



การจัดการความรู้ตามแผนการจัดการความรู้เพื่อสนับสนุนประเด็น

ยุทธศาสตร์กรมชลประทานประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน

ปราโมท พลพณะนาวิ

คณะทำงานสร้างความรู้ตามแผนการจัดการความรู้

ของสำนักชลประทานที่ 8 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554



การจัดการความรู้ตามแผนการจัดการความรู้เพื่อสนับสนุนประเด็น
ยุทธศาสตร์กรมชลประทานประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน

ปราโมทย์ พลพจนานาวี

คณะทำงานสร้างความรู้ตามแผนการจัดการความรู้
ของสำนักชลประทานที่ 8 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

คำนำ

ผู้บริหารจัดการความรู้

น้ำเป็นทรัพยากรที่เป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีพของมนุษย์มากที่สุดอย่างหนึ่ง ปัจจุบันปัญหาที่เกี่ยวข้องกับน้ำไม่ว่าจะเป็นการเกิดน้ำท่วม การขาดแคลนน้ำ นับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อการทำงานของกรมชลประทานในฐานะหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบเรื่องน้ำของประเทศทั้งทางตรงและทางอ้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นยุทธศาสตร์การบริหารจัดการน้ำ ดังนั้นจึงต้องหันมาให้ความสำคัญและใส่ใจในทุกกิจกรรมที่ต้องดำเนินการในเรื่องน้ำ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในทุกกระบวนการที่ต้องปฏิบัติ เพื่อการป้องกันบรรเทาหรือแก้ปัญหาเรื่องน้ำดังกล่าวให้หมดไป

ทีมงานจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ 8 ได้พิจารณาเลือกองค์ความรู้ที่จำเป็นต่อการปฏิบัติราชการ ประเด็นยุทธศาสตร์การบริหารจัดการน้ำ เรื่องหลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน มาจัดการความรู้ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 โดยเห็นว่าเป็นกระบวนการที่ย่อยที่สำคัญและจำเป็น ส่งผลต่อความสำเร็จของภารกิจหลักตามประเด็นยุทธศาสตร์ จะเป็นองค์ความรู้ที่เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการที่สำคัญและจำเป็นดังกล่าว อันจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติราชการตามภารกิจหลักของกรมชลประทานต่อไป



(หม่อมหลวงอนุมาศ ทองแถม)

ผู้บริหารจัดการความรู้ สำนักชลประทานที่ 8

ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ 8

สิงหาคม 2554

คำนำผู้เขียน

คู่มือหลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานเล่มนี้ ได้เขียนขึ้นตามแผนการจัดการความรู้เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์กรมชลประทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 ของสำนักชลประทานที่ 8 ในประเด็นยุทธศาสตร์ การบริหารจัดการน้ำ

ในการจัดทำคู่มือนี้ได้ดำเนินการภายใต้แนวทางการจัดการความรู้ ซึ่งนำความรู้จาก 2 แหล่งคือ ความรู้ทั่วไปหรือความรู้ชัดแจ้ง (Explicit Knowledge) ที่ได้จาก หนังสือ ตำรา คู่มือ รายงานการวิจัย บทความ ฯลฯ กับความรู้เฉพาะตัวหรือความรู้ที่ฝังอยู่ในคน (Tacit Knowledge) ที่ได้จากการสอบถาม การให้ความรู้ การให้ความเห็นคำแนะนำ จากบุคลากรของกรมชลประทานที่มีความรู้ มีประสบการณ์ มีความเชี่ยวชาญในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในคู่มือนี้ โดยเป็นข้อมูลความรู้ที่อยู่ภายใต้องค์ความรู้ในทางวิชาการ แล้วนำมาประมวลเรียบเรียง ให้เป็นเนื้อหาความรู้เป็นหมวดหมู่ที่มีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กัน

ในส่วนของเนื้อหาความรู้นั้นผู้เขียนมีความมุ่งมั่นที่จะรวบรวมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณปริมาณน้ำของอาคารชลศาสตร์ที่มีความจำเป็นต้องคำนวณปริมาณน้ำให้ครบถ้วนทุกประเภททุกชนิดให้มากที่สุด ซึ่งคิดว่าข้อมูลในคู่มือนี้น่าจะครอบคลุมอาคารชลประทานที่ต้องคำนวณปริมาณน้ำที่มีในประเทศไทยแล้ว

ผู้เขียนหวังว่าคู่มือนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้เป็นแนวทางในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานหรืออาคารชลศาสตร์ชนิดต่างๆ ตลอดจนเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะใช้ในการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์ต่างๆ ด้วย

ปราโมท พลพณนาวิ

กรกฎาคม 2554

ฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน

โครงการชลประทานบุรีรัมย์

สำนักชลประทานที่ 8

สารบัญ

	หน้า
คํานําผู้บริหารการจัดการความรู้	ก-1
คํานําผู้เขียน	ก-2
สารบัญ	ข
บทที่ 1 บทนํ้า	1-1
1.1 ความจําเป็นในการวัดปริมาณนํ้า	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวัดหรือคํานวณปริมาณนํ้า	1-2
1.3 วิธีการตรวจวัดคํานวณปริมาณนํ้า	1-2
1.4 ผลของการตรวจวัดคํานวณปริมาณนํ้าที่ถูกต้อง	1-4
1.5 การให้ความสําคัญในการตรวจวัดคํานวณปริมาณนํ้า	1-5
1.6 เนื้อหาของหนังสือ	1-6
บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน กลศาสตร์ของของไหล ชลศาสตร์ การไหลในทางนํ้าเปิด	2-1
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของของไหล	2-1
2.2 ความต่อเนื่องของการไหล และ Continuity equation	2-10
2.3 สมการพลังงาน (Energy equation or Bernoulli's equation)	2-18
2.4 สมการ Momentum (Law of conservation of momentum)	2-21
2.5 หลักการของการไหลของนํ้าผ่านช่องเปิด (Orifice)	2-22
2.6 การไหลในทางนํ้าเปิด	2-27
2.7 ขอบเขตของการตรวจวัดคํานวณปริมาณนํ้า	2-32
บทที่ 3 การวัดระดับนํ้า	3-1
3.1 ความสําคัญของการวัดระดับนํ้า	3-1
3.2 การเลือกตำแหน่งวัดระดับนํ้าหรือติดตั้งสถานีวัดระดับนํ้า	3-1
3.3 ระดับอ้างอิง	3-2

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 ประเภทของเครื่องวัดระดับน้ำ	3-3
3.4.1 เครื่องวัดระดับน้ำแบบไม่มีการบันทึก	3-3
3.4.1.1 แผ่นวัดระดับน้ำ	3-3
3.4.1.2 เครื่องวัดระดับน้ำแบบโซ่ (Chain gage)	3-7
3.4.1.3 เครื่องวัดระดับน้ำแบบสายโลหะถ่วงน้ำหนัก (Wire weight gage)	3-7
3.4.1.4 Float - tape gage	3-9
3.4.1.5 Electric - tape gage	3-9
3.4.2 เครื่องบันทึกระดับน้ำ (Water level recorder)	3-11
3.4.2.1 เครื่องบันทึกระดับน้ำแบบลูกลอย	3-11
3.4.2.2 เครื่องบันทึกระดับน้ำระบบ Digital แบบวัดน้ำ ทางอ้อม	3-14
3.5 ป่อน้ำนิ่ง (Stilling well)	3-18
3.6 เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบอื่น ๆ	3-20
3.6.1 เครื่องวัดระดับน้ำสูงสุด (Crest-stage gages)	3-20
3.6.2 เครื่องวัดระดับน้ำแบบลูกลอย	3-21
3.7 ต้องติดตั้งแผ่นวัดระดับน้ำไว้เสมอแม้จะใช้เครื่องมือวัดระดับน้ำ ประเภทอื่นแล้ว	3-21
 บทที่ 4 การตรวจวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิด	 4-1
4.1 หลักการตรวจวัดและคำนวณอัตราการไหลด้วยวิธี Velocity - area method	4-1
4.2 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดการไหลย่อยของทางน้ำ	4-2
4.3 วิธีการคำนวณอัตราการไหลโดยวิธี Velocity - area method	4-2
4.3.1 Mid - section method	4-3
4.3.2 Mean - section method	4-5
4.4 การวัดความเร็วเฉลี่ยการไหล (Mean velocity)	4-6

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1) Vertical velocity curve method	4-7
2) Two - point method	4-8
3) Six-tenths method	4-8
4) Three-point method	4-8
5) Subsurface method	4-9
6) Two - tenths method	4-9
7) Five - tenths method	4-9
8) Surface method	4-9
9) Four - point method	4-9
10) Five - Point Method	4-9
11) Six - point method	4-10
12) One - point continuous method or Depth integration method	4-10
4.5 การพิจารณาเลือกวิธีการตรวจวัดที่เหมาะสม	4-12
บทที่ 5 การวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิดด้วยวิธี และเครื่องมือพิเศษ	5-1
5.1 การตรวจวัดด้วยวิธีวัดปริมาตร (Volume metric method)	5-2
5.2 การคำนวณโดยวิธี Slope area method	5-3
5.3 การใช้ทุ่นลอย (Float method)	5-9
5.4 Dilution (Dye) method: วิธีการเจือจางสาร	5-12
5.5 การใช้ Pitot tube	5-15
5.6 Velocity head rod	5-21
บทที่ 6 การวัดกระแสน้ำด้วยเครื่องมือวัดกระแสน้ำเชิงกล (Mechanical velocity meters)	6-1
6.1 ชนิดของเครื่องมือวัดเชิงกล (Mechanical current meters)	6-1
6.1.1 เครื่องมือวัดที่มีการหมุนรอบแกนตั้ง (Vertical axis)	6-1
6.1.1.1 Price type AA	6-1
6.1.1.2 Pigmy type	6-2

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.2 เครื่องมือวัดที่มีการหมุนรอบแกนนอน (Horizontal axis)	6-5
6.1.3 Pendulum current meters	6-7
6.2 วิธีการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Cup type และ Propeller type current meters	6-9
6.2.1 การติดตั้ง Current meter	6-10
6.2.2 การหั่งความลึกของน้ำ และการกำหนดตำแหน่งความลึกของเครื่องมือวัด	6-12
6.2.3 วิธีการตรวจวัดด้วย Rotor current meter	6-14
6.3 การคำนวณความเร็วกระแสไฟฟ้าจาก Rotor current meter	6-25
บทที่ 7 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์	7-1
7.1 ประเภทของเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์	7-1
7.2 Electromagnetic current meter (ECM)	7-1
7.3 Doppler type current meters	7-7
7.4 Optical strobe current meters	7-19
บทที่ 8 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายทดน้ำ ฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น	8-1
8.1 หลักการเบื้องต้นของฝาย	8-1
8.1.1 หลักการเบื้องต้นของฝายสันคม	8-1
8.1.2 ฝายทดน้ำที่เป็นฝายแข็ง	8-3
8.1.3 ความลึกของน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย: H	8-4
8.2 ความหมายของฝาย (Weir) และทางระบายน้ำล้น (Spillway)	8-5
8.3 ประเภทของฝาย	8-5
8.4 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายทดน้ำ และทางระบายน้ำล้น (ไม่มีการควบคุม)	8-14
8.5 ฝายสันมน (Ogee Weir)	8-21
8.5.1 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันมนแบบไม่มีบานระบายควบคุม	8-21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลตามผลการศึกษาทดลอง ของ USBR	8-22
8.5.3 ผลกระทบที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝาย สันมน	8-24
8.5.4 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow แบบแยกส่วน	8-34
8.5.5 Discharge rating curve หรือ Q-H Curve	8-35
8.6 ฝายสันมนสันเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical crested weir)	8-39
8.7 ฝายหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู หรือ Indian type weir	8-46
8.7.1 ฝายหรือทางระบายน้ำสันหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู	8-46
8.7.2 ฝายลูกเงินฝายหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู	8-48
8.8 ฝายเกเบียน (Gabions weirs) หรือ ฝายกล่องลวดตาข่ายบรรจุหิน	8-52
8.9 ฝายยาง (Rubber Weir or Rubber Dam)	8-58
8.10 Straight Drop or Free Overfall Spillway	8-67
8.11 ฝายหยัก (Labyrinth Weir)	8-81
8.12 Shaft spillways or Drop inlet spillways	8-92
8.13 ฝายหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม (Crump weir)	8-102
8.14 การเพิ่มระดับเก็บกักของฝาย	8-105
บทที่ 9 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันคม (Sharp-crested or Thin-plate weirs)	9-1
9.1 ลักษณะและข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคม	9-1
9.2 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular sharp - crested weirs)	9-4
9.3 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม (Triangular or V-notch sharp- crested weirs or Thomson weirs)	9-18
9.4 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal sharp - crested weirs)	9-23
9.5 Proportional Weirs or Sutro Weirs	9-26
9.6 ฝายสันคมรูปพาราโบลา (Parabolic sharp - crested weirs)	9-28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.7 ฝายสันคมรูปวงกลม (Circular sharp - crested weirs)	9-29
9.8 ฝายสันคมแบบผสม (Compound sharp - crested weirs)	9-32
9.9 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม (Truncated triangular sharp-crested weirs)	9-34
บทที่ 10 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันกว้าง (Broad - Crested Weir)	10-1
10.1 หลักการของฝายสันกว้างโดย M.G. Bos	10-1
10.2 หลักการของฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10-4
10.3 รูปแบบของฝายวัดน้ำประเภทฝายสันกว้าง	10-6
10.4 ฝายสันกว้างแบบฝายแข็ง	10-6
10.4.1 ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10-6
10.4.2 ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้ง วงกลม	10-13
10.4.3 ฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม	10-16
10.5 ฝายสันกว้างที่พัฒนาจากฝายสันคม	10-21
10.6 ฝายสันกว้างรูปแบบพิเศษ	10-28
10.6.1 Romijn movable weir	10-28
10.6.2 Fayoum weir หรือ Faiyum weir	10-35
บทที่ 11 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันสั้น (Short Crested Weir)	11-1
11.1 Crump weir หรือ Triangular profile two-dimensional weir	11-1
11.2 Triangular profile flat-V weir	11-9
11.3 Weir sill with rectangular control section	11-15
11.4 V-notch weir sill	11-17
บทที่ 12 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบาย (ฝายระบายน้ำและประตูระบาย น้ำ)	12-1
12.1 ฝายเคลื่อนที่ได้ (Movable weir)	12-1

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
12.2 ฝ่ายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ	12-6
12.2.1 ประตูระบายน้ำ	12-6
12.2.2 ฝ่ายระบายน้ำ (Gated Spillways)	12-9
12.2.3 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายของประตูระบายน้ำและฝ่ายระบายน้ำ	12-10
12.3 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำ	12-11
12.3.1 บานระบายชนิดบานโค้ง (Radial or Tainter gate)	12-11
12.3.2 บานระบายชนิดบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate)	12-20
ก. กรณีเปิดบานระบายบางส่วน (Partial gate opening)	12-20
12.3.2.1 การศึกษาของ USBR	12-20
12.3.2.2 คำแนะนำของ FAO กรณี Open intake	12-24
12.3.2.3 การไหลลอดผ่านบานตรงกรณี Submerged flow ใช้ผลจากการศึกษาของ U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (USACE)	12-28
ข. กรณีเปิดบานระบายพ้นน้ำ (Fully gate opening)	12-30
12.3.3 ประตูระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรงแบบบานสองชั้น	12-33
ก. กรณีเปิดบานระบายบางส่วน (Partial gate opening)	12-33
ข. กรณีเปิดบานพ้นน้ำ กรณีบานตรงแบบบาน 2 ชั้น	12-35
12.4 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝ่ายระบายน้ำ	12-36
12.4.1 ฝ่ายระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate)	12-36
12.4.2 ฝ่ายระบายน้ำควบคุมด้วยบานโค้ง (Radial gate or Tainter gate)	12-38
12.5 Movable weir แบบ Long span leaf wheel gate	12-40
12.6 ข้อแนะนำในการควบคุมและการคำนวณปริมาณน้ำ ของฝ่ายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ	12-46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 13 อาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ และระบบท่อ	13-1
13.1 รูปแบบของการไหลของน้ำไหลผ่านท่อ	13-1
13.1.1 การไหลแบบเต็มท่อหรือการไหลภายใต้ความดัน	13-1
13.1.1.1 การแบ่งประเภทการไหลในท่อ	13-1
13.1.1.2 ชลศาสตร์ของการไหลในท่อกรณีการไหลคงที่	13-3
13.1.1.3 การสูญเสียพลังงานในระบบท่อ	13-4
13.1.1.4 อุปกรณ์ประกอบท่อและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย	13-8
13.1.2 ระบบท่อที่มีการไหลไม่เต็มท่อ (Partial Flow)	13-18
13.2 การตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำในระบบท่อ	13-21
13.2.1 หลักการตรวจวัดปริมาณน้ำในระบบท่อดัด	13-21
13.2.2 มาตรคอคอด (Constriction Meter)	13-22
13.2.3 มาตรข้องอ (Elbow meter or Bend meter)	13-24
13.2.4 พิโตมิเตอร์ (Pitometer)	13-24
13.2.5 มาตรประเภททุ่นลอย (Rotameter)	13-25
13.2.6 มาตรประเภทการเคลื่อนที่เชิงกล (Mechanical meters)	13-26
13.2.7 มาตรประเภทอิเล็กทรอนิกส์	13-27
13.2.8 มาตรประเภทอื่นๆ	13-28
13.3 อาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ	13-29
13.3.1 หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ	13-30
13.3.2 ทางระบายน้ำล้นแบบไซฟอน (Siphon/Syphon Spillway)	13-31
13.3.3 ทางระบายน้ำล้นแบบอุโมงค์ผันน้ำ (Tunnel Spillway)	13-38
13.3.4 ทางระบายน้ำล้นแบบท่อลอด (Culvert spillway)	13-40
13.3.5 อาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work) และอาคารรับน้ำ (Intake structure)	13-41
13.3.5.1 อาคารทิ้งน้ำหรืออาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work)	13-41
13.3.5.2 อาคารรับน้ำ (Intake structure)	13-45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
13.3.6 ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ (Head regulator) และอาคารทางเข้า (Inlet structure)	13-53
13.3.7 Bottom drain หรือ Bottom outlet	13-58
13.3.8 ท่อส่งน้ำเข้านา (Farm turnout: FTO หรือ Farm intake)	13-59
13.3.9 Constant Head Orifice (CHO)	13-61
13.4 การวัดปริมาณน้ำไหลผ่านท่อขนาดเล็กความยาวสั้นๆ	13-63
13.4.1 ท่อขนาดเล็กที่รับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงเพาะปลูก	13-63
13.4.2 การวัดปริมาณน้ำที่ออกจากปลายท่อเปิด	13-66
13.4.2.1 การวัดการไหลที่ออกจากท่อขึ้นไปในแนวดิ่ง	13-66
13.4.2.2 การวัดการไหลที่ออกจากปลายท่อในแนวราบ	13-68
13.5 การวัดปริมาณน้ำไหลผ่านกาลักน้ำหรือไซฟอนขนาดเล็ก	13-73
13.5.1 การใช้ประโยชน์กาลักน้ำหรือไซฟอนขนาดเล็กในงานชลประทาน	13-73
13.5.2 ตัวอย่างวิธีการติดตั้งไซฟอน (1 แฉก) ที่ทำนบดิน	13-75
13.5.3 หลักการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านกาลักน้ำ	13-76
บทที่ 14 การวัดปริมาณน้ำด้วยรางวัดน้ำ (Flume)	14-1
14.1 หลักการเบื้องต้นของรางวัดน้ำ	14-1
14.2 ชนิดของ Flume	14-2
14.3 Long-throat flume	14-4
14.3.1 การคำนวณอัตราการไหลผ่าน Long-throat flume	14-8
14.3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Winflume	14-8
14.4 Venturi Flume	14-9
14.5 Parshall flume	14-10
14.6 Cut-throat flume: รางวัดน้ำแบบไม่มีคอ	14-19
14.7 H- Flume	14-23
14.8 Washington State College flume หรือ WSC flume	14-41
14.9 S-M Flume	14-43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
14.10 Palmer - Bowlus flumes	14-46
14.11 RBC Flume	14-50
14.12 รางวัดน้ำแบบทอกลม (Circular flume)	14-53
14.13 รางวัดน้ำที่พัฒนาจากการดัดแปลงปรับปรุงรางวัดน้ำอื่นๆ	14-58
14.13.1 Montana Parshall flume	14-58
14.13.2 Montana cutthroat flume	14-58
บทที่ 15 การสอบเทียบ (Calibration) อาคารชลศาสตร์ และเครื่องมือตรวจวัดปริมาณน้ำ	15-1
15.1 การสอบเทียบอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดอัตราการไหล	15-2
15.2 การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์	15-3
15.2.1 สาเหตุสำคัญที่ทำให้ต้องสอบเทียบอาคารชลศาสตร์	15-4
15.2.2 หลักการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์	15-5
15.2.3 ขั้นตอนการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์	15-5
15.3 การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์แต่ละชนิด	15-7
15.3.1 ทางน้ำธรรมชาติ	15-7
15.3.2 ประตุน้ำฝายระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบาย (อาคารใหญ่ที่ห้วงงาน)	15-8
15.3.3 ประตุน้ำฝายระบายน้ำ ท่อระบายน้ำ (ในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำ)	15-9
15.3.4 ฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำสั้น (ไม่มีบานควบคุม)	15-11
15.3.5 อาคารวัดน้ำ ฝายวัดน้ำ และรางวัดน้ำ	15-11
บรรณานุกรม	บ
ภาคผนวก	ผ

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความจำเป็นในการวัดปริมาณน้ำ วัดประสิทธิภาพของการวัดหรือคำนวณปริมาณน้ำ วิธีการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำ ผลของการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำที่ถูกต้อง ขอบเขตของการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำ การให้ความสำคัญในการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำ และเนื้อหาของหนังสือคู่มือนี้จะนำเสนอเรื่องราวใดบ้าง

1.1 ความจำเป็นในการวัดปริมาณน้ำ

ในปัจจุบันมีปัญหาผลกระทบที่เกิดจากน้ำที่สำคัญ 3 ประการ ปัญหาแรกคือ *การขาดแคลนน้ำ* สาเหตุเนื่องจากฝนตกน้อย หรือฝนตกไม่ถูกต้องตามฤดูกาล เกิดฝนทิ้งช่วง ทำให้เกิดภาวะแห้งแล้งเพราะปริมาณน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมีปริมาณลดลง ส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์สำหรับกิจกรรมต่าง ๆ สาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้มีการใช้ทรัพยากรเพิ่มขึ้น ซึ่งรวมถึงการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การผลิตในภาคการเกษตร การอุตสาหกรรมและอื่นๆ เพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่น้ำเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด แหล่งเก็บกักน้ำไม่ได้เพิ่มขึ้นสอดคล้องเหมาะสมกับความต้องการ รวมทั้งสาเหตุจากการเกิดน้ำเสียที่ส่งผลกระทบต่อความเพียงพอในการใช้ประโยชน์จากน้ำ ปัญหาประการที่สองคือ *การเกิดน้ำท่วม* ที่สร้างความเสียหายให้แก่ทุกระบบ เช่น การผลิตทางการเกษตร การคมนาคม การอุตสาหกรรม สุขภาพอนามัย เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบเศรษฐกิจโดยรวมมาก ปัญหาประการที่สาม คือ *การเกิดน้ำเสียและคุณภาพน้ำไม่เหมาะสม* ซึ่งปัญหานี้ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนน้ำดังกล่าวแล้วข้างต้น

ในประเทศไทยปัญหาเรื่องน้ำดังกล่าวเกิดขึ้นซ้ำซากเกือบทุกปี แนวทางการแก้ปัญหาจะต้องพิจารณาทั้ง 3 ปัญหาไปพร้อมๆ กัน แนวทางที่ได้โดยตรงคือการบริหารจัดการน้ำที่ถูกต้องเหมาะสม กล่าวคือ (1) ต้องมีแหล่งเก็บกักน้ำเพียงพอที่จะช่วยป้องกันหรือบรรเทาปัญหาน้ำท่วมในฤดูฝน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมด้านต่างๆ ตลอดช่วงฤดูแล้ง และกรณีฝนทิ้งช่วงในฤดูฝน (2) มีการส่งน้ำกระจายน้ำเพื่อสนับสนุนกิจกรรมต่างๆ ตลอดจนการระบายน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิผลสูงสุด ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการตรวจวัด คำนวณปริมาณน้ำที่ถูกต้องเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวัดหรือคำนวณปริมาณน้ำ

การวัดหรือคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารชลศาสตร์ต่างๆ นั้น โดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1.2.1 เพื่อการจัดการน้ำ ซึ่งได้แก่ เพื่อการส่งน้ำและการระบายน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณและช่วงเวลาที่ต้องการ โดยกรณีนี้มักมีวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายการจัดการน้ำที่ชัดเจน สามารถวางแผนเพื่อดำเนินการไว้ล่วงหน้าได้ โดยที่การส่งน้ำนั้นส่วนใหญ่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ที่ถือเป็นกิจกรรมเป้าหมายหลัก เช่น การเพาะปลูก การเลี้ยงสัตว์ การอุปโภคบริโภค การประปา การอุตสาหกรรม เป็นต้น ส่วนการระบายน้ำนั้นเป็นกิจกรรมที่เป็นเป้าหมายรองลงไป เช่น เพื่อความมั่นคงปลอดภัยของหัวงานหรือแหล่งน้ำ โดยการพร่องน้ำหรือลดปริมาณน้ำในแหล่งน้ำที่เป็นการป้องกันน้ำท่วมทางอ้อม เพื่อการรักษาระบบนิเวศของกลุ่มน้ำ เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้กับพื้นที่ลุ่มน้ำด้านล่างลงไป เพื่อแก้ปัญหาน้ำเสีย เป็นต้น

การวัดหรือคำนวณปริมาณน้ำนั้นมีความสำคัญต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง เพราะถ้าผิดพลาดอาจก่อให้เกิดความเสียหาย เช่น ทำให้ได้รับปริมาณน้ำไม่เหมาะสมกับจำนวนที่ต้องการหรือทำให้เกิดความเสี่ยงที่จะไม่ปลอดภัยต่อตัวเขื่อน อ่างเก็บน้ำหรือหัวงานโครงการ เกิดความเสียหายต่อระบบชลประทานตลอดจนพื้นที่ด้านท้ายน้ำทั้งในเขตและนอกเขตชลประทาน โดยปกติแล้วเรามักจะรู้ปริมาณน้ำที่จะส่งหรือระบายออกไปแน่นอนว่าเป็นปริมาณเท่าใด ภายในช่วงเวลาใด ทำให้สามารถวางแผนและคำนวณล่วงหน้าได้ อาคารชลประทานในกลุ่มนี้ ได้แก่ ประตูระบายน้ำ ฝายระบายน้ำ ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ ท่อส่งน้ำเข้านา ฯลฯ ส่วนใหญ่จะมีอุปกรณ์ปิดเปิดควบคุมปริมาณน้ำอยู่ด้วย เช่น บานระบาย หรือประตูน้ำ

1.2.2 เพื่อการเก็บเป็นสถิติข้อมูลเพื่อประโยชน์ในอนาคต โดยปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารชลศาสตร์ต่าง ๆ ที่บันทึกไว้จะเป็นประโยชน์ในการวางแผนการบริหารจัดการน้ำ หรือเพื่อการปรับปรุงโครงการชลประทาน ระบบชลประทาน และระบบระบายน้ำในอนาคต

1.3 วิธีการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำ

การวัดปริมาณน้ำ หรืออัตราการไหล (Discharge: Q) ผ่านอาคารชลศาสตร์นั้น จากหลักการพื้นฐานจะคิดจาก ความเร็วการไหล (Velocity: V) ที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดการไหล (Area: A) หรือ $Q = VA$ โดยจะมีการคำนวณด้วยวัตถุประสงค์ 2 ประการได้แก่

1) การบริหารจัดการน้ำ เป็นการคำนวณหาขนาดการควบคุมการไหลของน้ำผ่านอาคารว่าจะเปิดปิดบานระบาย ประตูน้ำ หรือเพิ่มลดระดับสันฝายที่ปรับระดับได้เท่าไร เพื่อให้ น้ำไหลผ่านออกไปตามปริมาณที่ต้องการ

2) การเก็บเป็นสถิติข้อมูล เป็นการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารทุกตัวที่มีข้อกำหนดให้เก็บสถิติข้อมูล ซึ่งได้แก่ ฝ่ายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำสันอาคารที่ไม่มีการควบคุมด้วยบานระบาย รวมทั้งการคำนวณปริมาณน้ำจากการบริหารจัดการน้ำในกรณีข้อ 1) ข้างต้นด้วย

สำหรับวิธีการในการวัดหรือคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารต่างๆ นั้นทำได้ 2 วิธี คือ

1.3.1 การตรวจวัดโดยตรง

เมื่อต้องการทราบปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารชลศาสตร์ใด ก็ตรวจวัดจากอาคารชลศาสตร์หลักของระบบนั้นโดยตรง โดยอาศัยค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านอาคารนั้นๆ ตัวอย่างเช่น

- ต้องการทราบว่าปริมาณน้ำส่งเข้าคลองส่งน้ำเท่าใดก็คำนวณจากปริมาณน้ำไหลผ่านท่อระบายน้ำปากคลอง หรือประตูระบายน้ำปากคลอง
- ต้องการทราบปริมาณน้ำระบายลงสู่ลำน้ำก็ตรวจวัดคำนวณจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย หรือทางระบายน้ำสัน หรือประตูระบายน้ำ
- ต้องการทราบปริมาณน้ำไหลผ่านลำน้ำช่วงใดๆ ก็ตรวจวัดคำนวณจากลำน้ำที่ตำแหน่งนั้น (ถ้ามีสิ่งปิดกั้นในลำน้ำ เช่น ฝายหรือประตูระบาย ต้องไม่ก่อให้เกิดอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการตรวจวัดคำนวณ ณ จุดนั้น) อาจใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธี Slope - Area Method หรือใช้เครื่องมือวัดกระแสน้ำหรือสร้างอาคารวัดน้ำโดยเฉพาะ เป็นต้น แต่ถ้าสิ่งๆ ที่ปิดกั้นในลำน้ำมีอิทธิพลเกิดผลกระทบต่อการไหล ก็จะตรวจวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านสิ่งปิดกั้นนั้นแทน เพราะสิ่งปิดกั้นจะกลายเป็นอาคารหลักของระบบตรงนั้น

1.3.2 การตรวจวัดทางอ้อม

เป็นการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำที่ไม่ได้ตรวจวัดจากอาคารชลศาสตร์หลักของระบบโดยตรง แต่จะวัดจากอาคารชลศาสตร์อื่นหรือวิธีการอื่นแทน เช่น

- ถ้าต้องการทราบว่าปริมาณน้ำส่งเข้าคลองส่งน้ำเท่าใดก็ไม่คำนวณจากปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารชลศาสตร์หลัก คือ ท่อระบายน้ำปากคลอง หรือประตูระบายน้ำปากคลอง แต่ติดตั้งอาคารวัดน้ำหรือเครื่องมือวัดน้ำด้านท้ายอาคารเหล่านั้น เพื่อตรวจวัดคำนวณแทน ในการควบคุมเปิดปิดบานระบายก็ควบคุมปรับให้ได้ปริมาณน้ำไหลผ่านให้สัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารวัดน้ำหรือเครื่องมือวัดปริมาณน้ำดังกล่าว เป็นต้น

1.4 ผลของการตรวจวัดค่านวณปริมาณน้ำที่ถูกต้อง

ค่าความละเอียดหรือความถูกต้องแน่นอนของการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องการนั้น ขึ้นกับวัตถุประสงค์หรือหน้าที่ของอาคารชลประทานนั้นว่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเป็นประโยชน์อย่างไร มีความสำคัญระดับไหน ตลอดจนปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่ผู้รับผิดชอบในการบริหารจัดการน้ำต้องพิจารณาตัดสินใจเลือกให้เหมาะสม ซึ่งอาจสรุปถึงความจำเป็นในการวัดปริมาณน้ำให้ถูกต้องได้ดังนี้

1.4.1 ทำให้เกิดความประหยัดน้ำและลดความเสียหายจากการบริหารจัดการน้ำ การตรวจวัดบันทึกข้อมูลและการคำนวณที่ถูกต้อง ทำให้การจัดการน้ำได้เพียงพอ เหมาะสมกับความต้องการ โดยหากมีความผิดพลาดจากการคำนวณในทางสูงหรือเผื่อขาดมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำ ทำให้น้ำต้นทุนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ลดลง หรือกรณีการระบายน้ำปริมาณน้ำที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายท่วมพื้นที่ด้านท้ายน้ำได้ แต่หากคำนวณผิดพลาดในทางต่ำหรือคิดปริมาณน้ำน้อยเกินไป ในกรณีการส่งน้ำให้พื้นที่เพาะปลูกก็จะไม่เพียงพอตามที่ต้องการของพืช การระบายน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำก็จะระบายน้ำได้น้อย นอกจากจะเสียเวลาแล้ว อาจเกิดความไม่ปลอดภัยหรือทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวเขื่อนหรือท่านบดินได้

1.4.2 ลดปัญหาความขัดแย้งและง่ายต่อการบริหารจัดการน้ำ การคำนวณปริมาณน้ำผิดพลาดทั้งกรณีที่น้อยกว่าหรือมากกว่าปริมาณจริงที่ต้องการ ย่อมส่งผลกระทบต่อปริมาณความเพียงพอในช่วงเวลาที่ต้องการใช้น้ำ ทำให้ต้องเสียเวลาแก้ปัญหาทั้งระบบอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเกิดความขัดแย้งในการจัดการน้ำในระดับลุ่มน้ำได้มาก

1.4.3 การนำข้อมูลในด้านต่างๆ ที่มีความถูกต้องไปใช้ประโยชน์ในอนาคต จะทำให้การบริหารจัดการน้ำ การปรับปรุงโครงการ ฯลฯ มีความถูกต้องเหมาะสม สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิผลสูงสุด

1.4.4 ความคุ้มค่าการลงทุน ในการปฏิบัติงานใด ๆ จะเกิดต้นทุนในทุกกิจกรรมที่ทำ ในการบันทึกคำนวณที่ไม่ถูกต้องนั้นเสมือนเป็นการลงทุนที่สูงเปล่า เป็นการสูญเสียทรัพยากรไปแต่ไม่ได้รับผลประโยชน์ที่คุ้มค่าอย่างแท้จริง

1.4.5 ภาพลักษณ์ที่ดี การปฏิบัติงานหรือนำเสนอในสิ่งที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ย่อมจะสร้างความเชื่อมั่นและความเชื่อถือจากบุคคลและองค์กรภายนอก ต่อตัวผู้ปฏิบัติและองค์กรของผู้ปฏิบัติ

1.4.6 การปฏิบัติงานเกี่ยวกับจัดการน้ำภายใต้องค์ความรู้หรือหลักวิชาที่ถูกต้อง เป็นประโยชน์ต่อความก้าวหน้าในการพัฒนาความรู้ด้านชลศาสตร์ และการชลประทานในอนาคต

1.5 การให้ความสำคัญในการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำ

จากวิธีการตรวจวัด การเลือกใช้เครื่องมือ หรือสร้างอาคารชลศาสตร์เพื่อการวัดปริมาณน้ำ โดยตรงที่กล่าวข้างต้นนั้น เป็นแนวทางที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งบางวิธีการบางรูปแบบอาจไม่ปรากฏการใช้ในประเทศไทย ยกตัวอย่างเช่น การสร้างอาคารชลศาสตร์ขึ้นมาเพื่อให้ทำหน้าที่วัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทางน้ำขนาดใหญ่ เช่น แม่น้ำ ลำห้วย คลองผันน้ำหรือระบายน้ำนั้นในประเทศไทยจะไม่ทำกัน แต่จะใช้วิธีการตรวจวัดวิธีอื่นๆ แทน ในขณะที่ในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาจะให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพ ในทางน้ำขนาดใหญ่นิยมก่อสร้างอาคารวัดน้ำ เช่น Broad - crested weirs, Long - throated flumes หรือ Short - throated flumes แม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายสูง มีความยากลำบากในการก่อสร้างมากก็ตาม

ในอนาคตแนวคิดเหตุผลความจำเป็นด้านการอำนวยความสะดวกในการทำงาน เน้นการใช้เทคโนโลยีมาช่วยทำงาน แทนการใช้คนจำนวนมากๆ เช่นในการบริหารจัดการน้ำจะใช้ระบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ และมักจ้างบุคคลหรือหน่วยงานภายนอกที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านมาทำแทน (Outsource) ในกิจกรรมต่าง ๆ

ระบบการเมืองการปกครองจะมีอิทธิพลต่อระบบอื่นๆ ทุกระบบในสังคม ประเทศที่ระบบการเมืองมีความเข้มแข็ง การดำเนินงานจะมีการติดตามตรวจสอบจากทั้งหน่วยงานภายในและภายนอกอย่างเคร่งครัด การจัดการน้ำในระบบลุ่มน้ำระหว่างเขตการปกครองหรือระหว่างรัฐจะไม่นิยมให้เกิดความผิดพลาดใด ๆ ที่จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำไปโดยไม่เกิดประโยชน์ หรือเป็นอุปสรรคต่อการคมนาคมทางน้ำ หรือสร้างความเดือดร้อนให้เกิดขึ้นกับประชาชนไม่ว่ากรณีการเกิดน้ำท่วมหรือขาดแคลนน้ำที่ใช้ในทุกกิจกรรม มีการดำเนินงานภายใต้ข้อกำหนดกฎหมายที่มีหลักคิดที่ว่า ปัญหาที่เกิดจากลักษณะหรือสาเหตุ ในขนาดหรือระดับหรือปริมาณที่เคยเกิดมาแล้ว ผู้มีหน้าที่รับผิดชอบจะต้องแก้ไขป้องกันเพื่อไม่ให้ปัญหานั้นเกิดขึ้นอีก เพราะกฎหมายจะให้ความสำคัญคุ้มครองต่อสิทธิเสรีภาพของประชาชนสูงมาก หากเกิดความผิดพลาดที่ไม่ใช่เกิดจากเหตุสุดวิสัย จะต้องชดเชยค่าเสียหายแก่ผู้เสียหายที่สูงอย่างมากและจะสูญเสียคะแนนนิยมในการจะได้รับเลือกตั้งเข้ามาทำหน้าที่บริหารปกครองอีกในการเลือกตั้งครั้งต่อไป แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดคือประชาชนมีการศึกษาที่ดี มีความตระหนักถึงการไม่ยอมให้ใครมาละเมิดสิทธิเสรีภาพของตน ในขณะที่ทำหน้าที่ของตนให้ดีที่สุดโดยไม่ละเมิดสิทธิเสรีภาพของผู้อื่นด้วย เป็นต้น

ข้อมูลจากการตรวจวัดปริมาณน้ำที่ถูกต้องในทางน้ำจากอาคารชลศาสตร์ต่าง ๆ จะเป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการน้ำในระดับลุ่มน้ำ เพื่อการป้องกันหรือแก้ไขปัญหาภัยที่เกิดจากน้ำที่จะเกิดซ้ำซากและรุนแรงเพิ่มขึ้นในอนาคต การนำเทคโนโลยีระบบโทรมาตรที่มีความถูกต้อง

แม่นยำในการตรวจวัดและมีความรวดเร็วในการรายงานผล มาใช้ในการตรวจวัดรายงานข้อมูลด้านอุทกนิยมนิเทศและอุทกวิทยา เพื่อการเตือนภัยน้ำท่วมจากน้ำป่าไหลหลากล่วงหน้า จะป้องกันความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นได้มาก

1.6 เนื้อหาของหนังสือ

ได้จัดแบ่งเนื้อหาในหนังสือนี้ให้มีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกัน โดยนำเสนอเรื่องราวให้ครอบคลุมในทุกด้าน ทั้งความเป็นมา ทฤษฎีเบื้องต้น และรายละเอียดซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดของเรื่องนั้น ๆ โดยจัดแบ่งเนื้อหาเป็น 15 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ (บทนี้)

บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน กลศาสตร์ของของไหล ชลศาสตร์ การไหลในทางน้ำเปิด
นำเสนอทฤษฎีหรือหลักการพื้นฐาน เพื่อเป็นการทบทวนความรู้ในเรื่องต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดปริมาณน้ำ ได้แก่ กลศาสตร์ของของไหล ชลศาสตร์ การไหลในทางน้ำเปิด ฯลฯ

บทที่ 3 การวัดระดับน้ำ เสนอวิธีการวัดระดับน้ำด้วยวิธีการและเครื่องมือแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ เพราะการคำนวณปริมาณน้ำโดยวิธีการต่าง ๆ นั้นส่วนใหญ่แล้วมักต้องใช้ค่าระดับน้ำมาคำนวณเสมอ

บทที่ 4 การตรวจวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิด นำเสนอหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการตรวจวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิด การจะตรวจวัดที่ตำแหน่งใดของหน้าตัดการไหลของทางน้ำนั้นแนะนำการตรวจวัดคำนวณด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของทางน้ำและเครื่องมือที่จะใช้ตรวจวัด

บทที่ 5 การวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิดด้วยวิธีการและเครื่องมือพิเศษ ได้แก่ การตรวจวัดด้วยวิธี Volume metric method, การคำนวณโดยวิธี Slope Area Method, การใช้หุ่นลอย (Float method), การใช้สารเคมีและสี, การใช้ Pitot tube และการใช้ Velocity head rod เป็นต้น ซึ่งล้วนไม่ใช่เครื่องมือวัดกระแสน้ำเชิงกล และเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 6 การวัดความเร็วการไหลด้วยเครื่องมือวัดกระแสน้ำเชิงกล เครื่องมือในกลุ่มนี้เป็นเครื่องมือวัดกระแสน้ำที่เราคุ้นเคยกันคือ แบบลูกถ้วย และแบบใบพัดนั่นเอง โดยจะนำเสนอตาม

ลักษณะของเครื่องมือ 3 ประเภทได้แก่ Vertical axis current meters, Horizontal axis current meters และ Pendulum current meters

บทที่ 7 การวัดความเร็วการไหลด้วยเครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ Electromagnetic Velocity meter, Doppler Velocity meter และ Optical Strobe Velocity meter เป็นต้น

บทที่ 8 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายทดน้ำ ฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น

บทที่ 9 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันคม

บทที่ 10 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันกว้าง

บทที่ 11 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันสั้น

บทที่ 12 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบาย (ฝายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ)

บทที่ 13 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ และระบบท่อ

บทที่ 14 การวัดปริมาณน้ำด้วยรางวัดน้ำ (Flume)

บทที่ 15 การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์ นำเสนอรูปแบบและวิธีการสอบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Coefficient of Discharge) ของอาคารชลศาสตร์ที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ เพราะจะทำให้การคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์แห่งนั้นมีความถูกต้องที่สุด โดยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าเฉพาะของอาคารชลศาสตร์นั้นมาใช้ในการคำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากอาคารชลศาสตร์แต่ละแห่งจะมีขนาด มิติ รายละเอียด ปลีกย่อย มีสภาพแวดล้อมและปัจจัยที่จะทำให้เกิดผลกระทบเฉพาะตัว

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน

กลศาสตร์ของของไหล ชลศาสตร์ การไหลในทางน้ำเปิด

การวัดอัตราการไหลของน้ำหรือที่จะเรียกในคู่มือนี้ว่าการวัดปริมาณน้ำนั้น เป็นการตรวจวัดการไหลที่แบ่งตามชนิดของการไหลของน้ำได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1) การไหลของน้ำในทางน้ำเปิด เป็นการไหลของน้ำโดยอิสระเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก โดยผิวน้ำจะสัมผัสกับบรรยากาศ ได้แก่ การไหลในทางน้ำ เช่น คลอง คู ลำธาร ห้วย แม่น้ำ ฯลฯ การไหลผ่านอาคารชลศาสตร์ที่เป็นตัวควบคุมการไหลของน้ำในทางน้ำ เช่น ทางระบายน้ำล้น ฝายทดน้ำ ฝายระบายน้ำ ประตูระบายน้ำ เป็นต้น รวมทั้งการไหลในอาคารประเภทท่อหรือระบบท่อที่น้ำไหลไม่เต็มท่อด้วย

2) การไหลของน้ำในท่อภายใต้แรงดัน เป็นการไหลในระบบท่อที่น้ำไหลเต็มท่อซึ่งผิวน้ำไม่สัมผัสกับบรรยากาศ อาจมีอากาศในท่อบ้างก็จะอยู่ในสภาพสุญญากาศ แรงกระทำที่ทำให้เกิดการไหลคือความแตกต่างของแรงดันเนื่องจากความสูงของน้ำ (Pressure head) ระหว่างด้านหน้าท่อหรือปากท่อ กับด้านท้ายท่อหรือปลายท่อ ที่มักเรียกย่อๆ ว่า Head

จริงๆแล้วการไหลของน้ำนั้นยังมี "การไหลของน้ำใต้ดิน" อีกอย่างหนึ่ง ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในคู่มือนี้ ในการเรียนรู้เรื่องการวัดปริมาณน้ำนั้นต้องอาศัยความรู้ในเรื่อง กลศาสตร์ของของไหล (Fluid mechanics), ชลศาสตร์ (Hydraulics), การไหลในทางน้ำเปิด (Open channel flow) และการไหลในท่อ (Pipe flow) ประกอบกัน ดังนั้นในเบื้องต้นจึงควรรู้หลักการพื้นฐานของความรู้ดังกล่าว ซึ่งจะสรุปโดยสังเขปต่อไปนี้

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของของไหล

ของไหลเป็นสสารที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องเมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ อาจแบ่งของไหลได้เป็น ของไหลที่ยุบตัวไม่ได้ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลวที่มีความหนาแน่นคงที่ เช่น น้ำ น้ำมัน ฯลฯ กับของไหลที่ยุบตัวได้หรืออัดได้ จะอยู่ในรูปของก๊าซหรือไอที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ สมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลได้แก่ ความเร็ว ความเร่ง ความดัน ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะ น้ำหนักจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ เป็นต้น ซึ่งสมบัติดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งและเวลา และจะเกิดขึ้นในทั้ง 3 มิติ (ระนาบ) ในการศึกษาขั้นพื้นฐานมักศึกษาในระนาบเดียว เพราะง่ายต่อการเข้าใจ ไม่ต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ที่สูงมาก

สรุปสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลโดยสังเขป ต่อไปนี้

2.1.1 ความหนาแน่น (Mass density): ρ คือ มวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg} / \text{m}^3)$$

เมื่อ **m = มวล** กิโลกรัม, ก.ก., (kg)

V = ปริมาตร ลูกบาศก์เมตร, ม.³, ลบ.ม., (m³)

สำหรับความหนาแน่นของน้ำนั้น กำหนดให้ใช้เกณฑ์มาตรฐานสากล คือ ที่ความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส น้ำมีความหนาแน่น $1,000 \text{ kg/m}^3$

2.1.2 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume): V_s คือ ปริมาตรของสารในหนึ่งหน่วยมวล หรือคือส่วนกลับของความหนาแน่น

$$V_s = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3 / \text{kg})$$

2.1.3 น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight): γ คือน้ำหนักของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$\gamma = \frac{W}{\nabla} = \frac{mg}{\nabla} = \rho g \quad (\text{N} / \text{m}^3)$$

เมื่อ $W = \text{น้ำหนัก}$ นิวตัน (N)

$g = \text{ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก} = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\text{Ex 1} \quad \gamma = \rho g = 1,000 \times 9.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9.81 \times 10^3 \quad (\text{N} / \text{m}^3)$$

เมื่อ 1 นิวตัน (N) = 1 kg.m/ s²

2.1.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity): S คือ อัตราส่วนของน้ำหนักของวัตถุต่อ น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน.....ไม่มีหน่วย

$$S = \frac{W}{W_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w}$$

เมื่อ $W, W_w = \text{น้ำหนักของวัตถุ, น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน} \dots\dots \text{นิวตัน (N)}$

$$\gamma, \gamma_w = \text{น้ำหนักจำเพาะของวัตถุ, น้ำหนักจำเพาะของน้ำ}$$

ρ, ρ_w = ความหนาแน่นของวัตถุ, ความหนาแน่นของน้ำ

ความถี่จำเพาะของน้ำ = 1

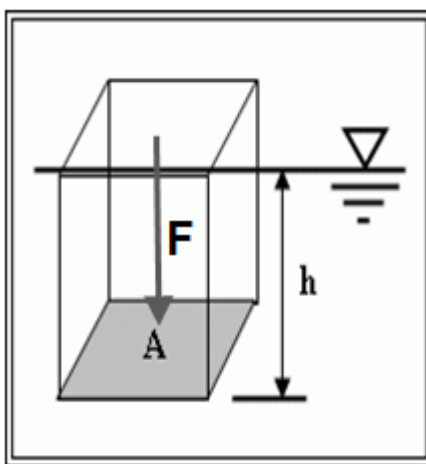
2.1.5 ความดัน (Pressure): P คือ แรงที่กระทำต่อพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวแรง

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{.....N/m}^2 \text{ หรือ Pascal (Pa)}$$

เมื่อ F = แรงกระทำหรือแรงกดจากน้ำหนักของแท่งน้ำ

A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวแรงหรือที่แรงมากระทำ

แรงดันของน้ำที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ก็คือน้ำหนักของแท่งน้ำที่อยู่เหนือพื้นที่นั้นนั่นเอง โดยความดันที่ระดับเดียวกันมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง



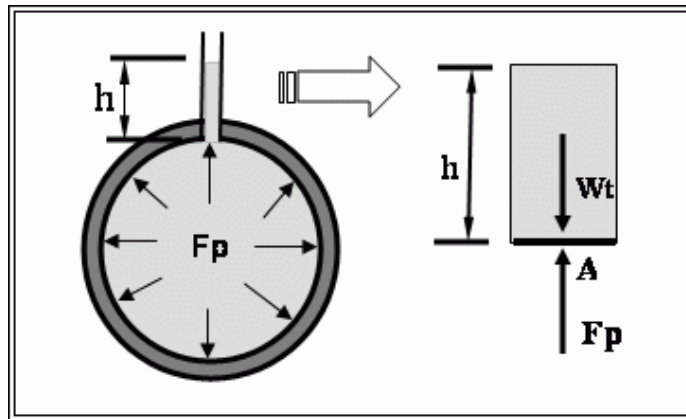
รูปที่ 2-1 แสดงความดันของน้ำที่เกิดจากแรง F กระทำต่อพื้นที่ A ที่ความลึก h

$$P = \frac{F}{A} = \rho gh = \gamma h$$

การบอกค่าความดันอาจบอกเป็นความสูงของของไหล (**Pressure head**)

$$h = \frac{P}{\gamma}$$

ในกรณีน้ำไหลในท่อภายใต้แรงดัน หากเจาะท่อเป็นรูเล็กๆ แรงดันของน้ำในท่อจะทำให้ น้ำพุ่งออกจากรู หากคิดท่อเล็กๆ ที่รูที่เจาะไว้ดังกล่าวไว้มีความยาวพอที่จะไม่ทำให้น้ำไหลล้นออกมาได้ ความสูงของน้ำในท่อเล็กๆ เท่ากับ h ก็คือ **Pressure head** ของน้ำในท่อที่ตำแหน่งนั้นนั่นเอง



รูปที่ 2-2 แสดง Pressure head ของน้ำในท่อ

W_t = น้ำหนักของน้ำมวล m ในท่อเล็กสูง h มีพื้นที่หน้าตัด A

F_p = แรงดันของน้ำในท่อใหญ่

เมื่อความสูงน้ำในท่อเล็ก h คงที่ จะอยู่ในสภาพสมดุล

$$W_t = F_p$$

$$W_t = F_p = mg$$

$$P = \frac{F_p}{A} = \frac{mg}{A} = \rho gh = \gamma h$$

$$h = \frac{P}{\gamma}$$

2.1.6 ความเร็วการไหล (Velocity): V เมื่อของไหลเกิดการไหลมวลของของไหลมีการเปลี่ยนตำแหน่ง โดยระยะทาง S ที่มวลของของไหลเคลื่อนที่ไป ในหนึ่งหน่วยเวลา t เรียกว่า เกิดความเร็วของการไหล

$$V = \frac{S}{t} \quad \text{เมตร/วินาที, (m/s)}$$

2.1.7 ความเร่งการไหล (Acceleration): a ความเร่งคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อหน่วยเวลา

$$a = \frac{V}{t} \quad \text{.....m/s}^2$$

2.1.8 อัตราการไหล (Discharge): Q คือ ปริมาณหรือปริมาตร V_o ของของไหลที่เปลี่ยนตำแหน่งหรือเคลื่อนที่ไปในหนึ่งหน่วยเวลา t เกิดความเร็วการไหล V

$$Q = \frac{V_o}{t} \quad \text{.....m}^3/\text{s}$$

หากให้ S = ระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง หรือเคลื่อนที่ ; $S = V \cdot t$

A = พื้นที่หน้าตัดของของไหลที่เคลื่อนที่

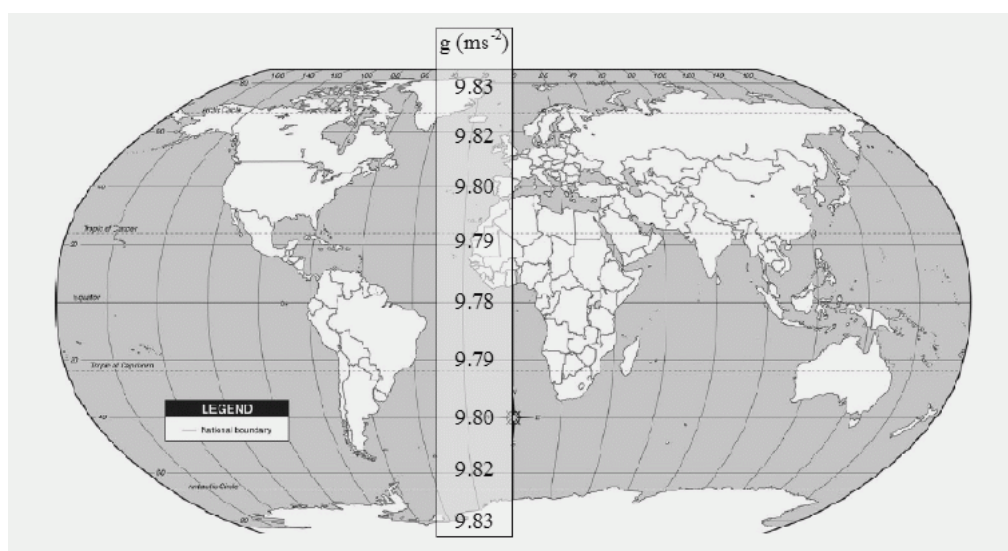
ดังนั้น $V_o = S \cdot A = V \cdot t \cdot A$

หารด้วย t ทั้งสองด้าน

$$\frac{V_o}{t} = VA$$

ดังนั้น $Q = VA \quad \text{.....m}^3/\text{s}$

2.1.9 ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (Gravitational acceleration) : g



รูปที่ 2-3 แสดงค่า g บนตำแหน่งเส้นรุ้งต่างๆ ของโลก

ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก หรือค่า g จะมีค่าระหว่าง 9.78 ม./วินาที² ถึง 9.83 ม./วินาที² ขึ้นกับตำแหน่ง latitude บนผิวโลก ซึ่งแสดงตามรูปที่ 2-3 ในการใช้งานในสูตรการคำนวณมักใช้ค่าตามแหล่งที่มาขององค์ความรู้ต่างๆ ที่มักมาจากสหรัฐอเมริกาและประเทศในทวีปยุโรป ซึ่งเป็นโซนที่มีค่า $g = 9.81$ ม./วินาที² (เป็นที่ยอมรับกันว่าการใช้ค่า g นั้นถ้าเพื่อความสะดวกในการคำนวณหรืออ้างอิงอาจใช้เท่ากับ 10 ม./วินาที² ก็ได้ ซึ่งจะมีความผิดพลาดประมาณ 2 %)

2.1.10 รูปแบบของการไหล (Type of flows) ในทางน้ำเปิด

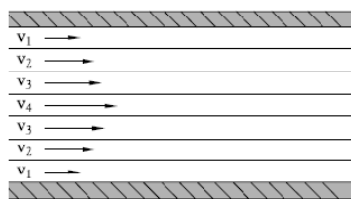
การไหล คือ การที่มวลหรืออนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ต่อเนื่องจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง การไหลในทางน้ำเปิดเป็นการไหลในลักษณะที่ผิวของน้ำสัมผัสกับอากาศ โดยมีความดันบรรยากาศกระทำต่อผิวของน้ำซึ่งเรียกว่า *ผิวของไหลอิสระ* ทางน้ำเปิดแบ่งได้เป็น (1) ทางน้ำเปิดตามธรรมชาติ ได้แก่ ร่องน้ำ คู ลำธาร คลอง ห้วย แม่น้ำ เป็นต้น โดยจะมีสภาพสลับซับซ้อน ลักษณะไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดไปตามสถานที่ และ (2) ทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้นโดยมนุษย์ เช่นแบบทางน้ำเปิดธรรมชาติ ที่มักมีรูปร่างลักษณะที่สมมาตร

การบอกถึงการไหล บอกได้ด้วย ความเร็วของการไหล (Velocity) และอัตราการไหล (Discharge or Rate of flow)

รูปแบบของการไหลนั้นสามารถแบ่งได้หลายอย่างขึ้นกับว่าจะพิจารณาองค์ประกอบใดได้แก่

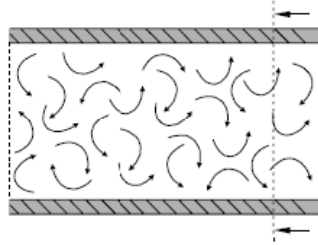
1) แบ่งตามทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลหรืออนุภาคของของไหล

1.1) **Laminar flows** หรือ **Viscous flows** เป็นการไหลที่มวลหรืออนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ตามกันในทิศทางที่แน่นอน ในลักษณะเป็นแผ่นหรือเป็นชั้นๆ มักเกิดในของไหลที่มีความหนืดสูง มีความเร็วต่ำ ได้แก่ การไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของน้ำมันในท่อที่ความเร็วต่ำๆ ฯลฯ มักไม่เกิดในการไหลในทางน้ำเปิด (การไหลของเลือดในเส้นเลือดก็เป็นรูปแบบนี้)



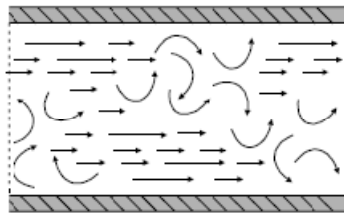
รูปที่ 2-4 ลักษณะการไหลแบบ Laminar flows

1.2) **Turbulent flows** เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปอย่างไม่แน่นอน ไม่เป็นระเบียบ เปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางในช่วงเวลาสั้นๆ มีความเร็วสูงๆ ซึ่งเป็นสภาพการไหลในทางน้ำเปิดทั่วไป



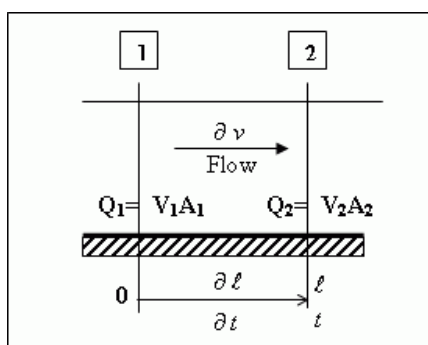
รูปที่ 2- 5 ลักษณะการไหลแบบ Turbulent flows

1.3) **Transition flows** เป็นการไหลแบบผสมผสานระหว่าง Laminar flows และ Turbulent flows โดยเป็นการไหลช่วงกลางก่อนที่จะเปลี่ยนการไหลจาก Laminar flows ไปเป็น Turbulent flows อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2-6 ลักษณะการไหลแบบ Transition flows

2) แบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และพื้นที่หน้าตัดการไหล



รูปที่ 2-7 แสดงการไหลจากหน้าตัด 1 ไปยังหน้าตัด 2

2.1) **Steady flows:** การไหลแบบทรงตัวนั้น เป็นการไหลที่ความเร็วของหน้าตัดการไหล (ที่หน้าตัด 1 และ 2) ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ระดับและความเร็วเท่ากันตลอดเวลา)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

2.2) **Unsteady flows:** เป็นการไหลที่คุณสมบัติของของไหล มีความเร็วเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ระดับและความเร็วเปลี่ยนแปลงตามเวลา จากจุด 1 ถึงจุด 2) ได้แก่การไหลที่เกิดจากน้ำขึ้นน้ำลง

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$$

2.3) **Uniform flows:** การไหลแบบเสมอด้านเสมอปลาย ความเร็วของการไหลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่จากหน้าตัด 1 ไปยังหน้าตัด 2 (ความลึกและความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อวัดที่ตำแหน่งต่างๆ)

$$\frac{\partial v}{\partial l} = 0$$

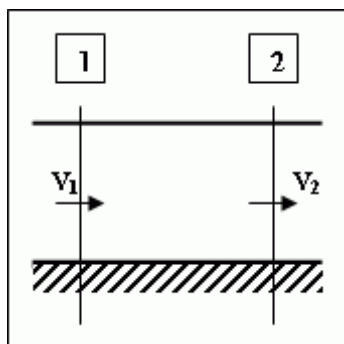
2.4) **Non-uniform flows:** การไหลแบบแปรเปลี่ยน ความเร็วของการไหลเปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่จากหน้าตัด 1 ไปยังหน้าตัด 2 โดยอาจเป็นการไหลแบบมีความเร่งในทิศทางไหล หรือการไหลแบบมีความหน่วงในทิศทางไหล (ความลึกและความเร็วมีค่าต่างกันในแต่ละหน้าตัดการไหล ตลอดทิศทางไหล)

$$\frac{\partial v}{\partial l} \neq 0 \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial l} > 0 \text{ and } \frac{\partial v}{\partial l} < 0$$

ในสภาพการไหลที่เกิดขึ้นจริงนั้น จะมีการไหลแบบต่างๆ เกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้หลายแบบ ซึ่งอาจสรุปรูปแบบการไหลที่เป็นไปได้ คือ

(1) **Steady - uniform flows** ความเร็วที่หน้าตัด 1 และ 2 เท่ากันตลอดเวลา

$$\frac{\partial v}{\partial l} = 0 \text{ และ } \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$



$$V_1 = V_2 \quad \text{และ}$$

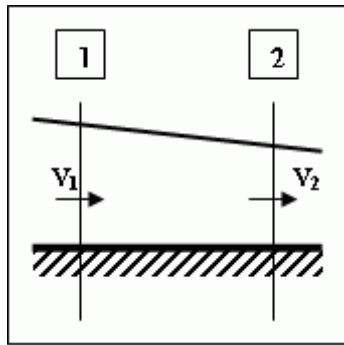
$$V_1(t) = V_1(t+\Delta t)$$

$$V_2(t) = V_2(t+\Delta t)$$

รูปที่ 2-8 การไหลแบบ Steady - uniform flows

(2) **Steady - non uniform flows** ความเร็วที่หน้าตัด 1 และ 2 มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าคงที่ตลอดเวลา

$$\frac{\partial v}{\partial \ell} \neq 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$



$$V_1 \neq V_2$$

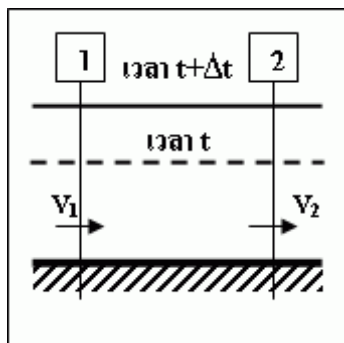
$$V_{1(t)} = V_{1(t+\Delta t)}$$

$$V_{2(t)} = V_{2(t+\Delta t)}$$

รูปที่ 2-9 การไหลแบบ Steady - non uniform flows

(3) **Unsteady - uniform flows** ความเร็วที่หน้าตัด 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่เวลาใดเวลาหนึ่ง (เวลาเดียวกัน) แต่ความเร็วจะมีค่าไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

$$\frac{\partial v}{\partial \ell} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$$



$$V_{1(t)} = V_{2(t+\Delta t)}$$

$$V_{1(t+\Delta t)} = V_{2(t+\Delta t)}$$

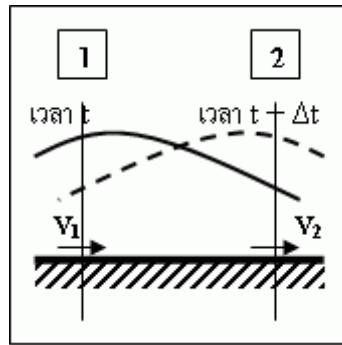
$$V_{1(t)} \neq V_{1(t+\Delta t)}$$

$$V_{2(t)} \neq V_{2(t+\Delta t)}$$

รูปที่ 2-10 การไหลแบบ Unsteady - uniform flows

(4) **Unsteady - non uniform flows** ความเร็วที่หน้าตัด 1 และ 2 ไม่เท่ากัน และมีค่าไม่คงที่ตลอดเวลา

$$\frac{\partial v}{\partial \ell} \neq 0 \quad \text{และ} \quad \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$$

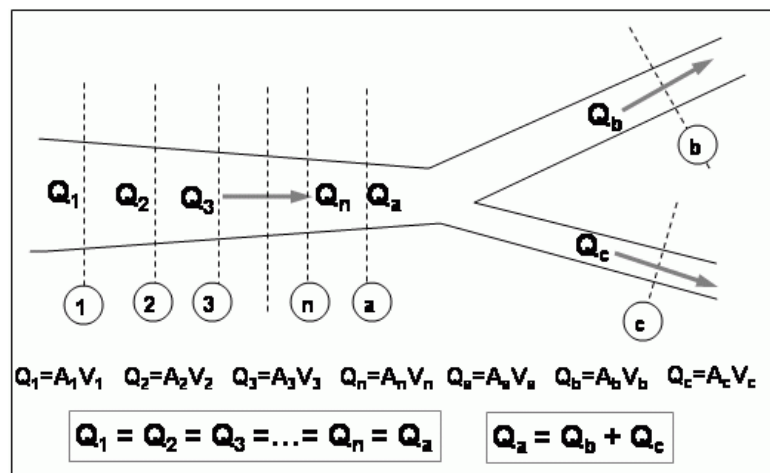


$$\begin{aligned} V_{1(t)} &\neq V_{2(t)} \\ V_{1(t+\Delta t)} &\neq V_{2(t+\Delta t)} \\ V_{1(t)} &\neq V_{1(t+\Delta t)} \\ V_{2(t)} &\neq V_{2(t+\Delta t)} \end{aligned}$$

รูปที่ 2-11 การไหลแบบ Unsteady - non uniform flows

2.2 ความต่อเนื่องของการไหล และ Continuity equation

หลักการของการไหลของของไหลที่ต่อเนื่อง คือเมื่อของไหลมีการไหลเกิดขึ้น การไหลนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายมวลของของไหลจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่ง เมื่อไม่มีตัวแปรหรือปัจจัยอื่นๆ มากระทบหรือเกี่ยวข้อง (มาเพิ่มขนาดมวล หรือทำให้มวลลดลง) ณ ที่ตำแหน่งใดๆ ของการไหล ค่าของมวลก็จะคงเดิม แม้รูปร่างของมวลจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งและเวลาก็ตาม



รูปที่ 2-12 แสดงความต่อเนื่องของการไหล

ในกรณีการไหลแบบ Steady flows ที่ค่า Q คงที่

อัตราไหลเข้า = อัตราไหลออก

$$Q = AV$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2 = A_3V_3 = \dots = A_nV_n \text{ เรียก Continuity equation}$$

$$Q_a = Q_b + Q_c$$

$$A_aV_a = A_bV_b + A_cV_c$$

ทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์ (Reynolds transport theorem)

ได้มีผู้อธิบายปรากฏการณ์ความต่อเนื่องของการไหลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบ แต่ที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางนั้นได้แก่ **ทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์ (Reynolds transport theorem)** โดยทฤษฎีนี้สามารถอธิบายการเคลื่อนย้ายปริมาณทางฟิสิกส์ที่ถูกย้ายเปลี่ยนตามเวลา ได้แก่ การย้ายมวล การย้ายพลังงาน และการการย้ายโมเมนตัม

การศึกษาทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ ไปจะศึกษาในกรอบหรือขอบเขตที่ควบคุมปัจจัยภายนอกไม่ให้นำกระทบหรือเกี่ยวข้องกับสิ่งที่ศึกษาเพื่อให้่ายในการหาคำตอบ โดยปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบมากจะถูกตัดทิ้งไป ทฤษฎีนี้ก็เช่นกัน ได้ศึกษาภายใต้ **ปริมาตรควบคุม (Control volume)** คือ บริเวณหนึ่งซึ่งของไหลผ่านเข้าและออกจากบริเวณนั้น อาณาเขตล้อมรอบบริเวณดังกล่าวเรียกว่า **ผิวควบคุม (Control surface)** โดยที่ขนาดและรูปร่างของปริมาตรควบคุมจะเป็นอย่างไรก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักจะให้ภาชนะบรรจุเป็นผิวควบคุมและเป็นส่วนอื่นของปริมาตรควบคุม ในการศึกษากลศาสตร์ของไหลระดับพื้นฐานมักไม่กล่าวถึงทฤษฎีนี้มากนัก เพราะทำความเข้าใจยากและต้องใช้จินตนาการที่สูงมาก

รศ. พงษ์ศักดิ์ เสริมสาธนสวัสดิ์ และ ผศ. ประมาณ เสริมสาธนสวัสดิ์ ได้อธิบายในหนังสือ กลศาสตร์ของของไหล FLUID MECHANICS ในเรื่องความต่อเนื่องของการไหล โดยใช้ทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์ (จากหน้า 131 - 136) ดังต่อไปนี้

ปริมาตรที่ถูกควบคุมและทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์

ปริมาตรที่ถูกควบคุม (Control Volume) คือ บริเวณหนึ่งซึ่งของไหลไหลผ่านเข้าและออกจากบริเวณนั้น อาณาเขตล้อมรอบบริเวณดังกล่าวเรียกว่า **ผิวควบคุม (Control Surface)** ขนาดและรูปร่างของปริมาตรควบคุมเป็นอย่างไรก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะให้ภาชนะที่บรรจุ

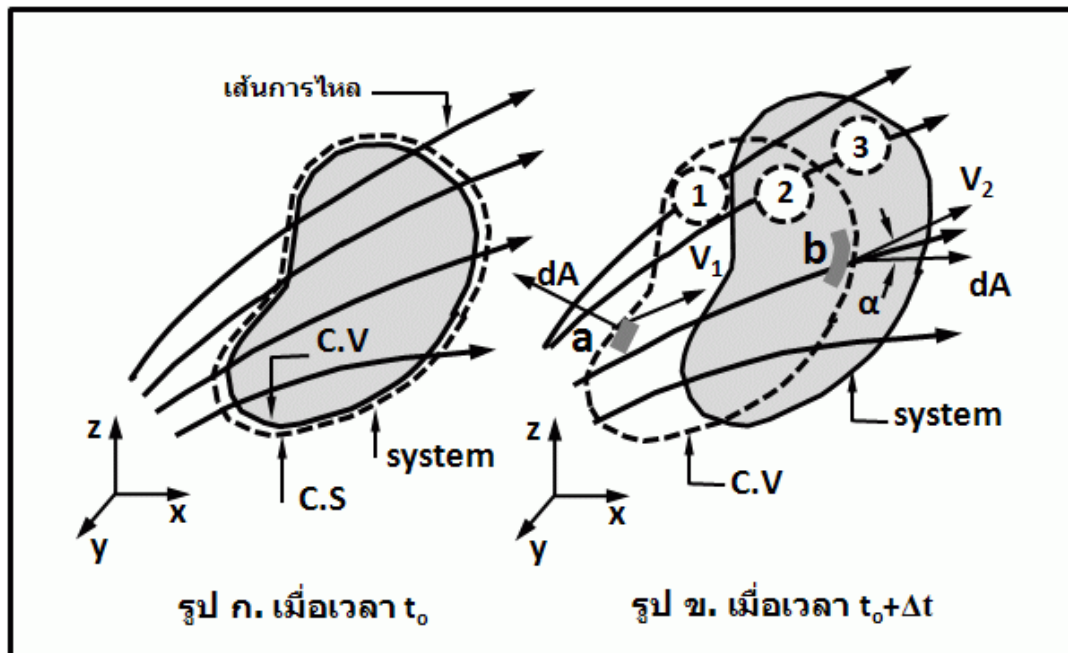
เป็นผิวควบคุม และส่วนอื่นๆ ของปริมาตรควบคุม ทั้งที่ไหลเข้าและไหลออกจะกำหนดให้ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

เมื่อไม่คำนึงถึงธรรมชาติของการไหล ทุกสภาวะของการไหลจะต้องสัมพันธ์กับเรื่องต่อไปนี้ ซึ่งใช้แสดงเป็นแบบฉบับของการวิเคราะห์ได้

1. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันใช้ได้กับทุกอนุภาค ทุกขณะ
2. ความสัมพันธ์ของการไหลต่อเนื่อง เช่น กฎทรงมวล
3. กฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์
4. สภาวะอาณาเขต (Boundary condition) ทำให้ทราบว่าความเร็วของของไหลจริงเป็นศูนย์ที่อาณาเขตดังกล่าว หรือของไหลจินตภาพไม่สามารถแทรกเข้าไปในอาณาเขตได้

สำหรับทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์ ที่จะกล่าวถึงในอันดับต่อไปนี้ นั้นใช้หลักการของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์ปริมาณทางฟิสิกส์ที่ถูกย้ายเปลี่ยนตามเวลาอันได้แก่ การย้ายมวล การย้ายพลังงาน และการย้ายโมเมนตัม ซึ่งทั้งการไหลแบบความเร็วคงที่และความเร็วไม่คงที่ (Steady State and Unsteady State)

Reynold's Transport Theorem



จากรูปของระบบและปริมาตรควบคุม (c.v) ที่เวลา t_0 มีสนามการไหล $\vec{v}(x, y, z, t)$ กล่าวคือความเร็วขึ้นกับระยะ x, y, z และเวลา t ซึ่งปริมาตรควบคุมกำหนดขึ้นแน่นอนในห้วงการไหล ที่เวลา t_0 อาณาเขตของระบบและปริมาตรควบคุมทับกัน ส่วนที่เวลา $t_0 + \Delta t$ ระบบแยกเป็นสองส่วนคือส่วนที่ 2 และ 3 และส่วนที่ 1 เป็นส่วนของไหลไหลเข้า ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของไหลไหลออกในช่วงเวลา Δt เดียวกัน (จากรูปไหลเข้าที่ a ไหลออกที่ b)

ให้ N เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่ถูกย้าย เช่น มวล, งาน และ โมเมนตัม เป็นต้น

η อ่านว่าเอตต้า เป็นปริมาณที่ถูกย้ายต่อมวลทั้งหมด

$$\text{กล่าวคือ } \eta = \frac{N}{m} \quad \text{เมื่อ } m \text{ คือมวล}$$

จากนิยามอนุพันธ์

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลง } N \text{ ของระบบคือ } \frac{dN}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_s)_{t_0 + \Delta t} - (N_s)_{t_0}}{\Delta t}$$

ตัวห้อย s แทนระบบดังรูป

ที่เวลา $t_0 + t$ ระบบประกอบด้วยส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3

ที่เวลา t_0 ระบบและปริมาตรควบคุมทับกันคือส่วนที่ 2, 1

$$\text{โดยที่} \quad N_s = \int_{\text{mass(system)}} n dm = \int_{V(\text{system})} \eta \rho dV$$

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{dN}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N_s)_{t_0 + \Delta t} - (N_s)_{t_0}}{\Delta t} \quad 1-1$$

$$\text{ค่าของ } (N_s)_{t_0 + \Delta t} = (N_2 + N_3)_{t_0 + \Delta t}$$

$$= (N_{cv} - N_1 + N_3)_{t_0 + \Delta t}$$

$$= \left[\int_{cv} \eta \rho dV \right]_{t_0 + \Delta t} - \left[\int_1 \eta \rho dV \right]_{t_0 + \Delta t} + \left[\int_3 \eta \rho dV \right]_{t_0 + \Delta t}$$

$$\text{และเทอม } (N_s)_{t_0} = (N_{cv})_{t_0} = \left[\int_{cv} \eta \rho dV \right]_{t_0}$$

แทนค่าลงใน 1-1 จะได้

$$\frac{dN}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_{cv} \eta \rho dV \right]_{t_0 + \Delta t} + \left[\int_3 \eta \rho dV \right]_{t_0 + \Delta t} - \left[\int_1 \eta \rho dV \right]_{t_0 + \Delta t} - \left[\int_{cv} \eta \rho dV \right]_{t_0}}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_{cv} \eta \rho d\forall \right]_{t_0 + \Delta t} - \left[\int_{cv} \eta \rho d\forall \right]_{t_0}}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_3 \eta \rho d\forall \right]_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_1 \eta \rho d\forall \right]_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} \quad 1-2$$

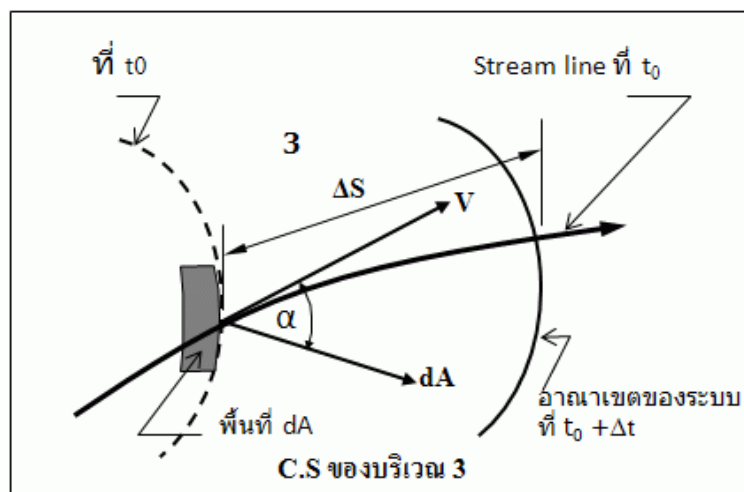
ขั้นตอนต่อไปคือหาค่าเทอมที่ (1) , (2) และ (3) ของสมการ 1-2 ดังนี้

พิจารณาเทอมที่ 1 คือส่วนที่ 2 ในรูป ข.

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_{cv} \eta \rho d\forall \right]_{t_0 + \Delta t} - \left[\int_{cv} \eta \rho d\forall \right]_{t_0}}{\Delta t} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{cv})_{t_0 + \Delta t} - N_{cv})_{t_0}}{\Delta t} \\ &= \frac{\partial N_{cv}}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho d\forall \end{aligned} \quad 1-3$$

พิจารณาเทอมที่ 2

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_3 \eta \rho d\forall \right]_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_3)_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t}$$



เพื่อหาค่าของ $N_3)_{t_0+\Delta t}$ ให้ดูรูปขยายของบริเวณที่ 3 เวกเตอร์ $\vec{dA}$ มีขนาดเท่ากับพื้นที่ dA ของพื้นที่ผิวควบคุม (Control Surface) กำหนดให้ทิศของ เวกเตอร์ $\vec{dA}$ พุ่งออกตั้งฉากกับผิวทำมุม α กับความเร็ว $\vec{V}$ เนื่องจากมวลในบริเวณที่ 3 เป็นมวลที่ออกจากการควบคุมปริมาตรระหว่างช่วงเวลา Δt ซึ่งมุม α น้อยกว่า $\frac{\pi}{2}$ เสมอ ตลอดผิวบริเวณที่ 3

ดังนั้นเราสามารถเขียนได้ดังนี้

$$dN_3)_{t_0+\Delta t} = (\eta \rho dV)_{t_0+\Delta t} = [\eta \rho (\Delta s \cos \alpha dA)]_{t_0+\Delta t}$$

เมื่อ $dV = \Delta s \cos \alpha dA$ ดังนั้นถ้าคิดทั้งหมดของบริเวณที่ 3 จะได้

$$dN_3)_{t_0+\Delta t} = \left[\int_{cs3} \eta \rho (\Delta s \cos \alpha dA) \right]_{t_0+\Delta t}$$

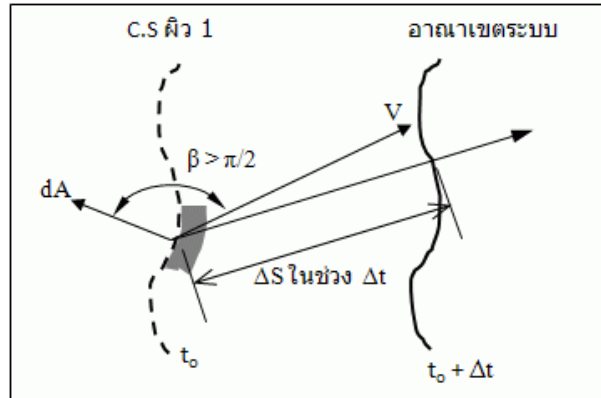
ดังนั้นเทอมที่ 2 ที่จะหาคือ

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left[\int_{cs3} \eta \rho dV \right]_{t_0+\Delta t}}{\Delta t} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_3)_{t_0+\Delta t}}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{cs3} \eta \rho \Delta s \cos \alpha dA}{\Delta t} \\ &= \int_{cs3} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \end{aligned} \quad 1-4$$

$$\text{เนื่องจาก } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \left| \vec{V} \right| \text{ และ } \vec{V} \cdot d\vec{A} = \left| \vec{V} \right| \left| d\vec{A} \right| \cos \alpha$$

และ Δs คือระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามเส้นการไหลในเวลา Δt

พิจารณาเทอมที่ 3 จากสมการ 1-1 ได้แก่การไหลเข้าสู่บริเวณที่ 1 ให้ดูรูปบริเวณขยายของบริเวณที่ 1 เวกเตอร์ $d\vec{A}$ ซึ่งมีขนาด dA มีทิศทางพุ่งออกจากพื้นที่ผิวควบคุม และตั้งฉากกับผิวและทำมุม β ซึ่งโตกว่า $\frac{\pi}{2}$ กับทิศทาง $\vec{V}$ ตลอดผิวควบคุม ซึ่งทำให้ค่าของการไหลเข้าเป็นลบเนื่องจาก $\cos \beta = -\cos \beta$



$$\begin{aligned}
 \text{เทอมที่ 3 คือ } - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[\int_1 \eta \rho dV]_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} &= - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_1)_{t_0 + \Delta t}}{\Delta t} \\
 &= - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{cs1} - \eta \rho \Delta \ell \cos \beta dA}{\Delta t} \\
 &= \int_{cs1} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad 1-5
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \ell}{\Delta t} = |\vec{V}|$ และ $\vec{V} \cdot d\vec{A}$ คือ dot product

$$\text{ซึ่ง } \vec{V} \cdot d\vec{A} = |\vec{V}| |d\vec{A}| \cos \beta$$

แทนค่าสมการ 1-5, 1-4 และ 1-3 ในสมการ 1-2 จะได้

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_{\text{system}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV + \int_{cs1} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} + \int_{cs3} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad 1-6$$

ซึ่งเขียนย่อได้ดังนี้ เรียก ทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_{\text{system}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV + \int_{cs} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad 1-7$$

เมื่อ $\left(\frac{dN}{dt} \right)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของระบบ

$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ N ภายในปริมาตรควบคุม

$\int_{cs} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$ คือ อัตราการไหลเข้าและออกจากผิวควบคุม โดยกำหนดให้ไหลเข้าเป็นลบและไหลออกเป็นบวก

หลักการของมวลและสมการความต่อเนื่อง

การไหลของของไหลที่ต่อเนื่องกันเป็นการย้ายมวล ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์สมการการย้ายของเรโนลด์ได้

$$\text{ปริมาณที่ถูกย้าย } N = \text{มวล } m = \rho V$$

$$\text{ปริมาณที่ถูกย้ายต่อมวล } \eta = \frac{N}{m} = \frac{m}{m} = 1$$

$$\text{จากสมการ 1-7 คือ } \left(\frac{dN}{dt} \right)_{\text{system}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV + \int_{cs} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

แทนค่า $\eta = 1$ จะได้

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_{\text{system}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

เนื่องจากมวล m ของระบบคงที่คือ N คงที่ จะได้ $\frac{dN}{dt} = 0$

ดังนั้นสมการทรงมวลคือ

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad 1-8$$

ต้องจำไว้เสมอว่าเทอมหลังคือ $\int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$ ประกอบด้วยมวลที่ไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุม ซึ่งกำหนดให้ไหลเข้าเป็นลบไหลออกเป็นบวก ถ้าไหลเข้ามากจะทำให้ปริมาณในปริมาตรควบคุมเพิ่ม $\left(\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV \right)$ ถ้าไหลเข้าน้อยกว่าไหลออกจะทำให้ปริมาณในปริมาตรควบคุมลดลง

ในกรณีที่ของไหลเป็นแบบอัดไม่ได้ (Incompressible fluid) ค่าของความหนาแน่น ρ คงที่ และปริมาตรควบคุมคงที่

$$\text{ทำให้ } \left(\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV \right) = 0$$

$$\rho \int_{cs} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad 1-9$$

$$\text{หรือ} \quad - \int_{cs1} \vec{V}_1 \cdot d\vec{A}_1 + \int_{cs2} \vec{V}_2 \cdot d\vec{A}_2 = 0$$

ดังนั้น

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad 1-10$$

เมื่อพิจารณาหน่วยของ V คูณกับ A คือเมตรต่อวินาทีคูณกับตารางเมตร จะได้ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หน่วยดังกล่าวเรียกว่า อัตราการไหล (Flow rate)

การที่ได้นำทฤษฎีการย้ายของเรโนลด์มานำเสนอครั้งนี้ ไม่มุ่งให้ต้องทำความเข้าใจอย่างจริงจัง แต่จะสื่อให้เห็นว่า เพียงแค่การอธิบายว่า $V_1 A_1 = V_2 A_2$ นั้นมีความสลับซับซ้อนเพียงใด

2.3 สมการพลังงาน (Energy equation or Bernoulli's equation)

พลังงานของการไหลมี 3 อย่างคือ

- 1) พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) : KE คือ Velocity head
- 2) พลังงานศักย์ (Potential Energy) : PE คือ Elevation head
- 3) พลังงานความดัน (Pressure Energy) คือ Pressure head

เมื่อ m = มวล, w = น้ำหนัก, V = ความเร็ว

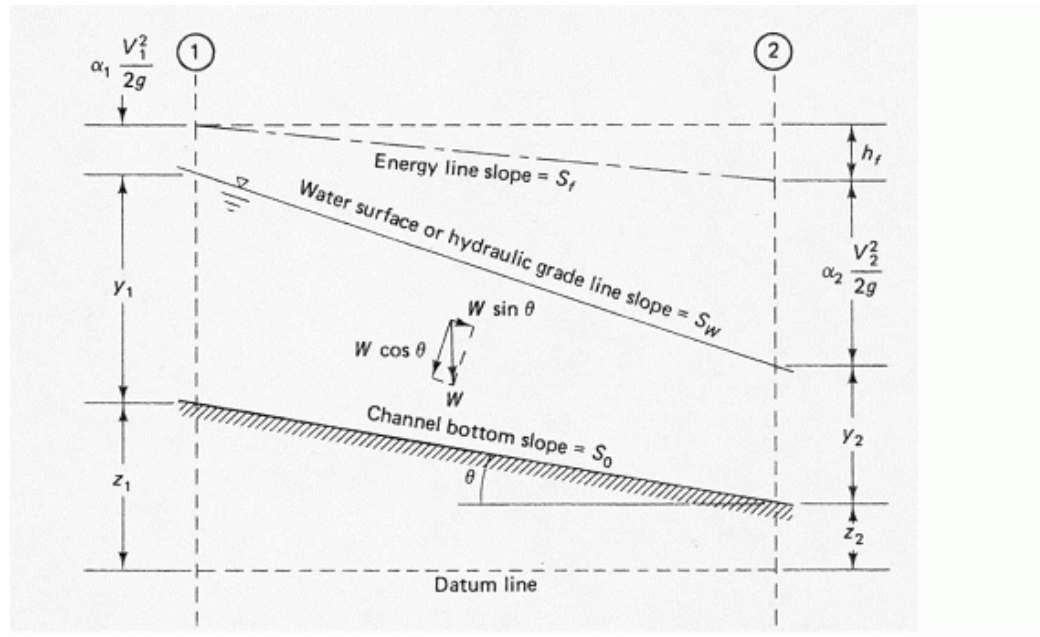
พิจารณารูปที่ 2-13

$$KE = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \frac{w}{g} V^2 \quad \text{คิดต่อหน่วยน้ำหนัก} \quad KE = \frac{1}{2} \frac{w}{g} \frac{V^2}{w} = \frac{V^2}{2g}$$

$$PE = w \cdot Z \quad \text{โดย } Z \text{ เป็นความสูง เมื่อคิดต่อหน่วยน้ำหนัก} \quad PE = \frac{wZ}{w} = Z$$

$$\text{Pressure energy (y)} \quad \text{ได้แก่ ความสูงของของเหลวเนื่องจากความดัน} = \frac{P}{\gamma}$$

$$E_1 = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \quad \text{และ} \quad E_2 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2$$



รูปที่ 2 - 13 เทอมต่างๆ ในสมการพลังงานของทางน้ำเปิด

หลักการใช้สมการพลังงาน

1) เมื่อไม่เกิด Friction ค่า Total energy per unit weight จะเท่ากันตลอดทุกๆ จุดที่ของเหลวไหลผ่าน

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2$$

ซึ่งสมการข้างต้นนี้ คือ Bernoulli's equation

2) เมื่อมีการสูญเสียพลังงาน (Head loss) : H_L เนื่องจาก Friction จะได้

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_L$$

3) ในกรณีเพิ่มพลังงานให้กับระบบ เช่น Pump = H_p

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + H_p = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_L$$

4) กรณีที่มีการดูดพลังงานจากระบบไปใช้ เช่น Turbine = H_T เพื่อปั่นกระแสไฟฟ้า

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_L + H_T$$

Specific Energy

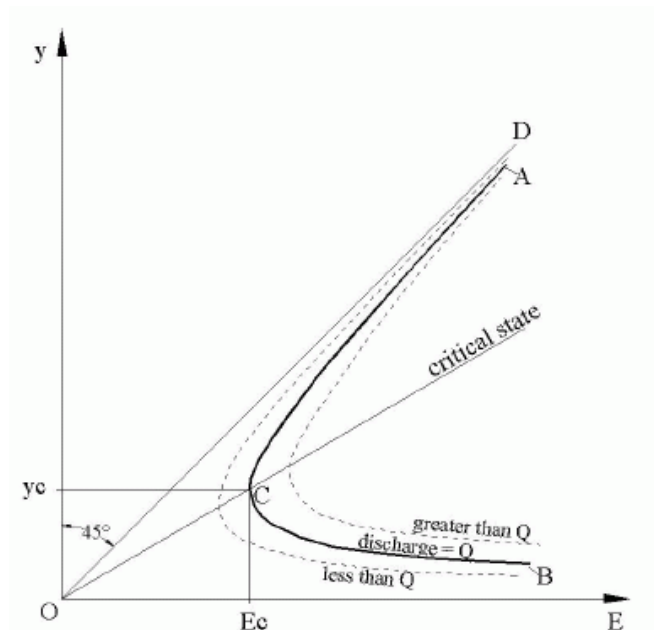
Specific Energy (E) คือ ค่าผลรวมของ Pressure head (y) กับ Velocity head ($V^2/2g$)

$$E = y + \frac{V_1^2}{2g}$$

จากที่ $Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$

ดังนั้น $y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$

จะเห็นได้ว่า A_1 และ A_2 ต่างสัมพันธ์กับค่าความลึก y นั่นคือ Specific Energy ที่หน้าตัดการไหลใด ๆ จะมีค่าที่ขึ้นกับค่าความลึกของการไหล y และเมื่อกำหนดให้ค่า Q คงที่ เมื่อนำค่าความลึกของการไหล (y) และค่า Specific Energy (E) มาเขียนเป็นกราฟ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2- 14



รูปที่ 2- 14 Specific Energy Curve

จากกราฟที่จุดยอดของกราฟ จุด C จะมีค่าพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการไหลแบบวิกฤต (Critical flows) และความลึกของการไหลที่จุดดังกล่าวเรียกว่า ความลึกวิกฤต (Critical depth) หรือ y_c

คุณสมบัติของ Critical flow

หากพิจารณาความสัมพันธ์จาก Specific energy curve ระหว่างค่าความลึก (y) และค่าพลังงานจำเพาะ (E) ของการไหลในทางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะพบว่าที่ Critical depth (y_c) จะมีพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด นั่นคือ $dE/dy = 0$

เมื่อ

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{2gA^3} \cdot \frac{dA}{dy}$$

ถ้าทางน้ำมีความกว้างวัดที่ผิวน้ำ T ดังนั้น $dA = T \cdot dy$ และ $dE/dy = 0$

$$\frac{Q^2 T_c}{2gA_c^3} = 1 \quad \text{and} \quad \frac{A_c}{T_c} = \frac{Q^2}{gA_c^2}$$

ถ้าความลึกของการไหลเท่ากับ D ดังนั้น $D = A/T$

จะได้

$$D_c = \frac{Q^2}{gA_c^2} = \frac{v^2}{g}$$

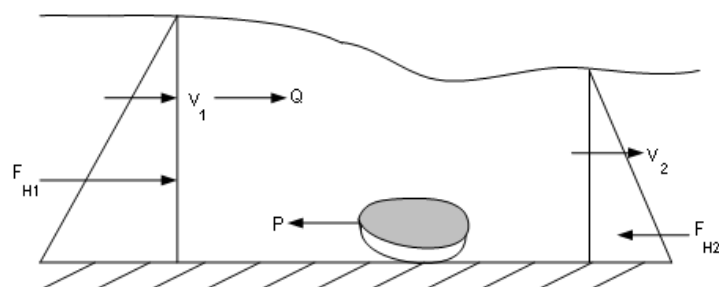
หารตลอดด้วย D_c จะได้ $1 = \frac{v}{\sqrt{gD_c}}$

ค่า $\frac{v}{\sqrt{gD_c}}$ นี้เรียกว่าค่า Froude number, Fr

ดังนั้น

- การไหลแบบ Critical flows จะมี $Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_c}} = 1$
- การไหลที่มีค่า $Fr < 1$ จะเป็นการไหลแบบ Sub-critical flows
- การไหลที่มีค่า $Fr > 1$ จะเป็นการไหลแบบ Super-critical flows

2.4 สมการ Momentum (Law of conservation of momentum)



รูปที่ 2-15 Free Body Diagram ของการไหลในทางน้ำเปิด

ถ้าการไหลมีการสูญเสียพลังงานในระบบแล้วต้องใช้ สมการ **Momentum** มาช่วยวิเคราะห์ ไม่สามารถใช้สมการพลังงานโดยตรงได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกรณีต่อไปนี้

- การคำนวณหาความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิด Hydraulic jump
- การคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนความเร็ว หรือเปลี่ยนทิศทาง
- การคำนวณหาแรงเนื่องจากการลดขนาดท่อ ท่อโค้ง

$F = \Delta(pQV)$ ซึ่งค่า (pQV) นี้เรียกว่า Momentum

$$\sum F = \rho Q(V_1 - V_2) = \rho Q \Delta V$$

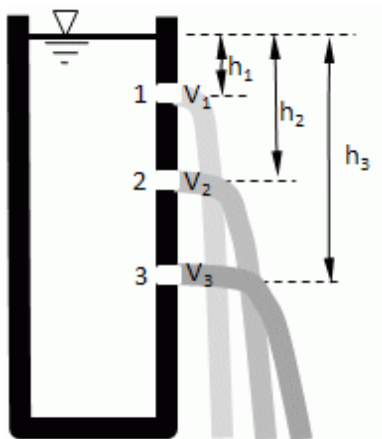
2.5 หลักการของการไหลของน้ำผ่านช่องเปิด (Orifice)

Orifice คือ ช่องเปิดให้ของไหลไหลออกจากภาชนะ

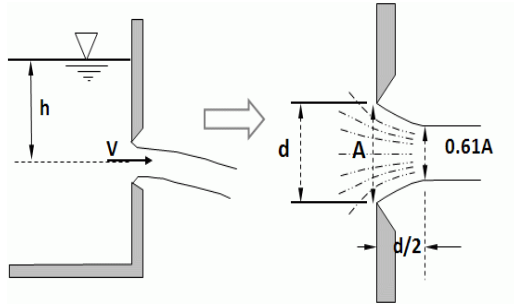
2.5.1 การไหลของน้ำผ่านช่องเปิดขนาดเล็ก

มีการศึกษาการไหลของน้ำผ่านช่องเปิดขนาดเล็ก ที่ให้ช่องเปิดอยู่ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากพินัยพบว่า ยิ่งช่องเปิดอยู่ต่ำกว่าพินัย ลำของน้ำที่พุ่งออกไป (Jet) จะยังมีความแรงและระยะที่ลำของน้ำกระทบพื้นก็จะยิ่งห่างออกไป และต่อมา Daniel Bernoulli ได้ค้นพบความสัมพันธ์ของความเร็วของการไหลกับระยะความลึก (Velocity head concept) ตามสมการต่อไปนี้

$$V = \sqrt{2gh} \quad \text{หรือ} \quad h = \frac{V^2}{2g}$$



รูปที่ 2-16 แสดงการไหลผ่านช่องเปิดขนาดเล็กที่ระดับความลึกต่างๆ $V = \sqrt{2gh}$



รูปที่ 2-17 แสดงการไหลผ่านช่องเปิดขนาดเล็ก และรูปขยายช่องเปิด

2.5.1.1 กรณีการไหลแบบ Free flow น้ำมีการไหลออกจากช่องเปิดโดยอิสระ อธิพจน์ที่เกี่ยวข้องที่ได้รับด้านท้ายน้ำมีเพียงแรงดึงดูดของโลกอย่างเดียว

ระยะ h วัดจากกึ่งกลางช่องเปิดถึงผิวน้ำ

เมื่อได้มีการศึกษาการไหลของน้ำผ่านรูเล็กๆ ละเอียดยิ่งขึ้น จากรูปที่ 2-17 ทำให้ขอบของช่องมีความคมเพื่อลดแรงเสียดทานให้เกิดน้อยที่สุด พบว่าลำของน้ำ (Jet) ที่พุ่งออกจากช่องเปิดพื้นที่ A จะมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าหน้าตัดของช่องเปิด และที่ระยะ $d/2$ ความเร็วของน้ำที่พุ่งออกมามีค่าใกล้เคียงค่าทางทฤษฎี หรือเป็นระยะที่เสมือนว่าไม่เกิดอิทธิพลอันเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก และเมื่อใช้ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่สามารถตรวจวัดค่าต่างๆ ได้ง่าย พบว่าหน้าตัดของลำของน้ำมีค่า $0.61A$

จากหลักการพื้นฐาน	$Q = AV$
และลำของน้ำที่ระยะ $d/2$	$V = \sqrt{2gh}$
ดังนั้นค่าในทางทฤษฎี	$Q_t = A\sqrt{2gh}$
แต่ค่าที่เกิดขึ้นจริง	$V_a = C_v\sqrt{2gh}$
	$A_c = C_c A$

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณคอขวด

C_v คือ สัมประสิทธิ์ความเร็ว (Coefficient of velocity) มีค่าใกล้เคียง 1

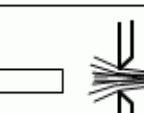
C_c คือ สัมประสิทธิ์การหดตัว (Coefficient of contracta) มีค่าน้อยกว่า 1

ค่าที่เกิดขึ้นจริง

$$Q_a = C_v C_c A \sqrt{2gh} = C_d A \sqrt{2gh}$$

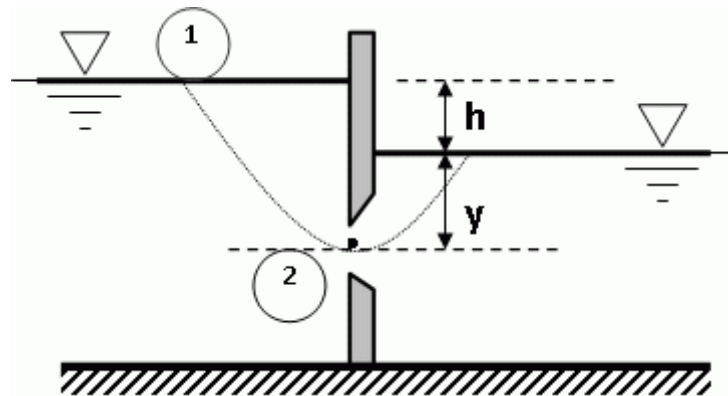
เมื่อ $C_d = C_v C_c$ คือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (Coefficient of discharge)

ตารางที่ 2-1 ชนิดและค่าสัมประสิทธิ์ของรูระบายชนิดต่างๆ

ชนิดรูระบาย	ลักษณะ	C_d	หมายเหตุ
1. วงกลมสั้นคม		0.60 - 0.65	
2. สี่เหลี่ยมจัตุรัสสั้นคม		0.60 - 0.61	
3. สี่เหลี่ยมผืนผ้าสั้นคม		0.62 - 0.68	อาจวางแนวตั้ง
4. ท่อวงกลมสั้น		0.80 - 0.83	ท่อสั้นพอที่จะไม่เกิดการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานและทางออกน้ำไหลเต็มท่อ
5. ท่อวงกลมสั้น		0.60 - 0.65	น้ำพุ่งออกโดยอิสระ และมีความเสียดทานบ้าง
6. สี่เหลี่ยมจัตุรัสสั้น		0.60 - 0.80	น้ำพุ่งออกโดยอิสระ
7. ท่อวงกลมสั้น		0.50 - 0.53	มีความยาวท่อเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เรียก reentract tube หรือ แบบ borda
8. ท่อขยายขนาด		0.87 - 0.99	
9. ท่อลดขนาด		0.96 - 0.98	ใช้ประกอบกับหัวฉีด (Nozzle)

ที่มา : หนังสือ ชลศาสตร์ (HYDRAULICS) โดย กิรติ ลีวัจนกุล

2.5.1.2 Submerged orifice : เป็นกรณีที่ระดับน้ำด้านท้ายท่วมช่องเปิด



รูปที่ 2-18 แสดง Submerged orifice

Energy equation ที่จุด (1) และ (2) ถ้าไม่มี Losses เกิดขึ้น
ถ้าให้ Datum line อยู่ที่จุด (2) ถึงกลางช่องเปิด

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2$$

$$V_1 = 0, Z_1 = Z_2; \quad (h + y) = \frac{V_2^2}{2g} + y$$

$$V_2 = \sqrt{2gh}$$

จาก $Q = AV$

ค่า Q ในทางทฤษฎี $Q_t = A\sqrt{2gh}$

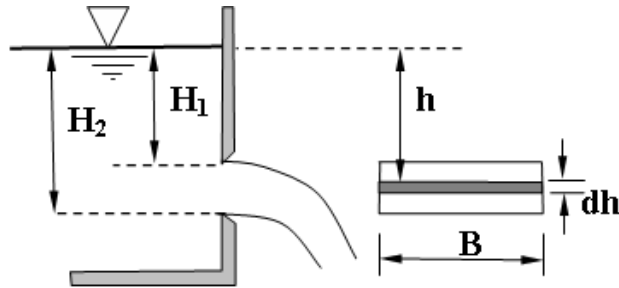
ค่าที่เกิดขึ้นจริง $Q_a = C_d A \sqrt{2gh}$

เมื่อ C_d คือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (Coefficient of discharge)

ข้อสังเกต จะเห็นได้ว่าการไหลแบบ Submerged flow ระยะ h จะเป็นความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับด้านท้ายน้ำ ซึ่งต่างจากกรณีของการไหลแบบ Free flow ที่ระยะ h วัดจากถึงกลางช่องเปิดถึงผิวน้ำ

2.5.2 อัตราการไหลของน้ำผ่านช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่

กรณี **Free flow**: ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่า Orifice



รูปที่ 2 - 19 แสดง การไหลผ่าน Orifice ขนาดใหญ่

พื้นที่หน้าตัดช่องเปิด $dA = Bdh$

$$V = \sqrt{2gh} = \sqrt{2g} \cdot (h^{1/2})$$

$$dQ = V \cdot dA = B \cdot dh \cdot \sqrt{2g} \cdot (h^{1/2})$$

$$\int dQ = \int V dA = \sqrt{2g} \cdot B \cdot \int (h^{1/2}) dh$$

ความสูงช่องเปิด จาก H_1 ถึง H_2

$$\text{และจากที่} \quad \int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$$

$$\int_{H_1}^{H_2} dQ = \sqrt{2g} B \int_{H_1}^{H_2} (h^{1/2}) dh$$

$$Q = \sqrt{2g} B \frac{[h^{3/2}]_{H_1}^{H_2}}{3/2}$$

$$Q_t = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$$

$$Q_a = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} C_d (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$$

C_d : Discharge Coefficient จะมีค่าระหว่าง 0.60 ถึง 0.80 ขึ้นกับขนาดมิติของช่องเปิด

หลักการของ **Orifice flow** ข้างต้นเป็นหลักการที่นำไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ที่มีบานระบายเป็นตัวบังคับควบคุมปริมาณน้ำ

2.6 การไหลในทางน้ำเปิด

2.6.1 ประเภทของทางน้ำเปิด แบ่งตามการกำเนิดได้ 2 ประเภท คือ

1). ทางน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural channels) โดยเกิดจากการกัดเซาะของน้ำเมื่อน้ำทำไหลลัดเลาะจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำตามธรรมชาติ ได้แก่ คู ลำธาร ลำห้วย คลอง แม่น้ำ ฯลฯ พื้นที่หน้าตัดของทางน้ำธรรมชาติมักไม่เป็นรูปเรขาคณิต โดยส่วนใหญ่จะเป็นรูปคล้ายพาราโบลา

2). ทางน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น (Regulated channels) เป็นทางน้ำที่สร้างขึ้นเลียนแบบทางน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยกำหนดแนวของทางน้ำที่เหมาะสมได้แก่ คลอง (ทำหน้าที่ย่อยๆ เช่น คลองส่งน้ำ คลองระบายน้ำ คลองชักน้ำ คลองผันน้ำ เป็นต้น) และคู (คูส่งน้ำ คูระบายน้ำ) มักสร้างให้มีหน้าตัดเป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก สี่เหลี่ยมคางหมู ครึ่งวงกลม สามเหลี่ยม ฯลฯ ในกรณีที่เป็นคลองส่งน้ำหรือ คูส่งน้ำ มักมีการป้องกันความเสียหายของลาดข้างจากการกัดเซาะของน้ำ หรือเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำจากการรั่วซึมโดยมักมีการปิดทับหน้าด้วยคอนกรีต หินก่อ หินเรียงยาแนว เป็นต้น หากไม่มีการป้องกันลาดดังกล่าว หรือเมื่อเกิดการตกลมของตะกอน หน้าตัดอาจเปลี่ยนไปเป็นรูปพาราโบลา หรือเป็นรูปอื่นๆ ได้

นอกจากนี้ ในกรณีของท่อส่งน้ำหรือท่อระบายน้ำที่มีการไหลของน้ำในท่อแบบไม่เต็มท่อก็ถือว่าเป็นการไหลในทางน้ำเปิดด้วย

2.6.2 คุณสมบัติการไหลในทางน้ำเปิด

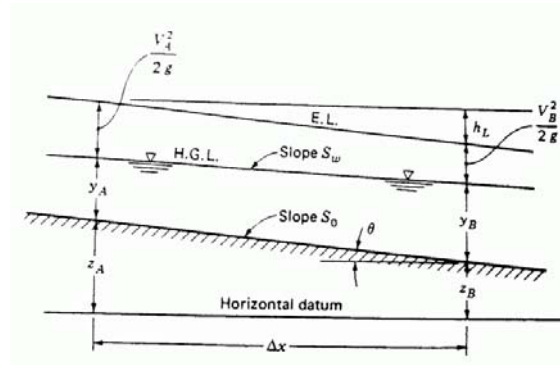
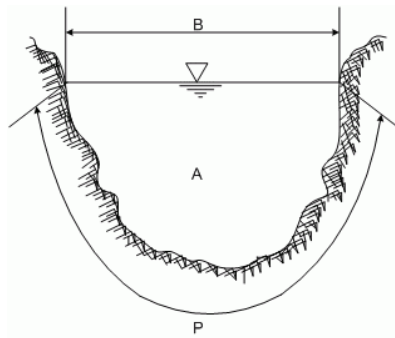
ในทางน้ำโดยทั่วไปในการคำนวณมักจะสมมุติให้มีลักษณะการไหลแบบ Steady-Uniform ที่ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและระยะทาง

คุณสมบัติของ Uniform คือ

(1) ความลึก ความเร็ว พื้นที่หน้าตัด และปริมาณการไหลของน้ำที่ทุกตำแหน่งในทางน้ำมีค่าคงที่

(2) ความลาดชันของเส้นพลังงานรวม ผิวน้ำ และพื้นทางน้ำมีค่าเท่ากัน หรือเส้นความลาดชันทั้งสามเส้นขนานกัน)

2.6.3 คุณสมบัติทั่วไปของทางน้ำเปิด



รูปที่ 2-20 หน้าตัดทั่วไปของทางน้ำธรรมชาติและการไหลในทางน้ำเปิดทั่วไป

ความลึกการไหล (Depth of flow) : y : ความลึกในแนวดิ่งวัดจากท้องน้ำต่ำสุดถึงผิวน้ำ

ระดับน้ำ (Stage) ระยะในแนวดิ่งที่วัดจากผิวน้ำกับระดับอ้างอิงมาตรฐานถึงผิวน้ำ โดยทั่วไประดับอ้างอิงมาตรฐานมักเป็นระดับน้ำทะเลปานกลาง (รทก.)

ความกว้างของผิวน้ำ (Top of width) : T (บางครั้งใช้ B) : ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดการไหลวัดที่ผิวน้ำ

เส้นขอบเปียก (Wetted perimeter) : P : ความยาวของเส้นรอบรูปของหน้าตัดทางน้ำที่สัมผัสกับน้ำ

หน้าตัดทางน้ำ (Water area) : A : พื้นที่หน้าตัดของทางน้ำที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ โดยในทางชลศาสตร์จะหมายถึงพื้นที่หน้าตัดของน้ำที่ไหลในเวลาใดเวลาหนึ่ง หรือที่เรียก พื้นที่หน้าตัดของการไหล

รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic radius) : R : อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดทางน้ำกับเส้นขอบเปียก

$$R = \frac{A}{P}$$

ความลึกชลศาสตร์ (Hydraulic depth) : D'' : อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดทางน้ำกับความกว้างผิวน้ำ

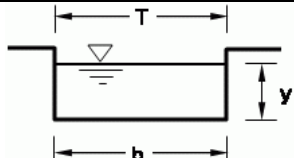
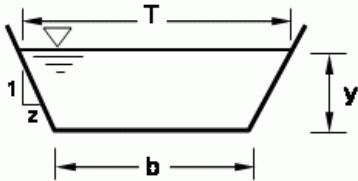
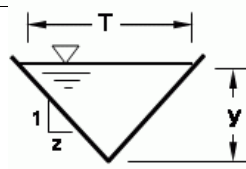
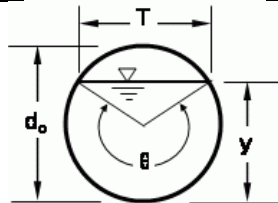
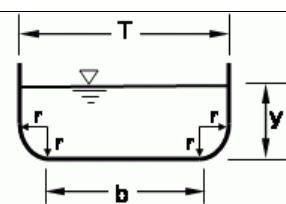
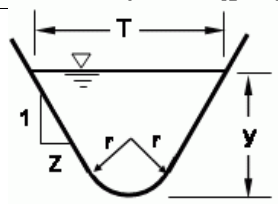
$$D'' = \frac{A}{B}$$

แฟกเตอร์หน้าตัด (Section factor) : Z : ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดการไหลกับรากที่สองของความลึกชลศาสตร์

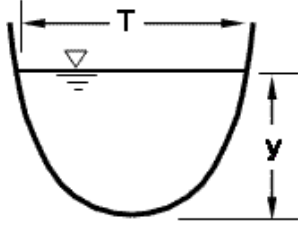
กรณีการไหลแบบวิฤต $Z = A\sqrt{D''} = A\sqrt{A/B}$

กรณีการไหลแบบ Uniform $Z = AR^{2/3}$

ตาราง 2-2 คุณสมบัติของทางน้ำเปิดรูปหน้าตัดต่าง ๆ

หน้าตัดทางน้ำ	พื้นที่ (A) เส้นขอบเปียก (P) รัศมีชลศาสตร์ (R)	ความกว้างผิวน้ำ (T) ความลึกชลศาสตร์ (D") แฟกเตอร์หน้าตัด (Z)
 สี่เหลี่ยมผืนผ้า	$A = by$ $P = b + 2y$ $R = \frac{by}{b + 2y}$	$T = b$ $D'' = y$ $Z = by^{1.5}$
 สี่เหลี่ยมคางหมู	$A = (b + zy)y$ $P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$ $R = \frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$T = b + 2zy$ $D'' = \frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$ $Z = \frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
 สามเหลี่ยม	$A = zy^2$ $P = 2y\sqrt{1 + z^2}$ $R = \frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$T = 2zy$ $D'' = \frac{y}{2}$ $Z = \frac{\sqrt{2}}{2} zy^{2.5}$
 วงกลม	$A = \frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)d_o^2$ $P = \frac{1}{2}\theta d_o$ $R = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)d_o$	$T = \left(\sin \frac{\theta}{2}\right)d_o \text{ or } 2\sqrt{y(d_o - y)}$ $D'' = \frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \theta / 2}\right)d_o$ $Z = \frac{\sqrt{2}(\theta - \sin \theta)^{1.5}}{32\left(\sin \frac{\theta}{2}\right)}d_o^{2.5}$
 สี่เหลี่ยมมุมโค้ง (y > r)	$A = \left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y$ $P = (\pi - 2)r + b + 2y$ $R = \frac{(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	$T = b + 2r$ $D'' = \frac{(\pi/2 - 2)r^2}{b + 2r}y$ $Z = \frac{[(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$
 สามเหลี่ยมมุมโค้ง	$A = \frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$ $P = \frac{T}{z}\sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$ $R = \frac{A}{P}$	$T = 2\left[z(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}\right]$ $D'' = \frac{A}{T}$ $Z = \sqrt{\frac{A}{T}}$

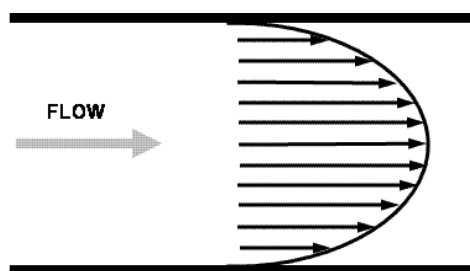
ตาราง 2-2 คุณสมบัติของทางน้ำเปิดรูปหน้าตัดต่าง ๆ (ต่อ)

หน้าตัดทางน้ำ	พื้นที่ (A) เส้นขอบเปียก (P) รัศมีชลศาสตร์ (R)	ความกว้างผิวน้ำ (T) ความลึกชลศาสตร์ (D") แฟกเตอร์หน้าตัด (Z)
 พาราโบลา	$A = \frac{2}{3}Ty$ $P = T + \frac{8}{3}\frac{y^2}{T} *$ $R = \frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2} *$ * การประมาณใช้ได้ในช่วงของ $0 < x \leq 1$ เมื่อ $x = \frac{4y}{T}$, เมื่อ $x > 1$ ค่าที่ถูกต้องของ $P = \frac{T}{2} \left[\sqrt{1+x^2} + \frac{1}{x} \ln \left(x + \sqrt{1+x^2} \right) \right]$	$T = \frac{3}{2}\frac{A}{y}$ $D'' = \frac{2}{3}y$ $Z = \frac{2}{9}\sqrt{6}Ty^{1.5}$

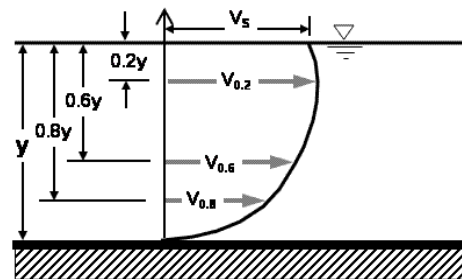
2.6.4 การกระจายความเร็ว

การกระจายความเร็วของการไหลตลอดหน้าตัดจะไม่สม่ำเสมอ สาเหตุเกิดจากแรงเสียดทานที่น้ำกระทำกับพื้นผิวของทางน้ำ โดยจะขึ้นกับขนาด รูปร่างหน้าตัดและความขรุขระของทางน้ำด้วย

พิจารณาตามรูปที่ 2-21 ในรูปแปลนความเร็วของการไหลจะมากที่สุดบริเวณกลางทางน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากความเสียดทานของผนังด้านข้างทางน้ำ และเมื่อพิจารณาการกระจายความเร็วตามความลึกจะได้รับอิทธิพลแรงเสียดทานจากบริเวณท้องน้ำ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดจะเกิดที่ท้องน้ำและความเร็วสูงสุดจะเกิดบริเวณผิวน้ำ ดังนั้นความเร็วสูงสุดจึงขึ้นกับอัตราส่วนของความลึกของการไหลและความกว้าง (Y/b) ในทางน้ำที่มีความลึกเท่ากันแต่ความกว้างไม่เท่ากัน ทางน้ำที่แคบจะมีจุดที่ความเร็วสูงสุดอยู่ลึกกว่าในทางน้ำที่กว้าง

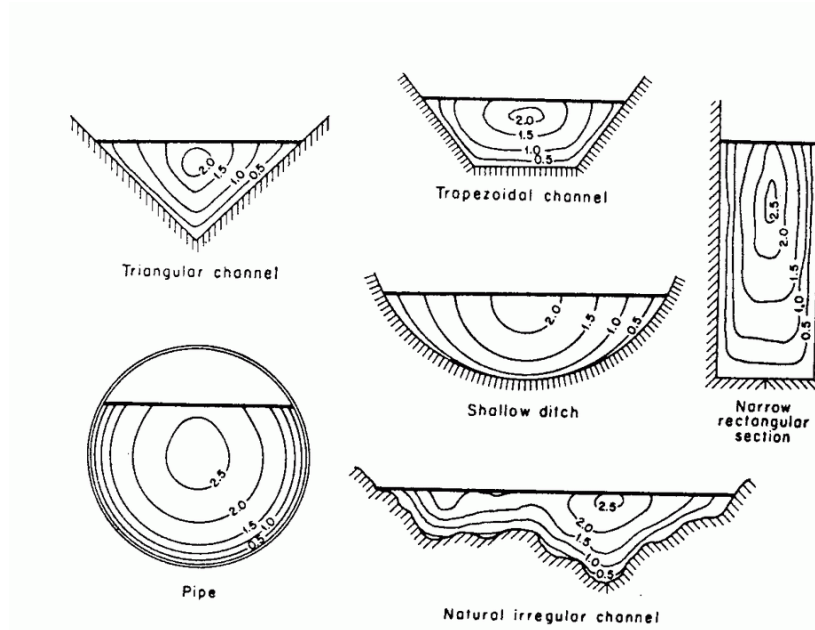


รูปแปลน แสดงการกระจายความเร็วของการไหล



รูปด้านข้าง แสดงการกระจายความเร็วตามความลึก

รูปที่ 2-21 การกระจายความเร็วของการไหลในทางน้ำเปิด



ที่มา : Open-Channel Hydraulics โดย Ven T. Chow

รูปที่ 2 - 22 ตัวอย่างการกระจายความเร็วในทางน้ำเปิดหน้าตัดแบบต่างๆ

2.6.5 ความเร็วเฉลี่ย (V_{av})

โดยทั่วไปแล้วจะคิดความเร็วเฉลี่ยของการไหลในทางน้ำที่ระยะ 0.6 ของความลึกการไหลที่วัดจากผิวน้ำ และในกรณีที่ทางน้ำลึกมาก ๆ การวัดความเร็วเฉลี่ยดังกล่าวจะวัดจากความเร็วที่ระยะความลึก 0.2 และ 0.8 จากผิวน้ำของความลึกการไหล

$$V_{av} = \frac{1}{2}(V_{0.2} + V_{0.8})$$

เมื่อ y = ความลึกของน้ำ

$V_{0.2}$ = ความเร็วเฉลี่ยที่ความลึก 0.2y จากผิวน้ำ

$V_{0.8}$ = ความเร็วเฉลี่ยที่ความลึก 0.8y จากผิวน้ำ

2.6.6 ความเร็วที่ผิวน้ำ (V_s)

ความเร็วที่ผิวน้ำจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วเฉลี่ยต่อไปนี้

$$V_{av} = kV_s$$

k = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล มีค่า 0.80 ถึง 0.95

2.6.7 การวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิด

1). การคำนวณโดยใช้สูตรคำนวณความเร็วของการไหลแบบ **Uniform** โดยทางน้ำช่วงนั้นต้องไม่มีอาคารควบคุมที่จะทำให้เกิดอิทธิพลต่อการไหลของน้ำในทางน้ำ วิธีการคำนวณได้แก่ การใช้สูตรของ Chezy, การประยุกต์ใช้สูตรของ Darcy-Weisbach, การใช้สูตรของ Manning เป็นต้น ซึ่งวิธีการคำนวณนี้เรียกว่า **Slope-Area Method** โดยสูตรของ Manning จะเป็นที่ยอมรับมากที่สุดเพราะใช้ง่ายกว่า

2). การใช้อุปกรณ์ เครื่องมือตรวจวัด กรณีไม่มีอาคารชลศาสตร์สร้างปิดกั้นทางน้ำเพื่อบังคับควบคุมปริมาณน้ำ การวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทางน้ำจะใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการวัดปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับขนาดของทางน้ำ หรืออัตราการไหลในทางน้ำนั้น อาจติดตั้งชั่วคราวหรือก่อสร้างเป็นอาคารชลศาสตร์ในทางน้ำเป็นการถาวร แต่มีหน้าที่หลักเพื่อการวัดปริมาณน้ำเท่านั้น ทั้งนี้รวมถึงการใช้สารเคมี สี ฯลฯ เพื่อตรวจวัดด้วย

3). การตรวจวัดทางอ้อมโดยใช้อาคารควบคุมในทางน้ำ กรณีมีอาคารชลศาสตร์สร้างปิดกั้นในทางน้ำ โดยอาคารนั้นทำหน้าที่บังคับควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทางน้ำ อันได้แก่ ฝาย ประตูระบาย ท่อระบาย ฯลฯ การวัดปริมาณน้ำจะวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารชลศาสตร์นั้นแทน

2.7 ขอบเขตของการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำ

คู่มือนี้ได้รวบรวมวิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำให้ครอบคลุมครบถ้วนมากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ โดยอาศัยการพิจารณาการแบ่งการไหลของน้ำตามหลักการทางชลศาสตร์ที่แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การไหลในทางน้ำเปิด (ทางน้ำ อาคารชลศาสตร์ รวมทั้งการไหลในท่อที่น้ำไหลไม่เต็มท่อ) และการไหลในท่อภายใต้แรงดัน (น้ำไหลเต็มท่อ)

2.7.1 การไหลในทางน้ำเปิด

ทางน้ำเปิดนั้นหมายถึงทางน้ำที่เป็นทางน้ำธรรมชาติ ทางน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น และอาคารชลศาสตร์ที่ประกอบอยู่ในทางน้ำนั้น รวมทั้งอาคารประเภทท่อที่มีการไหลแบบไม่เต็มท่อด้วย ซึ่งสามารถสรุปขอบเขตการตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำได้ต่อไปนี้

1). ทางน้ำธรรมชาติ ในแง่ของการวัดปริมาณน้ำโดยตรงจากทางน้ำจะหมายถึงเป็นทางน้ำช่วงที่มีการไหลของน้ำโดยอิสระเท่านั้น (ไม่ได้รับอิทธิพลจากสิ่งปิดกั้นทางน้ำ เช่น ทำนบดินหรือเขื่อน และอาคารชลศาสตร์ใด ๆ กล่าวคือไม่มีการควบคุมการไหลของน้ำ

1.1) แม่น้ำหรือทางน้ำธรรมชาติขนาดใหญ่ การตรวจวัดปริมาณน้ำทำโดยใช้เครื่องมือวัดกระแสน้ำวัดการไหลในทางน้ำที่ หรือวัดจากอาคารชลศาสตร์ที่ก่อสร้างปิดกั้นอยู่ในทางน้ำนั้น

1.1.1) การใช้เครื่องมือวัดกระแสน้ำ ตรวจวัดในจุดที่เหมาะสมที่รู้หน้าตัดทางน้ำ โดยอาจเป็นการตรวจวัดชั่วคราวในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง เพื่อเก็บข้อมูล ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทางน้ำนั้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป หรือใช้ตรวจวัดถาวรในเวลาที่ต้องการการต้องการรู้ปริมาณน้ำ เครื่องมือที่ใช้ทั่วไป ได้แก่

(1.1.1.1) Current Meter

(1.1.1.2) Acoustic velocity meters

(1.1.1.3) Acoustic Doppler velocity

(1.1.1.4) การใช้ทุ่นลอย

(1.1.1.5) วิธีการอื่นๆ เช่น การใช้สารเคมี การใช้สี การใช้อุปกรณ์

พิเศษ เป็นต้น

1.1.2) การตรวจวัดโดยอาคารชลศาสตร์ ที่สร้างไว้ในทางน้ำ ได้แก่

(1.1.2.1) Broad - crested weirs

(1.1.2.2) Long - throated flumes

(1.1.2.3) Short - crested weirs

(1.1.2.4) Short - throated flumes

1.1.3) การใช้ค่าความสัมพันธ์ของ ระดับน้ำและปริมาณน้ำ (Stage-discharge relation) เป็นการนำผลการตรวจวัดปริมาณน้ำเทียบกับระดับความลึกของน้ำมาใช้ประโยชน์

1.1.4) การคำนวณโดยวิธี Slope - area method

1.2) ทางน้ำขนาดกลางและขนาดเล็ก เช่น ลำห้วย ลำธาร

การตรวจวัดเป็นเช่นกรณีการวัดปริมาณน้ำในแม่น้ำหรือทางน้ำขนาดใหญ่ที่กล่าวข้างต้น

2) ทางน้ำที่สร้างขึ้น หรือทางน้ำที่มีการควบคุมปริมาณน้ำ (ถ้ามีอาคารควบคุมปริมาณน้ำ โดยปกติแล้วมักตรวจวัดปริมาณน้ำที่อาคารนั้น)

2.1) วัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารชลศาสตร์ที่ปิดกั้นทางน้ำที่ห้วงงาน เช่น มีการก่อสร้างฝายทดน้ำ ฝายระบายน้ำ อ่างเก็บน้ำหรือเขื่อน ประตูระบาย ฯลฯ ปิดกั้นทางน้ำ การตรวจวัดปริมาณน้ำจะวัดในลำน้ำโดยตรงดังกรณีที่กำลังกล่าวตามข้อ 1 ไม่ได้ เพราะสิ่งปิดกั้นจะมีอิทธิพลต่อการไหลของน้ำ จึงต้องวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายหรือทางระบายน้ำล้น หรือประตูระบาย แทน ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็น

2.1.1) อาคารมีบานระบายควบคุม เช่น บานตรงและบานโค้ง เป็นต้น

2.1.2) อาคารไม่มีบานระบายควบคุม

2.2) คลองขนาดใหญ่

2.2.1) มีอาคารควบคุมที่ปากคลอง

(2.2.1.1) ประตูระบาย ควบคุมด้วยบานตรงหรือ บานโค้ง

(2.2.1.2) ท่อระบายน้ำปากคลอง

2.2.2) ไม่มีอาคารควบคุมที่ปากคลอง

กรณีไม่มีอาคารควบคุม จะวัดปริมาณน้ำเช่นกรณีการวัดในทางน้ำธรรมชาติ นิยมวัดด้วย Broad - crested weirs, Long - throated flumes, Short - throated flumes และ Acoustic velocity meters เป็นต้น

2.3) คลองขนาดเล็ก รวมทั้งการไหลในท่อแบบไม่เต็มท่อ

คุณสมบัติและการตรวจวัดจะคล้ายกรณีคลองขนาดใหญ่ โดยอาจมีอาคารควบคุมเพิ่มเติม เป็น *Constant Head Orifice: CHO* และมักนิยมใช้ *ฝายสันคม (Sharp - crested weirs)* ในการวัดน้ำด้วย

2.4) คูน้ำ

2.4.1) มีอาคารควบคุม วัดน้ำผ่านอาคารควบคุม อาจเป็นท่อส่งน้ำเข้านา หรือ *Constant Head Orifice: CHO*

2.4.2) ไม่มีอาคารควบคุม มักวัดปริมาณน้ำโดยใช้ *Current meters*, ฝายวัดน้ำ และ *Flume*

2.5) อาคารประเภทท่อหรือระบบท่อที่น้ำไหลไม่เต็มท่อ

หากจะตรวจวัดคำนวณก็ใช้รูปแบบใดรูปแบบหนึ่งของการตรวจวัดในทางน้ำเปิดที่กล่าวแล้วข้างต้นที่มีความเหมาะสมมาใช้ตรวจวัด คำนวณ

2.7.2 ระบบท่อปิด

อาคารท่อหรือระบบท่อในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเพื่อการชลประทานหรืองานโยธา ซึ่งได้แก่ ระบบท่อของสถานีสูบน้ำ ชลประทานระบบท่อ ท่อระบายน้ำ ท่อลอด กาลักน้ำหรือไซฟอน ฯลฯ โดยทั่วไปแล้วระบบท่อปิดจะออกแบบอาคารท่อหรือระบบท่อให้สามารถรองรับปริมาณน้ำสูงสุดเมื่อมีการไหลเป็นแบบเต็มท่อภายใต้แรงดันเสมอ แต่อย่างไรก็ตามมีบางสถานะที่ทำให้การไหลในท่อเป็นแบบการไหลไม่เต็มท่อในลักษณะการไหลในทางน้ำเปิดได้

อนึ่ง ในงานระบบท่อเพื่อการชลประทานหรืองานโยธาทั่วไปนั้น มักจะออกแบบให้ระบบท่อทำงานเต็มท่ในระดับที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดตามที่ได้ออกแบบไว้ เช่น ให้น้ำไหลเต็มท่อ หรือตามอัตราการสูบน้ำสูงสุดของเครื่องสูบน้ำ การควบคุมจึงมักเป็นเพียงการเปิดปิดระบบเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างกับการใช้งานระบบท่อในอุตสาหกรรมที่มักต้องมีการปรับแต่งหรือควบคุมปริมาณการไหลตามความต้องการอยู่เสมอ

1) ท่อขนาดใหญ่ มักตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือต่อไปนี้

- 1.1) Venturi meter
- 1.2) Orifice
- 1.3) Acoustic velocity meter

2) ท่อขนาดกลางและท่อขนาดเล็ก มักตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือต่อไปนี้

- 2.1) Venturi meter
- 2.2) Orifice
- 2.3) Current meter
- 2.4) Magnetic meter
- 2.5) Acoustic velocity meter
- 2.6) Pitot meter
- 2.7) Elbow meter
- 2.8) Trajectory method เช่น California pipe method
- 2.9) วิธีอื่นๆ เช่น การวัดทางอ้อมโดยวิธีวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิดโดยใช้เครื่องมือประเภทต่าง ๆ ที่เหมาะสม หลังจากปล่อยน้ำออกจากระบบท่ลงสู่ทางน้ำเปิดแล้ว

บทที่ 3

การวัดระดับน้ำ

3.1 ความสำคัญของการวัดระดับน้ำ

1) ระดับน้ำมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำในทางน้ำและไหลผ่านอาคารชลศาสตร์, สัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่เก็บกักในเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ ดังนั้นการวัดระดับน้ำที่ถูกต้องจะทำให้คำนวณปริมาณน้ำได้ถูกต้อง ซึ่งส่งผลให้การบริหารจัดการน้ำมีประสิทธิภาพ และเกิดประสิทธิผลสูงสุด ไม่เกิดความเสียหายจากการจัดการน้ำโดยการควบคุมปริมาณน้ำที่มากหรือน้อยเกินไป

2) ข้อมูลระดับน้ำที่บันทึกรวบรวมไว้สามารถใช้เพื่อการวางแผนบริหารจัดการน้ำ เพื่อการเตรียมการป้องกันภัยที่มีสาเหตุอันเนื่องมาจากน้ำได้ล่วงหน้า

3) ข้อมูลอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำที่ตรวจวัดในเวลาปัจจุบัน ใช้ทำนายช่วงเวลาที่จะเกิดน้ำท่วม และการลดลงของน้ำท่วมเพื่อการป้องกันและลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้

การวัดระดับน้ำนั้นเพื่อให้รู้ว่าพิกัดในขณะนั้นมีความลึกหรือมีระดับเท่าใดเมื่อเทียบกับระดับอ้างอิง การเปรียบเทียบค่าผลของการตรวจวัดที่เวลาต่างๆ กัน จะทำให้รู้การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่จุดนั้น โดยทั่วไปแล้วการวัดระดับน้ำจะตรวจวัดในทางน้ำ วัดที่อาคารชลศาสตร์ทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ นอกจากนี้ยังรวมถึงการวัดระดับน้ำใต้ดินจากท่อวัดน้ำใต้ดิน ที่ใช้เป็นข้อมูลประกอบการส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูกด้วย

3.2 การเลือกตำแหน่งวัดระดับน้ำหรือติดตั้งสถานีวัดระดับน้ำ

การเลือกจุดที่ตั้งสถานีวัดระดับน้ำหรือจุดติดตั้งเครื่องมือวัดระดับน้ำนั้น มีข้อพิจารณาดังนี้

1) กรณีทางน้ำเปิดทั่วไป เช่น แม่น้ำ ห้วย คลอง ฯลฯ เลือกจุดที่มีการไหลของน้ำแบบราบเรียบ (Steady flow) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีลักษณะต่อไปนี้

1.1) เป็นบริเวณที่ทางน้ำมีลักษณะเป็นแนวตรง โดยระยะแนวตรงกำหนดให้มากกว่า 5 เท่าของความกว้างของทางน้ำ ในทางน้ำขนาดใหญ่ทั่วไปมักกำหนดให้มีแนวตรงจากจุดวัดน้ำไปด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำด้าน อย่างน้อยด้านละ 100 ม.

1.2) ไม่มีลำสาขา คลองส่งน้ำ ท่อส่งน้ำที่ระบายน้ำ และอาคารหรือสิ่งปิดกั้นในทางน้ำบริเวณนั้น ที่จะทำให้น้ำไหลเข้ามาหรือไหลออกไปจากทางน้ำ ที่ทำให้เกิดอิทธิพลต่อระดับน้ำที่จะตรวจวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงกะทันหัน

1.3) มีหน้าตัดทางน้ำค่อนข้างสมมาตร โดยหน้าตัดควรเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรือ Parabola ตัวทางน้ำและตลิ่งมีความมั่นคง มีการกัดเซาะน้อย

1.4) เป็นจุดที่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้สะดวก และไม่เกิดน้ำท่วมตลิ่งในฤดูน้ำหลาก

1.5) ความลาดชันของทางน้ำสม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดการตกจมของตะกอนได้ง่าย

2) กรณีเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ อาคารชลศาสตร์ และอาคารวัดน้ำ จุดวัดน้ำทั้งด้านเหนือน้ำ และด้านท้ายน้ำต้องตั้งอยู่พ้นจากอิทธิพลของอาคารชลศาสตร์ หรือตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้สำหรับอาคารแต่ละประเภท โดยต้องเป็นจุดที่สะดวกในการตรวจวัด และสามารถตรวจวัดได้ครอบคลุมทุกช่วงความลึก

3.3 ระดับอ้างอิง

การวัดระดับน้ำนั้นเป็นการตรวจวัดระดับที่ผิวน้ำ และเพื่อให้ข้อมูลผลการตรวจวัดสามารถสื่อสารไปยังผู้รับข้อมูลให้เข้าใจง่าย จึงมักบันทึกค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงเสมอ โดยการแสดงค่าระดับน้ำนั้นจะแสดงได้ 2 แบบคือ

1) การแสดงเป็นค่าระดับ ส่วนใหญ่มักเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง: รทก. (Mean Sea Level: MSL) แต่หากไม่สามารถโยงระดับจากหุมระดับที่เป็นระดับ รทก. มาได้ ก็จะใช้ระดับที่ใกล้เคียงกับระดับ รทก. ที่สุด เรียกระดับสมมุติ (รสม.) โดยการพิจารณาจากแผนที่มาตราส่วน 1 : 50,000 แล้วปักหมุดที่จะใช้อ้างอิงในตำแหน่งที่มีความมั่นคง หรืออาจใช้ระดับใดๆ ของอาคารเป็นระดับอ้างอิง การวัดแบบนี้การอ่านค่าจึงต้องอ่านเป็นค่าที่เทียบกับระดับ รทก. หรือ รสม.

2) การแสดงค่าเป็นความลึก จะเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงซึ่งเป็นระดับที่ต่ำที่สุด หรือระดับที่จะมีความสัมพันธ์กับการวัดอัตราการไหลของน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ที่ทำให้อัตราการไหลเท่ากับศูนย์ เช่น ความลึกน้ำในคลองจะเทียบความลึกกับก้นคลอง ความลึกน้ำผ่านฝายหรือทางระบายน้ำล้นจะเทียบกับระดับสันฝายหรือทางระบายน้ำล้น และกรณีเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำจะเทียบความลึกกับระดับธรณีท่อส่งน้ำตัวที่ต่ำที่สุด เป็นต้น

3.4 ประเภทของเครื่องวัดระดับน้ำ

การวัดระดับน้ำนั้นเริ่มต้นมาจากการใช้ไม้หยั่งวัดโดยตรงซึ่งไม่สะดวกและมีความผิดพลาดได้มาก ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการและเครื่องมือในการตรวจวัดขึ้น โดยอาจแบ่งเครื่องมือวัดระดับน้ำได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องวัดระดับน้ำแบบไม่มีการบันทึก และเครื่องวัดระดับน้ำแบบมีการบันทึก

3.4.1 เครื่องวัดระดับน้ำแบบไม่มีการบันทึก

ผู้ตรวจวัดต้องใช้เครื่องมือทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลเอง มีหลายชนิดได้แก่

3.4.1.1 แผ่นวัดระดับน้ำ แบ่งเป็น 2 ชนิดย่อย คือ แผ่นวัดระดับน้ำแนวตั้ง และแผ่นวัดระดับน้ำแนวลาด

1) แผ่นวัดระดับน้ำแนวตั้ง (Vertical staff gage) ทำด้วยแผ่นโลหะหรือแผ่นเหล็กเคลือบขาวแผ่นละ 1.00 ม. กว้าง 15 ซม. แบ่ง Scale ทุก ๆ 1 หรือ 2 ซม. โดย Scale อาจอยู่ด้านเดียวกันหรือสลับข้างกันทุก 10 ซม. เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าอาจติดแผ่นตัวเลขซึ่งมีขนาด 2.5 ซม. x 5 ซม.

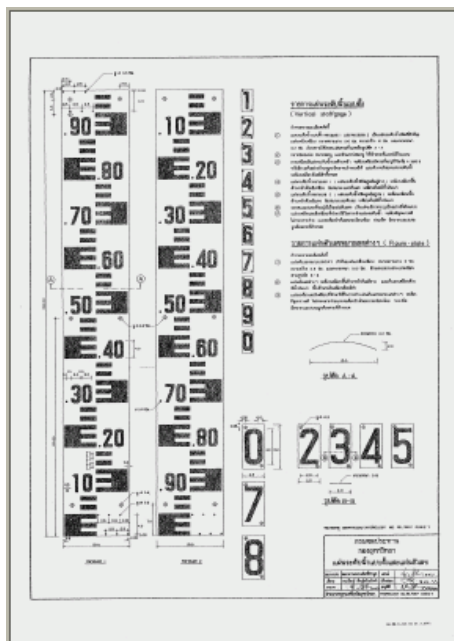
การติดตั้งแผ่นวัดระดับน้ำจะติดตั้งกับเสาที่มีความมั่นคงไม่เกิดการทรุดตัวได้ง่าย ถ้าช่วงความลึกของน้ำมีมากเกินไปจะติดตั้งและอ่านค่าจากเสาต้นเดียวได้สะดวก จะติดตั้งบนเสาที่ปักลงหล่นกันไป โดยความสูงของเสาหรือจำนวนแผ่นวัดระดับน้ำที่ติดตั้งแต่ละเสาตลอดจนจำนวนเสาที่ติดตั้งจะขึ้นกับความลาดชันของรูปร่างหน้าตัดทางน้ำ โดยระดับสูงสุดของแผ่นระดับของเสาต้นที่อยู่ต่ำจะต่ำกว่าระดับให้เท่ากับระดับที่ต่ำที่สุดของเสาต้นที่อยู่สูงกว่า ทำให้การวัดระดับทำได้ต่อเนื่อง

การติดตั้งเสาวัดระดับน้ำนั้นจะติดตั้งเป็นการถาวรตรงจุดที่ต้องวัดระดับน้ำเป็นประจำเพื่อเก็บสถิติข้อมูลมาประกอบการวิเคราะห์ทางอุทกวิทยา และติดตั้งชั่วคราวในบางแห่งหากต้องการวัดระดับน้ำบางช่วงเวลา เช่น วัดระดับน้ำในทางน้ำในฤดูน้ำหลากตรงบริเวณที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดน้ำท่วมเพื่อใช้เป็นแนวทางการพิจารณาในการแก้ปัญหาน้ำท่วมเป็นต้น

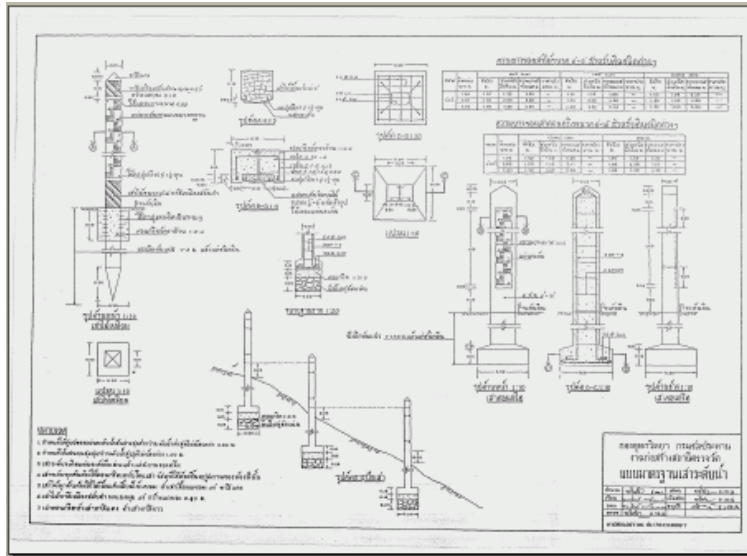


การวัดระดับน้ำในประเทศไทยเท่าที่มีหลักฐานปรากฏนั้น มีการติดตั้งเสาวัดระดับน้ำเพื่อวัดระดับน้ำสูงสุดในแม่น้ำเจ้าพระยา ในสมัยรัชกาลที่ 3 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2375 เป็นต้นมา

รูปที่ 3-1 เสาหินวัดระดับน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา



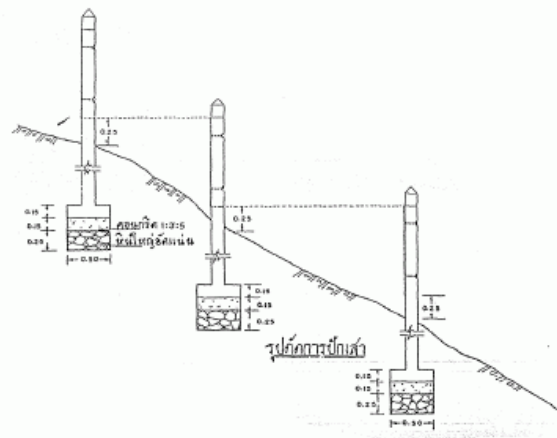
รูปที่ 3-2 แบบมาตรฐานกรมชลประทาน แผ่นระดับน้ำแนวตั้งและแผ่นตัวเลข



รูปที่ 3-3 แบบมาตรฐานเสา
วัดระดับน้ำ กรม

ชลประทาน

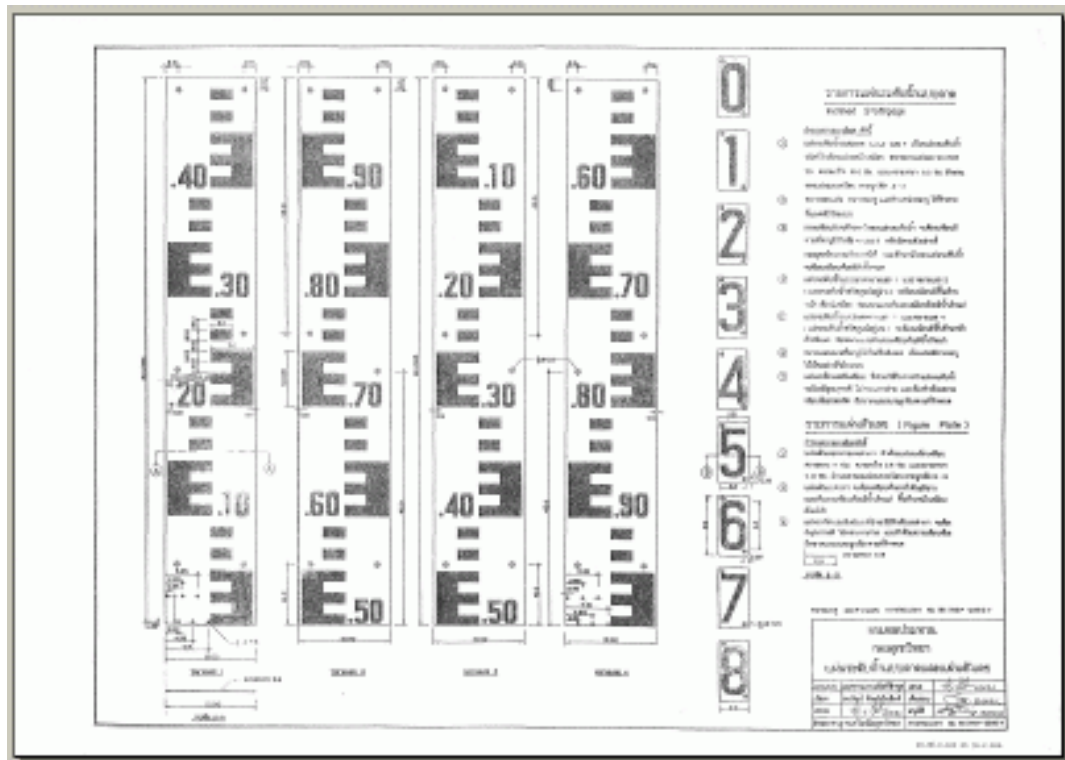
HYDROLOGY No.03612y



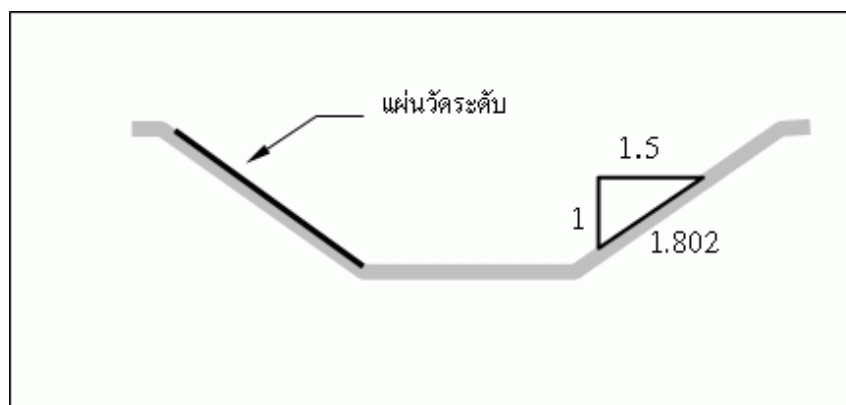
รูปที่ 3-4 รูปขยายแสดงการติดตั้งแผ่นระดับน้ำ
บนเสาวัดระดับน้ำที่ใช้อ่านระดับน้ำต่อเนื่องกัน

2) แผ่นวัดระดับน้ำแนวลาด (Slope gage) มักใช้ติดตั้งเพื่อวัดระดับน้ำในทางน้ำ เช่น คลองคาคอนกรีตที่หน้าตัดมักมีความลาดเอียง 1: 1.5 โดยจะติดตั้งกับลาดข้างของคอนกรีตคาคอนกรีตทำให้ไม่กีดขวางการไหลของน้ำ โดยจะวางต่อกันให้ระดับต่ำสุดเป็นระดับกันคลอง แผ่นวัดระดับแบบแนวลาดนี้มีลักษณะคล้ายกับแผ่นวัดระดับน้ำแบบแนวตั้ง แต่จะแปลง Scale จากแนวตั้งมาเป็นแนวลาด กรณีความลาดเอียง 1: 1.5 ระยะ 1 ซม. บนแผ่นระดับแนวลาดจะถูกขยายออกเป็น 1.802 ซม. เมื่อเทียบกับระยะ Scale แนวตั้ง ค่าที่อ่านได้จากแผ่นระดับน้ำแนวลาดจะเป็นตัวแทนของค่าระดับน้ำในแนวตั้งไม่ต้องแปลงค่าใด ๆ อีก แผ่นวัดระดับน้ำแบบเอียง 1 แผ่นจะวัดระดับน้ำได้ประมาณ 0.50 เมตร (กรณีลาดเป็นอย่างอื่นก็ใช้แผ่นระดับน้ำที่มีค่า Scale ที่ตรงตามลาดนั้น)

การอ่านค่าจากแผ่นวัดระดับน้ำทั้งสองแบบ ในทางทฤษฎีจากลักษณะ **Scale** จะอ่านค่าได้ถึงทศนิยม 3 ตำแหน่ง แต่ในทางปฏิบัติจะอ่านเพียงทศนิยม 2 ตำแหน่งก็พอแล้ว และเนื่องจากการใช้คนอ่านระดับน้ำ ความถูกต้องจึงขึ้นกับทักษะความชำนาญแม่นยำของผู้อ่าน ตลอดจนความนิ่งของน้ำด้วย ทั้งนี้การอ่านระดับน้ำโดยคนนั้นนอกจากการอ่านโดยตรงที่จุดตรวจวัดแล้ว ยังอ่านจากกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ระบบโทรมาตรได้อีกด้วย



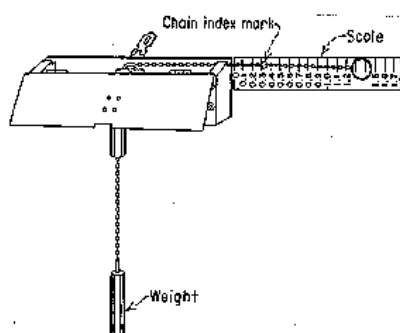
รูปที่ 3-5 แบบมาตรฐานกรมชลประทาน HYDROLOGY No.03613y
แผ่นระดับน้ำแบบลาดและแผ่นตัวเลข



รูปที่ 3-6 แสดงการติดตั้งแผ่นวัดระดับน้ำแนวลาด 1 : 1.5 ในคลอง

3.4.1.2 เครื่องวัดระดับน้ำแบบโซ่ (Chain gage)

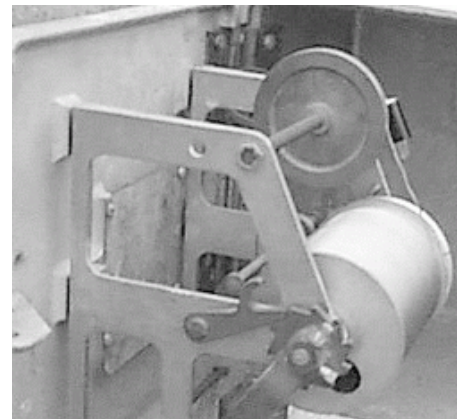
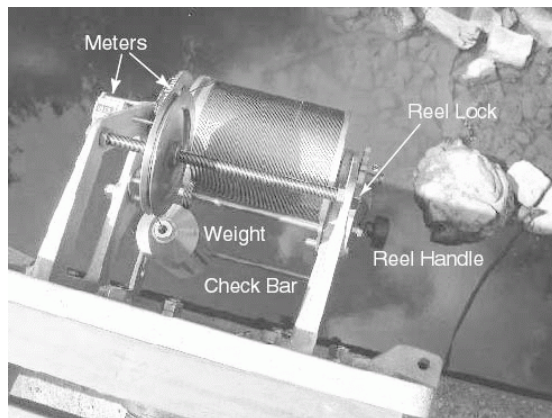
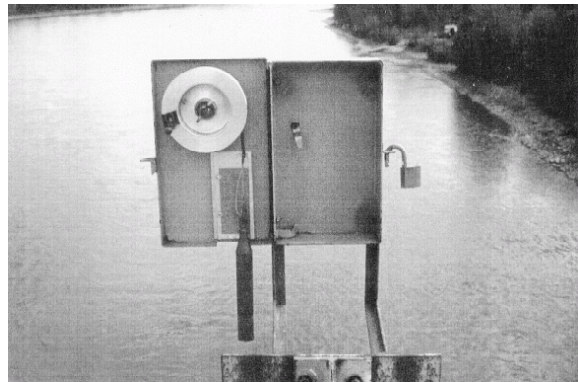
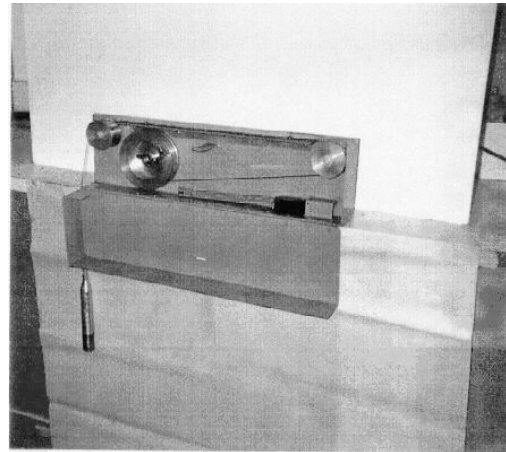
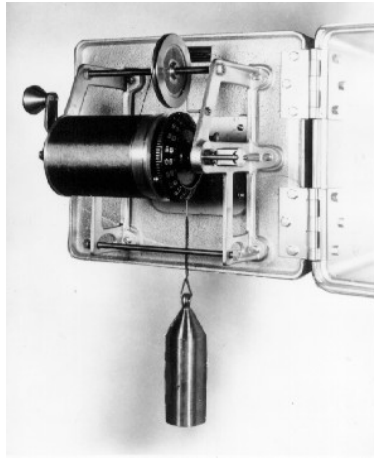
เป็นเครื่องวัดระดับน้ำยุคแรกที่ใช้แก้ปัญหามีข้อจำกัดในการใช้แผ่นวัดระดับน้ำ ที่ทำได้ไม่สะดวกหรือทำไม่ได้หากสภาพภูมิประเทศไม่เหมาะสมหรือช่วงความลึกของน้ำมีมาก โดยยุคนั้นมีการวัดระยะโดยใช้โซ่วัดระยะ (โดยโซ่ 1 เส้น = 100 ข้อม = 40 เมตร | 1 ข้อม = 10 ปอย = 40 ซม. | 1 ปอย = 10 ปวน = 4 ซม. | 1 ปวน = 4 มม.) เครื่องมือนี้จึงติดตั้งโซ่วัดระยะผ่านบนรอกโดยมีดัมน้ำหนักถ่วงติดไว้ที่ปลายโซ่ การวัดจะปล่อยโซ่ลงไปในน้ำจนปลายดัมน้ำหนักถ่วงสัมผัสผิวน้ำพอดี แล้วทำเครื่องหมายไว้บนข้อโซ่ให้ตรงกับตำแหน่งศูนย์ของ **Scale** ที่ตัวเครื่องมือ ซึ่งการติดตั้งเครื่องมือและการวัดครั้งแรกจะเทียบระยะที่วัดได้บนโซ่เทียบกับระดับอ้างอิงที่รู้ค่า เช่นระดับของอาคาร หรือระดับ รทก. ที่ได้โยงมาเป็นต้น และเมื่อวัดครั้งต่อไปโดยขยับโซ่ขึ้นหรือลงให้ปลายดัมน้ำหนักถ่วงสัมผัสผิวน้ำพอดี เทียบการเปลี่ยนแปลงระยะของโซ่จากตำแหน่งบนโซ่ที่ทำเครื่องหมายไว้ในครั้งก่อน จะได้ค่าระดับน้ำที่วัดในครั้งนี้แตกต่างจากการวัดในครั้งก่อนมากกว่าหรือน้อยกว่าซึ่งขึ้นกับว่าระดับน้ำเพิ่มหรือลด แล้วทำเครื่องหมายใหม่เพื่อเป็นตำแหน่งระดับน้ำขณะนั้นเพื่อจะใช้เปรียบเทียบกับครั้งต่อไปอีก ปัจจุบันเครื่องวัดระดับน้ำแบบโซ่ไม่มีใช้แล้ว



รูปที่ 3-7 เครื่องวัดระดับน้ำแบบโซ่

3.4.1.3 เครื่องวัดระดับน้ำแบบสายโลหะถ่วงน้ำหนัก (Wire weight gage)

เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหามีข้อจำกัดจากการวัดด้วยเครื่องวัดแบบโซ่ คือการอ่านระยะจากโซ่นั้นยาก มีปัญหาการเกิดความผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวจากการยืดตัวของห่วงโซ่ และการขยายหรือหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก การที่เครื่องวัดมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากหากต้องใช้โซ่ยาว ๆ จึงได้เปลี่ยนจากการใช้โซ่มาใช้สายโลหะหรือสลิงที่มีขนาดเล็กกว่า น้ำหนักเบาจึงติดตั้งให้มีความยาวมาก ๆ ได้ มีการยืดหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อย หลักการวัดนั้น จะวัดเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเช่นเดียวกับการวัดโดยเครื่องวัดระดับน้ำแบบโซ่ นอกจากนี้ยังมีรุ่นที่มีมิเตอร์วัดระยะอ่านค่าเป็นตัวเลขได้



รูปที่ 3-8 เครื่องวัดระดับน้ำแบบ Wire weight gage รูปแบบต่างๆ

เครื่องวัดระดับน้ำแบบนี้ต่อมาได้รับการพัฒนาโดยการนำวัสดุประเภทต่างๆ ที่มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้นมาใช้แทนสายโลหะ เช่น ใช้เทปวัดระยะโลหะ เทปวัดระยะไฟเบอร์ ฯลฯ (จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับชนิดของเครื่องมือวัดระยะในสมัยนั้นๆ) การที่สามารถอ่านค่าได้จากเทปโดยตรงทำให้การตรวจวัดสะดวกไม่ต้องทำเครื่องหมายเพื่อการเปรียบเทียบอีกต่อไป

3.4.1.4 Float - tape gage



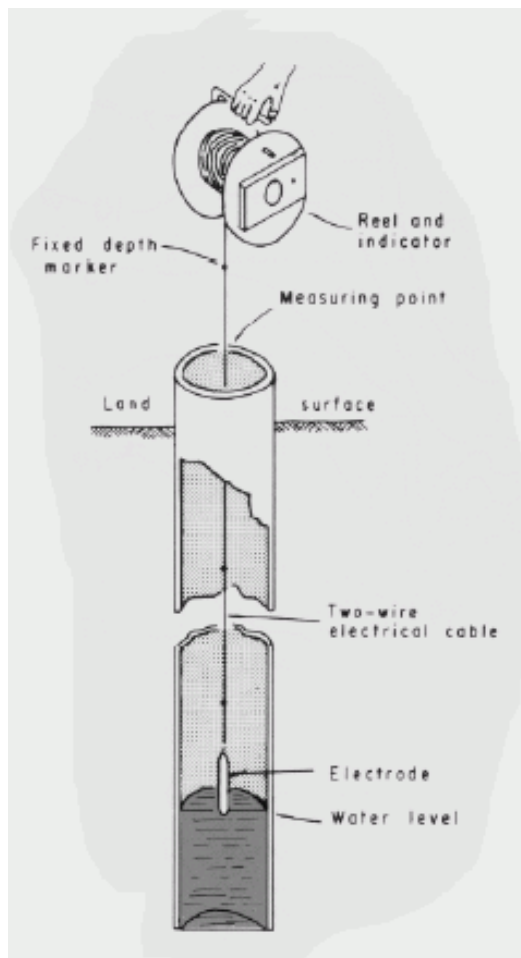
เครื่องวัดระดับน้ำประเภทนี้แก้ปัญหาความไม่สะดวกในการต้องคอยสังเกตปลายคัมน์น้ำหนักถ่วงของ Wire weight gage ว่าสัมผัสกับผิวน้ำหรือไม่ โดยพัฒนาให้มีลูกลอยที่ผูกติดกับเทปวัดระยะโลหะ และมีคัมน์น้ำหนักถ่วงที่ปลายอีกข้าง เส้นเทปจะคล้องอยู่บนรอกเพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ โดยตัวลูกลอยจะปล่อยให้ลอยอยู่บนผิวน้ำ ส่วนน้ำหนักถ่วงจะทำให้สายเทปโลหะที่คล้องผ่านรอกมีสภาพตึงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นจะดันลูกลอยยกสูงขึ้นทางด้านคัมน์น้ำหนักถ่วงก็จะลดระดับต่ำลง ในทางกลับกันเมื่อระดับน้ำลดลงน้ำหนักลูกลอยที่มากกว่าจะลดลงตามระดับน้ำ และจะดึงคัมน์น้ำหนักถ่วงให้ลอยสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจึงทำให้สายเทปโลหะเคลื่อนที่

ในการตรวจวัดจะอ่านค่าระยะจากเทปในตำแหน่ง Pointer บนเครื่องวัด เปรียบเทียบค่าจากการวัดครั้งนี้กับการวัดครั้งก่อน (หากติดตั้งเครื่องวัดได้เหมาะสมสัมพันธ์กับระดับอ้างอิงก็จะอ่านค่าเป็นความลึกในการวัดแต่ละครั้งได้ทันที)

รูปที่ 3-9 Float - tape gage

3.4.1.5 Electric - tape gage

เป็นเครื่องมือที่พัฒนาจากเครื่องวัดระดับน้ำแบบสายโลหะถ่วงน้ำหนัก ที่ต่อมาได้ใช้เทปวัดระยะแทนสายโลหะ มีการใช้ตัวเซ็นเซอร์ที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ติดที่ปลายน้ำหนัถ่วงหรือหัวหยั่ง เมื่อปลายหัวหยั่งสัมผัสผิวน้ำพอดีตัวเซ็นเซอร์จะต้องจรรยาให้ตัวแสดงสัญญาณทำงาน โดยอาจเป็นเสียง หลอดไฟหรือเข็มมิเตอร์ ไม่ต้องไปสังเกตว่าหัวหยั่งสัมผัสน้ำพอดีแล้วหรือไม่ ตัวเทปวัดความลึกอาจเป็นเทปวัดระยะที่ฝังสายสัญญาณไว้ในตัวเทปด้วย หรือเป็นสายเคเบิลพิเศษที่มีสายโลหะและสายสัญญาณรวมอยู่ในเส้นเดียวกัน ปลายข้างหนึ่งต่อหัวหยั่ง ปลายอีกข้างต่อตัวแสดงสัญญาณ โดยจะพิมพ์ Scale บอกระยะที่ตัวสายเคเบิลดังกล่าว เครื่องมือแบบนี้ทำให้การวัดทำได้สะดวกและถูกต้องมากยิ่งขึ้น



แสดงการหยั่งวัดระดับน้ำ



ตัวอย่างเครื่องวัดที่สายวัดเป็นเคเบิลพิเศษ
ที่มีสายสัญญาณและพิมพ์ Scale ที่สาย



ตัวอย่างเครื่องวัดที่สายวัดเป็นเทปวัดระยะที่มีสายสัญญาณฝังในตัว



รูปที่ 3-10 แสดงเครื่องวัดระดับน้ำแบบ Electric-tape gage และวิธีการตรวจวัด

3.4.2 เครื่องบันทึกระดับน้ำ (Water level recorder)

เป็นเครื่องวัดระดับน้ำที่จะบันทึกข้อมูลระดับน้ำในช่วงเวลาต่างๆ ทั้งแบบต่อเนื่องหรือตามเวลาที่กำหนด ไว้บนแถบกระดาษ หรือบันทึกในหน่วยความจำอิเล็กทรอนิกส์หรือในระบบคอมพิวเตอร์ได้โดยอัตโนมัติ ทำให้สามารถใช้แก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้เครื่องวัดระดับน้ำแบบไม่มีการบันทึกให้หมดไปได้ในเรื่อง การต้องใช้คนคอยตรวจวัดหรืออ่านบันทึกข้อมูล และหากระดับน้ำมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วมากต้องใช้ช่วงเวลากการตรวจวัดถี่มากขึ้น ทำให้ไม่สะดวกและอาจเกิดความผิดพลาดในการตรวจวัดช่วงเวลากลางคืน เป็นต้น

เครื่องวัดระดับน้ำแบบมีการบันทึกมีหลายแบบหลายชนิด อาจจัดแบ่งโดยอาศัยหลักการทำงานได้ต่อไปนี้

3.4.2.1 เครื่องบันทึกระดับน้ำแบบลูกลอย

1) Analog or graphic recorder

เครื่องวัดระดับน้ำประเภทนี้ มีลูกลอยที่ผูกด้วยสายโลหะหรือเทปโลหะ และมีคัมภ์น้ำหนักถ่วงที่ปลายอีกข้าง โดยตัวลูกลอยจะปล่อยให้ลอยอยู่บนผิวน้ำ ส่วนน้ำหนักถ่วงจะทำให้สายโลหะที่คล้องผ่านรอกที่มีความฝืดน้อยมากมีสภาพตึงอยู่ตลอดเวลา (คัมภ์น้ำหนักถ่วงจะมีน้ำหนักน้อยกว่าน้ำหนักลูกลอยที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเล็กน้อย ทำให้แรงกระทำจากน้ำหนัก 2 ข้างของสายโลหะค่อนข้างสมดุล)

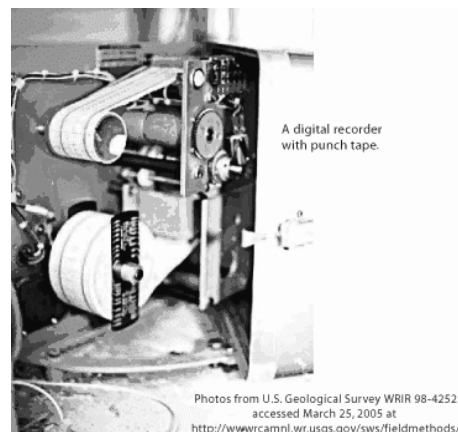
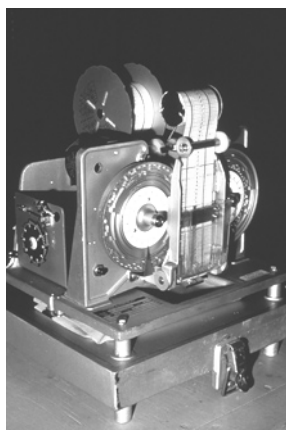
ดังนั้นเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นจะดันลูกลอยยกสูงขึ้นด้านคัมภ์น้ำหนักถ่วงก็จะลดต่ำลง ในทางกลับกันเมื่อระดับน้ำลดลงลูกลอยจะลดระดับลงตามระดับน้ำคัมภ์น้ำหนักถ่วงที่เบากว่าให้ยกตัวสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจึงทำให้สายโลหะเคลื่อนที่ไปและทำให้หมุนรอกที่เชื่อมต่อกับตัวบังคับแกนปากกาบันทึก อาจเป็นระบบเฟือง หรือ แกนทรงกระบอกที่มีร่องที่ใช้บังคับแกนของปากกาเมื่อทรงกระบอกหมุนไปทำให้ปากกาเกิดการเคลื่อนที่และเขียนบนแถบกระดาษที่มีลูกขับให้เลื่อนไปโดยระบบเฟืองของนาฬิกาที่อาจบันทึกได้หลายวัน มักออกแบบให้แกนปากกาเคลื่อนที่ต่อเนื่องในลักษณะกลับไปกลับมาตามแนวกระดาษที่ใช้บันทึก จึงทำให้ไม่ต้องใช้แถบกระดาษกว้างมาก และสามารถบันทึกระดับน้ำได้ต่อเนื่อง ตัวอย่างรูปแบบเครื่องวัดดังแสดงตามรูปที่ 3-11



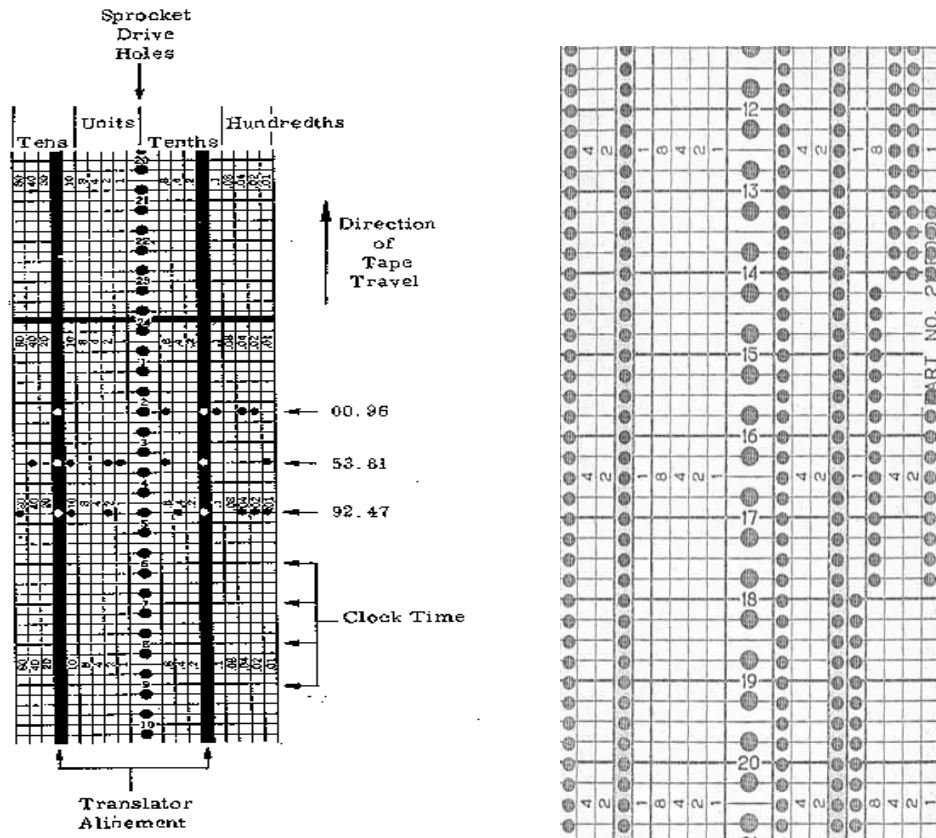
รูปที่ 3-11 เครื่องบันทึกกระดาษชนิดลูกกลอยแบบ Graphic recorder

2) Analog - to - digital recorder

จากข้อจำกัดของการบันทึกข้อมูลแบบกราฟิกมีหลายประการ เช่น ความสามารถในการบันทึกข้อมูลได้ในช่วงเวลาจำกัดตามความสามารถของนาฬิกาแบบไขลาน ลักษณะการบันทึกที่เมื่อสุดความกว้างของกระดาษด้านหนึ่งแล้วก็จะบันทึกวกกลับไปอีกด้านทำให้การอ่านข้อมูลไม่สะดวก เกิดความผิดพลาดเมื่อลานนาฬิกาใกล้หมด ปากกาบันทึกไม่ทำงานเพราะหมึกหมดหรือแห้ง จึงได้มีการคิดระบบการบันทึกเป็นตัวเลขขึ้นมาและให้เครื่องทำงานด้วยระบบไฟฟ้า ระบบของเครื่องยังคงใช้ลูกกลอยและรอกเช่นแบบ Analog or Graphic recorder แต่เปลี่ยนระบบบันทึกเป็นการบันทึกค่าแทนการใช้ปากกาเขียนเป็นลายเส้น เครื่องมียุคแรกยังไม่ได้บันทึกผลเป็นตัวเลขอย่างแท้จริง การบันทึกข้อมูลจะใช้วิธีการเจาะบัตร ซึ่งเป็นยุคเดียวกับการใช้เครื่องคำนวณและคอมพิวเตอร์ที่ป้อนข้อมูลโดยการเจาะบัตร เพราะสมัยนั้นระบบหน่วยความจำยังไม่มี สามารถกำหนดช่วงเวลาการบันทึกข้อมูลได้ การแปลผลทำโดยคนหรือใช้เครื่องแปลผลก็ได้



รูปที่ 3-12 Analog - to - digital recorder



รูปที่ 3-13 กระดาษบันทึกข้อมูลของ Analog - to - digital recorder

3) Digital recorder

3.1) เครื่องบันทึกระดับน้ำระบบ Digital แบบวัดน้ำทางตรง

เครื่องมือมีลักษณะคล้ายแบบ Float - tape gage แต่แสดงผลเป็นตัวเลขและบันทึกข้อมูลไว้ในหน่วยความจำของเครื่องโดยตรง



รูปที่ 3-14 Digital recorder แบบต่างๆ

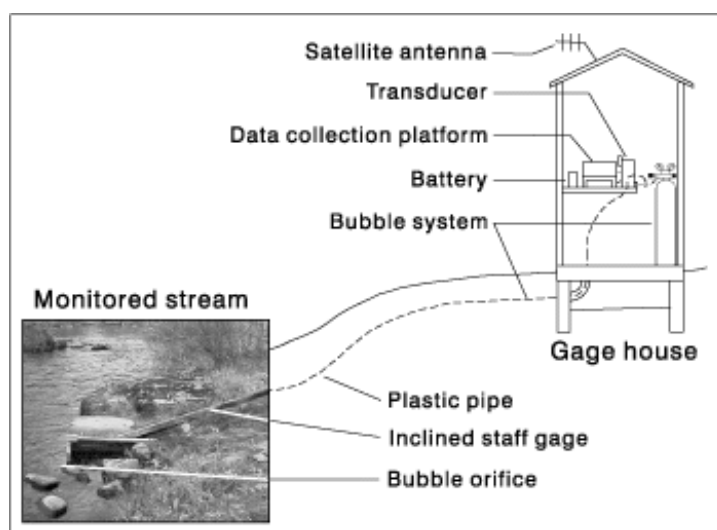
3.4.2.2 เครื่องบันทึกระดับน้ำระบบ Digital แบบวัดน้ำทางอ้อม (แบบไม่สัมผัสผิวน้ำ)

โดยการประยุกต์คุณสมบัติของน้ำบางด้าน เช่น การสะท้อนเสียง และแสง ความกดดันที่ระดับความลึกต่างๆ มาสร้าง Sensor วัดระดับน้ำรูปแบบต่าง ๆ ส่วนประกอบสำคัญคือ ตัว Sensor ที่เป็นตัวส่งสัญญาณและหรือรับสัญญาณ และเครื่องแปลงสัญญาณและบันทึกข้อมูล โดยสามารถต่อพ่วงกับระบบคอมพิวเตอร์ และสามารถติดตั้งกับระบบโทรมาตรส่งข้อมูลทางไกลโดยวิทยุหรือโทรศัพท์ได้ เครื่องมือประเภทนี้ได้แก่

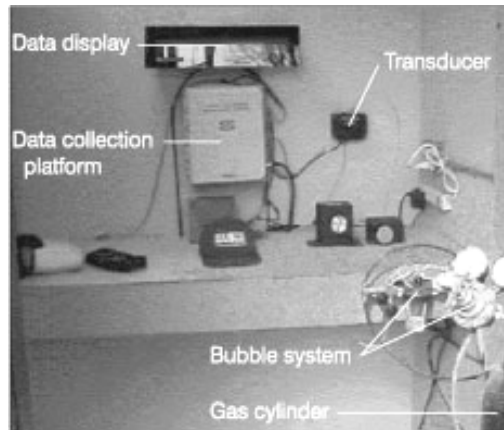
(1) เครื่องวัดแบบ Bubble gage

ในการวัดระดับน้ำโดยใช้ Staff gage, Chain gage และ Wire weight gage นั้น ต้องทำในระบบเปิดหรือที่โล่งตามธรรมชาติเพราะเราต้องอ่านค่าระดับหรือสังเกตตม้้น้ำหนักถ่วงสัมผัสผิวน้ำ ส่วนเครื่องมือประเภทอื่นๆ ต้องวัดในบ่อน้ำนิ่ง (Stilling well) ที่สร้างเป็นบ่อริมทางน้ำและมีท่อเล็กๆ ต่อเชื่อมให้น้ำจากทางน้ำไหลเข้ามาในบ่อดังกล่าวซึ่งจะทำให้ระดับน้ำในบ่อเป็นระดับที่เท่ากับในทางน้ำ (จะกล่าวในหัวข้อถัดไป) แต่ในบางพื้นที่ที่มีตะกอนไหลปนมากับน้ำมาก โอกาสที่จะเกิดการอุดตันหน้าท่อเล็กๆ ที่ต่อเข้ามาในบ่อวัดน้ำได้ จึงต้องใช้เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบใช้ฟองอากาศ (Bubble gage)

หลักการทำงาน เครื่องมือนี้จะปล่อยก๊าซในโตรเจนเป็นแรงดันผ่านท่อที่มีปลายเปิดใต้ผิวน้ำ การวัดความดันที่ปลายท่อที่ปล่อยฟองอากาศออกมาจะแปลงเป็นความสูงของน้ำโดยเครื่องบันทึกได้



รูปที่ 3-15 สถานีวัดระดับน้ำแบบ Bubble gage



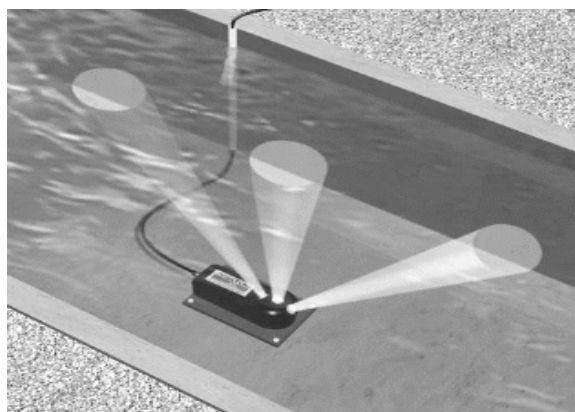
รูปที่ 3-16 อุปกรณ์ประกอบของ Bubble gage

(2) เครื่องวัดแบบหัววัดความดัน โดยใช้เซ็นเซอร์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน สำหรับหย่อนวัดเปรียบเทียบกับผิวน้ำกับระดับความลึกที่ทราบค่า



รูปที่ 3-17 Pressure sensor

(3) **Acoustic Doppler** เป็นเครื่องมือวัดความลึกของน้ำและสามารถวัดกระแสน้ำได้ด้วยในขณะเดียวกัน โดยใช้คลื่นความถี่สูง



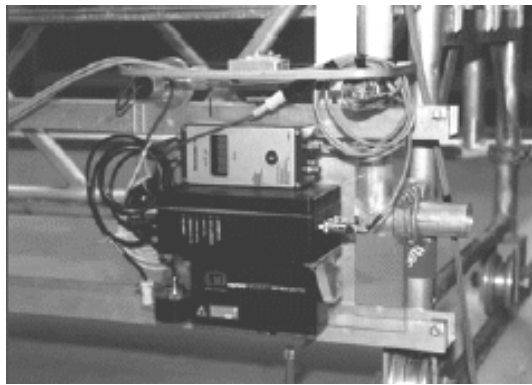
รูปที่ 3-18 การวัดระดับน้ำโดยใช้เครื่องวัดแบบ Acoustic Doppler

(4) เครื่องวัดแบบใช้ **Ultrasonic** เพื่อวัดระยะจากหัววัดถึงผิวน้ำ มีส่วนประกอบสำคัญคือ ตัว **Sensor** ที่เป็นตัวส่งและรับคลื่นในตัวเดียวกัน และเครื่องแปลสัญญาณและบันทึกข้อมูล

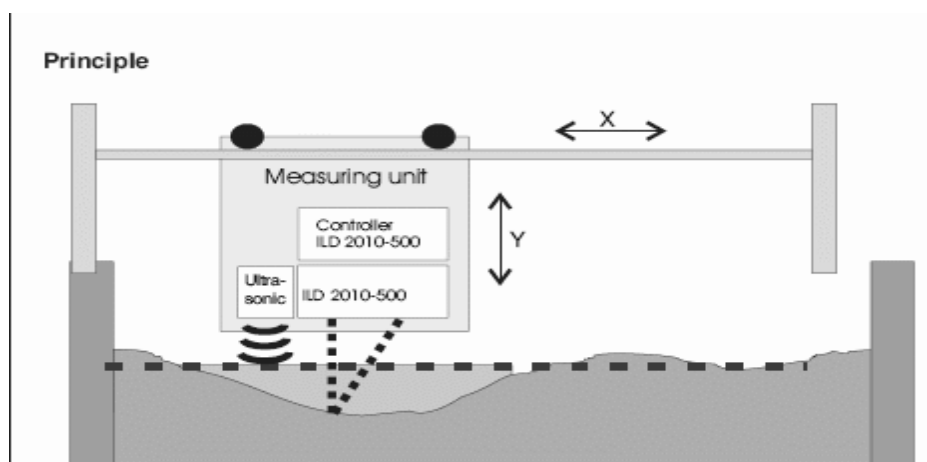


รูปที่ 3-19 หัววัดระดับน้ำ Ultrasonic และเครื่องบันทึกข้อมูล

(5) เครื่องวัดระบบ **Laser** เพื่อวัดระยะที่ห่างจากหัววัดถึงระดับท้องทางน้ำ หรือใช้ตัวสะท้อนแสงที่ผิวน้ำ หรือติดตั้งคู่กับเครื่องวัดแบบ **Ultrasonic** ก็จะสามารถวัดความลึกออกมาได้

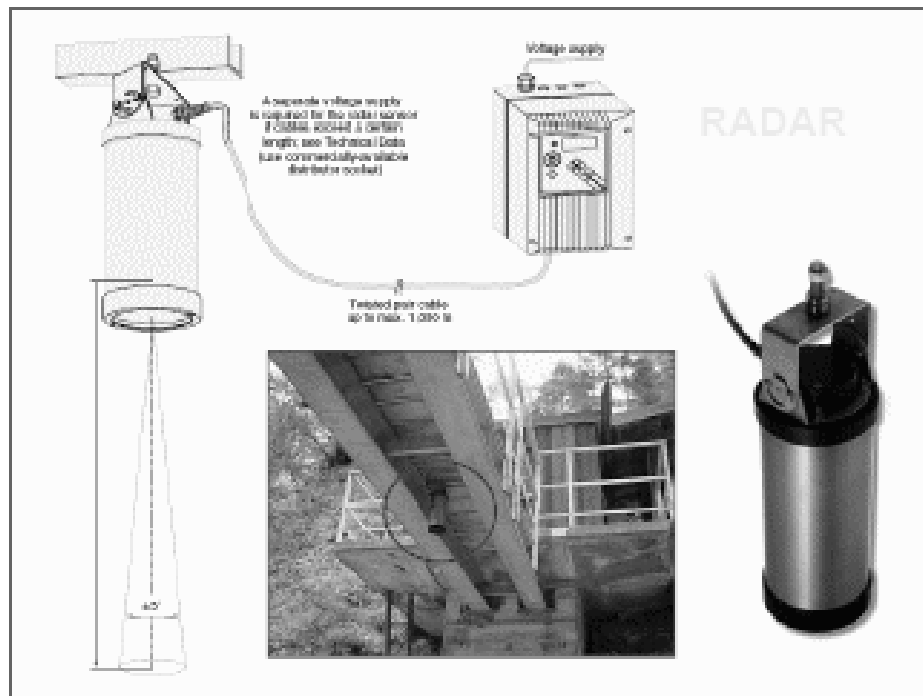


รูปที่ 3-20 เครื่องวัดระบบ Laser

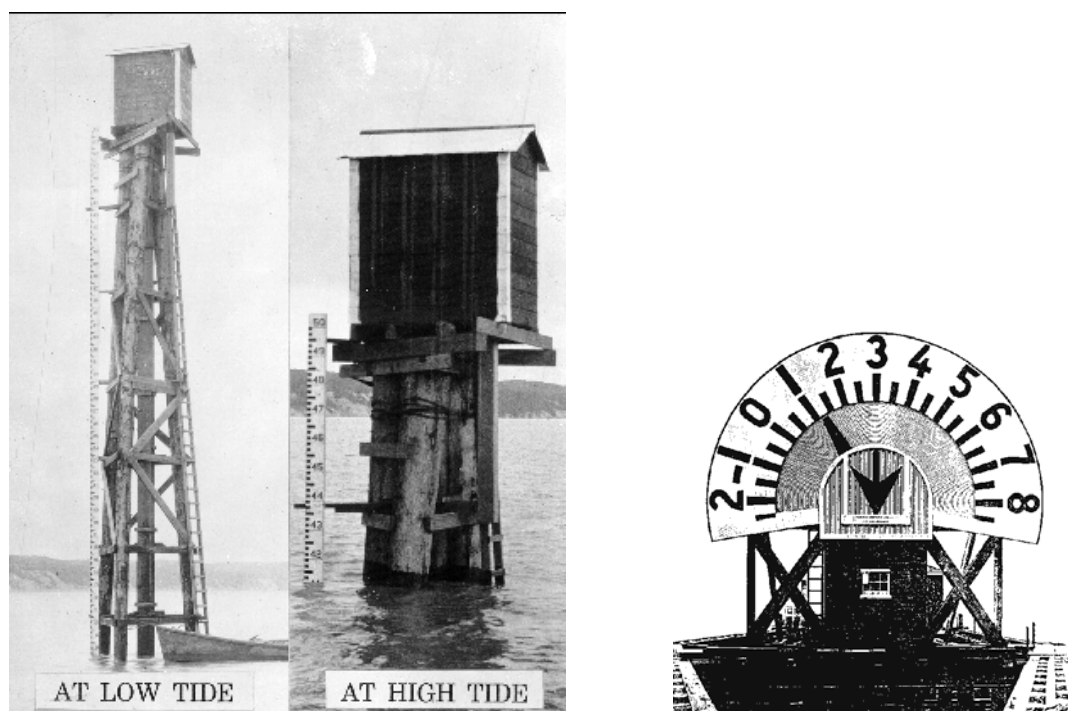


รูปที่ 3-21 การใช้เครื่องวัดระบบ Laser คู่กับระบบ Ultrasonic

(6) แบบหัววัด Radar



รูปที่ 3-22 การใช้ Radar ตรวจวัดระดับน้ำ



รูปที่ 3-23 เครื่องมือวัดระดับน้ำชุกนุกเบิก

3.5 บ่อน้ำนิ่ง (Stilling well)

การวัดระดับน้ำนั้นจะเกิดปัญหาที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวัดอันเนื่องมาจากสาเหตุต่อไปนี้

- 1) การมีกระแสน้ำไหลแรงทำให้เครื่องมือไม่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม
- 2) การมีคลื่นทำให้ผิวน้ำไม่นิ่ง
- 3) การมีขยะหรือวัชพืชลอยมากับน้ำมากทำให้ตรวจวัดลำบาก ฯลฯ

การตรวจวัดด้วยแผ่นวัดระดับน้ำอาจหลีกเลี่ยงปัญหาข้อ 2) และข้อ 3) ไม่ได้ แต่อาจป้องกันหรือแก้ปัญหาก็ได้โดยการสร้างตัวกำบังคลื่น และท่อกันขยะหรือวัชพืช ส่วนการใช้เครื่องมือวัดแบบอื่นๆ นั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมักสร้างบ่อน้ำนิ่งขึ้น การสร้างนั้นอาจสร้างในทางน้ำหรือสร้างบนตลิ่งใกล้ทางน้ำก็ได้ อาจสร้างจากวัสดุหลากหลายประเภท ส่วนขนาดของบ่อนั้นขึ้นกับสภาพการใช้งาน โดยพิจารณาจาก ขนาดและจำนวนอุปกรณ์ ตัวอาคารติดตั้งเครื่องมือต้องการสร้างเป็นที่พักชั่วคราวของเจ้าหน้าที่ด้วยหรือไม่ เป็นต้น

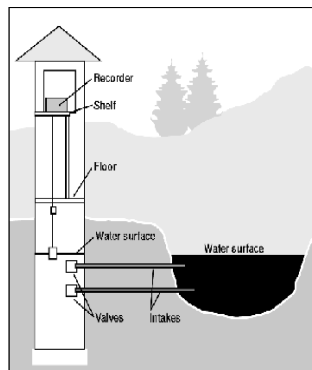
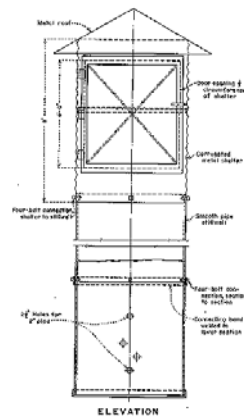
ลักษณะทั่วไปของบ่อน้ำนิ่ง จะมีส่วนประกอบ คือ

(1) ตัวบ่อน้ำ เป็นปล่องสี่เหลี่ยมหรือกลมในแนวดิ่ง ถ้าขนาดเล็กอาจใช้ท่อแทน โดยทั่วไปกันบ่อจะต่ำกว่าระดับน้ำต่ำสุดที่จะทำการวัดเล็กน้อย เพื่อเพื่อไว้สำหรับตะกอน

(2) ท่อชักน้ำเข้าบ่อ เป็นท่อเล็กๆ ที่ต่อจากตัวบ่อหรือปล่องหรือท่อ ออกไปยังทางน้ำในแนวราบเพื่อเป็นตัวรับน้ำเข้าตัวบ่อ โดยตำแหน่งที่วางท่อชักน้ำนี้จะอยู่ในแนวระดับที่ต่ำที่สุดที่ต้องการวัดระดับน้ำ และไม่เกิดผลกระทบจากการอุดตันของตะกอน อาจมีท่อเดียวหรือเพื่อไว้หลายท่อก็ได้ ถ้าตะกอนมีมากปลายท่อในทางน้ำจะต่อข้องอ 90 องศาให้ปลายหันไปด้านท้ายน้ำเพื่อกันตะกอนเข้าท่อ (ถ้าตัวบ่ออยู่ในทางน้ำจะไม่มีท่อนี้ แต่จะเจาะรูที่ตัวบ่อหรือท่อเพื่อรับน้ำแทน)

(3) ที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ จะตั้งอยู่บนตัวบ่อหรือปล่อง ถ้าเป็นบ่อขนาดเล็กจะมีลักษณะคล้ายตู้เพื่อใส่เครื่องมือวัด หากเครื่องมือขนาดใหญ่ หรือมีส่วนประกอบมาก อาจสร้างเป็นห้องเล็กๆ หรือสร้างเป็นสถานี

(4) สะพานทางเดิน เพื่อเข้าไปปฏิบัติงาน เมื่อสร้างบ่อน้ำนิ่งอยู่ในทางน้ำ

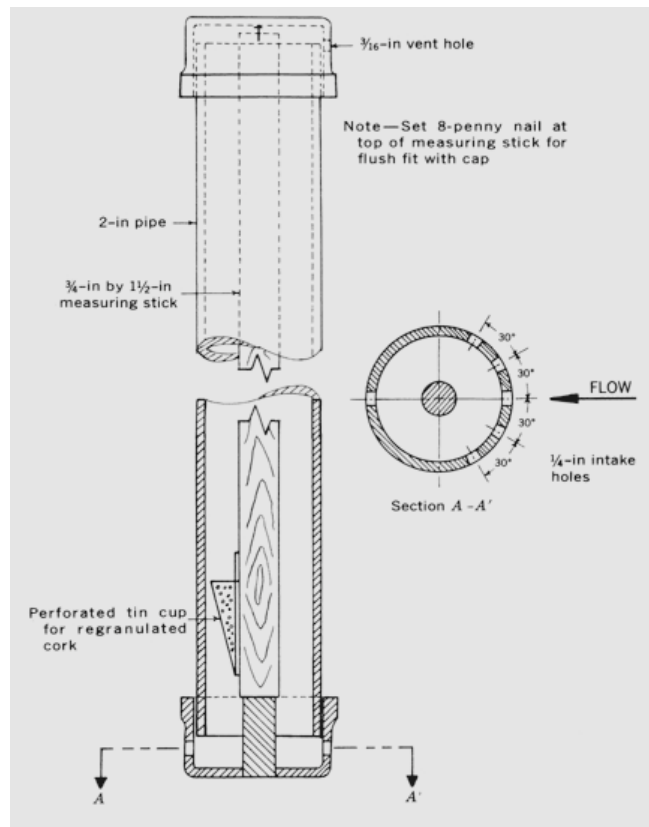


รูปที่ 3-24 แสดงตัวอย่างของบ่อน้ำนิ่ง และสถานีวัดระดับน้ำ

3.6 เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบอื่นๆ

3.6.1 เครื่องวัดระดับน้ำสูงสุด (Crest-stage gages)

การใช้เครื่องบันทึกกระดับน้ำจะอ่านระดับน้ำสูงสุดได้จากเส้นกราฟ หรือค่าตัวเลขที่เครื่องบันทึกไว้ แต่ก็ยังมีเครื่องมือที่ใช้วัดระดับน้ำสูงสุดโดยตรง โดยมีส่วนประกอบและหลักการทำงานง่ายๆ คือตัวเครื่องมือเป็นท่อที่เจาะรูไว้เพื่อให้ น้ำเข้าไปภายในท่อได้และทำให้ระดับน้ำในท่อกับภายนอกในทางน้ำเป็นระดับเดียวกัน ภายในท่อจะติดตั้งแผ่นวัดระดับเอาไว้ ปลายบนและล่างเป็นฝาครอบเพื่อที่จะใช้เปิดเพื่อนำแผ่นวัดระดับมาอ่านค่า หรือทำความสะอาดภายในได้ การตรวจวัดจะใส่ผงไม้ก๊อกลงไปในท่อ เอาท่อไปติดตั้งในทางน้ำตรงจุดตรวจวัด เทียบระดับของเครื่องมือกับระดับอ้างอิงเพื่อที่จะใช้อ้างอิงในการแสดงผล ผงไม้ก๊อกจะลอยอยู่ในน้ำในท่อ เมื่อน้ำลดระดับลงผงไม้ก๊อกจะติดอยู่กับผิวแผ่นวัดระดับ จึงสามารถอ่านค่าสูงสุดของระดับน้ำได้

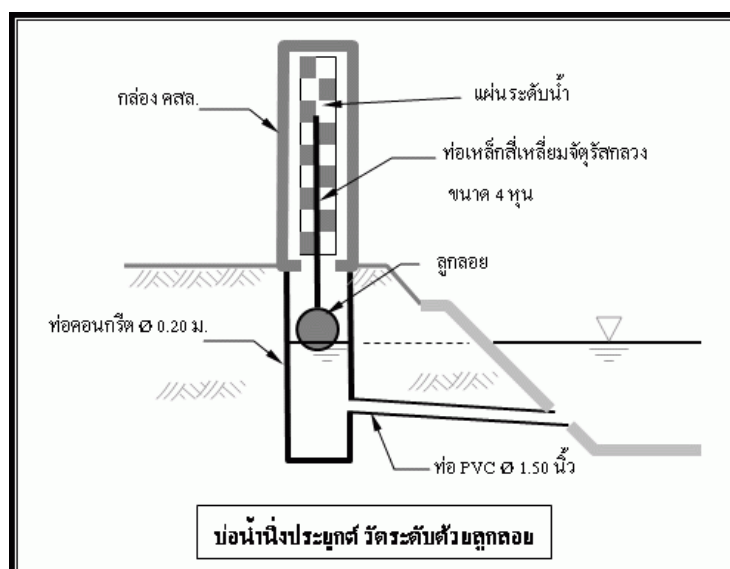


รูปที่ 3-25 เครื่องวัดระดับน้ำสูงสุด และลักษณะการติดตั้ง

3.6.2 เครื่องวัดระดับน้ำแบบลูกลอย

เมื่อรู้หลักการพื้นฐานของเครื่องวัดระดับน้ำและบ่อน้ำนิ่งแล้วก็สามารถประยุกต์ออกแบบและสร้างขึ้นใช้งานเองได้ ซึ่งมีกรณีตัวอย่างการประยุกต์ใช้คือ

ศิริชัย ศักดิ์ศิริโกศล ได้ออกแบบและสร้าง **บ่อน้ำนิ่งประยุกต์** เพื่อใช้วัดระดับน้ำในคลองส่งน้ำที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากำแพงแสน โดยใช้ท่อคอนกรีตที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20 เมตรเป็นตัวบ่อ และใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้วเป็นท่อชักน้ำเข้าบ่อ ตู้หรือกล่องเหนือปากบ่อน้ำนิ่งสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะเป็นกล่องทึบ เปิดด้านหน้าสำหรับติดตั้งแผ่นระดับน้ำ ช่องด้านในกว้าง 0.20 เมตร สูงประมาณ 1 – 2 เมตร ขึ้นกับความลึกของของน้ำที่จะวัด ด้านล่างเปิดช่องสำหรับเครื่องหยั่งวัด ที่ทำมาจากลูกลอยที่ใช้ควบคุมในถังน้ำที่ติดตั้งกับแกนท่อเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4 หุนสำหรับใช้เทียบวัดระดับ



รูปที่ 3-26 บ่อน้ำนิ่งประยุกต์

3.7 ต้องติดตั้งแผ่นวัดระดับน้ำไว้เสมอแม้จะใช้เครื่องมือวัดระดับน้ำประเภทอื่นแล้ว

แม้จะใช้เครื่องวัดระดับน้ำประเภทใดก็ตาม จำเป็นต้องติดตั้งแผ่นวัดระดับน้ำไว้ด้วยเสมอ เพื่อที่จะใช้สุ่มเช็คว่าการทำงานของเครื่องวัดนั้นยังคงมีความถูกต้องอยู่หรือไม่ อีกทั้งหากเครื่องมือวัดนั้นไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากสาเหตุเกิดการชำรุด หรือครบกำหนดการส่งไปตรวจเช็ค ก็จะสามารถใช้แผ่นระดับน้ำตรวจวัดระดับน้ำได้ต่อเนื่องกันไป

บทที่ 4

การตรวจวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิด

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการไหลในทางน้ำเปิดที่หมายถึงการไหลในทางน้ำ เช่น คลองส่งน้ำ คูน้ำ ลำธาร ห้วย แม่น้ำ ฯลฯ การไหลผ่านอาคารควบคุม รวมทั้งการไหลในอาคารประเภทท่อที่น้ำไหลไม่เต็มท่อด้วย

การตรวจวัดอัตราการไหลหรือปริมาณน้ำในทางน้ำเปิดนั้น มีสิ่งที่ต้องพิจารณาคัดสินใจคือ จะใช้เครื่องมืออะไรวัด และจะใช้วิธีการวัดอัตราการไหลอย่างไร ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการตรวจวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิดที่เป็นทางน้ำ ส่วนเครื่องมือวัดความเร็วการไหล และหลักการวัดของเครื่องมือแต่ละอย่างจะกล่าวในบทถัดไป

4.1 หลักการตรวจวัดและคำนวณอัตราการไหลด้วยวิธี Velocity-area method

การคำนวณอัตราการไหลของน้ำโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วการไหล มักใช้วิธี Velocity - area method ซึ่งมีหลักการคือ ตรวจวัดความเร็วของการไหลให้กระจายครอบคลุมทั่วทั้งหน้าตัดการไหลของทางน้ำ เพราะทางน้ำเปิดจะมีคุณสมบัติมีการกระจายความเร็วบนหน้าตัดการไหลตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน จึงต้องแบ่งการตรวจวัดคำนวณในพื้นที่หน้าตัดย่อยและวัดความเร็วการไหลที่ระดับความลึกต่างๆ กัน ผลรวมของอัตราการไหลของหน้าตัดย่อยจะเป็นค่าอัตราการไหลเฉลี่ยของทางน้ำนั้น

การคำนวณหาอัตราการไหล จากสมการการพื้นฐาน

$$Q = VA$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำผ่านหน้าตัดการไหล ($\text{ม.}^3 / \text{วินาที}$)

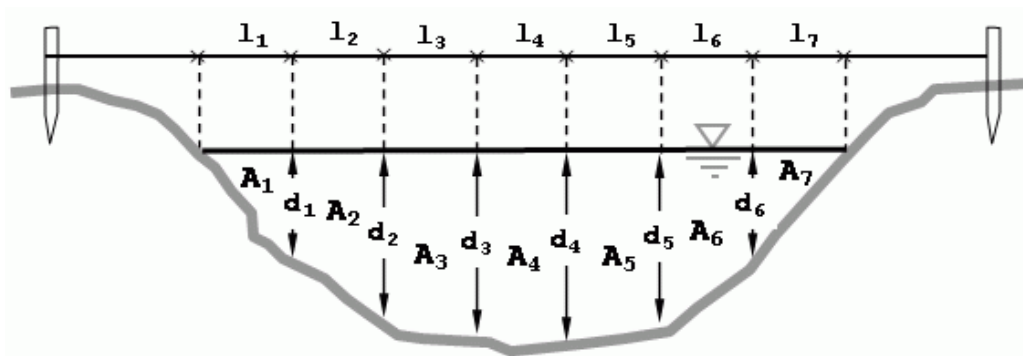
V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล ($\text{ม.} / \text{วินาที}$)

A = พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ (ม.^2)

- ความเร็วของการไหล (V) ได้จากการใช้เครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบต่างๆ ตามความเหมาะสม
- พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) ถ้าทางน้ำมีขนาดใหญ่ (กว้างและลึก) จะแบ่งพื้นที่หน้าตัดการไหลเป็นพื้นที่หน้าตัดย่อย เพื่อให้การตรวจวัดมีการกระจายอย่างทั่วถึงทั้งแนวราบและแนวดิ่งของหน้าตัดการไหลของทางน้ำ

4.2 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดการไหลย่อยของทางน้ำ

พิจารณารูปที่ 4-1 โดยทั่วไปแล้ววิธีการพื้นฐานในการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำธรรมชาติเป็นพื้นที่ย่อยนั้น ทำได้โดยการจึงเชือกขวางตั้งฉากกับทางน้ำเพื่อเป็นตัวกำหนดแนวแล้วแบ่งหน้าตัดเป็นส่วนย่อยระยะเท่าๆ กัน วัดความลึกที่ตำแหน่งที่แบ่งไว้ดังกล่าว แล้วคำนวณพื้นที่ย่อยแต่ละส่วนด้วยวิธีการคำนวณพื้นที่รูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 4-1 วิธีการหาพื้นที่หน้าตัดของน้ำในลำน้ำ

ข้อพิจารณาในการแบ่งพื้นที่หน้าตัดย่อย แสดงในตารางที่ 4-1 ความกว้างของแต่ละช่วงไม่ควรมากกว่า 10 % ของความกว้างทางน้ำ และความแตกต่างกันของแต่ละช่วงไม่ควรมากกว่า 4 %

ตารางที่ 4-1 เกณฑ์เบื้องต้นในการแบ่งพื้นที่หน้าตัดย่อยของหน้าตัดการไหล

ความกว้างของทางน้ำ (ม.)	จำนวนการแบ่งพื้นที่ย่อย (ช่วง)	ความกว้างมากที่สุดแต่ละช่วง (ม.)
< 15	15	1.50
15 - 90	15	6.00
90 - 150	15	15.00
> 150	25	พิจารณาจากความกว้างทางน้ำ

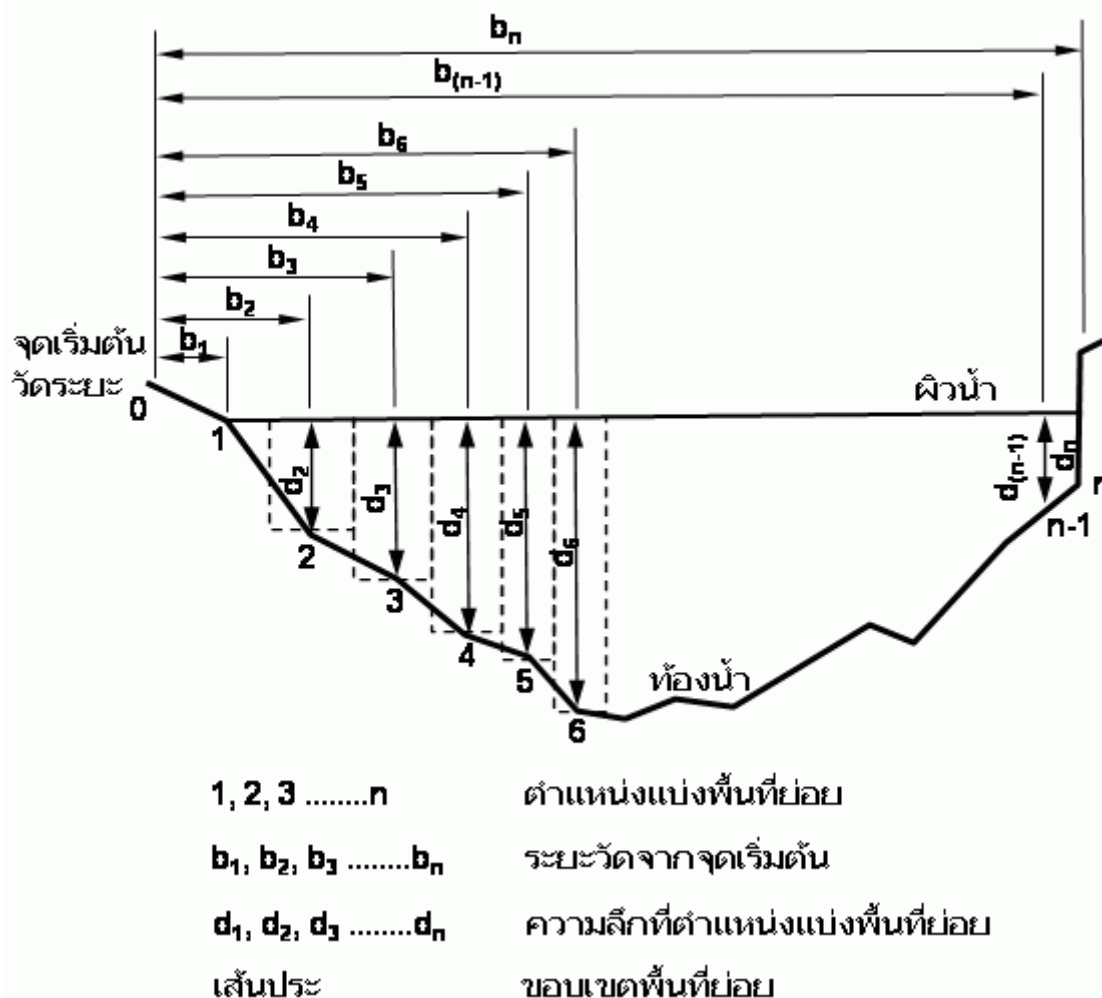
4.3 วิธีการคำนวณอัตราการไหลโดยวิธี Velocity-area method

Velocity - area method เป็นการการคำนวณปริมาณน้ำจากความเร็วการไหลที่ผ่านหน้าตัดการไหลย่อย มีวิธีการคำนวณหลายวิธี แต่ที่เป็นที่นิยมมักใช้ 2 วิธีต่อไปนี้ คือ วิธี Mid - section method และ วิธี Mean - section method

4.3.1 Mid - section method

เป็นวิธีการที่ใช้หลักการวัดความเร็วเฉลี่ยของการไหลในแนวดิ่งของพื้นที่หน้าตัดย่อย ที่กึ่งกลางของหน้าตัดย่อยนั้น ๆ อัตราการไหลของหน้าตัดการไหลของทางน้ำจึงเท่ากับ ผลรวมของความเร็วเฉลี่ยคูณพื้นที่หน้าตัดย่อยแต่ละหน้าตัดดังกล่าว

แต่ในทางปฏิบัติเมื่อเราแบ่งหน้าตัดย่อยเป็นส่วน ๆ และจะตรวจวัดหาความเร็วเฉลี่ยตรงแนวแบ่งนั้นเลยจะสะดวกและง่ายในการจดจำ แล้วหาค่าพื้นที่หน้าตัดย่อยจากกึ่งกลางของแนวแบ่งพื้นที่ย่อยดังกล่าวแทน จะได้พื้นที่การไหลย่อยที่มีลักษณะเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมวางเรียงกัน ในรูปที่ 4-2 แสดงการแบ่งพื้นที่ย่อยในทางน้ำขนาดใหญ่ ที่วัดระยะจุดแบ่งจากจุดเริ่มต้นวัดระยะเดียวกันแล้วเพิ่มระยะออกไปเรื่อยๆ (เป็น $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$) ส่วนทางน้ำขนาดเล็กมักแบ่งพื้นที่ย่อยโดยทำเครื่องหมายบนเชือกที่ขึงไว้หรือไม้ที่พาดไว้เลย ดังแสดงในรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-2 การแบ่งหน้าตัดการไหลย่อยแบบ Mid - section method ในทางน้ำขนาดใหญ่

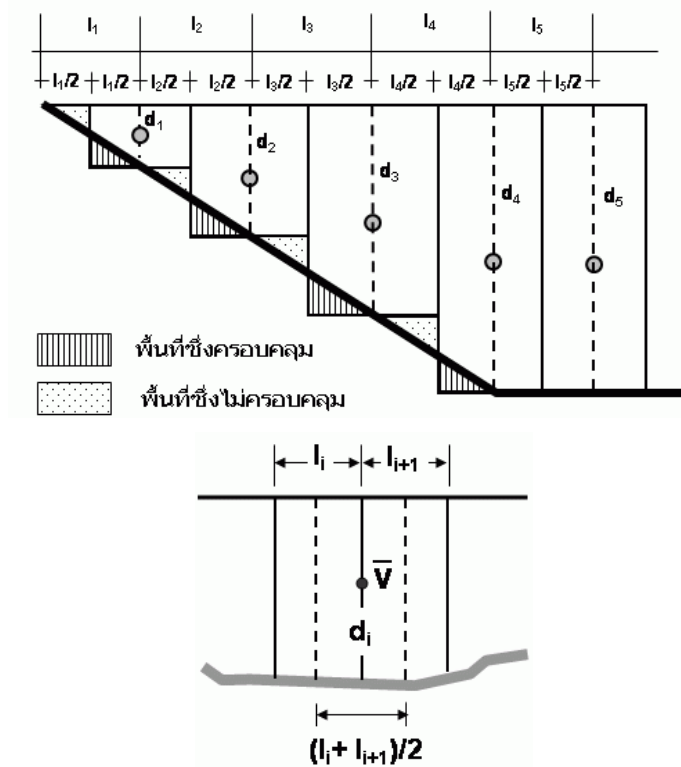
การคำนวณในทางน้ำขนาดใหญ่ ตามรูปที่ 4-2

$$Q_1 = \bar{V}_1 \left[\frac{b_2 - b_1}{2} \right] d_1$$

$$Q_n = \bar{V}_n \left[\frac{b_n - b_{(n-1)}}{2} \right] d_n$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i$$

พื้นที่ย่อยแบ่งด้วยแนวเส้นประ และเป็นแนวที่วัดความเร็วการไหลย่อย



รูปที่ 4-3 ลักษณะการแบ่งหน้าตัดการไหลย่อยแบบ Mid - section method ในทางน้ำขนาดเล็ก

ตัวอย่างการคำนวณในทางน้ำขนาดเล็ก ตามรูปที่ 4-3

พื้นที่หน้าตัดย่อย A_1 ของแนววัด d_1 : $Q_1 = d_1 \left(\frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2} \right) \bar{V}_1$

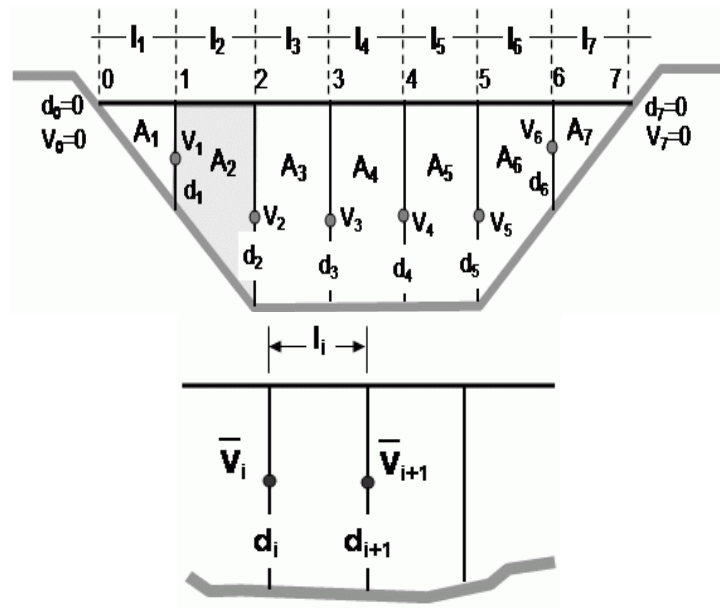
พื้นที่หน้าตัดย่อย A_2 ของแนววัด d_2 : $Q_2 = d_2 \left(\frac{l_2}{2} + \frac{l_3}{2} \right) \bar{V}_2$

พื้นที่หน้าตัดย่อย A_n ของแนววัด d_n : $Q_n = d_n \left(\frac{l_n}{2} + \frac{l_{n+1}}{2} \right) \bar{V}_n$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i$$

4.3.2 Mean - section method

เป็นวิธีการหาอัตราการไหลของน้ำในทางน้ำโดยแบ่งพื้นที่หน้าตัดย่อย และ ตรวจวัดค่าความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งแบ่งหน้าตัดย่อย ดังเช่นกรณี Mid - section method แต่ การคำนวณ ทั้งส่วนของพื้นที่หน้าตัด และความเร็วเฉลี่ย จะใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบพื้นฐานทั่วไป คือใช้ค่า 2 ค่ารวมกันแล้วหารด้วย 2



รูปที่ 4-4 การแบ่งหน้าตัดการไหลย่อยกรณี Mean - section method

อัตราการไหลที่หน้าตัดย่อยใดๆ = พื้นที่เฉลี่ยหน้าตัดย่อย x ความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดย่อย

พิจารณาตาม รูปที่ 4-4

Q_{A1} : อัตราการไหลที่หน้าตัด A_1

$$Q_{A1} = A_1 \cdot \bar{V}_{A1} = \left(\frac{(d_0 + d_1)}{2} \cdot l_1 \right) \cdot \left(\frac{\bar{V}_0 + \bar{V}_1}{2} \right) = \left(\frac{1}{2} d_1 \cdot l_1 \right) \cdot \bar{V}_1$$

$$Q_{A2} = A_2 \cdot \bar{V}_{A2} = \left(\frac{(d_1 + d_2)}{2} \cdot l_2 \right) \cdot \left(\frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2}{2} \right)$$

$$Q_{A7} = A_7 \cdot \bar{V}_{A7} = \left(\frac{(d_6 + d_7)}{2} \cdot l_7 \right) \cdot \left(\frac{\bar{V}_6 + \bar{V}_7}{2} \right) = \left(\frac{1}{2} d_6 \cdot l_6 \right) \cdot \bar{V}_6$$

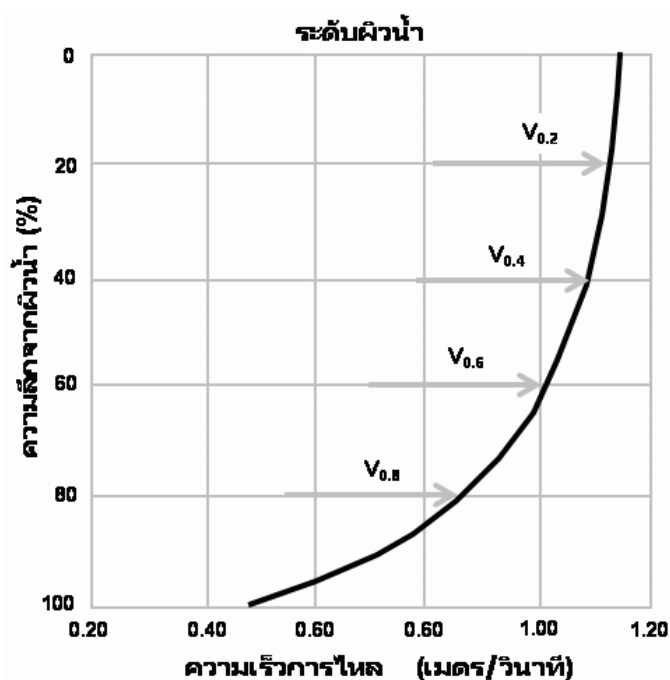
อัตราการไหลที่หน้าตัด A_n :

$$Q_{An} = A_n \cdot \bar{V}_{An} = \left(\frac{(d_n + d_{n+1})}{2} \cdot l_n \right) \cdot \left(\frac{\bar{V}_n + \bar{V}_{n+1}}{2} \right)$$

4.4 การวัดความเร็วเฉลี่ยการไหล (Mean velocity) : $\bar{V}$

ตามที่ทราบแล้วว่าการกระจายความเร็วการไหลในหน้าตัดการไหลของทางน้ำเปิดจะไม่เท่ากันทั้งหน้าตัด ในการวัดความเร็วการไหลจึงต้องแบ่งพื้นที่หน้าตัดเป็นพื้นที่ย่อยและวัดความเร็วการไหลในแนวตั้งที่ความลึกต่างๆ เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยการไหลของหน้าตัดย่อยนั้น จากผลการทดลองของนักชลศาสตร์พบว่า การกระจายความเร็วการไหลจะสัมพันธ์กับความกว้างและความลึกของน้ำในทางน้ำ โดยค่าเฉลี่ยความเร็วการไหลจะเกิดที่ประมาณ 0.6 ของความลึกวัดจากผิวน้ำ วิธีการวัดความเร็วการไหลมีหลายวิธีได้แก่ **Two-point method, Six-tenths method, Three-point method, Vertical velocity curve method, Subsurface method, Surface method, Two-tenths method, Five - Point Method, Six - Point Method, One - point continuous method or Depth integration method เป็นต้น โดย 3 วิธีแรก นิยมใช้มากที่สุด**

การจะเลือกวิธีการตรวจวัดความเร็วการไหลรูปแบบใด หรือที่ตำแหน่งความลึกใดบ้างนั้น ความเหมาะสมขึ้นกับลักษณะของทางน้ำ และชนิดเครื่องมือที่จะใช้ตรวจวัดด้วย



รูปที่ 4-5 ตัวอย่างการกระจายความเร็วการไหลตามความลึก

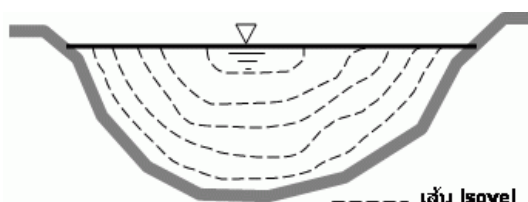
การกำหนดค่าตัวแปร

$\bar{V}$ = ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

$V_{0.2}, V_{0.4}, V_{0.6}, V_{0.8}$ = ความเร็วที่ความลึก 0.2d, 0.4d, 0.6d, 0.8d จากผิวน้ำ

1) Vertical velocity curve method

เป็นการตรวจวัดที่ระดับความลึกต่างๆ ของหน้าตัดย่อย เช่น ทุกระดับที่แบ่งจาก 0.1d (ตรวจวัดที่ระยะจากผิวน้ำที่ 0.1d, 0.2d, 0.3d, ..., 0.9d) เป็นต้น แล้วนำค่าความเร็วการไหลมา plot เป็นกราฟการกระจายความเร็วการไหลตามความลึก ดังรูปที่ 4-5 และ plot การกระจายความเร็วบนหน้าตัดการไหลเป็นเส้น Isovel หรือเส้นที่มีความเร็วเท่ากันทุกจุด ดังรูปที่ 4-6 ซึ่งจะมีประโยชน์ทำให้รู้รูปแบบการกระจายความเร็วของทางน้ำนั้น และใช้เปรียบเทียบการหาความเร็วด้วยวิธีต่างๆ ได้เหมาะสมยิ่งขึ้น ส่วนความเร็วเฉลี่ยอาจเอาค่าทุกค่ามาหาค่าเฉลี่ย วิธีนี้จะใช้เวลามาก ไม่เหมาะกับกรณีน้ำมีการเปลี่ยนแปลงระดับเร็วมากเพราะจะวัดไม่ทัน



รูปที่ 4-6 แสดงเส้น Isovel หรือเส้นที่มีความเร็วเท่ากันทุกจุด

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Standard vertical velocity curve

อัตราส่วนของความลึกของจุดที่ตรวจวัด(คิดจากผิวน้ำ)	อัตราส่วนของความเร็วเฉลี่ยในแนวตั้งเทียบกับความเร็วที่ระดับนั้น
0.05	0.86
0.10	0.86
0.20	0.87
0.30	0.88
0.40	0.90
0.50	0.94
0.60	0.98 say 1.00
0.70	1.05
0.80	1.15
0.90	1.34
0.95	1.54

(หมายเหตุ: จากค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการวัดที่จุดเดียว (1) ในกรณีที่ทางน้ำลึกไม่มาก ใช้วิธี Five - tenths method หรือ Six-tenths method (2) ในกรณีมีปัญหาในการวัด เช่น ระดับน้ำเปลี่ยนแปลงเร็ว มีสิ่งกีดขวางที่ตอไม้ ฯลฯ ใช้วิธี Two - tenths method หรือ Subsurface method เป็นต้น

ความลึกของน้ำ : d (หน่วยเมตร) กับวิธีการตรวจวัด

$d < 0.6$	วิธีวัดที่นิยมใช้	Six - tenths method
$0.60 < d < 1.00$	วิธีวัดที่นิยมใช้	Two - point method
$1.00 < d < 2.50$	วิธีวัดที่นิยมใช้	Three - point method
$d > 2.50$	วิธีวัดที่นิยมใช้	Five - point หรือ Six - point method

2) Two - point method

เป็นวิธีวัดที่นิยมที่สุด ใช้เมื่อระดับน้ำในทางน้ำไม่เปลี่ยนแปลงเร็วมาก ความลึกน้ำมากกว่า 0.60 เมตร โดยจะวัดความเร็วที่ความลึก 0.2d และ 0.8d จากผิวน้ำ

$$\bar{V} = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} \quad (\text{Error } 2.2 \%)$$

3) Six-tenths method

ในกรณีที่ความลึกของน้ำน้อยกว่า 0.60 เมตรไม่สะดวกในการวัดความเร็วแบบ Two-Point Method ที่ความลึก 0.8d ในกรณีนี้จึงวัดความเร็วที่ความลึก 0.6d จุดเดียว และถ้าเป็นทางน้ำขนาดเล็กก็จะวัดที่ตำแหน่งเดียวตรงศูนย์กลางทางน้ำ

$$\bar{V} = V_{0.6} \quad (\text{Error } 1.6 \%)$$

4) Three-point method

ในกรณีที่ทางน้ำค่อนข้างลึก และระดับน้ำไม่เปลี่ยนแปลงมาก อาจนำการวัดที่ใช้วิธี Six-tenths method และ Two-point method มาเฉลี่ยกัน โดยต้องพิจารณารูปแบบการกระจายความเร็วตามรูปแบบมาตรฐานด้วยไม่เช่นนั้นจะเกิดความผิดพลาดได้มาก

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} + V_{0.6} \right) \quad (\text{Error } 1.9 \%)$$

$$\text{หรือ} \quad \bar{V} = \frac{1}{3} (V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8}) \quad (\text{Error } 2.0 \%)$$

5) Subsurface method

เป็นการวัดตำแหน่งเดียว ที่ระดับต่ำจากผิวน้ำลงไปเล็กน้อย โดยค่าที่วัดได้ต้องคูณค่าสัมประสิทธิ์ **0.86 - 0.95** เพื่อปรับแก้เป็นความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดการไหล มักใช้วิธีนี้ในทางน้ำที่มีอุปสรรคในการตรวจวัดยังตามความลึกของทางน้ำ อาจเป็นเพราะระดับท้องน้ำมีระดับที่แตกต่างกันมาก หรือมีวัตถุขนาดใหญ่ที่กั้นทางน้ำ

6) Two - tenths method

เป็นการตรวจวัดจุดเดียวที่ระดับ 0.2 ของความลึกวัดจากผิวน้ำ

$$\bar{V} = 0.87V_{0.2}$$

7) Five - tenths method

เป็นการตรวจวัดจุดเดียวที่ระดับ 0.5 ของความลึกวัดจากผิวน้ำ

$$\bar{V} = 0.94V_{0.5} \quad (\text{Error } 3.3 \%)$$

8) Surface method

เป็นการวัดคล้าย Subsurface method แต่ใช้เครื่องมือวัดแบบ Optical current meter ติดตั้งเครื่องมือบนผิวน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ใช้ปรับเป็นการไหลเฉลี่ยของทางน้ำพิจารณาจาก กรณีทางน้ำธรรมชาติใช้ค่าสัมประสิทธิ์ **0.85** หรือ **0.86** ในขณะที่ทางน้ำที่สร้างขึ้นใช้ค่าสัมประสิทธิ์ **0.90**

9) Four - point method

เป็นการวัดความเร็วการไหลในแนวตั้งที่ 4 ตำแหน่งคือ วัดที่ความลึก 0.2, 0.4, 0.7 และ 0.9 ของความลึกจากผิวน้ำ โดยใช้สมการ

$$\bar{V} = \frac{1}{4}(V_{0.2} + V_{0.4} + V_{0.7} + V_{0.9}) \quad (\text{Error } - 0.9 \%)$$

10) Five - Point Method

เป็นการวัดความเร็วการไหลในแนวตั้งที่ 5 ตำแหน่งคือ วัดที่ผิวน้ำ(V_s) วัดที่ความลึก 0.2, 0.6 และ 0.8 ของความลึกจากผิวน้ำ และวัดที่ท้องน้ำ (V_b) โดยใช้สมการ

$$\bar{V} = 0.1(V_s + 3V_{0.2} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_b) \quad (\text{Error } 0.2 \%)$$

11) Six - point method

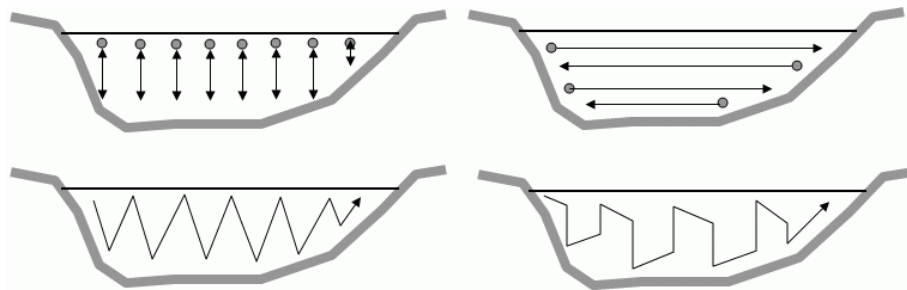
เป็นการวัดความเร็วการไหลในแนวคั้งที่ 6 ตำแหน่งคือ วัดที่ผิวน้ำ (V_s) วัดที่ความลึก 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ของความลึกจากผิวน้ำ และวัดที่ท้องน้ำ (V_b) โดยใช้สมการ

$$\bar{V} = 0.1(V_s + 2V_{0.2} + 2V_{0.4} + 2V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_b) \quad (\text{Error } 0.9 \%)$$

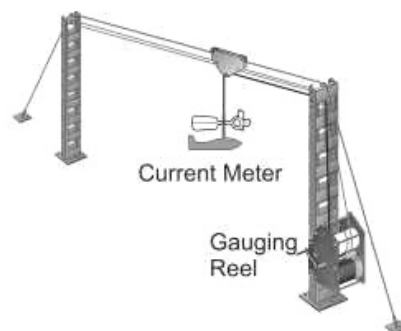
หรือ
$$\bar{V} = \frac{1}{6}(V_s + V_{0.2} + V_{0.4} + V_{0.6} + V_{0.8} + V_b) \quad (\text{Error } -1.6 \%)$$

12) One - point continuous method or Depth integration method

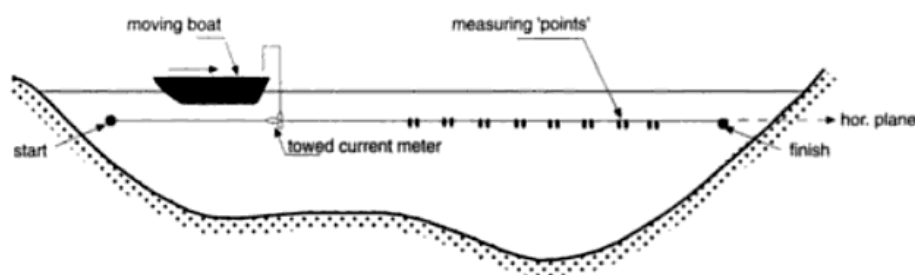
เป็นวิธีการตรวจวัดที่ช่วยแก้ปัญหาการกระจายความเร็วการไหลที่ไม่เท่ากันในหน้าตัดการไหล หรือกรณีที่ระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเร็ว หลักการตรวจวัดวิธีนี้คือ การที่ให้เครื่องมือมีการเคลื่อนตัวด้วยอัตราที่คงที่อย่างต่อเนื่องในตำแหน่งการวัดในหน้าตัดการไหล โดยแบ่งรูปแบบการตรวจวัดได้เป็นรูปแบบย่อย ดังแสดงในรูปที่ 4-7 ในการตรวจวัดอาจติดตั้งเครื่องมือวัดกับเรือ หรือระบบบรอกและรางเลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4-8 และ 4-9



รูปที่ 4-7 แสดงตัวอย่างแนวการลากเครื่องมือวัดความเร็วการไหลในหน้าตัดทางน้ำ
ในแนวคั้ง แนวราบและทั้งสองแนวหรือซิกแซก



รูปที่ 4-8 การตรวจวัดโดยติดตั้งเครื่องมือกับระบบบรอกและรางเลื่อน



รูปที่ 4-9 การตรวจวัดโดยติดตั้งเครื่องมือกับเรือ

12.1) การตรวจวัดความเร็วเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดย่อยในแนวดิ่ง เป็นการตรวจวัดตรงตำแหน่งแบ่งพื้นที่ย่อยเหมือนการตรวจวัดด้วยวิธี Three-point method และวิธีอื่นๆ แต่แทนที่จะวัดความเร็วเฉพาะจุดที่ 0.2, 0.6, 0.8 ของความลึกจากผิวน้ำเป็นต้น แต่จะให้เครื่องมือวัดเคลื่อนที่ในแนวดิ่งอย่างต่อเนื่องจากผิวน้ำลงสู่ท้องน้ำ หรือจากท้องน้ำขึ้นสู่ผิวน้ำแทน ผลการตรวจวัดจะเป็นตัวแทนของการไหลในแนวดิ่งที่ตรวจวัดนั้น

12.2) การตรวจวัดความเร็วเฉลี่ยเต็มทั้งหน้าตัดการไหล แบ่งย่อยเป็น

(1) เครื่องมือวัดเคลื่อนตัวแนวราบ โดยเครื่องมือติดตั้งคงที่ที่ความลึกใดๆ เช่น ผิวน้ำ ระยะ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 จากผิวน้ำ หรือระดับท้องน้ำ แล้วขณะวัดให้เครื่องมือเคลื่อนที่ในแนวราบ ผลการตรวจวัดจะเป็นตัวแทนของความเร็วเฉลี่ยที่ระดับความลึกนั้นของหน้าตัดการไหล วิธีนี้เหมาะกับการวัดในทางน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับเร็ว อาจวัดที่ระดับความลึกระดับใดระดับหนึ่ง แล้วคูณค่าสัมประสิทธิ์เพื่อให้เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วเฉลี่ยของทั้งหน้าตัดการไหล หรือติดตั้งเครื่องมือวัดหลายๆ ตัวที่ทุกระดับความลึกในคราวเดียวกันก็ได้

(2) เครื่องมือวัดเคลื่อนที่ทั้งแกนนิ่งและแกนราบพร้อมกัน เป็นการติดตั้งเครื่องมือวัดตัวเดียว แล้วให้มีการเคลื่อนตัวแบบซิกแซก ที่ครอบคลุมทั้งหน้าตัดการไหล

12.3) ข้อกำหนดและเทคนิคการตรวจวัดแบบ One - point continuous method

- เครื่องมือที่เหมาะสมกับการตรวจวัดวิธีนี้คือเครื่องมือวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีระบบบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง
- เครื่องมือวัดเชิงกลที่เหมาะสมกับการวัดวิธีนี้คือ *Current meter* แบบใบพัด (Propeller type) ที่มีการเคลื่อนที่ของใบพัดรอบแกนราบ ซึ่งเมื่อมีการลากเครื่องมือให้เคลื่อนตัวไปอย่างต่อเนื่องจะไม่เกิดผลกระทบต่อการวัดมาก ในขณะที่ไม่เหมาะกับการใช้ *Current*

meter แบบลูกถ้วย (Cup type) ที่มีการเคลื่อนที่ของถ้วยในแกนคิ่ง เพราะจะมีผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของเครื่องมือได้มาก

- ในการตรวจวัด เพื่อชดเชยความผิดพลาด จึงควรให้เครื่องมือเคลื่อนตัวในทิศทางที่ตรงข้ามกันด้วย เช่น การเคลื่อนตัวแนวคิ่งก็ให้วัดเมื่อเคลื่อนจากผิวน้ำลงสู่ท้องน้ำ และวัดเมื่อเคลื่อนตัวจากท้องน้ำสู่ผิวน้ำด้วย การเคลื่อนตัวในแนวราบก็เช่นกันต้องตรวจวัด โดยให้เคลื่อนตัวทั้ง 2 ทิศทาง

- อัตราการเคลื่อนตัวของเครื่องมือ แนวคิ่งไม่เกิน 0.05 เมตร/วินาที แนวราบ 0.05 – 0.50 เมตร/วินาที ขึ้นกับความกว้างของทางน้ำ หรือต้องไม่มากกว่า 25 % ของความเร็วเฉลี่ยของการไหล ไม่เช่นนั้นจะเกิดผลกระทบกับการตรวจวัดได้

- ในการตรวจวัดต้องใช้อุปกรณ์พิเศษประเภทระบบสายเคเบิลและรอก และระบบรถกระเช้าและเครน ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวคิ่งได้

4.5 การพิจารณาเลือกวิธีการตรวจวัดที่เหมาะสม

จากรูปแบบการตรวจวัดดังกล่าวข้างต้น ผู้ตรวจวัดจะต้องพิจารณาเลือกใช้เครื่องมือและวิธีการที่เหมาะสม โดยต้องพิจารณาจากองค์ประกอบต่อไปนี้

- ลักษณะและสภาพของทางน้ำ ได้แก่ รูปร่าง, ขนาด, สิ่งที่เกิดขวางในทางน้ำ หรือไหลมากับน้ำ เช่น ต้นไม้ ท่อนไม้ ตะกอน วัชพืช หรือสภาพท้องน้ำ ฯลฯ

- อัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในทางน้ำ ช้าหรือเร็ว
- ความแรงของกระแสน้ำ จะสัมพันธ์กับขีดจำกัดของเครื่องมือวัดแต่ละชนิด
- ลักษณะการไหล ราบเรียบ หรือปั่นป่วน
- ชนิดและจำนวนของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีใช้งาน รวมทั้งอัตรากำลัง

เจ้าหน้าที่

- ระดับความละเอียดถูกต้องของผลการตรวจวัดที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์
- งบประมาณค่าใช้จ่าย

ฯลฯ

บทที่ 5

การวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิดด้วยวิธีและเครื่องมือพิเศษ

จากบทที่ 4 ได้กล่าวถึงแนวทางการตรวจวัดปริมาณน้ำในทางน้ำเปิดที่มีหลายแนวทาง ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจวัดโดยการใช้เครื่องมือหรือวิธีการต่างๆ ที่ไม่ใช่เครื่องมือที่กำหนดให้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการตรวจวัด ซึ่งในยุคแรกเครื่องมือที่กำหนดเป็นมาตรฐานคือเครื่องวัดกระแสน้ำ(Current meters) ซึ่งมีแบบลูกถ้วยและแบบใบพัด และต่อมาเมื่อคิดค้นเครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบอิเล็กทรอนิกส์ จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานเครื่องมือวัดระบบนี้ขึ้นมาใหม่

อาจแบ่งกลุ่มของเครื่องมือตรวจวัดกระแสน้ำเป็น 3 กลุ่มใหญ่ได้ดังนี้

1. เครื่องมือพิเศษ เป็นเครื่องมือที่ไม่อยู่ใน 2 กลุ่มที่จะกล่าวถัดไป ได้แก่

1.1 การใช้ทุ่นลอย (Float method)

1.2 Pitot tube

1.3 Velocity head rod

1.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ หรือวิธีการอื่นๆ

2. เครื่องมือวัดเชิงกล (Mechanical velocity meters) แบ่งย่อยเป็น 3 ประเภท

2.1 ประเภทที่มีการหมุนรอบแกนตั้ง (Vertical axis current meters)

2.2 ประเภทที่มีการหมุนรอบแกนนอน (Horizontal axis current meters)

* เครื่องมือวัด 2 ประเภทข้างต้นอาจเรียก Rotor type current meters

2.3 ประเภทที่ใช้หลักการแกว่งตัว (Pendulum current meters)

3. เครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่

3.1 Electromagnetic velocity meters

3.2 Doppler velocity meters ได้แก่ Doppler Ultrasonic, Acoustic Doppler, ระบบ Laser หรือ Radar เป็นต้น

3.3 Optical strobe velocity meters

ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจวัดโดยใช้วิธีการและการใช้เครื่องมือพิเศษ ซึ่งได้แก่

- การตรวจวัดด้วยวิธี Volume metric method
- การคำนวณโดยวิธี Slope area method
- การใช้ทุ่นลอย (Float method)
- การใช้สารเคมีและสี
- การใช้ Pitot tube
- การใช้ Velocity head rod

5.1 การตรวจวัดด้วยวิธีวัดปริมาตร (Volume metric method)

วิธีการวัดปริมาตร หรือ Volume metric method นี้อาจเรียก “Bucket and stopwatch method” ตามวิธีการตรวจวัด คือการใช้ภาชนะรองรับน้ำในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง แล้วนำน้ำมาหาปริมาตร โดยการตวงหรือชั่งน้ำหนัก เพราะเรารู้แล้วว่า น้ำปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม

วิธีการนี้ใช้สำหรับการหาอัตราการไหลของน้ำที่มีอัตราน้อย ๆ ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำได้สะดวก เช่น ปริมาณน้ำที่ไหลรินในลำธาร หรือลำน้ำในช่วงหน้าแล้ง นอกจากนี้ยังใช้หาอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากท่อขนาดเล็ก หัวน้ำหยดให้น้ำแก่พืช ฯลฯ

หลักการตรวจวัดจะรองรับปริมาณน้ำในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยการจะรองรับน้ำนั้นต้องพิจารณาประยุกต์ตามสถานการณ์ตามความเหมาะสม

1) รองรับน้ำโดยตรงในตำแหน่งที่ท้องน้ำมีระดับแตกต่างกันมาก ซึ่งจะมีการไหลลักษณะคล้ายน้ำตก โดยอาจจุดแต่งท้องน้ำขึ้นมาให้มีลักษณะดังกล่าวก็ได้

2) ปิดกั้นทางน้ำเพื่อรวบรวมน้ำให้มีระดับสูงขึ้นแล้วให้น้ำไหลผ่านช่องหรือผ่านท่อลงสู่ภาชนะได้สะดวกขึ้น

3) Hauer and Lamberti, 1996 ใช้ถุงพลาสติกที่ปากถุงยึดติดกับวัสดุที่แข็งและเรียบ 2 ด้านเพื่อทำให้ปากถุงปิดทับกันค่อนข้างสนิทและสามารถทำให้ยกเปิดปากถุงด้านบนขึ้นได้สะดวก โดยในการตรวจวัดจะนำถุงที่กดปากถุงสนิทกันไปวางขวางทางน้ำไหล โดยให้ส่วนปากล่างยึดติดท้องน้ำอย่างมั่นคง (น้ำไหลลัดไปได้น้อยที่สุด) ก่อนการตรวจวัดจะให้น้ำไหลผ่านข้ามถุงออกไปก่อน เมื่อทำการตรวจวัดก็เพียงยกปากถุงส่วนบนขึ้นให้พ้นผิวน้ำ ทำให้น้ำทั้งหมดในขณะนั้นไหลเข้าถุงพร้อมจับเวลาเริ่ม และเมื่อปริมาณน้ำเข้าถุงพอสมควรที่จะวัดปริมาณได้แล้วก็ยกถุงทั้งหมดขึ้น พร้อมจับเวลาสุดท้าย

การคำนวณอัตราการไหล

$$Q = \frac{V_o}{t}$$

Q = อัตราการไหล หน่วย ลิตร/วินาที, ลูกบาศก์เมตร/วินาที

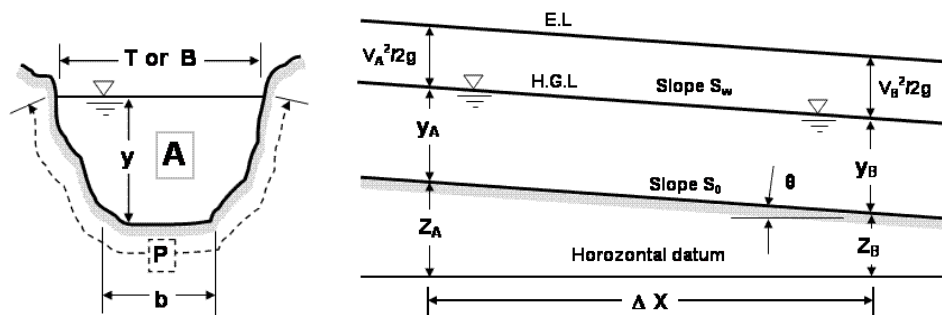
V_o = ปริมาตรของน้ำที่รองรับเก็บไว้ได้ หน่วย ลิตร, ลูกบาศก์เมตร

อาจชั่งน้ำหนักเป็นกิโลกรัม แล้วมาแปลงเป็นปริมาตร

t = ช่วงเวลาที่ใช้รองรับเก็บน้ำ หน่วย วินาที

5.2 การคำนวณโดยวิธี Slope area method

วิธีการ Slope-area method เป็นวิธีการคำนวณอัตราการไหลของน้ำในทางน้ำเปิดโดยอาศัยหลักการทางชลศาสตร์ จากความสัมพันธ์ของความลาดของผิวน้ำกับพื้นที่หน้าตัดของการไหลเฉลี่ย มีผู้นำเสนอวิธีการคำนวณหลายรูปแบบ แต่วิธีการคำนวณโดยใช้สูตรของ Robert Manning วิศวกรชาวไอริช จะเป็นที่ยอมรับใช้ที่สุดเพราะง่ายในการคำนวณ ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 5-1 หน้าตัดของทางน้ำธรรมชาติทั่วไป

Manning's equation

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำ หน่วย m^3 /วินาที

A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของการไหล หน่วย m^2

R = รัศมีชลศาสตร์ของหน้าตัดการไหล (Hydraulic radius) หน่วย m .
 $= A/P$

P = เส้นขอบเปียกของหน้าตัดการไหล (Wetted perimeter) หน่วย m .

S = ความลาดเทของผิวน้ำของทางน้ำช่วงที่ตรวจวัด ไม่มีหน่วย

n = ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning (Manning roughness coefficient) แสดงในตารางที่ 5-1 และ 5-2

ตารางที่ 5-1 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) ของทางน้ำเปิด

ผิวทางน้ำไหล	n
(1) ทางน้ำเปิดธรรมชาติ (Natural channels)	
เรียบและตรง	0.030
ไหลช้าเนื่องจากมีสระลึกเป็นช่วงๆ	0.040
แม่น้ำสายหลัก	0.035
(2) ลุ่มแม่น้ำที่มีน้ำท่วมถึง (Flood plains)	
ทุ่งหญ้า	0.035
ไม้พันธุ์เดี่ยวบางๆ	0.050
ไม้พันธุ์เดี่ยวหนา	0.075
(3) ทางน้ำเปิดดินขุด (Excavated earth channels)	
เรียบ	0.022
มีกรวดบ้าง	0.025
เต็มไปด้วยหญ้า	0.030
ก้อนหิน	0.035
(4) ทางน้ำเปิดลาดผิว (Artificially Lind channels)	
แก้ว	0.010
ทองเหลือง	0.011
เหล็กเรียบ	0.012
เหล็กทาสี	0.014
เหล็กมีหมุดขี้	0.015
เหล็กหล่อ	0.013
คอนกรีตขัดผิว	0.012
คอนกรีตผิวหยาบ	0.014
ไม้ไผ่เรียบ	0.012
ไม้ไม่ได้ไส	0.013
ดินเหนียว	0.014
ก่ออิฐ	0.015
แอสฟัลต์	0.016
โลหะถูกพูก	0.022
หินเรียง	0.025

ตารางที่ 5-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) ของทางน้ำเปิดประเภท คู คลอง

ลักษณะของทางน้ำเปิด	n
คลองลาดด้วยคอนกรีต โดยมีซี่เมนต์อุดบริเวณรอยต่อระหว่างแผงคอนกรีต และที่ท้องน้ำก็ลาดคอนกรีตเป็นฐานด้วย	0.012
คลองคอนกรีต	0.014
คูขนาดเล็กลาดด้วยคอนกรีต มีแนวคูเป็นเส้นตรงสม่ำเสมอ ความลาดท้องน้ำน้อย โดยมีตะกอนหยาบปกคลุมบริเวณด้านข้างและท้องคู	0.016
คลองลาดคอนกรีตโดยไม่มีการปรับแต่งให้เรียบ พื้นผิวปกคลุมด้วยวัชพืช ละเียขขนาดเล็ก และท้องน้ำมีตะกอนทราย	0.018
คลองดินเหนียวขุด มีตะกอนเป็นดินทรายที่กลางคลอง และตะกอนโคลนบริเวณข้างคลอง	0.018
คลองคอนกรีตที่สร้างจากหินลาวาตัดตรงดิ่ง โดยที่ผนังมีลักษณะหยาบ	0.020
คลองชลประทานแนวคลองเป็นเส้นตรงพื้นผิวบดอัดทรายเรียบ	0.020
คลองลาดซีเมนต์ (Cement-paster lining) เป็นแนวตรงบนคลองดิน โดยที่บริเวณรอยแตกมีวัชพืช และท้องคลองมีตะกอนทราย	0.022
คลองที่ขุดผ่านดินเหนียวปนตะกอนทราย สภาพท้องคลองแข็งแรง	0.024
คูลาดทั้งคันคูและลาดข้างด้วยหินหรืออิฐหัก ท้องน้ำไม่เรียบมีกรวดตกอยู่อย่างกระจัดกระจาย ผนังด้านข้างค่อนข้างอยู่ในแนวตั้ง	0.024
คลองขุดข้างภูเขา โดยตลิ่งด้านภูเขามีรากพืชเป็นระยะๆ ส่วนตลิ่งด้านลาดลงมีผนังคอนกรีต และท้องคลองมีกรวดปกคลุม	0.026
แม่น้ำธรรมชาติ มีก้อนกรวดและหินขนาดใหญ่เล็กคละกัน มีความเร็วกระแสน้ำไหลผ่านสูง	0.028
คลองดินขุด มีลักษณะเป็นตะกอนทราย โดยมีทรายตกทับถมบริเวณท้องคลอง ส่วนด้านข้างมีหญ้าขึ้นตามธรรมชาติ	0.029
คลองที่มีหินกรวดขนาดใหญ่ที่ท้องคลอง	0.030
คลองธรรมชาติ ด้านข้างบางแห่งมีสภาพขรุขระไม่เรียบ ท้องน้ำเรียบมีตะกอนดินเหนียว สภาพหน้าตัดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก	0.035
คลองหินขุดโดยวิธีระเบิดแนวคลอง	0.040
คลองดินเหนียวปนตะกอน ความลาดด้านข้างไม่เรียบ มีหญ้าขึ้น	0.040

ตารางที่ 5-2 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) ของทางน้ำเปิดประเภท คู คลอง

ลักษณะของทางน้ำเปิด	n
คลองดินขุดด้านข้างและด้านล่างไม่เรียบ โดยด้านข้างมีดินเหนียวสีดำและ เหลือปนกันอยู่ รูปตัดทางน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก	0.045
คลองดินขุดด้านข้างและด้านล่างไม่เรียบ ดินคลองเป็นดินเหนียวสีดำ มีหญ้า และวัชพืช รูปร่างหน้าตัดค่อยๆ เปลี่ยนแปลงตามแนวคลอง	0.050
คูดินเหนียวปนตะกอนทราย ด้านข้างและด้านล่างไม่เรียบ มีต้นไม้ขนาดใหญ่ ขึ้นตลอดแนวหน้าตัดค่อนข้างสม่ำเสมอ	0.060
คลองดินเหนียวสีดำปนตะกอนเทา ด้านข้างและด้านล่างไม่เรียบมีพืชปกคลุม หนาแน่น	0.080
คลองดินเหนียวปนตะกอนเทา มีต้นไม้ขนาดใหญ่ในหน้าตัดคลอง	0.110
คลองระบายน้ำธรรมชาติ สภาพดินเป็นดินทรายละเอียดปานกลางและดิน เหนียวละเอียด ไม่มีความลาดด้านข้าง ท้องคลองเป็นลูกคลื่น มีแนวต้นไม้ ขวางทิศทางการไหลกระจัดกระจาย	0.125
แม่น้ำธรรมชาติ สภาพดินเป็นดินเหนียวปนดินทราย รูปร่างไม่แน่นอน มีราก ไม้ต้นไม้และท่อนซุงขวางทางน้ำ	0.150

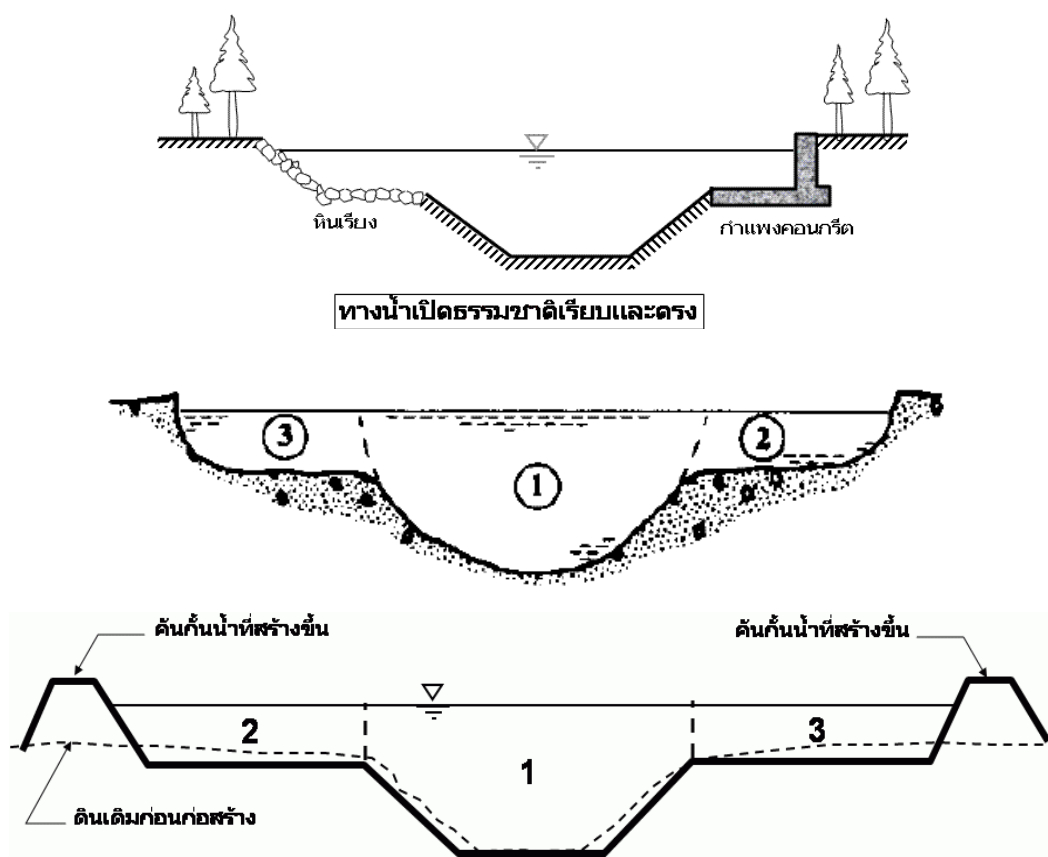
5.2.1 ค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทางน้ำ

ดังที่กล่าวแล้วว่าทางน้ำนั้นมีทั้งทางน้ำธรรมชาติ และทางน้ำที่สร้างขึ้น โดยทางน้ำที่สร้างขึ้นมักสร้างให้มีหน้าตัดเป็นรูปทรงเรขาคณิตเสมอ คุณสมบัติมิติทางชลศาสตร์(A, R, P) จึงคำนวณได้จากสูตรรูปทรงเรขาคณิต แต่ถ้าเป็นทางน้ำธรรมชาติหรือทางน้ำที่สร้างขึ้นแล้ว พื้นที่หน้าตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างไปจากรูปร่างหน้าตัดเดิม ค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ก็จะเปลี่ยนไปด้วย จะต้องสำรวจรูปตัดขวางของทางน้ำเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ใหม่

สำหรับค่าความลาดเทของผิวน้ำของทางน้ำ (S) ซึ่งกำหนดให้เท่ากับความลาดเทของพื้นที่ท้องทางน้ำ อาจใช้ข้อมูลจากแบบก่อสร้าง จากการสำรวจรูปตัดตามยาวของทางน้ำนั้น หรือกรณีการประเมินอย่างหยาบๆ อาจพิจารณาจากเส้น Contour จากแผนที่ 1: 50,000 ก็ได้

5.2.2 ทางน้ำที่มีรูปร่างหน้าตัดแบบผสมมีวัสดุหลายชนิด (Compound channel)

โดยทั่วไปแล้วทางน้ำธรรมชาติมักมีหน้าตัดเป็นรูปทรงคล้าย U-Shape หรือ Parabola ซึ่งเป็นรูปแบบหน้าตัดเดี่ยว แต่จากอัตราการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ทำให้ทางน้ำปรับตัวให้มีรูปร่างและขนาดสอดคล้องกับอัตราการไหลของน้ำดังกล่าว เป็นผลให้เกิดการกัดเซาะและเกิดการตกจมของตะกอน ทำให้รูปร่างหน้าตัดเปลี่ยนแปลงไป การที่พื้นผิวทางน้ำมีวัสดุหลายประเภทปกคลุมทั้งนี้รวมถึงต้นไม้ที่ขึ้นปกคลุมและมีวัตถุอื่นๆ อยู่ในทางน้ำ ล้วนมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระในทางน้ำตำแหน่งต่างๆ มีความแตกต่างกัน จึงเรียกหน้าตัดทางน้ำลักษณะนี้ว่า หน้าตัดการไหลแบบผสม ซึ่งในการคำนวณอัตราการไหลก็ต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะ

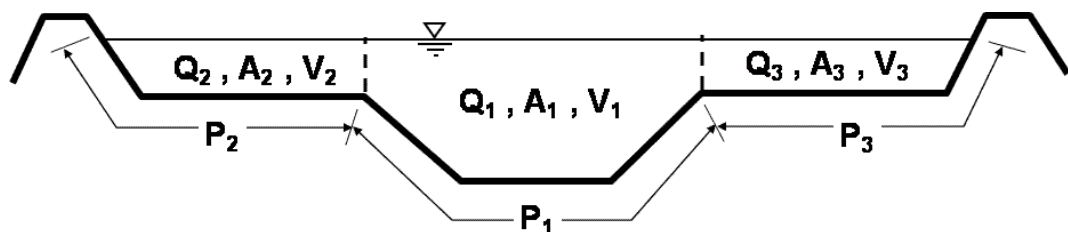


รูปที่ 5-2 ตัวอย่างทางน้ำที่มีรูปร่างหน้าตัดแบบผสม

รูปแบบของหน้าตัดการไหลแบบผสมที่ชัดเจนนั้น ได้แก่การสร้างพื้นที่รองรับน้ำนองเกินเกณฑ์ปกติ (Flood plain) ในทางน้ำทั้งกรณีทางน้ำธรรมชาติและทางระบายน้ำที่สร้างขึ้น มีหลักการคือการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดการไหลของทางน้ำเดิมให้เพียงพอที่จะรองรับปริมาณน้ำ

สูงสุดเท่าที่เคยปรากฏมา เพื่อไม่ทำให้เกิดน้ำท่วมสร้างความเสียหายได้อีก พิจารณาจากรูปที่ 5-2 บริเวณหน้าตัดหมายเลข 1 เป็นทางน้ำเดิม เมื่อสร้างคันกันน้ำสองฝั่งทางน้ำในตำแหน่งที่เหมาะสมโดยการขุดดินจากพื้นที่เขตทางน้ำจำนวนน้อยแต่ได้หน้าตัดการไหลมาก พื้นที่ในส่วนที่ 2 และ 3 เป็นพื้นที่ Flood plain ซึ่งอาจกว้างมากเท่าที่ทำให้เกิดหน้าตัดการไหลเพิ่มขึ้นเพียงพอ (อาจสร้างด้านเดียวก็ได้) พื้นที่ส่วนที่ 2 และ 3 จะแตกต่างจากส่วนของทางน้ำเดิม โดยในยามปกติใช้ทำประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ เช่น เป็นสนามหญ้า ปลูกต้นไม้ สวนหย่อม สนามกีฬา ปลูกพืชผัก ฯลฯ รูปแบบการป้องกันน้ำท่วมแบบนี้นิยมสร้างมากในต่างประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่น ส่วนในประเทศไทยรูปแบบไม่ชัดเจนโดยมักสร้างพื้นที่ส่วน 2 และ 3 แคบ ๆ ผลที่ได้จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดทางน้ำเดิม ส่วนที่ 1 ได้อีกเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปัญหาเรื่องที่ดิน เพราะการก่อสร้างแบบนี้ต้องใช้พื้นที่มาก

5.2.3 การคำนวณอัตราการไหลในทางน้ำหน้าตัดแบบผสม



รูปที่ 5-3 ตัวอย่างทางน้ำหน้าตัดแบบผสม 3 หน้าตัด

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q = \frac{1}{n_1} A_1 R_1^{2/3} S^{1/2} + \frac{1}{n_2} A_2 R_2^{2/3} S^{1/2} + \frac{1}{n_3} A_3 R_3^{2/3} S^{1/2}$$

$$R_1 = \frac{A_1}{P_1}, \quad R_2 = \frac{A_2}{P_2}, \quad R_3 = \frac{A_3}{P_3}$$

$$Q = S^{1/2} \left[\frac{A_1^{5/3}}{n_1 P_1^{2/3}} + \frac{A_2^{5/3}}{n_2 P_2^{2/3}} + \frac{A_3^{5/3}}{n_3 P_3^{2/3}} \right]$$

กรณีแบ่งหน้าตัดเป็น N หน้าตัด ห้อตราการไหลได้จาก

$$Q = S^{1/2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{A_i^{5/3}}{n_i P_i^{2/3}} \right] \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, N$$

หมายเหตุ: ปัญหาความผิดพลาดในการคำนวณขึ้นอยู่กับที่เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) ได้ถูกต้องตรงกับลักษณะสภาพของทางน้ำหรือไม่

5.3 การใช้ทุ่นลอย (Float method)

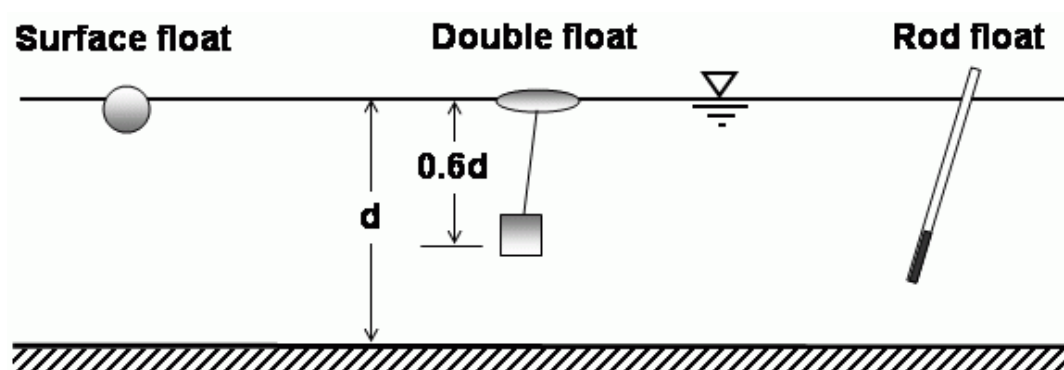
5.3.1 วิธีการตรวจวัดโดยใช้ทุ่นลอย เป็นวิธีการตรวจวัดความเร็วของน้ำแบบง่าย ๆ ที่มีหลักการคือ การสังเกตจากวัตถุที่ลอยบนผิวน้ำในทางน้ำว่าเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางที่กำหนดในเวลาที่เท่าใด ทำให้ทราบความเร็วกระแสน้ำ เป็นระยะทางต่อเวลา ซึ่งวิธีนี้ได้ผลการตรวจวัดเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น การวัดวิธีนี้เหมาะกับการตรวจวัดเบื้องต้นเมื่อ ไม่มีเครื่องมือตรวจวัด หรือเป็นการประเมินเบื้องต้นเพื่อการเลือกใช้เครื่องมือตรวจวัดที่เหมาะสมต่อไป หรือใช้ในกรณีที่ไม่สามารถใช้เครื่องมืออย่างอื่นตรวจวัดในทางน้ำนั้นได้ เช่น น้ำสกปรกมาก มีตะกอนหรือมีวัตถุลอยมากับน้ำมาก เป็นต้น

การตรวจวัดโดยใช้ทุ่นลอยที่ใช้งานกันมี 3 ลักษณะคือ

1) Surface float ตัวทุ่นลอยที่ใช้ในการวัดเป็นวัตถุอะไรก็ได้ที่ลอยน้ำได้ เช่น ลูกบอล กล้อง แ่งไม้หรือท่อนไม้สั้นๆ หรือแม้แต่ ผลไม้ วัชพืชน้ำ เป็นต้น โดยตัวทุ่นควรจมน้ำน้อยกว่า 25 % ของขนาดความสูงทุ่น

2) Double float จากการที่เราทราบแล้วว่าความเร็วเฉลี่ยของการไหลในทางน้ำจะอยู่ที่ระดับ 0.6 ของความลึกจากผิวน้ำ ดังนั้นจึงติดตั้งทุ่นเป็น 2 ตัวเข้าด้วยกัน ตัวหนึ่งเป็นทุ่นลอยที่ผิวน้ำ อีกตัวเป็นทุ่นจมในตำแหน่งความลึก 0.6 ของความลึกน้ำ วิธีนี้ไม่เหมาะกับทางน้ำที่มีสิ่งกีดขวาง

3) Rod float เป็นการดัดแปลงทุ่นลอยแบบ Double float มาใช้ท่อนไม้ หรือท่อ PVC ที่ถ่วงน้ำหนักที่ปลายล่างเพื่อให้เกิดการลอยตัวในแนวตั้ง โดยตำแหน่งปลายทุ่นจมน้ำในระดับ 75 – 95 % ของความลึกน้ำ วิธีนี้เหมาะกับทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมที่มีการไหลค่อนข้างราบเรียบ และไม่มีสิ่งกีดขวางในทางน้ำ

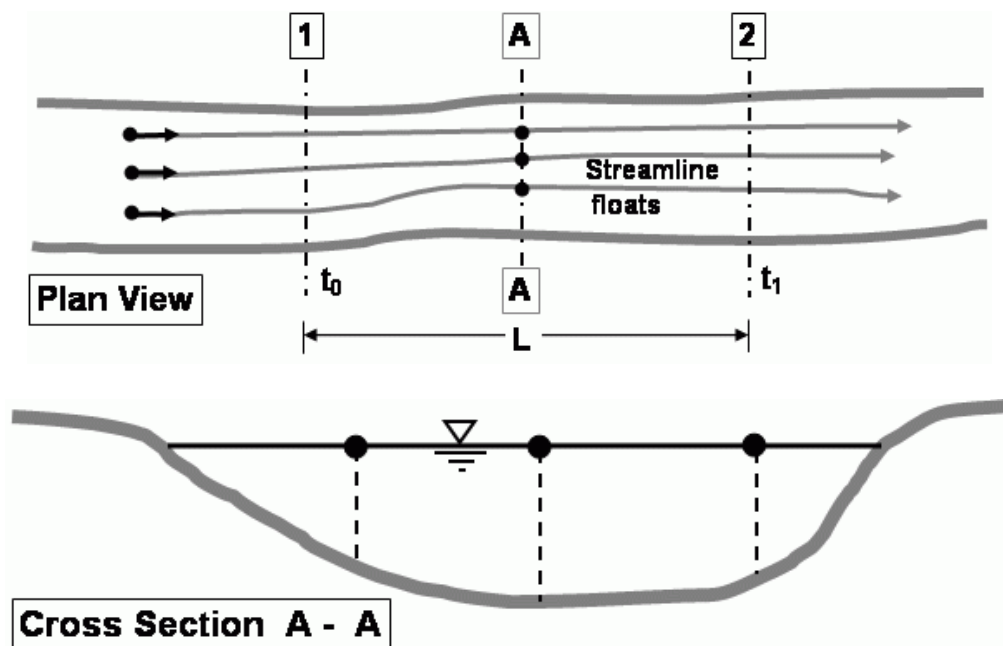


รูปที่ 5-4 แสดงลักษณะรูปแบบของทุ่นลอย

วิธีการตรวจวัด (พิจารณาจากรูปที่ 5-5)

1) เลือกตำแหน่งการตรวจวัดในทางน้ำบริเวณที่มีแนวตรง การไหลไม่ปั่นป่วน มากหน้าตัดทางน้ำค่อนข้างสมมาตร

2) กำหนดจุดเริ่มต้นการวัด ตำแหน่ง 1 จุดสิ้นสุดการตรวจวัดตำแหน่ง 2 ให้มี ระยะ L ประมาณ 10 - 20 เมตร



รูปที่ 5-5 แสดงการตรวจวัดโดยใช้ทุ่นลอย

3) โดยทั่วไปมักปล่อยทุ่นลอยในตำแหน่งที่กึ่งกลางหน้าตัดของทางน้ำ แต่หากทางน้ำขนาดใหญ่อาจกำหนดที่ตำแหน่งอื่น ๆ ที่ห่างตลิ่งพอสมควร โดยจุดปล่อยหรือสังเกตครั้งแรกให้อยู่เหนือตำแหน่งสังเกต 1 ออกไปพอสมควร เมื่อทุ่นลอยไหลมาถึงตำแหน่ง 1 เริ่มจับเวลา เป็นเวลา t_0 พอวัตถุสังเกตไหลถึงตำแหน่ง 2 หยุดจับเวลา เป็นเวลา t_1 ซึ่งแนวการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยนั้นเป็นอิสระขึ้นกับเคลื่อนตัวของน้ำที่ไม่สามารถกำหนดหรือควบคุมได้

4) จะได้ข้อมูลระยะเวลาที่ทุ่นลอยเคลื่อนที่จากจากตำแหน่ง 1 ไปยังตำแหน่ง 2 ระยะทาง L เป็นเวลา $t = t_1 - t_0$

5) ตรวจวัดแต่ละตำแหน่งประมาณ 10 ครั้งเพื่อนำผลการตรวจวัดมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดความผิดพลาด และค่าเฉลี่ยของแต่ละแนวจะเป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหลในทางน้ำ

5.3.2 การคำนวณอัตราการไหลโดยใช้ทุ่นลอย

$$V_{\text{float}} = \frac{L}{t}$$

$$\bar{V} = C \cdot V_{\text{float}}$$

$$Q = A\bar{V}$$

$\bar{V}$ = ความเร็วเฉลี่ยการไหล หน่วย ม./วินาที

V_{float} = ความเร็วการไหลที่วัดจากทุ่นลอย หน่วย ม./วินาที

L = ระยะทางระหว่างตำแหน่งสังเกต 2 ตำแหน่ง หน่วย ม.

t = เวลาที่วัตถุสังเกตเคลื่อนจาก 2 ตำแหน่งสังเกต หน่วย วินาที

Q = อัตราการไหล หน่วย ม.³/วินาที

A = หน้าตัดเฉลี่ยของทางน้ำช่วงที่ตรวจวัด หน่วย ม.²

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเฉลี่ยของหน้าตัดการไหลเมื่อเทียบกับการไหลที่วัดได้จากทุ่นลอย

5.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการตรวจวัดกับทุ่นลอยแบบต่างๆ

1) กรณีการใช้ **Surface float** นั้น U.S. Bureau of Reclamation ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 ค่าสัมประสิทธิ์การไหล การตรวจวัดโดย Floating Method

ความลึกของน้ำ(ม.)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.70	3.60	4.50	6.00+
สัมประสิทธิ์ C	0.66	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80

2) กรณีการใช้ **Rod float** กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ค่าสัมประสิทธิ์การไหล การตรวจวัดโดย Rod float

y/d	0.10	0.25	0.50	0.75	0.95
C	0.86	0.88	0.90	0.94	0.98

หมายเหตุ : เมื่อ d = ความลึกของน้ำในทางน้ำ และ y = ความยาวของ **Rod float**

และ Hydraulic radius (R) ของทางน้ำควรมีค่า $0.50 < R < 2.50$ ม.

5.3.4 ความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดโดยการใช้ทุ่นลอย

- 1) ไม่สามารถควบคุมให้ทุ่นลอย ไหลในแนวหรือตำแหน่งที่ต้องการในทางน้ำได้
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์การไหล **C** ย่อมให้มีความผิดพลาดได้ 10 – 20 % เพราะในสภาพทางน้ำจริงในระดับความลึกของการไหลที่เท่ากัน แต่ขนาดความกว้างของทางน้ำที่ต่างกัน ย่อมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหล **C** แตกต่างกัน วิธีการตรวจวัดนี้จึงให้ค่าโดยประมาณเท่านั้น
- 3) หากพื้นที่หน้าตัดการไหลเฉลี่ย **A** มีความผิดพลาด ผลการคำนวณก็ยิ่งผิดพลาด

5.4 Dilution (Dye) method: วิธีการเจือจางสาร

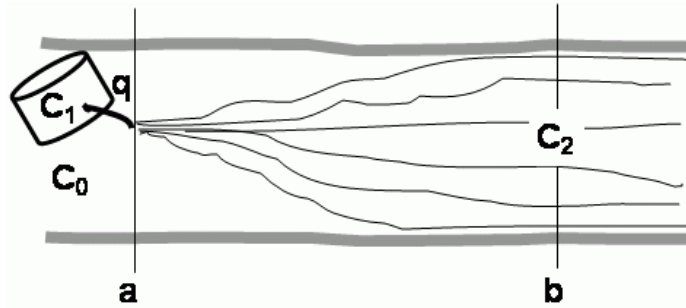
วิธีการเจือจางสาร เป็นวิธีการวัดความเร็วของการไหลวิธีพิเศษวิธีหนึ่งด้วยการใช้สารเคมี หรือสี โดยใช้วัดการไหลในทางน้ำที่ใช้เครื่องมือหรือวิธีการวัดอื่นๆ ไม่สะดวก อาจเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ทางน้ำคดเคี้ยว มีสิ่งกีดขวางที่ไหลปะปนมากับน้ำมาก เช่น ตะกอน วัชพืช ซากพืช เป็นต้น วิธีการตรวจวัดมีหลายวิธีแบ่งตามชนิดของสารที่นำมาใช้ได้แก่ Salt dilution method, Dye method, Radioisotopes, สารเรืองแสง (Fluorescent dye) เป็นต้น

1) **Salt dilution method** เป็นการตรวจวัดที่ใช้หลักการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในน้ำ โดยจะฉีดสารละลายที่มักใช้ **น้ำเกลือ** ค่าความเข้มข้นสูง **C₁** ลงไปในทางน้ำตำแหน่ง **a** ด้วยอัตราคงที่ **q** การไหลที่ปั่นป่วนของน้ำจะทำให้สารละลายเกิดการผสมกับน้ำในทางน้ำด้านท้ายน้ำ เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายในตำแหน่งที่มีการผสมของสารละลายทั่วถึงตลอดหน้าตัดการไหล ให้เป็นตำแหน่ง **b** เป็นความเข้มข้น **C₂** แล้วหยุดฉีดสารละลายเข้มข้นลงในน้ำ แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ตำแหน่ง **a** เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำก่อนการปล่อยสารละลายเข้มข้น หากค่าความเข้มข้นเป็น **C₀** (ความเค็มของน้ำตามปกติของทางน้ำ) อัตราการไหลของน้ำในทางน้ำ **Q** คำนวณได้จาก

$$[QC_0 + qC_1] = [(Q + q)C_2]$$

$$Q = q \left(\frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \right)$$

- หน่วยการวัดของค่าปริมาตร และเวลา ต้องสัมพันธ์เป็นหน่วยเดียวกัน
ตัวอย่างการใช้หน่วยวัด $C = \text{mg/ลิตร}$ q และ $Q = \text{ลิตร/วินาที}$



รูปที่ 5-6 รูปแปลนของทางน้ำแสดงการตรวจวัดโดย Salt Dilution Method

- เป็นการตรวจวัดอัตราการไหลโดยตรง ไม่ได้วัดความเร็วการไหล จึงไม่ต้องวัดค่าหน้าตัดการไหล
- ถ้าความเค็มของน้ำที่ไหลในทางน้ำตามปกติในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่แน่นอน ก็จะเกิดความผิดพลาดได้มาก ต้องตรวจวัดหลายๆ ครั้ง

2) Dye method หรือ Color-velocity method เป็นวิธีการตรวจวัดคล้ายวิธี

Floating Method นั่นคือ การตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของน้ำในระยะทาง L ที่กำหนด แต่ใช้สีแทนฟลูออริ่งซึ่งจะมีข้อดีที่สีจะผสมกับน้ำจึงเป็นตัวแทนของการเคลื่อนที่ของน้ำเกือบทั้งหน้าตัดของการไหล การจับเวลาจะเริ่มเมื่อส่วนหัวของน้ำสีไหลถึงจุดสังเกตแรก และหยุดจับเวลาเมื่อส่วนหัวของน้ำสีไหลถึงจุดสังเกตที่สอง ได้เวลา t

$$Q = AV$$

$$V = L/t$$

เมื่อ	Q = อัตราการไหล	ม. ³ /วินาที
	V = ความเร็วการไหล	ม./วินาที
	A = หน้าตัดการไหล	ม. ²
	L = ระยะทางของ 2 ตำแหน่งตรวจวัด	ม.
	t = เวลาที่น้ำไหลผ่าน 2 ตำแหน่งตรวจวัด	วินาที

- ขนาดของทางน้ำต้องไม่ใหญ่เกินไปจนทำให้การแพร่กระจายของสีไม่เต็มหน้าตัดอย่างเหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนของทั้งหน้าตัดการไหล
- น้ำในทางน้ำต้องไม่ขุ่นจนสังเกตสีได้ลำบาก
- ระยะการตรวจวัดต้องไม่ยาวเกินไปจนเกิดการกระจายตัวของสีจนไม่สามารถสังเกตส่วนหัวของน้ำสีที่ชัดเจนได้
- สีที่ใช้ต้องไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

3) การวัดอัตราการไหลของน้ำโดยใช้เรดิโอไอโซโทป (Radioisotopes)

ในการวัดอัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำลำคลองต่างๆ ไปนั้นวัดด้วยเครื่องมือวัดกระแสน้ำในบางกรณีที่แม่น้ำลำคลองบริเวณนั้นตื้นเขินเต็มไปด้วยโคลนหินกะกะ และมีกระแสน้ำไหลหมุนวนมากหรือบริเวณนั้นลึกและมีอัตราการไหลของน้ำสูงมากเครื่องมือวัดกระแสน้ำไม่สามารถใช้วัดได้ การใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์สามารถทำได้โดยปล่อยเรดิโอไอโซโทปลงไปในแม่น้ำลำคลองแล้วใช้เครื่องมือวัดรังสีวัดปริมาณรังสีตรงบริเวณ ตอนใต้ของจุดที่ปล่อยเรดิโอไอโซโทปบันทึกปริมาณรังสีที่วัดได้กับระยะเวลาหลังจากปล่อยเรดิโอไอโซโทปลงไปแล้วจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำ ณ บริเวณนั้นได้

ในปี 2514 สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติร่วมกับกรมชลประทาน ได้ทดลองทำการศึกษาวัดอัตราการไหลของน้ำที่ปล่อยออกจากเขื่อนแก่งกระจาน เพื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากการเปลี่ยนระดับประตูระบายน้ำ การทดลองได้เปลี่ยนระดับประตูน้ำหลายระดับ ผลสรุปได้ว่า ค่าที่ได้จากการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่คำนวณได้จากการเปลี่ยนระดับประตูระบายน้ำ จุดประสงค์ในการศึกษาก็เพื่อจะทดสอบว่าการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์วิธีนี้สามารถนำมาใช้ได้หรือไม่ เพื่อจะได้้นำเทคนิคทางนิวเคลียร์วิธีนี้ไปพัฒนาใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

4) **Fluorescent dye** เป็นการตรวจวัดคล้ายวิธีการใช้สี แต่ใช้สารเรืองแสงแทน เช่น Fluorescein, Rhodamine B, Rhodamine WT เป็นต้น ในการตรวจวัดต้องใช้เครื่องตรวจจับสารเรืองแสงโดยเฉพาะ

ตาราง 5-5 คุณสมบัติของสาร Fluorescent dyes

Properties of Three Useful Fluorescent Dyes

	Fluorescein	Rhodamine B	Rhodamine WT
Generic name	Acid Yellow 73	Basic Violet 10	—
Available form ^a	Powder	Powder	21.3% solution and powder
Specific gravity	—	1.12	1.11–1.13
Wavelength of excitation (nm)	490	555	558
Maximum emission wavelength (nm)	520	580	582
Minimum detection limit ($\mu\text{g L}^{-1}$)	0.29	0.01	0.013
Temperature correction coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	-0.0036	-0.027	-0.027
Tendency to sorb to:			
Inorganic solids	Low	High	Moderate
Organic solids	Moderate	High	Moderate
Photochemical decay rates constant (d^{-1})	0.03–0.39	0.0002–1.2	<0.0001–0.002

McCutcheon 1989; Smart and Laidlaw 1977; Wilson 1968; Wilson et al. 1986.

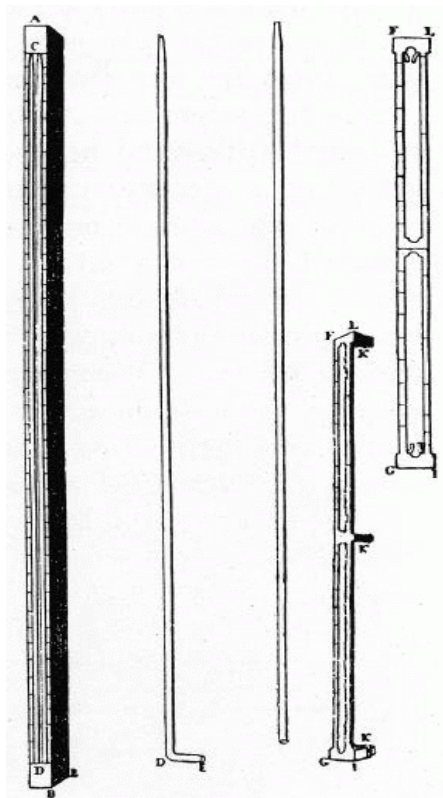
^a Rhodamine water tracing dyes available from Crompton and Knowles Corp., P.O. Box 33157, Charlotte, NC 28233-3157, phone (704) 372-5890.

5.5 การใช้ Pitot tube

Pitot tube เป็นเครื่องมือใช้วัดความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งปัจจุบันมีใช้งานดังนี้

1. วัดความเร็วของลม - ความเร็วลมในอุโมงค์ลม - วัดความเร็วของอากาศยาน
2. วัดความเร็วการไหลของของเหลว - ในท่อ - ในทางน้ำเปิด

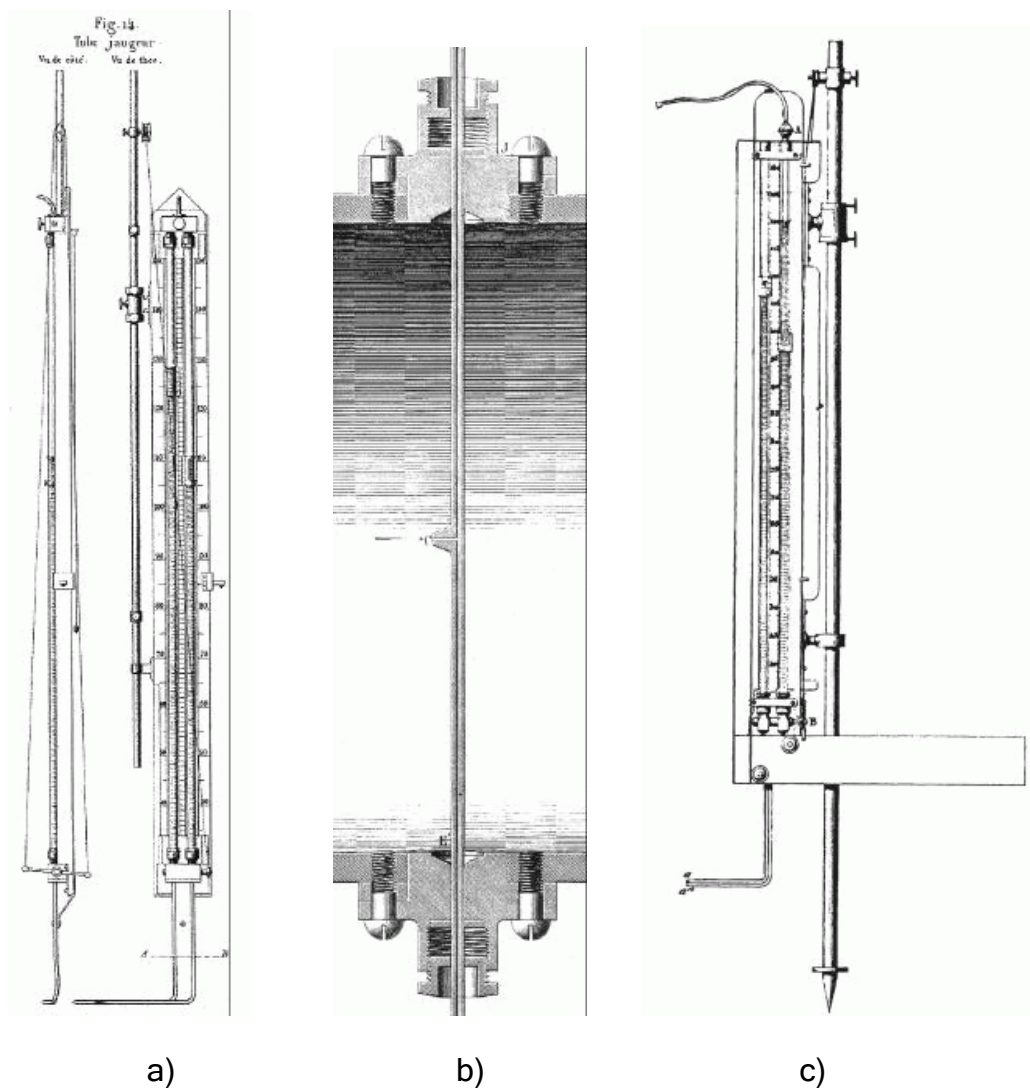
Pitot tube ได้ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส **Henri Pitot** โดยในปี ค.ศ. 1732 เขาได้เสนอผลงานวิชาการชื่อ "Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux" (Description of a machine to measure the speed of running waters and the wake of vessels.) แนะนำสิ่งประดิษฐ์เครื่องมือวัดกระแสน้ำรูปแบบใหม่ แสดงในรูปที่ 5-7 เป็นท่อหลอดแก้ว 2 ท่อ ติดตั้งในแนวตั้งบนแผ่นไม้ที่ทำเป็นแถบ **Scale** โดยท่อหนึ่งมีปลายปล่อยตรงเรียกท่อ **Static** ส่วนอีกท่องอ ปลาย 90 องศา เรียก ท่อ **Pitot** การตรวจวัดนำเครื่องมือไปจุ่มวัดในทางน้ำโดยให้ปลายท่อด้านที่งอหันหน้าด้านทิศทางการไหล ระดับน้ำในท่อจะมีความแตกต่างกัน โดยน้ำในท่อที่ปลายรับแรงดันน้ำไหลจะสูงกว่าอีกท่อ และยังกระแสน้ำแรงมากขึ้นเท่าไร ความแตกต่างของระดับน้ำในท่อก็ยิ่งมาก เครื่องมื่อดังกล่าวในเวลาต่อมาเรียกว่า เครื่องวัดความเร็วการไหลแบบ **Pitot tube**



รูปที่ 5-7 เครื่องมือวัดกระแสน้ำรูปแบบของ Henri Pitot ซึ่ง Rouse and Ince, 1957. ได้สร้างขึ้นใหม่

เครื่องมือวัดกระแสน้ำของ Pitot ในเวลานั้นไม่เป็นที่ยอมรับและถูกลืมเลือนไป เพราะยังไม่สามารถอธิบายและวิเคราะห์ผลจากปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเชิงทฤษฎีได้ การใช้งานไม่สะดวก มีความผิดพลาดในการวัดสูงเพราะยังไม่มี การ **Calibrate** ที่ดีพอ เครื่องมือมีขนาดใหญ่ ด้านกระแสน้ำจนทำให้การวัดผิดพลาดโดยบ่อยครั้งที่ทำให้ระดับน้ำในท่อ **Static** อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ และระดับน้ำในท่อมักกระเพื่อมมาก เพราะยังไม่เข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดจากรูปร่างของปากของท่อ Pitot

ต่อมาในปี ค.ศ. 1858 Henry Philibert Gaspard Darcy วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ศึกษา งานของ Pitot และได้พัฒนาเครื่องมือวัดกระแสน้ำ Pitot tube ขึ้นมาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 5-8



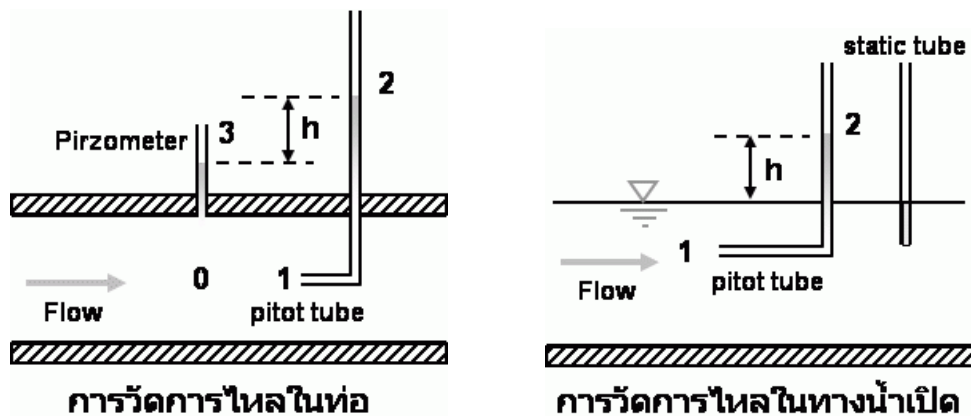
รูปที่ 5-8 Darcy's Pitot tube designs by publication date; a) 1856, b) 1857, c) 1858.

โดย Darcy สามารถแก้ปัญหาที่เคยเกิดขึ้นในเครื่องมือเดิมของ Pitot ให้หมดไป และอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการของนักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี Evangelista Torricelli (1643) ที่ใช้อธิบายการไหลของน้ำที่ออกจากถังน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางชลศาสตร์ของของไหลที่ Bernoulli (1738) นักคณิตศาสตร์ชาวสวิส เผยแพร่ในหนังสือ Hydrodynamica

Torricelli's equation: $V = \mu\sqrt{2gh}$

เมื่อ V = ความเร็วของน้ำที่จุดใดๆ ม./วินาที
 μ = Calibration coefficient ของเครื่องมือ
 g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²
 h = ความต่างระดับของน้ำในท่อ Static กับท่อ Pitot ม.

5.5.1 หลักการทำงานของ Pitot tube



การวัดการไหลในท่อ

การวัดการไหลในทางน้ำเปิด

รูปที่ 5-9 แสดงการวัดการไหลในทางน้ำเปิดและในท่อโดยใช้ Pitot tube

พิจารณาการวัดการไหลในท่อปิดด้วย Pitot tube วัดความเร็วเป็นจุด ความเร็ว ณ จุด 1 พลังงานของการไหล ณ จุด 0 จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ที่อยู่ในรูปของ Pressure head ณ จุด 1 โดยความเร็ว ณ จุด 0 คำนวณได้จากสมการของ Bernoulli

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g}$$

เมื่อ V_0 และ V_1 เป็นความเร็วที่จุด 0 และ 1 ตามลำดับ

P_0 และ P_1 เป็นความดันที่จุด 0 และ 1

$\rho g = \gamma$ เป็นค่าน้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) ของของไหล

$$V_1 = 0 ; \quad P_1 - P_0 = \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad \dots\dots (1)$$

ความดัน P_0 ตรวจวัดได้ที่ปลายของ Piezometer เป็น P_3

และความดัน P_1 ตรวจวัดได้ที่ปลายท่อ Pitot เป็น P_2

$$P_0 = P_3 \quad \text{และ} \quad P_1 = P_2$$

$$P_2 - P_3 = \rho gh$$

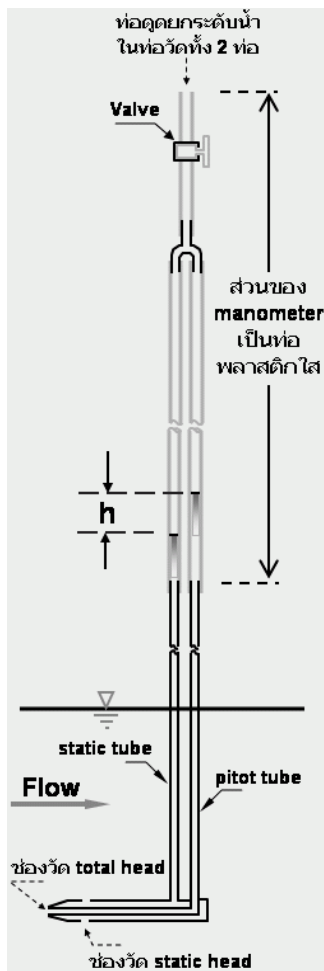
ดังนั้น

$$P_1 - P_0 = \rho gh \quad \text{..... (2)}$$

แทนค่า (2) ใน (1) ; $\rho gh = \frac{1}{2} \rho V_0^2$

$$V_0 = \sqrt{2gh}$$

5.5.2 การวัดกระแสน้ำในทางน้ำเปิดด้วย Pitot tube มีหลักการเช่นเดียวกับการวัดในท่อ โดยติดตั้งท่อ Static แทน Piezometer แล้วติดตั้ง Manometer เพื่อวัดความแตกต่างแรงดันที่ปลายท่อทั้งสอง เป็นค่า Pressure head ที่มีค่า h ใช้คำนวณค่า $V_0 = \sqrt{2gh}$ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5-10 แสดงการวัดการไหลในทางน้ำเปิดแสดงการวัดการไหลในทางน้ำเปิด

วิธีการตรวจวัดความเร็วการไหลของน้ำด้วย Pitot tube

ลักษณะการตรวจวัดด้วย Pitot tube นั้นจะใช้ตรวจวัดอัตราการไหลในทางน้ำโดยวิธี Velocity - area method นั่นคือการวัดความเร็วเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดย่อยของทางน้ำ เช่นเดียวกับการใช้ Current meter ตรวจวัดนั่นเอง

การวัดจะติดตั้งเครื่องวัดกับแท่งเหล็กวัดความลึกระดับน้ำเพื่อวัดในระดับความลึกต่างๆ เช่น 0.2, 0.6, 0.8 จากผิวน้ำ ให้สอดคล้องกับของความลึกของน้ำตามที่กำหนดในวิธี Velocity - Area Method ในการวัดจะหันปลายท่อ pitot ให้อยู่ในแนวเดียวกับทิศการไหลของน้ำมากที่สุด ดูดน้ำจากปลายท่อด้านบนหรือส่วนที่เป็น Manometer เพื่อยกระดับน้ำในท่อให้สูงขึ้นจะได้อ่านค่าความแตกต่างของระดับน้ำในท่อวัดได้สะดวกขึ้น

โดย แต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด จะตรวจวัดหลายครั้ง เพื่อนำค่าเฉลี่ยมาใช้ จะได้ลดความผิดพลาดในการวัด (การตรวจวัดครั้งใหม่เพียงบิดปลาย Pitot ไปอยู่ในแนวอื่นแล้ว บิดมาวางแนวให้ขนานกับทิศทางการไหลใหม่)

5.5.3 การคำนวณความเร็ว

นำค่าความแตกต่างของระดับน้ำในท่อทั้งสองท่อ หรือ **Manometer** ซึ่งเป็นค่า **Pressure head (h)** มาคำนวณ โดยเครื่องมือแต่ละเครื่องจะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการ **Calibrate** เครื่องมือให้มีความถูกต้องในการตรวจวัด ในการคำนวณจึงต้องคูณค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องมือด้วย

$$V = C\sqrt{2gh}$$

V = ความเร็วกระแสน้ำ ม./วินาที

h = ความแตกต่างของระดับน้ำในท่อทั้งสอง ม.

$g = \text{ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก} = 9.81 \text{ ม./ (วินาที)}^2$

C = ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของเครื่องมือเครื่องนั้น

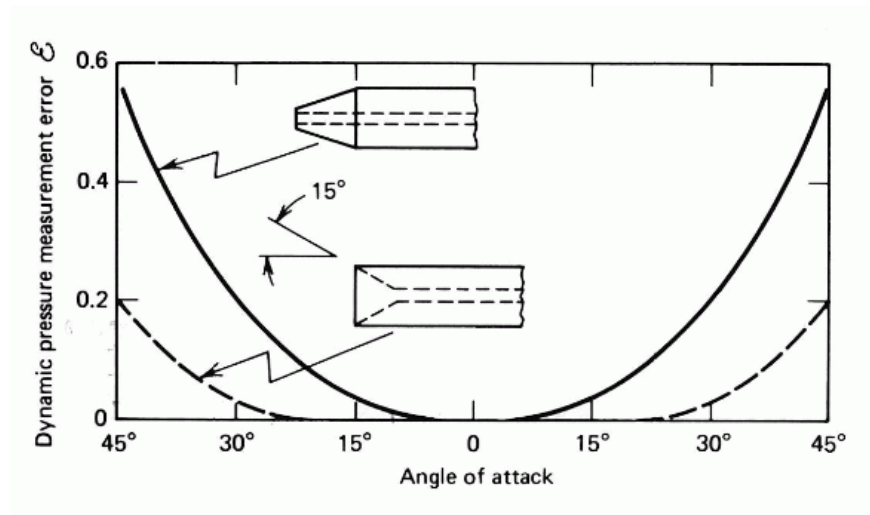
5.5.4 ความผิดพลาดในการตรวจวัดและอ่านค่า

- 1) การอ่านค่าระดับน้ำในท่อต้องให้พิกัดน้ำในท่ออยู่ในระดับสายตาไม่เช่นนั้นจะอ่านค่าผิดพลาด เพราะพิกัดน้ำในท่อจะโค้ง
- 2) ความไม่สมบูรณ์ การชำรุดของเครื่องมือ เช่น มีการรั่วของรอยต่อท่อต่าง ๆ หัววัดเสียหายเปลี่ยนรูปไปจากเดิม เป็นต้น
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของเครื่องมือนั้นเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากใช้งานมานาน การบำรุงรักษาหลังการใช้งานไม่ดี อาจมีสิ่งสกปรก หรือเกิดตะกอนจับในท่อ ต้องสอบเทียบค่าปรับแก้เครื่องมือ
- 4) ทิศทางของปลาย Pitot tube ไม่อยู่ในแนวเดียวกับทิศการไหล การวางตำแหน่งที่ต่างไปจากทิศการไหลเกินกว่าค่าความเบี่ยงเบนที่ยอมให้ได้ ทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนที่ไม่สามารถปรับแก้อะไรได้อีกเลย

Dally และคณะ (1993) ได้นำเสนอถึงผลความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดจากการวาง Pitot tube ผิดแนว ดังแสดงในกราฟของ **รูปที่ 5-11** โดยค่าความผิดพลาดขึ้นกับมุมของหัววัดที่เบี่ยงเบนไป และรูปร่างหัววัดที่ต่างกันจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นในการตรวจวัดจึงต้องใช้ความระมัดระวังในการวางแนวของหัววัดให้มาก

$$\text{Error } \varepsilon = \frac{\Delta P_a}{P_a} = \frac{P_a - P'_a}{P_a}$$

เมื่อ P_a' คือค่าความดันจลน์ที่วัดได้



รูปที่ 5-11 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวาง Pitot tube ผิดแนว (Dally et al. 1993)

5.5.5 ข้อดี ข้อเสียของการใช้ Pitot tube

แม้ว่าในปัจจุบันมีเครื่องมือวัดความเร็วของการไหลหรือกระแสน้ำชนิดต่างๆ มากมาย แต่ Pitot tube ก็ยังเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะยังมีคุณสมบัติที่ดีบางประการ

ข้อดี

- ราคาถูก
- ติดตั้งใช้งานง่าย
- ตัวเครื่องมือมีผลกระทบกับการไหลน้อย
- ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านหัววัดต่ำ

ข้อเสีย

- มีความอ่อนไหวต่อแนวการไหล
- ความเที่ยงตรง ± 5 % ค่าความผิดพลาดอาจมากขึ้นหาก Velocity profile ของลำการไหลเปลี่ยนแปลง (การไหลมีความปั่นป่วนมาก)
- ไม่เหมาะกับการวัดความเร็วของสารที่มีความสกปรก มีความหนืดมาก เพราะอาจทำให้เกิดการอุดตัน

สำหรับในประเทศไทย นายวิทยา สมหา อธิบดีผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ได้ออกแบบประดิษฐ์เครื่องวัดความเร็วน้ำแบบ Pitot เพื่อใช้ในหน่วยงานกรมชลประทาน เป็นผลงานที่ได้รับรางวัลผลงานประดิษฐ์นวัตกรรมแห่งชาติ และต่อมากณะวิจัยของสำนักวิจัยและพัฒนา ได้ต่อยอดนำมาพัฒนาให้สามารถวัดความเร็วน้ำเป็นตัวเลขดิจิทัล และคำนวณอัตราการไหลหรือปริมาณน้ำ ร่วมกับการสร้างโปรแกรมให้บันทึกข้อมูลเป็นแบบต่อเนื่อง Real time แสดงผลที่สถานีตรวจวัด และส่งผ่านข้อมูลระบบออนไลน์ให้แสดงผลทางคอมพิวเตอร์ที่ห้องควบคุมสามารถตรวจดูข้อมูลได้ตลอดเวลาที่ต้องการ

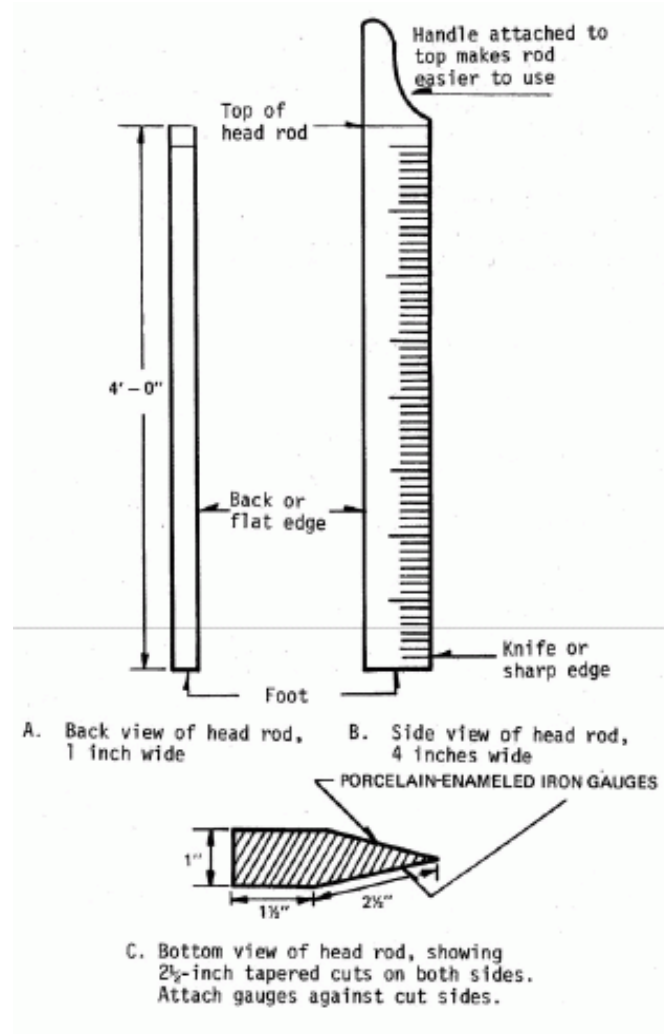
5.6 Velocity head rod

เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วการไหลของน้ำที่มีลักษณะเป็นแท่งไม้และไม้บรรทัด ประกอบกัน การวัดโดยนำเครื่องมือไปขวางแนวน้ำไหลแล้ววัดระดับของน้ำที่ยกตัวขึ้นจากการต้านการไหลของเครื่องมือ นำมาคำนวณความเร็ว โดยความเร็วที่ตรวจวัดเป็นความเร็วที่ผิวหน้า Velocity head rod ประดิษฐ์โดย Wilm และ Storey (1944) ช่างเทคนิคของ USDA Forest Service Equipment Development Center, San Dimas, California. แม้ว่าอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้สูง แต่ก็มีความสะดวกในการใช้วัดกระแสน้ำในทางน้ำขนาดเล็ก

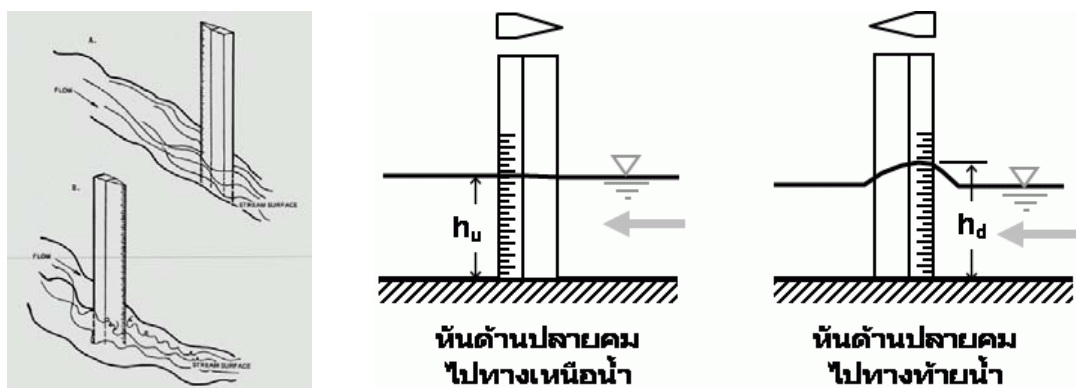
รูปร่างลักษณะของ Head rod แสดงในรูปที่ 5-13 ทำด้วยไม้ขนาด 1 นิ้ว x 4 นิ้ว ยาว 4 ฟุต หน้าตัดของเครื่องมือมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมประกบกับสามเหลี่ยมโดยการลบมุมที่ระยะ 1.5 นิ้วของหน้าตัด ให้มีลักษณะเป็นขอบคม โดยที่ขอบคมทั้งสองด้านติดแถบเหล็กเคลือบวัดระยะจากตลับเมตร

5.6.1 วิธีการตรวจวัดด้วย Head rod

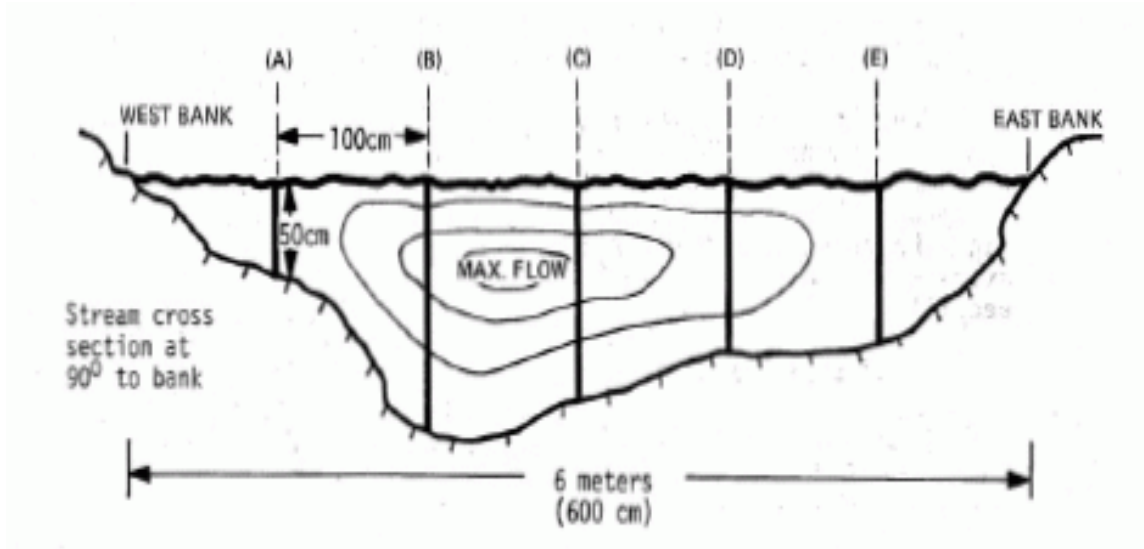
การตรวจวัดจะกำหนดตำแหน่งการวัดจะแบ่งหน้าตัดทางน้ำเป็นส่วนๆ ให้กระจายทั่วถึงตลอดหน้าตัดการไหลในทางน้ำ แสดงตัวอย่างตำแหน่งการวัดในรูปที่ 5-14 โดยในแต่ละตำแหน่งของการตรวจวัด จะวัดความลึกน้ำจากท้องน้ำถึงผิวหน้า จึงต้องวางเครื่องวัดในแนวตั้ง ให้ส่วนฐานวางอยู่บนท้องทางน้ำ แล้วอ่านค่าระดับน้ำจากแถบวัดระดับจากส่วนที่เป็นขอบคมของเครื่องวัด 2 ครั้ง ครั้งแรกเมื่อให้ปลายขอบคมชี้ไปทางด้านเหนือน้ำ และครั้งที่ 2 เมื่อปลายขอบคมชี้ไปทางด้านท้ายน้ำ โดยวางตำแหน่งเครื่องมือให้ปลายด้านเรียบตั้งฉากกับแนวการไหล ทั้งนี้ให้วัดซ้ำอย่างน้อยอย่างละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อลดความผิดพลาด แล้วจึงนำค่าไปคำนวณต่อไป



รูปที่ 5-13 รูปร่างลักษณะของ Head rod



รูปที่ 5-14 แสดงการใช้ Head rod วัดกระแสน้ำจุดละ 2 ครั้ง
เมื่อหันปลายสันคมไปทางด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ



รูปที่ 5-15 ตัวอย่างตำแหน่งของ Head rod ที่ใช้วัดกระแสน้ำในทางน้ำ

5.6.2 การคำนวณอัตราการไหลเมื่อวัดด้วย Head rod

$$Q = \sum_{i=1}^N (V_i A_i) \quad (i=1, 2, 3, \dots, N)$$

$$V_i = \sqrt{2gh_i}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลรวมของหน้าตัดการไหลย่อยของทางน้ำ ลบ.ม. / วินาที

V_i = ความเร็วของน้ำที่ตำแหน่งวัดบนหน้าตัด ม. / วินาที

A_i = พื้นที่หน้าตัดย่อย i ม.²

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

[ค่า $g = 9.81$ ม. / (วินาที)² หรือ 981 ซม. / (วินาที)²]

h = Velocity head ที่ตำแหน่ง i ม.

$$h = h_d - h_u$$

h_d = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำวัด 3 ครั้งเมื่อปลายขอบคมเครื่องมือชี้ไปทางท้ายน้ำ

h_u = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำวัด 3 ครั้งเมื่อปลายขอบคมเครื่องมือชี้ไปทางเหนือหน้า

ตัวอย่างการตรวจวัดและการคำนวณ ของหน้าตัดการไหลตามรูปที่ 5-15 แสดงในตารางที่ 5-6 และ ตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-6 แสดงตัวอย่างการวัดค่า และคำนวณที่ตำแหน่ง **A** ของหน้าตัดทางน้ำตามรูปที่ 5-15

การค่าอ่านจาก Rod	ค่าที่อ่านได้ เมื่อหันด้านสันคม ไปทางด้านเหนือ (cm.)	ค่าที่อ่านได้ เมื่อหันด้านสันคม ไปทางด้านท้ายน้ำ (cm.)
อ่านค่าครั้งที่ 1	55.40	60.70
อ่านค่าครั้งที่ 2	55.20	60.50
อ่านค่าครั้งที่ 3	55.30	60.60
รวม	165.90	181.80
เฉลี่ย	$55.30 = h_u$	$60.60 = h_d$
Velocity head (cm.) $h = h_d - h_u$	$h = 60.60 - 55.30 = 5.30$	
$V = \sqrt{2gh}$ (cm./s)	$V = \sqrt{2 \times 981 \times 5.30} = 102.0$	

ตารางที่ 5-7 ตัวอย่างการตรวจวัดคำนวณจากหน้าตัดการไหลของรูปที่ 5-15

	Stream depth† (cm)	water elevation†† (cm)	Velocity (cm/s)	Area (cm ²)	Q (cm ³ /s)
(A)	50.0	55.3	102.0 (west)	$\frac{0 + 50}{2} \times 100 = 2,500.0$	255,000
(B)	131.6	138.7	118.0	$\frac{50 + 131.6}{2} \times 100 = 9,080.0$	1,071,440
(C)	111.3	114.5	79.2	$\frac{131.6 + 111.3}{2} \times 100 = 12,145.0$	961,884
(D)	90.5	92.8	67.2	$\frac{111.3 + 90.5}{2} \times 100 = 10,090.0$	678,048
(E)	86.2	87.1	42.0	$\frac{90.5 + 86.2}{2} \times 100 = 8,835.0$	371,070
			42.2	$\frac{86.2 + 0}{2} \text{ (east)} \times 100 = 4,310.0$	181,882
				Average =	586,554
$Q = 586,554 \text{ cm}^3/\text{s} \text{ (20.7 ft}^3/\text{s)}$					

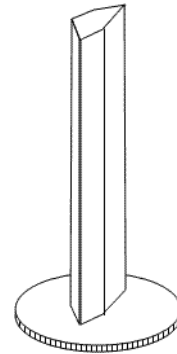
*Q = Flow of water through a cross section of a stream; A = Cross section area; V = stream velocity.

†Measured with knife edge of head rod.

††Measured with back or broad edge of head rod.

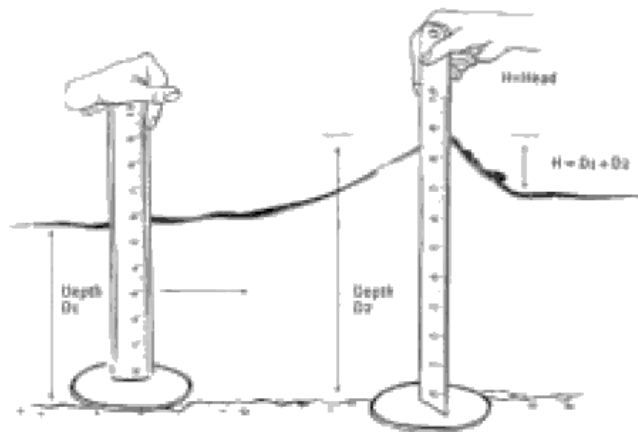
5.6.3 ข้อจำกัดในการตรวจวัดด้วย Head rod และการเกิดความผิดพลาด

- 1) หากความเร็วการไหลน้อยกว่า 0.50 เมตร/วินาที การยกตัวของน้ำจากการต้านการไหลของเครื่องมืออาจน้อยจนอ่านค่าได้ยาก
- 2) หากความเร็วของน้ำมากกว่า 2.50 เมตร/วินาที กระแสน้ำจะทำให้การตั้งเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้งยากลำบาก เพราะหากเครื่องมือไม่อยู่ในแนวตั้งการตรวจวัดจะเกิดความผิดพลาดสูง
- 3) หากกระแสน้ำไหลปั่นป่วนมาก การกระเพื่อมของน้ำจะทำให้อ่านค่าลำบาก เกิดความผิดพลาดได้มาก
- 4) การตรวจวัดอ่านค่าอาจยากลำบากเพราะต้องอ่านค่าบริเวณผิวน้ำ
- 5) พื้นท้องน้ำต้องแข็งพอที่จะไม่ทำให้แท่งไม้เครื่องมือจมลงไปซึ่งทำให้การตรวจวัดผิดพลาดได้มาก เพื่อลดความผิดพลาดกรณีดังกล่าวใช้แผ่นไม้หรือแผ่นเหล็กเป็นฐานของเครื่องวัด ดังแสดงในรูปที่ 5-16



รูปที่ 5-16 การติดตั้งของ Head rod

- 6) หากออกแบบให้ Head rod มีรูปร่างและขนาดต่างไปจากรูปแบบของ Wilm และ Storey จะต้องมีการ Calibrate หาค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องมือด้วย



รูปที่ 5-17 ตัวอย่างการประยุกต์นำไม้บรรทัดกว้าง 1 นิ้วมาใช้เป็น Head rod

บทที่ 6

การวัดกระแสด้วยเครื่องมือวัดกระแสเชิงกล (Mechanical velocity meters)

จากหลักการวัดอัตราการไหลของน้ำในทางน้ำมาจากสมการ $Q = AV$ เมื่อ Q เป็นอัตราการไหล, A เป็นพื้นที่หน้าตัดการไหล และ V เป็นความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำที่ไหลในพื้นที่หน้าตัดการไหลนั้น ซึ่งเรียกว่า **Velocity-area method** ในการตรวจวัดจริงในสนามจะใช้เครื่องมือวัดกระแสน้ำ (Current meters) วัดความเร็วของกระแสน้ำ ที่หน้าตัดการไหลที่กำหนด แล้วใช้หลักการ **Velocity-area method** ดังกล่าว เพื่อคำนวณปริมาณน้ำผ่านทางน้ำที่จุดตรวจวัดนั้น เมื่อนำข้อมูลการตรวจวัดเมื่อน้ำในทางน้ำมีระดับต่างๆ ที่จุดวัดน้ำนั้นมาสร้างเป็นกราฟที่เรียกว่า **Rating curve** และในโอกาสต่อไปหากสร้างสถานีวัดระดับน้ำที่จุดนั้น ก็ใช้ **Rating curve** ดังกล่าวเป็นเครื่องมือในการอ่านค่าปริมาณน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำที่วัดได้

6.1 ชนิดของเครื่องมือวัดเชิงกล (Mechanical current meters)

Mechanical current meters เป็นเครื่องมือที่ทำงานเชิงกล โดยส่วนประกอบของเครื่องมือมีการเคลื่อนไหวเมื่อกระแสน้ำไหลผ่าน การเรียกชื่อเครื่องมือมักจะเรียกตามชื่อผู้ประดิษฐ์พัฒนาเครื่องมือ หรือตามโรงงานที่ผลิต แบ่งย่อยออกเป็น 3 ชนิด คือ เครื่องมือวัดที่มีการหมุนรอบแกนตั้ง เครื่องมือวัดที่มีการหมุนรอบแกนนอน และ **Pendulum current meters**

6.1.1 เครื่องมือวัดที่มีการหมุนรอบแกนตั้ง (Vertical axis)

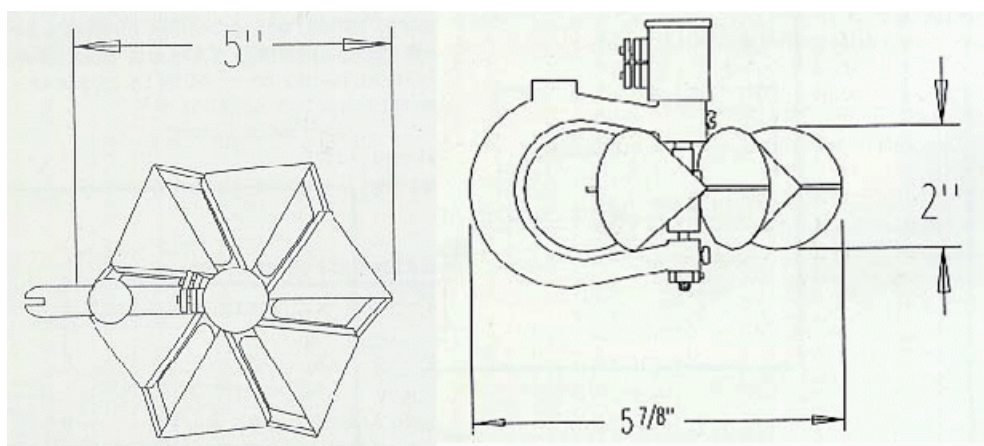
ตัวเครื่องมือวัดมีส่วนประกอบหลักเป็นลูกถ้วยทรงกรวย จึงเรียกว่า **เครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบลูกถ้วย (Cup type current meter)** จากการที่มีลักษณะคล้ายเครื่องวัดกระแสลมแบบลูกถ้วย (**Anemometer**) บางครั้งจึงอาจเรียก **Anemometer current meters**

6.1.1.1 Price type AA เป็นเครื่องมือวัดที่ทำจากเหล็กปลอดสนิม ออกแบบโดย **William Gunn Price** แล้วนำไปผลิตเชิงการค้าครั้งแรกโดย **W. & L.E. Gurley** (บางตำราจึงเรียก **Gurley current meter** ตามชื่อโรงงานที่ผลิต) ประกอบด้วย ลูกถ้วยทรงกรวย 6

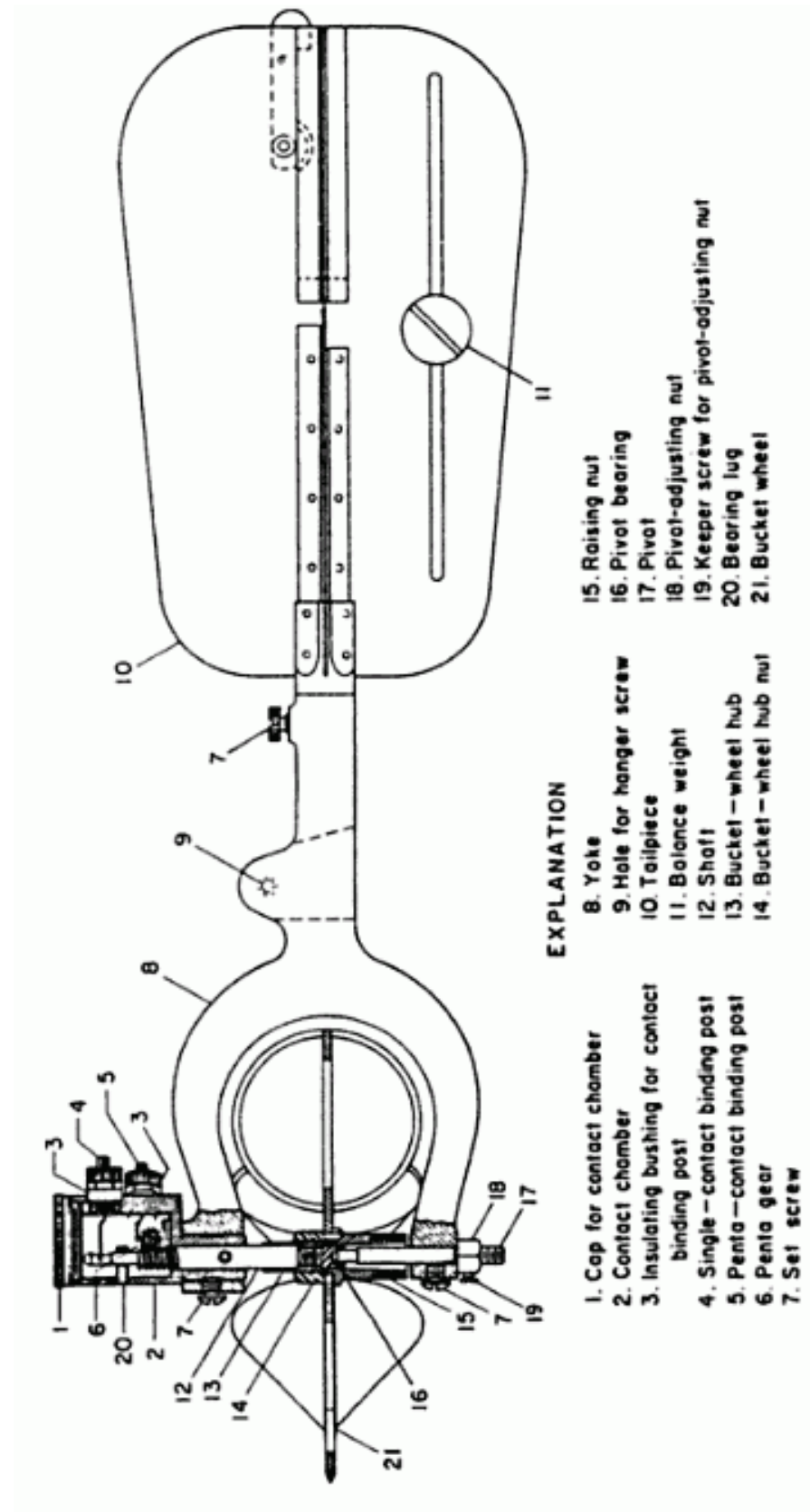
ใบเชื่อมต่อบนแกนหมุนแนวตั้ง ตัวเครื่องมือทั้งหมดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว สูง 2 นิ้ว ปัจจุบันรุ่น Price 622AA เป็นรุ่นมาตรฐาน จะมีสวิทช์หน้าสัมผัสแบบเส้นลวด 2 เส้น ซึ่งในการวัดจะใช้ Battery ร่วมกับหูฟังเพื่อฟังเสียงเมื่อเครื่องมือครบรอบและหน้าสัมผัสสวิทช์สัมผัสปิดวงจร หรือใช้โอห์มมิเตอร์เพื่อสังเกตนับรอบจากการกระดิกของเข็มมิเตอร์เมื่อเครื่องมือครบรอบ นอกจากนี้ยังมีรุ่นปรับปรุงจากรุ่นมาตรฐาน โดยปรับปรุงสวิทช์จากหน้าสัมผัสแบบเส้นลวดที่ไม่สามารถอ่านค่าได้ถูกต้องในรอบการหมุนที่ช้ามากๆ เพราะจะเกิดอาการหน้าสัมผัสของสวิทช์ค้าง เมื่อใช้ต่อกับเครื่องนับรอบอิเล็กทรอนิกส์ ปรับปรุงมาเป็นสวิทช์แม่เหล็กที่ทำงานกับเครื่องนับรอบอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี และยังมีรุ่นปรับปรุงแทนสวิทช์ด้วย Fiber optic sensor ช่วงของการวัด 0.05 – 3.50 เมตร/วินาที โดยถ้าความเร็วน้อยกว่า 0.30 เมตร/วินาที จะมีค่าผิดพลาด 1 % ถ้าความเร็วมากกว่า 0.30 เมตร/วินาที ค่าผิดพลาด 0.5 %

อนึ่ง เนื่องจากเครื่องมือวัดแบบลูกถ้วยนี้ จะวัดผิดพลาดได้มากหากการไหลของน้ำค่อนข้างปั่นป่วน และหากตำแหน่งเครื่องมือไม่วางในทิศทางแนวเดียวกับทิศการไหล ผลการตรวจวัดก็จะผิดพลาดได้เช่นกัน จึงมีการประดิษฐ์cribหางเพื่อติดตั้งเพิ่มกับเครื่องมือวัด เพื่อช่วยปรับทิศทางเครื่องมือให้วางอยู่ในแนวทิศการไหลได้เองตลอดเวลา

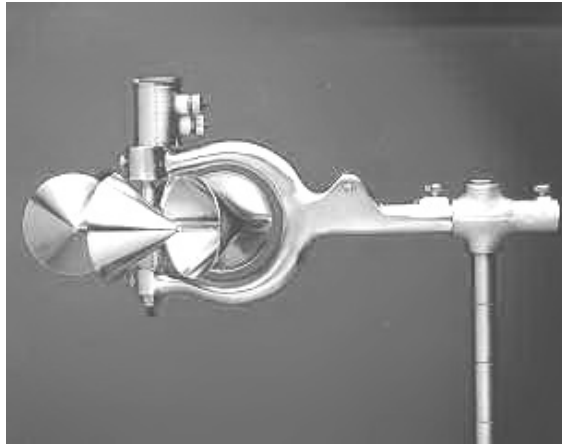
6.1.1.2 Pigmy type เป็นเครื่องมือวัดที่คล้าย Price type AA แต่ได้ย่อส่วนให้มีขนาดเล็กลงมาเป็นขนาด 2 ใน 5 ของขนาดมาตรฐาน พัฒนาโดย Edwin Geary Paul ในปี 1896 เหมาะกับการวัดในทางน้ำขนาดเล็ก หรือที่ซึ่งมีน้ำตื้น (ไม่เกิน 0.30 เมตร) วัดกระแสน้ำได้ในช่วง 0.03 - 1.50 เมตร/วินาที จึงไม่จำเป็นต้องมีหางปรับทิศทาง มีทั้งแบบการวัดรอบด้วยสวิทช์แม่เหล็ก และ Fiber optic sensor ในการวัดนิยมติดตั้งกับแท่งเหล็กหยั่งความลึก



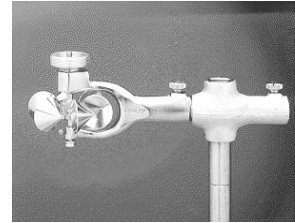
รูปที่ 6-1 แสดงขนาดมาตรฐานของ Price type AA



รูปที่ 6-2 แสดงส่วนประกอบของ Price type AA standard cup type current meters



Price AA type



Pigmy type

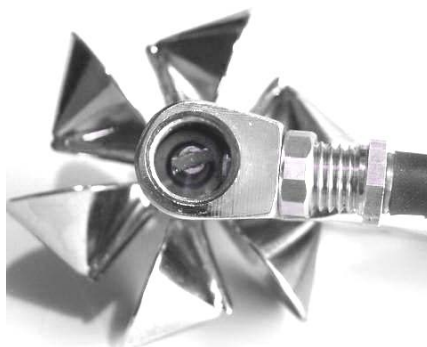
รูปที่ 6-3 Cup type current meters แบบมาตรฐาน Price AA type และแบบ Pigmy type



รูปที่ 6-4 แสดง Price type 622AA และ Pigmy แบบ Fiber optic sensor



รูปที่ 6-5 Price type 622AA ติดตั้งครีบบางช่วยบังคับทิศทาง

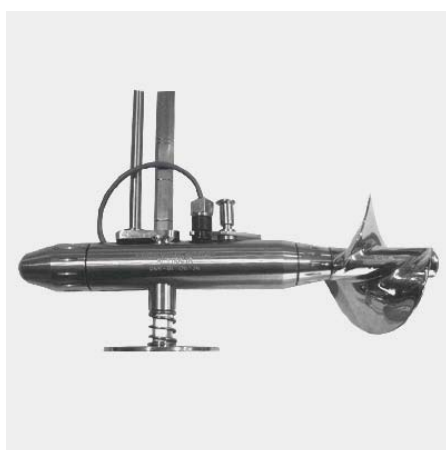


รูปที่ 6-6 แสดงสวิตช์แม่เหล็กของ Price type 622AA รุ่นปรับปรุง

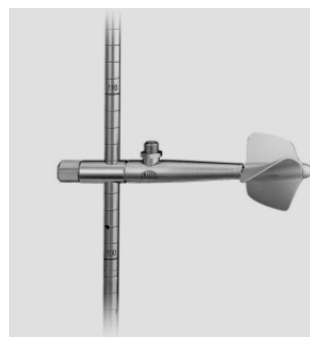
6.1.2 เครื่องมือวัดที่มีการหมุนรอบแกนนอน (Horizontal axis)

เครื่องมือประเภทนี้ได้แก่ เครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบใบพัด (Propeller type) เครื่องมือแบบนี้จะเกิดผลกระทบจากการไหลปั่นป่วนของน้ำน้อยกว่าแบบลูกถ้วย การหมุนจะมีความเสถียรมากกว่า เพราะแกนการหมุนอยู่ในแนวเดียวกับทิศการไหล ไม่มีปัญหาจากตะกอนที่ไหลปนมากับน้ำ มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา เครื่องมือแบบนี้ต้นแบบประดิษฐ์ในยุโรป มีหลายรูปแบบ เช่น Ott meters (Germany), Neyrpic "Dumas" meters (France), Hoff meters และ Haskell meters (USA), Braystoke meters (England), Oss meters เป็นต้น

เครื่องมือวัดในกลุ่มนี้แต่ละแบบ (ผู้ผลิตแต่ละราย) มักมีรุ่นมาตรฐาน และรุ่นปรับปรุงที่มีขนาดเล็ก โดยแต่ละรุ่นจะมีขนาดต่างๆ ที่มีช่วงของการวัดความเร็วที่ต่างกัน บางแบบยังคงมีการผลิตใช้งานจนถึงปัจจุบัน



OTT C31 Current meter



OTT C2 Small current meter

รูปที่ 6-7 Propeller current meter ที่ผลิตโดย Ott Hydrometrie

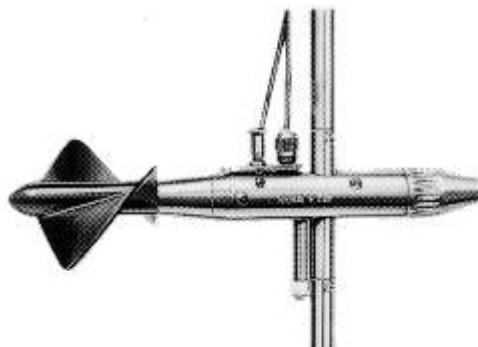


OSS - B1



OSS - PC1

รูปที่ 6-8 OSS-B1 Universal current meter และ OSS-PC1 Pigmy current meter
ที่ผลิตโดย Hydrological Service

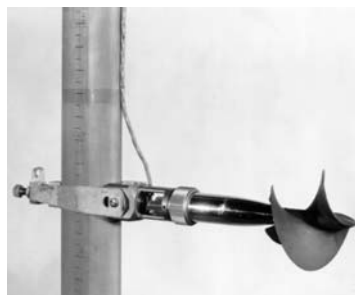


SEBA Universal current Meter F1

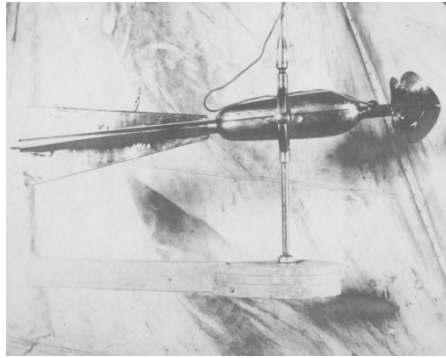


SEBA-Mini current Meter M1

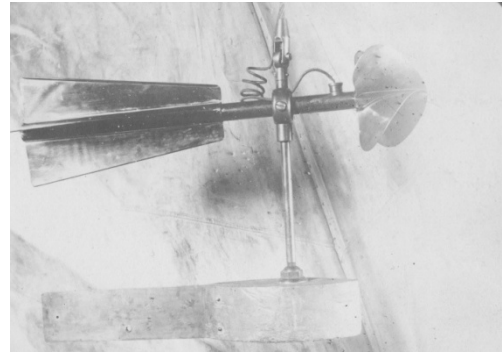
รูปที่ 6-9 Propeller current meter ผลิตโดย SEBA Hydrometrie



รูปที่ 6-10 Neyrpic "Dumas" current meters

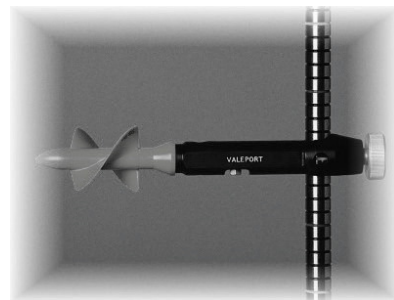
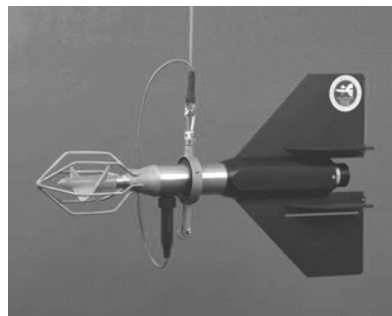
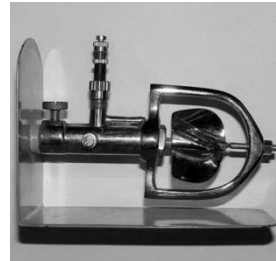
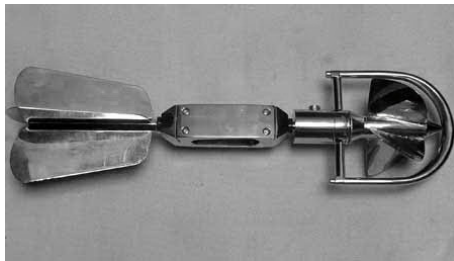


Haskell meters type A



Haskell meters type B

รูปที่ 6-11 Haskell current meters

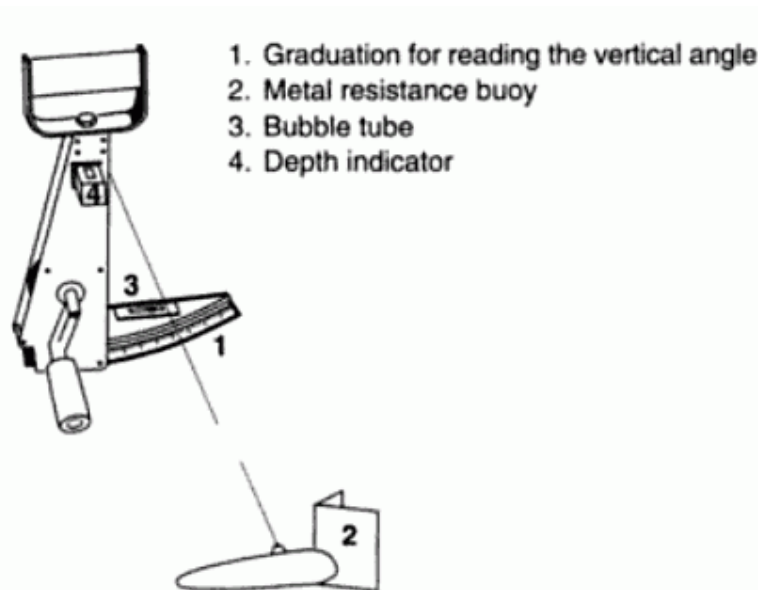


รูปที่ 6-12 Propeller current meters แบบอื่น ๆ

6.1.3 Pendulum current meters

เป็นเครื่องมือวัดกระแสน้ำที่ทำงานโดยใช้หลักการ เมื่อปล่อยวัตถุที่ผูกด้วยเส้นลวดหรือเส้นเชือกลงไปทางน้ำ เมื่อน้ำนิ่งหรือมีกระแสน้ำน้อยมากๆ วัตถุที่ผูกไว้กับเส้นเชือกจะอยู่ในแนวตั้ง แต่เมื่อมีกระแสน้ำแรงขึ้นวัตถุที่ผูกไว้จะต้านการไหลของน้ำ ทำให้วัตถุถูกกระแสน้ำผลัก ทำให้แนวเส้นเชือกเบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งความเร็วกระแสน้ำจะสัมพันธ์กับมุมที่เชือกเบนไป ตัวเครื่องมือวัดแบบ Pendulum current meters จะประกอบด้วยรอกปล่อยเส้น

ลวดหรือเชือกที่ปลายเชือกผูกทุ่นโลหะ (Metal resistance buoy) ที่ใช้ทำหน้าที่ปะทะกับ กระแสน้ำ ตัวเครื่องมือจะมีลูกน้ำเพื่อปรับระดับเครื่องมือให้อยู่ในแนวราบตลอดเวลา จะได้อ่านค่า มุมที่แนวเส้นเชือกเบี่ยงเบนไปจากแนวดิ่งได้ถูกต้อง โดยตัวอย่างเครื่องมือวัด Pendulum current meters แบบหนึ่งแสดงในรูปที่ 6-13 ที่สามารถวัดกระแสน้ำได้ระหว่าง 0 – 2 เมตร/วินาที



รูปที่ 6-13 แสดง Pendulum current meters แบบหนึ่งมีชื่อเรียก KLM

การตรวจวัดจะอ่านค่ามุมจากแนวเส้นเชือกที่เบนไปจากแนวดิ่ง (แนวดิ่งความเร็ว กระแสน้ำ = 0) แล้วนำค่ามุมไปเทียบกับ Calibrate curve ของเครื่องมือจะได้ค่าความเร็วของการไหล ซึ่งความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับความลึกที่หย่อนทุ่นโลหะ ขนาดและน้ำหนักของทุ่น ขนาดของเส้นลวดหรือเชือก และค่า Calibrate curve ของทุ่นโลหะเฉพาะแต่ละตัว

ในรูปที่ 6-14 แสดง Pendulum current meters อีกแบบหนึ่ง ใช้สำหรับวัดกระแสน้ำ ที่ไหลช้ามาก ๆ ระหว่าง 0.3 - 3.0 ซม./วินาที การวัดจะใช้กล้องถ่ายภาพรูปบันทึกตำแหน่งของทุ่น (Fig 1) หรือแผ่นวัดรูปวงกลม (Fig 2) ที่เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งปกติในแนวดิ่ง

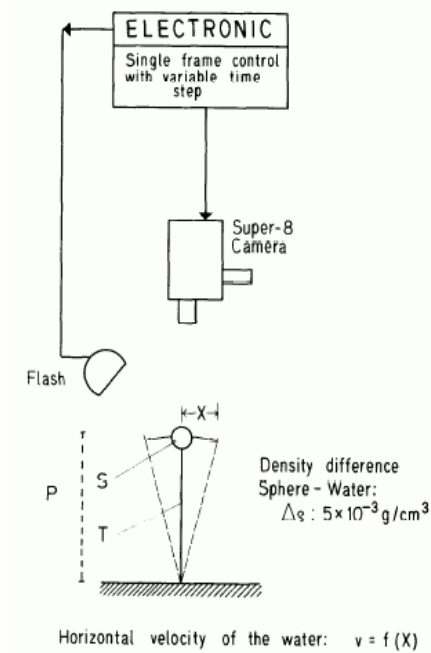


Fig. 1. Principle of operation of the bottom-resting current meter. Current-sensitive pendulum (P) consists of buoyant sphere (S) and light thread (T; diam about 0.3 mm).

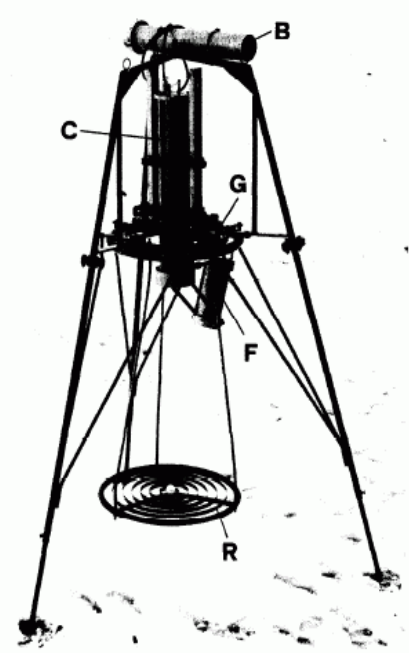


Fig. 2. Bottom-resting current meter. C—Camera housing; F—flash; G—gimbals mount; R—bottom ring with pendulum; B—battery pack. The sphere, shown resting on the bottom ring, will float about 55 cm above it when underwater.

รูปที่ 6-14 แสดง Pendulum current meters อีกแบบหนึ่ง ใช้วัดกระแสน้ำที่ไหลช้ามาก ๆ

ปัจจุบัน Pendulum current meters ไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะจะใช้ได้ดีเฉพาะกับทางน้ำหน้าตารูปสี่เหลี่ยมที่มีอัตราการไหลค่อนข้างคงที่ และลึกไม่มากเท่านั้น อีกทั้งจะมีปัญหาจากกระแสลมทำให้การวัดผิดพลาดได้มาก และเส้นเชือกมักไม่อยู่นิ่งจะมีการแกว่งตัวหากกระแสน้ำไหลไม่คงที่ ทำให้การอ่านค่ามุมหรือตำแหน่งตัววัดผิดพลาด

6.2 วิธีการตรวจวัดกระแสน้ำโดยใช้ Cup type และ Propeller type current meters

(อาจเรียก Rotor current meters เพราะมีการหมุนรอบแกน)

Cup type และ Propeller type current meters อาจเรียก Rotor current meters เพราะมีการหมุนรอบแกน

ต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการตรวจวัดใน 3 ประเด็น คือ (1) การติดตั้งเครื่องมือ (2) การการหยั่งความลึกของน้ำ และการกำหนดตำแหน่งความลึกของเครื่องมือวัด และ (3) วิธีการตรวจวัด โดยทั้ง 3 ประเด็นจะพิจารณาเลือกจากขนาดความกว้าง ความลึก รวมทั้งสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ของทางน้ำ เพื่อให้การตรวจวัดสะดวก รวดเร็ว มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

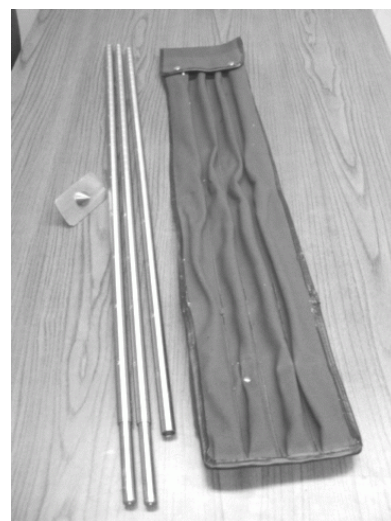
6.2.1 การติดตั้ง Current meter

รูปแบบการติดตั้ง Current meter เพื่อวัดความเร็วกระแสน้ำในทางน้ำนั้น ต้องพิจารณาถึงวิธีที่จะตรวจวัด ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดความกว้าง ความลึก และสภาพแวดล้อมของทางน้ำ โดยนิยมติดตั้งกับท่อนโลหะหยั่งวัด และการติดตั้งกับสายเคเบิล

1) การติดตั้งเครื่องมือวัดกับท่อนโลหะหยั่งวัด (Wading rod)

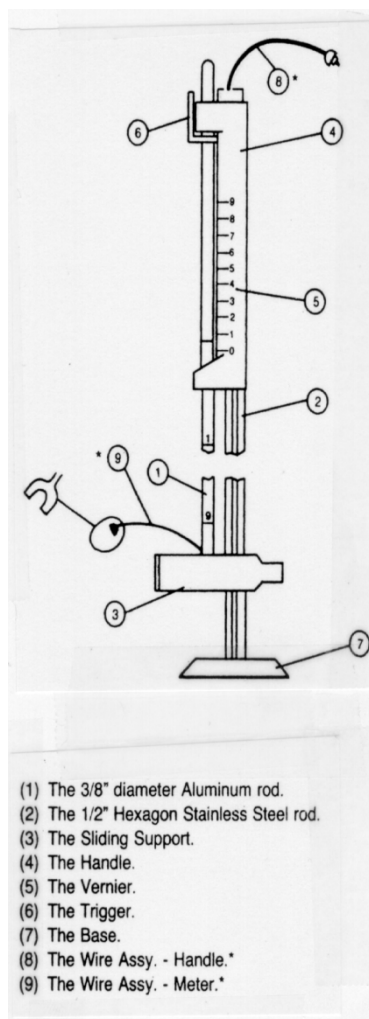
ใช้ในการตรวจวัดในทางน้ำที่ไม่ลึกมาก และกระแสน้ำไม่แรงมาก โดยออกแบบเป็นท่อนโลหะสำหรับใช้ติดตั้งกับเครื่องมือวัดมาโดยเฉพาะ เพื่อให้สะดวกในการใช้งาน ทั้งเพื่อการหยั่งวัดความลึกและติดตั้งเครื่องมือวัดที่ระดับความลึกต่างๆ ซึ่ง USGS กำหนดรูปแบบมาตรฐานไว้ 2 ชนิด คือ

1.1) แบบธรรมดา (Universal wading rod) เป็นท่อนโลหะกลมมี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดรุ่นมาตรฐาน ยาวท่อนละ 1.00 ม. ต่อกันได้ด้วยเกลียว (1 ชุดมี 3 ท่อน หรือ 3.00 ม.) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดรุ่นย่อส่วนขนาดเล็ก หรือ Pigmy ยาวท่อนละ 0.50 ม. ต่อกันได้ด้วยเกลียวเช่นกัน (1 ชุดมี 3 ท่อน หรือ 1.50 ม.) นอกจากนี้จะมีฐานรองเพื่อให้เกิดความมั่นคงในขณะวัด และไม่ให้แท่งโลหะจมลงไปในผิวท้องทางน้ำที่จะทำให้วัดความลึกผิดพลาด



รูปที่ 6-15 Universal wading rod

1.2) แบบมีตัวปรับระดับด้านบน (Top-setting wading rod) มีลักษณะเป็นท่อนเหล็กกลม 2 ท่อนประกบกัน ท่อนแรกมีลักษณะคล้าย Universal wading rod ทำหน้าที่หยั่งกับท้องทางน้ำ และอีกท่อนทำหน้าที่ติดตั้งเครื่องมือวัด และใช้ปรับตำแหน่งเครื่องมือวัดให้อยู่ที่ระดับความลึกที่ต้องการอย่างสะดวก มีความยาวสูงสุดให้เลือก ระหว่าง 1.20 – 3.00 เมตร



รูปที่ 6-16 Top-setting wading rod



ในทางปฏิบัตินั้นนอกจากจะใช้ท่อนโลหะแบบมาตรฐานดังกล่าวแล้ว อาจดัดแปลงใช้ท่อเหล็ก ท่อนไม้ หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีลักษณะเป็นท่อนกลมที่มีความแข็งแรง เพื่อติดตั้ง **Current meter** ก็ได้

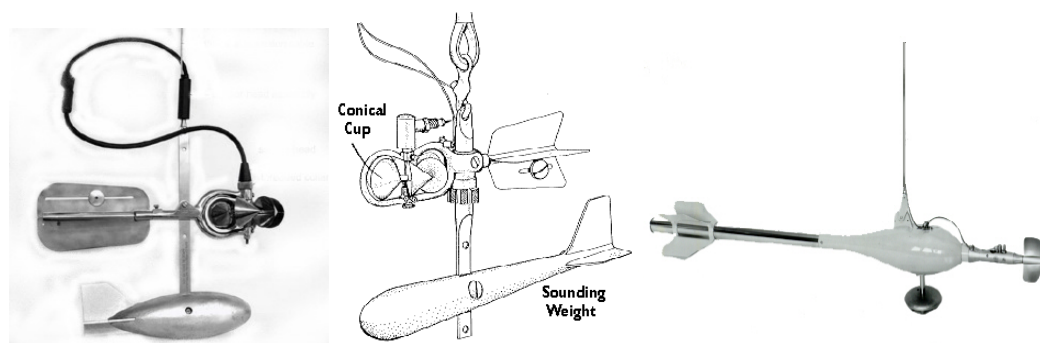
การติดตั้งเครื่องมือวัดอาจติดตั้งตัวเดียว หรือติดตั้งหลาย ๆ ตัวที่ตำแหน่งระดับความลึกที่ต้องการก็ได้ การติดตั้งหลายตัวจะทำให้การตรวจวัดในแต่ละตำแหน่งทำได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้นเพราะสามารถอ่านค่าได้พร้อมกันในการวัดครั้งเดียว

รูปที่ 6-17 แสดงการติดตั้ง **Current meter** หลายตัว

2) การติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อหยั่งวัดกับสายเคเบิล

ใช้ติดตั้ง **Current meters** เพื่อตรวจวัดในทางน้ำที่ลึกและกระแสน้ำค่อนข้างแรง (ไม่สะดวกในการตรวจวัดหากติดตั้งเครื่องมือกับ **Wading rod** ที่กล่าวข้างต้น) รูปแบบการติดตั้ง มักติดตั้งบนแท่งโลหะที่ผูกสายเคเบิล (เชือก หรือ ลวดสลิง) ไว้ด้านบน และติดตั้งน้ำหนักถ่วงไว้ด้านใต้ หรือติดตั้งกับอุปกรณ์พิเศษที่ทำหน้าที่เป็นน้ำหนักถ่วงและส่วนประกอบอื่นๆของเครื่องมือวัดด้วย

การติดตั้งเครื่องมือวัดกับสายเคเบิลจะต้องติดตั้งกริบหางบังคับทิศทางด้วยเสมอ ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อหยั่งวัดกับสายเคเบิล แสดงในรูปที่ 6-18



รูปที่ 6-18 การติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อหยั่งวัดกับสายเคเบิล

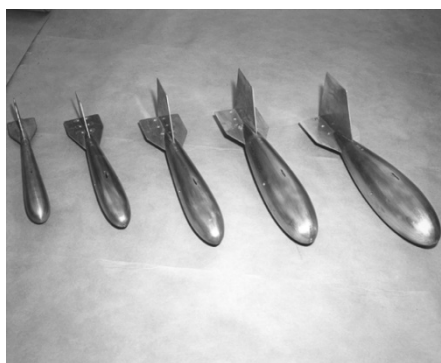
6.2.2 การหยั่งความลึกของน้ำ และการกำหนดตำแหน่งความลึกของเครื่องมือวัด

6.2.2.1 การหยั่งความลึกโดยใช้ **Wading rod**

ตัว **Wading rod** จะมีขีดแบ่ง **Scale** ลักษณะเป็นรอยบากเป็นปล้องหรือข้อละ 1 ซม. ที่จะสามารถอ่านค่าความลึกได้โดยตรง โดยถ้าจะให้สะดวกในการอ่านค่าอาจเขียนค่าตัวเลขหรือทำเครื่องหมายไว้ก็ได้ แต่ผู้ที่ไม่ชำนาญในการอ่านค่าโดยตรงดังกล่าว ก็อาจใช้ตลับเมตรวัดระยะก็ได้ จะวัดได้เร็วขึ้นและไม่ผิดพลาด (กรณีหยั่งวัดด้วยท่อนไม้ ท่อนโลหะอื่นๆ ก็ให้ใช้คู่กับตลับเมตร) ในการหยั่งต้องให้ **Wading rod** ตั้งอยู่ในแนวตั้งจะได้ค่าความลึกที่ถูกต้อง

เมื่อได้ค่าความลึกของน้ำแล้ว ก็นำมาหาตำแหน่งค่าความลึกที่จะติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่ต้องการต่อไป การวัดทำได้ 2 รูปแบบ คือ การวัดที่ปรับตำแหน่งเครื่องมือวัดให้เหมาะสม แล้ววาง Wading rod ในทางน้ำให้ฐานวางบนท้องทางน้ำแล้ว และการวัดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดที่ปลาย Wading rod การปรับตำแหน่งที่จะวัดก็เพียงแต่ยก Wading rod ขึ้นหรือลงให้มาอยู่ในระดับความลึกที่ต้องการ โดยทำเครื่องหมายจุดควบคุมตำแหน่งระดับผิวน้ำที่ Wading rod

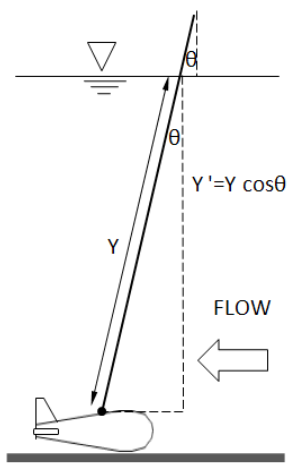
6.2.2.2 การหยั่งความลึกโดยใช้สายเคเบิล (หรือเชือก หรือลวด)



รูปที่ 6-19 Sound weight ขนาดต่าง ๆ

การหยั่งวัดความลึกจะผูกถ่วงสายเคเบิลกับน้ำหนักถ่วง (Sound weight) ที่มีรูปร่างคล้ายตอร์ปิโดเพื่อให้ลดแรงเสียดทานจากกระแสน้ำให้น้อยที่สุด จะได้จมดิ่งลงไปตรง ๆ และน้ำหนักทำให้สายเคเบิลตึง แล้วปล่อยสายเคเบิลลงจน Sound weight สัมผัสท้องน้ำพอดี (ตำแหน่งที่ถ่วงสายเคเบิลลงนิดหนึ่งแล้วสายเคเบิลจะหย่อน ขณะเดียวกันถ้าดึงสายเคเบิลขึ้นนิดหนึ่งก็จะตึง) แต่หากขนาดน้ำหนัก Sound weight น้อยและกระแสน้ำแรงมาก ตัว Sound weight และสายเคเบิลอาจถูกกระแสน้ำปะทะทำให้ถูกผลักไปจากแนวตั้งที่เป็นแนวตรวจวัดได้ นอกจากนี้แรงจากกระแสน้ำอาจทำให้เคเบิลที่ตึงจนตึงแล้วไม่เป็นแนวตรงแต่เป็นแนวโค้ง ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดน้ำหนัก Sound weight และขนาดเคเบิลให้สอดคล้องกับกระแสน้ำด้วย

สิ่งที่สำคัญในการตรวจวัดประการหนึ่งคือ หากผู้ตรวจวัดอยู่สูงกว่าผิวน้ำมากจนไม่สะดวกหรือไม่สามารถกำหนดตำแหน่งเคเบิลที่ผิวน้ำได้ จึงจำเป็นต้องวัดระยะจากปลายสายที่อยู่เหนือผิวน้ำขึ้นไปซึ่งต้องกำหนดให้ตำแหน่งปลายสายเป็นตำแหน่งที่คงที่ตำแหน่งเดียว ในการตรวจวัดต้องหยั่งวัดระยะความลึกจากปลายสายถึงผิวน้ำเพื่อห้ระยะเหนือผิวน้ำออกด้วย



รูปที่ 6-20 แสดงการวัดความลึกของทางน้ำ

การปรับแก้ค่าความลึกที่เบี่ยงเบนไปจากแนวตรวจวัด พิจารณา รูปที่ 6-20

- การหยั่งวัดความลึกของน้ำเมื่อ Sound weight วางอยู่บนผิวท้องน้ำ การปรับความลึกที่เบนไปจากแนวตรวจวัดหรือแนวตั้งเป็นมุม θ ทำได้ 2 รูปแบบ คือ

- (1) การเลื่อนตำแหน่งปลายสายเคเบิลบนผิวน้ำเพื่อให้สายเคเบิลปรับมาอยู่ในแนวตั้ง ($\theta \approx 0$)

- (2) ปรับแก้ระยะความลึกโดยใช้หลักการตรีโกณมิติ $Y' = Y \cos \theta$

- กรณีการกำหนดตำแหน่งความลึกของเครื่องมือวัด จะปรับดึงสายเคเบิลขึ้นลงให้เครื่องมือวัดวางอยู่ที่ระดับความลึกที่ต้องการ (Sound weight ไม่วางอยู่บนท้องน้ำ) ถ้าสายเคเบิลเบนไปจากแนวตั้งเป็นมุม θ จะมากหรือน้อยจะแปรผันตรงกับกระแสน้ำ การปรับแก้ระยะความลึกจะใช้หลักการตรีโกณมิติ $Y' = Y \cos \theta$

6.2.3 วิธีการตรวจวัดด้วย Rotor current meter

จะอธิบายถึงวิธีหรือรูปแบบในการนำเครื่องมือไปทำการตรวจวัดว่าทำได้ลักษณะใดบ้าง ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้นั้นจะขึ้นกับชนิดของเครื่องมือ และสภาพของจุดที่ตรวจวัด ได้แก่

- 1) การลงไปหยั่งวัดโดยตรง (Wading measurement)
- 2) การวัดจากสะพาน (Bridge measurement)
- 3) การตรวจวัดจากกริมตลิ่งโดยใช้ระบบสายเคเบิล (Cable supported measurement)
- 4) การตรวจวัดจากรถกระเช้า (Cable car measurement)
- 5) การตรวจวัดโดยอาศัยเรือ (Measurement by boat)

1) การลงไปหยั่งวัดโดยตรง

วิธีนี้เหมาะกับทางน้ำที่ไม่ลึกมาก กระแสน้ำไม่แรง ตัวผู้วัดจะลงไปหยั่งวัดในทางน้ำ โดยติดตั้งเครื่องมือวัดกับท่อนโลหะหยั่งวัด (Wading rod)

ในการหยั่งวัด ถ้าตัวผู้วัดต้องลงไปอยู่ในน้ำด้วย ต้องวางเครื่องมือวัดด้านเหนือน้ำหรือด้านหน้า ในตำแหน่งที่ตัวผู้วัดที่ปะทะกับน้ำเกิดการต้านการไหล แล้วไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการวัด



รูปที่ 6-21 การลงไปหยั่งวัดโดยตรง และใช้เชือกกำหนดแนวและตำแหน่งในทางน้ำที่กว้าง

2) การตรวจวัดจากสะพาน

โดยสะพานจะมีความยาวคลุมความกว้างของทางน้ำ จึงสามารถกำหนดจุดแบ่งทางน้ำเป็นส่วนย่อยจากสะพานได้เลย ทำให้สะดวกในการวัด

2.1) กรณีทางน้ำไม่ลึก ไม่กว้างมาก และสะพานไม่สูงจากผิวน้ำมากนัก (อาจใช้แผ่นไม้หรือโครงเหล็กพาดเป็นสะพานชั่วคราวก็ได้) การวัดจะติดตั้งเครื่องมือวัดกับ Wading rod กรณีนี้ตัวผู้วัดไม่ต้องลงไปในน้ำ แต่ถ้าระดับน้ำค่อนข้างลึกและกระแสน้ำแรงจนใช้คนจับ Wading rod แล้วไม่มั่นคง ก็อาจใช้อุปกรณ์ช่วยยึดจับได้

2.2) กรณีทางน้ำลึก กว้างมาก และสะพานอยู่สูงจากผิวน้ำ จะติดตั้งเครื่องมือวัดกับสายเคเบิล โดยอาจมีอุปกรณ์ประกอบเพื่ออำนวยความสะดวกในการตรวจวัดตามความเหมาะสม และจำเป็น เช่น อุปกรณ์ยึดเครื่องมือกับราวสะพาน, ระบบควบคุมสายเคเบิลที่อาจมีตัววัดระยะด้วย, ระบบบรอก, เกรน (ตัวอย่างเช่น รุ่นมาตรฐาน Type A crane) เป็นต้น



อุปกรณ์ยึดเครื่องมือใช้ควบคุมสายเคเบิลกับราวสะพาน



Type A crane

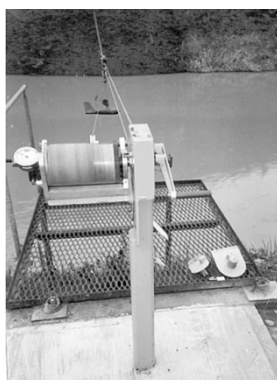
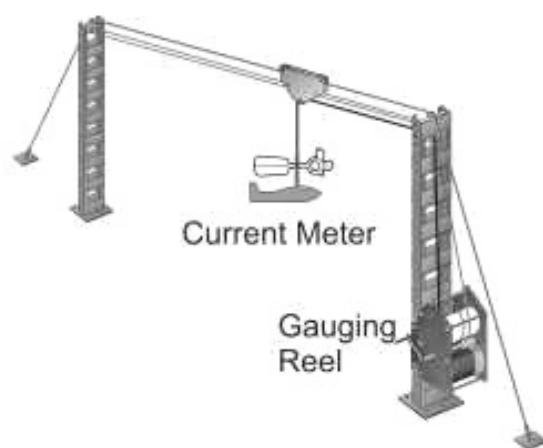


ตัวอย่างการตรวจวัดจากสะพานที่ติดตั้ง Propeller current meter 8 ตัว

รูปที่ 6-22 แสดงอุปกรณ์ประกอบเพื่ออำนวยความสะดวกในการตรวจวัดจากสะพาน

3) การตรวจวัดจากริมตลิ่งโดยใช้ระบบสายเคเบิล (Cable way)

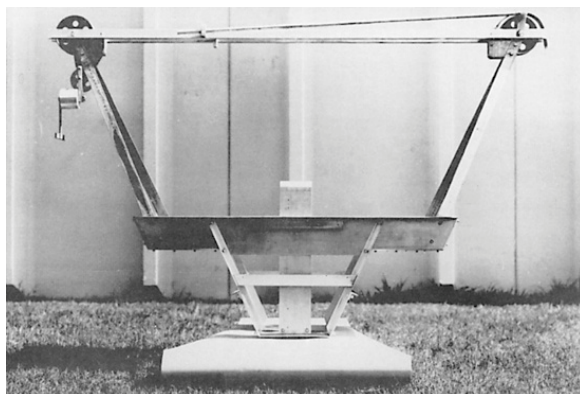
จะใช้ระบบสายเคเบิลที่สามารถควบคุมได้ทั้งแนวราบเพื่อพาเครื่องตรวจวัดไปยังตำแหน่งหน้าตัดย่อยของทางน้ำที่ต้องการ และการควบคุมในแนวดิ่งเพื่อหย่อนเครื่องมือวัดลงไป ในตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด จากมิเตอร์แสดงระยะการปล่อยสายเคเบิลออกไป โดยตัวผู้ตรวจวัดจะควบคุมอุปกรณ์และทำการตรวจวัดจากบนตลิ่ง



รูปที่ 6-23 แสดงการตรวจวัดโดยใช้ระบบสายเคเบิล

4) การตรวจวัดจากรถกระเช้า (Cable car)

เป็นรูปแบบการตรวจวัดที่ใช้รถกระเช้าที่ติดตั้งกับระบบสายเคเบิลเพื่อพาตัวผู้ตรวจวัดไปวัดในตำแหน่งที่ต้องการ ทำให้การตรวจวัดทำได้สะดวกและรวดเร็วเกิดความผิดพลาดได้น้อยกว่าการตรวจวัดจากริมตลิ่งโดยใช้ระบบสายเคเบิล ในการตรวจวัดจะติดตั้งเครื่องมือกับสายเคเบิล



รูปที่ 6-24 แสดงกระเช้าแบบหนึ่ง และการตรวจวัดจากรถกระเช้า

5) การตรวจวัดโดยอาศัยเรือ

การตรวจวัดโดยอาศัยเรือนี้มี 2 วิธีการ ที่ต้องทำความเข้าใจเพื่อไม่เกิดความสับสน คือ การตรวจวัดจากเรือ และการใช้เรือตรวจวัด โดยหลักการตรวจวัดโดยอาศัยเรือนี้จะมี 2 ขั้นตอนสำคัญในการตรวจวัด คือ (1) ต้องรู้หน้าตัดการไหลของทางน้ำในตำแหน่งที่จะตรวจวัด ซึ่งอาจได้จากแผนที่รูปตัดทางน้ำที่สำรวจไว้แล้ว หรือทำการหยั่งวัดเอง เพื่อใช้วางแผนแบ่งพื้นที่หน้าตัดการไหลย่อย และจะได้ทราบความลึกของน้ำเพื่อกำหนดระยะตำแหน่งความลึกของ **Current meter** ได้เหมาะสม (2) การตรวจวัดกระแสน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต้องควบคุมทั้งตำแหน่งของเรือ และระดับความลึกของ **Current meter**

5.1) การตรวจวัดจากเรือ (Boat measurement)

วิธีนี้เป็นจะใช้เรือเป็นพาหนะพาผู้ตรวจวัดออกไปตรวจวัดในทางน้ำ โดยเรือจะต้องไปจอดในตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด (ถ้ากระแสน้ำแรงต้องทอดสมอ) ซึ่งได้แก่ตำแหน่งที่ได้กำหนดแบ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดย่อยของทางน้ำนั่นเอง

ในการการตรวจวัดจากเรือนี้ มีสิ่งที่ต้องควบคุม ะมัดระวัง ได้แก่

(1) ต้องคำนึงถึงภัยทางน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

(2) ทางน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเร็ว ถ้าลำน้ำกว้างและต้องแบ่งพื้นที่หน้าตัดย่อยเพื่อตรวจวัดหลาย ๆ ตำแหน่ง กว่าที่จะตรวจวัดเสร็จระดับน้ำที่ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวัด จึงต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานหน้าที่ต่าง ๆ เช่น

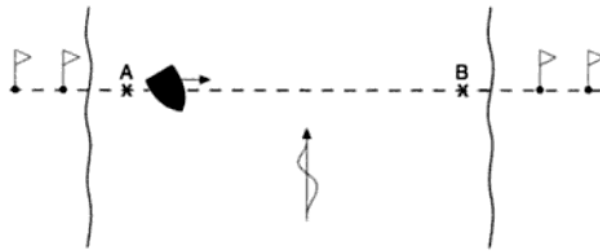
ผู้ขับเรือ ผู้แจ้งบอกควบคุมตำแหน่งเรือ ผู้ตรวจวัดตามจำนวนเครื่องมือที่ต้องตรวจวัดในเวลาเดียวกัน เป็นต้น ต้องวางแผนเลือกช่วงเวลาให้เหมาะสม กำหนดชุดปฏิบัติงานหลายชุด (ใช้เรือหลายลำ) เพื่อเร่งรัดการปฏิบัติงานให้ตรวจวัดเสร็จทัน

(3) เพื่อลดความผิดพลาดในการตรวจวัด ต้องควบคุมตำแหน่งของเรือให้อยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ถูกต้องให้มากที่สุด ทั้งในแนวหน้าตัดการไหล และอยู่ในตำแหน่งระยะแบ่งของหน้าตัดย่อย

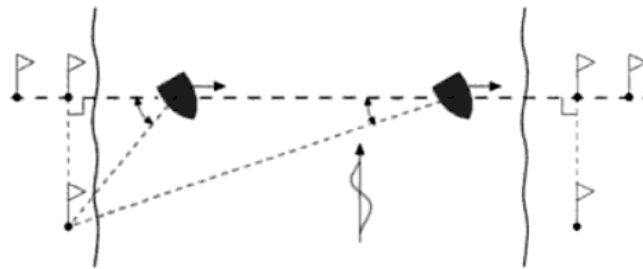
(4) ต้องเลือกวิธีการวัดความเร็วเฉลี่ยการไหลของหน้าตัดย่อยให้เหมาะสมกับปริมาณจุดที่ต้องตรวจวัด และระยะเวลาที่ระดับน้ำในทางน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ถ้าทางน้ำกว้างมากมีจุดตรวจวัดมาก ก็อาจเลือกใช้วิธีการวัดเพื่อหาค่าความเร็วเฉลี่ยที่ความลึกค่าเดียว แทนการตรวจวัดที่หลายระดับความลึก เป็นต้น

การควบคุมตำแหน่งของเรือ ทำได้หลายวิธี ขึ้นกับขนาดความกว้างของทางน้ำ และจุดสังเกตที่ใช้เปรียบเทียบกับแนวหรือมุม โดยเป็นสิ่งที่ต้องวางแผนไว้ล่วงหน้าเสมอ

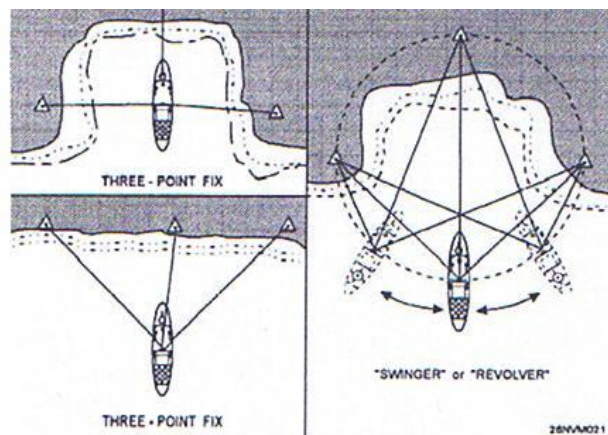
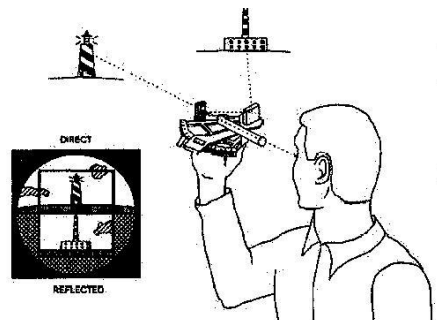
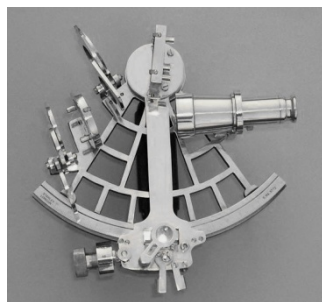
- ถ้าทางน้ำไม่กว้างมาก อาจควบคุมแนวหน้าตัดการไหลและตำแหน่งแบ่งหน้าตัดย่อย โดยการใช้แนวเส้นเชือกและแบ่งระยะบนเส้นเชือก
- ถ้าทางน้ำไม่กว้างมาก วิธีนี้คล้ายกรณีแรกแต่ไม่จึงเชือก จะให้ผู้สังเกตบนฝั่งคอยบอกควบคุมแนวของหน้าตัด จากการใช้จุดสังเกตริมฝั่ง 2 จุดที่มีอยู่ก่อนแล้วในพื้นที่หรือสร้างขึ้นมาเอง ซ้อนทับกับตำแหน่งเรือ (หลักการวางแนวโดยใช้ 3 pole ในงานสำรวจ) ส่วนระยะตำแหน่งที่จะตรวจวัดจะปล่อยเชือกวัดระยะต่อเนื่องกันไป
- การใช้หลักการทางตรีโกณมิติ ใช้จุดสังเกต 3 จุดเป็นตัวควบคุมทั้งแนวหน้าตัด และระยะตำแหน่งที่จะทำการตรวจวัด โดยอาศัยอุปกรณ์สำรวจชนิดมือถือ เช่น Sextant เป็นต้น กรณีนี้ผู้ทำหน้าที่ควบคุมแนวระยะตำแหน่งจะอยู่บนเรือ
- การใช้เครื่องอ่านพิกัดทางภูมิศาสตร์ (Global Positioning System : GPS) โดยต้องเลือกใช้เครื่องที่อ่านค่าได้ละเอียดเหมาะสมกับการปฏิบัติงาน



รูปที่ 6-25 หลักการใช้เชือกเป็นตัวกำหนดแนวและกำหนดตำแหน่งตรวจวัด หรือการให้ผู้สังเกตบนฝั่งคอยควบคุมแนวของหน้าตัด คู่กับใช้ความยาวเชือกกำหนดระยะ



รูปที่ 6-26 หลักการใช้หลักการทางตรีโกณมิติ ใช้จุด 3 จุดเป็นตัวควบคุม



รูปที่ 6-27 การใช้เครื่องมือสำรวจ Sextant และหลักการทางตรีโกณมิติควบคุมตำแหน่งเรือ

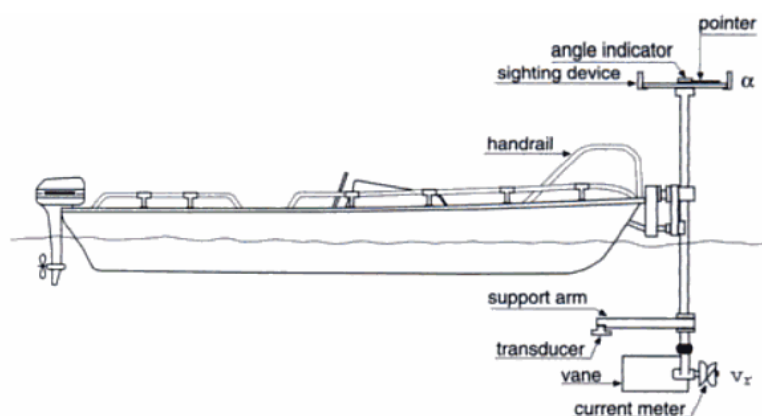
การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด เลือกชนิดและขนาดของเครื่องมือให้เหมาะสมกับความเร็วของกระแสน้ำ เพื่อทำการตรวจวัดแต่ละตำแหน่งหรือจุด

- 1) ถ้าน้ำไม่ลึกมาก ติดตั้ง Current meter กับ Wading rod หรือท่อเหล็ก หรือท่อนไม้
- 2) ถ้าน้ำลึกมาก ติดตั้ง Current meter เพื่อตรวจวัดกับสายเคเบิล

5.2) การใช้เรือในการตรวจวัดด้วยวิธี Moving Boat

ตามที่กล่าวข้างต้นว่ากรณีที่ทางน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเร็ว ถ้าน้ำกว้างและต้องแบ่งพื้นที่หน้าตัดย่อยเพื่อตรวจวัดหลาย ๆ ตำแหน่ง กว่าจะตรวจวัดเสร็จตลอดแนวหน้าตัด ถ้าวัดน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเร็ว จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวัดนั้น จึงได้มีการคิดค้นพัฒนาวิธีการตรวจวัดโดยอาศัยเรือรูปแบบใหม่ ที่เน้นความรวดเร็ว และความถูกต้องในการปฏิบัติงาน วิธีการนี้เกิดขึ้นเพราะการมีอุปกรณ์แบบใหม่ ๆ ที่มีประสิทธิภาพในการทำงาน โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดกับเรือ ในการตรวจวัดจะให้เรือแล่นไปในแนวหน้าตัดของทางน้ำและให้เครื่องมือตรวจวัดทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา จึงเรียกการตรวจวัดวิธีนี้ว่า Moving boat method

5.2.1) เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดด้วยวิธี Moving Boat



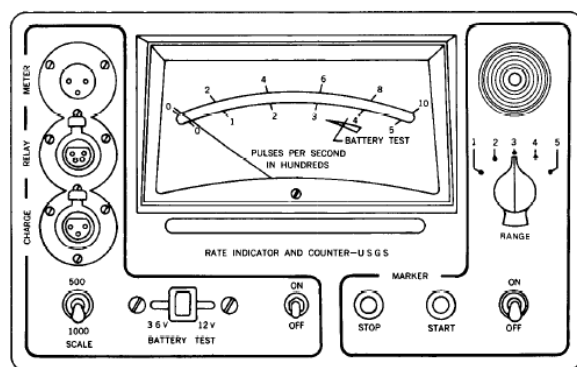
รูปที่ 6-28 การติดตั้ง Current meter กับอุปกรณ์พิเศษที่หัวเรือ

- (1) ติดตั้ง Propeller current meter กับอุปกรณ์พิเศษที่หัวเรือ ดังแสดงในรูปที่ 6-28 ซึ่งมีลักษณะเป็นแกนโลหะที่ประกอบอยู่ในท่อกลวง ซึ่งท่อกลวงยึดติดกับหัวเรือ ส่วนล่างของแกนใช้ติดตั้ง Current meter โดยมีครีบก้น (Vane) เพื่อใช้บังคับให้

Current meter วางตัวในแนวเดียวกับแนวการไหลตลอดเวลา ส่วนบนของแกนติดตั้ง Pointer สำหรับชี้แนวหรือชี้การวางตำแหน่งของ Current meter ส่วนบนที่ตกลงติดตั้งงานองศาเพื่ออ่านค่ามุมที่ Pointer หรือคือแนวของ Current meter เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งเริ่มต้น (จุด 0 องศาแนว pointer เป็นแนวเดียวกับตัวเรือ)

(2) ใช้เครื่องวัดความลึกของน้ำแบบคลื่นเสียงสะท้อน (Sonic sounder) ที่สามารถบันทึกค่าความลึกของน้ำหรือหน้าตัดของทางน้ำได้อย่างต่อเนื่อง

(3) ใช้เครื่องอ่านรอบอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติ ที่แสดงค่าการตรวจวัดต่อเนื่อง เป็น รอบต่อวินาที อ่านค่ารอบการหมุนของ Current meter



รูปที่ 6-29 เครื่องวัดรอบอิเล็กทรอนิกส์

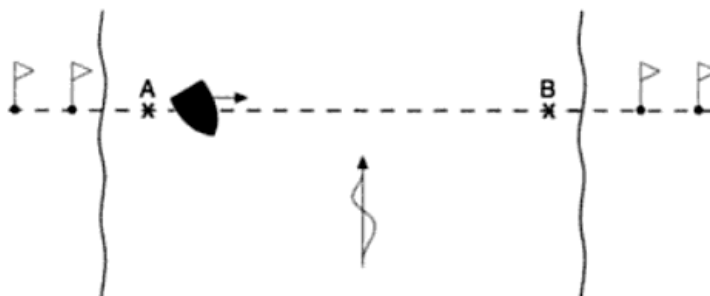
รูปซ้ายเป็นรุ่นเก่าใช้เข็มมิเตอร์ รูปขวารุ่นใหม่ๆอ่านค่าเป็นตัวเลข

5.2.2) วิธีการตรวจวัดด้วยวิธี Moving boat

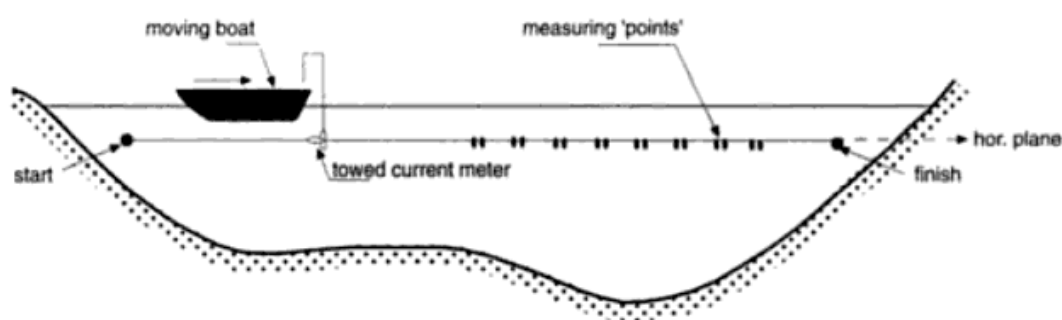
(1) กำหนดแนวหน้าตัดทางน้ำที่จะตรวจวัด และกำหนดจุดสังเกตที่จะใช้ควบคุมแนวที่ 2 ฝั่งทางน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6-30 หากทางน้ำกว้างมากอาจวางทุ่นเป็นระยะ ๆ เพื่อช่วยกำหนดแนวก็ได้ ในการตรวจวัดจะแล่นเรือในแนวหน้าตัดที่กำหนดไว้นี้ โดยจะตรวจวัดความลึกของน้ำด้วย Sonic sounder และตรวจวัดกระแสน้ำโดยให้เครื่องวัดรอบอ่านค่าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา แล้วผู้ตรวจวัดจะบันทึกค่าความลึกของน้ำ และค่ารอบการหมุนของ Current meter เมื่อเรือแล่นถึงตำแหน่งแบ่งพื้นที่ย่อยของทางน้ำที่กำหนดไว้ทุกจุด ดังแสดงในรูปที่ 6-31

(2) การกำหนดตำแหน่งพื้นที่ย่อย หรือจุดที่จะทำการตรวจวัดอ่านค่าความลึกของน้ำ และค่ารอบการหมุนของ Current meter คิดจากความยาวทั้งหมดของหน้าตัดทางน้ำที่เรือต้องแล่นไป (L) หารด้วย จำนวนหน้าตัดย่อย (n) ที่แบ่งตามเกณฑ์กำหนด จะได้

ระยะห่างของพื้นที่ย่อย หรือแต่ละจุดที่จะทำการอ่านค่าดังกล่าว (b) จาก $b = L/n$ เมื่อเรากำหนดความเร็วของเรือไว้คงที่ (V_b : เมตร/วินาที) นำมาหารก็จะทราบเวลา (t) ที่เรือจะแล่นไปถึงแต่ละจุดดังกล่าวได้ ดังนั้น ทุกเวลา t ที่เรือแล่นไปเราก็จะอ่านค่า



รูปที่ 6-30 แสดงการกำหนดจุดสังเกตแนวหน้าตัดทางน้ำที่จะตรวจวัด



รูปที่ 6-31 แสดงตำแหน่งพื้นที่ย่อยหรือจุดที่จะทำการตรวจวัด

(3) การขับเรือให้แล่นไปในแนวหน้าตัดทางน้ำที่กำหนดไว้ ถ้ากระแสน้ำในทางน้ำไม่แรงก็สามารถแล่นเรือไปตามแนวหน้าตัดดังกล่าวตรง ๆ ได้เลย แต่ถ้าทางน้ำมีน้ำไหลเชี่ยวเช่นในฤดูน้ำหลาก การขับเรือเพื่อให้อยู่ในแนวหน้าตัดที่กำหนดต้องบังคับให้เรือแล่นต้านความเร็วกระแสน้ำทวนกระแสน้ำด้วย โดยเรือต้องแล่นทำมุมที่เหมาะสมกับแนวหน้าตัด ในทางปฏิบัติต้องแล่นเรือเพื่อทดสอบการใช้ความเร็วเรือ มุมของหัวเรือ และระยะเวลาที่ถึงตำแหน่งตรวจวัดแต่ละจุดก่อนที่จะทำการตรวจวัดจริง (รูปที่ 6-30 และ 6-31)

(4) นำข้อมูลรอบการหมุนของ Current meter ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากความเร็วกะแสน้ำรวมกับความเร็วของเรือที่แล่นไป ข้อมูลความลึกของน้ำ และข้อมูลความเร็วของเรือ มาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของการไหลในแต่ละหน้าตัดย่อยต่อไป

หมายเหตุ : นอกจากการใช้วิธี **Moving boat** ตรวจวัดที่ตำแหน่งเฉพาะจุดดังกล่าวข้างต้นแล้ว อาจใช้ตรวจวัดแบบต่อเนื่อง ตามที่กล่าวในหัวข้อ 12). One - point continuous method or Depth integration method ในบทที่ 4

5.2.3) การคำนวณความเร็วเฉลี่ยของการไหล ด้วยวิธี **Moving boat**

ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

D : ความลึกของน้ำที่ตำแหน่งจุดตรวจวัด ม.

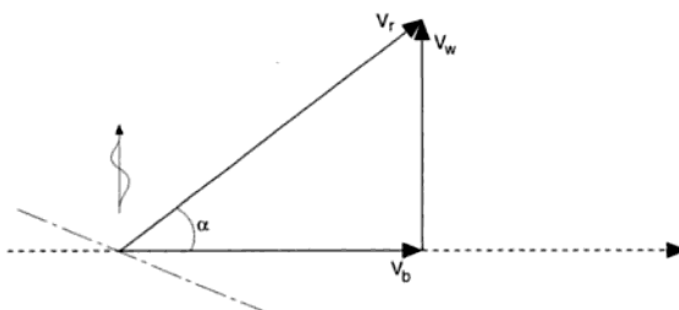
V_r : ความเร็วจาก **Current meter** (แปลงจากรอบที่วัดได้ไปเป็นความเร็ว) ซึ่งเป็นความเร็วสัมพัทธ์ของความเร็วกระแสน้ำและความเร็วเรือ ม./วินาที

V_b : ความเร็วของเรือ ม./วินาที

V_w : ความเร็วของกระแสน้ำที่แท้จริงที่ตำแหน่งตรวจวัดนั้น (ความเร็วที่ผิวหน้า) ม./วินาที

$\bar{V}$: ความเร็วเฉลี่ยในแนวตั้งโดยการแปลงจากความเร็วที่ผิวหน้าม./วินาที

α : ค่ามุมที่ครีปแพนหาง (vane) หรือ **Current meter** เบนไป ซึ่งเกิดจากแรงกระทำจากความเร็วกว้างขวาง ซึ่งอ่านได้จาก **Angle indicator** องศา



รูปที่ 6-32 Diagram of velocity vector

$$V_w = V_r \sin \alpha \quad \text{or} \quad V_w = \sqrt{V_r^2 - V_b^2}$$

$$\bar{V} = k_v \cdot V_w \quad \text{Subsurface method} \quad K_v = 0.9$$

หรือคำนวณจากสมการ

$$\bar{V} = \frac{6}{7} V_w \left(\frac{D}{D-1} \right)^{\frac{1}{6}}$$

6.3 การคำนวณความเร็วกระแสจาก Rotor current meter

ทั้ง Cup type และ Propeller type current meters ไม่ได้วัดค่าความเร็วกระแสที่ออกมาโดยตรง แต่จะวัดเป็นจำนวนรอบ ที่เครื่องวัดหมุนไป n รอบ ซึ่งอาจนับหรืออ่านค่าได้จาก สัญญาณระบบเสียง, การกระดิกของเข็มมัลติมิเตอร์ (โหมคโอห์มมิเตอร์), เครื่องนับจำนวนรอบ และเครื่องวัดรอบอัตโนมัติ เป็นต้น ในช่วงเวลาที่ตรวจวัด t วินาที โดยจะได้อัตราการหมุน $n/t = N$ รอบต่อวินาที ดังนั้นจึงต้องนำค่าจำนวนรอบและเวลา หรืออัตราการหมุนดังกล่าวไปแปลงเป็นความเร็วการไหลต่อไป

เครื่องมือวัดแต่ละเครื่องจะได้รับการสอบเทียบจากโรงงาน เพื่อกำหนดค่าที่ใช้แปลงจำนวนรอบและเวลา หรืออัตราการหมุน ที่ตรวจวัดได้เป็นความเร็วการไหล ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวติดมากับเครื่องวัดตัวนั้น โดยเฉพาะ ซึ่งอาจกำหนดเป็น

- ตาราง (Calibration tables)
- สมการ (Calibration equations) เป็นค่าที่ได้จากผลการสอบเทียบจาก ตาราง
- กราฟ (Calibration curves)

Calibration equations

สมการมาตรฐาน $V = aN \pm b$

เมื่อ $N =$ อัตราการหมุนของเครื่องวัดที่วัดได้ (รอบ/วินาที)

อาจใช้สัญลักษณ์อื่นๆ เช่น R หรือ n

$a, b =$ ค่าคงที่ ที่ได้จากการ Calibrate เครื่องมือ

การเลือกใช้สมการต้องพิจารณาจาก ช่วงของอัตราการหมุน

Propeller No. 1-70962	
$n < 0.49$	$v = 0.2463 n + 0.011$
$n \geq 0.49$	$v = 0.2585 n + 0.005$
$n >$	$v =$
Propeller No. 2-68764	
$n < 0.31$	$v = 0.4646 n + 0.018$
$n \geq 0.31$	$v = 0.5160 n + 0.002$
$n >$	$v =$
Propeller No. 4-72937	
$n < 1.20$	$v = 0.1270 n + 0.027$
$n \geq 1.20$	$v = 0.1320 n + 0.021$
$n >$	$v =$

รูปที่ 6-33 แสดง Calibration equations ของ Propeller current meter 3 ตัว

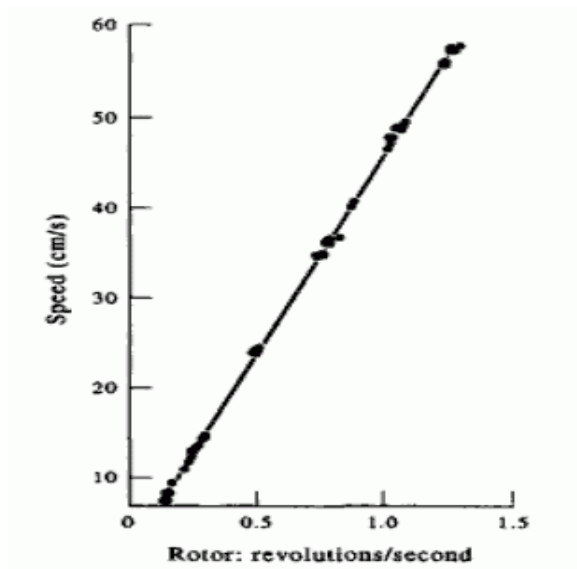
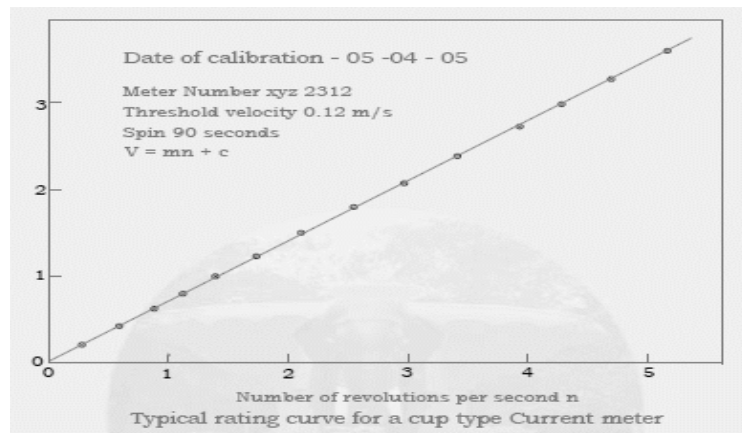
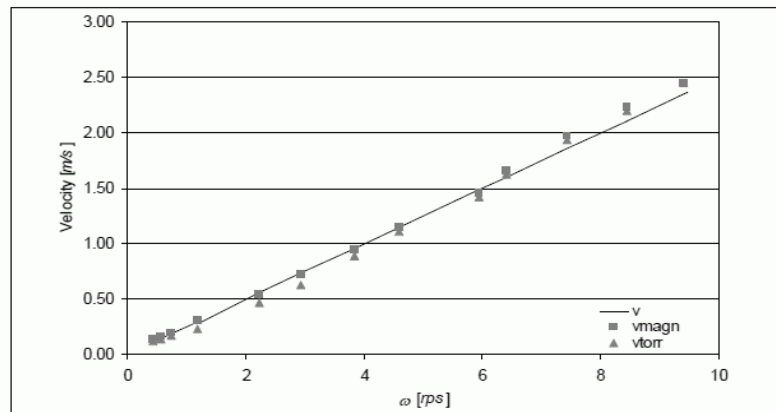
ตารางที่ 6-1 ตัวอย่าง Calibration table ของ Type AA current meter ที่กำหนด
Calibration equations ไว้ที่หัวตาราง $V = 2.2048 R + 0.0179$ (หน่วย ฟุต/วินาที)

STANDARD RATING TABLE NO. 2 FOR AA CURRENT METERS (S/99) EQUATION: V = 2.2048 R + 0.0178 (R=revolutions per second)																				
spu000																				

ตารางที่ 6-2 แสดง Calibration table ของ Pigmy current meter (หน่วย ฟุต/วินาที)

STANDARD RATING TABLE NO. 2 FOR PYGMY CURRENT METER (6/99)
EQUATION: $V = 0.9604 R + 0.0312$ (R=revolutions per second)

Seconds	VELOCITY IN FEET PER SECOND Revolutions														
	3	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200
40	0.103	0.151	0.199	0.271	0.391	0.511	0.631	0.752	0.992	1.23	1.47	1.96	2.43	3.63	4.83
41	0.101	0.148	0.196	0.266	0.383	0.500	0.617	0.734	0.968	1.20	1.44	1.91	2.37	3.54	4.72
42	0.100	0.146	0.191	0.260	0.374	0.489	0.603	0.717	0.946	1.17	1.40	1.86	2.32	3.46	4.60
43	0.098	0.143	0.188	0.255	0.366	0.478	0.590	0.701	0.925	1.15	1.37	1.82	2.26	3.38	4.50
44	0.097	0.140	0.184	0.249	0.359	0.468	0.577	0.686	0.904	1.12	1.34	1.78	2.21	3.31	4.40
45	0.095	0.138	0.181	0.245	0.351	0.458	0.565	0.671	0.885	1.10	1.31	1.74	2.17	3.23	4.30
46	0.094	0.136	0.177	0.240	0.344	0.449	0.553	0.658	0.866	1.08	1.28	1.70	2.12	3.16	4.21
47	0.093	0.133	0.174	0.236	0.338	0.440	0.542	0.644	0.849	1.06	1.26	1.67	2.07	3.10	4.12
48	0.091	0.131	0.171	0.231	0.331	0.431	0.531	0.631	0.832	1.03	1.23	1.63	2.03	3.03	4.03
49	0.090	0.129	0.168	0.227	0.325	0.423	0.521	0.619	0.815	1.01	1.21	1.60	1.99	2.97	3.95
50	0.089	0.127	0.165	0.223	0.319	0.415	0.511	0.607	0.800	0.992	1.18	1.57	1.95	2.91	3.87
51	0.088	0.125	0.163	0.220	0.314	0.408	0.502	0.596	0.784	0.973	1.16	1.54	1.91	2.86	3.80
52	0.087	0.124	0.160	0.216	0.308	0.401	0.493	0.585	0.770	0.955	1.14	1.51	1.88	2.80	3.73
53	0.086	0.122	0.158	0.212	0.303	0.394	0.484	0.575	0.756	0.937	1.12	1.48	1.84	2.75	3.66
54	0.085	0.120	0.156	0.209	0.298	0.387	0.476	0.565	0.743	0.920	1.10	1.45	1.81	2.70	3.59
55	0.084	0.119	0.153	0.206	0.293	0.380	0.468	0.555	0.730	0.904	1.08	1.43	1.78	2.65	3.52
56	0.083	0.117	0.151	0.203	0.288	0.374	0.460	0.546	0.717	0.889	1.06	1.40	1.75	2.60	3.46
57	0.082	0.115	0.149	0.200	0.284	0.368	0.452	0.537	0.705	0.874	1.04	1.38	1.72	2.56	3.40
58	0.081	0.114	0.147	0.197	0.280	0.362	0.445	0.528	0.694	0.859	1.02	1.36	1.69	2.51	3.34
59	0.080	0.113	0.145	0.194	0.275	0.357	0.438	0.520	0.682	0.845	1.01	1.33	1.66	2.47	3.29
60	0.079	0.111	0.143	0.191	0.271	0.351	0.431	0.511	0.671	0.832	0.992	1.31	1.63	2.43	3.23
61	0.078	0.110	0.141	0.189	0.267	0.346	0.425	0.504	0.661	0.818	0.976	1.29	1.61	2.39	3.18
62	0.078	0.109	0.140	0.186	0.264	0.341	0.418	0.496	0.651	0.806	0.961	1.27	1.58	2.35	3.13
63	0.077	0.107	0.138	0.184	0.260	0.336	0.412	0.489	0.641	0.793	0.946	1.25	1.56	2.32	3.08
64	0.076	0.106	0.136	0.181	0.256	0.331	0.406	0.481	0.631	0.782	0.932	1.23	1.53	2.28	3.03
65	0.076	0.105	0.135	0.179	0.253	0.327	0.401	0.474	0.622	0.770	0.918	1.21	1.51	2.25	2.99
66	0.075	0.104	0.133	0.177	0.249	0.322	0.395	0.468	0.613	0.759	0.904	1.20	1.49	2.21	2.94
67	0.074	0.103	0.132	0.175	0.246	0.318	0.390	0.461	0.605	0.748	0.891	1.18	1.46	2.18	2.90
68	0.074	0.102	0.130	0.172	0.243	0.314	0.384	0.455	0.596	0.737	0.879	1.16	1.44	2.15	2.86
69	0.073	0.101	0.129	0.170	0.240	0.310	0.379	0.449	0.588	0.727	0.866	1.14	1.42	2.12	2.81
70	0.072	0.100	0.127	0.168	0.237	0.306	0.374	0.443	0.580	0.717	0.854	1.13	1.40	2.09	2.78
	3	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200



รูปที่ 6-34 แสดงตัวอย่าง Curve Calibration ของ Current meter

บทที่ 7

เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์

ในยุคที่ความรู้ทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีความก้าวหน้า ทำให้มีการประดิษฐ์ อุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ทำงานด้วยระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อย่างมากมาย ที่สามารถใช้งานได้สะดวกรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในส่วนของเครื่องมือวัด ความเร็วกระแสน้ำก็เช่นกัน ได้มีการประดิษฐ์เครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบต่าง ๆ ออกมาหลาย รูปแบบ ที่ทำงานได้ดีกว่าและแก้ปัญหาที่เครื่องมือวัดเชิงกลแบบเก่าทำไม่ได้ เช่น สามารถใช้งานได้ดีกับการไหลที่ไม่ราบเรียบและทางน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลหรือเปลี่ยนแปลงระดับ น้ำอย่างรวดเร็ว หรืออัตราการไหลที่น้อยมาก ๆ หรือระดับน้ำต่ำมาก ๆ เป็นต้น

7.1 ประเภทของเครื่องมือวัดกระแสน้ำอิเล็กทรอนิกส์

อาจแบ่งตามหลักการทำงานได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

- 1) Electromagnetic current meters
- 2) Doppler type current meters
- 3) Optical strobe current meters

7.2 Electromagnetic current meter (ECM)

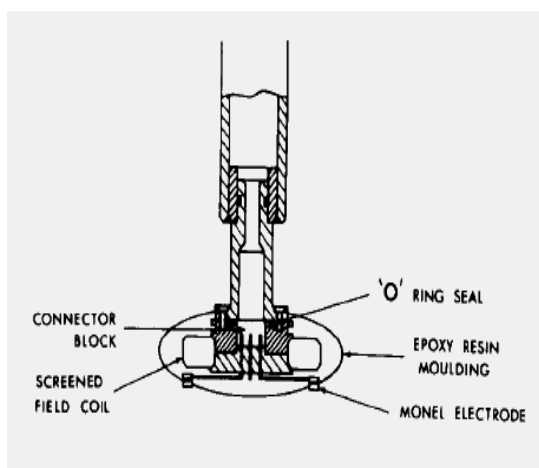
เป็นเครื่องมือวัดกระแสน้ำแบบวัดเฉพาะจุดที่พัฒนาโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ แม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Faraday's law of electromagnetic induction ที่ค้นพบโดย Michael Faraday ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งหลักการนี้ทำให้เกิดสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า โซลีนอยด์ และรวมถึง Electromagnetic current meter ด้วย โดยที่น้ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าเมื่อไหลผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น

7.2.1 ชนิดของ Electromagnetic current meter

Electromagnetic current meter ที่ใช้วัดกระแสน้ำในทางน้ำเปิดนั้น เครื่องวัดจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ หัววัด (Sensor head) และส่วนแสดงผล ในการตรวจวัดจะวัดกระแสน้ำเฉพาะจุดที่ตำแหน่งของหัววัด ตัวเครื่องอาจมีลักษณะรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะสมกับตัวแปรในการตรวจวัดที่แตกต่างกันไป เช่น ความเร็วกระแสน้ำ ความลึกของน้ำ (มีทั้งแบบวัดกระแสน้ำที่ผิวน้ำ (Surface flow) และวัดที่ระดับความลึกต่างๆ เป็นต้น) มีหลายขนาด (ขนาดเล็กมักมีช่วงการวัด 0-2 เมตร/วินาที ส่วนขนาดใหญ่จะมีช่วงการวัดที่สูงกว่า) มีหลายรูปแบบให้เลือกใช้ โดยสามารถแบ่งย่อยตามชนิดของหัววัด ได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) Discus head หรือ Flat head

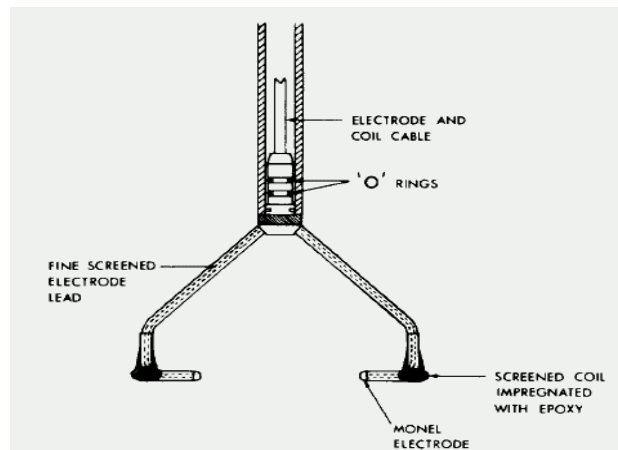
เป็นหัววัดที่พัฒนาขึ้นมาโดย Institute of Oceanographic Sciences (I.O.S) ประเทศแคนาดา มีลักษณะคล้ายจานแบนกลม หัววัดแบบนี้มีขดลวดสนามแม่เหล็กแนวเดียว มีขั้ววัดไฟฟ้า (Electrodes) 2 ขั้ว (คู่เดียว) เป็นการวัดใน 2 แกน (X-Y) จึงต้องวางปลายหัววัดในแนวราบในตำแหน่งแนวเดียวกับแนวการไหลจึงจะไม่เกิดความผิดพลาด ดังนั้นการตรวจวัดในตำแหน่งที่ลึกหรือหากมองไม่เห็นหัววัด ต้องติดตั้งครีบบางบังคับทิศทางด้วยเสมอ



รูปที่ 7-1 แสดงรูปตัด โครงสร้างของ Sensor head แบบ Discus head

2) Annular head

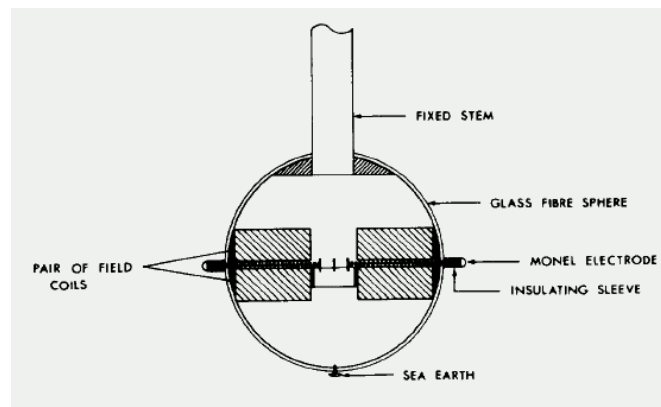
เป็นหัววัดที่มีขดลวดสนามแม่เหล็กขดเป็นวงแหวนรูปวงรี มีขั้ววัดไฟฟ้า 4 ขั้ว (2 คู่ แต่ละคู่อยู่ตรงข้ามกัน) แต่ละขั้วทำมุม 90 องศา พัฒนาขึ้นมาโดย I.O.S เพื่อแก้ปัญหาการตรวจวัดที่เกิดกับหัววัดแบบ **Discus head** ที่ต้องวางตำแหน่งหัววัดให้ถูกต้องกับทิศทางการไหลของน้ำ เพราะหัววัดแบบใหม่นี้กำหนดเพียงให้วางในแนวราบโดยไม่ต้องคำนึงถึงแนวทิศการไหลของน้ำมากนักก็วัดได้ถูกต้อง



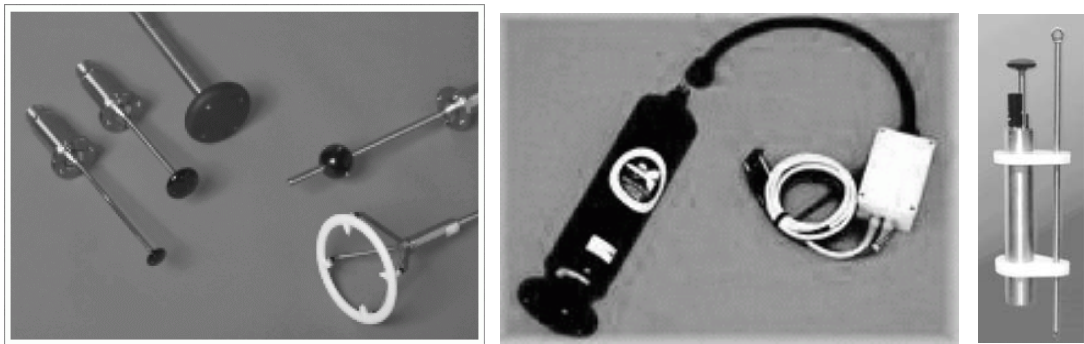
รูปที่ 7-2 แสดงรูปตัด โครงสร้างของ Sensor head แบบ Annular head

3) Spherical head หรือ Cylindrical head

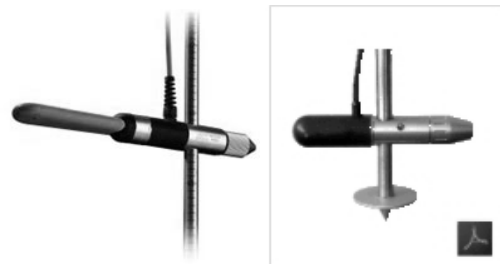
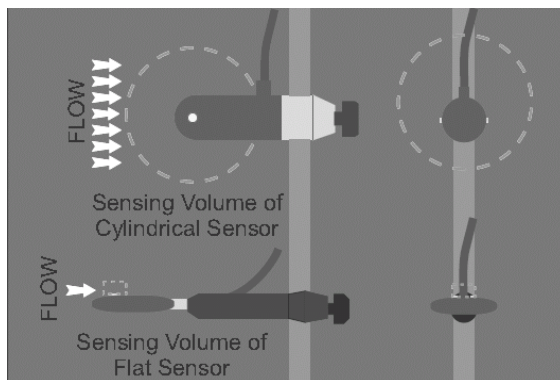
เป็นหัววัดที่ออกแบบบรรจุในรูปทรงกลม เพื่อให้เกิดการต้านกระแสน้ำน้อย มีขั้ววัด 4 ขั้ว (2 คู่) แต่ละขั้วทำมุม 90 องศา เป็นการวัดใน 3 แกน (X-Y-Z) จึงไม่ต้องคำนึงถึงการวางแนวตำแหน่งของหัววัดมากนัก



รูปที่ 7-3 แสดงรูปตัด โครงสร้างของ Sensor head แบบ Spherical head

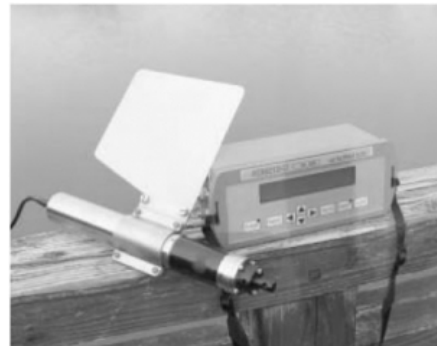
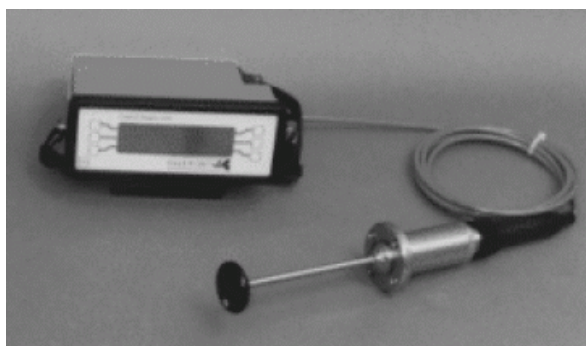


รูปที่ 7-4 แสดง Sensor head แบบต่าง ๆ



Flat sensor Cylindrical sensor

รูปที่ 7-5 แสดง Sensor head ที่ออกแบบติดตั้งกับ Wading rod



รูปที่ 7-6 การต่อ Sensor head กับเครื่องแสดงผล โดยรูปขวามือมีการติดครีบบังคับทิศทาง

7.2.2 ลักษณะการตรวจวัดโดยใช้ Electromagnetic current meter

การตรวจวัดโดยใช้ Electromagnetic current meter นั้นจะมีการตรวจวัดความเร็วการไหลเพื่อคำนวณโดยวิธี Velocity - area method ในลักษณะคล้ายการใช้ Mechanical current meters แต่เครื่องมือชนิดนี้จะแสดงผลเป็นอัตราการไหลได้โดยตรงเป็นระยะทางต่อเวลา (ม.ม./วินาที, ซม./วินาที หรือ ม./วินาที) มีรุ่นขนาดเล็กที่เหมาะสมกับการวัดกระแสน้ำที่ไหลน้อย ๆ หรือระดับน้ำตื้นมาก ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามลักษณะของเครื่องมือแล้วจะนิยมติดตั้งเครื่องมือใช้ตรวจวัดในลักษณะต่อไปนี้ (วัดกระแสน้ำน้อย ๆ ความลึกไม่มาก)

- 1) การจุ่มวัดหรือหยั่งวัดโดยตรง
- 2) การหยั่งวัดที่ระดับความลึกต่าง ๆ (เช่น 0.2, 0.6, 0.8) โดยติดตั้งหัววัดกับ Wading rod โดยหัววัดต้องออกแบบมาเพื่อติดตั้งกับ Wading rod โดยเฉพาะ
- 3) การหยั่งวัดโดยใช้เคเบิล โดยต้องเป็นรุ่นที่ออกแบบมาเพื่อการวัดด้วยเคเบิล โดยเฉพาะ ที่ติดตั้งกับอุปกรณ์พิเศษซึ่งมักมีรีบบังคับทิศทางด้วย
- 4) สามารถตรวจวัดโดยวิธี Moving boat เพื่อวัดการไหลในแนวหน้าตัดอย่างต่อเนื่องได้ (บทที่ 6) โดยใช้เครื่องวัดที่มีช่วงการวัดที่เหมาะสมติดตั้งกับเรือ



รูปที่ 7-7 แสดงการตรวจวัดที่ใช้หัววัดที่ติดตั้งกับ Wading rod

7.2.3 ข้อดีข้อเสียของเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าแบบ Electromagnetic current meter

ข้อดี

- 1) ไม่มีชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหว จึงไม่เกิดความผิดพลาดจากอิทธิพลของการไหลของน้ำดังเช่นเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าเชิงกล ใช้งานได้ดีกับกระแสน้ำที่ไหลไม่ราบเรียบ
- 2) ใช้งานได้ดีในกรณีมีตะกอนไหลปนมากับน้ำมาก หรือกรณีมีวัชพืชน้ำในทางน้ำ แต่ต้องระวังไม่ให้ตะกอนหรือวัชพืชจับปิดหัววัด
- 3) ใช้งานได้ง่ายและสะดวกมากกว่า เพราะสามารถแสดงผลเป็นค่าอัตราการไหลที่เป็นค่าตัวเลข หรือกราฟได้โดยตรง (ไม่ต้องนับรอบ) สามารถบันทึกข้อมูลไว้ในเครื่องอ่านข้อมูลได้
- 4) ใช้ตรวจวัดอัตราการไหลน้อย ๆ ที่ระดับน้ำตื้น ๆ ได้ดี ตัวอย่างเช่นการไหลน้อยกว่า 5 ซม./วินาที ลึกน้อยกว่า 5 ซม.
- 5) นอกจากการวัดกระแสน้ำแล้ว บางรุ่นอาจติดตั้ง Sensor ตรวจวัดหลายอย่างในเครื่องมือตัวเดียวกัน เช่น วัดอุณหภูมิ วัดความลึก เป็นต้น
- 6) การดูแลบำรุงรักษาทำได้ง่าย

ข้อเสีย

- 1) มีราคาแพง
- 2) ระดับของพลังงานจากแบตเตอรี่จะมีผลต่อการทำงานของเครื่องมือ
- 3) การเสื่อมของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานของเครื่องมือซึ่งเป็นเรื่องสังเกตได้ยาก ต้องส่งเครื่องมือกลับไปทดสอบที่โรงงานผลิตตามเวลาที่กำหนด
- 4) การวัดผิดพลาดเมื่ออยู่ในเขตมีสนามแม่เหล็ก แหล่งแร่โลหะ และวัตถุที่เป็นโลหะ

7.3 Doppler type current meters

7.3.1 แนวคิดหลักการทำงานของ Doppler type current meters

- เป็นกลุ่มเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยหลักการ The doppler principle ซึ่งค้นพบโดย Christian Johann Doppler นักฟิสิกส์ชาวออสเตรียในปี ค.ศ. 1842 ซึ่งสรุปได้ว่า เมื่อส่งสัญญาณคลื่นความถี่ไปยังวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ สัญญาณสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยหากวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิด สัญญาณความถี่สัญญาณสะท้อนกลับจะเพิ่มขึ้น และหากวัตถุเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด สัญญาณความถี่สัญญาณสะท้อนกลับจะลดลง

- เครื่องมือวัดประเภทนี้จะส่งสัญญาณจากตัวส่งของเครื่องวัดผ่านน้ำออกเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่องเมื่อไปกระทบกับอนุภาคหรือฟองอากาศที่ไหลปนมากับน้ำ (ขณะนั้นน้ำและอนุภาคหรือฟองอากาศที่ไหลมาพร้อมกันจะมีความเร็วเท่ากัน) แล้วสะท้อนกลับมายังตัวรับที่เครื่องวัด สัญญาณส่วนที่ยังไม่กระทบกับอนุภาคก็จะเดินทางต่อไป และสะท้อนกลับเมื่อไปกระทบอนุภาค เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนสัญญาณอ่อนหมดกำลัง เมื่อนำค่าตัวแปรได้แก่ ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของสัญญาณ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณ และคุณสมบัติของคลื่นไปประมวลผล จะได้เป็นค่าความเร็วของกระแสที่แสดงออกมาโดยตรงที่ตัวแสดงผล เครื่องมือกลุ่มนี้ออกแบบให้ใช้วัดกระแสได้ทั้งในทางน้ำเปิดและในท่อ

- จากการที่เครื่องมือทำงานด้วยหลักการ The doppler principle ที่ต้องตรวจวัดความเร็วของอนุภาคในน้ำที่เคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากเครื่องมือ จึงต้องให้แนวสัญญาณของตัวส่งและตัวรับทำมุมกับแนวหน้าตัดการไหลเสมอ และจะต้องให้มีสัญญาณทั้งในแนวด้านเหนือน้ำและแนวใต้น้ำทำมุมที่เหมาะสมกันเพื่อให้ทั้งสองแนวสัญญาณเป็นตัวช่วยในการเช็คซ้ำระหว่างกัน เพื่อให้เกิดความถูกต้องยิ่งขึ้น ดังนั้นหัวสัญญาณของเครื่องวัดประเภทนี้จึงมีเป็นคู่ ๆ (คู่เดียวหรือหลายคู่) วางทำมุมกัน

- องค์ประกอบของเครื่องมือตรวจวัดประเภทนี้ มักประกอบด้วย

- (1) ตัวส่งและรับสัญญาณ หรือหัววัด
- (2) ตัวประมวลผลสัญญาณ
- (3) ตัวแสดงผล เป็นค่าตัวเลข เป็นกราฟ หรือส่งข้อมูลไปประมวลผล

โดยคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์พิเศษ

7.3.2 ประเภทของ Doppler type current meters

อาจแบ่งเครื่องมือวัดกลุ่มนี้ตามแหล่งสัญญาณที่ใช้เป็น 2 ประเภท คือ

1) Acoustic doppler velocimeter (ADV) ใช้คลื่น Ultrasonics ในการตรวจวัด โดยเครื่องมือดังกล่าวนี้จะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่มีความถี่สูงๆ เช่น คลื่นเสียง Ultrasonics (เสียงที่มีความถี่มากกว่า 25,000 Hz หรือ 25 kHz โดยความถี่ที่ใช้กับเครื่องมือนี้จะใช้ที่มากกว่า 30 KHz ในขณะที่ USGS กำหนดมาตรฐานไว้ที่ 300 – 3,000 kHz) นำมาใช้งานตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำในทางน้ำครั้งแรกโดย USGS ในปี ค.ศ. 1982

2) Laser doppler velocimeter (LDV) ใช้แสงเลเซอร์ในการตรวจวัด ได้รับการพัฒนาขึ้นมาภายหลังประเภทแรก

7.3.3 ชนิดของหัววัดของ Acoustic doppler velocimeter

อาจแบ่งหัววัดหรือหัวส่งและรับสัญญาณของ Acoustic doppler velocimeter ได้เป็น 2 ชนิดคือ

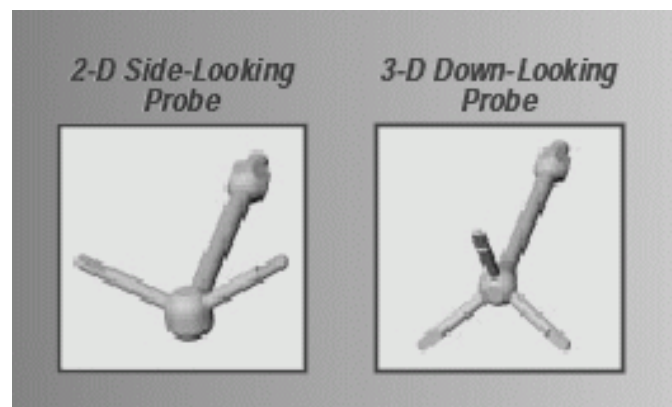
1) หัววัดแบบ 2 มิติ มีหัวสัญญาณ 1 คู่ ที่แนวสัญญาณวางทำมุมกันในระนาบเดียวกันหรือ 2 แกน หรือ 2-D (X-Y) มักใช้ตรวจวัดความเร็วการไหลในแนวราบ ถ้าเครื่องขนาดเล็กมีสัญญาณเบา จะใช้ตรวจวัดแบบเฉพาะจุดเหมือน Electromagnetic current meter แต่ถ้าเป็นเครื่องขนาดใหญ่มีสัญญาณแรงก็สามารถใช้ตรวจวัดความเร็วที่ระดับความลึกใด ๆ จากผิวน้ำได้ตลอดทั้งหน้าตัดการไหลต่อเนื่องกันในคราวเดียวกัน

2) หัววัดแบบ 3 มิติ หัวสัญญาณมักมีมากกว่า 1 คู่ (3 หัวขึ้นไป) แต่ละหัววางทำมุมกันทั้ง 3 ระนาบ หรือ 3 แกนหรือ 3-D (X-Y-Z) ใช้วัดกระแสน้ำในแนวตั้งได้อย่างต่อเนื่องทุกระดับความลึกที่สัญญาณส่งไปถึง

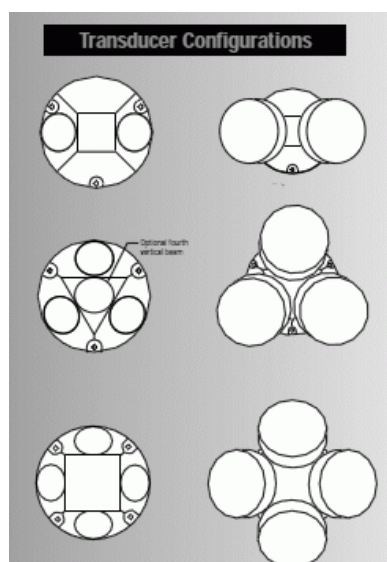
การตรวจวัดของหัวสัญญาณทั้ง 2 ชนิดมีหลักการคือ ส่งสัญญาณออกไปเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่อง จากคุณสมบัติเรื่องความถี่ของคลื่นและเวลาที่ส่งประมวลผล ทำให้สามารถ

แบ่งขอบเขตการตรวจวัดออกเป็นช่วง ๆ ตามระยะทางที่สัญญาณถูกส่งออกไป กรณีในแนวดิ่งเรียก Depth cell และในแนวราบเรียก Horizontal cell

อนึ่งนอกจากมีหัวสัญญาณวัดความเร็วการไหลดังกล่าวแล้ว อาจติดตั้งหัวสัญญาณวัดระยะทาง Ultrasonic หรือติดตั้ง Pressure sensor เพื่อใช้ตรวจวัดความลึกของน้ำด้วย



รูปที่ 7-8 แสดงหัววัด Acoustic doppler รูปแบบหนึ่งมีทั้ง 2-D และ 3-D

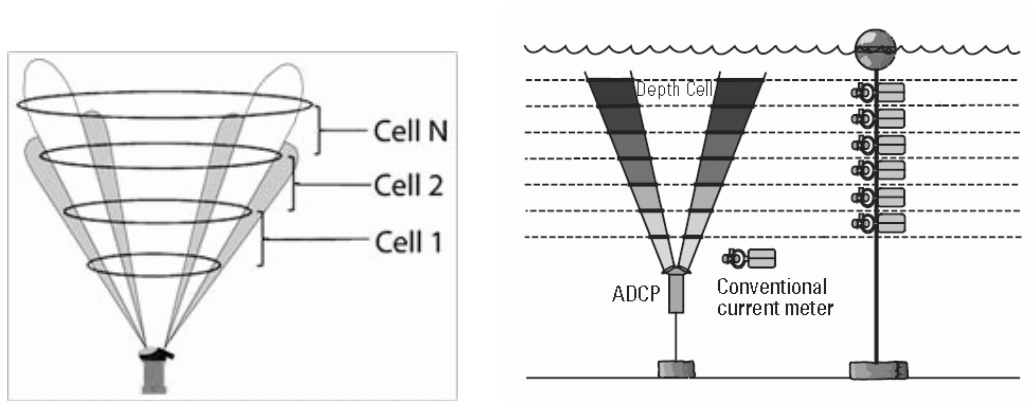


2-D



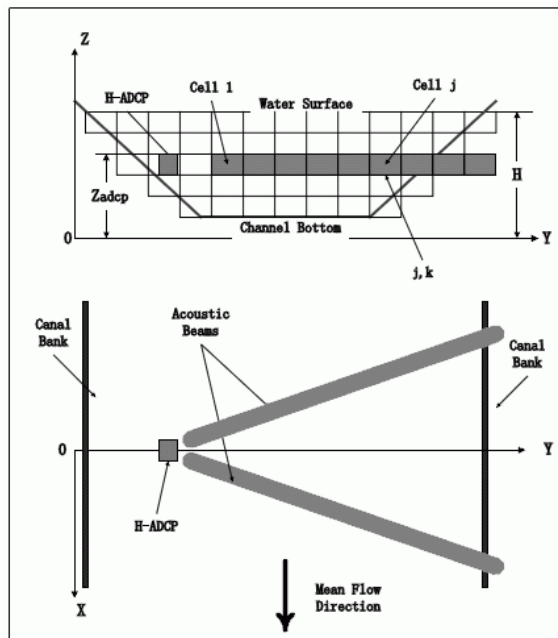
3-D

รูปที่ 7-9 แสดงหัววัด Acoustic doppler รูปแรกกลุ่มบนสุดเป็นแบบ 2-D ที่เหลือเป็น 3-D

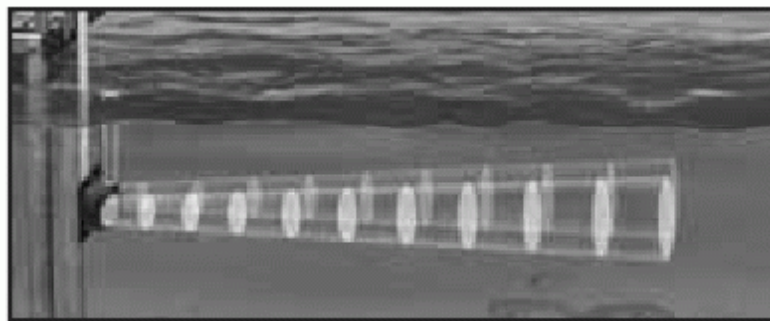


รูปที่ 7-10 แสดง Depth cell เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่องวัดแบบดั้งเดิมที่ระดับความลึกต่าง

ๆ



รูปที่ 7-11 แสดงแนวลำสัญญาณของหัววัดแบบ 2-D ที่ใช้ตรวจวัดความเร็วในแนวราบ



รูปที่ 7-12 แสดง Horizontal cell ของแนวลำสัญญาณของหัววัดแบบ 2-D

7.3.4 รูปแบบการตรวจวัดด้วย Acoustic doppler current meter

Acoustic doppler current meter นั้นมีหลายรูปแบบ หลายขนาดโดยขนาดเล็กมีกำลังส่งสัญญาณต่ำตรวจวัดได้ในขอบเขตแคบ ๆ ส่วนขนาดใหญ่มีกำลังส่งสัญญาณสูงมีระยะการตรวจวัดไกลครอบคลุมพื้นที่กว้าง มีหลายช่วงความถี่โดยยิ่งความถี่สูงจะยิ่งวัดได้ละเอียด ฯลฯ ทำให้สามารถเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของทางน้ำที่จะตรวจวัด ได้แก่ ความลึก ความกว้าง จำนวนตะกอนที่ไหลมากับน้ำ และอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลหรือระดับน้ำ เป็นต้น ทำให้สามารถเลือกรูปแบบการติดตั้งเครื่องวัดหรือรูปแบบการวัดได้หลายแบบ จาก 3 รูปแบบมาตรฐานคือ วัดในแนวดิ่งจากผิวน้ำสู่ท้องน้ำ วัดในแนวดิ่งจากท้องน้ำสู่ผิวน้ำ และการตรวจวัดในแนวราบ คือ

- 1) การตรวจวัดเฉพาะจุด เครื่องมือวัดอยู่กับที่ตำแหน่งและระดับใด ๆ
 - 1.1) การตรวจวัดในแนวดิ่งมีแนวการวัดจากผิวน้ำสู่ท้องน้ำ
 - 1.2) การตรวจวัดในแนวดิ่งโดยเครื่องมือวัดวางอยู่ที่ท้องน้ำวัดขึ้นไปหาผิวน้ำ
 - 1.3) การตรวจวัดในแนวราบโดยเครื่องมือวัดติดตั้งอยู่ที่ระดับความลึกต่าง ๆ
- 2) การตรวจวัดแบบต่อเนื่อง เครื่องมือวัดมีการเคลื่อนที่ในแนวหน้าตัดการไหล
 - 2.1) การตรวจวัดในแนวดิ่งมีแนวการวัดจากผิวน้ำสู่ท้องน้ำ
 - 2.2) การตรวจวัดในแนวดิ่งเครื่องมือวัดวางอยู่ที่ท้องน้ำวัดขึ้นไปหาผิวน้ำ

ต้องติดตั้งอุปกรณ์พิเศษมีลักษณะเป็นรางเลื่อน

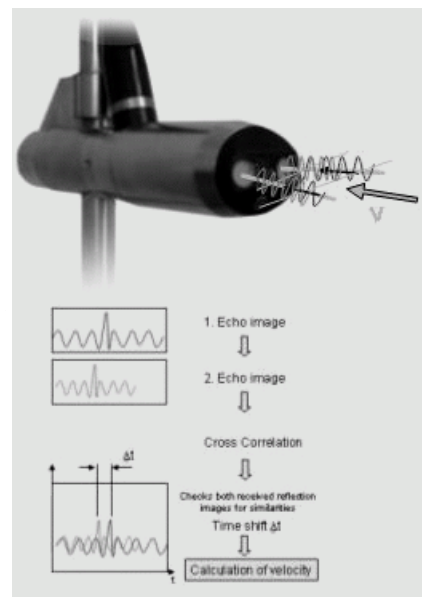
 - 2.3) การตรวจวัดในแนวราบโดยเครื่องมือวัดติดตั้งอยู่ที่ระดับความลึกต่าง ๆ

7.3.5 วิธีการติดตั้งตรวจวัดด้วย Acoustic doppler current meter

- 1) การหยั่งวัดโดยตรง หรือหยั่งวัดด้วย Wading rod เป็นการตรวจวัดเฉพาะจุดในแนวราบโดยใช้หัววัดแบบ 2-D หรือตรวจวัดในแนวดิ่งใช้หัววัดแบบ 3-D โดยมักเป็นหัววัดขนาดเล็กมีกำลังต่ำ ระดับน้ำตื้น ๆ ทางน้ำไม่กว้างมาก



รูปที่ 7-13 การหยั่งวัดโดยตรง



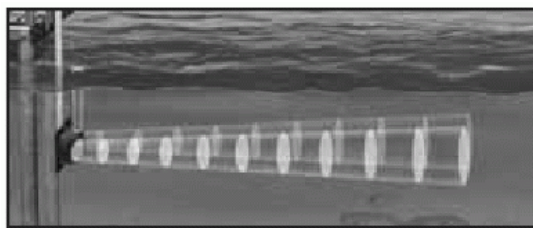
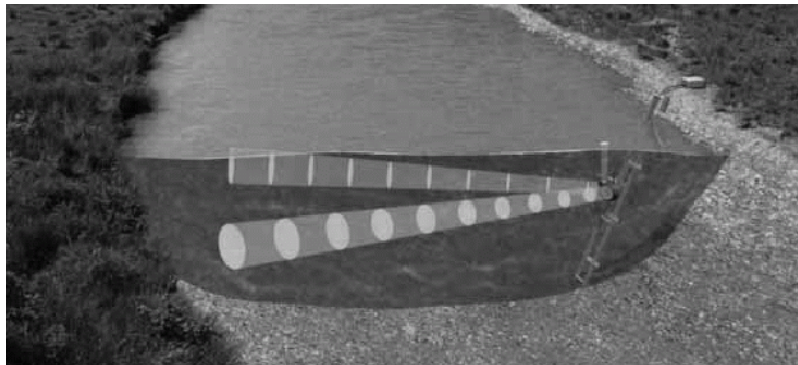
รูปที่ 7-14 การหยั่งวัดด้วย Wading rod

2) การหยั่งวัดโดยใช้สายเคเบิล เป็นการตรวจวัดในแนวตั้งที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยอาจวัดได้ทั้งแบบวัดเฉพาะจุดที่ละช่วงของหน้าตัดการไหลย่อย หรือการลากวัดแบบต่อเนื่อง ซึ่งเครื่องวัดต้องออกแบบมาเพื่อการวัดวิธีนี้โดยเฉพาะ มักมีครีบบางเพื่อบังคับทิศทาง



รูปที่ 7-15 การหยั่งวัดโดยใช้สายเคเบิล

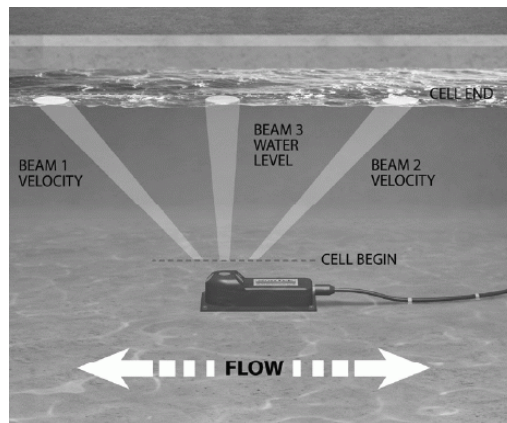
3) การติดตั้งที่ระดับความลึกต่าง ๆ เพื่อตรวจวัดในแนวราบตลอดแนวหน้าตัดการไหล โดยใช้หัววัดแบบ 2-D ขนาดใหญ่ โดยยังมีกำลังสูงยังวัดได้ไกล



รูปที่ 7-16 การตรวจวัดในแนวราบ

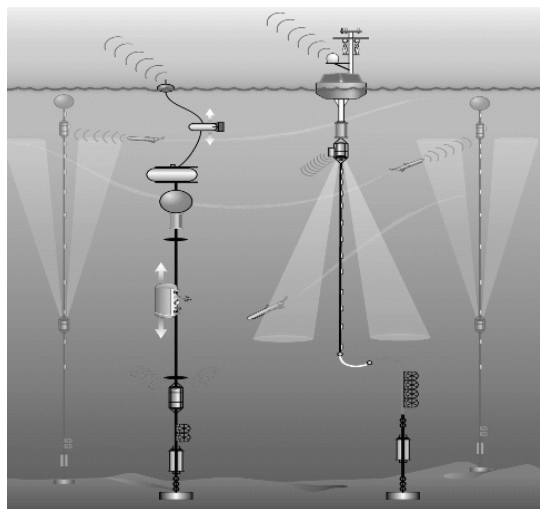
4) การตรวจวัดโดยติดตั้งเครื่องวัดตายตัวประจำที่ตำแหน่งใด ๆ

4.1) ตรวจวัดจากท้องน้ำสู่ผิวน้ำ ใช้ตรวจวัดในทางน้ำที่จะไม่เกิดผลกระทบจากการตกจมของตะกอนหรือกรวดทรายที่ถูกน้ำชะพามา โดยอาจติดตั้งเครื่องวัดเครื่องเดียวหรือหลายเครื่องต่อกันให้คลุมพื้นที่หน้าตัดการไหล



รูปที่ 7-17 แสดงเครื่องวัดแบบติดตั้งที่ท้องน้ำ มีหัววัดระยะความลึกอยู่ตรงกลางส่งสัญญาณในแนวดิ่ง

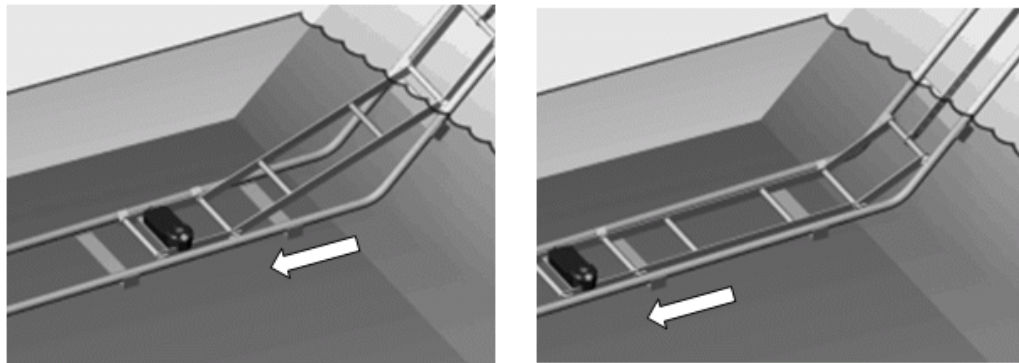
4.2) ตรวจวัดที่ระดับความลึกต่างๆ ติดตั้งกับสายเคเบิลโดยใช้ทุ่นลอยและน้ำหนักถ่วง นิยมใช้กับการตรวจวัดเมื่อระดับน้ำลึกมาก ๆ เช่น ปากแม่น้ำที่ออกทะเล ในทะเลและในมหาสมุทร



รูปที่ 7-18 ตรวจวัดที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อระดับน้ำลึกมาก ๆ

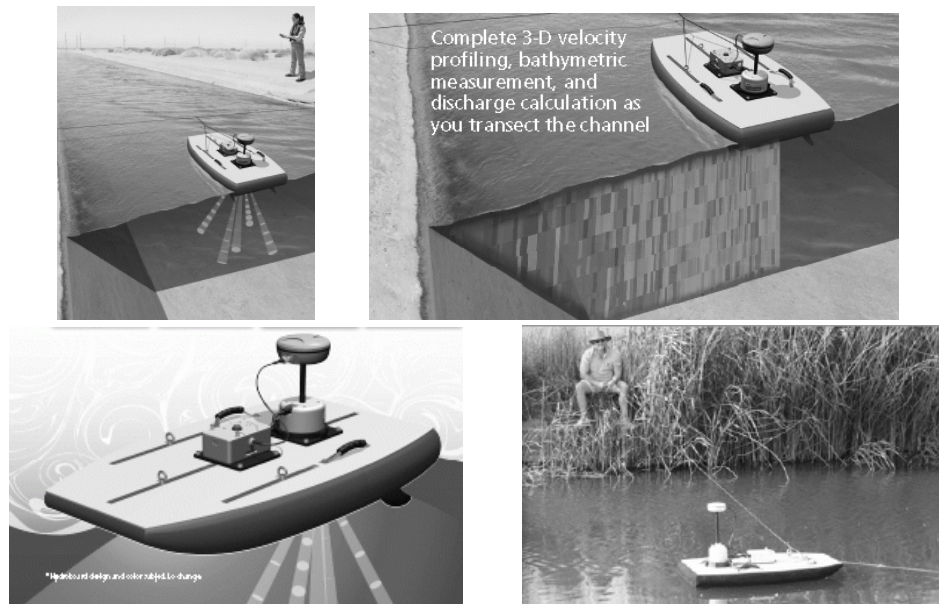
5) การตรวจวัดความเร็วการไหลในแนวตั้งแบบต่อเนื่อง โดยให้เครื่องวัดเคลื่อนที่ไปในแนวหน้าตัดการไหลด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้สะดวกรวดเร็วในการตรวจวัด

5.1) การวัดแนวตั้งจากท้องน้ำสู่ผิวน้ำโดยติดตั้งเครื่องวัดกับรางเลื่อนพิเศษ ใช้กับทางน้ำที่ไม่กว้างและไม่ลึกมาก



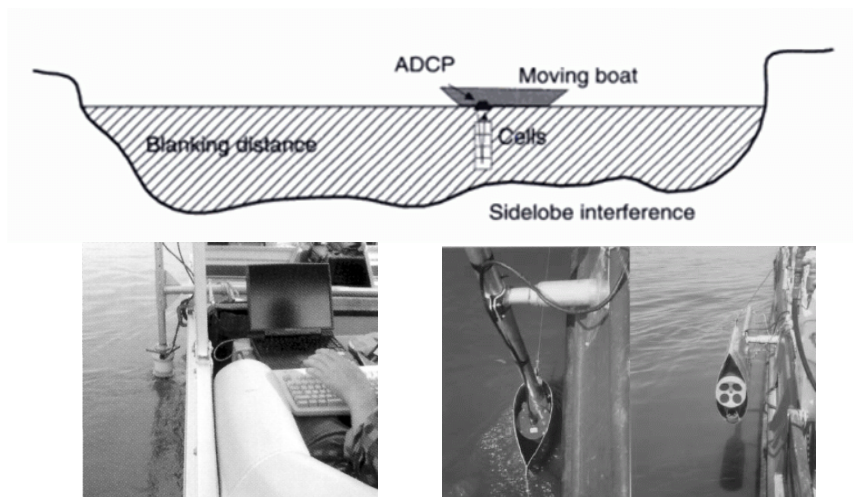
รูปที่ 7-19 แสดงการติดตั้งกับรางเลื่อนพิเศษ(กำลังเคลื่อนที่จากด้านขวามือไปยังด้านซ้ายมือ)

5.2) ติดตั้งกับ โป๊ะหรือทุ่น แล้วลากด้วยสายเคเบิล ใช้กับทางน้ำที่ไม่กว้างมากนัก



รูปที่ 7-20 ติดตั้งกับ โป๊ะหรือทุ่น

5.3) การตรวจวัดโดยวิธี Moving Boat โดยติดตั้งเครื่องมือกับเรือยนต์ หรือ เรือพาย มักใช้กับทางน้ำที่กว้างมาก ๆ หรือมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราไหลหรือระดับน้ำเร็ว



รูปการติดตั้งเครื่องวัดกับเรือยนต์ มีอุปกรณ์พิเศษหุ้ม เพื่อไม่ให้ด้านการไหลจนเกิดฟองอากาศเกิดขึ้น



รูปการติดตั้งเครื่องวัดกับเรือพาย

รูปที่ 7-21 การตรวจวัดโดยวิธี Moving boat

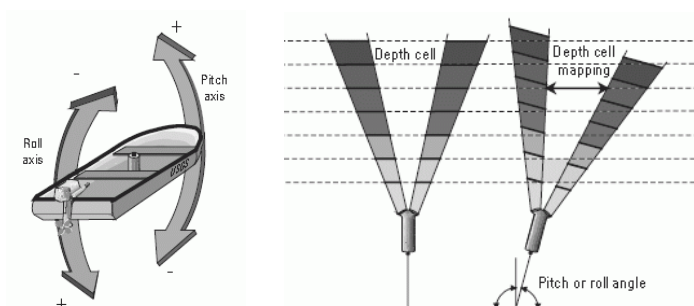
7.3.6 สิ่งควรระวังเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตรวจวัด

- 1) หัววัดต้องจุ่มอยู่ในน้ำเสมอ เพราะถ้าหัววัดลอยอยู่น้ำ อัตราการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศและในน้ำจะต่างกัน และจะเกิดการหักเหของสัญญาณจะทำให้ตรวจวัดผิดพลาด
- 2) การตรวจวัดแนวตั้งแนวการวัดจากท้องน้ำสู่ผิวน้ำ (ตำแหน่งเครื่องวัดอยู่ที่ท้องน้ำโดยหงายขึ้น) ถ้ากระแสน้ำไม่แรงตะกอนที่ปนมากับน้ำอาจตกปิดทับผิวหน้าหัววัดจนทำให้การวัดผิดพลาด ต้องคอยตรวจสอบทำความสะอาดอยู่เสมอ

3) การติดตั้งเครื่องวัดที่ท้องน้ำ เลือกใช้กับทางน้ำที่ไม่มีตะกอน กรวด ทราย ถูกพัดพามาตกทับถมตัวเครื่องมือวัด

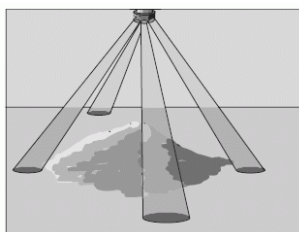
4) ทางน้ำต้องไม่มีอนุภาคที่ไหลปนมากับน้ำปริมาณมากเกินไปจนเกิดผลกระทบต่อการตรวจวัด ซึ่งจะทำให้ตรวจวัดได้ผิดพลาด

5) ตำแหน่งของเครื่องมือวัดไม่อยู่ในแนวที่ถูกต้องจะทำให้การวัดผิดพลาด เช่น การโคลงของเรือหรือทุ่นจากคลื่น เครื่องมือติดตั้งไม่อยู่ในแนวที่ถูกต้องเช่นในกรณีการตรวจวัดแนวโค้งเครื่องวัดไม่อยู่ในแนวโค้ง



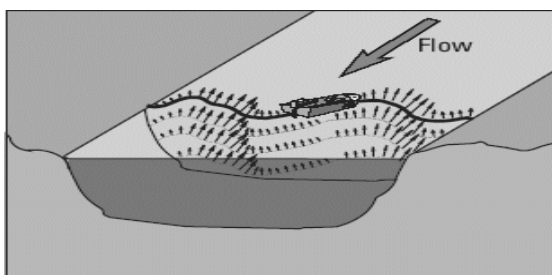
รูปที่ 7-22 ความผิดพลาดจากการตรวจวัดแนวโค้งแล้วเครื่องวัดไม่อยู่ในแนวโค้ง

6) การตรวจวัดความลึกจะผิดพลาดหากท้องน้ำไม่ราบเรียบ



รูปที่ 7-23 การตรวจวัดความลึกที่ผิดพลาด

7) การตรวจวัดที่ให้เครื่องวัดเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวที่กำหนด เช่น แนวหน้าตัดการไหล ส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวัด



รูปที่ 7-24 ความผิดพลาดที่เกิดจากแนวตรวจวัดเบี่ยงเบนไปจากแนวที่กำหนด

8) ต้องเลือกเครื่องวัดให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพิจารณาจากคุณสมบัติขั้นต่ำและขั้นสูงสุดด้วย เช่น ความลึกต่ำสุดที่จะวัดได้ถูกต้อง การมีหัววัดหลายชุดหลายความถี่ในตัวเดียวกัน

9) จะเกิดความผิดพลาดในการตรวจวัดบริเวณใกล้ตลิ่งหรือมีวัตถุแข็งเพราะสัญญาณจะเกิดการสะท้อนกระจายจากพื้นผิว

7.3.6 ข้อดีข้อเสียของ Acoustic doppler current meter

ข้อดี

- 1) ไม่มีชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหว จึงไม่เกิดความผิดพลาดจากอิทธิพลของการไหลของน้ำดังเช่นเครื่องมือวัดกระแสน้ำเชิงกล
- 2) ใช้งานได้ดีในกรณีมีตะกอนไหลปนมากับน้ำพอสมควร
- 3) ใช้งานได้ดีกับกระแสน้ำที่มีลักษณะการไหลไม่ราบเรียบ
- 4) ใช้งานได้ง่ายและสะดวกมากกว่า เพราะสามารถแสดงผลเป็นค่าอัตราการไหลเฉลี่ยในพื้นที่ขอบเขตการตรวจวัดที่เป็นค่าตัวเลข หรือกราฟได้โดยตรง แสดงผลข้อมูล **digital** ในลักษณะ **real time** สามารถใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้หลากหลาย
- 5) นอกจากการวัดกระแสน้ำแล้ว สามารถติดตั้ง **Sensor** ตรวจวัดหลายอย่างในเครื่องมือตัวเดียวกัน เช่น วัดอุณหภูมิ วัดความลึก เป็นต้น
- 6) การดูแลบำรุงรักษาทำได้ง่าย

ข้อเสีย

- 1) มีราคาแพงมาก
- 2) ระดับของพลังงานจากแบตเตอรี่จะมีผลต่อการทำงานของเครื่องมือ
- 3) การเสื่อมของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานของเครื่องมือซึ่งเป็นสิ่งสังเกตได้ยาก ต้องส่งเครื่องมือกลับไปทดสอบที่โรงงานผลิตตามเวลาที่กำหนด

7.3.6 Laser doppler velocimeter

เป็นเครื่องมือที่ตรวจวัดได้เที่ยงตรงแม่นยำสูงมากในขณะที่มีราคาแพงมากเช่นกัน เป็นเครื่องมือมีความละเอียดอ่อน โดยทั่วไปจะใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำต่าง ๆ ไม่นิยมใช้ตรวจวัดในสนาม

7.4 Optical strobe current meters

7.4.1 หลักการทำงานของ Optical strobe current meters

Optical strobe current meters เป็นเครื่องมือตรวจวัดความเร็วการไหลของผิวน้ำ (Surface velocity meters) ที่ไหลในทางน้ำเปิด พัฒนาขึ้นมาโดย USGS เพื่อใช้ตรวจวัดการไหลของน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก หรือเมื่อเกิดน้ำท่วม มีกระแสน้ำรุนแรง มีซากปรักหักพังวัตถุสิ่งของไหลมากับน้ำมาก ซึ่งในกรณีเช่นนี้จะไม่สามารถตรวจวัดการไหลโดยใช้เครื่องมือวัดประเภทอื่น ๆ ได้ โดยในการตรวจวัดนั้นจะไม่มีชิ้นส่วนของเครื่องวัดสัมผัสหรือจุ่มลงในน้ำ สามารถตรวจวัดได้จากสะพานหรือที่ซึ่งมีความเหมาะสม จึงเป็นวิธีที่ปลอดภัยกับผู้ตรวจวัด

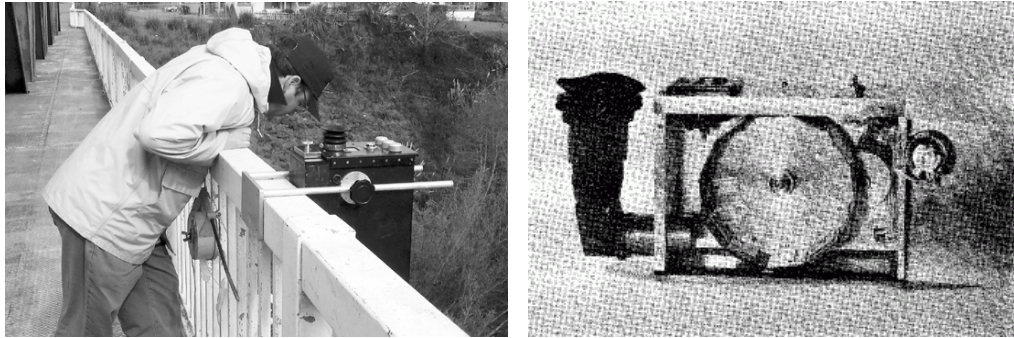
หลักการพื้นฐานการทำงานของเครื่องวัดรุ่นแรก ๆ มีลักษณะของเครื่องวัดการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของกล้องส่องทางไกลกำลังขยายต่ำ วงล้อติดกระจกเงาแผ่นตรงขึ้นเล็กๆ ที่ควบคุมปรับรอบการหมุนของวงล้อด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องวัดรอบ โดยในการใช้งาน ผู้ตรวจวัดมองผิวน้ำที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วผ่านทางกล้องส่องทางไกล โดยภาพผิวน้ำที่มองเห็นนั้นจะสะท้อนผ่านจากกระจกของวงล้อที่หมุนอยู่อีกทีหนึ่ง เมื่อปรับความเร็วของวงล้อกระจกถึงค่าหนึ่งภาพของผิวน้ำจะมองเห็นเหมือนว่าน้ำนิ่งไม่มีการไหล เพราะความเร็วการไหลจะสัมพันธ์กับความถี่ของการมองเห็นภาพ ซึ่งความถี่ดังกล่าวจะแสดงผลจากเครื่องวัดรอบ (เครื่องระบบใหม่จะใช้ความถี่ของการกระพริบของหลอดไฟแทนการหมุนวงล้อกระจก)

สามารถคำนวณความเร็วการไหลของผิวน้ำได้จากความถี่การหมุนของวงล้อกระจก กับระยะจากผิวน้ำถึงเครื่องวัด แต่เนื่องจากความเร็วการไหลที่วัดได้เป็นความเร็วที่ผิวน้ำ ดังนั้นจะต้องแปลงเป็นความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดการไหลย่อย โดยคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่สัมพันธ์กับความลึกของหน้าตัดการไหลย่อย ซึ่งกำหนดไว้สำหรับเครื่องวัดเครื่องนั้นโดยเฉพาะ

ความเร็วการไหลที่ผิวน้ำ = ความถี่การหมุนของวงล้อกระจก x ระยะจากผิวน้ำถึงเครื่องวัด

ความเร็วการไหลเฉลี่ย = ความเร็วการไหลที่ผิวน้ำ x สัมประสิทธิ์การไหล

อัตราการไหล = ความเร็วการไหลเฉลี่ย x พื้นที่หน้าตัดการไหล



รูปที่ 7-25 แสดง Optical current meters ของ USGS - Model 6620

นอกจากนี้ยังมี Surface current meter แบบอื่น ๆ เช่น Microwave water surface current meter - Model 6650 ที่พัฒนาโดย USGS ที่มีหลักการทำงานคล้าย Acoustic doppler current meter แต่ใช้คลื่น Microwave และเป็นการตรวจวัดการสะท้อนสัญญาณจากผิวน้ำ จึงไม่มีชิ้นส่วนของเครื่องมือสัมผัสหรือจุ่มอยู่ในน้ำ ให้ตรวจวัดกรณีที่เกิดน้ำไหลหลากรุนแรงมีซากปรักหักพังวัตถุสิ่งของไหลมากับน้ำมาก เช่นกัน



รูปที่ 7-26 แสดง Microwave water surface current meter - Model 6650

บทที่ 8

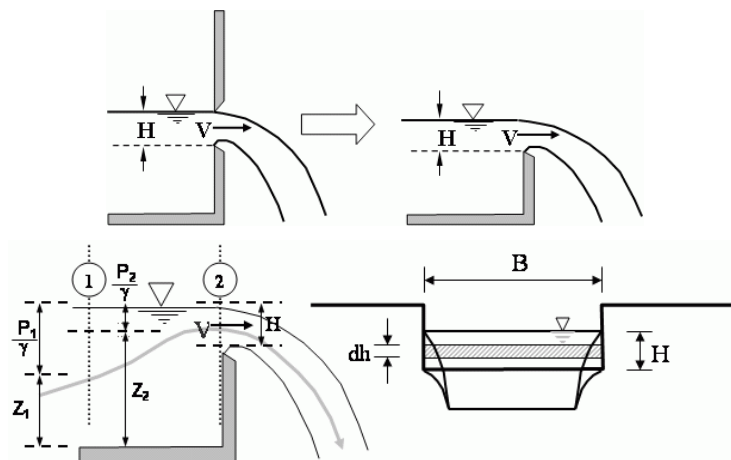
การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายทดน้ำ ฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น

เนื่องจากเรื่องราวเกี่ยวกับฝายนั้นมีมาก ในส่วนเนื้อหานี้จะขอแบ่งเป็น 4 บท คือ บทนี้จะกล่าวถึงฝายทดน้ำและทางระบายน้ำล้นที่ไม่มีบานระบายเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำซึ่งรวมถึงฝายที่ยกบานระบายขึ้นน้ำด้วย, บทที่ 9 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันคม, บทที่ 10 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันกว้าง, บทที่ 11 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันสั้น ส่วนฝายหรือทางระบายน้ำล้นที่ควบคุมด้วยบานระบายจะนำเสนอในบทที่ 12 เรื่องการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบาย (ฝายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ)

8.1 หลักการเบื้องต้นของฝาย

8.1.1 หลักการเบื้องต้นของฝายสันคม

การศึกษาการไหลของน้ำผ่านฝายนั้น เกี่ยวเนื่องมาจากการศึกษาการไหลของน้ำผ่านช่องเปิด (Orifice) ขนาดใหญ่ ตามรูปที่ 8.1-1 เมื่อระดับผิวน้ำอยู่ต่ำกว่าขอบด้านบนของช่องเปิด จะเกิดเป็นลักษณะของฝายสันคม ที่ลักษณะของหน้าตัดการไหลจะมีรูปแบบเฉพาะตัว โดยจะเกิดการไหลตกโดยอิสระและมีการบีบตัวด้านข้าง



รูปที่ 8.1-1 พัฒนาการของการศึกษาการไหลผ่านฝายมาจากการศึกษา Orifice

พิจารณาจากรูปที่ 8.1-1 Energy equation ที่จุด (1) และ (2) ถ้าไม่มี Losses เกิดขึ้น

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = \left[\left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - Z_2 \right] + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = h + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$V_2 = \sqrt{2g \left(h + \frac{V_1^2}{2g} \right)}$$

$$dQ = V \cdot dA = V \cdot B \cdot dh$$

$$dQ = B \sqrt{2g \left(h + \frac{V_1^2}{2g} \right)} dh$$

$$Q = B \sqrt{2g} \int_0^H \left(h + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{1/2} dh$$

$$Q = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} \left[\left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

$$Q_r = C_d Q$$

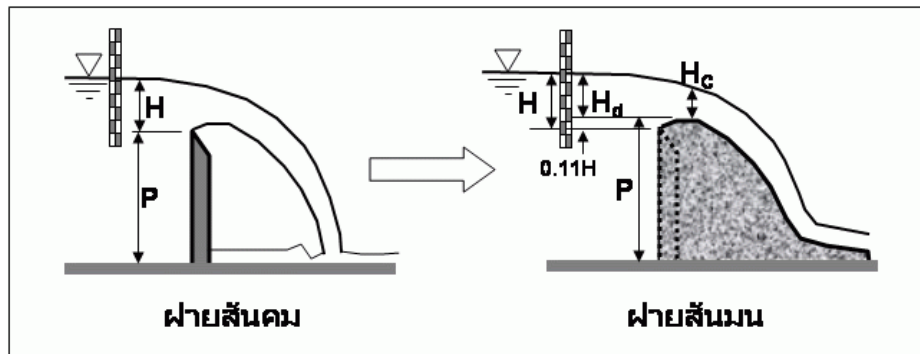
$$Q_r = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} \left[\left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

ถ้า V_1 มีค่าน้อยมาก (ไม่คิด Approach Velocity)

$$Q_r = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} H^{3/2}$$

8.1.2 ฝายทดน้ำที่เป็นฝายแข็ง

จาก รูปที่ 8.1-2 ฝายแข็งแบบฝายสันมน (Ogee weir) ถูกพัฒนามาจากฝายสันคม โดยการทำยอดของทางน้ำสัน (Spillway crest) ให้มีขอบเขตรูปร่างเหมือนกับผิวล่างของส่วนโค้งของน้ำที่ไหลผ่านฝายสันคมที่เรียก Nappe หรือคือการสร้างตัวฝายเป็นรูปร่างของช่องอากาศใต้ Nappe นั้นเอง



รูปที่ 8.1-2 แสดงฝายทดน้ำแบบฝายสันมน (Ogee weir) พัฒนาแนวคิดมาจากฝายสันคม

การวัดการไหลของน้ำผ่านฝาย ใช้หลักการวัดความสูงพลังงานของการไหลตกอิสระ (The head of overfall) ในลักษณะที่มีการไหลแบบวิกฤติ (Critical flow) และเกิดความลึกวิกฤติ (Critical depth) ที่หน้าตัดควบคุมที่สันฝายนั้น

อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายยาว L คำนวณจาก ความเร็ววิกฤติ (V_c) และพื้นที่หน้าตัดการไหลวิกฤติ (A_c) หรือ $Q = V_c A_c$ นั้นเอง แต่เนื่องจากมีความยุ่งยากในการวัดค่าความเร็ววิกฤติ และความลึกวิกฤติ (H_c หรือ y_c) จึงได้คิดเทียบจากความลึกวิกฤติจากตำแหน่งเหนือสันฝาย ไปเป็นความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำหน้าฝายที่มีสภาพนิ่งที่วัดได้ง่ายกว่าแทน และค่าเปรียบเทียบดังกล่าวเรียก ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

จากสมการการไหลของฝายสันคม

$$Q_r = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} H^{3/2}$$

ถ้าให้ $C = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g}$ และแทนความยาวของสันฝายด้วย L

จะได้ สมการพื้นฐานการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย เป็น

$$Q = CLH^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลข้ามสันฝาย $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย

L = ความยาวประสิทธิผล (Effective length) ของสันฝาย

หรือช่วงความยาวที่มีน้ำไหลผ่านไปจริง ม.

H = ความลึกของน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย ม.

8.1.3 ความลึกของน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย: H

จากรูปที่ 8.1-2 พิจารณาฝายสันมนที่เป็นตัวแทนของฝายแข็งที่พัฒนามาจากฝายสันคมเปรียบเทียบการใช้ H กับ H_d ในสมการการไหลผ่านทางระบายน้ำล้น (ฝายสันมน)

H = ความสูงของผิวน้ำด้านเหนือน้ำเหนือยอดฝายสันคม (ม.)

ตำแหน่งการวัดระดับน้ำห่างจากสันฝายไปด้านเหนือน้ำ ประมาณ $4H$

H_d = ความสูงของผิวน้ำด้านเหนือน้ำเหนือยอดฝายสันมนหรือทางน้ำล้น (ม.)

หรือเป็นความสูงออกแบบ (Design head) วัดตำแหน่งที่น้ำนิ่งที่ระยะ $4H$

$$[\text{ความต่างของ } H \text{ กับ } H_d : H - H_d = 0.11H \text{ หรือ } H_d = 0.89H]$$

H_c = ความลึกวิกฤติ (Critical depth) ของน้ำที่ไหลผ่านสันฝาย (ม.)

❖ เปรียบเทียบการใช้ H กับ H_d ในสมการการไหลผ่านฝาย

กรณีทางน้ำล้นหรือฝายมีความสูงมาก $\frac{H}{P} \approx 0$

สมการในทางทฤษฎี $Q = CLH_c^{3/2}$ ($\text{ม.}^3/\text{วินาที}$)

$$H_c = \frac{2}{3}H \text{ และ } H_d = 0.89H$$

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบค่าคงที่ ระหว่างการใช้ H กับ H_d ดังนี้

เมื่อใช้ค่า H ; $Q = 1.80LH^{3/2}$ ($\text{ม.}^3/\text{วินาที}$)

เมื่อใช้ค่า H_d ; $Q = 2.15L H_d^{3/2}$ ($\text{ม.}^3/\text{วินาที}$)

หลักการคำนวณในทางทฤษฎีนั้นต้องใช้ค่า H_c แต่ในทางปฏิบัติ การวัดค่า H_c จะไม่สะดวก ดังนั้นการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายจะใช้ค่า H หรือ H_d แล้วแต่ว่าจะเป็นฝายประเภทใด (ฝายสันคมใช้ H ฝายแข็งประเภทอื่นใช้ H_d) ทั้งนี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_c กับ H หรือ H_d และความสัมพันธ์ระหว่าง H กับ H_d ข้างต้น มาใช้ปรับค่าหรือแปลงค่าซึ่งจะแฝงอยู่ในค่า C

โดยปกติแล้วในการออกแบบฝายจะกำหนดให้มี Design head ไม่สูงมากนัก เพราะจะถูกกำหนดโดยระดับของตลิ่งของลำน้ำหรือระดับสันทำนบดินของอ่างเก็บน้ำ

อนึ่ง การวัดระดับน้ำที่เป็นค่า H หรือ H_d นั้นจะวัดในตำแหน่งที่มีน้ำนิ่งด้านเหนือน้ำที่ระยะไม่น้อยกว่า $4H$ จากสันฝาย (ตัวแปร H บางตำราอาจกำหนดตำแหน่งหน้าตัดเป็นแนวหน้าตัด 1 หรือหน้าตัด a ก็อาจใช้แทนค่าตัวแปรเป็น H_1 หรือ H_a)

8.2 ความหมายของฝาย (Weir) และทางระบายน้ำล้น (Spillway)

ฝายเป็นอาคารที่สร้างขึ้นสำหรับทดน้ำในลำน้ำที่ไหลมาในปริมาณต่างๆ กันให้มีระดับสูงจนสามารถส่งน้ำเข้าคลองส่งน้ำที่ขุดออกสองฝั่งลำน้ำด้านหน้าฝาย ลัดเลาะไปตามสภาพภูมิประเทศให้กับพื้นที่เพาะปลูกที่อยู่ด้านท้าย (ปราโมทย์ ไม่กล้าด, 2524)

โดยหน้าที่ของฝายนอกจากการทดน้ำแล้ว เมื่อน้ำมีระดับสูงมากกว่าระดับของสันฝาย น้ำก็จะไหลข้ามสันฝายออกไปสู่ด้านท้ายน้ำ ฝายจึงทำหน้าที่ระบายน้ำล้นด้วย จึงอาจเรียกเป็นฝายน้ำล้นหรือฝายระบายน้ำ ในกรณีที่สร้างฝายไว้เพื่อระบายน้ำส่วนเกินออกจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำมักเรียกฝายนั้นว่า ทางระบายน้ำล้น

8.3 ประเภทของฝาย

อาจแบ่งประเภทของฝายได้หลายอย่าง ได้แก่

8.3.1 แบ่งประเภทฝายตามลักษณะความมั่นคงแข็งแรง พิจารณาจากการก่อสร้างเป็น ฝายเฉพาะฤดูกาล ฝายชั่วคราว ฝายถาวรหรือฝายคอกหมู ฝายถาวร ฯลฯ

8.3.2 แบ่งประเภทฝายตามวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้าง ได้แก่ ฝายดินถม ฝายหิน (หินทิ้ง หินเรียง หินเรียงยาแนว หินก่อ) ฝายโครงสร้างไม้ ฝายคอนกรีต ฝายคอนกรีตเสริมเหล็ก ฯลฯ

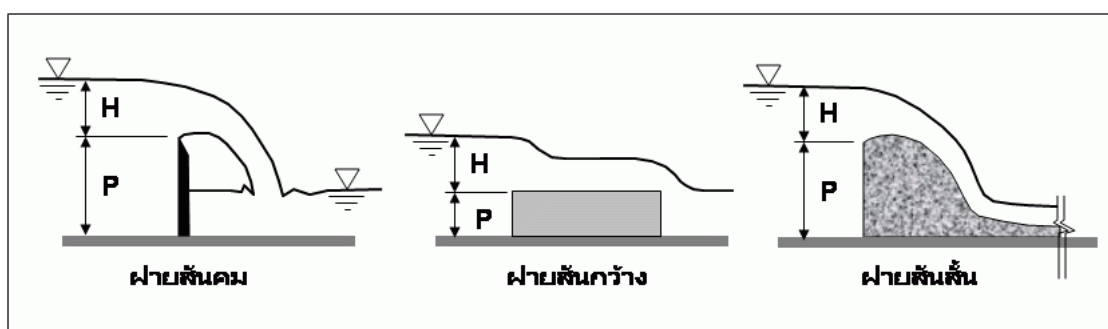
8.3.3 การแบ่งประเภทฝายตามลักษณะหน้าตัดของฝาย มีการจัดแบ่งใหม่ตามลักษณะการไหลของน้ำเหนือสันฝาย เป็น 3 ประเภท (จากเดิมที่การแบ่งตามลักษณะสันฝายจะมีเพียง ฝายสันคม และฝายสันกว้างเท่านั้น)

ถ้าให้ H = ความสูงของน้ำที่ไหลผ่านสันฝาย , B = ความหนาของสันฝาย

1) ฝายสันคม (Sharp crested weir or Thin plate weir) เป็นฝายที่มีสันคม ลักษณะการไหลเป็นแบบไหลตกอิสระ โดยเกิด Critical depth ที่ตำแหน่งสันฝายคม ได้แก่ ฝายวัดน้ำแบบฝายสันคมรูปแบบต่างๆ อาจพิจารณาจาก $H/B \geq 15$

2) ฝายสันกว้าง (Broad crested weir) เป็นฝายที่มีสันฝายหนาหรือกว้าง ลักษณะการไหลมีการกระจายความดันแบบความดันสถิตเท่ากันตลอดความกว้างบนสันฝาย หรือเกิด Critical depth เกือบทุกตำแหน่งบนสันฝาย โดยทั่วไปจะหมายถึง ฝายวัดน้ำแบบฝายสันกว้างรูปแบบต่างๆ อาจพิจารณาจาก $H/B \leq 1$

3) ฝายสันสั้น (Short crested weir) เป็นการแบ่งประเภทฝายที่เพิ่มเติมขึ้นมาใหม่ โดยจะมีลักษณะการไหลเหนือสันฝายเป็นแบบการไหลตกอิสระเช่นเดียวกับฝายสันคม (ฝายสันกว้างมีลักษณะการไหลที่มีการกระจายความดันแบบความดันสถิตตลอดแนวเหนือสันฝาย) โดย Critical depth จะเกิดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนสันฝาย ดังนั้นฝายรูปแบบต่างๆ ที่ไม่ใช่ฝายวัดน้ำแบบสันคมและแบบสันกว้าง จะจัดอยู่ในฝายกลุ่มนี้ทั้งสิ้น ซึ่งได้แก่ ฝายทดน้ำ ฝายระบายน้ำ หรือทางระบายน้ำล้น ที่มักเรียก “ฝายแข็ง” (การไหลของฝายสันสั้นที่มีสันฝายแบน อาจมีการไหลในลักษณะการไหลของฝายสันกว้างได้ แต่จะมีเป็นบางช่วงเวลาของการไหล จึงไม่ให้ความสำคัญว่าต้องคำนวณในลักษณะของฝายสันกว้าง) อาจพิจารณาจาก $1 \leq H/B \leq 15$



รูปที่ 8.3-1 แสดงรูปตัดลักษณะการไหลของฝายสันคม ฝายสันกว้าง และฝายสันสั้น

8.3.4 การแบ่งประเภทฝายตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือหน้าที่หลัก

การแบ่งประเภทฝายตามวัตถุประสงค์หลักในการใช้งานหรือหน้าที่หลัก โดยแบ่งออกเป็น

- 1) ฝายทดน้ำ 2) ฝายน้ำล้นหรือฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น 3) ฝายวัดน้ำ

1) **ฝายทดน้ำ** เป็นฝายที่ก่อสร้างปิดกั้นทางน้ำ โดยเป็นอาคารหลักของโครงการประเภทฝายเพื่อทำหน้าที่ทดน้ำให้มีระดับที่สูงขึ้น และให้น้ำส่วนเกินระบายไหลข้ามออกไป ได้แก่ ฝายสันมน (Ogee weir), ฝายยาง (Rubber weir หรือ Rubber dam), ฝายเกเบียน (Gabion weir), ฝายหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู, ฝายหยัก ฯลฯ

2) **ฝายน้ำล้นหรือฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น** เป็นฝายที่สร้างเป็นอาคารประกอบของโครงการประเภทเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ ทำหน้าที่ระบายหรือควบคุมปริมาณน้ำในเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำให้มีระดับที่เหมาะสม มีความปลอดภัยต่อความมั่นคงแข็งแรงของตัวเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ฝายรูปแบบลักษณะต่าง ๆ แบ่งได้ 3 กลุ่มใหญ่ คือ

2.1) **ฝายน้ำล้นหลักหรือฝายน้ำล้นใช้การ (Main or Service spillway)** เป็นฝายที่ออกแบบไว้สำหรับควบคุมหรือยอมให้ปริมาณน้ำหลาก (Design flood) ไหลผ่านไปทางท้ายน้ำได้ในเหตุการณ์ปกติ ถ้าเป็นฝายที่ไม่มีบานระบายควบคุมระดับสันฝายมักเท่ากับระดับน้ำเก็บกัก ฝายประเภทนี้อาจออกแบบให้มีลักษณะรูปแบบได้แตกต่างกันไปให้สอดคล้องกับสภาพของปริมาณน้ำหลากและทางน้ำด้านท้ายน้ำและปัจจัยตัวแปรอื่น ๆ

2.2) **ฝายน้ำล้นเสริม (Auxiliary spillway)** เป็นฝายน้ำล้นที่ออกแบบไว้เพื่อช่วยฝายน้ำล้นใช้การ ระบายน้ำในส่วนที่มีน้ำไหลหลากเกินกว่าปริมาณ Design flood ไม่มากนัก ระดับสันฝายประเภทนี้จะสูงกว่าระดับสันฝายน้ำล้นใช้การหรือระดับน้ำเก็บกัก (รณก.) เล็กน้อย ส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นฝายที่มีสันฝายแนวตรง (ไม่นิยมสร้างในประเทศไทย)

2.3) **ฝายฉุกเฉิน (Emergency spillway)** เป็นฝายที่ออกแบบไว้เพื่อระบายน้ำหลากสูงสุด (Extreme flood) ที่ไม่เกิดขึ้นบ่อยนัก ระดับสันฝายจะอยู่สูงกว่าระดับสันฝายน้ำล้นใช้การและฝายน้ำล้นเสริม แต่ไม่สูงกว่าระดับน้ำสูงสุด (รณส.) มักใช้แนวหินแข็งหรือดินแข็งเดิมเป็นตัวฝาย โดยลดระดับเขื่อนหรือทำนบดินลงในช่วงที่ให้ เป็นฝายฉุกเฉินดังกล่าวซึ่งมักอยู่ที่ปลายเขื่อนหรือทำนบดิน

อนึ่ง เนื่องจากทั้ง 1) ฝายทดน้ำ และ 2) ฝายน้ำล้น หรือฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้นนั้น จะต่างกันที่หน้าที่ แต่อาจมีรูปร่างแบบเดียวกัน หรือมีลักษณะการไหลของน้ำผ่านฝายที่เหมือนกัน ดังนั้นในบทนี้ถ้าใช้คำว่า “ฝาย” ให้หมายรวมถึงฝายใน 2 กลุ่มนี้

3) **ฝายวัดน้ำ** เป็นฝายสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่วัดปริมาณน้ำในทางน้ำโดยเฉพาะ เพื่อช่วยให้การควบคุมหรือบริหารจัดการน้ำสะดวกยิ่งขึ้น แบ่งได้เป็น ฝายวัดน้ำสันคม ฝายวัดน้ำสันกว้าง ฝายวัดน้ำสันสั้นและฝายวัดน้ำรูปแบบอื่นๆ

8.3.5 การแบ่งฝายออกตามลักษณะของการควบคุมการระบายน้ำ แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ ฝายที่ไม่มีการควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (8.3.5.1) และ ฝายที่มีการควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (8.3.5.2)

8.3.5.1 ฝายที่ไม่มีการควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (Uncontrolled weir) เป็นฝายที่มีการระบายน้ำแบบตายตัว ระดับสันฝายเป็นระดับเดียวกับระดับน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ หรือเป็นระดับที่จะทำให้ น้ำที่ไหลหลากด้านเหนือน้ำในลำน้ำเอ่อขึ้นได้สูงสุดโดยไม่เกิดการไหลบ่าออกไปท่วมพื้นที่สองฝั่งลำน้ำ เมื่อระดับน้ำสูงเกินระดับเก็บกักหรือระดับสันฝาย น้ำก็จะไหลล้นข้ามฝายออกไป ฝายกลุ่มนี้มักออกแบบให้มีระดับน้ำสูงสุดด้านหน้าฝายไม่สูงมากนัก (ไม่ทำให้เกิดผลกระทบทำให้น้ำท่วมพื้นที่ด้านเหนือน้ำ) โดยอาจแบ่งย่อยได้เป็น ฝายที่มีสันเป็นแนวตรง กับ ฝายที่มีสันไม่เป็นแนวตรง

(1) ฝายที่มีสันเป็นแนวตรง (Straight crest spillway) จะพิจารณาแนวของสันฝายเป็นแนวเส้นตรงเป็นเกณฑ์ แยกได้ 3 กลุ่มย่อย ได้แก่

- **Normal spillway** แนวของสันฝายวางในแนวเดียวกับทำนบกั้น หรือตั้งฉากกับแนวการไหลของน้ำในลำน้ำ ความยาวของสันฝายกับความกว้างของลำน้ำจะใกล้เคียงกัน น้ำที่ไหลผ่านฝายอาจลงสู่ลำน้ำโดยตรง หรือไหลผ่านรางระบายน้ำแล้วจึงลงสู่ลำน้ำ
- **Side channel spillway** แนวของสันฝายวางในตำแหน่งตั้งฉากกับทำนบกั้นหรือขนานกับแนวการไหลของน้ำในลำน้ำที่น้ำจากฝายระบายออกไป
- **Skew spillway** แนวของสันฝายวางในตำแหน่งเอียงทำมุมกับทำนบกั้นหรือทางน้ำ อาจเรียก Diagonal spillway หรือ Oblique spillway



รูปที่ 8.3-2 รูปแปลนฝายสันตรง 3 กลุ่ม

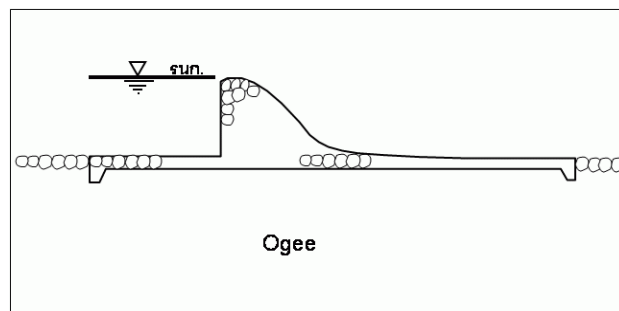
ฝ่ายที่มีสันเป็นแนวตรงนี้อาจพิจารณาแบ่งเป็นประเภทย่อย ตามลักษณะหน้าตัด ตำแหน่งหรือแนวของฝ่ายและลักษณะพิเศษเฉพาะตัว

- **ลักษณะหน้าตัด**

แบ่งหน้าตัดฝ่ายตามรูปแบบการไหลลักษณะ **Free flow** เป็น 2 รูปแบบ คือ **Free overflow** และ **Free overfall**

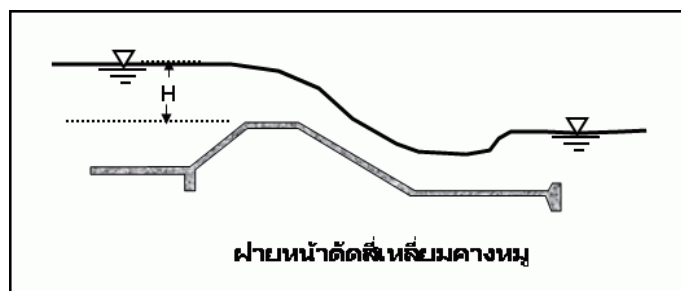
ก. การไหลแบบ **Free overflow** เป็นการไหลที่น้ำไหลอย่างต่อเนื่อง ผ่านผิวหน้าของฝ่ายสามส่วนที่มีความต่อเนื่องกันไป คือ (1) สันฝ่าย (**Crest**) (2)ลาดตัวฝ่ายด้านท้าย (**Face**) ซึ่งเป็นส่วนจากสันฝ่ายถึงพื้นท้ายฝ่าย และ (3) พื้นท้ายฝ่าย (**Toe**) แล้วไหลออกสู่ลำน้ำด้านท้ายหรือไหลผ่านรางเทก่อนออกสู่ลำน้ำ หน้าตัดของฝ่ายกลุ่มนี้ได้แก่

(1.1) ฝ่ายสันมน (**Ogee weir**) เป็นที่นิยมสร้างมาก เป็นฝ่ายที่ออกแบบให้มีการไหลตรงตามหลักการพื้นฐานทางชลศาสตร์ของการไหลผ่านฝ่ายมากที่สุด ดังที่กล่าวแล้วว่าพัฒนามาจากหลักการของฝ่ายสันคม โดยเมื่อให้คอนกรีตไปแทนที่ช่องว่างใต้แผ่นน้ำที่ไหลข้ามฝ่ายสันคม (**Nappe**) ก็จะเกิดเป็นฝ่ายสันมนที่มีความมั่นคงแข็งแรง



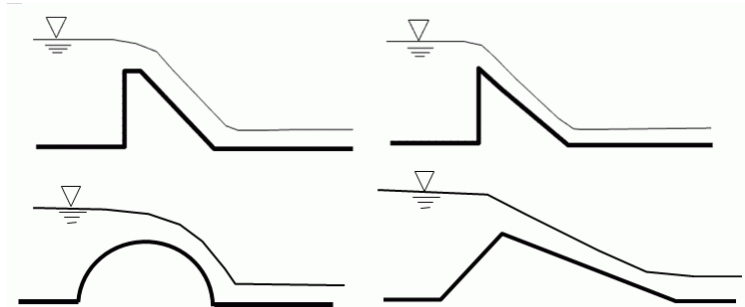
รูปที่ 8.3-3 รูปตัดตามยาวของฝ่าย Ogee

(1.2) ฝ่ายรูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรือ **Indian type**



รูปที่ 8.3-4 รูปตัดตามยาวของฝ่ายรูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรือ **Indian type** แบบหนึ่ง

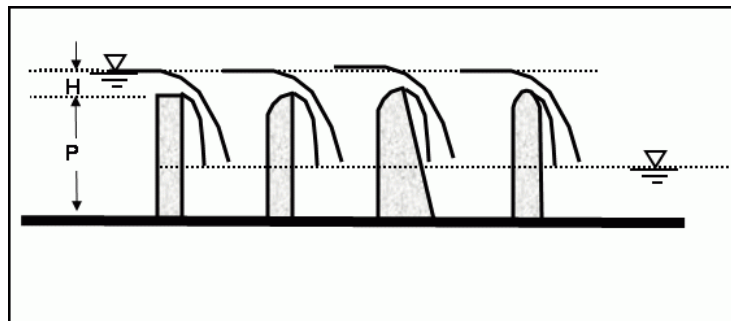
(1.3) ฝ่ายหน้าตัดอื่นๆ ที่ประยุกต์มาจากฝ่ายสันมน และฝ่ายรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เช่น รูปสามเหลี่ยม รูปวงกลม รูปส่วนของวงกลม เป็นต้น



รูปที่ 8.3-5 ลักษณะรูปตัดฝ่ายแบบอื่นบางแบบ

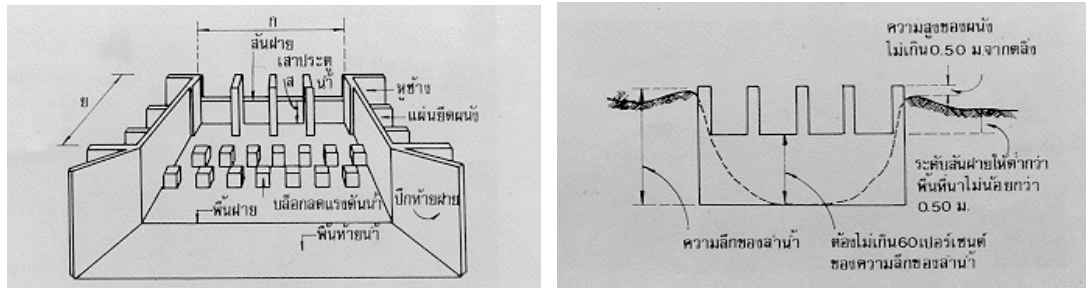
ข. การไหลแบบ **Free overfall** เป็นการไหลที่น้ำข้ามผ่านสันฝายออกไปแล้วตกอย่างอิสระ ลงไปรวมตัวกันที่พื้นแนวราบด้านท้ายฝาย แล้วจึงไหลออกสู่ลำน้ำด้านล่างหรือไหลผ่านรางเทก่อนออกสู่ลำน้ำต่อไป โดยหน้าตัดของฝายกลุ่มนี้ได้แก่

(1.3) **Vertical drop weir** เป็นฝายที่มีโครงสร้างแบบง่าย ๆ มักมีลักษณะเป็นกำแพงคอนกรีต ที่มียอดสันฝายรูปร่างต่างๆ ที่น้ำไหลข้ามออกไปอย่างอิสระ



รูปที่ 8.3-6 ลักษณะรูปร่างหน้าตัดบางแบบของ Vertical drop weir

ตัวอย่าง **Vertical drop weir** ได้แก่ ฝายมาตรฐาน มข. 2527 ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ร่วมมือกับโครงการประชาสัมพันธ์แหล่งน้ำในชนบทไทย - เขอร์มันออกแบบขึ้น ฝายมาตรฐาน มข. มีลักษณะเป็นกำแพงหน้าตัดสี่เหลี่ยม มีลักษณะกำหนดให้ความยาวสันฝายเท่ากับความกว้างลำน้ำ ซึ่งลักษณะลำน้ำกว้างไม่เกิน 20 เมตร ลึกไม่เกิน 3.50 เมตร และเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่ไม่ลาดชันมากจนเกินไป ลักษณะเด่นอีกประการหนึ่ง คือ ราษฎรสามารถก่อสร้างได้แบบประชาอาสา คือราษฎรทำการสำรวจ ออกแบบ กำหนดปริมาณงาน และก่อสร้างได้เอง



รูปที่ 8.3-7 แสดงฝายมาตรฐาน มข.

- แนวของสันฝาย

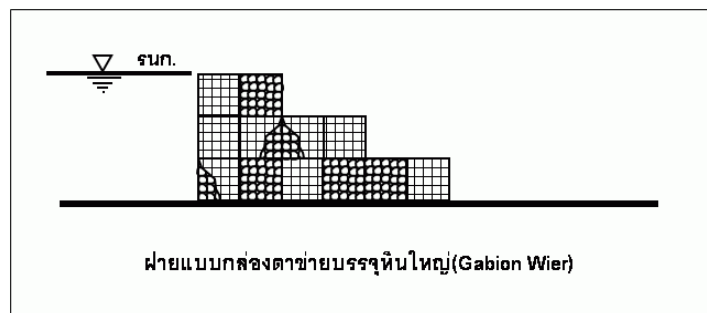
(1.4) Side channel spillway สันฝายเป็นแนวตรงหรือรูปตัว L ที่ด้านยาวของสันฝายวางตัวในแนวเดียวกับแนวของลำน้ำที่จะระบายน้ำออกไปด้านท้าย

(1.5) Skew spillway แนวสันฝายทำมุมเฉียงกับแนวน้ำไหล

- ลักษณะพิเศษเฉพาะตัว

(1.6) Chute spillway เป็นฝายที่มีระดับสันฝายกับระดับพื้นด้านท้ายน้ำต่างกันมาก อาคารรับน้ำด้านท้ายฝายจึงมีลักษณะเป็นรางสูง (ในขณะที่ฝายทั่วไป หรือ Simple weir มีระดับพื้นด้านหน้าและท้ายฝายไม่ต่างกันมาก)

(1.7) ฝายแบบกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabion weirs)



รูปที่ 8.3-8 แสดงรูปตัดของ Gabion weirs

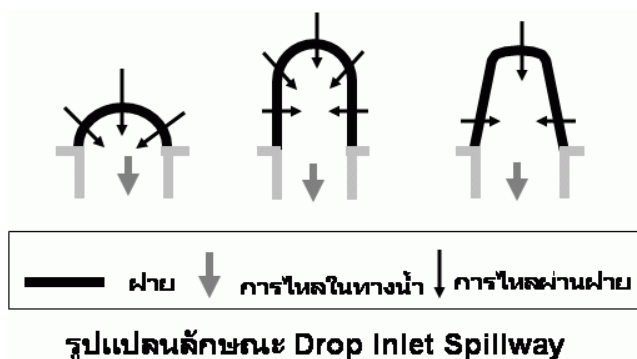
(1.8) ฝายรูปแบบอื่นๆ เช่น ฝายแบบขั้นบันได ฝายหินทิ้ง ฝายต้นน้ำลำธารขนาดเล็ก เป็นต้น

(2) ฝายที่มีสันไม่เป็นแนวตรง แต่จะมีรูปร่างลักษณะที่แตกต่างๆ กันไป ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่มีความจำกัดในเรื่องความกว้างของลำน้ำ น้อยกว่าความยาวของสันฝาย

ที่ออกแบบให้ระบายน้ำปริมาณมากๆ ได้เพียงพอ หรือข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เป็นต้น

ประเภทของฝายในกลุ่มนี้ได้แก่

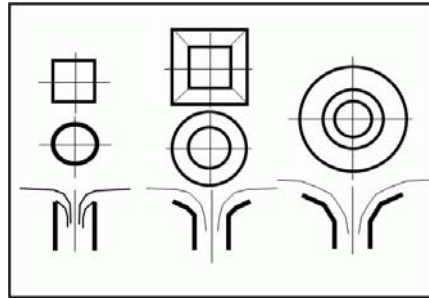
(2.1) **Drop inlet spillway** เป็นฝายที่มีความยาวรวมของสันฝายยาวกว่าความกว้างของลำน้ำหรือทางน้ำท้ายฝาย จึงต้องปรับรูปทรงแนวสันฝายเป็นรูปตัว U, รูปตัว C, รูปเกือกม้า, รูปปากเปิด, รูปสี่เหลี่ยม เป็นต้นให้ยื่นเข้าไปในตัวเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำเพื่อให้ปลายทั้ง 2 ข้างอยู่ที่ตำแหน่งพอดีกับความกว้างของลำน้ำ โดยมีลักษณะสำคัญคือด้านท้ายเป็นรางน้ำเปิด



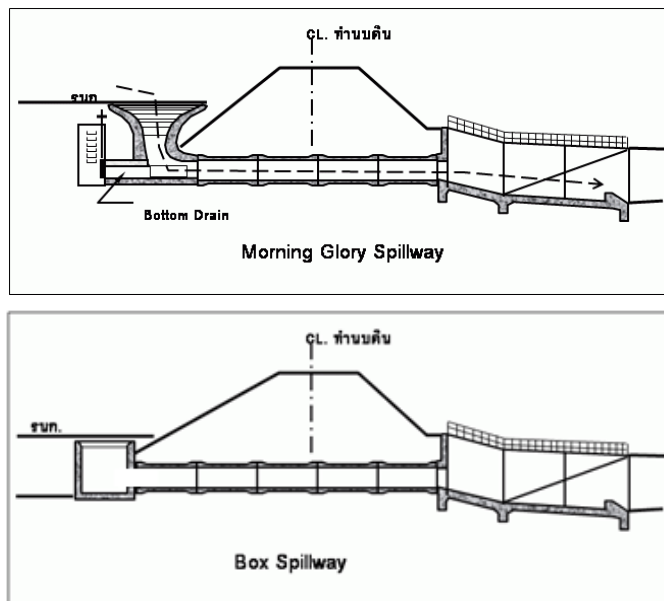
รูปที่ 8.3-9 ตัวอย่างรูปร่างสันฝายของ Drop inlet spillway

(2.2) **Shaft spillway** เป็นฝายที่สันฝายเป็นรูปทรงต่างๆ เช่น วงกลม สี่เหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก หรือกล่อ่ง หรือมีลักษณะเป็นปากแตร โดยจะยื่นเข้าไปในอ่างเก็บน้ำ น้ำที่ไหลผ่านสันฝายจะส่งออกไปสู่ด้านท้ายน้ำโดยผ่านท่อที่วางนอนลอดท้นดิน ฝายประเภทนี้มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น สันฝายเป็นปากแตร เรียก **Morning glory spillway** หรือ ฝายปากกระฉัง ถ้าสันฝายเป็นรูปสี่เหลี่ยม เรียก **Box spillway** เป็นต้น ฝายประเภทนี้ที่สันฝายอาจมีตอม่อ หรือครีปเพื่อใช้บังคับการไหลของน้ำให้ลงสู่จุดกึ่งกลางท่อไม่ให้เกิดน้ำวนเหนือปากทางน้ำเข้าเหนือสันฝาย หรืออาจเพื่อติดตั้ง **Stop logs** เพื่อเสริมเพิ่มระดับน้ำเก็บกักช่วงปลายฤดูน้ำหลาก หรือเป็นแนวกันวัชพืช ขยะไม่ให้ไหลลงสู่ช่องระบายของฝายก็ได้

ฝายประเภทนี้อาจมี **ท่อระบายน้ำ** ที่เรียก **Bottom drain** เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณการระบายน้ำ หรือใช้ระบายพร่องน้ำจากอ่างเก็บน้ำลงสู่ลำน้ำด้านท้ายเมื่อระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำอยู่ต่ำกว่าสันฝาย (จะกล่าวในหัวข้ออาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ)

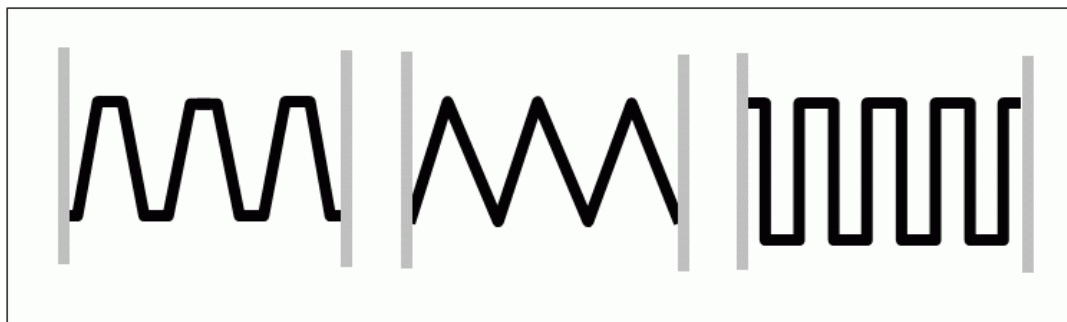


รูปที่ 8.3-10 แสดงรูปแปลน และรูปตัดของสันฝายกลุ่ม Shaft spillway



รูปที่ 8.3-11 รูปตัดตามยาวของ Shaft spillway

(2.3) ฝายหยัก (Labyrinth weir) อาจเรียก ฝายสันยาว** (Long crested weir) เป็นฝายที่มีลักษณะหยักไปหยักมาในรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อให้สันฝายมีความยาวเพียงพอที่จะระบายน้ำนองสูงสุดให้ล้นข้ามออกไปสู่ทางน้ำหรือลำน้ำที่มีความกว้างน้อยกว่าได้



รูปที่ 8.3-12 แสดงแปลนแนวสันฝายของฝายหยักบางรูปแบบ

**** ฝ่ายสันยาว (Long crested weir)**

ในบางตำราอาจพบการแบ่งกลุ่มของฝ่ายที่ต่างกันออกไปจากที่ได้กล่าวมาแล้ว ที่พบบ่อยคือ ฝ่ายสันยาว (Long crested weir) ใช้เรียกกลุ่มของฝ่ายที่สร้างปิดกั้นในลำน้ำ โดยตัวฝ่ายจะมีความยาวรวมของสันฝ่ายยาวกว่าความกว้างของลำน้ำ ซึ่งประกอบด้วย 3 กลุ่มย่อยคือ

- (1) ฝ่ายแนวเฉียง (Skew or Oblique weir)
- (2) ฝ่ายในกลุ่ม Drop inlet spillway ที่ส่วนใหญ่จะเป็นฝ่ายรูปปากเป็ด (Duckbill)
- (3) ฝ่ายหยัก (Labyrinth)

8.3.5.2 ฝ่ายที่มีการควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (Controlled spillway)

เป็นฝ่ายที่มีการการใช้อุปกรณ์ควบคุมซึ่งมักติดตั้งบนสันฝ่ายเพื่อเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำที่ต้องการระบายออกไป หรือเพื่อเพิ่มระดับและปริมาณน้ำเก็บกักให้สามารถเก็บกักน้ำในช่วงปลายฤดูน้ำหลากได้เพิ่มขึ้น ได้แก่ (1) บานระบายชนิดบานตรง (2) บานระบายชนิดบานโค้ง (3) บานระบายประเภทอื่น ๆ (4) แผ่นไม้กระดานอัดน้ำ (Flashboard), ไม้อัดน้ำ (Stop logs) (5) ฝ่ายยาง (Rubber weir) และ (6) ฝ่ายแบบพิเศษ เป็นต้น

อนึ่งฝ่ายที่มีบานระบายควบคุม ตัวฝ่ายมักมีลักษณะเป็นฝ่ายสันมน กรณีที่ได้ยกบานระบายพ้นผิวน้ำ ก็จะมีลักษณะเป็นแบบฝ่ายสันมนที่ได้กล่าวแล้วในข้อ 8.3.5.1

8.4 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝ่ายทดน้ำ และทางระบายน้ำล้น (ไม่มีการควบคุม)

(ฝ่ายทดน้ำ ฝ่ายน้ำล้นหรือฝ่ายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น ในที่นี้ต่อไปจะเรียกว่า ฝ่าย)

การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝ่ายที่ไม่มีการควบคุมการไหลทุกประเภทย่อมมีหลักการที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงจะขอสรุปหลักการเพื่อให้เกิดแนวทางสร้างความเข้าใจ เพื่อจะได้ค้นหาข้อมูลจากเนื้อหาที่จัดทำไว้ได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งสรุปได้ต่อไปนี้

- 1) การออกแบบฝ่ายมักออกแบบให้มีการไหลแบบ **Free flow** ที่อาจเป็น **Free overflow** และ **Free overfall** เสมอ แต่อย่างไรก็ตามฝ่ายที่ก่อสร้างในลำน้ำหรือทางน้ำมักจะหลีกเลี่ยงการเกิดการไหลแบบ **Submerged flow** หรือน้ำด้านท้ายฝ่ายสูงกว่าระดับสันฝ่ายไม่ได้ ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณเป็นกรณีเฉพาะ

2) การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายทุกประเภทใช้สมการพื้นฐาน เหมือนกัน คือ $Q = CLH^{3/2}$

3) ในการคำนวณความยาวของสันฝาย หรือ L เป็นความยาวที่น้ำไหลผ่านสันฝายไปได้จริง (Effective length) ถ้ามีตอม่อและมีกำแพงด้านข้างที่ตัวฝาย ต้องไม่คิดความหนาตอม่อ และต้องหักค่าการบีบตัวของน้ำเนื่องจากอิทธิพลของตอม่อและกำแพงด้วย

4) ค่าความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝาย (H) เป็นความลึกของผิวน้ำด้านเหนือน้ำเทียบกับยอดสันฝาย โดยตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ด้านหน้าฝายเป็นตำแหน่งที่น้ำนิ่งห่างจากสันฝายออกไปเป็นระยะไม่น้อยกว่า 4 เท่าของความลึกสูงสุดของน้ำที่ไหลข้ามฝาย

5) ประเภทของฝายนั้นแตกต่างกันเนื่องจากรูปร่างหน้าตัด และรูปร่างของแนวสันฝายที่ต่างกัน

6) ในทางทฤษฎีฝายหรือทางระบายน้ำล้นที่มีลักษณะรูปแบบเหมือนกันจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล หรือ C ในการออกแบบค่าเดียวกัน แต่ในทางปฏิบัติฝายแต่ละแห่งจะมีค่า C ที่เป็นค่าเฉพาะตัวที่จะทราบได้เมื่อทำการสอบเทียบ (Calibrate) เท่านั้น

7) ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝาย หรือ C จะสัมพันธ์กับรูปร่างหน้าตัดของฝาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฝายที่มีหน้าตัดแบบเดียวกัน แม้จะมีรูปร่างแนวของสันฝายเป็นรูปแบบใดก็ตาม ในการคำนวณให้ถือว่าฝายนั้นมีสันฝายยาวรวมเสมือนเป็นแนวตรง ยกเว้นมีรูปร่างสันฝายลักษณะพิเศษ หรือมีมิติที่ทำให้เกิดคุณสมบัติทางชลศาสตร์เฉพาะตัว จึงจะมีค่า C ที่แตกต่างไป ตัวอย่างเช่น ฝาย Ogee สันแนวตรง กับฝาย Ogee สันเป็นรูปโค้งหรือรูปเกือกม้า โดยทั่วไปอาจถือได้ว่ามีคุณสมบัติทางชลศาสตร์เหมือนกัน ใช้ค่า C เดียวกันในการคำนวณ แต่เมื่อเป็น Morning glory spillway ซึ่งก็คือ ฝาย Ogee ที่มาขุดสันฝายเป็นรูปวงกลม แต่จะมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์เฉพาะตัว ต้องใช้ค่า C เฉพาะต่างหาก เป็นต้น

8.4.1 ค่าตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย

จากสมการพื้นฐานการคำนวณปริมาณน้ำไหลข้ามสันฝายทุกประเภท

$$Q = CLH^{3/2}$$

เมื่อ

Q = ปริมาณน้ำไหลข้ามฝาย $m^3/วินาที$

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย

L = Effective length ของสันฝายที่น้ำไหลผ่านไปได้จริง m .

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำวัดจากสันฝายถึงผิวน้ำ m .

การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายนั้นอาจคำนวณจาก 2 ลักษณะการไหล คือ

(1) การไหลแบบ Free flow กรณีนี้ น้ำไหลข้ามฝายโดยมีระดับน้ำท้ายน้ำต่ำกว่าสันฝาย จะคำนวณโดยใช้สมการพื้นฐานที่กล่าวข้างต้น

(2) การไหลแบบ Submerged flow กรณีนี้ระดับน้ำท้ายน้ำสูงกว่าสันฝาย ซึ่งระดับน้ำด้านท้ายจะทำให้เกิดการต้านการไหล ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลในกรณีปกติหรือ Free flow ลดลง ดังนั้นในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายในกรณี Submerged flow จึงอาศัยหลักการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจากการคำนวณในกรณีปกติหรือ Free flow ด้วยค่า Submerged factor ส่วนการจะเกิด Submerged flow นั้นจะสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนระหว่างระดับน้ำด้านท้ายน้ำและด้านเหนือน้ำ หรือค่า Submergence ratio โดยค่าอัตราส่วนดังกล่าวจะมากหรือน้อยจะขึ้นกับชนิดของฝาย

จะเห็นได้ว่าในการคำนวณจะมีตัวแปร 3 ตัวมาเกี่ยวข้อง คือ H ความลึกของน้ำหน้าฝาย, C ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย และค่า L ความยาวของสันฝายที่มีน้ำไหลผ่านจริง (Effective length) ที่จะต้องพิจารณาว่าฝายแต่ละรูปแบบจะหาค่าดังกล่าวได้อย่างไร

H : ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝาย (ความลึกของน้ำเหนือสันฝายด้านหน้าฝาย)

ความลึกของน้ำเหนือระดับสันฝายด้านเหนือน้ำหรือหน้าฝาย จะตรวจวัดในจุดที่น้ำนิ่งโดยมักห่างจากสันฝายออกไปไม่น้อยกว่า 4 เท่าของระดับน้ำเหนือสันฝายสูงสุด ในทางทฤษฎีความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย ต้องเป็น Total head ที่ต้องคิด Velocity of approach ($V_1^2/2g$) ด้วย แต่ในทางปฏิบัติจะวัดค่า Total head โดยตรงไม่ได้จึงมักออกแบบให้ฝายมีองค์ประกอบด้านหน้าที่จะทำให้การเกิด Velocity of approach ดังกล่าวมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด

L : ความยาว Effective ของสันฝายหรือความยาวสันฝายที่มีน้ำไหลผ่านไปจริง

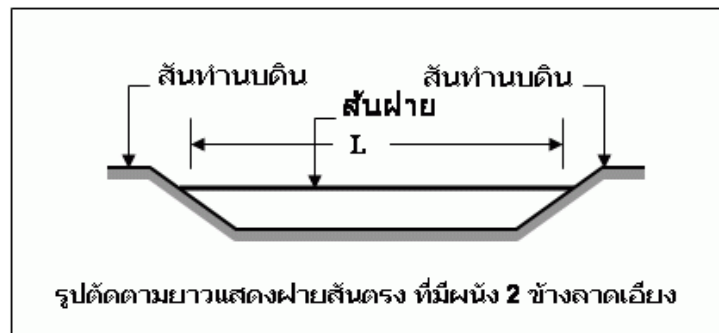
การคิดค่าความยาว Effective ของสันฝายนั้นพิจารณาเฉพาะสันฝายส่วนที่น้ำไหลผ่านออกไปจริงๆ เท่านั้น ความยาวส่วนที่เป็นตอม่อที่ออกแบบเพื่อรองรับสะพานหรือเพื่อแบ่งน้ำเป็นส่วนย่อยจะถูกหักออกไป และเมื่อน้ำไหลผ่านกำแพงข้างและตอม่อจะเกิดผลกระทบที่ทำให้ความเร็วกระแสน้ำลดลงและเกิดการบีบตัวทำให้น้ำตัดการไหลแคบลง หรือเสมือนว่าความยาวสันฝายที่น้ำไหลผ่านลดลง ดังนั้นจึงต้องคิดหักค่าการบีบตัวของน้ำไหลออกด้วย

หลักการคิดความยาวสันฝายอาจพิจารณาตามรูปร่างของสันฝาย ดังต่อไปนี้

1) ฝายมีสันตรง

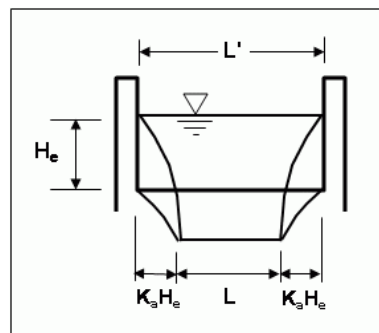
1.1) กรณีฝายสันตรง ที่ริมข้างฝาย 2 ด้านไม่เป็นกำแพงตั้ง แต่มีลักษณะเป็นลาด และไม่มีตอม่อ กลาง

ให้คิด L = ความยาวทั้งหมดของสันฝาย ม.



รูปที่ 8.4-1 ความยาวสันฝายกรณีฝายสันตรง ที่ริมข้างฝาย 2 ด้านไม่เป็นกำแพงตั้ง

1.2) กรณีเป็นฝายสันตรงมีช่องระบายเพียงช่องเดียว มีกำแพงข้าง (Abutment) 2 ข้าง จะเกิดการบีบตัวของน้ำไหลเนื่องจากแรงเสียดทานจากผนังของกำแพง



รูปที่ 8.4-2 ฝายสันตรงมีช่องระบายเพียงช่องเดียว มีกำแพง (Abutment) 2 ข้าง

$$L = L' - 2K_a H_e$$

L = ความยาว Effective ของสันฝายที่มีน้ำไหลผ่านจริง ม.

L' = ความยาวของสันฝายทั้งหมด ม.

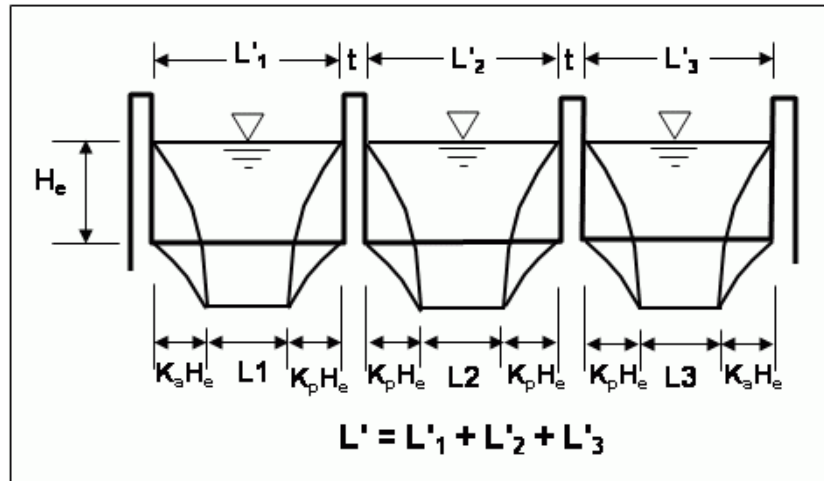
H_e = ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝาย ม.

K_a = สัมประสิทธิ์การบีบตัวเนื่องจากกำแพงตั้งข้างสันฝาย

ตามตารางที่ 8-1

หมายเหตุ : กรณีการคำนวณอย่างหยาบอาจไม่คิดการบีบตัว ใช้ $L = L'$

1.3) กรณีเป็นฝายสันตรงมีช่องระบายหลายช่อง โดยมีกำแพงข้าง (Abutment) 2 ข้าง และมีตอม่อกลางฝาย (Pier) แบ่งฝายเป็นช่องๆ (n ช่อง) จะเกิดการบีบตัวของการไหลเนื่องจากแรงเสียดทานจากกำแพงด้านข้างและตอม่อกลาง



รูปที่ 8.4-3 ตัวอย่างอาคารน้ำสัน 3 ช่อง ที่มีกำแพงด้านข้าง 2 ข้าง และมีตอม่อตรงกลาง 2 ตอม่อ

$L' =$ ความยาวรวมของสันฝายทั้งหมด (หักตอม่อกลางออก) ม.

$$L' = L'_1 + L'_2 + L'_3 + \dots + L'_n$$

(การคำนวณอย่างหยาบๆ อาจใช้ค่านี้เป็น ค่า L)

$L =$ ความยาว Effective ของสันฝายที่มีน้ำไหลผ่านจริง ม.

$$L = L' - 2(NK_p + K_a)H_e$$

$N =$ จำนวนตอม่อกลาง แห่ง

กรณีตัวอย่างจากรูปที่ 8.4-3 $L' = L'_1 + L'_2 + L'_3$; $N = 2$

$H_e =$ ความลึกของน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย ม.

$K_a =$ สัมประสิทธิ์การบีบตัวเนื่องจากกำแพงตั้งสองข้างสันฝาย

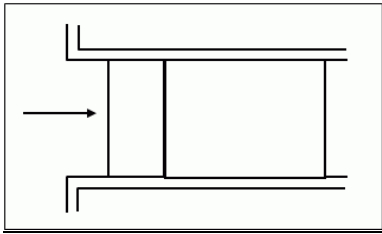
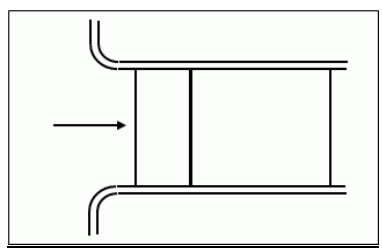
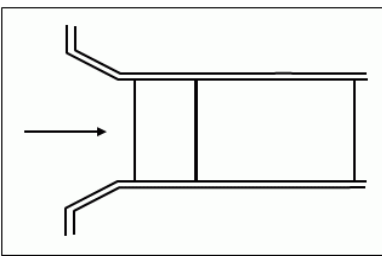
ตามตารางที่ 8-1

$K_p =$ สัมประสิทธิ์การบีบตัวเนื่องจากตอม่อตัวกลางของสันฝาย

ตามตารางที่ 8-2

หมายเหตุ : ในการคำนวณอย่างหยาบๆ อาจไม่คิดการบีบตัว ใช้ $L = L'$

ตารางที่ 8-1 ค่าสัมประสิทธิ์ K_a

รายละเอียดของกำแพงตั้งด้านข้าง	รูปร่างของกำแพงตั้ง	ค่า K_a
1. กำแพงตั้งที่ส่วนของกำแพงด้านเหนือน้ำหักตั้งฉากกับทิศทางน้ำไหล		0.20
2. กำแพงตั้งที่ส่วนของกำแพงด้านเหนือน้ำตั้งฉากกับทิศทางน้ำไหลโดยที่มุมมุมระหว่างตอม่อกับกำแพงเหนือน้ำมนเป็นโค้งของวงกลมรัศมี R และ $0.5H > R > 0.15H$		0.10
3. กำแพงตั้ง ที่ส่วนของกำแพงเหนือน้ำทำมุมกับทิศทางไหลของน้ำไม่เกิน 45 องศาและรอยต่อระหว่างตอม่อกับกำแพงมนเป็นรูปโค้งรัศมี R ไม่น้อยกว่า $0.5H$		0.00

ตารางที่ 8-2 ค่าสัมประสิทธิ์ K_p

แบบที่	ลักษณะตอม่อ	รูปร่างตอม่อ	K_p
1	รูปสี่เหลี่ยม ไม่ลมนุ่ม		0.10
2	รูปสี่เหลี่ยม ลมนุ่ม		0.02
3	รูปโค้งมน		0.01
4	รูปปลายแหลม		0.00

2) ฝายที่มีสันฝายรูปร่างแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฝายสันตรง

การคิดความยาวสันฝายก็คิดลักษณะเดียวกับกรณีของฝายที่มีสันตรงที่กล่าวแล้ว โดยคิดความยาวทั้งหมดในแนวของสันฝาย หากมีกำแพงข้างและมีตอม่อกลางฝาย ก็ให้หักความหนาตอม่อ และหักค่าการบีบตัวของคอนกรีตเนื่องจากอิทธิพลของกำแพงและตอม่อ

C : ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย

ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝายนั้นจะขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดของฝาย หรือชนิดของฝาย ดังที่กล่าวแล้วว่า ฝายที่มีรูปร่างหน้าตัดแบบเดียวกัน จะมีรูปร่างแนวสันฝายเป็นรูปร่างใดก็ตาม ในเบื้องต้นให้ใช้ค่า C ค่าเดียวกันในการคำนวณโดยเสมือนว่าฝายนั้นเป็นฝายมีสันเป็นแนวตรง (ยกเว้นกรณีที่มีข้อกำหนดระบุไว้เป็นการเฉพาะ) ซึ่งจะนำเสนอตามลำดับหัวข้อดังนี้

8.5 ฝายสันมน (Ogee weir)

8.6 ฝายสันมนสันเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical crested weir)

8.7 ฝายหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู หรือ Indian type weir

8.8 ฝายเกเบียน (Gabions weirs) หรือ ฝายกล่องลวดตาข่ายบรรจุหิน

8.9 ฝายยาง (Rubber weir or Rubber dam)

8.10 Straight Drop or Free overfall spillway

8.11 ฝายหยัก (Labyrinth weir)

8.12 Shaft spillways or Drop inlet spillways

8.13 ฝายหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม (Crump weir)

ฯลฯ

8.5 ฝายสันมน (Ogee Weir)

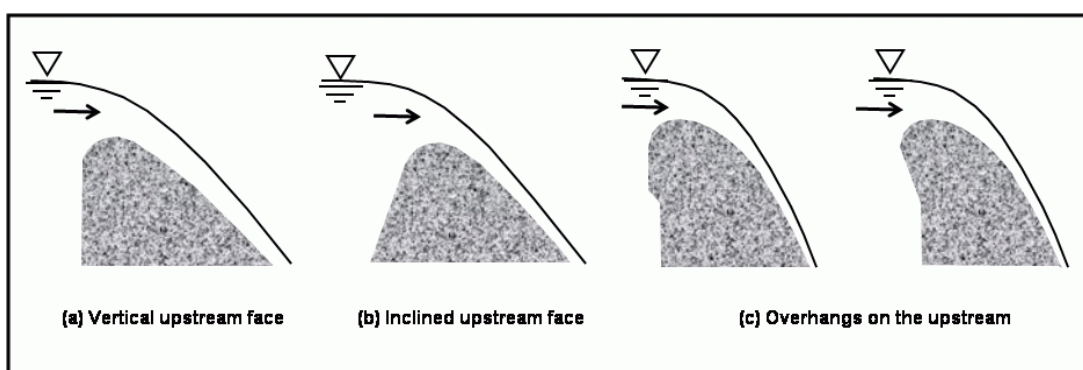
ฝายสันมน หรือ Ogee weir ที่เรียกเช่นนี้เพราะเป็นฝายที่มีรูปร่างเป็นเส้นโค้งคล้ายตัว S (S-shape or Ogee) โดยเป็นฝายที่พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางชลศาสตร์ของ ฝายสันคม ซึ่งการไหลของน้ำผ่านฝายชนิดนี้ถือว่าเป็นแบบ **Free overflow** ที่สมบูรณ์แบบที่สุด ดังนั้นจึงอาจเรียกฝายชนิดนี้ว่า **Free overflow weir**

รูปร่างหน้าตัดของฝายสันมน แบ่งได้ 3 รูปแบบ ได้แก่

(a) Vertical upstream face: ฝายด้านเหนือน้ำเป็นแนวตั้ง

(b) Inclined upstream face: ฝายด้านเหนือน้ำเป็นแนวเอียง มักเลือกใช้กรณี มีวัตถุไหลมากับน้ำหรือมีตะกอนในน้ำมาก

(c) Over hang on upstream face: ฝายด้านหน้าตอนบนติดสันฝายเป็นผนังยื่นออกมา มี 2 ลักษณะ คือ ผนังที่มีฝายหน้าเป็นแนวตั้ง กับผนังที่มีฝายหน้าลาดเอียง เป็นการตัดส่วนหน้าฝายออกเพื่อการลดปริมาณวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง



รูปที่ 8.5-1 แสดงรูปร่างสันของฝายสันมน

8.5.1 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันมนแบบไม่มีบานระบายควบคุม (รวมทั้งฝายที่มีบานระบายควบคุมที่ยกบานระบายพื้นน้ำ)

ในการคำนวณนั้นมีวิธีการของหลายสำนักวิจัยหรือหน่วยงานที่ได้ศึกษาทดลอง หรือประยุกต์นำผลมาใช้งาน ส่วนการจะเลือกใช้วิธีการใดนั้น ผู้คำนวณจะต้องตัดสินใจเลือกให้ สอดคล้องเหมาะสมกับอาคารนั้น ๆ โดยทุกวิธีจะมีหลักการพื้นฐานของการไหลของน้ำผ่านฝาย แบบเดียวกัน

สมการมาตรฐานของฝาย

$$Q = C_e L_e H_e^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

L_e = ความยาวประสิทธิผล (Effective length) ของสันฝาย (ม.)

ถ้ามีกำแพงด้านข้าง และมีตอม่อกลางฝายให้หักความหนาคอม่อ และการบีบตัวของน้ำที่เกิดจากอิทธิพลของกำแพงและตอม่อ $L_e = L' - 2(NK_p + K_a)H_e$

H_e = ความลึกของน้ำเหนือสันฝายที่คิด Approach velocity ด้วย (ม.)

C_e = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านสันฝาย

8.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลตามผลการศึกษาทดลองของ USBR

ฝายสันมนที่ก่อสร้างกันทั่วไปนั้น ส่วนใหญ่มาจากผลการทดลองศึกษาโดย US Bureau of Reclamation (USBR) ต่อมา US Army Corps of Engineers (USACE) ได้นำมาพัฒนารูปแบบมาตรฐานของฝายสันมนใน Waterways Experiment Station ที่ Vicksburg ได้เป็นรูปแบบที่เรียกกันว่า WES Standard 4 แบบ คือ

- ฝายสันมนที่ด้านหน้าฝายเป็นแนวตั้ง
- ฝายสันมนที่ด้านหน้าฝายเป็นลาด 3 : 1
- ฝายสันมนที่ด้านหน้าฝายเป็นลาด 3 : 2
- ฝายสันมนที่ด้านหน้าฝายเป็นลาด 3 : 3

สมการส่วนโค้งที่เป็นสันมน (Downstream profile) ของฝาย WES Standard

ฝายสันมนตาม WES Standard จะมีลักษณะของส่วนโค้งมนตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{Y}{H_d} = -K \left(\frac{X}{H_d} \right)^n \quad \text{USBR form}$$

$$X^n = K(H_d)^{(n-1)}Y \quad \text{USACE form}$$

เมื่อ Y = ระยะในแกนตั้ง

X = ระยะในแกนราบ

H_d = Design head

K = ค่าตัวแปรที่สัมพันธ์กับความลึกของน้ำหน้าฝาย

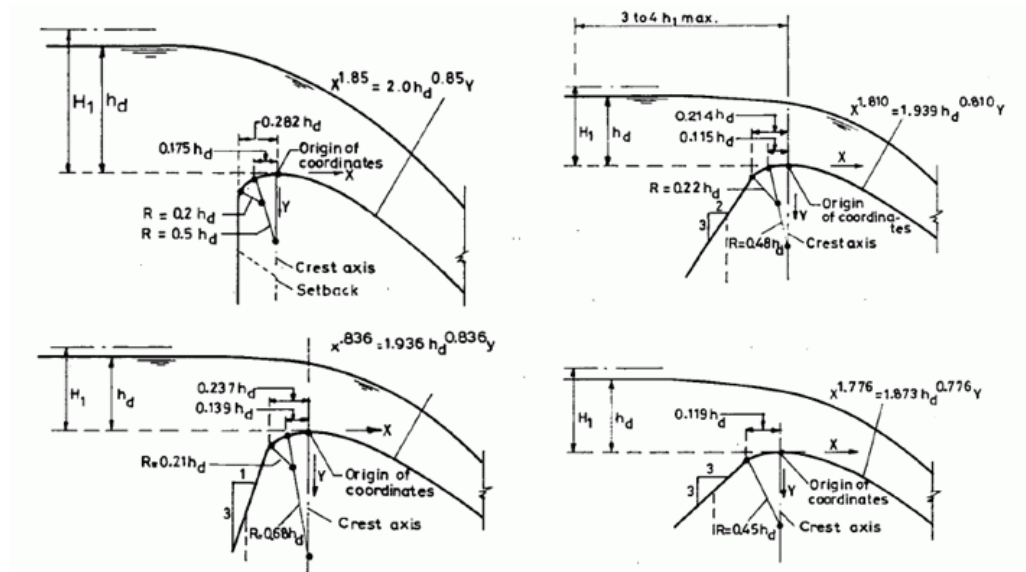
n = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดของฝาย ดังต่อไปนี้

ฝายไม่มี Slope ด้านหน้า : $n = 1.850$

ฝายมี Slope ด้านหน้า 3 : 1 : $n = 0.836$

ฝายมี Slope ด้านหน้า 3 : 2 : $n = 1.810$

ฝายมี Slope ด้านหน้า 3 : 3 : $n = 1.776$



รูปที่ 8.5-2 แสดงฝายสันมน WES Standard 4 แบบ

ผลการศึกษาของ USBR นั้นเป็นต้นแบบของการศึกษาและออกแบบฝายสันมนแบบอื่นๆ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C) ที่ได้จากการศึกษาฝายสันมนรูปร่างมาตรฐาน *WES Standard* นั้น จะผันแปรไปตามองค์ประกอบต่อไปนี้

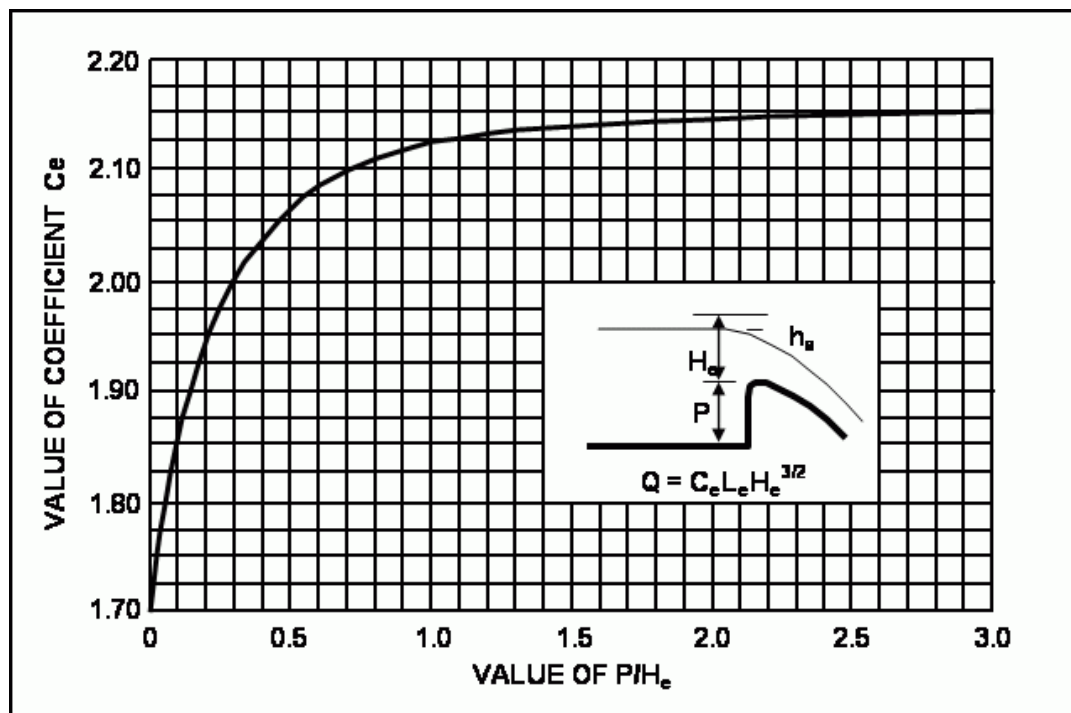
- (1) การศึกษานั้นใช้ฝายสันมนที่มีผิวหน้าฝายเป็นแนวโค้งเป็นรูปแบบมาตรฐาน พบว่า ค่า C จะขึ้นกับค่าความลึกของน้ำที่ทางเข้าหรือด้านเหนือน้ำ ซึ่งคือค่า P และ H_e
- (2) ถ้าหากฝายนั้นมีรูปร่างต่างไปจากรูปร่างตามมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของฝายนั้น (C) จะต่างไปจากค่าของฝายมาตรฐาน (C_d) ซึ่งทำให้ Head (H) ของฝายนั้นต่างจาก Design head (H_d) ของฝายมาตรฐานด้วย
- (3) ถ้าหากผิวหน้าฝายเป็นแนวลาดเอียง การปะทะของน้ำด้านหน้าฝายจะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การไหลจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฝายที่หน้าฝายเป็นแนวโค้ง
- (4) ระดับพื้นด้านท้ายฝายมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล
- (5) ถ้าหากระดับน้ำด้านท้ายน้ำสูงกว่าสันฝาย จะทำให้เกิดการไหลแบบ Submerged flow เกิดการดันการไหลเกิดขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล จากกรณี Free flow จะลดลง

8.5.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายสันมน *WES Standard*

ตามที่ได้กล่าวนำมาก่อนหน้านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายสันมน *WES Standard* จะเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับองค์ประกอบหรือผลกระทบ 5 ประการต่อไปนี้

1) ผลกระทบจากความลึกของน้ำที่ปากทางเข้า

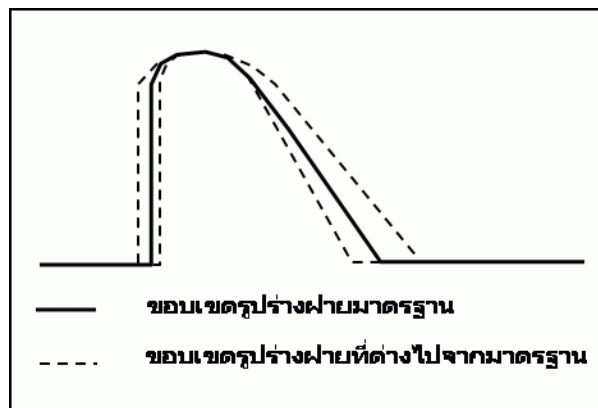
ฝายสันมนรูปแบบหน้าตัด *WES Standard* นั้น จะมีฝายสันมนที่มีผิวหน้าฝายเป็นแนวโค้งเป็นต้นแบบ (พิจารณาออกแบบฝายผิวหน้าแนวโค้งก่อนแล้วจึงพิจารณาผิวหน้าลาดเอียงในลำดับถัดไป) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_e) กรณี **Free flow** ของฝายสันมนที่มีผิวหน้าฝายเป็นแนวโค้ง จะสัมพันธ์กับความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำที่วัดจากสันฝาย (H_o) กับความสูงของฝาย (P) ซึ่งหาได้จากกราฟใน รูปที่ 8.5-3 โดยค่า C_e จะถูกต้องเมื่อรูปร่างของฝายถูกต้องตามค่ามาตรฐานซึ่งเป็นรูปร่างของ *Nappe* ในอุดมคติ ที่ $H_e/H_o = 1$ (เมื่อ $H_e = H_o + h_a$ โดยที่ h_a คือ approach velocity ที่มีค่าน้อยมาก)



รูปที่ 8.5-3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายสันมนที่มีผิวหน้าฝายเป็นแนวโค้ง

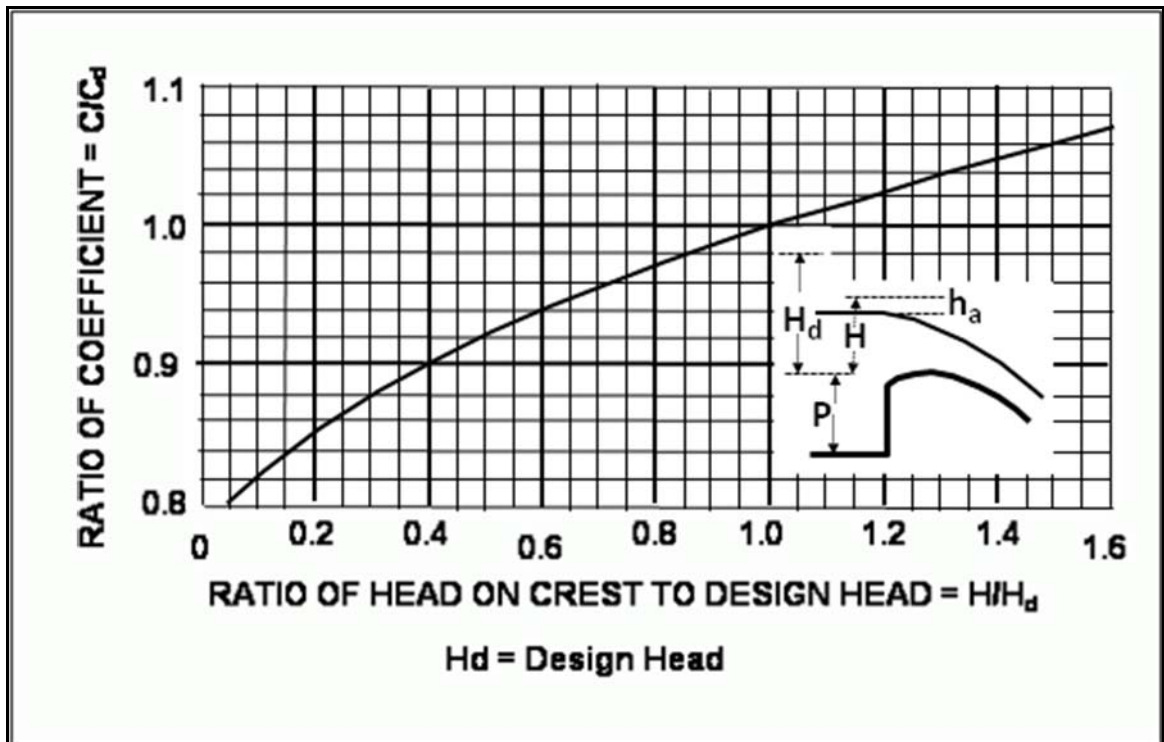
2) ผลกระทบจากรูปร่างของ Crest ที่ต่างไปจากรูปร่างมาตรฐาน

USACE ได้ศึกษาฝายสันมนที่มีด้านหน้าฝายเป็นแนวโค้ง และมีรูปร่างของ Crest หลายรูปแบบ ได้แก่ ฝายสันมนที่มีความโค้งของ Crest ตามเกณฑ์ของ USBR, ฝายสันมนตามเกณฑ์ WES Standard (ให้เป็นตัวใช้เปรียบเทียบ) และฝายสันมนที่มีส่วนโค้งเป็นรูปวงรี (Elliptical) ยกตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 8.5-4 โดยศึกษาเปรียบเทียบค่า Head กับค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล ซึ่งในทางทฤษฎีนั้นหากมีค่าตัวแปรต่างๆ เหมือนกัน ก็ควรมีค่า Head จริง (H_e) ใกล้เคียงกับ Design Head (H_d) แต่ผลจากการศึกษาพบว่า หาก Crest มีรูปร่างที่กว้างกว่าจะทำให้เกิด Positive pressure ตามผิว Crest ทำให้อัตราการไหลลดลง และหากมีรูปร่างที่แคบกว่า จะทำให้เกิด Negative pressure ตามผิว Crest ทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น แล้วได้สรุปผลเป็นกราฟในรูปที่ 8.5-5 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของ C/C_d และ H/H_d หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดผลกระทบเนื่องจาก Head ที่ตรวจวัดหรือสังเกตซึ่งรวม Velocity of approach (H หรือ H_e) ของฝายตัวนั้น ที่แตกต่างไปจาก Design head (H_d) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเป็น C_d ของฝายตามรูปแบบ WES Standard ที่เป็นตัวเปรียบเทียบ



รูปที่ 8.5-4 แสดงขอบเขตหน้าตัดฝายที่ทำให้รูปร่างแตกต่างไปจากฝายมาตรฐาน

ดังนั้นผลการศึกษาผลกระทบจากรูปร่างของ Crest ที่ต่างไปจากรูปร่างมาตรฐานนี้ จึงเป็นประโยชน์ในการใช้พิจารณาออกแบบฝายให้มี Head และค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลให้ได้ตรงกับที่ต้องการ โดยหากออกแบบให้ต่างไปจากรูปแบบมาตรฐาน ก็มีความจำเป็นต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลอง เพื่อให้ทราบและยืนยันค่า Head และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่ควรเป็นจริงด้วยเสมอ



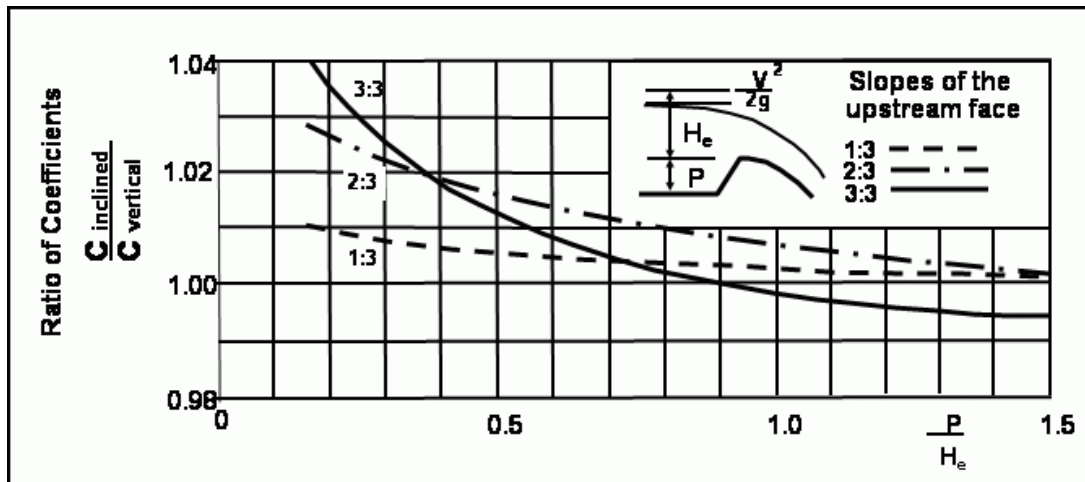
รูปที่ 8.5-5 กราฟความสัมพันธ์ของ C/C_d และ H/H_d

เมื่อรูปร่างของ Crest ที่ต่างไปจากรูปร่างมาตรฐาน

3) ผลกระทบจากความลาดเทผิวของฝายด้านเหนือน้ำ

ถ้าด้านหน้าฝายยิ่งลาดมากแรงต้านการไหลจะยิ่งน้อย จึงต้องปรับแก้ค่า C_e ที่หาได้จากกราฟในรูปที่ 8.5-3 ซึ่งเป็นกรณีผิวหน้าฝายเป็นแนวตั้ง ให้เป็นค่าของฝายที่ผิวหน้ามีความลาดเอียง โดยกราฟในรูปที่ 8.5-6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของ $\frac{C_{\text{incline}}}{C_{\text{vertical}}}$ กับ $\frac{P}{H_e}$ ที่มีความลาดเทผิวด้านหน้าฝายตาม WES Standard เป็น 3:1, 3:2 และ 3:3

ตัวอย่างวิธีการหาค่า C ถ้าฝายมีความลาดเทผิวด้านหน้า 3:3 มี $P = 2.50$ ม. ที่ $H = 1.00$ ม. คำนวณค่า C ได้โดยหาค่า C_e โดยใช้กราฟในรูปที่ 8.5-3 ซึ่งเป็นฝายที่ด้านหน้าฝายเป็นแนวตั้ง จากค่าของ $P/H_e = 2.50$ ได้ $C_e = 2.15$ ต่อไปแปลงค่าเป็น C_{incline} 3:3 โดยหาค่า $\frac{C_{\text{incline}}}{C_{\text{vertical}}}$ จากเส้นกราฟ 3:3 โดยใช้ค่า $\frac{P}{H_e} = \frac{2.50}{1.00} = 2.50$ ซึ่งมากกว่า 1.50 จึงปรับใช้เป็น 1.50 จะได้ $\frac{C_{\text{incline}}}{C_{\text{vertical}}} = 0.994$ ดังนั้น ค่า C ของฝายนี้ เมื่อ $H = 1.00$ ม. เท่ากับ $2.15 \times 0.994 = 2.137$

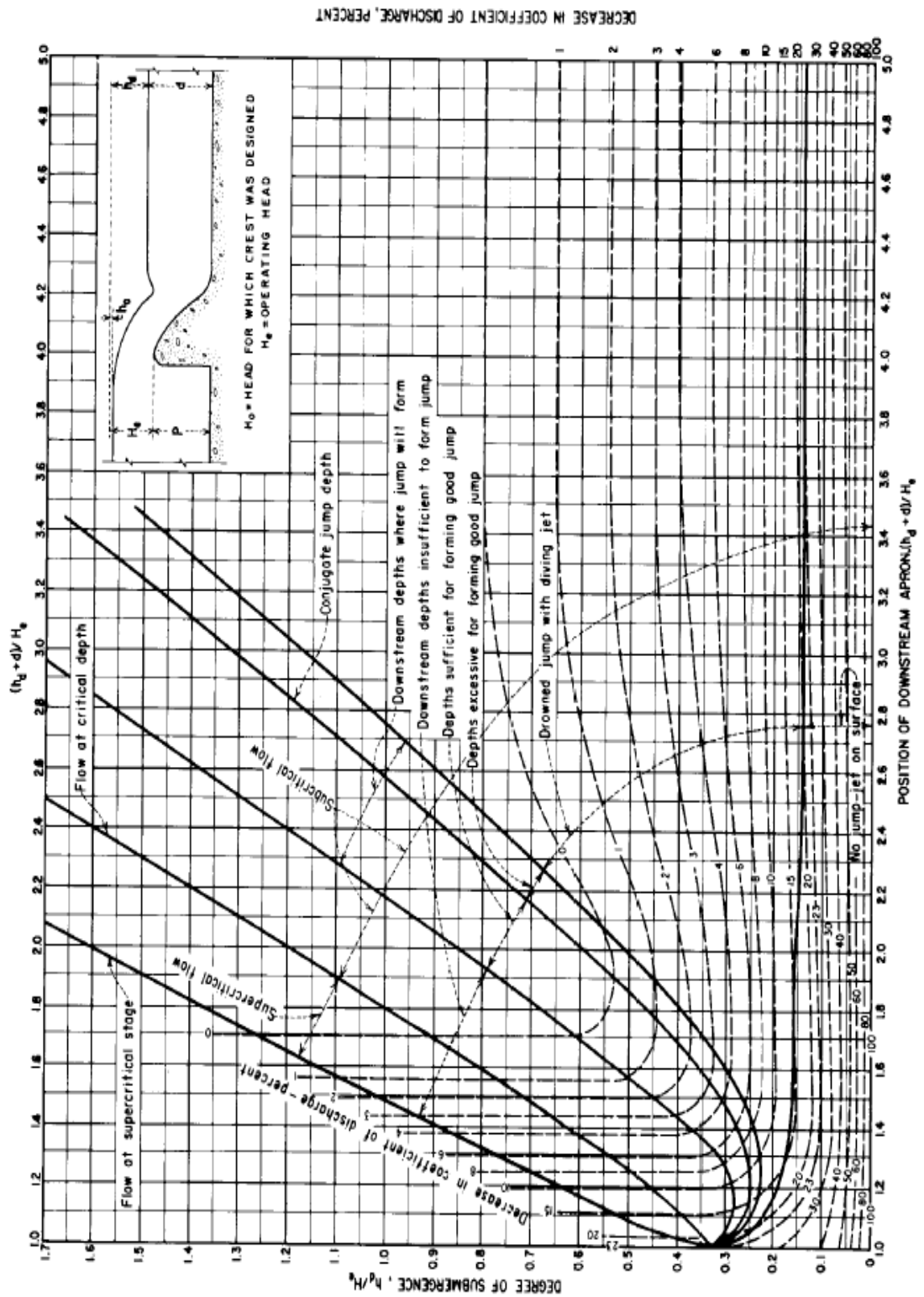


รูปที่ 8.5-6 ตัวปรับแก้สัมประสิทธิ์การไหลของฝายสันนมนเนื่องจากความลาดเอียงของผิวหน้าฝาย

4) ผลกระทบจากพื้นด้านท้ายน้ำ และการเกิด Submergence ด้านท้ายน้ำ

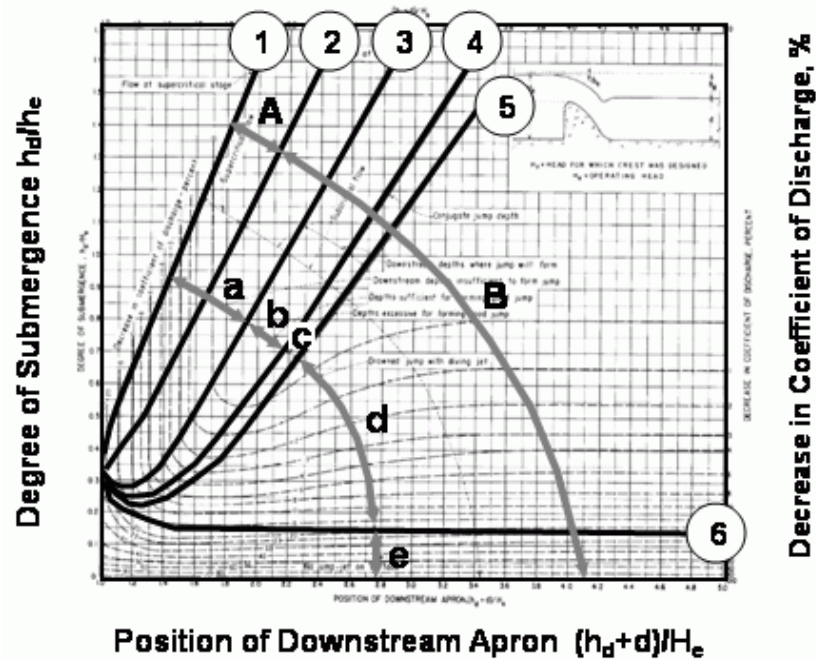
เมื่อระดับน้ำด้านท้ายฝายสูงขึ้นจนทำให้เกิดการไหลเป็นแบบ Submerged แล้ว ระยะในแนวตั้งจาก Crest ของการไหลข้ามถึงพื้นด้านท้ายน้ำ และความลึกการไหลด้านท้ายน้ำ ของลำนํ้าจะมีความสัมพันธ์กับ Head ที่วัดจากพื้นด้านหน้าฝาย ($P+H_e$) ซึ่งเป็น Factor ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลเปลี่ยนแปลงลดลงจากกรณีการไหลแบบ Free Flow

จากผลการศึกษาผลกระทบจากพื้นด้านท้ายน้ำ และการเกิด Submergence ด้านท้ายน้ำ ได้สร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 8.5-7 ซึ่งประกอบด้วยกราฟ 2 ชุด คือ ก. กราฟเส้นเอียงเป็นกราฟอธิบายลักษณะการไหล และ ข. กลุ่มกราฟลักษณะคล้ายอักษร L ที่อธิบายสถานะการเกิด Submergence



รูปที่ 8.5-7 กราฟที่สัมพันธ์กับผลกระทบจากพื้นด้านท้ายน้ำ
และการเกิด Submergence ด้านท้ายน้ำ

ก. กลุ่มกราฟอธิบายลักษณะการไหล โดยแบ่งคุณลักษณะการไหลที่สำคัญ 5 ประการที่สามารถเกิดขึ้นด้านท้ายน้ำของ Overflow crest จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้น (Apron) ท้ายน้ำและผิวน้ำด้านท้ายน้ำเพื่อใช้ในการทำความเข้าใจจึงขออธิบายด้วยรูปที่ 8.5-8 ดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 8.5-8 แสดงกลุ่มกราฟเพื่ออธิบายลักษณะการไหล

เส้นกราฟ

- เส้นกราฟหมายเลข 1 : Flow at supercritical stage
- เส้นกราฟหมายเลข 2 : Flow at critical depth
- เส้นกราฟหมายเลข 3 – 6 : Flow at subcritical stage
- เส้นกราฟหมายเลข 4 : Conjugate jump depth

ช่วงของการไหล

- ช่วง A ระหว่างเส้นหมายเลข 1 ถึง 2 เป็นช่วงของ Supercritical flow
- ช่วง B ระหว่างเส้นหมายเลข 2 ถึงเส้นล่างสุดของแกนนอน เป็นช่วงของการไหลแบบ Subcritical flow

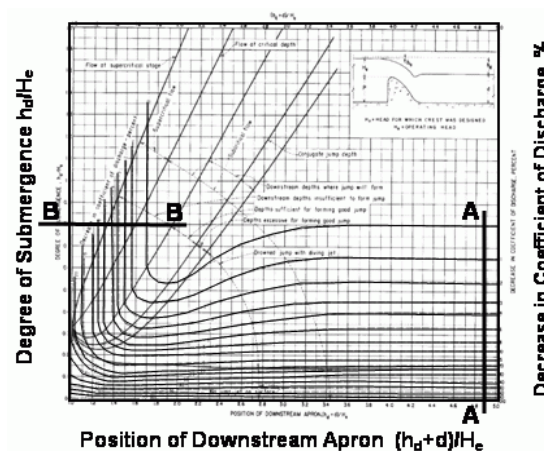
คุณลักษณะด้านท้ายน้ำของการไหลที่สำคัญ 5 ประการ

- ช่วง **a** ระหว่างเส้นกราฟหมายเลข 1 ถึง เส้น 3 เป็นการไหลของน้ำยังคงต่อเนื่องไปด้วยสภาวะ **Supercritical Stage**
- ช่วง **b** ระหว่างเส้นกราฟหมายเลข 3 ถึงเส้น 4 **Hydraulic jump** เริ่มก่อตัวเป็นแบบส่วนหรือมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์
- ช่วง **c** ระหว่างเส้นกราฟหมายเลข 4 ถึงเส้น 5 เกิด **Hydraulic jump** ที่แท้จริง
- ช่วง **d** ระหว่างเส้นกราฟหมายเลข 5 ถึงเส้น 6 เกิด **Jump จมน้ำ (Drowned jump)** เนื่องจากน้ำที่ไหลข้ามสันฝายออกไปยังมีความเร็วที่สูง และระดับน้ำด้านท้ายไม่สูงพอที่จะต้านค่า **Jet** น้ำ แต่เมื่อระดับน้ำด้านท้ายยิ่งสูงเพิ่มขึ้น การไหลก็จะช้าลงเรื่อยๆ จากแรงต้านของน้ำด้านท้าย
- ช่วง **e** ระหว่างเส้นกราฟหมายเลข 6 ถึงเส้นล่างสุดของแกนนอน ไม่มี **Jet** เกิดขึ้น การไหลจะเสมือนขนานไปกับแนวของฝายน้ำด้านท้ายเหนือสันฝายขึ้นไป

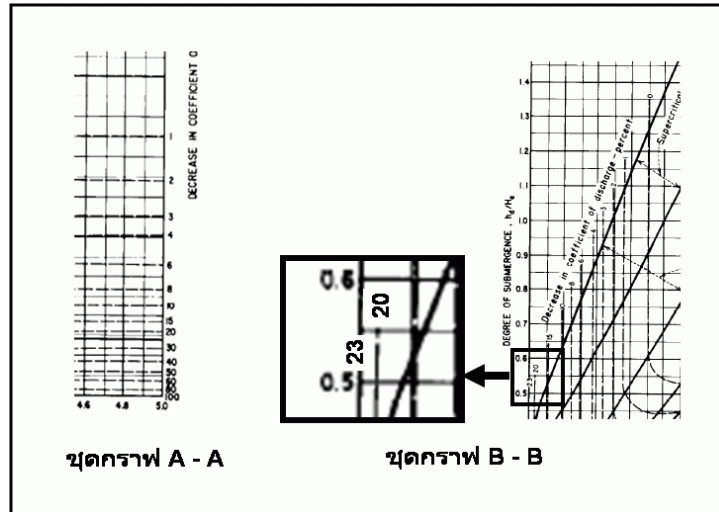
สภาวะการไหล ช่วง **a, b, c** มักเกิดกับฝายขนาดใหญ่ที่มีความสูงมาก ส่วนสภาวะการไหล ช่วง **d** และ **e** มักเกิดกับฝายเตี้ยๆ

ข. กลุ่มกราฟลักษณะคล้ายอักษร L ที่อธิบายสภาวะการเกิด Submergence

การเกิด **Submergence** หรือการไหลแบบ **Submerged flow** ที่ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝายลดลงเนื่องจากเกิดการต้านของน้ำด้านท้ายน้ำ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ 2 ลักษณะ อธิบายด้วย รูปที่ 8.5-9 และรูปขยายตาม รูปที่ 8.5-10 คือ



รูปที่ 8.5-9 แสดงกลุ่มกราฟลักษณะคล้ายอักษร L ที่อธิบายสภาวะการเกิด Submergence



รูปที่ 8.5-10 แสดงรูปขยายของชุดกราฟ A - A และ B - B

(1) Degree of Submergence, h_d/H_e กับ Decrease in Coefficient of Discharge, Percent ที่อ่านได้จากกราฟ ช่วง A - A

ค่าจากกราฟสรุปได้ว่า เมื่อ h_d/H_e มากกว่า 0.60 จะไม่เกิดผลกระทบจาก Submergence

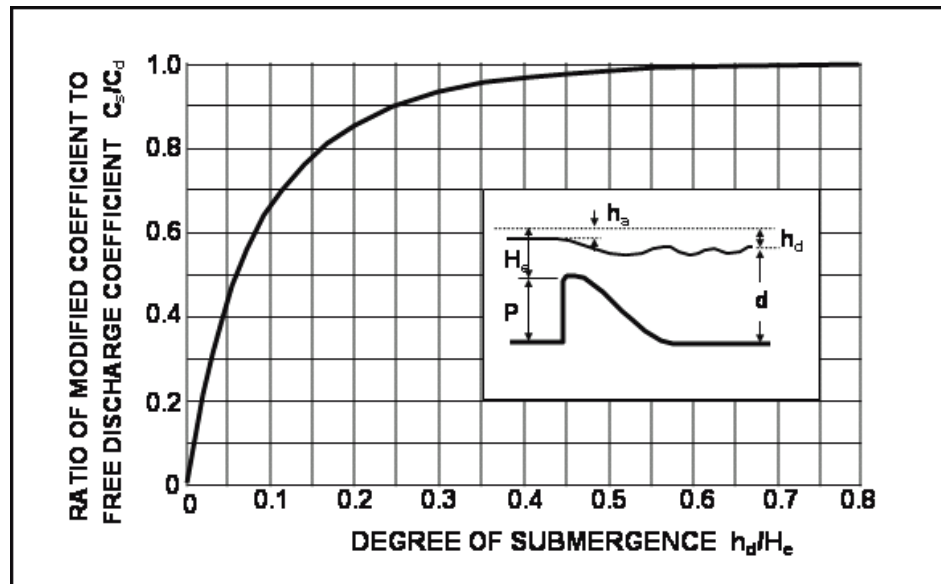
การอ่านค่าจากกราฟรูปที่ 8.5-7 มีความยุ่งยาก จึงได้มีการปรับปรุงกราฟเพื่อให้ง่ายและสะดวกในการใช้งานสร้างเป็นกราฟ ตามรูปที่ 8.5-12 โดยได้แปลงค่า Decrease in coefficient of discharge (ค่าที่ลดลงของสัมประสิทธิ์ของการไหลจากกรณี Free Flow) เป็นค่า C_s/C_d (เมื่อ $C_s=C$ -submerged, $C_d=C$ -design)

(2) Position of Downstream Apron, $(h_d+d)/H_e$ กับ Decrease in coefficient of discharge, Percent ที่อ่านได้จากกราฟ ช่วง B - B

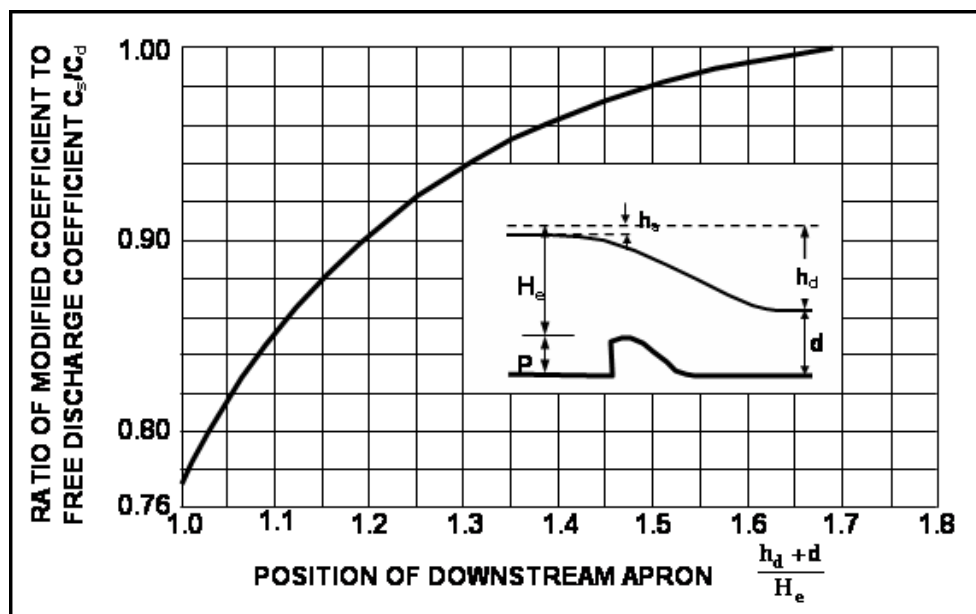
กราฟรูปที่ 8.5-7 เมื่อ $(h_d+d)/H_e = 1$, ค่า Decrease in coefficient of discharge เท่ากับ 23% (หมายถึงค่า C ที่หาได้กรณีการไหลแบบ Free flow จะลดลงอีก 23%) และเมื่อ $(h_d+d)/H_e$ มากกว่า 1.7 จะไม่เกิดผลกระทบจาก Submergence โดยมีค่า Decrease in coefficient of discharge เท่ากับ 0 %

เช่นเดียวกับกราฟชุดแรก การอ่านค่าจากกราฟรูปที่ 8.5-7 ข้างต้นมีความยุ่งยาก จึงได้มีการปรับปรุงกราฟเพื่อให้ง่ายและสะดวกในการใช้งานสร้างเป็นกราฟ ตามรูปที่ 8.5-12 โดยได้แปลงค่า Decrease in coefficient of discharge เป็นค่า C_s/C_d เช่น เมื่อ

$(h_d + d/H_e) = 1$ จะได้ค่า C_s/C_d เท่ากับ 0.77 หมายถึง C_s เท่ากับ $0.77C_d$ ที่หาได้จากกรณี Free Flow (มาจาก กรณีกกราฟรูปที่ 8.5-6 Decrease in coefficient of discharge 23% = $C_d - 0.23C_d$, $C_s = 0.77 C_d$ นั่นเอง และเมื่อ $(h_d + d/H_e) = 1.7$ จะได้ค่า C_s/C_d เท่ากับ 1.00



รูปที่ 8.5-11 กราฟความสัมพันธ์ Degree of submergence, h_d/H_e กับ Ratio of modified coefficient to free discharge coefficient, C_s/C_d ที่อ่านได้จากกราฟ ช่วง A - A (ปรับปรุง)



รูปที่ 8.5-12 กราฟความสัมพันธ์ Position of downstream apron, $(h_d + d)/H_e$ กับ Ratio of modified coefficient to free discharge coefficient, C_s/C_d ที่อ่านได้จากกราฟช่วง B - B (ปรับปรุง)

อาจสรุปการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของฝายสันมนได้ว่า ฝายสันมนในกรณีนี้ต้องเป็นฝายที่มีรูปร่างตามมาตรฐาน *WES Standard* 4 รูปแบบเท่านั้น

ถ้าให้ C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝายสันมน

$C_0 = C_e$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การไหลของฝายผิวหน้าเป็นแนวดิ่ง หากจากกราฟรูปที่ 8.5-3

$C_1 = \frac{C_{\text{incline}}}{C_{\text{vertical}}}$ เป็นค่าที่เกิดจากผลกระทบจากความลาดเทผิวด้านหน้าฝาย หากจากกราฟรูปที่ 8.5-6 (ถ้าเป็นฝายด้านหน้าฝายเป็นแนวดิ่งค่านี้ไม่ต้องคิด)

$C_2 = C_s/C_d$ เป็นค่าที่เกิดจากผลกระทบจากพื้นด้านท้ายน้ำ และการเกิด Submergence หากจากกราฟในรูปที่ 8.5-7 หรือใช้กราฟรูปที่ 8.5-11 และรูปที่ 8.5-12 แล้วแต่กรณี โดยพิจารณาว่าเกิดการไหลแบบ Submerged flow หรือไม่ก่อน โดยใช้กราฟรูปที่ 8.5-7 ประกอบ (ถ้าไม่เป็นการไหลแบบ Submerged flow ค่านี้ไม่ต้องคิด)

ดังนั้นค่า C ที่ใช้คำนวณในหลักการของ USBR นั้นจะมาจาก

$$C = C_0 \times C_1 \times C_2$$

กรณีฝายสันมนที่มีการออกแบบรูปร่างแตกต่างไปจากรูปแบบมาตรฐาน *WES Standard* ก็ต้องใช้ค่าความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การไหล กับ head ตลอดจนค่าอื่นๆ ตามมาตรฐานการออกแบบฝายนั้นๆ มาใช้คำนวณ และในกรณีที่ฝายนั้นมีความสำคัญมักมีการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของฝายนั้นมาใช้งานเสมอ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ยังไม่ใช่ว่าที่ถูกต้องอย่างแท้จริง เพราะในสภาพพื้นที่จริงจะมีตัวแปรต่างๆ มาเกี่ยวข้องหลายประการ เช่น การก่อสร้างไม่ได้มาตรฐานถูกต้องตามแบบ มีสภาพแวดล้อมของพื้นที่ด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำมาเกี่ยวข้อง หรือการมีตะกอนตกจมหน้าฝาย เป็นต้น ต้องมีการสอบเทียบเพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ใช้ออกแบบด้วย

ฝายที่มีรูปร่างหน้าตัดเป็นฝายสันมนนี้อาจออกแบบให้เป็นที่ตั้งฝายทดน้ำในลำน้ำ และฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้นของอ่างเก็บน้ำ โดยสามารถออกแบบให้เป็นฝายชนิดต่าง ๆ เช่น ฝายหรือทางระบายน้ำล้นแนวตรงมาตรฐาน, ฝายแนวเฉียง (Skew weir), Side channel spillway, Drop inlet spillway ที่มีแนวสันฝายเป็นรูปร่างต่าง ๆ เช่น รูปส่วนโค้งของวงกลม

หรือ C-Shape รูป U-Shape รูปปากเป็ด (Duckbill) ฯลฯ ซึ่งฝ่ายเหล่านี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลแบบเดียวกับที่ได้อธิบายมาข้างต้นได้ทุกชนิด

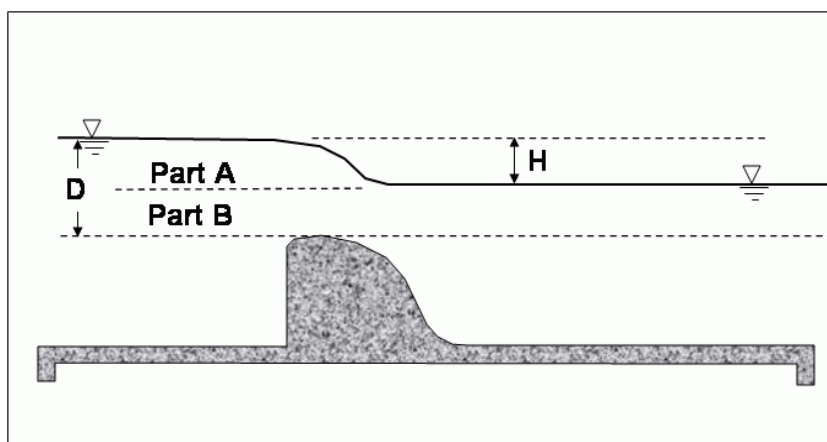
โดยทั่วไปแล้วการออกแบบฝายหรือทางระบายน้ำสัน ถ้าจะสร้างในโครงการชลประทานที่มีความสำคัญ เช่น โครงการขนาดใหญ่ หรือเป็นโครงการที่สงสัยว่าจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มักจะมีการทดสอบโดยใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ด้วยเสมอ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวทำให้รู้พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของอาคารตัวนั้น และทำให้รู้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล ซึ่งการทดลองที่ได้มาตรฐาน ผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นที่ยอมรับกันว่าให้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพจริงของอาคารนั้น ซึ่งอาจใช้เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีหรือค่าที่ใช้คำนวณออกแบบ นอกจากนี้จะเป็นประโยชน์ในการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจริงในสนาม โดยการสุ่มตรวจเป็นบางช่วงของอัตราการไหล ไม่ต้องสอบเทียบตลอดทุกช่วงของ Head

8.5.4 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow แบบแยกส่วน

เราอาจพบได้บ่อยๆ กับการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายในกรณีการไหลแบบ Submerged flow โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Q = CL\sqrt{2gH} \left(D - \frac{H}{3}\right) \dots\dots\dots C = 0.65 \quad (\text{SI Unit})$$

สมการดังกล่าวเป็นการคำนวณอัตราการไหลเมื่อระดับน้ำด้านท้ายสูงกว่าระดับสันฝาย มาจากการวิเคราะห์หัดแยกการไหลโดยใช้ระดับน้ำด้านท้ายแบ่งการไหลออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 8.5-13 (ฝายมีความยาวสันฝาย L)



รูปที่ 8.5-13 แสดงการแยกส่วนการไหลกรณี Submerged flow เป็น 2 ส่วน

Part A

$$V_A = \frac{2}{3} C_A \sqrt{2gH}$$

$$A_A = LH$$

$$Q_A = V_A \cdot A_A$$

$$Q_A = \frac{2}{3} C_A \sqrt{2gH} \cdot LH = \frac{2}{3} C_A LH \sqrt{2gH}$$

Part B

$$V_B = C_B \sqrt{2gH}$$

$$A_B = L(D - H)$$

$$Q_B = V_B \cdot A_B$$

$$Q_B = C_B \sqrt{2gH} \cdot L(D - H)$$

$$C_A = C_B = C_{(\text{Approximate})} = \text{Discharge coefficient}$$

$$Q = Q_A + Q_B$$

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2gH} \cdot LH + CL \sqrt{2gH} \cdot (D - H)$$

$$Q = CL \sqrt{2gH} \left(\frac{2}{3} H + D - H \right)$$

$$Q = CL \sqrt{2gH} \left(D - \frac{H}{3} \right)$$

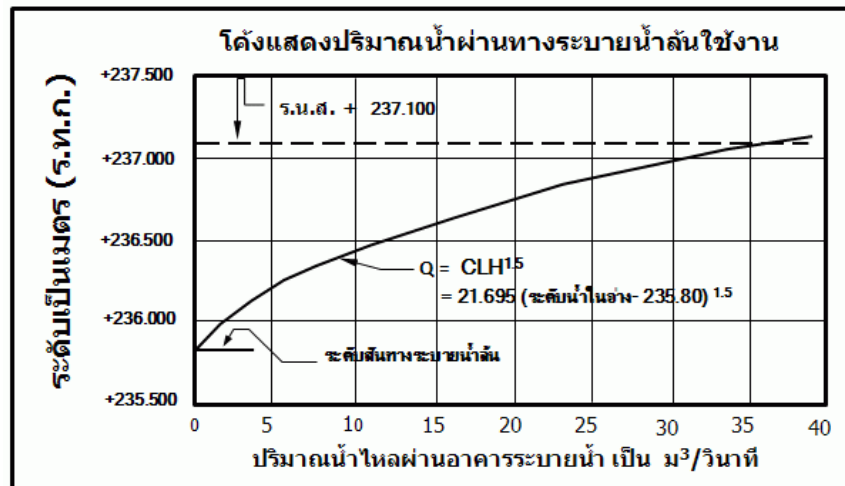
ค่า C ให้ใช้ค่าเฉลี่ย 0.65

การนำสมการข้างต้นมาใช้ในการคำนวณ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลในแต่ละส่วน คือ C_A และ C_B มากำหนดให้มีค่าเท่ากันค่าเดียวเป็นค่าเฉลี่ยนั้นนักชลศาสตร์บางส่วนเห็นว่าผิดหลักการ เพราะค่า **Submergence ratio** ที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ดีความผิดพลาดดังกล่าวถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

8.5.5 Discharge rating curve หรือ Q-H Curve

ในการออกแบบฝายหรือทางระบายน้ำล้นนั้นผู้ออกแบบอาจแสดงกราฟหรือตารางความสัมพันธ์ของอัตราการไหลและระดับน้ำที่ไหลผ่านสันฝาย (**Discharge rating curve หรือ Q-H Curve**) ไว้ในแบบก่อสร้าง ซึ่งกราฟหรือตารางดังกล่าว ถ้ามาจากผลการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการให้ถือว่าสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลได้ถูกต้อง (แต่ต้องสอบเทียบเมื่อใช้งานไปถึงระยะเวลาที่สภาพแวดล้อมของอาคารนั้นมีการเปลี่ยนแปลง) แต่ถ้าเป็นค่าการคำนวณทางทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ ต้องสอบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องด้วยเสมอ เพราะมีฝายหรือทางระบายน้ำล้นจำนวนไม่น้อยที่มีพฤติกรรมทางชลศาสตร์รวมทั้งสัมประสิทธิ์ของการไหลแตกต่างไปจากที่กำหนดไว้ตามทฤษฎี

ตัวอย่าง Q-H Curve จาก รูปที่ 8.5-14 เป็น Discharge rating curve ในแบบก่อสร้าง Side channel spillway ที่มีหน้าตัดเป็น WES Standard Ogee ของอ่างเก็บน้ำห้วยตาเขียว จังหวัดบุรีรัมย์ ที่มีสันฝายยาว 10.00 ม. (ค่า C ที่ใช้ในกราฟ จึงเป็น 2.1695) ระดับสันฝาย +235.80 ม. (รทก.) ซึ่งสามารถคำนวณตรวจสอบค่า C ได้ตามตารางที่ 8.5-2



รูปที่ 8.5-14 Discharge rating curve ในแบบก่อสร้าง Side channel spillway ของอ่างเก็บน้ำห้วยตาเขียว จังหวัดบุรีรัมย์

$$Q = CLH^{1.5} \quad (\text{ม.}^3/\text{วินาที})$$

$$L = 10.00 \text{ ม.}; \quad Q = C \times 10 \times (\text{ระดับน้ำในอ่าง} - 235.80)^{1.5}$$

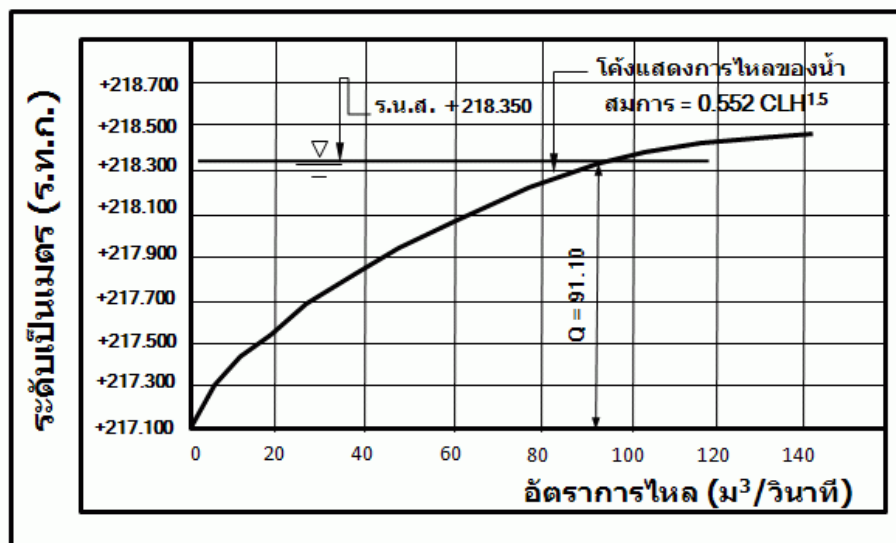
$$\text{จะได้} \quad C = Q / [10 \times (\text{ระดับน้ำในอ่าง} - 235.80)^{1.5}]$$

ตารางที่ 8.5-2 ตัวอย่างการตรวจสอบค่า C

Q (ม.³/วินาที)	El. (ม. รทก.)	H (ม.)	C
5.00	236.20	0.40	1.976
10.00	236.40	0.60	2.152
15.00	236.60	0.80	2.096
20.00	236.80	1.00	2.000
25.00	236.90	1.10	2.167
30.00	237.00	1.20	2.282
35.80	237.10	1.30	2.415

(เฉลี่ยแบบหยาบๆ ได้ค่า C เฉลี่ย 2.156 ซึ่งใกล้เคียงกับที่ระบุไว้ในแบบก่อสร้าง 2.1695)

ในรูปที่ 8.5-15 เป็นตัวอย่าง Discharge rating curve ในแบบก่อสร้าง Side channel spillway ที่มีหน้าตัดเป็น WES Standard Ogee ของอ่างเก็บน้ำห้วยตะโก จังหวัดบุรีรัมย์ ที่มีสันฝายยาว 30.00 ม. ระดับสันฝาย +217.10 ม.(รทก.) ซึ่งสามารถคำนวณตรวจสอบค่า C ได้ตามตารางที่ 8.5-3



รูปที่ 8.5-15 Discharge rating curve ในแบบก่อสร้าง Side channel spillway ของอ่างเก็บน้ำห้วยตะโก จังหวัดบุรีรัมย์

สมการที่ระบุในแบบก่อสร้าง $Q = 0.552CLH^{1.5}$ **** (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)
 $L = 30.00$ ม.; $Q = 0.552 C \times 30 \times (\text{ระดับน้ำในอ่าง}-217.10)^{1.5}$
 จะได้ $C = Q / [0.552 \times 30 \times (\text{ระดับน้ำในอ่าง}-217.10)^{1.5}]$
 หรือ $0.552C = Q / [30 \times (\text{ระดับน้ำในอ่าง}-217.10)^{1.5}]$

ตารางที่ 8.5-3 การตรวจสอบค่า C

Q (ม. ³ /วินาที)	El. (ม. รทก.)	H (ม.)	C	0.552 C
6.00	217.30	0.20	4.051	2.236
15.00	217.50	0.40	3.580	1.976
28.00	217.70	0.60	3.638	2.008
44.00	217.90	0.80	3.713	2.050
62.00	218.10	1.00	3.744	2.067
91.10	218.35	1.25	3.936	2.173

(เฉลี่ยแบบหยาบๆ ได้ค่า C เฉลี่ย 3.777 และค่า 0.552 C เฉลี่ย 2.085)

ข้อสังเกต ความคลาดเคลื่อนของ Discharge rating curve ตามตัวอย่างข้างต้นอาจเกิดได้จาก (1) มีการปรับโค้งเส้นกราฟให้ราบเรียบ ค่าจึงอาจต่างกับผลการคำนวณจริงเล็กน้อย (2) ผู้ออกแบบมักระบุเพียงค่า C ที่เป็นค่า *Design head* สูงสุดค่าเดียวในกราฟ แล้วใช้ค่า C นั้นคำนวณสร้างกราฟ หรืออาจใช้ค่า C ที่สัมพันธ์กับค่า H/P ก็ได้ จึงต้องตรวจสอบให้ดี

**** สมการการคำนวณ $Q = 0.552CLH^{1.5}$ (ม.³/วินาที)

ในการคำนวณปริมาณน้ำถ้าใช้สมการ $Q = 0.552CLH^{1.5}$ ในกรณีดังตัวอย่างที่นำมาเสนอนี้ เป็นสมการคำนวณที่แปลงแล้วจากสมการหน่วยระบบอังกฤษ โดย Q จะมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วินาที ในขณะที่ L และ H มีหน่วยเป็น เมตร แต่ค่า C ยังไม่ได้แปลง จึงยังคงต้อง หาจากกราฟในหน่วยระบบอังกฤษ (ไม่ได้แสดงกราฟดังกล่าวไว้ในคู่มือนี้) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าต้องปรับค่า C ในหน่วยระบบอังกฤษให้เป็นหน่วยระบบ SI ด้วยค่าคงที่ 0.552 หรือต้องใช้ค่า 0.552C นั่นเอง

ที่มาการแปลงข้อมูลหน่วย ระบบ อังกฤษ เป็น SI

$$1 \text{ ฟุต} = 0.3048 \text{ ม.}$$

$$1 \text{ ลูกบาศก์ฟุต} = 0.0283 \text{ ม.}^3$$

$$\begin{array}{ll} Q = CLH^{1.5} & \text{ฟ.}^3/\text{วินาที} \\ L, H & \text{ฟ.} \\ C & \text{ระบบอังกฤษ}^* \end{array}$$

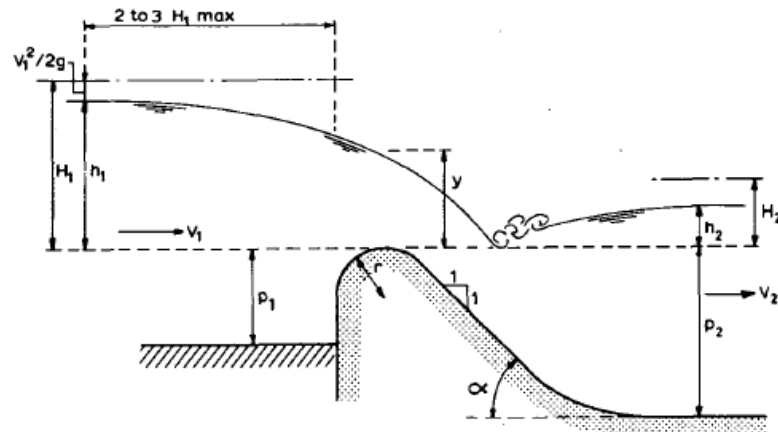
$$\begin{aligned} (Q/0.0283) &= C (L/0.3048) (H/0.3048)^{1.5} & \text{ม.}^3/\text{วินาที} \\ Q &= (0.0283/(0.3048 \cdot 0.3048^{1.5})) CLH^{1.5} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ll} Q = 0.552CLH^{1.5} & \text{ม.}^3/\text{วินาที} \\ L, H & \text{ม.} \\ C & \text{ระบบอังกฤษ}^* \end{array}$$

นั่นคือ ในสมการ $Q = 0.552CLH^{1.5}$ ได้แปลงให้มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วินาที โดยที่ L และ H ใช้ค่าหน่วยเมตรเพราะได้แปลงแล้วเช่นกัน แต่ค่า C ยังคงเป็นค่าในระบบอังกฤษ จึงต้องหาจากกราฟในหน่วยระบบอังกฤษ

8.6 ฝ่ายสันมนสันเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical crested weir)

เป็นฝ่ายที่พัฒนาจากแนวคิดของฝ่าย WES Standard โดยมีรูปร่างของ Crest ที่ต่างไปจากรูปร่างของ Nappe ในอุดมคติ ซึ่งจะมีหน้าตัดเป็นส่วนโค้งของวงกลมที่มีรัศมี r และมีลาดท้ายฝ่ายสัดส่วน 1:1 หรือทำมุม 45 องศา กับพื้นด้านท้ายน้ำ ซึ่งแสดงในรูปที่ 8.6-1



รูปที่ 8.6-1 Cylindrical crested weir

$$\frac{(P/\rho g)_{\min}}{H_1} \text{ vs } \frac{H_1}{r}$$

จากการศึกษาของ Escande และ Sananes (1959) พบว่า ถ้า H_1/r มีค่าน้อยกว่า 1.5 แรงดันเหนือสันฝ่าย $(P/\rho g)$ จะมีค่าเป็นบวก และถ้า H_1/r มีค่ามากกว่า 1.5 แรงดันเหนือสันฝ่ายจะมีค่าเป็นลบ โดยสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ แรงดันน้อยที่สุดดังนี้

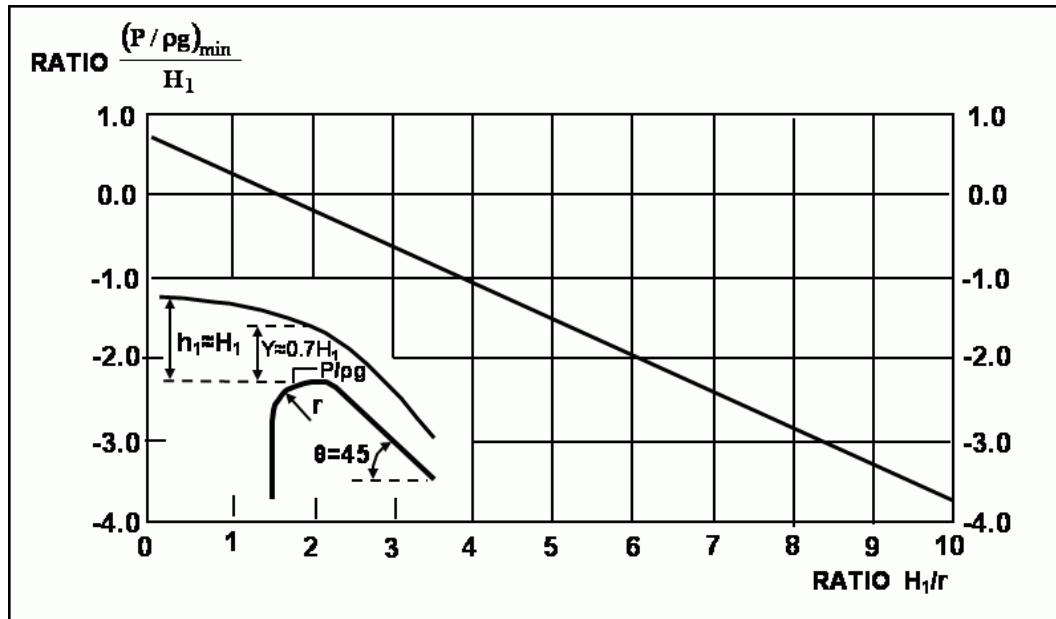
$$\frac{p}{\rho g} = H_1 - (H_1 - y) \left\{ \frac{(r + ny)}{r} \right\}^{2/n}$$

เมื่อ $n = 1.6 + 0.35 \cot \theta$

$$\cot \theta = \cot 45 = 1$$

$$y = 0.7 H_1$$

จากผลการศึกษาดังกล่าวสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ของ $(P/\rho g)_{\min} / H_1$ และ H_1/r ได้ดังรูปที่ 8.6-2 โดยค่า $(P/\rho g)_{\min} / H_1$ มีได้สูงสุดไม่เกิน 4 เมตร ไม่เช่นนั้นจะมีผลต่อการกัดกร่อนผิวหน้าฝ่ายเกิดรูพรุน (Cavitation corrosion) จากฟองอากาศที่เกิดที่ผิวลาดท้ายฝ่ายอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงจำกัดขนาดของฝ่ายประเภทนี้ด้วยค่าของ H_1/r



รูปที่ 8.6-2 แรงดันน้อยที่สุดที่เกิดบน Cylindrical weir สัมพันธ์กับค่า H_1/r

8.6.1 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Cylindrical weir

ใช้สมการพื้นฐานของฝ่ายสันตื้น

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} L_e H^{3/2} \quad \text{ลบ.ม. /วินาที}$$

C_e ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่าน Cylindrical weir จะสัมพันธ์กับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวฝ่ายต่อไปนี้ ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเป็นดังสมการ

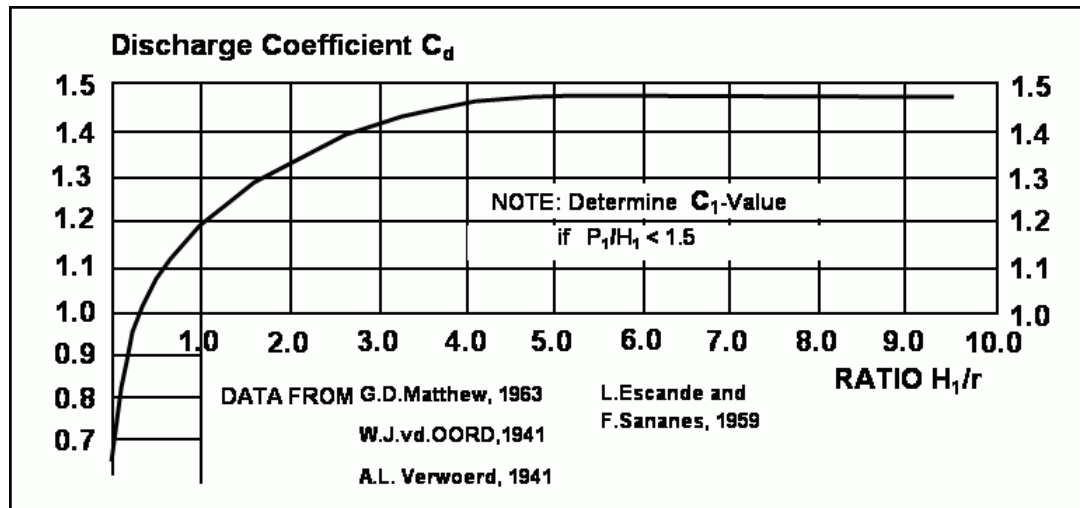
$$C_e = C_0 C_1 C_2 C_3$$

C_0 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่เกิดจากผลกระทบหรือความสัมพันธ์เนื่องจาก H_1/r ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 8.6-3

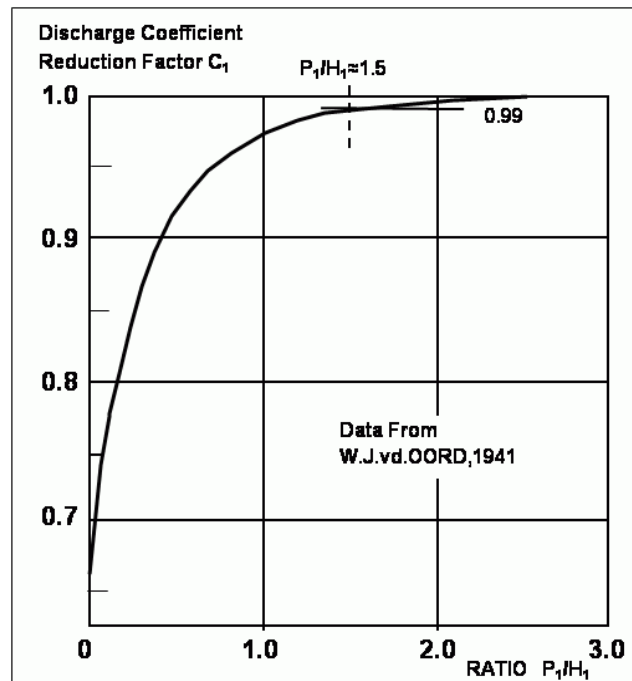
C_1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่เกิดจากผลกระทบหรือความสัมพันธ์เนื่องจาก P_1/H_1 ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 8.6-4

C_2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่เกิดจากผลกระทบจากความลาดเทผิวของฝายด้านเหนือหน้า เช่นกรณีฝายสันมนมาตรฐาน WES ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 8.6-5

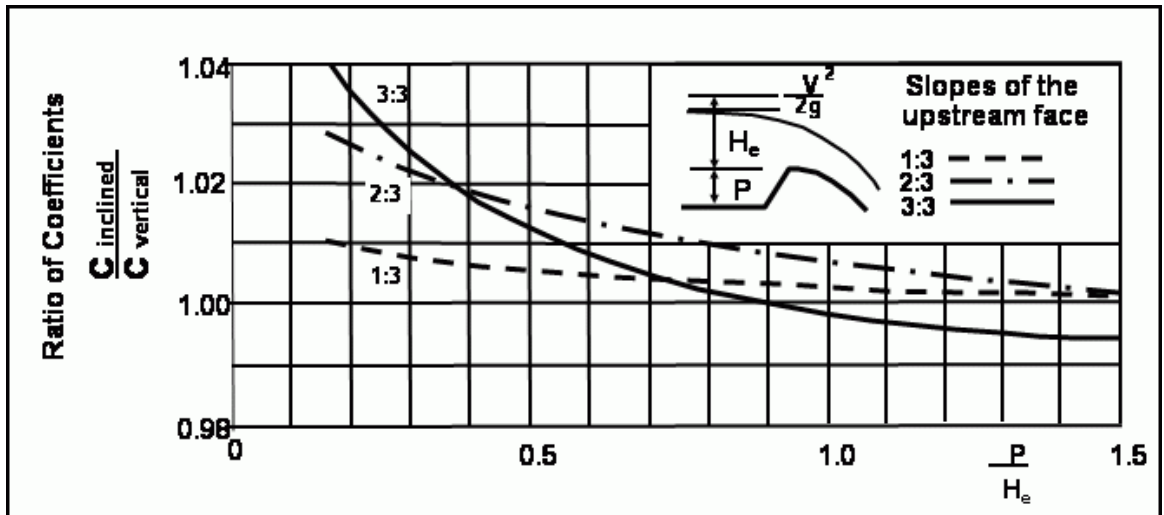
$C_3 = f$ ค่า Factor ของการไหลที่เกิดจากผลกระทบการเกิด Submergence ด้านท้ายน้ำ ที่สัมพันธ์กับค่าของ H_2/H_1 ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 8.6-6 ทั้งนี้จะเริ่มเกิดผลกระทบเนื่องจาก Submergence ด้านท้ายน้ำ เมื่อ $H_2/H_1 > 0.33$ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อไม่ให้ยุ่งยากในการคำนวณอาจถือว่าการไหลยังเป็นแบบ Free flow หาก Submergence $H_2/H_1 < 0.65$ เพราะอัตราการไหลจะลดลงเพียง 10 % เท่านั้น



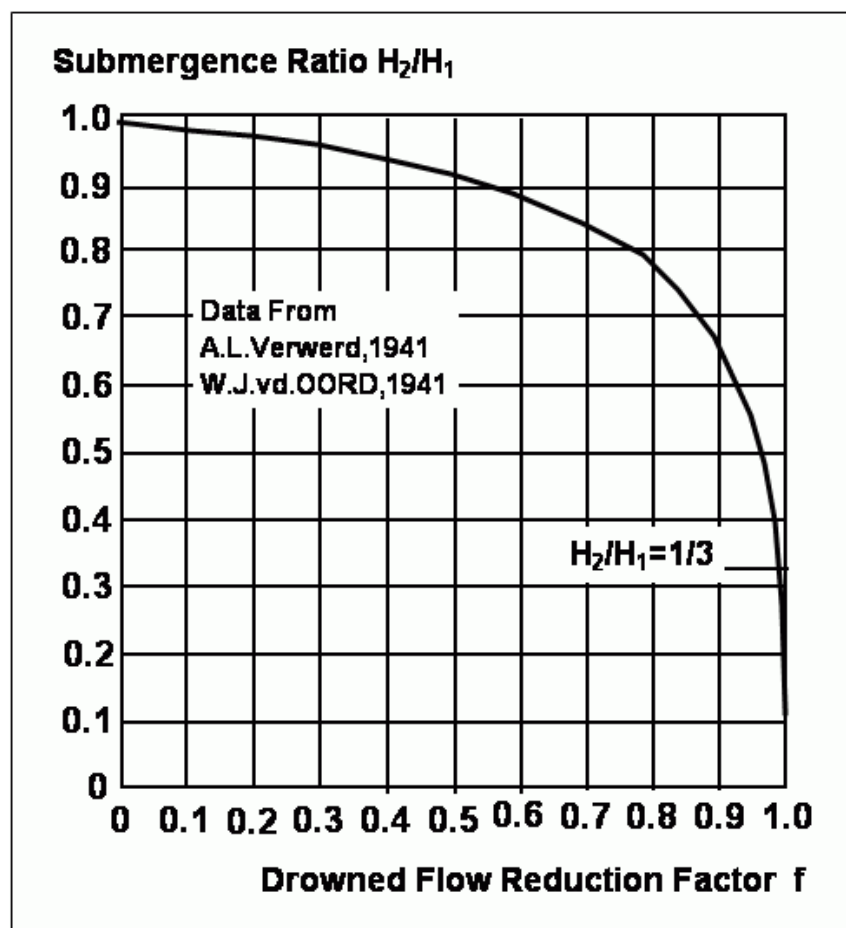
รูปที่ 8.6-3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_d หรือ C_0 ที่สัมพันธ์กับ H_1/r



รูปที่ 8.6-4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_1 ที่สัมพันธ์กับ P_1/H_1



รูปที่ 8.6-5 ตัวปรับแก้สัมประสิทธิ์การไหลของฝายสันนมนเนื่องจากความลาดเอียงของผิวหน้าฝาย



รูปที่ 8.6-6 ค่า Factor ของการไหลที่เกิดจากผลกระทบ
การเกิด Submergence ด้านท้ายน้ำ H_2/H_1

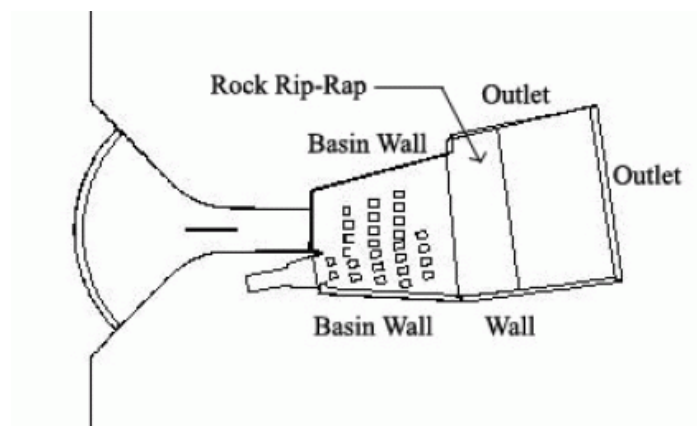
ฝายที่มีรูปร่างหน้าตัดเป็นฝายสันมนรูปแบบนี้เนื่องจากลาดตัวฝายด้านท้ายมีความชันมาก (1:1) จึงมักออกแบบเป็นฝายทดน้ำในลำน้ำ และฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้นของอ่างเก็บน้ำ ลักษณะสันเป็นแนวตรงมาตรฐาน หรือรูปส่วนโค้งของวงกลมที่มีความโค้งไม่มาก

ผลการศึกษาที่มีชื่อเสียงของฝายลักษณะนี้ได้แก่ การศึกษาเรื่อง Computational Modeling of Flow Over a Spillway In Vatnsfellsstífla Dam in Iceland โดย BJÖRN MARGEIRSSON โดยได้ศึกษาที่ Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology, Sweden ในปี 2007

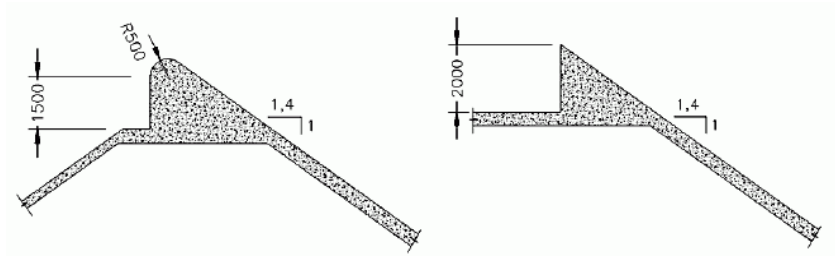
ทางระบายน้ำล้นของเขื่อน Vatnsfellsstífla เป็นฝายสันมนที่ยอดสันฝายเป็นส่วนโค้งของวงกลมรัศมี 0.50 ม. มีลาดด้านท้ายฝาย 1:1.4 แนวของสันฝายเป็นส่วนโค้งของวงกลมยาว 50 ม. ซึ่งปรับไปสู่รางเต้านท้ายที่กว้างเพียง 10 ม. ระดับสันฝายสูงกว่าพื้นด้านท้ายน้ำ 80 ม. สามารถระบายน้ำได้ไม่น้อยกว่า 280 ม.³/วินาที



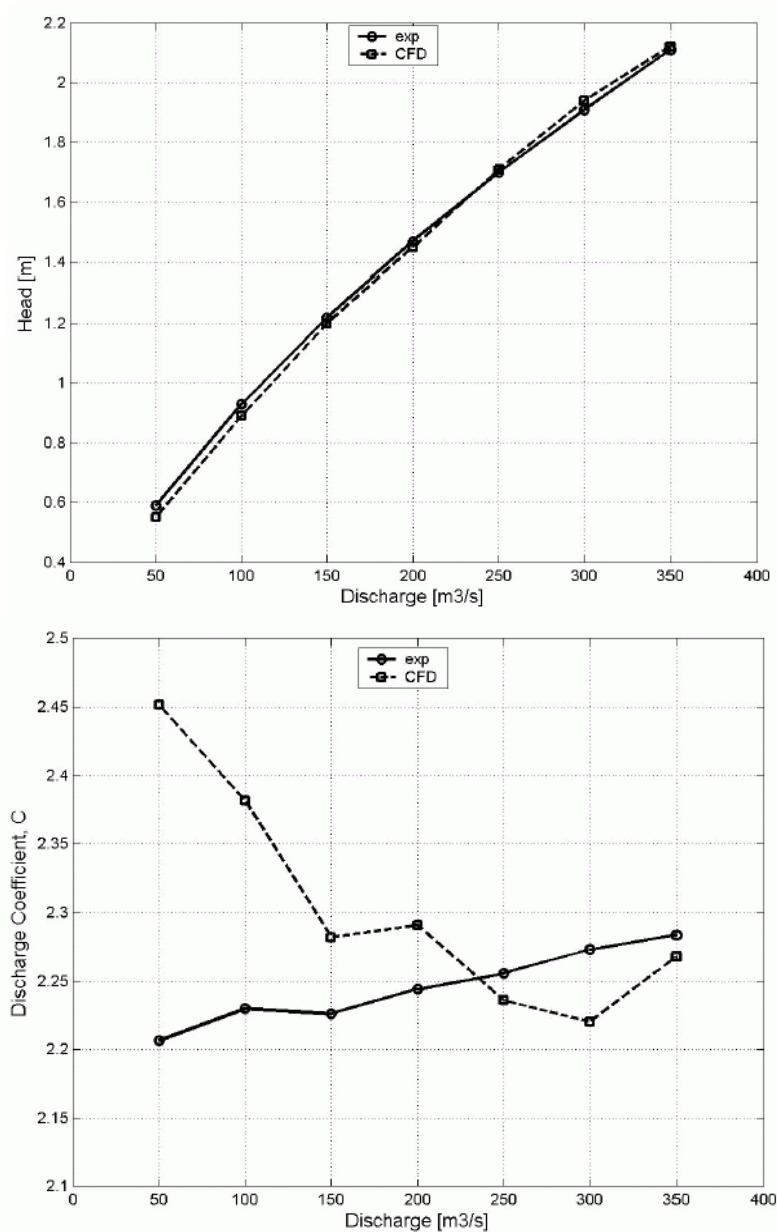
รูปที่ 8.6-7 แสดงแนวเส้นทางระบายน้ำล้นของเขื่อน Vatnsfellsstífla



รูปที่ 8.6-8 แสดงรูปแบบเส้นทางระบายน้ำล้นของเขื่อน Vatnsfellsstífla



รูปที่ 8.6-9 แสดงหน้าตัดทางระบายน้ำล้นของเขื่อน Vatsfellsstifla
รูปขวามือเป็นรูปหน้าตัดที่ปรับให้เป็นรูปแบบอย่างง่าย



รูปที่ 8.6-10 รูปบน กราฟ Discharge (Q) VS Head (H) รูปล่าง กราฟ Discharge (Q) VS Discharge coefficient (C) ที่เปรียบเทียบผลจากการทดลอง (exp) และผลจากการคำนวณ CFD: Computational Fluid Dynamics)

ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า

- ความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ H ผลจากการทดลองและการคำนวณนั้นไม่แตกต่างกันมาก
- ความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ C ผลจากการทดลองและการคำนวณในช่วงมีที่อัตราการไหลน้อย ๆ เท่านั้นที่มีค่า C แตกต่างกันประมาณ 11% ซึ่งยอมรับได้และผลโดยรวมอยู่ในระดับที่ดี
- ค่า Discharge coefficient (C) มีค่าค่อนข้างสูงกว่าฝ่ายสันมนอื่น ๆ โดยมีค่า C เฉลี่ยประมาณ 2.25 เป็นเพราะการไหลผ่านผิวหน้าฝายที่มีความลาดชันมากจะเกิดอัตราเร่งของการไหลเกิดขึ้น โดยจะเกิดชั้นติดขอบ (Boundary layer) ขึ้นระหว่างการไหล และเมื่อการไหลถึงตำแหน่งที่ชั้นติดขอบมีความหนาเต็มหน้าตัดการไหล ก็จะมีฟองอากาศปนกับน้ำเกิดขึ้น แต่ลักษณะการไหลยังเป็นแบบเสมอต้นเสมอปลายจนมาถึงฐานของทางฝาย

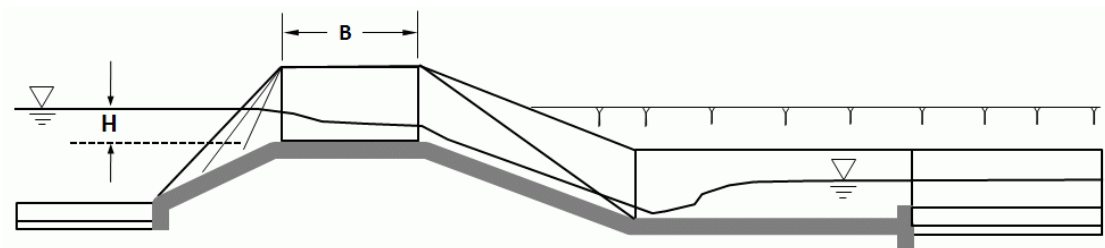
8.7 ฝายหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู หรือ Indian type weir

8.7.1 ฝายหรือทางระบายน้ำล้นหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

ฝายหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นฝายที่นิยมสร้างมากในอินเดีย ดังนั้นจึงมักเรียกว่า ฝายแบบอินเดีย (Indian type weir) การออกแบบอาจมีลักษณะรายละเอียดปลีกย่อยออกไป แต่ลักษณะสำคัญคือมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีสันฝายแบนและกว้าง ซึ่งอาจใช้เพื่อการสัญจรข้ามผ่านสันฝายไปได้



รูปที่ 8.7-1 ลักษณะของฝายหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ตามแนวสันฝาย



รูปที่ 8.7-2 รูปตัดตามยาวของฝายหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูรูปแบบหนึ่ง

สมการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านใช้สมการทั่วไปของฝาย

$$Q = CLH^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลข้ามสันฝาย $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$

C = สัมประสิทธิ์ในการระบายน้ำข้ามสันฝาย สัมพันธ์กับค่าความลึกของน้ำนิ่งด้านหน้าฝาย และความกว้างของสันฝาย ซึ่งแสดงในตารางที่ 8.7-1

(ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องสอบเทียบหาค่า C สำหรับฝายแต่ละแห่ง เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอน การคำนวณปริมาณน้ำจึงจะต้อง)

L = ความยาวของสันฝาย ม.

B = ความกว้างของสันฝาย ม.

H = ความลึกของน้ำนิ่งด้านหน้าฝายเหนือสันฝาย ม.

ตารางที่ 8.7-1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล “ C ” สำหรับการไหลของน้ำข้ามฝายที่มีสันฝายแบน และกว้าง เมื่อระดับน้ำด้านท้ายน้ำต่ำกว่าสันฝาย

ความกว้างสันฝาย (ม.)	ความลึกของน้ำด้านหน้าฝายเหนือสันฝาย (H) (ม.)	C
0.15	> 0.30	1.82
	0.30 - 0.50	1.65
0.30	> 0.60	1.82
	0.30 - 0.40	1.57
0.45	0.50 - 0.60	1.65
	> 0.70	1.82
0.60	0.30 - 0.40	1.49
	0.50 - 0.60	1.57
1.00	0.70 - 0.80	1.65
	> 0.90	1.82
	0.30 - 0.40	1.46
	0.50 - 0.60	1.49
	0.70 - 0.80	1.57
	0.90 - 1.00	1.68
	> 1.10	1.82

ที่มา : ปราโมทย์ ไหม้กลัด-คู่มืองานเขื่อนดินขนาดเล็กและฝาย

หมายเหตุ : กรณีสันฝายกว้างมากๆ ให้ใช้ค่า $C = 1.82$

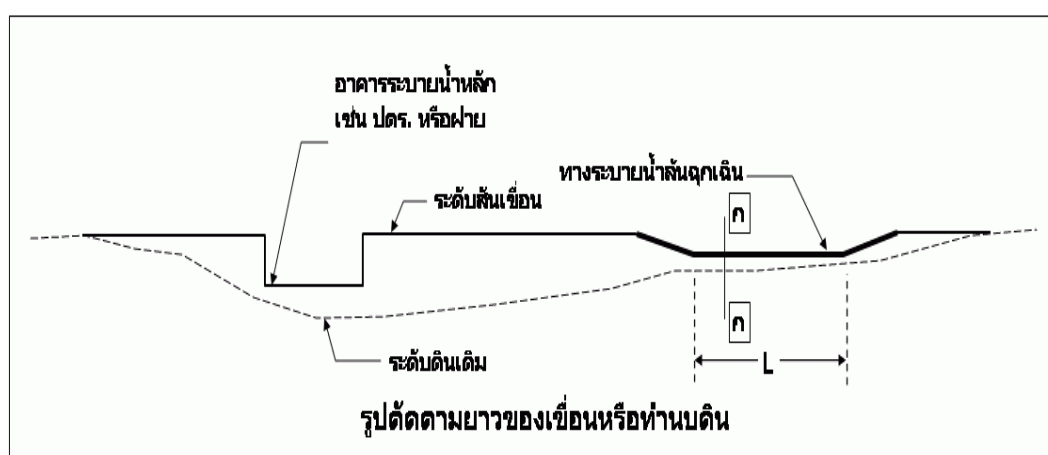
ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องสอบเทียบหาค่า C สำหรับฝายแต่ละแห่ง เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอน การคำนวณปริมาณน้ำจึงจะต้อง

8.7.2 ฝ่ายฉุกเฉินหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

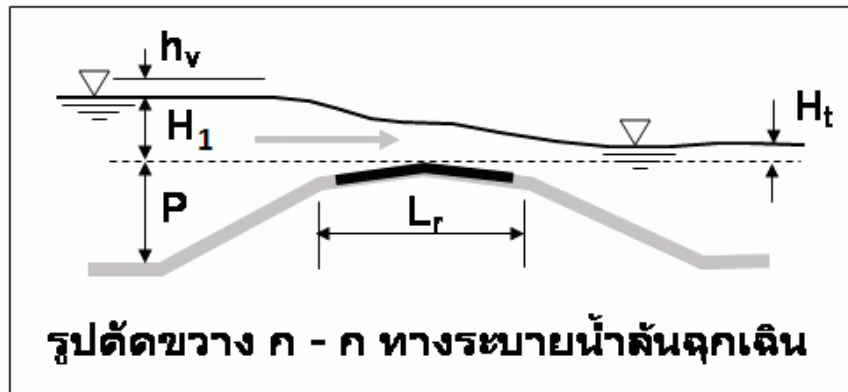
ปกติแล้วเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำจะมีอาคารชลศาสตร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำให้อยู่ในระดับหรือปริมาณที่ต้องการ ซึ่งอาจเป็นฝ่ายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้นที่มีระดับสันอยู่ที่ระดับน้ำเก็บกัก (รณก.) หรือเป็นประตูระบายน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้อาจมีทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินหรือฝ่ายฉุกเฉิน เพื่อทำหน้าที่ระบายน้ำในกรณีที่อาคารระบายน้ำหลักไม่สามารถระบายน้ำออกไปได้ทัน โดยระดับสันของทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินมักกำหนดไว้สูงกว่าระดับ รณก. แต่ไม่เกินระดับน้ำสูงสุด (รณส.) ทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินมักสร้างไว้ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งของเขื่อนหรือทำนบดินที่จะสามารถผันน้ำให้ไหลลงสู่ทางน้ำธรรมชาติด้านท้ายโดยได้สะดวก

ทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินหรือฝ่ายฉุกเฉินอาจออกแบบในลักษณะของฝ่ายถาวรแบบต่างๆ ก็ได้ แต่ส่วนใหญ่เนื่องจากนานๆ ครั้งจึงจะมีปริมาณน้ำมากจนต้องระบายผ่านทางระบายน้ำล้นฉุกเฉิน ดังนั้นจึงมักออกแบบโดยการลดระดับของสันเขื่อนหรือทำนบดินลง เป็นช่องฝ่ายความยาวที่เพียงพอที่จะระบายน้ำมากที่สุดที่อาจเกิดขึ้นได้ทัน มีป้องกันการกัดเซาะตัวฝ่ายทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ โดยอาจเป็นคอนกรีต หินเรียง หินทิ้ง และอื่นๆ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจึงเหมือนเกิดน้ำไหลล้นข้ามถนนออกไป (Roadway overtopping)

ในที่นี้จะกล่าวถึงทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินหรือฝ่ายฉุกเฉินที่ใช้การลดระดับของตัวเขื่อนหรือทำนบดินซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมสร้าง หากเป็นลักษณะฝ่ายประเภทอื่นๆ ก็ให้ดูรายละเอียดของฝ่ายประเภทนั้น



รูปที่ 8.7-3 รูปตัดตามยาวของเขื่อนหรือทำนบดิน แสดงทางระบายน้ำล้นฉุกเฉิน



รูปที่ 8.7-4 แสดงรูปตัดขวางของทางระบายน้ำล้นฉุกเฉิน

❖ การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินหรือฝายฉุกเฉิน

จากคู่มือของ Federal Highway Administration (FHWA) ในชุด Hydraulic Design series No. 5 เรื่อง Hydraulic Design of Highway Culverts, 1985. ได้อธิบายการคำนวณปริมาณน้ำไหลล้นข้ามทางหลวง (ซึ่งในที่นี้เป็นทางระบายน้ำล้นฉุกเฉิน) สรุปได้ดังนี้

การคำนวณใช้สมการทั่วไปของฝาย

$$Q = C_d L H_1^{1.5}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายฉุกเฉิน ($\text{ม}^3/\text{วินาที}$)

L = ความยาวของสันฝาย หรืออาจแทนด้วย B (ม.)

H หรือ H_1 = ความสูงของน้ำด้านเหนือน้ำวัดจากสันฝาย (ม.)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลข้ามฝาย = $K_t \cdot C_r$

C_r = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล กรณี Free flow ที่ขึ้นกับค่าของ H_1 และชนิดของผิวจราจร ได้แก่ ผิวลาดยาง (Paved) และผิวที่เป็นกรวด (Gravel) ซึ่งปัจจุบันเป็นผิวหินคลุกหรือลูกรัง

กราฟรูปที่ 8.7-5 ในกรณีที่ $\frac{H_1}{L_r} \leq 0.15$

และกราฟรูปที่ 8.7-6 ในกรณีที่ $\frac{H_1}{L_r} \geq 0.15$

เมื่อ L_r = ความกว้างของผิวจราจร (สันฝาย) (ม.)

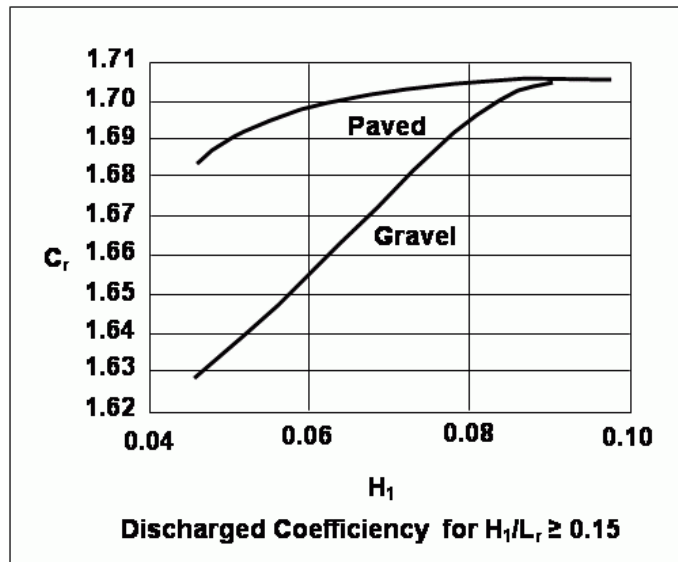
K_t = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลแบบท่วม (Submerged flow)

ซึ่ง K_t หาได้จากกราฟในรูปที่ 8.7-7 โดยจะเกิดการไหลแบบ Submerged flow ในกรณีต่อไปนี้

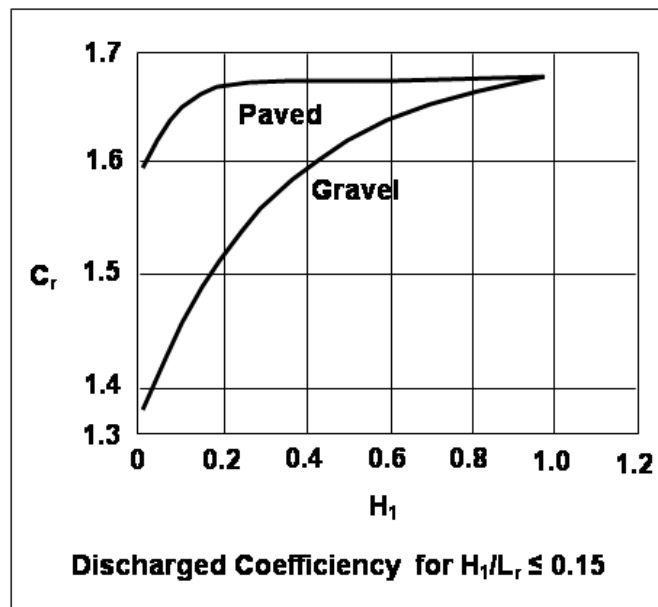
(เมื่อ H_t เป็นระดับน้ำท่วมสันฝาย ด้านท้ายน้ำ)

ก. ผิวจราจรลาดยาง เกิดเมื่อ $H_t/H_1 > 0.80$

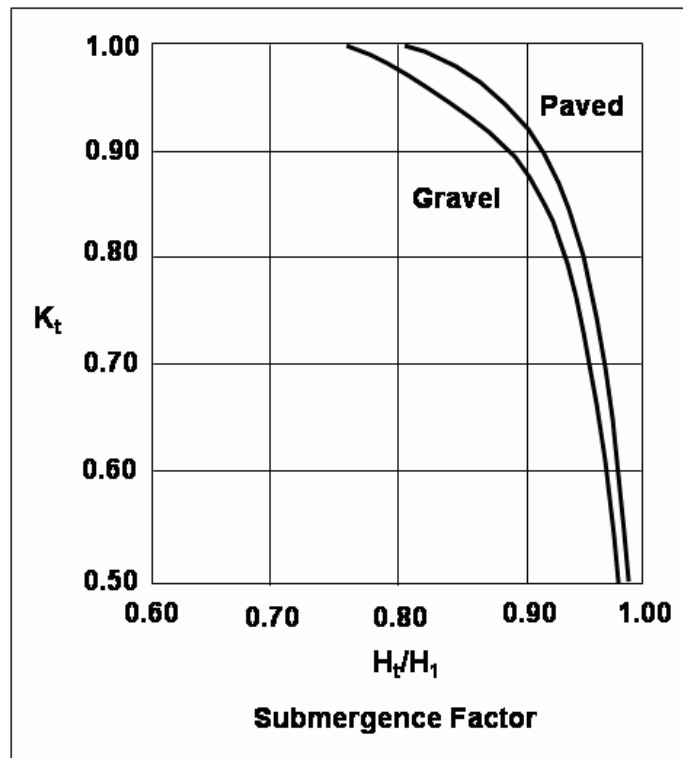
ข. ผิวจราจรเป็นหินคลุกหรือลูกรัง เกิดเมื่อ $H_t/H_1 > 0.75$



รูปที่ 8.7-5 Discharged coefficient : C_r for $H_1/L_r \geq 0.15$



รูปที่ 8.7-6 Discharged coefficient : C_r for $H_1/L_r \leq 0.15$



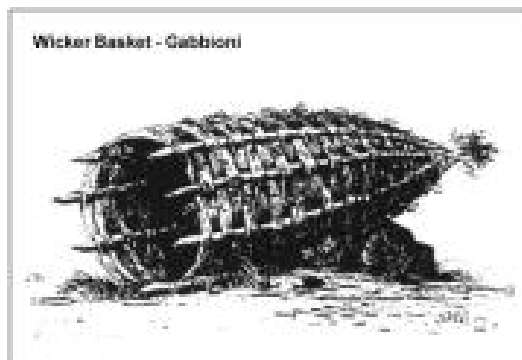
รูปที่ 8.7-7 Submergence factor

8.8 ฝายเกเบียน (Gabions weirs) หรือ ฝายกล่องลวดตาข่ายบรรจุหิน

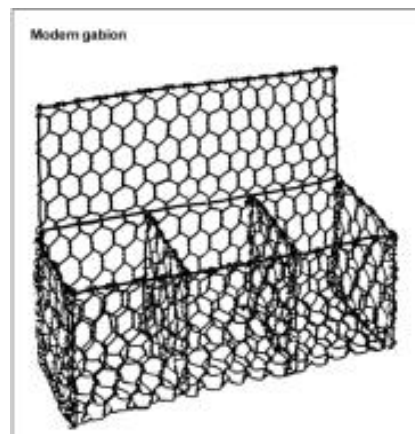
Gabion มาจากภาษาอิตาลีคือ Gabbione แปลว่าตะกร้าขนาดใหญ่ (Big cage) หมายถึง กล่องลวดตาข่ายขนาดใหญ่ที่บรรจุหินไว้ภายใน โดยมีการใช้ตะกร้าบรรจุหินเพื่อป้องกันการกัดเซาะแม่น้ำในลโดยชาวอิตาลีตั้งแต่ 2000 กว่าปีมาแล้ว ส่วนการใช้งานยุคใหม่เท่าที่มีการบันทึกไว้ในปี ค.ศ.1894 Maccaferri ได้เสนอให้ใช้ Gabion เพื่อป้องกันการกัดเซาะแม่น้ำ Reno ในประเทศอิตาลี ต่อมาได้ประยุกต์นำ Gabion มาก่อสร้างใช้เป็นกำแพงกันดิน ใช้ป้องกันลาดตลิ่ง ป้องกันกัดเซาะในทางน้ำ ก่อสร้างทำนบ ฝายทดน้ำ และอื่นๆ

การเรียก Gabion ในชื่ออื่นๆ (มักเป็นชื่อทางการค้า)

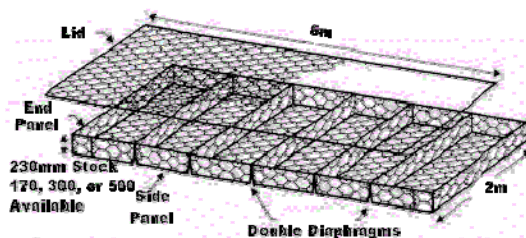
- Reno Mattresses เรียก Gabion ที่มีความหนาหรือสูงน้อยกว่า 0.50 ม.
- Terramesh ใช้เรียก Gabion ที่มีส่วนที่เป็นแผ่นลวดตาข่ายบริเวณฐานเพื่อวางเรียงหินทับ



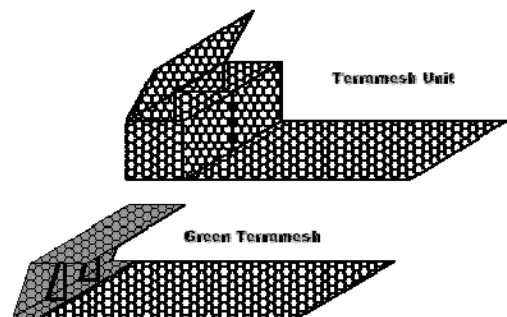
Big cage



Gabion



Reno Mattresses



Terramesh

รูปที่ 8.8-1 แสดงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแบบต่างๆ



รูปที่ 8.8-2 การใช้งาน Gabion เพื่อป้องกันการกัดเซาะของแม่น้ำ Reno ในประเทศอิตาลี

ฝายกล่องหินลวดตาข่าย (Gabion weirs) หรือ ฝายเกเบียน

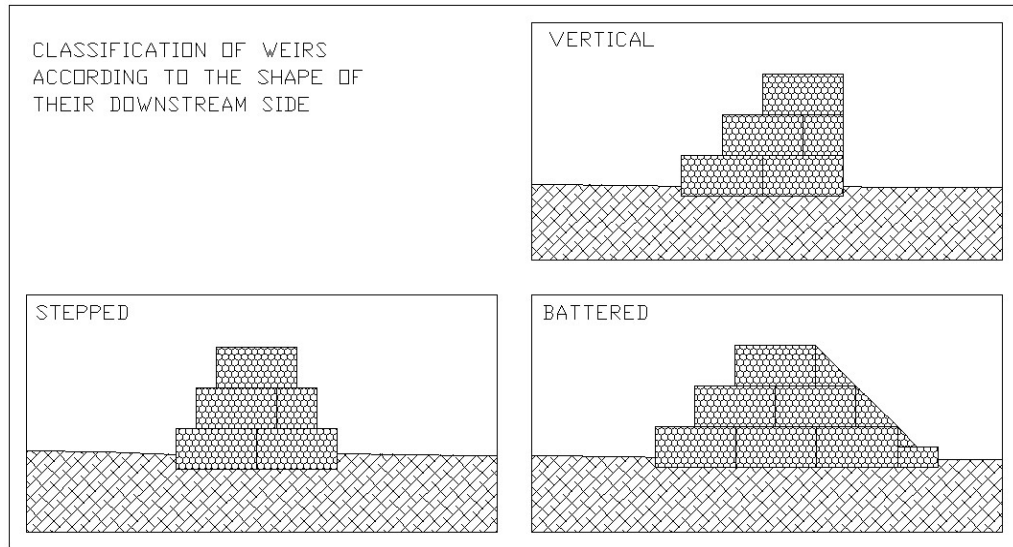
เป็นการนำ Gabion มาวางเรียงซ้อนกันตามรูปแบบที่ต้องการเพื่อทดน้ำในทางน้ำให้มีระดับสูงขึ้น เหมาะกับพื้นที่ซึ่งการขนส่งวัสดุเพื่อก่อสร้างฝายประเภทอื่นๆ ทำได้ไม่สะดวก ต้องเสียค่าขนส่งสูงมาก และพื้นที่นั้นมีหินเพียงพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ มีสภาพของฐานรากค่อนข้างความมั่นคงแข็งแรง (ถ้าสภาพของฐานรากไม่ดีต้องปรับปรุงให้มีความมั่นคง) อีกทั้งการสร้างฝายเกเบียนนั้นง่ายและรวดเร็วกว่าการสร้างฝายประเภทอื่นๆ มาก

8.8.1 รูปแบบมาตรฐานของฝายเกเบียน

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (1987) ได้กำหนดรูปแบบมาตรฐานของฝายเกเบียน ออกเป็น 3 รูปร่างหน้าตัด และ 4 ประเภทของฝาย

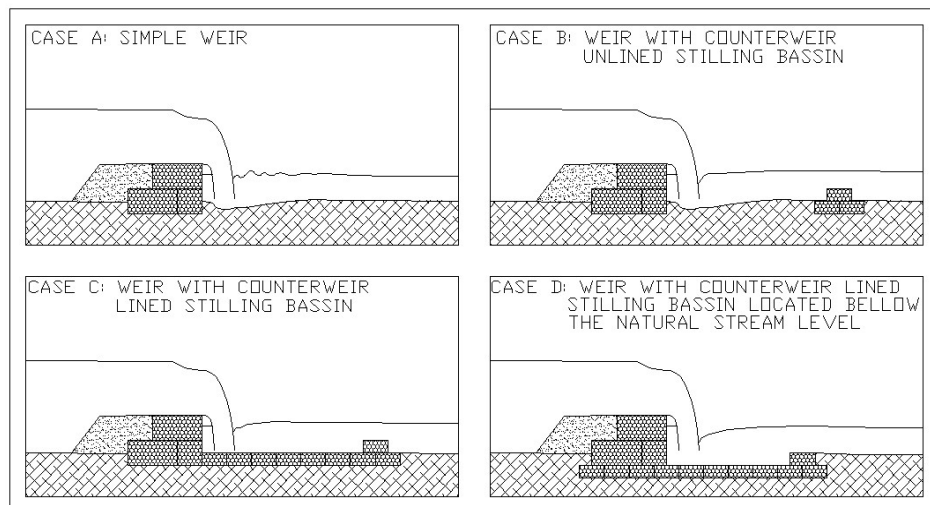
รูปร่างหน้าตัดของฝายเกเบียน

- Vertical weir
- Stepped weir
- Battered or Sloped weirs



รูปที่ 8.8-3 รูปตัดแสดงรูปแบบมาตรฐานของฝายเกเบียน

8.8.2 ประเภทของฝายเกเบียน

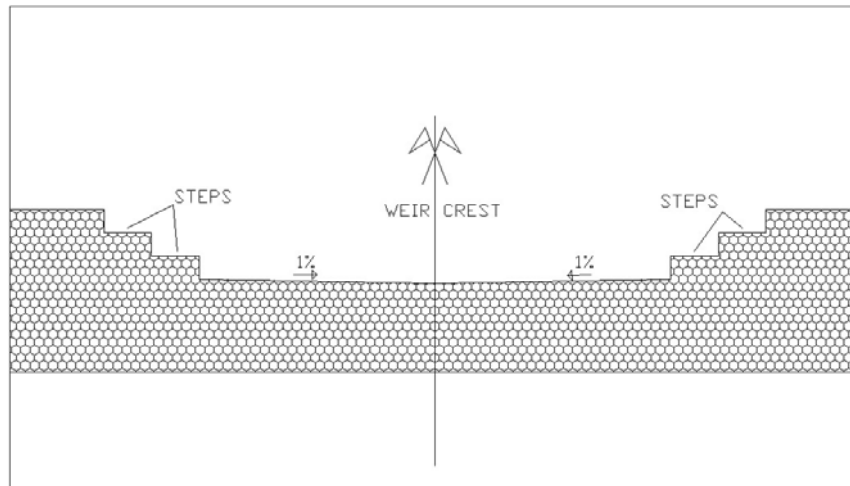


รูปที่ 8.8-4 รูปตัดตามยาวแสดงองค์ประกอบแบบต่างๆ ของฝาย Gabion

- **CASE A : Simple Weir**
วางเรียง Gabion บนฐานรากที่มั่นคงบนดินเดิม หน้าฝายถมด้วยวัสดุที่บ่อน้ำ
- **CASE B : Weir with counterweir unlined stilling basin**
คล้าย Case A แต่มีกำแพงปะทะน้ำด้านท้าย แต่ไม่ป้องกันการกัดเซาะที่บ่อน้ำนี้
- **CASE C : Weir with counterweir lined stilling basin**
คล้าย Case B แต่มีการป้องกันการกัดเซาะที่บ่อน้ำนี้โดยการวาง gabion

- CASE D : Weir with counterweir lined stilling basin located below the natural stream level**

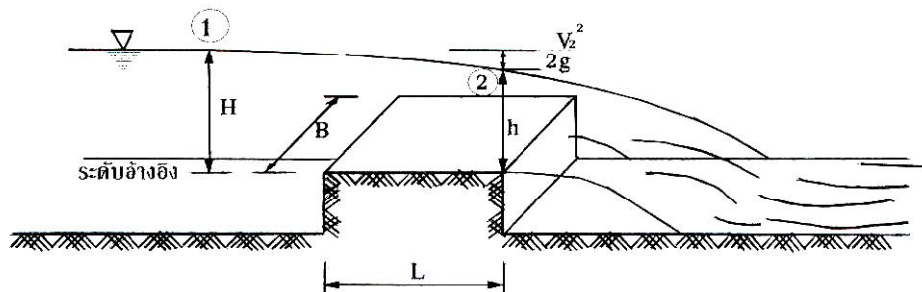
คล้าย Case C แต่วาง Gabion ลึกต่ำกว่าระดับดินเดิม ทำให้มีความปลอดภัยจากการกัดเซาะมากขึ้น



รูปที่ 8.8-5 แสดงตัวอย่างรูปตัดตามยาวของฝายเกเบียนรูปแบบหนึ่ง

8.8.3 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายเกเบียน

ฝายเกเบียนนั้นจะต่างจากฝายประเภทอื่นๆ ในทางทฤษฎีจะออกแบบให้พื้นผิวเรียบและตัวฝายทึบน้ำ แต่ในทางปฏิบัติเพราะใช้ก้อนหินบรรจุในกล่องตาข่าย จึงมีพื้นผิวของสันฝายไม่ราบเรียบ อีกทั้งตัวอาจฝายไม่ทึบน้ำ จะมีน้ำไหลผ่านช่องว่างของหินที่ตัวฝายออกไปได้ จนกว่าจะมีวัสดุไปอุดช่องว่างจนตัวฝายเกิดการทึบน้ำ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตรวจวัดจริงกับทางทฤษฎีหรือในห้องปฏิบัติการจึงมีได้มากกว่าฝายประเภทอื่นๆ



รูปที่ 8.8-6 แสดงรูปตัดของฝายเกเบียน

การคำนวณใช้สมการของ Chezy

$$Q = AV, \quad V = C\sqrt{2gh_1}, \quad A = B \cdot h_1$$

$$Q = B \cdot h_1 \cdot C\sqrt{2gh_1}$$

$$Q = B \cdot C \cdot \sqrt{2g} h_1^{3/2}$$

เนื่องจากฝายเกเบียนมีลักษณะคล้ายฝายสันกว้างการแทนค่าตัวแปรต่างๆ จึงกำหนดให้คล้ายฝายสันกว้าง (ให้สังเกต ค่า B และ L)

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย กรณี **Free flow** (ม.³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

B = ความยาวของสันฝาย (ม.)

L = ความหนาของสันฝาย (Weir length) (ม.)

H หรือ h_1 = ความสูงของน้ำด้านเหนือหน้า (สันฝายถึงผิวน้ำ) (ม.)

C หรือ C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

8.8.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายเกเบียน

Cremonese (1996) ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลในกรณี **Free flow** ซึ่งขึ้นกับความสัมพันธ์ของ H และ L (Weir length) พบว่ามีค่าระหว่าง 0.3 - 0.4 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 8.8-1

สำหรับการไหลกรณี **Submerged flow** ค่า C จะคูณค่าปรับแก้ m ขึ้นกับอัตราส่วนของระดับน้ำด้านท้ายน้ำเหนือสันฝาย (H_2) กับระดับน้ำด้านเหนือหน้าสันฝาย (H_1) หรือ H_2/H_1 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 8.8-2

สมการการไหลกรณี **Submerged flow** = $m \times \text{Free flow}$

$$Q = m \cdot B \cdot C \cdot \sqrt{2g} h_1^{3/2}$$

ตารางที่ 8.8-1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลในกรณี Free flow

Discharge coefficients										
Head (m)	Weir length (m)									
	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.00	1.20	3.00	4.50
0.06	0.347	0.335	0.327	0.317	0.309	0.304	0.297	0.292	0.310	0.334
0.12	0.364	0.340	0.329	0.325	0.324	0.322	0.317	0.319	0.319	0.337
0.18	0.384	0.343	0.329	0.325	0.324	0.334	0.335	0.337	0.337	0.337
0.24	0.411	0.355	0.334	0.324	0.324	0.333	0.334	0.334	0.335	0.329
0.30	0.414	0.372	0.343	0.332	0.329	0.330	0.333	0.334	0.334	0.328
0.36	0.414	0.384	0.357	0.337	0.330	0.329	0.333	0.332	0.335	0.329
0.42	0.414	0.399	0.364	0.345	0.334	0.329	0.330	0.330	0.333	0.329
0.48	0.414	0.409	0.373	0.360	0.343	0.334	0.332	0.330	0.329	0.328
0.54	0.414	0.412	0.838	0.359	0.342	0.334	0.332	0.330	0.329	0.328
0.60	0.414	0.411	0.838	0.355	0.344	0.340	0.334	0.330	0.329	0.328
0.75	0.414	0.414	0.409	0.383	0.360	0.350	0.340	0.333	0.329	0.328
0.90	0.414	0.414	0.414	0.399	0.380	0.364	0.341	0.332	0.329	0.328
1.05	0.414	0.414	0.414	0.414	0.398	0.370	0.344	0.334	0.329	0.328
1.20	0.414	0.414	0.414	0.414	0.414	0.383	0.348	0.337	0.329	0.328

ตารางที่ 8.8-2 ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์ของการไหลในกรณี Submerged flow

ค่าปรับแก้สูตรการไหลกรณี Submerged Flow : m											
Fawer formula for submerged weirs $Q = m . B . C . \sqrt{2g} h_1^{3/2}$											
h_2/h_1	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
m	0.10	0.99	0.96	0.92	0.88	0.81	0.71	0.52	0.40	0.32	0.00
h_1 : ระดับน้ำด้านเหนือน้ำจากระดับสันฝาย											
h_2 : ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจากระดับสันฝาย											

8.9 ฝายยาง (Rubber Weir or Rubber Dam)

ฝายยาง (Rubber weir) หรือบางแห่งอาจเรียกว่า เพื่อนยาง (Rubber dam) เป็นฝายที่มีการการม้วนยางให้มีลักษณะเป็น ถุงยาง (Rubber bag) ปลายปิดรูปทรงกระบอกที่อากาศหรือน้ำรั่วซึมผ่านไม่ได้และนำมาวางขวางกั้นเต็มขนาดความกว้างของลำน้ำ โดยยึดติดกับสลักเกลียวที่ฝังในฐานคอนกรีตที่ก่อสร้างอยู่ในท้องลำน้ำรวมทั้งติดตั้งแนบกับแท่นคอนกรีตที่ตลิ่งทั้งสองฝั่ง ตัวฝายยางสามารถพองตัวและยุบตัวได้

8.9.1 ประเภทของฝายยาง

ฝายยางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ฝายยางชนิดสูบน้ำด้วยน้ำ และชนิดสูบน้ำด้วยลม

1) ฝายยางชนิดพองตัวด้วยน้ำ ฝายยางชนิดพองตัวด้วยน้ำมีอุปกรณ์สำหรับการพองตัวที่สำคัญคือ เครื่องสูบน้ำ (Pump) สูบน้ำอัดเข้าตัวยางเพื่อให้ยางพองตัว

2) ฝายยางชนิดพองตัวด้วยลม ฝายยางชนิดพองตัวด้วยลมมีอุปกรณ์สำหรับการพองตัวที่สำคัญ คือ เครื่องสูบลม (Blower) ฝายยางชนิดสูบน้ำด้วยลมมักจะมีน้ำตกค้างอยู่ภายในถุงยางเสมอ ทั้งนี้เกิดจากความชื้นของอากาศที่อัดเข้าไปเมื่อถูกความเย็นจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้ยางยุบตัวแบนราบไม่สนิททำให้ยางสับตัวในขณะที่น้ำไหลผ่านจึงต้องมีการอัดลมไล่น้ำที่ตกค้างออกไปบ่อย ๆ

ฝายยางทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะและองค์ประกอบใกล้เคียงกันมาก จะต่างกันบ้างเล็กน้อยในเรื่องของอุปกรณ์สำหรับพองตัว เช่น บั๊มลมกับปั๊มน้ำและอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพในการใช้งานและราคาใกล้เคียงกัน

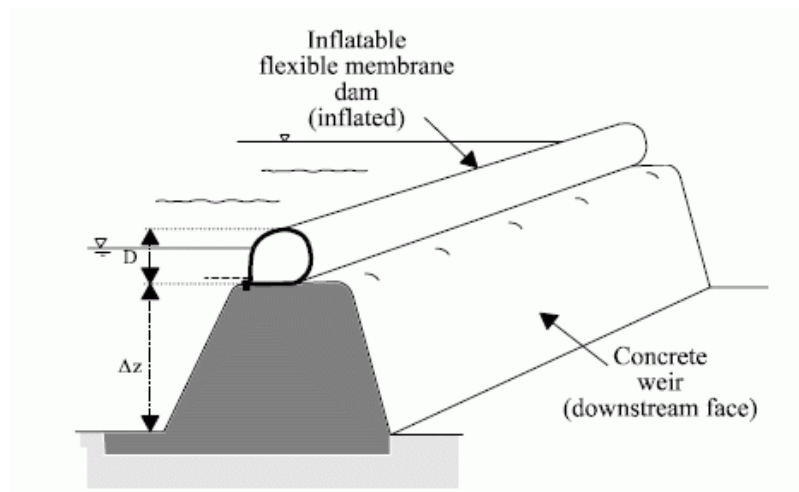
8.9.2 ส่วนประกอบของฝายยาง

- 1) ตัวฝายยางที่มีลักษณะเป็นถุงยาง (Rubber bag)
- 2) ฐานคอนกรีตหรือฝายคอนกรีตที่ต้องการเพิ่มระดับเก็บกัก เพื่อใช้ยึดตัวถุงยาง
- 3) ห้องควบคุมการทำงาน (Control room)
- 4) ระบบควบคุมการทำงานของฝายยาง แต่ละแห่งจะมีระบบควบคุม 2 ระบบคือ ระบบที่ใช้ในการสูบน้ำให้ถุงยางพองตัว และระบบที่ใช้ในการทำให้ถุงยางยุบตัว โดยที่ฝายยางจะทำงานใน 2 ลักษณะเท่านั้นคือ การพองตัวเต็มที่เพื่อเก็บกักน้ำ และการยุบฝายแบนราบ จะไม่หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน

ควบคุมระดับน้ำให้ฝ่ายมีระดับต่างๆ เพราะจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อแผ่นดินทำให้ฝ่ายเสียรูปทรง

รูปแบบการทำงานขุดตัวของฝ่ายยาง สามารถออกแบบให้ระบบควบคุมทำการสั่งฝ่ายยางให้ล้มราบแนบกับฐานคอนกรีตโดยอัตโนมัติเมื่อระดับน้ำหน้าฝ่ายสูงกว่าหรือถึงระดับความสูงที่กำหนด ซึ่งจะ ทำให้ให้ฝ่ายยางไม่ได้รับอันตรายจากแรงดันน้ำหน้าฝ่าย อีกทั้งยังเป็นการระบายน้ำหน้าฝ่ายไม่ให้ไหลท่วมตลิ่งอีกด้วย หรืออีกกรณีเมื่อระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับฐานของฝ่ายยาง เป็นการเก็บพับเอาไว้

เพราะไม่ได้ใช้งานฝ่ายยางเพื่อเก็บกักน้ำแล้ว



รูปที่ 8.9-1 แสดงส่วนประกอบของฝ่ายยางทั่วไป

8.9.3 ข้อดีและข้อจำกัดของฝ่ายยาง

1) ข้อดีของฝ่ายยาง

(1) สามารถบังคับควบคุมให้แบนแฟบลงติดฐานคอนกรีตในฤดูฝนทำให้ตะกอนที่ไหลมากับน้ำระบายผ่านฝ่ายไปได้ คล้ายกับลำน้ำธรรมชาติสามารถระบายน้ำในฤดูน้ำหลากได้ดีเนื่องจากไม่กีดขวางทางน้ำ

(2) สามารถก่อสร้างได้ในระยะเวลาอันรวดเร็ว เนื่องจากฐานคอนกรีตบางกว่าฝ่ายปกติและไม่มีตอม่อจำนวนมากทำให้ไม่เสียเวลา ตัวฝ่ายสามารถผลิตจากโรงงานและนำมาติดตั้งในระยะเวลาอันรวดเร็วขึ้นอยู่กับขนาดของฝ่าย

(3) ทนน้ำเค็ม กรด และด่าง ได้ดีกว่าฝ่ายซึ่งมีบานประตูเป็นเหล็ก

(4) เป็นการส่งเสริมการเกษตรอุตสาหกรรมตามนโยบายของรัฐ เนื่องจากขั้นตอนการผลิตและการใช้วัตถุดิบ สามารถกระทำได้ภายในประเทศ

2) ข้อจำกัดของฝายยาง

- (1) มีโอกาสชำรุดเสียหายของตัวยางจากของแหลมได้ง่าย
- (2) เมื่อเป็นสินค้านำเข้ามีราคาค่อนข้างสูง
- (3) ก่อสร้างได้ในความสูงที่จำกัด ปัจจุบันออกแบบตัวยางสูงได้ไม่เกิน 4.50 ม. เพราะจะเกิดการสั่นของตัวยางเมื่อรับแรงจากน้ำ
- (4) ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำในระดับต่าง ๆ ได้เนื่องจากเมื่อไม่พองตัวเต็มที่จะเสียรูปทรง จึงทำได้เพียง 2 ลักษณะคือพองตัวเต็มที่ กับยุบตัวแบนราบ

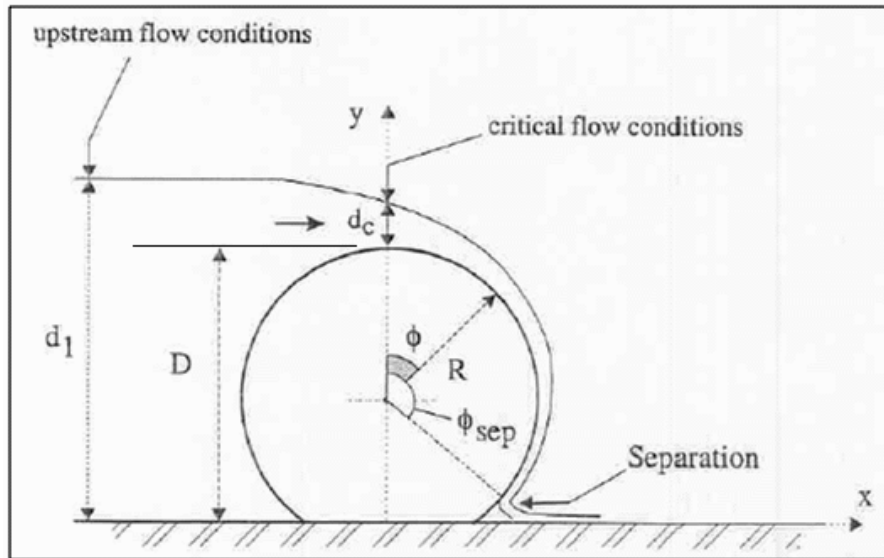
8.9.4 วัตถุประสงค์ของการสร้างฝายยาง

- 1) สร้างเพื่อทดแทนฝายคอนกรีตหรือประตูระบายน้ำ
- 2) สร้างเพื่อเพิ่มความสูงของอาคารฝายเดิม (กรณีนี้จะเป็นลักษณะฝายที่มีการควบคุมปริมาณน้ำ)
- 3) สร้างเพื่อทดน้ำในลำน้ำเข้าไปเก็บไว้ในหนอง บึง หรือแก้มลิง
- 4) สร้างเพื่อป้องกันการรุกรานของน้ำเค็ม

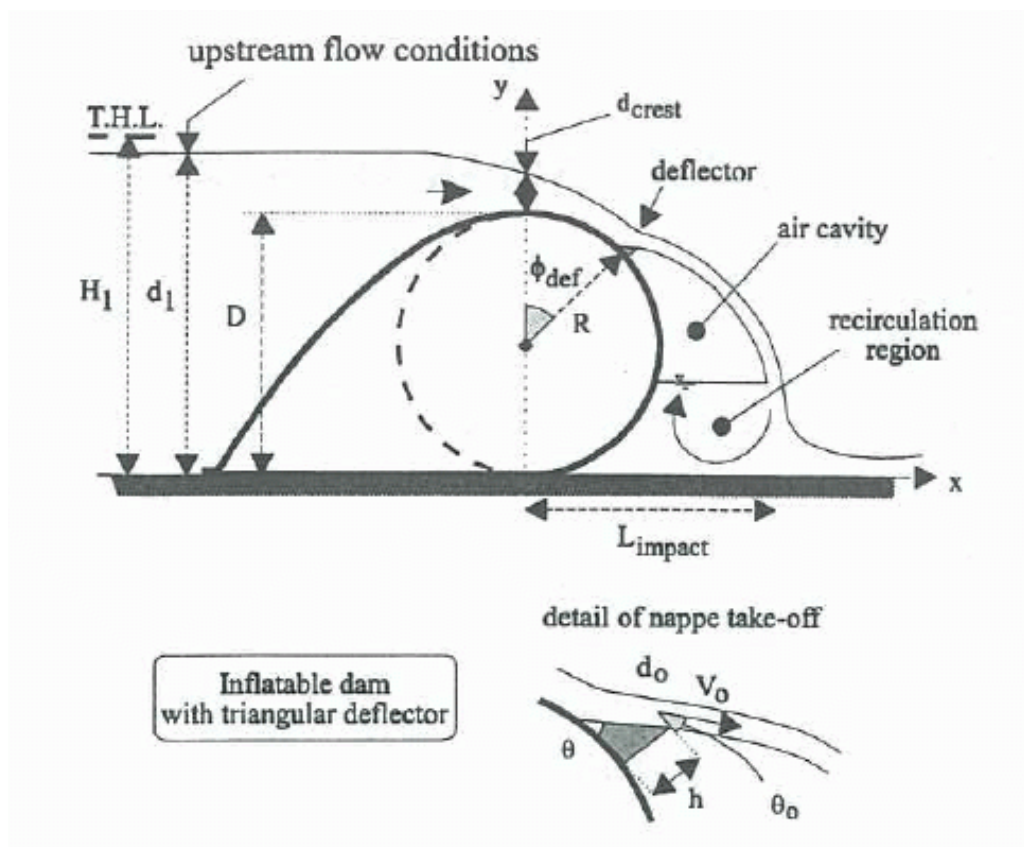
8.9.5 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของฝายยาง

ตัวฝายยางในอุดมคติที่ใช้ในการศึกษานั้นมีลักษณะเป็นถุงยางรูปทรงกระบอก ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม เมื่อน้ำไหลล้นข้ามสันฝายยางออกไปลักษณะของ **Nappe** ของน้ำจะไหลไปตามผิวสัมผัส (**Face**) จากยอดไปสู่ฐานแล้วหักเหจากมุมฐานออกสู่แท่นคอนกรีตหรือสันฝายคอนกรีตเดิมที่รองรับถุงยาง (ฝายยาง) ดังแสดงในรูปที่ 8.9-2 และมีการค้นพบว่าน้ำที่ไหลสัมผัสตลอดผิวหน้าตัดด้านท้ายฝายและโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำบริเวณใกล้ฐานและที่จุดหักเหที่ฐาน (**Separation**) จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยากระทำในลักษณะกระแทกต่อฝายยางทำให้ฝายยางเกิดการแกว่งตัวหรือเกิดการสั่น (**Vibrations**) มีผลต่อความมั่นคงแข็งแรงของตัวฝายยาง ที่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์การยึดแผ่นยางกับฐานและต่อเนื้อแผ่นยาง แนวทางแก้ไขนั้นต้องทำให้เกิดแรงกระทำจากน้ำบริเวณฐานด้านท้ายเกิดน้อยที่สุดโดยการเลื่อน **Nappe** บริเวณฐานออกไปให้ไกลขอบฐาน โดยออกแบบให้มีตัวหักเหการไหล (**Deflector**) หรือเรียกว่า **FIN** เพื่อให้ **Nappe** บริเวณฐานท้ายฝายยางเลื่อนตำแหน่งออกไปจนไม่ทำให้เกิดผลกระทบที่ทำให้ฝายยางสั่น ดังแสดงในรูปที่ 8.9-3

เนื่องจากฝายยางสร้างเพื่อทำหน้าที่ในการทดน้ำเพื่อการกักเก็บ และจะต้องยุบตัวเมื่อปริมาณน้ำไหลผ่านทางน้ำมาก ๆ ดังนั้นการออกแบบฝายยางจึงมักให้มีกรไหลเป็นแบบ **Free flow** เสมอ

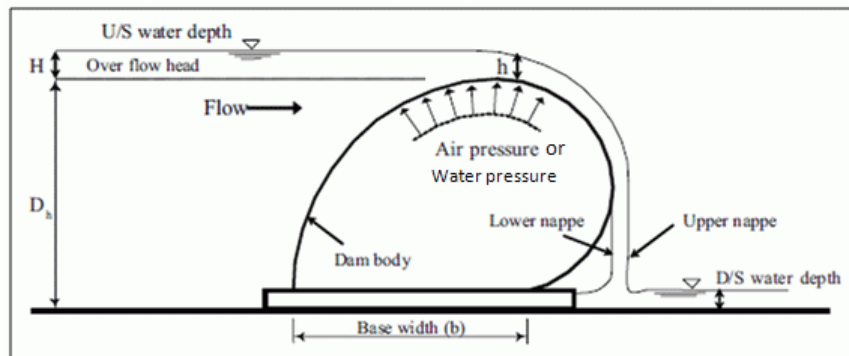


รูปที่ 8.9-2 แสดงรูปตัดของฝายขวางในอุดมคติและลักษณะการไหลถล่นของน้ำผ่านฝาย



รูปที่ 8.9-3 แสดงรูปตัดของฝายขวางที่ออกแบบให้มีตัวหักเหการไหลด้านท้าย (Deflector) หรือเรียกว่า FIN เพื่อแก้ปัญหการสั่นของตัวฝาย

8.9.6 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายยาง



รูปที่ 8.9-4 แสดงรูปตัดของฝายยาง ที่ใช้อธิบายการคำนวณการไหล

Anwar (1967) ได้ศึกษาฝายยางที่พองตัวด้วยลมและด้วยน้ำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_d) ของฝายยางมีค่าระหว่าง 0.35 ถึง 0.50 โดยจะสัมพันธ์กับค่าของ H/D_h เมื่อ D_h เป็นความสูงของฝายยาง โดยใช้สมการ (1)

$$q = C_d \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (1)$$

เมื่อ C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล
 q = อัตราการไหลผ่านฝาย $\text{ม.}^3/\text{วินาที}/\text{ความยาวสันฝาย 1 ม.}$
 H = ความสูงของน้ำที่ไหลผ่านสันฝาย ม.
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก $9.81 \text{ ม.}/\text{วินาที}^2$

หรือคือสมการอัตราการไหล $Q = C_d L \sqrt{2g} H^{3/2} \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$

L = ความยาวของสันฝาย ม.

Baker และ Clare อ้างโดย Al-Shami (1983) ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า C_d ของฝายยางที่พองตัวด้วยน้ำ โดยใช้สมการ (1) พบว่ามีค่าระหว่าง 0.386 ถึง 0.51

Stodulka อ้างโดย Al-Shami (1983) ใช้สมการ (1) คำนวณหาค่า C_d ของฝายยาง พบว่ามีค่าระหว่าง 0.25 ถึง 0.40

The ministry of overseas development อ้างโดย Alwan (1979) พบว่าค่า C_d ของฝายยางที่พองตัวด้วยน้ำจะสัมพันธ์กับค่าของ H/D_h โดยมีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.4

Alwan (1979) สมมุติให้ฝายที่มีคุณสมบัติคล้ายฝายสันกว้างหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม แล้วหาค่า C_d โดยใช้สมการ (2)

$$q = C_d \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{g} H^{3/2} \quad (2)$$

ค่า C_d ของ Alwan มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 1.1 ซึ่งแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$C_d = \frac{3\sqrt{3}}{(s-1)} \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{3/2} \left(s - \frac{(1+x)^{1/s}}{(1+x)} \right)$$

เมื่อ h = ระดับ Critical depth ของน้ำบนยอดสันฝาย ม.

H = ระดับน้ำด้านเหนือหน้าฝาย ม.

$$x = \frac{s \cdot h}{R}$$

R = รัศมีส่วนของรูปวงกลมของถุยง ม.

s = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับค่า H และ R

$$s = 2.28(H/R)^{0.21} \quad \text{กรณีฝายyangที่พองตัวด้วยลม}$$

$$s = 2.36(H/R)^{0.21} \quad \text{กรณีฝายyangที่พองตัวด้วยน้ำ}$$

Al-Shami (1983) ใช้สมการ (1) ศึกษาฝายyang พบว่ามีค่า C_d ระหว่าง 0.35 ถึง 0.40 โดยมีความสัมพันธ์กับ H/D_h ดังสมการต่อไปนี้

$$C_d = 0.4866(H/D_h)^{0.11} \quad \text{กรณีฝายyangที่พองตัวด้วยลม}$$

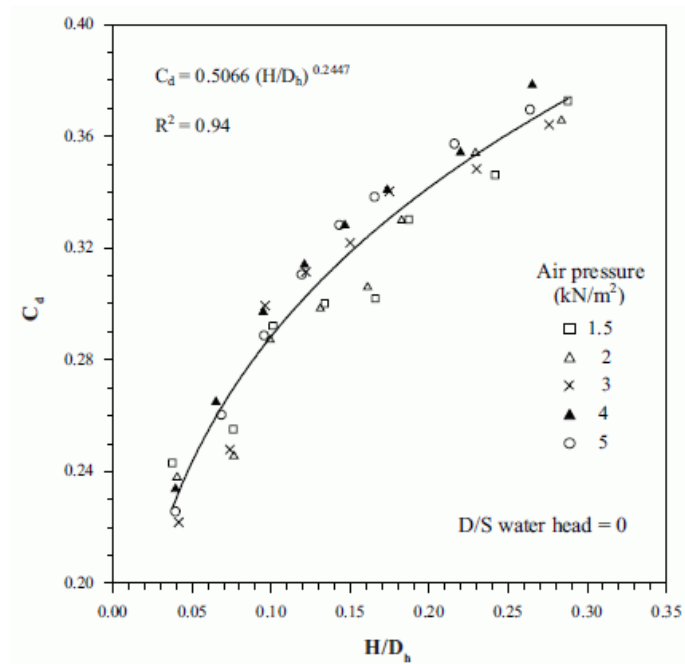
$$C_d = 0.4338(H/D_h)^{0.0694} \quad \text{กรณีฝายyangที่พองตัวด้วยน้ำ}$$

Abd Alsabar (1997) พบความสัมพันธ์ของอัตราการไหลผ่านฝายyangที่พองตัวด้วยลมเทียบกับ H/D_h ดังสมการ $Q = 110.205(H/D_h) - 5.9625$

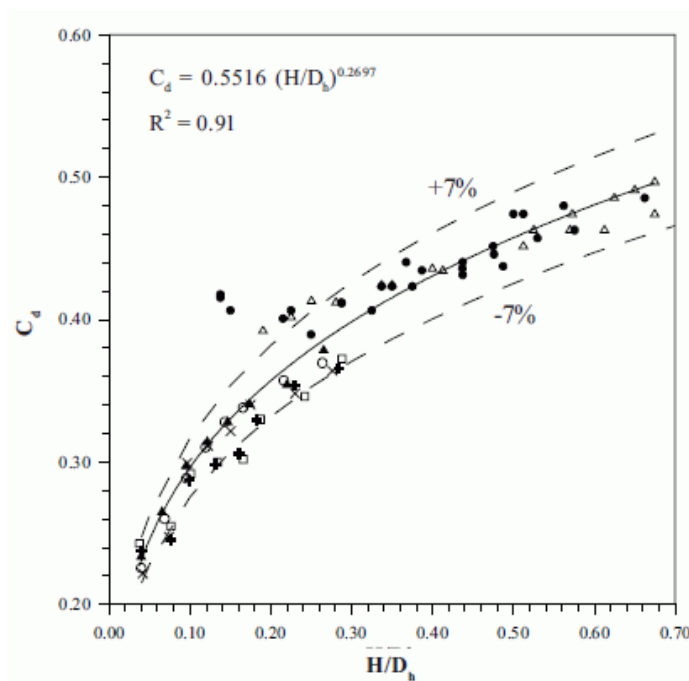
Abdullah Ali Nasser Alhamati และคณะ ได้ศึกษาการไหลของน้ำผ่านฝายyangที่พองตัวด้วยลม โดยใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สมการ (1) พบว่า ค่า C_d จะสัมพันธ์กับค่า H/D_h ดังสมการ $C_d = 0.5066(H/D_h)^{0.2447}$

โดย H/D_h มีค่าระหว่าง 0.04 ถึง 0.30 ทำให้ C_d มีค่าระหว่าง 0.22 ถึง 0.38 ผลการศึกษาแสดงตามกราฟความสัมพันธ์ของ C_d และ H/D_h ดังรูปที่ 8.9-5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Anwar (1967) ตามกราฟในรูปที่ 8.9-6 ซึ่งอาจสรุปผลการศึกษาได้ว่า

- 1) การเพิ่มหรือลดแรงดันภายในตัวฝายyangที่พองตัวเต็มที่ จะไม่ส่งผลต่อค่า C_d
- 2) พิจารณาประเมินค่า C_d ของการศึกษาการไหลผ่านฝายyangของนักชลศาสตร์อื่นๆ อาจสรุปได้ว่า ฝายyangมีค่า C_d ระหว่าง 0.22 ถึง 0.50 โดย H/D_h มีค่าระหว่าง 0.04 ถึง 0.70



รูปที่ 8.9-5 C_d - H/D_h Curve ผลการศึกษาของ Abdullah Ali Nasser Alhamati และคณะ



Anwar's Data (Air-inflated dam)		△
Sumitomo Data (as cited in (Tam,1998)) internal air pressures are 0.98,1.96 and 2.94 kN/m².		●
Present study (Air-inflated dam)	P = 1.5 kN/m²	□
	P = 2 kN/m²	+
	P = 3 kN/m²	×
	P = 4 kN/m²	▲
	P = 5 kN/m²	○

รูปที่ 8.9-6 C_d - H/D_h Curve ผลการศึกษาของ Anwar

8.9.7 การคิดค่าความยาวประสิทธิภาพของสันฝายยาง

การออกแบบและการติดตั้งฝายยางบนฐานรองรับแผ่นยางหรือถุงยางนั้นมีส่วนที่ยากอยู่ที่ส่วนปลายทั้ง 2 ข้าง เพราะมีผลต่อการยุบฝายยางให้ชนราบกับฐานรองรับได้มากที่สุดเพียงใด ซึ่งรูปแบบการติดตั้งดังกล่าวก็จะเกี่ยวข้องกับการคิดความยาวของสันฝายด้วย โดยทั่วไปแล้วฐานรองรับถุงยางจะมี 2 รูปแบบ คือ 1) ฐานรองรับฝายยางที่มีขอบด้านข้างเป็นแนวลาด 2) ฐานรองรับฝายยางที่มีขอบด้านข้างเป็นกำแพงตั้ง ส่วนใหญ่จะเป็นการติดตั้งเสริมฝายเดิมที่มีตอม่อกลางฝาย

สำหรับการติดตั้งถุงยางบนฐานรองรับนั้นเมื่อพิจารณาส่วนปลายของฝายยางทั้ง 2 ข้างจะมีการติดตั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การติดตั้งปลายถุงยางเป็นแนวตรงตามแนวสันฝายทำให้ขอบทั้ง 2 ข้างยกตัวสูงขึ้น มักติดตั้งกับฐานรองรับที่ขอบข้างเป็นลาด 2) การติดตั้งปลายถุงยางให้พับโค้งไปทางท้ายน้ำ จะได้แนวสันฝายตรงตลอดแนวติดตั้งได้กับฐานรองรับทั้ง 2 แบบ

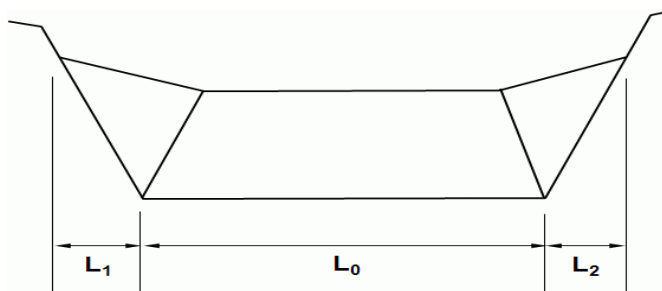


รูปที่ 8.9-7 แสดงการติดตั้งฝายยางชนิดสูบลมอัดด้วยลม เสริมสันอาคารระบายน้ำล้นโครงการอ่างเก็บน้ำลำปาว จังหวัดกาฬสินธุ์ ยึดขอบข้างปลายถุงยางที่พับโค้งไปทางท้ายน้ำกับตอม่อ



รูปที่ 8.9-8 แสดงการติดตั้งฝายยางที่ขอบฐานรองรับด้านข้างเป็นลาด รูป 1 ปลายถุงยางเป็นแนวตรงขึ้นไปตามลาด รูป 2 ปลายถุงยางที่พับโค้งไปทางท้ายน้ำ

จะเห็นว่าไม่ว่าจะติดตั้งรูปแบบใด ตัวฝายยางจะมีความยาวรูปร่างด้านหน้าเป็น 3 ส่วนเสมอคือ แนวสันฝายตอนกลาง ความยาว L_0 และแนวขอบด้านข้าง ความยาว L_1 และ L_2



รูปที่ 8.9-9 แสดงระยะความยาว 3 ส่วนของฝายยางที่นำมาคิดความยาวประสิทธิผล

การคิดความยาวประสิทธิผลของสันฝายยาง (L)

$$L = L_0 + \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right)$$

8.9.8 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายยางกรณียุบฝายยางราบกับฐาน

ในกรณีที่ระดับน้ำด้านเหนือน้ำสูงถึงระดับสูงสุดที่กำหนดไว้เพื่อเป็นการให้น้ำสามารถระบายออกไปไม่เกิดการเอ่อล้นท่วมพื้นที่ด้านเหนือน้ำและเป็นการลดความเสียหายที่จะเกิดกับตัวฝายยางเนื่องจากการรับแรงกระทำจากน้ำมากเกินไปจนเกินขีดจำกัด และเนื่องจากการใช้งานฝายยางไม่สามารถปรับลดระดับของตัวฝายยางที่ระดับต่างๆ เพื่อการควบคุมปริมาณน้ำได้ จึงต้องมีการยุบฝายยางให้นอนราบกับฐาน

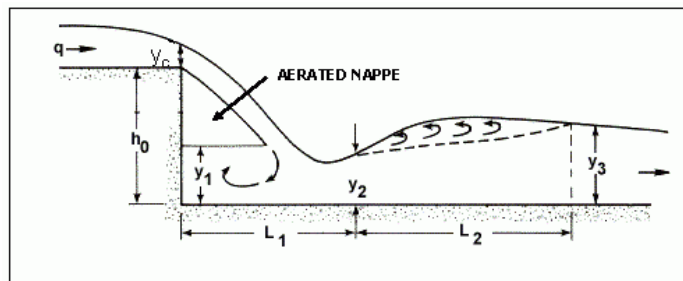
การคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายยางกรณียุบฝายยางให้นอนราบนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการสอบเทียบเพื่อสร้าง Discharge curve หรือ Q-H Curve เป็นการเฉพาะ แต่อาจคำนวณได้ค่าโดยประมาณโดยพิจารณาตามลักษณะของฐานต่อไปนี้

1) ถ้าเป็นฐานลักษณะเป็นยกพื้นคอนกรีต ให้คำนวณโดยถือว่าเป็นฝายสันกว้าง (ฝายหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู) โดยคิดระดับสันฝายเพิ่มระดับของความหนาแผ่นยางที่นอนราบกับฐาน

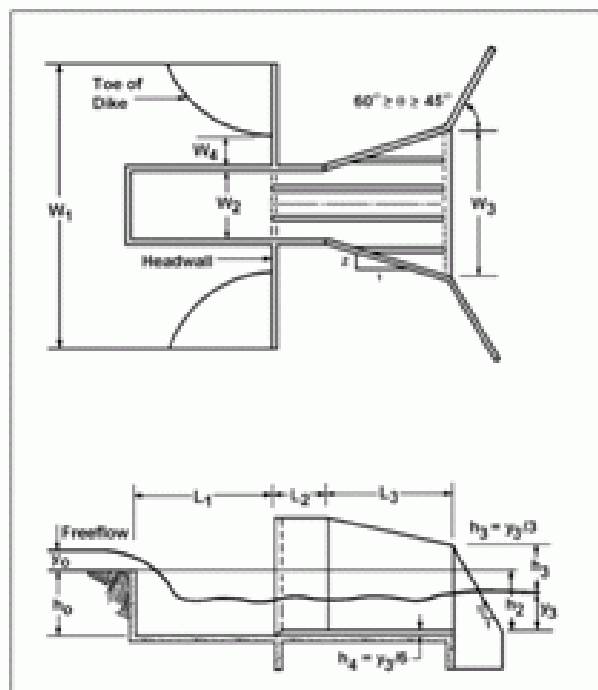
2) ถ้าฐานเป็นฝายเดิมที่ติดตั้งฝายยางเพื่อเพิ่มระดับเก็บกัก การคำนวณก็ให้คำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายเดิมนั้นโดยให้เพิ่มระดับสันฝายเดิมด้วยความหนาของแผ่นยางด้วย

8.10 Straight Drop or Free Overfall Spillway

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการไหลของน้ำผ่านฝายอีกกลุ่มหนึ่งที่รูปร่างหน้าตัดของฝายทำให้เกิดการไหลของน้ำผ่านสันฝายโดยอิสระในลักษณะ **Free overfall flow** กล่าวคือ เมื่อน้ำไหลข้ามสันฝายก็จะตกลงสู่พื้นด้านล่างฝายแล้วไหลออกสู่ทางน้ำด้านล่างต่อไป ตัวฝายมีลักษณะเป็นกำแพงตั้ง มียอดสันฝายเป็นลักษณะต่าง ๆ อย่างไรก็ตามอาจสับสนสื่อความหมายที่ต่างกันออกไปเป็น **Straight drop spillway** ที่หมายถึงอาคารลักษณะน้ำตก หรือฝายที่มี $P=0$ ที่มักสร้างในคลองส่งน้ำที่สภาพพื้นที่มีความชันมาก จนต้องปรับลดระดับพื้นของคลองด้วยอาคารน้ำตกดังกล่าว (ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 10 ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันสัน)



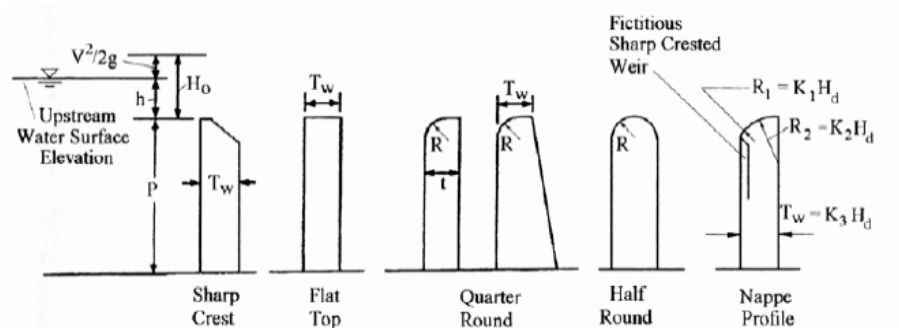
Simple Straight Drop



Box inlet drop

รูปที่ 8.10-1 แสดง Straight drop spillway ที่เป็นอาคารประเภทน้ำตก
รูปแบบเป็นน้ำตกจากพื้นคลองด้านเดียว รูปถ่วงน้ำตก 3 ด้านผ่านช่องเปิดสี่เหลี่ยม

8.10.1 ลักษณะของ Straight drop or Free overfall spillway เป็นฝายทอนน้ำหรือฝายระบายน้ำที่มีลักษณะหน้าตัดเป็นกำแพงตั้ง มียอดสันฝายเป็นลักษณะต่าง ๆ ด้านท้ายฝายเป็นแนวตั้งหรือเกือบเป็นแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 8.10-2



รูปที่ 8.10-2 แสดงหน้าตัดโดยทั่วไปของ Straight drop or Free overfall spillway

ฝายที่มีรูปร่างหน้าตัด Straight drop or Free overfall นี้ สามารถนำไปสร้างเป็นฝายประเภทต่างๆ ได้ทุกประเภท ได้แก่

- 1) ฝายสันตรงทุกแบบ* และฝาย มข. ที่มีรูปแบบมาตรฐานเฉพาะตัว
- 2) ฝายหยัก (Labyrinth spillway)
- 3) Shaft spillway ที่มีตัวฝายเป็นปล่องรูปกล่อง (Box spillway), รูปทรงกระบอก (Cylindrical Spillway) แล้วระบายน้ำผ่านท่อออกสู่ลำน้ำด้านล่าง
- 4) Drop inlet spillway (เป็นฝายสันยาวในกลุ่ม Duckbill) ที่ด้านท้ายน้ำของฝายเป็นรางเปิด อาจมีรูปร่างสันฝายเป็นส่วนโค้งของวงกลม (C-Shape*), รูปเกือกม้า (Horse shoes* หรือ U-Shape* หรือ Bathtub*), รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, รูปปากเปิด (Duckbill) ลักษณะปลายปากโค้ง* และปลายปากเหลี่ยม เป็นต้น

หมายเหตุ ฝาย* เป็นฝายที่สร้างได้ทั้งหน้าตัดที่เป็นฝายสันมน และหน้าตัด Free overfall

8.10.2 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Straight drop or Free overfall spillway

ฝายหน้าตัดลักษณะในกลุ่มนี้จัดเป็นฝายสันสั้น ซึ่งถือว่าอยู่ตรงกลางระหว่างฝายสันคมกับฝายสันกว้าง โดยมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์คล้ายฝายสันคมคือมี Critical depth เหนือสันฝายตำแหน่งเดียว ในขณะที่สันฝายมีความกว้างแต่ไม่กว้างจนเป็นฝายสันกว้าง ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝายขึ้นกับรูปร่างของสันฝาย

ข้อมูลการศึกษาการไหลของฝายกลุ่มนี้มีน้อยมาก เพราะตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เดิมนั้นมีการแบ่งประเภทฝายเป็นฝายสันคมและฝายสันกว้าง เมื่อฝายมีสันที่มีความหนาที่อยู่ระหว่างฝาย 2 ประเภทดังกล่าว จึงมักจะใช้วิธีพิจารณาว่าแนวโน้มของลักษณะฝายจะเป็นลักษณะของฝายประเภทใด ก็จะคำนวณปริมาณน้ำตามวิธีการของฝายประเภทนั้น โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่เป็นค่าเฉลี่ยมาคำนวณ

ในที่นี้จะนำเสนอผลการศึกษา ตลอดจนการเลือกนำค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลมาใช้ในการออกแบบของหน่วยงานต่างๆ พอสังเขป

1) การศึกษาของ G. Peter

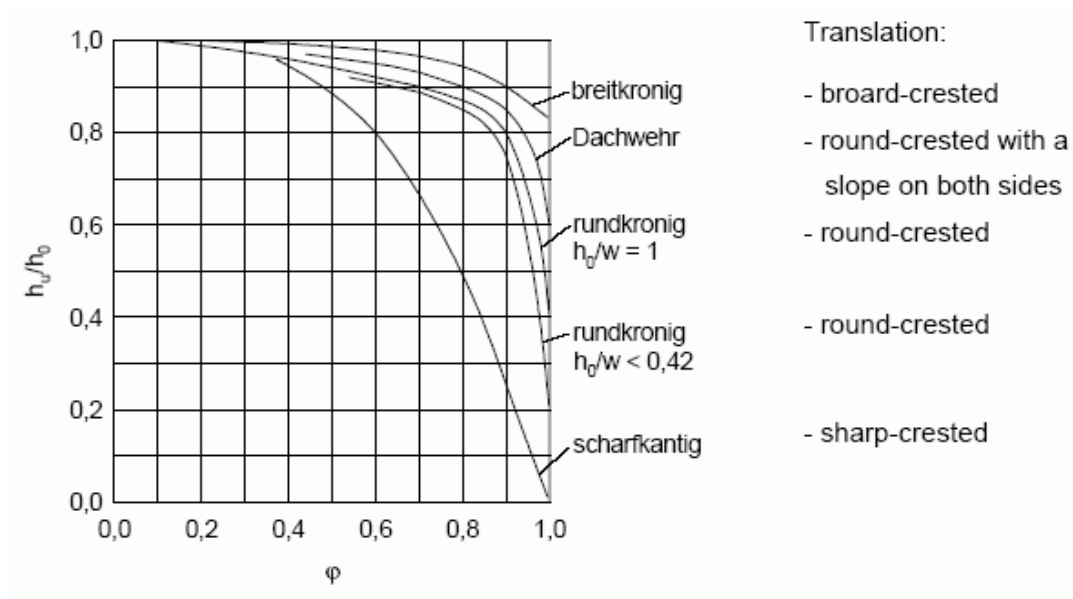
ศาสตราจารย์ G. Peter ชาวเยอรมัน ได้เสนอบทความชื่อ The discharge and run off calculation of weirs under the consideration of dynamic flows ต่อที่ประชุม 7th International Conference on Urban Storm Drainage SuG - Verlagsgesellschaft Hannover, 1996 เพื่ออธิบายการไหลของน้ำผ่านฝายที่มีสันไม่หนา มาก (Small-crested weir) ซึ่งนิยมสร้างเมื่อขนาดของฝายไม่ใหญ่มาก

ผลการศึกษาของ G. Peter ในส่วนของเอกสารที่มีการเผยแพร่เป็นภาษาอังกฤษ เป็นข้อมูลสรุปที่มีเพียง 6 หน้า จึงมีรายละเอียดไม่มาก สารสำคัญถูกตัดทอนไปมาก แต่มีแนวคิดที่น่าสนใจที่จะเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจศึกษาฝายกลุ่มนี้ในโอกาสต่อไป

G. Peter กล่าวว่าในเยอรมันจะใช้สมการของ POLENI ในการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายประเภทต่างๆ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลกรณี Free flow หรือ Suppressed overfall ซึ่งแทนด้วย μ ดังแสดงในตารางที่ 8.10-1 ส่วนกรณี Submerged flow นั้นจะคูณค่าการไหลที่คำนวณด้วยสมการ Free flow ด้วยค่า Φ - Factor ที่สัมพันธ์กับค่า Submergence ratio h_u/h_0 (ความลึกของน้ำเหนือสันฝาย ด้านท้ายน้ำ / ด้านเหนือน้ำ) ดังแสดงในรูปที่ 8.10-4 แต่กรณีการออกแบบระบบน้ำเสียในเยอรมันกำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านฝายเพียงค่าเดียว คือ 0.5 สำหรับฝายทุกประเภทที่ไม่ใช่ฝายสันคม ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าสัมประสิทธิ์การไหลของฝายสันกว้าง จึงไม่เหมาะสมกับฝายที่มีสันไม่หนา

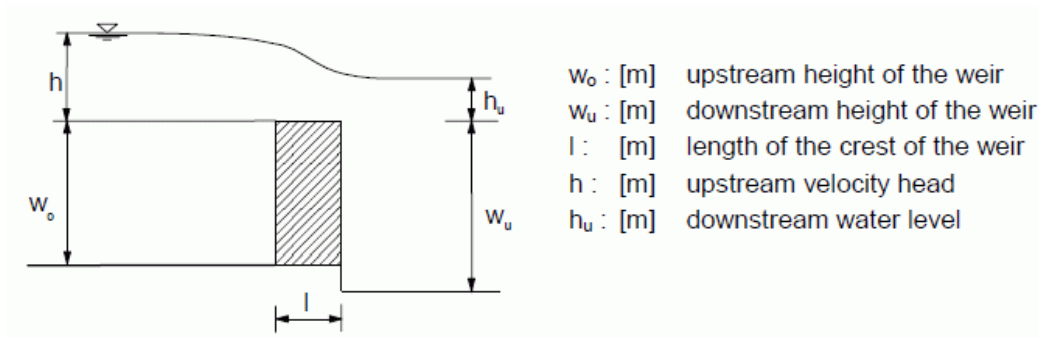
ตารางที่ 8.10-1 แสดงค่า μ - Factor ของฝายประเภทต่าง ๆ

Shape of the crest		μ
	broad-crested weir	0,49-0,51
	broad-crested weir, chamfered	0,50-0,55
	drum gate: perfect round-crested weir	0,65-0,73
	sharp-crested weir with full aeration under the nappe	0,64
	round-crested weir with a slope on the down-stream side	0,75
	round-crested weir with a slope on both sides	0,79



รูปที่ 8.10-3 ค่า ϕ - Factor ที่สัมพันธ์กับค่า Submergence h_u/h_0

G. Peter ตั้งสมมุติฐานว่า ฝายที่มีสันไม่หนามาก (Small crest) จะมีรูปร่างสันฝายอยู่ระหว่างฝายสันคมและฝายสันกว้าง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจึงต้องอยู่ในช่วงระหว่างค่าของฝายสันคมและฝายสันกว้าง จึงไม่ควรใช้ค่า μ - Factor จากตารางที่ 8.10-1 และค่า ϕ - Factor จาก รูปที่ 8.10-3 ได้โดยตรง



รูปที่ 8.10-4 รูปตัดแสดงการไหลของน้ำผ่านฝาย ที่มีสันไม่หนามาก (Small crest)

1.1) การไหลกรณี Free flow หรือ Suppressed overfall

สมการของ POLENI; $Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \phi \cdot \sqrt{2g} \cdot b \cdot h^{3/2}$ ม.³/วินาที

ถ้า $C_h = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} = 2.953\mu$

ดังนั้น $Q = C_h \cdot \phi \cdot b \cdot h^{3/2}$

เมื่อ b : ความยาวของสันฝาย (หรือคือ L ในสมการฝายมาตรฐาน) [ม.]

μ : Factor for free overfall

C_h : ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝาย (หรือคือ C ในสมการฝายมาตรฐาน)

ϕ : ค่าปรับแก้การไหลที่เกิดจากอิทธิพลจากน้ำด้านท้ายฝาย

(สำหรับ Free overfall $\phi = 1$)

จากการที่ฝายมีคุณสมบัติของฝายสันคมและฝายสันกว้างจะได้ว่า

$$C_h = f\left(\frac{h}{w_o}; \frac{h}{l}\right) = 2.953\mu_1\mu_2$$

μ_1 คือค่า Factor การไหล (หรือคือค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล) ของ Small-crested ที่โน้มเอียงไปทาง Sharp crest หาค่าจากสมการของ Rehbock

$$\mu_1 = 0.6034 + 0.0813 \frac{h}{w_o}$$

μ_2 คือค่า Factor การไหลที่โน้มเอียงไปทาง Broad crest หาค่าจากสมการของ G. Peter

$$\mu_2 = 1 - 0.2 e^{-0.6 \left(\frac{h}{l}\right)^{3.06}}$$

จะได้สมการการไหลผ่านฝายกรณี Free flow เป็น

$$Q = 2.953 \mu_1 \mu_2 b h^{3/2}$$

อิทธิพลที่เกิดในส่วนของการเป็น Broad-crested weir ที่แทนค่าด้วย factor μ_2 จะลดอัตราการไหลในส่วนของการเป็น Sharp-crested weir ลงซึ่งมีค่าได้สูงสุด 20 % และหากมีการลบมุมของฝายก็จะเกิดค่า Factor ที่ทำให้อัตราการไหลผ่านฝายเพิ่มขึ้น (ประมาณ 15%)

1.2) การไหลกรณี Submerged flow

Small crest จะมีคุณสมบัติการไหลเป็นแบบ Submerged flow เมื่อเริ่มมีค่า Submergence ratio ระหว่าง $0.80 < h_u/h < 0.87$

จากการทดลองกับฝายที่มีหน้าตัดขนาดต่างๆ ครอบคลุมในช่วง Sharp-crested และ Broad-crested พบว่าอิทธิพลของ Submergence ที่มีต่อคุณสมบัติการไหลที่ทำให้การไหลกรณี Free flow ลดลงด้วย ϕ - Factor จะมีความสัมพันธ์ 3 รูปแบบคือ

$$(a) \quad \phi = f\left(\frac{h_u}{h}; \frac{h}{h_u + W_u}\right)$$

เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

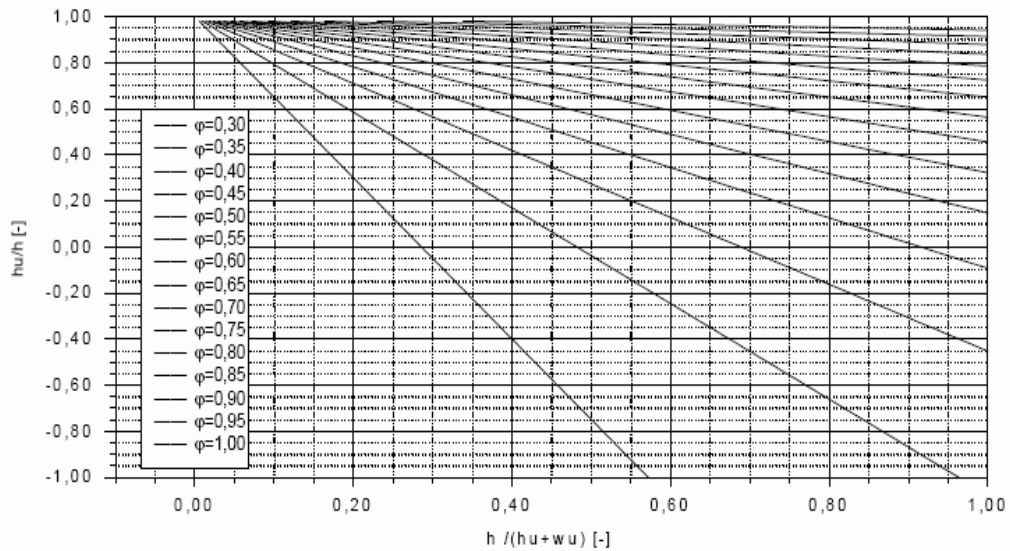
$$\phi = \exp^a \left[\arctan \left(c \left(\frac{1 - \frac{h_u}{h}}{\frac{h}{h_u + W_u}} \right) \right) \right]^b$$

ค่าคงที่ a, b และ c ขึ้นกับความแตกต่างของ h/W_u ที่มีค่าในช่วง 0.25 ถึง 0.35 ซึ่งไม่แสดงข้อมูลค่าคงที่ในเอกสารสรุป ให้ใช้ค่าจากกราฟใน รูปที่ 8.10-5

$$(b) \quad \phi = f\left(\frac{h_u}{h}; \frac{h_u}{h_u + W_u}\right)$$

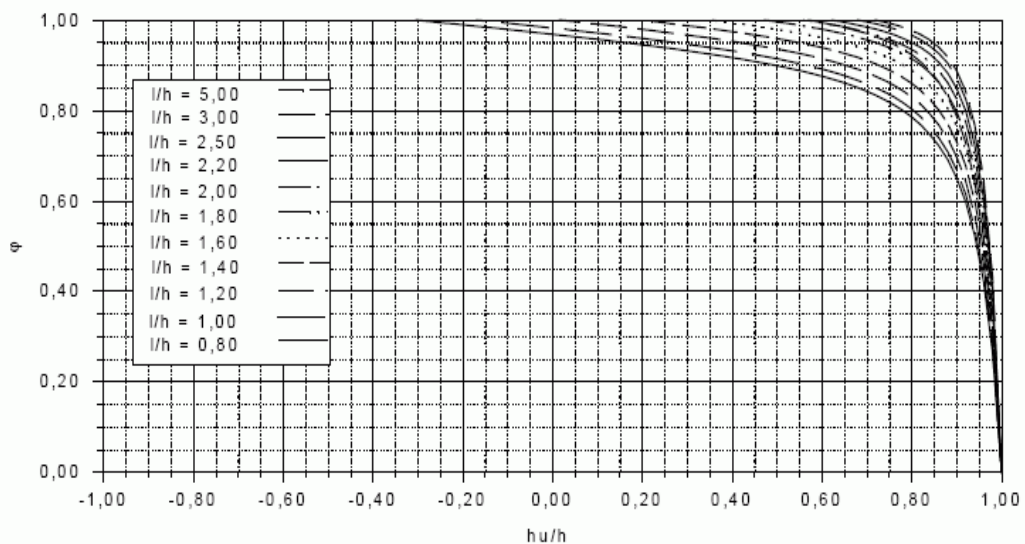
$$(c) \quad \varphi = f\left(\frac{h_u}{h}; \frac{l}{h}\right)$$

หาได้จากกราฟใน รูปที่ 8.10-6



เส้นกราฟเรียงจากบนลงล่างตามค่า φ ในกรอบสี่เหลี่ยม เส้นล่างสุด $\varphi = 1.00$

$$\text{รูปที่ 8.10-5 กราฟ } \varphi = f\left(\frac{h_u}{h}; \frac{h}{h_u + W_u}\right)$$



เส้นกราฟเรียงจากบนลงล่างตามค่า l/h ในกรอบสี่เหลี่ยม เส้นล่างสุด $l/h = 0.80$

$$\text{รูปที่ 8.10-6 กราฟ } \varphi = f\left(\frac{h_u}{h}; \frac{l}{h}\right)$$

2) ผลการศึกษาของ Kraatz และ Mahajan สำหรับฝายสันยาว

Kraatz และ Mahajan (1975) ได้ศึกษาฝายสันยาวทั้ง 3 กลุ่ม คือ ฝายสันเอียง ฝายปากเปิดและฝายหยัก โดยให้เป็นตัวแทนของฝายที่สร้างในทางน้ำ โดยเลือก ฝายปากเปิดและ ฝายหยักมาเพียง Cycle เดียว และฝายแต่ละแบบจะมีโครงสร้างเป็นกำแพงตั้ง ที่มี 2 ลักษณะคือ ไม่ลบบเหลี่ยม และลบบเหลี่ยมโค้งมน (Round crest)

$$Q = \sqrt{2g} C_d L H^{1.5}$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย

L = ความยาวสันฝาย (ม.)

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือหน้าฝาย (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม./วินาที²

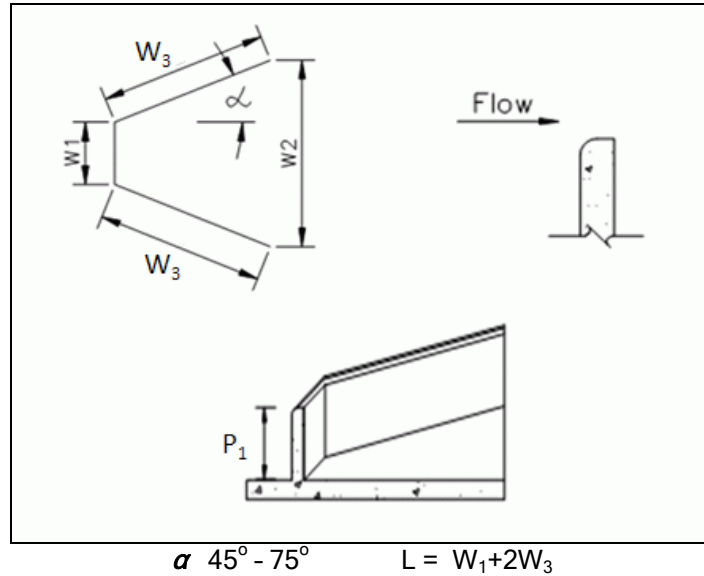
Kraatz และ Mahajan ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_d) ของฝาย สันยาว ดังแสดงในตารางที่ 8.10-2

ตารางที่ 8.10-2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝายสันยาวการศึกษาของ Kraatz และ Mahajan

<u>Crest Type</u>	<u>Weir Type</u>		
	Diagonal	Duckbill	Labyrinth
Unrounded Crest	0.34	0.32	0.31
Rounded Crest	0.38	0.36	0.34

3) กรมชลประทาน

ไกรฤกษ์ อินทร์ชนะนันท์ วิศวกรสำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม กรมชลประทาน ได้ให้คำแนะนำในการออกแบบ Double Side Spillway หรือคือ Duckbill Spillway แบบปลายปากเหลี่ยม ที่ตัวฝายมีลักษณะเป็นกำแพงตั้งดังแสดงในรูปที่ 8.10-7 ไว้ดังนี้



รูปที่ 8.10-7 แสดงมิติของรูปแปลน รูปตัดตัวฝาย Double Side Spillway

การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Double Side Spillway

$$Q = CLH^{1.5}$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย 1.60 – 1.84

อาจใช้ค่าเฉลี่ย 1.82

L = ความยาวสันฝาย = $W_1 + 2W_3$ (ม.)

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือสันฝาย (ม.)

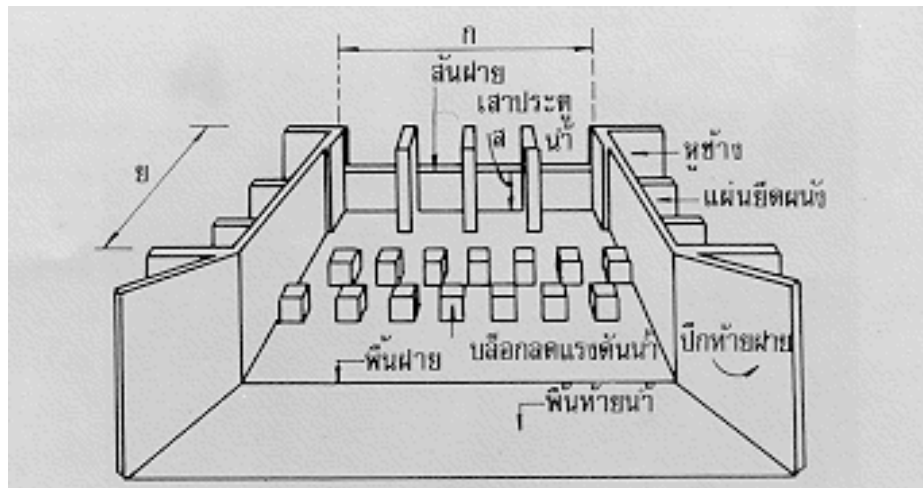
(อ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก Afflux ไม่ควรมากกว่า 1.00 ม.)

***กรณี Side channel spillway (แนวสันฝายเป็นรูปตัว L) ถ้ามีหน้าตัดฝายเป็นกำแพงตั้งเหมือนข้างต้น การคำนวณก็ใช้หลักการและค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเหมือนกัน

ข้อควรระวัง การออกแบบต้องให้การไหลเป็นแบบ Free flow เท่านั้น โดยระดับน้ำด้านท้ายฝายต้องไม่สูงกว่าระดับสันฝายมากกว่า $\frac{2}{3}H$ ซึ่งเป็นค่า Critical depth ของการไหลผ่านฝายแบบ Free flow เพราะถ้าระดับน้ำด้านท้ายฝายสูงกว่า Critical depth คุณสมบัติของฝายสันยาวจะหมดไปจะเป็นลักษณะฝายสั้นกว้าง ที่ความยาว L จะเหลือเพียง W_2 เท่านั้น

4) มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สถาบันแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้ออกแบบฝายขนาดเล็กหลายแบบ จนได้แบบที่ได้ปรับปรุงให้มีความเหมาะสมที่สุด คือ ฝาย มข. 2527 ซึ่งตัวฝายมีลักษณะเป็นกำแพงตั้งค้ำแสดงในรูปที่ 8.10-8



รูปที่ 8.10-8 แสดงลักษณะของฝาย มข.2527

สมการการไหลข้ามฝาย มข.2527

อัตราการระบายน้ำของฝายที่ระดับน้ำต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ การไหลข้ามฝาย โดยสถาบันแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้มีการศึกษาและสามารถเขียนได้ในรูปทั่วไป ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$Q_w = 1.7 W h^{3/2} \quad (\text{ม.}^3/\text{วินาที})$$

โดยที่ W = ความกว้างของสันฝายที่น้ำไหลข้าม (ม.)

(ความยาวรวมของความยาวสันฝายระหว่างตอม่อ)

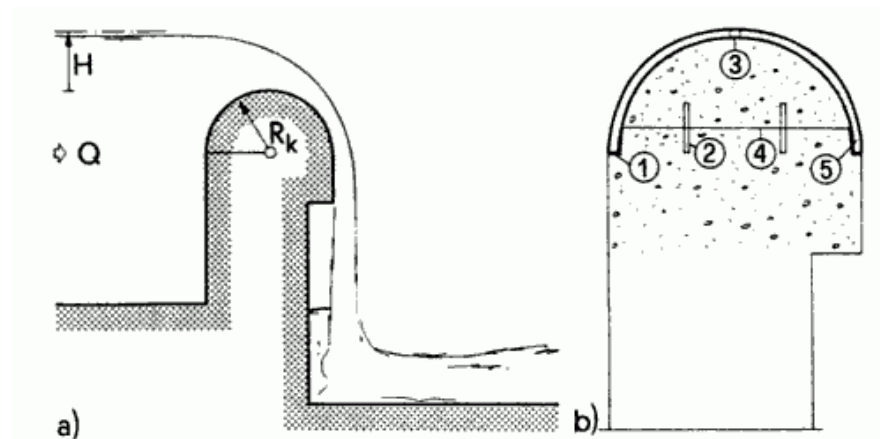
h = ความสูงของน้ำที่ไหลขึ้นสันฝาย (ม.)

จากสมการข้างต้น หากเทียบกับสมการมาตรฐานของฝาย $Q = C L h^{3/2}$

$$C = 1.70, \quad L = W$$

5) Cylindrical Overfall Weir

Willi H. Hager (1992) ได้นำเสนอผลการศึกษา Cylindrical overfall weir ซึ่งเป็นฝายในกลุ่ม Straight drop or Free overfall spillway ที่มีการไหลเป็นแบบ Overfall flow ที่ตัวฝายมีลักษณะเป็นกำแพงที่มีผิวด้านเหนือและท้ายน้ำเป็นแนวตรง ส่วนของยอดสันฝายมีลักษณะเป็นเป็นครึ่งทรงกระบอกวางอยู่บนกำแพง อาจใช้เป็นท่อเหล็ก หรือท่อคอนกรีต รัศมีความโค้ง R_k ซึ่งแสดงในรูปที่ 8.10-9



รูปที่ 8.10-9 รูป a) หน้าตัดของ Cylindrical overfall weir รูป b) รูปขยาย

(1) Support and sealing (2) Bolt (3) Deaeration (4) Construction joint (5) Pipe

การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย

$$Q = C_d L \sqrt{2g} H^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

L = ความยาวประสิทธิภาพ (Effective Length) ของสันฝาย (ม.)

H = ความลึกของน้ำเหนือสันฝายที่คิด Approach Velocity ด้วย (ม.)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านสันฝาย ***

*** ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านสันฝาย: C_d

อาศัยผลการศึกษาของ Hager (1992) ที่พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านสันฝายลักษณะนี้ จะสัมพันธ์กับค่า ของ H และ R_k

ถ้าให้ $\frac{H}{R_k} = \rho_k$

เมื่อ $H/R_k \leq 1.5$ แรงกดดันของที่เกิดจากการไหลของน้ำบนผิวหน้าของฝาย จะไม่เกิด Cavitations หรือเกิดการกัดเซาะผิวหน้าฝายจากฟองอากาศ นั่นคือ H/R_k มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1.5 นั่นเอง

การคำนวณจะได้ค่าที่ถูกต้องเมื่อ $H \geq 7$ ซม. (จะไม่เกิดผลกระทบจากความหนืด และจากความขรุขระของผิวของฝาย)

$$C_d = 0.374 \left(1 + \frac{3\rho_k}{11 + 2.5\rho_k} \right) \quad \text{การไหลแบบ Free Flow}$$

กรณีน้ำไหลผ่านน้อยมาก (< 7 ซม.) $\rho_k \approx 0$

จะได้ $C_d = 0.374$

กรณีน้ำไหลผ่านมากที่สุด $\rho_k = 1.5$

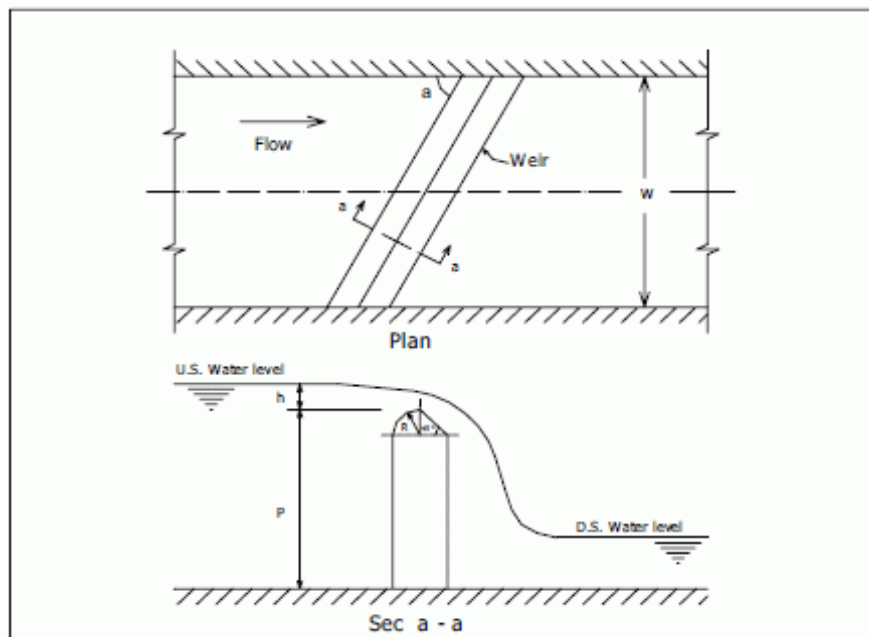
จะได้ $C_d = 0.488$

ดังนั้น C_d จะมีค่าระหว่าง 0.374 ถึง 0.488

เนื่องจากค่า C_d มีช่วงแคบ ดังนั้นการเกิดการไหลแบบ Submerged Flow จะเกิดขึ้นที่ระดับน้ำด้านท้ายน้ำสูงถึงระดับสันฝาย ซึ่งฝายในกลุ่มที่มีการไหลแบบ Free Overfall จึงมักออกแบบให้ไม่เกิดอิทธิพลจากการเกิด Submergence เสมอ

6) Compound Crested Weir

Thair Mahmood Al-Taiee และ Tahssen Ali Hassan Chilmeran แห่ง Research Center of Dams and Water Resources, University of Mosul, Iraq ได้เสนอผลการศึกษาเรื่อง Hydraulic Characteristics of Flow Over Compound Crested Weir ซึ่งเป็นฝายกลุ่ม Straight drop หรือ Free overfall ที่มีสันฝายเป็นแบบผสม (Compound Crested) ระหว่างฝายที่มีสันโค้งแบบ Quarter round และฝายสันคม ดังแสดงในรูปที่ 8.10-10 โดยในการทดลองได้วางแนวของสันฝายทำมุม α กับทิศทางการไหลของน้ำ (เป็น Oblique or Skew weir) เป็นมุม 35° , 45° , 60° และ 90° (ฝายแนวตรงปกติ)



รูปที่ 8.10-10 แสดงแปลน และรูปตัดของ Compound Crested Weir

รายละเอียดของฝาย หน่วย SI

ส่วนโค้งของสันฝาย มีรัศมี = R

ฝายมีความสูง = P

โดยที่ $R = P/12$

ความลึกน้ำที่ไหลผ่านฝาย = h

ฝายมีความหนา = t

แนวทางการศึกษาทดลอง

- ใช้สมการพื้นฐานการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝาย

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H^{1.5}$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย

L = ความยาวสันฝาย (ม.)

H = Total head ของน้ำเหนือสันฝาย (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม./วินาที²

$$C_d = \frac{Q_{act}}{Q_{theo}}$$

Q_{act} = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายที่วัดได้จริง (ใช้เครื่องมือวัดน้ำ)

Q_{theo} = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายที่คำนวณตามทฤษฎี

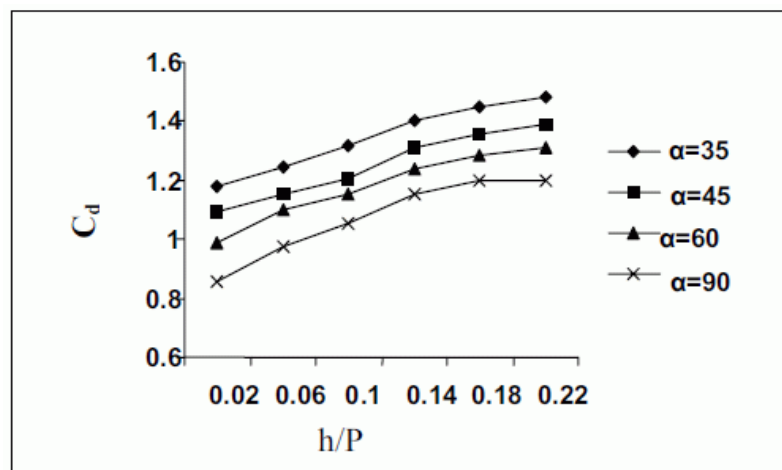
$$Q_{theo} = \frac{2}{3} \sqrt{2gL} H^{1.5}$$

$$C_d = \phi\left(\frac{h}{P}, \frac{R}{P}\right)$$

ผลจากการศึกษา

ได้ผลการทดลองเป็นค่าความสัมพันธ์ของ C_d และอัตราส่วนของ h/P , R/P สำหรับฝายที่แนวสันทำมุม α กับแนวการไหล ดังสมการต่อไปนี้ ซึ่งแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 8.10-11

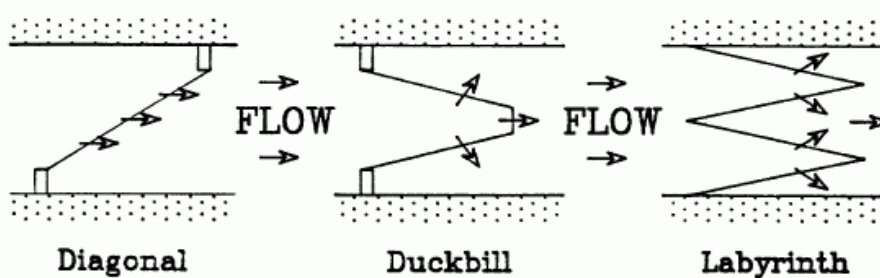
$$C_d = 0.0035 \frac{\left(\frac{h}{P}\right)^{0.2}}{\left(\frac{R}{P}\right)} (\sin \alpha)^{0.3}$$



รูปที่ 8.10-11 กราฟความสัมพันธ์ของ C_d และอัตราส่วนของ h/P , R/P สำหรับฝายที่แนวสันทำมุม α กับแนวการไหล

8.11 ฝายหยัก (Labyrinth Weir)

มีองค์ประกอบสำคัญหลายอย่างในการกำหนดรูปแบบของฝายเพื่อให้น้ำในปริมาณที่ต้องการไหลผ่านไปได้ เช่น อัตราส่วนความสูงของน้ำที่ไหลข้ามฝายกับความสูงของตัวฝาย ลักษณะรูปร่างของสันฝายและความยาวสันฝายเป็นต้น ถ้ามีความจำเป็นต้องระบายน้ำปริมาณมาก ต้องใช้ขนาดความยาวของสันฝายยาวกว่าความกว้างของลำน้ำ เมื่อความกว้างของทางน้ำมีความจำกัดไม่สามารถขยายให้มากกว่านั้นได้ จึงมีการออกแบบเพิ่มความยาวสันฝายในความกว้างของทางน้ำที่จำกัดดังกล่าวด้วยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง จะเรียกฝายที่มีสันฝายยาวกว่าความกว้างของลำน้ำว่าฝายสันยาว (Long Crested Weir) ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ ฝายทแยง (Skew or Diagonal or Oblique Weir), ฝายปากเป็ด (Duckbill Weir or Bathtub Weir) และฝายหยัก (Labyrinth Weir)



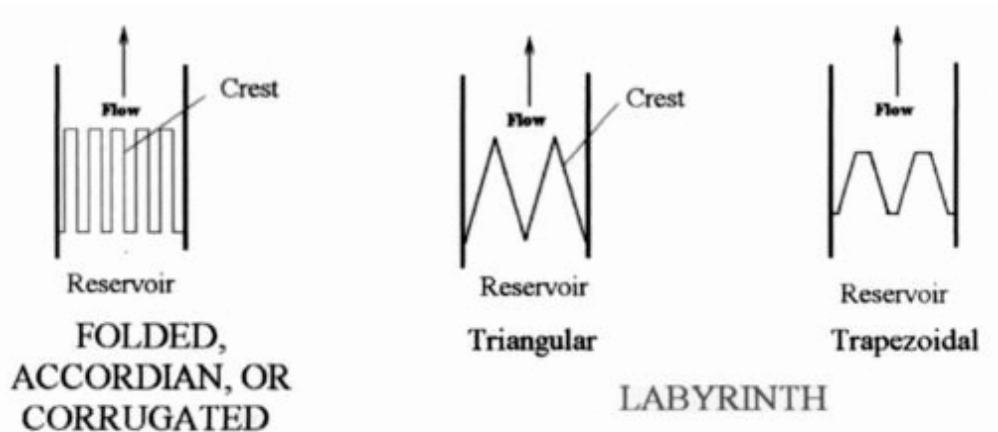
รูปที่ 8.11-1 แสดงแปลนรูปแบบของ Long crested weir 3 กลุ่ม



รูปที่ 8.11-2 แสดง Long crested weir บางรูปแบบที่ติดตั้งในทางน้ำ

ในส่วนของฝายหยักจะมีลักษณะของสันฝายที่เมื่อมองจากด้าน Plan แล้ว จะมีการพับไปพับมาของรูปร่างฝายอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือเป็นการนำเอาฝายรูปทรงนั้นส่วนเดียวที่เรียก 1 Cycle มาเรียงต่อกันเป็นหลายๆ Cycle นั่นเอง เพื่อให้มีความยาวสันฝายยาวพอที่จะระบาย

น้ำนองสูงสุดลงสู่ทางน้ำที่มีความกว้างจำกัดได้อย่างเพียงพอ จึงเรียกฝายแบบนี้ว่า ฝายหยัก หรือ Labyrinth แต่บางครั้งอาจมีการเรียกเป็นอย่างอื่น โดยถ้าเป็น Cycle ของรูป U-Shape หรือ Bathtub Shape หรือ รูปสี่เหลี่ยม อาจเรียก Corrugated หรือ Accordion หรือ Folded หรือ Piano Keys Weirs ถ้าเป็น Cycle ของรูปสามเหลี่ยม หรือ สี่เหลี่ยมคางหมู หรือ Duckbill จะเรียก Labyrinth Weir เป็นต้น



รูปที่ 8.11-3 แปลนฝายหยักบางรูปแบบ

Kraatz and Mahajan (1975) ได้ศึกษาฝายสันยาวทั้ง 3 กลุ่ม โดยให้เป็นตัวแทนของฝายที่สร้างในทางน้ำ โดยเลือกฝายปากเปิดและฝายหยักมาเพียง Cycle เดียว และฝายแต่ละแบบจะมีสันฝาย 2 ลักษณะคือ สันฝายที่โค้งมน และสันฝายที่เป็นเหลี่ยม โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Q = L \sqrt{2g} C_d L H^{1.5}$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านฝาย

L = ความยาวสันฝาย (ม.)

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือสันฝาย (ม.)

Kraatz และ Mahajan ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 8.11-1 แม้ว่าค่า C_d ที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยค่าเดียว ไม่สามารถใช้ประกอบการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายให้ครอบคลุมช่วงความลึกของน้ำที่ระดับต่างๆ ได้ แต่ก็เพียงพอสำหรับการพิจารณาออกแบบเบื้องต้นฝายประเภทดังกล่าวได้ดี และเป็นที่ยอมรับเพราะเป็นแนวคิดใหม่ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบที่ครอบคลุมฝายสันยาวทั้งหมด

ตารางที่ 8.11-1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝายสันยาวการศึกษาของ Kraatz และ Mahajan

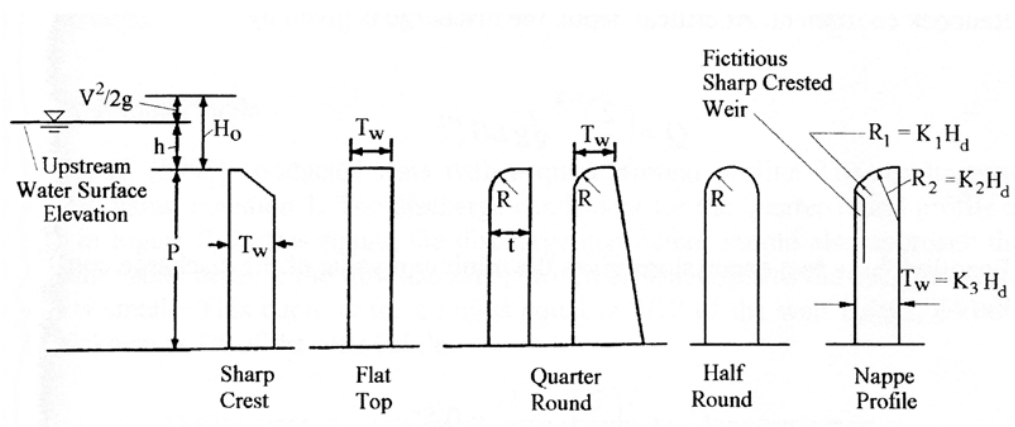
<u>Crest Type</u>	<u>Weir Type</u>		
	Diagonal	Duckbill	Labyrinth
Unrounded Crest	0.34	0.32	0.31
Rounded Crest	0.38	0.36	0.34

8.11.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบเป็นฝายหยัก

- 1) วัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความสามารถของการระบายน้ำของทางระบายน้ำล้นหรือฝายจากความกว้างของทางน้ำปกติที่แคบได้มากขึ้น ซึ่งทำให้สร้างฝายได้สูงขึ้นด้วย
- 2) ใช้เป็น Drop Structure ในระบบส่งน้ำระบายน้ำที่เป็นอาคารวัดปริมาณน้ำด้วย
- 3) ใช้เพิ่มปริมาณอากาศในน้ำ (เพิ่มออกซิเจน) เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของน้ำในทางน้ำ เพราะการไหลผ่านฝายประเภทนี้จะเป็นลักษณะ Aerating Flow คือเกิดฟองอากาศปนไปกับน้ำเมื่อมีการไหลผ่านสันฝายออกไปและขณะน้ำกระทบพื้นด้านล่างทำปริมาณมาก

8.11.2 รูปแบบของสันฝายหยัก

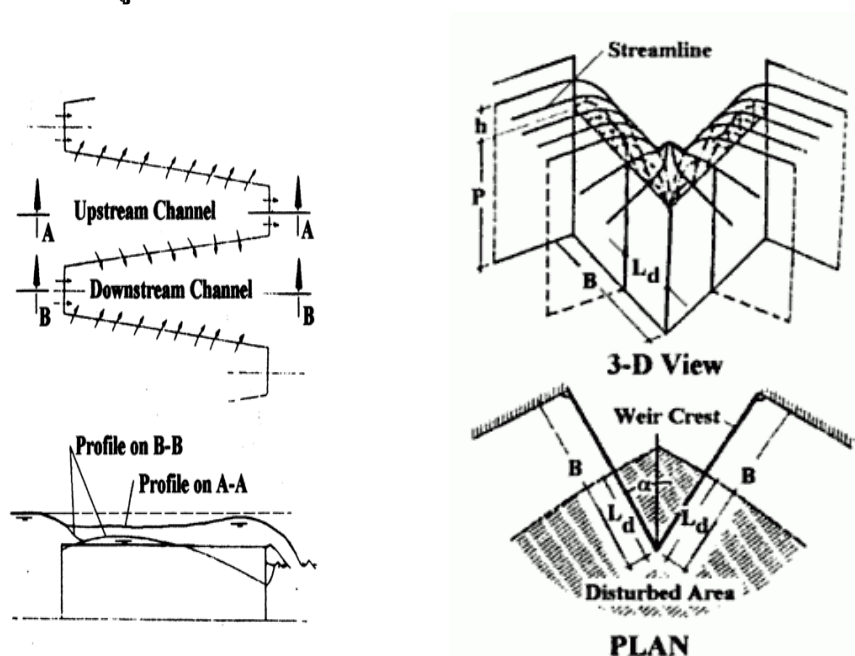
เนื่องจากการไหลของน้ำผ่านฝายหยักเป็นแบบ Free overfall ฝายหยักจะมีรูปแบบของสันฝายลักษณะกำแพงตั้งหลายรูปแบบตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 8.11-4



รูปที่ 8.11-4 ลักษณะรูปแบบสันของฝายหยักแบบต่าง ๆ

8.11.3 ลักษณะการไหลของน้ำผ่านฝายหัก

จากการที่ฝายหักมีการพับไปพับมา ตำแหน่งของสันฝายและลักษณะการไหลจึงอาจมีได้ 3 รูปแบบ คือ ตั้งฉากกับทิศการไหล (การไหลของฝายปกติ Normal Spillway Flow), ขนานกับทิศการไหล (Side Channel Spillway Flow) และทำมุมกับทิศการไหล (Skew Spillway Flow) และเนื่องจากฝายหักประกอบด้วยสันฝายที่มีมุมหักในแนวแปลน การไหลของน้ำที่ผ่านสันฝายบริเวณที่เป็นส่วนมุมหักนี้และบริเวณใกล้เคียงจึงต่างจากการไหลของน้ำที่ผ่านสันฝายบริเวณที่เป็นเส้นตรง การไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวหนึ่งของสันฝาย ความยาวนี้เรียกว่า Nappe Interference (L_d) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสูงของน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย ความสูงของฝาย และมุมของฝาย โดยในบริเวณ L_d นี้ น้ำจะมีการอัดตัวกัน มีผลให้น้ำไหลข้ามฝายได้น้อยลง ซึ่งแสดงตามรูปที่ 8.11-5



รูปที่ 8.11-5 แสดงลักษณะของฝายหักบางรูปแบบ

เมื่อ h = ความสูงของน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย หรือ Head ของน้ำด้านเหนือน้ำของฝาย

H_0 = Total Head (หรือ $h + \text{Velocity head, } (V^2/2g)$)

P = ความสูงของฝาย

W = ความกว้างของฝาย

L = ความยาวสันฝายของฝายหัก

B = ความยาวด้านข้างสันฝายหักที่เอียงทำมุมกับทิศน้ำไหล

Shape = รูปร่างของฝายหัก

α = มุมของกำแพงด้านข้างของฝาย

L_d = Nappe Interference ส่วนที่มีการไหลที่ทับซ้อนกัน = $f(h/p, \alpha)$

C หรือ $C(l)$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของการรบกวนกันของการไหล = C_r / C_d

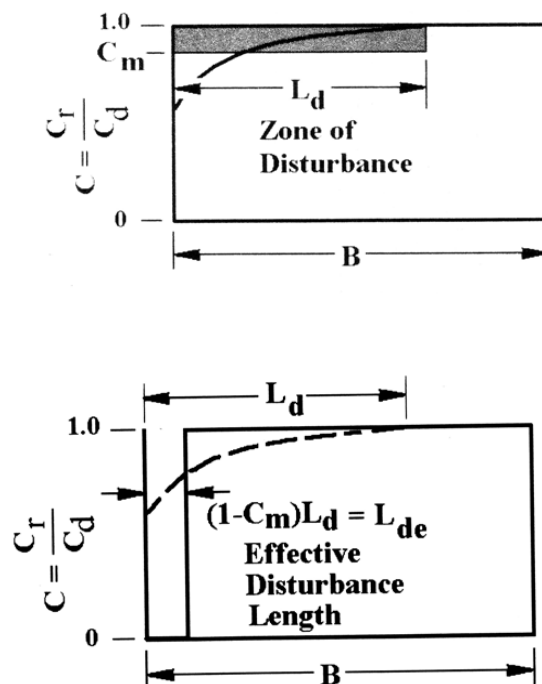
C_r = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายที่มีค่าลดลงจากการรบกวนกันของการไหล

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายเมื่อไม่คิดการรบกวนกันของการไหล (ค่าจากฝายวัดน้ำสันตรงอื่นๆ ที่มีความยาวสันเท่าฝายหยักที่ใช้วัดเทียบกัน)

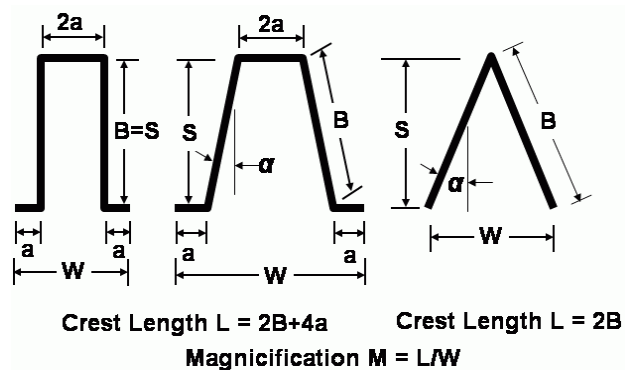
C_m = ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของการไหลที่ลดลงจากการรบกวนกันของการไหล

N.Hay และ G.Taylor ศึกษาพบความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลผ่านฝายหยักสรุปได้ว่า

$$Q = f(h/P, L/W, \text{Shape})$$



รูปที่ 8.11-6 แสดงการเกิด Nappe Interference



รูปที่ 8.11-7 แสดงรูปร่างสันฝาย 1 Cycle ของฝายหยัก

ผลจากการศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับฝายหยักทำให้ทราบว่ามุมของฝายกับทิศทางการไหลด้านเหนือน้ำมีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำที่ไหลข้ามฝายเป็นอย่างมาก

สำหรับฝายสามเหลี่ยมมุมที่คำนวณได้จากสมการนี้คือมุมสูงสุดที่จะสร้างได้

$$\alpha_{\max} = \arcsin \left(\frac{W}{L} \right)$$

สำหรับมุมของฝายรูปสี่เหลี่ยมคางหมูนั้นจะเป็น

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{W - 4a}{L - 4a} \right)$$

8.11.4 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายหยัก

ในการออกแบบฝายหยักนั้นอาจดำเนินการได้ 2 ลักษณะ คือ

1) การออกแบบเป็นฝายหยักมาตรฐานภายใต้รูปแบบและข้อกำหนดตามผลการศึกษานักชลศาสตร์ที่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ซึ่งเราสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายมาตรฐานมาใช้ในการคำนวณได้เลย ซึ่งอาจจะระบุไว้ในแบบก่อสร้าง หรือสอบถามผู้ออกแบบได้

2) การออกแบบที่ไม่ใช้รูปแบบข้อกำหนดที่เป็นฝายมาตรฐาน แต่เป็นการออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างออกไป เป็นฝายที่มีรูปแบบลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งกรณีเช่นนี้จะต้องมีการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์และผลกระทบต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการคำนวณจึงให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจากผลการศึกษา ที่อาจจะระบุไว้ในแบบหรือระบุไว้ในเอกสารรายงานผลการศึกษา

อนึ่ง ฝายที่มีขนาดใหญ่หรือเป็นฝายที่มีความสำคัญ มักมีการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ทราบข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรวมถึงข้อมูลการไหลของน้ำผ่านฝายด้วย

เสมอ และเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จจะมีการสอบเทียบอาคารเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลหรือหาเป็นอัตราการไหลเทียบกับระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่ไหลผ่านฝาย (Discharge Curve หรือ Q-H Curve) ตลอดจนศึกษาผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นจริงเสมอ เพื่อเป็นข้อมูลในการบริหารจัดการน้ำและข้อมูลทางวิชาการที่จะใช้พัฒนาการออกแบบฝายในภายหน้าต่อไป

ในคู่มือนี้จะเสนอการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายหักตามรูปแบบฝายมาตรฐานโดยใช้ข้อมูลผลการศึกษาที่นิยมใช้ในการออกแบบฝายหักทั่วไปเป็นแนวทางการคำนวณ

การศึกษาชลศาสตร์การไหลของฝายหักมีนักชลศาสตร์หลายท่านได้เสนอผลการศึกษาและกำหนดแนวทางการออกแบบ เป็น Design Curve ที่เกี่ยวข้องไว้ ได้แก่

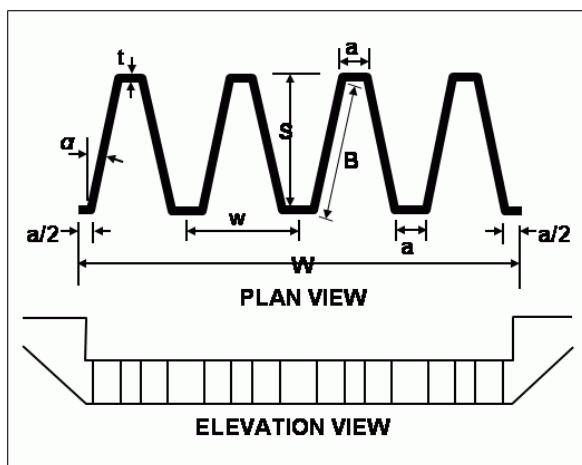
- Hay และ Taylor (1970) ได้ร่วมกันศึกษาและเสนอวิธีการออกแบบฝายหักรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู
- Darvas (1971) ได้ศึกษาฝายหักรูปต่างๆ และสร้างชุดกราฟที่ใช้สำหรับการออกแบบฝายหัก
- Lux และ Hinchliff (1984) ได้ศึกษาฝายหัก 1 cycle โดยเปรียบเทียบกับ การไหลผ่าน Flume และเสนอค่าความสัมพันธ์ของ Discharge Coefficient กับ Total Upstream Head
- Tullis และคณะ (1995) ได้ศึกษาฝายหักรูปแบบต่างๆ ลงรายละเอียดปลีกย่อยมากขึ้น โดยศึกษาฝายที่มีมุมหักแตกต่างกันระหว่าง 6 – 18 องศา (ต่อมาได้มีการศึกษาเพิ่มเติม จนถึง 90 องศา)
- Falvey ได้นำผลการศึกษานักชลศาสตร์ต่างๆ มาคำนวณเปรียบเทียบกับ ผลการศึกษาแบบจำลองของฝายหักหลายแห่งที่ได้ก่อสร้างแล้ว มีข้อสรุปว่า วิธีการที่ Tullis เสนอเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการออกแบบและคำนวณปริมาณน้ำที่สุด

ดังนั้นคู่มือนี้จึงขอนำเสนอวิธีการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายหักเฉพาะวิธีการของ Tullis วิธีเดียว

8.11.5 ข้อมูลผลการศึกษาของ Tullis ที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายหัก

ผลการศึกษาที่สร้างเป็น Design Curve ของ Tullis ไม่ได้กำหนดว่าใช้กับฝายหักรูปแบบใด จึงใช้ได้กับฝายหักรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดย Curve นี้พิจารณา มุมเอียงของกำแพงฝายซึ่งทั้งรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมูก็จะมีมุมเอียงลักษณะเดียวกัน

ความแตกต่างจะอยู่ที่ความกว้าง **a** ของส่วนยอดของฝาย ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย หักเพราะส่วนนี้จะทำให้ความยาวสุทธิของสันฝายสั้นลง ทำให้ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายได้น้อยลง จึงควรให้ความกว้าง **a** น้อยที่สุด (ควรเป็น 1 หรือ 2 เท่าของความหนาของฝาย) อนึ่งเมื่อระยะ **a** มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวสันฝายส่วนอื่นๆ ทำให้ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายหักรูปสามเหลี่ยมกับรูปสี่เหลี่ยมคางหมูต่างกัน ไม่เกิน 10 %



รูปที่ 8.11-8 แสดงฝายหักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทั่วไป

การคำนวณใช้สมการมาตรฐานของฝายทั่วไป

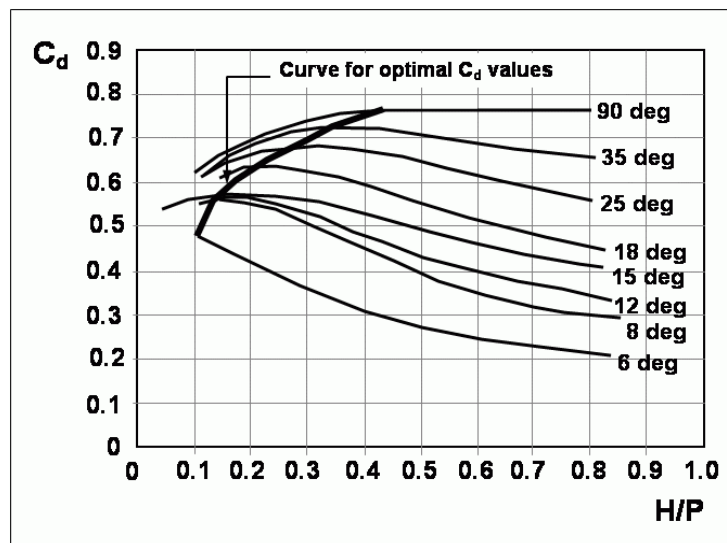
$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H^{1.5}$$

$$C_d = A + B\left(\frac{H}{P}\right) + C\left(\frac{H}{P}\right)^2 + D\left(\frac{H}{P}\right)^3 + E\left(\frac{H}{P}\right)^4$$

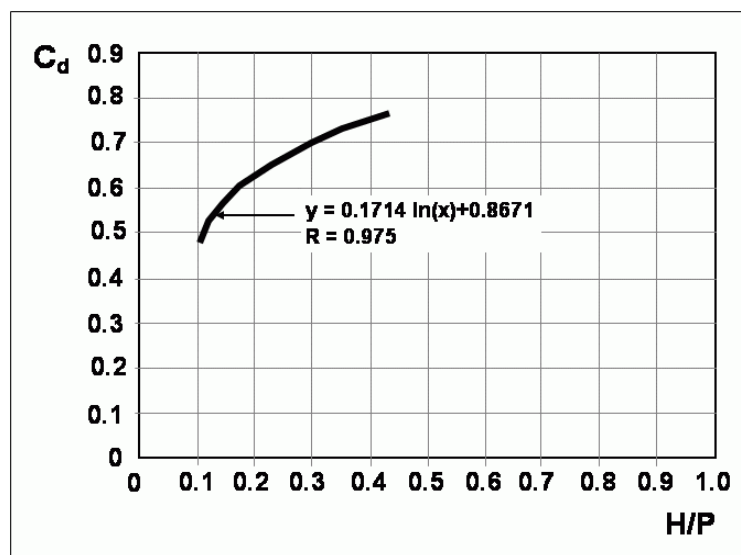
การหาค่า C_d ของฝายหักของ Tullis ตามสมการข้างต้นนั้น กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ A, B, C, D, E ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.11-2 และได้สรุปผลเป็น Design Curve ตามรูปที่ 8.11-9 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายที่มีมุมของกำแพงด้านข้างของฝาย (α) ขนาดต่าง ๆ

ตารางที่ 8.11-2 Table of Coefficient

α	6°	8°	12°	15°	18°	25°	35°	90°
A	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
B	-0.24	1.08	1.06	1.00	1.32	1.51	1.69	1.46
C	-1.20	-5.27	-4.43	-3.57	-4.13	-3.83	-4.05	-2.56
D	2.17	6.79	5.18	3.82	4.24	3.40	3.62	1.44
E	-1.03	-2.83	-1.97	-1.38	-1.50	-1.05	-1.10	0



รูปที่ 8.11-9 Design Curve ของ Tullis ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายหักทั่วไป



รูปที่ 8.11-10 Curve of Optimum C_d

จาก Design Curve ในรูปที่ 8.11-9 กราฟแต่ละเส้นจะมีค่าในช่วงต้นที่มีค่า H/P น้อยๆ จะเป็นช่วงที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลสูงสุด เมื่อเชื่อมต่อจุดสูงสุดของกราฟแต่ละเส้น จะได้ กราฟค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลสูงสุด (Curve of Optimum C_d) ดังแสดงในรูปที่ 8.11-10 ซึ่งสามารถใช้ประกอบการพิจารณาในการออกแบบว่า สัมประสิทธิ์ของการไหลสูงสุดของฝายหักนั้นจะเกิดที่ H/P มีค่าระหว่าง 0.10 ถึง 0.45 โดยกำหนดเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

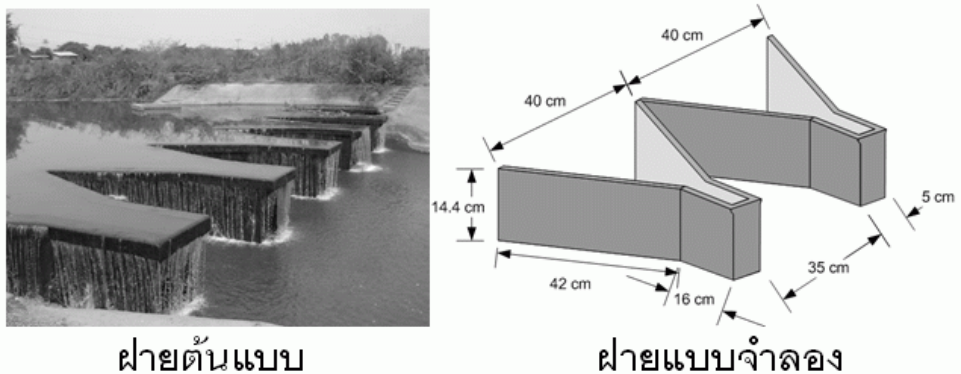
The Optimum C_d :

$$C_d = 0.1714 \ln\left(\frac{H}{P}\right) + 0.8671$$

ฝายหยักนั้นจะออกแบบให้มีการไหลเป็นแบบ **Free Flow** เสมอ ทั้งนี้เพราะหากระดับน้ำด้านท้ายน้ำอยู่สูงกว่าระดับสันฝายเมื่อไร ฝายหยักจะมีคุณสมบัติการไหลที่เปลี่ยนไป จะเป็นเสมือนฝายสันกว้างที่มีความยาวสันฝายเท่ากับส่วนกว้างที่สุดของตัวฝายในทางน้ำหรือระยะระหว่างปลาย 2 ข้างของฝายไปทันที

8.11.6 ฝายหยักกับการไหลแบบ **Submerged flow**

เชษฐพงศ์ นันทิทรภัก ได้ศึกษา ชลศาสตร์การไหลด้วยแบบจำลองทางกายภาพของฝายแล็บบิรินทร์ ที่มีต้นแบบมาจากฝายแม่ร่องน้อย อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน ซึ่งเป็นฝายหยักที่มีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 8.11-11



รูปที่ 8.11-11 แสดงฝายต้นแบบและแบบจำลองฝายแม่ร่องน้อย อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน

ผลการศึกษา สรุปได้ว่า

1) กรณีการไหลแบบอิสระ (Free flow)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_d) จากสมการ

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} L \sqrt{2g} H_1^{1.5}}$$

Q = อัตราการไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

C_d = สัมประสิทธิ์ของการไหล

H_1 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 ม./วินาที²)

โดยเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจะมีค่าลดลง และ C_d จะมีค่าในช่วง 0.35 - 0.55

2) การไหลแบบจม (Submerged flow)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_s) จากสมการ

$$C_s = \frac{Q}{LH\sqrt{2gH_d}}$$

Q = อัตราการไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

C_s = สัมประสิทธิ์ของการไหลแบบจม

H_1 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ (ม.)

H_2 = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ (ม.)

H_d = ผลต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับด้านท้ายน้ำ = $(H_1 - H_2)$ (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 ม./วินาที²)

ค่า C_s จะมีค่าในช่วง **0.32 - 0.41**

3) ช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหลจากการไหลแบบอิสระเป็นการไหลแบบจม

เมื่อค่า Submergence ratio H_2/H_1 น้อยกว่า **0.57** การไหลจะเป็นแบบอิสระ

เมื่อค่า Submergence ratio H_2/H_1 มากกว่า **0.57** การไหลจะเป็นแบบจม โดยฝายแล้บบีร์นหรือฝายหยักจะเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแบบฝายสันกว้าง

8.12 Shaft spillways or Drop inlet spillways

8.12.1 ลักษณะของ Shaft spillways

Shaft spillway เป็นทางระบายน้ำล้นที่มีลักษณะเป็นปล่องแนวดิ่ง โดยส่วนบนสุดปากปล่องเป็นตัวฝายเพื่อรับน้ำลงสู่ท่อที่อยู่ในแนวดิ่งหรือแนวเอียง จากนั้นจึงระบายน้ำออกสู่อาคารสลายพลังงานด้านท้ายผ่านท่อที่วางในแนวราบ อาจแยกส่วนองค์ประกอบได้ดังนี้

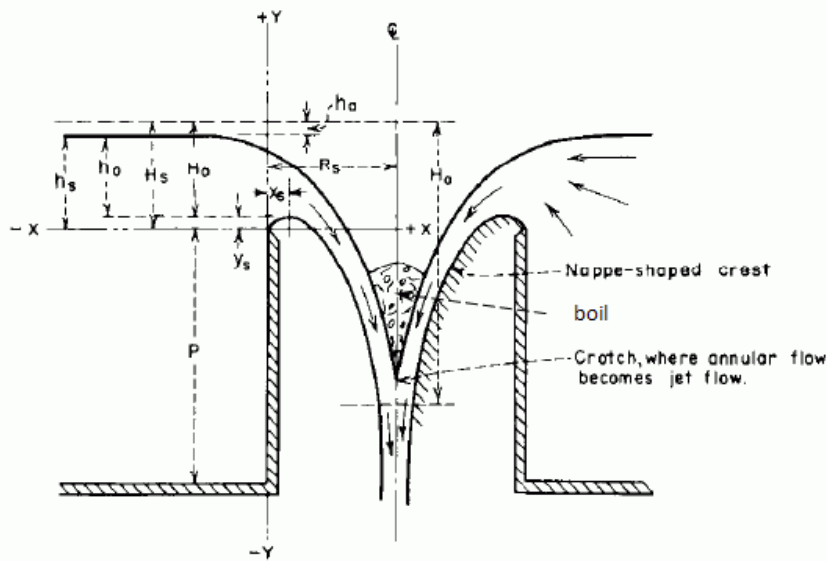
1) **Spillway section** หรือส่วนของปากทางระบายน้ำล้น เป็นส่วนที่เป็นปากของทางน้ำเข้าที่ตั้งในแนวดิ่ง มีลักษณะเป็นสันฝายคอนกรีตรูปทรงต่างๆ เช่น รูปวงกลม เรียก **Morning glory spillway** รูปสี่เหลี่ยม เรียก **Box spillway** (ทั้ง 2 แบบนี้จะนิยมสร้างมาก) นอกจากนี้จะมีรูปทรงอื่นๆ เช่น รูปหกเหลี่ยม รูปส่วนของวงกลม ฯลฯ

2) **Transition section** เป็นส่วนเชื่อมต่อปากทางระบายน้ำล้นแบบ **Morning glory** กับปล่องแนวดิ่งหรือแนวเอียง (**Vertical or Inclined shaft**) ที่ค่อยๆ เปลี่ยนรูปร่างจากรูปทรงของปากทางระบายน้ำล้นไปเป็นรูปท่อกลม ส่วนกรณี **Box spillway** อาจไม่มีส่วนนี้ โดยตัวฝายและปล่องรับน้ำจะเป็นส่วนเดียวกัน

3) ท่อระบายน้ำออกสู่ด้านท้าย โดยจะเชื่อมต่อปล่องแนวดิ่งหรือแนวเอียงที่เป็นท่อกลมด้วยท่อโค้งเพื่อปรับแนวท่อให้เป็นแนวราบเพื่อระบายน้ำลงสู่ลำน้ำด้านท้ายต่อไป

8.12.2 หลักการของ Shaft Spillway

พิจารณา รูปที่ 8.12-1 ซึ่งแสดงรูปแบบพื้นฐานของ **Shaft spillway** ที่มาจากรายส้นคมที่เป็นท่อกลมแนวดิ่ง เมื่อมีระดับน้ำเหนือสันฝายน้อยๆ น้ำจะไหลล้นข้ามสันฝายลงสู่กลางท่อในลักษณะแผ่นน้ำ (**Nappe**) ที่มีขอบเขตผิวบนและผิวล่างคล้ายกรณีฝายสันคมทั่วไปตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และหากระดับน้ำเหนือสันฝายสูงเพิ่มขึ้นอัตราการไหลก็จะเพิ่มขึ้น **Nappe** ก็จะเพิ่มขนาดและเปลี่ยนตำแหน่ง เมื่อถึงตำแหน่งหนึ่ง **Nappe** ของแต่ละด้านจะมาพบกันแล้วรวมกันเป็นลำของน้ำ (**Jet**) เรียกตำแหน่งนี้ว่า **Crotch** และหากระดับน้ำเหนือสันฝายเพิ่มสูงขึ้นอีก ขนาดของลำ **Jet** ก็จะใหญ่ขึ้น ตำแหน่ง **Crotch** ก็จะยกตัวสูงขึ้น และน้ำที่อยู่เหนือ **Crotch** จะมีลักษณะคล้ายเดือดพล่าน ซึ่งเรียกว่า **Boil** ถ้ายังระดับน้ำเหนือสันฝายยังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ **Crotch** และ **Boil** ก็จะขยับตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งจะเกิดปรากฏการณ์ **Flood out** คือทั้ง **Crotch** และ **Boil** จะหายไป มองเห็นเพียงน้ำกระเพื่อมๆ เท่านั้น



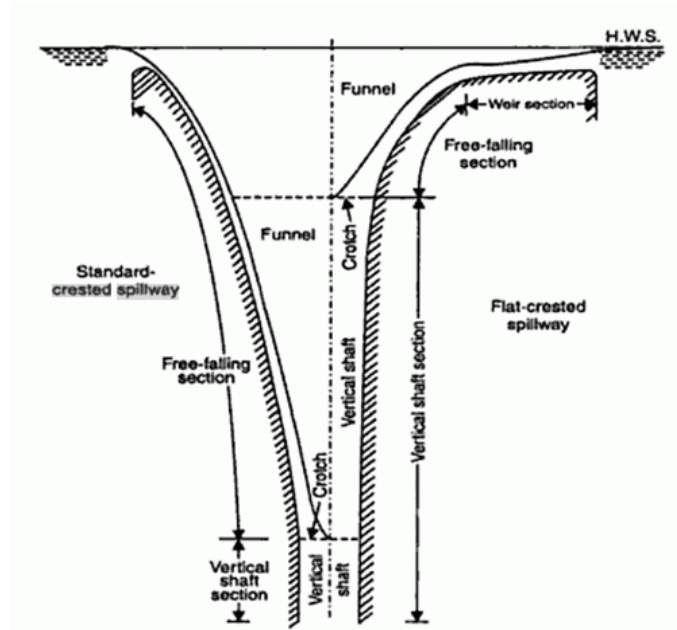
รูปที่ 8.12-1 แสดงรูปแบบพื้นฐานของ Shaft spillway มาจากท่อกลมมีสันคม

การไหลของน้ำข้างต้นเมื่อระดับน้ำยังต่ำจะไหลผ่านสันฝายและ Transition ในลักษณะ **Free flow** จนกระทั่งระดับน้ำสูงขึ้น **Crotch** และ **Boil** ขยับตัวสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง การไหลจะเกิดผลกระทบเนื่องจาก **Submergence** และเมื่อถึงจุด **Flood out** การไหลของน้ำจะถูกควบคุมด้วย **Jet flow** หรือรูปร่างของ **Transition** โดยน้ำไหลเต็มท่อ (ถ้ารูปร่างของ **Transition** ไม่พอดีกับรูปร่าง **Jet**)

Shaft spillway มักออกแบบหน้าตัดของสันฝายให้มีรูปร่างเหมือนผิวโค้งด้านล่างของ **Nappe** โดยให้มีขนาดปากสันฝาย และขนาดช่องรับน้ำแนวดิ่งให้เพียงพอที่จะรองรับการไหลให้เป็นแบบ **Free flow** เสมอ จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการไหลที่เกิดสภาวะ **Submergence** เพราะการไหลลักษณะดังกล่าวน้ำจะไหลเต็มท่อด้วยความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้เกิด **Cavitation** คือจะเกิดฟองอากาศที่ผิวหน้าของน้ำกับผนังคอนกรีต ถ้าเกิดขึ้นมากจะเกิดการกระแทกของฟองอากาศจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง และเกิดการกัดทำลายผิวคอนกรีต ทำให้เป็นอันตรายต่อความมั่นคงของตัวฝาย กรณีเช่นนี้อาจป้องกันด้วยการติดตั้งท่อเพื่อระบายอากาศออกไป

8.12.3 Morning Glory Spillway

Morning glory spillway เป็น **Shaft spillway** ที่มีสันฝายเป็นรูปร่างกลม อาจออกแบบรูปตัดสันฝายหรือปากได้เป็น 2 ชนิดคือ



รูปที่ 8.12-2 สันของ Morning glory spillway อาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ
Standard crest spillway (รูปด้านซ้าย) และ Flat crest spillway (รูปด้านขวา)

1) Standard crest spillway มีสันฝายเป็นรูปหน้าตัดที่สอดคล้องกับรูปร่างส่วนโค้งผิวด้านล่างของ Nappe (รูปร่างขอบเขตของแผ่นน้ำที่ล้นข้ามสันฝายออกไป) ซึ่งเป็นการไหลผ่านสันฝายลักษณะของฝายสันคม ซึ่ง USBR ได้กำหนดรูปแบบหน้าตัดฝายตามรูปแบบของ Standard nappe เอาไว้ การออกแบบก่อสร้างส่วนใหญ่มักสร้างสันฝายแบบนี้

2) Flat crest spillway ปรับส่วนสันฝายหรือปากทางรับน้ำให้แบนราบ ทำให้การไหลเป็นลักษณะคล้ายการไหลของฝายสันกว้าง

8.12.3.1 รูปแบบการไหลของ Morning glory spillway

USBR (1973) ได้ศึกษารูปแบบการไหลของ Morning glory spillway พบว่าจะมีได้ 3 รูปแบบ ซึ่งแสดงตามรูปตัดแสดงการไหลและกราฟ H-Q ในรูปที่ 8.12-3 ได้แก่

1) Entrance or Crest control เป็นรูปแบบตามหลักการของ Shaft spillway ที่มีการไหลเป็นแบบ Free flow ที่ทุกระดับความลึกเหนือสันฝาย และท่อระบายน้ำออกสู่ด้านท้ายน้ำมีขนาดเพียงพอที่จะระบายน้ำออกไปในลักษณะการไหลในทางน้ำเปิดอย่างอิสระ (น้ำไหลไม่เต็มท่อ) ซึ่งเป็นช่วงของเส้นกราฟ ab

2) Orifice or Tube control เกิดเมื่อระดับน้ำเหนือสันฝายสูงจนการไหลไม่เป็นลักษณะการไหลสั้นข้ามสันฝายอย่างอิสระ แต่เป็นการไหลลักษณะของลำของน้ำที่ผ่านปากฝายออกไป ซึ่งเป็นลักษณะการไหลผ่านช่อง Orifice ขนาดใหญ่นั้นเอง แต่น้ำยังไม่ไหลเต็มท่อทั้งในส่วนปล่องแนวตั้งและท่อแนวราบที่ระบายน้ำออกด้านท้าย น้ำไม่ท่วมปากด้านท้ายท่อ เป็นช่วงของเส้นกราฟ cd ที่เกิดต่อจากเส้นกราฟ ab ที่ตำแหน่ง g

3) Exit control or Full pipe flow เป็นการไหลที่น้ำไหลเต็มในทุกส่วนหน้าตัดของท่อกับประกอบของฝาย รวมทั้งน้ำท่วมท้ายท่อด้วย เป็นช่วงของเส้นกราฟ ef ที่เกิดต่อจากเส้นกราฟ cd ที่ตำแหน่ง h

ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ที่อัตราการไหล (Q) จะแปรผันตรงกับระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) โดยรูปแบบการไหลแบบ Entrance control ที่มีการไหลแบบ Free flow โดยจะมีอัตราการไหลเริ่มจากน้อยๆ เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้น การไหลจะเปลี่ยนรูปแบบเป็น Orifice control และ Exit Control ตามลำดับ โดยอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ช่วงการไหลระหว่าง Orifice control กับ Exit control จะมีลักษณะการไหลที่เป็น Submerged flow

ในทางปฏิบัติมักออกแบบให้ Shaft spillway มีการไหลเป็นแบบ Entrance control ซึ่งเป็นการไหลแบบ Free flow เสมอ โดยการควบคุมด้วยการกำหนดระดับน้ำสูงสุดของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำให้เหมาะสม ไม่ให้มีระดับสูงเกินไปจนทำให้เกิดการไหลที่เป็น Submerged flow แต่ในการออกแบบจะกำหนด Design head ให้มีระดับที่ทำให้เกิดอัตราการไหลเลยจากช่วง Entrance control ไปสู่ช่วง Orifice control ได้เล็กน้อย โดยพิจารณาจากการไหลของน้ำที่ระบายออกจากท่อด้านท้ายน้ำให้มีความลึกการไหลในท่อ ไม่เกิน 75 %

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าสถานะที่เหมาะสมของการไหลนั้นขึ้นกับตัวแปรของรูปร่างสัดส่วนของตัวฝายต่อไปนี้ คือ H_0/R_s

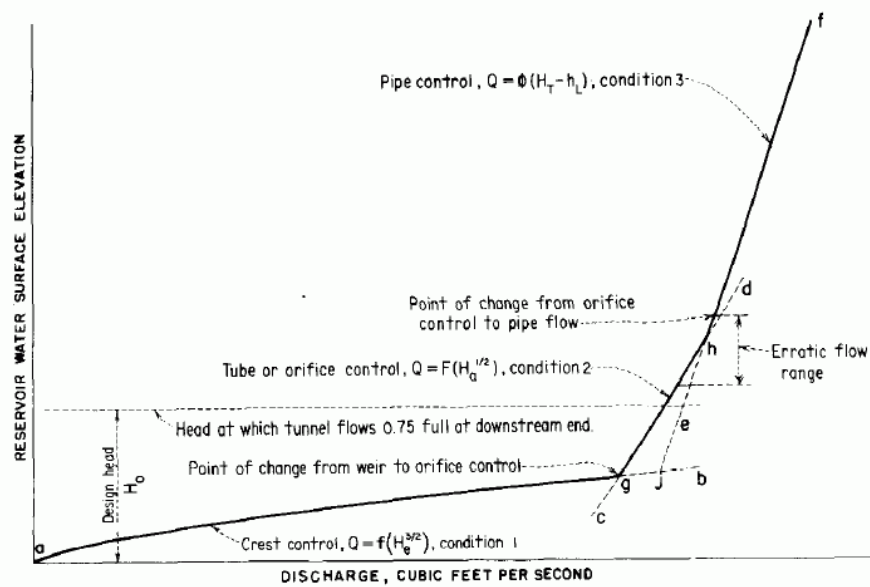
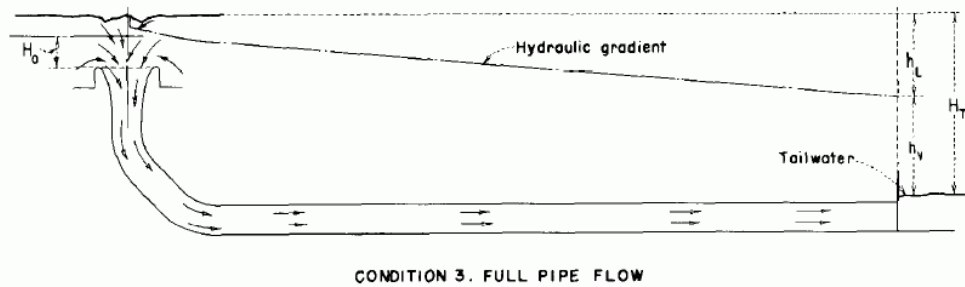
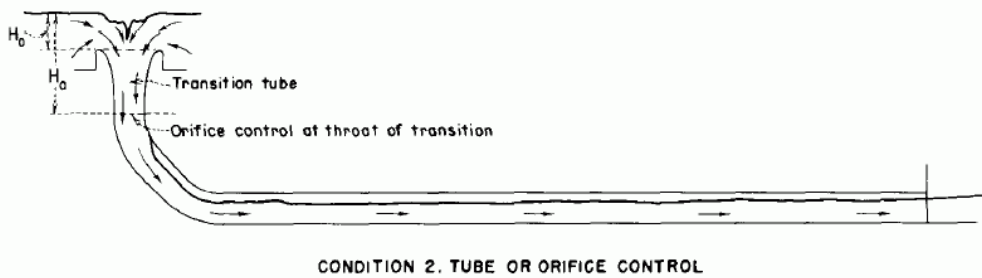
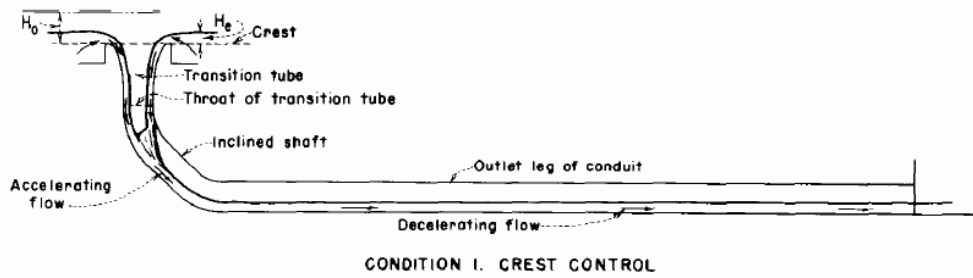
$H_0/R_s < 0.45$ เป็นการไหลแบบ Free Flow หรือ Entrance control

$0.45 < H_0/R_s < 1.00$ เป็นการไหลที่เข้าสู่สถานะการเกิด Submerged

$H_0/R_s \approx 1.00$ เป็นการไหลแบบ Submerged ที่สมบูรณ์

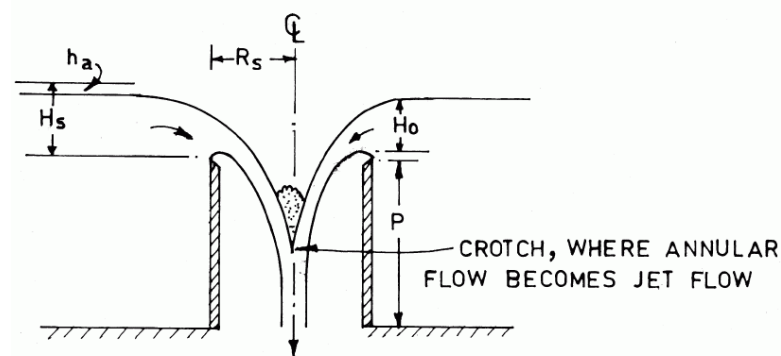
$H_0/R_s > 1.00$ เป็นการไหลแบบ Orifice flow

ทั้งนี้ในการออกแบบฝายชนิดนี้ ลักษณะการไหลที่ยอมรับได้นั้นคือ ค่า $H_0/R_s < 0.60$ โดยยอมให้เกิดการไหลแบบ Submerged flow ได้เล็กน้อย



รูปที่ 8.12-3 รูปแบบการไหล และกราฟ H-Q ของ Morning glory spillway

8.12.3.2 การคำนวณอัตราการไหลของ Morning glory spillway



(ตัวห้อย s หมายถึง Sharp crest : ตำแหน่งสันฝายทางทฤษฎี ที่เป็นฝายสันคม

o หมายถึง Over crest : ตำแหน่งยอดหรือสันจริงของฝาย)

รูปที่ 8.12-4 แสดงมิติต่าง ๆ ของ Morning glory spillway (R_s , H_s , H_o , P)

R_s = รัศมีขอบนอกของปากปล่องสันฝาย เทียบได้กับยอดฝายสันคม

H_s = ความลึกของน้ำเหนือฝายที่เป็นสันคม ซึ่งรวมค่า Approach velocity (h_a) ด้วย

H_o = ความลึกของน้ำเหนือยอดสันฝาย

P = ความสูงของสันฝายเมื่อวัดจากพื้นดิน

การคำนวณใช้สมการพื้นฐานอัตราการไหลของฝาย

$$Q = C_o L H_o^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

L = ความยาวของสันฝาย (ม.)

- L กรณีไม่มีตอม่อหรือคريبเหนือสันฝาย

$$L = 2\pi R_s$$

- L กรณีมีตอม่อหรือคريبเหนือสันฝายเพื่อใช้บังคับการไหลไม่ให้เกิดการ

หมุนวนของน้ำเหนือปากปล่องฝาย ต้องนำตอม่อมาพิจารณาด้วยต่อไปนี้

ถ้ามีตอม่อ หนา t เมตร จำนวน N ตัว

+ กรณีคำนวณแบบหยาบ ให้หักเพียงความหนาตอม่อออกจากความยาวสันฝาย จะได้

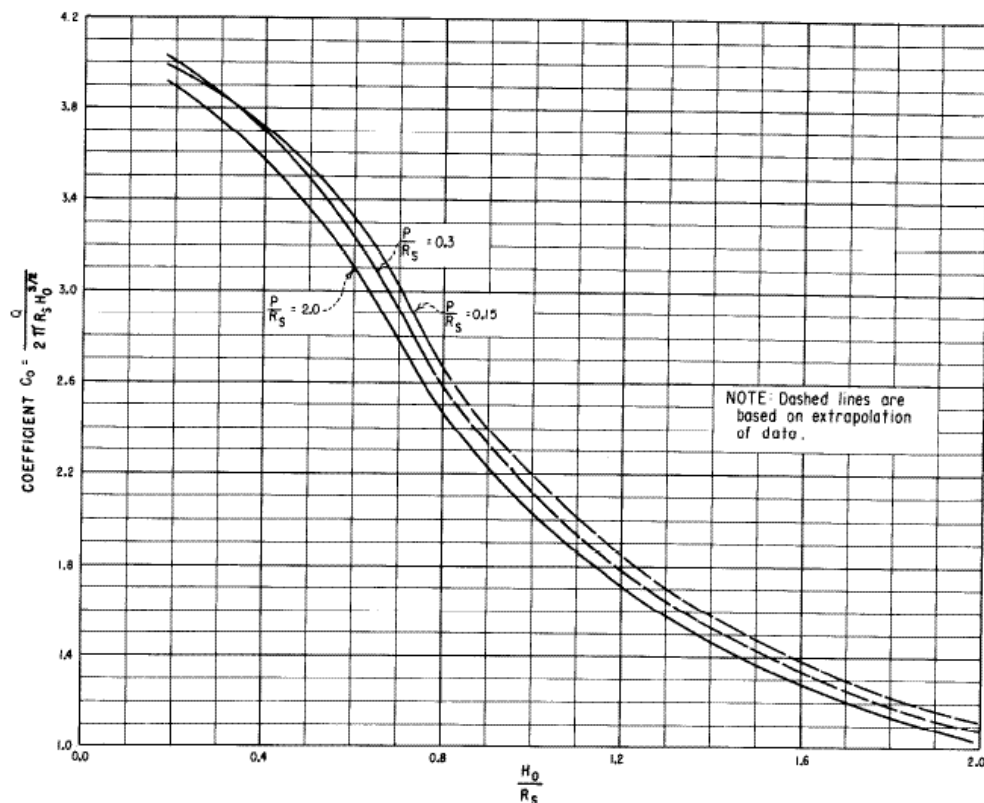
$$L = 2\pi R_s - nt$$

+ กรณีคำนวณแบบละเอียดให้หักความหนาตอม่อออกจากความยาวสันฝาย และคิดหักค่าการบีบตัวของกรไหลผ่านผิวตอม่อด้วยค่าสัมประสิทธิ์การบีบตัว ซึ่งขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดของตอม่อ ดังเช่นกรณีของฝายสันตรงที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ จะได้

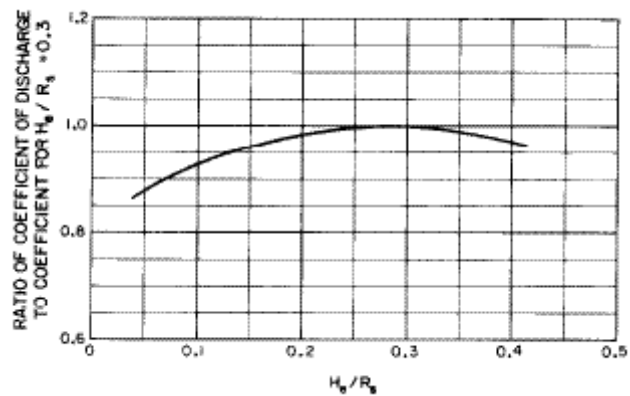
$$L = 2\pi R_s - 2(NK_p)H_o$$

H_o = ความลึกของน้ำเหนือยอดสันฝาย (เมตร)

C_o = ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของ Morning glory spillway นั้น USBR (1973) ได้นำผลการศึกษาของ Wagner (1956) มาสร้างเป็นกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 8.12-5 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของ H_o/R_s , P/R_s ซึ่งได้เผยแพร่ในหนังสือ Design of Small Dams ซึ่งมีหน่วยเป็นระบบอังกฤษ ที่นำมาเสนอไว้ในที่นี้เพราะมักมีผู้นำกราฟนี้ไปใช้คำนวณในหน่วยระบบ SI อย่างผิด ๆ ซึ่งปรากฏในตำราหลายเล่ม กล่าวคือแม้ว่าค่า H_o/R_s จะไม่มีหน่วย แต่ค่า C_o ของกราฟนี้เป็นระบบอังกฤษ การจะใช้ค่ากราฟชุดนี้กับการคำนวณในระบบ SI จึงต้องแปลงค่าหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ให้ตรงกัน

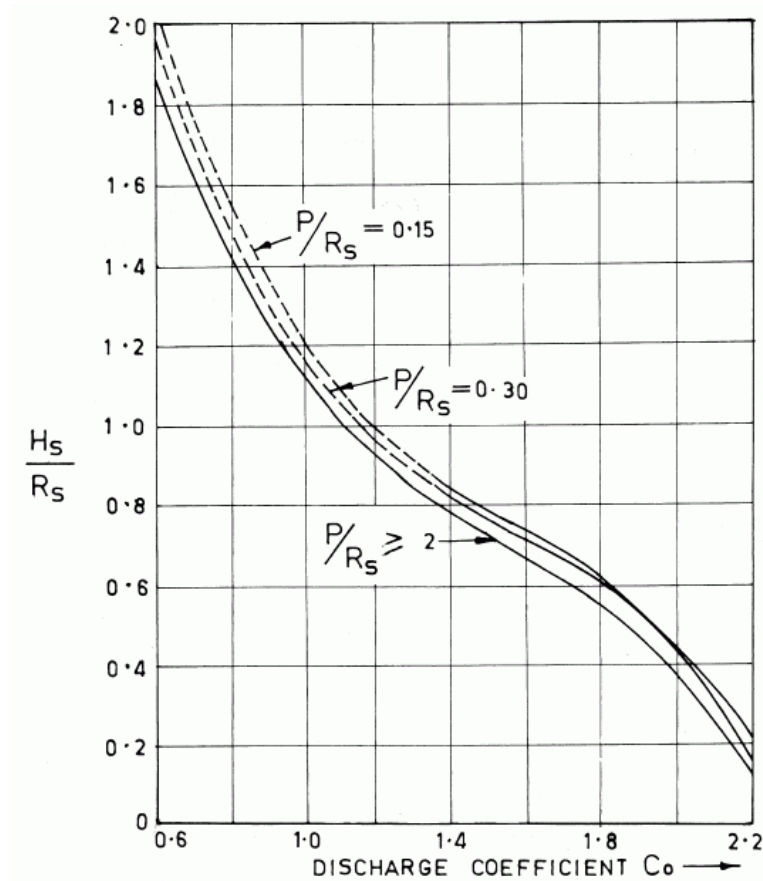


รูปที่ 8.12-5 กราฟสัมประสิทธิ์การไหลผ่าน Morning glory spillway โดย USBR
ได้จากผลการศึกษาของ Wagner (1956) มีหน่วยเป็นระบบอังกฤษ

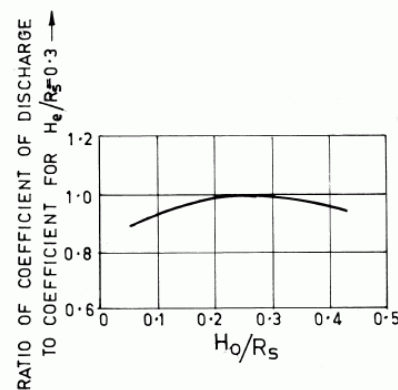


รูปที่ 8.12-6 กราฟสัมประสิทธิ์การไหลผ่าน Morning glory spillway หน่วยระบบ อังกฤษ
กรณีที่มีความลึกของน้ำเหนือสันฝายต่างจาก Design head

ต่อมา USBR ได้แปลงกราฟค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่าน Morning glory spillway
ข้างต้น มาเป็นหน่วย SI ดังแสดงในรูปที่ 8.12-7



รูปที่ 8.12-7 กราฟสัมประสิทธิ์การไหลผ่าน Morning glory spillway
ที่ USBR คัดแปลงเป็นหน่วยระบบ SI



รูปที่ 8.12-8 กราฟสัมประสิทธิ์การไหลผ่าน Morning glory spillway หน่วยระบบ SI
กรณีที่มีความลึกของน้ำเหนือสันฝายต่างจาก Design head

นอกจากนี้ FAO ได้สรุปการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่าน Morning glory spillway ในหน่วย SI ไว้ให้ซึ่งแบ่งตามประเภทของสันฝาย ดังนี้

1) Circular crest

H_o/R_s	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
C_o	1.82	1.78	1.63	1.33	1.12	0.93	0.80	0.70	0.62	0.57

2) Standard crest

H_o/R_s	0.10	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
C_o	1.830	1.825	1.815	1.800	1.785	1.760	1.740	1.720

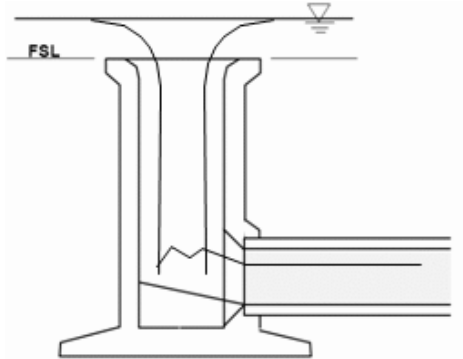
3) Flat crest

$$C_o = 3.20$$

8.12.4 Drop Inlet Pipe Spillway / Box Inlet Drop Spillway

เป็น Shaft spillway ที่มีรูปแบบง่าย ๆ ตัวฝายเป็นปล่องรับน้ำแนวดิ่ง แล้วมีท่อทิ้งน้ำออกจากปล่องลอดทำนบกินของอ่างเก็บน้ำไปสู่ลำน้ำด้านท้าย ฝายหรือทางระบายน้ำลักษณะนี้มักมีขนาดเล็กกระบายน้ำได้ไม่มาก มีชื่อเรียกต่างๆ กันตามรูปร่างของปล่องรับน้ำ ถ้าเป็นรูปวงกลมเรียก Drop inlet pipe spillway หรือ Pipe spillway ถ้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมเรียก Box inlet drop spillway หรือ Box spillway ตัวฝายหรือปล่องรับน้ำจะมีรูปทรงหน้าตัดที่เท่ากันตลอดทั้งปล่อง ผิวด้านในไม่สร้างให้เป็นรูปทรงของ Nappe ดังเช่น Morning glory spillway อาจสร้างให้

มีปล่องรับน้ำปล่องเดียวหรือสร้างเป็นกลุ่มมีปล่องรับน้ำหลายปล่อง ส่วนท่อทิ้งน้ำอาจเป็นท่อเดียวหรือหลายท่อซึ่งขึ้นกับปริมาณน้ำที่ต้องระบาย



รูปที่ 8.12-9 รูปตัดด้านข้างของ Drop inlet pipe spillway แบบหนึ่ง

การก่อสร้างหากมีขนาดเล็กใช้ระบายน้ำออกจากสระเล็กๆ อาจสร้างโดยใช้ท่อเหล็ก หรือท่ออื่นๆ มาประกอบกัน แต่หากมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เช่น ใช้กับอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กมักสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำสันฝายหรือยอดที่ปากให้โค้งมนในลักษณะรูปแบบสันฝาย Ogee หรือลบบมุมเพื่อลดการต้านการไหลของน้ำก็ได้

❖ การคำนวณอัตราการไหลของ Drop inlet pipe spillway และ Box Inlet Drop Spillway การคำนวณปริมาณน้ำของฝายชนิดนี้ เป็นรูปแบบของ Shaft spillway ซึ่งแสดงในรูปที่ 8.12-9

การคำนวณใช้สมการพื้นฐานอัตราการไหลของฝาย

$$Q = C_o L H_o^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย (ม.³/วินาที)

L = ความยาวเส้นรอบรูปของปากสันฝาย (ขึ้นกับรูปร่างของปาก) (ม.)

- ถ้าสันฝายเป็นรูปวงกลม $L = 2\pi R_s$

R_s = รัศมีขอบนอกของปากปล่องสันฝาย (ม.)

- ถ้าสันฝายเป็นรูปสี่เหลี่ยม $L = 2$ (ด้านกว้าง+ด้านยาว)

C_o = ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝาย ขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดของสันฝาย (ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมา)

H_o = ความลึกของน้ำเหนือยอดสันฝาย (ม.)

8.13 ฝ่ายหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม (Crump weir)

ฝ่ายหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม หรือ Crump weir ที่กล่าวถึงนี้ เป็นฝ่ายทดน้ำที่ได้พัฒนามาจากฝ่ายต้นแบบคือ ฝ่ายวัดน้ำชนิด Crump weir ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 11 ในหัวข้อ 11.1 Crump weir หรือ Triangular profile two dimensional weir (ผู้เขียนไม่นำเสนอรายละเอียดในบทนี้ เนื่องจากต้องการให้เนื้อหาสอดคล้องกับประเภทของฝายนั้นๆ อย่างแท้จริง เพราะหากนำเสนอในบทนี้ ก็ต้องอธิบายจากที่มาซึ่งคือฝ่ายวัดน้ำนั่นเอง จึงขอให้ข้ามไปดูรายละเอียด หลักการ วิธีการคำนวณในบทที่ 11)

ฝ่ายหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมนี้มักสร้างปิดกั้นลำน้ำขนาดเล็ก ที่มีความลาดชันค่อนข้างมาก และมีตะกอนไหลมากับน้ำมาก โดยตัวฝายจะมีความสูงไม่มาก เมื่อมีอัตราการไหลมากๆ ก็เกิดระดับน้ำขึ้น (Afflux) ไม่มาก เมื่อมีอัตราการไหลน้อยๆ ตะกอนก็ผ่านไปได้สะดวก ลักษณะของ Crump weir แสดงในรูปที่ 8.13-2

ข้อกำหนดคุณสมบัติทั่วไปของ Crump weir

มักสร้างให้มีลาดฝาด้านหน้า 1: 2 ลาดฝาด้านท้าย 1: 5

ด้านข้างของฝายนิยมสร้างเป็นกำแพงตั้ง

ระดับน้ำที่ไหลข้ามสันฝาย: $h \geq 0.06$ ม.

ความสูงของฝาย: $P \geq 0.06$ ม.

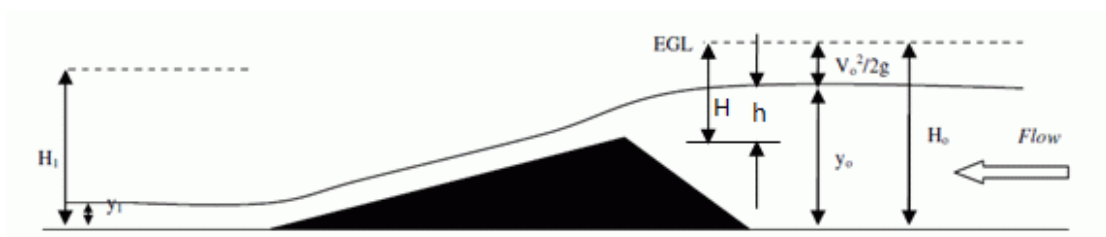
ความยาวของสันฝาย: $L \geq 0.30$ ม.

$$h/P \leq 3.5$$

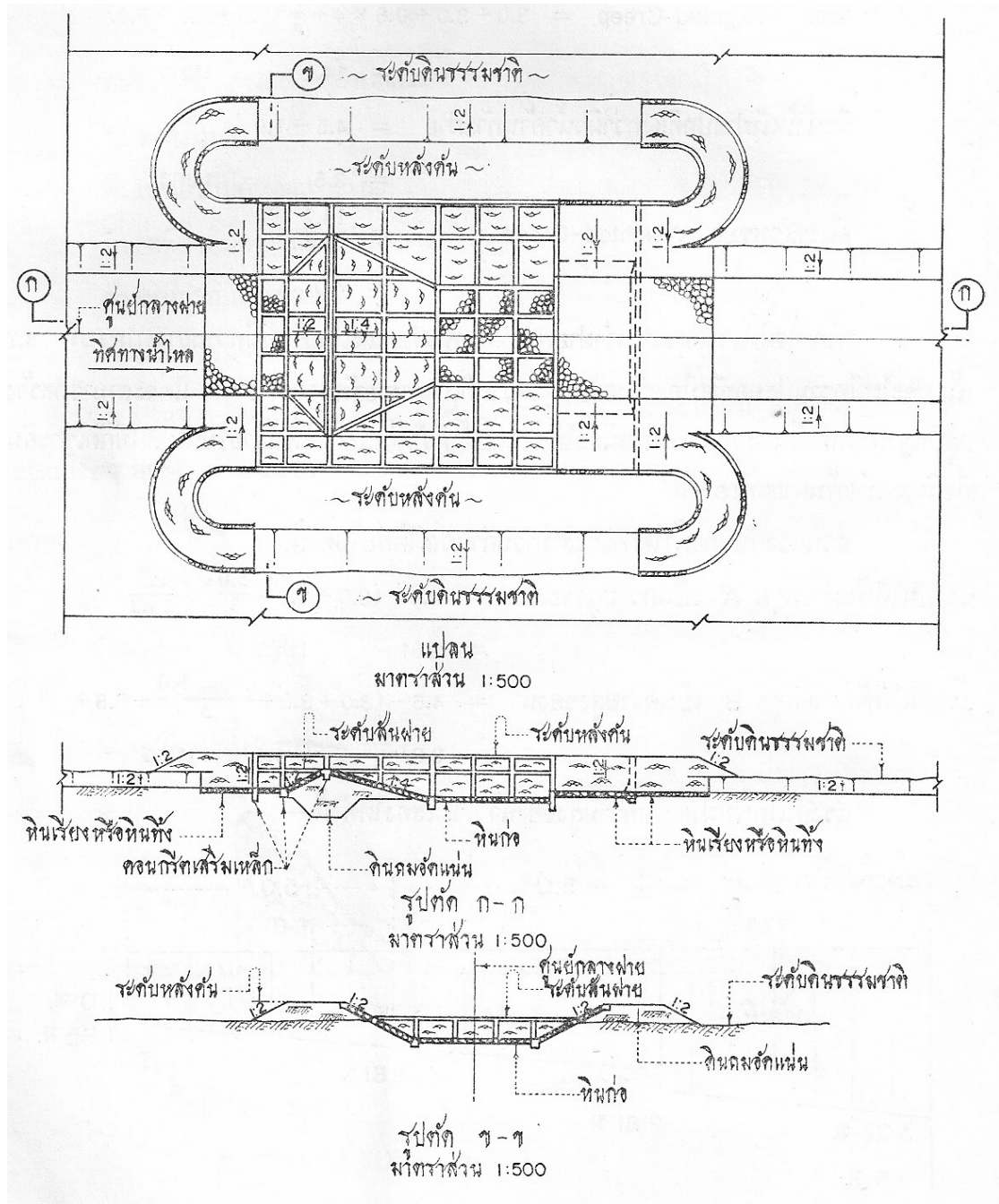
$$L/h \geq 2.0$$

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Crump weir

1) กรณีการไหลแบบ Free flow



รูปที่ 8.13-1 ลักษณะการไหลแบบ Free flow



ที่มา : ปราโมทย์ ไม้กลัด-คู่มืองานเขื่อนดินขนาดเล็กและฝาย

รูปที่ 8.13-2 แสดงรูปแบบมิติของ Crump weir แบบหนึ่ง

การคำนวณของ Crump weir กรณี Free flow ใช้สมการฝายสันสันที่มีหน้าตัดการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$Q = C_d L \frac{2}{3} \sqrt{2g} H^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

$H = h + (V^2 / 2g)$ = ความลึกประสิทธิผลของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.) *

* กรณีคำนวณแบบหยาบๆ อาจให้ $H \approx h$

L = ความยาวของสันฝาย, (ม.)

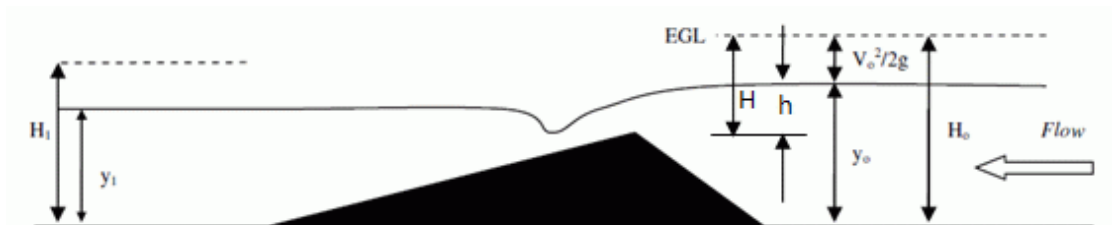
C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

ใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์คือ

$C_d = 1.163$ เมื่อ $h > 0.10$ ม

$C_d = 1.163 \left(1 - \frac{0.003}{h} \right)^{1.5}$ เมื่อ $h < 0.10$ ม.

2) กรณีการไหลแบบ Submerged flow



รูปที่ 8.13-3 ลักษณะการไหลแบบ Submerged flow

การคำนวณอัตราการไหลของ Crump weir กรณี Submerged flow

$$Q = f Q_F$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow, (ม³/วินาที)

Q_F = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายกรณี Free flow, (ม³/วินาที)

f = ค่า Factor การไหลกรณี Submerged flow ซึ่งขึ้นกับค่า

Submergence ratio: H_1 / H_0 (หรือ y_1 / y_0)

H_1 = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ, (ม.)

H_0 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ, (ม.)

- $f = 1.00$ ถ้า $0.75 \geq H_1 / H_0$
- $f = 1.035 \left[0.817 - (H_1 / H_0)^4 \right]^{0.0647}$ ถ้า $0.75 \leq H_1 / H_0 \leq 0.93$
- $f = [8.686 - 8.403 (H_1 / H_0)]$ ถ้า $0.95 \leq H_1 / H_0 \leq 0.985$

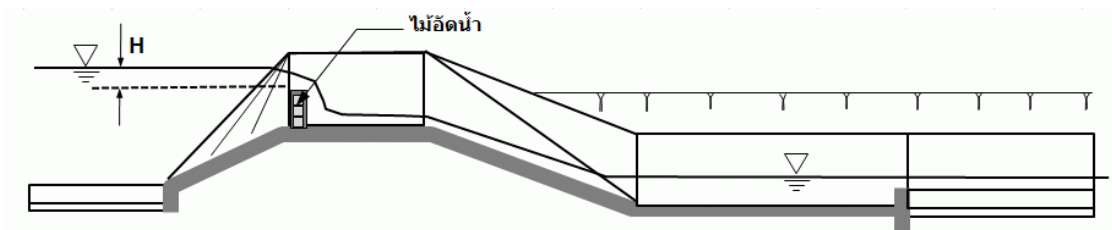
8.14 การเพิ่มระดับเก็บกักของฝาย

ในช่วงปลายฤดูน้ำหลากเป็นช่วงเวลาที่ต้องพิจารณาเก็บกักน้ำในแหล่งน้ำเพื่อให้มีปริมาณมากที่สุดเพื่อใช้ประโยชน์ในหน้าแล้ง โดยที่การเก็บกักน้ำต้องไม่สร้างผลกระทบทำให้เกิดน้ำท่วมพื้นที่ด้านเหนือน้ำด้วย โดยทั่วไปแล้วจะมีการเก็บกักน้ำไว้ที่ระดับน้ำเก็บกัก (รณก.) โครงการชลประทานบางแห่งอาจออกแบบให้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักให้สูงกว่าระดับ รณก. โดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมบนสันฝายหรือทางระบายน้ำสัน ได้แก่ ไม้อัดน้ำ, แผ่นไม้อัดน้ำ, ฝายยาง ฯลฯ

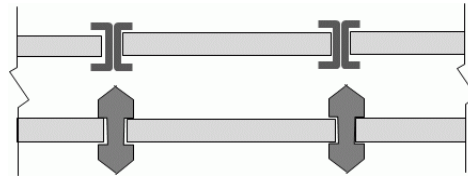
การเสริมสันฝายหรือทางระบายน้ำสันด้วยฝายยาง ทำให้ฝายเดิมนั้นมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์เป็นฝายยางไปโดยปริยาย ซึ่งได้นำเสนอข้อมูลแล้วในหัวข้อ 8.9 ในลำดับต่อไปจะนำเสนอในส่วนของไม้อัดน้ำ และแผ่นไม้อัดน้ำ

การใช้ ไม้อัดน้ำ (Stop log) และแผ่นไม้อัดน้ำ (Flash board)

การเพิ่มระดับน้ำเก็บกักรูปแบบแรกๆ ใช้ท่อนไม้หลายๆท่อนเรียงกันในช่องต่อม่อขนาดเล็ก (หรือรูปแบบง่ายๆ ใช้เหล็กตัว C จำนวน 2 ชิ้นมาประกบด้านหลังเข้าด้วยกัน) หรือใช้แผ่นไม้แผ่นเดียวหรือหลายแผ่นมาประกบกัน ทั้งนี้เนื่องจากในเวลานั้นไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานเพราะ หาง่าย ราคาถูก น้ำหนักไม่มาก ปัจจุบันมีการใช้วัสดุอื่นๆ เช่น ใช้คอนกรีต เหล็ก และโลหะอื่นๆ พลาสติก มาสร้างหรือขึ้นรูป เพื่อใช้แทนไม้ที่หายาก ตลอดจนการใช้กระสอบบรรจุทรายมาเรียงทับกันเพื่ออัดน้ำ



รูปตัดตามยาวตัวฝายแสดงการติดตั้งไม้อัดน้ำ

รูปแปลน แสดงการใช้เหล็กตัว C 2ตัวประกบกัน (รูปบน)
หรือตอม่อเล็กๆ (รูปล่าง) เพื่อติดตั้งไม้อัดน้ำบนสันฝาย

รูปที่ 8.14-1 แสดงการติดตั้งไม้อัดน้ำบนสันฝาย

❖ การคำนวณปริมาณน้ำไหลข้ามไม้อัดน้ำและแผ่นไม้อัดน้ำ

ในกรณีที่ได้ติดตั้งไม้อัดน้ำหรือแผ่นไม้อัดน้ำเหนือสันฝายหรือทางระบายน้ำแล้ว ไม้อัดน้ำหรือแผ่นไม้อัดน้ำก็จะทำหน้าที่เป็นฝายตัวใหม่แทนฝายหรือทางระบายน้ำเดิม ซึ่งการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านไม้อัดน้ำจะไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก เพราะมักติดตั้งในช่วงปลายฤดูน้ำหลากที่อัตราการไหลผ่านออกไปไม่มากและเริ่มลดลง หากจะคำนวณให้ใช้คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของการไหลผ่าน **Straight Drop or Free Overfall Spillway** ในหัวข้อ 8.10 เพราะมีลักษณะรูปแบบที่คล้ายกัน ซึ่งสรุปได้ดังนี้

$$Q = CLH^{1.5}$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านไม้อัดน้ำ (ม.³/วินาที)

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล อาจใช้ค่าเฉลี่ย **1.82**

L = ความยาวสันไม้อัดน้ำ (ม.)

H = ความลึกของน้ำที่ไหลข้ามสันไม้อัดน้ำ (ม.)

หมายเหตุ อนุโลมให้ใช้ในการคำนวณการไหลผ่านกระสอบทรายกั้น
น้ำที่วางเรียงให้สันมีระดับใกล้เคียงกันตลอดแนวด้วย

บทที่ 9

ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันคม (Sharp-crested or Thin-plate weirs)

9.1 ลักษณะและข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคม

การใช้ฝายสันคมเป็นเครื่องมือวัดปริมาณน้ำในทางน้ำนั้น นักชลศาสตร์ได้พยายามคิดค้นรูปแบบฝายที่หลากหลาย เพื่อที่จะแก้ปัญหาข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในฝายบางแบบ รวมทั้งทำให้การวัดปริมาณน้ำทำได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น

ฝายสันคมได้รับการพัฒนาขึ้นมามีหลายรูปแบบ ได้แก่

- 1) ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- 2) ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม
- 3) ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู
- 4) ฝายสันคมแบบ Proportional
- 5) ฝายสันคมแบบผสม เช่น แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับแบบสามเหลี่ยม
- 6) ฝายสันคมรูปวงกลม
- 7) ฝายสันคมรูปพาราโบลา
- 8) ฝายสันคมรูปส่วนตัวของสามเหลี่ยม
- 9) ฝายสันคมของรูปทรงเรขาคณิตอื่นๆ

ในที่นี้จะแบ่งย่อยเป็น 3 กลุ่ม คือ

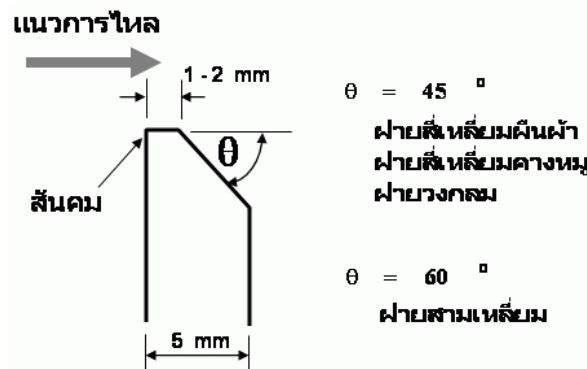
ก. กลุ่มแรก ลำดับที่ 1) ถึง 3) เป็นฝายที่นิยมใช้งานแพร่หลายทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เพราะสร้างและดูแลรักษาง่าย การคำนวณไม่ยุ่งยาก

ข. กลุ่มที่สอง ลำดับที่ 4) และ 5) มีการสร้างใช้งานบ้างในบางประเทศ เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมบางประการ

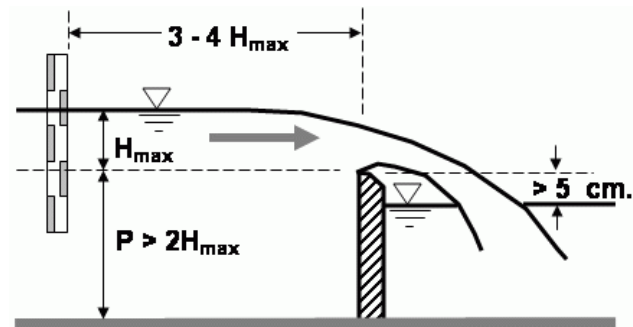
ค. กลุ่มที่สาม ลำดับที่ 6) เป็นต้นไป มักเป็นการวิเคราะห์เชิงวิชาการหรือสร้างในห้องปฏิบัติการมากกว่าการใช้งานจริง เพราะสร้างและดูแลรักษายาก อีกทั้งการคำนวณยุ่งยาก

หมายเหตุ ในคู่มือนี้จะอธิบายเฉพาะฝายวัดน้ำสันคมที่นิยมสร้างใช้งานจริง นอกนั้นจะนำเสนอเป็นแนวทางพอสังเขป

พิจารณารูปที่ 9-1 และรูปที่ 9-2



รูปที่ 9-1 รูปตัดขยายส่วนที่เป็นสันคมของฝายฝาย



รูปที่ 9-2 แสดงข้อกำหนดของระยะต่าง ๆ

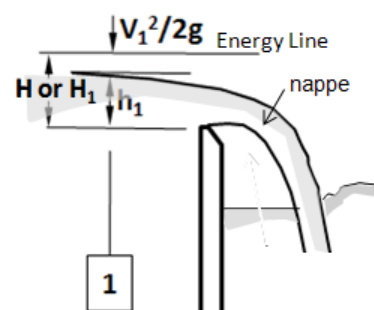
- แผ่นฝายด้านเหนือน้ำต้องเรียบ ตั้งฉากกับท้องทางน้ำ และแนบสนิทกับกำแพงข้างของอาคารหรือทางน้ำ
- ฝายต้องติดตั้งในแนวตั้งฉากกันแนวการไหลของน้ำตรงจุดกึ่งกลางของทางน้ำที่เป็นแนวตรงและมีความสมมาตร โดยพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านเหนือน้ำตลอดแนวความยาววัดจากฝายออกไป 15 – 20 เท่าของความสูงน้ำเหนือสันฝาย ต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 8 เท่าของหน้าตัดของน้ำที่ไหลผ่านฝาย เพื่อลดความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลในทางน้ำที่จะทำให้เกิด **Velocity of approach** ให้หมดไปหรือเหลือน้อยกว่า 0.30 เมตร/วินาที (จะได้ไม่ต้องนำมาคำนวณ)
- แผ่นฝายมักสร้างด้วยแผ่นโลหะหนาไม่เกิน 5 ม.ม. มีความหนาของช่องที่น้ำผ่านทุกด้านประมาณ 1 - 2 ม.ม. และต้องถูกลบมุมออก 45 องศา สำหรับฝายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, สี่เหลี่ยม

คางหมู, วงกลม และพาราโบลา ลมมุม 60 องศา สำหรับฝายรูปสามเหลี่ยม และ Sutro weir โดยด้านคมหรือมุมของสันฝายต้องอยู่ทางด้านเหนือ น้ำ ด้านที่ถูกลมมุมอยู่ด้านท้ายน้ำ

- เส้นขอบผิวรูปหน้าตัดของทางน้ำต้องห่างจากสันคมของฝายด้านที่อยู่ติดกันไม่น้อยกว่า 2 เท่าของระยะความลึกน้ำสูงสุดที่จะไหลผ่านฝาย และไม่น้อยกว่า 30 ซม.
- เพื่อที่การในทางน้ำด้านเหนือน้ำส่วนที่อยู่ต่ำกว่าระดับสันฝายไม่เกิดอิทธิพลต่อการไหลของน้ำส่วนที่ข้ามผ่านฝาย
- ระดับน้ำด้านท้ายต้องต่ำกว่าสันฝายมากกว่า 5 ซม. เพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดสภาพสุญญากาศใต้ผิวน้ำที่ไหลออกจากฝาย (Nappe) ที่จะส่งผลต่อการไหลผ่านฝาย
- การวัดระดับน้ำ(Head) ที่ไหลผ่านฝายจะวัดที่จุดห่างจากแผ่นฝายออกไปประมาณ 3 – 4 เท่าของระยะความลึกน้ำสูงสุดที่จะไหลผ่านฝาย

การกำหนดสัญลักษณ์ความลึกของน้ำ
 พิจารณารูปที่ 9-3 ในหนังสือหรือคู่มือต่างๆ มักระบุสัญลักษณ์ที่ต่างกัน ในความหมายที่แท้จริงเรื่องความลึกของระดับน้ำหน้าอาคารนั้น ที่ตำแหน่งหน้าตัด 1 ขอทำความเข้าใจให้เป็นแนวทางเดียวกันว่า

$$H \text{ หรือ } H_1 = h_1 + V_1^2/2g$$



รูปที่ 9-3 แสดงความลึกของน้ำ H และ h ที่ตำแหน่งหน้าตัด 1

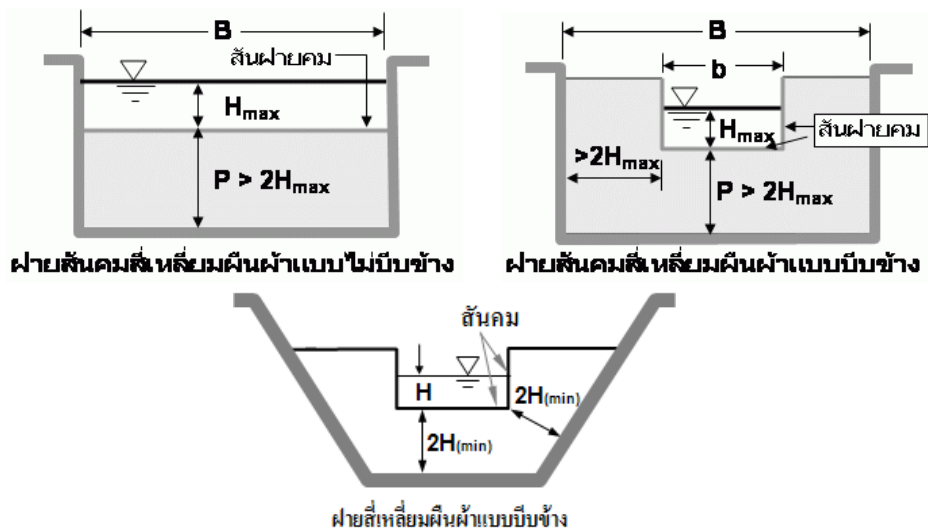
ในทางปฏิบัติแล้ว ถ้าค่า V_1 น้อยกว่า 0.30 ม./วินาที ให้ถือว่า $V_1^2/2g$ มีค่าน้อยมากไม่ต้องนำมาคิด ทำให้ H หรือ $H_1 = h_1$ และการออกแบบโดยทั่วไปมักจะให้เกิด Velocity of approach น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดังนั้นในการใช้สัญลักษณ์ ไม่ว่าจะเป็น H หรือ H_1 หรือ h_1 ให้เข้าใจตรงกันว่าเป็นค่าเดียวกัน คือค่าความลึกของน้ำเหนือสันฝายที่วัดหน้าอาคารในตำแหน่งที่กำหนดให้วัด ยกเว้นจะระบุเป็นอย่างอื่น

9.2 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular sharp - crested weirs)

ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) ฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไม่บีบข้าง (Full width weirs หรือ Suppressed weirs) ตัวฝายจะมีสันฝายยาวเต็มความกว้างของทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สันคมของฝายจะมีเพียงส่วนสันฝายที่น้ำไหลข้ามไป

2) ฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบีบข้าง (Fully contracted weirs) ตัวฝายจะเป็นช่องเปิดที่มีความยาวสันฝายเพียงส่วนหนึ่งของความกว้างทางน้ำ โดยส่วนที่เป็นสันคมจะมี 3 ด้าน คือ สันฝาย และขอบ 2 ข้าง



รูปที่ 9-4 แสดงรูปด้านหน้าของฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า

9.2.1 ข้อกำหนดเฉพาะของฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

(นอกเหนือจากลักษณะและข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคมที่กล่าวข้างต้น)

1. ฝายสันคมแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่บีบข้าง เสมือนเป็นฝายแบบบีบข้างที่มี $b = B$ นั่นเอง

$$2. B - b \geq 4H$$

$$3. H/P \leq 0.5$$

$$4. H/b \leq 0.5$$

$$5. 0.07\text{ m} \leq H \leq 0.60\text{ m}$$

$$6. b \geq 0.30\text{ m}$$

$$7. P \geq 0.30\text{ m}$$

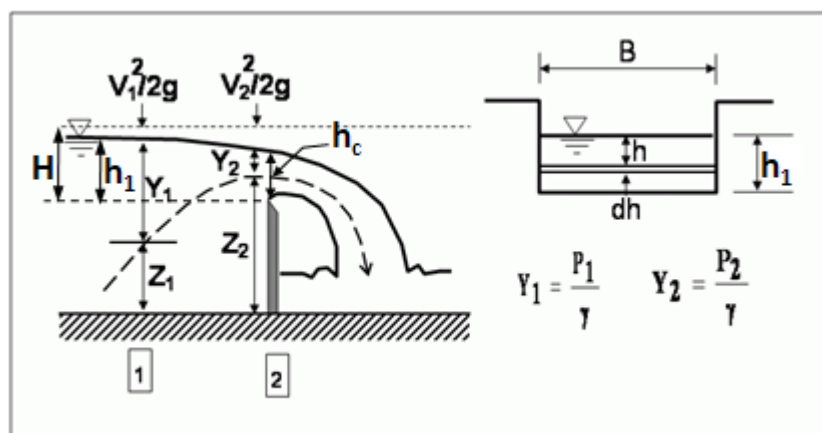
9.2.2 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมนั้นมีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง

- พัฒนาความรู้จากการไหลผ่าน Orifice มาเป็นการไหลผ่านฝายสันคม และพัฒนาเป็นฝายสันมนและฝายอื่นๆ
- Henry bazin (1898) ได้เสนอหลักการไหลของน้ำล้นข้ามโครงสร้างที่ปิดกั้นทางน้ำ ซึ่งต่อมากำหนดว่าเป็น Standard weir
- Rehbock (1929) ได้นำเสนอหลักการไหลผ่านฝายรูปทรงเรขาคณิต พร้อมหลักการคำนวณโดยใช้ ความลึกของการไหล (Overfall depth)
- Kindsvater and Carter (1957) ได้ศึกษาเพิ่มเติมจากผลการศึกษาของ Rehbock โดยพัฒนาสูตรการคำนวณ พร้อมทั้งกราฟประกอบการคำนวณที่เป็นที่ยอมรับ เพราะครอบคลุมฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้าทุกลักษณะ
- นักชลศาสตร์อื่นๆ ได้ศึกษาคุณสมบัติ ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถคำนวณปริมาณน้ำได้ถูกต้องยิ่งขึ้น และสร้างสูตรการคำนวณที่ไม่ยุ่งยากทำให้ง่ายในการใช้งานยิ่งขึ้นมาตามลำดับ

การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมนั้นอาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กรณีการไหลแบบ Free flow (9.2.3) และกรณีการไหลแบบ Submerged flow (9.2.4)

9.2.3 หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรณี Free flow เมื่อระดับน้ำด้านท้ายอยู่ต่ำกว่าสันฝาย



รูปที่ 9-5 แสดงการไหลผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่บีบข้าง

พิจารณารูปที่ 9-5 การไหลที่ตำแหน่ง [1] และ [2] จะมีพลังงานเท่ากัน

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = \left[\left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - Z_2 \right] + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = h + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$V_2 = \sqrt{2g \left(h + \frac{V_1^2}{2g} \right)}$$

$$dQ = V \cdot dA = V \cdot B \cdot dh$$

$$dQ = B \sqrt{2g \left(h + \frac{V_1^2}{2g} \right)} dh$$

$$Q = B \sqrt{2g} \int_0^{h_1} \left(h + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{1/2} dh$$

$$Q = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} \left[\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

$$Q_r = C_d Q \quad \text{เมื่อ } C_d \text{ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝาย}$$

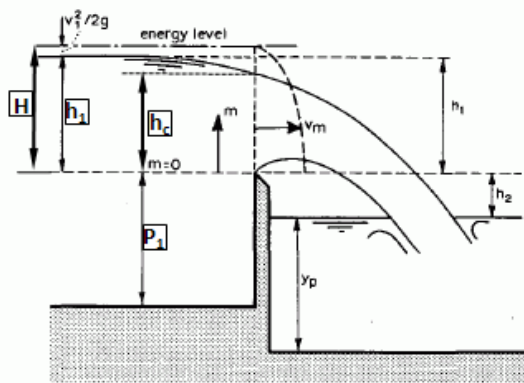
$$Q_r = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} \left[\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad (9.1)$$

ถ้า V_1 มีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 0.30 ม./วินาที)

$$Q_r = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} h_1^{3/2} \quad (9.2)$$

ถ้า V_1 มีค่ามากกว่า 0.30 ม./วินาที ให้ใช้สมการ (9.1) ในทางปฏิบัติจะวัดค่าเฉพาะความลึกน้ำเหนือสันฝาย หรือ h_1 เท่านั้น จะไม่มีการวัดค่า V_1 (เพราะถ้าวัดค่า V_1 ก็คำนวณปริมาณน้ำที่หน้าตัดที่ตรวจวัดระดับน้ำโดยสมการ $Q = A_1 V_1$ ไม่ต้องเสียเวลาคำนวณน้ำผ่านฝายอีก) จึงมีการคิดค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของกระแสน้ำ (Approach velocity coefficient: C_v) มาใช้เป็นค่าปรับแก้ ดังสมการ (8.3) โดยใช้คำนวณเมื่อมีระบุในสูตรเท่านั้น เพราะบางสูตรอาจใช้ C หรือ C_e แทน $C_d \cdot C_v$

$$Q_r = C_d C_v \frac{2}{3} B \sqrt{2g} h_1^{3/2} \quad (9.3)$$



รูปที่ 9-6 ตัวแปร H , h_1 , h_c ของหน้าตัดการไหลของฝายสันคม

ค่า C_v (ใช้คำนวณในกรณีที่กำหนดไว้ในสูตรเท่านั้น เพราะบางสูตรใช้ค่าอื่นปรับแก้)

- การคำนวณ U เป็นค่าตัวยกกำลังของ h_1 ในสมการอัตราการไหล

$$C_v = \left[\frac{H}{h_1} \right]^U$$

เมื่อ $H = h_1 + V_1^2/2g$

กรณีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $U = 3/2$ หรือ 1.5

กรณีช่องเปิดรูปพาราโบลา $U = 2.0$

กรณีช่องเปิดรูปสามเหลี่ยม $U = 2.5$

- การใช้กราฟ ดังแสดงในรูปที่ 9-7 ค่าของ C_v ขึ้นกับฟังก์ชันอัตราส่วนพื้นที่

$$\sqrt{\alpha_1} \cdot C_d \cdot A^* / A$$

เมื่อ $\alpha_1 = 1$, C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

A^* = พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ control section หรือช่องฝายโดยให้ $h_c = h_1$

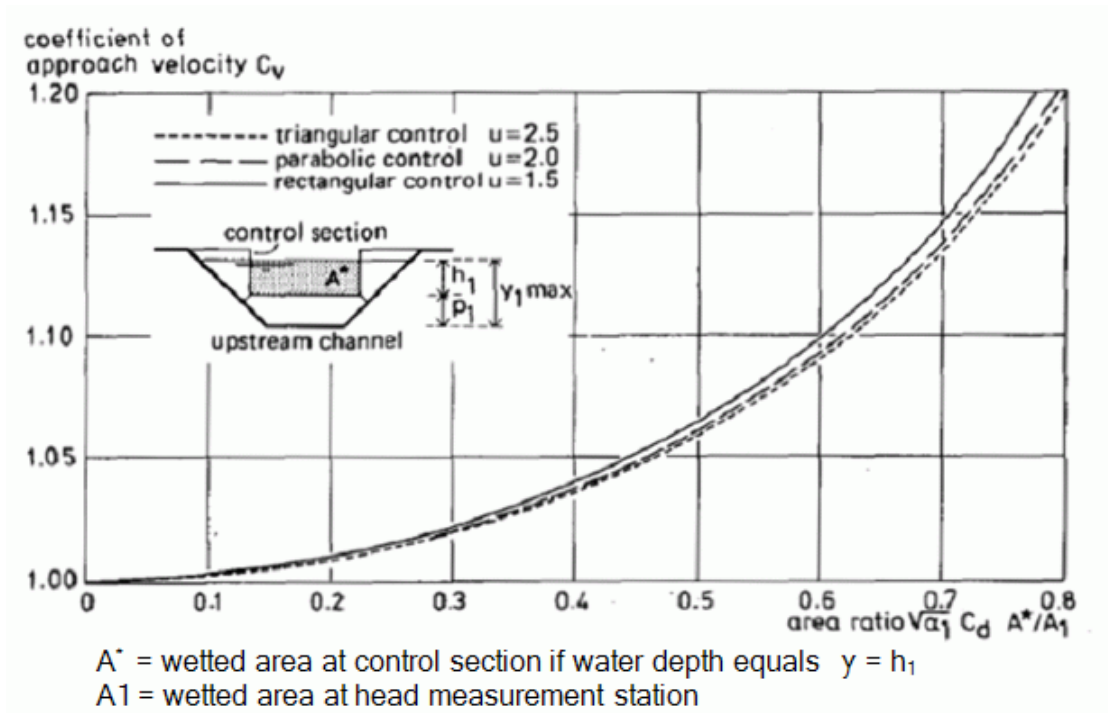
A = พื้นที่หน้าตัดการไหลของทางน้ำที่ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่กำหนด โดยมี

ความลึกการไหล = $P_1 + h_1$

ดังนั้นเมื่อคำนวณค่า $C_d \cdot A^* / A$ ได้แล้วนำไปหาค่า C_v โดยกราฟในรูปที่ 9-7 โดย

เลือกเส้นกราฟให้ตรงกับรูปร่างช่องเปิดของฝาย

หมายเหตุ ถ้าการคำนวณไม่ต้องการความละเอียดมากนักให้ใช้ $C_v = 1$



รูปที่ 9-7 กราฟหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของกระแสน้ำ (C_v)

8.2.3.1 ตัวอย่างหลักการคำนวณปริมาณน้ำโดยคิด Approach velocity

พิจารณาจากรูปที่ 9-7 การคำนวณ Approach velocity จะมี 3 ขั้นตอนคือ

1) คำนวณปริมาณน้ำผ่านฝาย ใช้สมการ (8.2) กรณีไม่คิด Approach velocity โดยใช้ค่า h_1 ที่วัดได้ สมมติได้ผลลัพธ์เป็นค่า Q

2) คำนวณ V_1 จากการไหลในทางน้ำที่ตำแหน่ง (1) เมื่อเรารู้ค่า Q จากข้อ 1) และเราหาค่าพื้นที่หน้าตัดทางน้ำที่ตำแหน่ง (1) หรือ A_1 ได้โดยใช้ค่าความลึกของการไหล $h_1 + P$ เมื่อ P เป็นความสูงของฝาย ($h_1 + P = Y_1 + Z_1$ นั่นเอง) ก็จะได้ $V_1 = Q/A_1$ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียง Approach velocity จริงมากที่สุด

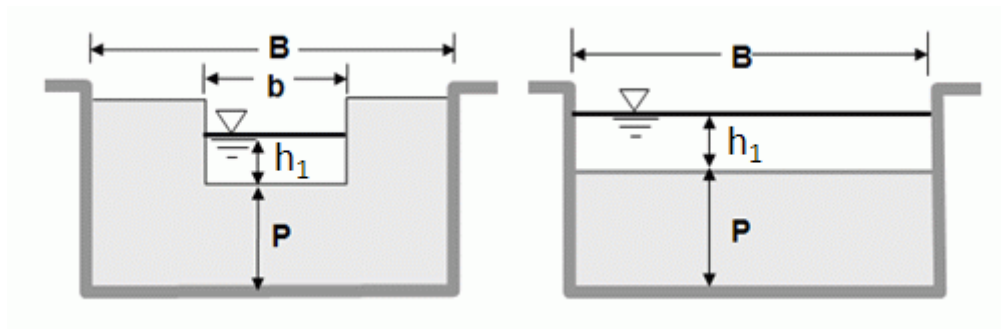
3) คำนวณปริมาณน้ำใหม่เป็นกรณีคิด Approach velocity โดยใช้ สมการ (9.1) ก็จะได้ปริมาณน้ำผ่านฝายที่ถูกต้อง

ข้อควรระวัง ต้องใช้สมการ (9.1) เท่านั้นในการคำนวณกรณีคิด Approach velocity ทั้งนี้ก็มีการเข้าใจผิดใช้สมการ (9.2) แล้วแทนค่า H ในสมการดังกล่าวด้วย $H + v_1^2/2g$ เป็น $Q = C_d \frac{2}{3} B \sqrt{2g} (H + v_1^2/2g)^{3/2}$ ซึ่งไม่ถูกต้อง

9.2.3.2 วิธีการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น นักชลศาสตร์หลายท่านได้ศึกษาทดลองและนำเสนอวิธีการคำนวณไว้ โดยจะนำเสนอผลงานที่มีชื่อเสียงเป็นที่ยอมรับดังต่อไปนี้

1) สมการของ Kindsvater และ Carter (ใช้ได้กับฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้ง 2 ลักษณะ)



รูปที่ 9-8 ฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่บีบข้าง เสมือนเป็นฝายแบบบีบข้างที่มี $b = B$

$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b_e \cdot h_e^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, ($\text{m}^3/\text{วินาที}$)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = $9.81 \text{ เมตร/วินาที}^2$

$h_e = h_1 + k_h$ = ความลึกประสิทธิผลของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.)

$b_e = b + k_b$ = ความยาวประสิทธิผลสันฝายแบบบีบข้าง

$B_e = B + k_B$ = ความยาวประสิทธิผลสันฝายแบบไม่บีบข้าง

$k_h = 0.001 \text{ ม.}$ = ค่าปรับความลึกที่เป็นผลจากความหนืดและแรงตึงผิว

k_b = ค่าปรับความยาวสันฝายที่เป็นผลจากความหนืดและแรงตึงผิว

(หน่วย เมตร) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า b/B หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-9

C_e = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล ขึ้นกับค่าของ h_1/P และ b/B

$$C_e = 0.392 + 0.50 \left(\frac{h_1}{P} + 0.2 \right) \cdot \left(\frac{b}{B} \right)^{2.5}$$

หรือหาได้จากกราฟในรูปที่ 9-10 หรือ ตารางที่ 9-1

เปรียบเทียบค่า C_e ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล กรณีฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่บีบข้าง ($b/B = 1$)

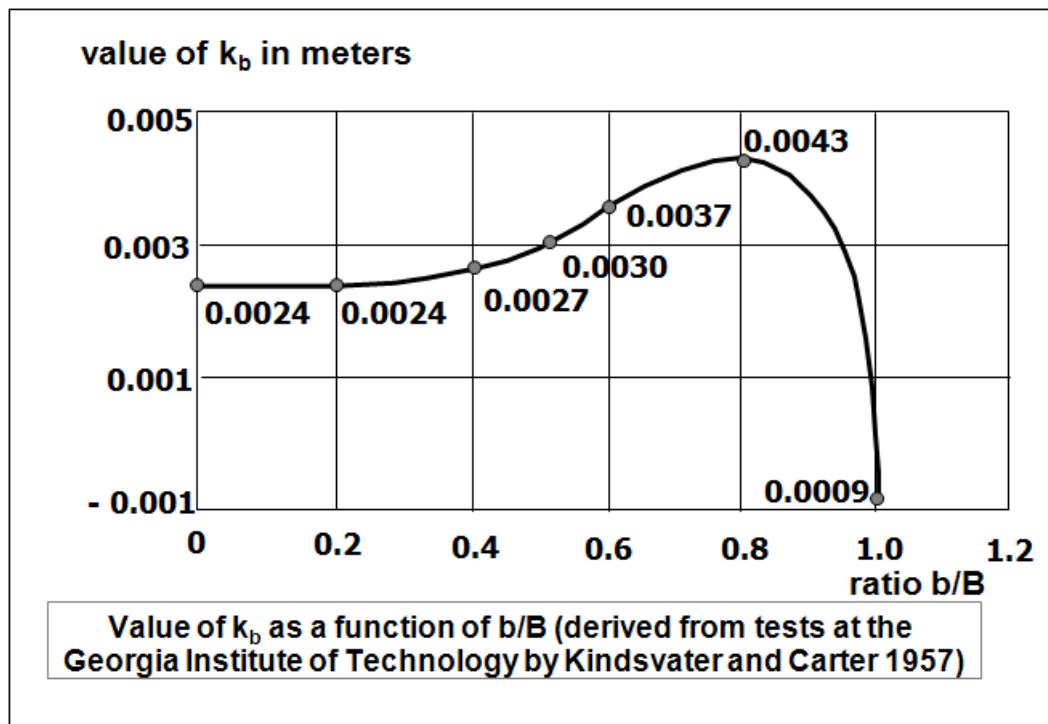
Kindsvater และ Carter (1957) : $C_e = 0.402 + 0.050 \left(\frac{h_1}{P} \right)$

Rehbock (1929) : $C_e = 0.4023 + 0.054 \left(\frac{h_1}{P} \right)$

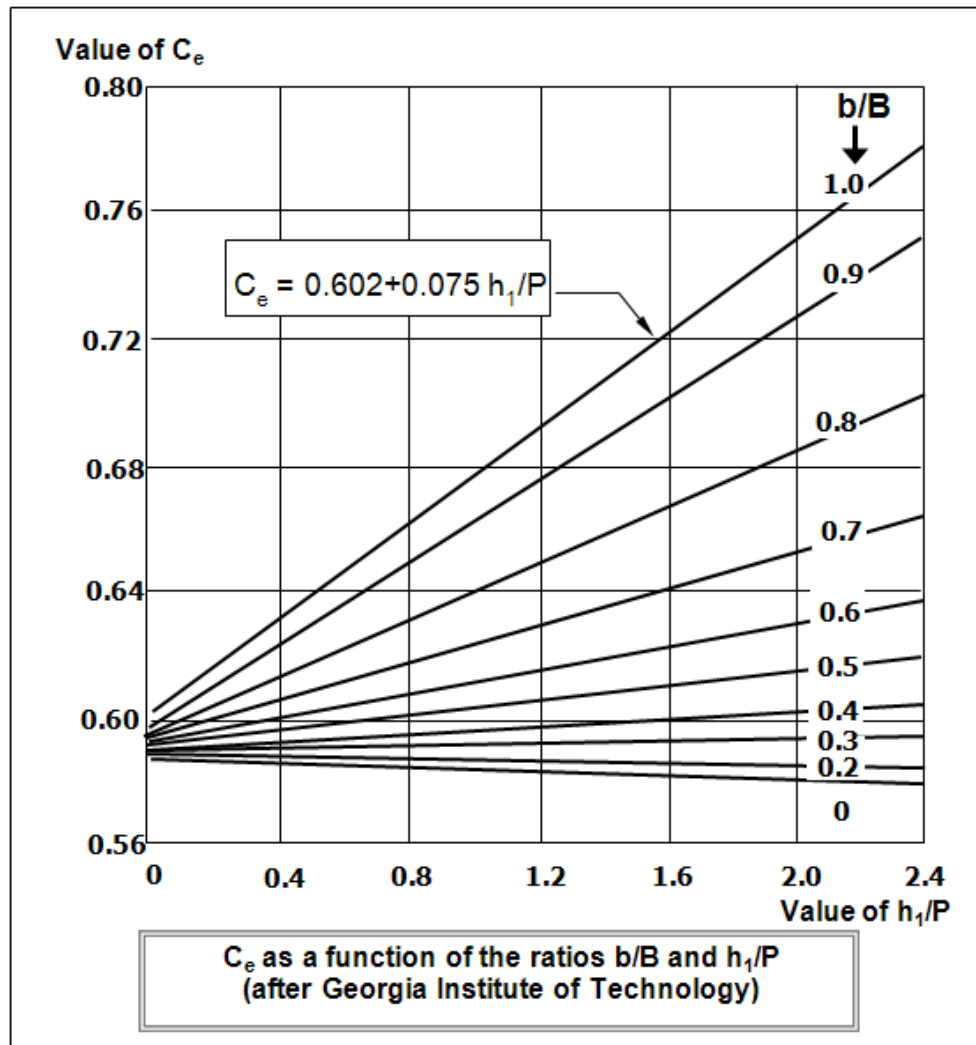
Ackers et al. : $C_e = 0.3988 + 0.060 \left(\frac{h_1}{P} \right)$

ข้อกำหนดเพิ่มเติม เมื่อใช้สูตรของ Kindsvater และ Carter จะมีความผิดพลาดน้อยกว่า 1 % เมื่อ

- $h_1 > 3$ ซม.
- $h_1/P < 5$
- b หรือ B ต้องมากกว่า 10 ซม.



รูปที่ 9-9 กราฟหาค่าปรับความยาวสันฝาย (k_b)



หมายเหตุ ค่า $b/B = 1$ เป็นกรณีฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไม่บีบข้าง

รูปที่ 9-10 กราฟหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_e)

ตารางที่ 9-1 ค่า C_e ขึ้นอยู่กับค่าของ b/B และ h_1/P (Georgia Institute of Technology)

b/B	C_e	b/B	C_e
1.0	$0.602 + 0.075 h_1/P$	0.5	$0.592 + 0.010 h_1/P$
0.9	$0.599 + 0.064 h_1/P$	0.4	$0.591 + 0.0058 h_1/P$
0.8	$0.597 + 0.045 h_1/P$	0.3	$0.590 + 0.0020 h_1/P$
0.7	$0.595 + 0.030 h_1/P$	0.2	$0.589 - 0.0018 h_1/P$
0.6	$0.593 + 0.018 h_1/P$	0.1	$0.588 - 0.0021 h_1/P$
		0	$0.587 - 0.0023 h_1/P$

2) ผลการศึกษาของนักชลศาสตร์อื่น ๆ

กรณีฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไม่บีบข้าง $(b/B) = 1$

จาก
$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b_e \cdot h_e^{3/2}$$

จัดรูปใหม่เป็น
$$Q = K L H^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย แบบ **Free flow**, (ม.³/วินาที)

L = ความยาวของสันฝาย (หรือคือ B), (ม.)

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือหน้าฝาย, (ม.)

K = สัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝาย (หรือคือ C_d)

หมายเหตุ ในกรณีที่ความเร็วของกระแสน้ำมากกว่า 0.30 เมตร/วินาที
จะต้องนำค่า H เนื่องจากความเร็วกระแสน้ำดังกล่าวมาคิดด้วย
นั่นคือ ค่า $H^{3/2}$ จะกลายเป็น $[(H+\Delta h)^{3/2} - \Delta h^{3/2}]$
เมื่อ $\Delta h = V^2/2g$ หรือใช้ค่า C_v หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-7

2.1) การใช้สมการของ Francis

$$K = 1.81 + 0.22 \frac{H}{P}$$

$$\frac{H}{P} \leq 0.50 \quad \text{ค่า } K \text{ เฉลี่ย} = 1.84$$

$$Q = 1.84 L H^{3/2}$$

Q : ลูกบาศก์เมตร/วินาที, L (หรือ B) และ H : เมตร

2.2) การใช้สมการของ Rehbock

$$K = 1.785 + \left(\frac{0.00295}{H} + 0.237 \frac{H}{P} \right) (1 + \epsilon)$$

$$\epsilon : P < 1 \text{ ม.} \quad \epsilon = 0$$

$$P > 1 \text{ ม.} \quad \epsilon = 0.55(P-1)$$

2.3) การใช้สมการของ Bazin

$$K = \left(1.794 + \frac{0.0133}{H} \right) \left\{ 1 + 0.55 \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right\}$$

ขอบเขตความเหมาะสม

สมการของ	H (ม.)	L หรือ B (ม.)	P (ม.)
Francis	0.19 - 0.50	2.40 - 3.00	0.60 - 1.50
Rehbock	> 0.50	0.30 - 2.50	0.03 - P
Bazin	0.08 - 0.50	0.50 - 2.00	0.75

3) ผลการศึกษาของนักชลศาสตร์อื่น ๆ (ต่อ)

กรณีฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบีบข้าง (b/B) < 1

$$Q = KLH^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย แบบ **Free Flow**, (ม.³/วินาที)
 L = ความยาวของสันฝาย (หรือคือ b), (ม.)
 H = ความลึกของน้ำด้านเหนือหน้าฝาย, (ม.)
 K = สัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝาย (หรือคือ C_d)

หมายเหตุ ในกรณีที่ความเร็วของกระแสน้ำมากกว่า 0.30 เมตร/วินาที
 จะต้องนำค่า H เนื่องจากความเร็วกระแสน้ำดังกล่าวมาคิดด้วย
 นั่นคือ ค่า $H^{3/2}$ จะกลายเป็น $[(H+\Delta h)^{3/2} - \Delta h^{3/2}]$
 เมื่อ $\Delta h = V^2/2g$ หรือใช้ค่า C_v หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-7

3.1) การใช้สมการปรับแก้ของ Francis

Francis พบว่าการไหลแบบผ่านช่องฝายที่มีไม่เต็มความกว้างของทางน้ำ จะเกิดการบีบตัวของน้ำด้านข้างตามหลักการของ **Orifice** แต่ละข้างประมาณ 1/10 ของระดับน้ำเหนือสันฝาย โดยความยาวประสิทธิผลของสันฝายจะเป็นตามสมการต่อไปนี้

$$L_e = L - 0.1NH$$

L_e = ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย, (ม.)

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือหน้าเหนือสันฝาย, (ม.)

L = ความยาววัดได้จริงของสันฝาย, (ม.)

N = จำนวนการบีบตัวด้านข้าง (0, 1, 2)

0 ไม่มีการบีบตัว 1 บีบตัวข้างเดียว 2 บีบตัว 2 ข้าง

กรณีฝายสี่เหลี่ยมแบบบีบข้าง มีการบีบ 2 ข้าง $N = 2$

ดังนั้น

$$L_e = L - 0.2H$$

สมการปรับแก้ของ Francis

$$Q = 1.84 (L - 0.2H) H^{3/2}$$

Q : ลบ.ม./วินาที, L (หรือ b) และ H : เมตร

3.2) การใช้สมการปรับแก้ของ Rehbock

$$K = 1.785 + \frac{0.00295}{H} + 0.237 \frac{H}{P} - 0.428 \sqrt{\frac{(B-b)}{P \cdot B}} + 0.034 \sqrt{\frac{B}{P}}$$

9.2.4 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรณี **Submerged flow** เป็นกรณีเมื่อระดับน้ำด้านท้ายน้ำท่วมสันฝาย

9.2.4.1 ลำดับของการเกิด Submerged flow

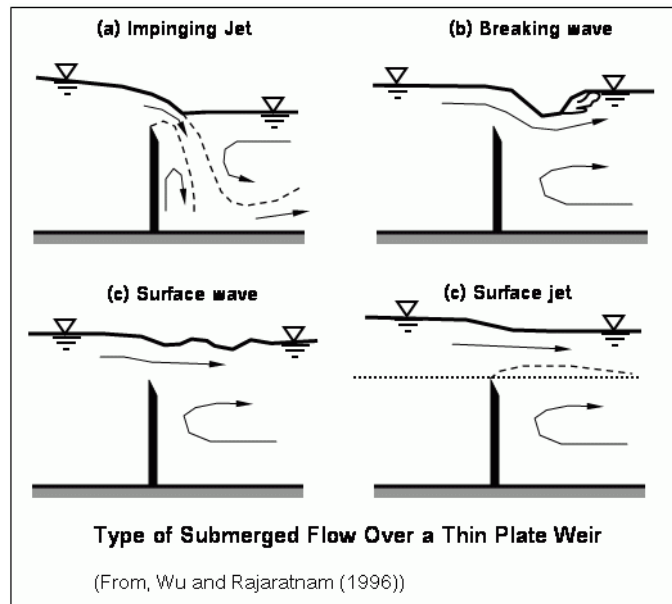
Wu and Rajaratnam (1996) ได้เสนอรูปแบบการเกิด Submerged flow ของฝายสันคม ที่ระดับน้ำด้านท้ายสูงกว่าสันฝายนั้น แบ่งได้เป็น 4 ลำดับหรือรูปแบบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 8-11

1) **Impinging flow**: การเกิด Submerged flow ในลำดับแรกหรือรูปแบบแรกนี้ การไหลในลักษณะของ Free flow ที่แผ่นน้ำ (Nappe) ไหลลงไปถึงพื้นของท้ายน้ำ หรือเกิดลำกระแทก (Impinging jet) ยังคงเกิดอยู่ เพียงแต่ระดับน้ำด้านท้ายสูงขึ้นจนสูงกว่าสันฝายไม่เหลือช่องอากาศใต้ Nappe อีกต่อไป (ในสภาวะนี้อาจถือได้ว่าเป็นการไหลแบบ Free flow)

2) **Plunging flow**: อัตราการไหลข้ามฝายเพิ่มขึ้น ระดับน้ำด้านท้ายน้ำเพิ่มสูงขึ้นและด้านกระแสน้ำเหนือฝายไม่เกิด Impinging jet อีกต่อไป น้ำด้านท้ายปั่นป่วนและเกิด Hydraulic jump ที่ด้านท้ายน้ำ

3) **Surface wave:** เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอีก Hydraulic jump ที่ด้านท้ายน้ำค่อยๆ หายไป แล้วเกิดเป็นคลื่นน้ำที่ด้านท้ายน้ำแทน

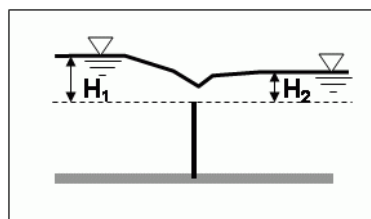
4) **Surface jet:** อัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นอีก ผิวน้ำด้านท้ายน้ำจะราบเรียบ การไหลของ กระแสน้ำจะเกิดในแนวที่อยู่เหนือระดับสันฝาย ซึ่งเป็น Submerged flow ที่สมบูรณ์



รูปที่ 9-11 ลำดับของการเกิด Submerged flow

ในสภาพการไหลที่เกิดจริงนั้น รูปแบบการไหลจะไม่คงที่แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ซึ่งจะขึ้นกับตัวแปรของสภาพแวดล้อมในช่วงเวลานั้น ดังนั้นการคำนวณปริมาณน้ำกรณี Submerge flow จึงมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่สูงมาก ค่าที่คำนวณได้จึงมักเป็นค่า โดยประมาณเสมอ

Villemonte (1947) ได้ทดลองพบว่าการไหลกรณี Submerged flow ของฝายสันคม แนวโค้งรูปแบบต่างๆ นั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของระดับน้ำด้านท้ายน้ำกับระดับน้ำด้านเหนือน้ำ (H_2/H_1) ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเกิดผลกระทบต่อการไหลในกรณีแบบ Free flow โดยตรง และได้สร้างสมการเพื่อใช้ทำนายการเกิด Submerged ต่อไปนี้



รูปที่ 9-12 Submerged flow เป็นกรณีเมื่อระดับน้ำด้านท้ายน้ำท่วมสันฝาย

$$Q_S = Q[1 - \beta^N]^{0.385}$$

Q_S = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow (ม.³/วินาที)

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Free flow (ม.³/วินาที)

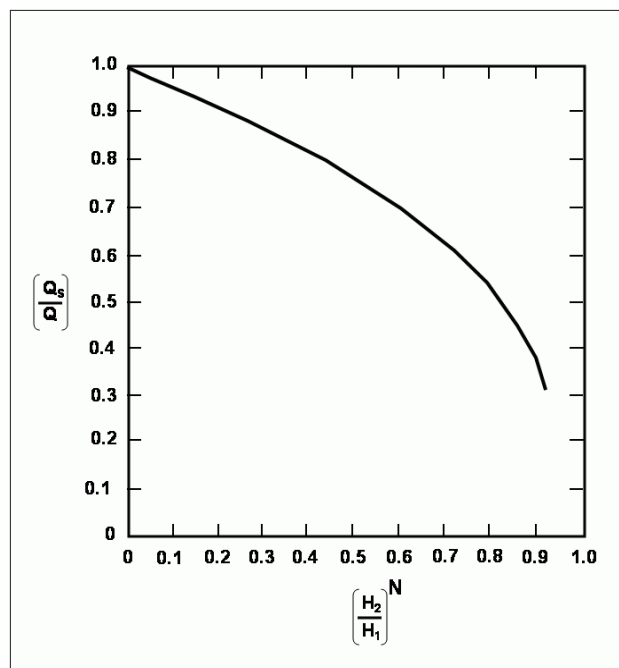
H_1 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำวัดจากระดับสันฝาย (ม.)

H_2 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำวัดจากระดับสันฝาย (ม.)

$$\beta = \frac{H_2}{H_1}$$

N = เลขยกกำลังของ H ในสมการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมกรณี Free flow (H^N) ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $N = 1.5$ ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม $N = 2.5$ และ ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู $N = 1.5$ เป็นต้น

นอกจากนี้ Villemonte ได้นำ ผลการความสัมพันธ์ดังกล่าวมาสร้างเป็นกราฟ สำหรับการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันคม รูปแบบต่าง ดังแสดงในรูปที่ 9-13



รูปที่ 9-13 แสดงความสัมพันธ์ของการไหลแบบ Submerged ของฝายสันคมแนวตั้ง

Q = อัตราการไหลกรณี Free flow ผ่านฝายสันคมรูปแบบใดๆ

Q_S = อัตราการไหลกรณีการเกิด Submerged flow ที่เราต้องการหา

N = เลขยกกำลังของ H ในสมการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมกรณี Free flow (H^N) เช่น ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $N = 1.5$ ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม $N = 2.5$ และ ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู $N = 1.5$

ผลการศึกษานักชลศาสตร์อื่น ๆ

Abou - Seida and Quraishi (1976) ได้ศึกษาการไหลของฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้ง 2 ลักษณะ คือ บีบข้างและไม่บีบข้าง ในกรณีการไหลแบบ Submerged flow และนำเสนอสมการคำนวณโดยอาศัยหลักการของ Submerged orifice flow โดยพิจารณาการไหล 2 ส่วน คือ การไหลเหนือ $H_1 - H_2$ และการไหลใต้ $H_1 - H_2$

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} \cdot H_1^{3/2} \left[(1-\beta)^{1/2} (1+0.5\beta) \right]$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow (ม.³/วินาที)

H_1 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ ที่วัดจากระดับสันฝาย (ม.)

H_2 = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ที่วัดจากระดับสันฝาย (ม.)

C_d = สัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝาย ให้ใช้ตามสมการ C_e ที่ระบุในหัวข้อ
สมการของ Kindsvater และ Carter

$$\beta = \frac{H_2}{H_1}$$

Borghei, Z.Vatannia, M.Ghodsian และ M.R.Jallili (2003) ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการ พัฒนาสมการคำนวณปริมาณน้ำผ่าน ฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้เป็น

$$Q = \left[\left(\left(0.008 \frac{L}{B} + 0.985 \right) + \left(0.161 \frac{L}{B} - 0.479 \right) \right) * \left(\frac{H_d}{H_u} \right)^3 \right]^2 * Q_m$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow (ม.³/วินาที)

Q_m = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Free flow (ม.³/วินาที)

$L = b$ = ความยาวของสันฝาย (ม.)

B = ความกว้างของทางน้ำ (ม.)

$H_u = H_1$ = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ ที่วัดจากระดับสันฝาย (ม.)

$H_d = H_2$ = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ที่วัดจากระดับสันฝาย (ม.)

กรณี $L/B = 1$ เป็นฝายไม่บีบข้าง

$$Q = [0.993 - 0.318\beta^3]^2 * Q_m$$

เมื่อ $\beta = \frac{H_d}{H_u}$

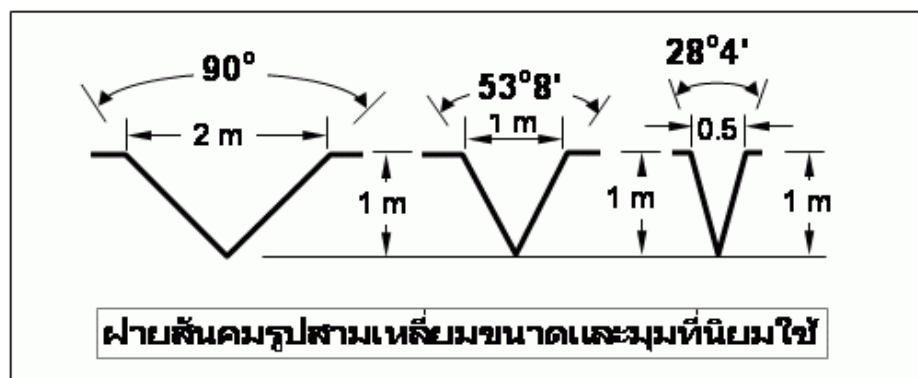
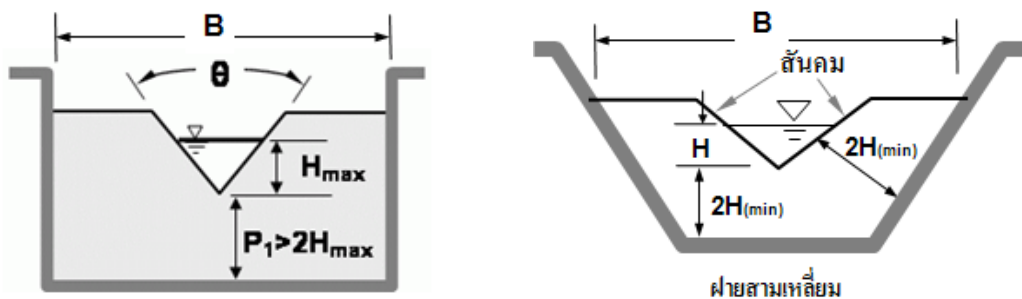
สมการนี้ต่อมาเรียกว่า **“Modified BVGJ”**

(ตั้งตามอักษรนำหน้าชื่อร่วมผู้วิจัย)

9.3 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม

(Triangular or V-notch sharp-crested weirs or Thomson weirs)

James Thomson (1859) ได้เสนอรูปแบบฝายสันคมแบบสามเหลี่ยมที่สามารถลดข้อจำกัดหรือปัญหาการใช้ฝายสันคมสี่เหลี่ยมพื้นผ้าลงได้ ในกรณีที่วัดปริมาณน้ำเมื่ออัตราการไหลน้อย ๆ หรือ Head ต่ำๆ ดังนั้นจึงมักเรียกฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมว่า **Thomson Weir**



รูปที่ 9-14 รูปแบบฝายสันคมแบบสามเหลี่ยม

ข้อกำหนดเฉพาะของฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม

(นอกเหนือจากลักษณะและข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคม)

- ลบมุมที่สันคม 60 องศา
- ระดับน้ำด้านท้ายควรต่ำกว่าจุดยอดของสันฝาย (จะได้ไม่เกิดอิทธิพลต่อการไหล)
- ฝายสันคมแบบสามเหลี่ยมแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1). **Partially contracted weirs** เป็นฝายลักษณะกึ่งบีบข้าง ในกรณีที่ติดตั้งฝายในทางน้ำที่ค่อนข้างเล็กโดยความกว้างน้อยและต้นรูปร่างหน้าตัดคล้ายสี่เหลี่ยม หรืออีกนัยหนึ่งคือ ระยะห่างจากสันคมของฝายกับเส้นขอบเขตหน้าตัดของทางน้ำน้อยกว่าข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคม (มากกว่า $2H_{\max}$)

2). **Fully contracted weirs** เป็นฝายบีบข้างที่เป็นไปตามข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคม ในทางน้ำที่มีหน้าตัดรูปแบบต่าง ๆ

Bos (1997) ได้กำหนดคุณสมบัติขั้นต่ำของฝายสันคมแบบสามเหลี่ยมทั้งสองลักษณะกำหนดไว้ต่อไปนี้

Partially contracted weirs

1. $H/P \leq 1.2$
2. $H/B \leq 0.4$
3. $0.05\text{ m} \leq H \leq 0.60\text{ m}$
4. $B \geq 0.60\text{ m}$
5. $P \geq 0.10\text{ m}$

Fully contracted weirs

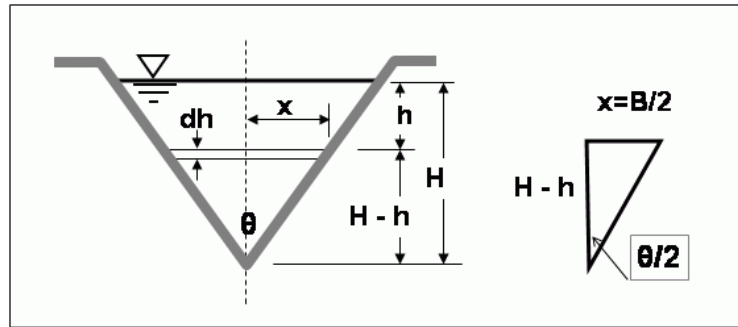
1. $H/P \leq 0.4$
2. $H/B \leq 0.2$
3. $0.05\text{ m} \leq H \leq 0.38\text{ m}$
4. $B \geq 0.45\text{ m}$
5. $P \geq 0.90\text{ m}$

9.3.1 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสามเหลี่ยม กรณี **Free Flow**

ก. การใช้สมการของ **Kindsvater** และ **Carter** กับฝายสันคมสามเหลี่ยม

$$Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot h_e^{2.5}$$

ซึ่งมีมาจากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ต่อไปนี้



รูปที่ 9-15 ฝ่ายสันคมสามเหลี่ยม

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{X}{H-h} = \frac{B/2}{H-h}$$

$$B = 2 \tan \frac{\theta}{2} (H-h)$$

$$dQ = C_e \cdot B \cdot dh \cdot \sqrt{2gh}$$

$$dQ = C_e 2 \tan \frac{\theta}{2} (H-h) \cdot \sqrt{2gh} \cdot dh$$

$$Q = C_e 2 \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} \int_0^H (H-h) \cdot h^{3/2} \cdot dh$$

$$Q = C_e 2 \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} \left[\left(\frac{2}{3} H \cdot h^{3/2} \right) - \left(\frac{2}{5} h^{5/2} \right) \right]_0^H$$

$$Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot h_e^{5/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝ่าย Free Flow, (ม³/วินาที)

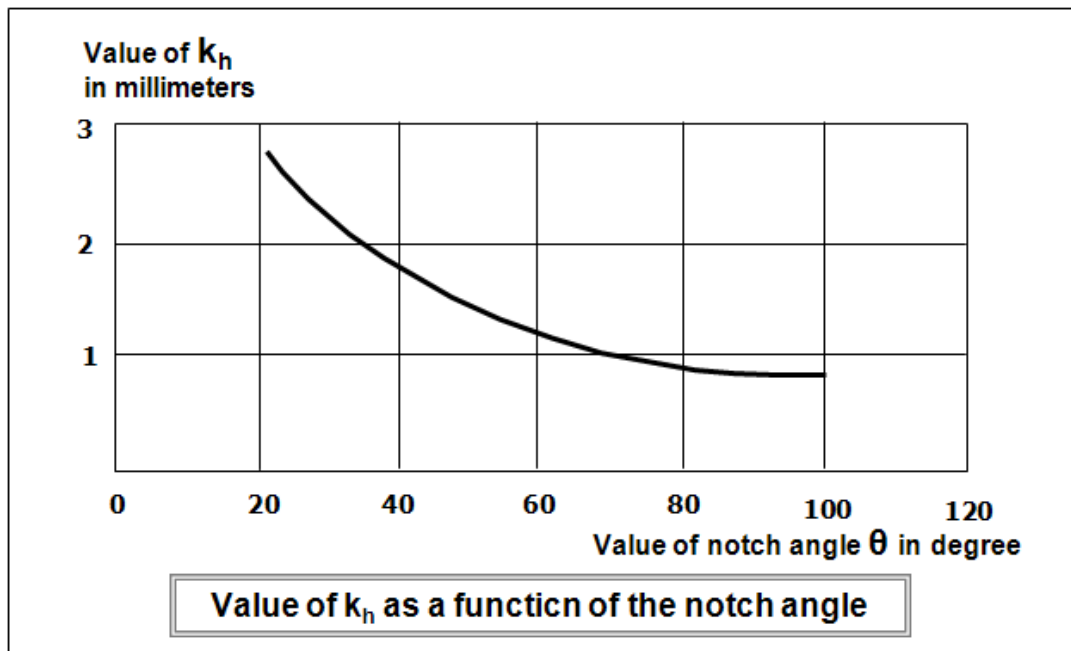
g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/ (วินาที)²

$h_e = h_1 + k_h$ = ความลึกประสิทธิผลของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝ่าย, (ม.)

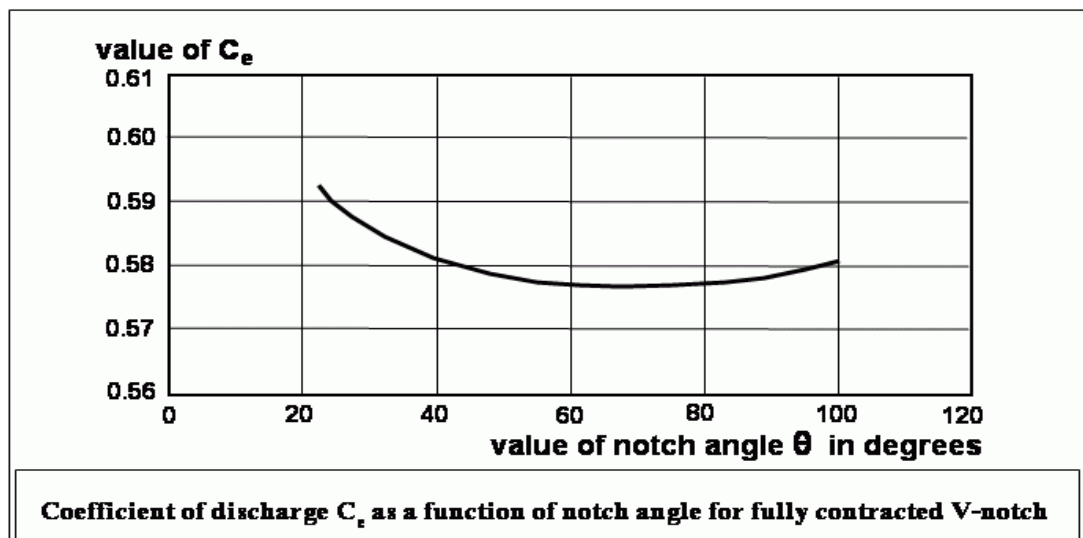
k_h = ค่าปรับความลึกที่เป็นผลจากความหนืดและแรงตึงผิว ขึ้นกับมุม θ

ที่มีค่าระหว่าง 20 - 100 องศา หาได้จากกราฟ ตามรูปที่ 9-16

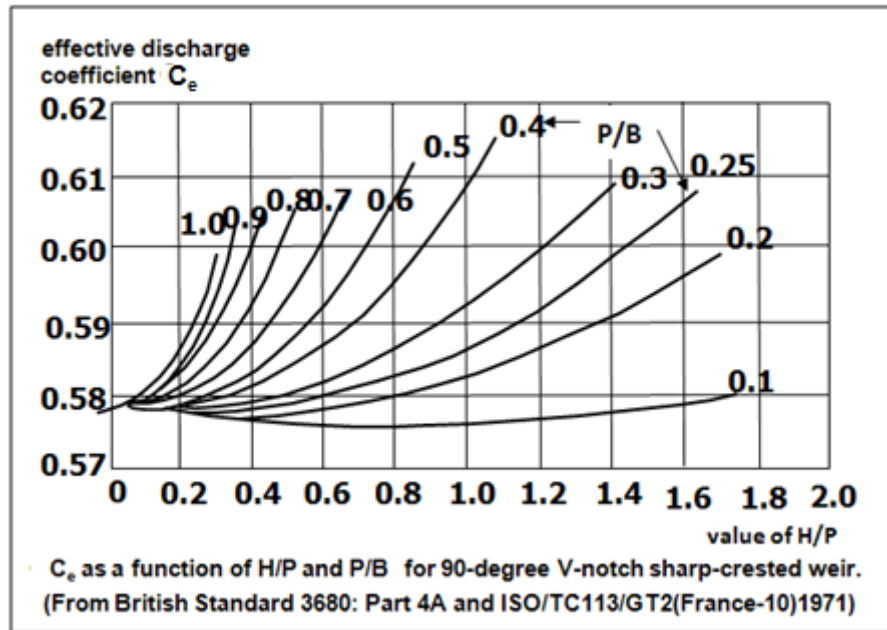
C_e = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล ขึ้นกับค่ามุม θ ของฝ่าย โดยฝ่ายทั่วไปหาได้โดยกราฟในรูปที่ 9-17 ส่วนฝ่ายที่มีมุม 90 องศาขึ้นกับของ H/P และ P/B หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-18



รูปที่ 9-16 กราฟค่าปรับความลึกที่มีความสัมพันธ์กับมุม θ ของฝาย



รูปที่ 9-17 กราฟค่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_e ของฝายฝายสันคมสามเหลี่ยมทั่วไป



รูปที่ 9-18 กราฟค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_e ขึ้นกับค่าของ H/P กับ P/B
สำหรับฝายสันคมสามเหลี่ยมที่มีมุม 90 องศา

ข. การคำนวณโดยประมาณ กรณีฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมที่มีมุม θ เท่ากับ 90 องศา

$$Q = 1.38 H^{5/2} \quad Q: \text{ลบ.ม./วินาที}, H: \text{เมตร}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย
 H = ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านเหนือสันฝาย
 $\theta = 90^\circ$
 $C_e = 0.585$ (เฉลี่ย)

9.3.2 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมสามเหลี่ยม กรณี Submerged flow

Hager (1990) ศึกษาการไหลกรณี Submerged flow ของฝายสันคมสามเหลี่ยม โดยใช้หลักการของ Villemonte สรุปผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ของ $S = H_2 / H_1$ และ $\psi = Q_s / Q$ ตามรูปที่ 9-19

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\frac{Q_s}{Q} = (1 - S^{2.5})^{0.385}$$

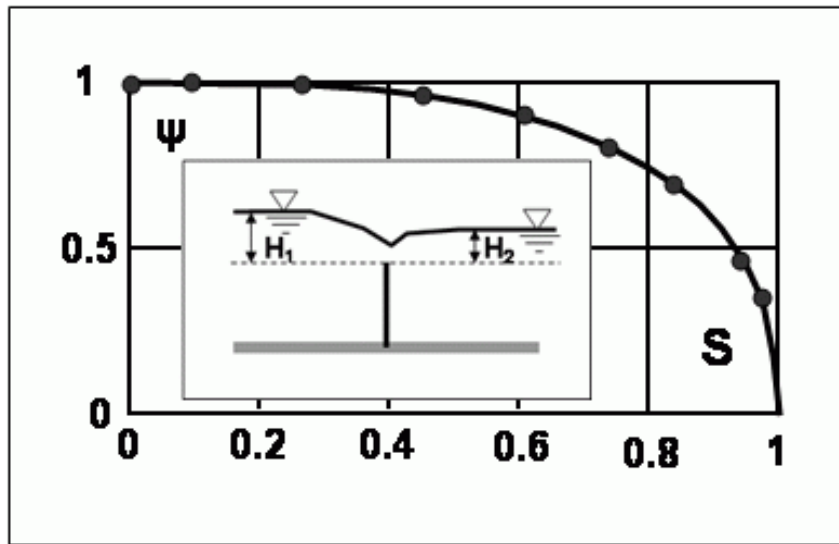
Q_s = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Submerged flow (ม.³/วินาที)

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านฝายกรณี Free flow (ม.³/วินาที)

$$S = H_2 / H_1$$

การใช้กราฟ ตามรูปที่ 9-19

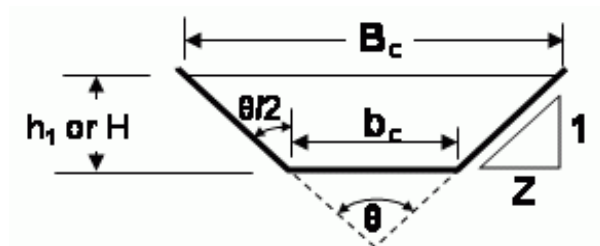
- 1) คำนวณค่า Q จากสมการ Free flow
- 2) หาค่า $S = H_2 / H_1$ นำค่า S ไปหาค่า ψ จากกราฟ
- 3) แทนค่า $Q_S = \psi Q$



รูปที่ 9-19 กราฟใช้ประกอบการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันคมสามเหลี่ยม
กรณี Submerged Flow

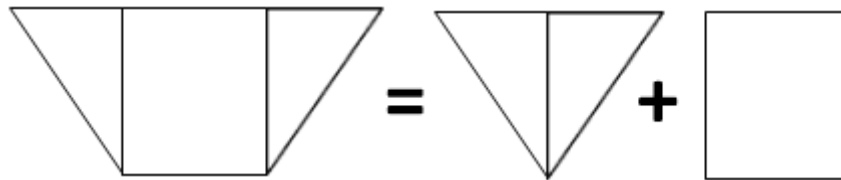
9.4 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal sharp - crested weirs)

หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู นั้นมาจากส่วนตัดของสามเหลี่ยม ซึ่งแสดงตามรูปที่ 9-20 โดยส่วนที่เป็นสันคมต้องกลมมนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 45 องศา



รูปที่ 9-20 ลักษณะของฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมูมาจากฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมและฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม
ประกอบกัน แสดงดังรูปที่ 9-21



รูปที่ 9-21 หลักการคำนวณของฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

สมการของฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_1^{3/2}$

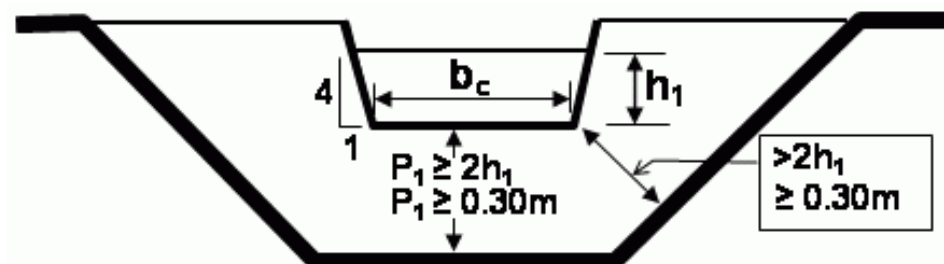
สมการฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม $Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot h_1^{5/2}$

Q ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู = Q ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า + Q ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม

$$Q = \left[C_e \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_1^{3/2} \right] + \left[C_e \cdot \frac{8}{15} \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot h_1^{5/2} \right]$$

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left[b_c + \frac{4}{5} h \tan \frac{\theta}{2} \right] h_1^{3/2}$$

Cipoletti (1886) ได้ปรับปรุงฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบป้านข้าง เพื่อให้การไหลมี
การบีบตัวด้านข้างลดลง โดยปรับให้มียูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ด้านข้างมีความลาดเอียง
แนวตั้ง: แนวราบ เท่ากับ 4:1 ดังนั้นจึงมักเรียกฝายรูปแบบนี้ว่า **Cipoletti weir**



รูปที่ 9-22 ข้อกำหนดพื้นฐานของ Cipoletti weir

สมการคำนวณสำหรับ Cipoletti weir จะคล้ายกับฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบีบข้าง

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_1^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/ (วินาที)²

h_1 = ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.)

b = ความกว้างของสันฝาย, (ม.)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล มีค่า = 0.63

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำ หาได้จากกราฟจากรูปที่ 9-7 กรณีฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมูอนุโลมให้ใช้กราฟของช่องเปิดสี่เหลี่ยม หรือใช้ค่า = 1.0 ถ้าไม่ต้องการความละเอียดในการคำนวณมากนัก

ขีดจำกัดที่เพิ่มเติมจากคุณสมบัติทั่วไป พิจารณารูปที่ 9-22

$$1. 0.06 \text{ m} \leq h_1 \leq 0.60 \text{ m}$$

$$2. h_1 / b_c \leq 0.5$$

สูตรทั่วไปของคำนวณสำหรับ Cipoletti weir

1) เมื่อความเร็วเฉลี่ยกระแสน้ำหน้าฝายน้อยกว่า 0.30 เมตร /วินาที

$$Q = 1.859 L H^{3/2}$$

Q : ลบ.ม./วินาที, H : เมตร (หรือ h_1)

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย

H = ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านเหนือสันฝาย

L = ความกว้างของสันฝาย (หรือค่า b)

2) เมื่อความเร็วเฉลี่ยกระแสน้ำหน้าฝายมากกว่า 0.30 เมตร /วินาที ให้คิด

Velocity head หรือ $\Delta h = v^2/2g$ ด้วย

$$Q = 1.859 L (H + 1.5h)^{5/2}$$

Q : ลบ.ม./วินาที, L, H : เมตร

การไหลรวมในช่องเปิดทั้ง 2 ส่วน

$$Q = Q_r + Q_c = C_e \sqrt{2g} \left[\frac{2}{3} b_c (h_1^{1.5} - h_0^{1.5}) + \int_0^{h_0} (h_0 - n')^{0.5} x dn' \right]$$

เนื่องจากการคำนวณมีความยุ่งยากมากจึงขอแสดงผลสรุปมาแสดง จะได้เป็น

$$\left[\frac{2}{3} b_c (h_1^{1.5} - h_0^{1.5}) + \int_0^{h_0} (h_0 - n')^{0.5} x dn' \right] = b_c \sqrt{a} (h_1 - a/3)$$

$$Q = C_e \sqrt{2ga} b_c (h_1 - a/3)$$

ตารางที่ 9-2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_e ของ Sutro weir ที่สัมพันธ์กับค่า a และ b หรือ b_c

a meters	b (meters)				
	0.150	0.230	0.300	0.330	0.460
0.006	0.608	0.613	0.617	0.618	0.619
0.015	0.606	0.611	0.615	0.617	0.618
0.030	0.603	0.608	0.612	0.613	0.614
0.046	0.601	0.606	0.610	0.611	0.612
0.061	0.599	0.604	0.608	0.609	0.610
0.076	0.598	0.602	0.606	0.608	0.609
0.091	0.597	0.602	0.606	0.607	0.608

ในทางปฏิบัติจะพบว่าการตรวจวัดโดยใช้ Sutro weir นั้นจะทำให้ง่ายมีความสะดวกในการคำนวณมาก เพราะว่าเมื่อนำค่าความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝาย (h_1) มาคูณค่าคงที่ของฝายก็จะทราบปริมาณน้ำไหลผ่านฝายได้เลย โดยการปรับปรุงสูตรการคำนวณต่อไปนี้

ปรับปรุงสูตรการคำนวณเป็น

$$Q = K (h_1 - a/3)$$

หรือ

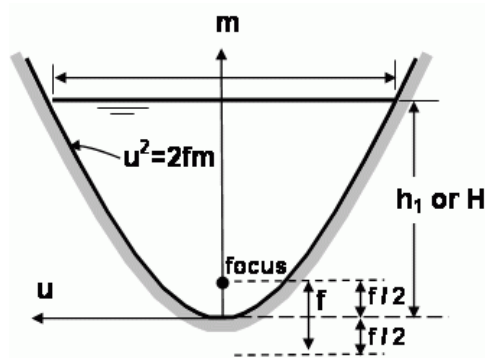
$$Q = K h_d$$

เมื่อ $K = C_e \sqrt{2ga} b_c$ จะเป็นค่าคงที่ เพราะ ค่า C_e , $g=9.81$, a , b_c เป็นค่าคงที่
 $h_d = (h_1 - a/3)$

Sutro weir นิยมใช้มากในต่างประเทศเพื่อวัดปริมาณน้ำในคูส่งน้ำ คูระบายน้ำในระบบชลประทาน หรือใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงาน ฯลฯ

9.6 ฝายสันคมรูปพาราโบลา (Parabolic sharp - crested weirs)

เป็นฝายที่อาจจัดในกลุ่มที่ศึกษาในเชิงวิชาการมากกว่าการใช้งานจริง ในที่นี้นำเสนอให้เห็นแนวคิดและหลักการคำนวณเท่านั้น



รูปที่ 9-24 คุณสมบัติทั่วไปของฝายสันคมรูปพาราโบลา

$$x = 2\sqrt{2fm}$$

$$Q = C_e \sqrt{2g} \int_0^{h_1} 2\sqrt{2fm}(h_1 - m) dm$$

$$m = \frac{h_1}{2} (1 - \cos \alpha)$$

$$Q = C_e \sqrt{2g} \cdot 2\sqrt{2f} \cdot \left[\frac{h_1}{2} \right]^2 \int_0^\pi \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \sin \alpha d\alpha$$

$$Q = C_e \frac{\pi}{2} \sqrt{fg} h_1^2$$

เมื่อ f = focus of parabolic, เมตร

h_1 = ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านสันฝาย, เมตร

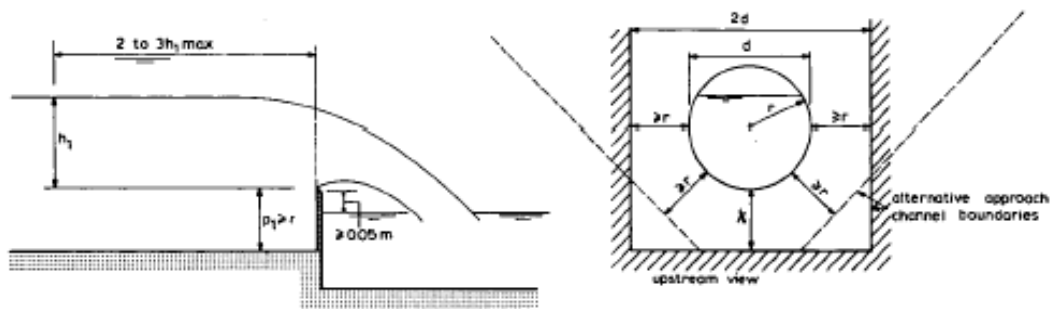
ค่า C_e หาได้จากตารางที่ 9-3 โดยจะสัมพันธ์กับค่า h_1/f

ตารางที่ 9-3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_e ของฝายสันคมรูปพาราโบลา

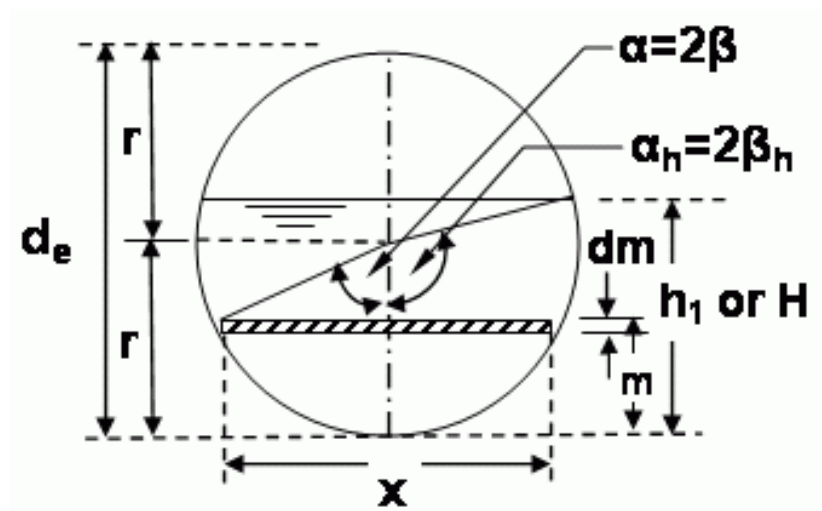
h_1/f	C_e	h_1/f	C_e	h_1/f	C_e
1.00	0.606	0.65	0.595	0.30	0.600
0.95	0.604	0.60	0.594	0.25	0.604
0.90	0.602	0.55	0.593	0.20	0.610
0.85	0.600	0.50	0.593	0.15	0.623
0.80	0.599	0.45	0.594	0.10	0.650
0.75	0.597	0.40	0.595	0.05	0.750
0.70	0.596	0.35	0.597	0.00	-

9.7 ฝายสันคมรูปวงกลม (Circular sharp - crested weirs)

เป็นฝายที่อาจจัดในกลุ่มที่ศึกษาในเชิงวิชาการมากกว่าการใช้งานจริง ในที่นี้
นำเสนอให้เห็นแนวคิดและหลักการคำนวณเท่านั้น



รูปที่ 9-25 แสดงข้อกำหนดทั่วไปของฝายสันคมรูปวงกลม



รูปที่ 9-26 รูปด้านหน้าแสดงของการไหลผ่านฝายสันคมรูปวงกลม

$$x = 2r \sin \alpha = d_c \sin 2\beta = 2d_c \sin \beta \cos \beta$$

$$m = r(1 - \cos \alpha) = d_c \sin^2 \beta$$

$$dm = 2d_c \sin \beta \cos \beta d\beta$$

ดังนั้น $Q = C_e \sqrt{2g} \int_0^{\beta_h} (2d_c \sin \beta \cos \beta)^2 \sqrt{(h_1 - d_c \sin^2 \beta)} d\beta$

ถ้า $k^2 = \frac{h_1}{d_c}$ (มีค่า < 1)

$$Q = C_e 4\sqrt{2g} d_c^{2.5} \left[\int_0^{\beta_h} \sin^2 \beta \sqrt{(k^2 - \sin^2 \beta)} d\beta - \int_0^{\beta_h} \sin^4 \beta \sqrt{(k^2 - \sin^2 \beta)} d\beta \right]$$

$\sin \beta = k \sin \psi$ and $\Delta \psi = \sqrt{(1 - k^2 \sin^2 \beta)}$

$$E = \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\Delta \psi}$$

$$K = \int_0^{\pi/2} \Delta \psi d\psi$$

$$\int_0^{\pi/2} \frac{\sin^n \psi}{\Delta \psi} = \frac{n-2}{n-1} \frac{1+k^2}{k^2} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^{n-2} \psi}{\Delta \psi} d\psi - \frac{n-3}{n-1} \frac{1}{k^2} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^{n-4} \psi}{\Delta \psi} d\psi$$

$$Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} d_c^{2.5} \{2(1 - k^2 + k^4)E - (2 - 3k^2 + k^4)K\}$$

$$Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} d_c^{2.5} \omega = C_e \phi_i d_c^{2.5}$$

$$\omega = \{2(1 - k^2 + k^4)E - (2 - 3k^2 + k^4)K\}$$

$$\phi_i = \frac{4}{15} \sqrt{2g}$$

ค่า ω และ ϕ_i ที่ขึ้นอยู่กับค่าของ $\frac{h_1}{d_c}$ หาได้จาก ตารางที่ 9-4

ตารางที่ 9-4 ค่าของ ω และ ϕ_i ที่ขึ้นอยู่กับค่าของ $\frac{h_1}{d_c}$

Table 5.6 Values of ω and ϕ as a function of the filling ratio $h_1/d_c = k^2$ of a circular sharp-crested weir

h_1/d_c	ω dimension- less	ϕ_i $m^{1/2}/s$	h_1/d_c	ω dimension- less	ϕ_i $m^{1/2}/s$	h_1/d_c	ω dimension- less	ϕ_i $m^{1/2}/s$
0.01	0.0004	0.00047	0.36	.3451	.4076	0.71	1.1804	1.3943
.02	.0013	.00154	.37	.3633	.4291	.72	1.2085	1.4275
.03	.0027	.00319	.38	.3819	.4511	.73	1.2368	1.4609
.04	.0046	.00543	.39	.4009	.4735	.74	1.2653	1.4946
.05	.0071	.00839	.40	.4203	.4965	.75	1.2939	1.5284
.06	.0102	.0120	.41	.4401	.5199	.76	1.3226	1.5623
.07	.0139	.0164	.42	.4603	.5437	.77	1.3514	1.5963
.08	.0182	.0215	.43	.4809	.5681	.78	1.3802	1.6303
.09	.0231	.0273	.44	.5019	.5929	.79	1.4091	1.6644
.10	.0286	.0338	.45	.5233	.6182	.80	1.4380	1.6986
.11	.0346	.0409	.46	.5451	.6439	.81	1.4670	1.7328
.12	.0412	.0487	.47	.5672	.6700	.82	1.4960	1.7671
.13	.0483	.0571	.48	.5896	.6965	.83	1.5250	1.8013
.14	.0560	.0661	.49	.6123	.7233	.84	1.5540	1.8356
.15	.0642	.0758	.50	.6354	.7506	.85	1.5830	1.8699
.16	.0728	.0860	.51	.6588	.7782	.86	1.6120	1.9041
.17	.0819	.0967	.52	.6825	.8062	.87	1.6410	1.9384
.18	.0914	.1080	.53	.7064	.8344	.88	1.6699	1.9725
.19	.1014	.1198	.54	.7306	.8630	.89	1.6988	2.0066
.20	.1119	.1322	.55	.7551	.8920	.90	1.7276	2.0407
.21	.1229	.1452	.56	.7799	.9212	.91	1.7561	2.0743
.22	.1344	.1588	.57	.8050	.9509	.92	1.7844	2.1077
.23	.1464	.1729	.58	.8304	.9809	.93	1.8125	2.1409
.24	.1589	.1877	.59	.8560	1.0111	.94	1.8403	2.1738
.25	.1719	.2030	.60	.8818	1.0416	.95	1.8678	2.2063
.26	.1854	.2190	.61	.9079	1.0724	.96	1.8950	2.2384
.27	.1994	.2355	.62	.9342	1.1035	.97	1.9219	2.2702
.28	.2139	.2527	.63	.9608	1.1349	.98	1.9484	2.3015
.29	.2289	.2704	.64	.9876	1.1666	.99	1.9744	2.3322
.30	.2443	.2886	.65	1.0147	1.1986	1.00	2.000	—
.31	.2601	.3072	.66	1.0420	1.2308	$Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} \omega d_c^{2.5}$ or $Q = C_e \phi_i d_c^{2.5}$		
.32	.2763	.3264	.67	1.0694	1.2632			
.33	.2929	.3460	.68	1.0969	1.2957			
.34	.3099	.3660	.69	1.1246	1.3254			
.35	.3273	.3866	.70	1.1524	1.3612			

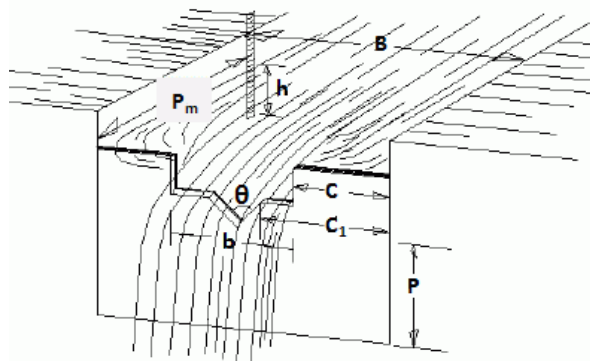
Values of ω from Stevens 1957

$$Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} d_c^{2.5} \omega = C_e \phi_i d_c^{2.5}$$

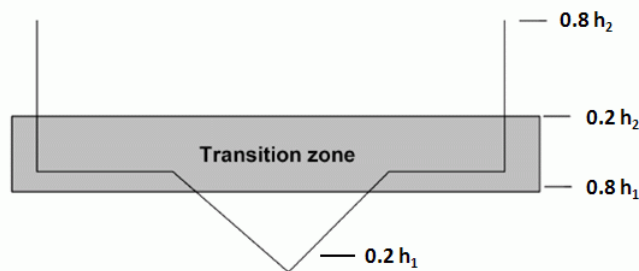
9.8 ฝายสันคมแบบผสม (Compound sharp - crested weirs)

เป็นฝายที่นำรูปแบบของฝายสันคมแบบต่าง ๆ โดยเลือกคุณสมบัติที่ดี มาปรับใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลของน้ำในทางน้ำ เช่น ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมใช้ได้กับความลึกของน้ำน้อย ๆ หรืออัตราการไหลต่ำ ตะกอนที่ไหลปนมากับน้ำไหลผ่านไปได้ง่าย ในขณะที่ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมาะกับอัตราการไหลสูง ๆ ดังนั้นหากเป็นทางน้ำที่มีอัตราการไหลหลายระดับคือตั้งแต่ต่ำน้อยมากจนถึงค่าสูงสุดของความจุทางน้ำ หรือมีตะกอนไหลปนมากับน้ำมาก การใช้ฝายวัดน้ำรูปแบบผสมของฝายรูปสามเหลี่ยมอยู่ส่วนล่างกับฝายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่บนบนก็จะทำให้สามารถตรวจวัดได้ครอบคลุมทุกอัตราการไหล และแก้ปัญหาการเกิดตะกอนตกจนหน้าฝายวัดน้ำเมื่ออัตราการไหลต่ำ ๆ ได้ เป็นต้น

รูปแบบของฝายสันคมแบบผสม (Compound sharp-crested weirs อาจเรียกเป็น Combined sharp-crested weirs weir) นั้นมีหลากหลาย แต่ที่นิยมสร้างใช้งานจะมีรูปแบบผสมระหว่างฝายสันคมสามเหลี่ยม และฝายสันคมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามรูปแบบของ USBR ดังแสดงในรูปที่ 9-27



รูปที่ 9-27 ฝายสันคมแบบผสมของฝายสามเหลี่ยมและฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 9-28 ฝายสันคมแบบผสมของฝายสามเหลี่ยม 90 องศาและฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้า
จะมีขอบเขตการไหลทับซ้อนกัน (Transition zone)

ตัวอย่างลักษณะฝายแบบผสมที่ออกแบบโดย USBR แสดงในรูปที่ 9-27 เป็นฝายผสมระหว่างฝายสันคมแบบผสมของฝายสามเหลี่ยม 90 องศาและฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าระยะต่างๆ ต้องเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของฝายสันคมทั้ง 2 ชนิด

B: ความกว้างของทางน้ำ ค่าต่ำสุดไม่น้อยกว่า 0.61 ม. (2 ฟุต)

b: ความกว้างของช่องฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าต่ำสุดไม่น้อยกว่า 0.305 ม. (1 ฟุต)

การไหลผ่านฝายหากระดับน้ำต่ำกว่าช่องฝายสามเหลี่ยมให้คำนวณด้วยสมการฝายสามเหลี่ยม 90 องศาที่ได้อธิบายมาแล้ว แต่หากระดับน้ำอยู่สูงกว่าช่องฝายสามเหลี่ยม ลักษณะการไหลจะเปลี่ยนไป อัตราการไหลจะต้องคิดจาก 2 ส่วนดังนี้

อัตราการไหลรวม $\approx$ อัตราการไหลผ่านช่องเปิดรูปสามเหลี่ยม + ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

อัตราการไหลรวมของฝายแบบผสมจะใกล้เคียงกับอัตราการไหลที่คิดแบบแยกส่วนในกรณีการไหลปกติของฝายแต่ละแบบ เพราะจะเกิดการทับซ้อนกันของการไหล (Transition zone) ที่ระดับ 0.8 ของความสูงฝายสามเหลี่ยม หรือ $0.8 d_1$ ถึงระดับ 0.2 ของความลึกสูงสุดน้ำที่ผ่านช่องเปิดของฝายสี่เหลี่ยม หรือ $0.2 d_2$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 9-28

ดังนั้นฝายประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการ Calibrate เพื่อหาสมการการไหล และหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่ความลึกแต่ละช่วงของฝายแต่ละตัวก่อนเสมอจึงจะใช้ตรวจวัดได้ถูกต้อง

ตัวอย่าง การคำนวณที่ได้จากการ Calibrate ฝายแบบผสมรูปที่ 9-27 เมื่อความลึกการไหลอยู่ในช่วงระดับของฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้ว

$$Q = 5.2 h_1^{1.72} - 0.04 + 1.82 b h_2^{1.5}$$

Q = อัตราการไหล (ม.³/วินาที)

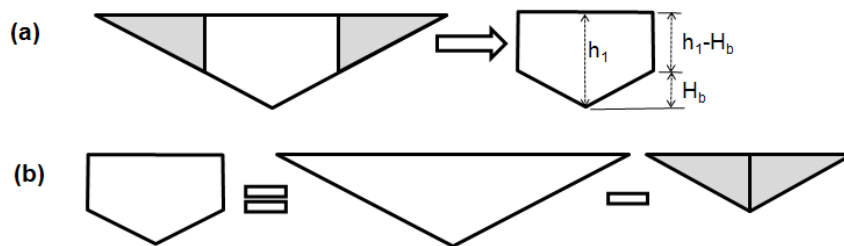
h_1 = ความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม (ม.)

h_2 = ความลึกของน้ำเหนือฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ม.)

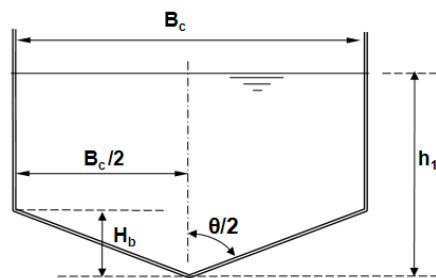
b = ความกว้างของช่องฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ม.)

9.9 ฝ่ายสันคมรูปส่วนตัดของรูปสามเหลี่ยม (Truncated triangular sharp-crested weirs)

พิจารณารูปที่ 9-29 ลักษณะของ Truncated triangular sharp-crested weirs นั้นเป็นช่องเปิดเป็นรูปห้าเหลี่ยม ที่เกิดจากรูปสามเหลี่ยมสูง h_1 ที่ถูกตัดส่วนมุมที่ฐานทั้งสองข้างออก ตามรูป (a) ส่วนการไหลผ่านช่องเปิดรูปห้าเหลี่ยมนั้นอาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนของหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมรูปใหญ่มีความสูง h_1 หักกับส่วนของหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมที่ถูกตัดออกสูง $h_1 - H_b$ ในรูป (b)



รูปที่ 9-29 ที่มาของ Truncated triangular sharp-crested weirs



รูปที่ 9-30 แสดงรูปร่างมิติของ Truncated triangular sharp-crested weirs

การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Truncated triangular sharp-crested weirs

ถ้า $h_1 \leq H_b$ ใช้สมการ

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} h_1^{2.5}$$

ถ้า $h_1 > H_b$ ใช้สมการ

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} [h_1^{2.5} - (h_1 - H_b)^{2.5}]$$

หรือ

$$Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} \frac{B_c}{H_b} [h_1^{2.5} - (h_1 - H_b)^{2.5}]$$

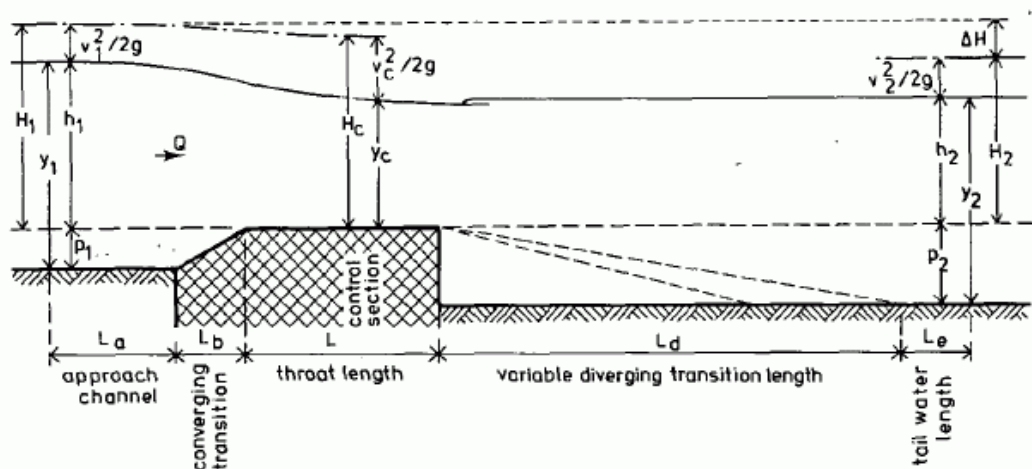
บทที่ 10

ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันกว้าง (Broad - Crested Weir)

ฝายสันกว้างที่เป็นฝายวัดน้ำที่มีสันฝายอยู่ในแนวระนาบ และการกระจายแรงดันของน้ำบนสันฝายเป็นแบบสถิต (Hydrostatic pressure) กล่าวคือ เหนือสันฝายไม่มีความเร่งของการไหลเกิดขึ้น เส้นสายธารการไหลของน้ำเป็นแนวตรงและขนานไปกับสันฝาย ซึ่งเป็นลักษณะการไหลแบบวิกฤติ (Critical flow) เกือบตลอดแนวสันฝาย ใช้วัดปริมาณน้ำที่ไหลในทางน้ำ โดยนิยมติดตั้งไว้ที่ปากคลองส่งน้ำหรือคูส่งน้ำ เพื่อที่จะช่วยให้การควบคุมปริมาณน้ำทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

10.1 หลักการของฝายสันกว้างโดย M.G. Bos

M.G. Bos (1984) ได้เสนอแนวคิดในเชิงอุดมคติของการคำนวณการไหลของน้ำผ่าน Broad-crested weir และ Long-throated flume โดยพิจารณารูปที่ 10-1 ซึ่งเป็นรูปตัวแทนของ Broad-crested weir และ Long-throated flume ที่ใช้ในการศึกษาอัตราการไหล โดยมีคุณสมบัติพื้นฐาน $0.08 \leq H_1/L \leq 0.50$ และมีสมมติฐานว่าไม่เกิดการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลผ่านอาคาร



รูปที่ 10-1 แสดงรูปแบบที่มีลักษณะเฉพาะของ Broad-crested weir และ Long-throated flume

$$H_1 = h_1 + \alpha \bar{v}_1^2 / 2g = H = y + \alpha \bar{v}^2 / 2g$$

หรือ $\bar{v} = \{2g(H_1 - y)\}^{0.5} \alpha^{-0.5}$

เมื่อ $H_1 = \text{Total energy head ด้านเหนือ}$

$$Q = \bar{v}A \quad \text{และ} \quad \alpha = 1$$

$$Q = A \{2g(H_1 - y)\}^{0.5}$$

การไหลในตำแหน่ง Critical flow

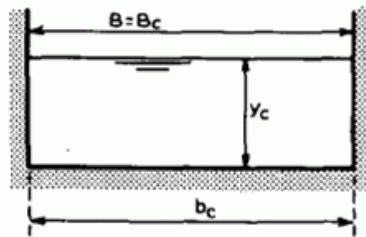
$$y = y_c$$

$$\text{และ} \quad \frac{\bar{v}_c^2}{2g} = \frac{A_c}{2B_c}$$

หรือ $\bar{v} = \bar{v}_c = \left(\frac{g A_c}{B_c} \right)^{0.50}$

จะได้ว่า $Q = A_c \{2g(H_1 - y_c)\}^{0.5} \quad (10.1)$

ถ้า Broad-crested weir มีช่องเปิดที่น้ำไหลผ่านเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 10-2 รูปแสดงมิติของ Rectangular control section

$$A_c = b_c y_c \quad \text{และ} \quad A_c / B_c = y_c$$

$$y_c = \frac{2}{3} H = \frac{2}{3} H_1 \quad \text{..... (Rectangular control section)}$$

$$A_c = b_c \frac{2}{3} H_1$$

แทนค่า A_c และ y_c ในสมการ (10.1)

$$\text{จะได้} \quad Q = \frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} g \right)^{0.50} b_c H_1^{1.5}$$

ในสภาพการไหลจริงต้องมีตัวแปรค่าความหนืด ความปั่นป่วนของการไหล ฯลฯ ที่ทำให้อัตราการไหลเปลี่ยนไปจากค่าในทางทฤษฎี ที่แทนด้วยค่า สัมประสิทธิ์ของการไหล (C_d)

$$\text{ดังอัตราการไหลจะเป็น} \quad Q = C_d \frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} g \right)^{0.50} b_c H_1^{1.5}$$

ในทางปฏิบัติ การวัดค่า H_1 ที่ต้องคิด Approach velocity ($v_1^2/2g$) ทำได้ยาก จึงวัดเพียงค่าความลึกของของน้ำด้านเหนือน้ำ (h_1) แทน ทำให้ต้องชดเชยด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของการไหล (C_v)

ดังนั้นอัตราการไหลจะเป็น
$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} g \right)^{0.50} b_c h_1^{1.5}$$

โดยที่
$$C_v = \left[\frac{H_1}{h_1} \right]^U$$

U เป็นค่ายกกำลังของ h_1 ในสมการมาตรฐานของฝาย $Q = CLh_1^U$

$U = 1.5$ สำหรับหน้าตัดการไหลของรูปสี่เหลี่ยม

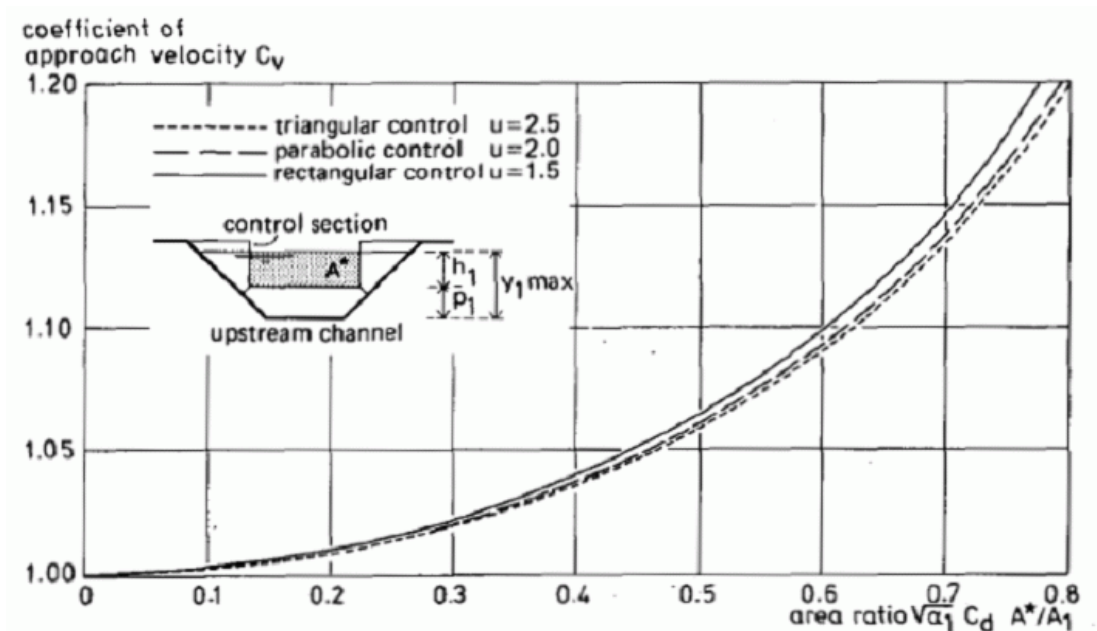
$U = 2.0$ สำหรับหน้าตัดการไหลของรูป Parabolic

$U = 2.5$ สำหรับหน้าตัดการไหลของรูปสามเหลี่ยม

ค่า C_v นั้นอาจหาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 (รูปเดียวกับรูปที่ 9-7) โดยจะสัมพันธ์กับค่า $\sqrt{\alpha_1} C_d A^* / A_1$... (ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วน้ำ $\alpha_1 = 1$)

A^* = พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ไหลผ่านตัวอาคารวัดน้ำ $y = h_1$

A_1 = พื้นที่หน้าตัดการไหลในทางน้ำที่จุดวัดระดับน้ำ $y = h_1 + p_1$



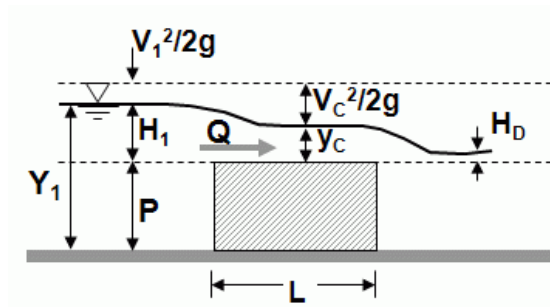
A^* = wetted area at control section if water depth equals $y = h_1$

A_1 = wetted area at head measurement station

รูปที่ 10-3 ค่า C_v ที่สัมพันธ์กับค่าของอัตราส่วนพื้นที่ $\sqrt{\alpha_1} C_d A^* / A$

10.2 หลักการของฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Woodburn (1930) ได้ศึกษาฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบเงื่อนไขและข้อกำหนดด้านอื่น ๆ เมื่อ H_1 เป็นความลึกน้ำด้านเหนือของฝาย และ L เป็นความกว้างของสันฝายในแนวทศน้ำไหล (พิจารณารูปที่ 10 - 4) ดังนี้



รูปที่ 10-4 ลักษณะการไหลผ่านฝายสันกว้าง

- ลักษณะการไหลผ่านฝายสันกว้างเป็นแบบ **Critical flow** เกือบตลอดแนว L
- เมื่อ $0.07 \leq \frac{H_1}{L} \leq 0.50$ การไหลจะเป็นแบบชลสติดอย่างแท้จริง

ถ้า $\frac{H_1}{L} \leq 0.07$ ต้องนำค่าของพลังงานที่สูญเสียไปบนสันฝายมาคิดด้วย เพราะการไหลจะมีลักษณะเป็น **Subcritical flow** มีลักษณะเป็นระลอกคลื่น

ถ้า $\frac{H_1}{L} \geq 0.50$ เส้นสายธารบนสันฝายจะมีการโค้งตัวมาก (มีลักษณะคล้ายการไหลผ่านฝายต้นสั้น) ทำให้ความดันของน้ำบนสันฝายไม่เป็นแบบชลสติดอย่างแท้จริง

10.2.1 การวิเคราะห์ฝายสันกว้างในทางทฤษฎีกรณีการไหลแบบ **Free flow**

การไหลผ่านฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เมื่อ b = ความยาวของฝายสันกว้าง

$$Q = A_1 V_1 = A_c V_c$$

$$A_c = b \cdot y_c$$

$$V_c = \sqrt{g \cdot y_c}$$

ดังนั้น
$$Q = b \cdot y_c \sqrt{g \cdot y_c} = b \sqrt{g} y_c^{3/2}$$

$$y_c = \frac{2}{3} E_c$$

$$\frac{V_1^2}{2g} + H_1 = \frac{V_c^2}{2g} + y_c = E_c$$

$$E_c = \frac{V_1^2}{2g} + H_1$$

$$\text{ดังนั้น} \quad y_c = \frac{2}{3} \left(H_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

$$\text{แทนค่า} \quad Q = b \sqrt{g} y_c^{3/2} = b \sqrt{g} \left[\frac{2}{3} \left(H_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) \right]^{3/2}$$

$$\text{เมื่อ } \frac{V_1^2}{2g} \text{ มีค่าน้อยมาก,} \quad Q = b \sqrt{g} \left[\frac{2}{3} (H_1) \right]^{3/2}$$

$$Q_t = 1.705 b H_1^{3/2}$$

แต่การไหลที่เกิดขึ้นจริง (Q_{actual} หรือ Q_a) นั้นจากการทดลองพบว่า

$$Q_a = 1.705 C_d b H_1^{3/2} = C_b H_1^{3/2}$$

โดยที่ $C = 1.705 C_d$ และ C จะมีค่าระหว่าง 1.40 ถึง 2.10 แต่ส่วนใหญ่ค่าจะอยู่ในช่วง 1.66

หลักการพื้นฐานของฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังกล่าวเป็นการไหลแบบ **Free flow** โดยเมื่อค่าเปรียบเทียบระดับด้านท้ายน้ำกับด้านเหนือน้ำ $H_D / H_1 \leq 0.66$ ให้ถือเป็นการไหลแบบ **Free flow**

10.2.2 ความสูงน้อยที่สุดของฝายสันกว้าง (P)

จากหลักการไหลผ่านฝายสันกว้างเป็นแบบ **Critical flow** ที่จะเกิด **Critical depth** เหนือสันฝาย และโดยทั่วไปเราจะรู้ค่าสำคัญของทางน้ำที่ออกแบบไว้ เช่น Q_{max} , V_{max} , y_{max} ดังนั้นการกำหนดความสูงของฝายสันกว้าง (P) จึงพิจารณาจาก

$$\frac{V_1^2}{2g} + Y_1 = \frac{V_c^2}{2g} + y_c + P$$

$$\text{เมื่อ} \quad V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad y_c = \sqrt{\left(\frac{Q^2}{g b^2} \right)} \quad V_c = \sqrt{g y_c}$$

10.3 รูปแบบของฝายวัดน้ำประเภทฝายสันกว้าง

จากปัญหาข้อจำกัดของฝายสันคมที่มีข้อกำหนดในเรื่องรูปร่างและขนาดมิติที่เหมาะสมกับการตรวจวัดในทางน้ำขนาดเล็ก และการสร้างสันฝายด้วยแผ่นโลหะบางๆ ที่มีสวนสันคมที่ไม่ทนทานเสียหายปัดงอหรือผุกร่อนได้ง่าย จึงได้มีการพัฒนาเป็นฝายวัดน้ำสันกว้างขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว รวมทั้งเป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ ด้วย โดยอาจแบ่งฝายวัดน้ำสันกว้างได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

10.3.1 ฝายสันกว้างแบบฝายแข็ง เป็นรูปแบบฝายสันกว้างรูปแบบมาตรฐานดั้งเดิม อาจออกแบบได้หลายรูปแบบ ได้แก่

- 1) ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular broad crested weir)
- 2) ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้งวงกลม (Round-nose broad crested weir)
- 3) ฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม (Triangular broad crested weir)

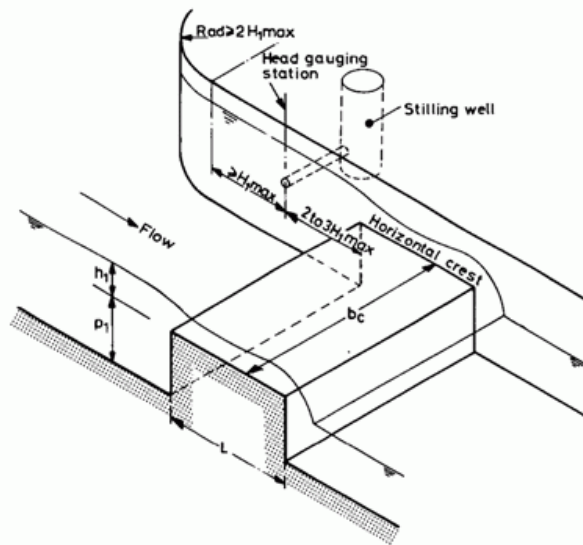
10.3.2 ฝายสันกว้างที่พัฒนาจากฝายสันคม โดยการติดแผ่นโลหะแนวราบที่มีความกว้างที่เหมาะสมบนตำแหน่งที่เป็นสันคมของช่องเปิดฝาย ฝายวัดน้ำกลุ่มนี้จะมีรูปร่างช่องเปิดเช่นเดียวกับฝายสันคมที่กล่าวมาแล้ว ได้แก่ Rectangular, Parabolic, Triangular, Truncated triangular, Trapezoidal, Circular เป็นต้น

10.3.3 ฝายสันกว้างรูปแบบพิเศษ ถ้าเป็นฝายรูปแบบใหม่มักพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาคัดที่ยังคงมีอยู่ หรือเพื่อสร้างนวัตกรรมใหม่ ๆ หรือมีรูปแบบที่สร้างง่าย ได้แก่ Romijn movable, Faiyum weir เป็นต้น

10.4 ฝายสันกว้างแบบฝายแข็ง

10.4.1 ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular broad crested weir)

10.4.1.1 รูปแบบมาตรฐานของฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 10-5 แสดงรูปแบบมาตรฐานของฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

- เป็นฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สันฝายอยู่ในแนวราบ ด้านหน้าของฝายอยู่ในแนวตั้งและเรียบ จึงอาจเรียก ฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบคม

- ตัวฝายควรติดตั้งในทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และตั้งฉากกับทิศทางน้ำไหล

- การวัดระดับน้ำด้านเหนือน้ำ วัดที่ระยะ 2 - 3 เท่าของความสูงของระดับน้ำสูงสุดที่ไหลผ่านสันฝาย

- พฤติกรรมการไหลของน้ำบนสันฝายขึ้นกับค่าสัดส่วนของความลึกของน้ำเหนือสันฝาย (h_1) และความกว้างของสันฝาย (L) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ คือ

1) $\frac{h_1}{L} \leq 0.08$ การไหลจะอยู่ในภาวะได้วิกฤติ (Subcritical flow) ซึ่งไม่สามารถใช้ฝายเป็นอาคารวัดอัตราการไหลของน้ำได้ เพราะการไหลจะคล้ายระลอกคลื่น

2) $0.08 \leq \frac{h_1}{L} \leq 0.33$ ถือเป็นการไหลของฝายสันกว้างที่เป็นการไหลในภาวะวิกฤติ (Critical flow) ที่เส้นสายธารบนสันฝายขนานกัน ค่าสัมประสิทธิ์การไหลมีค่าคงที่

3) $0.33 \leq \frac{h_1}{L} \leq 1.5$ to 1.8 ลักษณะการไหลเส้นสายธารเหนือสันฝายจะไม่ขนานกันแต่จะมีความโค้งคล้ายการไหลของฝายสันคม

4) $\frac{h_1}{L} \geq 1.5$ การไหลของน้ำเหนือสันฝายกับน้ำด้านท้ายฝายจะมีการแยกตัวเป็นสภาวะการไหลแบบอิสระ คล้ายการไหลบนฝายสันคมแต่ยังไม่มี ความมั่นคง และถ้า $\frac{h_1}{L} \geq 3.0$ การแยกตัวจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ ดังเช่นการไหลของฝายสันคม และสภาวะการไหลมีความมั่นคงแน่นอน และจะเกิดความดันใต้แผ่นน้ำ (Nappe) เหมือนกรณีฝายสันคมที่ต้องติดตั้งท่อระบายอากาศเพื่อให้สภาพสุญญากาศหมดไป

จากสภาพการไหลทั้ง 4 ลักษณะข้างต้นจะเป็นการไหลแบบ **Free flow** ภายใต้อำนาจต่อไปนี้

เมื่อ p_1 คือความสูงของฝาย และ h_2 เป็นความลึกของน้ำด้านท้ายฝาย

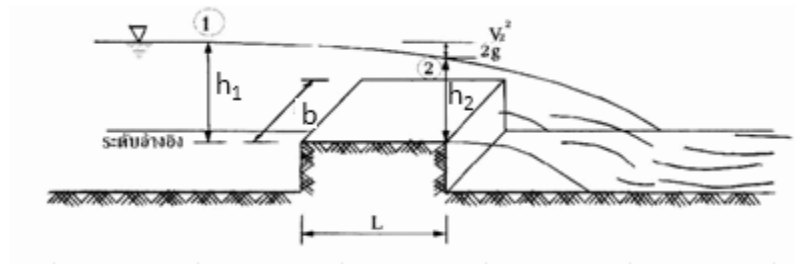
$$\text{กรณี } 0.08 \leq \frac{h_1}{L} \leq 0.33 \quad \text{ค่า } \frac{h_2}{h_1} \leq 0.66$$

$$\text{กรณี } \frac{h_1}{L} \geq 1.5 \quad \text{ค่า } \frac{h_2}{h_1} \leq 0.38$$

$$\text{กรณี } \frac{h_1}{L} \text{ มากกว่าช่วง } 0.33 \leq \frac{h_1}{L} \leq 1.5 \quad \text{ค่า } \frac{h_1}{h_1 + p_1} \leq 0.35$$

10.4.1.2 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบคม

ก. การไหลแบบ Free flow



รูปที่ 10 - 6 แสดงการไหลผ่านฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พิจารณา รูปที่ 10 - 6 สมการพลังงานที่จุด (1) และจุด (2)

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

$P_1 = P_2$ เป็นความดันบรรยากาศ และ V เข้าใกล้ 0 ที่ $Z_1 = h_1$

$$\text{ดังนั้น} \quad 0 + 0 + h_1 = 0 + \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

$$V = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

$$A = bh_1$$

$$Q = bh_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

$$\text{เมื่อการไหลเป็นแบบ Critical flow} \quad h_2 = \frac{2}{3} E_1 \approx \frac{2}{3} h_1$$

$$Q = b \frac{2}{3} h_1 \sqrt{2g \frac{h_1}{3}}$$

$$Q = B \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} \cdot h_1^{3/2}$$

$$Q_r = C_d C_v b \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} \cdot h_1^{3/2}$$

$$Q_r = 1.705 C_d C_v b \cdot h_1^{3/2}$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²

b = ความยาวของสันฝาย (ม.)

h_1 = ความลึกน้ำด้านเหนือหน้าที่ตำแหน่งตรวจวัดถึงสันฝาย (ม.)

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วยของกระแสน้ำที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจากเสดของความเร็วในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 โดยใช้ค่าความสัมพัทธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1}$ เมื่อ A^* เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดเหนือสันฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย ในกรณีนี้ให้ใช้เส้นกราฟช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular control) หากไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากอาจใช้ $C_v = 1$

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

$$\text{ก. ภายใต้งเออนไขการไหล } 0.33 \leq \frac{h_1}{L} \leq 1.5 \text{ และ } \frac{h_1}{h_1 + p_1} \leq 0.35$$

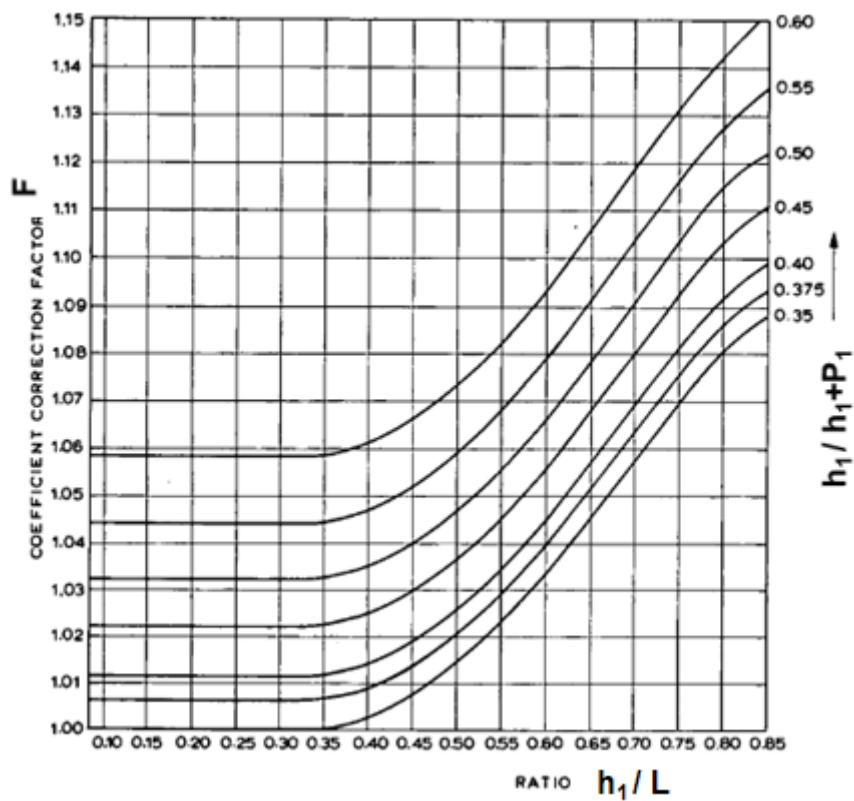
$$C_d \text{ มีค่าเฉลี่ย} = 0.848$$

ข. กรณีไม่เป็นตามภายใต้งเออนไข ก. ข้างต้น ต้องปรับแก้ค่า C_d ที่มีค่า 0.848

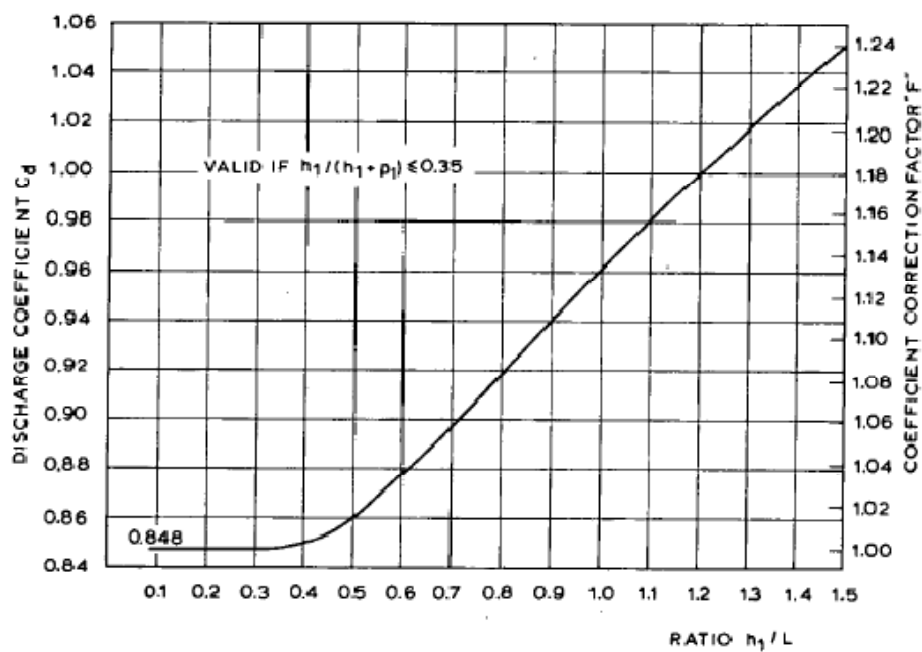
ด้วยค่า X_c ที่สัมพันธ์กับค่า Coefficient correction factor F ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 10-7 โดย F เป็นค่าที่ขึ้นกับความสัมพัทธ์ของ $\frac{h_1}{L}$ และ $\frac{h_1}{h_1 + p_1}$ ให้นำค่า F ไปคำนวณค่าปรับแก้ X_c จากสมการต่อไปนี้

$$X_c = \pm(10F - 8) \text{ percent}$$

• ในกรณีที่ ไม่คิด C_v และ $\frac{h_1}{h_1 + p_1} \leq 0.35$ C_d หาได้จากกราฟรูปที่ 10-8



รูปที่ 10-7 ค่าปรับแก้ F ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของ h_1/L และ $h_1/(h_1+p_1)$
สำหรับสายสันกว้างหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 10-8 กราฟค่า C_d ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของ Factor F และ h_1/L
เมื่อไม่คิด C_v และ $h_1/(h_1+p_1) \leq 0.35$

10.4.1.3 ผลการศึกษาของ King และ Brater

การศึกษาทดลองเกี่ยวกับฝายสันกว้างนั้นทำโดยนักชลศาสตร์และหน่วยงานต่างๆ เช่น Blackwell, Bazin, Woodburn, U.S. Deep Waterway Board, U.S. Geological Survey เป็นต้น โดยจะศึกษาภายใต้เงื่อนไขตัวแปรเฉพาะที่แต่ละบุคคลหรือหน่วยงานกำหนด ซึ่งต่อมา King และ Brater (1953) ได้นำผลการศึกษาของนักชลศาสตร์และหน่วยงานดังกล่าวมาประมวลใหม่ โดยได้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C) ที่สัมพันธ์กับค่า Head ของน้ำเหนือสันฝาย (h_1) และค่าความกว้างของสันฝาย (L หรือ Breadth of crest of weir ในตาราง) ขึ้นมา เพื่อให้สะดวกในการคำนวณยิ่งขึ้นเพื่อใช้กับสมการ $Q = CLh_1^{3/2}$ ซึ่งค่าที่แปลงใหม่มาจาก $C = m\sqrt{2g}$ เมื่อ m ก็คือ C_d นั่นเอง ดังแสดงในตารางที่ 10-1

ตารางที่ 10-1 ค่า C ใช้กับสมการ $Q = CLh_1^{3/2}$ สำหรับฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบคม

Measured	Breadth of crest of weir, m										
head, m	0.15	0.20	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.20	1.50	3.00	4.50
0.10	1.61	1.55	1.50	1.46	1.44	1.44	1.43	1.40	1.38	1.41	1.49
0.20	1.70	1.60	1.52	1.46	1.44	1.44	1.46	1.49	1.49	1.49	1.49
0.30	1.83	1.73	1.65	1.52	1.47	1.46	1.46	1.48	1.48	1.48	1.45
0.40	1.83	1.80	1.77	1.61	1.53	1.48	1.46	1.46	1.46	1.48	1.46
0.50	1.83	1.82	1.81	1.70	1.60	1.52	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45
0.60	1.83	1.83	1.82	1.67	1.57	1.52	1.50	1.48	1.46	1.46	1.45
0.80	1.83	1.83	1.83	1.81	1.70	1.60	1.55	1.50	1.48	1.46	1.45
0.90	1.83	1.83	1.83	1.83	1.77	1.69	1.61	1.51	1.47	1.46	1.45
1.00	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.76	1.64	1.52	1.48	1.46	1.45
1.20	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.70	1.54	1.49	1.46	1.45
1.40	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.59	1.51	1.46	1.45
1.50	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.70	1.54	1.46	1.45
1.70	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.59	1.46	1.45

10.4.1.4 ข้อจำกัดของฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบคม

- 1) ค่า h_1 ต่ำสุดเท่ากับ 0.06 เมตร หรือ $0.08L$ แล้วแต่ค่าไหนจะมากกว่า
- 2) ค่าสูงสุดของ $\frac{h_1}{h_1 + p_1}$ เท่ากับ 0.60 โดยที่ p_1 ต้องไม่น้อยกว่า 0.15 เมตร
- 3) $\frac{h_1}{L}$ ไม่ควรน้อยกว่า 0.08 และไม่ควรมากกว่า 1.50 และถ้ามีค่า C_v มาเกี่ยวข้องกับค่า C_d และค่า $\frac{h_1}{h_1 + p_1}$ มีค่ามากกว่า 0.35 แล้ว ค่า C_d จะแปรไปตามค่าของ $\frac{h_1}{L}$ ในช่วงที่มีค่าไม่มากกว่า 0.85 หรือ $\left(\frac{h_1}{L} \leq 0.85\right)$
- 4) ความยาวของสันฝาย b หรือ b_c ต้องไม่น้อยกว่า 0.30 เมตร หรือไม่น้อยกว่า $H_{1\max}$ หรือไม่น้อยกว่า $\frac{L}{5}$

5) ถ้า $\frac{h_1}{L} > 0.33$ จะต้องต่อท่อระบายอากาศออกจากใต้สันฝาด้านท้ายน้ำ หรือได้ Nappe เพื่อป้องกันการเกิดสุญญากาศที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่า

ข. การไหลกรณี Submerged flow

จากหลักการพื้นฐานของฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่กล่าวข้างต้นเป็นกรณีการไหลแบบ Free flow ส่วนการไหลที่เป็น Submerged flow นั้น หาค่า Submerged factor (C_s/C_f) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Submergence ratio (h_2/h_1) ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 10-9 (กราฟเส้นที่ 2 จากด้านขวามือ) โดยการไหลจะเป็น Submerged flow เมื่อ $h_2/h_1 \geq 0.66$

C_s = สัมประสิทธิ์การไหลกรณี Submerged flow

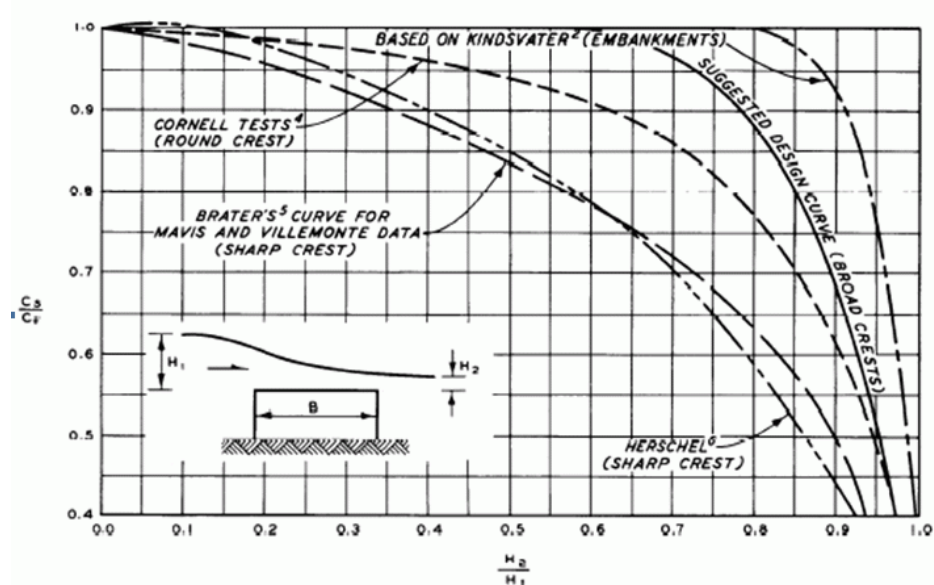
C_f = สัมประสิทธิ์การไหลกรณี Free flow

h_2 = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ

h_1 = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ

ในการคำนวณการไหลกรณี Submerged flow (Q_s) ให้คำนวณอัตราการไหลด้วยสมการในกรณีการไหลแบบ Free flow (Q_f) แล้วคูณด้วยค่า Submerged factor (C_s/C_f) หรือ

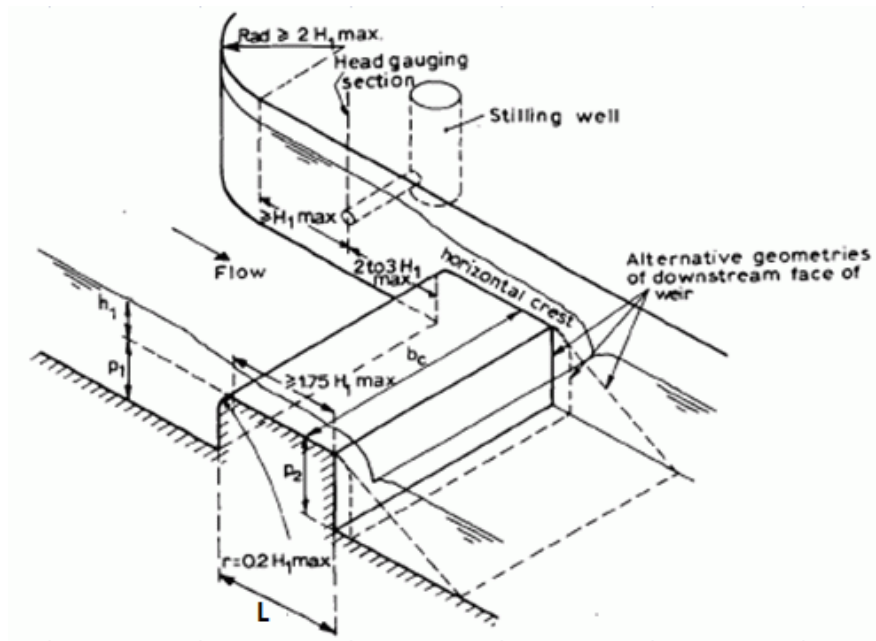
$$Q_s = Q_f \cdot (C_s/C_f)$$



รูปที่ 10-9 กราฟ Submerged factor (C_s/C_f) ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Submergence ratio (h_2/h_1) กรณีฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมเป็นเส้นกราฟเส้นที่ 2 จากด้านขวามือ

10.4.2 ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้งวงกลม (Round-Nose Broad Crested Weir)

ฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้งวงกลม เป็นฝายที่มีลักษณะคล้ายฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่กล่าวมาแล้ว แต่สันฝายด้านเหนือน้ำจะมีลักษณะเป็นส่วนโค้งของวงกลม รัศมีน้อยที่สุด $r = 0.11 H_{1\max}$ และค่า r ที่เหมาะสมที่สุดที่แนะนำให้ ออกแบบคือ $r = 0.2 H_{1\max}$ ความยาวของสันฝาย (b หรือ b_c) ไม่น้อยกว่า $1.45 H_{1\max}$ ตำแหน่งของจุดวัดน้ำด้านเหนือน้ำระยะ 2-3 เท่าของ $H_{1\max}$ ดังแสดงในรูปที่ 10-10



รูปที่ 10-10 แสดงฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้งวงกลม

10.4.2.1 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้งวงกลม ใช้สูตรมาตรฐานของฝายสันกว้าง

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} b_c h_1^{3/2} \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = $9.81 \text{ ม.} / (\text{วินาที})^2$

b_c = ความยาวของสันฝาย (ม.)

h_1 = ความสูงของน้ำด้านเหนือน้ำ (สันฝายถึงผิวน้ำ) (ม.)

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วยของกระแสน้ำ หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1}$ เมื่อ A^* เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

$$C_d = 0.93 + 0.10 \frac{h_1}{L}$$

10.4.2.2 ค่าปรับแก้ความผิดพลาดของ C_d

เป็นค่าความผิดพลาดที่ทำให้ค่า C_d คลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น อาจมีสาเหตุสภาพของอาคาร จากการก่อสร้างและหรือการบำรุงรักษาที่ไม่ดีพอ การตรวจวัดอ่านค่าไม่ละเอียด เป็นต้น หาได้จากสมการ

$$X_c = \pm \left(3 \left| \frac{h_1}{L} - 0.55 \right|^{1.5} + 4 \right) \quad \text{percent}$$

10.4.2.3 Modular Limit

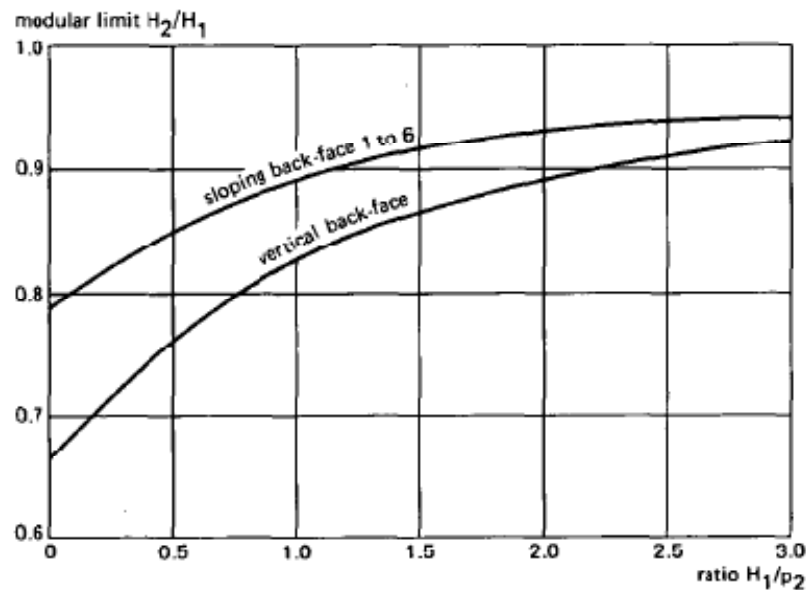
Modular Limit หมายถึง ขีดจำกัดของการไหลที่ยังคงสถานะ Free flow อยู่ แม้ว่าระดับน้ำด้านท้ายจะสูงกว่าระดับสันฝาย จะขึ้นอยู่กับค่าเปรียบเทียบของระดับน้ำด้านท้ายน้ำ (H_2) กับระดับน้ำด้านเหนือน้ำ (H_1) หรือ Submergence ratio H_2/H_1 อีกนัยหนึ่งค่าขีดจำกัดดังกล่าวก็คือ ค่า H_2 สูงสุดที่จะยอมให้เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้การใช้สมการการคำนวณการไหลแบบ Free flow นั้นยังถูกต้อง ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 10-11 ซึ่งขึ้นกับความสัมพันธ์ของ H_1/p_2 และ H_2/H_1 โดยมีลักษณะของท้ายฝาย 2 ลักษณะ คือ กรณีด้านท้ายเป็นลาดไม่เกิน 1: 6 กับกรณีด้านท้ายเป็นแนวตั้ง

H_1 เป็นระดับน้ำด้านเหนือน้ำวัดจากสันฝาย (เมตร)

H_2 เป็นระดับน้ำด้านท้ายน้ำวัดจากสันฝาย (เมตร)

p_1 เป็นความสูงของฝายที่ด้านเหนือน้ำ (เมตร)

p_2 เป็นความสูงของฝายที่ด้านท้ายน้ำ (เมตร)



รูปที่ 10 - 11 กราฟ Modular limit H_2/H_1 ที่สัมพันธ์กับค่าของ H_1/p_2

10.4.2.4 ผลการศึกษาของ King และ Brater

เช่นเดียวกับกรณีของฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบคม King และ Brater (1953) ได้นำผลการศึกษาเกี่ยวกับฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบด้านหน้ามน ที่นักชลศาสตร์และหน่วยงานได้ศึกษาไว้ มารวบรวมประมวลใหม่ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C) ที่สัมพันธ์กับค่า Head ของน้ำเหนือสันฝาย (h_1) ค่าความกว้างของสันฝาย (L) และรัศมีความโค้งมนด้านหน้าฝาย ขึ้นมาเพื่อให้สะดวกในการคำนวณยิ่งขึ้นเพื่อใช้กับสมการ $Q = CLh_1^{3/2}$ ดังแสดงในตารางที่ 10-2

ตารางที่ 10-2 ค่า C ใช้กับสมการ $Q = CLh_1^{3/2}$ ของฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบด้านหน้ามน

Experimenter	Radius of curve, m	Breadth of weir, m	Height of weir, m	Head H , m								
				0.10	0.20	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.20	1.50
Basin	0.10	0.80	0.75	1.62	1.64	1.66	1.68					
Basin	0.10	2.00	0.75	1.49	1.56	1.60	1.61					
U.S. Deep Waterways	0.10	0.80	1.40		1.53	1.56	1.61	1.66	1.70	1.75	1.85	1.93
U.S. Deep Waterways	0.10	2.00	1.40			1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56

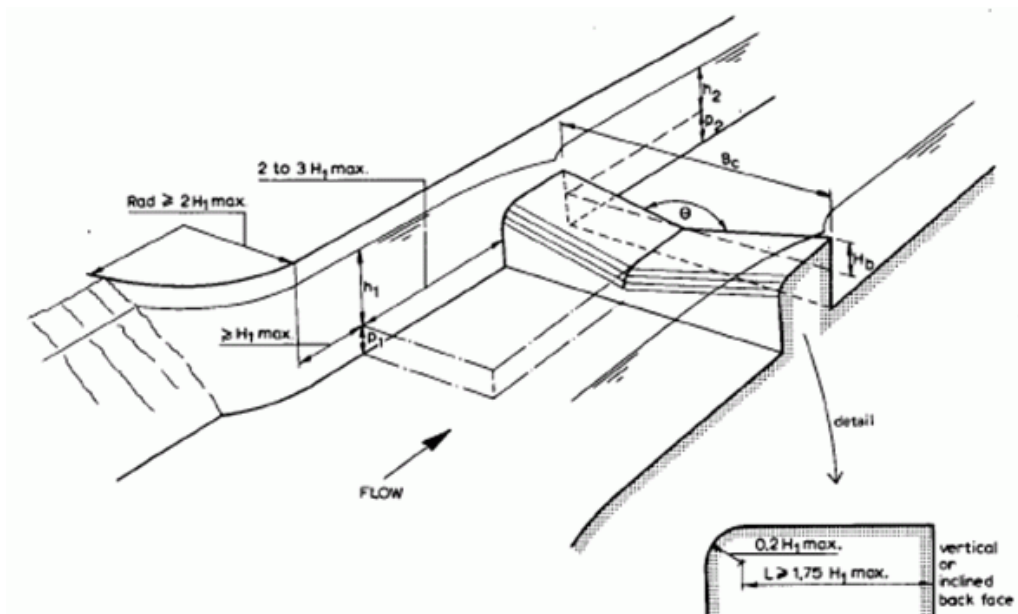
10.4.2.5 ข้อจำกัดทั่วไปของฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้ง

วงกลม

- 1) ค่า H_1 ต่ำสุด 0.060 เมตร หรือ $0.05L$ แล้วแต่ค่าไหนจะมากกว่า
- 2) ความยาวของสันฝาย b ต้องไม่น้อยกว่า 0.30 เมตร หรือไม่น้อยกว่า $H_{1\max}$ หรือไม่น้อยกว่า $\frac{L}{5}$
- 3) ค่า $\frac{H_1}{L}$ จะมีค่าระหว่าง 0.08 ถึง 0.7

10.4.3 ฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

(Triangular or V-Shaped Broad Crested Weir)



รูปที่ 10 - 12 แสดงลักษณะของฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

ฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม เป็นฝายวัดน้ำที่มีลักษณะพิเศษเฉพาะตัวคือเป็นฝายที่รวมข้อดีของฝายสันกว้าง (Broad-crested weir) และฝายสันคมรูปตัววี (V- notch weir) เข้าด้วยกันโดยตัวฝายมีลักษณะเหมือนดังเช่นฝายสันกว้างรูปสี่เหลี่ยมที่สันฝายด้านเหนือน้ำมนเป็นส่วนโค้งของวงกลม แต่แนวสันฝายจะเป็นลาดจากขอบด้านข้างลงสู่กึ่งกลางฝาย หรือรูปตัว V ทำมุม θ ซึ่งจะมีข้อดีที่ ฝายเป็นช่องเปิดกว้างที่น้ำผ่านได้มาก สันฝายรูปสามเหลี่ยมทำให้วัดปริมาณน้ำปริมาณน้อยๆ ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยน้ำที่ไหลผ่านสันฝายนี้จะมีวลิกวิฤติ (Critical depth): $Y_c = 0.80H_1$ ทำให้ค่า Submergence มีค่าสูงประมาณ 0.95 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการไหลผ่านฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยมเป็นการไหลแบบ Free flow

10.4.3.1 ข้อกำหนดทั่วไปของรูปร่างลักษณะของฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

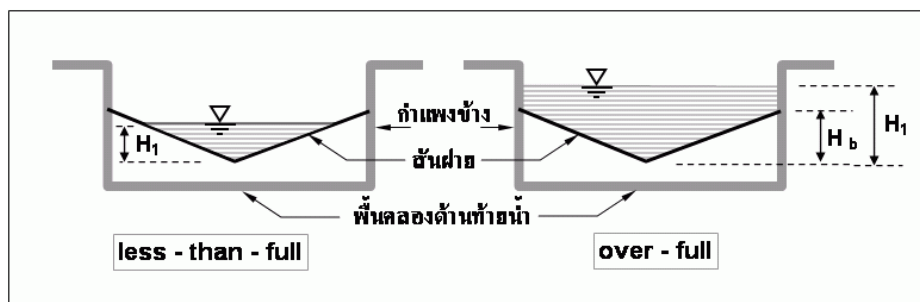
- รัศมีความโค้งของขอบสันฝายด้านเหนือให้น้อยที่สุด $r_{\min} = 0.11H_{1\max}$ และที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างใช้ $r = 0.20 H_{1\max}$
- ความกว้างของสันฝาย (L) ไม่น้อยกว่า 1.75 เท่าของระดับน้ำสูงสุดด้านเหนือน้ำ ($L > 1.75 H_{1\max}$)
- การวัดระดับน้ำด้านเหนือน้ำวัดที่ระยะ 2-3 เท่าของ $H_{1\max}$ จากหน้าฝาย
- หน้าตัดทางน้ำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

10.4.3.2 รูปแบบการไหลของปริมาณน้ำผ่านฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

ถ้าระดับน้ำเหนือสันฝายเท่ากับระดับขอบสันฝายด้านข้างหรือเต็มหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมพอดี จะเป็น Full discharge แต่โอกาสของการเกิดการไหลที่เกิดจริงจะเป็น 2 รูปแบบ คือ ระดับน้ำต่ำกว่าระดับ Full และ สูงกว่าระดับ Full

1) “Less - than - full” ระดับน้ำเหนือสันฝายต่ำกว่าระดับ Full โดยจะไม่ท่วมถึงส่วนสูงสุดของลาดสันฝายที่ชนกับกำแพงด้านข้างของฝาย หรือน้ำไม่ท่วมสันฝายทั้งหมด หน้าตัดการไหลจะเป็นรูปสามเหลี่ยม

2) “Over - full” ระดับน้ำเหนือสันฝายสูงกว่าระดับ Full โดยจะท่วมเหนือสันฝายสูงกว่าระดับขอบลาดของสันฝายที่ชนกำแพงข้าง หน้าตัดการไหลจะเป็นรูปส่วนตัดของรูปสามเหลี่ยม (รูปสามเหลี่ยมที่ตัดพื้นที่ในส่วนมุมบริเวณฐานออก) ที่เรียก Truncated triangular control section



รูปที่ 10 - 13 รูปแบบการไหลของปริมาณน้ำผ่านฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

การไหลในช่วง Less - than - full;

$$Y_c = 0.80H_1$$

การไหลที่ตำแหน่ง full ;

$$H_b = 0.80H_1 \text{ หรือ } H_1 = 1.25H_b$$

เมื่อ H_b เป็นความแตกต่างของระดับสันฝาย จากจุดต่ำสุดที่เป็นจุดยอดของมุม θ ที่

$$\text{กึ่งกลางฝายกับระดับสูงสุดของสันฝายที่ติดกำแพงข้าง โดยที่ } H_b = \frac{1}{2}B_c \cot \frac{\theta}{2}$$

10.4.3.3 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

1) กรณี “Less - than - full” ($H_1 \leq 1.25H_b$)

$$Q = C_d C_v \frac{16}{25} \sqrt{\frac{2}{5} g} \tan \frac{\theta}{2} H_1^{2.5} \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = $9.81 \text{ ม./ (วินาที)}^2$

b = ความยาวของสันฝาย (ม.)

H_1 หรือ h_1 = ความสูงของน้ำด้านเหนือน้ำ (สันฝายถึงผิวน้ำ) (ม.)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล หาได้จากกราฟจากรูปที่ 10-14 ซึ่งขึ้นกับ

อัตราส่วนของ H_1/L

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำ หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 ซึ่ง

เป็นความสัมพันธ์ในรูปของ $C_d \frac{A^*}{A_1} = C_d \frac{H_1^2 \tan \frac{\theta}{2}}{B(H_1 + P_1)}$ เมื่อ A^* เป็น

พื้นที่หน้าตัดของช่องฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย

2) กรณี “Over - full” ($H_1 \geq 1.25H_b$)

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} B \left[H_1 - \frac{H_b}{2} \right]^{1.50}$$

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล หาได้จากกราฟจากรูปที่ 10-14 เหมือนกรณีแรก ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนของ H_1/L ที่ไม่ควรมากกว่า 0.50 เพราะหาก

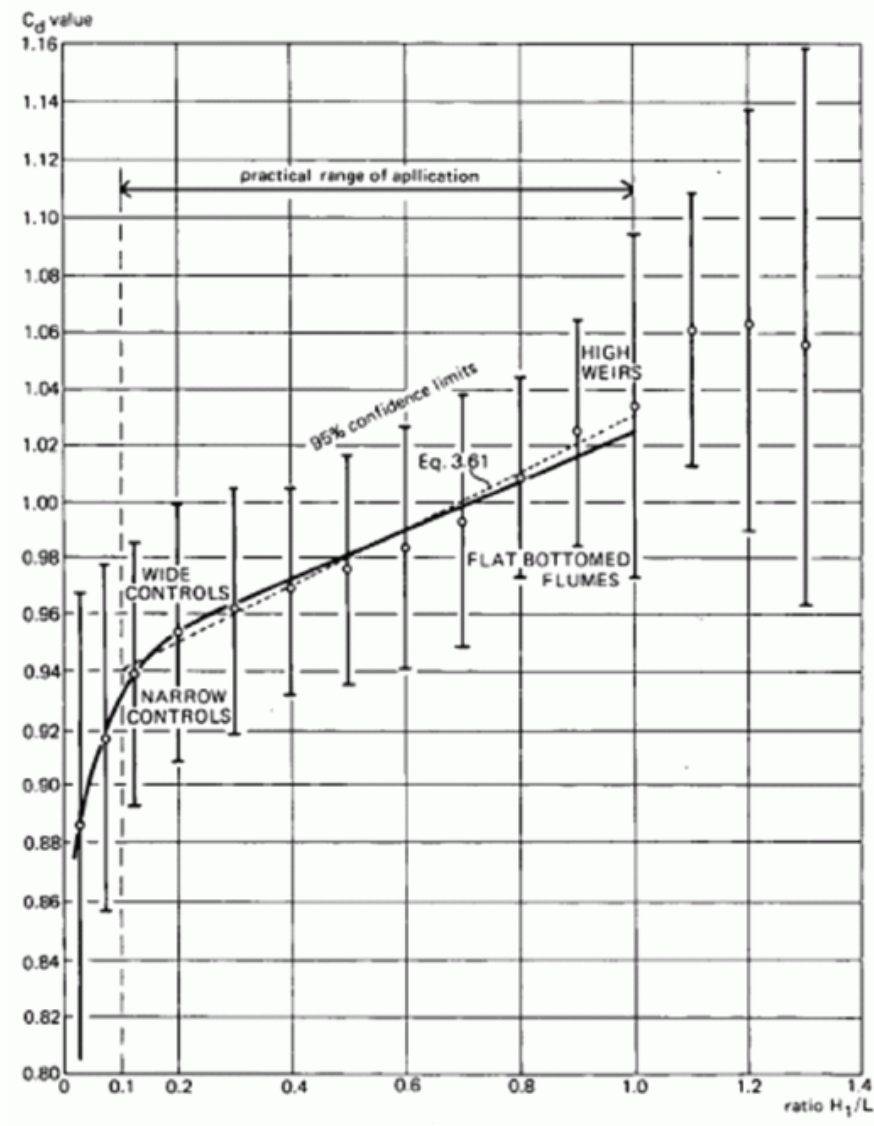
$\frac{H_1}{L} \geq 0.50$ จะเกิดสภาพสุญญากาศเกิดขึ้นได้ **Nappe** ที่จะวัดการไหลได้

ไม่ถูกต้อง จำเป็นต้องระบายอากาศออกสู่บรรยากาศ

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำ หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 ซึ่ง

เป็นความสัมพันธ์ในรูปของ $C_d \frac{A^*}{A_1} = C_d \frac{\left(h_1 - \frac{H_b}{2} \right)}{(h_1 + p_1)}$ เมื่อ A^* เป็น

พื้นที่หน้าตัดของช่องฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย



รูปที่ 10-14 กราฟค่าของ C_d ที่สัมพันธ์กับค่าของ H_1/L สำหรับฝายสันกว้าง และ Long-throated flume ทุกรูปร่างทุกขนาด (Bos 1984)

10.4.3.4 ค่าปรับแก้ความผิดพลาดของ C_d

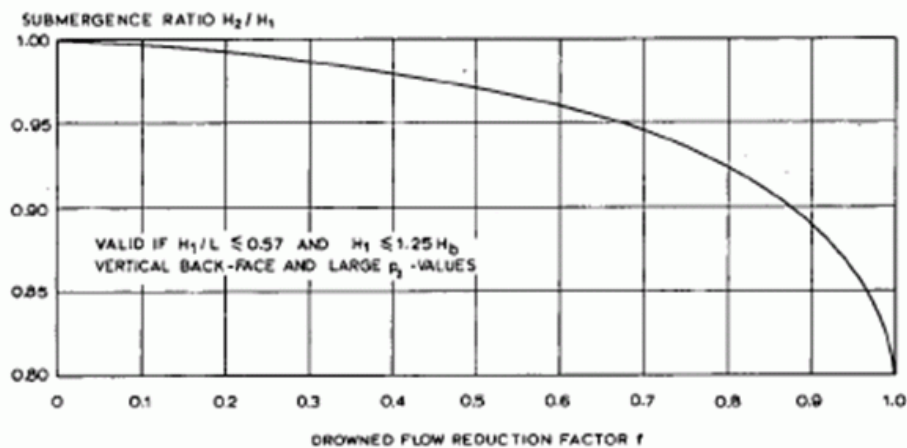
ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยมนั้น จะเกิดความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากการก่อสร้าง การตรวจวัดอ่านค่าเกิดขึ้น ซึ่งค่าความผิดพลาดที่ต้องนำไปชดเชยหาได้จากสมการ

$$X_c = \pm \left(3 \left| \frac{H_1}{L} - 0.55 \right|^{1.5} + 4 \right) \text{ percent}$$

10.4.3.5 Modular limit

ก. กรณี Less-than-full

Modular limit ในที่นี้หมายถึงขีดจำกัดของการไหลแบบ Free flow ที่มีผลจาก Submergence ratio H_2/H_1 ที่จะทำให้การไหลเป็น Submerged flow สำหรับฝายสันกว้าง รูปสามเหลี่ยมในกรณี Less-than-full จะเกิดในช่วงที่ $H_2/H_1 \geq 0.8$ ซึ่งทำให้การไหลในกรณี คำนวณด้วยสูตรการไหลแบบ Free flow นั้นมีค่าลดลง ด้วยค่า Factor f ที่มีค่าไม่เกิน 1% เท่านั้น ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟในรูปที่ 10-15 ในการจะลดข้อจำกัดส่วนนี้ทำได้โดยการสร้างต่อต้านท้ายฝายออกไปให้เป็นลาด 1:6



รูปที่ 10-15 ค่า Factor f ที่ทำให้อัตราการไหลของฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม ลดลงเนื่องจากผลของ Submergence ratio H_2/H_1 มีค่าไม่เกิน 1%

ข. กรณี Over-full

ในกรณี Over- full นี้ยังไม่มีรายงานการศึกษาที่แน่ชัด ให้พิจารณาเปรียบเทียบ จากข้อมูลการศึกษาอื่นๆ มาประยุกต์ใช้ เช่น ถ้า $H_2/H_1 \leq 0.8$ ถือว่าการไหลเป็นแบบ Free flow เป็นต้น

10.4.3.6 ข้อจำกัดของฝายสันกว้างรูปสามเหลี่ยม

- o h_1 น้อยที่สุดที่ทำให้การตรวจวัดถูกต้อง เท่ากับ 0.06 ม. หรือ 0.07 L
- o มุม θ ของสันฝายต้องไม่น้อยกว่า 30 องศา
- o H_1/p_1 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.0 และ p_1 ไม่น้อยกว่า 0.15 ม.
- o H_1/L ต้องไม่น้อยกว่า 0.50
- o B_c ต้องไม่น้อยกว่า $L/5$

10.4.3.7 งานวิจัยคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ที่ดีที่สุด ของฝายสันกว้างรูปตัววี

กัญญา อินเกลียง, ปริญญากมลสินธุ์ และสมเกียรติ อภิพัฒน์วิตรว (2539) นักวิจัยจากกลุ่มงานชลศาสตร์ ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน ได้ศึกษาเพื่อหาคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ที่ดีที่สุดของฝายสันกว้างรูปตัววี ที่ทำให้อัตราการไหลผ่านฝายสูงสุด มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุดตลอดจนช่วงการวัดปริมาณน้ำมากที่สุด และมีความแม่นยำมากที่สุดด้วย

การศึกษาทำโดยการเปลี่ยนรูปแบบของฝายสันกว้างต่างๆ ดังนี้คือเปลี่ยนขนาดมุมรูปตัววีเป็น 90, 120, 150 และ 180 องศา เปลี่ยนความหนาของสันฝาย (L) = 45, 30 และ 15 ซม. และเปลี่ยนรัศมีความโค้งด้านหน้าของสันฝาย (Rounding Radius, R) = 0, 1, 3 และ 5 ซม. เพื่อหารูปแบบฝายสันฝายกว้างรูปตัววีที่เหมาะสมพร้อมทั้งหาสูตรการไหลของน้ำผ่านฝายทั้งกรณี การไหลแบบอิสระ (Free Flow) และการไหลเป็นแบบจม (Submerge Flow)

ผลการศึกษาพบว่าฝายสันกว้างรูปตัววีขนาดมุม = 120 องศา ความหนาสัน (L) = 30 ซม. และ รัศมีความโค้งด้านหน้าของสันฝาย (R) = 3 ซม. เป็นฝายที่มีลักษณะทางชลศาสตร์ที่ดีที่สุด ทั้งกรณีการไหลแบบอิสระและกรณีการไหลแบบจม คือให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลมากที่สุด (C_d) = 0.877 สำหรับการไหลแบบอิสระ และ C_d = 0.797 สำหรับการไหลแบบจม ซึ่งค่า C_d มากที่สุด ทำให้การไหลมีอัตราการไหล (Q) ผ่านฝายสูงสุด

10.5 ฝายสันกว้างที่พัฒนาจากฝายสันคม

เป็นผลจากการศึกษาของ M.G. Bos ที่กล่าวในหัวข้อ 10.1 โดยปรับปรุงฝายสันคมให้เป็นฝายสันกว้างที่มีรูปร่างหน้าตัดของสันฝายเหมือนเช่นรูปร่างของฝายสันคมรูปร่างต่างๆ (แต่ให้มีส่วนของสันฝายมีความกว้าง) อาจสร้างในลักษณะฝายที่บดเต็มขนาดความกว้างของสัน หรือติดตั้งแผ่นเพลตกับส่วนสันของช่องฝายที่มีรูปแบบของฝายสันคมเดิม โดยทำให้มีความกว้างของสันฝายเป็นไปตามคุณสมบัติพื้นฐาน $0.08 \geq H_1/L \geq 0.50$ สันฝายด้านเหนือน้ำมักมนเป็นส่วนโค้งของวงกลม

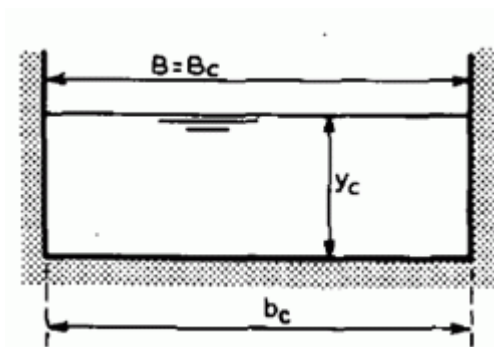
ฝายชนิดนี้จะเป็นการนำเสนอในเชิงแนวความคิดเสียมากกว่าการใช้งานจริง เพราะยังไม่มีผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_d) ของฝายแต่ละรูปแบบ แต่เห็นว่าเป็นแนวความคิดที่ดี เพราะจะใช้แก้ปัญหฝายสันคมที่มีจุดอ่อนที่สันฝายมีความบางมาก จะเกิดการเสียหายผุกร่อน

หรือคงอเลิยรูปทรงได้ง่าย ทำให้การตรวจวัดเกิดการผิดพลาด ก็สามารถใช้หลักการของฝ่ายสั้นกว้างในหัวข้อนี้มาปรับปรุงติดตั้งแผ่นเพลตให้เป็นฝ่ายสั้นกว้างก็จะสามารถใช้ประโยชน์ได้ต่อไป ส่วนค่า C_d ก็สามารถสอบเทียบได้

ในที่นี้จะนำเสนอลักษณะสรุป เฉพาะรูปแบบของฝ่าย สูตรคำนวณอัตราการไหล และค่าเกี่ยวข้องที่สำคัญเท่านั้น ไม่ลงลึกถึงรายละเอียด

10.5.1 ฝ่ายสั้นกว้างที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Broad-crested weir with rectangular control section



รูปที่ 10-16 มิติของ Rectangular control section

$$A_c = b_c y_c$$

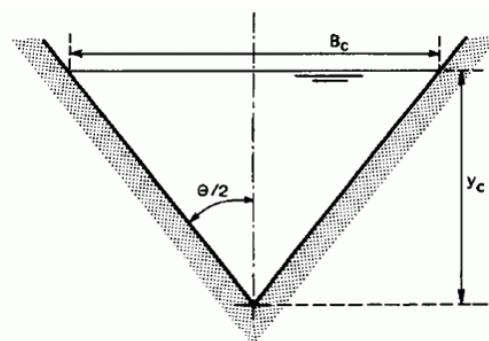
$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{1}{2} y_c$$

$$y_c = \frac{2}{3} H_1$$

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3} g\right)} b_c h_1^{1.50}$$

10.5.2 ฝ่ายสั้นกว้างที่มีหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม

Broad-crested weir with triangular control section



รูปที่ 10-17 มิติของ Triangular control section

$$A_c = y_c^2 \tan \frac{\theta}{2} ; B_c = 2 y_c \tan \frac{\theta}{2}$$

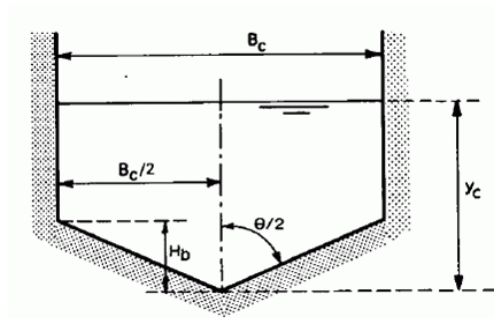
$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{1}{4} y_c$$

$$y_c = \frac{4}{5} H_1$$

$$Q = C_d C_v \frac{16}{25} \sqrt{\left(\frac{2}{5} g\right)} \tan \theta h_1^{2.50}$$

10.5.3 ฝายสันกว้างที่มีหน้าตัดรูปส่วนของรูปสามเหลี่ยม

Broad-crested weir with truncated triangular control section



รูปที่ 10-18 มิติของ Truncated triangular control section

กรณีที่ $H_1 \leq 1.25H_b$ มีคุณสมบัติตามข้อ 10.5.2

กรณีที่ $H_1 \geq 1.25H_b$

$$A_c = H_b^2 \tan \frac{\theta}{2} + B_c (y_c - H_b)$$

$$= b_c y_c - \frac{1}{2} B_c H_b$$

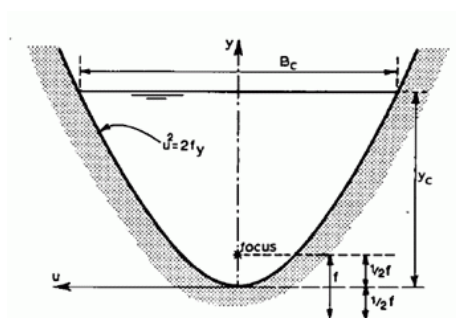
$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{A_c}{2B_c} = \frac{1}{2} y_c - \frac{1}{4} H_b$$

$$y_c = \frac{2}{3} H_1 + \frac{1}{6} H_b$$

$$Q = C_d C_v B_c \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3} g\right)} \left(h_1 - \frac{1}{2} H_b\right)^{1.50}$$

10.5.2 ฝายสันกว้างที่มีหน้าตัดรูปพาราโบลา

Broad-crested weir with parabolic control section



รูปที่ 10-19 มิติของ Parabolic control section

$$A_c = \frac{2}{3} B_c y_c ; B_c = 2 \sqrt{f y_c}$$

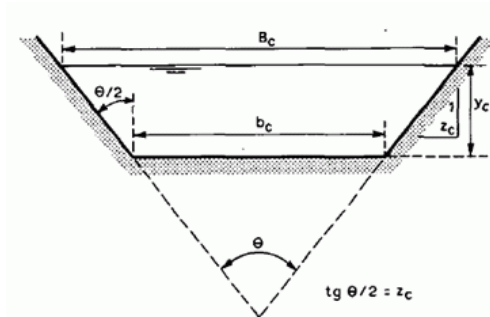
$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{A_c}{2B_c} = \frac{1}{3} y_c$$

$$y_c = \frac{3}{4} H_1$$

$$Q = C_d C_v \sqrt{\left(\frac{3}{4} f \cdot g\right)} h_1^{2.0}$$

10.5.5 ฝายสันกว้างที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

Broad-crested weir with trapezoidal control section



$$A_c = c_c y_c + z_c y_c^2$$

$$B_c = b_c + 2z_c y_c$$

$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{A_c}{2B_c} = \frac{b_c y_c + z_c y_c^2}{2b_c + 4z_c y_c}$$

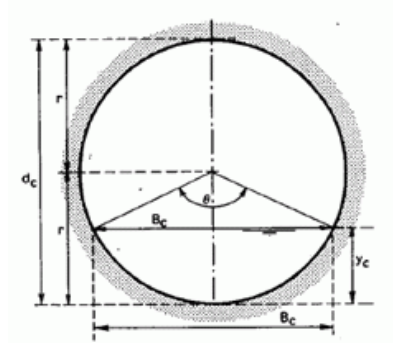
รูปที่ 10-20 มิติของTrapezoidal control section

$$Q = C_d \left\{ b_c y_c + z_c y_c^2 \right\} \sqrt{2g(H_1 - y_c)}$$

- y_c/H_1 เป็นค่าที่ขึ้นกับค่าของ z_c และ H_1/b_c ***หาได้จากตารางที่ 10 - 1
- $H_1 = h_1 + v_1^2/2g$ หรือ $h_1 = H_1 - v_1^2/2g$
- ถ้าไม่คิด Approach velocity head ($v_1^2/2g$) จะได้ $H_1 = h_1$ เมื่อรู้ค่า h_1 ซึ่งเราสามารถวัดได้ จะหาค่า y_c โดยเทียบค่าจากตารางที่ 10 - 3
- ถ้าคิด Approach velocity head ($v_1^2/2g$) เรารู้ค่า h_1 เพราะสามารถวัดได้ แต่จะรู้ค่า H_1 นั้นจะต้องหาค่า $v_1^2/2g$ ก่อน

10.5.6 ฝายสันกว้างที่มีหน้าตัดรูปวงกลม

Broad-crested weir with circular control section



รูปที่ 10-21 มิติของ Circular control section

$$A_c = \frac{1}{8} d_c^2 (\theta - \sin \theta)$$

$$B_c = d_c \sin \frac{\theta}{2}$$

$$y_c = \frac{d_c}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) = d_c \sin^2 \frac{\theta}{4}$$

$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{A_c}{2B_c} = \frac{d_c (\theta - \sin \theta)}{16 \sin \frac{\theta}{2}}$$

$$H = H_1 = y_c + \frac{v_c^2}{2g} ; \quad \frac{H_1}{d_c} = \frac{y_c}{d_c} + \frac{v_c^2}{2gd_c} = \sin^2 \frac{\theta}{4} + \frac{(\theta - \sin \theta)}{16 \sin \frac{\theta}{2}}$$

จากคุณสมบัติของฝายสันกว้าง $Q = C_d A_c \{2g(H_1 - y_c)\}^{0.5}$

แปลงสมการเป็น $Q = C_d \frac{A_c}{d_c^2} d_c^{2.50} \sqrt{2g \left[\frac{H_1}{d_c} - \frac{y_c}{d_c} \right]}$

แทนค่าความสัมพันธ์ของค่า $\frac{H_1}{d_c}, \frac{y_c}{d_c}, \frac{A_c}{d_c}$

$$Q = C_d d_c^{2.50} \sqrt{g} \{f(\theta)\}$$

เมื่อ $f(\theta) = \frac{(\theta - \sin \theta)^{1.50}}{8 \left(8 \sin \frac{\theta}{2} \right)^{0.50}}$

*** ค่าต่างๆ หาได้จากตารางที่ 10-4

ตารางที่ 10-3 ค่าของ y_c/H_1 ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าของ z_c และ H_1/b_c สำหรับฝายสันกว้างที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

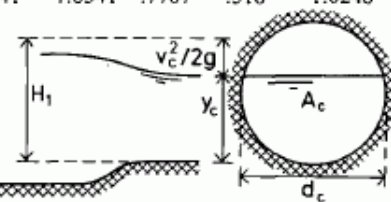
Table 1.1 Values of the ratio y_c/H_1 as a function of z_c and H_1/b_c for trapezoidal control sections

H_1/b_c	Side slopes of channel, ratio of horizontal to vertical ($z_c:1$)									
	Vertical	0.25:1	0.50:1	0.75:1	1:1	1.5:1	2:1	2.5:1	3:1	4:1
.00	.667	.667	.667	.667	.667	.667	.667	.667	.667	.667
.01	.667	.667	.667	.668	.668	.669	.670	.670	.671	.672
.02	.667	.667	.668	.669	.670	.671	.672	.674	.675	.678
.03	.667	.668	.669	.670	.671	.673	.675	.677	.679	.683
.04	.667	.668	.670	.671	.672	.675	.677	.680	.683	.687
.05	.667	.668	.670	.672	.674	.677	.680	.683	.686	.692
.06	.667	.669	.671	.673	.675	.679	.683	.686	.690	.696
.07	.667	.669	.672	.674	.676	.681	.685	.689	.693	.699
.08	.667	.670	.672	.675	.678	.683	.687	.692	.696	.703
.09	.667	.670	.673	.676	.679	.684	.690	.695	.698	.706
.10	.667	.670	.674	.677	.680	.686	.692	.697	.701	.709
.12	.667	.671	.675	.679	.684	.690	.696	.701	.706	.715
.14	.667	.672	.676	.681	.686	.693	.699	.705	.711	.720
.16	.667	.672	.678	.683	.687	.696	.703	.709	.715	.725
.18	.667	.673	.679	.684	.690	.698	.706	.713	.719	.729
.20	.667	.674	.680	.686	.692	.701	.709	.717	.723	.733
.22	.667	.674	.681	.688	.694	.704	.712	.720	.726	.736
.24	.667	.675	.683	.689	.696	.706	.715	.723	.729	.739
.26	.667	.676	.684	.691	.698	.709	.718	.725	.732	.742
.28	.667	.676	.685	.693	.699	.711	.720	.728	.734	.744
.30	.667	.677	.686	.694	.701	.713	.723	.730	.737	.747
.32	.667	.678	.687	.696	.703	.715	.725	.733	.739	.749
.34	.667	.678	.689	.697	.705	.717	.727	.735	.741	.751
.36	.667	.679	.690	.699	.706	.719	.729	.737	.743	.752
.38	.667	.680	.691	.700	.708	.721	.731	.738	.745	.754
.40	.667	.680	.692	.701	.709	.723	.733	.740	.747	.756
.42	.667	.681	.693	.703	.711	.725	.734	.742	.748	.757
.44	.667	.681	.694	.704	.712	.727	.736	.744	.750	.759
.46	.667	.682	.695	.705	.714	.728	.737	.745	.751	.760
.48	.667	.683	.696	.706	.715	.729	.739	.747	.752	.761
.50	.667	.683	.697	.708	.717	.730	.740	.748	.754	.762
.60	.667	.686	.701	.713	.723	.737	.747	.754	.759	.767
.70	.667	.688	.706	.718	.728	.742	.752	.758	.764	.771
.80	.667	.692	.709	.723	.732	.746	.756	.762	.767	.774
.90	.667	.694	.713	.727	.737	.750	.759	.766	.770	.776
1.0	.667	.697	.717	.730	.740	.754	.762	.768	.773	.778
1.2	.667	.701	.723	.737	.747	.759	.767	.772	.776	.782
1.4	.667	.706	.729	.742	.752	.764	.771	.776	.779	.784
1.6	.667	.709	.733	.747	.756	.767	.774	.778	.781	.786
1.8	.667	.713	.737	.750	.759	.770	.776	.781	.783	.787
2	.667	.717	.740	.754	.762	.773	.778	.782	.785	.788
3	.667	.730	.753	.766	.773	.781	.785	.787	.790	.792
4	.667	.740	.762	.773	.778	.785	.788	.790	.792	.794
5	.667	.748	.768	.777	.782	.788	.791	.792	.794	.795
10	.667	.768	.782	.788	.791	.794	.795	.796	.797	.798
∞		.800	.800	.800	.800	.800	.800	.800	.800	.800

ตารางที่ 10 - 4 ค่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของตัวแปรที่ใช้หาค่าอัตราการไหลของฝายสันกว้าง
และ Long-throated flume ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม

Table 1.2 Ratios for determining the discharge Q of a broad-crested weir and long-throated flume with circular control section (Bos 1985)

y_c/d_c	$v_c^2/2gd_c$	H_1/d_c	A_c/d_c^2	y_c/H_1	$f(\theta)$	y_c/d_c	$v_c^2/2gd_c$	H_1/d_c	A_c/d_c^2	y_c/H_1	$f(\theta)$
.01	.0033	.0133	.0013	.752	0.0001	.51	.2014	.7114	.4207	.717	0.2556
.02	.0067	.0267	.0037	.749	0.0004	.52	.2065	.7265	.4127	.716	0.2652
.03	.0101	.0401	.0069	.749	0.0010	.53	.2117	.7417	.4227	.715	0.2750
.04	.0134	.0534	.0105	.749	0.0017	.54	.2170	.7570	.4327	.713	0.2851
.05	.0168	.0668	.0147	.748	0.0027	.55	.2224	.7724	.4426	.712	0.2952
.06	.0203	.0803	.0192	.748	0.0039	.56	.2279	.7879	.4526	.711	0.3056
.07	.0237	.0937	.0242	.747	0.0053	.57	.2335	.8035	.4625	.709	0.3161
.08	.0271	.1071	.0294	.747	0.0068	.58	.2393	.8193	.4724	.708	0.3268
.09	.0306	.1206	.0350	.746	0.0087	.59	.2451	.8351	.4822	.707	0.3376
.10	.0341	.1341	.0409	.746	0.0107	.60	.2511	.8511	.4920	.705	0.3487
.11	.0376	.1476	.0470	.745	0.0129	.61	.2572	.8672	.5018	.703	0.3599
.12	.0411	.1611	.0534	.745	0.0153	.62	.2635	.8835	.5115	.702	0.3713
.13	.0446	.1746	.0600	.745	0.0179	.63	.2699	.8999	.5212	.700	0.3829
.14	.0482	.1882	.0688	.744	0.0214	.64	.2765	.9165	.5308	.698	0.3947
.15	.0517	.2017	.0739	.744	0.0238	.65	.2833	.9333	.5404	.696	0.4068
.16	.0553	.2153	.0811	.743	0.0270	.66	.2902	.9502	.5499	.695	0.4189
.17	.0589	.2289	.0885	.743	0.0304	.67	.2974	.9674	.5594	.693	0.4314
.18	.0626	.2426	.0961	.742	0.0340	.68	.3048	.9848	.5687	.691	0.4440
.19	.0662	.2562	.1039	.742	0.0378	.69	.3125	1.0025	.5780	.688	0.4569
.20	.0699	.2699	.1118	.741	0.0418	.70	.3204	1.0204	.5872	.686	0.4701
.21	.0736	.2836	.1199	.740	0.0460	.71	.3286	1.0386	.5964	.684	0.4835
.22	.0773	.2973	.1281	.740	0.0504	.72	.3371	1.0571	.6054	.681	0.4971
.23	.0811	.3111	.1365	.739	0.0550	.73	.3459	1.0759	.6143	.679	0.5109
.24	.0848	.3248	.1449	.739	0.0597	.74	.3552	1.0952	.6231	.676	0.5252
.25	.0887	.3387	.1535	.738	0.0647	.75	.3648	1.1148	.6319	.673	0.5397
.26	.0925	.3525	.1623	.738	0.0698	.76	.3749	1.1349	.6405	.670	0.5546
.27	.0963	.3663	.1711	.737	0.0751	.77	.3855	1.1555	.6489	.666	0.5698
.28	.1002	.3802	.1800	.736	0.0806	.78	.3967	1.1767	.6573	.663	0.5855
.29	.1042	.3942	.1890	.736	0.0863	.79	.4085	1.1985	.6655	.659	0.6015
.30	.1081	.4081	.1982	.735	0.0922	.80	.4210	1.2210	.6735	.655	0.6180
.31	.1121	.4221	.2074	.734	0.0982	.81	.4343	1.2443	.6815	.651	0.6351
.32	.1161	.4361	.2167	.734	0.1044	.82	.4485	1.2685	.6893	.646	0.6528
.33	.1202	.4502	.2260	.733	0.1108	.83	.4638	1.2938	.6969	.641	0.6712
.34	.1243	.4643	.2355	.732	0.1174	.84	.4803	1.3203	.7043	.636	0.6903
.35	.1284	.4784	.2450	.732	0.1289	.85	.4982	1.3482	.7115	.630	0.7102
.36	.1326	.4926	.2546	.731	0.1311	.86	.5177	1.3777	.7186	.624	0.7312
.37	.1368	.5068	.2642	.730	0.1382	.87	.5392	1.4092	.7254	.617	0.7533
.38	.1411	.5211	.2739	.729	0.1455	.88	.5632	1.4432	.7320	.610	0.7769
.39	.1454	.5354	.2836	.728	0.1529	.89	.5900	1.4800	.7384	.601	0.8021
.40	.1497	.5497	.2934	.728	0.1605	.90	.6204	1.5204	.7445	.592	0.8293
.41	.1541	.5641	.3032	.727	0.1683	.91	.6555	1.5655	.7504	.581	0.8592
.42	.1586	.5786	.3130	.726	0.1763	.92	.6966	1.6166	.7560	.569	0.8923
.43	.1631	.5931	.3229	.725	0.1844	.93	.7459	1.6759	.7612	.555	0.9297
.44	.1676	.6076	.3328	.724	0.1927	.94	.8065	1.7465	.7662	.538	0.9731
.45	.1723	.6223	.3428	.723	0.2012	.95	.8841	1.8341	.7707	.518	1.0248
.46	.1769	.6369	.3527	.722	0.2098						
.47	.1817	.6517	.3627	.721	0.2186						
.48	.1865	.6665	.3727	.720	0.2276						
.49	.1914	.6814	.3827	.719	0.2368						
.50	.1964	.6964	.3927	.718	0.2461						



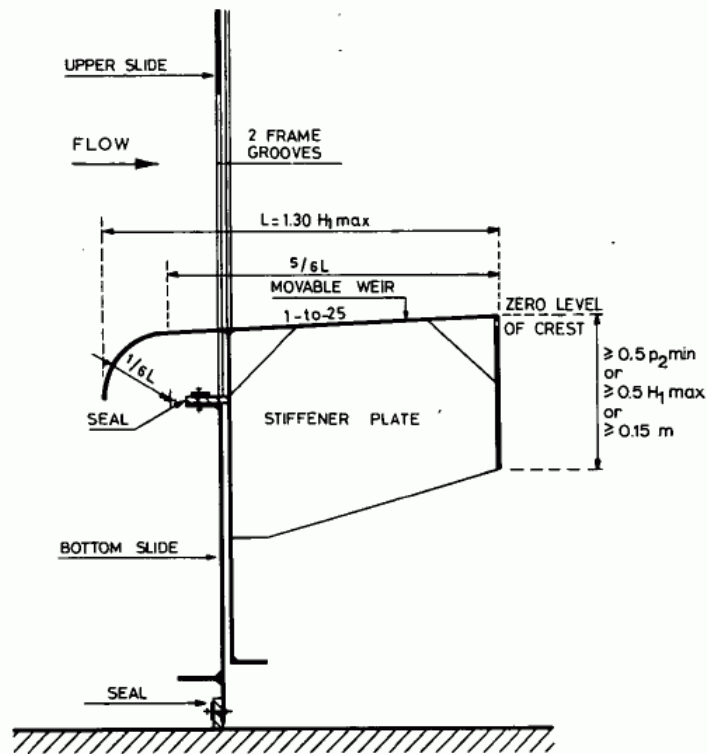
10.6 ฝ่ายสันกว้างรูปแบบพิเศษ

10.6.1 Romijn movable weir

Romijn weir เป็นฝ่ายที่พัฒนาขึ้นมาโดยหน่วยงานชลประทานประเทศอินโดนีเซีย ที่สามารถทำหน้าที่ได้ดีทั้งการตรวจวัดและการควบคุมปริมาณน้ำ ในขณะที่ทำให้เกิด Head loss น้อยมาก จึงเหมาะกับการใช้งานในระบบชลประทานที่มีอัตราความต้องการใช้น้ำในช่วงฤดูกาลเพาะปลูกมีความผันแปรมาก การเรียกชื่อฝ่ายชนิดนี้ เรียกตามชื่อของ D.G.Romijn ซึ่งเป็นผู้คิดค้นเผยแพร่ในปี 1932

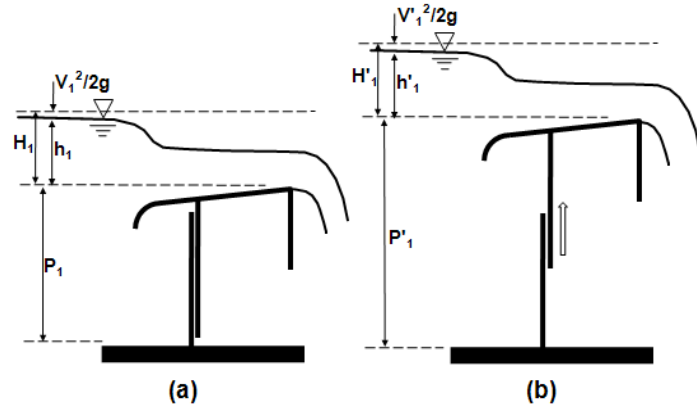
10.6.1.1 หลักการทำงานและลักษณะของ Romijn weir

Romijn weir นั้นออกแบบมาในลักษณะโครงสร้างแผ่นเหล็กตรง 2 ชั้นซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 10-22, รูปที่ 10-23, รูปที่ 10-24 และรูปที่ 10-25 โดยชั้นแรกยึดติดกับพื้นทางน้ำ ส่วนอีกชั้นปรับยกขึ้นลงได้ ลักษณะคล้ายบานระบายบานตรง โดยส่วนบนที่เป็นสันฝาย ให้น้ำไหลล้นข้ามไป ปิดทับด้วยแผ่นเหล็กอีกชั้นที่ปลายด้านเหนือน้ำค้ำเป็นส่วนโค้งลงของวงกลม ปลายด้านท้ายน้ำหักลงเป็นมุมฉาก และแผ่นสันฝายนี้จะมีลักษณะเป็นลาดขึ้นจากด้านเหนือน้ำไปทางท้ายน้ำ 1 ต่อ 25



รูปที่ 10-22 แสดงรูปตัดของ Romijn weir

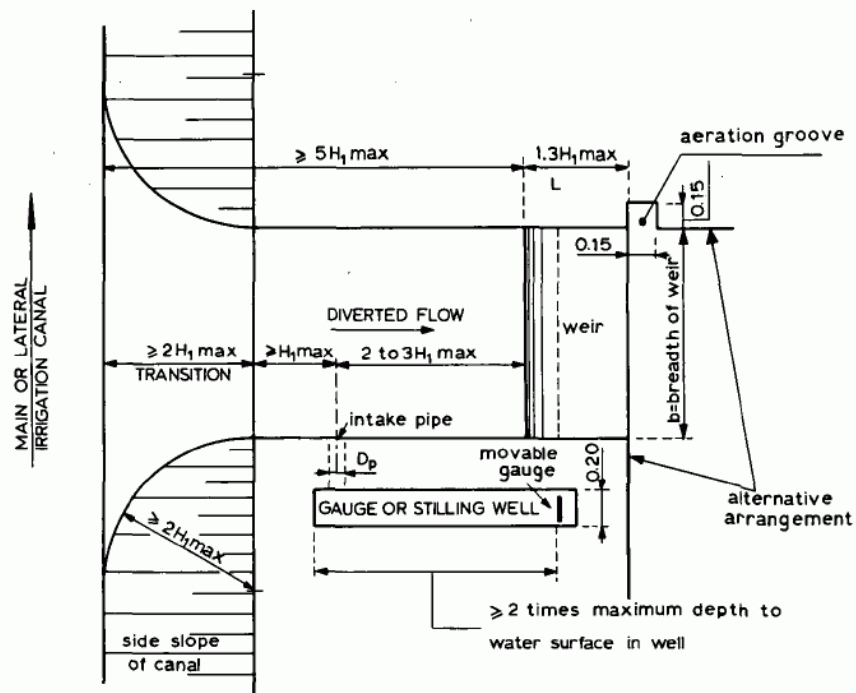
การที่สันฝายสามารถปรับระดับได้ ทำให้สามารถควบคุมความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำที่ไหลผ่านฝาย (h_{cr}) ให้คงที่ได้ แม้ระดับน้ำในทางน้ำจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้ควบคุมปริมาณน้ำได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 10-25 แสดงลักษณะการไหลผ่าน Romijn weir

รูป (a) เมื่อระดับสันฝายต่ำสุด รูป (b) เมื่อระดับสันฝายถูกปรับให้สูงขึ้น

รูปแบบลักษณะที่เหมาะสมทางชลศาสตร์ของกำแพงฝาย เป็นกำแพงแนวโค้ง รูปตัดของทางเข้าฝายเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีปากทางเข้าที่ระยะไม่น้อยกว่า $5H_{1max}$ จากตัวฝายจะมนเป็นส่วนโค้งของวงกลม กรณีตัวฝายวางตั้งกับตั้งฉากกับแนวการไหลของทางน้ำ จะมีรัศมีความโค้ง $r \geq 2H_{1max}$ ดังแสดงในรูปที่ 10-26 แต่หากตัวฝายวางปิดกั้นแนวทางการไหล $r \geq H_{1max}$ จะมีจุดวัดระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่ระยะไม่น้อยกว่า $2-3H_{1max}$



รูปที่ 10 - 26 แสดงมิติทางชลศาสตร์กำแพงข้างที่เหมาะสมของ Romijn weir

ในกรณีที่เป็นฝายหลายช่อง ตอม่อกลางที่จะแบ่งฝายแต่ละตัวควรมีหน้าตอม่อเป็นครึ่งวงกลมหรือวงรี ความหนาของตอม่อควรมากกว่าหรือเท่ากับ $0.65H_{1\max}$ แต่ไม่น้อยกว่า 0.30 ม. และฝายแต่ละตัวต้องวัดระดับน้ำแยกจากกัน

10.6.1.2 การตรวจวัดปริมาณน้ำผ่าน Romijn weir

ลักษณะการไหลผ่าน Romijn weir เป็นลักษณะการไหลแบบฝายสันกว้างจึงใช้สมการของฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการคำนวณ

ก. กรณีการไหลแบบ Free flow

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} b H_1^{3/2}$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 เมตร/ (วินาที)²

b = ความยาวของสันฝาย (เมตร)

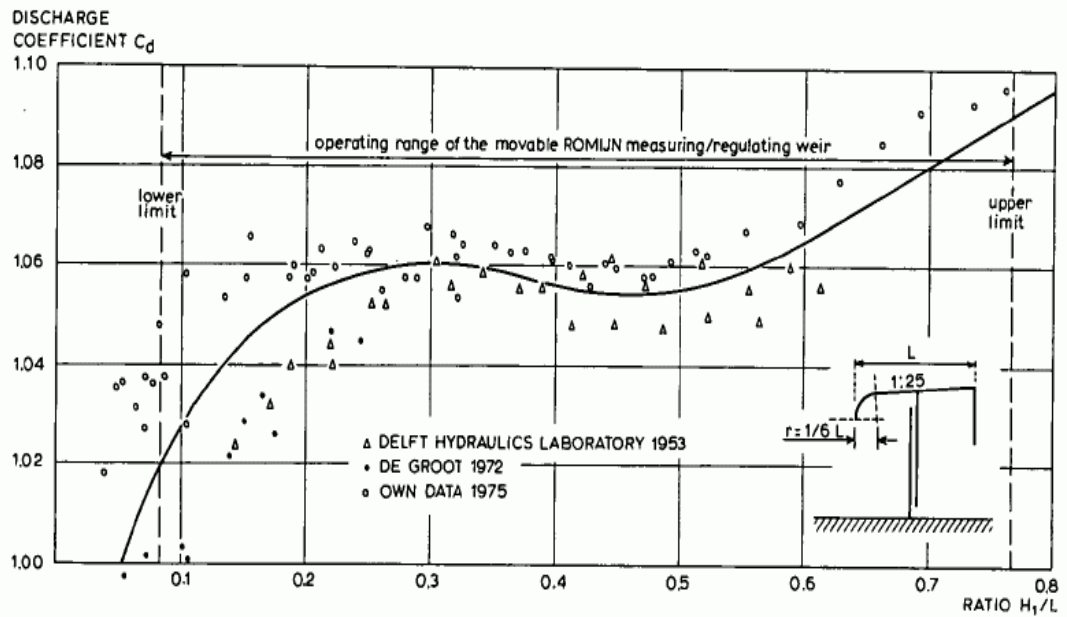
$H_1 \approx h_1$ = ความลึกน้ำเหนือสันฝายที่ตำแหน่งตรวจวัดด้านเหนือน้ำ (เมตร)

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจากเสดของความเร็วในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1} = C_d \frac{h_1}{h_1 + P_1}$ เมื่อ A^* เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดเหนือสันฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย ในกรณีนี้ให้ใช้เส้นกราฟช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular control) หากไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากอาจใช้ $C_v = 1$

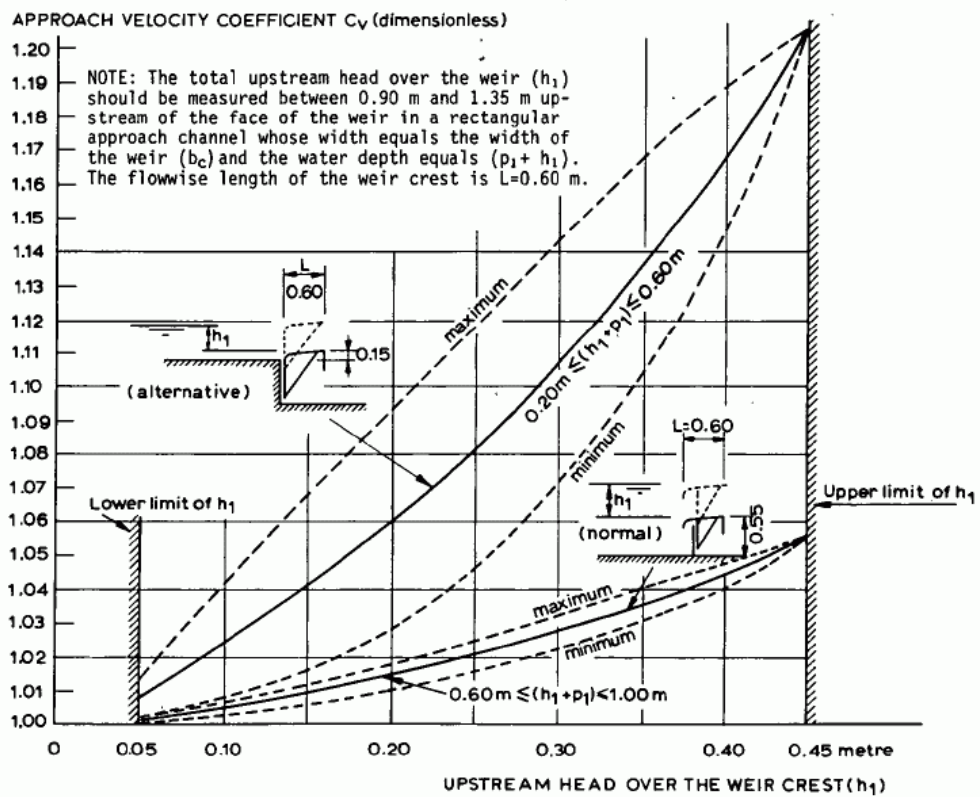
หรือ หาจากกราฟในรูปที่ 10-28 ซึ่งจะสัมพันธ์กับระดับน้ำที่อยู่เหนือสันฝาย (h_1)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล โดยหาด้านท้ายน้ำเป็นการไหลแบบท่วมสันฝาย หาก Modular limit $H_2/H_1 \leq 0.66$ ให้ถือว่าเป็นการไหลแบบ Free flow (H_2 = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำที่วัดเหนือสันฝาย)

- C_d หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-27 โดยจะสัมพันธ์กับค่าของ H_1/L
- อาจใช้ $C_d = 1.055$ คงที่ทุกค่าของ H_1/L จะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 4%



รูปที่ 10-27 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของ Romijn weir ที่จะสัมพันธ์กับค่าของ H_1/L หรืออาจใช้ $C_d = 1.055$ คงที่ทุกค่าของ H_1/L



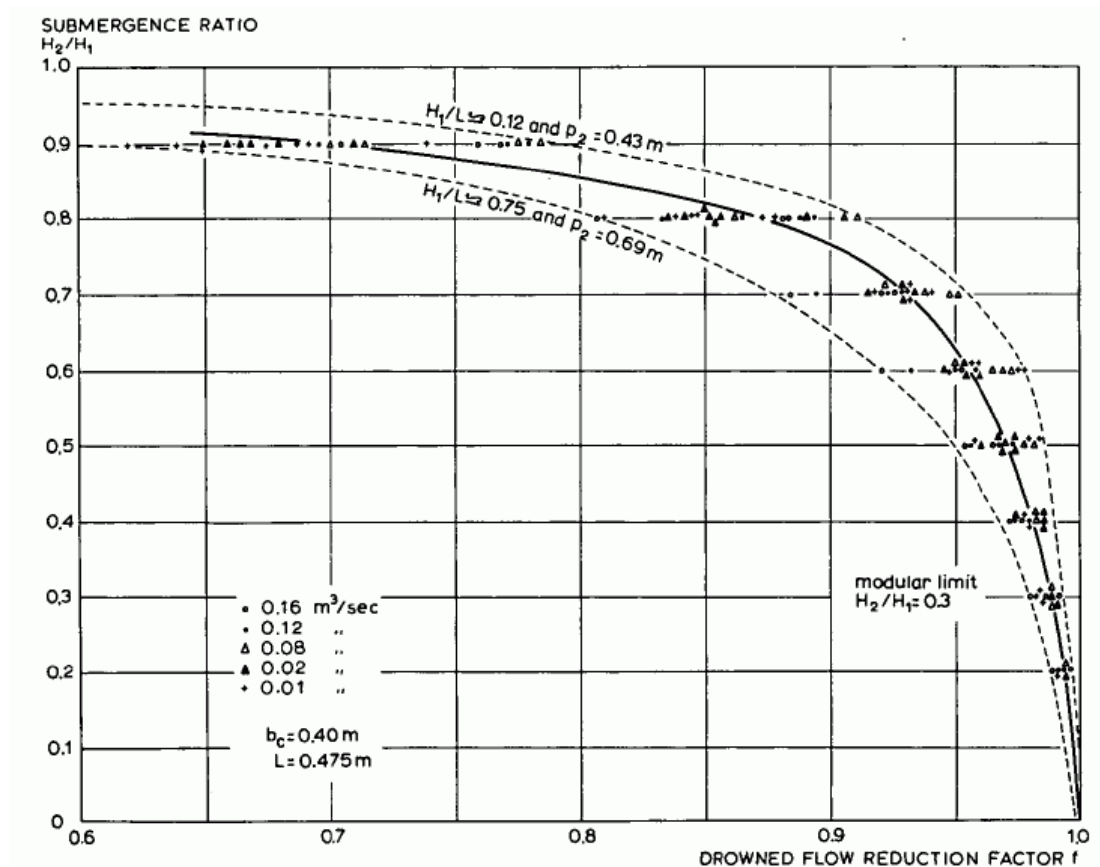
รูปที่ 10-28 ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำของ Romijn weir ที่จะสัมพันธ์กับค่า h_1

ข. กรณีการไหลแบบ Submerged flow

สภาวะการไหลแบบ Submerged flow ของ Romijn weir จะเกิดเมื่อค่า Modular limit $H_2/H_1 > 0.66$ โดยจะมีอัตราการไหลลดลงไม่เกิน 1% จากสภาวะการไหลแบบ Free flow

ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลในกรณี Submerged flow: $C_{d(s)}$ นั้นจะลดลงจากสัมประสิทธิ์ของการไหลในกรณี Free flow: C_d ด้วยค่า Drowned flow reduction: f ที่จะสัมพันธ์กับค่า H_2/H_1 หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-29

$$C_{d(s)} = f \cdot C_d$$



รูปที่ 10-29 ค่า Drowned flow reduction: f สำหรับ Romijn weir

10.6.1.3 ข้อจำกัดของ Romijn weir

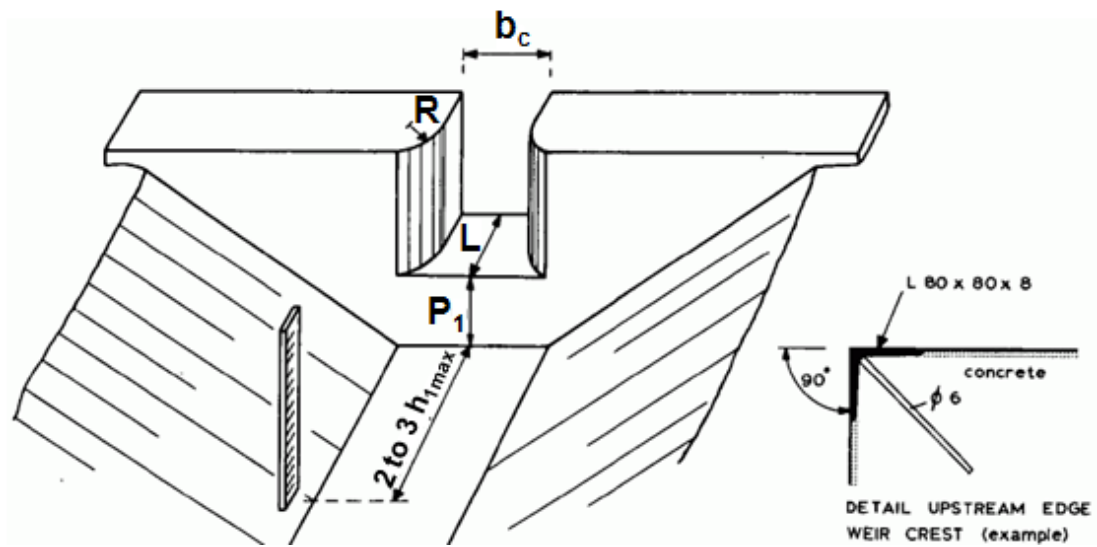
- 1) ค่า h_1 น้อยที่สุดที่จะทำให้การวัดไม่ผิดพลาดเท่ากับ 0.05 ม. หรือ 0.08L
- 2) ความยาวของสันฝายหรือช่องฝาย $b_c \geq 0.30$ ม.
- 3) ความสูงของสันฝายจากพื้นทางน้ำ $P_1 \geq 0.15$ ม. หรือ $P_1 \geq 0.33 H_{1max}$
- 4) เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจะมีความเสถียร หาก $H_1/L \geq 0.75$
- 5) การไหลในสถานะ Free flow อย่างแท้จริง ต้องมีค่า Submergence ratio หรือ Modular limit $H_2/H_1 \leq 0.30$ และจะเกิดสภาวะการไหลแบบ Submerged flow อย่างสมบูรณ์เมื่อ $H_2/H_1 \geq 0.66$

นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดอื่น ๆ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบ ซึ่งจะไม่ขอกล่าวในที่นี้

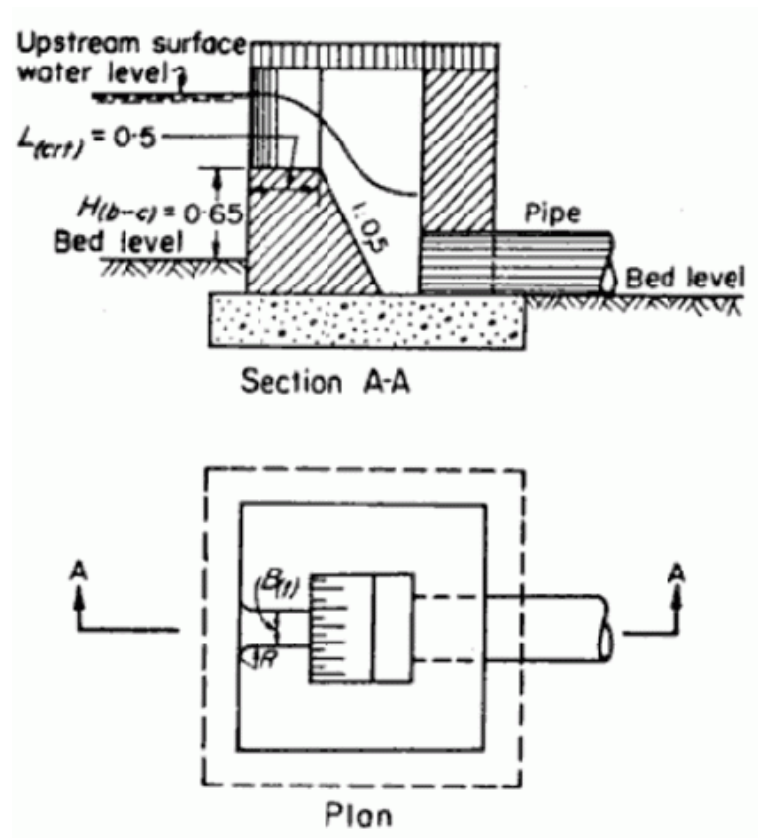
10.6.2 Fayoum weir หรือ Faiyum weir

Fayoum หรือ Faiyum เป็นจังหวัดหนึ่งในประเทศอียิปต์ ที่ได้มีการขุดค้นพบซากเมืองโบราณ ซึ่งในการขุดค้นพบว่ามีระบบชลประทานที่มีการใช้ฝายชนิดหนึ่งด้วยและเป็นลักษณะรูปแบบเช่นเดียวกับที่ใช้ในปัจจุบัน แสดงว่ามีการใช้ฝายชนิดนี้ในระบบชลประทานต่อเนื่องมายาวนานจนถึงปัจจุบัน จึงเรียกฝายชนิดนี้ว่า Fayoum หรือ Faiyum weir ตามชื่อเมืองดังกล่าว

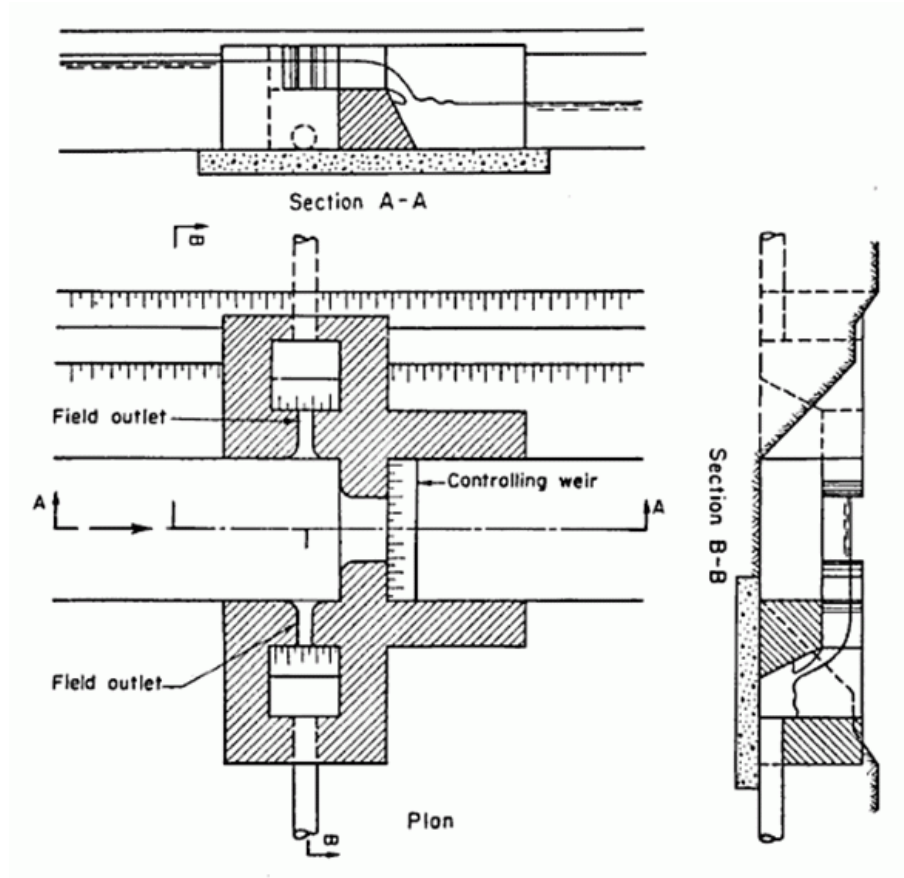
Faiyum weir เป็นฝายที่มีรูปแบบของฝายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีลักษณะพิเศษคือ เป็นช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยส่วนที่เป็นสันฝายกว้าง b_c มีขอบสันฝายด้านหน้าและด้านหลังเป็นมุมฉากหรือเป็นแนวโค้ง ส่วนด้านข้างเป็นแนวโค้งความหนาเท่ากับความยาวของตัวฝาย L โดยมุมผนังด้านเหนือน้ำสร้างเป็นส่วนโค้งของวงกลมรัศมี R ส่วนด้านหลังน้ำมุมผนังเป็นมุมฉาก ฝายชนิดนี้มีวัตถุประสงค์การใช้งานเพื่อเป็นอาคารแบ่งน้ำในทางน้ำชลประทาน มีลักษณะรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 10-30, 10-31, 10-32 และ 10-33



รูปที่ 10-30 แสดงลักษณะรูปแบบ Faiyum weir



รูปที่ 10-31 แสดงแปลน และรูปตัดของ Faiyum weir มาตรฐาน



รูปที่ 10-32 แสดงแปลน และรูปตัดของกลุ่มของ Faiyum weir



รูปที่ 10-33 กลุ่มของ Faiyum weir ที่ใช้ในอียิปต์

- **A.D. Butcher** เป็นผู้นำเสนอผลการทดลองศึกษา Faiyum weir ในปี 1923 โดยใช้ฝายขนาดมาตรฐานที่มีการใช้งานจริงขณะนั้น มีความยาวตัวฝาย L คงที่ 0.50 ม. ด้านท้ายฝายมีลักษณะเป็นลาดลงด้วยสัดส่วน แนวราบ : แนวตั้ง เป็น 0.5 : 1 มีระดับสันฝายสูงจากพื้นทางน้ำ (P_1) เป็น 0.65 ม. มีระดับน้ำเหนือสันฝายสูงสุด 0.50 ม. หรือมีระดับน้ำสูงสุดในทางน้ำหรือคลอง 1.15 ม. ซึ่งสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของน้ำผ่านฝายจะขึ้นกับ รัศมีความโค้ง R ของมุมกำแพงข้างของฝายด้านเหนือน้ำ และ b_c โดยสรุปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ R และ b_c โดยมีค่าความผิดพลาดของอัตราการไหลจากการอ่านค่าระดับน้ำผิดพลาด $\pm 1\%$ ของค่าที่แท้จริง ซึ่งแสดงด้วยเส้นจุด 2 เส้น ในกราฟรูปที่ 10-34 (ต่อมาได้พัฒนาเป็นกราฟในรูปที่ 10-36)

- กำแพงข้างด้านท้ายน้ำไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการไหล หากด้านท้ายฝายมีลักษณะเป็นลาดลงด้วยสัดส่วน แนวราบ : แนวตั้ง เป็น 0.5 : 1

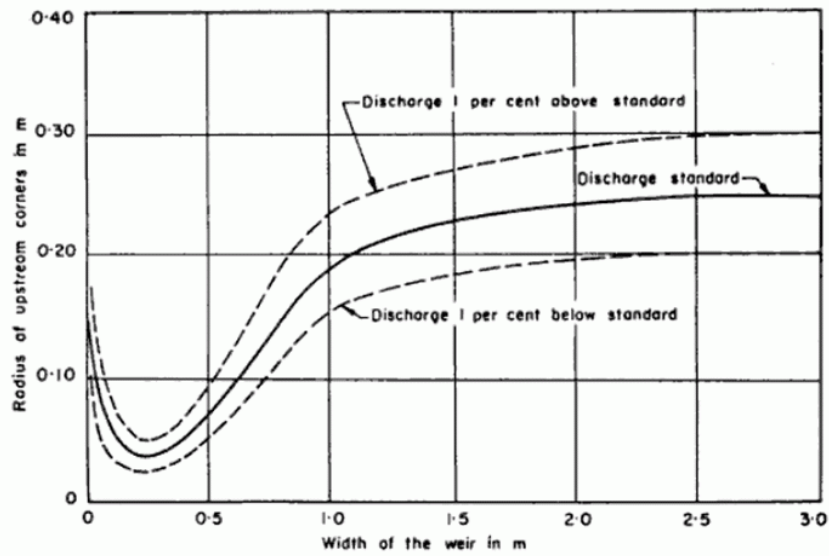
- เมื่อลักษณะการไหลเป็นแบบท่วม สัดส่วนของระดับน้ำด้านเหนือน้ำ $H_{(crt)}$ และด้านท้ายน้ำ $H_{(s)}$ มีผลต่อการลดลงของอัตราการไหลที่คำนวณในสภาพ Free flow แสดงโดยกราฟในรูปที่ 10-35

- ช่วงที่เหมาะสมของการใช้งานของ Faiyum weir ระดับน้ำผ่านฝาย 0.01 ม. ถึง 1.00 ม. ความกว้างของสันฝาย 0.01 ม. ถึง 10 ม.

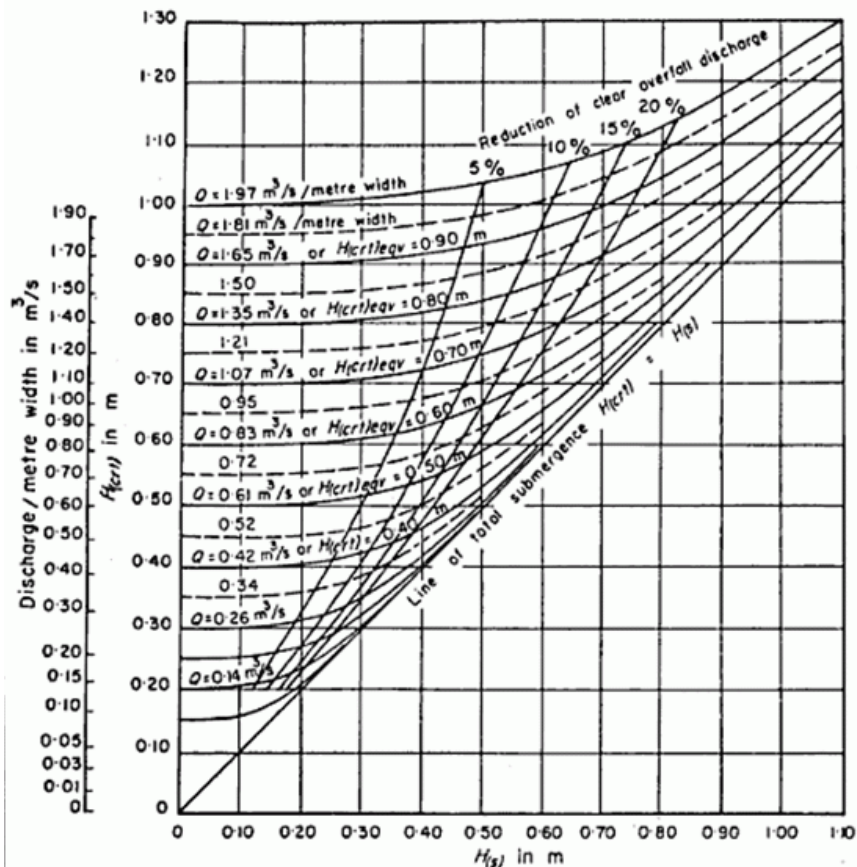
- สมการอัตราการไหลจากผลการทดลองของ Butcher (q) ลบ.ม./วินาที/ม. จากฝายขนาดมาตรฐาน

$$\text{เมื่อ } H_{(crt)} = 0 - 0.14 \text{ ม.} \quad q = 1.652 H_{crt}^{1.54}$$

$$H_{(crt)} = 0.14 - 1.00 \text{ ม.} \quad q = 1.956 H_{crt}^{1.72} + 0.014$$



รูปที่ 10-34 กราฟผลการศึกษาของ Butcher แสดงอัตราการไหลที่ความสัมพันธ์กับรัศมีความโค้ง R ของมุมกำแพงฝายด้านเหนือน้ำ และความกว้างของสันฝาย b_c



รูปที่ 10-35 กราฟผลการศึกษาของ Butcher แสดงความสัมพันธ์ของระดับน้ำ ด้านเหนือน้ำ $H_{(cr1)}$ และด้านท้ายน้ำ $H_{(s)}$ ที่มีผลต่อการลดลงของอัตราการไหล เมื่อระดับท้ายน้ำท่วมสันฝาย

การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Faiyum weir

ได้มีผู้ศึกษารายอื่นๆ ศึกษา Faiyum weir โดยอาศัยรูปแบบการศึกษาของ Butcher แต่ได้มีการปรับปรุงพัฒนาแนวความคิดที่ทันสมัย ทำให้ได้ผลการศึกษาที่ง่ายต่อการเข้าใจเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานฝ่ายประเภทนี้ยิ่งขึ้น โดยการไหลผ่านฝ่ายชนิดนี้จะมีได้ 2 รูปแบบคือ

- (1) การไหลแบบ Free flow ที่ระดับน้ำด้านท้ายอยู่ต่ำกว่าสันฝาย
- (2) การไหลแบบ Submerged flow ที่ระดับน้ำด้านท้ายอยู่สูงกว่าสันฝาย

ก. กรณีการไหลแบบ Free flow

มีสถานะการไหลของฝ่ายสันกว้างแบบ Free flow ที่ระดับน้ำด้านท้ายอยู่ต่ำกว่าสันฝายเมื่อ $0.08 \leq H_1/L \leq 0.33$ และ Modular limit $H_2/H_1 \leq 0.66$

การคำนวณใช้สมการมาตรฐานของฝ่ายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าตัวแปรต่าง ๆ ก็ให้ใช้เช่นเดียวกับกรณีฝ่ายสันกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าทุกประการ

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} b H_1^{3/2}$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 เมตร/(วินาที)²

b = ความยาวของสันฝาย (เมตร)

H_1 หรือ h_1 = ความลึกน้ำเหนือสันฝายที่ตำแหน่งตรวจวัดด้านเหนือน้ำ (เมตร)

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจากเสดของความเร็วในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-3 โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1} = C_d \frac{b_c h_1}{A_1}$ โดย C_v มีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 1.035 เมื่อ A^* เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดเหนือสันฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย ในกรณีนี้ให้ใช้เส้นกราฟช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular control) หากไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากอาจใช้ $C_v = 1$

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล ภายใต้เงื่อนไขการไหล $0.08 \leq H_1/L \leq 0.33$ และ Modular limit $H_2/H_1 \leq 0.66$ (การไหลยังเป็น Free Flow)

$$C_d = 0.848F$$

F = Coefficient correction factor หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-7 ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ของ $\frac{h_1}{L}$ และ $\frac{h_1}{h_1 + P}$

- ในกรณีไม่คิด C_v และ $\frac{h_1}{h_1 + P} \leq 0.35$ ค่า C_d หาได้จากกราฟรูปที่ 10-8

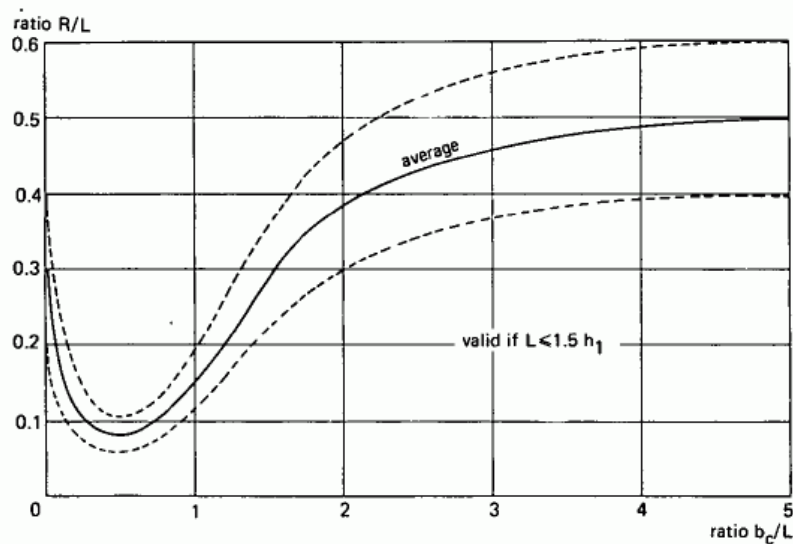
ข. กรณีการไหลแบบ Submerged flow

เมื่อระดับน้ำด้านท้ายอยู่สูงกว่าสันฝาย และ Modular limit $H_2/H_1 \geq 0.66$ (หาก $H_2/H_1 \leq 0.66$ การไหลจะมีสถานะการไหลเป็น Free flow)

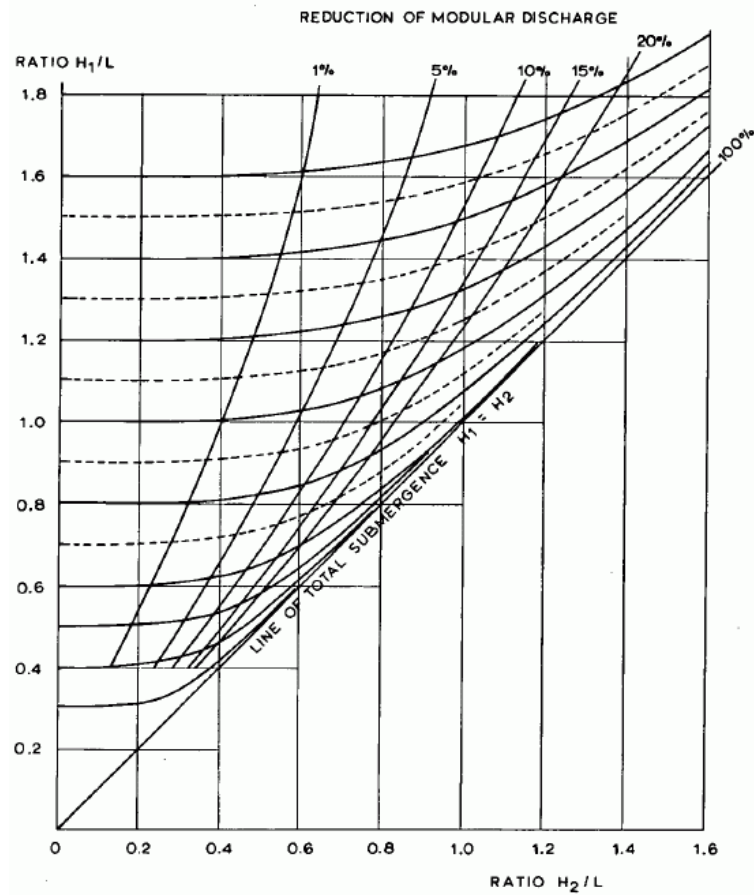
หลักการคำนวณ

- 1) ให้คำนวณการไหลแบบ Free flow ดังข้างต้น
- 2) ปรับแก้อัตราการไหลที่จะลดลงเนื่องจากผลกระทบจากระดับน้ำด้านท้ายน้ำ โดยพิจารณาจากค่า H_2 และ H_1 โดยใช้กราฟในรูปที่ 10-37 (เป็นกราฟที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่จากกราฟของ Butcher รูปที่ 10-35)

กราฟรูปที่ 10-37 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) แกนตั้งด้านซ้ายมือเป็นค่าของ H_1/L มีลักษณะเป็นเส้นกราฟปลายโค้งขึ้น (2) แกนนอนด้านล่างเป็นค่าเส้นแนวตั้งของ H_2/L และ (3) เส้นกราฟอัตราการลดลงของอัตราการไหล (Reduction of modular discharge) ซึ่งเป็นเส้นกราฟแนวเฉียงแสดงค่า 1%, 5%, 10%, 15%, 20% และ 100%



รูปที่ 10-36 กราฟ แสดงอัตราการไหลที่ความสัมพันธ์กับรัศมีความโค้ง R ของมุมกำแพงฝายด้านเหนือน้ำ และความกว้างของสันฝาย b_c ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่จากกราฟของ Butcher



รูปที่ 10-37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับน้ำ ด้านเหนือน้ำ H_1 และด้านท้ายน้ำ H_2 ที่มีผลต่อการลดลงของอัตราการไหล เมื่อระดับท้ายน้ำท่วมสันฝาย ที่ปรับปรุงจากกราฟของ Butcher

การอ่านค่าจากกราฟรูปที่ 10-37 ทำโดย หาค่า H_1/L และ H_2/L แล้วนำค่าทั้งสองค่าไปหาอัตราการลดลงของอัตราการไหล ว่าจุดตัดของค่า H_1/L และ H_2/L ตกที่ตำแหน่งเส้นกราฟ Reduction of modular discharge ค่าใด

ตัวอย่างการอ่านค่าจากกราฟรูปที่ 10-37 ถ้า $H_1/L = 1.00$ และ $H_2/L = 0.40$ มีจุดตัดกันที่เส้น Reduction of modular discharge 1% หรือ $H_1/L = 1.20$ และ $H_2/L = 0.80$ มีจุดตัดกันที่เส้น Reduction of modular discharge ระหว่างเส้น 5% กับเส้น 10% เปรียบเทียบตำแหน่งจุดตัดดังกล่าว Reduction of modular discharge เป็น 8% ดังนั้นจึงต้องลดอัตราการไหลที่คำนวณจากสมการ Free flow ลง 8%

บทที่ 11

ฝายวัดน้ำประเภทฝายสันสั้น (Short Crested Weir)

ตามที่ทราบแล้วว่าฝายสันสั้นนั้นเป็นการจัดกลุ่มของฝายขึ้นมาใหม่ เพิ่มจากเดิมที่มีเพียงฝายสันคมกับฝายสันกว้าง โดยฝายวัดน้ำที่เป็นฝายสันสั้นเท่าที่ปรากฏข้อมูลรายงานต่าง ๆ จะได้แก่ฝายต่อไปนี้

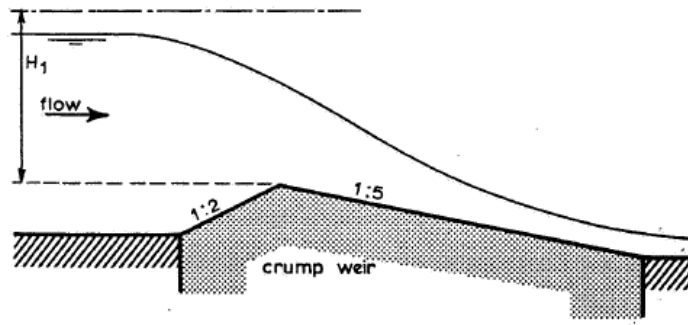
- 1) Crump weir หรือ Triangular profile two-dimensional weir
- 2) Triangular profile flat-V weir
- 3) Weir sill with rectangular control section หรือ Drop weir
- 4) V-notch weir sill

11.1 Crump weir หรือ Triangular profile two-dimensional weir

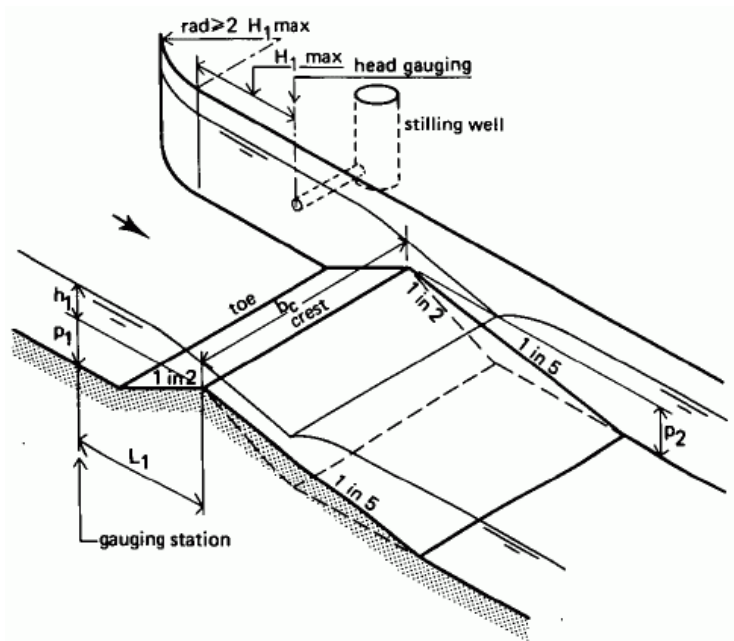
Crump weir พัฒนาขึ้นมาโดย E.S Crump โดยได้ศึกษาทดลองที่ Hydraulics Research Station เมือง Wallingford ประเทศอังกฤษ ในปี 1952 โดยที่รูปแบบมาตรฐานของฝายชนิดนี้จะมี 2 รูปแบบ คิดตั้งในทางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือมีด้านข้างเป็นกำแพงตั้งเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 11-1 โดยจะมีลักษณะเฉพาะตัว คือ ด้านเหนือน้ำเป็นลาด 1:2 (แนวตั้ง: แนวราบ) และด้านท้ายน้ำเป็นลาด 1:5 (อาจเรียกฝาย 1:2 / 1:5) ต่อมาเมื่อมีการศึกษาทดลองมากขึ้นพบว่าสามารถปรับปรุงลาดโดยทำให้คุณสมบัติทางชลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไม่มาก 2 ลักษณะคือ

- (1) ให้ด้านท้ายเป็นลาด 1:2 (อาจเรียกฝาย 1:2 / 1:2)
- (2) การลดขนาดความยาวตัวฝายจากรูปแบบมาตรฐาน เพื่อลดปริมาณวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 11-2 ซึ่งทำได้ทั้งลาดด้านหน้าและด้านท้าย โดยจะทำให้สัมประสิทธิ์การไหลลดลงเพียง 0.5 % เท่านั้น ทั้งนี้การตัดส่วนของลาดออกได้กำหนดให้มีความยาวของลาดน้อยที่สุดเป็นไปตามหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

- ฝาย 1:2 / 1:2 ความยาวน้อยที่สุดของลาดที่วัดจากสันฝายออกไป ด้านเหนือน้ำเท่ากับ $0.8 H_{1\max}$ และด้านท้ายน้ำเท่ากับ $1.2 H_{1\max}$
- ฝาย 1:2 / 1:5 ความยาวน้อยที่สุดของลาดที่วัดจากสันฝายออกไป ด้านเหนือน้ำเท่ากับ $1.0 H_{1\max}$ และด้านท้ายน้ำเท่ากับ $2.0 H_{1\max}$



รูปตัดตามยาว ฝ่าย 1:2/1:5

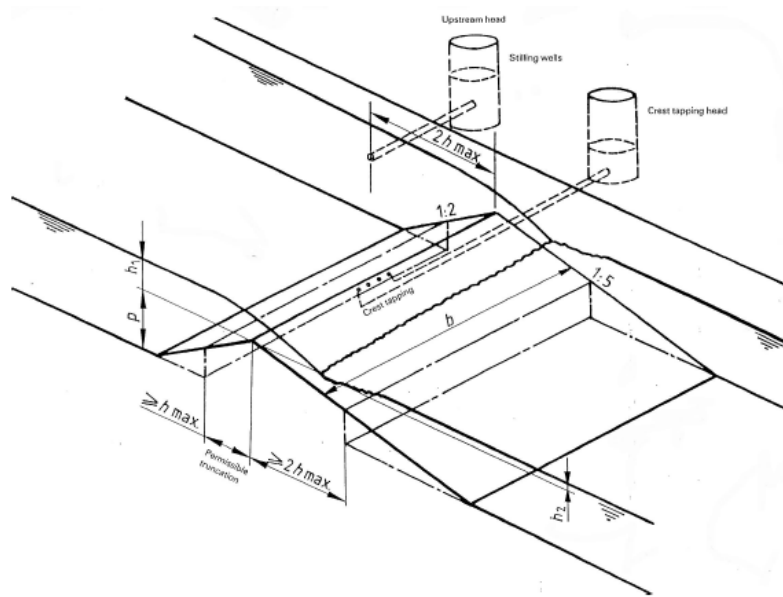


มิติมาตรฐาน

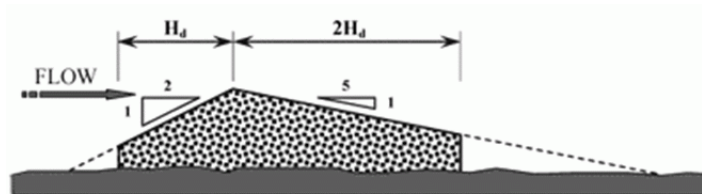
รูปที่ 11-1 แสดง Crump weir รูปแบบมาตรฐาน

คุณสมบัติที่ดีของฝายชนิดนี้ ได้แก่ ก่อสร้างง่าย สามารถให้ตะกอนที่ปนมากับน้ำไหลข้ามไปได้สะดวก มีสภาวะการไหลเป็นแบบ **Free flow** ที่สูงมากแม้จะระดับน้ำด้านท้ายจะท่วมสันฝายมากก็ตาม

การวัดความลึกของน้ำที่ไหลผ่านฝาย (h_1) ปกติแล้วกำหนดให้วัดจากหน้าทางรับน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านเหนือน้ำที่ระยะ L_1 จากสันฝาย โดย $L_1 = 6p_1$ สำหรับฝาย 1:2 / 1:5 และ $L_1 = 4p_1$ สำหรับฝาย 1:2 / 1:2 ในกรณีต้องการลดขนาดความยาวของทางรับน้ำด้านเหนือน้ำลง อาจกำหนดจุดวัดระดับน้ำที่ระยะ $2p_1 + 0.5H_{1max}$ ซึ่งจะก่อให้เกิดความผิดพลาดที่สัมพันธ์กับค่า H_1/p_1 ดังต่อไปนี้ ความผิดพลาด 0.25 % เมื่อ $H_1/p_1 = 1$, ผิดพลาด 0.50 % เมื่อ $H_1/p_1 = 2$ และ ผิดพลาด 1.0 % เมื่อ $H_1/p_1 = 3$



(ให้ H_{1max} หรือ h_{max} หรือ H_d = Design head คือค่าเดียวกัน)

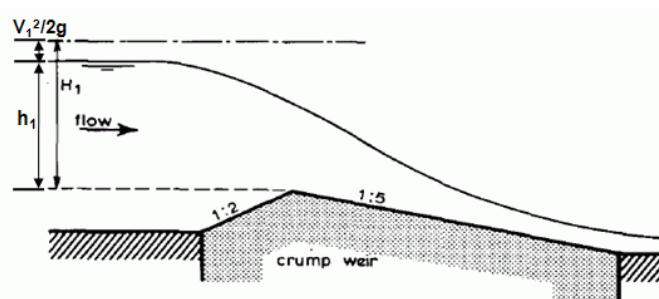


รูปที่ 11-2 ตัวอย่างการลดขนาดความยาวด้านหน้าและท้ายฝายที่มีลาด 1:2 / 1:5

11.1.1 การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Crump weir

การไหลผ่านฝายนี้จะมี 2 ลักษณะคือ การไหลแบบ Free flow บางตำราเรียก Modular flow ที่ระดับน้ำด้านท้ายต่ำกว่าสันฝาย และการไหลแบบ Submerged flow (Non-modular flow หรือ Drowned flow) ที่ระดับน้ำด้านท้ายท่วมสันฝาย

ก. กรณีการไหลแบบ Free flow



รูปที่ 11-3 รูปตัดตามยาวของ Crump weir แสดงการไหลกรณี Free flow

การคำนวณใช้สมการฝายสันสันที่มีหน้าตัดการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$Q = C_d C_v b_c \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot h_e^{3/2}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

$h_e = h_1 + K_h$ = ความลึกประสิทธิผลของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.) *

K_h = ค่าปรับความลึกที่เป็นผลจากความหนืดและแรงตึงผิว ≈ 0.001 ม.

(มีค่า 0.00025 ม. เมื่อฝายมีลาด 1:2/1:2 และ 0.0003 ม. เมื่อฝายมีลาด 1:2/1:5)

* กรณีคำนวณแบบหยาบๆ อาจให้ $h_e \approx h_1$

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล เมื่อ $h_1/P_1 < 3$ หาได้จากกราฟในรูปที่ 11-4 โดยจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของ h_1/P_2 เมื่อ P_2 เป็นความสูงของสันฝายเมื่อเทียบกับพื้นด้านท้ายน้ำโดยจะมีเส้นกราฟ 2 เส้นคือกราฟกรณีฝายมีลาด 1:2/1:2 และ ลาด 1:2/1:5

หรือใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์

$C_d = 1.163$ เมื่อ $h > 0.10$ ม

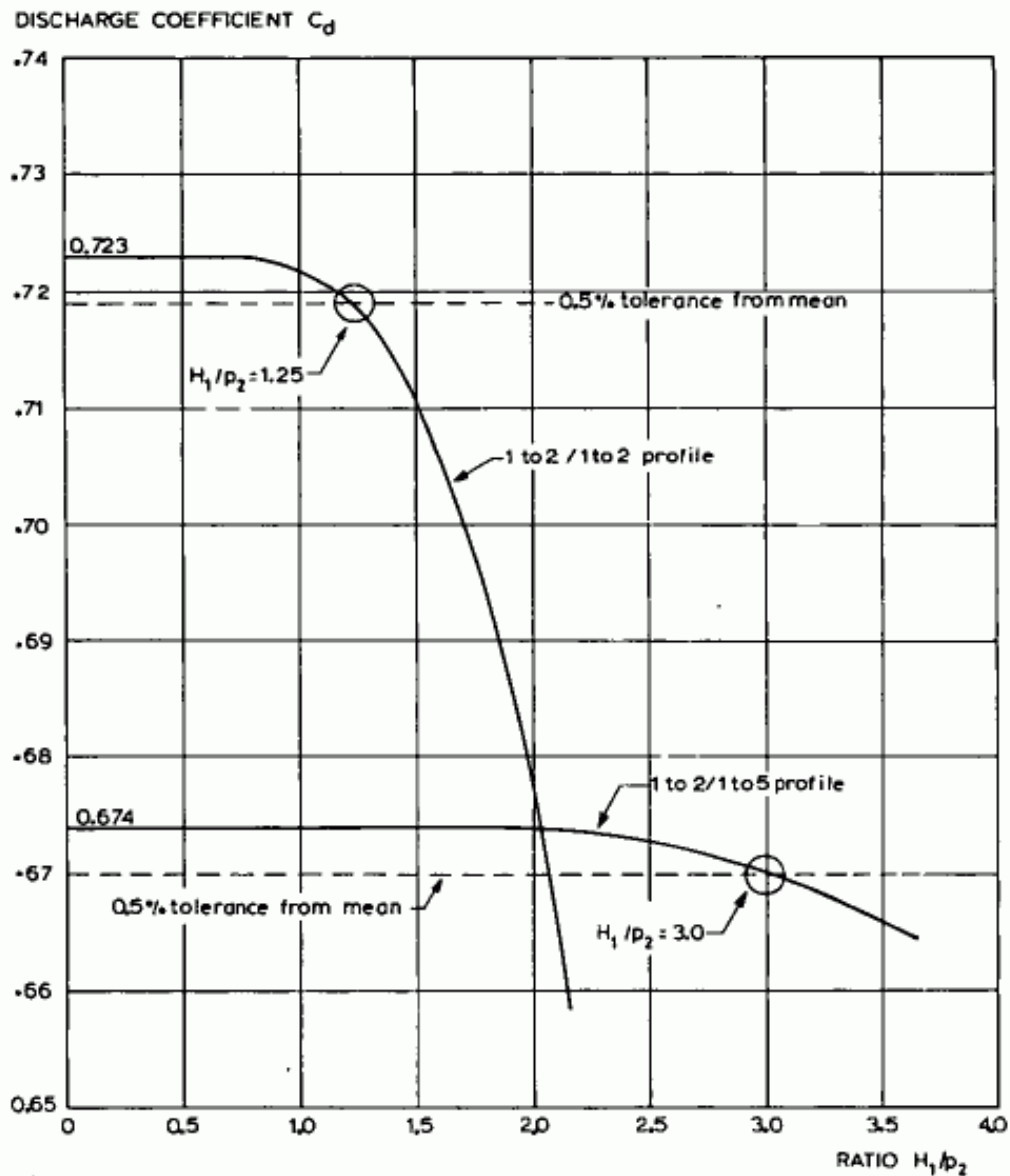
$C_d = 1.163 \left(1 - \frac{0.003}{h}\right)^{1.5}$ เมื่อ $h < 0.10$ ม.

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจากเสดของความเร็วในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 ในบทที่ 10 โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1}$ เมื่อ A^* เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดเหนือสันฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย (หากไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากอาจใช้ $C_v = 1$)

ค่าปรับแก้ความผิดพลาดของค่า $C_d C_v$

ความผิดพลาดที่มักเกิดขึ้นได้ในการคำนวณ ขึ้นกับสภาพของฝายที่มีการดูแลบำรุงรักษาไม่ดี (ใช้งานมานาน) การก่อสร้างที่ไม่ดี ความชำนาญของเจ้าหน้าที่ ฯลฯ อาจปรับแก้โดยสมการต่อไปนี้

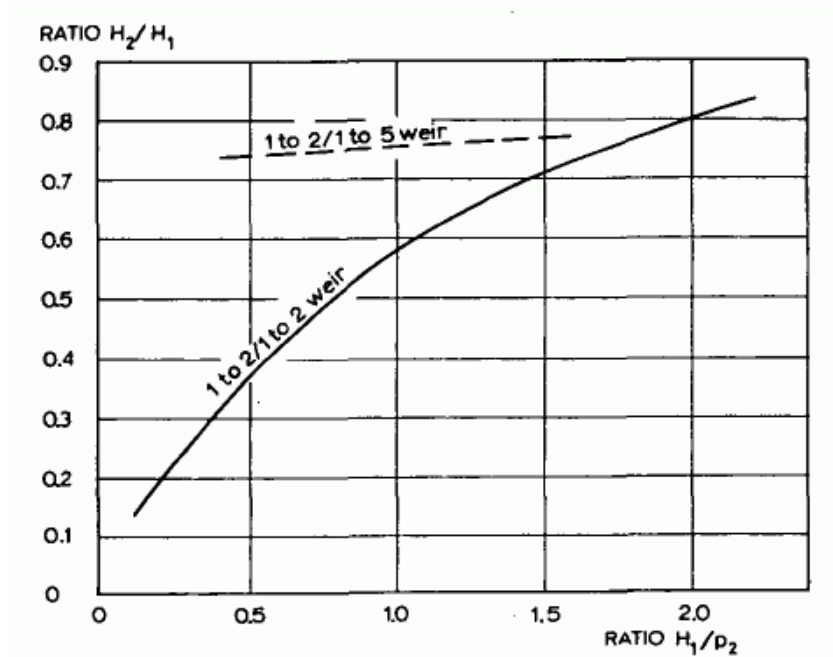
$$X_c = \pm(10C_v - 9) \text{ percent}$$



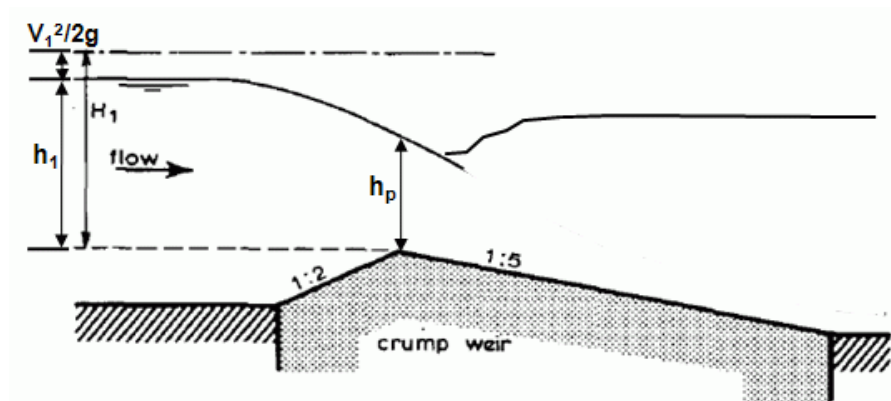
รูปที่ 11-4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C_d ของ Crump weir กรณี Free flow
ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของ H_1/P_2

ข. กรณีการไหลแบบท่วมสันฝาย (Submerged flow)

สถานการณ์การไหลแบบ Free flow ของฝายชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 11-5 ซึ่งเส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าแม้ค่าอัตราส่วนแสดงการท่วมสันฝายของระดับน้ำด้านท้ายฝายกับด้านหน้าฝาย หรือ H_2/H_1 มีค่าสูงจนถึงประมาณ 0.80 การไหลก็ยังเป็น Free flow อยู่



รูปที่ 11-5 แสดงช่วงของการไหลแบบ Free flow ของ Crump weir



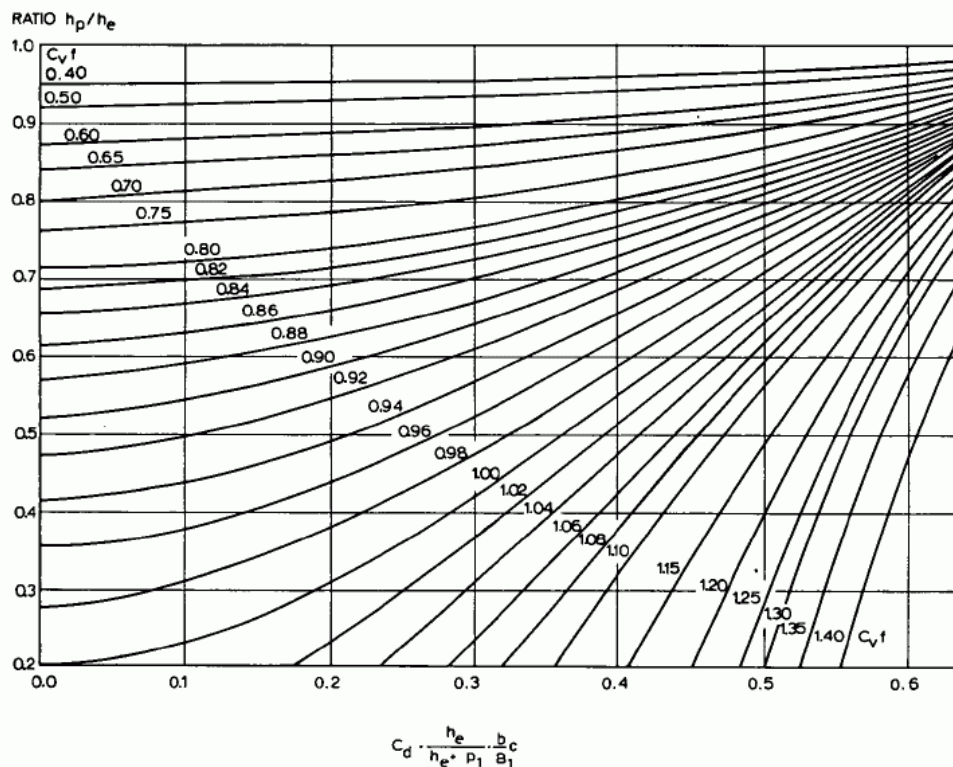
รูปที่ 11-6 รูปตัดตามยาวของ Crump weir แสดงการไหลกรณี Submerged flow

โอกาสการเกิดการไหลแบบ Submerged flow ที่แท้จริงนั้นมีโอกาสเกิดเมื่อ Submergence ratio $H_2/H_1 > 0.80$ ซึ่งในการคำนวณจะคูณสมการการไหลแบบ Free flow ด้วยค่า Factor f ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้อัตราการไหลลดลง จะได้สมการการไหลเป็น

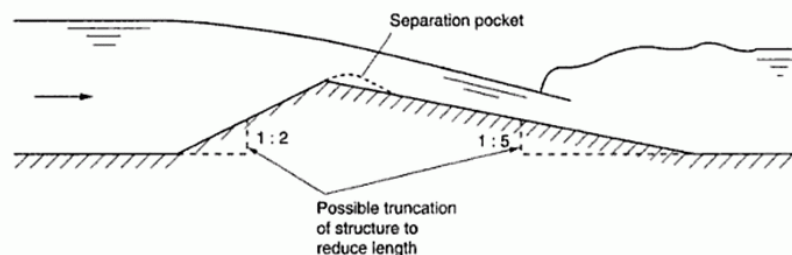
$$Q_s = f \cdot Q_f$$

$$Q_s = C_d C_v \cdot f \cdot b_c \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot h_e^{3/2}$$

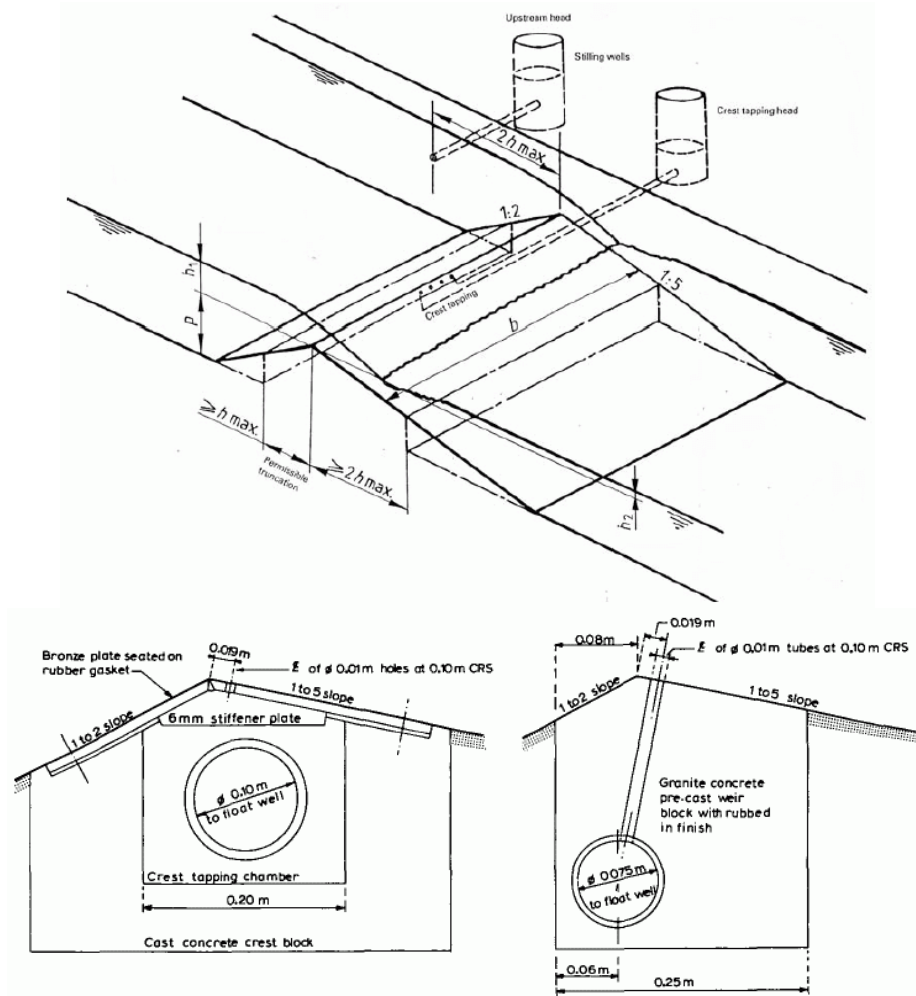
กราฟในรูปที่ 11-7 ใช้หาค่า $C_v \cdot f$ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนของ $\{C_d h_e / (h_e + P_1)\} b_c / B_1$ และค่า h_p / h_e เมื่อ h_p เป็นค่า Head เหนือสันฝายที่วัดจาก Piezometer ที่ฝังไว้ในตัวฝายบริเวณสันฝาย เพราะในกรณีการไหลแบบ Submerged flow ถ้าอัตราการไหลสูง (ความเร็วการไหลสูง) เมื่อระดับน้ำด้านท้ายฝายท่วมสูงกว่าสันมาก การต้านการไหลของน้ำด้านท้ายยังมีมาก ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนด้านหน้าฝาย และมักทำให้เกิดโพรงอากาศบริเวณสันฝายด้านท้าย ดังแสดงในรูปที่ 11-8 โพรงอากาศดังกล่าวจะมีแรงดันหรือ Pressure head เหนือสันฝาย ที่มีผลต่อการไหลซึ่งมีผลต่อความผิดพลาดของค่า C_v ดังนั้นในการหาค่า Factor f จึงต้องตรวจวัด Head เหนือสันฝายด้วยซึ่งจะติดตั้ง Piezometer ฝังไว้ในตัวฝายบริเวณสันฝายเอียงไปด้านท้ายน้ำเพื่อตรวจวัด Pressure head ดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 11-9



รูปที่ 11-7 กราฟค่า $C_v \cdot f$ ที่ใช้คำนวณการไหลกรณี Submerged flow ของ Crump weir



รูปที่ 11-8 แสดงการเกิดโพรงอากาศเหนือสันฝายด้านท้ายของ Crump weir



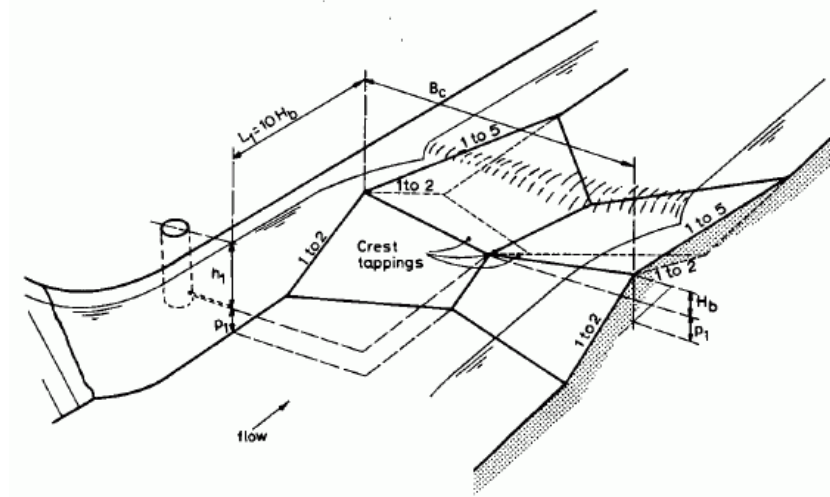
รูปที่ 11-9 แสดงการติดตั้ง Piezometer ที่ฝังไว้ในตัวฝายบริเวณสันฝาย เพื่อตรวจวัดค่า Pressure head เหนือสันฝาย (h_p)

11.1.2 ข้อกำหนดของ Crump weir

- 1) ค่าต่ำสุดที่การตรวจวัดมีความถูกต้อง ถ้าสันฝายปิดทับด้วยแผ่นโลหะ $h_{1min} = 0.03$ เมตร แต่ถ้าเป็นคอนกรีตธรรมดา $h_{1min} = 0.06$ เมตร
- 2) การตรวจวัดจะผิดพลาดเมื่อการไหลในทางน้ำมีค่า Froude number: $F_{r1} \geq 0.5$ ($F_{r1} = V_1 / \sqrt{gA_1/B_1}$) เพราะจะเกิดคลื่นนิ่งบนผิวน้ำ โดยค่า F_{r1} นี้จะสัมพันธ์กับค่าของ h_1 และ P_1 ดังนั้นฝายจึงควรมีค่า $h_1/P_1 \leq 3.0$
- 3) ความสูงของฝาย $P_1 \geq 0.06$ เมตร
- 4) $b_c \geq 0.30$ เมตร และ $b_c/H_1 \geq 2.0$
- 5) หากจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C_d) ที่เป็นค่าคงที่ กรณีฝายที่มีลาด 1:2/1:2 ต้องมีค่า $H_1/P_2 \leq 1.25$ และ ฝายที่มีลาด 1:2/1:5 ต้องมีค่า $H_1/P_2 \leq 3.0$

11.2 Triangular profile flat-V weir

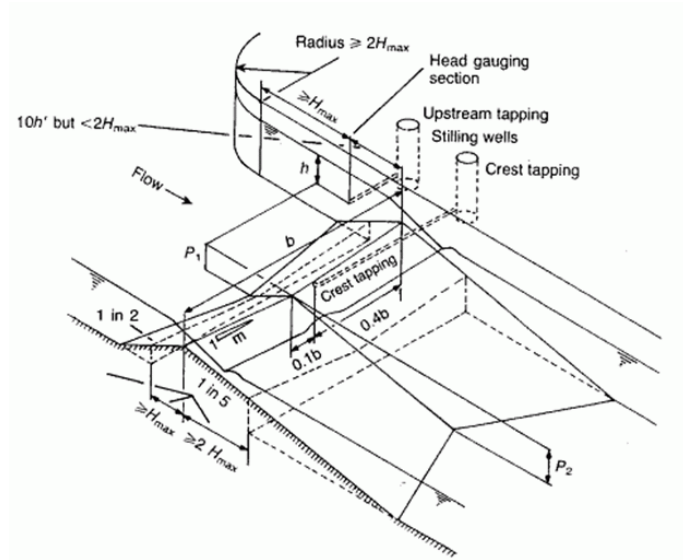
Triangular profile flat-V weir เป็นฝายวัดน้ำที่ Hydraulics Research Station ได้พัฒนาต่อเนื่องจาก Crump weir จึงมีลักษณะรูปแบบมิติล้าย Crump weir คือ เป็นรูปสามเหลี่ยมตามแนวรูปตัดตามยาว มีลาดด้านเหนือน้ำเป็น 1:2 และมีลาดด้านท้ายน้ำได้ 2 รูปแบบ คือ 1:2 หรือ 1:5 แต่มีสันฝายเป็นรูปตัววีที่ฝายมาตรฐานอาจมีหน้าตัดได้ 2 แบบ คือหน้าตัดที่เป็นลาด 1:10 หรือ 1:20 ฝายชนิดนี้มีตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ไหลผ่านสันฝาย (h_1) ด้านหน้าฝายที่ระยะ $L_1 = 10H_b$ จากสันฝาย ดังแสดงในรูปที่ 11-10



รูปที่ 11-10 แสดงรูปแบบมาตรฐานของ Triangular profile flat - V weir

ด้วยการมีสันฝายเป็นรูปตัววีฝายชนิดนี้จึงเหมาะกับอัตราการไหลน้อย ๆ และเช่นเดียวกับ Crump weir ฝายชนิดนี้สามารถตัดลดขนาดความยาวของแนวลาดด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำที่ระยะเดียวกัน โดยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลลดลงเพียง 0.50% เท่านั้น คือ (1) กรณีฝายที่มีลาดด้านหน้า / ด้านท้าย 1:2 / 1:2 ความยาวลาดด้านหน้าลดที่ระยะจากสันฝาย $0.8H_{1max}$ ความยาวลาดด้านท้ายลดที่ระยะจากสันฝาย $1.2H_{1max}$ (2) กรณีฝายที่มีลาดด้านหน้า / ด้านท้าย 1:2 / 1:5 ความยาวลาดด้านหน้าลดที่ระยะห่างจากสันฝาย $1.0H_{1max}$ ความยาวลาดด้านท้ายลดที่ระยะห่างจากสันฝาย $2.0H_{1max}$

ในกรณีฝายที่มีลาดด้านหน้า / ด้านท้าย 1:2 / 1:5 และออกแบบให้มีการใช้งานภายใต้สภาวะการไหลแบบ Submerged flow จะต้องติดตั้ง Piezometer ฝังไว้ในตัวฝายบริเวณสันฝายเพื่อตรวจวัด Pressure head ที่สันฝาย (h_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 11-11



รูปที่ 11-11 แสดงการติดตั้ง Piezometer ฝังไว้ในตัวฝายบริเวณสันฝายเพื่อตรวจวัดระดับน้ำที่สันฝาย (h_p) เมื่อการไหลเป็นแบบ Submerged flow

11.2.1 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Triangular profile flat - V weir

ก. กรณีการไหลแบบ Free flow

การคำนวณใช้สมการฝายสันตื้นที่มีหน้าตัดการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$Q = C_d C_v \frac{4}{15} \sqrt{2g} \frac{B_c}{H_b} [h_e^{2.5} - (h_e - H_b)^{2.5}]$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/(วินาที)²

$h_e = h_1 - K_h$ = ความลึกประสิทธิผลของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.) *

K_h = ค่าปรับความลึกที่เป็นผลจากความหนืดและแรงตึงผิว หาได้จากตารางที่ 11-1

* อาจให้ $h_e \approx h_1$ ถ้าไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมาก เพราะ K_h มีค่าน้อยมาก

H_b = ระดับสันฝายที่สูงที่สุดที่ขอบด้านข้าง - ระดับสันฝายที่ต่ำที่สุดที่กลางฝาย

ค่า $(h_e - H_b)^{2.5}$ ไม่ต้องคิดถ้า $h_e < H_b$

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

$C_d \approx 0.66$ สำหรับฝายที่มีลาดด้านหน้า / ด้านท้าย 1:2 / 1:5 (หน้าตัดทั้ง 2 แบบ)

เมื่อ $h_e/P_2 < 3$

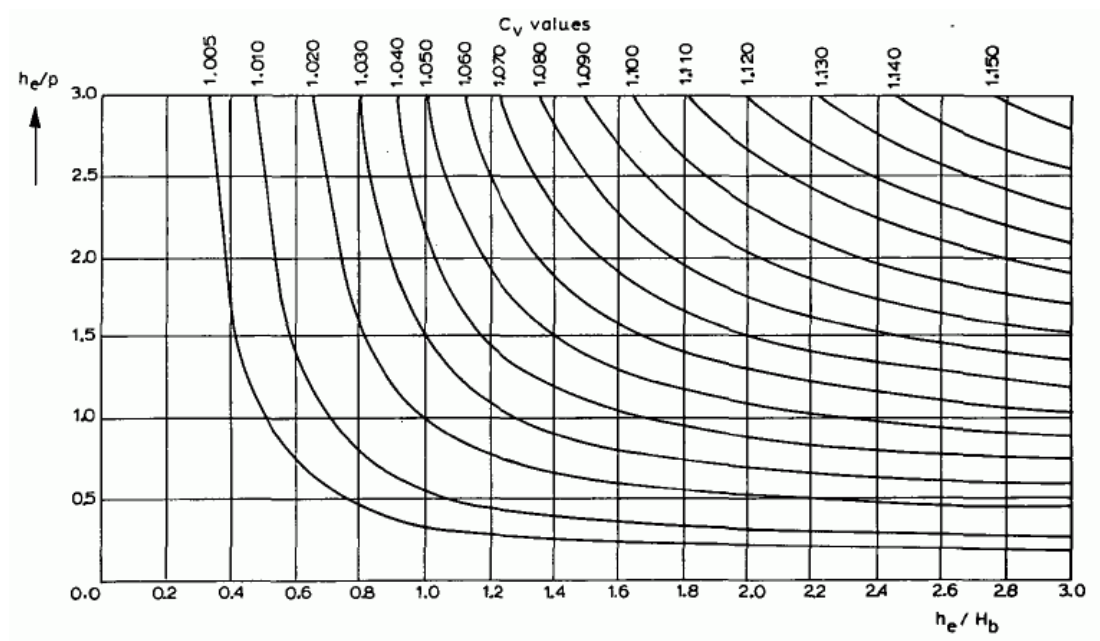
$C_d \approx 0.71$ สำหรับฝายที่มีลาดด้านหน้า / ด้านท้าย 1:2 / 1:2 (หน้าตัดทั้ง 2 แบบ)

เมื่อ $h_e/P_2 < 1.25$

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจาก
 เสดของความเร็วน้ำในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 9-3 ซึ่งสัมพันธ์กับค่า
 ของ h_e/P_1 และ h_e/H_b

ตารางที่ 11-1 ค่า K_h ของ Triangular profile flat - V weir

ลาดตามยาวของตัวฝาย	หน้าตัดมีลาด 1:20	หน้าตัดมีลาด 1:10
1:2 / 1:2	0.0004 ม.	0.0006 ม.
1:2 / 1:5	0.0005 ม.	0.0008 ม.



รูปที่ 11-12 ค่า C_v ซึ่งความสัมพันธ์กับค่าของ h_e/P_1 และ h_e/H_b

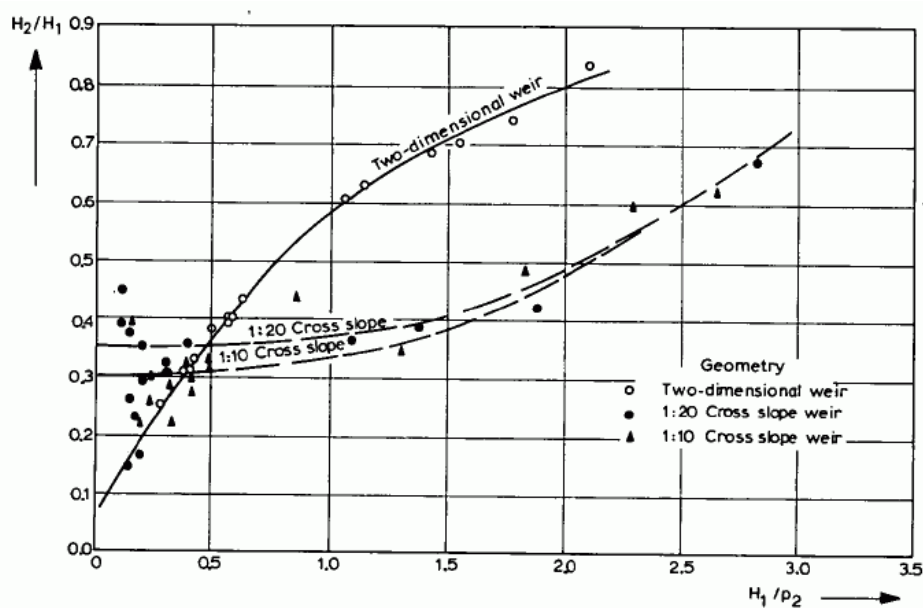
ค่าปรับแก้ความผิดพลาดของค่า $C_d C_v$

ความผิดพลาดที่มักเกิดขึ้นได้ในการคำนวณ ขึ้นกับสภาพของฝายที่มีการ
 ดูแลบำรุงรักษาไม่ดี (ใช้งานมานาน) การก่อสร้างที่ไม่ดี ความชำนาญของเจ้าหน้าที่ ฯลฯ อาจ
 ปรับแก้โดยสมการต่อไปนี้

$$X_c = \pm(10C_v - 8) \text{ percent}$$

ข. กรณีการไหลแบบ Submerged flow

กราฟในรูปที่ 11-13 แสดงสถานะการไหลแบบ Free flow ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของ H_2/H_1 และ H_1/P_1 ของ Triangular profile flat - V weir ที่มีหน้าตัด 2 แบบคือ 1:10 และ 1:20 เทียบกับ Crump weir (Two-dimension weir) จะเห็นได้ว่า กรณี Triangular profile flat - V weir ทั้ง 2 หน้าตัด จะมีสถานะการไหลแบบ Free flow ใกล้เคียงกัน โดยมี H_2/H_1 สูงสุดประมาณ 0.70 ในขณะที่ Crump weir มีสถานะการไหลแบบ Free flow ที่ H_2/H_1 สูงสุดประมาณ 0.80



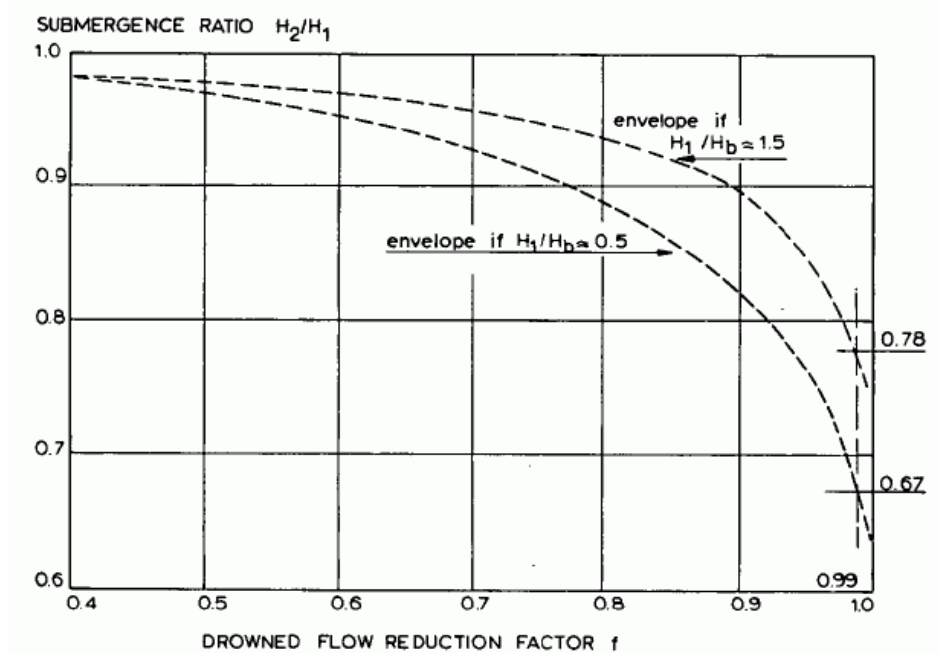
รูปที่ 11-13 กราฟแสดงสถานะการไหลแบบ Free flow Triangular profile flat - V weir

การไหลในกรณี Submerged flow นั้นจะสัมพันธ์กับค่าของ H_2/H_1 และ H_1/H_b ที่จะทำให้อัตราการไหลในกรณีการคำนวณด้วยสมการ Free flow ลดลงด้วยค่าของ Factor f ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_s = f \cdot Q$$

$$Q_s = C_d C_v f \frac{4}{15} \sqrt{2g} \frac{B_c}{H_b} \left[h_e^{2.5} - (h_e - H_b)^{2.5} \right]$$

ค่า Factor f ของฝายที่มีลาด 1:2 / 1:5 ที่สัมพันธ์กับค่าของ H_2/H_1 และ H_1/H_b หาได้จากกราฟในรูปที่ 11-14 โดยหาก $H_1/H_b \approx 0.5$ การไหลจะเป็นแบบ Submerged flow เมื่อ $H_2/H_1 > 0.67$ และหาก $H_1/H_b \approx 1.5$ การไหลเป็นแบบ Submerged flow เมื่อ $H_2/H_1 > 0.78$

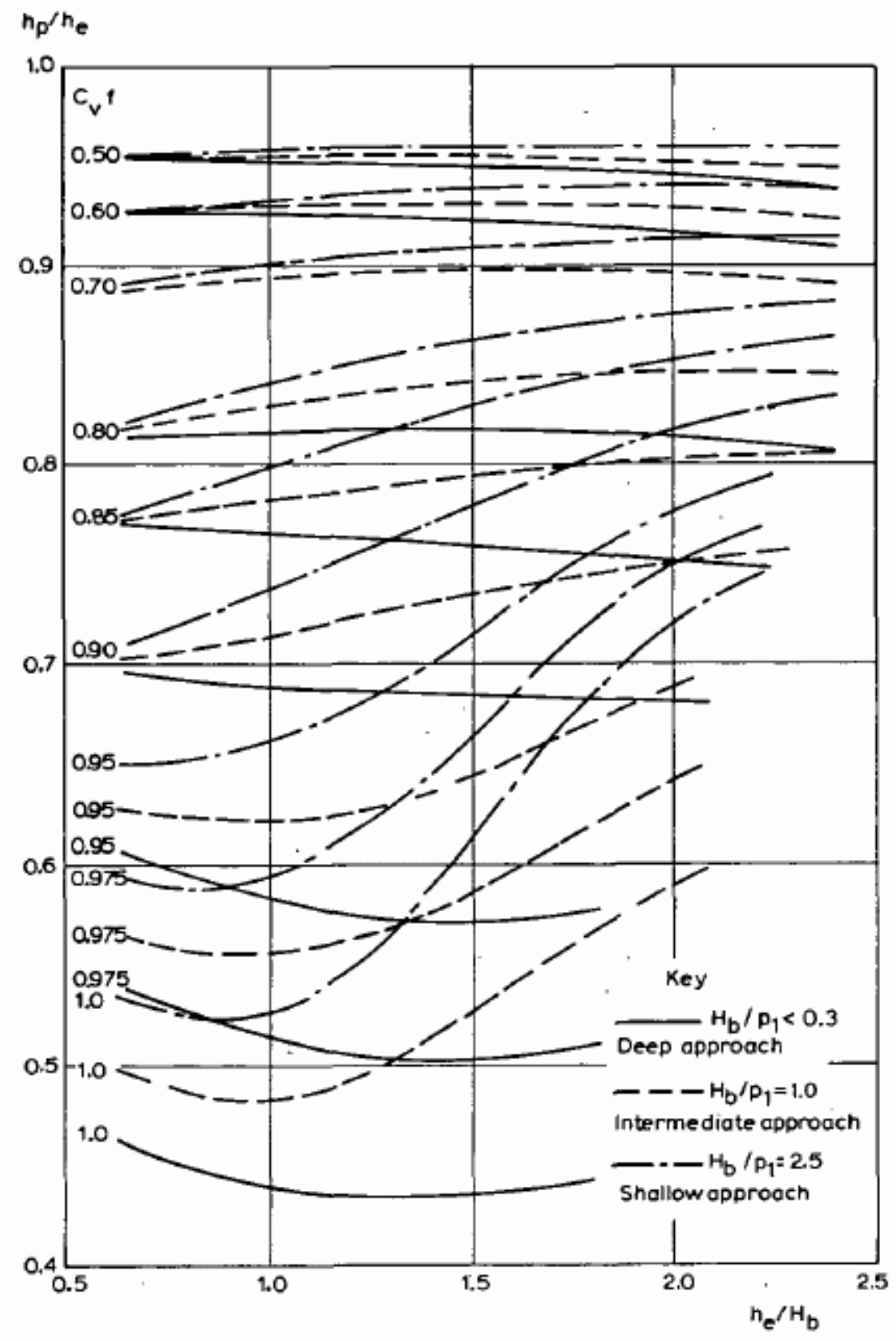


รูปที่ 11-14 ค่า Factor f ของ Triangular profile flat - V weir
ที่ใช้คำนวณการไหลกรณีที่เกิด Submerged flow

การหาค่า Factor f ตามที่กล่าวข้างต้นอาจมีปัญหาในการตรวจวัดค่า H_1 และ H_2 ($H_1 = h_1 + V^2/2g$) ดังนั้นจึงอาจใช้ค่า $C_v \cdot f$ ที่สัมพันธ์กับค่าของ h_p/h_e , h_e/H_b และ H_b/P_1 ดังแสดงในกราฟในรูปที่ 11-15 เพื่อแทนค่าในสมการโดยตรง ทั้งนี้ H_b/P_1 จะมี 3 ช่วง คือ $H_b/P_1 < 0.3$, $H_b/P_1 = 1$ และ $H_b/P_1 = 2.5$

11.2.2 ข้อกำหนดของ Triangular profile flat - V weir

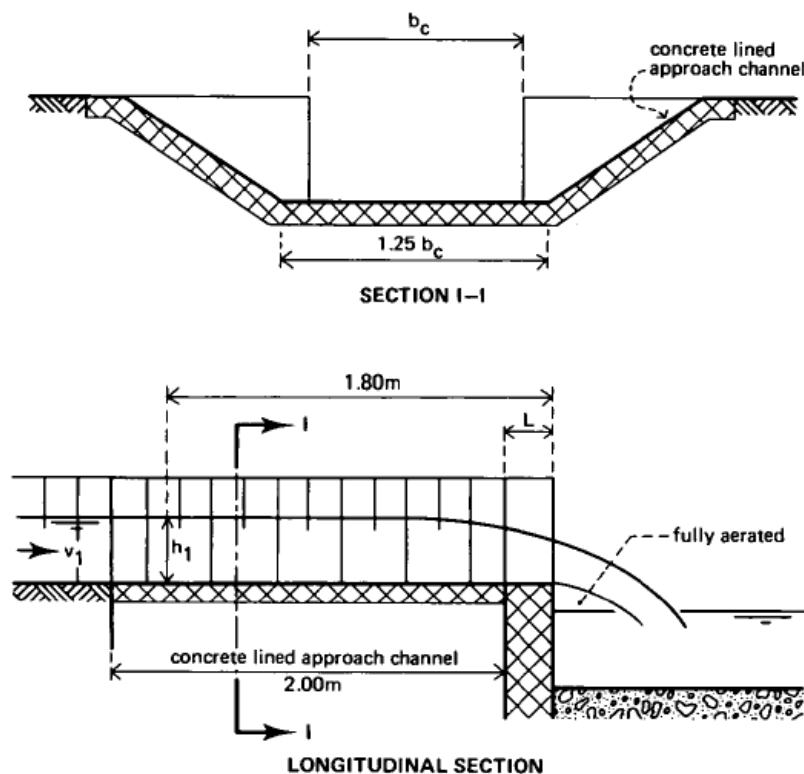
- 1) ถ้าสันฝายปิดทับด้วยแผ่นโลหะที่ทนการสึกกร่อน $h_{1min} = 0.03$ ม. แต่ถ้าเป็นคอนกรีต $h_{1min} = 0.06$ ม.
- 2) $h_1/P_1 \leq 3.0$
- 3) $P_1 \geq 0.06$ ม.
- 4) $B_c \geq 0.30$ ม. และ $B_c/H_1 \geq 2$
- 5) กรณีฝายที่มีลาด 1:2/1:2 ต้องมีค่า $H_1/P_2 \leq 1.25$ และ ฝายที่มีลาด 1:2/1:5 ต้องมีค่า $H_1/P_2 \leq 3.0$
- 6) ตำแหน่งวัดระดับน้ำด้านหน้าฝายห่างจากสันฝาย $10H_b$



รูปที่ 11-15 ค่า $C_v f$ ที่สัมพันธ์กับ h_p/h_e , h_e/H_b และ H_b/P_1 ของ Triangular profile flat-V weir
กรณีฝายที่มีลาด 1:2/1:5

11.3 Weir sill with rectangular control section

ฝ่ายชนิดนี้แสดงในรูปที่ 11-16 สร้างเป็นรูปทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีความยาวตามแนวทางน้ำไม่น้อยกว่า 2.00 ม. ปิดกั้นให้มีช่องน้ำไหลผ่านเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระดับสันเป็นระดับเดียวกับระดับท้องทางน้ำ หรือ $P_1=0$ มีตำแหน่งวัดระดับน้ำด้านหน้าฝาย (h_1) ที่ระยะอย่างน้อย 1.80 ม. วัดจากขอบด้านท้ายตัวฝาย ฝ่ายชนิดนี้เป็นรูปแบบพื้นฐานของอาคารน้ำตก (Drop) และหากติดตั้งบานระบายเพื่อควบคุมปริมาณน้ำก็จะเป็นอาคารอัดน้ำ (Check) ที่ยกบานระบายพื้นน้ำ



รูปที่ 11-16 แสดงรูปตัดขวาง และรูปตัดตามยาวของ Weir sill

11.3.1 การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Weir sill

ฝ่ายวัดน้ำชนิดนี้มีรายงานผลการศึกษาเฉพาะการไหลเป็นแบบ Free flow โดยมีอัตราส่วนระดับน้ำด้านท้ายฝายกับด้านหน้าฝาย หรือ H_2/H_1 มีค่าไม่เกิน 0.20 โดยใช้สมการปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันสั้น ที่มีหน้าตัดการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า คือ

$$Q = C_d C_v b_c \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} . h_1^{3/2}$$

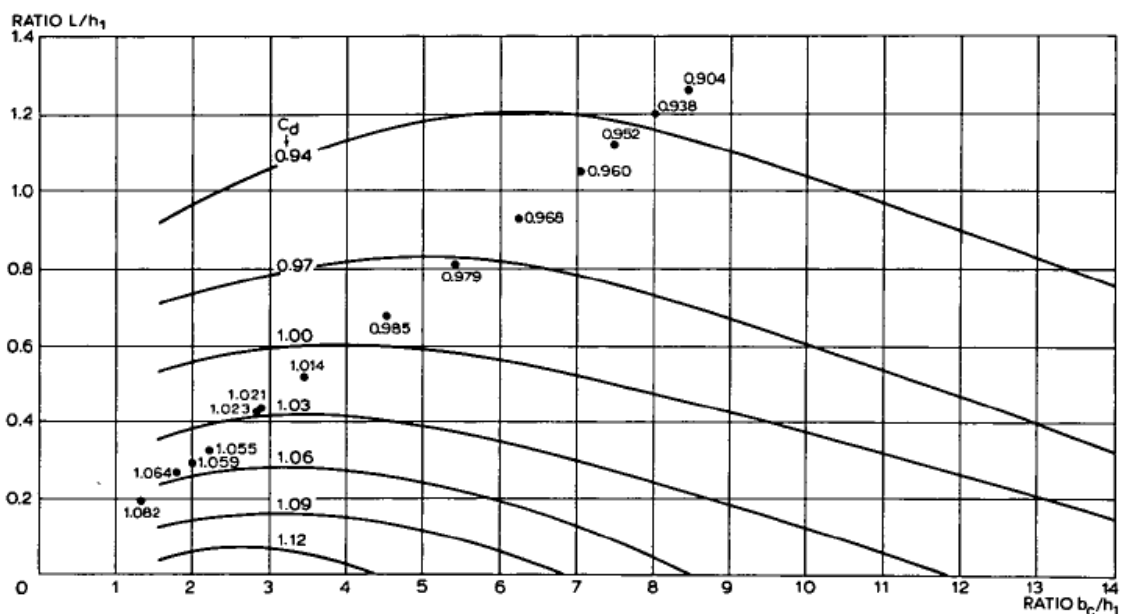
เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²

h_1 = ความลึกของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล หาได้จากกราฟในรูปที่ 11-17 โดยจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของ b_c/h_1 และ L/h_1

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจาก Head ของความเร็วในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1}$ เมื่อ $A^* = b_c h_1$ เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดเหนือสันฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย (หากไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากอาจใช้ $C_v = 1$)



รูปที่ 11-17 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของWeir sill ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของ b_c/h_1 และ L/h_1

ค่าความผิดพลาดของค่า $C_d C_v$ ขึ้นกับการดูแลบำรุงรักษาไม่ดี (ใช้งานมานาน) การก่อสร้างที่ไม่ดี ฯลฯ โดยมีค่าน้อยกว่า 5%

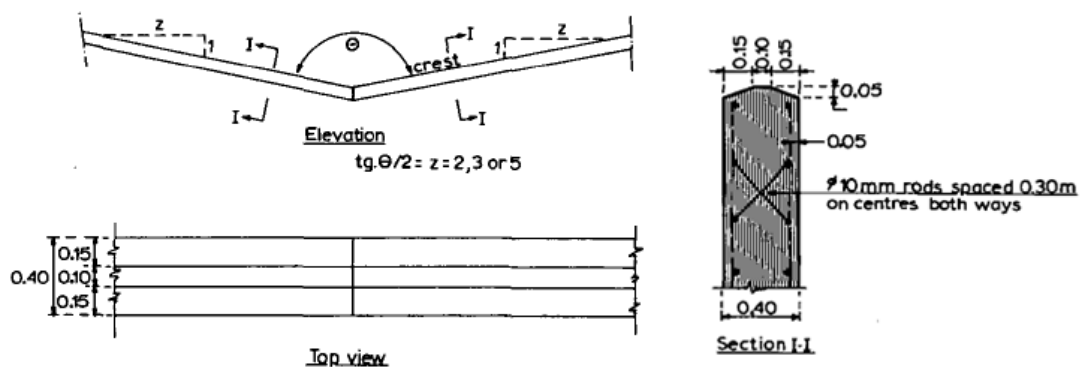
11.3.2 ข้อจำกัดของ Weir sill

- 1) $h_{1\min} = 0.09$ ม.
- 2) สันฝายเป็นแนวราบและด้านท้ายเป็นมุมฉาก
- 3) ทางน้ำเข้าฝายเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูยาวไม่น้อยกว่า 2.00 ม. และมีกันกว้าง $1.25 b_c$ เมื่อ b_c = ความกว้างของช่องน้ำไหลฝาย
- 4) ตำแหน่งการวัดระดับน้ำด้านหน้าฝาย (h_1) อยู่ที่ระยะ 1.80 ม. วัดจากท้ายฝาย โดย h_1 ไม่ควรมากกว่า 0.90 ม.
- 5) ฝายชนิดนี้มักออกแบบให้มีสถานะเป็น Free flow โดยมี $H_2/H_1 \leq 0.20$

11.4 V-notch weir sill

เป็นฝายที่พัฒนาโดย U.S. Soil Conservation Service (ปัจจุบันคือ Natural Resources Conservation Service) เพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในทางน้ำขนาดเล็ก โดยการปิดกั้นฝายเต็มหน้าตัดของทางน้ำ แต่ไม่ทำให้ระดับน้ำเกิดการเอ่อท้นย้อนกลับอันเนื่องจากการกีดขวางของตัวฝายมากนัก โดยการออกแบบสันฝายให้เป็นรูปตัว V ที่มีลาดของสันฝายของรูปแบบมาตรฐาน แนวราบ : แนวตั้ง (Z:1) เป็น 2:1 , 3:1 หรือ 5:1 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 11-18

ฝายชนิดนี้มีตำแหน่งตรวจวัดระดับน้ำ (h_1) ด้านหน้าฝายที่ระยะไม่น้อยกว่า 3.00 ม. จากสันฝาย หรือ $1.65 h_{1\max}$ ซึ่ง $h_{1\max}$ ที่ได้ทำการทดลองแค่เพียง 1.83 ม. หรือ 6 ฟุต ตัวฝายต้องตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมคือ ทางน้ำด้านเหนือน้ำของตัวฝายต้องมีแนวตรงและมีพื้นค่อนข้างราบเรียบไม่น้อยกว่า 15 ม. ระยะความสูงของสันฝายวัดจากพื้นทางน้ำด้านหน้าฝายต้องไม่น้อยกว่า 0.15 ม. และต้องป้องกันการกัดเซาะทางน้ำด้านท้ายฝาย โดยสร้างเป็นแอ่งรองรับน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กเล็กขนาดอย่างน้อย (กว้าง x ยาว x ลึก) 6.00 x 3.50 x 0.60 ม.



รูปที่ 11-18 ลักษณะรูปแบบของ V-notch weir sill

11.4.1 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน V-notch weir sill

ฝายวัดน้ำชนิดนี้มักออกแบบให้มีการไหลเป็นแบบ Free flow โดยมีอัตราส่วนระดับน้ำด้านท้ายฝายกับด้านหน้าฝาย หรือ H_2/H_1 มีค่าไม่เกิน 0.30 การคำนวณปริมาณน้ำใช้สมการพื้นฐานปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันสันที่มีหน้าตัดการไหลเป็นรูปสามเหลี่ยม

$$Q = C_d C_v \frac{16}{25} \sqrt{\frac{2}{5} g \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot h_1^{5/2}}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม³/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²

h_1 = ความลึกของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝาย, (ม.)

θ = ค่ามุมกึ่งกลางสันฝายที่มีลาด Z:1 เป็น 2:1 , 3:1 และ 5:1

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำที่ใช้ปรับแก้อัตราการไหลที่เกิดจาก

Head ของความเร็วในทางน้ำเข้าสู่ฝาย หาได้จากกราฟในรูปที่ 10-3 (บทที่ 10)

โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ของ $C_d \frac{A^*}{A_1}$ เมื่อ A^* เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด

เหนือสันฝาย และ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดทางน้ำด้านหน้าฝาย (หากไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากอาจใช้ $C_v = 1$)

เนื่องจาก U.S. Soil Conservation Service ไม่ได้นำเสนอค่า C_d และค่า C_v จากการทดลองไว้ให้ แต่ได้จัดทำตารางความสัมพันธ์ของ ระดับน้ำ-ปริมาณน้ำ (Rating table h-Q) ไว้ให้ ดังแสดงในตารางที่ 11-2 ซึ่งแสดงค่าความสัมพันธ์ของ ปริมาณน้ำ (Q) , หน้าตัดการไหลของน้ำในทางน้ำด้านหน้าฝาย (Wetted area : A_1) โดยที่ฝายปิดกั้นเต็มหน้าตัดของทางน้ำ ที่ความลึกของการไหล (h_1) ทุกๆ 1 ฟุต หรือ 0.305 ม. สำหรับฝายที่สันฝายมีลาด Z:1 เป็น 2:1 , 3:1 และ 5:1 และตารางที่ 11-3 ที่แสดงค่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหล (ลิตร/วินาที) กับความลึกการไหล จาก 0.03 – 0.20 ม.สำหรับฝายที่สันฝายมีลาด Z:1 เป็น 2:1 , 3:1 และ 5:1

11.4.2 ข้อกำหนดของ V-notch weir sill

- 1) $h_{1min} = 0.03$ ม. โดยมีตำแหน่งตรวจวัดที่ระยะ 3.00 ม.จากสันฝาย
- 2) $P_{1min} = 0.15$ ม.
- 3) ฝายปิดกั้นเต็มหน้าตัดของทางน้ำที่มีแนวตรงและเรียบไม่น้อยกว่า 15 ม.
- 4) ฝายชนิดนี้มักออกแบบให้มีสถานะเป็น Free flow โดยมี $H_2/H_1 \leq 0.30$

ตารางที่ 11-2 ค่าความสัมพันธ์ของ ปริมาณน้ำ (Q), หน้าตัดการไหลของน้ำในทางน้ำด้านหน้า
ฝาย (Wetted area : A_1) ที่ความลึกของการไหล (h_1) ทุกๆ 1 ฟุต หรือ 0.305 ม.

Table 6.1 Rating table for V-notch weir sill (adapted from data of U.S. Soil Conservation Service at Cornell University, Ithaca)

$h_1 = 0.305$ m (1 ft)		$h_1 = 0.610$ m (2 ft)		$h_1 = 0.915$ m (3 ft)		$h_1 = 1.219$ m (4 ft)		$h_1 = 1.524$ m (5 ft)		$h_1 = 1.829$ m (6 ft)	
A_1 in m^2	Q in m^3/s	A_1 in m^2	Q in m^3/s	A_1 in m^2	Q in m^3/s	A_1 in m^2	Q in m^3/s	A_1 in m^2	Q in m^3/s	A_1 in m^2	Q in m^3/s
2-to-1 V-notch weir											
0.55	0.159	1.20	1.17	2.40	3.74	4.30	7.56	6.75	13.7	9.50	25.4
0.60	0.157	1.25	1.13	2.45	3.60	4.50	7.00	7.00	12.5	9.75	21.3
0.65	0.156	1.30	1.09	2.50	3.48	4.75	6.64	7.25	11.8	10.00	19.6
0.70	0.156	1.35	1.06	2.65	3.23	5.00	6.38	7.50	11.4	10.25	19.0
0.75	0.155	1.40	1.03	3.00	2.93	5.50	6.06	7.75	11.2	10.50	18.5
0.80	0.154	1.45	1.02	3.50	2.78	6.00	5.84	8.00	10.9	11.0	17.6
0.90	0.154	1.50	1.00	4.00	2.70	6.50	5.69	8.50	10.6	12.0	16.8
1.00	0.153	1.60	0.980	4.50	2.64	7.00	5.61	9.00	10.4	13.0	16.2
1.50	0.153	1.75	0.962	5.00	2.61	7.50	5.54	9.75	10.2	14.0	15.8
2.00	0.152	2.00	0.942	6.00	2.57	8.00	5.46	10.50	9.96	17.0	15.1
3.00	0.152	2.50	0.927	7.50	2.55	10.0	5.30	12.00	9.74	20.0	14.8
4.00	0.152	5.00	0.898	10.00	2.52	13.0	5.24	15.00	9.35	25.0	14.6
5.00	0.151	7.50	0.895	15.00	2.50	16.0	5.21	20.0	9.16	30.0	14.4
6.00	0.151	10.0	0.895	20.00	2.49	23.0	5.18	30.0	9.01	40.0	14.3
7.00	0.151	14.0	0.895	25.00	2.49	32.0	5.18	40.0	9.00	60.0	14.2
3-to-1 V-notch weir											
0.75	0.237	1.85	1.62	3.75	5.24	6.50	12.0	10.5	19.2	15.0	30.6
0.80	0.234	2.00	1.56	4.00	4.83	6.75	10.8	11.0	18.0	15.5	28.8
0.90	0.232	2.50	1.44	4.50	4.43	7.00	10.3	12.0	16.8	16.0	27.6
1.00	0.230	2.75	1.42	5.00	4.25	7.50	9.69	13.0	16.0	16.5	27.0
1.20	0.228	3.00	1.40	5.50	4.14	8.00	9.31	14.0	15.5	17.0	26.5
1.50	0.226	3.50	1.38	6.00	4.06	8.50	9.02	15.0	15.1	18.0	25.9
2.00	0.225	4.00	1.37	6.50	4.02	9.00	8.81	16.0	14.9	19.0	24.9
3.00	0.224	4.50	1.36	7.00	3.98	9.50	8.67	17.0	14.7	20.0	24.4
5.00	0.224	5.00	1.35	8.00	3.91	10.0	8.55	18.0	14.5	22.5	23.6
7.50	0.224	5.50	1.35	9.00	3.88	11.0	8.37	20.0	14.4	25.0	23.1
		6.00	1.34	10.0	3.85	12.0	8.25	22.5	14.2	27.5	22.8
		7.00	1.34	12.5	3.79	15.0	8.03	25.0	14.0	30.0	22.5
		8.00	1.33	15.0	3.77	20.0	7.90	30.0	13.9	40.0	22.0
		10.00	1.33	20.0	3.75	30.0	7.80	40.0	13.8	50.0	21.8
		14.00	1.33	25.0	3.74	45.0	7.79	55.0	13.7	60.0	21.7
5-to-1 V-notch weir											
1.50	0.386	2.80	2.77	5.60	8.76	11.0	16.4	16.0	30.0	22.0	49.4
2.00	0.382	3.00	2.67	5.75	8.49	11.25	16.1	17.0	27.8	23.0	46.3
3.00	0.378	3.25	2.58	6.00	8.17	11.5	15.8	18.5	26.9	25.0	43.4
6.00	0.376	3.50	2.52	6.25	7.87	12.0	15.5	20.0	26.0	27.5	41.1
10.00	0.376	3.75	2.49	6.50	7.70	12.5	15.2	22.5	25.0	30.0	39.8
		4.00	2.45	7.00	7.42	13.0	15.0	25.0	24.5	32.5	39.1
		4.50	2.42	7.50	7.26	14.0	14.6	27.5	24.1	35.0	38.5
		5.00	2.39	8.00	7.10	15.0	14.4	30.0	23.8	37.5	38.0
		6.00	2.35	9.00	6.99	16.0	14.2	32.5	23.7	40.0	37.6
		7.00	2.33	10.0	6.84	17.5	14.0	35.0	23.6	45.0	37.1
		8.50	2.32	12.0	6.67	20.0	13.8	40.0	23.4	50.0	36.6
		10.00	2.30	15.0	6.56	25.0	13.5	50.0	23.3	55.0	36.4
		15.00	2.23	20.0	6.48	30.0	13.4	60.0	23.2	60.0	36.2
		20.00	2.28	30.0	6.42	40.0	13.3	75.0	23.0	75.0	36.0
		25.00	2.28	45.0	6.40	65.0	13.2	90.0	22.8	90.0	36.0

ตารางที่ 11-3 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหล (ลิตร/วินาที) กับความลึกการไหล

Table 6.2 Discharge values for heads up to 0.20 m of V-notch weirs $\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$

Head (metres)	Discharge in litres per second for V-notch weirs		
	2-to-1 (a)	3-to-1 (b)	5-to-1 (c)
0.03	0.5	0.7	1.0
0.04	0.9	1.3	2.0
0.05	1.7	2.3	3.7
0.06	2.6	3.7	6.0
0.07	3.7	5.3	8.6
0.08	5.2	7.3	12.1
0.09	6.9	9.9	16.1
0.10	8.9	12.9	21.1
0.11	11.2	16.4	26.8
0.12	13.9	20.5	33
0.13	17.0	25.3	41
0.14	21.8	31	52
0.15	24.5	37	59
0.16	28.3	43	68
0.17	34	51	80
0.18	39	59	93
0.19	45	67	107
0.20	51	77	123

NOTE:

Applicable to stations with cross-sectional areas at head measurement station equal to or greater than

(a) = 0.55 m^2 for 0.30 m head

(b) = 0.75 m^2 for 0.30 m head

(c) = 1.40 m^2 for 0.30 m head

บทที่ 12

การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบาย (ฝ่ายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ)

12.1 ฝ่ายเคลื่อนที่ได้ (Movable weir)

เมื่อพิจารณานิยามของอาคารประเภทฝายสันแข็ง (Fixed crest weir) ที่สร้างในลำน้ำ เพื่อปิดกั้นการไหลของน้ำแล้วฝายดังกล่าวทำหน้าที่กั้นน้ำส่งผลให้เกิดการเพิ่มระดับน้ำสูงขึ้น ต่อมามีการสร้างอาคารชลศาสตร์ในลำน้ำเพื่อให้ทำหน้าที่อื่นๆ อีกนอกเหนือจากการกั้นน้ำดังกล่าว ได้มีการออกแบบและก่อสร้างอาคารชลศาสตร์ที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ มีการนำอุปกรณ์แบบใหม่ๆ มาใช้เพื่อการควบคุมหรือเสริมประสิทธิภาพการทำงาน เช่น บานระบายชนิดต่างๆ เป็นต้น ซึ่งในภาวะปกติอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้จะทำหน้าที่ปิดกั้นกั้นน้ำเหมือนกับการทำงานของฝายสันแข็ง และเมื่อใช้งานเพื่อให้ทำหน้าที่อย่างอื่นก็จะทำการควบคุมปรับขนาดหรือการเปิดปิด จึงเรียกอาคารชลศาสตร์ลักษณะดังกล่าวว่า ฝ่ายเคลื่อนที่ได้ (Movable weir)

ตัวอย่างรูปแบบลักษณะของ Movable weir บางแบบ ที่ควบคุมด้วยบานระบายแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 12-1 ถึง รูปที่ 12-9

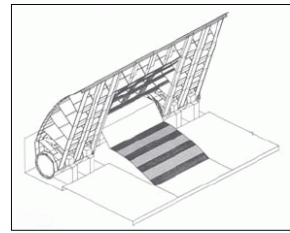
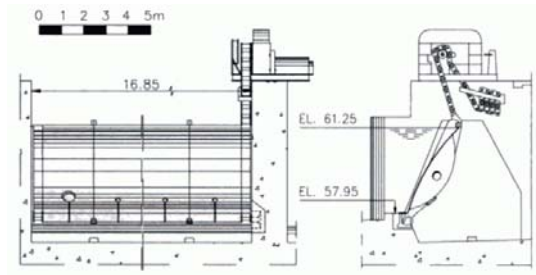


Osaka, Japan, 1970



Hagestein, The Netherlands (~1960)

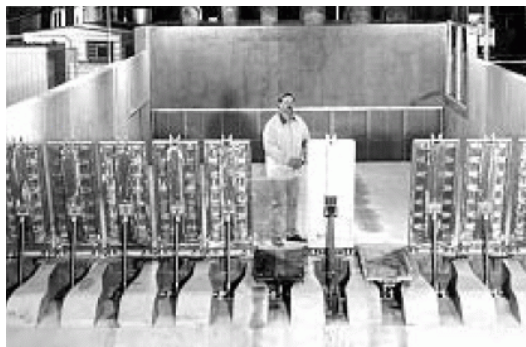
รูปที่ 12-1 Visor weirs ควบคุมด้วย Arch หรือ Visor gates



Desha County, Arkansas, USA, about 2004



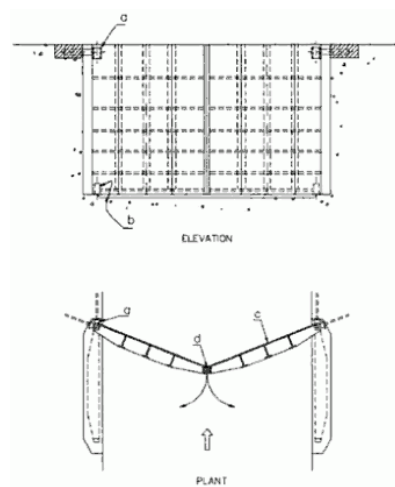
ฝายพับ แบบ Flap gates



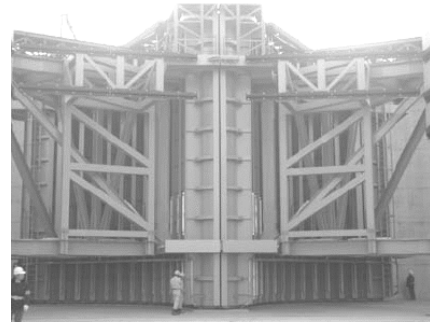
Olmsted, Illinois, USA, Estimated 2009.

ฝายพับ แบบ Wicket Gates

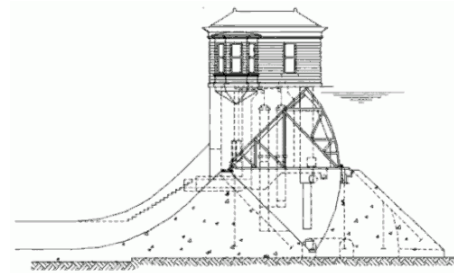
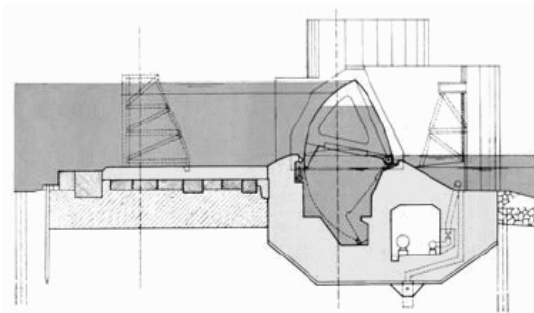
รูปที่ 12-2 ฝายพับ



รูปที่ 12-3 Miter gate



Sector gates - Vertical axis

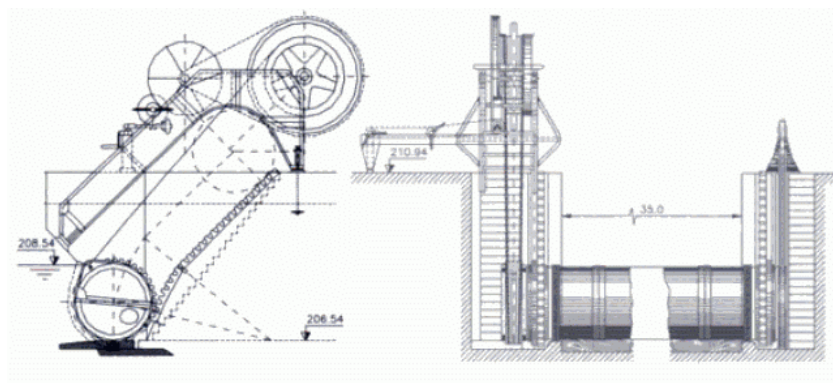


Sector gates - Horizontal axis

รูปที่ 12-4 ควบคุมด้วย Sector gates



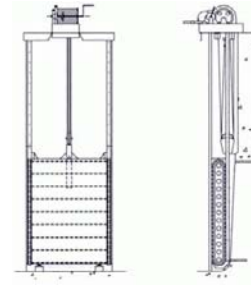
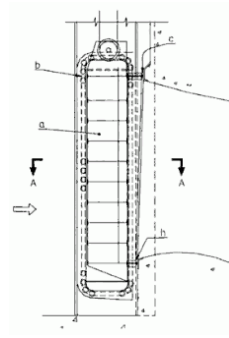
รูปที่ 12-5 ควบคุมด้วยบานสวิง (Swing gates)



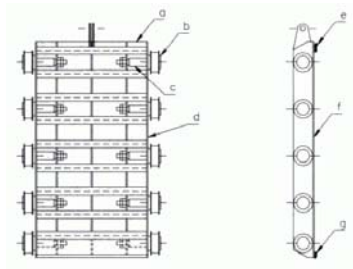
รูปที่ 12-6 ควบคุมด้วย Roller gate



Caterpillar gate ขนาดใหญ่



Caterpillar gate ขนาดเล็ก



Fixed-wheel gate



Slide gate



เขื่อนระบายน้ำที่ควบคุมด้วย Long span leaf wheel gate

รูปที่ 12-7 ควบคุมด้วยบานตรง ชนิดต่างๆ



รูปที่ 12-8 ควบคุมด้วยบานโค้ง (Radial หรือ Tainter gate)



รูปที่ 12-9 ฝายยาง (Rubber weir หรือ Rubber dam) ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 8.9

จะเห็นได้ว่าประเภทของบานระบายนั้นแบ่งตามลักษณะเฉพาะของบานระบายแต่ละแบบได้เป็น Visor gate, Flap gate, Cylinder gate, Slide gate, Caterpillar gate, Miter gate, Roller gate, Segment gate, Sector gate, Drum gate, Bear-trap gate, Fixed-wheel gate, Bear-trap gate ฯลฯ รวมทั้งการควบคุมด้วย ฝายยาง (Rubber weir) และยังมีไม้อัดน้ำหรือ Stop log (ได้อธิบายในบทที่ 8) อีกด้วย

เมื่อประมวลบานระบายแต่ละประเภทตามที่กล่าวข้างต้นแล้ว อาจสรุปได้ดังนี้

1) แบ่งตามรูปแบบของบานระบาย เป็น 2 กลุ่ม คือ

1.1) บานระบายชนิดบานตรง

1.2) บานระบายชนิดบานที่เป็นส่วนโค้งของวงกลม หรือบานโค้ง (รวมทั้งบานระบายที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งมีหน้าตัดของบานเป็นวงกลม แต่ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นบานที่ปะทะกับน้ำเป็นเพียงส่วนโค้งวงกลมบางส่วน)

2) แบ่งตามหน้าที่หลักของบานระบาย เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1) บานระบายที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่านออกไป ลักษณะการควบคุมมักเปิดบานเพียงบางส่วน

2.2) บานระบายที่ทำหน้าที่ควบคุมระดับน้ำ โดยปิดบานเมื่อไม่ต้องการให้น้ำไหลผ่านออกไปซึ่งจะทำให้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำถูกกักให้มีระดับสูงขึ้น และเปิดให้น้ำไหลผ่านออกไปเพื่อลดระดับน้ำด้านเหนือน้ำลงให้เท่าด้านท้ายน้ำ ลักษณะการควบคุมจะเปิดหรือปิดหมดทั้งบาน

3) แบ่งตามลักษณะการควบคุมปิดเปิดบาน

3.1) เปิดปิดยกบานในแนวตั้ง โดยน้ำผ่านบานระบายออกไปอาจเป็นแบบลอคได้ บาน หรือไหลล้นข้ามบานออกไป (บานระบายที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมักเปิดปิดแบบนี้)

3.2) เปิดปิดบานตามแนวราบ (มีลักษณะเดียวกับการเปิดปิดบานประตูรั้วที่อาจเป็นแบบบานเลื่อนหรือบานแบบขยับ) เป็นบานระบายที่ทำหน้าที่ควบคุมระดับน้ำบางแบบ

การนำเสนอการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายในบทนี้ จะนำเสนอในส่วนของ บานระบายที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำของ ฝ่ายระบายน้ำ และประตูระบายน้ำ ซึ่งได้แก่บานโค้ง (Radial หรือ Tainter gate) และบานตรง (Vertical lift gate หรือ Sluice gate) ส่วนบานระบายที่ใช้กับอาคารประเภทท่อจะนำเสนอในบทที่ 13 เรื่องการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ

12.2 ฝ่ายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ

การกำหนดให้ฝ่ายระบายน้ำ หรือประตูระบายน้ำเป็นอาคารชลศาสตร์หลักที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำที่หัวงานนั้น เพราะต้องการให้สามารถระบายน้ำออกไปได้ปริมาณมากๆ รวมทั้งสามารถพร่องน้ำล้นหน้าได้ เพราะธรรมชาติของบานระบายกำหนดให้มีระดับต่ำๆ ซึ่งต่างจากฝายหรือทางระบายน้ำล้นที่ไม่มีบานระบายเป็นตัวควบคุมซึ่งมีระดับสันฝายอยู่สูงเท่ากับระดับน้ำเก็บกักในขณะที่มี Head การไหลไม่สูงมากนัก หากต้องการระบายน้ำปริมาณมากๆ สันฝายต้องยาว ส่วนการพร่องน้ำนั้นถ้าไม่มีท่อดึงน้ำ ก็อาจทำได้โดยใช้กาลักน้ำ (Siphon) ซึ่งไม่สะดวก

ฝ่ายระบายน้ำและประตูระบายน้ำนั้นจะแตกต่างกันที่โครงสร้างลักษณะรูปแบบ แต่คุณสมบัติทางชลศาสตร์และการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายของอาคารดังกล่าวใช้หลักการไหลของน้ำผ่าน Orifice ขนาดใหญ่ ที่เป็นช่องเปิดบานระบายเหมือนกัน ซึ่งอาจเปรียบเทียบองค์ประกอบของอาคารประเภทฝ่ายระบายน้ำและประตูระบายน้ำ ได้ดังนี้

12.2.1 ประตูระบายน้ำ

ประตูระบาย หรือ ปตร. เป็นอาคารชลศาสตร์ที่ทำหน้าที่ 2 ประการคือ ปิดกั้นเพื่อเก็บกักเพิ่มปริมาณน้ำหรือระดับน้ำในทางน้ำ และทำหน้าที่ควบคุมการระบายน้ำออกจากทางน้ำ ส่วนใหญ่จะพบอาคารประตูระบายใน 3 รูปแบบ คือ

1) โครงการประตูละบายน้ำ ที่มี ประตู เป็นอาคารหลักปิดกั้นในลำน้ำที่ไม่กว้างนัก เช่น ห้วย คลองชักน้ำ เป็นต้น โดยจะทำหน้าที่ปิดกั้นเพื่อเก็บกักเพิ่มระดับน้ำในลำน้ำ และระบายน้ำในช่วงฤดูน้ำหลากไม่ให้เกิดการเอ่อท่วมพื้นที่สองฝั่งลำน้ำ ทั้งนี้รวมทั้ง ประตู ที่ทำหน้าที่ควบคุมป้องกันน้ำทะเลหนุนไหลย้อนเข้ามาในทางน้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้นด้วย

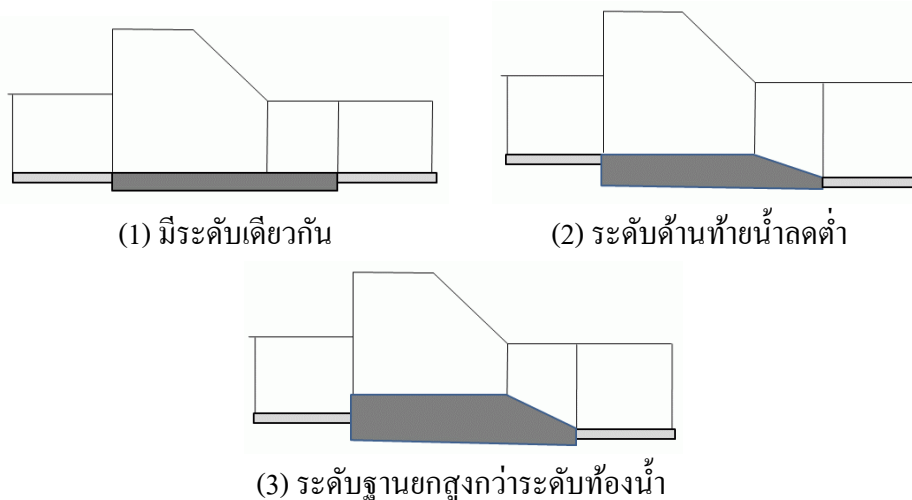
2) เป็นอาคารประกอบของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ เพื่อทำหน้าที่เก็บกัก และระบายควบคุมปริมาณน้ำของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ

3) เป็นอาคารควบคุมปริมาณน้ำในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำที่มีขนาดใหญ่ (ถ้าขนาดเล็กจะก่อสร้างเป็นท่อระบายน้ำ) ได้แก่ ประตู.ปากคลองส่งน้ำสายใหญ่, ประตู.ปากคลองซอย, ประตู.ท่อน้ำกลางคลอง และในกรณีทำหน้าที่ป้องกันน้ำจากด้านนอก เช่น จากลำน้ำธรรมชาติไม่ให้ไหลเข้ามาในระบบส่งน้ำหรือระบบระบายน้ำ ได้แก่ ประตู.ปลายคลองส่งน้ำ , ประตู.ปลายคลองระบายน้ำ เป็นต้น

ลักษณะเด่นของประตูละบายคือ ฐานที่เป็นตัวรองรับบานระบายจะมีลักษณะเป็นพื้นคอนกรีตราบที่มีระดับที่เท่ากันระดับเดียว อาจแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะย่อย (แสดงในรูปที่ 12-10) คือ

- (1) ฐานระดับเดียวกับระดับท้องน้ำทั้งด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ
- (2) ฐานมีระดับเท่าระดับท้องน้ำด้านเหนือน้ำส่วนด้านท้ายน้ำลดระดับต่ำกว่าด้านเหนือน้ำ
- (3) ฐานยกสูงกว่าระดับท้องน้ำด้านเหนือน้ำ (ลักษณะของฝายสันกว้าง)

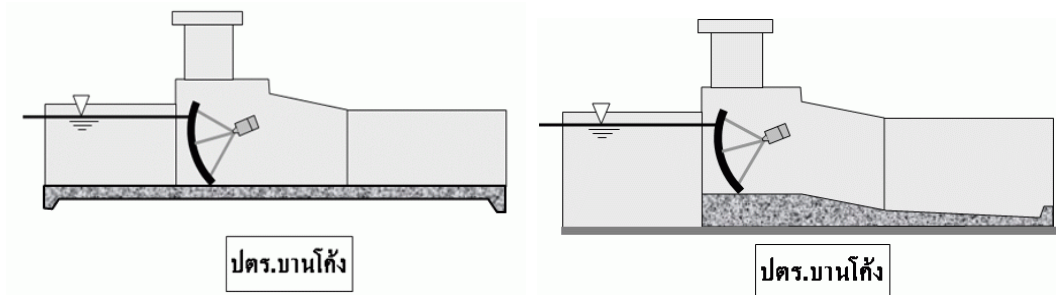
กรณี (1) ได้แก่ ประตู. ของระบบส่งน้ำ กรณี (2) และ (3) ได้แก่ ประตู.ที่ห้วงงานเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะมีกำแพงข้างและตอม่อกลางเพื่อติดตั้งบานระบาย ที่มีทั้งบานตรง และบานโค้ง กับเพื่อรองรับสะพาน



รูปที่ 12-10 รูปตัดแสดงฐานรองรับบานระบายของประตูละบาย 3 ลักษณะ

ประเภทของประตูระบายน้ำ แบ่งตามชนิดของบานระบายที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำ เฉพาะที่นิยมสร้างในประเทศไทย ได้แก่

1) ประตูระบายน้ำควบคุมด้วยบานโค้ง (Radial or Tainter gate)

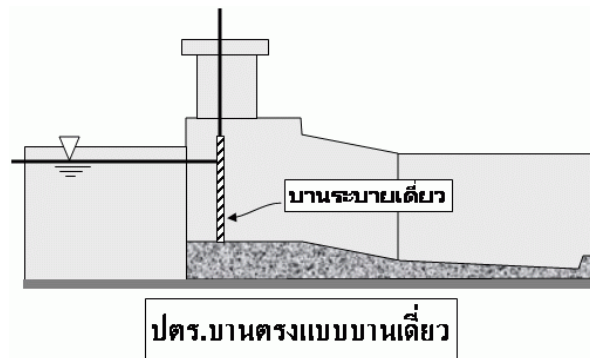


ฐานรองรับบาน รูปสามเหลี่ยมอยู่ที่ระดับท้องน้ำ รูปขาบานมีระดับสูงจากท้องน้ำ (เสมือนเป็นฝายสันกว้าง)

รูปที่ 12-11 รูปตัดประตูระบายน้ำควบคุมด้วยบานโค้ง

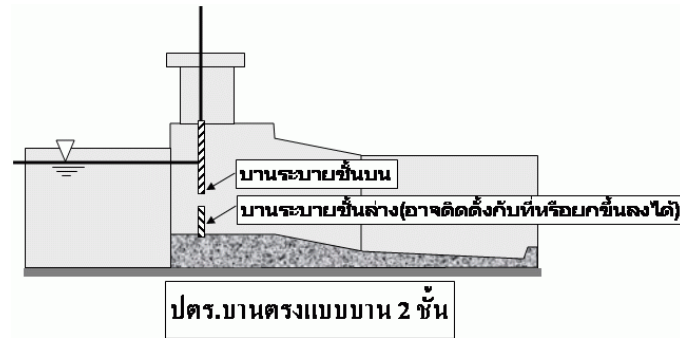
2) ประตูระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate) แบ่งย่อยเป็นบานระบายขึ้นส่วนเดียวหรือบานเดี่ยว และบานระบายหลายชั้นส่วนหรือบานสองชั้น

(2.1) บานระบายเดี่ยว ฐานรองรับบานอาจอยู่ที่ระดับท้องน้ำหรือยกระดับสูงก็ได้



รูปที่ 12-12 รูปตัดประตูระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรงแบบบานเดี่ยว ที่ฐานรองรับบานยกระดับสูง (ระดับฐานรองรับบานอาจออกแบบให้อยู่ที่ระดับท้องน้ำหรือยกระดับสูงขึ้นก็ได้)

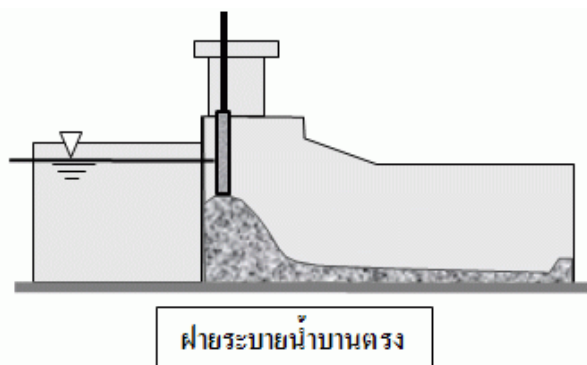
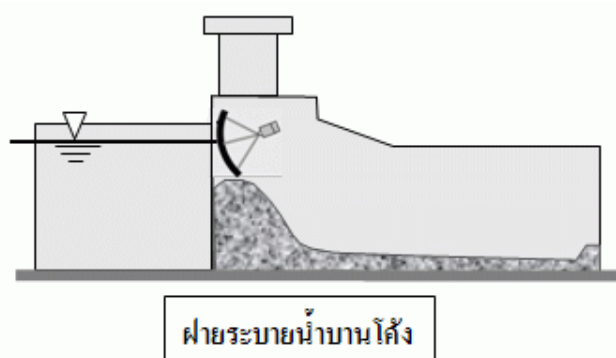
(2.2) บานระบาย 2 ชั้น มักเป็นประตูระบายน้ำที่สร้างในยุคแรก ๆ จะมี 2 ส่วน คือส่วนบนเป็นบานระบาย และส่วนล่างที่อาจเป็นบานที่ยกได้ หรือเป็นเพียงธรณิบานที่ยกสูงก็ได้



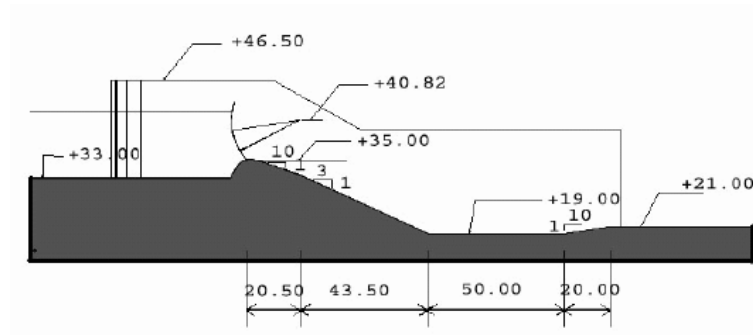
รูปที่ 12-13 รูปตัดประตูระบายควบคุมด้วยบานตรงแบบบานสองชั้น

12.2.2 ฝายระบายน้ำ (Gated Spillways)

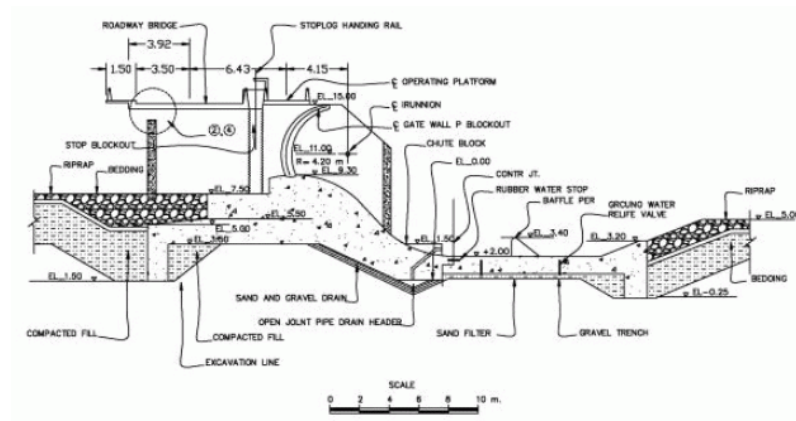
เป็นอาคารประเภทฝายสันมน (Ogee weir) แบบต่างๆ ที่ติดตั้งบานระบายเพื่อควบคุมปริมาณการระบายน้ำ (ในขณะที่ ปตร. เป็นฐานราบ ๆ หรือลักษณะฝายสันกว้าง) โดยธรณีบานระบายจะตั้งที่ส่วนยอดสันฝายหรือจุดใกล้เคียงที่เหมาะสมก็ได้ เป็นอาคารที่มักสร้างไว้ควบคุมปริมาณน้ำของอ่างเก็บน้ำหรือเขื่อนทดน้ำ มีกำแพงข้างและตอม่อกลางเพื่อติดตั้งบานระบาย และรองรับสะพาน บานระบายมีทั้งบานตรงแบบบานเดี่ยว และบานโค้ง (ส่วนใหญ่มักเป็นบานโค้ง)



รูปที่ 12-14 ตัวอย่างรูปตัดฝายระบายน้ำติดตั้งบานโค้งและบานตรง



รูปตัดอาคารควบคุมปริมาณน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์



รูปตัดอาคารควบคุมปริมาณน้ำเขื่อนปัตตานี

รูปที่ 12-15 ตัวอย่างเขื่อนที่มีโครงสร้างอาคารระบายน้ำในลักษณะแบบฝายระบายน้ำ

12.2.3 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายของประตูระบายน้ำและฝายระบายน้ำ

รูปแบบการไหลของน้ำผ่านบานระบาย อาจแบ่งย่อยได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) การไหลลอดบานระบายโดยเปิดบานระบายบางส่วน
- 2) การยกบานระบายพ้นน้ำ
- 3) การไหลข้ามบานระบาย

นอกจากนี้แต่ละรูปแบบการไหลยังแบ่งย่อยเป็น 2 ลักษณะการไหล คือ

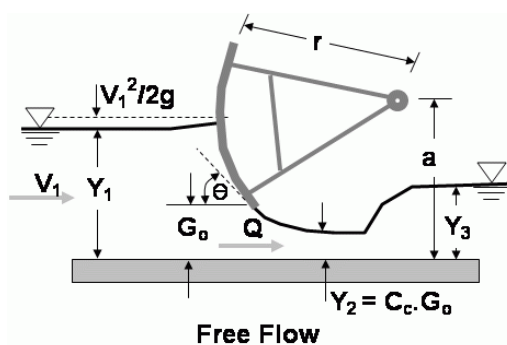
- 1) การไหลแบบ Free flow
- 2) การไหลแบบ Submerged flow

12.3 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำ

12.3.1 บานระบายชนิดบานโค้ง (Radial or Tainter gate)

ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายชนิดบานโค้งนั้น ใช้หลักการวิเคราะห์การไหลผ่าน Orifice ขนาดใหญ่เช่นเดียวกับกรณีบานตรงที่กล่าวแล้วข้างต้น แต่จะมีความแตกต่างกันที่บานตรงจะตั้งฉากกับทิศทางการไหล ตำแหน่งช่องเปิดของบานตรง ขอบล่างของบานกับธรณีรองรับบานเป็นแนวตำแหน่งหน้าตัดแนวตั้งแนวเดียวกันตลอด แต่กรณีบานโค้งเมื่อยกบานขึ้น ส่วนขอบล่างของบานจะเคลื่อนตัวเป็นส่วนโค้งของวงกลมไม่อยู่ในแนวตั้งแนวเดียวกับจุดธรณีรองรับบาน แต่จะทำมุมกันเป็นมุม θ หรืออาจกล่าวได้ว่าช่องเปิดของบานโค้งนั้นจะเอียงเป็นมุม θ

12.3.1.1 การไหลลอดผ่านบานโค้งแบบ Free Flow



r หรือ R เป็นรัศมีมีความโค้งของบาน

รูปที่ 12-16 ลักษณะการไหลลอดผ่านบานโค้งแบบ Free Flow

$$Q = C_d L G_o \sqrt{2gY_1}$$

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \left(\frac{G_o}{Y_1} \right)}}$$

θ ค่านุมเมื่อเปิดบานระบาย ระหว่างเส้นสัมผัสของส่วนโค้ง (Tangent) ของบานระบาย ที่ตำแหน่งธรณีสันหรือขอบล่างของบาน กับ (ก) ฐานที่รองรับธรณีสันในกรณีของ ประตู . และ (ข) เส้นสัมผัสของส่วนโค้งของสันฝายตรงจุดที่เป็นฐานรองรับธรณีสัน

❖ ค่า C_c คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_c = 1 - 0.75 \left(\frac{\theta}{90} \right) + 0.36 \left(\frac{\theta}{90} \right)^2 \quad (5)$$

C_c จะมีความผิดพลาดไม่เกิน 5% ถ้า $\theta/90 \leq 1$

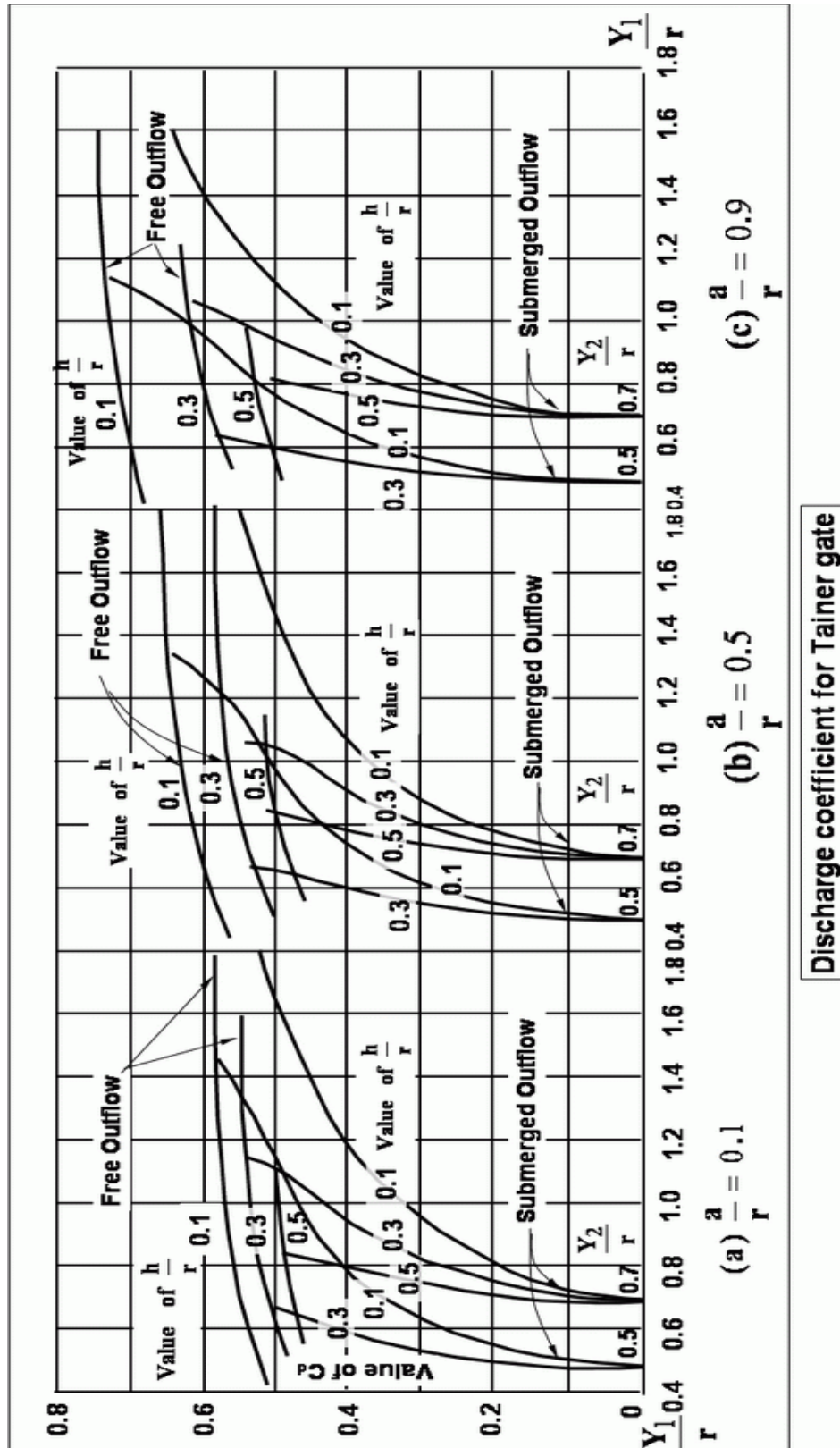
❖ ค่า C_d

A. Toch (1955) ได้ศึกษาพบว่าค่า C_d จะแปรผันไปตามค่าของ Y_1 , G_o , a และ r (r หรือ R เป็นรัศมีความโค้งของบาน) โดยอาจใช้ค่า C_d ตามกราฟในรูปที่ 12-17

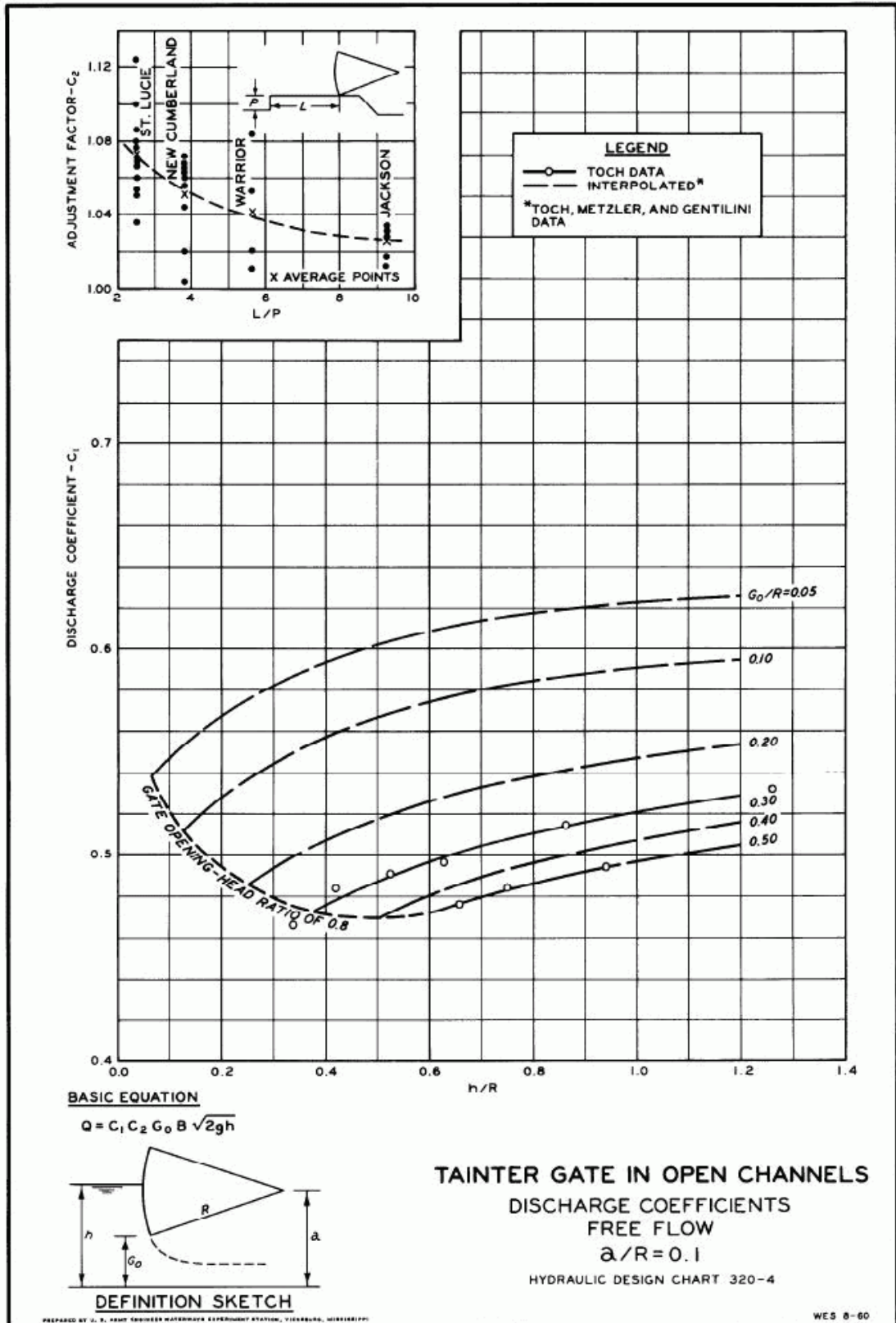
USBR ได้ปรับปรุงสูตรการคำนวณ การไหลตลอดผ่านบานโค้งแบบ Free Flow ให้ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นเป็น

$$Q = C_1 C_2 G_o L \sqrt{2gh}$$

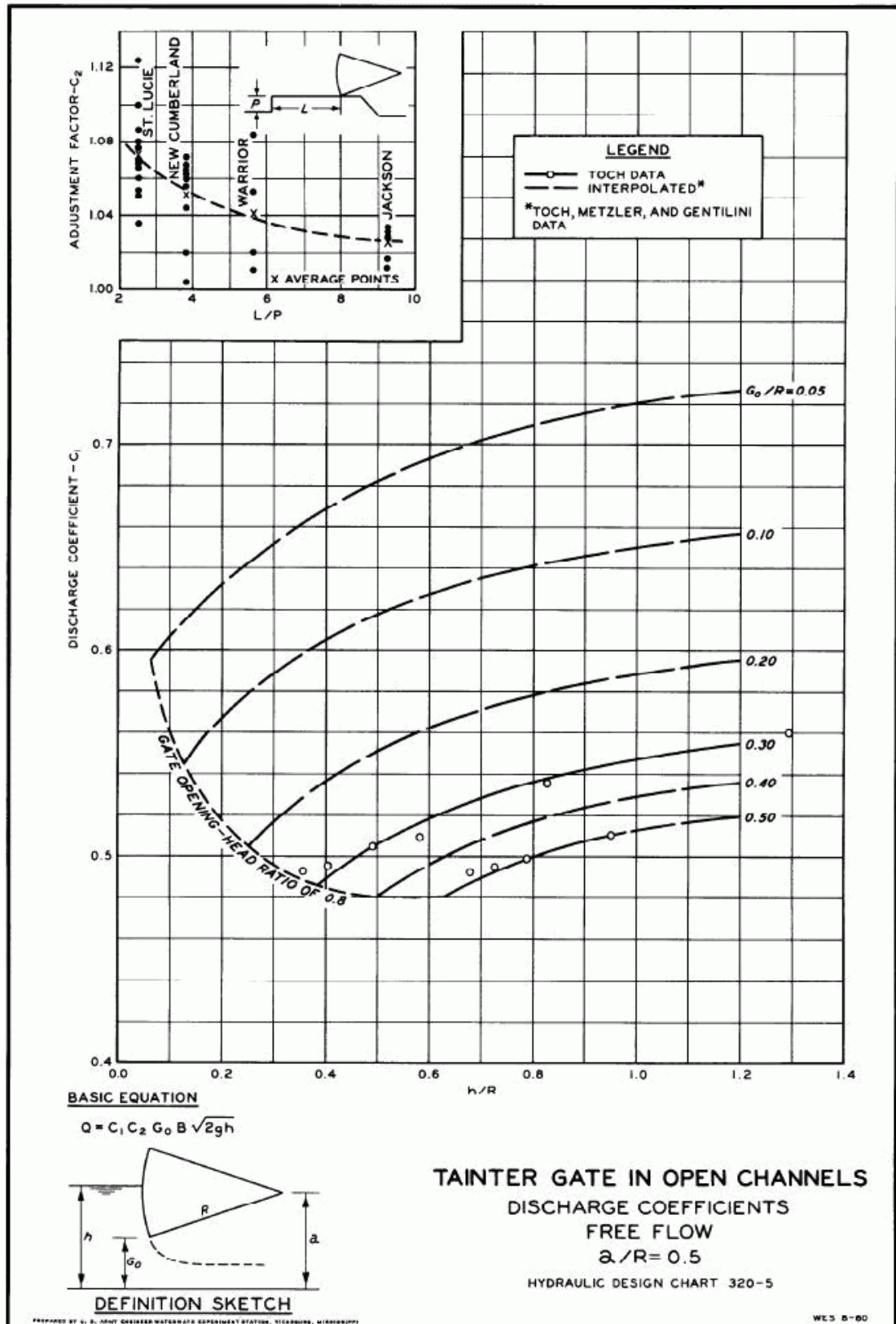
โดยค่า C_1 และ C_2 หาได้จากกราฟในรูปที่ 12-18 รูปที่ 12-19 และรูปที่ 12-20 เมื่อ a/R เท่ากับ 0.1, 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ โดยที่ C_1 จะสัมพันธ์กับค่า h/R , G_o/R และ a/R ส่วน C_2 จะสัมพันธ์กับค่า L/P และ a/R



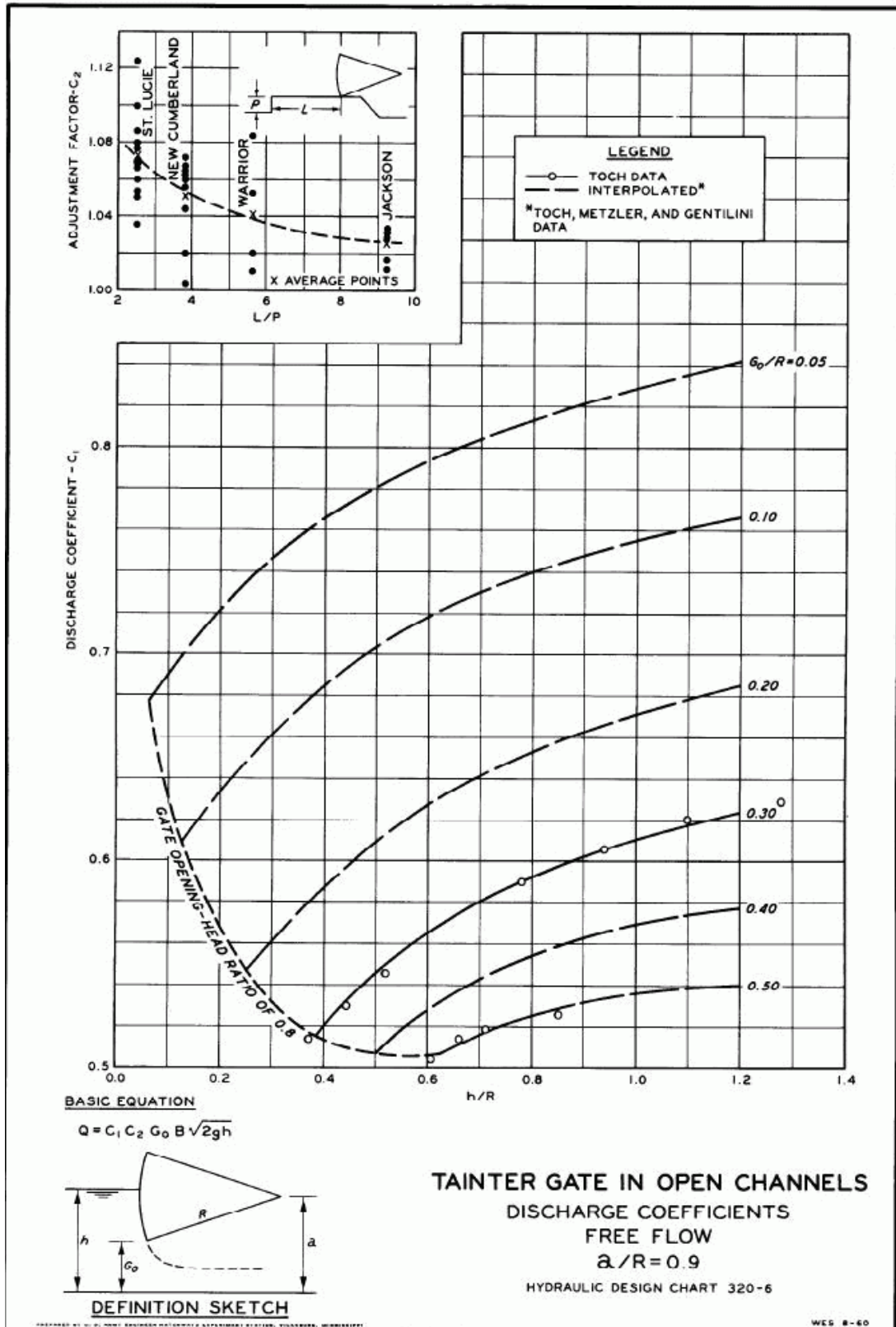
รูปที่ 12-17 กราฟหาค่า C_d ที่จะแปรผันไปตามค่าของ Y_1 , G_0 , a และ r
ทั้งกรณี Free flow และ Submerged flow



รูปที่ 12-18 กราฟหาค่า C_1 และ C_2 การไหลแบบ Free flow เมื่อ $a/R = 0.1$



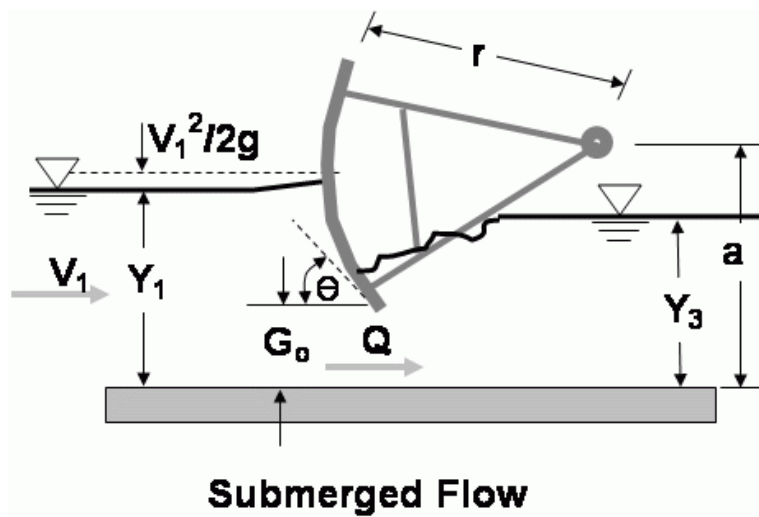
รูปที่ 12-19 กราฟหาค่า C_1 และ C_2 การไหลแบบ Free flow เมื่อ $a/R = 0.5$



รูปที่ 12-20 กราฟหาค่า C_1 และ C_2 การไหลแบบ Free flow เมื่อ $a/R = 0.9$

12.3.1.2 การไหลลอดผ่านบานโค้งแบบ Submerged Flow

เป็นการไหลที่น้ำด้านท้ายท่วมขอบล่างหรือธรณิบานระบาย หลักการวิเคราะห์จะเหมือนกรณีการไหลของ Orifice ขนาดใหญ่ แบบ Submerged Flow



Y_3 หรือ h_s เป็นระดับน้ำด้านท้ายน้ำ

รูปที่ 12-21 ลักษณะการไหลลอดผ่านบานโค้งแบบ Submerged Flow

❖ สมการการคำนวณการไหลผ่านบานระบายโค้งกรณี Submerged flow ของ USACE

จากสมการ $Q = CL G_o \sqrt{2gh}$

$$Q \left(\frac{G_o}{h_s} \right) = CL G_o \left(\frac{G_o}{h_s} \right) \sqrt{2gh}$$

$$Q = C_S L G_o \left(\frac{G_o}{h_s} \right) \sqrt{2gh}$$

$$Q = C_S L h_s \sqrt{2gh}$$

$$C_S = C \left(\frac{G_o}{h_s} \right)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านต่อบานระบาย 1 ช่อง, (ม.³/วินาที)

L = ความกว้างของบานระบายน้ำ 1 ช่อง, (ม.)

h_s หรือ Y_3 = ระดับน้ำท้ายประตูวัดจากธรณิบานระบาย หรือ, (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²

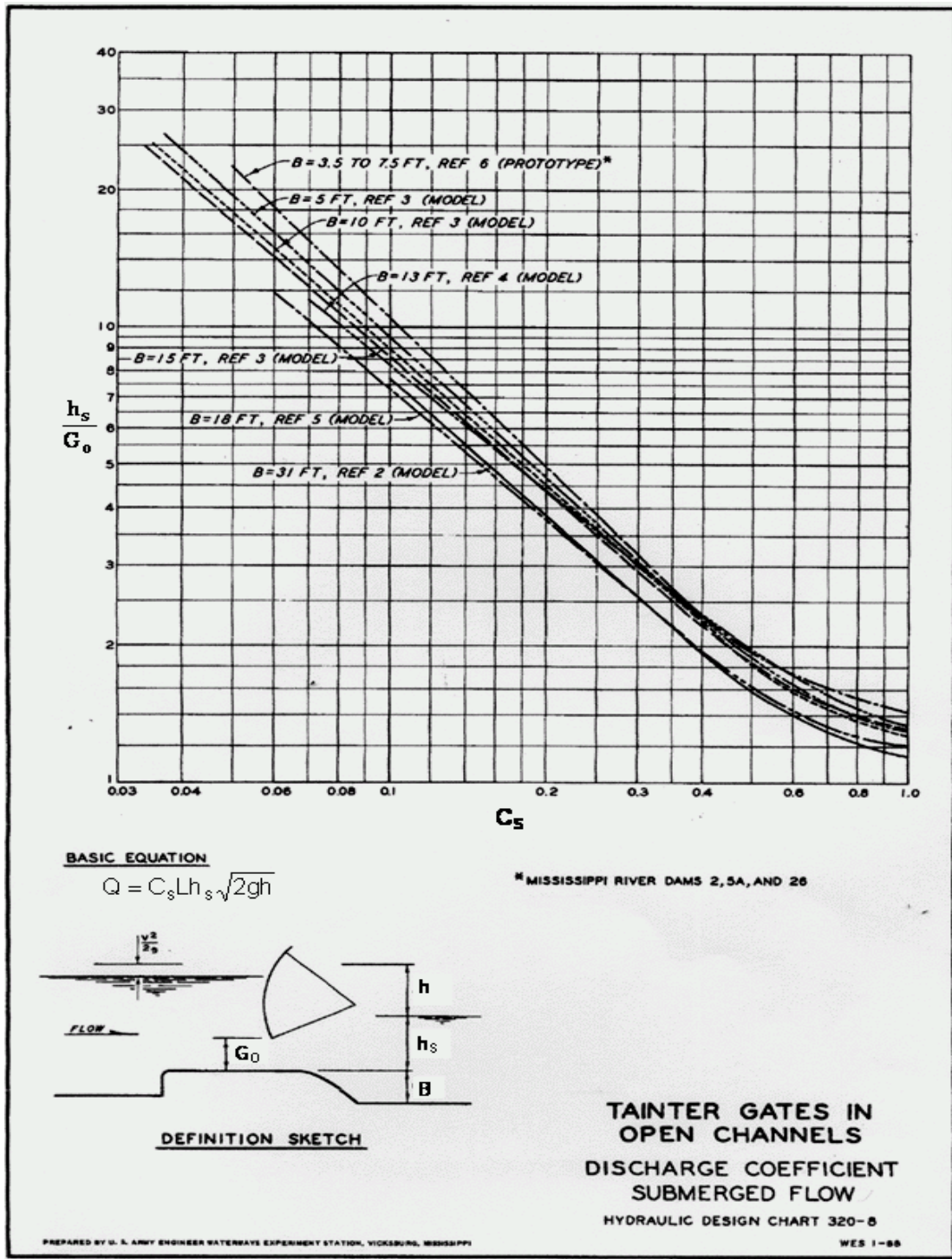
G_0 = ระยะเปิดบานระบาย, (ม.)

h = ความแตกต่างของ Head ทั้งหมดระหว่างเหนือหน้าและท้ายน้ำ, (ม.)

C = สัมประสิทธิ์การไหลกรณี Free flow

C_s = สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านบานระบาย กรณี Submerged flow

ค่า C_s : สัมประสิทธิ์การไหล จากผลการทดลองของ U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station พบว่า ค่า C_s มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่า h_s / G_0 ดังแสดงใน Log - Log Scale ตามรูปที่ 12-22 ที่ต้องเลือกเส้นกราฟตามขนาดความกว้างของบานระบาย (B)



รูปที่ 12-22 กราฟหาค่า C_s สัมประสิทธิ์การไหลผ่านบานระบาย กรณี Submerged flow
 เมื่อใช้สมการของ USACE ใช้ได้กับอาคารอื่น ๆ ที่ควบคุมด้วยบานระบายได้อีก
 เช่น ประตูระบายบานตรง, ไชฟอน และท่อระบายน้ำ

12.3.2 บานระบายชนิดบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate)

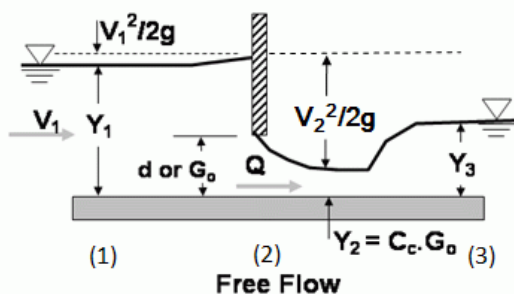
ก. กรณีเปิดบานระบายบางส่วน (Partial gate opening)

12.3.2.1 การศึกษาของ USBR

❖ [ประตุน้ำ > บานตรง > Free flow]

(1.1) การไหลลอดผ่านบานตรงแบบอิสระ (Free flow)

น้ำไหลลอดผ่านบานระบายแบบบานตรง สำหรับกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อระดับน้ำท้ายประตูมีระดับไม่สูงกว่าระดับท้องบานระบายที่ยกขึ้น เป็นการไหลของน้ำแบบอิสระที่ไม่อยู่ภายใต้การถูกบังคับ หรือต้านทานของการไหลของน้ำท้ายบานระบาย



รูปที่ 12-23 การไหลแบบ Free flow ของบานระบายชนิดบานตรง

การไหลของน้ำในกรณี Free flow หากไม่คิดการสูญเสียในระบบ

$$E_1 = E_2$$

$$Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$q = VY; \quad Y_1 + \frac{q^2}{2gY_1^2} = Y_2 + \frac{q^2}{2gY_2^2} \quad (1)$$

$$q = Y_1 Y_2 \sqrt{\frac{2g}{Y_1 + Y_2}}$$

แทนค่า $Y_2 = C_c G_o$ และนำ Y_1 ใส่ใน $\sqrt{\quad}$ จะได้

$$q = C_c G_o \sqrt{\frac{2gY_1^2}{Y_1 + C_c G_o}}$$

$$\text{จาก } Q = q.L; \quad Q = C_c L G_o \sqrt{2gY_1 \left(\frac{Y_1}{Y_1 + C_c G_o} \right)}$$

$$Q = C_d L G_o \sqrt{2gY_1} \quad (2)$$

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \left(\frac{G_o}{Y_1} \right)}} \quad (3)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านบานระบาย 1 ช่อง, (ม.³/วินาที)
 C_d = สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านบานระบาย
 C_c = สัมประสิทธิ์การบีบตัวของหน้าตัดการไหลของน้ำ
 G_o = ระยะเปิดบาน, (เมตร) อาจแทนค่าเป็นอย่างอื่น เช่น d, W, a
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²
 L = ความกว้างของบานประตู 1 ช่อง, (ม.)
 Y_1 = ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำของบานประตู, (ม.)

❖ [ประตุน้ำ > เปิดบานบางส่วน > บานตรง > Free flow]

C_c : สัมประสิทธิ์การบีบตัวของหน้าตัดการไหลของน้ำ

- Southwell, R.V และ G. Valsey (1964) เสนอแนะว่าค่า C_c เท่ากับ 0.608 เมื่อ Y_2/Y_1 เท่ากับ 0.321
- Benjamin T.B (1956) ได้วิเคราะห์และทดลองพบความสัมพันธ์ของค่า C_c กับ G_o/Y_1 สรุปตามตารางที่ 12-1

ตารางที่ 12-1 ความสัมพันธ์ของค่า C_c กับ G_o/Y_1

G_o/Y_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
C_c	0.611	0.606	0.602	0.600	0.598	0.598

ในทางปฏิบัติแล้วให้ใช้ $C_c = 0.61$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าการบีบตัวของ Orifice

❖ [ประตุน้ำ > เปิดบานบางส่วน > บานตรง > Free flow]

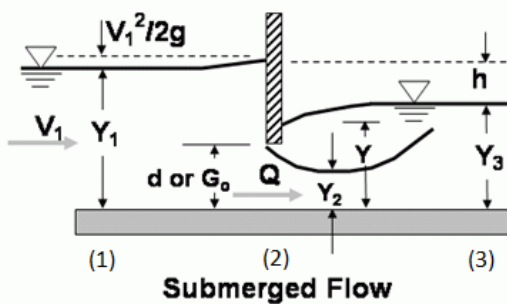
C_d : สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านบานระบาย อาจหาได้จาก

- ใช้ค่าตามสมการ (3) โดยที่ค่า C_d ผันแปรไปตามค่า G_o/Y_1
- H.R. Henry ได้ศึกษาทดลองการไหลผ่านบานระบายแบบบานตรง ได้ผลการทดลองสรุปค่าสัมประสิทธิ์การไหล (C_d) เป็นกราฟดังรูปที่ 12-17 โดยเส้นกราฟ Free flow เป็นกราฟเส้นแนวนอนเส้นบนมีค่าระหว่าง 0.5 – 0.6 (เส้นกราฟอื่นๆเส้นแนวเฉียงเป็น Submerged flow)

❖ [ประตุน้ำ > เปิดบางส่วน > บานตรง > Submerged flow]

(1.2) การไหลผ่านบานตรงแบบท่วม (Submerged flow)

มีลักษณะการไหลเมื่อเปิดบานระบายจะมีลำเจ็ทของน้ำพุ่งผ่านช่องบานระบายออกไปดังเช่นกรณีการไหลแบบ Free flow แต่น้ำด้านท้ายที่มีระดับสูงจะย้อนกลับมาทับบนลำเจ็ทและระดับน้ำด้านท้ายจะสูงกว่าขอบล่างของบานระบาย การวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นจึงเหมือนกรณีการไหลแบบ Free flow ที่กล่าวแล้วทุกประการ แต่ระดับน้ำเหนือลำเจ็ทจะทำให้การไหลไม่สะดวก นั่นคือระดับน้ำด้านท้ายมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลหรือค่า C_d



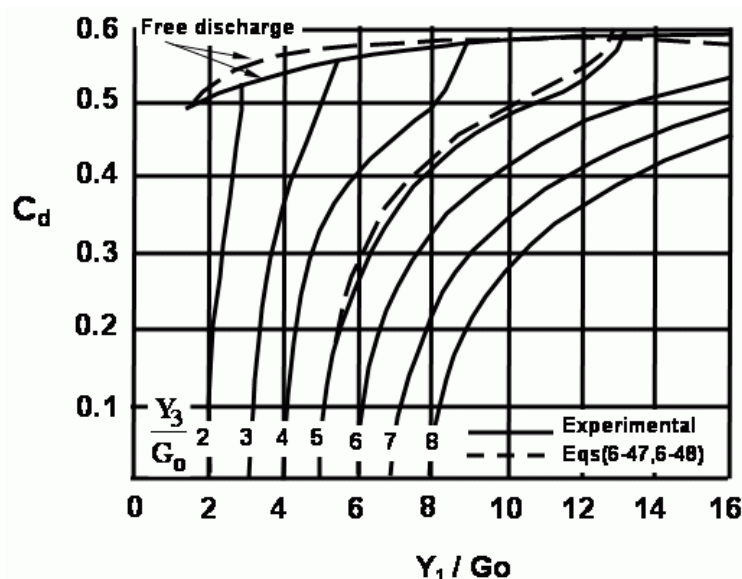
Y_2 เป็นความลึกจากลำเจ็ทของน้ำที่ไหลพุ่งลอดใต้บานระบายออกไปแบบ Supercritical flow
 Y เป็นเสตติคทั้งหมดที่หน้าตัด (2)
 Y_3 เป็นความลึกที่ทำให้เกิด Hydraulic jump

รูปที่ 12-24 การไหลแบบ Submerged flow ของบานระบายชนิดบานตรง

❖ [ประตุน้ำ > เปิดบางส่วน > บานตรง > Submerged flow]

- H.R. Henry ได้วิเคราะห์และทดลองพบว่าจากสมการ (2)

$Q = C_d L G_o \sqrt{2gY_1}$ ค่า C_d จะผันแปรไปตามค่า Y_1/G_o และ Y_3/G_o โดยได้สร้างกราฟความสัมพันธ์กรณีการไหลแบบ Submerged และ Free flow ของบานตรงดังรูปที่ 12-25



รูปที่ 12-25 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของบานระบายบานตรงจากผลการทดลองของ Henry

จากกราฟในรูปที่ 12-25 Eqs. (6-47, 6-48) คือสมการต่อไปนี้

Eqs. 6-47 คือสมการ $E1 = E2$

$$Y_1 + \frac{q^2}{2gY_1^2} = Y + \frac{q^2}{2gY_2^2}$$

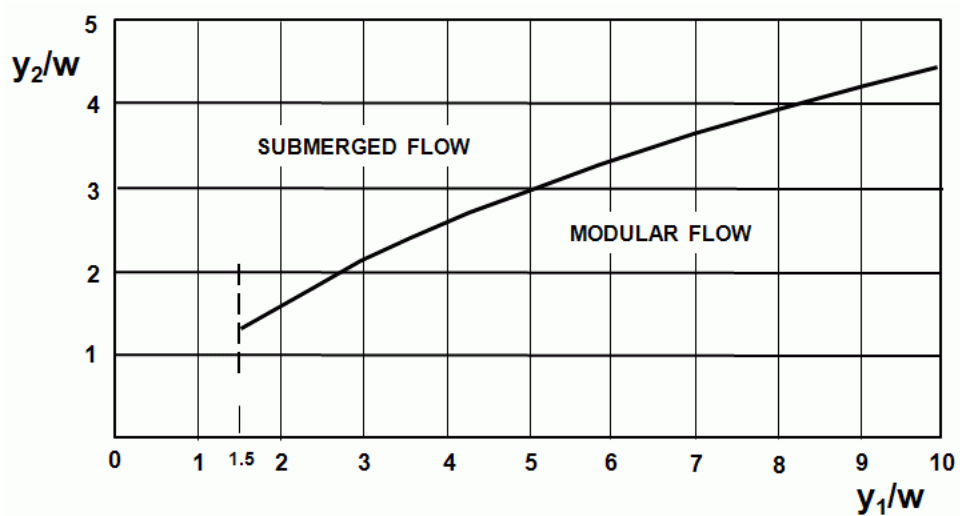
และ Eqs. 6-48 คือสมการ $M2 = M3$

$$\frac{q^2}{gY_2} + \frac{Y^2}{2} = \frac{q^2}{gY_3} + \frac{Y_3^2}{2}$$

❖ [ประตุน้ำ > เปิดบางส่วน > บานตรง]

(1.3) เงื่อนไขของลักษณะการไหลผ่านบานตรง

ตามที่กล่าวข้างต้นว่าการไหลแบบ Submerged flow นั้นในช่วงแรกมีระดับการท่วมน้อยๆ จะยังคงมีคุณสมบัติการไหลแบบ Free flow อยู่แต่น้ำด้านท้ายที่มีระดับสูงขึ้นจะย้อนกลับมาทับบนลำเจ็ท จนระดับน้ำด้านท้ายจะสูงกว่าขอบล่างของบานระบาย ส่วนการจะเกิดการไหลที่เป็น Submerged flow ที่สมบูรณ์นั้น จะเกิดเมื่อการท่วมบานของน้ำด้านท้ายน้ำเลยระดับหนึ่งขึ้นไป อาจพิจารณาได้จากกราฟ ในรูปที่ 12-26 (ใช้ตัวแปรระยะยกบานระบายเป็น w ซึ่งก็คือ G_0 นั่นเอง) ซึ่งเปรียบเทียบจากจุดตัดของค่าอัตราส่วน Y_1/G_0 (ในกราฟใช้ Y_1/w) กับ Y_2/G_0 (ในกราฟใช้ Y_2/w) ว่าอยู่ในขอบเขตใดระหว่าง Free or Modular flow หรือ Submerged flow



รูปที่ 12-26 เงื่อนไขของลักษณะการไหลผ่านบานตรง สัมพันธ์กับ Y_1/w และ Y_2/w

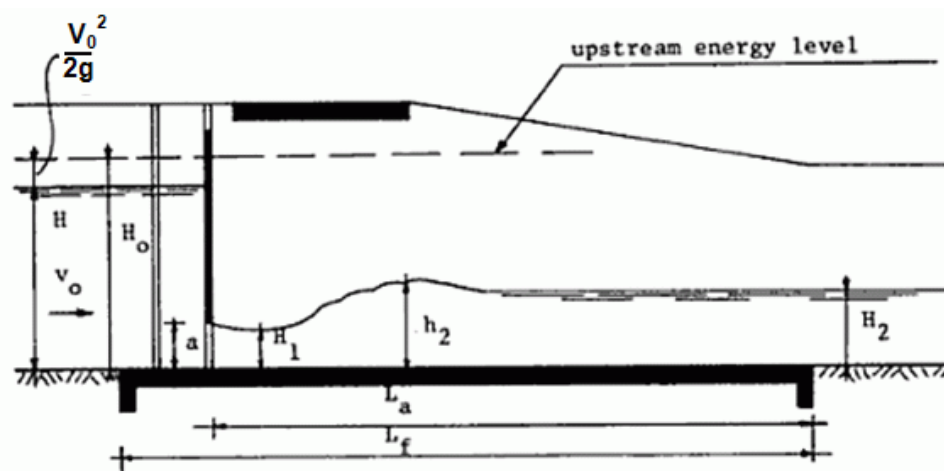
❖ [ประตูละบายน้ำ > บานตรง > FAO]

12.3.2.2 คำแนะนำของ FAO กรณี Open intake

FAO: องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations) ได้ให้คำแนะนำในการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารรับน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายชนิดบานตรง ในคู่มือฝึกอบรมชื่อ **Inland Aquaculture Engineering** ซึ่งนำเสนอส่วนนี้โดย **J. Kövári** โดยได้แบ่งอาคารรับน้ำเป็น 2 ประเภทคือ **Pipe intake** หรือ ท่อระบายน้ำ (จะกล่าวในบทที่ 13 อาคารประเภทท่อ) และ **Open intake** หรือประตูละบายน้ำ

Open intake (sluice) เป็นอาคารรับน้ำประเภทประตูละบายน้ำในระบบส่งน้ำควบคุมด้วยบานตรง และจากการที่ในระบบส่งน้ำจะมีการไหลของน้ำอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น **Approach velocity** ด้านเหนือหน้าบานระบายจึงมีอิทธิพลต่อการคำนวณอัตราการไหลมาก (ยกเว้นความเร็วน้อย ๆ เช่น น้อยกว่า 0.30 ม./วินาที อาจไม่ต้องคิด) ทั้งนี้ FAO เสนอแนะการคำนวณปริมาณน้ำ 3 รูปแบบ คือ

- ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายกรณีการไหลแบบ **Free flow**
- ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายกรณีการไหลแบบ **Submerged flow**
- อัตราการไหลผ่านบานระบายจากอิทธิพลของน้ำด้านท้ายน้ำ ซึ่งเป็นการคำนวณปริมาณน้ำกรณีการไหลแบบ **Submerged flow** อีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 12-27 รูปตัดแสดงการไหลผ่าน Open intake ที่ควบคุมด้วยบานตรง

❖ [ประตุน้ำ > บานตรง > FAO]

(2.1) ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายกรณีการไหลแบบ Free flow

$$Q = \phi \cdot b \cdot a \cdot H_1 \sqrt{2g(H_0 - H_1)} \quad , \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

$$H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g}$$

และ $H_1 = \psi a$

เมื่อ ϕ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (Velocity coefficient) มีค่าตามตารางที่ 12-2

ซึ่งขึ้นกับลักษณะของฐานรองรับ บานระบาย

b = ความกว้างของบานระบาย, ม.

a = ระยะเปิดบานระบายพื้นที่บานระบาย (หรือคือ G_0), ม.

H_0 = ความลึกน้ำด้านเหนือน้ำที่รวม Approach velocity (v_0), ม.

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำหน้าบานระบาย, ม.

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม./วินาที²

H_1 = เป็นความลึกจากลำเจ็ทของน้ำที่ไหลพุ่งลอดใต้บานระบายออกไป, ม.

ψ = ค่าสัมประสิทธิ์การบีบตัว (Contraction coefficient) (หรือคือ C_c) ซึ่งจะ

สัมพันธ์กับค่า a/H ซึ่งหาได้จากตารางที่ 12-3

V_0 = Approach velocity***, ม./วินาที

***การคำนวณถ้าต้องการใช้ค่า Approach velocity ทำได้โดย

(1) คำนวณหาค่า Q โดยไม่คิด Approach velocity ก่อน โดยใช้ค่า $H_0 = H$

(2) จากค่า Q ที่คำนวณได้ หาค่า V_0 ที่ไหลผ่านหน้าตัดทางน้ำ A_0 (ที่ตำแหน่งวัด

ค่า H ด้านหน้าบานระบาย) จากสมการ $Q = A_0 \cdot V_0$

(3) นำค่า V_0 ไปใช้คำนวณอีกครั้งโดยใช้ค่า $H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g}$

ตารางที่ 12-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (Velocity coefficient) ϕ

ลักษณะของฐานรองรับบานระบาย	ϕ
ฐานรองยกสูงจากท้องน้ำ(ลักษณะ Broad crested)	0.85 - 0.95
ฐานรองมีระดับเดียวกับระดับท้องน้ำ	0.95 - 1.00

หมายเหตุ : ในการคำนวณให้ใช้ค่าเฉลี่ยได้

ตารางที่ 12-3 ค่าสัมประสิทธิ์การบีบตัว (Contraction coefficient) : ψ

a/H	ψ	a/H	ψ	a/H	ψ	a/H	ψ
0.00	0.611	0.30	0.625	0.55	0.650	0.80	0.720
0.10	0.615	0.35	0.628	0.60	0.660	0.85	0.745
0.15	0.618	0.40	0.630	0.65	0.675	0.90	0.780
0.20	0.620	0.45	0.638	0.70	0.690	0.95	0.835
0.25	0.622	0.50	0.645	0.75	0.705	1.00	1.000

❖ [ประตูละบายน้ำ > บานตรง > FAO]

(2.2) ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายกรณี Submerged flow

$$Q = a \cdot b \cdot C \cdot \sqrt{2gh} \quad , \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

$$h = H_0 - H_2 = \text{head}, \quad \text{ม.}$$

เมื่อ a = ระยะเปิดบานระบายพื้นที่บานระบาย, ม.

b = ความกว้างของบานระบาย, ม.

$C = \phi \cdot \psi$ = Discharge coefficient

ϕ = Velocity coefficient มีค่าตามตารางที่ 12-2 ซึ่งขึ้นกับลักษณะของฐานรองรับบานระบาย

ψ = ค่าสัมประสิทธิ์การบีบตัว (contraction coefficient) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า a/H ซึ่งหาได้จากตารางที่ 12-3

$$h = H_0 - H_2$$

$$H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g}$$

H_0 = ความลึกน้ำด้านเหนือน้ำที่รวม approach velocity, ม.

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำหน้าบานระบาย, ม.

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, = 9.81 ม./วินาที²

V_0 = approach velocity, ม./วินาที

❖ [ประตุน้ำ > บานตรง > FAO]

(2.3) อัตราการไหลผ่านบานระบายจากอิทธิพลของน้ำด้านท้ายน้ำ

เป็นการคำนวณอัตราการไหลในกรณี **Submerged flow** อีกวิธีหนึ่งที่มีหลักการคือ เมื่อระดับน้ำด้านท้ายน้ำสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งจะมีอิทธิพลกับการไหลในกรณี **Free flow** โดยน้ำด้านท้ายน้ำจะต้านการไหลของน้ำที่ไหลผ่านบานระบายออกไป ทำให้อัตราการไหลกรณี **Free flow** ลดลง

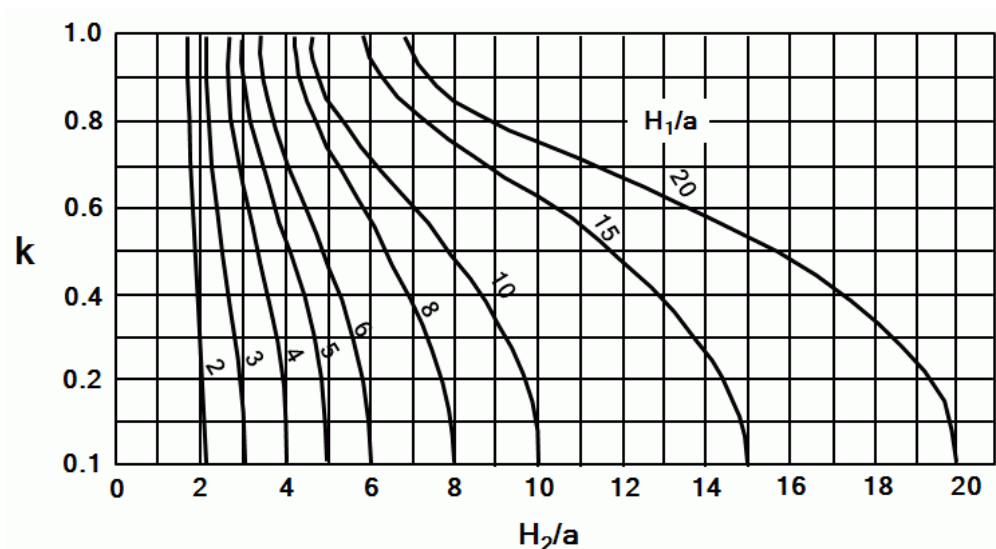
$$\frac{Q_{\text{retarded}}}{Q} = k \quad \text{หรือ}$$

$$Q_{\text{retarded}} = k \cdot Q$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายกรณีการไหลแบบ **Free flow** ที่คำนวณจากสมการ $Q = \phi \cdot b \cdot a \cdot H_1 \sqrt{2g(H_0 - H_1)}$, ม.³/วินาที

Q_{retarded} = ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบายกรณีเกิดจากอิทธิพลของน้ำด้านท้ายน้ำ หรือการไหลแบบ **Submerged flow**, ม.³/วินาที

k = ค่าสัมประสิทธิ์การต้านการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำด้านท้ายน้ำ ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 12-28 ที่สัมพันธ์กับค่า H_1/a และ H_2/a

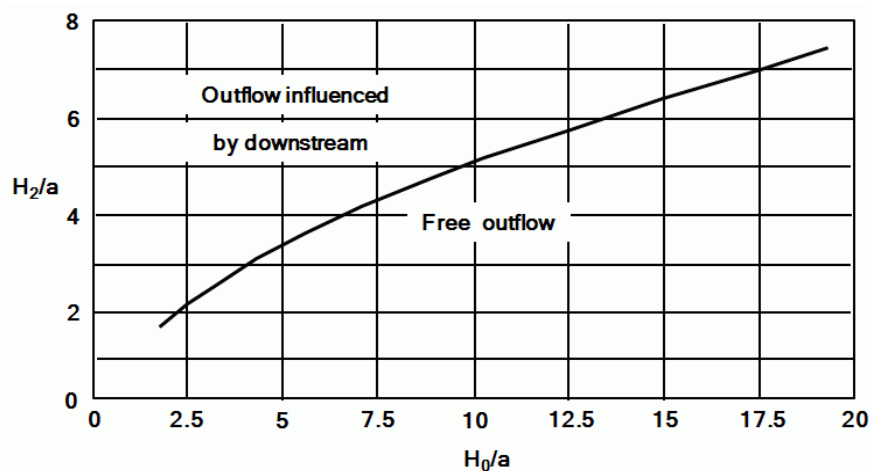


รูปที่ 12-28 ค่า k Coefficient เมื่อเป็นการไหลแบบ **Submerged flow**

❖ [ประตุน้ำ > บานตรง > FAO]

(2.4) เงื่อนไขของลักษณะการไหลผ่านบานตรงของ FAO

การจะพิจารณาว่าการไหลเป็นแบบ Free flow หรือเป็นการไหลแบบ Submerged flow นั้น พิจารณาได้จากกราฟ ในรูปที่ 12-29 ซึ่งเปรียบเทียบจากจุดตัดของค่าอัตราส่วน H_1/a กับ H_2/a ว่าอยู่ในขอบเขตใด ระหว่าง Free flow ในขอบเขต Free outflow ได้เส้นกราฟ หรือ Submerged flow ในขอบเขต Outflow influenced by downstream (การไหลที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำด้านท้ายน้ำ) เหนือเส้นกราฟ



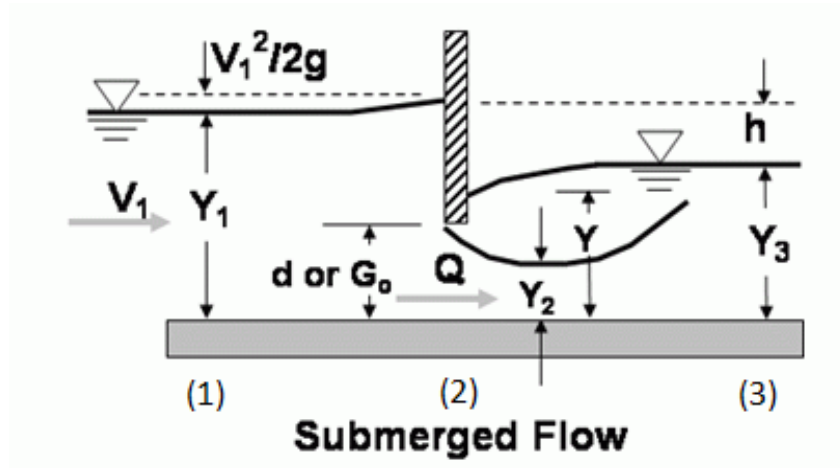
รูปที่ 12-29 กราฟเพื่อใช้พิจารณาการไหลเป็นแบบ Free flow หรือ Submerged flow

❖ [ประตุน้ำ > เปิดบานบางส่วน > บานตรง > USACE > Submerged flow]

12.3.2.3 การไหลลอดผ่านบานตรงกรณี Submerged flow ใช้ผลจากการศึกษาของ U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (USACE)

ในหัวข้อ 12.3.1.2 ได้นำเสนอการศึกษาของ U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (USACE) เกี่ยวกับการไหลผ่านบานโค้งในกรณี Submerged flow ซึ่งได้มีการพัฒนาตัดแปลงสูตรของ Standard Orifice $Q = CLG_o\sqrt{2gh}$ เพื่อให้สามารถใช้ได้ง่ายและสะดวก ได้เป็นสมการที่เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป

สมการการคำนวณการไหลผ่านบานระบายโค้งกรณี **Submerged flow** ของ USACE สามารถนำไปใช้กับอาคารอื่น ๆ ที่ควบคุมด้วยบานระบายได้อีก เช่น ประตูระบายบานตรง (ที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้), ไซฟอน และท่อระบายน้ำ ซึ่งการนำค่าสัมประสิทธิ์การไหลของบานโค้งมาใช้นั้นจะเป็นค่าโดยประมาณที่ยอมรับได้ แต่หากต้องการความถูกต้องแน่นอนต้อง **Calibrate** หาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอาคารแต่ละแห่งมาใช้คำนวณ



รูปที่ 12-30 ลักษณะการไหลแบบ Submerged flow

สมการการคำนวณการไหลผ่านบานระบายโค้งกรณี **Submerged flow** ของ USACE

$$Q = C_S L h_S \sqrt{2gh}$$

$$C_S = C \left(\frac{G_0}{h_S} \right)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านต่อบานระบาย 1 ช่อง, (ม.³/วินาที)

L = ความกว้างของบานระบายน้ำ 1 ช่อง, (ม.)

h_S หรือ Y_3 = ระดับน้ำท้ายประตูวัดจากธรณีสันบานระบาย หรือ, (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 ม./ (วินาที)²

G_0 = ระยะเปิดบานระบาย, (ม.)

h = ความแตกต่างของ Head ทั้งหมดระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ, (ม.)

C = สัมประสิทธิ์การไหลกรณี **Free flow**

C_S = สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านบานระบาย กรณี **Submerged flow**

หาได้จาก Log - Log Scale ตามรูปที่ 12-22 (ในหัวข้อบานโค้ง)

❖ [ประตูระบายน้ำ > บานตรง > เปิดบานระบายพื้นน้ำ]

ข. กรณีเปิดบานระบายพื้นน้ำ (Fully gate opening)

ในการบริหารจัดการน้ำในช่วงฤดูน้ำหลากนั้น มักมีการพร่องน้ำไว้ล่วงหน้าในช่วงต้นฤดู แต่หากมีความจำเป็นต้องระบายน้ำปริมาณมาก ๆ นอกจากการพิจารณาถึงความปลอดภัยของหัวงานเป็นหลักแล้ว ต้องพิจารณาผลกระทบที่จะทำให้เกิดน้ำท่วมพื้นที่ด้านท้ายด้วย

การระบายน้ำโดยการยกบานระบายพื้นน้ำนั้นจะทำใน 2 กรณี คือ

(1) โครงการประเภทเขื่อนระบายน้ำหรือประตูระบายน้ำที่ได้ออกแบบให้มีการระบายน้ำสูงสุดผ่านอาคารประตูระบายน้ำโดยการยกบานระบายพื้นน้ำ เพื่อให้การระบายน้ำมีอัตราสูงสุดซึ่งน้ำจะไหลในลำน้ำโดยอิสระเหมือนสภาพธรรมชาติเดิมของมัน โดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบทำให้น้ำท่วมพื้นที่ด้านท้ายน้ำ ซึ่งการยกบานระบายพื้นน้ำจะทำเมื่อระดับน้ำด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำของอาคารมีระดับใกล้เคียงกัน กรณีเช่นนี้ถือเป็นการระบายน้ำตามปกติ

(2) อาคารทั่ว ๆ ไปที่ไม่ได้ออกแบบให้มีการระบายน้ำผ่านประตูระบายน้ำโดยให้ยกบานระบายพื้นน้ำ เมื่อเกิดภาวะวิกฤติเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อหัวงานต้องระบายน้ำออกไปให้มากที่สุดซึ่งจำเป็นต้องมีการยกบานระบายพื้นน้ำ ซึ่งเป็นการแน่นอนว่าจะทำให้น้ำท่วมพื้นที่ด้านท้ายน้ำ กรณีเช่นนี้ต้องมีการประเมินสภาพการเกิดน้ำท่วมพื้นที่ดังกล่าว และต้องมีการประกาศแจ้งเตือนล่วงหน้า

เมื่อมีการยกบานระบายพื้นน้ำ ขณะนั้นระดับน้ำด้านเหนือและท้ายอาคารมีระดับสูงมากกว่าระดับปกติ อาจเกือบถึงระดับตลิ่งจนถึงสันข้ามตลิ่งออกไป จะเกิดการไหลหลายรูปแบบขึ้นกับลักษณะของฐานรองรับบานระบาย, อัตราการไหล และระดับน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ

❖ [ประตูระบายน้ำ > เปิดบานระบายพื้นน้ำ > รูปแบบที่ 1]

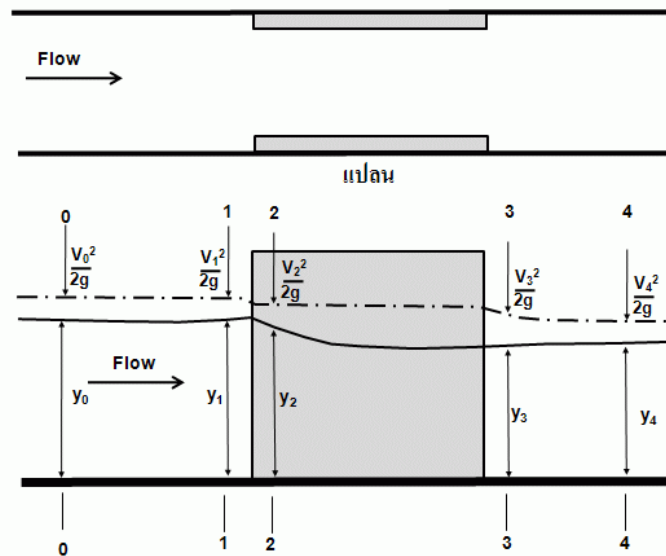
❖ กรณีที่ฐานรองรับบานระบาย พื้นด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ มีระดับเท่ากัน

* อาคารตั้งอยู่ในทางน้ำที่มีขนาดหน้าตัดด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำใกล้เคียงกัน และระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับท้ายน้ำต่างกันไม่มาก เช่น ปลด.ในคลองส่งน้ำหรือคลองระบายน้ำ

ลักษณะการไหลจะเป็นแบบไหลผ่านสิ่งกีดขวางทางน้ำ (Obstructions) ซึ่งสิ่งกีดขวางก็คือตอม่อและกำแพงข้างของอาคารนั่นเอง การไหลอาจจะเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะการไหลแบบ Supercritical flow ที่ไหลด้วยความเร็วมากๆ มีความปั่นป่วนเกิดกระแสน้ำวน กับสถานะ

การไหลแบบ Subcritical flow ที่ไหลเอื่อยด้วยความเร็วค่อยๆ แต่ส่วนใหญ่มักเป็นการไหลแบบ Subcritical flow เสมอ

ลักษณะการไหลดังกล่าวเสมือนว่าหน้าตัดของคลองหรือทางน้ำหดแคบลง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Back Water ขึ้นทางด้านเหนือน้ำของอาคาร และเมื่อไหลผ่านอาคารที่เสมือนเป็นหน้าตัดที่แคบลง ความเร็วของกระแสน้ำก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับน้ำลดลง และเมื่อไหลผ่านหน้าตัดนั้นแล้ว ระดับน้ำก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับปกติ ดังแสดงในรูปที่ 12-31



รูปที่ 12-31 ลักษณะการไหลแบบไหลผ่านสิ่งกีดขวางทางน้ำ (Obstructions) เมื่อยกบานระบายพื้นน้ำ กรณีที่ฐานรองรับบานระบาย พื้นด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ มีระดับเท่ากัน

การคำนวณลักษณะการไหลผ่านตอม่อ ตามรูปที่ 12-31 หน้าตัดการไหลเมื่อผ่านตอม่อที่หน้าตัด 2 จะหดตัวแคบลง โดยระดับน้ำจะค่อยๆ ลดลงในขณะที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น เมื่อถึงระยะหนึ่ง (บริเวณท้ายตอม่อที่หน้าตัด 3 เสมือนเป็น Orifice) ระดับน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับปกติที่หน้าตัด 4 ในทางทฤษฎีจะคำนวณปริมาณน้ำที่ตำแหน่ง หน้าตัด 3 ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = CA_3 \sqrt{2g \left(\Delta h + \frac{V_1^2}{2g} \right)}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน ปตร. , (ม.³/วินาที)

C = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล

Δh = ความแตกต่างของ Head ระหว่างหน้าตัด 1 กับ 3, (ม.)

A_3 = หน้าตัดการไหลที่หน้าตัด 3, ม.²

$V_1^2/2g$ = Approach velocity ; $V_1 = Q/A_1$

แทนค่า $V_1 = Q/A_1$ ในสมการข้างต้น จะได้เป็น

$$Q = CA_3 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{C^2 A_3^2}{A_1^2}}} \quad ***$$

*** ใช้สมการนี้ในการการ **Calibrate** อาคาร ปตร. กรณียกบานพื้นน้ำ

ในทางปฏิบัติการปกติจะวัดระดับน้ำที่ตำแหน่ง 0 กับตำแหน่ง 4 ไม่วัดที่ตำแหน่ง 3 จึงอาจอนุโลมให้ใช้ความลึก y_4 แทนความลึก y_3 และปรับสมการให้สะดวกในการคำนวณโดยการไม่คิด Approach velocity จะได้เป็น

$$Q = CLy_4 \sqrt{2g\Delta h}$$

เมื่อ L = ความกว้างของช่องการไหลของ ปตร. , (ม)

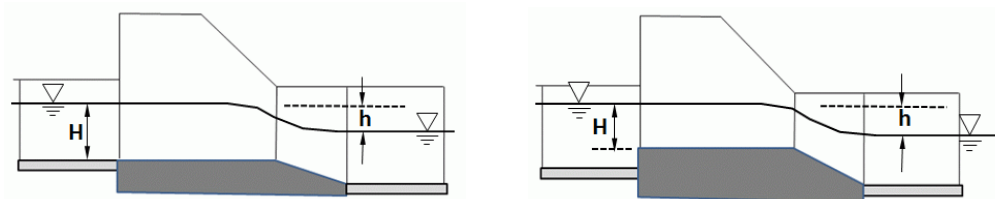
y_4 = ความลึกระดับน้ำด้านท้ายน้ำ - ระดับธรณีประตู่ , (ม)

หมายเหตุ ค่า C นั้นต้องมีการ **Calibrate** หาค่าที่ถูกต้องมาใช้ ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากมักมีอุปสรรคในการปฏิบัติงานมาก แต่ส่วนใหญ่ใช้ค่า 0.6 - 0.7 ตามคุณสมบัติพื้นฐานของการไหลผ่าน Orifice ซึ่งอาจผิดพลาดได้มาก หรือเลียงไปใช้ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลผ่านลำน้ำด้านท้ายโดยตรวจวัดแล้วสร้างเป็น **Rating Curve** มาใช้แทนการคำนวณจาก ปตร. ข้างต้น

❖ [ประตู่ระบายน้ำ > เปิดบานระบายพื้นน้ำ > รูปแบบที่ 2]

❖ กรณีที่ฐานรองมีลักษณะรูปแบบคล้ายฝาย

ลักษณะการไหลแบบไหลผ่านฝายสันกว้าง เป็นกรณีที่ฐานรองมีลักษณะยกสูงหรือมีรูปร่างคล้ายฝาย โดยจะเกิดการไหลแบบนี้ก็เมื่อสภาวะการไหลเป็นแบบ **Critical flow** ที่ระดับความลึกของน้ำที่เหมาะสมช่วงหนึ่งที่มีความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับด้านท้ายน้ำปรากฏให้เห็นชัดเจน คุณสมบัติการไหลจึงเสมือนการไหลผ่านฝาย แต่หากระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นมากและระดับด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำแตกต่างกันไม่มาก การไหลก็อาจเป็นแบบไหลผ่านสิ่งกีดขวางทางน้ำ (**Obstructions**) ตามข้อแรก



รูปที่ 12-32 ลักษณะการไหลแบบผ่านฝายแบบจม กรณีที่ฐานรองมีลักษณะรูปแบบคล้ายฝาย จะมีลักษณะการไหลเป็นแบบการไหลผ่านฝายแบบจม (**Submerged flow**)

$$Q = CL\sqrt{2gh}\left[H - \frac{h}{3}\right]$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน, (ม.³/วินาที)

C = สัมประสิทธิ์การไหล

ปตร. ขนาดเล็ก มีความกว้างน้อยกว่า 3 เมตร ใช้ $C = 0.60$

ปตร.ขนาดใหญ่ มีความกว้างมากกว่า 3 เมตร ใช้ $C = 0.70$

H = ความลึกของน้ำทางด้านหน้าประตูระบาย, (ม.)

h = ผลแตกต่างระหว่างระดับน้ำด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ, (ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

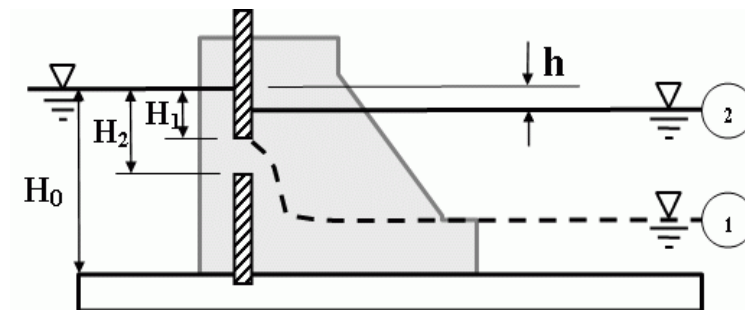
L = ความกว้างของช่องประตูระบาย, (เมตร)

❖ [ประตูระบายน้ำ > บานตรงแบบสองชั้น]

12.3.3 ประตูระบายน้ำ ควบคุมด้วยบานตรงแบบบานสองชั้น

ก. กรณีเปิดบานระบายบางส่วน (Partial gate opening)

เป็นกรณีที่ฐานรองรับบานมีระดับยกสูง ซึ่งเป็นลักษณะของ ฝ่ายระบายน้ำ (บานตรงอาจพบได้น้อย เพราะส่วนใหญ่จะใช้บานโค้ง) และประตูระบายแบบบานระบายสองชั้น ในกรณีนี้ช่องเปิดของบานระบายจะมีสภาพเป็น Orifice ที่แท้จริงหรือสมบูรณ์กว่ากรณีที่ฐานรองรับบานไม่ได้ยกตัวสูง คุณสมบัติการไหลจึงแตกต่างกัน มีสูตรการคำนวณที่ต่างไป



รูปที่ 12-33 ประตูระบายแบบบานระบายสองชั้น เปิดบานบางส่วน

1) การไหลลอดผ่านบานตรงสองชั้นแบบ Free Flow

เป็นกรณีที่ระดับน้ำด้านท้ายต่ำกว่าขอบล่างบานระบาย (บานระบายด้วยบานกรณีบาน 2 ชั้น) ตามรูปที่ 12-33 ระดับน้ำด้านท้ายน้ำเป็นเส้น (1)

การคำนวณใช้สมการการไหลผ่าน Orifice รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่ ดังต่อไปนี้ (ได้นำเสนอ หลักการพื้นฐาน ไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5.2 อัตราการไหลของน้ำผ่านช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่)

$$Q = \frac{2}{3} C_g L \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบาย (ม.³/วินาที)

L = ความกว้างของช่องระบาย (ม.)

H_1 = ระยะจากระดับน้ำด้านเหนือน้ำถึงขอบบนช่องระบาย (ม.)

H_2 = ระยะจากระดับน้ำด้านเหนือน้ำถึงขอบล่างช่องระบาย (ม.)

d = ระยะยกบานระบาย = $H_2 - H_1$ (ม.)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

C_g หรือ C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านบานระบาย ตามรายละเอียดต่อไปนี้

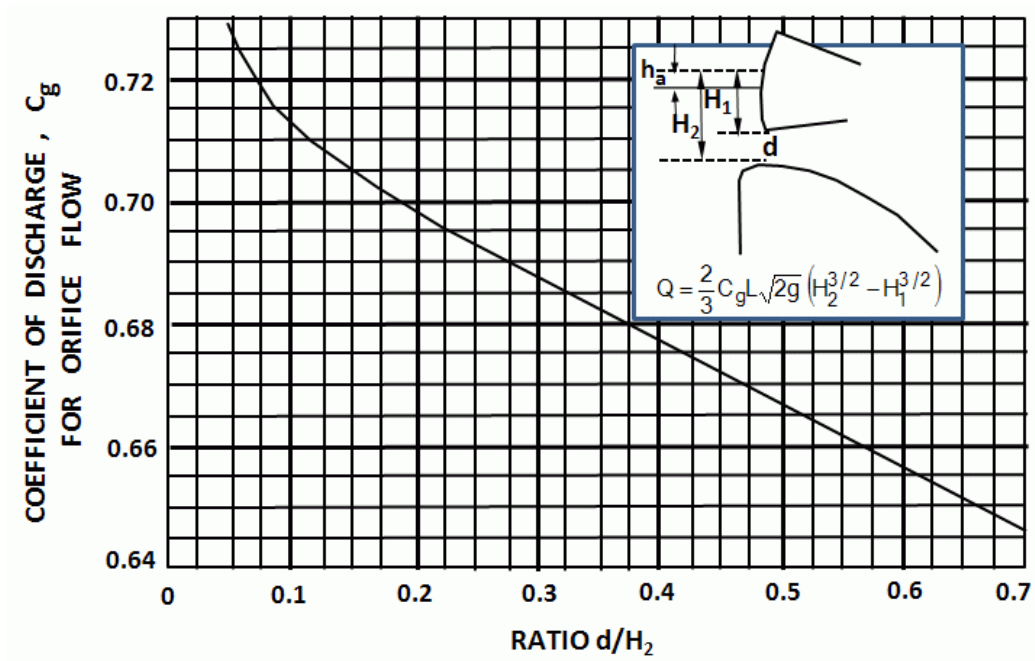
C_g : ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านบานระบาย

• USBR ได้สรุปผลการศึกษาทดลอง ค่า C_g ของฝายระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายโค้ง ดังสมการต่อไปนี้ (ใช้ได้กับฝายระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรง และประตูระบายบานระบาย 2 ชั้นด้วย)

$$C_g = 0.615 + 0.104 \frac{H_2}{H_1} \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{H_2}{H_1} < 0.83$$

ซึ่ง C_g สูงสุดเมื่อ $H_2/H_1 = 0.83$ มีค่า 0.70

นอกจากนี้ได้สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ ของ C หรือ C_g กับ d/H_2 ดังแสดงในรูปที่ 12-34



รูปที่ 12-34 กราฟความสัมพันธ์ของ C หรือ C_g กับ d/H_2

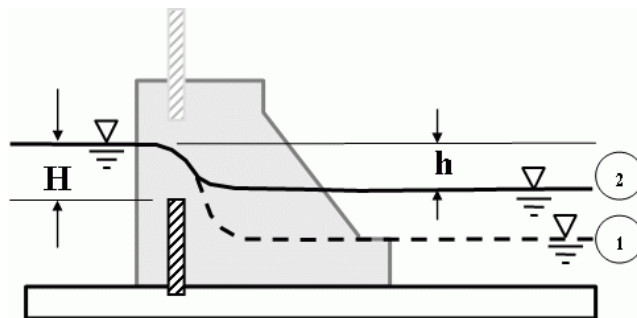
- กรมชลประทาน ได้แนะนำในเอกสารคู่มือการคำนวณปริมาณน้ำกำหนดค่าโดยประมาณ ดังนี้

กรณีประตูระบายขนาดใหญ่ มีความกว้างมากกว่า 3.00 เมตร $C = 0.70$

กรณีประตูระบายขนาดเล็ก มีความกว้างน้อยกว่า 3.00 เมตร $C = 0.60$

ข. กรณีเปิดบานพื้นน้ำ กรณีบานตรงแบบบาน 2 ชั้น

เมื่อยกบานระบายด้วยบานพื้นน้ำ การไหลจะเป็นแบบไหลข้ามสันบานล่าง (Overpour-type regulators) ซึ่งเป็นลักษณะการไหลข้ามฝายสันสันลักษณะ Free overfall



รูปที่ 12-35 ประตูระบายแบบบานระบายสองชั้น เปิดบานพื้นน้ำ

(1) การไหลแบบ **Free Flow** ระดับน้ำด้านท้ายต่ำกว่าสันบานล่าง

$$Q = \frac{2}{3} CL \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$$

(2) การไหลแบบ **Submerge Flow** ระดับน้ำด้านท้ายสูงกว่าสันบานล่าง

$$Q = CL \sqrt{2gH} \cdot \left[H - \frac{h}{3} \right]$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบาย (ม.³/วินาที)

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

กรณีประตูระบายขนาดใหญ่ มีความกว้างมากกว่า 3.00 เมตร $C = 0.70$

กรณีประตูระบายขนาดเล็ก มีความกว้างน้อยกว่า 3.00 เมตร $C = 0.60$

L = ความกว้างของช่องระบาย (ม.)

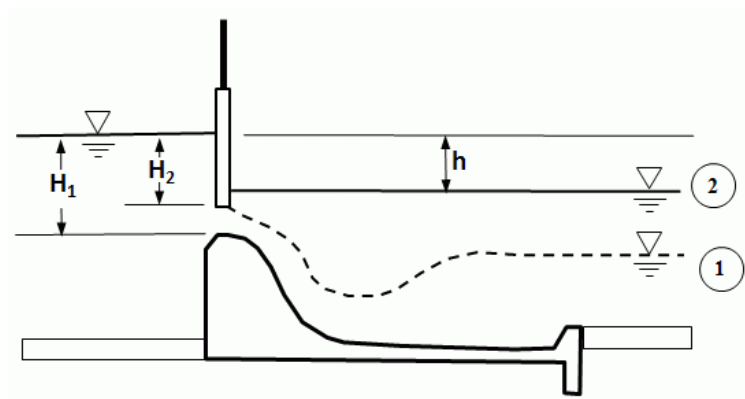
H = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเหนือระดับสันบานระบายตัวล่าง (ม.)

h = ระดับแตกต่างของน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (ม.)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม. / (วินาที)²

12.4 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายระบายน้ำ

12.4.1 ฝายระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate)



รูปที่ 12-36 ฝายระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรง

การไหลผ่านควบคุมบานระบายของฝายระบายน้ำนั้น อาจมีลักษณะการไหลได้ 2 ลักษณะ คือ แบบ Free flow และแบบ Submerged flow

1) การไหลแบบ Free flow เป็นกรณีที่ระดับน้ำด้านท้ายไม่ท่วมขอบล่างของบานระบาย หรือระดับด้านท้ายเป็นระดับ (1) ในรูปที่ 12-36 คำนวณอัตราการไหลโดยสูตร Orifice ดังนี้

$$Q = \frac{2}{3} C_g L \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านบานระบาย (ม.³/วินาที)

L = ความกว้างของช่องระบาย (ม.)

H_1 = ระยะจากระดับน้ำด้านเหนือน้ำถึงขอบสันฝาย (ม.)

H_2 = ระยะจากระดับน้ำด้านเหนือน้ำถึงขอบล่างของบาน (ม.)

d = ระยะยกบานระบาย = $H_2 - H_1$ (ม.)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

C_g หรือ C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านบานระบาย ตามรายละเอียดต่อไปนี้

C_g : ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านบานระบาย

• USBR ได้สรุปผลการศึกษาทดลอง ค่า C_g ของฝายระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายโค้ง ดังสมการต่อไปนี้ (ใช้ได้กับฝายระบายน้ำควบคุมด้วยบานตรง และประตูระบายบานระบาย 2 ชั้นด้วย)

$$C_g = 0.615 + 0.104 \frac{H_2}{H_1} \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{H_2}{H_1} < 0.83$$

ซึ่ง C_g สูงสุดเมื่อ $H_2/H_1 = 0.83$ มีค่า 0.70

นอกจากนี้ได้สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ ของ C หรือ C_g กับ d/H_2 ดังแสดงในรูปที่ 12-34

2) การไหลแบบ **Submerged flow** เป็นกรณีที่ระดับน้ำด้านท้ายท่วมขอบล่างของบานระบาย หรือระดับด้านท้ายเป็นระดับ (2) ในรูปที่ 12-36 คำนวณอัตราการไหลโดยสูตร Submerged orifice ดังนี้

$$Q = CL\sqrt{2gh}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านช่องบานระบายของฝายระบาย (ม.³/วินาที)

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

กรณีประตูระบายขนาดใหญ่ มีความกว้างมากกว่า 3.00 เมตร $C = 0.70$

กรณีประตูระบายขนาดเล็ก มีความกว้างน้อยกว่า 3.00 เมตร $C = 0.60$

L = ความกว้างของช่องระบาย (ม.)

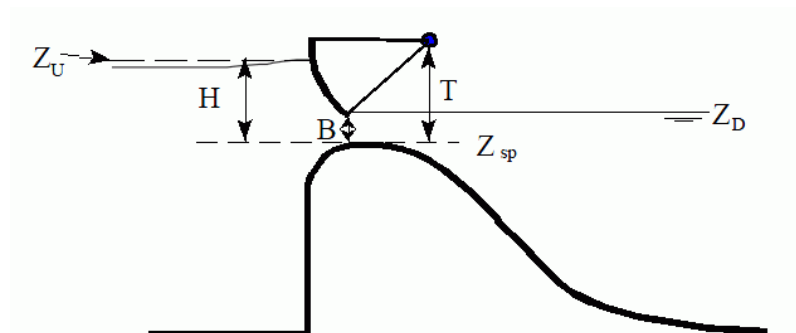
h = ระดับแตกต่างของน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (ม.)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 ม. / (วินาที)²

12.4.2 ฝายระบายน้ำควบคุมด้วยบานโค้ง (Radial gate or Tainter gate)

❖ U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center

ได้ศึกษาและเสนอการคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายระบายน้ำแบบ Ogee ที่ควบคุมด้วยบานโค้งดังนี้



[Z_U = ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ, Z_D = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ, Z_{sp} = ระดับสันฝาย]

รูปที่ 12-37 ฝายระบายน้ำแบบ Ogee ที่ควบคุมด้วยบานโค้ง

1) การไหลกรณี Free flow

เป็นการไหลผ่านฝายระบายน้ำที่ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ (Z_D) มีระดับต่ำจนไม่ส่งผลกระทบในการต้านการไหลของน้ำที่ไหลผ่านสันฝายออกมา ซึ่งพิจารณาจากค่า Submergence ratio: $Z_D/Z_U < 0.67$ คำนวณโดยสมการต่อไปนี้

$$Q = C\sqrt{2g} W T^{TE} B^{BE} H^{HE}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล, (ม.³/วินาที)

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล มีค่า 0.6 - 0.8 ขึ้นกับขนาดหน้าตัดการไหล

W = ความกว้างของบานระบาย, (ม.)

T = ความสูงของแกนหมุนบานวัดจากสันฝาย, (ม.)

TE = ค่ายกกำลังของ T ขึ้นกับแบบบานมีค่าไม่เกิน 0.16

(ค่า T และ TE เกี่ยวข้องกับผลกระทบที่เกิดจากการทำมุมของบาน อาจไม่คิดผลกระทบนี้โดยใช้ 0.0 ทำให้ $T = 1$)

B = ระยะยกบาน, (ม.)

BE = ค่ายกกำลังของ B ขึ้นกับแบบบาน เป็นค่าปรับแก้ผลกระทบที่เกิด

จากขอบล่างบานเบนไปจากตำแหน่งธรณีบานบนสันฝายมีค่าไม่เกิน 0.72

(อาจไม่คิดผลกระทบนี้ใช้ $BE = 1.0$)

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำวัดจากสันฝาย หรือ Head การไหล ($Z_U - Z_{sp}$)

HE = ค่ายกกำลังของ H ขึ้นกับแบบบาน มีค่าไม่เกิน 0.62 (ค่าทั่วไปใช้ 0.5)

2) การไหลกรณี Submerged flow

- เป็นการไหลผ่านฝายเมื่อค่า Submergence ratio: $Z_D/Z_U > 0.67$ นั่นคือระดับน้ำด้านท้ายน้ำ (Z_D) มีระดับสูงจนรบกวนการไหล (เกิดการต้านการไหลเกิดขึ้น) การคำนวณปริมาณน้ำ ใช้สมการต่อไปนี้

$$Q = C\sqrt{2g} W T^{TE} B^{BE} H^{HE}$$

ค่าต่างๆ เหมือนกรณี การไหลแบบ Free flow ยกเว้นค่า H

H = ความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือกับด้านท้ายน้ำ = $Z_U - Z_D$

- กรณีที่ค่า Submergence ratio: Z_D/Z_U สูงจนเท่ากับหรือมากกว่า 0.8 ถือเป็นการไหลในลักษณะของ Submerged orifice ที่สมบูรณ์ จึงใช้สมการคำนวณ

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

เมื่อ $A =$ พื้นที่หน้าตัดการไหล = BW, (ม.²)
 $H = Z_U - Z_D$
 $C = 0.8$

12.4.3 การไหลฝายระบายน้ำกรณีเปิดบานระบายพื้นน้ำ

ไม่ว่าจะเป็นฝายที่ควบคุมด้วยบานตรงหรือบานโค้ง เมื่อยกบานระบายพื้นน้ำแล้ว ตัวฝายจะมีลักษณะและคุณสมบัติทางชลศาสตร์เป็นฝายเปิดดังเช่นที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 8

12.5 Movable weir แบบ Long span leaf wheel gate

บานตรงแบบใหม่ที่จะกล่าวถึงนี้เป็นบานระบายที่ออกแบบใช้กับเขื่อนที่ปิดกั้นในแม่น้ำหรือลำน้ำขนาดใหญ่ (1) ทำหน้าที่ป้องกันน้ำท่วมเมื่อสร้างไว้ตอนบนหรือตอนกลางของกลุ่มน้ำ และ (2) ใช้เพื่อทำหน้าที่ป้องกันน้ำทะเลหนุนและป้องกันน้ำเค็มเมื่อสร้างไว้ตอนปลายของกลุ่มน้ำ ส่วนการใช้งานเพื่อการทดน้ำเป็นเป้าหมายรอง ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอบานระบายที่ออกแบบในญี่ปุ่น ที่นำมาสร้างในประเทศไทย เช่นที่เขื่อนบางปะกง จังหวัดปราจีนบุรี บานระบายชนิดนี้มีลักษณะรูปแบบและคุณสมบัติพิเศษ คือ

1) บานระบายจะมีลักษณะเป็นบานตรงที่ทำหน้าที่ปิดกั้นและรับแรงกระทำจากน้ำ 2 ด้าน คือทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ รูปแบบมาตรฐานทั่วไปบานมักมีความกว้างมาก (ส่วนใหญ่ 30 เมตร หรือมากกว่า) จึงเรียก Long span leaf wheel gate หรือ Leaf wheel gate ที่ประกอบขึ้นมาจากโครงเหล็กและแผ่นโลหะ จากการที่บานรับแรง 2 ด้านและมีความกว้างมากทำให้โครงเหล็กที่เป็นคานของบานจึงมีขนาดใหญ่ตัวบานจึงมีรูปร่างที่คล้ายฝายที่ส่วนบนจะมนโค้งเพราะมักออกแบบให้น้ำไหลส้นข้ามไปได้ด้วย

2) ที่เขื่อนแห่งเดียวกันจะมีหลายช่องประตู มักออกแบบให้มี Leaf wheel gate หลายรูปแบบและหลายขนาดก็ได้ ขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งานและลักษณะที่ต้องการควบคุมน้ำ ซึ่งมักมีรูปแบบในช่วงการเก็บกักน้ำที่ยังไม่ยกบานให้น้ำไหลลอดออกไปดังนี้ (1) แบบที่มีความสูงของ

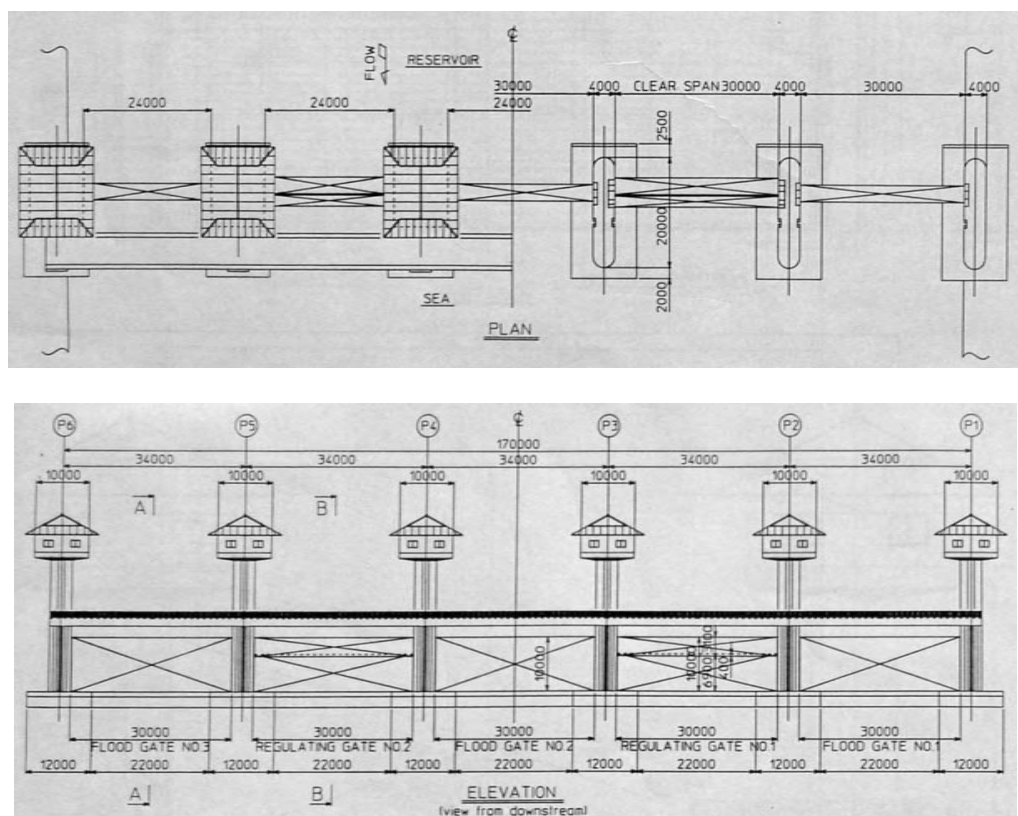
สันคงที่เท่าระดับน้ำสูงสุด (2) แบบที่มีระดับสันต่ำสุดเท่าระดับน้ำเก็บกัก (3) แบบที่สามารถปรับให้มีระดับใดๆ ก็ได้ ระหว่างระดับน้ำสูงสุดกับระดับที่ต่ำกว่าระดับเก็บกัก

3) **Leaf wheel gate** ทำหน้าที่เป็นได้ทั้งลักษณะฝายและบานระบาย นั่นคือสภาพปกติจะวางบนฐานคอนกรีตเพื่อทำหน้าที่ปิดกั้นเก็บกักน้ำ เมื่อต้องการพร่องน้ำหรือระบายน้ำทำโดยยก **Leaf wheel gate** ขึ้นให้น้ำไหลลอดใต้บานออกไป บางแบบอาจลดระดับสันให้ต่ำลงเพื่อให้ น้ำไหลข้ามออกไป

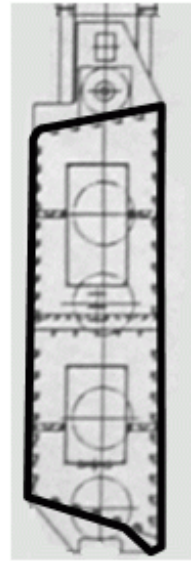
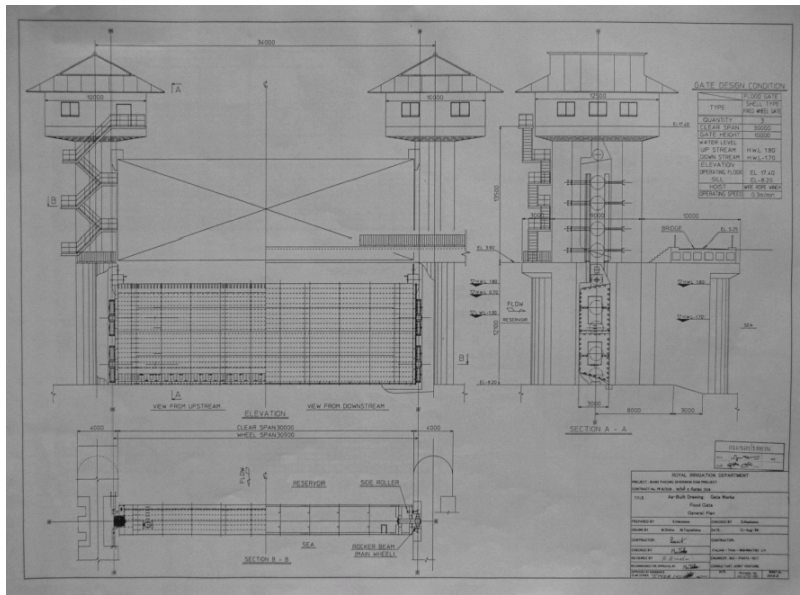
4) **Leaf wheel gate** ตามลักษณะย่อยที่กล่าวข้างต้น อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

(4.1) **Single leaf wheel gate** เป็นบานที่จะมีหน้าตัดขนาดเดียว

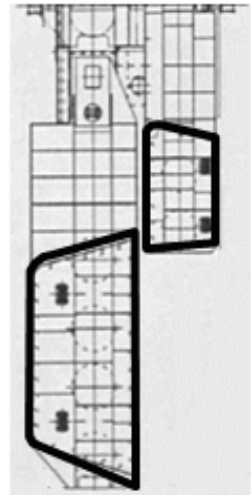
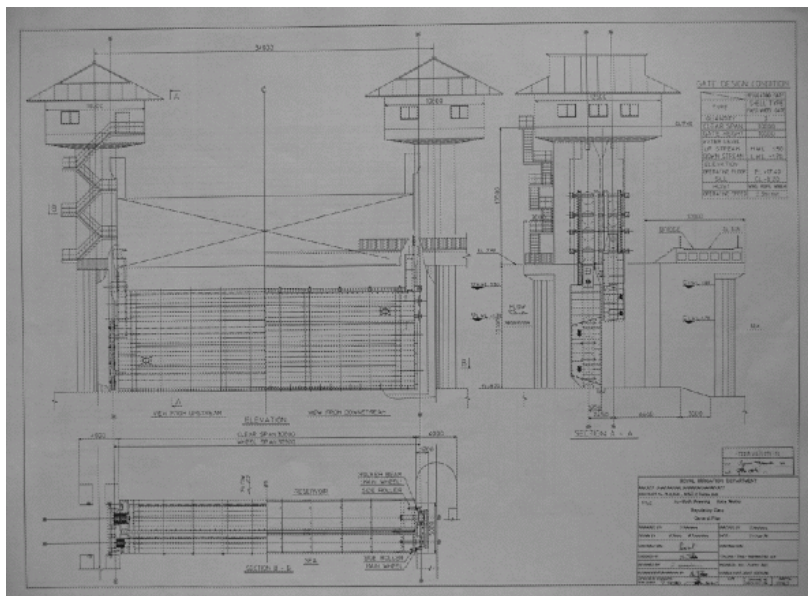
(4.2) **Multi leaf wheel gate** เป็นบานที่จะมีหลายขนาดหน้าตัดในบานเดียวกัน ส่วนใหญ่มักมี 2 ขนาดซึ่งเรียก **Double leaf wheel gate**



รูปที่ 12-38 ตัวอย่างแปลนและรูปด้านท้ายน้ำของเขื่อนระบายน้ำที่ควบคุมด้วย Long span leaf wheel gate (เขื่อนบางปะกง)



รูปที่ 12-39 แบบลักษณะของ Single leaf wheel gate
เป็นบานที่จะมีหน้าตัดขนาดเดียว (เขื่อนบางปะกง)



รูปที่ 12-40 แบบลักษณะของ Double leaf wheel gate
เป็นบานที่จะมีหน้าตัด 2 ขนาด (เขื่อนบางปะกง)



รูป ก.

รูป ก. แสดงสันของบานที่มีลักษณะรูปแบบของฝาย



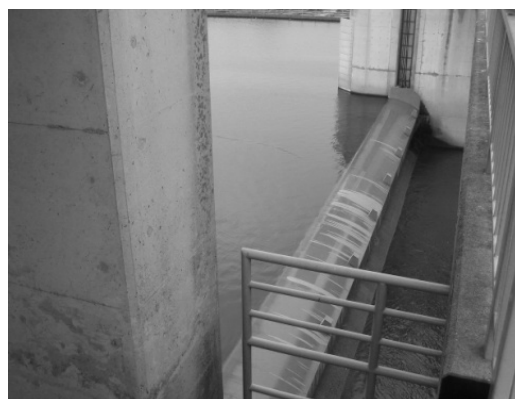
รูป ข

รูป ข. แสดงลักษณะการไหลตลอดของน้ำในรูปแบบของบานระบาย



รูป ค.

รูป ค. แสดงลักษณะการไหลข้ามของน้ำในรูปแบบของฝาย



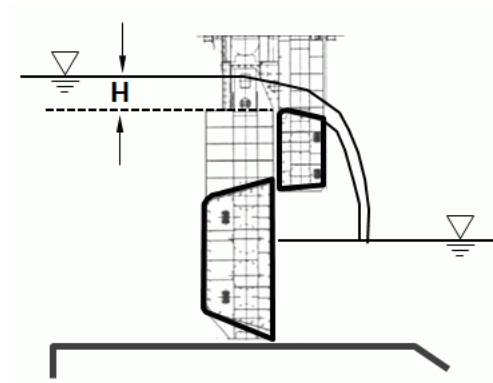
รูป ง.

รูป ง. แสดงลักษณะการทำหน้าที่เก็บกักน้ำในรูปแบบของฝายหรือบานระบาย

รูปที่ 12-41 แสดง Long span leaf wheel gate ของโครงการระบายน้ำในญี่ปุ่น
โดยที่อาคารแห่งเดียวกันมีบานระบายที่ทำหน้าที่หลายรูปแบบ

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารที่ควบคุมด้วย Leaf wheel gate

1) กรณีน้ำไหลล้นข้ามสันออกไป เป็นการไหลลักษณะของฝายสันกว้าง ที่เป็นการไหลแบบ Free flow เพราะส่วนใหญ่ระดับสันจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ทั้งนี้จะมีบาน 2 ลักษณะคือ บานที่มีระดับสันคงที่ที่ระดับน้ำเก็บกักเมื่อระดับน้ำสูงกว่าระดับเก็บกักก็จะไหลข้ามออกไป กับบานที่สามารถปรับลดระดับให้ต่ำกว่าระดับ รนค. ได้



รูปที่ 12-42 แสดงการไหลข้าม Long span leaf wheel gate

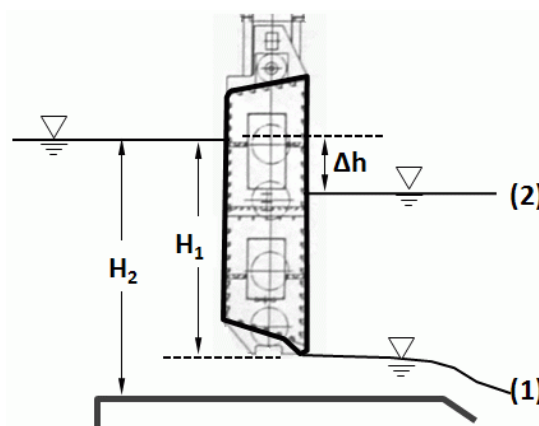
การคำนวณปริมาณน้ำใช้หลักการไหลผ่านฝาย

$$Q = CLH^{3/2}$$

- เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลข้ามสันฝาย $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$
 C = สัมประสิทธิ์ในการระบายน้ำข้ามสันฝาย
 (ต้องสอบเทียบหาค่า C แต่อาจใช้ค่าโดยประมาณ 1.82)
 L = ความกว้างของช่องประตู (ความยาวสันฝาย) ม.
 H = ความลึกของน้ำนิ่งด้านหน้าฝายเหนือสันฝาย ม.

2) กรณียกให้น้ำไหลลดบานออกไป เป็นการไหลลักษณะของบานระบายแบบบานตรง

- 2.1) การไหลแบบ Free flow ดังรูปที่ 12-43 ระดับน้ำด้านท้าย (1)
 2.2) การไหลแบบ Submerged flow ดังรูปที่ 12-43 ระดับน้ำด้านท้าย (2)



ระดับน้ำด้านท้าย (1) กรณี Free flow (2) กรณี Submerged flow

รูปที่ 12-43 แสดงการไหลลด Long span leaf wheel gate

* การคำนวณอัตราการไหล จากหัวข้อ 12.3.2 บานระบายชนิดบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate) ข้อย่อย ก. กรณีเปิดบานระบายบางส่วน (Partial gate opening)

3) กรณียกบานพื้นน้ำ เมื่อต้องการให้มีการระบายน้ำปริมาณมากที่สุด ซึ่งระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับด้านท้ายน้ำมักต่างกันไม่มาก

* การคำนวณอัตราการไหล จากหัวข้อ 12.3.2 บานระบายชนิดบานตรง (Vertical lift gate or Sluice gate) ข้อย่อย ข. กรณีเปิดบานระบายพื้นน้ำ (Fully gate opening)

ตัวอย่างอาคาร Movable weir ในประเทศไทย ที่มีการควบคุมด้วย Leaf wheel gate ได้แก่ เขื่อนบางปะกง จังหวัดปราจีนบุรี



รูปที่ 12-44 เขื่อนบางปะกง จังหวัดปราจีนบุรี



Single leaf wheel gate มีหน้าตัดขนาดเดียว

และ Double leaf wheel gate มีหน้าตัด 2 ขนาด

รูปที่ 12-45 ลักษณะบานระบายของเขื่อนบางปะกงเมื่อยกบานพ้นน้ำ

12.6 ข้อเสนอแนะในการควบคุมและการคำนวณปริมาณน้ำ ของฝายระบายน้ำ และประตูระบายน้ำ

12.6.1 ข้อเสนอแนะในการควบคุม

1) อาคารที่มีบานระบายหลายช่อง ควรเปิดบานแต่ละช่องเท่ากัน เพื่อให้เกิดความสมดุลในการที่ตอม่อได้รับการถ่ายแรงจากกระทำของน้ำผ่านตัวบานระบาย หากต้องการระบายน้ำเพียงเล็กน้อยโดยเปิดบานบางช่วงควรเปิดบานช่วงกลางของอาคาร

2) การเปิดบานระบายต้องเพิ่มขนาดที่ละน้อยเพื่อให้ระดับน้ำด้านท้ายไม่เพิ่มอย่างรวดเร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้ลดการกัดเซาะการพังทลายของลำน้ำด้านท้ายน้ำได้มาก และควรเปิดบานช่วงกลางก่อน

12.6.2 ข้อเสนอแนะในการคำนวณปริมาณน้ำ

1) กรณีเกิดการไหลในลักษณะฝายการคำนวณความยาวของสันฝาย (L) ซึ่งเป็นช่วงความกว้างของช่องประตู ต้องคิดเป็นความยาวประสิทธิผล (L_e) หรือความยาวที่หักค่าการบีบตัวเนื่องจากอิทธิพลของตอม่อ ที่ได้นำเสนอแล้วในบทที่ 8 หัวข้อ 8.4.1 ค่าตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝาย $[L = L' - 2(NK_p + K_a)H]$

2) กรณีเกิดการไหลในลักษณะของบานระบายให้คำนวณการไหลของบานแต่ละช่องแยกกันอย่างอิสระและไม่ต้องการบีบตัวเหมือนกรณีฝายข้างต้น เพราะได้คิดไว้แล้วในรูปแบบการไหลของ Orifice ขนาดใหญ่

บทที่ 13

อาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ และระบบท่อ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอาคารที่โครงสร้างมีท่อเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งได้แก่ ระบบท่อปิดที่ใช้ในระบบส่งน้ำเพื่อการประปา, ชลประทานระบบท่อ, ระบบระบายน้ำ และกัลกน้ำ เป็นต้น กับอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อที่มักก่อสร้างไว้เป็นอาคารหลักของหัวงาน และอาคารในระบบส่งน้ำหรือระบบระบายน้ำ

13.1 รูปแบบของการไหลของน้ำไหลผ่านท่อ

การไหลของน้ำผ่านท่อมี 2 รูปแบบ คือ

- (1) การไหลแบบเต็มท่อหรือการไหลภายใต้ความดัน (หัวข้อ 13.1.1)
- (2) การไหลแบบไม่เต็มท่อ เป็นการไหลภายใต้แรงดึงดูดของโลก ที่ผิวหน้าของน้ำในท่อจะสัมผัสกับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นลักษณะการไหลในทางน้ำเปิด (หัวข้อ 13.1.2)

13.1.1 การไหลแบบเต็มท่อหรือการไหลภายใต้ความดัน

เป็นการไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อและอยู่ภายใต้ความดัน การส่งน้ำผ่านระบบท่อมีข้อดีที่สามารถวางท่อไปในแนวตรงแนวใดก็ได้ มีการสูญเสียจากการระเหยและรั่วซึมน้อย มีการรับมลพิษภายนอกเข้ามาในระบบน้อยมาก เมื่อเทียบกับทางน้ำเปิดที่ต้องวางแนวไปตามชั้นความสูงของพื้นดิน (Contour) มีการสูญเสียจากการระเหยและรั่วซึมและมลพิษสามารถเข้าสู่ระบบได้มาก

ระบบท่อปิดนั้นมักเป็นระบบขนส่งของไหล เช่น ระบบส่งน้ำเพื่อการประปา เพื่อการชลประทาน (ชลประทานระบบท่อ), ระบบการลำเลียงแก๊สหรือน้ำมัน, ระบบท่อในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น กับระบบท่อปิดที่มีขนาดเล็กหรือสั้นๆ ได้แก่ กัลกน้ำ (Siphon/ Syphon), ท่อรับน้ำหรือท่อทิ้งน้ำ เป็นต้น

13.1.1.1 การแบ่งประเภทการไหลในท่อ

ประเภทการไหลในท่อนั้น Osborne Reynolds วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้ทำการทดลองพบว่า การไหลในท่อแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

- 1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ความเร็วของการไหลในท่อช้าๆ น้ำไหลราบเรียบ
- 2) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition Flow) ความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้น จนน้ำเริ่มมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเกิดขึ้น ก่อนจะเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
- 3) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) น้ำไหลแรงมาก กระแสน้ำหมุนวนปั่นป่วน

นอกจากนี้การไหลในท่อจะมีความสัมพันธ์กับ อัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia Force) ต่อแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล (Viscous Force) ซึ่งเรียกอัตราส่วนนี้ว่า ค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number: N_R หรือ Re)

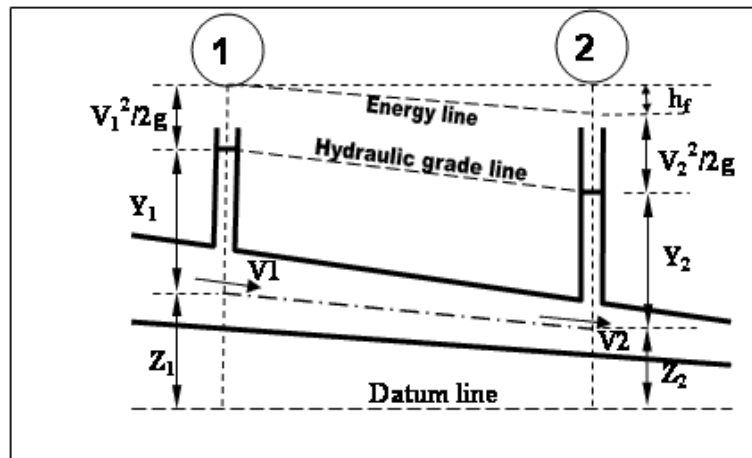
$$N_R = \frac{\text{Inertia Force}}{\text{Viscous Force}}$$

$$N_R = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu}$$

- เมื่อ V = ความเร็วการไหลในท่อ
 D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ
 ν = ความหนืดเปรียบเทียบ
 μ = ความหนืดพลวัต
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล
 R = รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius) = A/P
 A = หน้าตัดการไหล
 P = เส้นขอบเปียก (Wetted Parameter)

ชนิดของการไหลในท่อ	N_R
การไหลแบบราบเรียบ	$N_R < 2000$
การไหลแบบเปลี่ยนแปลง	$2000 < N_R < 4000$
การไหลแบบปั่นป่วน	$N_R \geq 4000$

13.1.1.2 ขสศาสตร์ของการไหลในท่อกรณีการไหลคงที่



รูปที่ 13-1 แสดงลักษณะขสศาสตร์ของการไหลในท่อ

$$Y_1 = \frac{P_1}{\gamma} \quad \text{และ} \quad Y_2 = \frac{P_2}{\gamma}$$

สมการการไหลต่อเนื่อง

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

สมการพลังงาน

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f$$

$$h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g} + (Z_1 - Z_2)$$

ถ้าขนาดของท่อคงที่ นั่นคือ $V_1 = V_2$

$$\text{ดังนั้น} \quad h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} + (Z_1 - Z_2)$$

ถ้าท่ออยู่ในแนวระดับ นั่นคือ $Z_1 = Z_2$ และขนาดของท่อคงที่

$$\text{ดังนั้น} \quad h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma}$$

13.1.1.3 การสูญเสียพลังงานในระบบท่อ

ระบบท่อนั้นจะประกอบด้วยเส้นท่อ และอุปกรณ์ประกอบท่อได้แก่ ข้อต่อ ข้องอ ประตุน้ำ ทางน้ำเข้า ทางน้ำออก ฯลฯ การไหลในระบบท่อจะเกิดการสูญเสีย 2 ลักษณะ คือ

- การสูญเสียหลัก (Major losses) หรือการสูญเสียในเส้นท่อ เป็นการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืดของของไหล และแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างของไหลกับผนังท่อ
- การสูญเสียรอง (Minor losses) เป็นการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ประกอบท่อ โดยจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียในเส้นท่อ

การสูญเสียในระบบท่อทั้งหมด หรือ Total losses = Major losses + Minor losses

ก. การสูญเสียหลัก (Major losses) หรือการสูญเสียในเส้นท่อวิเคราะห์ได้จากสมการทั่วไปคือ

*** สมการของ Darcy - Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

เมื่อ L = ความยาวท่อ ม.

D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ ม.

V = ความเร็วของการไหลในท่อ ม./วินาที

f = แฟกเตอร์ความเสียดทาน

N_R หรือ R_e = ค่าเรโนลด์นัมเบอร์

การหาค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน : f

กรณีการไหลแบบราบเรียบ เมื่อ $N_R \leq 2000$

$$f = \frac{64}{N_R}$$

กรณีการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อ $N_R \geq 4000$

และเมื่อ ϵ เป็นค่าความขรุขระของผนังท่อ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{N_R \sqrt{f}} \right]$$

หากการไหลปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ N_R จะมีค่ามาก ๆ ทำให้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} \right]$$

ตารางที่ 13-1 ค่า C ความขรุขระของผนังท่อ อาจดูจากคู่มือจากบริษัทผู้ผลิต

ชนิดของท่อ	ค่าความขรุขระของผนังท่อ (ม.ม.)
ท่อเหล็กหมุดย้ำ	0.90 - 9.00
ท่อคอนกรีต	0.30 - 3.00
ท่อไม้	0.18 - 0.90
ท่อเหล็กหล่อ	0.25
ท่อเหล็กอาบสังกะสี	0.15
ท่อเหล็กฉาบยางมะตอย	0.12
ท่อเหล็กดลาด / ท่อเหล็กเหนียว	0.046
ท่อเรียบ / ท่อ PVC	0.0015

*** สมการของ Manning กับการใช้กับการไหลแบบปั่นป่วน

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

เมื่อ V = ความเร็วเฉลี่ย ม./วินาที

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

R = รัศมีชลศาสตร์ = A/P = $D/4$ ม.

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล = $\frac{\pi}{4} D^2$ ม.²

P = เส้นขอบเปียก = πD ม.

S = ความลาดของเส้นพลังงาน = $\frac{h_f}{L}$

L = ความยาวท่อทั้งหมด ม. (ให้คิดความยาวทั้งท่อและอุปกรณ์

ประกอบท่อรวมกัน เพราะถือว่าอุปกรณ์ประกอบท่อมีความยาวน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวท่อ)

แทนค่าได้
$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/2}$$

หรือ
$$V^2 = \frac{R^{4/3}}{n^2} \left(\frac{h_f}{L} \right)$$

$$h_f = \frac{n^2 L V^2}{R^{4/3}}$$

$$h_f = \frac{n^2 L V^2}{\left(\frac{D}{4}\right)^{4/3}}$$

$$h_f = \frac{6.35 n^2 L V^2}{D^{4/3}}$$

กรณีที่อยู่ในเทอมของ Q

$$h_f = \frac{10.29 n^2 L Q^2}{D^{16/3}}$$

ตารางที่ 13-2 สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning : n

วัสดุท่อ	n
ทองเหลือง ทองแดง และแก้ว	0.009 - 0.013
ไม้	0.011 - 0.013
คอนกรีต ผิวเรียบ	0.011 - 0.013
ผิวขรุขระ	0.013 - 0.017
ดินเหนียว	0.011 - 0.017
เหล็กหล่อ ผิวเรียบและเคลือบผิว	0.011 - 0.013
ผิวเรียบและไม่เคลือบผิว	0.012 - 0.015
ผิวขรุขระ ไม่เรียบ	0.015 - 0.035
อิฐ (ซีเมนต์ มอร์ต้า)	0.012 - 0.017
เหล็กเหนียว เหล็กตลาด	0.012 - 0.017
เหล็กหมุดยั่ว	0.013 - 0.017
โลหะลูกฟูก	0.020 - 0.024

*** สมการของ Hazen - Williams

$$V = 0.85 C_H R^{0.63} S^{0.54}$$

เมื่อ C_H คือ สัมประสิทธิ์ของการไหล ขึ้นกับชนิดและอายุการใช้งานของท่อ

R คือ รัศมีชลศาสตร์ (ท่อกลม $R=D/4$)

S คือ ความลาดของเส้นระดับพลังงาน

ตารางที่ 13-3 ค่า C_H สำหรับสมการ Hazen - Williams

ชนิดของท่อ	C_H
ซีเมนต์ไยหิน	140
ทองเหลือง	130 - 140
อิฐ	100
<u>เหล็กหล่อ</u>	
ใหม่ไม่ฉาบผิว	130
เก่า 5 ปี	120
เก่า 10 ปี	110
เก่า 20 ปี	100
เก่า 40 ปี	65 - 80
ฉาบคอนกรีต	130 - 140
ฉาบ Bitumastic enamel	140 - 150
ฉาบน้ำมันดิน	115 - 135
<u>คอนกรีต</u>	
ผิวหยาบ	130
ใช้เหล็กทำแบบ	140
ใช้ไม้ทำแบบ	120
ใช้แรงเหวี่ยงในการผลิต	135
ทองแดง	130 - 140
ท่อดับเพลิง (ฉาบยาง)	135
เหล็กฉาบสังกะสี	120
แก้ว	140
ตะกั่ว	130 - 140
พลาสติก	140 - 150
<u>เหล็ก</u>	
ฉาด้วย Coal - Tar enamel	145 - 150
ท่อใหม่ไม่ฉาบ	140 - 150
หมุดย้ำ	110
ดีบุก	130
ดินเหนียวที่ทำให้กลายเป็นแก้ว	100 - 140

ข. การสูญเสียรอง (Minor losses: h_m)

เป็นการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ประกอบท่อ เช่น ข้อต่อ ข้องอ ประตูน้ำ ข้อลด ข้อขยาย สามทาง ฯลฯ โดยการสูญเสียในส่วนเหล่านี้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเส้นท่อ จึงเรียก การสูญเสียรอง (ในบางกรณีหากท่อมีความยาวมากๆ อาจไม่คิดค่าการสูญเสียรองก็ได้ ซึ่งต้องพิจารณาวิเคราะห์ระบบท่อให้ดี จากจำนวนอุปกรณ์ และความเร็วของน้ำ)

ค่าการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ประกอบท่อใดๆ จะเป็นปฏิกภาคโดยตรงกับเสดความเร็ว

$$h_m = K \frac{V^2}{2g}$$

เมื่อ h_m = ความสูญเสียในอุปกรณ์ใดๆ

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียของอุปกรณ์ใด ๆ

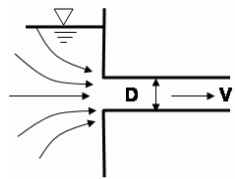
13.1.1.4 อุปกรณ์ประกอบท่อและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

(ได้รวบรวมไว้เพื่อให้มีข้อมูลเรื่องท่อครบถ้วน)

1) ทางเข้าท่อ

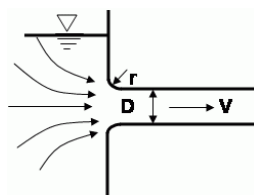
$$h_m = K \frac{V^2}{2g}$$

1.1) ทางเข้าขอบเหลี่ยม



$$K = 0.5$$

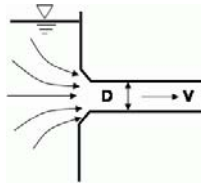
1.2) ทางเข้าขอบมน



r/D	0.08	0.16	0.20	≥ 0.25
K	0.30	0.25	0.21	0.13

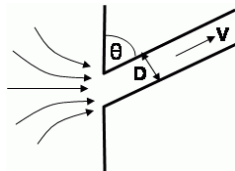
กรณีทางเข้าเป็นแบบปากกระฉัง (Bell-mouth) ซึ่งมีรัศมีโค้งมากๆ $K = 0.05$

1.3) ทางเข้าลบบวม



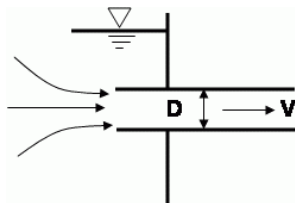
$$K = 0.25$$

1.4) ทางเข้าท่อเอียงทำมุม



α	85°	75°	60°	45°
K	0.53	0.59	0.70	0.74

1.5) ทางเข้าท่อปีกหรือปากท่อยื่นออก



$$K = 1.00$$

1.6) ตะแกรงปิดปากทางเข้า มี 3 ลักษณะให้พิจารณาตัดสินใจ



1.6.1) มีตะแกรงกันสวะหรือขยะด้านหน้าท่อคิดค่าโดยประมาณ

$$K_t = 1.30$$

$$1.6.2) \text{ อาจคิด } K_t = 1.45 - 0.45 \left(\frac{a_n}{a_g} \right) - \left(\frac{a_n}{a_g} \right)^2$$

เมื่อ a_n = พื้นที่ของช่องว่างระหว่างตะแกรง

a_g = พื้นที่รวมของตะแกรงทั้งหมด

1.6.3) ถ้าตะแกรงห่างจากปากท่อกว้างมาก ความเร็วของกระแสน้ำที่ผ่านตะแกรง

คือ V_n จะมีค่าน้อยมากและเป็นคนละค่ากับ V ที่ผ่านระบบท่อ ดังนั้น $h_t = K_t \frac{V_n^2}{2g}$ จึงอาจไม่ต้องคิดก็ได้

2) ทางออก
$$h_m = K \frac{V^2}{2g}$$

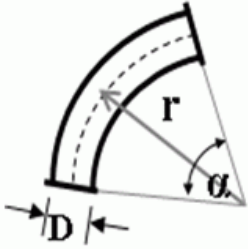
ทางออกอาจมีลักษณะเช่นเดียวกับทางเข้า โดยจะเป็นแบบใดก็ตาม จะถือเสมือนว่าเป็นการเปลี่ยนขนาดทันทีทันใด (Sudden Enlargement) โดยจะมีค่า $K = 1.0$

3) ข้อต่อ ข้องอ

3.1) ข้อต่อตรง ไม่เกิดการสูญเสียตรง (โดยจะคิดเสมือนว่าเป็นตัวท่อ)

3.2) ข้องอ
$$h_m = K \frac{V^2}{2g}$$

3.2.1) ข้อโค้ง ค่า K ขึ้นกับ ค่าสัดส่วนของ รัศมีความโค้งของท่อ กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ: r/D และค่ามุมโค้งของท่อ: α ตามตารางต่อไปนี้

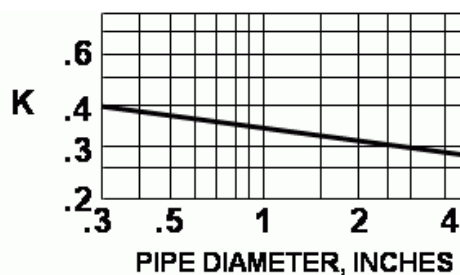


r/D	α			
	90	60	45	22.5
1.0	0.30	0.25	0.21	0.13
2.0	0.16	0.13	0.11	0.05
3.0	0.12	0.10	0.08	0.04
4.0	0.11	0.09	0.06	0.04
5.0	0.09	0.07	0.06	0.03
≥ 6.0	0.08	0.07	0.06	0.03

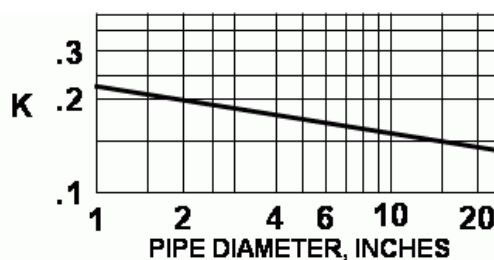
3.2.2) ข้องอ 45 องศา



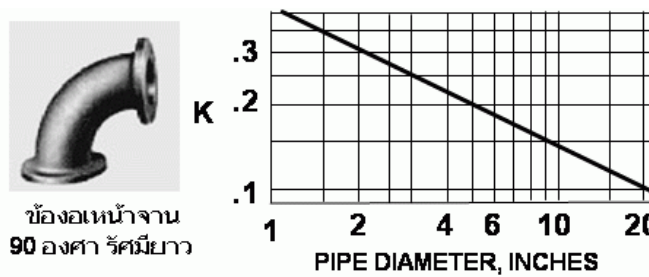
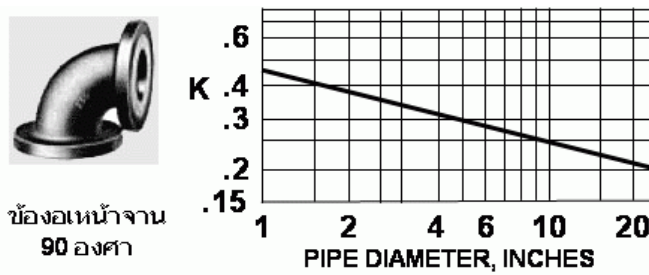
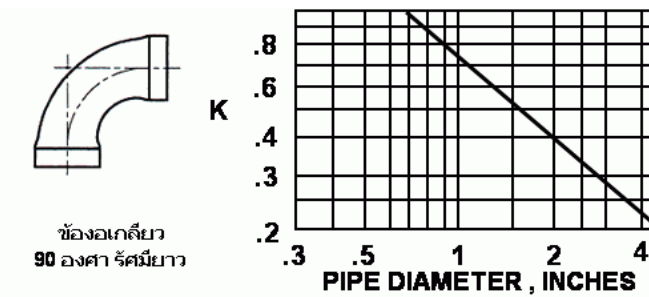
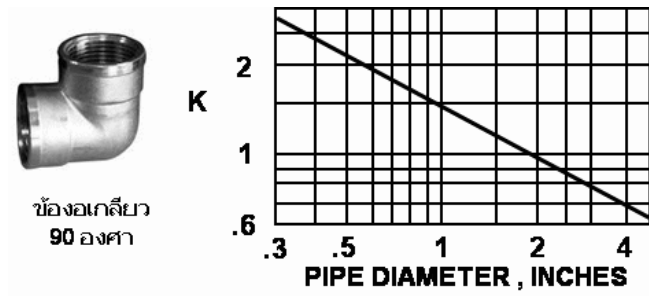
ข้องอเกลียว
45 องศา



ข้องอหน้างาน
45 องศา



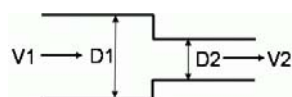
3.2.3) ข้อต่อ 90 องศา



3.3) ข้อต่อลดขนาด

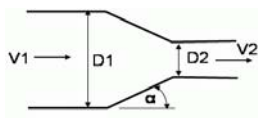
3.3.1) ข้อต่อลดขนาดทันทีทันใด

$$h_m = K \left(\frac{V_2^2}{2g} \right)$$



D2/D1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
K	4.5	4.0	2.5	1.5	0.0

3.3.2) ข้อต่อค่อยๆ ลดขนาด



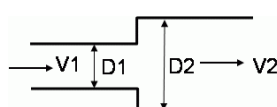
$$h_m = K \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

α	10°	20°	30°	40°
K	0.20	0.28	0.32	0.35

$\alpha/D1$	2.5	5	7.5	10	15	20	30
K	0.06	0.16	0.18	0.20	0.24	0.28	0.32

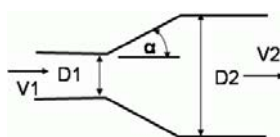
3.4) ข้อต่อขยายขนาด

3.4.1) ข้อต่อขยายขนาดทันทีทันใด



$$h_m = K \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) ; \quad K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$$

3.4.2) ข้อต่อค่อยๆ ขยายขนาด



$$h_m = K \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

α	10°	20°	30°	40°
K	0.39	0.80	1.00	1.06

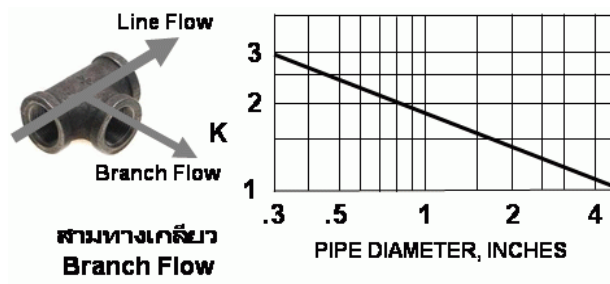
D2/D1	α					
	3°	5°	7.5°	10°	15°	20°
1.25	0.04	0.06	0.10	0.13	0.22	0.29
1.50	0.22	0.31	0.47	0.62	1.09	1.40
1.75	0.60	0.85	1.28	1.70	2.98	3.82
2.00	1.26	1.80	2.70	3.60	6.30	8.10
2.25	2.31	3.30	4.95	6.60	11.60	14.80
2.50	3.86	5.52	8.28	11.00	19.30	24.80
2.75	6.03	8.62	12.90	17.20	30.20	38.80
3.00	8.96	12.80	19.20	25.60	44.80	57.60

3.5) ข้อต่อสามทาง
$$h_m = K \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)$$

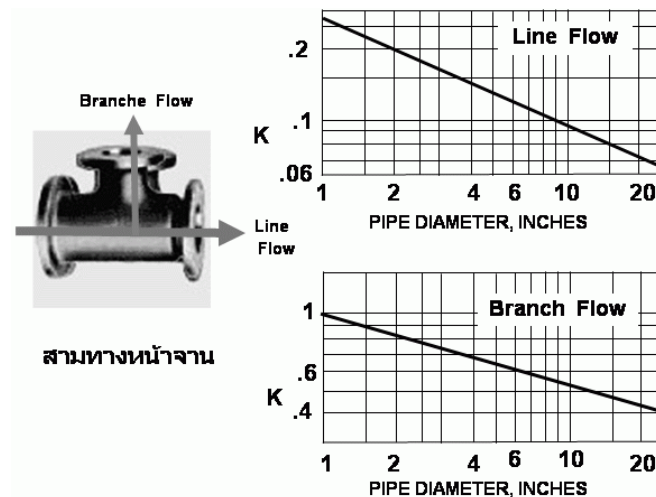
3.5.1) ข้อต่อสามทางแบบเกลียว

กรณีการไหลตามแนวเส้นท่อ (Line Flow) $K = 0.9$

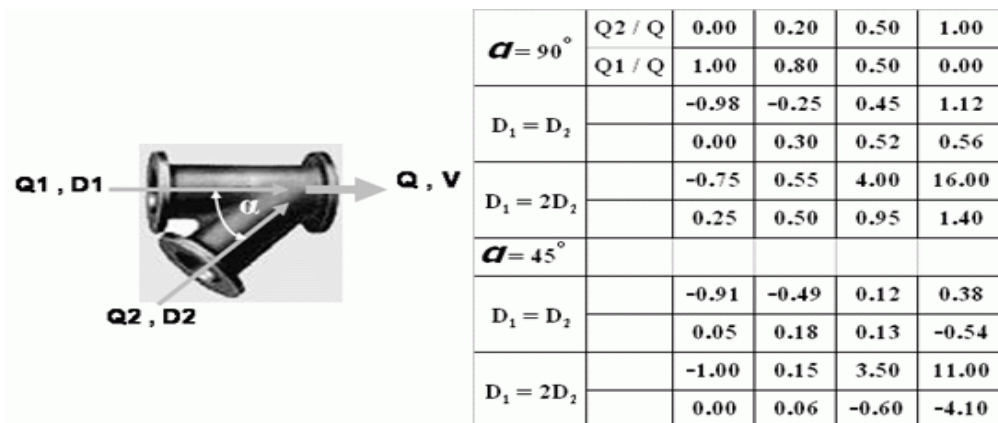
กรณีการไหลเข้าท่อแยก (Branch Flow) ค่า K ตามกราฟ



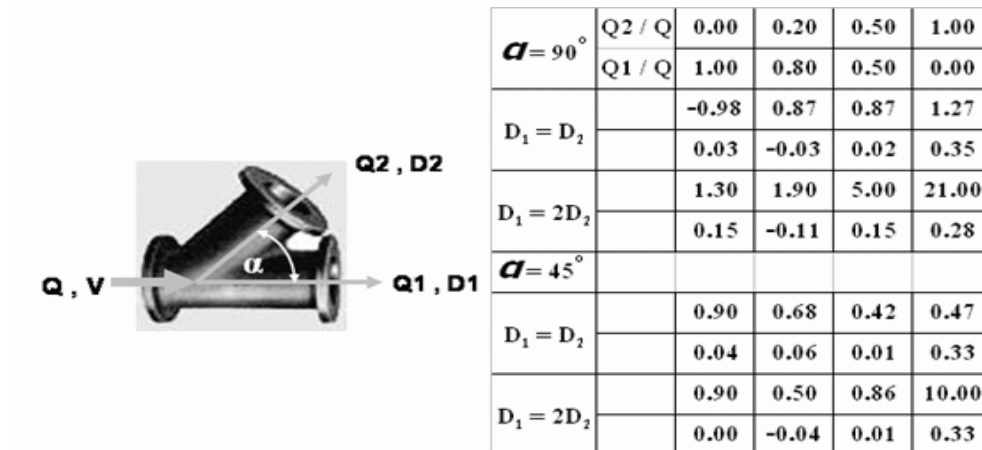
3.5.2) ข้อต่อสามทางแบบหน้าแปลน



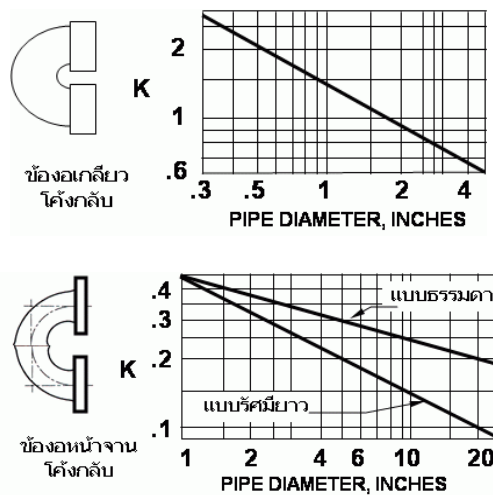
3.5.3) สามทางสาขา รวม



3.5.4) สามทางสาขาแยก



3.6) ข้อโค้งกลับ

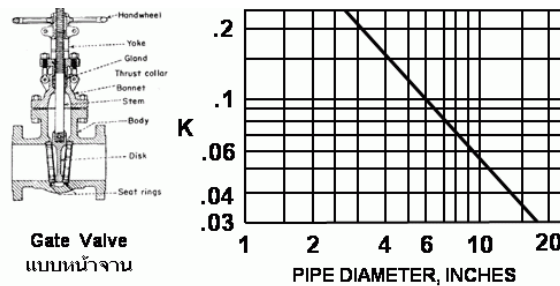
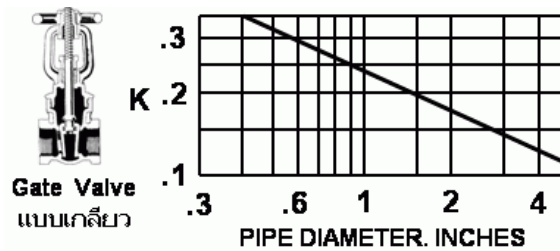


3.7) ประตุน้ำ

$$h_m = K \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)$$

ค่า K พิจารณาจากคู่มือของประตุน้ำนั้นๆ โดยแต่ละแบบแต่ละรุ่นแต่ละบริษัทค่าจะแตกต่างกัน ซึ่งหากเป็นประตุน้ำขนาดใหญ่จะมีการสอบเทียบหาค่า K เป็นการเฉพาะของแต่ละตัว ดังนั้นค่าต่างๆ ที่รวบรวมมาต่อไปนี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางเท่านั้น ค่าที่แท้จริงควรตรวจสอบกับผู้ผลิต

3.7.1) Gate Valve โดยปกติแล้วการต่อ Gate Valve กับระบบปั๊มสูบน้ำจะให้ทำหน้าที่เปิดและปิด จะไม่ใช่เพื่อควบคุมปริมาณน้ำ โดยค่า K กรณีที่มีการเปิดวาล์วเต็มที่แสดงตามกราฟต่อไปนี้



แต่กรณีการใช้ Gate Valve เพื่อควบคุมปริมาณน้ำ ค่า K จะขึ้นกับ อัตราการเปิดวาล์ว โดยวาล์วขนาดใหญ่จะมีการสอบเทียบหาค่าเฉพาะของแต่ละตัวจากโรงงาน ซึ่งค่าทั่วไปอาจแสดงตามตารางต่อไปนี้

เมื่อ z = ระยะเปิดวาล์ว และ D = ขนาดของวาล์วที่เปิดเต็มที่

z / D	1.00	0.80	0.60	0.50	0.40	0.20	0.10
K	0.00	0.19	0.90	2.10	5.00	25.00	1.00

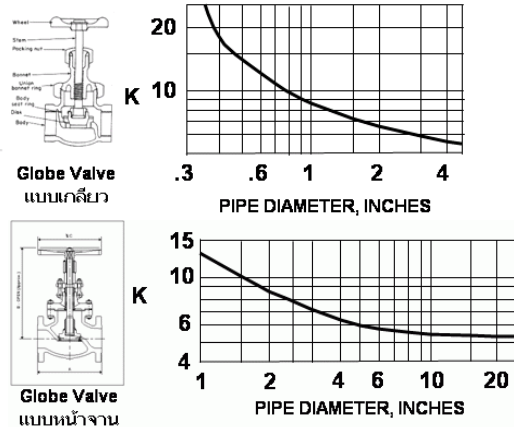
ตัวอย่างคุณสมบัติของ Gate Valve ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 500 ม.ม. (จะมีในคู่มือที่มากับ Valve แต่ละตัว)

Gate Valve 500 ม.ม. $D = 500$ ม.ม. ระยะยกขึ้น 585 ม.ม.

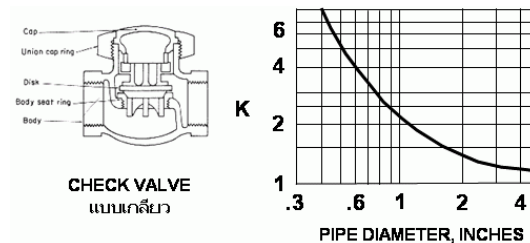
จำนวนรอบ ปิด-เปิดสุด 90 รอบ ระยะต่อรอบ 6.5 ม.ม.

- เปิด 25% หมุน 22.5 รอบ ระยะยกขึ้น 146.25 ม.ม. $K = 24.00$
- เปิด 50% หมุน 45 รอบ ระยะยกขึ้น 292.50 ม.ม. $K = 5.60$
- เปิด 75% หมุน 67.5 รอบ ระยะยกขึ้น 438.75 ม.ม. $K = 1.15$
- เปิด 100% หมุน 90 รอบ ระยะยกขึ้น 585 ม.ม. $K = 0.19$

3.7.2) Globe Valve

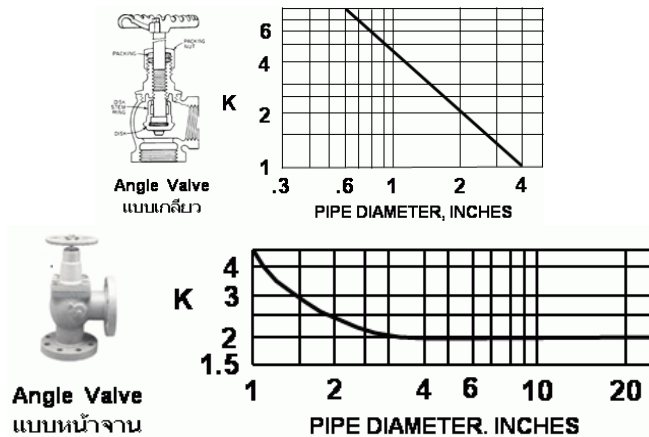


3.7.3) Check Valve



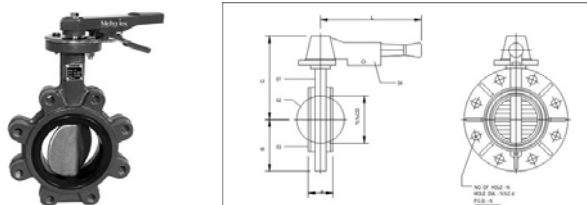
Check Valve แบบหน้างาน $K = 2.0$ ทุกขนาด

3.7.4) Angle Valve

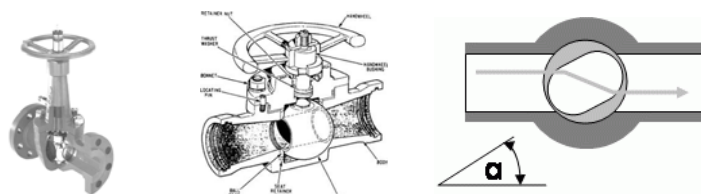


3.7.5) Butterfly Valve

$K = 0.15$



3.7.6) Ball Valve ค่า K ขึ้นกับมุมการหมุนของ ลูก Ball

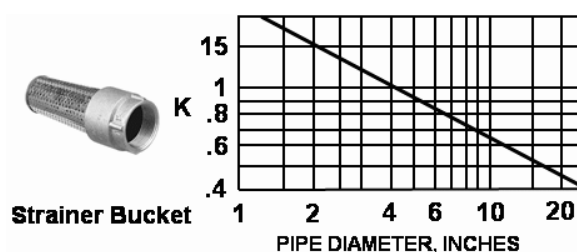


α	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
K	0.05	0.29	1.56	5.47	17.30	25.60	206.00	485.00	∞

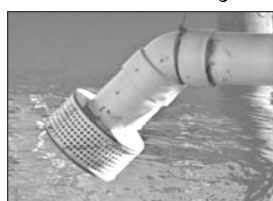
3.7.7) Foot Valve และ Strainer bucket ใช้ติดตั้งที่ทางเข้าท่อของระบบปั๊มสูบน้ำ โดย Foot Valve ทำหน้าที่ปิดกั้นไม่ให้น้ำไหลออกจากท่อดูดของปั๊มเมื่อปิดปั๊มสูบน้ำ ส่วนหัวกะโหลกกรองน้ำ (Strainer bucket) จะดักไม่ให้ขยะเข้าไปในระบบ

- (1) กรณีเป็น Foot valve ไม่มีหัวดักขยะ ใช้ $K = 0.8$ ทุกขนาดท่อ
- (2) กรณีเป็นหัวกะโหลกกรองน้ำอย่างเดียว ไม่มี Foot Valve ค่า K ขึ้นกับรูปร่าง ขนาดของหัวและช่องตะแกรงที่น้ำไหลผ่าน

(2.1) หัวกะโหลกแบบยาวเรียว



(2.2) หัวกะโหลกใหญ่ สั้น ใช้ $K = 5.5$



- (3) กรณี Foot Valve และ Strainer bucket ประกอบด้วยกัน ใช้ $K = 10$



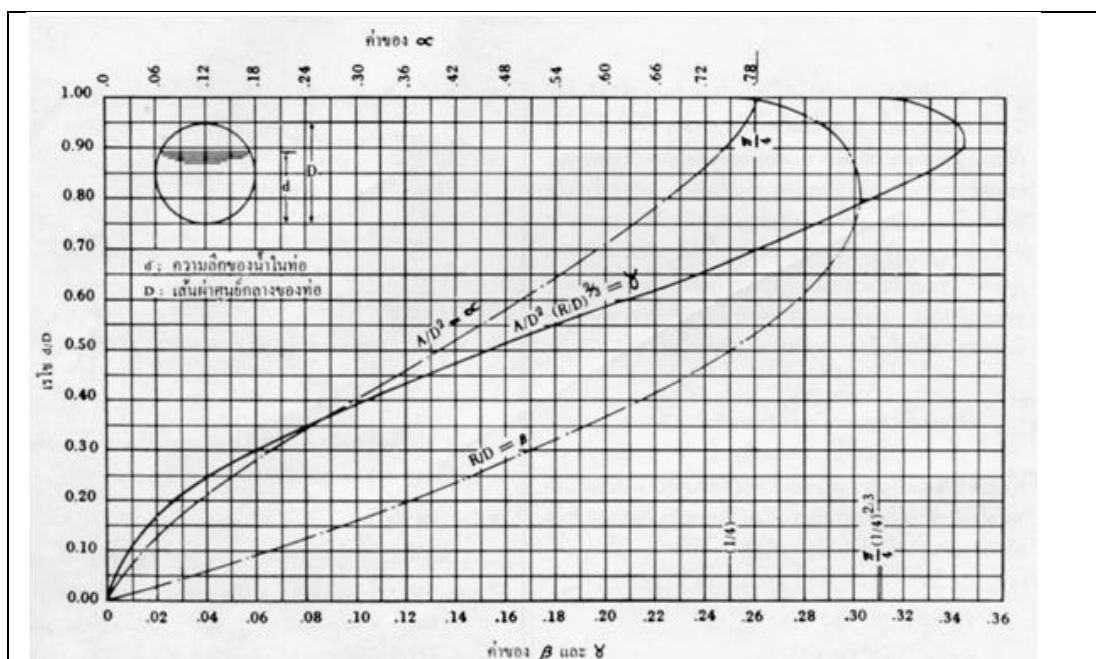
13.1.2 ระบบท่อที่มีการไหลไม่เต็มท่อ (Partial Flow)

เป็นการไหลที่น้ำไหลไม่เต็มท่อภายใต้แรงดึงดูดของโลกในลักษณะของการไหลในทางน้ำเปิด มักได้แก่ ระบบระบายน้ำ (รวมทั้งระบบท่อปิดที่กล่าวข้างต้นที่มีการไหลไม่เต็มท่อด้วย) การออกแบบระบบท่อมักออกแบบให้ระบบสามารถรองรับการไหลสูงสุดที่มีลักษณะการไหลเต็มท่อเสมอ การเกิดการไหลไม่เต็มท่อดำเนินการในระบบระบายน้ำก็ถือว่าเป็นเรื่องปกติเพราะเกิดจากปริมาณน้ำน้อย แต่ถ้าเกิดในระบบส่งน้ำย่อมแสดงถึงการมีปัญหาเกิดในระบบ

ในสภาวะปกติทั่วไปส่วนใหญ่จะไม่มีมาตรวัดปริมาณน้ำของระบบท่อที่มีการไหลไม่เต็มท่อ แต่หากมีความจำเป็นต้องตรวจวัดปริมาณน้ำ ก็สามารถทำได้โดยการคำนวณโดยวิธี Slope-area method หรือการใช้เครื่องมือวัดน้ำที่เหมาะสม เช่น ใช้ Flume ฝ่ายวัดน้ำ เครื่องมือวัดน้ำเชิงกลหรือแบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

❖ การคำนวณการระบายน้ำที่ไหลในท่อคอนกรีตไม่เต็มท่อ

(โดยวิธี Slope-area method)



วิธีใช้กราฟ 1) หาค่า R จากค่า d/D ซ้ายมือลากเส้นไปตัดกราฟ $RD = \beta$ แล้วลากเส้นจากจุดตัด ไปหาค่า β จากแกนราบด้านล่าง แทนค่า β และ D ใน $R = \beta/D$

2) หาค่า A จากค่า d/D ซ้ายมือลากเส้นไปตัดกราฟ $A/D^2 = \gamma$ แล้วลากเส้นจากจุดตัด ไปหาค่า γ จากแกนราบด้านบน แทนค่า γ และ D ใน $A = \gamma D^2$

รูปที่ 13-2 กราฟใช้หาค่า A, R ของท่อกลมเมื่อการไหลไม่เต็มท่อ

คำนวณความเร็วการไหลโดยวิธี Slope-area method โดยใช้สมการของ

Manning

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = VA$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

จากกราฟใน รูปที่ 13-2 $A = \propto D^2$ และ $R = \beta D$

แทนค่าของ A และ R ในสมการ Q จะได้

$$Q = \frac{\alpha D^2}{n} (\beta D)^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \alpha \beta^{2/3} D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n}$$

แต่ $\alpha \beta^{2/3} = \delta$

ดังนั้น $Q = \delta D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n}$

จากกราฟใน รูปที่ 13-2 ค่าของ $\propto$, β และ δ หาได้ตาม Ratio ของความลึกของน้ำที่ไหลในท่อต่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อระบายนั้น จนถึง Ratio เท่ากับ 1.0 คือเมื่อมีน้ำไหลเต็มท่อ

เพื่อความสะดวกและความรวดเร็วในการคำนวณ จึงได้มีการคำนวณค่าของ $D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n}$ เมื่อ $n = 0.017$ (ท่อคอนกรีตมีรอยต่อท่อแต่ละท่อน) และ D เป็นขนาดท่อ ส่วนค่าของ S มีตั้งแต่ 1:100 จนถึง 1:5,000 ดังปรากฏในตารางที่ 13-4

ตารางที่ 13-4 ค่าของ $D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n}$ สำหรับท่อคอนกรีต เมื่อ ค่า $n = 0.017$

φ ท่อ (ซ.ม.)	ค่าของ S ต่าง ๆ						
	1/100	1/500	1/1000	1/2000	1/3000	1/4000	1/5000
30	0.2373	0.1061	0.0750	0.0531	0.0433	0.0375	0.0336
40	0.9264	0.4143	0.2930	0.2072	0.1691	0.1465	0.1310
60	1.5064	0.6737	0.4764	0.3369	0.2750	0.2382	0.2130
80	3.2443	1.4509	1.0259	0.7255	0.5923	0.5130	0.4588
100	5.8824	2.6307	1.8602	1.3153	1.0740	0.9301	0.8319
120	9.5654	4.2778	3.0248	2.1389	1.7464	1.5124	1.3527
150	17.3431	7.7561	5.4844	3.8780	3.1664	2.7422	2.4527

ตัวอย่าง หาอัตราการไหลของน้ำระบายผ่านท่อระบายน้ำคอนกรีตขนาด ϕ 100 ซม. น้ำไหลในท่อไม่เต็มท่อ มีส่วนลึกของน้ำในท่อ 40 ซม. ระดับน้ำหน้าท่อและท้ายท่อต่างกัน 3.0 ซม. ท่อมีความลาด 1: 1,500

จากกราฟใน รูปที่ 13-2 เมื่อ $d/D = 0.40$ จะได้ค่าของ $\delta = 0.105$ และ $\alpha = 0.2934$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } Q &= \delta D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n} \\ &= 0.105 \left(1.0^{8/3}\right) \left(\frac{3}{1500}\right)^{1/2} \frac{1}{0.017} \\ &= 0.105 \times 0.0447 \times \frac{1}{0.017} \\ &= 0.105 \times 2.6294 \\ &= 0.276 \quad \text{ม}^3. / \text{วินาที} \end{aligned}$$

$$V = Q/A$$

$$\begin{aligned} A &= \alpha D^2 = 0.2934 \times (1)^2 \\ &= 0.2934 \quad \text{ม}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= 0.276 / 0.2934 \\ &= 0.941 \quad \text{ม. / วินาที} \end{aligned}$$

ถ้าคำนวณโดยใช้ค่าต่าง ๆ จาก ตารางที่ 13-4

$$\text{เมื่อ } D = 1.0 \text{ ม. (100 ซม.)} \quad ; \quad S = 3 / 1500 = 1: 500$$

$$D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n} = 2.6294 \quad ; \quad \delta = 0.105$$

$$\text{ดังนั้น } Q = \delta D^{8/3} \frac{S^{1/2}}{n} = 2.6294 \times 0.105 = 0.276 \quad \text{ม}^3. / \text{วินาที}$$

13.2 การตรวจวัดคำนวณปริมาณน้ำในระบบท่อ

การตรวจวัดคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับท่อในงานชลประทานที่จะนำเสนอในที่นี้จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การตรวจวัดในระบบท่อปิด ซึ่งใช้ในระบบท่อของระบบประปา และการชลประทานระบบท่อ กับ การตรวจวัดปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ

13.2.1 หลักการตรวจวัดปริมาณน้ำในระบบท่อปิด

ในระบบท่อปิดที่ใช้สำหรับลำเลียงของไหล ควรมีมาตรสำหรับวัดอัตราการไหลติดตั้งไว้ด้วยเสมอ ซึ่งการวัดอัตราการไหลมีประโยชน์สำคัญ 2 ประการด้วยกัน คือ (1) ช่วยในการตรวจสอบการทำงานของระบบท่อและใช้ควบคุมอัตราการไหลในระบบ (2) ช่วยให้ผู้สามารถเก็บสถิติปริมาณการไหลในช่วงระยะเวลาต่างๆ โดยในทางปฏิบัติการตรวจวัดในระบบท่อปิดนั้นจะตรวจวัด 2 ลักษณะ คือ

ก. การวัดปริมาณการใช้น้ำของจุดใช้น้ำใดๆ โดยการติดตั้งมาตรหรือมิเตอร์วัดน้ำเพื่อให้ทราบว่าผู้ใช้น้ำของจุดใช้น้ำนั้นได้ใช้น้ำไปเป็นจำนวนเท่าใด (เป็นลิตรหรือลูกบาศก์เมตร) หรือเพื่อที่จะได้คิดค่าใช้จ่ายได้ถูกต้อง

ข. การตรวจวัดในระบบท่อ เพื่อให้รู้ว่าระบบสามารถทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุดหรือถูกต้องตรงตามค่าที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ นอกจากนี้ทำให้รู้ว่ามีย่อหรืออุปกรณ์ในระบบส่วนใดเกิดการแตกหักชำรุดเสียหายหรือไม่ การตรวจวัดจะใช้มาตรวัดอัตราการไหลในระบบท่อที่แบ่งตามหลักการทำงานได้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1) มาตรประเภทเทียบอัตราการไหลกับผลต่างของความดัน (Differential Head Meters) เป็นมาตรที่มีราคาถูก ติดตั้งได้กับระบบท่อทุกขนาด ทั้งระบบส่งน้ำเพื่อการประปา และการชลประทานระบบท่อ มักติดตั้งมาตรประเภทนี้ ซึ่งได้แก่

1.1) มาตรคอขวด (Constriction Meters) ลักษณะสำคัญ คือ จะมีบริเวณที่มีลักษณะเป็นคอขวดหรือรูให้น้ำไหลลอดผ่านด้วยความเร็วสูง ได้แก่ Venturi meter, Nozzle meter และ Orifice meter

1.2) มาตรข้องอ (Elbow meter or Bend meter)

1.3) พิโตมิเตอร์ (Pitometer) หรือ Pitot tube

2) มาตรประเภทเทียบอัตราการไหลกับตำแหน่งของทุ่นลอย (Rotameter)

3) มาตรประเภทเทียบอัตราการไหลกับการเคลื่อนที่เชิงกล (Mechanical meters)

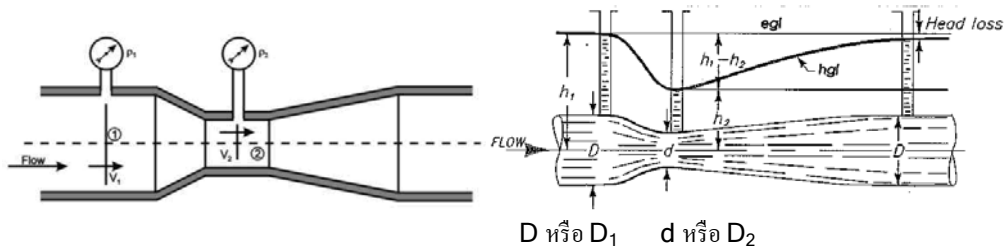
4) มาตรประเภทอิเล็กทรอนิกส์ เช่น Vortex flow meter, Magnetic flow meter, Ultrasonic flow meter

5) มาตรประเภทอื่นๆ

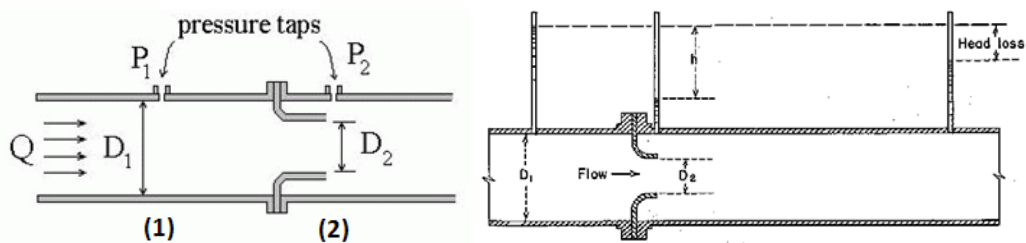
หลักการตรวจวัดและข้อมูลของมาตรดังกล่าวจะอธิบายในหัวข้อถัดไป โดยจะนำเสนอข้อมูลที่เป็นรายละเอียดเฉพาะมาตรที่นิยมใช้ในระบบชลประทานระบบท่อเท่านั้น

13.2.2 มาตรคอคอด (Constriction Meter)

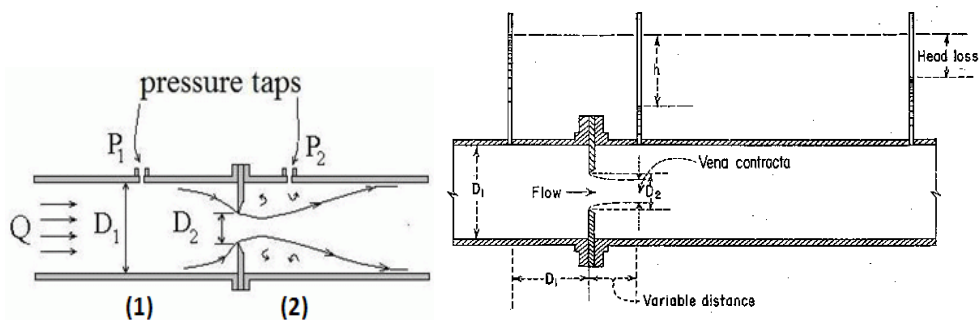
เป็นมาตรประเภทเทียบอัตราการไหลกับผลต่างของความดัน เมื่อมีการไหลผ่านส่วนแคบในท่อจะทำให้เกิดความเร็วมเพิ่มขึ้นในขณะที่ความดันจะลดลง ผลต่างของความดันที่ลดลงระหว่างความดันในท่อน้ำตัดปกติที่ไม่ถูกรบกวนกับความดันในส่วนแคบจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลผ่านท่อ มาตรวัดในลักษณะนี้ได้แก่ Venturi meter, Nozzle meter และ Orifice meter



รูปที่ 13-3 Venturi meter



รูปที่ 13-4 Nozzle meter



รูปที่ 13-5 Orifice meter

จากรูปที่ 13-3, รูปที่ 13-4 และ รูปที่ 13-5 หน้าตัด (1) เป็นหน้าตัดปกติของท่อ และหน้าตัด (2) เป็นหน้าตัดคอคอด การวัดความดันที่ตำแหน่งหน้าตัด (1) และ (2) อาจใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) ที่วัดความแตกต่างความดันจากระดับปรอท หรือใช้มาตรวัดความดัน (Pressure gage) ก็ได้

การประยุกต์ใช้สมการพลังงานของ Bernoulli ระหว่างหน้าตัด (1) และ (2) โดยไม่คิดการสูญเสียพลังงาน และเมื่อเปลี่ยนความเร็ว V ให้อยู่ในเทอมของอัตราการไหล Q จะได้

$$Q_{ทฤษฎี} = \frac{A_2}{[1 - (A_2 / A_1)^2]^{1/2}} \cdot \left[2g \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - z_2 - \frac{P_2}{\gamma} \right) \right]^{1/2}$$

การไหลในสภาพจริงมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น จึงต้องปรับด้วยค่าสัมประสิทธิ์การไหล C_d เป็นอัตราการไหลจริง Q คือ

$$Q = \frac{C_d A_2}{[1 - (A_2 / A_1)^2]^{1/2}} \cdot \left[2g \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - z_2 - \frac{P_2}{\gamma} \right) \right]^{1/2}$$

$$\text{หรือ } Q = \frac{C_d A_2}{[1 - (D_2 / D_1)^2]^{1/2}} \cdot \left[2g \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - z_2 - \frac{P_2}{\gamma} \right) \right]^{1/2}$$

เมื่อ C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของมาตรคอคอดตัวนั้น

P_1 คือ ความดันที่หน้าตัดปกติของท่อ [หน้าตัด (1)] (Pa หรือ N/m²)

P_2 คือ ความดันที่หน้าตัดคอคอด [หน้าตัด (2)] (Pa หรือ N/m²)

A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดคอคอด [หน้าตัด (2)] (m²)

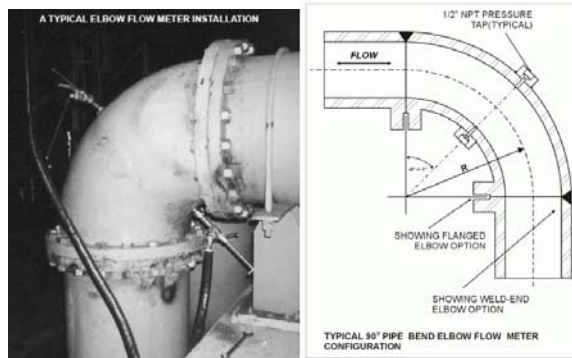
$\gamma = \rho g$ ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

z_1 และ z_2 คือตำแหน่งตรวจวัด P_1 และ P_2

แนวของการติดตั้งมาตรคอคอดนั้น จะพิจารณาจากความสะดวกในการที่จะอ่านค่าจากมาตรวัดความดัน ซึ่งจะมีผลต่อการตรวจวัดด้วย โดยถ้าติดตั้งแนวราบ ผลต่างของ z_1 และ z_2 จะเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าติดตั้งแนวตั้ง ผลต่างของ z_1 และ z_2 จะเท่ากับระยะห่างของจุดวัดความดัน P_1 และ P_2

เพื่อให้การวัดมีความละเอียดถูกต้อง ควรให้ความยาวของช่วงตรงอย่างน้อย 6 ถึง 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อยู่ก่อนถึงตัวมาตร และ 3 ถึง 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อยู่หลังตัวมาตร

13.2.3 มาตรข้องอ (Elbow meter or Bend meter)



รูปที่ 13-6 มาตรข้องอ (Elbow meter or Bend meter)

อัตราการไหลจริง Q คือ

$$Q = C_d A [2g\Delta h]^{1/2}$$

เมื่อ Δh คือ ผลต่างของ Head ระหว่างโค้งด้านนอกและด้านในของข้องอ
 C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของมาตรข้องอ

$$C_d = \sqrt{\frac{R}{2D}} \quad \text{สำหรับข้องอ } 90^\circ$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

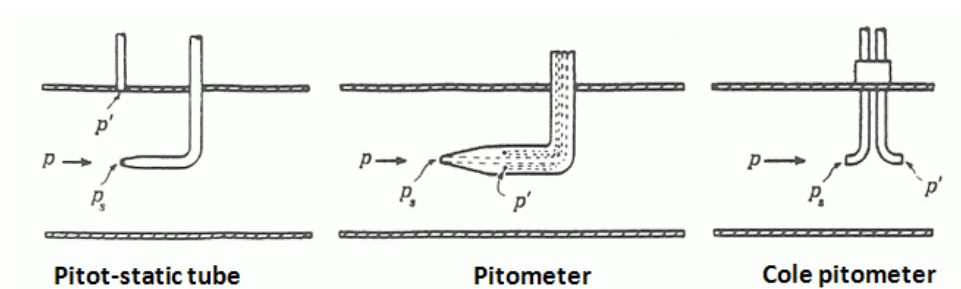
D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อหรือข้องอ

R คือ รัศมีที่วัดถึงกึ่งกลางของข้องอ (R จะต้องมีค่าน้อยกว่า $1.5 D$)

13.2.4 พิโตมิเตอร์ (Pitometer)

Pitometer เป็นมาตรวัดที่ใช้ตรวจวัดความเร็วการไหลที่จุดใด ๆ ในระบบท่อ (หลักการของ Pitot tube ได้เสนอแล้วในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.5) มาตรวัดชนิดนี้จะมีลักษณะของเครื่องมือ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 13-7 คือ

- 1) Pitot-static tube 2) Pitometer 3) Cole pitometer



รูปที่ 13-7 พิโตมิเตอร์ (Pitometer)

สมการหาความเร็วของกระแสน้ำที่วัดโดยใช้พิโตมิเตอร์ คือ

$$V = C_1 \left[\frac{2g(p_s - p')}{\gamma} \right]^{1/2}$$

เมื่อ C_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของมาตรพิโตมิเตอร์

Pitot-static tube ≈ 0.98

Pitometer ≈ 0.98

Cole pitometer ≈ 0.95

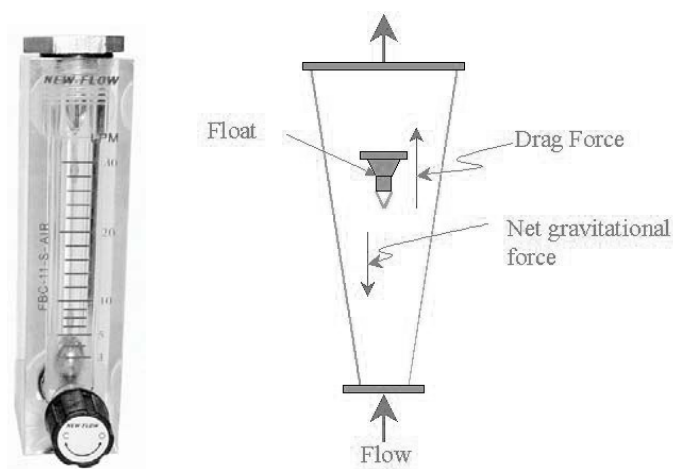
p_s คือ ความดันที่ปากของมาตรพิโตมิเตอร์ที่ด้านการไหล

p' คือ ความดันทั่วไปในท่อ

13.2.5 มาตรประเภทหุ่นลอย (Rotameter)

โรตاميเตอร์ (Rotameter) ประกอบด้วยหลอดแก้วรูปกรวยตัด ปลายล่างสอบเข้าหากัน ตั้งอยู่ในแนวดิ่ง ภายในจะมีหุ่นเป็นตัวตรวจวัด นิยมใช้ในระบบท่อขนาดเล็กในระบบอุตสาหกรรม ตัวอย่างแบบหนึ่งดังแสดงตามรูปที่ 13-8 มีวาล์วควบคุมปรับอัตราการไหล

หลักการทำงานของ Rotameter ขณะที่ของไหลไหลผ่านหุ่นจะมีแรงปะทะและแรงดูดลาก (Drag Force) ดันให้หุ่นลอยตัวขึ้น ขณะที่ไหลผ่านหุ่นจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงแหวน ขณะที่หุ่นลอยตัวสูงขึ้นพื้นที่วงแหวนจะใหญ่ขึ้นด้วย ขนาดของแรงที่ของเหลวปะทะและลากหุ่นจะแปรผันตามพื้นที่ของวงแหวนนี้ เมื่อหุ่นถูกดันลอยขึ้นถึงระดับหนึ่ง แรงดันที่หุ่นขึ้นจะสมดุลกับน้ำหนักของหุ่นพอดี ทำให้หุ่นรักษาระดับคงที่อยู่ที่ใดเมื่อเปลี่ยนอัตราไหลระดับนี้ก็จะเปลี่ยนไป



รูปที่ 13-8 ตัวอย่างมาตรประเภทหุ่นลอย (Rotameter)

โดยทั่วไปจะทำหีบอัตรการไหลติดตั้งไว้ที่ข้างหลอดแก้ว โดยปกติแล้วจะ
ใช้ได้เฉพาะของไหลชนิดที่ระบุไว้ และช่วงอุณหภูมิที่กำหนดไว้เท่านั้น แต่ถ้านำไปใช้ในอุณหภูมิ
ที่ต่างกัน หรือของไหลต่างชนิดกัน จะต้องปรับแก้ค่าที่อ่านได้โดยใช้สมการ

$$Q_A = Q_C \sqrt{\frac{\gamma_C}{\gamma_A}}$$

โดย Q_A คือ อัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านมาตรจริง

Q_C คือ อัตราการไหลที่อ่านได้จากขีดข้างหลอด

γ_a คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหลที่ไหลผ่านมาตรจริง

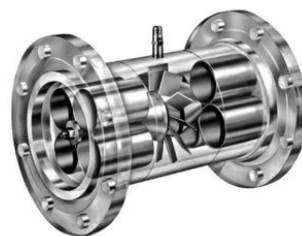
γ_c คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหลที่ใช้เป็นมาตรฐานของขีดระดับ

13.2.6 มาตรประเภทการเคลื่อนที่เชิงกล (Mechanical meters)

เป็นการพัฒนาเครื่องมือวัดกระแส น้ำเชิงกลในทางน้ำเปิดแบบต่าง ๆ มาใช้วัดใน
ระบบท่อ โดยใช้หลักการของโมเมนตัมเชิงมุมในการวัดการไหล ประกอบด้วยกระบอกและใบพัด
วางอยู่ในแนวการไหล เมื่อของเหลวไหลผ่านใบพัดทำให้ใบพัดหมุนซึ่งได้สัดส่วนกับอัตราการ
ไหล แล้วอ่านค่าจำนวนรอบการหมุนที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลด้วย **Sensor** แบบต่าง ๆ เช่น ใช้
แม่เหล็กหรือคอตลินในการวัดอัตราการหมุนของใบพัดและส่งสัญญาณพัลส์ออกไปเพื่อวิเคราะห์
หรืออ่านค่าต่อไป ซึ่งได้แก่ แบบใบพัด (Propeller flow meters), แบบกังหัน (Turbine flow
meters) ฯลฯ



Propeller flow meters

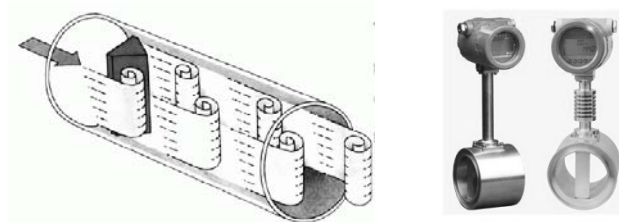


Turbine flow meters

รูปที่ 13-9 ตัวอย่างมาตรประเภทการเคลื่อนที่เชิงกล

13.2.7 มาตรประเภทอิเล็กทรอนิกส์

1) **Vortex-Shedding** หรือ **Vortex flow meters** ใช้หลักการของกลศาสตร์ของไหลโดยเมื่อวัตถุขวางการไหลจะเกิดกระแสวนแอ็ดดีขึ้น จำนวนวงของกระแสวนจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการไหลในระบบเครื่องจะทำการวัดจำนวนกระแสวนแอ็ดดีและส่งสัญญาณพัลส์ออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

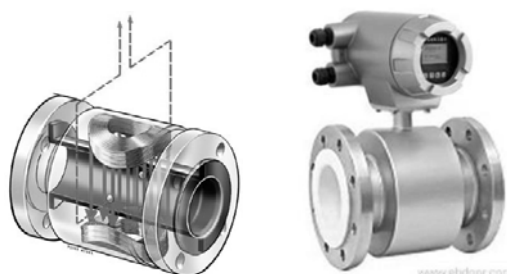


รูปที่ 13-10 ลักษณะการทำงาน และตัวอย่างของ Vortex flow meters

2) Electromagnetic flow meters

หลักการทำงานของเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้าจะอาศัยกฎของฟาราเดย์เป็นหลักในการทำงาน กล่าวคือการวัดความเร็วการไหลจะเป็นการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อมีของเหลวไหลผ่านสนามแม่เหล็กก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลและสนามแม่เหล็ก

เครื่องมือวัดแบบนี้มีข้อได้เปรียบกว่าเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอื่นๆ คือขณะใช้วัดอัตราการไหลจะไม่เกิดการสูญเสียความดันเลย สามารถใช้วัดของไหลที่มีสิ่งแขวนลอยปะปนมาหรือที่เป็นสารกัดกร่อนได้ดี ผลของการวัดไม่ขึ้นกับค่าความหนืด ความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ หรือสภาพการไหลทั้งแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนเลย มีความแม่นยำในการวัดสูง



รูปที่ 13-11 ลักษณะของ Electromagnetic flow meters แบบหนึ่ง

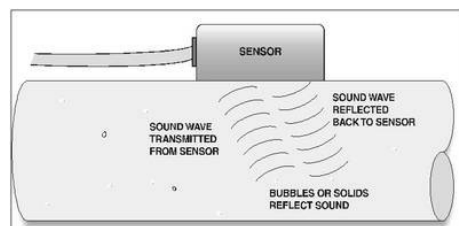
3) Ultrasonic flow meter

3.1) Counterpropagating (Transit time model)

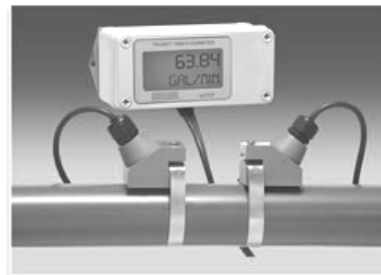
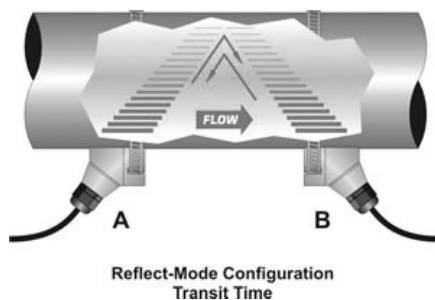
ใช้หลักความแตกต่างของความเร็วในการเดินทางของคลื่นความถี่เหนือเสียง ความเร็วจะมากขึ้นเมื่อทิศทางการไหลและทิศทางของคลื่นความถี่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และ จะลดลงเมื่อทิศทางการไหลและทิศทางของคลื่นความถี่ไหลกลับกัน

3.2) Doppler

ใช้หลักการสะท้อนกลับของคลื่นความถี่เหนือเสียงเมื่อส่งไปกระทบกับอนุภาค ของสารที่ปะปนมากับของเหลว ค่าความถี่เหนือเสียงแปรผันตรงกับค่าความเร็วในการไหล อาจใช้ ทรานสดิวเซอร์ตัวเดียวทำหน้าที่ทั้งรับและส่งคลื่นความถี่ก็ได้



รูปที่ 13-12 ลักษณะการทำงานของ Ultrasonic Doppler flow meters



รูปที่ 13-13 ลักษณะการทำงานของ Counterpropagating (Transit time model)

13.2.8 มาตรประเภทอื่นๆ

1) Coriolis mass flow meters เป็นมาตรวัดอัตราการไหลที่ใช้หลักการเกิดการสั่นหรือบิดตัวของท่ออ่อนเมื่อมีน้ำไหลผ่านโดยอัตราการสั่นหรือบิดตัวจะสัมพันธ์กับอัตราการไหล

2) มาตรวัดน้ำแบบจานหมุน (Nutating disk flow meters) มาตรชนิดนี้คือมาตรที่ใช้วัดปริมาณน้ำประปา หรือที่เรียกกันว่า “มิเตอร์วัดน้ำ” นั่นเอง

13.3 อาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ

ในที่นี้หมายถึงอาคารชลศาสตร์ที่มีท่อความยาวสั้นๆ เป็นส่วนประกอบหลัก ที่มักก่อสร้างไว้เป็นอาคารหลักของหัวงาน และอาคารในระบบส่งน้ำหรือระบบระบายน้ำ

ก. อาคารหลักที่หัวงาน เป็นอาคารที่ทำหน้าที่ในการระบายน้ำที่เก็บกักไว้ออกไปจากหัวงาน (อ่างเก็บน้ำ เขื่อน ฝายทดน้ำ ประตูระบายน้ำ) ส่วนจะเป็นอาคารชนิดหรือประเภทใด ขึ้นกับประเภทหัวงาน ซึ่งแบ่งกลุ่มอาคารตามวัตถุประสงค์ในการระบายน้ำได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) ระบายน้ำเพื่อทิ้งลงลำน้ำด้านท้าย ได้แก่ ทางระบายน้ำล้นแบบไซฟอน (Siphon/Syphon Spillway), ทางระบายน้ำล้นแบบอุโมงค์ผันน้ำ (Tunnel Spillway), ทางระบายน้ำล้นแบบท่อลอด (Culvert spillway), อาคารทิ้งน้ำหรืออาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work), อาคารรับน้ำ (Intakes structure), Bottom drain ที่ประกอบอยู่กับทางระบายน้ำล้นแบบ Morning glory ฯลฯ การระบายน้ำผ่านอาคารเหล่านี้เพื่อการพร่องน้ำลดระดับและปริมาณน้ำ หรือเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ด้านท้ายน้ำ

2) ระบายน้ำเพื่อส่งเข้าระบบส่งน้ำหรือคลองส่งน้ำ ได้แก่ ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำสายใหญ่ (Head regulators), อาคารทางเข้า (Inlet structure)

ข. อาคารในระบบส่งน้ำหรือระบบระบายน้ำ ซึ่งอาจแบ่งย่อยตามหน้าที่ของอาคารได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1) อาคารควบคุม

1.1) ท่อระบายน้ำปากคลอง (Head regulators) (รวมถึงท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำสายใหญ่ที่เป็นอาคารหลักของหัวงานด้วย)

1.2) ท่อส่งน้ำเข้านา (Farm turnout: FTO หรือ Farm intake)

1.3) ท่อระบายน้ำปลายคลอง (Tail regulators) ฯลฯ

2) อาคารลำเลียงน้ำ

2.1) ท่อลอด ถนน/ทางรถไฟ (Road Crossing)

2.2) ท่อเชื่อม (Inverted Syphon)

2.3) อาคารน้ำตกแบบท่อ (Pipe drop) ฯลฯ

3) อาคารป้องกัน ได้แก่ ท่อลอดคลอง (Culvert) ฯลฯ

4) อาคารวัดน้ำ ได้แก่ Constant Head Orifice (CHO) ฯลฯ

อาคารชลศาสตร์ประเภทท่อนั้นแม้อาคารทุกชนิดจะสามารถคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านได้ แต่ในทางปฏิบัติจะมีการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารเฉพาะอาคารหลักที่หัวงานอาคารควบคุมและอาคารวัดน้ำเท่านั้น (ซึ่งจะนำเสนอในลำดับถัดไป) ส่วนอาคารลำเลียงน้ำและอาคารป้องกันจะไม่มีคำนวณปริมาณน้ำ เพราะไม่มีความจำเป็นต้องคิดปริมาณน้ำไหลผ่าน เพราะเป็นอาคารที่มีไว้เพื่อให้ปริมาณน้ำสูงสุดตามที่ออกแบบไว้ผ่านไปตามที่นั้น

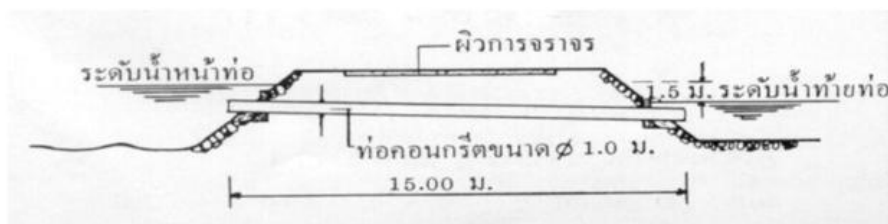
13.3.1 หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อ

การคำนวณปริมาณน้ำจะพิจารณาจากลักษณะการไหลของน้ำในท่อ และการควบคุม ซึ่งจะได้แก่

- (1) การไหลในระบบท่อมักออกแบบให้เป็นการไหลเต็มท่อเสมอ คำนวณโดยหลักการไหลในท่อปิดภายใต้แรงดัน ซึ่งได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้ว
- (2) กรณีการไหลไม่เต็มท่อ จะคำนวณโดยหลักการคำนวณการไหลในทางน้ำเปิด
- (3) ถ้ามีการควบคุมอัตราการไหลด้วยบานระบายจะคำนวณโดยหลักการ Submerged Orifice Flow

อนึ่ง ในกรณีการคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลเต็มท่อผ่านอาคารที่ถือว่ามีความยาวใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวท่อสั้น ๆ นอกจากคำนวณโดยหลักการของท่อปิดภายใต้แรงดันแล้วอาจคำนวณโดยหลักการ Submerged Orifice Flow ซึ่งจะเปรียบเทียบให้เห็นดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง ตามรูปที่ 13-14 ท่อคอนกรีตระบายน้ำลอดใต้ถนนขนาด ϕ 1.00 ม. ยาวทั้งหมด 15.0 ม. และมีระดับน้ำความดันต่างกัน 1.5 ม. อยากทราบว่าท่อคอนกรีตดังกล่าวจะทำการระบายน้ำได้ในอัตราเท่าใด



รูปที่ 13-14 ตัวอย่างลักษณะการไหลผ่านท่อลอด

ก. การคำนวณกรณีการไหลในท่อปิด

$H = 1.5$ ม. เป็นความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับด้านท้ายน้ำ (น้ำท่วมท้ายท่อ) แต่ถ้าท้ายท่อน้ำไม่ท่วมหลังท่อให้คิดที่กึ่งกลางปลายท่อ

ท่อคอนกรีต ตามปกติใช้ $n = 0.014$ แต่ถ้ามีรอยต่อท่อทุกๆ เมตรให้ใช้ $n = 0.017$

การสูญเสียในระบบ = การสูญเสียที่ปากทางเข้า+การสูญเสียในท่อ+การสูญเสียที่ทางออก

$$\begin{aligned}
 H_L &= K_e \frac{V^2}{2g} + H_f + K \frac{V^2}{2g} \\
 &= 0.78 \frac{V^2}{2g} + \frac{6.35n^2LV^2}{D^{4/3}} + 1.0 \frac{V^2}{2g} \\
 &= \frac{0.78V^2}{19.7} + \frac{6.35n^2LV^2}{(1)^{4/3}} + \frac{V^2}{19.7} \\
 &= 0.0397 V^2 + 0.0274 V^2 + 0.0507 V^2 \\
 &= 0.1178 V^2 \\
 V &= \frac{\sqrt{1.5}}{\sqrt{0.1178}} = \sqrt{12.75} = 3.58 \text{ ม. /วินาที} \\
 Q &= VA = \frac{3.58 \times \pi}{4} (2)^2 = 2.82 \text{ ม.}^3/\text{วินาที} \leftarrow
 \end{aligned}$$

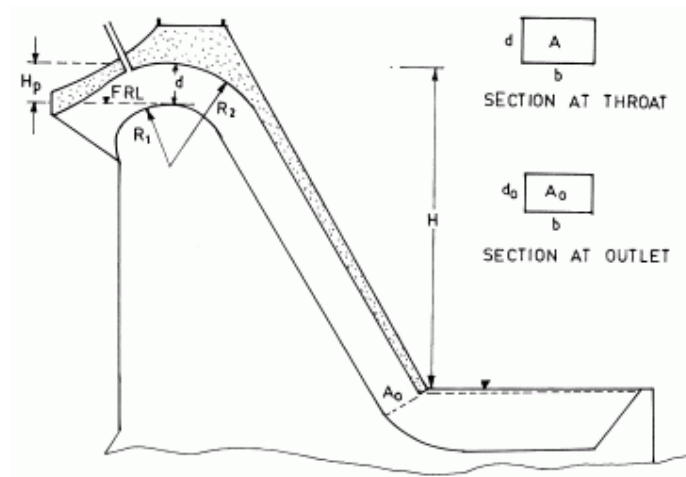
ข. การใช้สูตร Submerged Orifice ท่อมีความยาวสั้นๆ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางโต

$$\begin{aligned}
 Q &= CA\sqrt{2gH} \\
 \text{โดยให้ } C &\text{ สัมประสิทธิ์ของการไหลเท่ากับ } 0.65 \\
 Q &= 0.65 \times \frac{\pi}{4} (1)^2 \sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5} \\
 &= 0.65 \times 0.785 \times 5.42 \\
 &= 2.77 \text{ ม.}^3/\text{วินาที} \quad \text{ใกล้เคียง } 2.82 \text{ ม.}^3/\text{วินาที} \leftarrow
 \end{aligned}$$

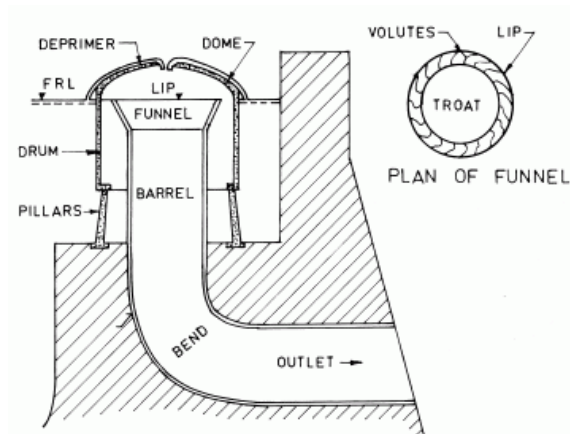
13.3.2 ทางระบายน้ำล้นแบบไซฟอน (Siphon/Syphon Spillway)

13.3.2.1 ลักษณะรูปแบบทั่วไปของ Siphon spillway

Siphon spillway นั้นสามารถออกแบบให้มีลักษณะรูปแบบได้หลายแบบ แต่รูปแบบที่นิยมสร้างมากที่สุดเป็นแบบ **Saddle siphon** และรองลงไปเป็น **Siphon volute** ดังแสดงรูปแบบทั่วไปใน รูปที่ 13-15



Saddle siphon spillway



Siphon volute spillway

รูปที่ 13-15 แสดงรูปแบบทั่วไปของ Saddle siphon spillway และ Siphon volute spillway

Siphon spillway ทุกแบบจะมีลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่

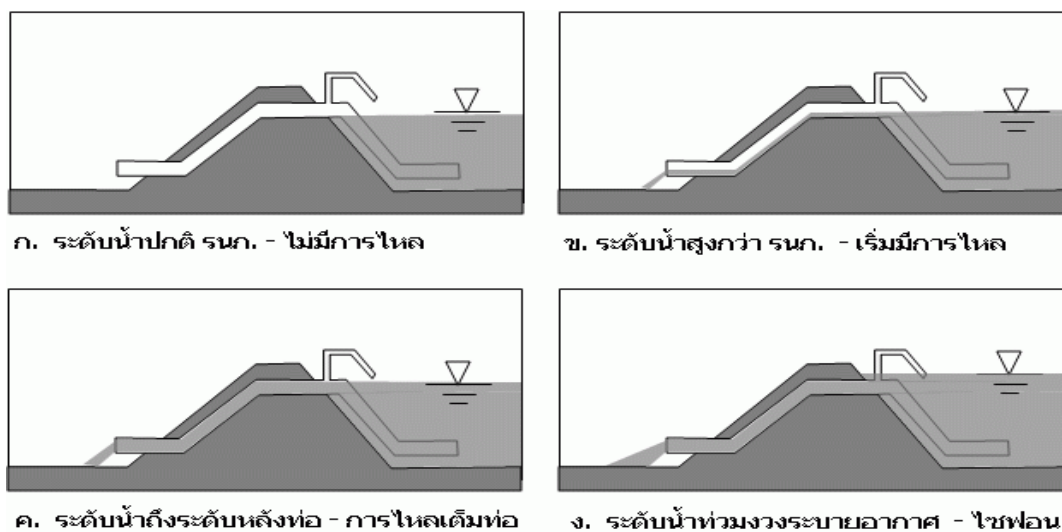
- 1) ปากทางเข้า
- 2) ช่องอากาศ หรือท่ออากาศ หรือวงอากาศ คัดตั้งไว้ที่ระดับสูงสุดของท่อ ทำหน้าที่ควบคุมสถานะการทำงานของไซฟอน โดยจะเกิดสถานะการไหลเต็มท่อแบบไซฟอนอย่างสมบูรณ์เมื่อระดับเหนือน้ำท่วมช่องอากาศดังกล่าว

3) ท่อลำเลียงน้ำ

4) ทางน้ำออก อาจปล่อยปลายอิสระหรือมีองค์ประกอบของอาคารสลาย

พลังงาน

13.3.2.2 หลักการทำงานของ Siphon spillway



รูปที่ 13-16 แสดงหลักการทำงานของทางระบายน้ำล้นแบบไซฟอน

พิจารณารูปที่ 13-16 ทางระบายน้ำล้นแบบไซฟอนมีหลักการทำงานคือ ด้านบนของท่อไซฟอนจะติดตั้งท่อหรือวงระบายอากาศ (หรืออาจติดตั้งเป็นวาล์วลูกกลอยแบบพิเศษ)

รูป ก. ระดับท้องท่อแนวราบจะเท่ากับระดับเก็บกักของอ่างเก็บน้ำหรือเขื่อน ระดับน้ำที่ต่ำกว่าระดับนี้ลงไปน้ำจะไม่ไหล

รูป ข. เมื่อระดับน้ำสูงกว่าระดับ รนค. จะเริ่มเกิดการไหลของน้ำผ่านท่อ

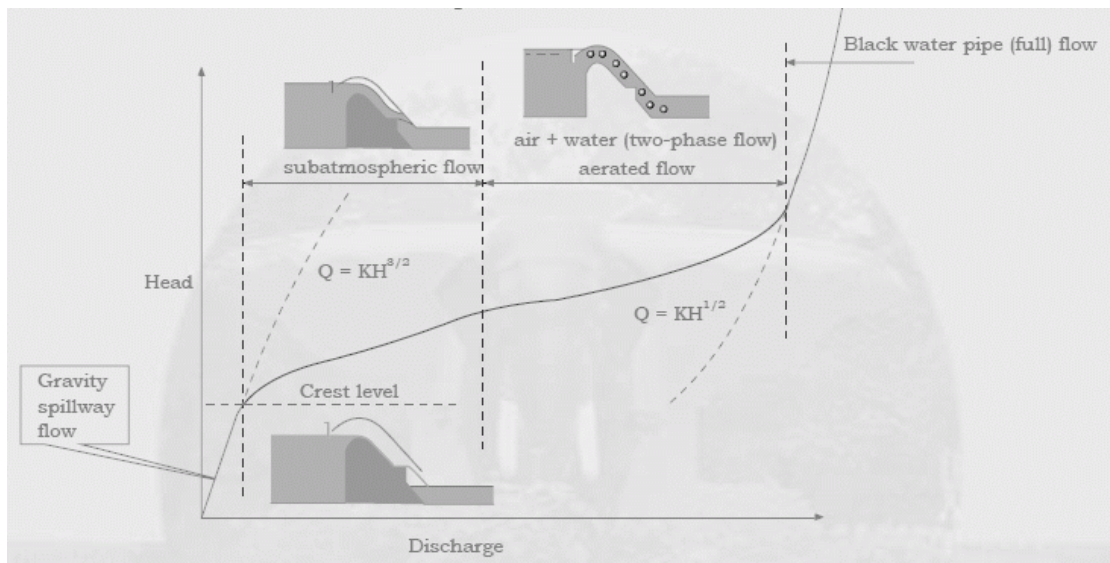
รูป ค. และเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับหลังท่อ แต่ยังไม่ถึงปากวงระบายอากาศ จะเกิดการไหลแบบเต็มท่อ

จากการไหลทั้ง 2 ลักษณะข้างต้นเป็นการไหลภายใต้แรงดึงดูดของโลก

รูป ง. หากระดับน้ำสูงท่วมปลายวงระบายอากาศเมื่อใด จะเกิดการไหลแบบไซฟอนซึ่งเป็นการไหลภายใต้แรงดันโดยน้ำจะถูกดูดผ่านทั้งท่อและวงออกไป

ในทางกลับกันเมื่อระดับน้ำลดลงต่ำกว่าปลายวง อากาศก็จะเข้าไปในท่อสภาพการเป็นไซฟอนก็จะหมดไป เมื่อการระบายน้ำยังคงเกิดต่อไปจนระดับน้ำเท่ากับระดับท้องท่อ แนวราบน้ำก็จะหยุดไหล ในประเทศไทยไม่นิยมสร้างทางระบายน้ำล้นแบบนี้ โดยส่วนใหญ่จะสร้างเป็นลักษณะฝายเปิดมากกว่า

13.3.2.3 การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Saddle siphon spillway



รูปที่ 13-17 ลักษณะการไหลผ่าน Siphon spillway

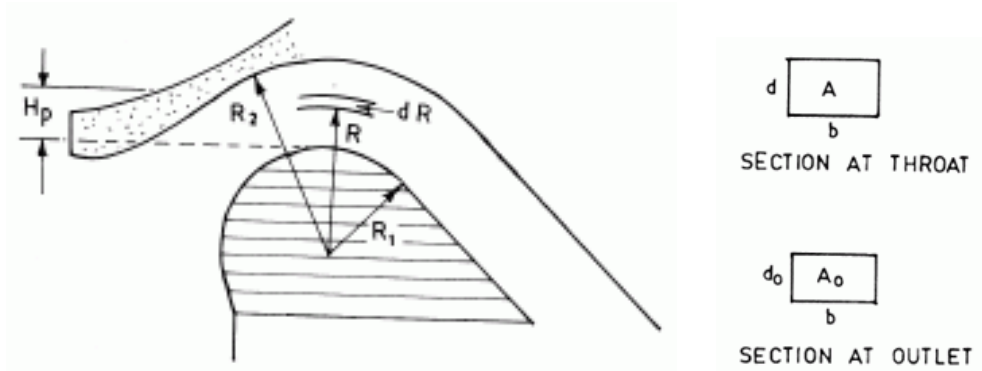
พิจารณา รูปที่ 13-17 ลักษณะการไหลผ่าน Siphon spillway จะมี 3 ลักษณะคือ

1) การไหลลักษณะ Gravity spillway flow เมื่อระดับน้ำสูงกว่าไถ่ด้านในของท่อน้ำแต่ยังไม่สูงถึงระดับหลังท่อด้านในจะไหลตกออกไปอย่างอิสระด้วยแรงดึงดูดของโลกคล้ายฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำสั้น ส่วนใหญ่จะมีการศึกษาการไหลจากแบบจำลอง เพราะมักจะมีลักษณะรูปแบบโครงสร้างเฉพาะตัว และต้องสอบเทียบเป็นกรณีพิเศษ

2) การไหลแบบ Aerated flow เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นจนเริ่มมีแรงดูดโดยอาศัยความดันเกิดขึ้นบ้าง โดยจะมีการดูดเอาอากาศจากปากทางเข้า หรือจากท่อหรือวงอากาศ ปนเข้าไปจำนวนมาก การไหลลักษณะนี้จะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น จึงไม่ให้ความสำคัญมากนัก

3) การไหลในท่อปิดภายใต้แรงดัน (Pipe flow) เป็นการไหลที่น้ำไหลเต็มท่ออย่างสมบูรณ์ ซึ่งคำนวณเหมือนท่อปิดทั่วไป โดยคิดการสูญเสียที่ ปากทางเข้า+ท่อไถ่ทั้งสองบน+ที่ผิวตัวท่อ+ท่อไถ่ทั้งสองล่าง+ปากทางออก ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว สภาวะที่เกิดการไหลแบบเต็มท่อนี้เรียก **Black water condition** เพราะการเกิดสภาวะ Aerated flow ก่อนหน้านี้นี้สีของน้ำที่ปนฟองอากาศที่เห็นเป็นสีขาวหมดไป น้ำจึงดูเป็นสีเข้ม

ดังนั้นการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Saddle siphon spillway จึงคำนวณตามลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นข้างต้น ที่ต้องใช้ระดับน้ำด้านหน้าอาคารเป็นตัวกำหนดลักษณะการไหล



รูปที่13-18 แสดงช่วงคอของ Saddle siphon spillway

พิจารณาส่วนคอของ Saddle siphon spillway จากรูปที่13-15 และรูปที่13-18

$$VR = V_1 R_1 = V_2 R_2$$

เมื่อ V = ความเร็วของน้ำ

R = รัศมี

ตัวห้อย 1 แทนตำแหน่งสันของคอ และ 2 แทนตำแหน่งจุดสูงสุดของคอ

$$V = V_1 \frac{R_1}{R}$$

ปริมาณน้ำไหลผ่านหน้าตัด dA ของส่วนตัด dR เมื่อคอมีความกว้าง b

$$Q_A = V_1 \frac{R_1}{R} dA = V_1 \frac{R_1}{R} b dR$$

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} V_1 \frac{R_1}{R} b dR = V_1 R_1 b \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R} = V_1 R_1 b \left[\ln \frac{R_2}{R_1} \right]$$

กำหนดให้ค่า V_1 สูงสุดสำหรับ Saddle siphon spillway เท่ากับ 12 ม. /วินาที

$$Q_{\max} = 12 R_1 b \left[\ln \frac{R_2}{R_1} \right]$$

$$V_a = \frac{Q}{A} = \frac{12 R_1 b}{(R_2 - R_1) b} \left[\ln \frac{R_2}{R_1} \right] = \frac{12 R_1}{(R_2 - R_1)} \left[\ln \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (\text{Eq.1})$$

(Eq.1 ใช้ในการคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยในกรณีน้ำไหลไม่เต็มท่อ)

- เมื่อขนาดของท่อเท่ากันตลอดความเร็วที่เกิดขึ้นในทุกหน้าตัดจะมีค่าเท่ากัน
- เมื่อเกิดการไหลเต็มท่อ ความเร็วการไหลจะเกิดจากอิทธิพลของ head H ซึ่งเป็นความแตกต่างระดับน้ำในเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำกับระดับบนสุดของปลายท่อ ใช้หลักการไหลในท่อปิดภายใต้แรงดันในการคำนวณ โดยได้แปลงรูปสมการเป็น

$$V = \mu \sqrt{2gH} \quad (\text{Eq.2})$$

เมื่อ μ = siphon coefficient ที่คิดจากค่าการสูญเสียต่าง ๆ ในระบบท่อ ได้แก่ ทางเข้า (k_i), แนวท่อโค้ง (k_b), เส้นท่อ (k_f), ทางออก ($k_o = 1$) ฯลฯ

ถ้าท่อมีขนาดเดียวกันตลอดจะได้ว่า

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{k}} = \frac{1}{\sqrt{(1+k_i+k_b+k_f+\dots)}} \quad (\text{Eq.3})$$

ค่าการสูญเสียรวมในระบบ และให้ V_o เป็นความเร็วที่ทางออกค่า $k_o = 1$

$$H = \frac{V_o^2}{2g} + \frac{V_a^2}{2g} (k_i + k_b + k_f + \dots) \quad (\text{Eq.4})$$

(Eq.4 แสดงให้เห็นรูปแบบสมการที่แท้จริงของสมการ(Eq.2) ซึ่งก็คือสมการคำนวณการสูญเสียในระบบท่อปิดทั่วไปนั่นเอง โดยสมการนี้ใช้ในการคำนวณหาค่า H สูงสุดในการออกแบบอาคาร)

$$A_o = \frac{Q}{V_o} = \frac{AV_a}{V_o} = \frac{A}{\sqrt{\frac{2gH}{V_a^2} - (k_i + k_b + k_f + \dots)}} \quad (\text{Eq.5})$$

(Eq.5 ใช้ในการคำนวณหาค่า A_o พื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมในการออกแบบอาคาร ซึ่งก็คือสมการคำนวณการสูญเสียในระบบท่อปิดทั่วไปนั่นเอง)

❖ สรุปการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Saddle siphon spillway

1) กรณีน้ำไหลไม่เต็มท่อ คำนวณความเร็วการไหล V_a ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยโดยสมการ (Eq.1)

2) กรณีน้ำไหลเต็มท่อ คำนวณความเร็วการไหลโดยใช้หลักการไหลในท่อปิดภายใต้แรงดันทั่วไป ที่คิดจากค่าการสูญเสียในระบบ โดยใช้สมการ (Eq.2) ที่มีการแปลงรูปใหม่

3) คำนวณอัตราการไหลจาก $Q = AV$

$$Q = A.V = A.\mu\sqrt{2gH}$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของท่อไซฟอน ม.^2

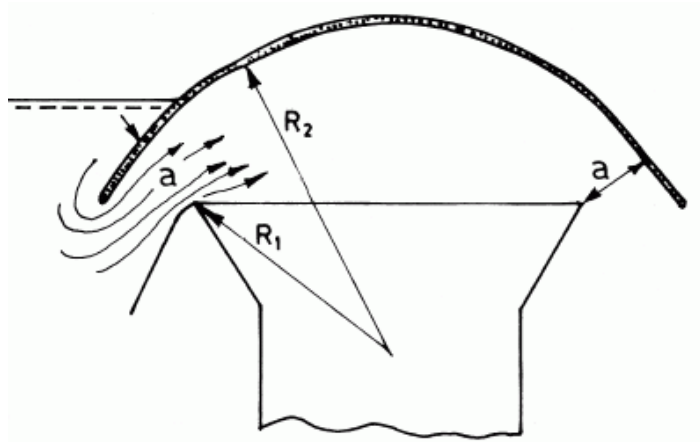
$$\mu = \frac{1}{\sqrt{k}} = \frac{1}{\sqrt{(1+k_i+k_b+k_f+\dots)}}$$

k = ค่าการสูญเสียต่าง ๆ ในระบบท่อ ได้แก่ ทางเข้า (k_i), แนวท่อโค้ง (k_b), เส้นท่อ (k_f), (จากสมการคิดค่า $k_o = 1$ ที่ทางออกแล้ว)

H = ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ – ระดับขอบบนของปลายท่อ ม.

$$g = 9.81 \text{ ม./วินาที}^2$$

13.3.2.4 การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Siphon volute spillway



รูปที่ 13-19 ส่วนยอดของ Siphon volute spillway

พิจารณาส່วนยอดหรือโดมของ Siphon volute spillway จากรูปที่ 13-15 และรูปที่ 13-19 ด้วยหลักการเดียวกับ Saddle siphon spillway ข้างต้น

1) คำนวณอัตราการไหลจากค่าความเร็วเฉลี่ยจากสมการต่อไปนี้

$$Q = C_d \cdot a \cdot \frac{V_1 R_1 \log_e \frac{R_2}{R_1}}{R_2 - R_1}$$

เมื่อ C_d = Coefficient of discharge ≈ 0.7

a = พื้นที่หน้าตัดวงแหวนช่องทางที่น้ำเข้าจากล้นน้ำ ม.^2

R_1 = รัศมีขอบล่างของการไหล ม.

R_2 = รัศมีขอบบนของการไหล ม.

2) กรณีที่น้ำไหลเต็มช่องโดม

$$Q = C_d \cdot A_o \sqrt{2gH}$$

เมื่อ C_d = Coefficient of discharge ≈ 0.7

A_o = พื้นที่หน้าตัดที่ทางออก ม.^2

H = ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ – ระดับขอบบนของปลายท่อ ม.

$g = 9.81 \text{ ม. / วินาที}^2$

13.3.3 ทางระบายน้ำล้นแบบอุโมงค์ผันน้ำ (Tunnel Spillway)

Tunnel Spillway เป็นอาคารระบายน้ำขนาดใหญ่ สร้างในกรณีที่ห้วยงานตั้งอยู่ในบริเวณช่องเขาที่พื้นที่มีความลาดชันมาก สภาพพื้นที่ไม่ค่อยมีความมั่นคง มีโอกาสเกิดดินถล่มหรือมีตะกอนไหลลงมากับน้ำป่ามาก ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อการสร้างอาคารที่มีลักษณะเป็นทางน้ำเปิด จึงต้องแก้ปัญหาโดยการสร้างอาคารระบายน้ำที่ใช้ท่อหรืออุโมงค์เพื่อผันน้ำที่ระบายออกจากห้วยงานให้ไปลงสู่ลำน้ำที่อยู่ตอนล่างต่อไป

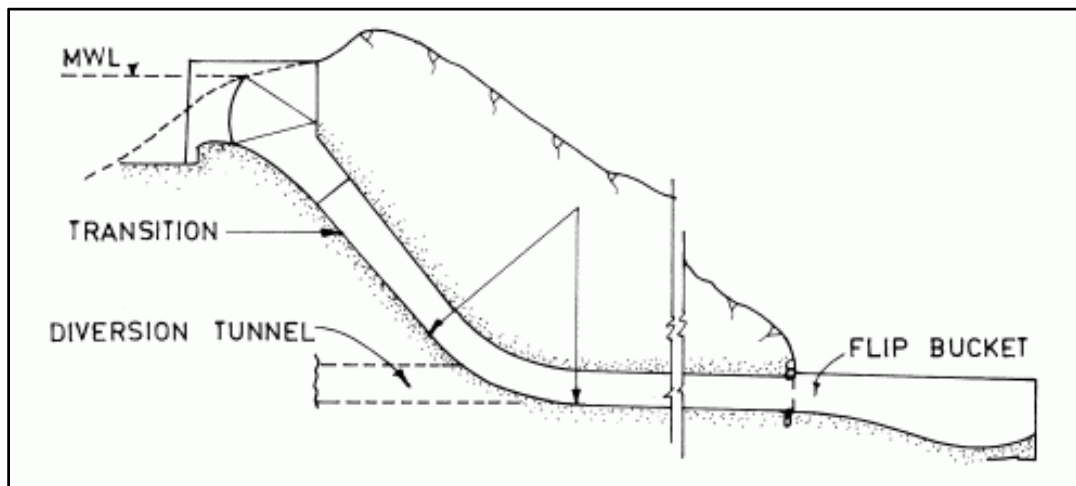
ส่วนประกอบโครงสร้างของ Tunnel Spillway ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1) ฝ่ายหรือทางระบายน้ำล้น ซึ่งจะมีลักษณะรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งก็ได้ขึ้นกับความเหมาะสม แบ่งย่อยเป็น 2 รูปแบบ คือ

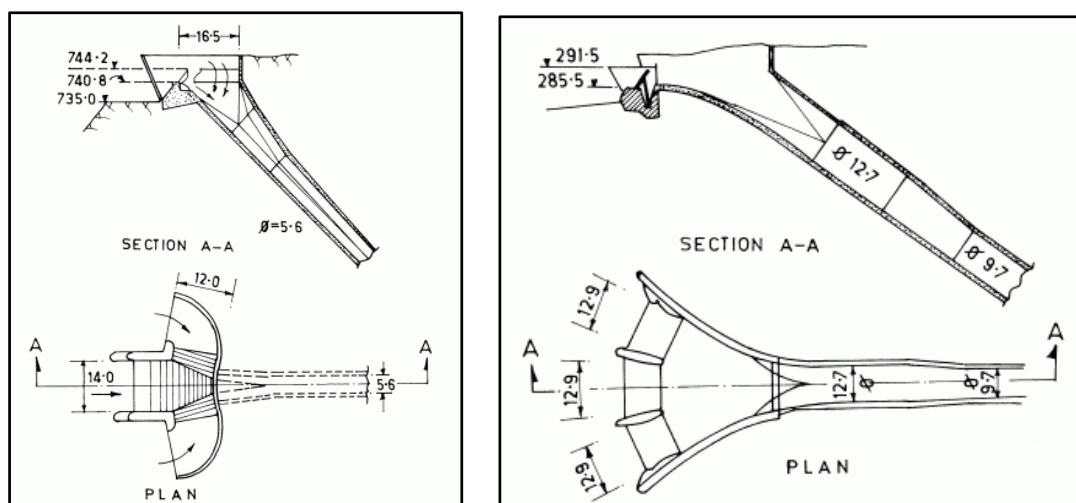
1.1) ไม่มีการควบคุม ระดับสันฝายจึงอยู่ที่ระดับน้ำเก็บกักของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ

1.2) มีการควบคุมด้วยบานระบาย ระดับสันฝายจะอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำเก็บกักเพราะมีบานระบายปิดกั้นอยู่บนฝาย

2) ท่อหรืออุโมงค์ผันน้ำ ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำที่ระบายผ่านฝายออกไปทิ้งยังลำน้ำที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งปลายท่อหรืออุโมงค์มักมีระดับต่ำกว่าระดับที่ปากมาก



รูปที่ 13-20 ตัวอย่างรูปตัดของ Tunnel Spillway บางแบบ



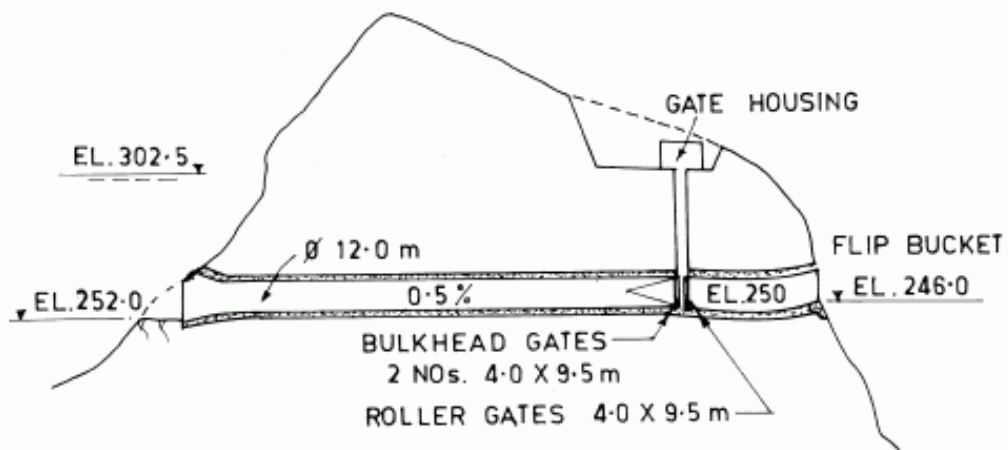
รูปที่ 13-21 ตัวอย่างแปลนและรูปตัดของ Tunnel Spillway บางแบบ

❖ การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Tunnel Spillway

จากลักษณะรูปแบบของ Tunnel Spillway นั้นตัวท่อหรืออุโมงค์ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำที่ระบายผ่านฝายออกไปทิ้งลงลำน้ำด้านล่างเท่านั้น ดังนั้นการคำนวณปริมาณน้ำจึงคำนวณจากการไหลผ่านฝายหรือทางระบายน้ำล้น ตามวิธีการของฝายหรือทางระบายน้ำล้นชนิดนั้น ที่นำเสนอใน บทที่ 8

13.3.4 ทางระบายน้ำล้นแบบท่อลอด (Culvert spillway)

จากปัญหาในเรื่องลักษณะภูมิประเทศที่มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับการก่อสร้าง Tunnel Spillway จึงต้องพิจารณาผันน้ำโดยใช้ท่อ แต่ Culvert spillway จะต่างจาก Tunnel Spillway ตรงที่ ระดับปากท่อจะอยู่ที่ระดับใดๆ ที่เหมาะสม ไม่ต้องมีระดับใกล้เคียงกับระดับน้ำเก็บกัก และระดับปากท่อกับระดับท้ายท่อจะไม่แตกต่างกันมาก การควบคุมใช้ประตูระบายหรือประตุน้ำที่ติดตั้งที่ตำแหน่งที่เหมาะสม เช่น ตอนกลางหรือด้านท้าย ของตัวเขื่อนหรือทำนบดิน โดยมักให้ทำหน้าที่เปิดปิดเท่านั้น (เปิดหมด ปิดหมด)



รูปที่ 13-22 ตัวอย่างรูปแบบของ Culvert spillway

❖ การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Culvert Spillway

การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Culvert Spillway ใช้หลักการคำนวณปริมาณน้ำในระบบท่อปิด โดยเปิดบานระบายหรือประตุน้ำจนสุดเสมอ

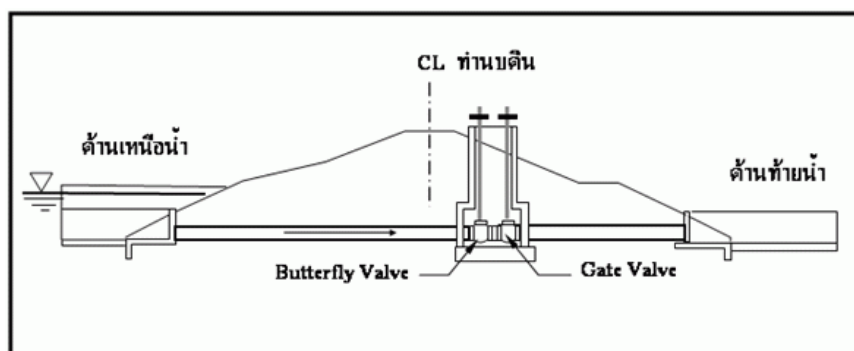
13.3.5 อาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work) และอาคารรับน้ำ (Intake structure)

เป็นกลุ่มอาคารที่ใช้ระบายน้ำที่ออกไปลงลำน้ำด้านท้ายเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ โดยทั่วไปแล้วจะเรียกอาคารกลุ่มนี้ตามวัตถุประสงค์ในการระบายน้ำว่า อาคารทิ้งน้ำ หรืออาคารส่งน้ำจากเขื่อน หรือ **Outlet** แต่อาจเรียกชื่อเป็น อาคารรับน้ำ (**Intake structure**) เนื่องจากอาคารมีลักษณะรูปแบบที่แตกต่างออกไปโดยมีจุดเด่นที่มีโครงสร้างอาคารทำหน้าที่รับน้ำ (**Intake**) อยู่ด้านหน้า **Outlet work** ซึ่งจะได้อธิบายในลำดับต่อไป

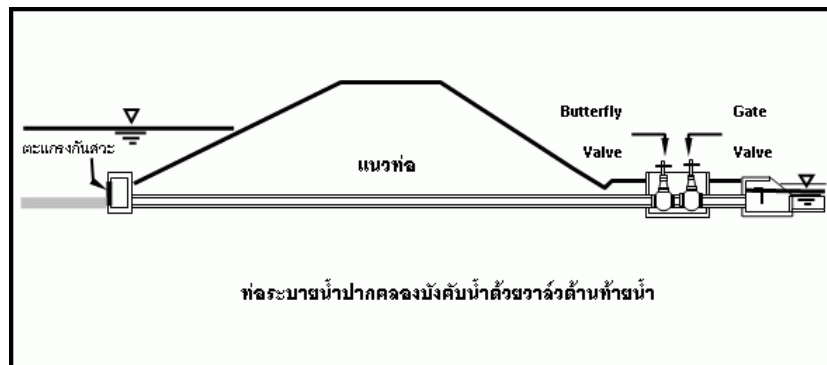
13.3.5.1 อาคารทิ้งน้ำหรืออาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work)

ด้านหน้าจะมีอาคารรับน้ำ (**Intake**) หรือเป็น Transition มีตะแกรงกันสวะปิดเต็มปากทาง (ดักขยะหรือวัชพืชที่หลุดรอดไหลผ่านอุปกรณ์การป้องกันเข้ามา) เพื่อรับน้ำผ่านเข้าท่อไปทิ้งออกสู่ลำน้ำด้านท้าย จะมี **ชุดวาล์วควบคุม (Control valve)** ที่ประกอบด้วย **Butterfly valve** และ **Gate valve** เพื่อควบคุมปริมาณน้ำ เป็นอาคารที่ระบายน้ำปริมาณไม่สูงมากใช้ท่อไม่ใหญ่นัก เพราะขนาดของวาล์วที่มีการผลิตจำหน่ายจะเป็นตัวควบคุมขนาดท่อ (1) ติดตั้ง **Control valve** ไว้ที่ตอนกลางของทำนบดินหรือเขื่อน คล้ายดังแสดงในรูปที่ 13-23 หรือ (2) ติดตั้ง **Control valve** ไว้ที่ด้านท้ายตอนปลายทำนบดิน คล้ายดังแสดงในรูปที่ 13-24 มักสร้างถนนขนานไปกับดินลาดท้ายเขื่อนหรือทำนบดินเพื่อให้สะดวกในการปฏิบัติงานด้วยเสมอ ในประเทศไทยนิยมสร้างให้ **Control valve** อยู่ด้านท้ายตอนปลายทำนบดิน เพราะจะสร้างและบำรุงรักษาได้ง่ายกว่า

เหตุผลที่ไม่ควบคุมปริมาณน้ำด้านหน้าท่อด้วยอาคารรับน้ำที่ใช้บานระบายเป็นตัวควบคุมเป็นเพราะ ถ้าที่ตำแหน่งของอาคารมีทำนบดินสูงมีระดับน้ำด้านเหนือน้ำสูง ปากท่ออยู่ห่างจากแนวศูนย์กลางทำนบดินมาก ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน ต้องสร้างโครงยกสูง ต้องมีก้านเครื่องกวั่นยาวจนยากที่จะควบคุม และการดูแลรักษาในอนาคตทำได้ยาก



รูปที่ 13-23 ท่อระบายน้ำที่ควบคุมด้วยประตูน้ำบริเวณกลางทำนบดิน



รูปที่ 13-24 ท่อบรรณน้ำปากคลองที่ควบคุมด้วยประตูน้ำที่ท้ายท่อ

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Outlet work

1) กรณีควบคุมด้วย Control valve (Butterfly valve และ Gate valve) ตามที่แสดง รูปที่ 13-23 และ รูปที่ 13-24 ซึ่งจะคำนวณโดยหลักการไหลในท่อปิดภายใต้แรงดัน

1.1) ผลต่างของ Head losses คิดจากความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำ กับระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ถ้าด้านท้ายน้ำน้ำไม่ท่วมปลายท่อคิดระดับน้ำด้านท้ายที่ระดับกึ่งกลางปลายท่อ

1.2) Losses ในระบบท่อกิดจาก ที่ตะแกรงหน้าท่อ + ปากท่อ + ในตัวท่อ + ที่ Control valve + ที่ตัวปากทางออก (เมื่อเปิด Butterfly valve เต็มที่ และควบคุม Gate valve เปิดที่ค่ามาตรฐาน 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์)

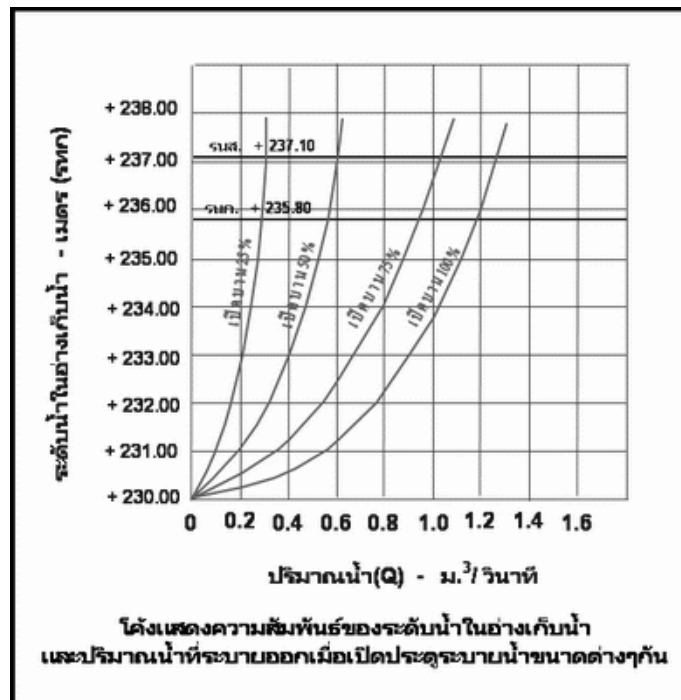
1.3) ตัวอย่างคุณสมบัติของ Gate Valve ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 500 ม.ม. (มีใน คู่มือที่ให้มากับ Valve แต่ละตัว)

Gate Valve 500 ม.ม., $D = 500$ ม.ม. ระยะยกขึ้น 585 ม.ม.

จำนวนรอบ ปิด-เปิดสุด 90 รอบ ระยะต่อรอบ 6.50 ม.ม.

- เปิด 25% หมุน 22.5 รอบ ระยะยกขึ้น 146.25 ม.ม. $K_g = 24.00$
- เปิด 50% หมุน 45 รอบ ระยะยกขึ้น 292.50 ม.ม. $K_g = 5.60$
- เปิด 75% หมุน 67.5 รอบ ระยะยกขึ้น 438.75 ม.ม. $K_g = 1.15$
- เปิด 100% หมุน 90 รอบ ระยะยกขึ้น 585 ม.ม. $K_g = 0.19$

1.4) ส่วนใหญ่แล้วจะมีการคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารออกไปที่ระยะเปิด Gate valve ค่ามาตรฐาน 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ดังกล่าว ที่ระดับน้ำด้านเหนือน้ำระดับต่าง แล้วสร้างเป็น Rating Curve กำหนดไว้ในแบบก่อสร้างไว้ให้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 13-25

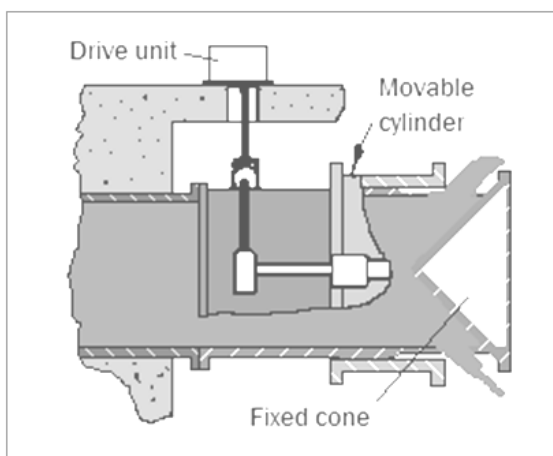
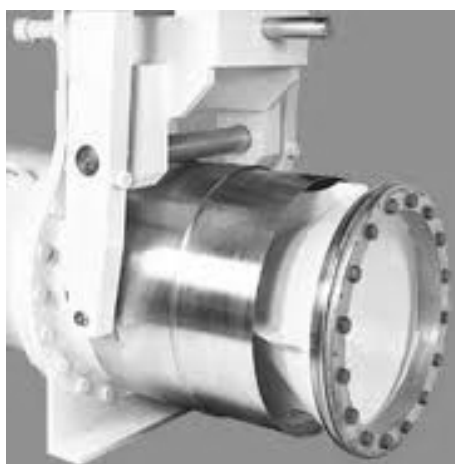


รูปที่ 13-25 ตัวอย่าง Rating Curve แสดงความสัมพันธ์ของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ และปริมาณน้ำที่ระบายออก เมื่อเปิดบานประตูน้ำที่ขนาดต่างๆกัน

2) อาคาร Outlet ที่ควบคุมด้วย Fixed cone valve

Fixed cone valve เป็นวาล์วขนาดใหญ่รูปแบบใหม่ใช้ควบคุมเปิดปิดการไหลของน้ำในระบบท่อ ดังแสดงรูปที่ 13-26 มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนโลหะ 2 ชิ้นประกอบกัน ชิ้นแรกมีลักษณะเป็นท่อที่มีกรวยอยู่ตอนปลายโดยท่อและกรวย (Cone) เชื่อมติดกันด้วยแผ่นโลหะลักษณะหน้าตัดรูป X หรือ Y โดยส่วนของแผ่นโลหะหน้าตัดรูป X หรือ Y จะมีลักษณะเป็นช่องว่าง ชิ้นส่วนอีกชิ้นมีลักษณะเป็นปลอกท่อที่เคลื่อนที่ได้ระหว่างแผ่นโลหะหน้าตัดรูป X หรือ Y กับส่วนที่เป็นท่อด้านหัว ซึ่งปลอกท่อดังกล่าวเป็นชิ้นส่วนที่ใช้เลื่อนเปิดปิด ปรับขนาดช่องที่จะให้น้ำไหลพุ่งผ่านออกไปปะทะกับตัวกรวยเพื่อให้น้ำแตกกระจายออกเป็นการลดพลังงานไปในตัว (นอกจากนี้อาจมีรูปแบบอื่นๆที่ให้ส่วนของกรวยเป็นตัวเคลื่อนที่เพื่อเปิดปิดและควบคุมปรับอัตราการไหล เรียก Cone valve) โดยใช้ติดตั้งไว้ที่ปลายท่อเพื่อควบคุมปริมาณน้ำให้ไหลออกจากท่อ

ออกไปตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีอาคารOutlet จะติดตั้งเพื่อควบคุมการระบายน้ำลงสู่ลำน้ำโดยตรง ในปัจจุบันโครงการชลประทานที่สร้างใหม่ ๆ มักจะสร้างอาคารทิ้งน้ำหรือ Outlet แบบนี้ โดยลักษณะรูปแบบทั่วไปของอาคารที่ควบคุมด้วย Fixed cone valve แสดงใน รูปที่ 13-27



รูปที่ 13-26 ลักษณะรูปแบบของ Fixed cone valve แบบหนึ่ง



รูปที่ 13-27 แสดงตัวอย่างของอาคารOutlet ที่ควบคุมด้วย Fixed cone valve

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Fixed cone valve

การคำนวณการไหลสำหรับอาคาร Outlet ที่มีการควบคุมการไหลด้วย Fixed cone valve ใช้หลักการคำนวณ Orifice flow

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน Fixed cone valve, ลูกบาศก์เมตร/วินาที

A = พื้นที่หน้าตัดการไหล ที่เป็นหน้าตัดวงแหวนเมื่อเปิดวาล์วที่ตำแหน่งปลายทรงกระบอกของปลอกท่อที่เคลื่อนที่ได้ ถึงผิวกรวยของวาล์ว, ตารางเมตร

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/วินาที²

H = ความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับระดับกึ่งกลางวาล์ว, เมตร

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล มีค่าเฉลี่ย 0.85

(กรณี Cone valve ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหล C_d ดูจากคู่มือที่มากับตัววาล์ว)

13.3.5.2 อาคารรับน้ำ (Intake structure)

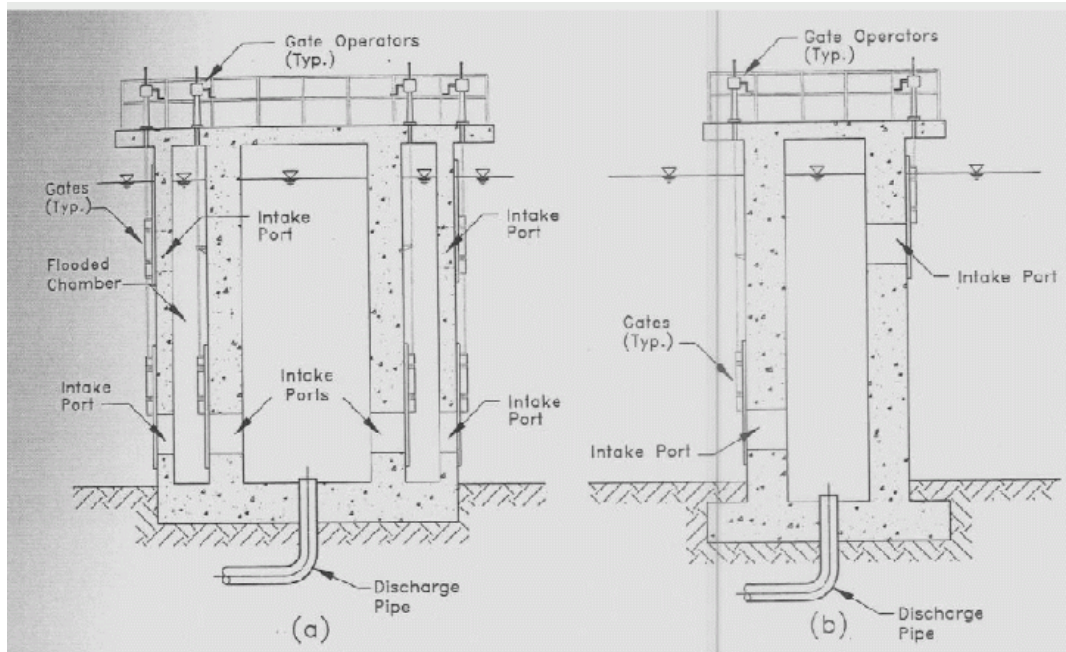
จัดเป็นอาคาร Outlet ที่มีลักษณะรูปแบบที่แตกต่างออกไปจากอาคาร Outlet ตามที่กล่าวข้างต้น มีปริมาณน้ำที่ต้องระบายออกไปค่อนข้างมาก ขนาดท่อมักมีขนาดใหญ่ อาจแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) อาคารทางเข้าเป็นหอหรือปล่องรับน้ำ และ 2) อาคารทางเข้าแบบจม

1) อาคารทางเข้าเป็นหอหรือปล่องรับน้ำ (Intake tower) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอาคารรับน้ำและเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำก่อนเข้าสู่ท่อ อาจแบ่งตามลักษณะของหอหรือปล่องรับน้ำเป็น 2 ประเภทย่อย คือ

1.1) อาคารทางเข้าแบบเปียก (Wet intake tower) เป็นอาคารทางเข้าที่ประกอบด้วยปล่องคอนกรีต 2 ชั้น ปล่องชั้นนอกจะมีช่องให้น้ำไหลที่ควบคุมปริมาณน้ำด้วยบานระบายก่อนส่งเข้าสู่ปล่องชั้นใน ช่องว่างระหว่างปล่องดังกล่าวจะทำให้ลดระดับน้ำด้านเหนือน้ำหน้าปล่องชั้นในลง ก่อนที่จะมีจะระบายน้ำผ่านช่องระบายที่ควบคุมด้วยบานระบาย ให้น้ำไหลผ่านท่อแล้วไหลออกไปด้านท้ายน้ำต่อไป

1.2) อาคารทางเข้าแบบแห้ง (Dry intake tower) มีลักษณะเป็นปล่องหรือหอถึงเช่นเดียวกับอาคารทางเข้าแบบเปียก แต่จะเป็นปล่องเพียงชั้นเดียว กล่าวคือจากกำแพงหอถึงจะมีช่องรับน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบาย เพื่อรับน้ำลงสู่ท่อด้านล่างแล้วไหลออกไปด้านท้ายน้ำ

ลักษณะรูปแบบพื้นฐานทั่วไปของ Intake tower ทั้ง 2 แบบ ดังแสดงใน รูปที่ 13-28



รูปที่ 13-28 ลักษณะรูปแบบพื้นฐานทั่วไปของ Intake tower
(a) Wet intake tower (b) Dry intake tower

1.3) การกำหนดรูปแบบอาคารระบายน้ำเป็นอาคารลักษณะ Intake tower นั้นสืบเนื่องมาจากสาเหตุต่อไปนี้

1.3.1) มีสิ่งไหลลอยปนมากับน้ำมาก เช่น ขยะ วัชพืช ซากพืช ฯลฯ ที่จะ เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในท่อ หรือในเมื่องหนวช่วงฤดูหนาวผิวน้ำเป็นน้ำแข็ง หอหรือปล่อง สูงจึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สิ่งเหล่านั้นปิดกั้นหรืออุดตันตัวท่อทั้งน้ำได้ เพราะสิ่งเหล่านั้นลอยอยู่ ด้านบนในขณะที่ช่องระบายน้ำอยู่ต่ำลงไป มีเวลาให้กำจัดออกไปควบคู่ไปกับการระบายน้ำได้

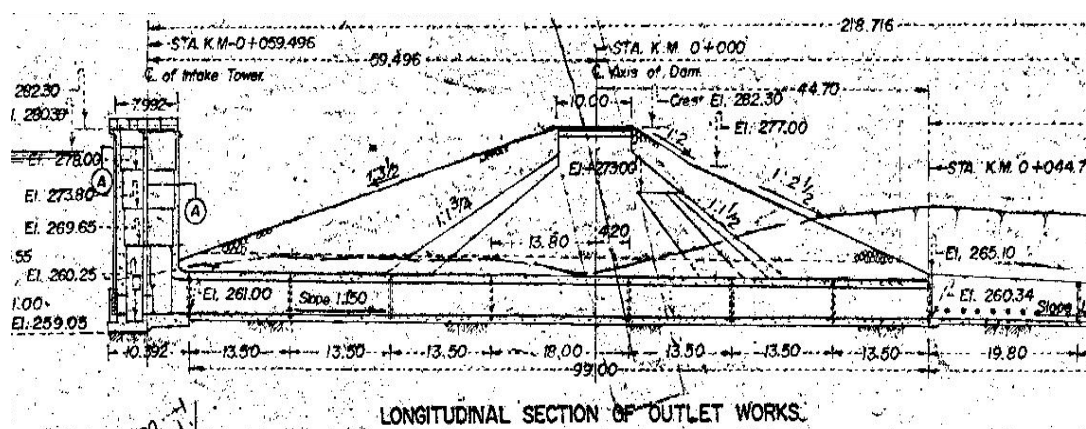
1.3.2) ระดับธรณีท่อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำมาก ทำให้มี Head การไหล ที่สูงมาก การใช้หอหรือปล่องสูงเป็นตัวรับน้ำและควบคุมระดับน้ำในกรณีของ Wet intake tower จะช่วยลดระดับ Head การไหลลง ทำให้ความเร็วการไหลลดลง ทำให้ไม่ความรุนแรงลง

ตัวอย่างอาคาร Wet intake tower ในประเทศไทยได้แก่ อาคารระบายน้ำ ที่เขื่อนลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา ภาณรินทร์ ภาณุพิณฑุ หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุง ระบบชลประทาน โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำตะคอง ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับอาคาร Intake structure ของเขื่อนลำตะคอง รวมทั้งวิธีการคำนวณและขั้นตอนในการใช้งานอาคารดังกล่าว ดัง รายละเอียดต่อไปนี้

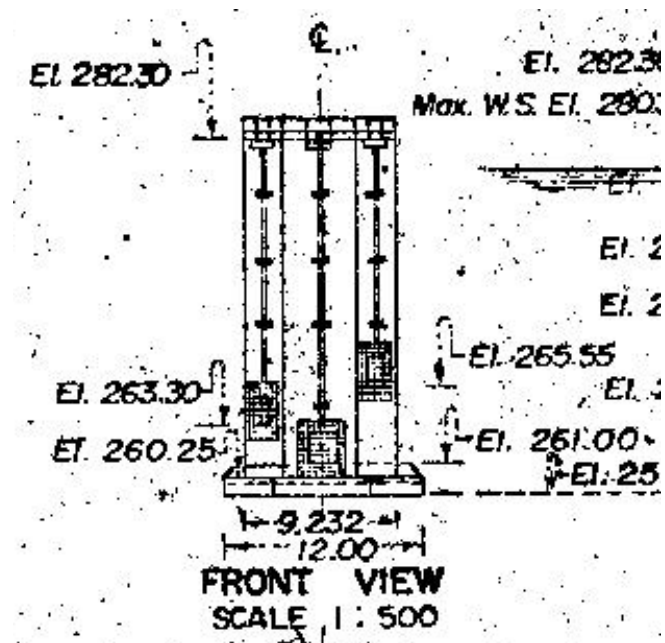
อาคาร **Intake structure** ของเขื่อนลำตะคอง ดังแสดงใน รูปที่ 13-29 และแปลนสังเขปใน รูปที่ 13-30, รูปที่ 13-31 และ รูปที่ 13-32 มีลักษณะเป็นหอถังรูปหกเหลี่ยมยาวด้านละ 6 เมตร สูง 22 เมตร มีกำแพงแบ่งกั้นแนวกกลางหอถัง ทำให้มีลักษณะคล้ายปล่องสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ปล่องประกบกัน มีช่องรับน้ำที่ติดตั้งบานระบายเพื่อควบคุมขนาด 1.75 x 1.75 เมตร โดยมีช่องรับน้ำที่กำแพงของหอถังปล่องหน้าด้านละ 1 บาน (ที่ระดับต่างกัน) รวม 3 บาน (เป็นบานที่เปิดปิดให้น้ำเข้ามาในหอถัง) และติดตั้งที่กำแพงแบ่งกั้นแนวกกลางหอถัง 1 บาน (เป็นบานที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำ) แล้วระบายน้ำผ่านท่อคอนกรีตเสริมเหล็กรูปเกือกม้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.50 เมตร ยาว 99 เมตร ระบายน้ำได้สูงสุด 20 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที



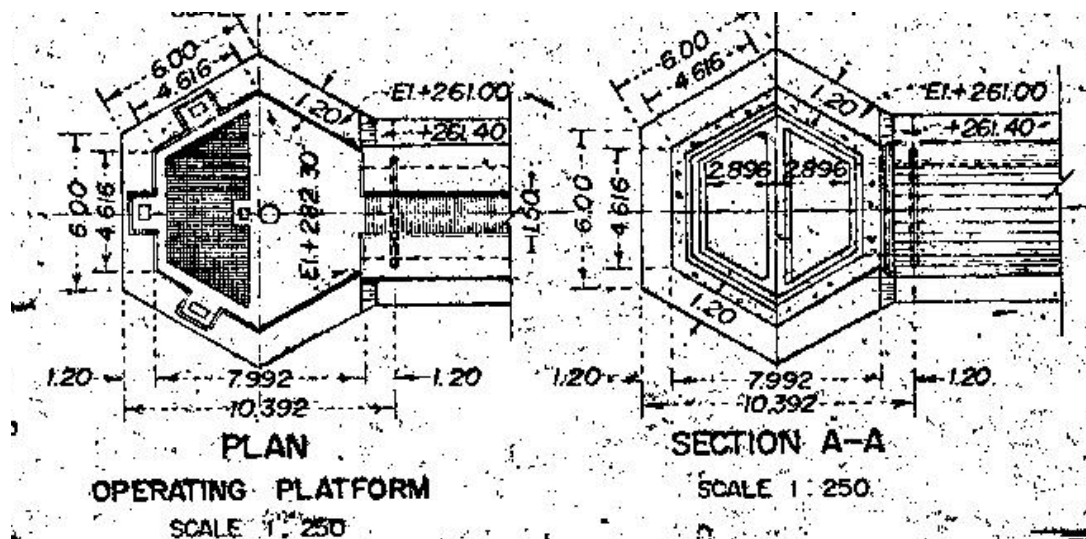
รูปที่ 13-29 อาคาร Outlet work ของเขื่อนลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา
ที่มีอาคารทางเข้าแบบเปียก (Wet intake tower)



รูปที่ 13-30 รูปตัดตามยาวอาคาร Outlet work ของเขื่อนลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา



รูปด้านหน้าอาคาร Intake outlet ของเขื่อนลำตะคอง
มีช่องรับน้ำที่กำแพงหอดังด้านหน้า 3 ด้านๆ ละ 1 ช่อง ควบคุมด้วยบานระบาย



Outlet tower เป็นรูปหกเหลี่ยมมีกำแพงแบ่งกันแนวกกลาง (Skimming wall)

ทำให้แบ่งปล่องเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูด้านหน้าและด้านใน 2 ปล่องประกบกัน

มีช่องรับน้ำที่กำแพงส่วนหน้า 3 ด้าน ๆ ละช่อง กำแพงกลางปล่องมีช่องระบายน้ำ 1 ช่อง

รูปที่ 13-31 รูปด้านหน้า แพลน และรูปตัดอาคาร Outlet work ของเขื่อนลำตะคอง

1.4) การคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารทางเข้าเป็น Intake tower

ตัวอย่างกรณีเขื่อนลำตะคอง

อาคารประเภทนี้จริง ๆ แล้วตัวท่อทำหน้าที่เพียงเป็นตัวลำเลียงน้ำออกไปด้านท้ายน้ำเท่านั้น ส่วนของอาคารที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมปริมาณน้ำนั้นคือช่องรับน้ำของหอถังหรือปล่องที่ควบคุมด้วยบานระบาย ดังนั้นการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารรับน้ำจึงต้องคำนวณปริมาณผ่านบานระบายที่ตัวหอถัง กรณี **Wet intake** ต้องควบคุมโดยบานทั้ง 2 ชั้น และกรณี **Dry intake** ควบคุมโดยบานใด ๆ นั่นเอง

การระบายน้ำของ **Wet intake** นั้น บานระบายของปล่องใน (ด้านหน้าท่อ) จะใช้เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่จะระบายทิ้งออกด้านท้ายน้ำ ส่วนบานระบายของปล่องด้านนอกหรือด้านหลังน้ำใช้ควบคุมปริมาณน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำให้ผ่านเข้ามาในปล่องชั้นในอย่างเหมาะสม

ขั้นตอนสำคัญในการระบายน้ำออกจาก Wet intake

- 1) กำหนดอัตราการระบายน้ำผ่านอาคารออกไป Q $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$
- 2) คำนวณระยะเปิดบานระบายจากช่องระบายน้ำที่ปล่องด้านใน เพื่อให้ปริมาณน้ำ Q $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$ ถูกระบายออกไป โดยให้มีระดับน้ำด้านหน้าช่องระบายน้ำคงที่ ที่ระดับกำหนด สมมติเป็น **EI.B**
- 3) คำนวณระยะเปิดบานระบายจากช่องระบายน้ำที่ปล่องด้านนอก เพื่อให้ปริมาณน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำที่สมมติมีระดับน้ำ **EI.A** ผ่านเข้ามาสู่ช่องว่างหน้าปล่องด้านใน ด้วยอัตราการไหล Q $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$ โดยให้มีระดับน้ำด้านท้ายช่องระบายน้ำด้านหน้าคงที่ที่ระดับ **EI.B** (ระดับสันของ **Skimming wall** กรณี **Wet intake** ของเขื่อนลำตะคอง)
- 4) จาก ข้อ 2) และ 3) อาจกล่าวได้ว่าควบคุมให้ปริมาณน้ำผ่านปล่องด้านนอกเข้า และระบายออกจากปล่องด้านในอัตราที่เท่ากัน (น้ำไหลเข้าเท่ากับน้ำไหลออก) จึงทำให้มีระดับน้ำระหว่างปล่องคงที่ตลอดเวลา
- 5) การควบคุมปริมาณน้ำด้วยบานระบายดังกล่าว ถ้าปล่องแต่ละชั้นมีบานระบายหลายบานให้พิจารณาควบคุมบานแต่ละบานตามความเหมาะสม โดยให้เป็นไปตามข้อกำหนดในข้อ 4)

ข. การควบคุมปริมาณน้ำจากบานระบายของปล่องนอก

การคำนวณการไหลผ่านช่องรับน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบาย ของ Intake tower ที่ปล่องนอก ใช้หลักการคำนวณ Submerged orifice flow ซึ่งกรณีของเขื่อนลำตะคองมีช่องรับน้ำ 3 ช่องที่กำแพงหอถึงด้านหน้า 3 ด้าน โดยแต่ละช่องมีระดับธรณีไม่เท่ากัน การระบายน้ำอาจเลือกบานเดียวหรือหลายบานก็ได้ แต่ต้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดคือ อัตราการไหลรวมตามที่ต้องการ และระดับน้ำด้านท้ายต้องไม่เกินระดับสัน Skimming wall

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านช่องรับน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบาย, $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$

A = พื้นที่หน้าตัดการไหล = $B \times G_o$, ม.^2

B = ความกว้างของช่องระบาย (1.75 ม.)

G_o = ระยะยกบานระบายด้านนอก, ม.

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/วินาที²

H = ความแตกต่างระดับน้ำด้านหน้าบานระบาย (H_o) กับท้ายบานระบาย (H_i), ม.

$$[H = H_o - H_i]$$

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล มีค่า 0.60

ข้อควรปฏิบัติ

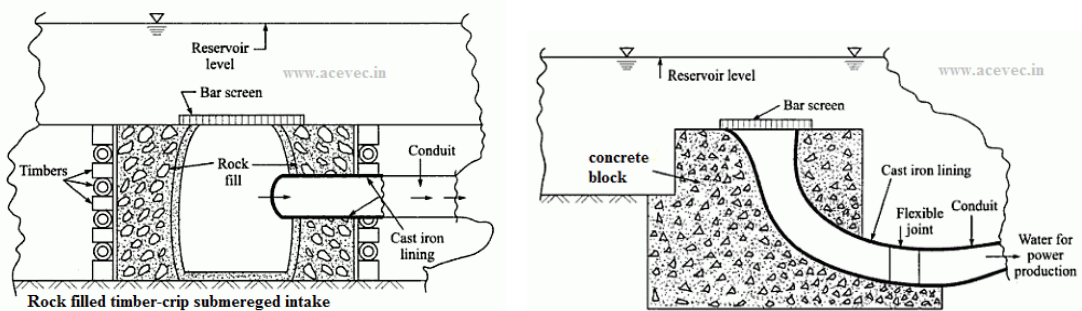
1) ในการเปิดบานระบายนั้นจะเปิดบานระบายของปล่องไหนก่อนก็ได้ แต่หากเปิดบานระบายของปล่องนอกก่อน ค่อยๆ ปล่อยน้ำเข้าไปในช่องว่างระหว่างปล่อง (หน้า Skimming wall) น้ำก็จะไม่กระทบบานระบายระบายตัวในให้เสียหายได้

2) กรณีระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำมีระดับต่ำกว่าสัน Skimming wall อาจเปิดบานระบายของปล่องหน้าทั้งหมดเพราะไม่มีความจำเป็นต้องลด Head การไหลก่อนเข้าบานชั้นในแล้ว การควบคุมจะใช้เฉพาะบานชั้นใน และขณะนั้นอาคารมีสภาพเป็น Dry intake outlet ไปโดยปริยาย

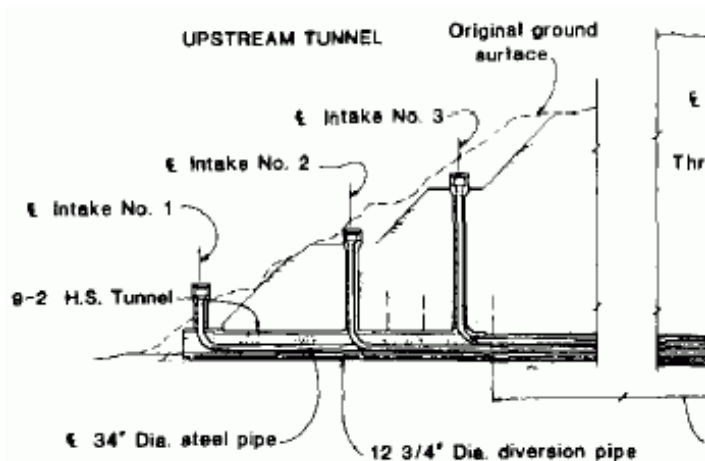
ในกรณีต้องระบายน้ำปริมาณมากกว่าที่บานระบายชั้นในจะสามารถระบายได้ ก็ให้ปรับการระบายน้ำผ่านบานระบายด้านหน้าเพิ่มขึ้น เพราะน้ำส่วนเกินจะล้นข้ามสัน Skimming wall ออกไปลงสู่ท่อ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาความสามารถรองรับน้ำของลำน้ำด้านท้ายที่จะไม่ทำให้เกิดการล้นตลิ่งไหลบ่าท่วมพื้นที่ด้านท้ายน้ำด้วย

2) อาคารทางเข้าแบบจม (Submerged outlet work)

อาคารชนิดนี้ในปัจจุบันเปลี่ยนรูปแบบเป็นอาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work) ที่ได้นำเสนอแล้วในหัวข้อ 13.3.1 โดยใช้เป็นอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก ที่มีอัตราการระบายน้ำไม่มาก และไม่มีสิ่งไหลปนมากับน้ำ เช่น ตะกอน ขยะ วัชพืช ฯลฯ ที่จะเกิดสาเหตุให้เกิดการอุดตันในท่อ ระดับของพื้นที่ด้านท้ายมักลาดต่ำ จึงต้องวางท่อต่ำ รูปแบบอาคารรับน้ำ (Intake) ที่ออกแบบในช่วงแรกๆ ดังแสดงใน รูปที่ 13-33 และรูปที่ 13-34 โดยจะมีบานระบายทำหน้าที่ปิดเปิดติดตั้งไว้ตอนท้ายอาคาร (การใช้งานจะเปิดบานจนหมด)



รูปที่ 13-33 รูปแบบอาคารรับน้ำ (Intake) ที่ออกแบบในช่วงแรกๆ บางแบบ



รูปที่ 13-34 ตัวอย่างอาคารรับน้ำที่ออกแบบให้มี Intake อยู่ 3 ระดับ

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารทางเข้าแบบจม

มีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณการไหลในท่อปิดภายใต้แรงดัน ตามที่ได้อธิบายไว้ในตอนต้น

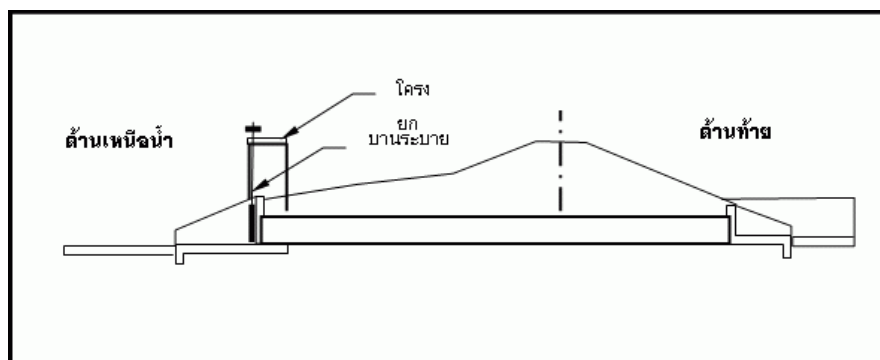
13.3.6 ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ (Head regulator) และอาคารทางเข้า (Inlet structure)

อาคารท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ และอาคารทางเข้า จะเป็นท่อวางลอดทำนบดินมีอาคาร Transition ทั้งที่ด้านหน้ารับน้ำเข้าท่อและที่ด้านท้ายเชื่อมต่อกับคลองส่งน้ำเพื่อนำน้ำเข้าสู่คลองส่งน้ำดังกล่าว มีอุปกรณ์ควบคุมได้แก่บานระบาย หรือประตูน้ำเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำ เพื่อให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านออกไปเข้าสู่คลองส่งน้ำตามปริมาณที่เราต้องการ โดยคลองส่งน้ำจะมีขนาดไม่ใหญ่มาก ท่อของอาคารนี้จะออกแบบให้มีรูปร่างหน้าตัดเป็นรูปทรงใดก็ได้ แต่ส่วนใหญ่มักนิยมใช้ท่อกลม

13.3.6.1 ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ (Head regulator)

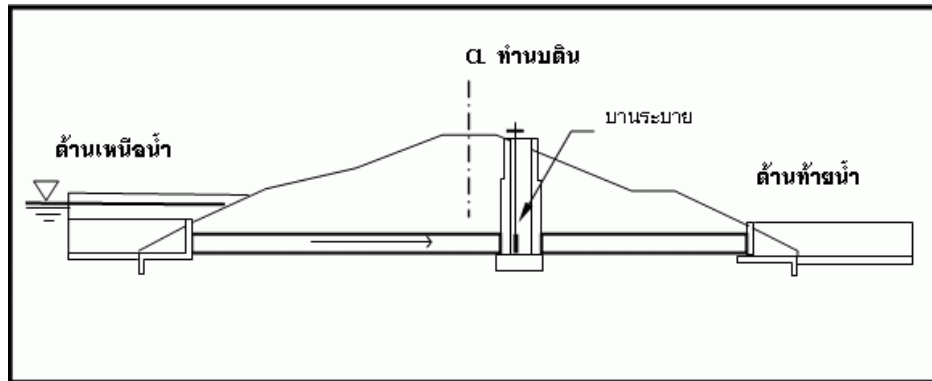
ลักษณะการไหลของท่อระบายน้ำปากคลองจะมีได้ 3 รูปแบบ คือ การไหลผ่านบานระบายแบบ Orifice flow, การไหลในระบบท่อปิดภายใต้แรงดัน และการไหลแบบทางน้ำเปิดเมื่อน้ำไหลไม่เต็มท่อ โดยลักษณะการควบคุมปริมาณน้ำของอาคารท่อระบายน้ำด้วยบานระบายแบบบานตรง แบ่งได้ 3 ลักษณะคือ

1) การควบคุมด้านเหนือน้ำหรือหน้าท่อ เป็นลักษณะรูปแบบที่นิยมใช้มาก ถ้าทำนบดินไม่สูง ฐานไม่กว้าง โครงยกเดี่ยว แขนบานสั้น การคำนวณปริมาณน้ำใช้หลักการของน้ำไหลผ่าน Orifice หรือ บานระบาย อนึ่ง ในคลองสายเดียวกัน ถ้ามีอาคารท่อระบายน้ำปลายคลอง (Tail regulator) ก็มักสร้างให้มีลักษณะรูปแบบ และมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์เหมือนอาคารปากคลองดังกล่าวนี้ด้วย



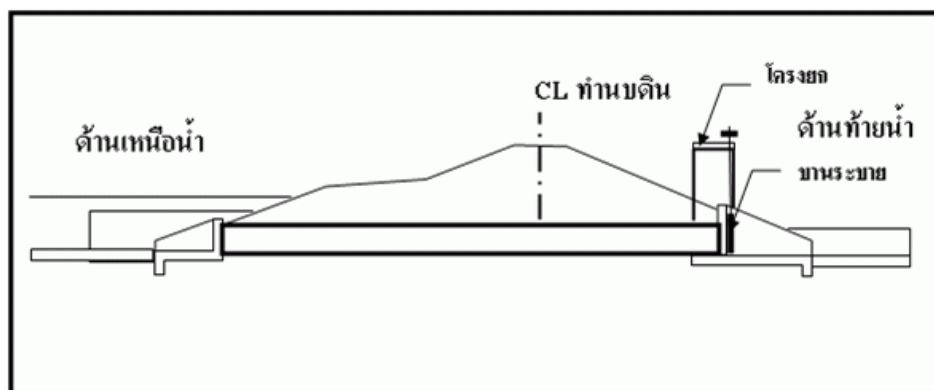
รูปที่ 13-35 ท่อระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายด้านเหนือน้ำหรือหน้าท่อ

2) การควบคุมกลางท่อ จะใช้ในกรณีที่ตัวเขื่อนหรือทำนบดินสูงมากทำให้ฐานมีความกว้างมากการควบคุมที่ด้านหน้าหรือด้านหลังทำได้ไม่สะดวก ในประเทศไทยไม่นิยมสร้างอาคารลักษณะนี้เพราะ จะมีความยุ่งยากในการสร้างและการบำรุงรักษา การคำนวณปริมาณน้ำใช้หลักการของน้ำไหลผ่าน Orifice หรือ บานระบาย



รูปที่ 13-36 ท่อระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายที่กลางท่อ

3) การควบคุมด้านท้ายน้ำหรือท้ายท่อ การออกแบบลักษณะนี้เนื่องจากตัวเขื่อนหรือทำนบดินสูงและมีฐานที่กว้างมาก มักสร้างถนนขนานไปกับดินลาดท้ายเขื่อนหรือทำนบดินเพื่อให้สะดวกในการปฏิบัติงาน ในประเทศไทยไม่นิยมสร้างอาคารลักษณะนี้ (จะสร้างเป็นอาคารทางเข้า หรือ Inlet structure แทน) การคำนวณปริมาณน้ำใช้หลักการของน้ำไหลผ่าน Orifice หรือ บานระบาย



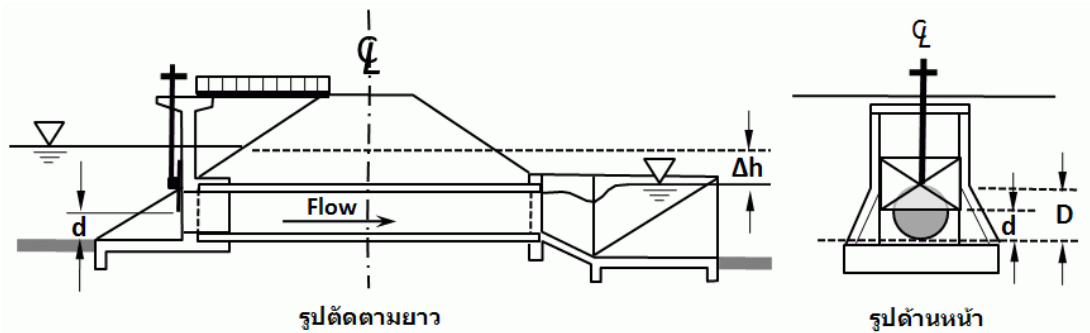
รูปที่ 13-37 ท่อระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายที่ด้านท้ายท่อ

13.3.6.2 การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ

จะนำเสนอเฉพาะท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำที่มีลักษณะรูปแบบที่นิยมสร้างใช้งานในประเทศไทยซึ่งได้แก่ ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำที่ควบคุมปริมาณน้ำด้วยบานระบายด้านหน้าอาคารเท่านั้น

❖ ท่อระบายน้ำปากคลองที่ควบคุมปริมาณน้ำด้วยบานระบายด้านหน้าอาคาร

ลักษณะรูปแบบทั่วไปของท่อระบายน้ำปากคลองประเภทนี้แสดงตาม **รูปที่ 13-38** การควบคุมอัตราการไหลจะใช้บานระบายชนิดบานตรง เนื่องจากส่วนประกอบของอาคารเป็นท่อสั้น ๆ และเมื่อเทียบขนาดท่อกับความยาวท่อแล้วถือได้ว่าเป็นอาคารที่มีคุณสมบัติของท่อขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงใช้หลักการ **Submerged orifice flow** ในการคำนวณอัตราการไหล



รูปที่ 13-38 แสดงลักษณะรูปแบบทั่วไปของท่อระบายน้ำปากคลอง

1.1) ลักษณะการไหลแบบ Submerged orifice flow สำหรับอาคารชลศาสตร์ประเภทท่อเมื่อมีการควบคุมอัตราการไหลด้วยบานระบาย ที่ระดับน้ำด้านท้ายน้ำท่วมท้ายท่อ

$$Q = C_d A \sqrt{2g\Delta h}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคาร, $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$

A = พื้นที่หน้าตัดการไหล (ขนาดของช่องเปิดของท่อ), ม.^2

- ค่า A ของท่อกลม เมื่อยกบานระบาย d ของท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D หาได้จากกราฟใน **รูปที่ 13-2** หรือจาก **ตารางที่ 13-5**

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = $9.81 \text{ ม.} / \text{วินาที}^2$

Δh = ความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำ (ในอ่างเก็บน้ำหรือฝายทดน้ำ) กับด้านท้ายน้ำ (ในคลองส่งน้ำ)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล มีค่าระหว่าง 0.61 ถึง 0.71 อาจใช้ค่าเฉลี่ย **0.65**

1.2) ลักษณะการไหลแบบอื่น

นอกจากการไหลแบบ Submerged orifice ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานในการทำงานตามปกติของอาคารชนิดนี้แล้ว ยังมีลักษณะการไหลรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ การไหลแบบ Free orifice flow ที่ระดับน้ำด้านท้ายน้ำไม่ท่วมท้ายท่อ กับการยกบานระบายพื้นน้ำแล้วน้ำไหลไม่เต็มท่อ ซึ่งจะไม่ให้ความสำคัญมากนัก เพราะจะเกิดเมื่ออยู่ในสถานะที่ไม่ปกติ คือระดับน้ำด้านเหนือ น้ำในแหล่งเก็บกักน้ำ เช่น อ่างเก็บน้ำ ฝายทดน้ำ ฯลฯ อยู่ต่ำ

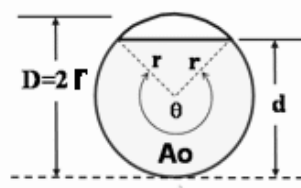
13.3.6.3 อาคารทางเข้า (Inlet structure)

เป็นอาคารที่ทำหน้าที่รับน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำเข้าสู่คลองส่งน้ำ อาจเรียกได้หลายอย่าง เช่น อาคารทางเข้า อาคารท่อส่งน้ำ ท่อระบายน้ำปากคลองส่งน้ำ ฯลฯ ลักษณะรูปแบบและคุณสมบัติทางชลศาสตร์เหมือนอาคารทิ้งน้ำหรืออาคารส่งน้ำจากเขื่อน (Outlet work) ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 13.4.5.1 ทุกประการ ต่างกันที่วัตถุประสงค์การใช้งานระบายน้ำออกไป โดยอาคาร Inlet จะระบายน้ำเข้าสู่คลองส่งน้ำ แต่อาคาร Outlet จะระบายน้ำทิ้งลงลำน้ำด้านท้าย

*** ดังนั้นจึงให้ไปดูรายละเอียดในหัวข้อ 13.3.5.1

ตารางที่ 13-5 พื้นที่หน้าตัดการไหลของท่อกลมเทียบกับระยะที่ยกบานระบาย

AREA OF GATE OPENING - m. ²										
GATE OPENING-m	PIPE DIAMETER - m.									
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
0.05	0.0079	0.0096	0.0102	0.0106	0.0123	0.0147	0.0164	0.0155	0.0211	0.0276
0.10	0.0203	0.0245	0.0279	0.0381	0.0384	0.0409	0.0459	0.0544	0.0588	0.0588
0.15	0.0353	0.0438	0.0495	0.0553	0.0665	0.0739	0.0834	0.0920	0.1072	0.1176
0.20	0.0503	0.0628	0.0733	0.0814	0.0982	0.1118	0.1267	0.1350	0.1439	0.1636
0.25	0.0627	0.0834	0.0982	0.1127	0.1327	0.1535	0.1747	0.1991	0.2046	0.2400
0.30	0.0707	0.1011	0.1230	0.1414	0.1753	0.1982	0.2264	0.2515	0.2710	0.2956
0.35		0.1171	0.1468	0.1701	0.2130	0.2450	0.2812	0.3071	0.3424	0.3844
0.40		0.1256	0.1684	0.2014	0.2513	0.2934	0.3386	0.3850	0.4180	0.4472
0.45			0.1861	0.2275	0.2897	0.3428	0.3978	0.4459	0.4970	0.5460
0.50			0.1963	0.2509	0.3336	0.3927	0.4584	0.5085	0.5788	0.6140
0.55				0.2721	0.3699	0.4426	0.5220	0.5944	0.6351	0.7200
0.60				0.2827	0.4044	0.4920	0.5823	0.6601	0.7212	0.7928
0.65					0.4361	0.5404	0.6448	0.7265	0.8091	0.9040
0.70					0.4685	0.5872	0.7072	0.8161	0.8985	0.9800
0.75					0.4904	0.6319	0.7687	0.8836	0.9889	1.0956
0.80					0.5026	0.6736	0.8294	0.9511	1.0801	1.1736
0.85						0.7115	0.8886	1.0406	1.1720	1.2916
0.90						0.7445	0.9459	1.1070	1.2333	1.3712
0.95						0.7707	1.0008	1.1727	1.3251	1.4908
1.00						0.7854	1.0525	1.2587	1.4164	1.5708
1.05							1.1005	1.3212	1.5067	1.6908
1.10							1.1437	1.3822	1.5962	1.7704
1.15							1.1812	1.4600	1.6841	1.8896
1.20							1.2108	1.5156	1.7701	1.9680
1.25							1.2272	1.5680	1.8265	2.0848
1.30								1.6321	1.9082	2.1616
1.35								1.6751	1.9872	2.2748
1.40								1.7121	2.0629	2.3488
1.45								1.7516	3.1342	2.4572
1.50								1.7671	2.2007	2.5276
1.55									2.2613	2.6292
1.60									2.2981	2.6944
1.65									2.3465	2.7876
1.70									2.3841	2.8460
1.75									2.4053	2.9280
1.80										2.9780
1.85										3.0448
1.90										3.0828
1.95										3.1268
2.00										3.1416

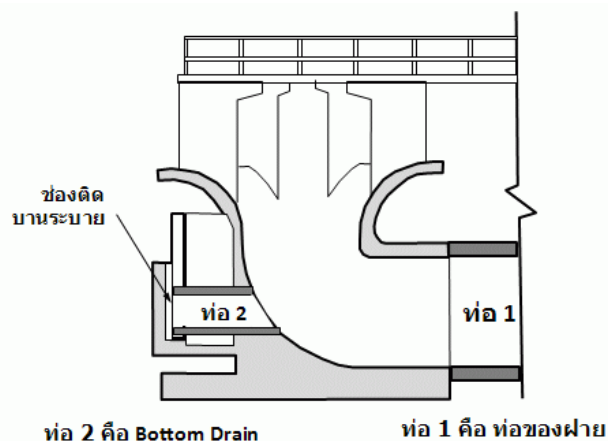


A_o = พื้นที่หน้าตัดของน้ำที่ไหลผ่านท่อ
 d = ระยะยกบานระบาย
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
 r = รัศมีท่อ

หมายเหตุ ในการส่งน้ำนั้นจะกำหนดระยะเปิดบานระบายเพื่อควบคุมอัตราการไหลเป็นค่าจำนวนเต็มที่เป็นค่าสัดส่วนของ 0.05 เมตรซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่จะเปิดบานเสมอ ส่วนจะให้ได้ปริมาณน้ำเท่าใดก็กำหนดจากระยะเวลาที่ต้องใช้ในการส่งน้ำ

13.3.7 Bottom drain หรือ Bottom outlet

เป็นอาคารที่อาจสร้างไว้เป็นส่วนหนึ่งของทางระบายน้ำล้นแบบ Morning Glory Spillway โดยสร้างไว้ที่ฐานด้านหน้าในระดับเดียวกับท่อทิ้งน้ำเนวราบออกสู่ด้านท้ายของทางระบายน้ำล้น มีลักษณะเป็นอาคารรับน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบายชนิดบานตรงนำน้ำผ่านท่อไปเชื่อมต่อกับท่อทิ้งน้ำเนวราบของตัวทางระบายน้ำล้น มีหน้าที่ใช้ระบายน้ำลงสู่ลำน้ำด้านท้ายน้ำเมื่อระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำอยู่ต่ำกว่าสันทางระบายน้ำล้น



รูปที่ 13-39 ลักษณะรูปแบบทั่วไปของ Bottom drain

สร้างไว้เป็นอาคารประกอบด้านหน้า Morning Glory Spillway

❖ การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน Bottom drain

ลักษณะการไหลเป็นแบบ Submerged orifice flow คำนวณโดยสมการ

$$Q = C_d A \sqrt{2gY}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคาร, $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$

A = พื้นที่หน้าตัดการไหล (ขนาดของช่องเปิดของท่อ), ตารางเมตร

- ค่า A เมื่อระยะยกบาน d ท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง D หาได้จาก ตารางที่ 13-5

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = $9.81 \text{ ม.} / \text{วินาที}^2$

Y = ระยะระหว่างระดับน้ำด้านเหนือน้ำในอ่างเก็บน้ำกับระดับ Centroid ของช่องเปิดที่ปากท่อจากการยกบานระบาย (อนุโลมให้ใช้ที่กึ่งกลางระยะยกบาน)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล ใช้ค่าเฉลี่ย 0.65

13.3.8 ท่อส่งน้ำเข้านา (Farm turnout: FTO หรือ Farm intake)

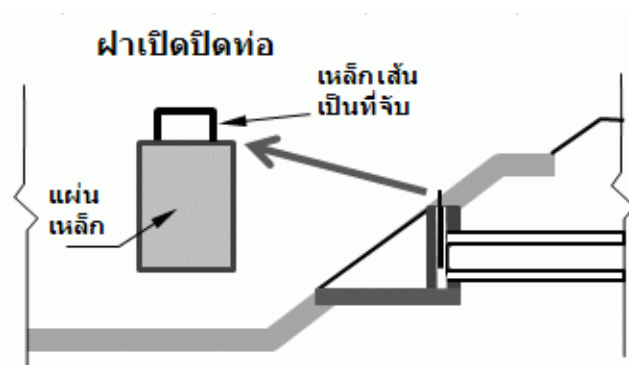
เป็นอาคารรับน้ำจากคลองส่งน้ำเข้าสู่ทุ่งน้ำ ขนาดของท่อส่งน้ำเข้านากำหนดจากขนาดของท่อที่ใช้ ที่มักใช้ท่อกลมขนาด 0.20 ถึง 0.50 เมตร การควบคุมปริมาณน้ำ อาจควบคุมด้วยใช้ฝาท่อเพื่อปิดเปิดซึ่งนิยมใช้กับท่อขนาด 0.20 เมตร และการควบคุมด้วยบานระบาย สำหรับท่อขนาดใหญ่ ความยาวของท่อขึ้นกับความกว้างของคันคลองส่งน้ำ

โดยปกติแล้วในการออกแบบท่อส่งน้ำเข้านาถ้ารู้ขนาดน้ำด้านท้ายเป็นคูตินจะกำหนดให้มีความเร็วของน้ำผ่านท่อไม่เกิน 1.0 เมตร/วินาที แต่ถ้าเป็นคูตาคอนกรีตและความลาดเทของพื้นที่เหมาะสมอาจออกแบบให้มีความเร็วของน้ำผ่านท่อสูงสุดได้ถึงไม่เกิน 1.5 เมตร/วินาที (ใช้เป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบการตรวจสอบการคำนวณปริมาณน้ำ)

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่านท่อส่งน้ำเข้านา

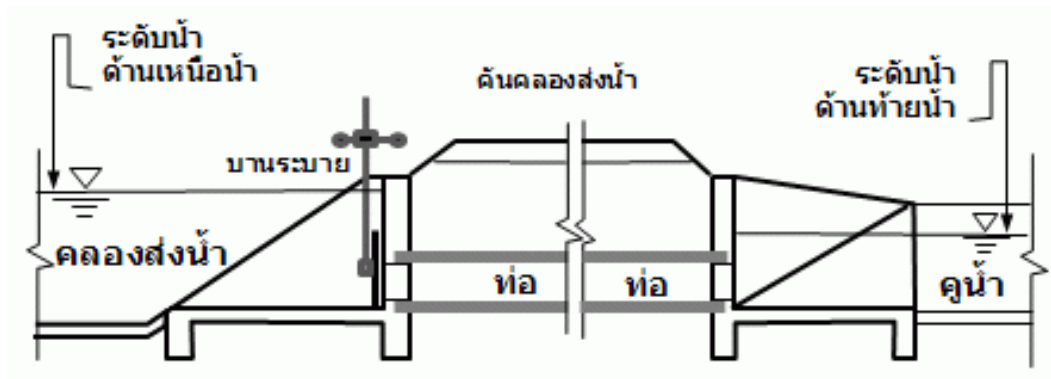
1) กรณีท่อขนาดเล็กที่ใช้ฝาท่อทำหน้าที่เปิดปิด

เป็นท่อส่งน้ำเข้านาขนาดเล็กที่มีลักษณะรูปแบบง่าย ๆ ใช้ฝาท่อที่เป็นแผ่นเหล็กมีมือจับทำด้วยเหล็กเส้นเชื่อมติดไว้ เพื่อทำหน้าที่เปิดปิดปากท่อ มีการไหลผ่านท่อเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ จึงใช้ค่าการออกแบบอัตราการไหลสูงสุดของท่อนั้นมาใช้ได้เลย เพราะในการออกแบบท่อส่งน้ำเข้านานั้นจะใช้หลักการไหลในท่อปิดภายใต้แรงดัน มาออกแบบอัตราการไหลสูงสุดเมื่อน้ำไหลผ่านท่อเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ (ปากท่อเป็นอิสระเปิดเต็มที่ไม่มีสิ่งใดมาควบคุมปิดกั้น) ซึ่งคำนวณได้จากการคิดการสูญเสียในระบบจากที่ปากทางเข้า ในท่อ และที่ทางออก โดยกำหนดให้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำในคลองส่งน้ำ และระดับน้ำด้านท้ายน้ำในคูน้ำ อยู่ในระดับ Full supply ของคลองส่งน้ำและคูน้ำดังกล่าว



รูปที่ 13-40 ท่อส่งน้ำเข้านาขนาดเล็กที่ใช้ฝาท่อทำหน้าที่เปิดปิด

2) ท่อส่งน้ำเข้านาที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยบานระบาย ใช้หลักการ Submerged orifice flow สำหรับเมื่อมีการควบคุมอัตราการไหลของท่อส่งน้ำเข้านาด้วยบานระบาย ดังแสดงใน รูปที่ 13-41



รูปที่ 13-41 แสดงรูปตัดอาคารท่อส่งน้ำเข้านาแบบหนึ่งที่ใช้บานระบายควบคุมปริมาณน้ำ

การคำนวณอัตราการไหล โดยใช้สมการ Submerged orifice flow

$$Q = C_d A \sqrt{2g\Delta h}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคาร, ลูกบาศก์เมตร/วินาที

A = พื้นที่หน้าตัดการไหล (ขนาดของช่องเปิดของท่อ), ตารางเมตร

- กรณีท่อสี่เหลี่ยม $A = L \cdot d$

L = ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยม, เมตร

d หรือ G_o = ระยะยกบานระบาย, เมตร

- กรณีท่อกลมค่า A หาได้จากกราฟใน รูปที่ 13-2 หรือ ตารางที่ 13-5

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/วินาที²

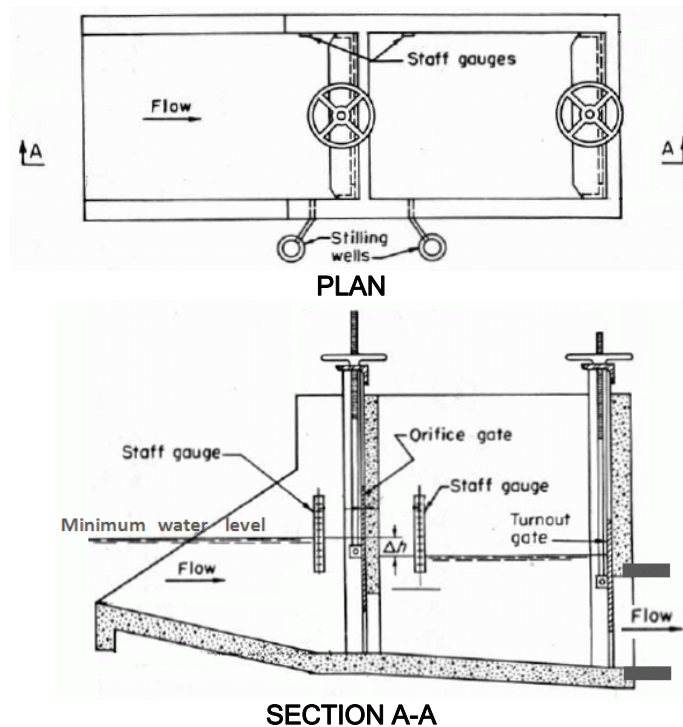
Δh = ความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำในคลองส่งน้ำกับด้านท้ายน้ำในคูน้ำ

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล = 0.65

13.3.9 Constant Head Orifice (CHO)

Constant Head Orifice หรือ CHO เป็นอาคารชลศาสตร์ที่พัฒนาโดย United States Bureau of Reclamation (USBR) เพื่อทำหน้าที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำและวัดปริมาณน้ำไปพร้อมกัน โดยใช้เป็นอาคารควบคุมที่ปากคลอง หรือใช้เป็นท่อส่งน้ำเข้านา (Turnout) ลักษณะเด่นคือมีบานระบายแบบบานตรง 2 ชั้นหรือ 2 บาน คือบานด้านหน้าเป็น Orifice gate (ช่อง Orifice เป็นช่องสี่เหลี่ยม) บานด้านในเป็น Turnout gate (ช่อง Turnout ขึ้นกับรูปร่างของท่อ) โดยระหว่างบานทั้งสองจะเป็นเป็นบ่อน้ำนิ่ง (Stilling basin) หลักการทำงานให้น้ำไหลผ่านอาคารเป็นแบบ Submerged Orifice ที่กำหนดให้มีความแตกต่างของระดับน้ำ (Δh) ระหว่างด้านเหนือหน้า Orifice gate กับน้ำระดับน้ำด้านท้ายน้ำใน Stilling basin เป็นค่าคงที่ กำหนดให้มีความมาตรฐานเท่ากับ 6 เซนติเมตร ลักษณะรูปแบบของ CHO ดังแสดงใน รูปที่ 13-42

ในส่งน้ำผ่าน CHO ใดๆ จะนำค่าความต้องการใช้น้ำทั้งหมดของพื้นที่ที่ต้องรับน้ำผ่านจาก CHO นั้นมาคำนวณหาขนาดของช่องรับน้ำ ซึ่งเป็นระยะยกบานของ Orifice gate กล่าวคือ เมื่อทำการส่งน้ำ Orifice gate จะเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำตามปริมาณที่เราต้องการ ส่วน Turnout gate จะเป็นตัวปรับให้ระดับน้ำใน Stilling basin มีความแตกต่างกับระดับน้ำหน้า Orifice gate ให้คงที่อยู่ที่ 6 เซนติเมตร



รูปที่ 13-42 ตัวอย่าง แปลนและรูปตัดตามยาวของ CHO

❖ การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน CHO

ใช้สมการพื้นฐานของ Submerged orifice flow

$$Q = C_d A \sqrt{2g\Delta h}$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคาร, ลูกบาศก์เมตร/วินาที

$A = L \cdot Y_o$ = พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด Orifice gate, ตารางเมตร

L = ความกว้างของช่องเปิด, เมตร

Y_o หรือ G_o = ระยะเปิดบานระบาย, เมตร

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 เมตร/วินาที²

Δh = 0.06 เมตร ความแตกต่างของระดับน้ำด้านหน้าและท้าย Orifice Gate

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (ตามรายละเอียดในลำดับถัดไป)

ค่า C_d ของ CHO

C_d จะขึ้นอยู่กับค่าของ Y_1 / Y_o เมื่อ Y_1 คือระดับน้ำด้านหน้าอาคารและ Y_o เป็นระยะยกบานระบาย ซึ่งได้จากการทดลองดังนี้

$$\frac{Y_1}{Y_o} \geq 4.0 \quad \text{จะได้ค่า} \quad C_d = 0.65$$

$$\frac{Y_1}{Y_o} \leq 2.5 \quad \text{จะได้ค่า} \quad C_d = 0.75$$

อาจใช้ค่าโดย C_d เฉลี่ย = 0.7

ปัญหาและความผิดพลาดในการส่งน้ำผ่าน CHO

1) ค่า Δh ที่ต้องควบคุมให้คงที่ เป็นค่าช่วงแคบ ๆ คือ 0.06 เมตร หากค่าดังกล่าวผิดพลาดเพียงเล็กน้อย จากการอ่านค่าระดับน้ำจาก Staff gage ผิดก็จะทำให้อัตราการไหลผิดพลาดได้มาก ตัวอย่างเช่น หากอ่านค่าจาก Staff gage ผิดไปเพียง 0.5 ซม. ทำให้ความผิดพลาดโดยรวมผิดไป 1 ซม. ซึ่งคิดเป็น 16% ของ Δh ทั้งหมด ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลผิดพลาด 8% ส่วนการปรับเพิ่มค่า Δh แม้ทำให้ความผิดพลาดของอัตราการไหลลดลง แต่จะทำให้การไหลรุนแรง ทำให้เกิดผลกระทบต่อด้านท้ายน้ำได้มาก

2) การคิดปริมาณความต้องการใช้น้ำของพื้นที่เพาะปลูกหรืออื่น ๆ ไม่ถูกต้อง เมื่อส่งน้ำผ่าน CHO ทำให้ปริมาณน้ำที่ส่งกับปริมาณน้ำที่ใช้ไม่สอดคล้องกัน ไม่สามารถควบคุมให้ค่า Δh คงที่ที่ 0.06 เมตรได้

3) การคำนวณระยะเปิดบาน Orifice gate ผิดพลาดทำให้ปริมาณน้ำที่ส่งกับปริมาณน้ำที่ใช้ไม่สอดคล้องกัน ไม่สามารถควบคุมให้ค่า Δh คงที่ได้

4) การไม่รู้และไม่เข้าใจหลักการทำงานของ CHO แล้วส่งน้ำโดยไม่ตรวจสอบความต้องการใช้น้ำ หรือไม่คำนวณระยะเปิดบาน Orifice gate แต่พยายามปรับบานทั้ง Orifice gate และ Turnout gate เพื่อให้ได้ค่า Δh คงที่ที่ 0.06 เมตรให้ได้ ซึ่งยากที่จะทำได้

5) จากการที่การส่งน้ำผ่าน CHO นั้นค่อนข้างมีความละเอียดอ่อนและมีปัญหามากตามที่กล่าวข้างต้น ทำให้ผู้ใช้งานส่วนใหญ่เห็นว่าอาคาร CHO นั้นทำงานไม่ได้ผลตามหลักที่กำหนด จึงมักแก้ปัญหาโดยการยกบาน Orifice gate พื้นน้ำหรือถอดออก แล้วควบคุมอัตราการไหลโดยใช้ Turnout gate เพียงบานเดียว ทำให้อาคารดังกล่าวกลายสภาพเป็น Farm turnout ไปโดยปริยาย

13.4 การวัดปริมาณน้ำไหลผ่านท่อขนาดเล็กความยาวสั้นๆ

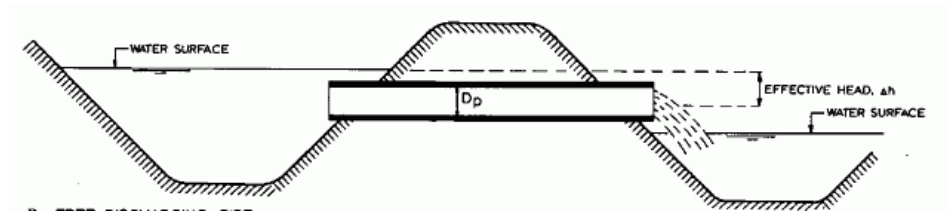
การวัดปริมาณน้ำผ่านท่อขนาดเล็กที่จะกล่าวในหัวข้อนี้ ประกอบด้วยท่อ 2 ประเภทคือ ท่อขนาดเล็กที่รับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงเพาะปลูก กับการวัดปริมาณน้ำที่ออกจากปลายท่อเปิดที่ใช้ปล่อยน้ำจากระบบท่อออกไปใช้

13.4.1 ท่อขนาดเล็กที่รับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงเพาะปลูก

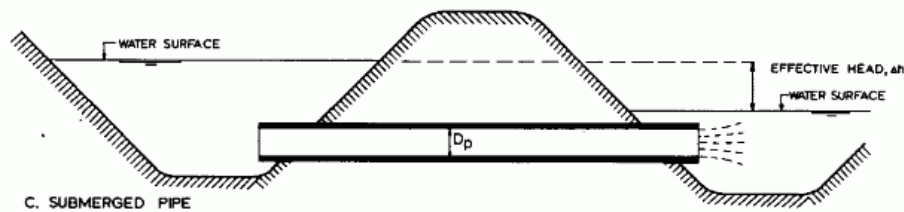
โดยปกติแล้วจะไม่มี การคำนวณปริมาณน้ำจากท่อรับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงนา เพราะพื้นที่แต่ละแปลงมักกำหนดให้มีท่อ ขนาดและจำนวนที่เหมาะสมกับขนาดของแปลงอยู่แล้ว สำหรับการวัดปริมาณน้ำเข้านั้นแปลงมักทำในกรณีศึกษาการใช้น้ำของพืช การศึกษาประสิทธิภาพการส่งน้ำในแปลง หรือตรวจสอบความเพียงพอที่แปลงได้รับน้ำเหมาะสมกับระยะเวลาหรือรอบเวรการส่งน้ำ เป็นต้น ซึ่งอาจใช้เครื่องมือวัดน้ำ เช่น Flume หรือฝายวัดน้ำ วัดปริมาณน้ำจากท้ายท่อแล้ว อาจคำนวณหรือเทียบหาค่าจากกราฟได้โดยตรงเมื่อรู้ค่า Head ของการไหลผ่านท่อนั้น

รูปแบบการไหลของท่อรับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงนา แสดงในรูปที่ 13-43 ซึ่งรูป ก. ฝั่งท่อไว้สูงน้ำด้านท้ายท่อไม่ท่วมหลังท่อจึงมีการไหลแบบ Free flow ซึ่ง Head ของการไหลจะคิดจากผลต่างของระดับน้ำหน้าท่อกับระดับกึ่งกลางของท้ายท่อ ส่วนรูป ข. ฝั่งท่อไว้ต่ำน้ำด้านท้าย

ท่อท่วมน้ำหลังท่อจึงมีการไหลแบบ Submerged flow ซึ่ง Head ของการไหลจะคิดจากผลต่างของระดับน้ำหน้าท่อกับระดับน้ำด้านหลังท่อ



ก. มีการไหลแบบ Free flow



ข. มีการไหลแบบ Submerged flow

รูปที่ 13-43 ท่อรับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงนา

❖ การคำนวณผ่านท่อขนาดเล็กโดยหลักการไหลในท่อปิด (ค่าโดยประมาณ)

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g}, \quad Q = \frac{\pi}{4} D_p^2 \left(\frac{2g\Delta h}{K} \right)^{1/2}$$

+ ท่อขนาดเล็ก $K = 1.9 + f \frac{L}{D_p}$

D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของปากท่อ ม.

K = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน

ถ้าความยาวท่อ 1.00 ม. หรือ 1.50 ม. เหลือ 1.25 ม. จะได้

$$K = 1.9 + \frac{1.25f}{D_p}$$

เมื่อ f = friction loss coefficient of Darcy-Weissbach

$$f = \frac{64}{N_R} \quad \text{เมื่อ } N_R \text{ หรือ } R_e = \text{Reynolds number}$$

ϵ หรือ k ค่าความขรุขระของผนังท่อ $k = 5 \times 10^{-5}$ ม.

$R_e > 10^5$, $k = 5 \times 10^{-5}$ ม., $300 < D_p/k < 1200$

$$0.028 > f > 0.019$$

+ ท่อขนาดใหญ่ $K = 2.1$

❖ กราฟอัตราการไหลผ่านท่อผิวเรียบขนาดเล็ก และไซฟอน

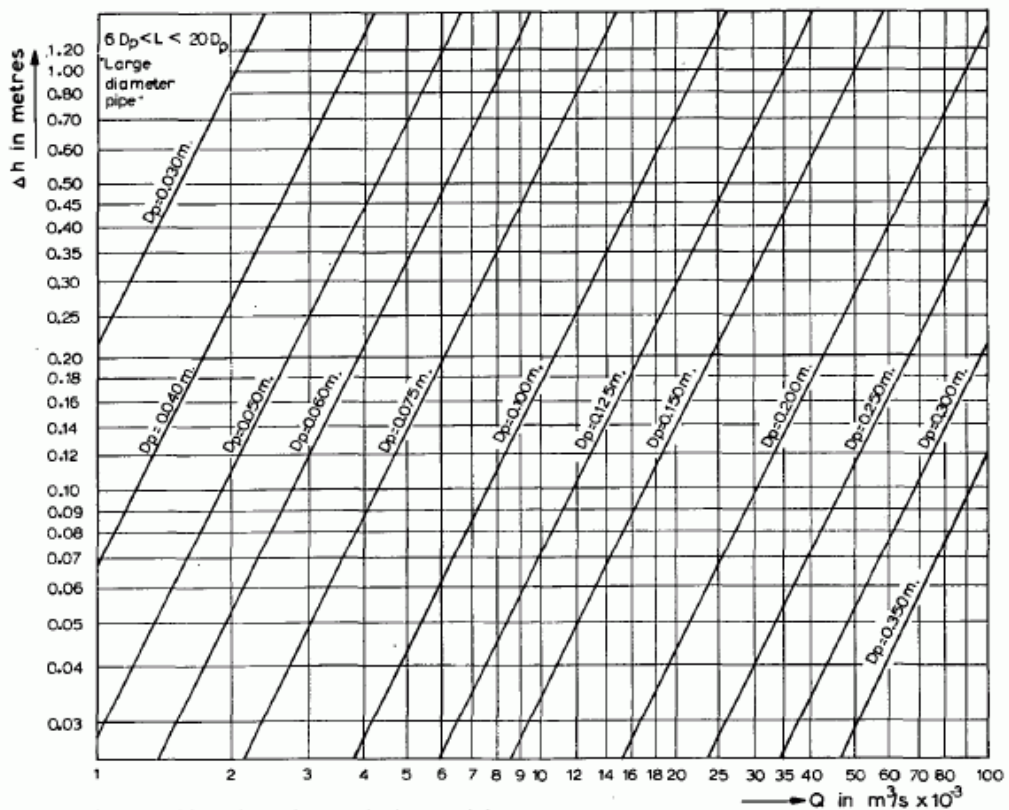
สำหรับท่อที่มีความยาวในช่วง 1.0 - 1.5 ม. ตามหลักการคำนวณข้างต้น ได้สรุปอัตราการไหลของท่อขนาด 0.015 ม. (1/2"), 0.020 ม. (3/4"), 0.025 ม. (1"), 0.030 ม. (1-1/4"), 0.040 ม. (1-1/2"), 0.050 ม. (2") และ 0.060 ม. (2-1/2") ที่ Δh ต่างๆ เป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 13-44 ที่ใช้ได้กับท่อไซฟอนขนาดเล็กด้วย

❖ กราฟอัตราการไหลผ่านท่อผิวเรียบขนาดใหญ่ และไซฟอน

สำหรับท่อที่มีความยาวในช่วง $6D_p < L < 20D_p$ ตามหลักการคำนวณข้างต้น ได้สรุปอัตราการไหลของท่อขนาด 0.030 ม. (1-1/4"), 0.040 ม. (1-1/2"), 0.050 ม. (2"), 0.060 ม. (2-1/4"), 0.0750 ม. (3"), 0.100 ม. (4"), 0.125 ม. (5"), 0.150 ม. (6"), 0.200 ม. (8"), 0.250 ม. (10"), 0.300 ม. (12") และ 0.350 ม. (13-3/4") ที่ Δh ต่างๆ เป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 13-45 ที่ใช้ได้กับท่อไซฟอนด้วย (หน่วย ลิตร/วินาที)



รูปที่ 13-44 อัตราการไหลผ่านท่อขนาดเล็กผิวเรียบ และไซฟอน (หน่วย ลิตร/วินาที)



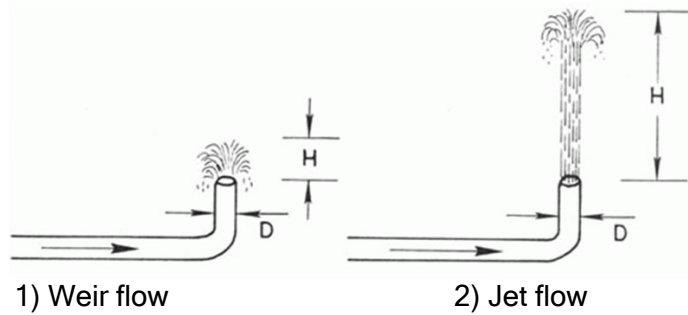
รูปที่ 13-45 อัตราการไหลผ่านท่อขนาดใหญ่ผิวเรียบ และไซฟอน(ท่อเล็ก)

13.4.2 การวัดปริมาณน้ำที่ออกจากปลายท่อเปิด

เป็นกรณีที่น้ำจากระบบท่อถูกปล่อยออกไปใช้โดยผ่านปลายท่อเปิด ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการไหลออกจากท่อได้จากลักษณะของลำของน้ำที่ไหลพุ่งออกไปจากปลายท่อดังกล่าว ซึ่งอาจตรวจวัดได้ 2 ลักษณะคือการไหลออกจากท่อขึ้นไปในแนวดิ่ง และการไหลออกจากท่อในแนวราบ

13.4.2.1 การวัดการไหลที่ออกจากท่อขึ้นไปในแนวดิ่ง

Lawrence และ Braunworth (1906) ได้ศึกษาการไหลออกจากท่อที่ติดตั้งให้ปลายท่อตั้งขึ้นในแนวดิ่ง พบว่าอัตราการไหลจะสัมพันธ์กับความสูงของน้ำพุเหนือปากท่อ วิธีการดังกล่าวมักใช้เพื่อตรวจสอบการทำงานของปั้มน้ำ และตรวจวัดอัตราการไหลที่น้ำจากระบบท่อออกสู่บ่อพักน้ำ ช่วงปลายของท่อต้องมีขนาดเดียวกันมีความยาวไม่น้อยกว่า 6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ และปลายท่อต้องเป็นขอบเรียบดังแสดงใน **รูปที่ 13-46**



รูปที่ 13-46 การวัดการไหลออกจากท่อขึ้นไปในแนวดิ่ง

การคำนวณอัตราการไหลที่ออกจากท่อขึ้นไปในแนวดิ่งซึ่งแบ่งรูปแบบการไหลได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้ (เมื่อ D หรือ D_p เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของปากท่อ และ H หรือ h_s เป็นความสูงของน้ำพุเหนือปากท่อ)

1) **Weir flow** ในกรณีที่ $h_s \leq 0.37D$ จะมีลักษณะการไหลผ่านปลายท่อแบบฝายสันคม อัตราการไหลคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = 5.47 D_p^{1.25} h_s^{1.35}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (m^3/s)

D หรือ D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของปากท่อ (m)

H หรือ h_s = ความสูงของน้ำพุเหนือปากท่อ (m)

2) **Jet flow** ในกรณีที่ $h_s \geq 1.4D$ จะมีลักษณะการไหลผ่านปลายท่อเป็นลำ Jet อัตราการไหลคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

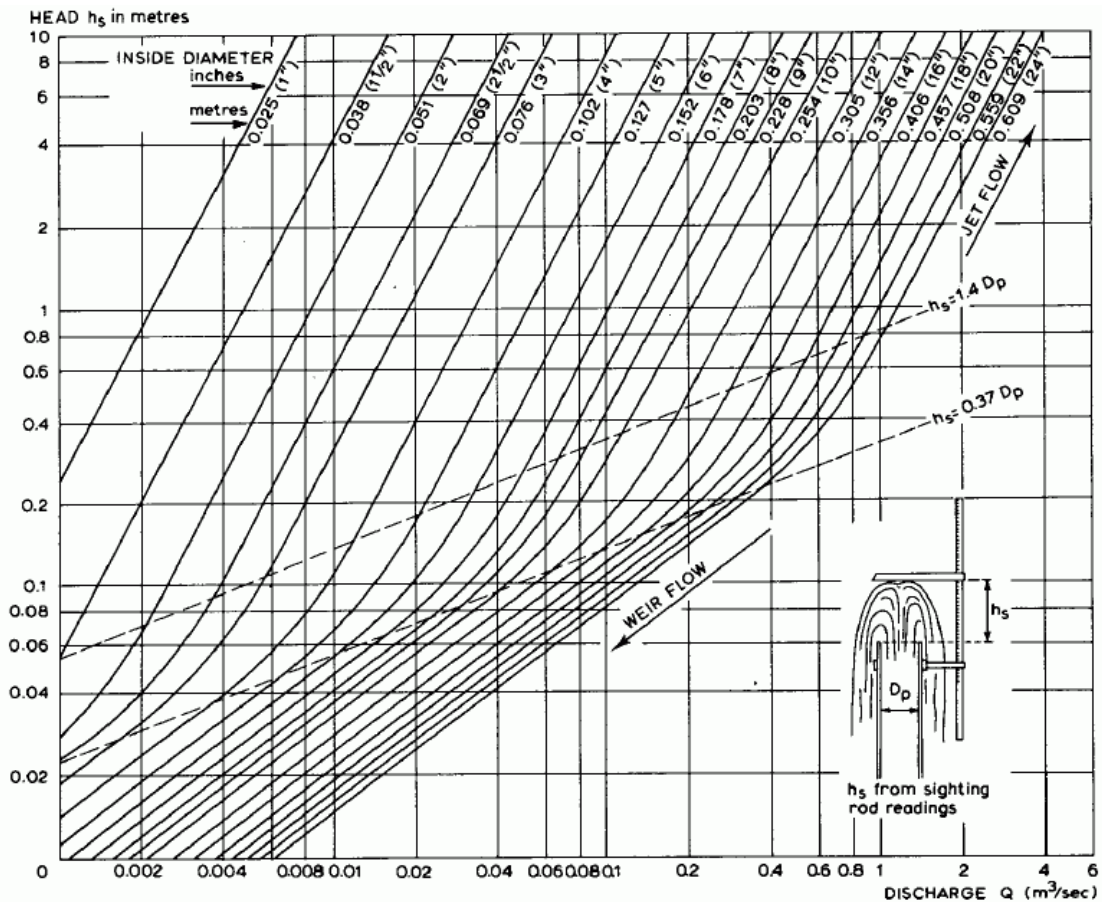
$$Q = 3.15 D_p^{1.99} h_s^{0.53}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (m^3/s)

D หรือ D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของปากท่อ (m)

H หรือ h_s = ความสูงของน้ำพุเหนือปากท่อ (m)

Lawrence และ Braunworth ได้สรุปผลการศึกษารวบรวมเป็นกราฟความสัมพันธ์ของ Q , D_p และ h_s ของท่อขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 13-47

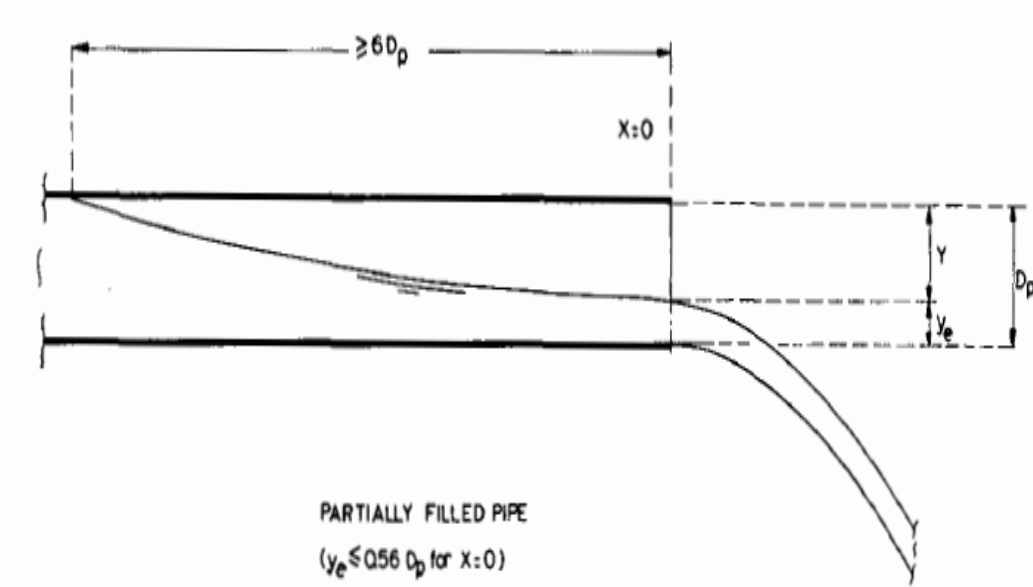


รูปที่ 13-47 กราฟ ความสัมพันธ์ของ Q , D_p และ h_s ของท่อขนาดต่าง ๆ
ที่วัดการไหลออกจากท่อขึ้นไปในแนวดิ่ง

13.4.2.2 การวัดการไหลที่ออกจากปลายท่อในแนวนอน

มีผลการศึกษาการวัดการไหลที่ออกจากท่อขึ้นไปในแนวนอนที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง คือ 1) California pipe method และ 2) Trajectory method

1) **California pipe method** เป็นการศึกษาโดย **Van Leer** ในปี 1922 ซึ่งมีรายละเอียดคือ เป็นการศึกษาจากท่อขนาด 2 – 6 นิ้ว ที่วางในแนวนอน การไหลออกจากปลายท่อเป็นการไหลแบบไม่เต็มหน้าตัดของท่อที่เป็นการไหลตกออกไปอย่างอิสระ และมีความยาวท่อในช่วงน้ำไหลไม่เต็มท่อจากปลายท่อที่จะปล่อยน้ำออกไปไม่น้อยกว่า 6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

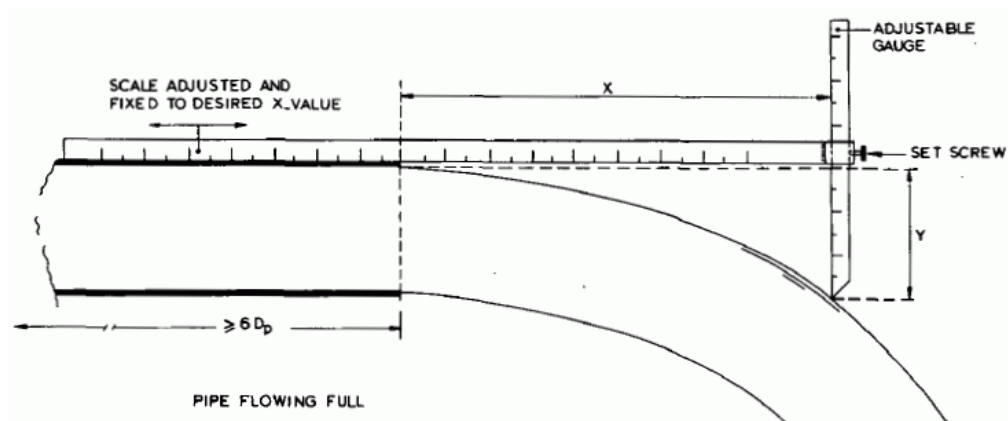


รูปที่ 13-48 ลักษณะการไหลไม่เต็มท่อออกจากปลายท่อของ California pipe method

เมื่อ y_c = ความลึกของน้ำที่ปลายท่อ (ค่าสูงสุด $0.56D_p$)
 D_p = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ
 Y = ความสูงของช่องอากาศเหนือระดับน้ำที่ปลายท่อ

ที่ตำแหน่งปลายท่อ $X = 0$; $y_c \leq 0.56D_p$; $Y = D_p - y_c$

2) **Trajectory method** เป็นการศึกษาโดย **Greve** ในปี 1928 ที่ Purdue University บางครั้งจึงอาจเรียก **Purdue method**



รูปที่ 13-49 ลักษณะการไหลเต็มท่อออกจากปลายท่อของ Trajectory method

❖ การคำนวณอัตราการไหล

1) กรณีการไหลไม่เต็มท่อ (California pipe method) คำนวณได้จากสมการ

$$Q = 0.017 D^2 X \sqrt{Y} (a / A)$$

เมื่อ	Q คือ ปริมาณการไหลของน้ำ	เป็น ลิตร / วินาที
	D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	เป็น ซม.
	X, Y คือ ระยะวัดในแนวราบ และแนวตั้ง	เป็น ซม.
	a คือ พื้นที่หน้าตัดลำน้ำที่พุ่งออกจากท่อ	เป็น ซม. ²
	A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ	เป็น ซม. ²

2) กรณีการไหลเต็มท่อ (Trajectory method) คำนวณได้จากสมการ

$$Q = 0.017 D^2 X \sqrt{Y}$$

เมื่อ	Q คือ ปริมาณการไหลของน้ำ	เป็น ลิตร / วินาที
	D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	เป็น ซม.
	X, Y คือ ระยะวัดในแนวราบ และแนวตั้ง	เป็น ซม.

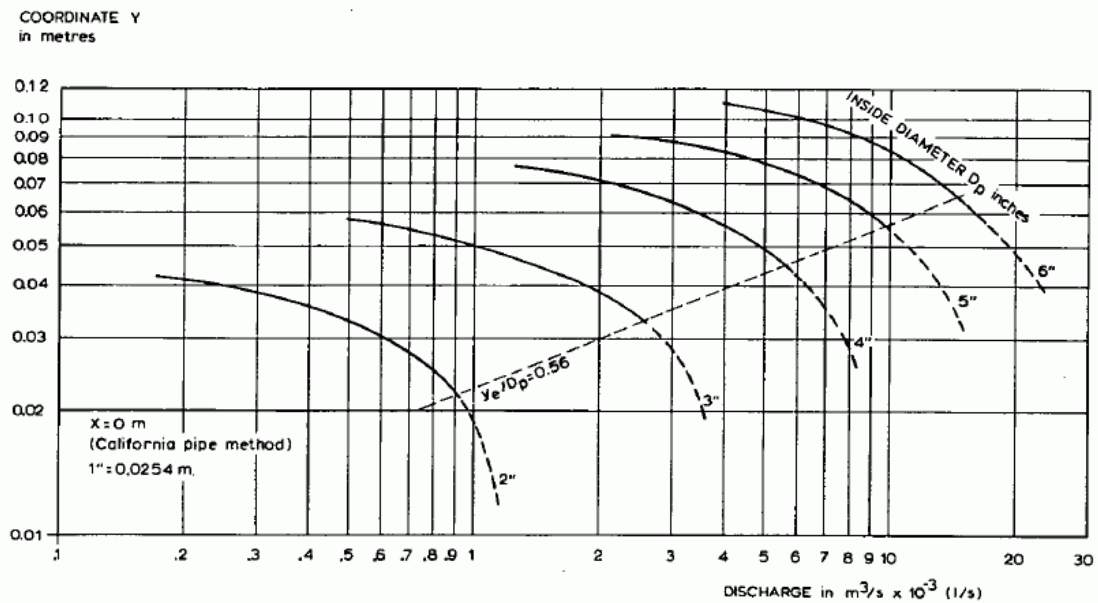
3) ผลการศึกษาท่อขนาดเล็ก 2 – 6 นิ้ว การวิเคราะห์การไหลออกจากปลายท่อโดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่แบบ Projectile จากผลการศึกษาได้สมการอัตราการไหลเมื่อออกจากท่อดังต่อไปนี้

$$X = v_0 t \quad ; \quad Y = \frac{1}{2} g t^2$$

$$Q = C_d \left(\frac{1}{4} \pi D_p^2 \right) \sqrt{g \frac{X^2}{2Y}}$$

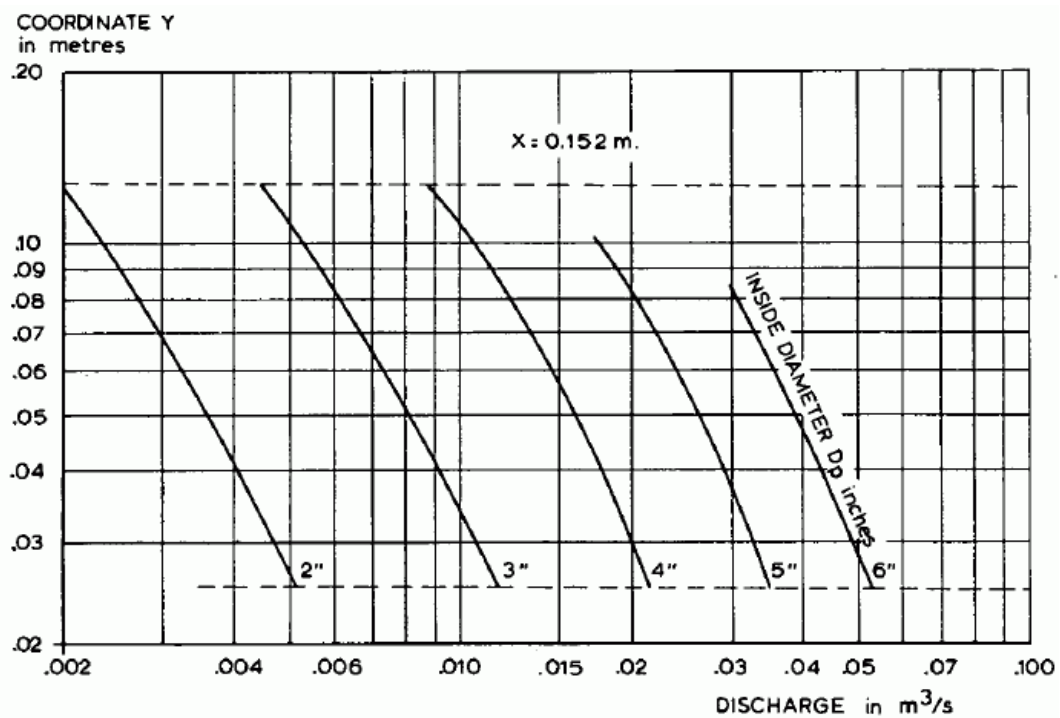
Q คือ ปริมาณการไหลของน้ำ	เป็น ม. ³ / วินาที
C _d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลออกจากปลายท่อ	≈ 1.10
D _p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	เป็น ม.
X, Y คือ ระยะวัดในแนวราบ และแนวตั้ง	เป็น ม.
g คือ 9.81 ม. / วินาที ²	

นอกจากนี้สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ของ Y , Q , ขนาดท่อ ที่ X ค่าต่าง ๆ
California pipe method เมื่อ $X = 0$ ม. ในรูปที่ 13-50 และ Trajectory method เมื่อ $X = 0.152$ ม. ในรูปที่ 13-51, $X = 0.305$ ม. ในรูปที่ 13-52 และ $X = 0.457$ ม. ในรูปที่ 13-53



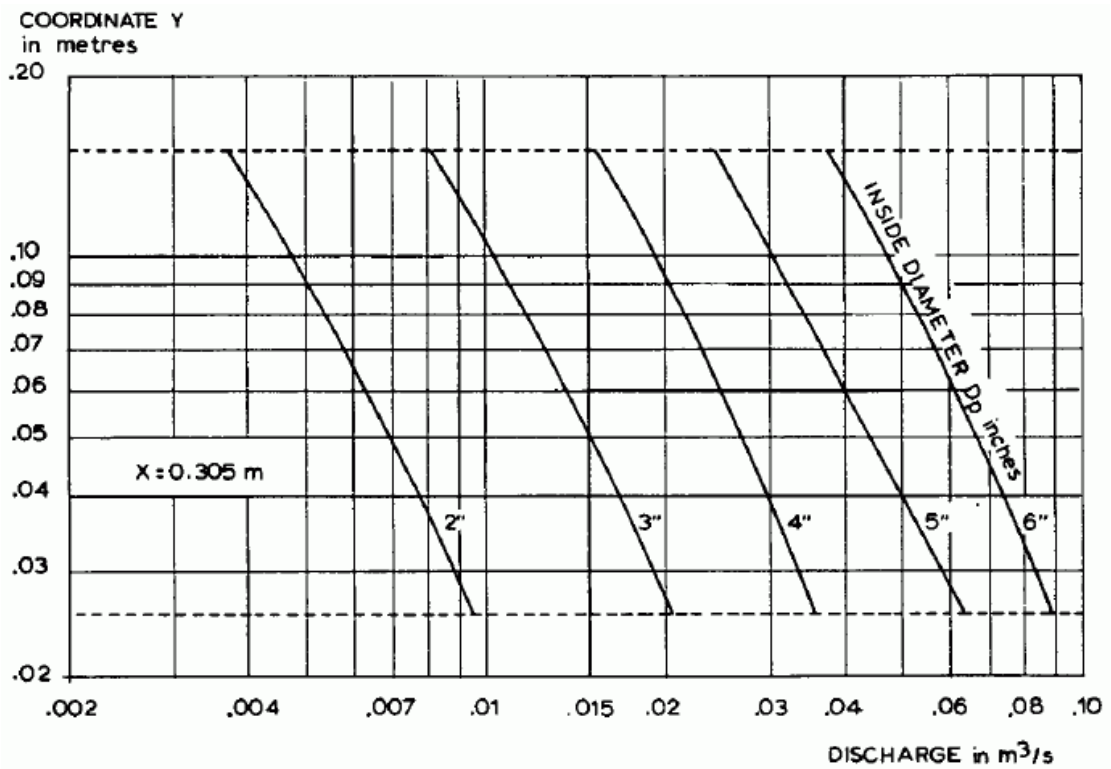
รูปที่ 13-50 กราฟความสัมพันธ์ของ Y , Q , ขนาดท่อ ที่ $X = 0$ ม.

(California pipe method ของท่อ 2 – 6 นิ้ว)



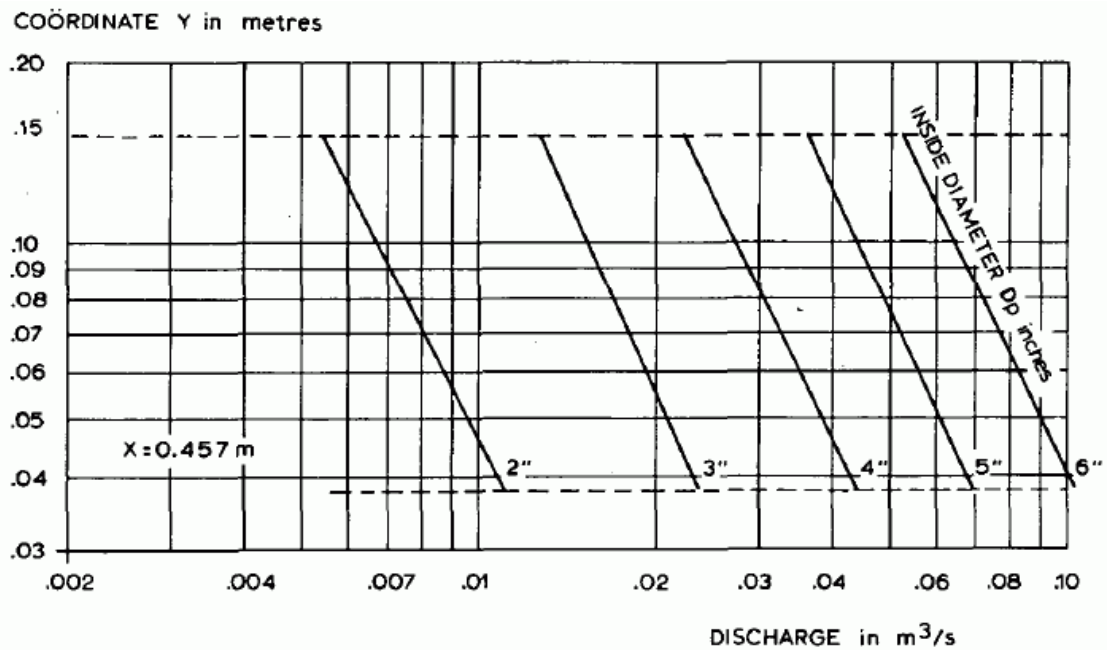
รูปที่ 13-51 กราฟความสัมพันธ์ของ Y , Q , ขนาดท่อ ที่ $X = 0.152$ ม.

(Trajectory method ของท่อ 2 – 6 นิ้ว)



รูปที่ 13-52 กราฟความสัมพันธ์ของ Y, Q, ขนาดท่อ ที่ $X = 0.305 \text{ m}$.

(Trajectory method ของท่อ 2 – 6 นิ้ว)



รูปที่ 13-53 กราฟความสัมพันธ์ของ Y, Q, ขนาดท่อ ที่ $X = 0.457 \text{ m}$.

(Trajectory method ของท่อ 2 – 6 นิ้ว)

13.5 การวัดปริมาณน้ำไหลผ่านกาลักน้ำหรือไซฟอนขนาดเล็ก

เมื่อก้าวถึงกาลักน้ำ ส่วนใหญ่จะนึกถึงการใช้สายยางถ่าน้ำจากตู้ปลาหรือการถ่าน้ำมันจากถังน้ำมันตำรองเดิมใส่รถยนต์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการนำหลักการการไหลของน้ำในท่อภายใต้แรงดันมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ซึ่งในทางวิศวกรรมชลประทานนั้นได้ให้นิยามของกาลักน้ำหรือไซฟอนไว้ดังนี้

Siphon : ท่อเชื่อม: อาคารที่เป็นท่อนำน้ำในคลองไหลผ่านลอดสิ่งกีดขวาง เช่น ถนน ทางรถไฟ ทางน้ำ โดยออกแบบให้น้ำไหลผ่านแบบเต็มท่อภายใต้แรงดัน มีลักษณะเฉพาะตัวคือตัวท่อจะวางเป็นแนวโค้งลอดสิ่งกีดขวางออกไปด้านท้าย คำเต็มเรียก Inverted siphon



รูปที่ 13-54 แสดงรูปตัดตามยาวของ Inverted siphon

Siphon: กาลักน้ำ: ท่อเล็กๆ ที่นำน้ำจากแหล่งน้ำหรือทางน้ำไหลผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น คันกั้นน้ำ ถนน ลงสู่อีกด้านหนึ่งที่มีระดับต่ำกว่า โดยวางพาดข้ามสิ่งกีดขวางนั้นไป และปลายท่อต้องมีระดับต่ำกว่าน้ำด้านเหนือน้ำ โดยเป็นการไหลเต็มท่อภายใต้แรงดัน

13.5.1 การใช้ประโยชน์กาลักน้ำหรือไซฟอนขนาดเล็กในงานชลประทาน

1) การใช้ท่อกาลักน้ำขนาดเล็กเพื่อนำน้ำจากคลองหรือคูส่งน้ำไปปล่อยให้แก่พื้นที่เพาะปลูกในจุดที่ไม่มีท่อส่งน้ำ โดยนิยมใช้กับการให้น้ำแบบร่องคู



รูปที่ 13-55 การใช้ท่อกาลักน้ำขนาดเล็กเพื่อนำน้ำจากคลองหรือคูส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูก

2) การพร่องน้ำออกจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำและฝายทดน้ำที่ห้วงานไม่มีอาคารระบายน้ำที่สามารถควบคุมระดับน้ำได้ เช่น ประตูระบายน้ำ ประตูระบายทราย และฝายระบายน้ำ เป็นต้น ดังนั้นเมื่อระดับน้ำต่ำกว่าสันฝายหรือสันทางระบายน้ำสัน การจะลดระดับน้ำที่ห้วงานลงอีก อาจเพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดความมั่นคงปลอดภัยต่อตัวอาคารห้วงาน หรือเพื่อการซ่อมแซมบำรุงรักษาหรือปรับปรุงอาคารห้วงานก็ตาม ในการแก้ปัญหาอาจทำได้โดยวิธีต่อไปนี้

(1) การใช้เครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายเป็นค่าสูบน้ำ

(2) การระบายน้ำผ่านระบบส่งน้ำแล้วระบายทิ้งลงทางน้ำธรรมชาติ แต่มักไม่นิยมทำกันเพราะระบายได้ปริมาณไม่มากต้องใช้ระยะเวลานาน และถ้าควบคุมไม่ดีจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งน้ำ หรือความเสียหายต่อพื้นที่เพาะปลูกในช่วงเวลานั้น

(3) หากเป็นกรณีฉุกเฉินอาจต้องเจาะตัวเขื่อนหรือทำนบดินในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งจะไม่สามารถควบคุม ปริมาณน้ำ, การกัดเซาะที่ช่องเจาะ และน้ำที่ระบายออกไปที่ด้านท้ายน้ำที่อาจย้อนมากัดเซาะตัวทำนบดิน หรือถ้าน้ำที่ถูกลดระดับลงเร็วเกินไป (Sudden drawdown) อาจทำให้ตัวเขื่อนดินหรือทำนบดินพังทลายได้

(4) ใช้กาลักน้ำระบายน้ำซึ่งเสียค่าใช้จ่ายน้อยเป็นค่าขนย้ายท่อและค่าติดตั้งเท่านั้น กรณีตัวอย่างเช่น การพร่องน้ำจากเขื่อนมูลบน จังหวัดนครราชสีมา ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2533 หรือการพร่องน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่มาน จังหวัดแพร่ เมื่อ พฤษภาคม พ.ศ. 2549 โดยติดตั้งกาลักน้ำที่ทางระบายน้ำสัน เป็นต้น

3) การพร่องน้ำออกจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำและฝายทดน้ำในกรณีที่มีอาคารระบายน้ำที่มีทั้งหมดไม่สามารถระบายน้ำได้ทัน วิธีการแก้ปัญหาอาจทำได้ดังเช่นกรณีข้อ 2) แต่การใช้กาลักน้ำจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดเป็นค่าขนย้ายท่อและค่าติดตั้งเท่านั้น กรณีตัวอย่างเช่น การพร่องน้ำจากอ่างเก็บน้ำลำตะโคง จังหวัดบุรีรัมย์ โดยติดตั้งกาลักน้ำที่ตัวทำนบดินซึ่งต้องป้องกันการกัดเซาะด้านท้ายท่อเป็นอย่างดี

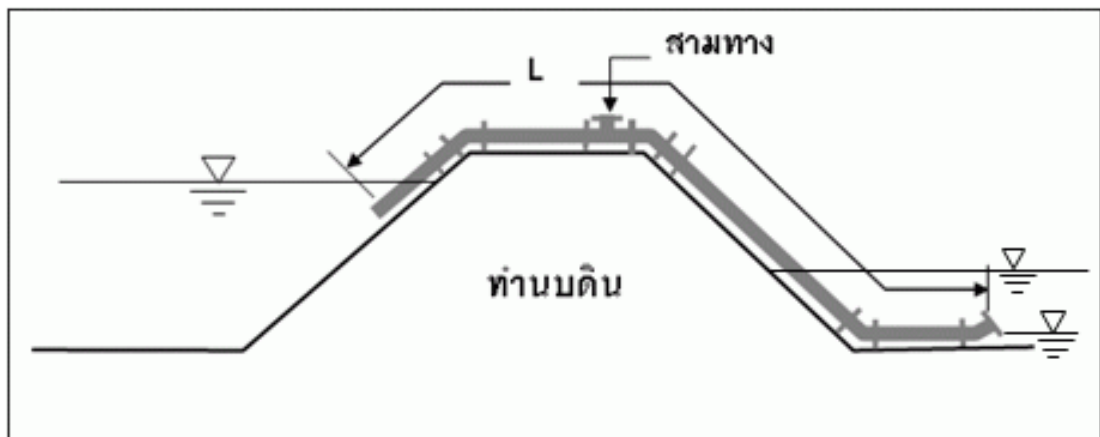


รูปที่ 13-56 การติดตั้งกาลักน้ำที่ทางระบายน้ำสันอ่างเก็บน้ำแม่มาน จังหวัดแพร่



รูปที่ 13-57 การติดตั้งกาลักน้ำที่ทำนบดินเพื่อช่วยพร่องน้ำ
จากอ่างเก็บน้ำลำตะโค่ง จังหวัดบุรีรัมย์

13.5.2 ตัวอย่างวิธีการติดตั้งไซฟอน (1 แถว) ที่ทำนบดิน



รูปที่ 13-58 ตัวอย่างลักษณะการติดตั้งกาลักน้ำที่ทำนบดิน

- 1) ใช้ท่อเหล็กและอุปกรณ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20 หรือ 0.30 ม.
- 2) การติดตั้งท่อที่ลาดด้านเหนือน้ำ (ในอ่างเก็บน้ำ) มักติดตั้งให้แนวท่อเป็นแนวตั้งฉากกับแนวทำนบดินให้ราบไปกับตามแนวลาดทำนบดิน ซึ่งการหักมุมท่อด้านหน้าจะใช้ข้องอ 45 องศา 2 ตัวเป็นตัวปรับ
- 3) การติดตั้งท่อที่ลาดด้านท้ายทำนบดิน ถ้าให้มีลักษณะเหมือนด้านหน้าก็ใช้ข้องอ 45 องศา 2 ตัวเป็นตัวปรับ แต่หากใช้ 1 ตัวจะกำหนดลักษณะได้ 2 ลักษณะคือ แนวท่อเป็น

แนวตั้งฉากกับแนวทำนบกั้นน้ำแต่จะไม่ราบไปกับลาดทำนบกั้นน้ำ กับปรับให้แนวท่อราบไปกับลาดทำนบกั้นน้ำแต่แนวท่อเอียงไปจากแนวตั้งกับแนวทำนบกั้นน้ำ

4) ใช้สามทางติดตั้งในแนวท่อบนหลังทำนบกั้นน้ำสำหรับกรอกน้ำเข้าท่อ 1 ตัว การกรอกน้ำใช้แผ่นไม้ปิดปลายท่อทั้ง 2 ข้างแล้วกรอกน้ำเข้าท่อผ่านสามทางจนน้ำล้นออกที่สามทางจึงฉีกสามทางให้สนิทด้วยแผ่นยางกันรั่วและปิดแผ่นเหล็กทับอีกชั้น ขึ้นด้วยน๊อตจนแน่น เมื่อเอาแผ่นไม้ที่อุดปลายท่อทั้งสองข้างออกท่อไซฟอนก็จะทำงาน

5) พื้นดินด้านท้ายท่อต้องมีการป้องกันการกัดเซาะไว้ด้วยเสมอ และปลายท่อต้องติดตั้งข้องอเพื่อให้น้ำที่ไหลออกไปพุ่งขึ้นเพื่อลดการกัดเซาะดินด้านท้ายได้ระดับหนึ่ง

6) ต้องป้องกันไม่ให้มีสวะ ขยะหรือวัชพืชมมาติดอยู่ด้านหน้าท่อ เพราะจะทำให้เกิดการอุดตัน

13.5.3 หลักการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านกาลักน้ำ

13.5.3.1 ส่วนประกอบของท่อกาลักน้ำ

กาลักน้ำหรือไซฟอนทุกขนาดทุกแบบจะใช้หลักการที่เหมือนกันคือ การไหลแบบเต็มท่อในท่อปิดหรือการไหลภายใต้แรงดัน แล้วมีการเกิดการสูญเสียพลังงานจากการต้านทานการไหลในระบบท่อ (Head Losses)

$$H_L = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

โดย H_L = การเสียดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ (เมตร)

K = ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหล

V = ความเร็วของการไหล (เมตร /วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 (เมตร/วินาที²)

การต้านทานการไหลที่เกิดขึ้นในระบบท่อนั้นอาจประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ที่ทางเข้าจากอุปกรณ์ประกอบท่อ จากตัวท่อ และที่ทางออก

1) การต้านทานการไหลที่ทางเข้า (Entrance Losses)

ท่อ 0.20 ม. และ 0.30 ม. คัดสัมประสิทธิ์ที่ทางเข้า หรือ $K_e = 0.80$

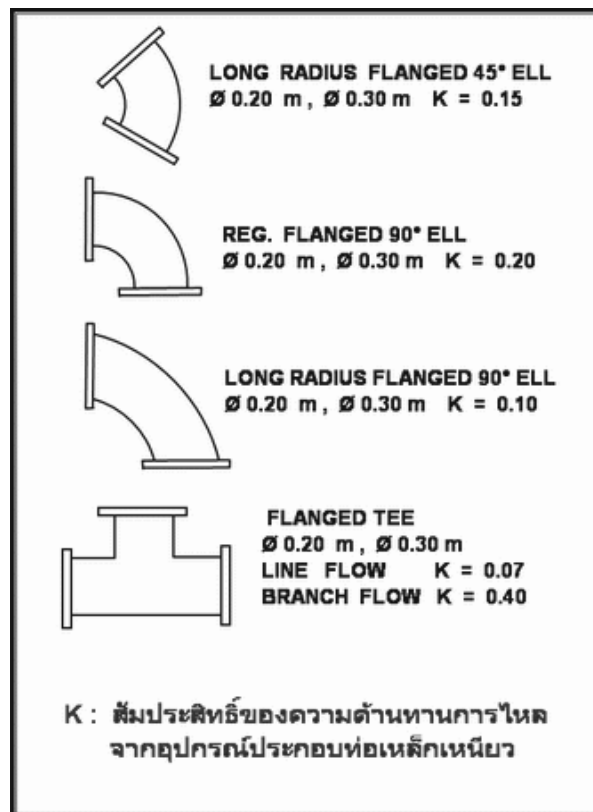
2) การต้านทานการไหลจากอุปกรณ์ประกอบท่อ ได้แก่ ข้อต่อ ข้องอ วาล์ว ต่าง ๆ

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหลจากอุปกรณ์ประกอบท่อ ขนาด 0.20 ม. ขึ้นไป ที่มักใช้เพื่อประกอบเป็นกาลักน้ำดังนี้

- ประตูน้ำ (Gate Valve) ค่า K_g
 - = 0.19 เมื่อเปิดประตูน้ำเต็มที่
 - = 1.15 เมื่อเปิดประตูน้ำ 75 % ของพื้นที่หน้าตัด
 - = 5.60 เมื่อเปิดประตูน้ำ 50 % ของพื้นที่หน้าตัด
 - = 24.00 เมื่อเปิดประตูน้ำ 25 % ของพื้นที่หน้าตัด

กรณีประตูน้ำแบบ Butterfly Valve $K_g = 0.15$

- ค่า K ข้องอ ข้อต่อ 3 ทาง



รูปที่ 13-59 ค่า K ของข้องอ ข้อต่อ 3 ทาง

3) การต้านทานการไหลที่เกิดในตัวท่อ

$$H_F = \frac{6.35 n^2 V^2 L}{D^{4/3}}$$

โดย H_F = การเสียดในท่อ (เมตร)

n = ค่าสัมประสิทธิ์ ความขรุขระของผิวท่อ ท่อเหล็กใช้ 0.012

V = ความเร็วของการไหล (ม./วินาที)

L = ความยาวท่อ (เมตร)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (เมตร)

4) การคำนวณการไหลที่ทางออก (Exit Losses)

ท่อ 0.20 ม. และ 0.30 ม. คัดสัมประสิทธิ์ที่ทางออก หรือ $K_{ex} = 1.00$

13.5.3.2 แนวทางคำนวณปริมาณน้ำผ่านท่อไซฟอนที่ใช้พร่องน้ำจากอ่างเก็บน้ำ

ถ้า $El.w$ = ระดับน้ำ ในอ่างเก็บน้ำ หรือฝายทดน้ำ

$El.t$ = ระดับน้ำท่วมท้ายท่อกลักน้ำ หรือระดับกึ่งกลางท้ายท่อถ้าน้ำไม่ท่วมท้ายท่อ

$El.w - El.t$ = การสูญเสียรวมทั้งหมดในระบบท่อ (Total Losses: H_T)

$El.w - El.t$ = การสูญเสียที่ทางเข้า + การสูญเสียจากอุปกรณ์ประกอบ
+ การสูญเสียในเส้นท่อ + การสูญเสียที่ทางออก

$$El.w - El.t = K_e \cdot \frac{V^2}{2g} + \left(\sum K_b + K_g \right) \cdot \frac{V^2}{2g} + \frac{6.35 n^2 V^2 L}{D^{4/3}} + K_{ex} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$El.w - El.t = K_e \cdot \frac{V^2}{2g} + \left(\sum K_b + K_g \right) \cdot \frac{V^2}{2g} + \frac{6.35 n^2 V^2 L}{D^{4/3}} \cdot \frac{2g}{2g} + K_{ex} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$El.w - El.t = \left(K_e + \sum K_b + K_g + \frac{6.35 n^2 L (2g)}{D^{4/3}} + K_{ex} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$El.w - El.t = \left(K_e + \sum K_b + K_g + \frac{12.70 g n^2 L}{D^{4/3}} + K_{ex} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

*** เมื่อแทนค่าต่างๆ แล้ว ให้หาค่า V ออกมา

*** หาค่า Q จาก

$$Q = AV$$

ตัวอย่างการคำนวณ ถาลักน้ำติดตั้งที่ท่ำนบดินเพื่อช่วยระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำเมื่อคิดจาก 1 แถวโดยใช้ท่อเหล็กและอุปกรณ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20 ม. หักมุมท่อด้านหน้าและท้ายท่ำนบดินใช้ข้องอ 45 องศาแต่ละ 2 ตัว ติดตั้งข้อต่อ 3 ทางเพื่อกรอกน้ำ 1 ตัว ปลายท่อด้านท้ายติดตั้งข้องอ 45 องศา 1 ตัว ความยาวรวมระหว่างปลายท่อดังกล่าวข้างยาว 30 เมตร ระดับน้ำด้านท้ายไม่ท่วมท้ายท่อ ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำกับระดับกึ่งกลางปลายท่อด้านท้ายต่างกัน 10 เมตร

$$El.w - El.t = \text{การสูญเสียเฮดที่ทางเข้า} + \text{การสูญเสียเฮดจากอุปกรณ์ประกอบ} \\ + \text{การสูญเสียเฮดในเส้นท่อ} + \text{การสูญเสียเฮดที่ทางออก}$$

$$El.w - El.t = \left(K_e + \sum K_b + \frac{12.70 \text{ g n}^2 L}{D^{4/3}} + K_{ex} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

- $El.w - El.t = 10 \text{ ม.}$
- การสูญเสียเฮดที่ทางเข้า $K_e = 0.80$
- การสูญเสียเฮดจากอุปกรณ์ประกอบ
ข้องอ 45 องศา 5 ตัว, สามทางติดตั้งในแนวการไหล 1 ตัว

$$\sum K_b = (0.15 \times 5) + 0.07 = 0.82$$

- การสูญเสียเฮดในเส้นท่อ

$$\text{เมื่อ } g = 9.81 \text{ ม./วินาที}^2, n = 0.012, L = 30 \text{ ม.}$$

$$\left(\frac{12.70 \text{ g n}^2 L}{D^{4/3}} \right) = \left(\frac{12.70 \times 9.81 \times 0.012^2 \times 30}{0.20^{4/3}} \right) = 4.602$$

- การสูญเสียเฮดที่ทางออก $K_{ex} = 1.00$

$$\text{แทนค่าในสมการ } 10 = (0.80 + 0.82 + 4.602 + 1.00) \frac{V^2}{(2 \times 9.81)}$$

$$V^2 = 10 \times 2 \times 9.81 / (0.80 + 0.82 + 4.602 + 1.00) = 27.167$$

$$V = (27.167)^{0.5} = 5.212 \text{ ม./วินาที}$$

$$A = \pi D^2 / 4 = \pi (0.2^2 / 4) = 0.0314 \text{ ม.}^2$$

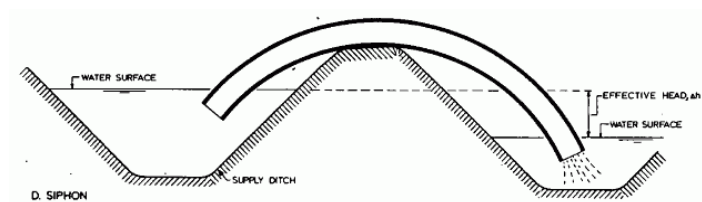
$$Q = AV$$

$$Q = 0.0314 \times 5.212 = 0.164 \text{ ม.}^3/\text{วินาที}$$

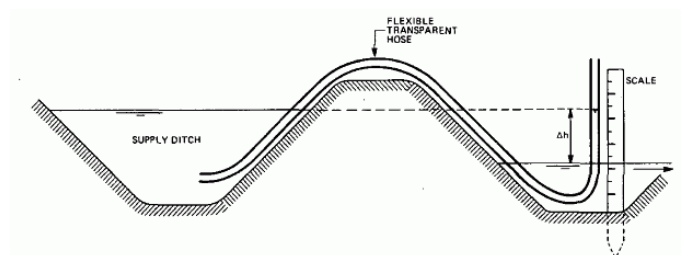
จะเห็นได้ว่าการใช้ท่อ Siphon ขนาด 8 นิ้ว เพียงแถวเดียวสามารถระบายน้ำได้ 0.164 ม.³/วินาที หรือ 590 ม.³/ชั่วโมง

13.5.3.3 ปริมาณน้ำผ่านท่อไซฟอนขนาดเล็กที่ใช้ปล่อยน้ำให้แก่แปลงเพาะปลูก

ท่อไซฟอนที่ใช้งานลักษณะนี้มักใช้ท่อพลาสติกอ่อน ส่วนขนาดที่ใช้ขึ้นกับปริมาณน้ำที่ท่อสามารถปล่อยออกไปได้ ส่วนใหญ่ใช้ท่อขนาด 1 – 4 นิ้ว โดยหากท่อที่ยังมีขนาดใหญ่การใช้งานก็จะยิ่งยาก การหาค่า Head การไหลหรือความแตกต่างของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับท้ายน้ำ (Δh) ทำได้ในลักษณะเดียวกับการใช้สายยางวัดระดับ โดยการยกปลายท่อขึ้นถ้าท่อใดสังเกตจากระดับน้ำในท่อนิ่ง ถ้าท่อทึบให้ปรับระดับปลายท่อจนระดับน้ำในท่อปรึ้มปลายท่อพอดี แล้วจึงวัดความแตกต่างกับระดับน้ำในแปลงหรือคูด้านท้าย



การติดตั้งท่อ Siphon ขนาดเล็ก



วิธีการตรวจวัด Head การไหล (Δh)

รูปที่ 13-60 การติดตั้งท่อ Siphon ขนาดเล็กและการตรวจวัด Head การไหล

❖ การหาอัตราการไหลผ่านท่อไซฟอนขนาดเล็ก

1) คำนวณโดยใช้หลักการไหลในท่อปิด ที่คิดการสูญเสียเฮดที่ทางเข้า(ปากท่อ) ในเส้นท่อและที่ทางออก (ปลายท่อ) ส่วน Head การไหล (Δh) คัดจากความแตกต่างของระดับน้ำ

ด้านเหนือหรือเหนือปากต่อกับด้านท้ายน้ำเหนือปลายท่อ หรือกึ่งกลางปลายท่อกรณีที่มีน้ำด้านท้ายไม่ท่วมปลายท่อ

วิธีการคำนวณ และการใช้กราฟ เหมือนที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 13.4.1 ท่อขนาดเล็ก
ที่รับน้ำจากคูน้ำเข้าแปลงเพาะปลูกทุกประการ

2) การหาอัตราการไหลด้วยวิธีตวงแล้วเทียบกับเวลา โดยการเอาภาชนะรับน้ำจากปลายท่อ บันทึกช่วงเวลารองรับเก็บน้ำ หาปริมาตรน้ำจากการตวงหรือเทียบจากน้ำหนักเป็นปริมาตร

บทที่ 14

การวัดปริมาณน้ำด้วยรางวัดน้ำ (Flume)

14.1 หลักการเบื้องต้นของรางวัดน้ำ

รางวัดน้ำ หรือ Flume เป็นอาคารวัดน้ำหรืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นหรือติดตั้งเพื่อวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทางน้ำ ตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงคลองขนาดใหญ่ การออกแบบ Flume เป็นอาคารวัดน้ำนั้นสืบเนื่องจากการวัดน้ำโดยใช้ฝายวัดน้ำมีการเกิด Head loss สูงมาก เพราะระดับสันฝายจะต้องสูงจากพื้นของทางน้ำตามเกณฑ์ที่กำหนด ทำให้ระดับน้ำด้านท้ายฝายวัดน้ำลดต่ำลงมาก ดังนั้นในการออกแบบ Flume จึงต้องการให้ (1)เกิดการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ระดับน้ำด้านท้ายเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก นั่นคือตัว Flume ต้องมีขนาดหน้าตัดการไหลที่ใกล้เคียงและกลมกลืนกับหน้าตัดของทางน้ำ โดยที่แนวศูนย์กลางตามยาวของ Flume กับของทางน้ำจะทับเป็นแนวเดียวกัน ระดับพื้น Flume กับระดับก้นทางน้ำต้องใกล้เคียงกัน จากลักษณะดังกล่าวจึง (2)ไม่เกิดผลกระทบจาก Approach velocity และ(3)ไม่ทำให้เกิดการตกจมของตะกอนทางด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ

หลักการพื้นฐานทางชลศาสตร์ของ Flume โดยทั่วไปนั้น คือการทำให้ความเร็วปกติของน้ำในทางน้ำที่มีการไหลเป็นแบบ Sub-critical flow มีการเพิ่มความเร็วขึ้นเมื่อผ่านเข้ามาในรางให้เกิดเป็นการไหลแบบ Super-critical flow โดยการบีบลดขนาดหน้าตัดของรางให้เล็กลง จะโดยการบีบด้านข้างให้แคบเข้าหรือการยกระดับพื้นรางขึ้นมาอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง และจะเกิด Critical flow ที่บริเวณส่วนที่แคบที่สุดของราง ทำให้เกิด Critical depth ที่ตำแหน่งดังกล่าว แล้วขยายออกเพื่อให้การไหลเป็นปกติอีกครั้ง จากนั้นนำคุณสมบัติของ Critical depth ไปคำนวณอัตราการไหลได้ดังเช่นกรณีอาคารวัดน้ำประเภทฝายตามที่กล่าวแล้ว

จากคุณสมบัติของ Critical flow หากพิจารณาความสัมพันธ์จาก Specific energy curve ระหว่างค่าความลึก (y) และค่าพลังงานจำเพาะ (E) ของการไหลที่อธิบายในบทที่ 2 (หัวข้อ 2.3) จะพบว่าที่ Critical depth (y_c) จะมีพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด (ที่ตำแหน่งจุดยอดของกราฟ) นั่นคือ $dE/dy = 0$

เมื่อ $E = y + \frac{V^2}{2g}$ และ $\frac{Q_c^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c}$

$$q = \sqrt{gy_c^3} \Rightarrow Q = B\sqrt{gy_c^3}$$

เมื่อ B คือความกว้างของทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

และจากที่ $y_c/2 = v_c^2/(2g)$, $y_c = 2/3E$

$$Q = B\sqrt{g\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2}} E^{3/2} \Rightarrow Q = 0.385B\sqrt{2g} E^{3/2}$$

ถ้าไม่คิด Approach velocity และ $H = y$ จะได้อัตราการไหลในทางทฤษฎีคือ

$$Q_{\text{Theoretical}} = 0.385B\sqrt{2g} H^{3/2}$$

แต่การไหลที่เกิดขึ้นจริง Q จะมีค่าน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎี เพราะยังมี Approach velocity เกิดขึ้นเสมอไม่มากนัก คำนวณอัตราการไหลที่เป็นจริงจึงขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล C

$$C = \frac{Q}{Q_{\text{Theoretical}}}$$

ดังนั้น จะได้สมการพื้นฐานของ Flume คือ $Q = 0.385CB\sqrt{2g} H^{3/2}$

ทั้งนี้สามารถจัดรูปแบบสมการในการคำนวณอัตราการไหลได้เป็น $Q = KH^n$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน Flume แบบ Free flow

H = ความลึกของน้ำด้านเหนือ

K = สัมประสิทธิ์การไหลผ่าน Flume ตามขนาดมิติเฉพาะตัว

n = ค่าตัวแปร ที่สัมพันธ์กับขนาดมิติเฉพาะตัวของ Flume

14.2 ชนิดของ Flume

นับตั้งแต่ Flume ตัวแรกได้ถูกสร้างขึ้นมา ด้วยเหตุผลหลายประการ เช่น เพื่อการพัฒนาแก้ปัญหาที่มี เพื่อลดข้อจำกัด หรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของ Flume ที่มีการออกแบบไว้เดิมแล้ว การสร้างนวัตกรรมใหม่ก็เป็นเหตุผลสำคัญ ทำให้นักชลศาสตร์ได้พัฒนาออกแบบ Flume หลากรูปแบบหรือหลายชนิดขึ้นมา ซึ่งจะได้นำเสนอตามลำดับต่อไป

อาจแบ่งประเภทของ Flume เป็น 2 กลุ่ม คือ Long-throat flume และ Short- throat flume

1) Long-throat flume เป็นอาคารวัดปริมาณน้ำที่พัฒนาขึ้นมาโดยการปรับปรุงฝายวัดน้ำสันกว้าง (Broad crested weir) ด้วยการเพิ่มลาดด้านหน้าเพื่อลดการปะทะด้านการไหลของน้ำ จึงอาจเรียกว่า Ramp flume (บางแบบอาจเพิ่มลาดด้านท้ายด้วย) ซึ่งจะทำให้ Head loss ลดลง แต่อาคารที่ได้พัฒนาปรับปรุงใหม่นี้ มีลักษณะการไหลที่ต่างไปจากฝายวัดน้ำสันกว้าง คือแนวเส้นการไหลจะขนานไปตลอดแนวหน้าตัดแต่ละช่วง มี Head loss ที่น้อยกว่ามาก ส่วนที่เป็นคอของ Flume ชนิดนี้ค่อนข้างยาว จึงเรียก Long-throat flume ต่อมา มีการปรับปรุงพัฒนาให้มีหลายรูปแบบ ติดตั้งในทางน้ำทุกรูปร่างหน้าตัดทางน้ำและมีการบีบด้านข้างเป็นคอที่ชัดเจนขึ้นด้วย สำหรับหลักการทางชลศาสตร์ของ Long-throat flume เป็นลักษณะเดียวกับฝายสันกว้างที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 10 ส่วนรายละเอียดของรางวัดน้ำชนิดนี้จะอธิบายในลำดับถัดไป

2) Short- throat flume เป็นกลุ่มของรางวัดน้ำที่มีช่วงคอของรางสั้นเมื่อเทียบกับ Long-throat flume ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่ารางวัดน้ำชนิดอื่น ๆ ล้วนอยู่ในกลุ่ม Short- throat flume ทั้งสิ้น แม้ว่าบางแบบจะมีคุณสมบัติของ Long-throat flume แต่มีลักษณะรูปร่างที่เป็นลักษณะพิเศษเฉพาะตัว ได้แก่

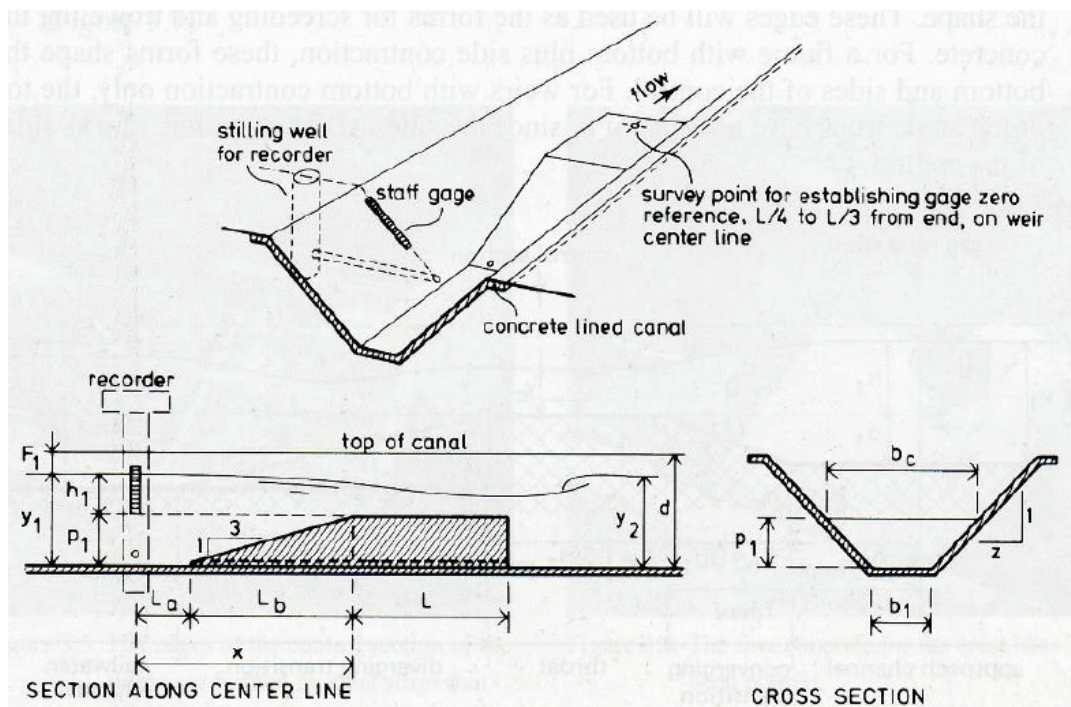
- | | |
|-------------------------|--------------------|
| (1) Venturi flume | (2) Parshall flume |
| (3) Cut-throat flume | (4) H-flume |
| (5) WSC flume | (6) RBC flume |
| (7) Palmer-Bowles flume | (8) S-M flume |
| (9) Circular flume | ฯลฯ |

รางวัดน้ำชนิดต่าง ๆ อาจสร้างขึ้นใช้เอง หรือใช้รางวัดน้ำสำเร็จรูปที่มีผู้ผลิตในเชิงการค้าที่มีมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะต้องสร้างให้ได้ตามขนาดมิติของรางที่ได้กำหนดไว้แน่นอนตายตัว การใช้งานจะใช้ตารางความสัมพันธ์ของความลึกและอัตราการไหล (Flow rate หรือ Calibration table) ที่เป็นตารางมาตรฐานที่มีการสอบเทียบจนได้ค่าที่ถูกต้องแน่นอน รางวัดน้ำที่ไม่มั่นใจว่าสร้างได้ถูกต้องทุกประการตามข้อกำหนด หรือหากเป็นรางวัดน้ำมาตรฐานที่ได้มีการใช้งานมานาน จะต้องมีการสอบเทียบให้ครอบคลุมตลอดย่านความลึกที่รางวัดน้ำจะวัดได้ เพื่อนำมาสร้าง Calibration table, Calibration Curve หรือ กำหนดเป็นสมการการคำนวณใหม่เพื่อการใช้งานที่ถูกต้องต่อไป

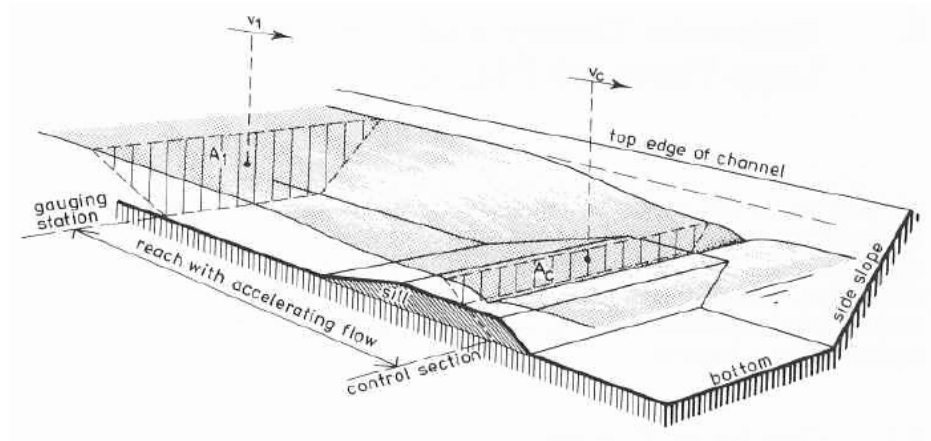
14.3 Long-throat flume

ในปี 1991 **John A. Replogle** และคณะ ได้นำเสนอผลงานการพัฒนา Long-throat flume รูปแบบพื้นฐานขึ้นใช้งานโดยการปรับปรุงฝายวัดน้ำสันกว้าง (Broad crested weir) ด้วยการเพิ่มลาดด้านหน้า 3:1 (H:V) เพื่อลดการปะทะด้านการไหลของน้ำ โดยสร้างเป็นอาคารวัดน้ำในทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ 14-1 อาคารวัดน้ำดังกล่าวมีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น Ramp flume ตามลักษณะลาดด้านหน้า 3:1, Replogle flume ตามชื่อผู้พัฒนา และ Trapezoidal-throated flume ตามหน้าตัดทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ต่อมาเมื่อมีการแบ่งกลุ่มของ Flume ตามลักษณะของคอของรางวัดน้ำจึงเรียก Long-throat flume

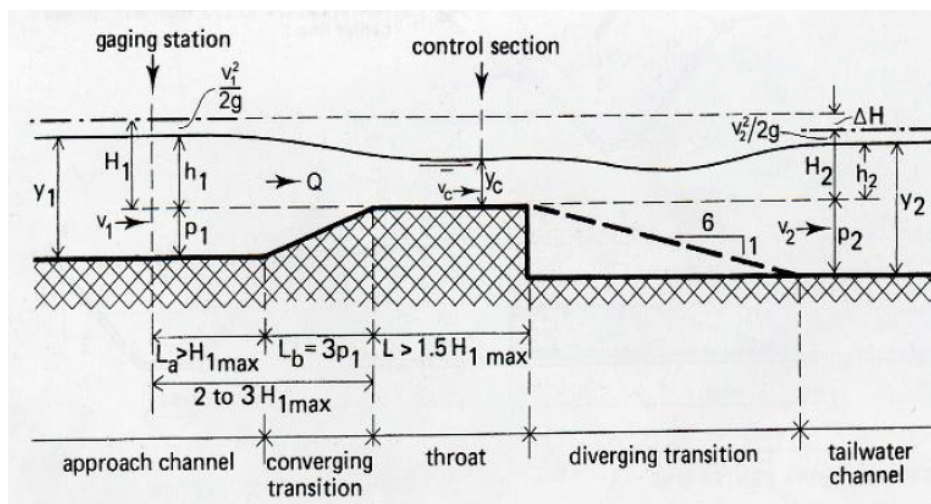
นอกจากสร้างในทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแล้ว Long-throat flume สามารถสร้างได้ในทางน้ำทุกรูปแบบหน้าตัด เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า พาราโบลา ส่วนของวงกลม ฯลฯ ลักษณะของ Long-throat flume ที่ปรับปรุงจาก Replogle flume รูปแบบพื้นฐานให้มีลาดด้านท้ายเป็น 6:1 (H:V) เพื่อให้ Submergence ratio มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงในรูปที่ 14-2 ส่วนรูปแบบและมิติทั่วไปของ Long-throat flume แสดงในรูปที่ 14-3



รูปที่ 14-1 รูปแบบพื้นฐานของ Replogle flume

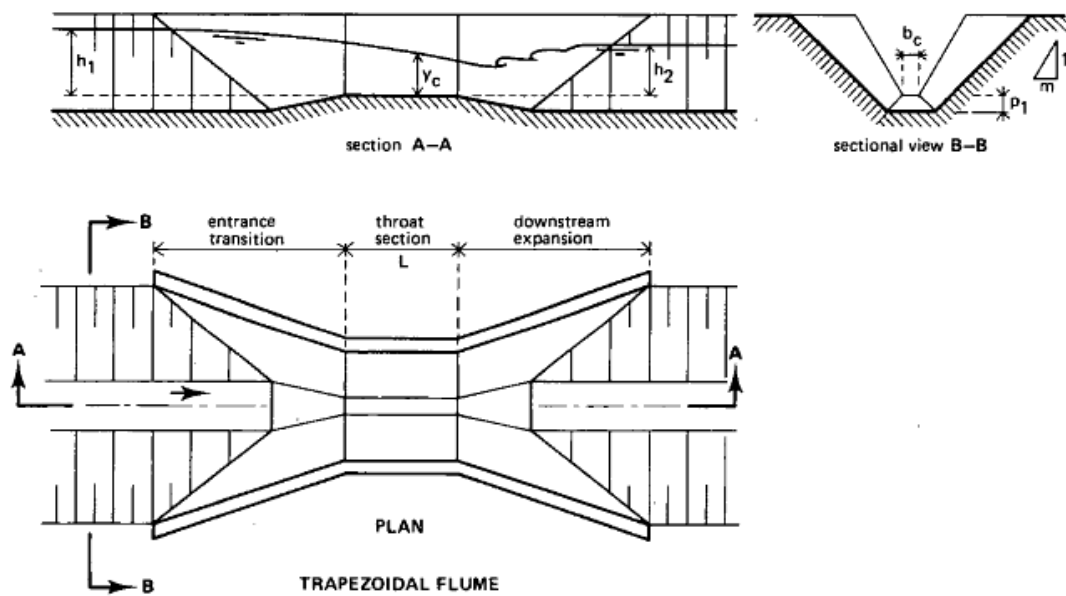


รูปที่ 14-2 ลักษณะของ Long-throat flume ที่ปรับปรุง Replogle flume
รูปแบบพื้นฐานให้มีลาดด้านท้ายเป็น 6 : 1 (H:V)

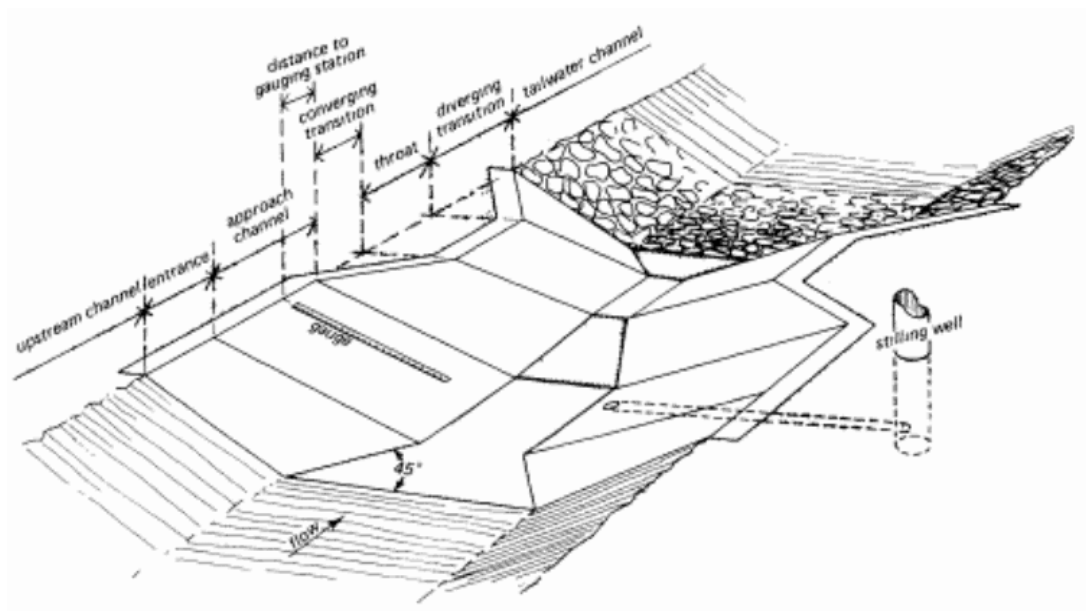


รูปที่ 14-3 รูปตัดตามยาวและมิติทั่วไปของ Long-throat flume

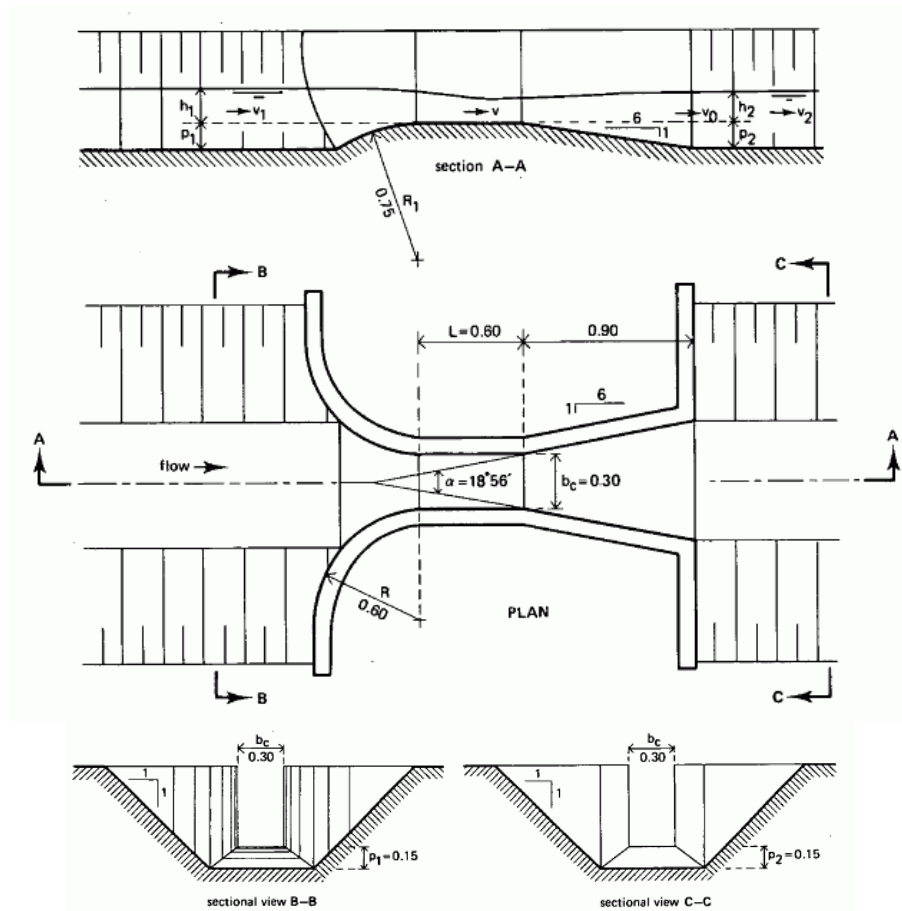
รูปแบบและมิติทั่วไปของ Long-throat flume ในรูปที่ 14-3 เป็นรูปแบบที่ได้มีการปรับปรุงพัฒนาจากรูปแบบมาตรฐานให้เป็นรูปแบบใหม่ๆ โดยที่ส่วนที่เป็นพื้นราบต่อจากลาดด้านหน้า 1:3 ออกแบบให้มีการบีบด้านข้าง 2 ด้าน กลายสภาพเป็นคอคอด (Throat) ดังนั้นส่วนของลาดด้านหน้าจึงเป็น Converging transition ปรับหน้าตัดของทางน้ำด้านหน้าผายเข้าสู่ส่วนคอ (Transition แนวตรงหรือแนวโค้งก็ได้) และส่วนท้ายถัดจากคอคอดออกไปเป็น Diverging transition (Transition แนวตรง) ที่ปรับหน้าตัดจากคอให้ผายออกไปรับกับหน้าตัดทางน้ำด้านท้าย ทั้งนี้ Diverging transition อาจสร้างเป็นลาด 6:1 ตัวอย่างรูปแบบของ Long-throat flume รูปแบบอื่นๆ แสดงในรูปที่ 14-4, รูปที่ 14-5, รูปที่ 14-6 และ รูปที่ 14-7



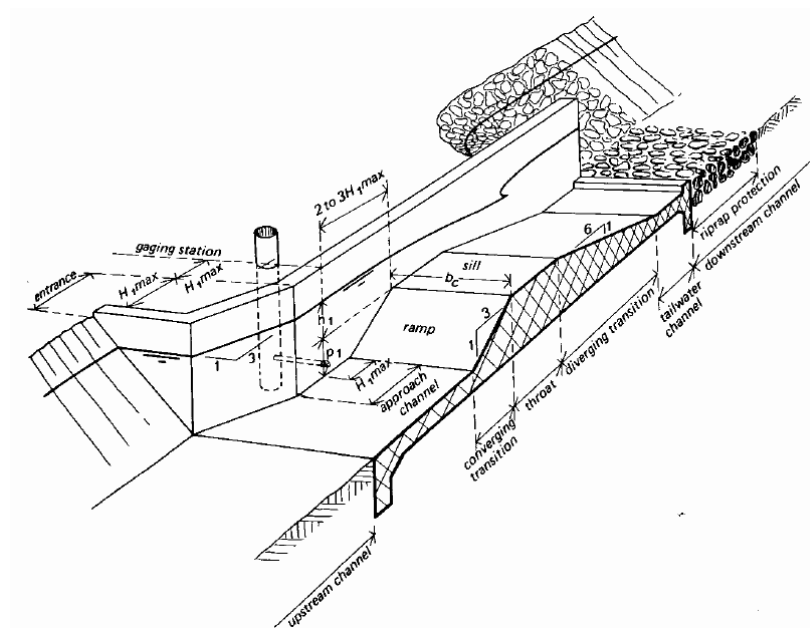
รูปที่ 14-4 รูป Plan และรูปตัดของTrapezoidal long-throat flume



รูปที่ 14-5 ลักษณะของTrapezoidal long-throat flume



รูปที่ 14-6 รูป Plan และรูปตัดของ Rectangular long-throat flume
(ตัวอย่างขนาด 0.30 x 0.80 ม.)



รูปที่ 14-7 ลักษณะของ Rectangular long-throat flume (ตัดตามแนวศูนย์กลาง)

14.3.1 การคำนวณอัตราการไหลผ่าน Long-throat flume

ความสำคัญของ Long-throat flume นั้นอยู่ที่ส่วนคอหรือส่วนที่เสมือนเป็นฝายสันกว้างนั่นเอง การคำนวณปริมาณน้ำจึงคำนวณในส่วนที่ผ่านคอออกไปซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายฝายสันกว้างที่มีรูปร่างหน้าตัดตามหน้าตัดการไหลส่วนคอ ซึ่งจะเกิด Critical Area: A_c และ Critical depth: y_c เหนือส่วนคอดังกล่าว

การคำนวณใช้สมการและค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับ ฝายสันกว้างที่พัฒนาจากฝายสันคม ในบทที่ 10 หัวข้อ 10.5 ยกตัวอย่างร่างวัดน้ำที่นิยมสร้างต่อไปนี้

- กรณีหน้าตัดการไหลเหนือส่วนคอเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ดูจากหัวข้อ 10.5.1)

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} b_c h_1^{1.50}$$

- กรณีหน้าตัดการไหลเหนือส่วนคอเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (ดูจากหัวข้อ 10.5.5)

$$Q = C_d \left\{ b_c y_c + z_c y_c^2 \right\} \sqrt{2g(H_1 - y_c)}$$

ค่า C_d ที่สัมพันธ์กับค่าของ H_1/L สำหรับฝายสันกว้างและ Long-throated flume ทุกรูปร่างทุกขนาด หาได้จากกราฟ รูปที่ 10-14

C_v ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของกระแสน้ำ หาได้จากกราฟ รูปที่ 10-3

ค่าของ y_c/H_1 ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าของ z_c และ H_1/b_c สำหรับฝายสันกว้างที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู หาได้จาก ตารางที่ 10-3

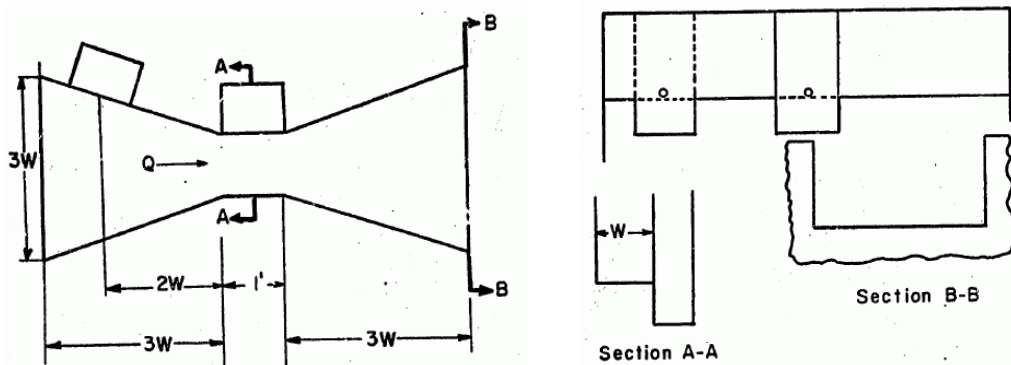
14.3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Winflume

Winflume เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาโดยทีมงานของ Replogle ที่พัฒนา Long-throated flume เพื่อใช้ในการช่วยออกแบบ Long-throated flume รวมทั้งใช้ศึกษาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ ใช้สอบเทียบเบื้องต้น เป็นฟรี โปรแกรมที่ทำงานบน Windows สามารถดาวน์โหลดได้ที่เว็บไซต์ของ USBR โดยเป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้ง่าย ช่วยให้เข้าใจการทำงานของ Long-throated flume ได้ดีขึ้น

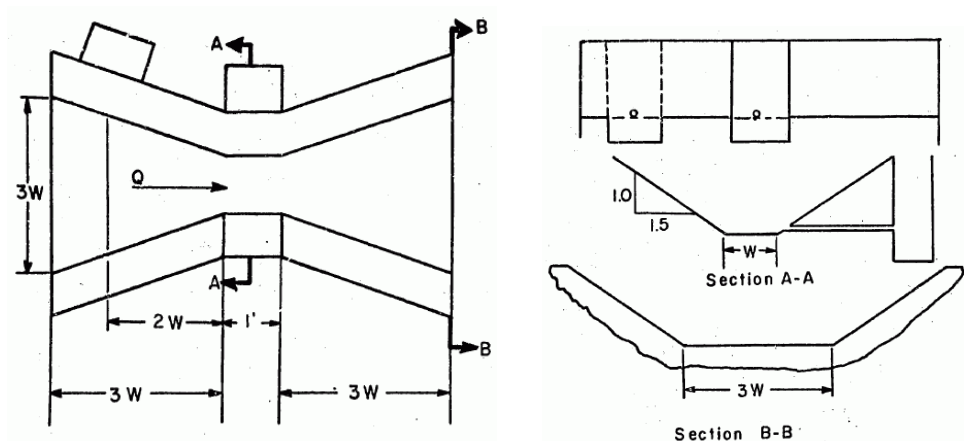
14.4 Venturi Flume

ในปี 1791 J. B. Venturi วิศวกรชาวอิตาลีได้ค้นพบและอธิบายปรากฏการณ์ที่ของไหลคือของเหลวและก๊าซที่ไหลในระบบท่อปิดที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดในลักษณะคอขวดว่า ที่หน้าตัดส่วนที่แคบหรือคอขวด Velocity head จะเพิ่มขึ้น แต่ Pressure head จะลดลง ซึ่งต่อมาการค้นพบนี้นำไปสู่การพัฒนาเป็น Venturi meter โดย Clemens Herschel ในปี 1887 และต่อมาในปี 1917 V.M.Cone ได้นำหลักการดังกล่าวมาพัฒนาสร้างเป็นรางวัดน้ำ ที่ Fort Collins Hydraulic Laboratory หน่วยงานของ Colorado Agriculture Experiment Station และเรียกว่า **Venturi flume**

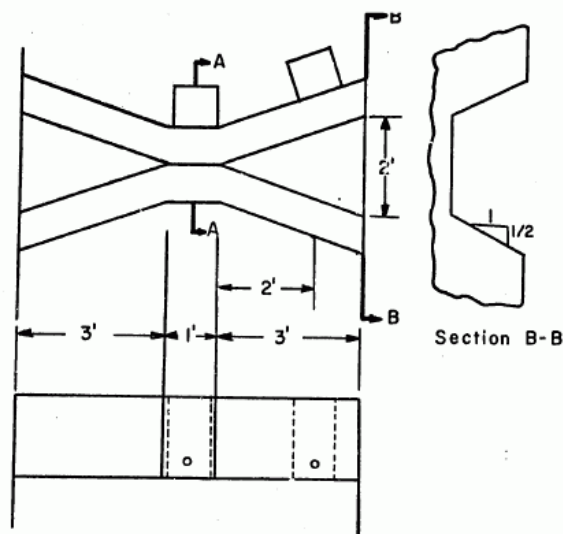
Venturi flume นี้สามารถสร้างให้กลมกลืนกับหน้าตัดทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู เป็น Rectangular venturi flume และ Trapezoidal venturi flume นอกจากนี้ได้พัฒนาเป็น V-notch venturi flume เพื่อใช้วัดอัตราการไหลน้อย ๆ ซึ่งรางวัดน้ำทั้ง 3 รูปแบบ แสดงในรูปที่ 14-8, รูปที่ 14-9 และ รูปที่ 14-10



รูปที่ 14-8 แสดงแปลน และรูปตัดของ Rectangular venturi flume



รูปที่ 14-9 แสดงแปลน และรูปตัดของ Trapezoidal venturi flume



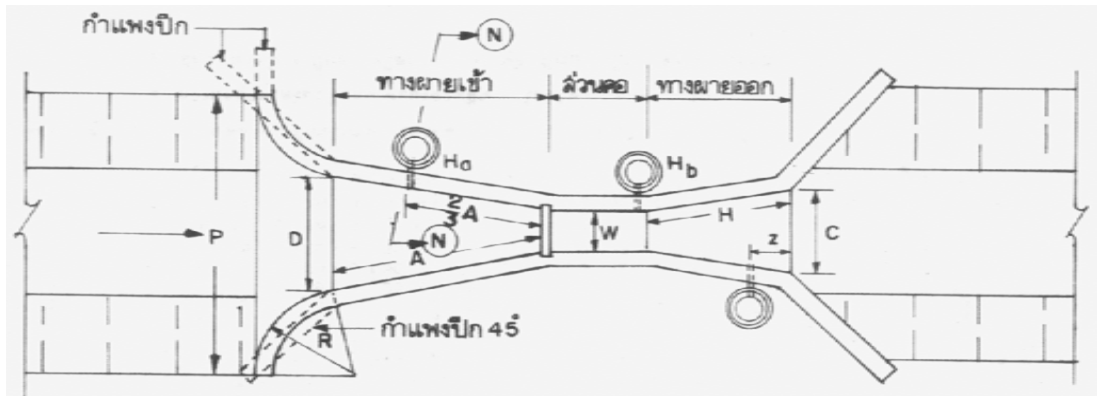
รูปที่ 14-10 แสดงแปลน และรูปตัดของ V-notch flume

Venturi flume ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ทางผายเข้า ส่วนคอ และทางผายออก (ส่วนคอมีความสำคัญที่สุด ทางผายเข้าและทางผายออกเป็น Transition ของส่วนคอ) มีคุณสมบัติสำคัญคือเกิด Head loss น้อย ลักษณะการไหลผ่านรางเป็นแบบ Submerged flow อัตราการไหลผ่านรางวัดน้ำชนิดนี้จะสัมพันธ์กับ ความเร็วการไหล และ เส้นขอบเปียกของหน้าตัดการไหล สองตำแหน่ง คือที่ระยะ $2/3$ ของความยาวปากทางเข้า และที่กึ่งกลางคอของราง (ตำแหน่ง Critical depth) และเนื่องจากสมการการคำนวณปริมาณน้ำผ่านรางชนิดนี้มีความยุ่งยากซับซ้อนมาก จึงใช้อัตราการไหลจากผลการสอบเทียบมาสร้างเป็นตารางสำเร็จรูปให้ใช้งาน ในเวลาต่อมา Venturi flume ของ Cone ได้รับการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ โดย Ralph L. Parshall แล้วจึงหันมาใช้รางวัดน้ำของ Parshall แทน

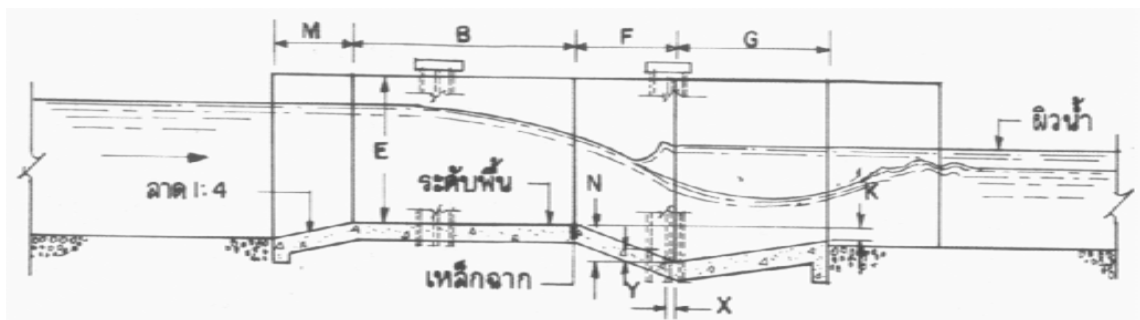
14.5 Parshall flume

Parshall flume พัฒนาขึ้นมาโดย Ralph L. Parshall ในช่วงปี 1922 ที่ U.S. Soil Conservation Service เป็นการปรับปรุง Venturi flume ของ V.M.Cone ที่พบว่ามีความบกพร่องหลายประการ ที่สำคัญคือ Parshall พบว่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของ Venturi flume นั้นมีลักษณะของผายด้วย โดยในช่วงแรกเรียกกรางวัดน้ำรูปแบบใหม่ว่า The improved Venturi flume ต่อมาจึงเรียก Parshall flume

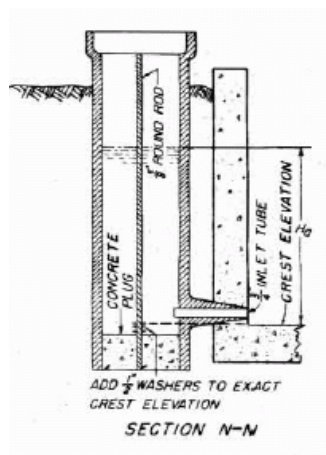
Parshall flume นี้ได้ออกแบบให้มีขนาดคอคอตั้งแต่ 1 นิ้วไปจนถึง 50 ฟุต จำนวน 22 ขนาด โดยจะมีรูปแบบที่กำหนดมิติที่เป็นสัดส่วนที่สัมพันธ์กันไว้เป็นค่ามาตรฐาน รูปแบบลักษณะของ Parshall flume แสดงใน รูปที่ 14-11 ส่วนมิติหรือสัดส่วนมาตรฐานและช่วงของอัตราการไหลที่รางแต่ละขนาดจะวัดได้ แสดงใน ตารางที่ 14-1



รูปแปลน



รูปด้านข้าง



รูปตัด N-N

รูปที่ 14-11 รูปแบบลักษณะของ Parshall flume

ตารางที่ 14-1 ลักษณะมาตรฐานของ PARSHALL FLUMES และช่วงอัตราการไหลผ่านเมื่อการไหลเป็นแบบอิสระ

W	A		(2/3)A		B		C		D		E		F		G		H		K		M		N		P		R		X		Y		Z		ไหลแบบอิสระ: ลิตร/วินาที	
	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	นิ้ว	ฟุต	ต่ำสุด	สูงสุด		
0	1	1	2.28	0	9.53	1	2	0	3.7	0	6.59	0	6-9	0	3	0	8	0	8.13	0	0.75	-	-	0	1.13	-	-	-	-	0	0.31	0	0.50	0.13	0.09	5.40
2	1	4.31	10.88	1	4	5.3	8.41	10	10.13	0.88	-	-	6-10	4.50	10	10.13	0.88	-	-	-	-	-	1.69	-	-	-	-	-	-	0.63	1	0.25	0.18	13.20		
3	1	6.38	1	0.25	1	6	7	10.19	1-1.5	10.19	1-1.5	6	1	0	1	0.16	1	0.16	1	-	-	-	2.25	-	-	-	-	-	-	1	1.50	0.50	0.77	32.10		
6	2	0.44	1	4.31	2	0	1	3	1	3.63	2	0	1	0	2	0	4.50	2	11.50	1	4	0	2	0	4.50	2	11.50	1	4	0	2	0	3	-	1.50	111
9	2	10.63	1	11.13	2	10	1	5	1	10.63	2	0	1	0	2	0	4.50	3	6.50	1	4	2	3	4.50	3	6.50	1	4	2	2	3	-	-	2.50	251	
1	0	4	6	3	0	4	4.88	2	3	2	9.25	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	3	9	4	10.75	1	8	2	3	-	-	-	-	3.32	457	
1	6	4	9	3	2	4	7.88	2	0	3	4.38	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	3	9	5	6	1	8	2	3	-	-	-	-	4.80	695	
2	0	5	0	3	4	4	10.88	3	6	3	11.50	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	3	9	6	1	1	8	2	3	-	-	-	-	12.10	937	
3	0	5	6	3	8	5	4.75	4	0	5	1.88	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	3	9	7	3.50	1	8	2	3	-	-	-	-	17.60	1427	
4	0	6	0	4	0	5	10.63	5	0	6	4.25	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	6	9	8	10.75	2	0	2	3	-	-	-	-	35.80	1923	
5	0	6	6	4	4	6	4.50	6	0	7	6.63	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	6	9	10	1.25	2	0	2	3	-	-	-	-	44.10	2424	
6	0	7	0	4	8	6	10.38	7	0	8	9.00	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	6	9	11	3.50	2	0	2	3	-	-	-	-	74.10	2929	
7	0	7	6	5	0	7	4.25	8	0	9	11.38	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	6	9	12	6	2	0	2	3	-	-	-	-	85.80	3438	
8	0	8	0	5	4	7	10.13	9	0	11	1.75	3	0	2	0	3	0	-	-	3	1	6	9	13	8.25	2	0	2	3	-	-	-	-	97.20	3949	
รวม/วินาที																																				
10	0	-	-	6	0	14	0	12	0	15	7.25	4	0	3	0	6	0	-	-	0	6	-	-	1	1.50	-	-	-	-	0	9	1	0	-	0.16	8.28
12	0	-	-	6	8	16	0	14	8	18	4.75	5	0	3	0	8	0	-	-	6	-	-	1	1.50	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.19	14.68	
15	0	-	-	7	8	25	0	18	4	25	0	6	0	4	0	10	0	-	-	9	-	-	1	6	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.23	25.04	
20	0	-	-	9	4	25	0	24	0	30	0	7	0	6	0	12	0	-	-	1	0	-	2	3	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.31	37.97	
25	0	-	-	11	0	25	0	29	4	35	0	7	0	6	0	13	0	-	-	1	0	-	2	3	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.38	47.14	
30	0	-	-	12	8	26	0	34	8	40	4.75	7	0	6	0	14	0	-	-	1	0	-	2	3	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.46	56.33	
40	0	-	-	16	0	27	0	45	4	50	9.50	7	0	6	0	16	0	-	-	1	0	-	2	3	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.60	74.70	
50	0	-	-	19	4	27	0	56	8	60	9.50	7	0	6	0	20	0	-	-	1	0	-	2	3	-	-	-	-	-	9	1	0	-	0.75	93.04	

หมายเหตุ

1. ความคลาดเคลื่อนในขนาดของท่อ (W) ที่ยอมให้ไม่เกิน $\pm 1/64$ นิ้ว
2. ความคลาดเคลื่อนในขนาดของส่วนอื่น ไม่เกิน $\pm 1/32$ นิ้ว
3. อัตราการไหลเมื่อขนาดต่ำกว่า 10 ฟุต มีหน่วยเป็น ลบ.ม./วินาที

ที่มา : หนังสือหลักการชลประทาน โดย รศ.ดร. วิบูลย์ บุญยชโรกุล (แปลงค่าจากผลงานของนิว เป็นทศนิยม)

จากรูปแบบลักษณะที่แสดงใน รูปที่14-11 Parshall flume มีลักษณะทั่วไปประกอบด้วย

- 1) ทางผายเข้า (Converging section) เป็นผนังแนวตั้งที่เริ่มบีบตัวจากกำแพงปีกที่ทางเต็มความกว้างของทางน้ำให้แคบเข้า
- 2) ส่วนคอ (Throat section) เป็นส่วนแคบที่สุดของรางโดยความส่วนคือนี้อาจแตกต่างกันตลอดแต่พื้นรางส่วนนี้จะลาดต่ำลง ความกว้างของส่วนนี้ใช้เรียกขนาดของ Flume
- 3) ทางผายออก (Diverging section) เป็นส่วนที่ผายออกจากคอไปพบกำแพงปีกด้านท้ายน้ำซึ่งส่วนปลายสุดจะมีความกว้างเท่ากับทางน้ำ

จากความสำคัญของขนาดมิติที่วัดจากด้านในของราง ทำให้สามารถสร้าง Parshall flume ได้ด้วยวัสดุหลากหลาย โดยอาจสร้างด้วยคอนกรีตตายตัวในพื้นที่ หรือสร้างด้วยเหล็กพลาสติก ไม้ หรือวัสดุอื่นๆ แล้วเอาไปติดตั้งก็ได้

14.5.1 อัตราการไหลผ่าน Parshall flume

การไหลผ่าน Parshall flume จะมี 2 ลักษณะคือ การไหลแบบ Free flow และการไหลแบบ Submerged flow โดยลักษณะของผิวน้ำของการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 14-11 โดยที่อัตราการไหลจะขึ้นอยู่กับ Head หรือความลึกของน้ำในราง ซึ่งวัดจากบ่อน้ำนิ่ง (Stilling well) ที่ตำแหน่งทางผายเข้า และที่ส่วนคอ ซึ่งแทนด้วย H_a และ H_b

14.5.1.1 กรณีการไหลแบบ Free flow

กรณีนี้อัตราการไหลจะขึ้นกับขนาดของคอและความลึกการไหล H_a เท่านั้น H_b ไม่มีผลกระทบกับการไหล เมื่ออัตราส่วน H_b/H_a หรือ Submergence ratio: S มีค่าไม่เกินที่กำหนดตาม ตารางที่ 14-2

ตารางที่ 14-2 การไหลแบบ Free flow เมื่ออัตราส่วน H_b/H_a มีค่าไม่เกินที่กำหนด

ขนาดของราง	H_b/H_a
1 ถึง 3 นิ้ว	0.50
6 และ 9 นิ้ว	0.60
1 ถึง 8 ฟุต	0.70
10 ถึง 50 ฟุต	0.80

จากการทดลองพบว่า Parshall flume ที่มีขนาดและมิติที่ต่างกันแม้เพียงเล็กน้อยจะมีคุณสมบัติทางศาสตร์ที่ต่างกันอย่างมาก จึงไม่สามารถกำหนดสมการในการคำนวณอัตราการไหลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การไหล และค่าตัวแปร (ค่ายกกำลัง) ให้ครอบคลุมใช้ได้ทั่วไปแบบอาคารอื่นๆ เช่นฝายได้

การคำนวณอัตราการไหลใช้สูตร $Q = KH_a^n$ โดยช่วงการวัดและค่าสัมประสิทธิ์การไหล K กับค่าตัวแปรยกกำลัง n แสดงไว้ใน ตารางที่ 14-3

ตารางที่ 14-3 ค่าคงที่ K และ n สำหรับการคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Parshall Flume กรณีการไหลแบบ Free flow

สูตรการคำนวณ $Q = KH_a^n$ ค่า H เป็น ม. ค่า Q เป็น $m^3/วินาที$

ขนาดของราง	K	n	ช่วง Head (ม.)	
			ต่ำสุด	สูงสุด
1 in	0.060	1.55	0.015	0.21
2 in	0.121	1.55	0.015	0.24
3 in	0.177	1.55	0.030	0.33
6 in	0.381	1.58	0.030	0.45
9 in	0.535	1.53	0.030	0.61
12 in	0.691	1.522	0.030	0.76
18 in	1.056	1.538	0.030	0.76
2 ft	1.429	1.550	0.046	0.76
3 ft	2.184	1.566	0.046	0.76
4 ft	2.954	1.578	0.060	0.76
5 ft	3.732	1.587	0.060	0.76
6 ft	4.518	1.595	0.076	0.76
7 ft	5.313	1.601	0.076	0.76
8 ft	6.115	1.607	0.076	0.76
10 ft	7.463	1.60	0.090	1.07
12 ft	8.859	1.60	0.090	1.37
15 ft	10.96	1.60	0.090	1.67
20 ft	14.45	1.60	0.090	1.83
25 ft	17.94	1.60	0.090	1.83
30 ft	21.44	1.60	0.090	1.83
40 ft	28.43	1.60	0.090	1.83
50 ft	35.41	1.60	0.090	1.83

ที่มา : U.S. EPA, Recommended Practice for the use of Parshall Flumes and Palmer-Bowlus Flumes in Wastewater Treatment Plants, EPA600/2-84-180, 1984

14.5.1.2 กรณีการไหลแบบ Submerged flow

การไหลผ่าน Parshall flume จะมีลักษณะเป็นแบบ Submerged flow เมื่ออัตราส่วน H_b/H_a มีค่ามากกว่าที่กำหนดตาม ตารางที่ 14-2 โดยการไหลกรณี Submerged flow นี้ ระดับน้ำด้านท้ายที่ยกตัวสูงจะต้านการไหลทำให้อัตราการไหลลดลงจากการไหลที่คำนวณโดยสมการ Free flow ดังนั้นอัตราการไหลจะคำนวณได้จาก

$$Q_s = Q_F - Q_E$$

เมื่อ Q_s = อัตราการไหลที่เป็น Submerged flow

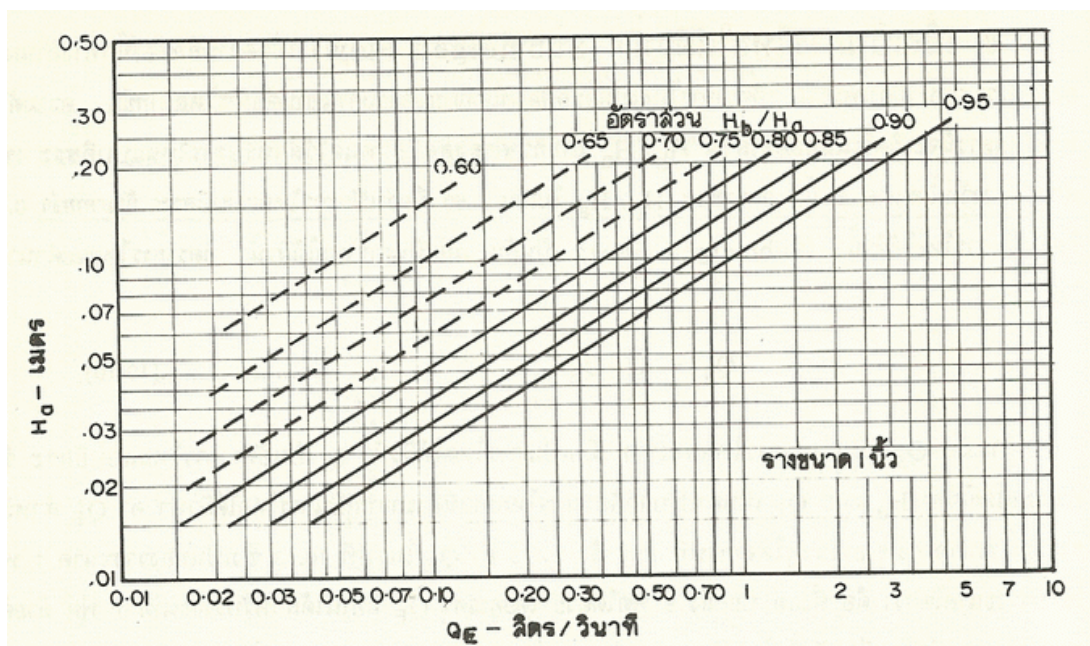
Q_F = อัตราการไหลที่คำนวณโดยสมการ Free flow

Q_E = ค่าปรับแก้อัตราการไหลที่เป็นผลจาก Submerged flow

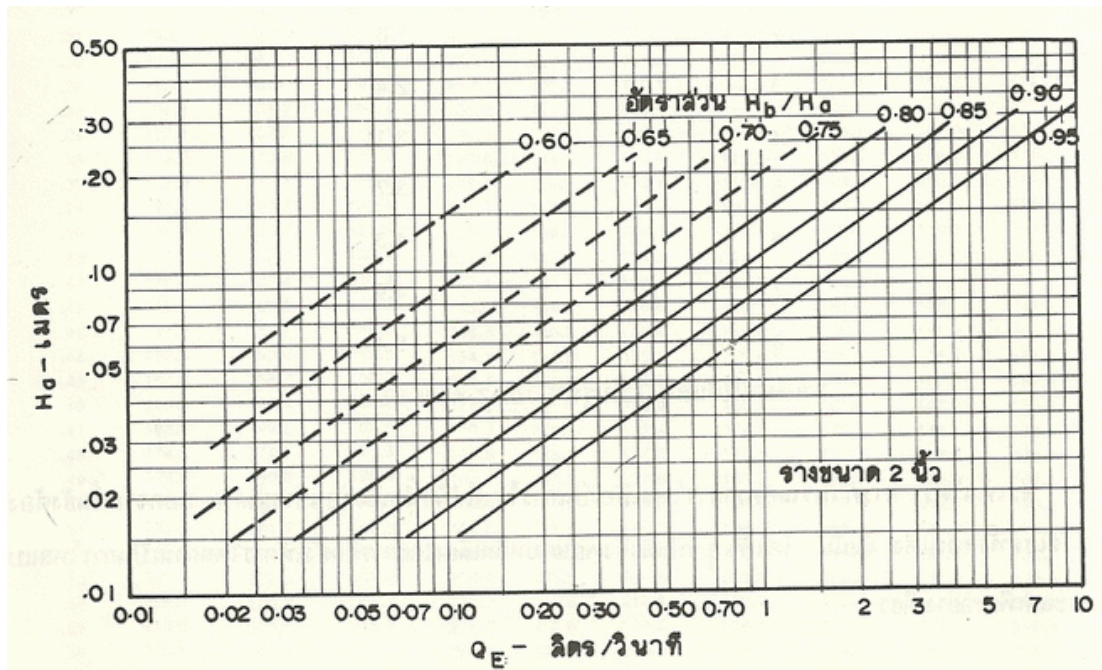
Q_E : ค่าปรับแก้อัตราการไหลที่เป็นผลจาก Submerged flow

1) กรณี Parshall flume ขนาด 1 นิ้ว ถึง 9 นิ้ว

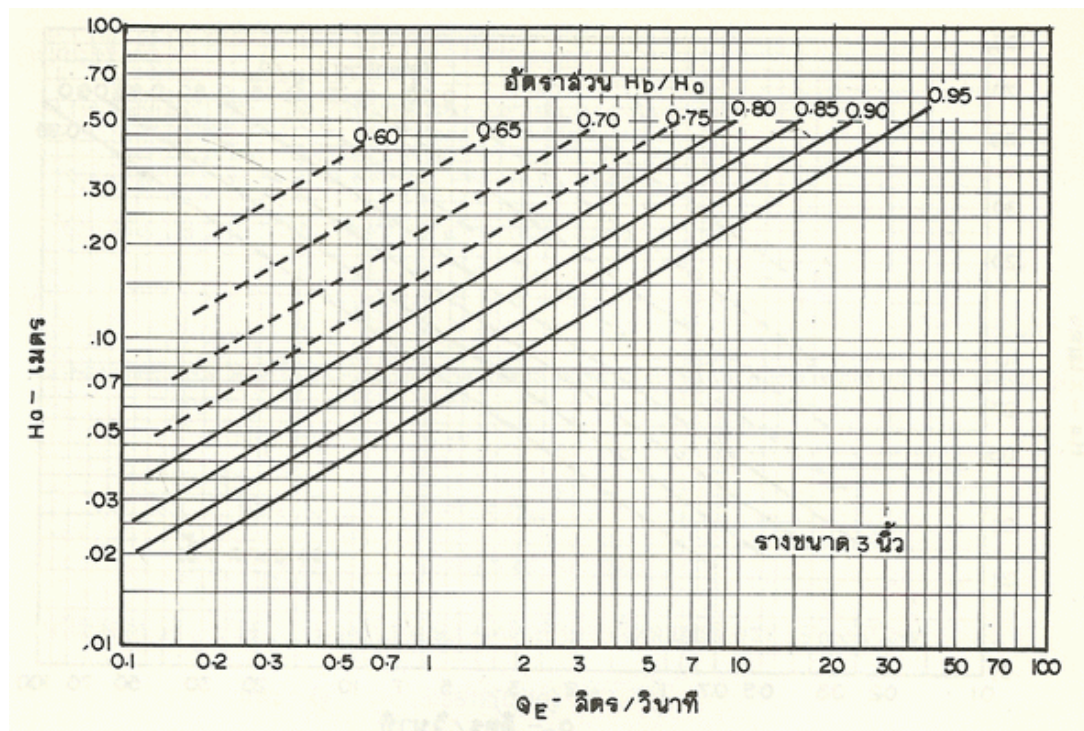
ค่าปรับแก้ Q_E หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ H_a , Q_E และ อัตราส่วน H_b/H_a ซึ่งแสดงไว้ใน รูปที่ 14-12 ถึง รูปที่ 14-16



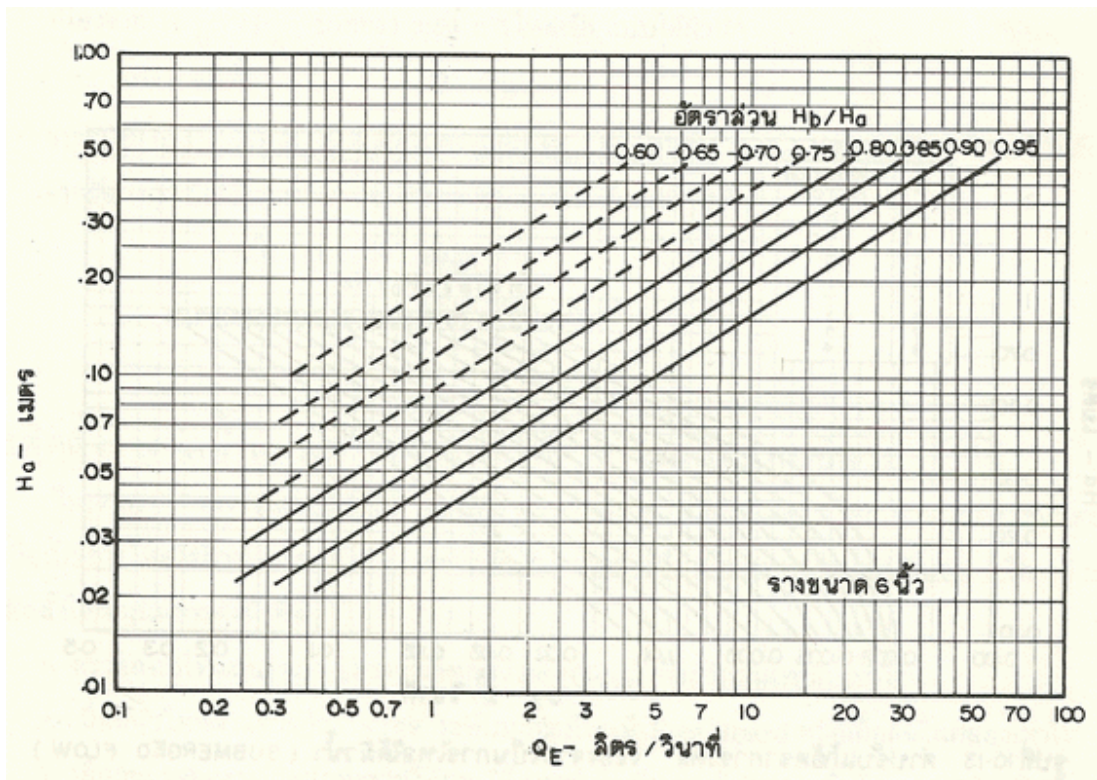
รูปที่ 14-12 ค่าปรับแก้การไหลเนื่องจาก Submerged flow ของ Parshall flume 1 นิ้ว



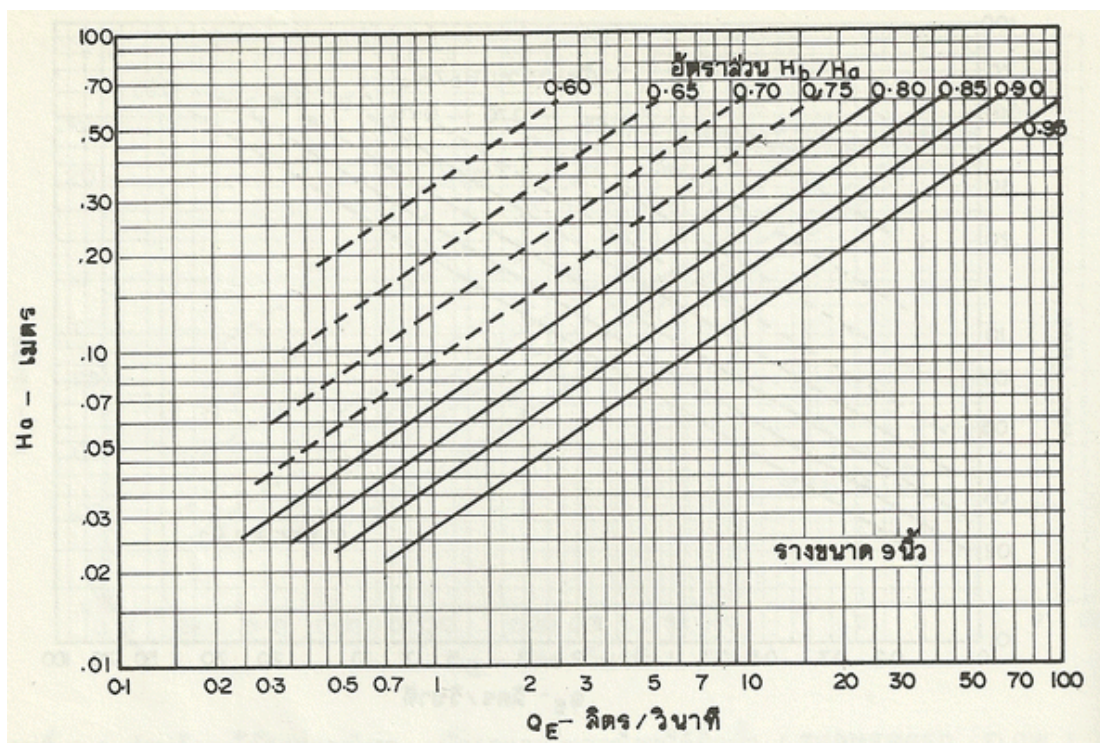
รูปที่ 14-13 ค่าปรับแก้การไหลเนื่องจาก Submerged flow ของ Parshall flume 2 นิ้ว



รูปที่ 14-14 ค่าปรับแก้การไหลเนื่องจาก Submerged flow ของ Parshall flume 3 นิ้ว



รูปที่ 14-15 ค่าปรับแก้การไหลเนื่องจาก Submerged flow ของ Parshall flume 6 นิ้ว



รูปที่ 14-16 ค่าปรับแก้การไหลเนื่องจาก Submerged flow ของ Parshall flume 9 นิ้ว

2) กรณี **Parshall flume** ขนาด 1 ฟุต ถึง 50 ฟุต

2.1) **Parshall flume** ขนาด 1 ฟุต ถึง 8 ฟุต

$$Q_S = Q_F - Q_E \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

$$Q_E = (3.738 / 10^6) M H_a^{2.123} e^{9.284 S}$$

- **M** เป็นค่าที่สัมพันธ์กับขนาดของ Flume มีค่าดังนี้

ขนาดของราง (ฟุต)	M
1	1.0
1.5	1.4
2	4.8
3	2.4
4	3.1
5	3.7
6	4.3
7	4.9
8	5.4

- **H_a** ความลึกของน้ำ หน่วย ม.
- **e** คือ Napier's constant = 2.71828
- **S** หรือ Submergence ratio คือค่าอัตราส่วนของ **H_b / H_a** (มี

ค่ามากกว่า 0.7)

2.2) **Parshall flume** ขนาด 10 ฟุต ถึง 50 ฟุต

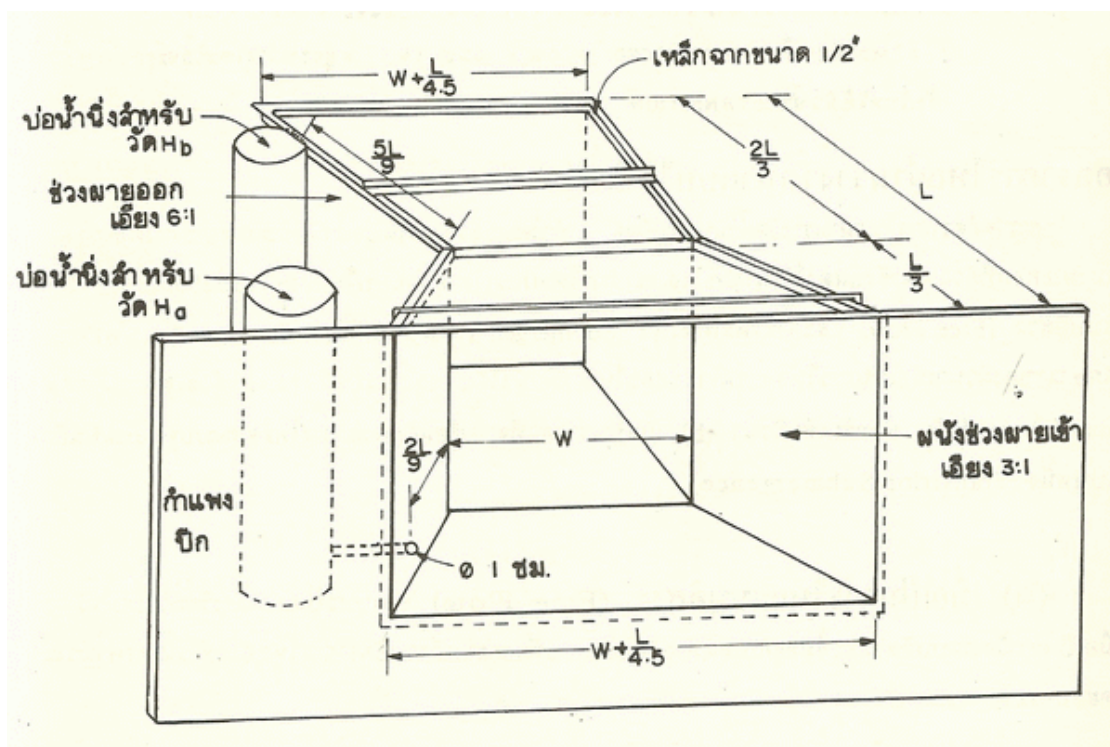
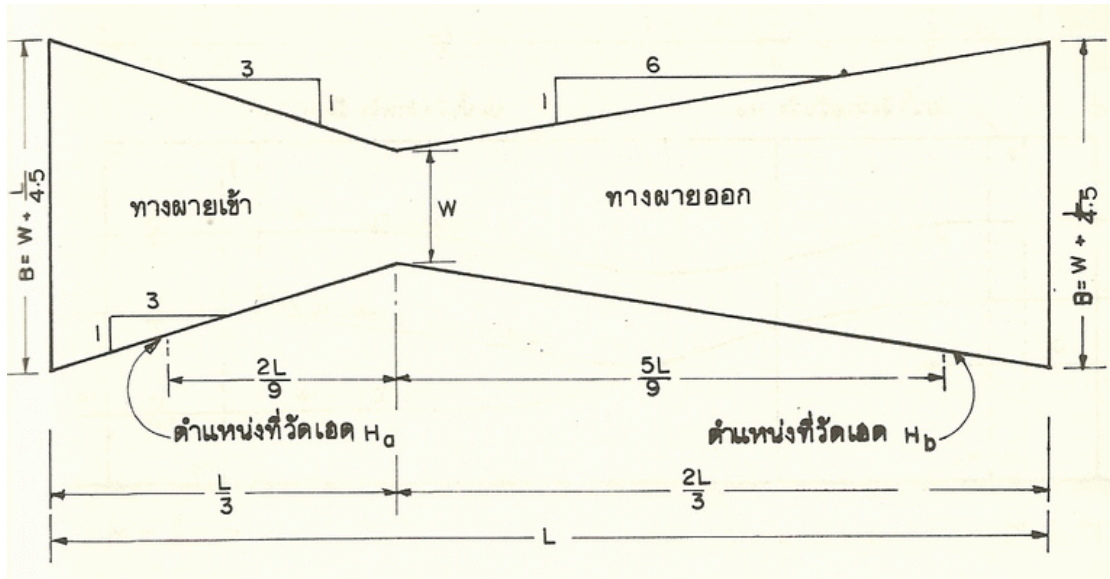
$$Q_S = Q_F + Q_E \quad \text{ม.}^3/\text{วินาที}$$

$$Q_E = (W / 3.048) (0.3048^3) (3.364 + 20.19 S^2 \ln S)^2$$

- **W** ขนาดของราง หน่วย ฟุต
- **S** คือค่าอัตราส่วนของ **H_b / H_a** (มีค่ามากกว่า 0.8)

14.6 Cut-throat flume: รางวัดน้ำแบบไม่มีคอ

เป็นรางวัดน้ำที่พัฒนาโดย Skogerboe, Hyatt, Anderson และ Eggleston ในปี 1967 โดยดัดแปลง Parshall flume ด้วยการตัดส่วนคอของรางออกและทำให้พื้นรางเรียบเสมอกัน รูปร่างลักษณะและขนาดมิติของ Cut-throat flume แสดงในรูปที่ 14-17



รูปที่ 14-17 รูปร่างลักษณะและขนาดมิติของ Cut-throat flume

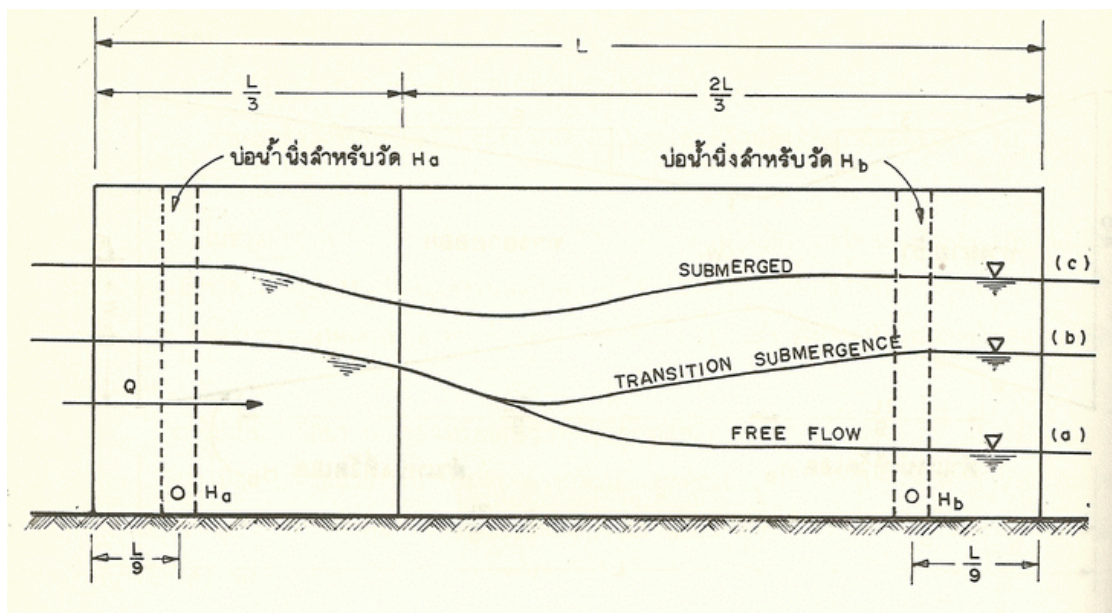
จากลักษณะของ Cut-throat flume ดังแสดงในรูปที่ 14-17 มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ทางผายเข้าที่ผนังรางจะบีบทางน้ำให้แคบเข้าด้วยอัตราส่วน 1 : 3 เมื่อสุดทางที่ระยะ $L/3$ ของความยาวทั้งหมด ซึ่งเป็นส่วนแคบที่สุดของราง แล้วจะเป็นทางผายออกที่มีอัตราส่วนการผายออก 1 : 6 และมีความยาวเป็น 2 เท่าของทางผายเข้า ขนาดของ Cut-throat flume จะบอกด้วยความกว้างแคบที่สุด กับ ความยาวของราง ยกตัวอย่างเช่น ขนาด 0.50 x 1.50 เมตร หมายถึงรางที่มีส่วนแคบสุด 0.50 เมตร และรางยาว 1.50 เมตร

รูปแบบของ Cut-throat flume นั้นไม่ซับซ้อนทำให้สร้างง่ายไม่ว่าสร้างด้วยวัสดุใด มีราคาถูกกว่า Parshall flume เมื่อขนาดเท่ากัน ติดตั้งง่ายสามารถวางบนพื้นคลองคอนกรีตได้เลย

14.6.1 อัตราการไหลผ่าน Cut-throat flume

ลักษณะการไหลผ่าน Cut-throat flume แสดงในรูปที่ 14-18 ซึ่งจะมี 3 รูปแบบ คือ การไหลแบบอิสระ (Free flow) การไหลใต้ผิวน้ำ (Submerged flow) และมีลักษณะการไหลแบบ Transition submergence ซึ่งเป็นช่วงการไหลที่เปลี่ยนระหว่างการไหลทั้งสองแบบดังกล่าว

ในการคำนวณอัตราการไหลจะวัดระดับน้ำจากบ่อน้ำนิ่ง 2 ตำแหน่ง คือที่ทางผายเข้าวัด H_a และที่ทางผายออกวัด H_b



รูปที่ 14-18 ลักษณะการไหลผ่าน Cut-throat flume 3 ลักษณะ

ก. กรณีการไหลแบบ Free flow

อัตราการไหลที่เป็นการไหลแบบอิสระจะขึ้นกับ Head ของทางผายเข้า H_a อย่างเดียว ซึ่งสามารถคำนวณโดยสมการ

$$Q = CH_a^{n_1} \quad ; \quad \frac{H_a}{L} \leq 0.40$$

$$C = KW^{1.025}$$

- เมื่อ Q = อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)
 H_a = ความลึกของน้ำในทางผายเข้า (ม.)
 L = ความยาวของราง (ม.)
 C = สัมประสิทธิ์ของการไหลแบบอิสระ
 n_1 = สัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับความยาวของราง***
 W = ขนาดความกว้าง (ส่วนแคบที่สุด) ของราง (ม.)
 K = สัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับความยาวของราง***

***ค่า C , n_1 , K หาได้จากกราฟในรูปที่ 14-19 การคำนวณมีความละเอียดถูกต้องเมื่อ $H_a/L \leq 0.40$

ข. กรณีการไหลแบบ Submerged flow

เป็นการไหลเมื่อความลึกของน้ำทางด้านผายออก H_b มีค่าสูงจนทำให้เกิดความลึกในรางสูงกว่า Critical depth โดยความลึกของน้ำด้านท้ายน้ำมีผลกระทบต่อการไหลในสภาพ Free flow นั้นเอง การคำนวณอัตราการไหลจึงต้องพิจารณาทั้งความลึก H_a และ H_b ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{C_1(H_a - H_b)^{n_1}}{(-\log S)^{n_2}} \quad ; \quad \frac{H_a}{L} \leq 0.40$$

$$C_1 = K_1W^{1.025}$$

- เมื่อ Q = อัตราการไหล (ม³./วินาที)
 H_a = ความลึกของน้ำในทางผายเข้า (ม.)
 H_b = ความลึกของน้ำในทางผายออก (ม.)
 L = ความยาวของราง (ม.)
 C_1 = สัมประสิทธิ์ของการไหลแบบได้พัวน้ำ***
 n_1, n_2, K_1 = สัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับความยาวของราง***
 W = ขนาดความกว้าง (ส่วนแคบที่สุด) ของราง (ม.)

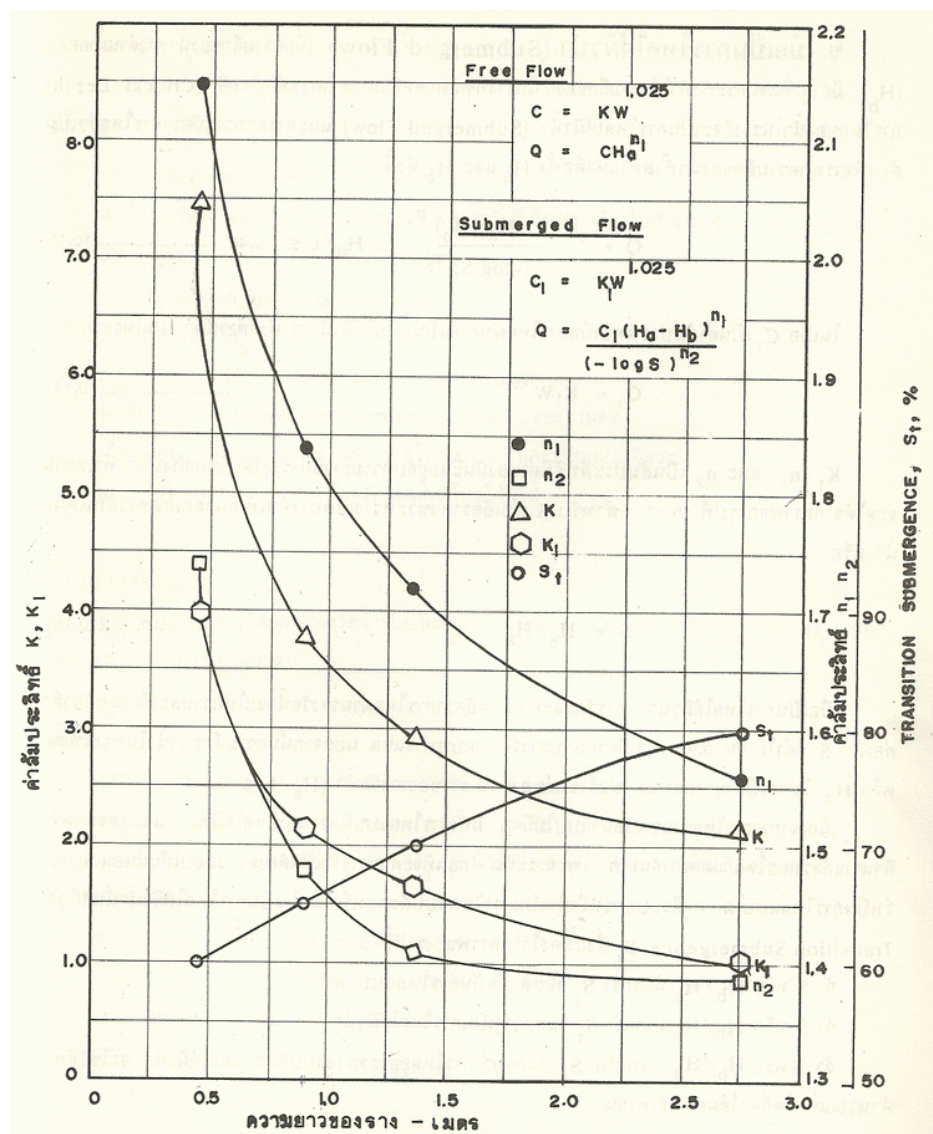
***ค่า C_1 , n_1 , n_2 , K_1 หาได้จากกราฟในรูปที่ 14-20 การคำนวณมีความถูกต้อง เมื่อ $H_a/L \leq 0.40$

14.6.2 การพิจารณาลักษณะการไหลของ Cut-throat flume

- การไหลเป็นแบบ **Free flow** ถ้า S หรือ H_b/H_a น้อยกว่า S_t ***
- การไหลเป็นแบบ **Submerged flow** ถ้า S หรือ H_b/H_a มากกว่า S_t
- การไหลเป็นแบบ **Transition submergence** ถ้า S หรือ H_b/H_a เท่ากับ S_t

ซึ่งเป็นการไหลที่อยู่ระหว่าง Free flow กับ Submerged flow จะใช้การคำนวณแบบใดก็ได้ ผลลัพธ์ที่เท่ากัน

**** S_t ค่า % Transition submergence ที่ขึ้นกับความยาวของรางหาได้จากกราฟในรูปที่ 14-21



รูปที่ 14-21 กราฟใช้หาค่า n_1, n_2, K, K_1 และ S_t ที่สัมพันธ์กับความยาวราง
สำหรับใช้คำนวณอัตราการไหลของ Cut-throat flume

14.7 H- Flume

H-Flume นั้นพัฒนาขึ้นมาที่ **Agricultural Research Service (ARS)** โดย **Holtan, Minshall** และ **Harrold** ส่วนที่เรียกชื่อว่า H-Flume นั้นเพราะเป็น Flume ที่กำหนดขนาดตามความสูงด้านทางเข้าของราง (H มาจาก Height) ในการพัฒนานั้นใช้หน่วยในระบบอังกฤษทั้งหมด ต่อมาในปี 1976 Bos ได้แปลงหน่วยอัตราการไหลเป็นระบบ SI

H- Flume นี้กำหนดให้ใช้วัดปริมาณน้ำที่มีการไหลเป็นแบบ Free flow เป็นหลัก ได้แก่การตรวจวัดในระดับแปลงนา ในระบบระบายน้ำขนาดเล็ก เป็นต้น จากรูปร่างลักษณะพิเศษของรางวัดน้ำชนิดนี้จึงมีคุณสมบัติของฝายกับรางวัดน้ำผสมกัน นั่นคือมีพื้นแบนราบระดับเดียวกับทางน้ำ แต่มีทางน้ำออกคล้ายฝายสันคมรูปตัววี ต่อมา **U.S. Soil Conservation Service** ได้พัฒนารางวัดน้ำชนิดนี้เป็น 3 ลักษณะรูปแบบตามขนาดและอัตราการไหล ได้แก่

1) **HS-Flume** : (H Small-Flume) เป็นรางน้ำขนาดเล็ก มีขนาดความสูง **D** มากสุด 0.305 ม. (1 ฟุต) ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้สูงสุด 0.022 ลบ.ม./วินาที

HS-Flume ที่ได้ออกแบบไว้เดิมนั้นจะมี 3 ขนาด คือ 0.4 ฟุต (0.122 ม.), 0.6 ฟุต (0.183 ม.), 0.8 ฟุต (0.244 ม.) และ 1.0 ฟุต (0.305 ม.)

2) **H-Flume** เป็นรางขนาดกลางมีขนาดความสูง **D** มากสุด 1.37 ม. (4.5 ฟุต) ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้สูงสุด 2.36 ลบ.ม./วินาที

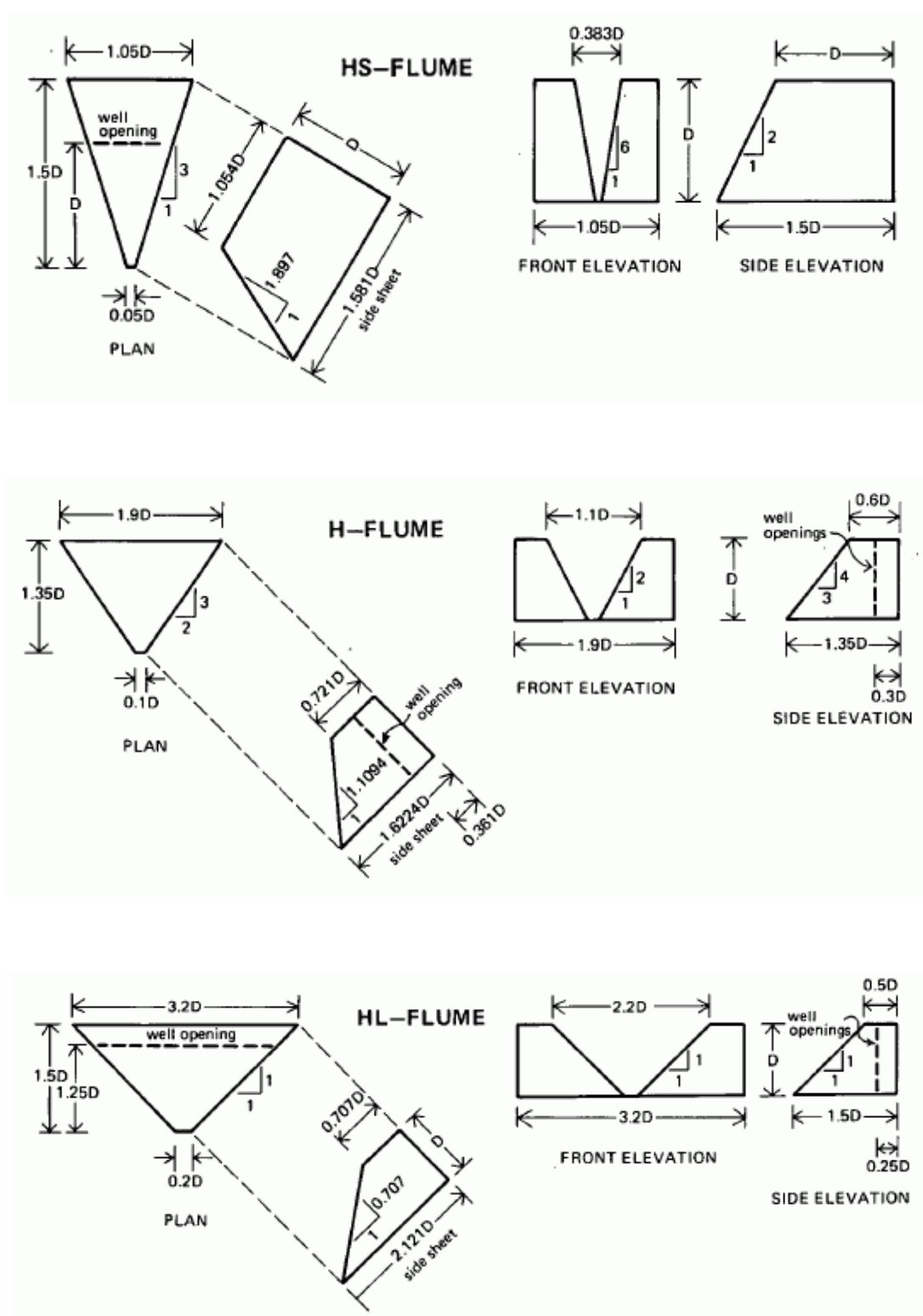
H-Flume ที่ได้ออกแบบไว้เดิมนั้นจะมี 8 ขนาด คือ 0.5 ฟุต (0.152 ม.), 0.75 ฟุต (0.229 ม.), 1.0 ฟุต (0.305 ม.), 1.5 ฟุต (0.457 ม.), 2.0 ฟุต (0.610 ม.), 2.5 ฟุต (0.762 ม.), 3.0 ฟุต (0.914 ม.) และ 4.5 ฟุต (1.370 ม.),

3) **HL-Flume**: (H Large-Flume) เป็นรางน้ำขนาดใหญ่ ที่มีความสูงเท่ากับ **H-Flume** แต่มีความกว้างมากกว่า โดยมีขนาดความสูง **D** มากสุด 1.37 ม. (4.5 ฟุต) ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้สูงสุด 3.32 ลบ.ม./วินาที

HL-Flume ที่ได้ออกแบบไว้เดิมนั้นจะมี 2 ขนาด คือ 3.5 ฟุต (1.07 ม.) และ 4.0 ฟุต (1.22 ม.)

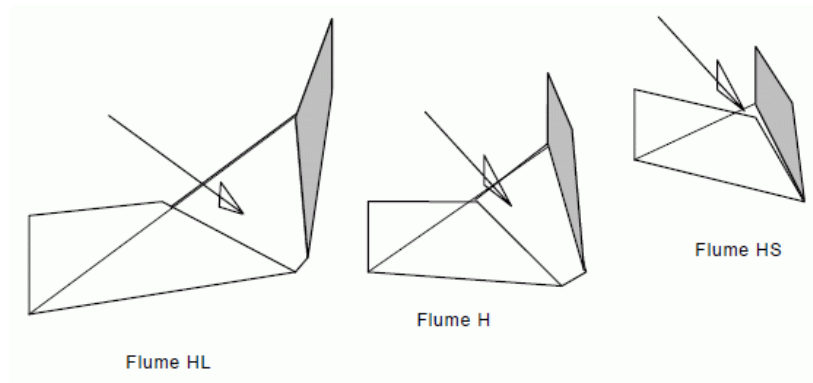
- ลักษณะรูปแบบมิติของทั้ง 3 รูปแบบแสดงในรูปที่ 14-22, รูปที่ 14-23 และ รูปที่ 14-24

[ในที่นี้ในการนำเสนอเมื่อเรียก H-Flume ให้หมายรวมถึง Flume ทั้ง 3 ลักษณะ]

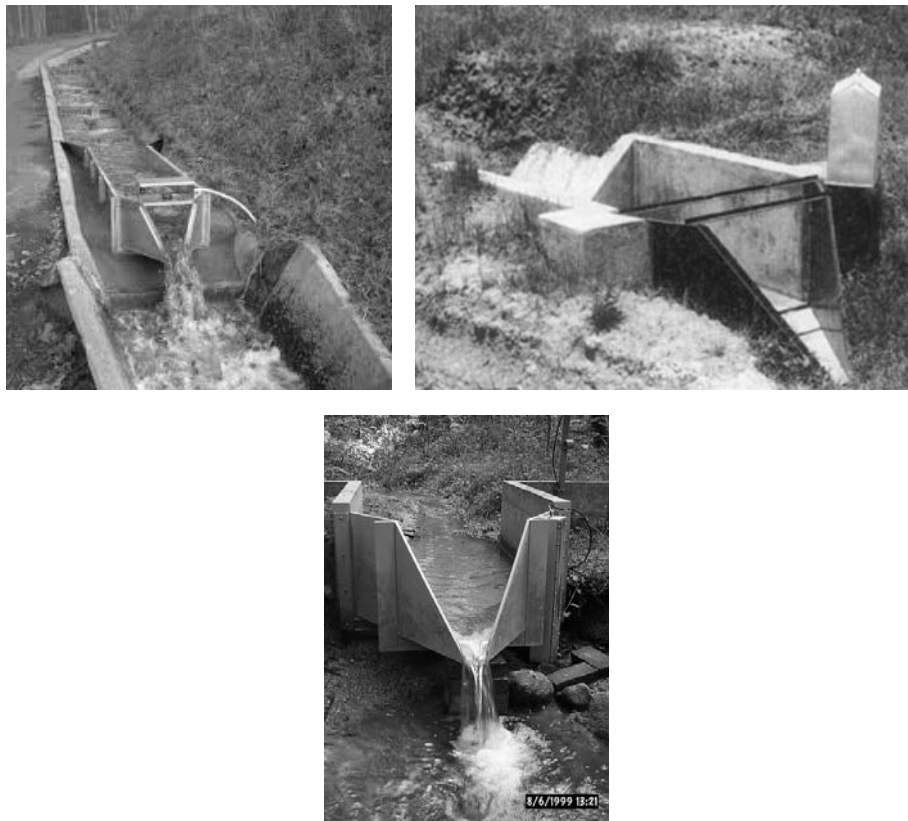


Well opening เป็นตำแหน่งวัดระดับน้ำ h_a โดยติดตั้งไม้บรรทัดที่ผนังด้านข้าง

รูปที่ 14-22 ลักษณะรูปแบบมิติของ HS-Flume, H-Flume และ HL-Flume



รูปที่ 14-23 เปรียบเทียบลักษณะของ HS-Flume, H-Flume และ HL-Flume



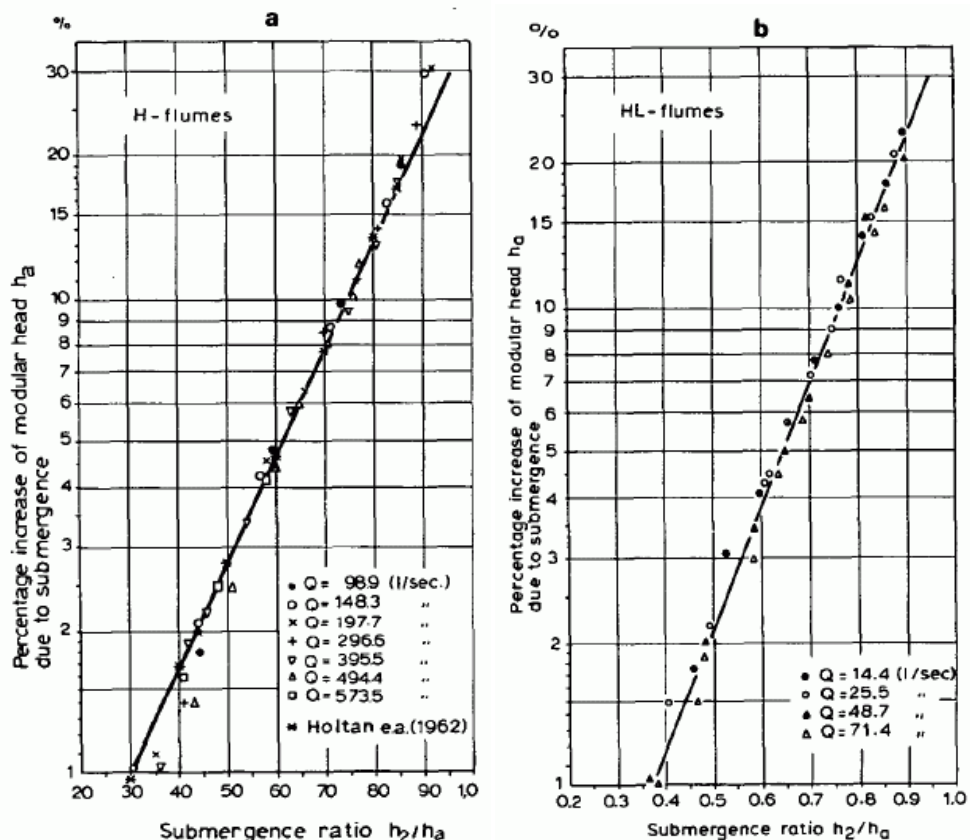
รูปที่ 14-24 แสดงการติดตั้ง H-Flume ท่อ ๆ ไป

H-Flume ทุกแบบทุกขนาดนั้นจะมีการกำหนดขนาดมิติไว้แน่นอน อัตราการไหลที่ระดับความลึกต่าง ๆ จึงเป็นค่าที่แน่นอนตายตัวที่ได้จากการทดลองมาโดยตรง การติดตั้งนั้นในส่วนของทางน้ำที่เป็นทางน้ำเข้าและทางน้ำออกต้องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้างเท่าทางรับน้ำของ Flume เสมอ โดยความยาวต่ำสุดของทางน้ำเข้าและออกจาก Flume เท่ากับ 2D ส่วนตัว Flume นั้นอาจสร้างด้วยแผ่นเหล็กหรือวัสดุอื่น ๆ แต่ปากทางเข้าและทางออกอาจสร้างด้วยคอนกรีตหรือหินก่อหรือก่อด้วยอิฐก็ได้ และเพื่อป้องกันการตกตะกอนพื้นทางน้ำหรือปากทางเข้าอาจเป็นลาดไม่เกิน 2% ก็ได้

14.7.1 ขีดจำกัดของการตรวจวัดด้วย H-Flume

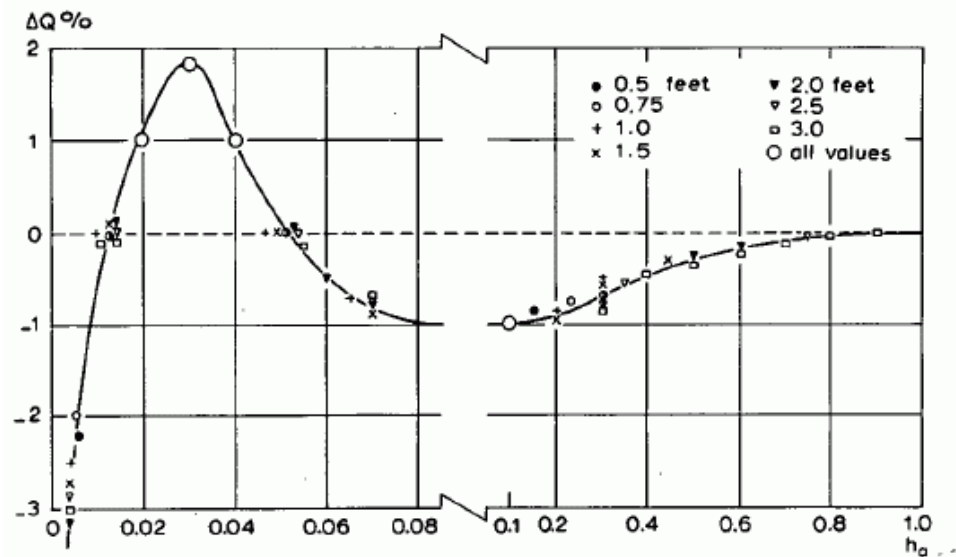
จากการทดลองพบว่า การไหลแบบ Submerged flow จะส่งผลทำให้การตรวจวัดมีความผิดพลาด กล่าวคือ Submergence ratio: h_b/h_a (เมื่อ h_b คือความลึกของน้ำด้านท้ายน้ำ และ h_a คือความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำ ที่วัดจากพื้นราง) จะมีอิทธิพลต่อการทำให้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า h_a เพิ่มขึ้น โดยกราฟในรูปที่ 14-25 แสดงอิทธิพลของ Submergence ratio: h_b/h_a ที่มีผลต่อการเพิ่มของความลึกของน้ำ h_a (%) กราฟ a กรณี HS และ H Flume กราฟ b กรณี HL Flume

H-Flume นั้นเหมาะกับการตรวจวัดในกรณี Free flow ทั้งนี้ยอมให้มีลักษณะการไหลเป็นแบบ Submerged flow ได้ไม่มากนัก ให้ค่าความผิดพลาดจากอิทธิพลของ Submerged flow นั้นไม่เกิน 1 % โดยค่า Submergence ratio: h_b/h_a ไม่เกิน 0.25 สำหรับ HS และ H Flume และค่า Submergence ratio: h_b/h_a ไม่เกิน 0.30 สำหรับ HL-Flume



รูปที่ 14-25 กราฟแสดงอิทธิพลจาก Submergence ratio: h_b/h_a ที่มีผลต่อการเพิ่มของความลึกของน้ำ h_a (%) การปรับลาดพื้นของ H-Flume

ในกรณีที่สิ่งกีดขวางที่ไหลปนมากับน้ำและมีโอกาสที่จะตกจมในตัวรางได้มาก เช่น หิน กรวด ทราย ฯลฯ ซึ่งหากมีการตกจมก็จะทำให้การวัดค่าความลึกของน้ำผิดพลาด กรณีนี้ยอมให้แก้ปัญหาโดยการติดตั้งให้พื้นรางมีความลาด 1 : 8 ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีที่พื้นรางวางแนวราบ โดยกราฟในรูปที่ 14-26 จะแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกรณี Free flow ที่มีการเปลี่ยนแปลง (ΔQ %) เมื่อเทียบกับค่า h_a ของน้ำ (หน่วย ฟุต)

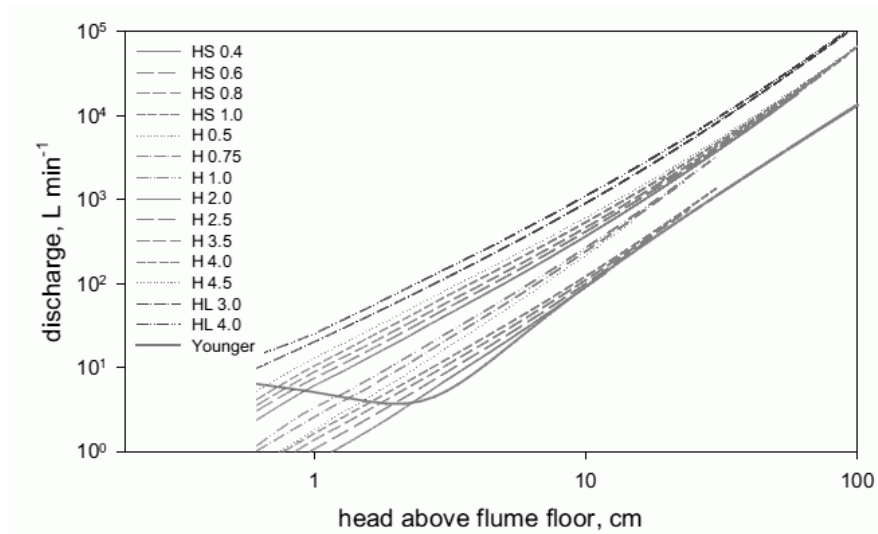


รูปที่ 14-26 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลกรณี Free flow (ΔQ %)

เทียบกับค่า h_a ของน้ำ (หน่วย ฟุต) เมื่อพื้นรางติดตั้งให้มีความลาดเอียง

14.7.2 อัตราการไหลของน้ำผ่าน H-Flume

นอกจากรูปแบบมิติของ H-Flume ทุกแบบทุกขนาดจะมีการกำหนดไว้แน่นอนตายตัวแล้ว อัตราการไหลผ่าน H-Flume ในกรณี Free flow ที่จะสัมพันธ์กับความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำที่วัดจากตำแหน่งที่กำหนดนั้น จะได้มาจากการทดลองหรือการสอบเทียบ แล้วทำเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 14-5 ถึง ตารางที่ 14-18 หรือนำมาสร้างเป็นกราฟ H-Q ที่พล็อตใน Log scale คล้ายที่แสดงในรูปที่ 14-27



รูปที่ 14-27 ตัวอย่างกราฟแสดงอัตราการไหลผ่าน H-Flume ชนิดและขนาดต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำ (h_a)

จากเส้นกราฟ H-Q สามารถสรุปในรูปสมการได้เป็น

$$\log Q = A + B \log h_a + C(\log h_a)^2$$

ค่า A, B และ C แสดงใน ตารางที่ 14-4

ตารางที่ 14-4 แสดงรายละเอียดค่าตัวแปรเพื่อใช้คำนวณอัตราการไหลของ H-Flume แบบต่างๆ

Flume type	Flume depth D		Maximum capacity $m^3/s \times 10^{-3}$	Number in Equation 7-6		
	ft	m		A	B	C
HS	0.4	.122	2.27	-0.4361	+2.5151	+0.1379
HS	0.6	.183	6.14	-0.4430	+2.4908	+0.1657
HS	0.8	.244	12.7	-0.4410	+2.4571	+0.1762
HS	1.0	.305	22.3	-0.4382	+2.4193	+0.1790
H	0.5	.152	9.17	+0.0372	+2.6629	+0.1954
H	0.75	.229	26.9	+0.0351	+2.6434	+0.2243
H	1.0	.305	53.5	+0.0206	+2.5902	+0.2281
H	1.5	.457	150	+0.0238	+2.5473	+0.2540
H	2.0	.610	309	+0.0237	+2.4918	+0.2605
H	2.5	.762	542	+0.0268	+2.4402	+0.2600
H	3.0	.914	857	+0.0329	+2.3977	+0.2588
H	4.5	1.37	2366	+0.0588	+2.3032	+0.2547
HL	3.5	1.07	2370	+0.3081	+2.3935	+0.2911
HL	4.0	1.22	3298	+0.3160	+2.3466	+0.2794

ตารางที่ 14-5 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HS-Flume ขนาด 0.4 ฟุต หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
0.01	0.012	0.015	0.017	0.020	0.024	0.027	0.031	0.035	0.039	0.044
0.02	0.049	0.054	0.059	0.065	0.071	0.077	0.084	0.091	0.098	0.105
0.03	0.113	0.121	0.130	0.138	0.147	0.156	0.166	0.176	0.186	0.197
0.04	0.208	0.219	0.230	0.242	0.255	0.267	0.280	0.293	0.307	0.321
0.05	0.335	0.350	0.365	0.380	0.396	0.412	0.428	0.445	0.462	0.480
0.06	0.497	0.516	0.534	0.553	0.573	0.592	0.612	0.633	0.654	0.675
0.07	0.697	0.719	0.741	0.764	0.787	0.811	0.835	0.860	0.884	0.910
0.08	0.935	0.961	0.988	1.01	1.04	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19
0.09	1.21	1.25	1.28	1.31	1.34	1.37	1.40	1.44	1.47	1.50
0.10	1.54	1.57	1.61	1.64	1.68	1.71	1.75	1.79	1.83	1.87
0.11	1.90	1.94	1.98	2.02	2.06	2.10	2.15	2.19	2.23	2.27

หมายเหตุ : ตัวเลขแถวบนสุด .000 .001 .002 เป็นค่าทศนิยมตัวที่ 3 ของ h_a

ตัวอย่าง Q ที่ h_a เท่ากับ 0.025 มีค่า 0.077 ลิตร/วินาที (ค่าที่ตำแหน่ง 0.02 ตัดกับ .005)

ตารางที่ 14-6 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HS-Flume ขนาด 0.6 ฟุต หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
0.02	0.064	0.070	0.076	0.083	0.091	0.098	0.106	0.114	0.123	0.131
0.03	0.141	0.150	0.160	0.170	0.181	0.191	0.202	0.214	0.226	0.238
0.04	0.251	0.263	0.277	0.290	0.304	0.318	0.333	0.348	0.363	0.379
0.05	0.395	0.412	0.429	0.446	0.463	0.481	0.500	0.518	0.537	0.557
0.06	0.577	0.597	0.618	0.639	0.660	0.682	0.704	0.727	0.750	0.773
0.07	0.797	0.821	0.846	0.871	0.896	0.922	0.948	0.975	1.00	1.03
0.08	1.06	1.09	1.11	1.14	1.17	1.20	1.23	1.26	1.30	1.33
0.09	1.36	1.39	1.43	1.46	1.49	1.53	1.56	1.60	1.63	1.67
0.10	1.71	1.74	1.78	1.82	1.86	1.90	1.93	1.97	2.01	2.06
0.11	2.10	2.14	2.18	2.22	2.27	2.31	2.35	2.40	2.44	2.49
0.12	2.53	2.58	2.63	2.68	2.72	2.77	2.82	2.87	2.92	2.97
0.13	3.02	3.07	3.12	3.18	3.23	3.28	3.34	3.39	3.45	3.50
0.14	3.56	3.61	3.67	3.73	3.78	3.84	3.90	3.96	4.02	4.08
0.15	4.14	4.20	4.27	4.33	4.39	4.46	4.52	4.58	4.65	4.72
0.16	4.78	4.85	4.92	4.98	5.05	5.12	5.19	5.26	5.33	5.40
0.17	5.47	5.55	5.62	5.69	5.77	5.84	5.92	5.99	6.07	6.14

ตารางที่ 14-7 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HS-Flume ขนาด 0.8 ฟุต หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
0.03						0.227	0.239	0.252	0.266	0.280
0.04	0.294	0.308	0.324	0.339	0.355	0.371	0.388	0.404	0.422	0.440
0.05	0.458	0.476	0.495	0.514	0.534	0.554	0.574	0.595	0.617	0.638
0.06	0.660	0.683	0.706	0.729	0.753	0.777	0.802	0.827	0.852	0.878
0.07	0.904	0.931	0.958	0.986	1.01	1.04	1.07	1.10	1.13	1.16
0.08	1.19	1.22	1.25	1.29	1.32	1.35	1.38	1.42	1.45	1.49
0.09	1.52	1.56	1.59	1.63	1.67	1.70	1.74	1.78	1.82	1.86
0.10	1.90	1.94	1.98	2.02	2.06	2.10	2.15	2.19	2.23	2.28
0.11	2.32	2.37	2.41	2.46	2.50	2.55	2.60	2.65	2.69	2.74
0.12	2.79	2.84	2.89	2.94	2.99	3.05	3.10	3.15	3.20	3.26
0.13	3.31	3.37	3.42	3.48	3.54	3.59	3.65	3.71	3.77	3.83
0.14	3.89	3.95	4.01	4.07	4.13	4.19	4.25	4.32	4.38	4.45
0.15	4.51	4.58	4.64	4.71	4.77	4.84	4.91	4.98	5.05	5.12
0.16	5.19	5.26	5.33	5.40	5.48	5.55	5.62	5.70	5.77	5.85
0.17	5.92	6.00	6.08	6.15	6.23	6.31	6.39	6.47	6.55	6.63
0.18	6.71	6.79	6.88	6.96	7.04	7.13	7.21	7.30	7.39	7.47
0.19	7.56	7.65	7.74	7.82	7.91	8.00	8.10	8.19	8.28	8.37
0.20	8.47	8.56	8.65	8.75	8.84	8.94	9.04	9.14	9.23	9.33
0.21	9.43	9.53	9.63	9.73	9.83	9.94	10.0	10.1	10.2	10.4
0.22	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4
0.23	11.5	11.7	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.5	12.6
0.24	12.7									

ตารางที่ 14-8 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HS-Flume ขนาด 1.0 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
0.04	0.339	0.355	0.372	0.389	0.407	0.425	0.443	0.462	0.482	0.501
0.05	0.521	0.542	0.563	0.584	0.606	0.629	0.651	0.674	0.698	0.722
0.06	0.746	0.771	0.797	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.986
0.07	1.02	1.04	1.07	1.10	1.14	1.17	1.20	1.23	1.26	1.30
0.08	1.33	1.36	1.40	1.43	1.47	1.50	1.54	1.58	1.61	1.65
0.09	1.69	1.73	1.77	1.81	1.85	1.89	1.93	1.97	2.01	2.05
0.10	2.10	2.14	2.18	2.23	2.27	2.32	2.36	2.41	2.46	2.51
0.11	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85	2.90	2.96	3.01
0.12	3.06	3.11	3.17	3.22	3.28	3.33	3.39	3.45	3.50	3.56
0.13	3.62	3.68	3.74	3.80	3.86	3.92	3.98	4.04	4.11	4.17
0.14	4.23	4.30	4.36	4.43	4.49	4.56	4.63	4.69	4.76	4.83
0.15	4.90	4.97	5.04	5.11	5.18	5.25	5.32	5.40	5.47	5.54
0.16	5.62	5.69	5.77	5.85	5.92	6.00	6.08	6.16	6.24	6.32
0.17	6.40	6.48	6.56	6.64	6.73	6.81	6.89	6.98	7.06	7.15
0.18	7.23	7.32	7.41	7.50	7.58	7.67	7.76	7.85	7.94	8.04
0.19	8.13	8.22	8.31	8.41	8.50	8.60	8.69	8.79	8.89	8.98
0.20	9.08	9.18	9.28	9.38	9.48	9.58	9.69	9.79	9.89	9.99
0.21	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	11.0	11.1
0.22	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.9	12.0	12.1	12.2
0.23	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.2	13.3	13.4
0.24	13.5	13.6	13.8	13.9	14.0	14.2	14.3	14.4	14.5	14.7
0.25	14.8	14.9	15.1	15.2	15.3	15.5	15.6	15.7	15.9	16.0
0.26	16.1	16.3	16.4	16.5	16.7	16.8	17.0	17.1	17.3	17.4
0.27	17.5	17.7	17.8	18.0	18.1	18.3	18.4	18.6	18.7	18.9
0.28	19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.8	19.9	20.1	20.2	20.4
0.29	20.6	20.7	20.9	21.0	21.2	21.4	21.5	21.7	21.8	22.0
0.30	22.2	22.3								

ตารางที่ 14-9 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 0.5 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.01	0.031	0.044	0.059	0.077	0.097
0.02	0.119	0.145	0.172	0.203	0.236
0.03	0.272	0.311	0.353	0.398	0.446
0.04	0.497	0.551	0.609	0.669	0.733
0.05	0.801	0.871	0.946	1.02	1.10
0.06	1.19	1.28	1.37	1.47	1.57
0.07	1.67	1.78	1.89	2.00	2.12
0.08	2.25	2.37	2.51	2.64	2.78
0.09	2.93	3.07	3.23	3.38	3.55
0.10	3.71	3.88	4.06	4.24	4.42
0.11	4.61	4.81	5.01	5.21	5.42
0.12	5.63	5.85	6.08	6.31	6.54
0.13	6.78	7.02	7.27	7.53	7.79
0.14	8.05	8.32	8.60	8.88	9.17

ตารางที่ 14-10 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 0.75 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.01	0.044	0.061	0.080	0.103	0.128
0.02	0.155	0.186	0.220	0.256	0.296
0.03	0.339	0.384	0.433	0.486	0.541
0.04	0.600	0.662	0.728	0.797	0.869
0.05	0.945	1.03	1.11	1.20	1.29
0.06	1.38	1.48	1.58	1.69	1.80
0.07	1.91	2.03	2.15	2.28	2.41
0.08	2.54	2.68	2.83	2.97	3.13
0.09	3.28	3.44	3.61	3.78	3.95
0.10	4.13	4.31	4.50	4.70	4.89
0.11	5.10	5.30	5.52	5.73	5.96
0.12	6.18	6.42	6.65	6.90	7.14
0.13	7.40	7.65	7.92	8.19	8.46
0.14	8.74	9.03	9.32	9.61	9.91
0.15	10.2	10.5	10.9	11.2	11.5
0.16	11.8	12.2	12.5	12.9	13.2
0.17	13.6	14.0	14.4	14.7	15.1
0.18	15.5	15.9	16.3	16.7	17.2
0.19	17.6	18.0	18.5	18.9	19.4
0.20	19.8	20.3	20.8	21.2	21.7
0.21	22.2	22.7	23.2	23.7	24.2
0.22	24.8	25.3	25.8	26.4	26.9

ตารางที่ 14-11 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 1.0 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.00						0.15	11.0	11.3	11.7	12.0	12.3
0.01				0.127	0.157	0.16	12.7	13.1	13.4	13.8	14.2
0.02	0.190	0.226	0.265	0.308	0.236	0.17	14.5	14.9	15.3	15.7	16.1
0.03	0.403	0.455	0.511	0.571	0.634	0.18	16.5	16.9	17.4	17.8	18.2
0.04	0.701	0.771	0.845	0.922	1.00	0.19	18.7	19.1	19.6	20.0	20.5
0.05	1.09	1.18	1.27	1.37	1.47	0.20	21.0	21.4	21.9	22.4	22.9
0.06	1.57	1.68	1.79	1.91	2.03	0.21	23.4	23.9	24.5	25.0	25.5
0.07	2.16	2.28	2.42	2.56	2.70	0.22	26.1	26.6	27.2	27.7	28.3
0.08	2.84	2.99	3.15	3.31	3.47	0.23	28.9	29.4	30.0	30.6	31.2
0.09	3.64	3.82	3.99	4.18	4.36	0.24	31.8	32.4	33.1	33.7	34.2
0.10	4.56	4.75	4.95	5.16	5.37	0.25	35.0	35.6	36.3	37.0	37.6
0.11	5.59	5.81	6.04	6.27	6.50	0.26	38.3	39.0	39.7	40.4	41.1
0.12	6.74	6.99	7.24	7.50	7.76	0.27	41.8	42.6	43.3	44.0	44.8
0.13	8.03	8.30	8.58	8.86	9.15	0.28	45.5	46.3	47.1	47.9	48.6
0.14	9.45	9.75	10.1	10.4	10.7	0.29	49.4	50.2	51.0	51.9	52.7
						0.30	53.5				

ตารางที่ 14-12 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 1.5 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.00						0.25	38.2	38.9	39.6	40.3	41.0
0.01						0.26	41.7	42.5	43.2	43.9	44.7
0.02	0.269	0.316	0.367	0.421	0.479	0.27	45.4	46.2	47.0	47.8	48.5
0.03	0.542	0.608	0.677	0.751	0.829	0.28	49.3	50.1	51.0	51.8	52.6
0.04	0.910	0.996	1.09	1.18	1.28	0.29	53.4	54.3	55.1	56.0	56.8
0.05	1.38	1.49	1.60	1.71	1.83	0.30	57.7	58.6	59.5	60.4	61.3
0.06	1.75	2.08	2.21	2.35	2.49	0.31	62.2	63.1	64.1	65.0	66.0
0.07	2.64	2.78	2.94	3.10	3.26	0.32	66.9	67.9	68.8	69.8	70.8
0.08	3.43	3.60	3.78	3.96	4.15	0.33	71.8	72.8	73.8	74.9	75.9
0.09	4.34	4.54	4.74	4.95	5.16	0.34	76.9	78.0	79.0	80.1	81.2
0.10	5.38	5.60	5.83	6.06	6.29	0.35	82.3	83.4	84.5	85.6	86.7
0.11	6.54	6.78	7.04	7.30	7.56	0.36	87.8	89.0	90.1	91.3	92.4
0.12	7.83	8.10	8.38	8.67	8.96	0.37	93.6	94.8	96.0	97.2	98.4
0.13	9.25	9.55	9.86	10.2	10.5	0.38	99.6	101	102	103	105
0.14	10.8	11.1	11.5	11.8	12.2	0.39	106	107	108	110	111
0.15	12.5	12.9	13.2	13.6	14.0	0.40	112	114	115	116	118
0.16	14.4	14.8	15.1	15.5	16.0	0.41	119	120	122	123	125
0.17	16.4	16.8	17.2	17.6	18.1	0.42	126	127	129	130	132
0.18	18.5	19.0	19.4	19.9	20.4	0.43	133	135	136	138	139
0.19	20.8	21.3	21.8	22.3	22.8	0.44	141	142	144	145	147
0.20	23.3	23.8	24.3	24.9	25.4	0.45	148	150			
0.21	25.9	26.5	27.0	27.6	28.2						
0.22	28.7	29.3	29.9	30.5	31.1						
0.23	31.7	32.3	33.0	33.6	34.2						
0.24	34.9	35.5	36.2	36.9	37.5						

ตารางที่ 14-13 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 2.0 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.00						0.30	61.9	62.9	63.8	64.7	65.6
0.01						0.31	66.6	67.6	68.6	69.5	70.4
0.02			0.469	0.535	0.606	0.32	71.5	72.5	73.5	74.6	75.6
0.03	0.681	0.760	0.844	0.932	1.02	0.33	76.6	77.7	78.7	79.7	80.7
0.04	1.12	1.22	1.33	1.44	1.55	0.34	81.9	83.0	84.1	85.2	86.2
0.05	1.67	1.79	1.92	2.05	2.19	0.35	87.5	88.6	89.7	90.9	92.1
0.06	2.33	2.48	2.63	2.79	2.95	0.36	93.2	94.4	95.6	96.7	97.9
0.07	3.11	3.29	3.46	3.64	3.83	0.37	99.2	100	102	103	104
0.08	4.02	4.21	4.41	4.62	4.83	0.38	105	107	108	109	110
0.09	5.04	5.27	5.49	5.72	5.96	0.39	112	113	114	116	117
0.10	6.20	6.45	6.70	6.96	7.22	0.40	118	120	121	123	124
0.11	7.49	7.76	8.04	8.33	8.62	0.41	125	127	128	130	131
0.12	8.91	9.22	9.52	9.84	10.2	0.42	132	134	135	137	138
0.13	10.5	10.8	11.1	11.5	11.8	0.43	140	141	143	144	146
0.14	12.2	12.5	12.9	13.3	13.7	0.44	147	148	150	152	154
0.15	14.0	14.4	14.8	15.2	15.6	0.45	155	157	158	160	162
0.16	16.1	16.5	16.9	17.3	17.8	0.46	163	165	167	168	170
0.17	18.2	18.7	19.1	19.6	20.1	0.47	172	173	175	177	179
0.18	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	0.48	180	182	184	186	187
0.19	23.0	23.5	24.1	24.6	25.1	0.49	189	191	193	195	196
0.20	25.7	26.2	26.8	27.3	27.9	0.50	198	200	202	204	206
0.21	28.5	29.1	29.7	30.2	30.9	0.51	208	210	211	213	215
0.22	31.5	32.1	32.7	33.3	34.0	0.52	217	219	221	223	225
0.23	34.6	35.3	35.9	36.6	37.3	0.53	227	229	231	233	235
0.24	38.0	38.7	39.4	40.1	40.8	0.54	237	240	242	244	246
0.25	41.5	42.2	42.9	43.7	44.4	0.55	248	250	252	254	256
0.26	45.2	46.0	46.7	47.5	48.3	0.56	259	261	263	265	267
0.27	49.1	50.0	50.7	51.5	52.3	0.57	270	272	274	276	279
0.28	53.2	54.0	54.9	55.7	56.6	0.58	281	283	286	288	290
0.29	57.5	58.3	59.2	60.1	61.0	0.59	293	295	297	300	302
						0.60	305	307	309		

ตารางที่ 14-14 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 2.5 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.00						0.40	125	126	128	129	131
0.01						0.41	132	134	135	136	138
0.02				0.649	0.732	0.42	139	141	142	144	145
0.03	0.820	0.912	1.01	1.11	1.22	0.43	147	149	150	152	153
0.04	1.33	1.45	1.57	1.69	1.82	0.44	155	156	158	160	161
0.05	1.96	2.10	2.25	2.40	2.55	0.45	163	165	166	168	169
0.06	2.71	2.88	3.05	3.23	3.41	0.46	171	173	175	176	178
0.07	3.59	3.78	3.98	4.18	4.39	0.47	180	181	183	185	187
0.08	4.60	4.82	5.04	5.27	5.51	0.48	189	190	192	194	196
0.09	5.75	5.99	6.24	6.50	6.76	0.49	198	199	201	203	205
0.10	7.02	7.30	7.58	7.86	8.15	0.50	207	209	211	213	215
0.11	8.44	8.75	9.05	9.36	9.68	0.51	216	218	220	222	224
0.12	10.0	10.3	10.7	11.0	11.4	0.52	226	228	230	232	234
0.13	11.7	12.1	12.4	12.8	13.2	0.53	236	239	241	243	245
0.14	13.6	14.0	14.4	14.8	15.2	0.54	247	249	251	253	255
0.15	15.6	16.0	16.4	16.9	17.3	0.55	257	260	262	264	266
0.16	17.6	18.2	18.7	19.1	19.6	0.56	268	271	273	275	277
0.17	20.1	20.6	21.1	21.6	22.1	0.57	280	282	284	286	289
0.18	22.6	23.1	23.6	24.2	24.7	0.58	291	293	296	298	301
0.19	25.2	25.8	26.4	26.9	27.5	0.59	303	305	308	310	313
0.20	28.1	28.7	29.2	29.8	30.5	0.60	315	317	320	322	325
0.21	31.1	31.7	32.3	33.0	33.6	0.61	327	330	332	335	337
0.22	34.2	34.9	35.6	36.2	36.9	0.62	340	343	345	348	350
0.23	37.6	38.4	39.0	39.7	40.4	0.63	353	355	358	361	363
0.24	41.1	41.9	42.6	43.4	44.1	0.64	366	369	371	374	377
0.25	44.9	45.6	46.4	47.2	48.0	0.65	380	382	385	388	391
0.26	48.8	49.6	50.4	51.2	52.0	0.66	393	396	399	402	405
0.27	52.9	53.7	54.6	55.4	56.3	0.67	408	410	413	416	419
0.28	57.2	58.1	59.0	59.9	60.8	0.68	422	425	428	431	434
0.29	61.7	62.7	63.5	64.5	65.4	0.69	437	440	443	446	449
0.30	66.4	67.3	68.3	69.3	70.3	0.70	452	455	458	461	464
0.31	71.3	72.3	73.3	74.3	75.3	0.71	467	470	474	477	480
0.32	76.4	77.4	78.5	79.5	80.6	0.72	483	486	489	493	496
0.33	81.7	82.8	83.9	85.0	86.1	0.73	499	502	506	509	512
0.34	87.2	88.3	89.5	90.6	91.8	0.74	515	519	522	525	529
						0.75	532	535	539	542	
0.35	93.0	94.1	95.3	96.5	97.7						
0.36	98.9	100	101	102	104						
0.37	105	106	108	109	110						
0.38	112	113	114	115	117						
0.39	118	119	121	122	124						

ตารางที่ 14-15 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 3.0 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.00						0.50	216	218	220	222	224
0.01						0.51	226	228	230	232	234
0.03	0.959	1.06	1.18	1.29	1.41	0.53	246	248	251	253	255
0.04	1.54	1.67	1.81	1.95	2.09	0.54	257	259	261	263	266
0.05	2.25	2.40	2.57	2.74	2.91	0.55	268	270	272	274	277
0.06	3.09	3.27	3.46	3.66	3.86	0.56	279	281	283	286	288
0.07	4.06	4.28	4.49	4.72	4.95	0.57	290	293	295	297	300
0.08	5.18	5.42	5.66	5.92	6.17	0.58	302	304	307	309	312
0.09	6.43	6.70	6.98	7.26	7.54	0.59	314	317	319	321	324
0.10	7.83	8.13	8.44	8.75	9.06	0.60	326	329	331	334	336
0.11	9.38	9.71	10.0	10.4	10.7	0.61	339	341	344	347	349
0.12	11.1	11.4	11.8	12.2	12.5	0.62	352	354	357	360	362
0.13	12.9	13.3	13.7	14.1	14.5	0.63	365	368	370	373	376
0.14	14.9	15.4	15.8	16.2	16.7	0.64	378	381	384	387	389
0.15	17.1	17.6	18.0	18.5	19.0	0.65	392	395	398	400	403
0.16	19.4	19.9	20.4	20.9	21.4	0.66	406	409	412	415	418
0.17	21.9	22.4	23.0	23.5	24.0	0.67	420	423	426	429	432
0.18	24.6	25.1	25.7	26.3	26.8	0.68	435	438	441	444	447
0.19	27.4	28.0	28.6	29.2	29.8	0.69	450	453	456	459	462
0.20	30.4	31.1	31.7	32.3	33.0	0.70	465	468	471	475	478
0.21	33.6	34.3	35.0	35.6	36.3	0.71	481	484	487	490	494
0.22	37.0	37.7	38.4	39.1	39.8	0.72	497	500	503	506	510
0.23	40.5	41.3	42.0	42.8	43.5	0.73	513	516	519	523	526
0.24	44.3	45.1	45.8	46.6	47.4	0.74	529	533	536	539	543
0.25	48.2	49.0	49.8	50.7	51.5	0.75	546	550	553	556	560
0.26	52.3	53.2	54.0	54.9	55.8	0.76	563	567	570	574	577
0.27	56.6	57.5	58.4	59.3	60.2	0.77	581	584	588	592	595
0.28	61.2	62.1	63.0	64.0	64.9	0.78	599	602	606	610	613
0.29	65.9	66.8	67.8	68.8	69.8	0.79	617	620	624	628	632
0.30	70.8	71.8	72.8	73.8	74.9	0.80	635	639	643	647	650
0.31	75.9	77.8	78.0	79.1	80.2	0.81	654	658	662	666	669
0.32	81.2	82.3	83.4	84.5	85.7	0.82	673	677	681	685	689
0.33	86.8	87.9	89.1	90.2	91.4	0.83	693	697	701	705	709
0.34	92.5	93.7	94.9	96.1	97.3	0.84	713	717	721	725	729
0.35	98.5	99.7	101	102	103	0.85	733	737	741	745	749
0.36	105	106	107	109	110	0.86	753	757	762	766	770
0.37	111	112	114	115	116	0.87	774	778	783	787	791
0.38	118	119	120	122	123	0.88	795	800	804	808	813
0.39	125	126	127	129	130	0.89	817	821	826	830	835
0.40	132	133	135	136	138	0.90	839	843	848	852	857
0.41	139	141	142	144	145						
0.42	147	148	150	151	153						
0.43	154	156	158	159	161						
0.44	163	164	166	167	169						
0.45	171	173	174	176	178						
0.46	179	181	183	185	186						
0.47	188	190	192	194	195						
0.48	197	199	201	203	205						
0.49	207	208	210	212	214						

ตารางที่ 14-16 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 4.5 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.00						0.40	152	154	155	157	159
0.01						0.41	160	162	164	165	167
0.02						0.42	169	170	172	174	176
0.03	1.39	1.53	1.68	1.84	2.00	0.43	177	179	181	183	184
0.04	2.17	2.35	2.53	2.72	2.91	0.44	186	188	190	192	193
0.05	3.12	3.32	3.53	3.76	3.98	0.45	195	197	199	201	203
0.06	4.22	4.46	4.70	4.95	5.21	0.46	205	207	208	210	212
0.07	5.48	5.75	6.02	6.31	6.60	0.47	214	216	218	220	222
0.08	6.90	7.20	7.52	7.83	8.16	0.48	224	226	228	230	232
0.09	8.49	8.82	9.17	9.52	9.88	0.49	234	236	238	240	243
0.10	10.2	10.6	11.0	11.4	11.8	0.50	245	247	249	251	253
0.11	12.2	12.6	13.0	13.4	13.8	0.51	255	257	260	262	264
0.12	14.3	14.7	15.1	15.6	16.1	0.52	266	268	271	273	275
0.13	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	0.53	277	280	282	284	287
0.14	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	0.54	289	291	294	296	298
0.15	21.6	22.1	22.7	23.2	23.8	0.55	301	303	305	308	310
0.16	24.4	25.0	25.6	26.2	26.8	0.56	313	315	317	320	322
0.17	27.4	28.0	28.6	29.2	30.0	0.57	325	327	330	332	335
0.18	30.5	31.2	31.9	32.5	33.2	0.58	337	340	343	345	348
0.19	33.9	34.6	35.3	36.0	36.7	0.59	350	353	355	358	361
0.20	37.4	38.2	38.9	39.7	40.4	0.60	363	366	369	371	375
0.21	41.2	42.0	42.7	43.5	44.3	0.61	377	380	382	385	388
0.22	45.1	45.9	46.8	47.6	48.4	0.62	390	393	396	399	402
0.23	49.3	50.1	51.0	51.8	52.7	0.63	405	407	410	413	416
0.24	53.6	54.5	55.4	56.3	57.2	0.64	419	422	425	427	430
0.25	58.1	59.1	60.0	61.0	61.9	0.65	433	436	439	442	445
0.26	62.9	63.9	64.8	65.8	66.8	0.66	448	451	454	457	460
0.27	67.8	68.9	69.9	70.9	72.0	0.67	463	466	470	473	476
0.28	73.0	74.1	75.1	76.2	77.3	0.68	479	482	485	488	491
0.29	78.4	79.5	80.6	81.7	82.8	0.69	495	498	501	504	507
0.30	84.0	85.1	86.3	87.4	88.6	0.70	511	514	517	520	524
0.31	89.8	91.0	92.2	93.4	94.6	0.71	527	530	534	537	540
0.32	95.8	97.0	98.3	99.5	101	0.72	544	547	551	554	557
0.33	102	103	105	106	107	0.73	561	564	568	571	575
0.34	109	110	111	113	114	0.74	578	582	585	589	592
0.35	115	117	118	119	121						
0.36	122	124	125	126	128						
0.37	129	131	132	134	135						
0.38	137	138	140	141	143						
0.39	144	146	148	149	151						

ตารางที่ 14-16 (ต่อ) ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน H-Flume ขนาด 4.5 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008	h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.75	596	599	603	606	610	1.05	1281	1287	1292	1299	1304
0.76	614	617	621	625	628	1.06	1310	1316	1321	1327	1333
0.77	632	636	639	643	647	1.07	1339	1345	1350	1356	1362
0.78	650	654	658	662	666	1.08	1368	1374	1380	1386	1392
0.79	669	673	677	681	685	1.09	1398	1403	1409	1415	1421
0.80	689	693	696	700	704	1.10	1427	1434	1440	1446	1452
0.81	708	712	716	720	724	1.11	1458	1464	1470	1476	1482
0.82	728	732	736	740	744	1.12	1489	1495	1501	1507	1513
0.83	748	752	757	761	765	1.13	1520	1526	1532	1539	1545
0.84	769	773	777	781	786	1.14	1551	1558	1564	1570	1577
0.85	790	794	798	802	807	1.15	1583	1590	1596	1603	1609
0.86	811	815	820	824	828	1.16	1616	1622	1629	1635	1642
0.87	833	837	841	846	850	1.17	1648	1655	1661	1668	1675
0.88	855	859	863	868	872	1.18	1681	1688	1695	1701	1708
0.89	877	881	886	890	894	1.19	1715	1722	1728	1735	1742
0.90	899	904	909	913	918	1.20	1749	1756	1763	1769	1776
0.91	922	927	932	936	941	1.21	1783	1790	1797	1804	1811
0.92	946	950	955	960	965	1.22	1818	1825	1832	1839	1846
0.93	969	974	979	984	988	1.23	1853	1860	1867	1875	1882
0.94	993	998	1003	1008	1013	1.24	1889	1896	1903	1910	1918
0.95	1018	1023	1028	1032	1037	1.25	1925	1932	1939	1947	1954
0.96	1042	1047	1052	1057	1062	1.26	1961	1969	1976	1983	1991
0.97	1068	1073	1078	1083	1088	1.27	1998	2006	2013	2020	2028
0.98	1093	1098	1103	1108	1114	1.28	2035	2043	2050	2058	2066
0.99	1119	1124	1129	1134	1140	1.29	2073	2081	2088	2096	2104
1.00	1145	1150	1156	1161	1166	1.30	2111	2119	2127	2134	2142
1.01	1172	1177	1182	1188	1193	1.31	2150	2158	2165	2173	2181
1.02	1198	1204	1209	1215	1220	1.32	2189	2197	2205	2212	2220
1.03	1226	1231	1237	1242	1248	1.33	2228	2236	2244	2252	2260
1.04	1253	1259	1265	1270	1276	1.34	2268	2276	2284	2292	2300
						1.35	2308	2317	2325	2333	2341
						1.36	2349	2357	2366		

ตารางที่ 14-17 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HL-Flume ขนาด 4.5 ฟุต, หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.05	4.86	5.19	5.52	5.86	6.22
0.06	6.58	6.95	7.34	7.73	8.14
0.07	8.55	8.98	9.41	9.86	10.32
0.08	10.79	11.27	11.75	12.25	12.77
0.09	13.29	13.82	14.36	14.92	15.48
0.10	16.06	16.65	17.24	17.85	18.47
0.11	19.11	19.75	20.40	21.07	21.75
0.12	22.44	23.14	23.85	24.57	25.31
0.13	26.05	26.81	27.58	28.36	29.16
0.14	29.96	30.78	31.61	32.45	33.31
0.15	34.17	35.05	35.94	36.84	37.76
0.16	38.69	39.63	40.58	41.54	42.52
0.17	43.51	44.51	45.53	46.55	47.59
0.18	48.65	49.71	50.79	51.88	52.99
0.19	54.10	55.23	56.38	57.53	58.70
0.20	59.89	61.08	62.29	63.52	64.75
0.21	66.00	67.27	68.54	69.83	71.14
0.22	72.45	73.79	75.13	76.49	77.86
0.23	79.25	80.65	82.06	83.49	84.93
0.24	86.39	87.86	89.34	90.84	92.36
0.25	93.88	95.42	96.98	98.55	100.14
0.26	101.73	103.35	104.98	106.62	108.28
0.27	109.95	111.64	113.34	115.06	116.79
0.28	118.53	120.30	122.07	123.86	125.67
0.29	127.49	129.33	131.18	133.05	134.93
0.30	136.83	138.74	140.67	142.61	144.57
0.31	146.55	148.54	150.55	152.57	154.61
0.32	156.66	158.73	160.82	162.92	165.03
0.33	167.17	169.32	171.48	173.66	175.86
0.34	178.07	180.30	182.55	184.81	187.09
0.35	189.38	191.69	194.02	196.36	198.73
0.36	201.10	203.50	205.91	208.33	210.78
0.37	213.24	215.72	218.21	220.72	223.25
0.38	225.80	228.36	230.94	233.53	236.15
0.39	238.78	241.43	244.09	246.77	249.47
0.40	252.19	254.92	257.68	260.45	263.23
0.41	266.04	268.86	271.70	274.56	277.43
0.42	280.33	283.24	286.17	289.12	292.08
0.43	295.06	298.06	301.08	304.12	307.18
0.44	310.25	313.34	316.45	319.58	322.73
0.45	325.89	329.07	332.28	335.50	338.74
0.46	341.99	345.27	348.57	351.88	355.21
0.47	358.56	361.93	365.32	368.73	372.16
0.48	375.60	379.07	382.35	386.05	389.58
0.49	393.12	396.68	400.26	403.86	407.48
0.50	411.12	414.77	418.45	422.15	425.86
0.51	429.60	433.35	437.13	440.92	444.74
0.52	448.57	452.43	456.30	460.19	464.11
0.53	468.04	472.00	475.97	479.96	483.98
0.54	488.01	492.07	496.14	500.24	504.35
0.55	508.49	512.65	516.82	521.02	525.24
0.56	529.48	533.74	538.02	542.32	546.64
0.57	550.98	555.34	559.73	564.13	568.56
0.58	573.00	577.47	581.96	586.47	591.00
0.59	595.55	600.13	604.72	609.34	613.97

ตารางที่ 14-17 (ต่อ) ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HL-Flume ขนาด 3.5 ฟุต หน่วย ลิตร/วินาที

h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.60	618.63	623.31	628.01	632.74	637.48
0.61	642.25	647.03	651.84	656.67	661.53
0.62	666.40	671.30	676.22	681.16	686.12
0.63	691.10	696.11	701.14	706.19	711.26
0.64	716.35	721.47	726.61	731.77	736.95
0.65	742.16	747.39	752.64	757.91	763.21
0.66	768.52	773.87	779.23	784.61	790.02
0.67	795.46	800.91	806.39	811.89	817.41
0.68	822.96	828.52	834.12	839.73	845.37
0.69	851.03	856.71	862.42	868.15	873.91
0.70	879.68	885.49	891.31	897.16	903.03
0.71	908.92	914.84	920.78	926.75	932.74
0.72	938.75	944.79	950.85	956.93	963.04
0.73	969.17	975.33	981.51	987.71	993.94
0.74	1000.19	1006.47	1012.77	1019.10	1025.44
0.75	1031.82	1038.22	1044.64	1051.08	1057.56
0.76	1064.05	1070.57	1077.12	1083.69	1090.28
0.77	1096.90	1103.54	1110.21	1116.90	1123.62
0.78	1130.36	1137.13	1143.92	1150.74	1157.58
0.79	1164.45	1171.34	1178.26	1185.20	1192.17
0.80	1199.17	1206.19	1213.23	1220.30	1227.40
0.81	1234.52	1241.66	1248.83	1256.03	1263.25
0.82	1270.50	1277.78	1285.08	1292.40	1299.75
0.83	1307.13	1314.54	1321.97	1329.42	1336.90
0.84	1344.41	1351.94	1359.50	1367.09	1374.70
0.85	1382.34	1390.00	1397.69	1405.41	1413.15
0.86	1420.92	1428.72	1436.54	1444.39	1452.27
0.87	1460.17	1468.10	1476.06	1484.04	1492.05
0.88	1500.09	1508.15	1516.24	1524.36	1532.50
0.89	1540.67	1548.87	1557.10	1565.35	1573.63
0.90	1581.94	1590.27	1598.63	1607.02	1615.44
0.91	1623.88	1632.35	1640.85	1649.38	1657.93
0.92	1666.51	1675.12	1683.75	1692.42	1701.11
0.93	1709.83	1718.58	1727.35	1736.16	1744.99
0.94	1753.85	1762.73	1771.65	1780.59	1789.56
0.95	1798.56	1807.59	1816.65	1825.73	1834.85
0.96	1843.99	1853.16	1862.35	1871.58	1880.84
0.97	1890.12	1899.43	1908.77	1918.14	1927.54
0.98	1936.97	1946.42	1955.91	1965.42	1974.96
0.99	1984.53	1994.13	2003.76	2013.42	2023.11
1.00	2032.82	2042.57	2052.35	2062.15	2071.98
1.01	2081.85	2091.74	2101.66	2111.61	2121.59
1.02	2131.60	2141.64	2151.71	2161.81	2171.94
1.03	2182.10	2192.28	2202.50	2212.75	2223.03
1.04	2233.33	2243.67	2254.04	2264.44	2274.86
1.05	2285.32	2295.81	2306.33	2316.87	2327.45
1.06	2338.06	2348.70	2359.37	2370.07	

ตารางที่ 14-18 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HL-Flume ขนาด 4.0 ฟุต หน่วย ลิตร/วินาที

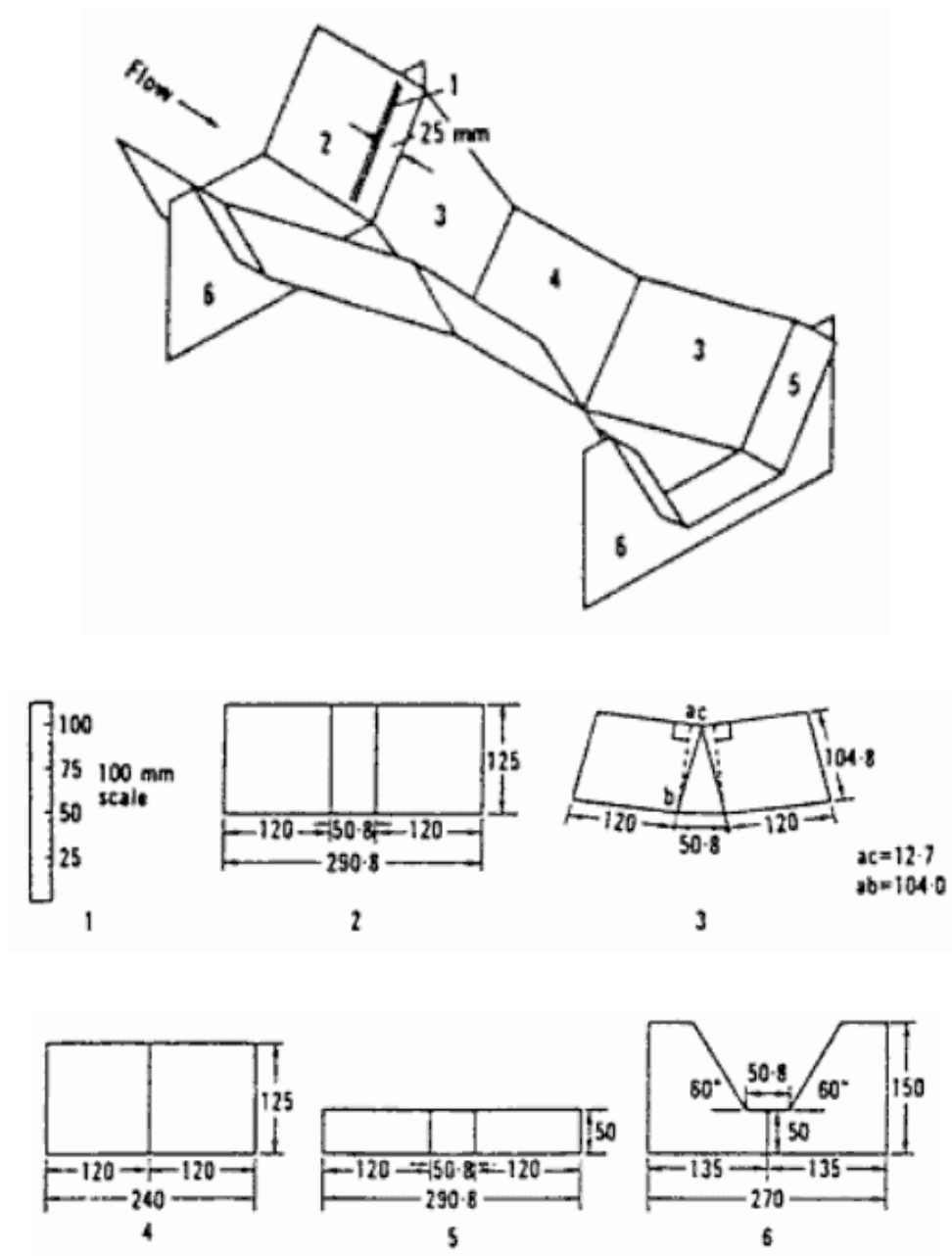
h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.05	5.38	5.73	6.10	6.48	6.86
0.06	7.26	7.67	8.09	8.52	8.96
0.07	9.41	9.88	10.35	10.84	11.34
0.08	11.84	12.36	12.90	13.44	13.99
0.09	14.56	15.13	15.72	16.32	16.93
0.10	17.55	18.19	18.84	19.49	20.16
0.11	20.84	21.54	22.24	22.96	23.69
0.12	24.43	25.18	25.95	26.73	27.51
0.13	28.32	29.13	29.96	30.79	31.65
0.14	32.51	33.38	34.27	35.17	36.09
0.15	37.01	37.95	38.90	39.86	40.84
0.16	41.83	42.83	43.85	44.88	45.92
0.17	46.97	48.04	49.12	50.21	51.32
0.18	52.44	53.57	54.72	55.88	57.05
0.19	58.24	59.44	60.65	61.88	63.12
0.20	64.37	65.64	66.92	68.21	69.52
0.21	70.85	72.18	73.53	74.90	76.27
0.22	77.67	79.07	80.49	81.93	83.38
0.23	84.84	86.32	87.81	89.31	90.83
0.24	92.37	93.92	95.48	97.06	98.65
0.25	100.26	101.88	103.52	105.17	106.83
0.26	108.51	110.21	111.92	113.64	115.38
0.27	117.14	118.91	120.69	122.50	124.31
0.28	126.14	127.99	129.85	131.73	133.62
0.29	135.52	137.45	139.38	141.34	143.31
0.30	145.29	147.29	149.31	151.34	153.39
0.31	155.45	157.53	159.62	161.73	163.86
0.32	166.00	168.16	170.34	172.53	174.73
0.33	176.96	179.20	181.45	183.72	186.01
0.34	188.31	190.63	192.97	195.32	197.69
0.35	200.08	202.48	204.90	207.34	209.79
0.36	212.26	214.75	217.25	219.77	222.31
0.37	224.86	227.43	230.02	232.62	235.24
0.38	237.88	240.54	243.21	245.90	248.61
0.39	251.33	254.08	256.84	259.61	262.41
0.40	265.22	268.05	270.89	273.76	276.64
0.41	279.54	282.46	285.39	288.34	291.32
0.42	294.30	297.31	300.33	303.38	306.44
0.43	309.51	312.61	315.72	318.86	322.01
0.44	325.18	328.36	331.57	334.79	338.03
0.45	341.29	344.57	347.87	351.18	354.52
0.46	357.87	361.24	364.63	368.04	371.47
0.47	374.92	379.39	381.86	385.37	388.89
0.48	392.43	395.99	399.57	403.16	406.78
0.49	410.42	414.07	417.75	421.44	425.15
0.50	428.88	432.63	436.41	440.20	444.00
0.51	447.83	451.68	455.55	459.44	463.35
0.52	467.27	471.22	475.19	479.17	483.18
0.53	487.20	491.25	495.31	499.40	503.51
0.54	507.63	511.78	515.94	520.13	524.33
0.55	528.56	532.81	537.07	541.36	545.67
0.56	550.00	554.34	558.71	563.10	567.51
0.57	571.94	576.39	580.87	585.36	589.87
0.58	594.40	598.96	603.53	608.13	612.75
0.59	617.39	622.04	626.72	631.43	636.15

ตารางที่ 14-18 (ต่อ) ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน HL-Flume ขนาด 4.0 ฟุต หน่วย ลิตร/วินาที

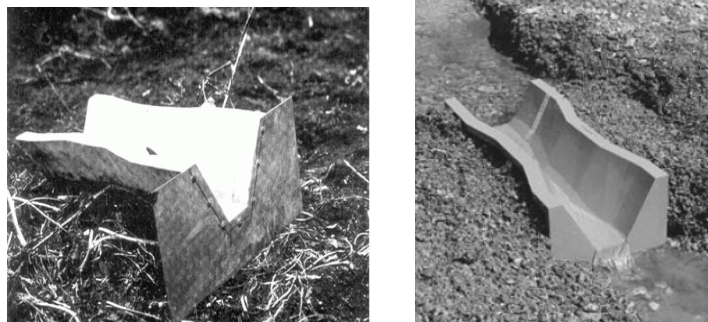
h_a (m)	.000	.002	.004	.006	.008
0.60	640.89	645.66	650.44	655.25	660.08
0.61	664.92	669.80	674.69	679.60	684.54
0.62	689.49	694.47	699.47	704.49	709.53
0.63	714.60	719.68	724.79	729.92	735.07
0.64	740.24	745.44	750.65	755.89	761.15
0.65	766.44	771.74	777.07	782.41	787.79
0.66	793.18	798.59	804.03	809.49	814.97
0.67	820.48	826.00	831.55	837.13	842.72
0.68	848.34	853.98	859.64	865.32	871.03
0.69	876.76	882.51	888.29	894.09	899.91
0.70	905.75	911.62	917.51	923.42	929.36
0.71	935.31	941.30	947.30	953.33	959.38
0.72	965.46	971.55	977.67	983.82	989.99
0.73	996.18	1002.39	1008.63	1014.89	1021.18
0.74	1027.49	1033.82	1040.18	1046.56	1052.96
0.75	1059.39	1065.84	1072.31	1078.81	1085.34
0.76	1091.88	1098.45	1105.05	1111.67	1118.31
0.77	1124.98	1131.67	1138.38	1145.12	1151.89
0.78	1158.68	1165.49	1172.32	1179.19	1186.07
0.79	1192.98	1199.92	1206.88	1213.86	1220.87
0.80	1227.90	1234.96	1242.04	1249.15	1256.28
0.81	1263.44	1270.62	1277.82	1285.05	1292.31
0.82	1299.59	1306.90	1314.23	1321.59	1328.97
0.83	1336.37	1343.81	1351.26	1358.74	1366.25
0.84	1373.79	1381.34	1388.93	1396.54	1404.17
0.85	1411.83	1419.52	1427.23	1434.96	1442.73
0.86	1450.52	1458.33	1466.17	1474.04	1481.93
0.87	1489.84	1497.79	1505.76	1513.75	1521.77
0.88	1529.82	1537.89	1545.99	1554.12	1562.27
0.89	1570.44	1578.65	1586.88	1595.13	1603.42
0.90	1611.73	1620.06	1628.42	1636.81	1645.23
0.91	1653.67	1662.14	1670.63	1679.15	1687.70
0.92	1696.28	1704.88	1713.51	1722.16	1730.84
0.93	1739.55	1748.29	1757.05	1765.84	1774.66
0.94	1783.50	1792.37	1801.27	1810.20	1819.15
0.95	1828.13	1837.14	1846.17	1855.23	1864.32
0.96	1873.44	1882.58	1891.75	1900.75	1910.18
0.97	1919.43	1928.71	1938.02	1947.36	1956.73
0.98	1966.12	1975.54	1984.99	1994.46	2003.97
0.99	2013.50	2023.06	2032.65	2042.26	2051.91
1.00	2061.58	2071.28	2081.01	2090.76	2100.55
1.01	2110.36	2120.20	2130.07	2139.97	2149.90
1.02	2159.85	2169.84	2179.85	2189.89	2199.96
1.03	2210.06	2220.18	2230.34	2240.52	2250.73
1.04	2260.97	2271.24	2281.54	2291.87	2302.23
1.05	2312.61	2323.03	2333.47	2343.95	2354.45
1.06	2364.98	2375.54	2386.13	2396.75	2407.40
1.07	2418.07	2428.78	2439.52	2450.28	2461.08
1.08	2471.90	2482.76	2493.64	2504.55	2515.49
1.09	2526.47	2537.47	2548.50	2559.56	2570.65
1.10	2581.77	2592.93	2604.11	2615.32	2626.56
1.11	2637.83	2649.13	2660.46	2671.82	2683.21
1.12	2694.63	2706.09	2717.57	2729.08	2740.62
1.13	2752.19	2763.80	2775.43	2787.09	2798.79
1.14	2810.51	2822.27	2834.05	2845.87	2857.72
1.15	2869.60	2881.50	2893.44	2905.41	2917.41
1.16	2929.45	2941.51	2953.60	2965.73	2977.88
1.17	2990.07	3002.29	3014.54	3026.81	3039.13
1.18	3051.47	3063.84	3076.25	3088.68	3101.15
1.19	3113.65	3126.18	3138.74	3151.33	3163.96
1.20	3176.61	3189.30	3202.02	3214.77	3227.55
1.21	3240.37	3253.21	3266.09	3279.00	3291.94

14.8 Washington State College flume หรือ WSC flume

เป็น Flume ที่ออกแบบโดย Washington State College มีลักษณะคล้าย Parshall flume นิยมใช้เพื่อการวัดน้ำในทางน้ำขนาดเล็กที่ไม่มีการคาด ซึ่งมีอัตราการไหลไม่มาก เช่น ลำธาร คูน้ำ ฯลฯ เป็นรางสำเร็จรูปที่นำไปติดตั้งสะดวก ลักษณะรูปแบบมิติของ WSC flume ดังแสดงในรูปที่ 14-28



รูปที่ 14-28 ลักษณะรูปแบบมิติของ WSC flume



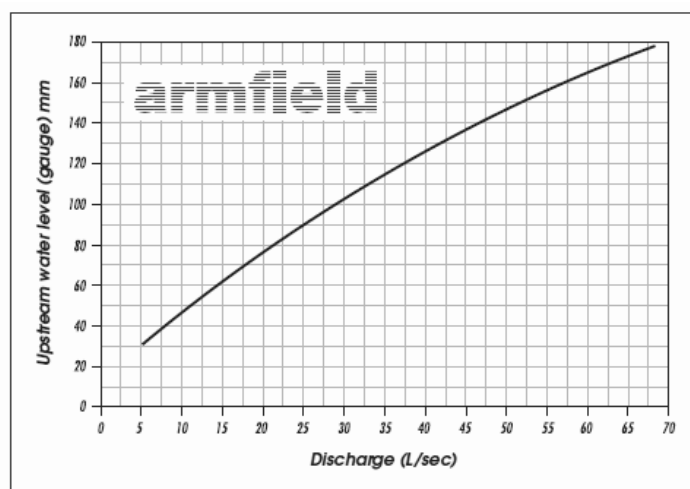
รูปที่ 14-29 WSC flume สำเร็จรูป

อัตราการไหลผ่าน WSC flume

การใช้งาน WSC flume จะใช้ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ WSC flume แต่ละตัวมาสร้างเป็น Calibration table ตัวอย่างแสดงใน ตารางที่ 14-19 หรือสร้างเป็น Calibration curve ตัวอย่างแสดงใน รูปที่ 14-30

ตารางที่ 14-19 ตัวอย่าง Calibration table ของ WSC flume ตัวหนึ่ง

ความลึกการไหล (mm)	30	40	50	60	70	80	90
อัตราการไหล (l/s)	0.10	0.20	0.33	0.50	0.75	1.07	1.43



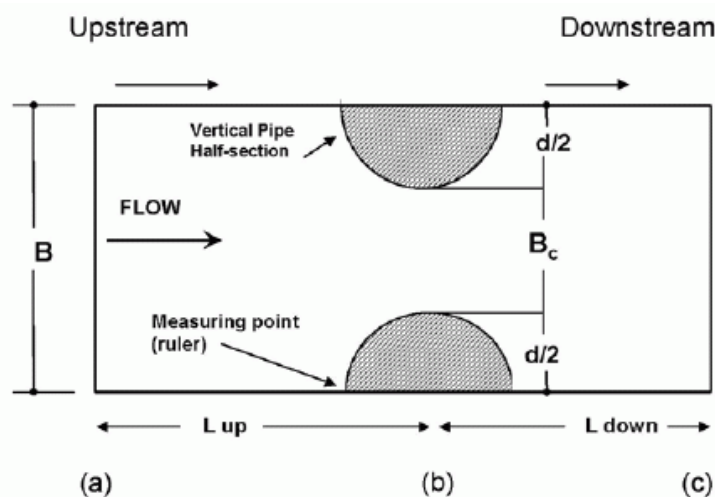
Calibration curve for a typical WSC flume

รูปที่ 14-30 ตัวอย่าง Calibration curve ของ WSC flume ตัวหนึ่ง

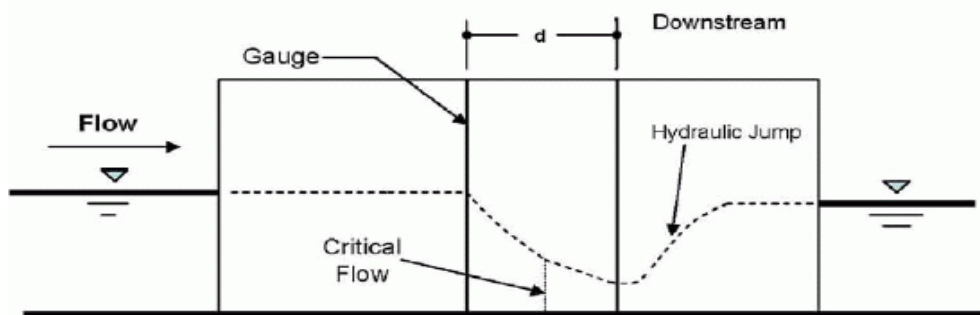
14.9 S-M Flume

S-M Flume นั้นได้ออกแบบพัฒนาขึ้นมาโดย **Zohrab Samani** และ **Henry Magallanez** ที่ New Mexico State University ในปี 2000 เพื่อแก้ปัญหารางวัดน้ำแบบอื่น ๆ ที่มีข้อจำกัดในเรื่องความไม่ยืดหยุ่นในเรื่องรูปแบบ ขนาด มิติ สร้างยาก มีราคาแพง ให้หมดไป รากวัดน้ำแบบใหม่มีรูปแบบเรียบง่าย แต่มีความถูกต้องในการใช้งานอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (มีความผิดพลาดในการวัด 5%) เหมาะกับการใช้ตรวจวัดในทางน้ำที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปแบบของ S-M Flume ดังแสดงในรูปที่ 14-31 และรูปที่ 14-32 มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นรางหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และส่วนที่เป็นทรงกระบอกครึ่งซีกติดผนัง 2 ข้าง ที่อาจสร้างด้วยวัสดุได้หลายอย่าง เช่น ไม้ แผ่นโลหะ พลาสติก คอนกรีต อิฐก่อ ฯลฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ส่วนที่เป็นทรงกระบอกครึ่งซีกอาจใช้ท่อทำจากเหล็ก PVC ไยหิน หรือคอนกรีต ที่มีขนาดตรงตามกำหนดมาสร้าง ซึ่งทำให้การสร้างสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 14-31 รูปแปลนของ S-M Flume



รูปที่ 14-32 รูปตัดตามยาวในแนวศูนย์กลางของ S-M Flume



รูปที่ 14-33 แสดง S-M Flume ที่ติดตั้งเพื่อวัดน้ำในคูน้ำ

14.9.1 ขนาดและมิติของ S-M Flume

1) Flume ชนิดนี้ต้องพิจารณาขนาดของท่อที่จะนำมาผ่าครึ่งสร้างเป็นส่วนคอเป็นหลัก เพื่อเทียบกับมิติข้อกำหนดอื่น ๆ

2) B_c/B มีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 0.6

เมื่อ B คือความกว้างของราง และ B_c คือความกว้างของคอราง

3) $L=1.5H$, $L_{up} = (2/3)L$, $L_{down} = (1/3)L$

เมื่อ L คือความยาวน้อยที่สุดของราง

H คือความสูงของรางที่เท่ากับ ความลึกน้ำสูงสุด h_{max} บวกระยะ Free board อย่างน้อย 2 นิ้ว

L_{up} และ L_{down} คือ ตำแหน่งติดตั้งท่อผ่าครึ่งที่เป็นคอของราง

14.9.2 การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน S-M Flume

ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลแบบ Free flow กับความลึกของการไหลผ่านรางที่วัดจากตำแหน่งด้านหน้าทรงกระบอกครึ่งซีกเป็นตามสมการต่อไปนี้ (มีค่าความผิดพลาด 5%)

$$Q = 0.701 \sqrt{g} B_c^{0.91} h^{1.59}$$

- เมื่อ Q = อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)
 h = ความลึกของน้ำด้านทางเข้าวัดที่ขอบทรงกระบอกครึ่งซีก (ม.)
 B_c = ความกว้างช่วงคอของราง (ม.)
 g = ความเร่งจากแรงดึงดูดของโลก = 9.81 (ม./วินาที²)

14.9.3 ข้อพิจารณาในการออกแบบ S-M Flume

การออกแบบขนาดรางต้องพิจารณาความลึกของน้ำในทางน้ำ และช่วงของอัตราการไหลผ่านราง ตัวอย่างเช่น ตามตารางที่ 14-20 (ที่หน่วยอัตราการไหลเป็น ลบ.ฟุต/วินาที ขนาดระยะความยาวเป็นฟุต) แสดงช่วงอัตราการไหล สำหรับรางที่ B_c/B มีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 0.6 เมื่อ B เป็นความกว้างรางระหว่าง 1 ถึง 6 ฟุต และมี $H = 2$ ฟุต

ตารางที่ 14-20 ตัวอย่างแสดงช่วงอัตราการไหล (ลบ.ฟุต/วินาที) สำหรับรางที่ B_c/B มีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 0.6 เมื่อ B เป็นความกว้างรางระหว่าง 1 ถึง 6 ฟุต และมี $H = 2$ ฟุต เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบ

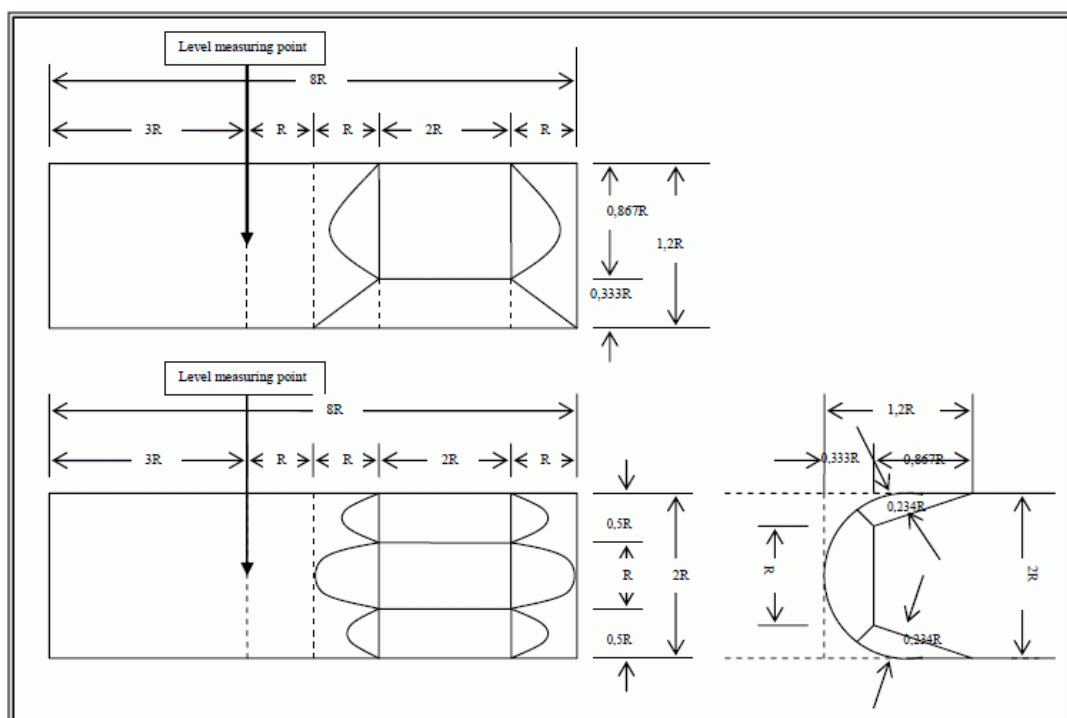
B_c/B^*	B. Width of Flume in feet					
	1	2	3	4	5	6
0.40	0.04-5.00	0.20-9.00	0.30-14.00	0.30-18.00	0.40-22.00	0.40-26.00
0.50	0.05-6.00	0.30-11.00	0.40-17.00	0.50-22.00	0.60-27.00	0.70-32.00
0.60	0.08-7.00	0.50-14.00	1.0-20.00	1.30-26.00	1.50-32.00	2.00-38.00

14.9.4 ข้อกำหนดของ S-M Flume

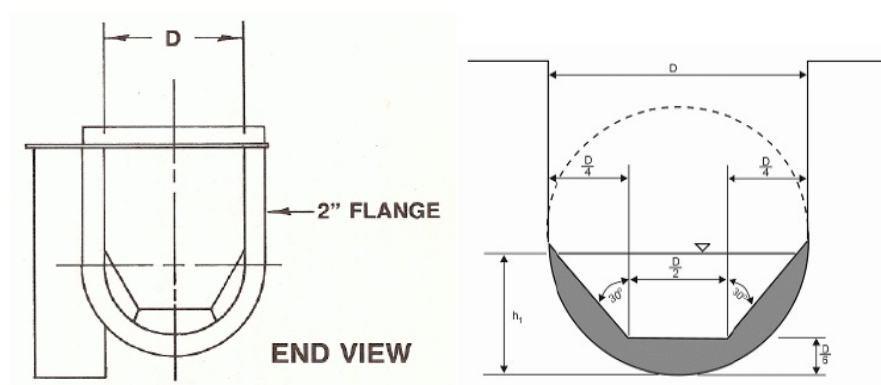
- 1) พื้นของ S-M Flume และพื้นทางน้ำ ทั้งสองด้านต้องได้ระดับ
- 2) ต้องซีลเพื่อไม่ให้มีน้ำไหลรั่วซึมผ่านขอบด้านข้างและขอบล่างของรางออกไป
- 3) การไหลผ่าน S-M Flume จะมีความถูกต้องเมื่อเป็นแบบ Free flow นั่นคือ เกิด Critical depth ที่บริเวณคอของราง และเกิด Hydraulic jump ที่ตำแหน่งเลขขอบทรงกระบอกครึ่งซีกของรางออกไปเสมอ

14.10 Palmer - Bowlus flumes

Palmer - Bowlus flumes เป็นรางวัดน้ำที่พัฒนาขึ้นมาในปี 1930 โดย Harold Palmer และ Fred Bowlus ที่ The Los Angeles County Sanitation Department มีวัตถุประสงค์เพื่อการวัดน้ำในระบบระบายน้ำที่ส่วนใหญ่เป็นระบบท่อ จึงออกแบบให้เป็นรางลักษณะท่อกลม หรือรางรูปตัว U ที่มีการบีบตัวด้านล่างเป็นยกพื้นและบีบตัวด้านข้าง คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของ Palmer - Bowlus flumes เป็นลักษณะคล้ายฝายสันกว้างเหมือนรางวัดน้ำอื่นๆ สำหรับตัวอย่างรูปแบบและมิติของ Palmer - Bowlus flumes นั้นแสดงใน รูปที่ 14-34

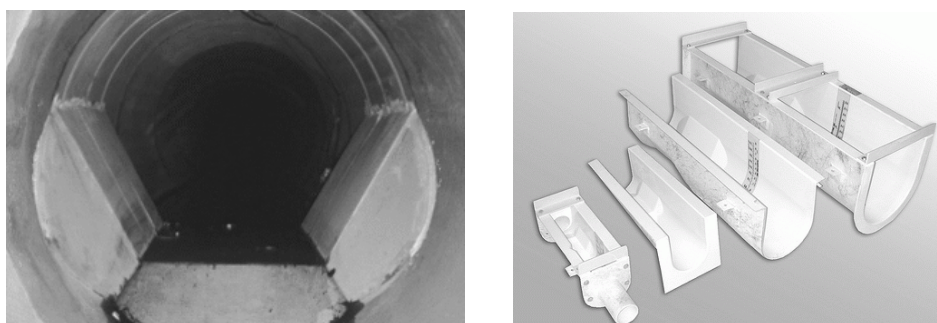


รูปที่ 14-34 รูปแบบและมิติมาตรฐานของ Palmer - Bowlus flumes



รูปที่ 14-35 End view ของ Palmer - Bowlus flumes

ที่มีหน้าตัดรูป U-Shape และ วงกลม



รูปที่ 14-36 ลักษณะของ Palmer - Bowlus

Palmer - Bowlus flumes มีทั้งเป็นรางสำเร็จรูปมีหลายขนาด ตามขนาดของศูนย์กลางท่อ มีหน่วยเป็นนิ้ว ได้แก่ 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 36, 42, 48, 60, 72 นิ้ว จนถึงขนาดใหญ่ที่ก่อสร้างไว้ในระบบระบายน้ำขนาดใหญ่

14.10.1 การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน Palmer - Bowlus flumes

ปริมาณน้ำหรืออัตราการไหลผ่าน Palmer - Bowlus flumes ที่มีขนาดและมิติตรงตามมาตรฐานที่กำหนดนั้น นอกจากการใช้ค่าจาก Calibration table หรือ Calibration curve ของรางแต่ละขนาดแล้ว อาจใช้สมการในการคำนวณอัตราการไหลซึ่งเป็นสมการที่เป็นผลสรุปที่ได้จากผลการ Calibrate รางขนาดต่างๆ ซึ่งสมการอัตราการไหลดังกล่าวในรางแต่ละขนาดอาจกำหนดสมการได้ 2 สมการ คือ สมการ (a) เป็นสมการที่มีความเบี่ยงเบนเล็กน้อยในช่วงของอัตราการไหลใกล้เคียงช่วงต่ำสุดและช่วงสูงสุด และ สมการ (b) เป็นสมการที่มีความแม่นยำครอบคลุมตลอดช่วงของการวัด ซึ่งสมการการคำนวณสำหรับ Palmer - Bowlus flumes ที่มีขนาดและมิติตามมาตรฐาน ได้แก่ต่อไปนี้

เมื่อ H = Head หน่วย ฟุต, Q = อัตราการไหล หน่วย ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที

4" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 1.73 \times (H + .00588)^{1.9573} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.000491374 + 0.052219H + 1.815283H^2 - 3.352818H^3 + 7.682511H^4 + 79.0388H^5 + 113.3232H^6 - 2711.151H^7 + 5131.661H^8$$

6" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 2.071 \times (H + .005421)^{1.9025} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.000252012 + 0.051932H + 2.872653H^2 - 5.988129H^3 + 5.207215H^4 + 69.2287H^5 - 89.3457H^6 - 348.922H^7 + 572.806H^8$$

8" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 2.537 \times (H + .01456)^{1.9724} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.002211174 + 0.144056H + 2.644594H^2 - 2.468403H^3 + 1.537941H^4 + 18.920840H^5 + 4.9486H^6 - 123.611H^7 + 119.943H^8$$

10" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 2.843 \times (H + .01610)^{1.9530} \text{ or}$$

$$(b) Q = -0.002568036 + 0.157007H + 3.717063H^2 - 7.279155H^3 + 12.957680H^4 + 10.044620H^5 - 30.7575H^6 - 3.989H^7 + 20.724H^8$$

12" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 3.142 \times (H + .017)^{1.9362} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = +0.001285249 + 0.160814H + 4.074878H^2 - 4.868885H^3 + 5.194802H^4 + 5.391436H^5 - 2.3493H^6 - 15.932H^7 + 11.682H^8$$

15" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 3.574 \times (H + .01682)^{1.9062} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.005446241 + 0.321892H + 3.703519H^2 - 1.430430H^3 + 2.165814H^4 - 10.406070H^5 + 32.1713H^6 - 36.007H^7 + 13.225H^8$$

18" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 3.988 \times (H + .01875)^{1.8977} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = +0.010862620 + 0.005188H + 6.702144H^2 - 7.621502H^3 + 5.159058H^4 + 3.082969H^5 - 1.4116H^6 - 3.676H^7 + 1.957H^8$$

21" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 4.223 \times (H + .039)^{1.9619} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.027504770 + 0.689056H + 4.144363H^2 - 1.761823H^3 + 1.672703H^4 - 0.342789H^5 + 1.6492H^6 - 2.110H^7 + 0.656H^8$$

24" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 4.574 \times (H + .0408)^{1.9497} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.002225281 + 0.420895H + 5.930978H^2 - 3.470244H^3 + 0.746696H^4 + 3.182714H^5 - 2.1110H^6 + 0.058H^7 + 0.141H^8$$

27" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 4.97 \times (H + .038)^{1.9269} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.009705140 + 0.354086H + 6.791781H^2 - 3.986792H^3 + 1.071059H^4 + 2.255546H^5 - 1.3530H^6 - 0.005H^7 + 0.084H^8$$

30" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 5.022 \times (H + .0625)^{1.9663} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.200116800 + 2.238534H + 2.207354H^2 + 1.185735H^3 + 0.374370H^4 - 0.386049H^5 + 0.2800H^6 - 0.168H^7 + 0.033H^8$$

36" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 5.462 \times (H + .08)^{1.991} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.084205270 + 1.359937H + 5.845147H^2 - 1.647873H^3 + 0.509795H^4 + 0.413952H^5 - 0.0570H^6 - 0.105H^7 + 0.0261H^8$$

42" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 6.12 \times (H + .078)^{1.9628} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.083333500 + 1.431028H + 7.047561H^2 - 2.475667H^3 + 1.037684H^4 + 0.102303H^5 - 0.0446H^6 - 0.035H^7 + 0.008H^8$$

48" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 6.626 \times (H + .085)^{1.9586} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.053395340 + 1.441452H + 7.813287H^2 - 2.012471H^3 + 0.265820H^4 + 0.384576H^5 - 0.0875H^6 - 0.020H^7 + 0.005H^8$$

60" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 7.183 \times (H + .126)^{1.9833} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.614242800 + 4.007510H + 6.591763H^2 - 1.186873H^3 + 0.318855H^4 + 0.215911H^5 - 0.0987H^6 + 0.012H^7 - 0.000H^8$$

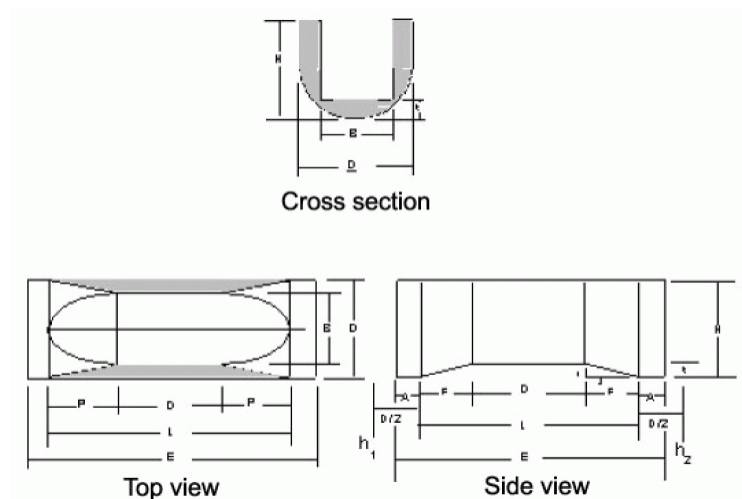
72" Palmer-Bowlus:

$$(a) Q = 7.839 \times (H + .155)^{1.9871} \text{ หรือ}$$

$$(b) Q = -0.358481400 + 3.418848H + 8.675141H^2 - 1.269805H^3 + 0.156454H^4 + 0.085580H^5 - 0.0048H^6 - 0.005H^7 + 0.001H^8$$

14.10.2 การพัฒนาปรับปรุงดัดแปลง Palmer - Bowlus flumes

Leopold-Lagco Flume เป็นรางวัดน้ำที่ปรับปรุงส่วนบิวด้านข้างของ Palmer - Bowlus flumes จากเป็นลาด 2:1 เป็นกำแพงแนวตั้ง ดังแสดงใน รูปที่ 14-37



รูปที่ 14-37 แสดงรูปแบบและมิติของ Leopold-Lagco Flume

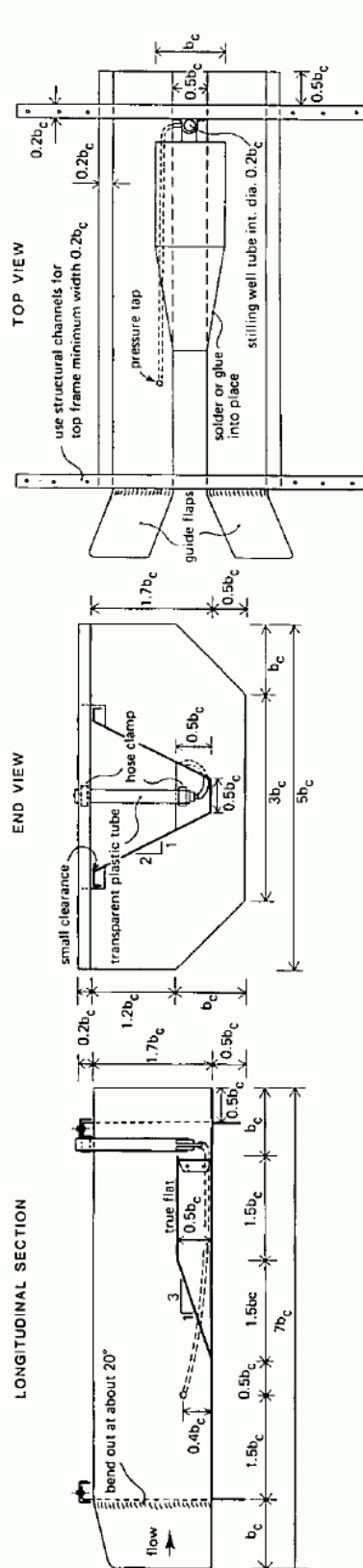
14.11 RBC Flume

RBC Flume นั้นได้พัฒนาขึ้นมาในปี 1980 โดย Marinus Bos (International Institute for Land Reclamation and Improvements), John Repolge และ Albert Clemmens (U.S. Water Conservation Laboratory) สำหรับวัดอัตราการไหลน้อย ๆ ในร่องคู และทางน้ำเล็ก ๆ ที่มีความลาดเทน้อยกว่า 1% โดยได้ใช้ลักษณะรูปแบบของ Trapezoidal long-throat flume กับ Palmer-Bowlus flume มาเป็นรูปแบบ มีการกำหนดขนาดโดยความกว้างของช่วงคอ ที่มีขนาดระหว่าง 50 มม. ถึง 200 มม. มีมิติของแต่ละขนาดกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน

รูปที่ 14-38 แสดง RBC Flume สำเร็จรูปแบบหนึ่ง ส่วนรูปที่ 14-39 แสดงรูปแบบและมิติของ RBC Flume

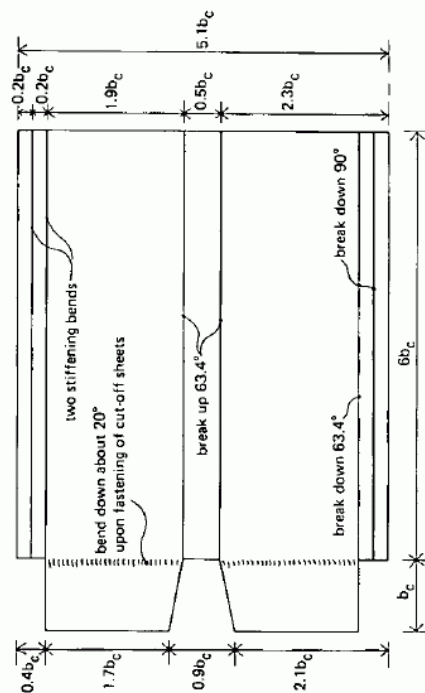


รูปที่ 14-38 RBC flume ที่ผลิตเชิงการค้าแบบหนึ่ง

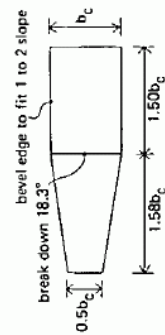


UNFOLDED SHEETS

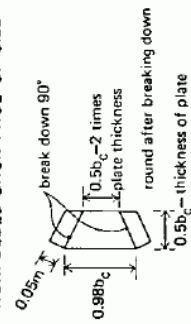
UNFOLDED BOTTOM SHEET



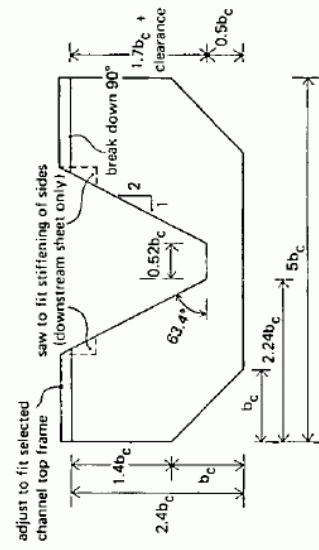
UNFOLDED WEIR SHEET



UNFOLDED BACK FACE OF SILL



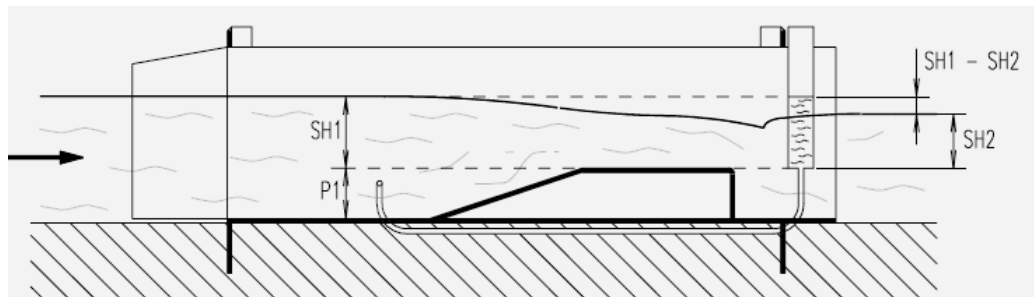
UNFOLDED CUT-OFF SHEET (2 times)



รูปที่ 14-39 รูปแบบ มิติ ของ RBC flume

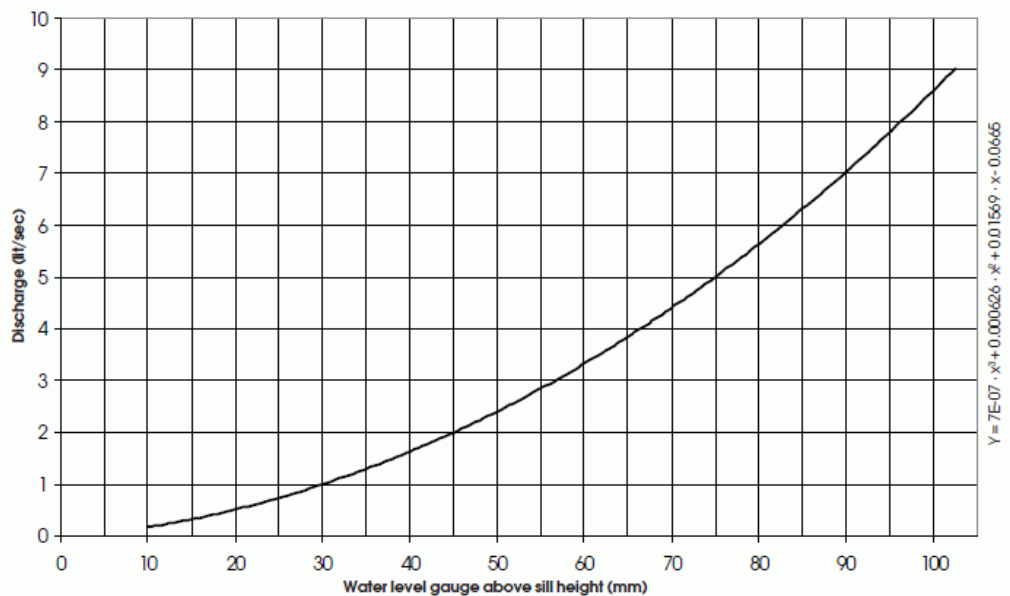
การวัดอัตราการไหลผ่าน RBC flume

RBC flume ก็เหมือนรางวัดน้ำประเภทอื่นๆ ที่การคิดอัตราการไหลจะใช้ค่าที่ได้จากการ Calibration มาสร้างเป็น Calibration table หรือ Calibration Curve หรือสร้างสมการการคำนวณอัตราการไหล ของรางแต่ละขนาดหรือแต่ละตัว โดยลักษณะการไหลใน RBC flume แสดงในรูปที่ 14-40



รูปที่ 14-40 ลักษณะการไหลใน RBC flume

ตัวอย่าง RBC flume รุ่น 13.17.02 หรือ 13.17.02 RBC flume ที่ผลิตโดย Eijkelkamp Agrisearch Equipment ขนาดคอกว้าง 10 ซม. มีมิติตามมาตรฐาน RBC flume มี Calibration Curve ดังแสดงใน รูปที่ 14-41



รูปที่ 14-41 Calibration Curve ของ 13.17.02 RBC flume

ตัวอย่างสมการการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่าน 13.17.02 RBC flume

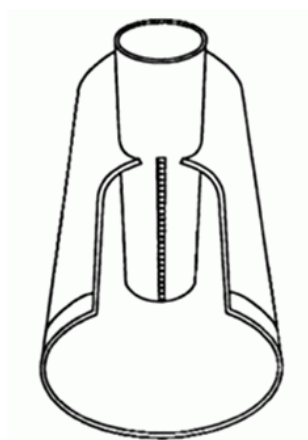
$$Q = (7E - 07) \cdot (SH_1)^3 + 0.000626 (SH_1)^2 + 0.01569 (SH_1) - 0.0665$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)

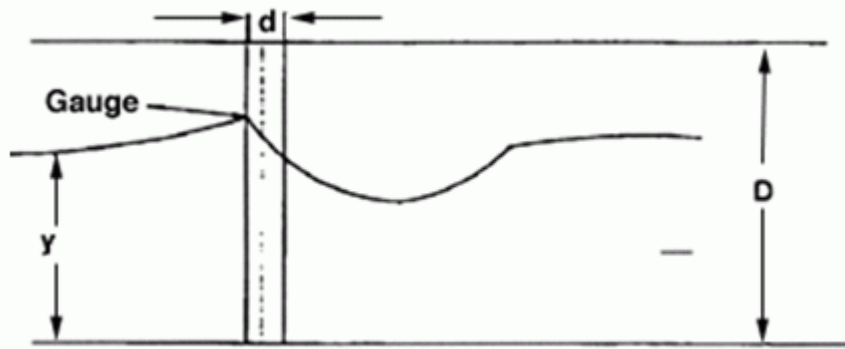
SH_1 = Head ด้านเหนือน้ำที่วัดจากผิวน้ำถึงสันของฝายหรือยกพื้น (ม.ม.)

14.12 รางวัดน้ำแบบทอกลม (Circular flume)

เป็นรางวัดน้ำที่มีรูปแบบง่าย ๆ สร้างได้เองในราคาที่ถูกมาก ๆ ออกแบบโดย **Zohrab Samani** (ผู้ร่วมออกแบบ S-M flume) ลักษณะรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 14-42 ซึ่งประกอบด้วย ท่อ 2 ท่อน 2 ขนาดมาประกอบกัน ท่อท่อนใหญ่เป็นตัวราง ท่อท่อนเล็กติดตั้งขวางกลางรางใน แนวตั้งเพื่อทำหน้าที่บิบน้ำตัดการไหล ทำให้ลักษณะการไหลเป็นดังรูปที่ 14-43 โดยท่อท่อนใหญ่ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเป็น 3 เท่าของท่อท่อนเล็ก (หรือเทียบสัดส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในท่อใหญ่ กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อเล็ก ระหว่าง 0.25 ถึง 0.32) เรียกขนาดของรางวัดน้ำ ตามขนาดของท่อทั้ง 2 ขนาด ความยาวของท่อท่อนใหญ่ที่เป็นรางกับท่อท่อนเล็กขึ้นกับขนาดของ ราง ท่อท่อนใหญ่ที่เป็นรางจะเปิดช่องด้านบนเพื่อให้สามารถอ่านระดับน้ำจาก Gauge ที่ติดไว้ที่ ด้านท้ายน้ำของท่อท่อนเล็กได้ รางวัดน้ำชนิดนี้เรียกว่า รางวัดน้ำแบบทอกลม (Circular flume) เหมาะกับการใช้วัดปริมาณน้ำในร่องน้ำและคูน้ำ



รูปที่ 14-42 ลักษณะของ Circular flume มองจากด้านบนหรือด้านเหนือน้ำ



รูปที่ 14-43 ลักษณะการไหลใน Circular flume

ในเบื้องต้นได้ออกแบบ Circular flume ไว้ 4 ขนาด การเรียกขนาดของรางวัดน้ำชนิดนี้ เรียกตามขนาดของท่อทั้ง 2 ขนาดที่อาจใช้ท่อ PVC ท่อเหล็ก หรือใช้เหล็กแผ่นมาขึ้นรูป ได้แก่ 6x2 นิ้ว, 12x4 นิ้ว, 18x6 นิ้ว และ 32x12 นิ้ว ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) ใช้กับร่องคูขนาดเล็กมีอัตราการไหลน้อยกว่า 100 แกลลอนต่อนาที (GPM)

ใช้รางขนาด 6x2 นิ้ว โดยใช้ท่อ PVC 6 นิ้วเป็นรางยาว 2 ฟุต และใช้ท่อ PVC 2 นิ้วท่อแกนตั้งภายในรางยาว 2 ฟุต ติดตั้งท่อเล็กโดยเจาะท่อใหญ่ด้านหนึ่งที่ระยะ 1.5 ฟุต โดยให้ด้านที่ยาวกว่านี้เป็นด้านเหนือน้ำ ติดตั้งท่อเล็กกับท่อใหญ่ให้อยู่ในแนวศูนย์กลางท่อใหญ่และได้ฉากใน 2 แกน มนปลายท่อเล็กให้รับกับส่วนโค้งด้านในของท่อใหญ่พอดีติดกาวให้แน่น และเปิดช่องด้านบนของท่อใหญ่ด้านที่ยาวกว่าจากท่อเล็กเพื่อให้สามารถอ่านระดับน้ำจาก Gauge ที่ติดกับท่อเล็กได้สะดวก ติดตั้ง Gauge (ไม้บรรทัดขนาดเล็ก) ความยาวเป็นนิ้ว ให้ระยะ 0 อยู่ที่ผิวด้านในของท่อใหญ่พอดี

2) ใช้กับร่องคูที่มีอัตราการไหลมากกว่า 100 GPM

ใช้รางขนาดที่ใหญ่กว่าคือ 12x4 นิ้ว, 18x6 นิ้ว และ 32x12 นิ้ว ส่วนจะใช้ขนาดใดอาจพิจารณาจากขนาดของคูและอัตราการไหลสูงสุดที่รางแต่ละขนาดจะตรวจวัดได้จาก Calibration table จาก ตารางที่ 14-22 ตารางที่ 14-23 และ ตารางที่ 14-24 โดยใช้ท่อใหญ่ยาว 4 ฟุต ท่อเล็กให้ยาวกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อใหญ่พอสมควร เจาะท่อใหญ่เพื่อติดตั้งท่อเล็กแนวตั้งที่ระยะ 3 ฟุต ของท่อใหญ่ที่ด้านยาวจะเป็นด้านเหนือน้ำ การติดตั้ง การเจาะช่องเหนือท่อใหญ่การติดตั้งบรรทัดวัดระดับน้ำทำเหมือนกรณีแรกที่กล่าวแล้วทุกประการ ทั้งนี้กรณีท่อขนาดใหญ่อาจใช้แผ่นโลหะมาขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามต้องการก็ได้

14.12.1 การตรวจวัดอัตราการไหล

- นำเครื่องมือไปติดตั้งในร่องคูให้อยู่ในตำแหน่งแนวเหนือน้ำท้ายน้ำให้ถูกต้อง
- โดยติดตั้งให้ท่อใหญ่วางได้แนวระดับ
- การตรวจวัดให้อ่านค่าความลึกของน้ำจากบรรทัดไม้ที่ติดไว้กับท่อเล็กซึ่งเป็นระดับน้ำด้านเหนือน้ำในท่อ แล้วไปเทียบอัตราการไหลจาก Calibration table จาก ตารางที่ 14-21 ตารางที่ 14-22 ตารางที่ 14-23 และ ตารางที่ 14-24 ให้ตรงกับขนาดของราง ค่าจากตาราง ความลึกของน้ำเป็น นิ้ว อัตราการไหลเป็น แกลลอนต่อวินาที (เพื่อความสะดวกอาจดัดแปลงค่าอัตราการไหลในตารางให้เป็นหน่วย SI)

$$[1 \text{ GPM} = 0.0630 \text{ ลิตร/วินาที} = 0.000063 \text{ ลบ.ม./วินาที}]$$

14.12.2 Submergence ratio

รางวัดน้ำแบบท่อกลม (Circular flume) นี้สามารถวัดอัตราการไหลในย่าน Free flow โดยมีค่า Submergence ratio (ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ:ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ) ได้ไม่เกิน 0.85

ตารางที่ 14-21 Calibration table ของ Circular flume ท่อ PVC ขนาด 6x 2 นิ้ว

Calibration table for a 6 x 2" PVC circular flume.

Depth (")	Flow (GPM)
1.0	1.77
1.5	5.76
2.0	12.13
2.5	20.70
3.0	31.07
3.5	42.51
4.0	57.32
4.5	73.89
5.0	92.56

ตารางที่ 14-22 Calibration table ของ Circular flume ท่อ PVC ขนาด 12 x 4 นิ้ว

Calibration table for a 12 x 4" PVC circular flume.

Depth (")	Flow (GPM)
1.0	0.63
1.5	3.93
2.0	9.48
2.5	18.47
3.0	30.65
3.5	46.04
4.0	64.64
4.5	86.42
5.0	111.32
5.5	139.25
6.0	170.12
6.5	204.88
7.0	240.33
7.5	279.53
8.0	321.48
8.5	366.27
9.0	414.13
9.5	464.89
10.0	515.34

ตารางที่ 14-23 Calibration table ของ Circular flume ท่อ PVC ขนาด 18x 6 นิ้ว

Calibration table for a 18 x 6" schedule-40 PVC circular flume.

Depth (")	Flow (GPM)
1.0	0.23
1.5	3.22
2.0	9.07
2.5	19.02
3.0	32.98
3.5	51.09
4.0	73.44
4.5	100.06
5.0	131.00
5.5	166.24
6.0	205.77
6.5	249.57
7.0	297.58
7.5	349.77
8.0	406.07
8.5	466.41
9.0	530.71
9.5	598.91
10.0	670.92
10.5	748.18
11.0	826.12
11.5	909.20
12.0	995.91
12.5	1086.26
13.0	1180.34
13.5	1278.29
14.0	1380.28
14.5	1486.47
15.0	1596.70
15.5	1691.76
16.0	1801.48
16.5	1911.12
17.0	2027.45

ตารางที่ 14-24 Calibration table ของ Circular flume ท่อ PVC ขนาด 36x 12 นิ้ว

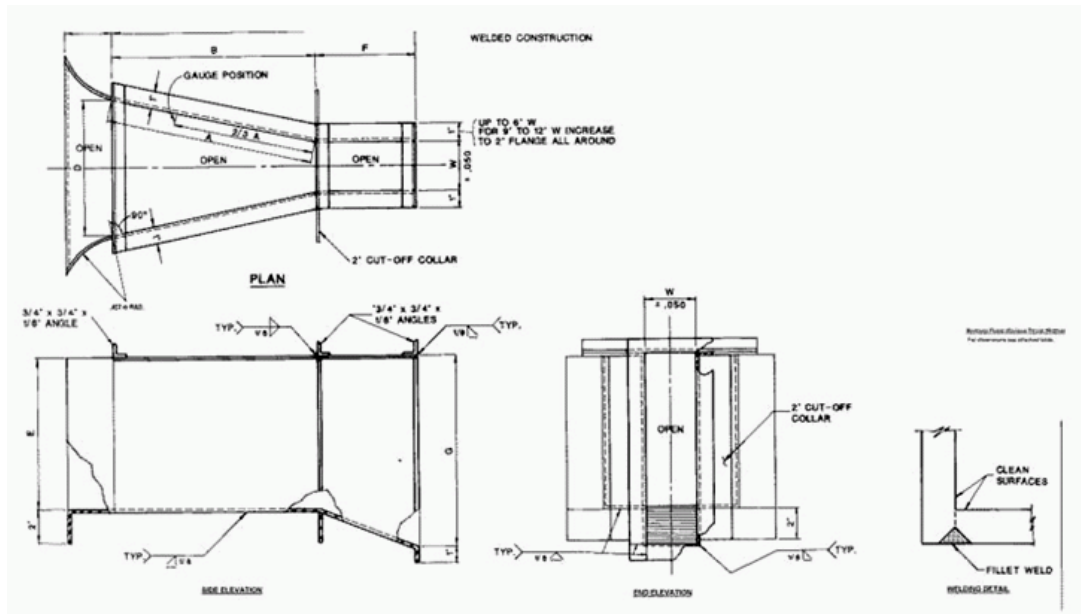
**Calibration table for a 36 x 12" circular flume
(36" corrugated 16-gauge, 12" schedule-40
PVC).**

Depth (")	Flow (GPM)
2.0	1.61
2.5	7.94
3.0	17.39
3.5	32.46
4.0	52.66
4.5	78.20
5.0	109.24
5.5	145.90
6.0	188.30
6.5	236.50
7.0	290.56
7.5	350.54
8.0	416.47
8.5	488.37
9.0	566.26
9.5	650.15
10.0	740.03
10.5	835.91
11.0	937.76
11.5	1045.58
12.0	1159.34
12.5	1279.01
13.0	1404.57
13.5	1535.97
14.0	1673.19
14.5	1816.17
15.0	1964.87
15.5	2119.26
16.0	2279.27
16.5	2444.85
17.0	2615.95
17.5	2792.52
18.0	2974.50
18.5	3161.84
19.0	3354.48
19.5	3552.37
20.0	3755.46
20.5	3964.41
21.0	4177.07
21.5	4395.51
22.0	4619.00
22.5	4847.55
23.0	5081.13
23.5	5319.77
24.0	5563.51
24.5	5812.38
25.0	6066.49
25.5	6325.92
26.0	6590.78
26.5	6861.23
27.0	7137.41
27.5	7419.41
28.0	7707.30
28.5	7956.04
29.0	8239.81
29.5	8526.78
30.0	8816.92
30.5	9110.50
31.0	9408.30
31.5	9712.26
32.0	9999.47
32.5	10360.77
33.0	10626.92

14.13 รางวัดน้ำที่พัฒนาจากการดัดแปลงปรับปรุงรางวัดน้ำอื่นๆ

14.13.1 Montana Parshall flume

เป็นการพัฒนาดัดแปลง Parshall flume เพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งานให้เหมาะกับลักษณะของทางน้ำ โดยตัดทางผายออก (Diverging section) ที่อยู่ท้ายส่วนคอคออก ใช้วัดปริมาณน้ำของการไหลที่เป็น Free flow เรียก Montana Parshall flume

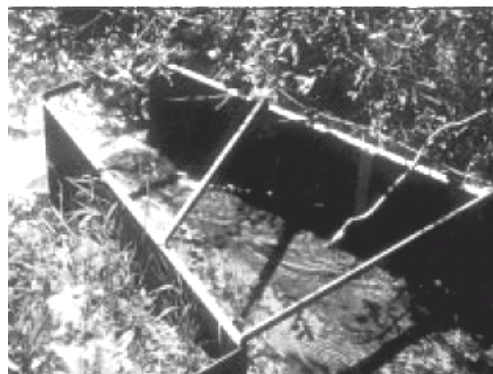


รูปที่ 14-44 แสดงรูปแบบและมิติของ Montana Parshall flume

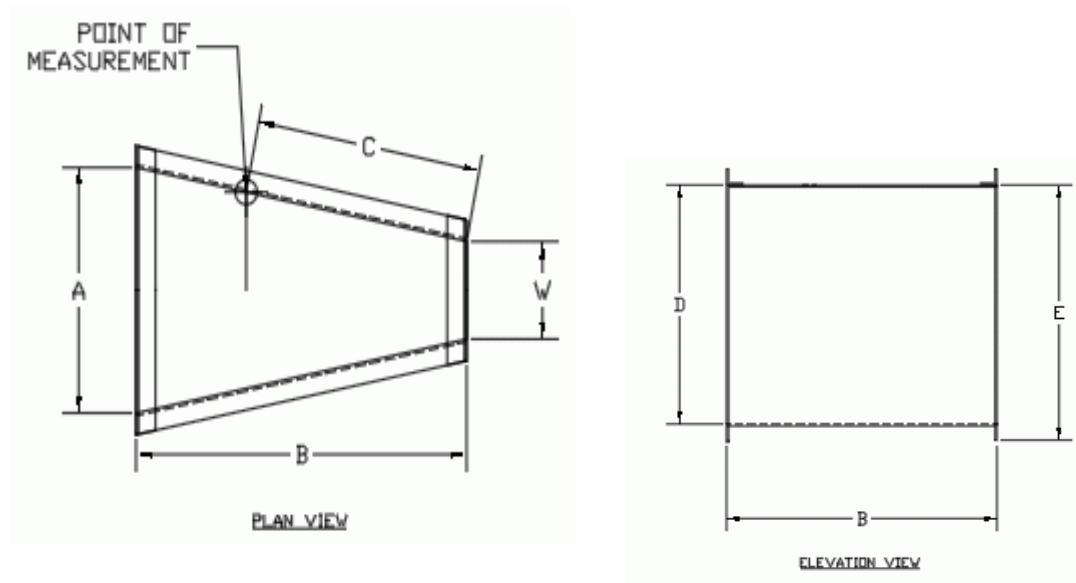
คือ Parshall flume ตัด Diverging section ออก

14.13.2 Montana cutthroat flume

เป็นการดัดแปลง Cutthroat flume โดยตัดทางผายออก (Diverging section) ที่อยู่ท้ายส่วนคอคคอคออก ใช้วัดปริมาณน้ำของการไหลที่เป็น Free flow เรียกว่า Montana cutthroat flume



รูปที่ 14-45 แสดงการติดตั้งใช้งาน Montana Cutthroat flume



รูปที่ 14-46 แสดงรูปแบบและมิติของ Montana Cutthroat flume

นอกจากนี้ยังมีรางวัดน้ำอีกหลายแบบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ที่ไม่ได้นำมานำเสนอในที่นี้ แต่ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ที่ไม่ต่างไปจากรางวัดน้ำต้นแบบ แต่มีความเหมาะสมในการใช้งานมากขึ้นกว่าเดิม อาจประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้าง การติดตั้งหรือการตรวจวัดทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งทุกแบบมักจะมีค่า Calibration table หรือ Calibration curve หรือสมการการคำนวณ โดยเฉพาะของแต่ละตัวเสมอ

บทที่ 15

การสอบเทียบ (Calibration)

อาคารชลศาสตร์ และเครื่องมือตรวจวัดปริมาณน้ำ

- การไหลของน้ำนั้นเป็นการไหลใน 3 ระบบใหญ่ๆ คือ

1) การไหลในระบบทางน้ำเปิด กรณีแรกเกิดจากน้ำผิวดินเพิ่มปริมาณรวมตัวกัน แล้วไหลจากทางน้ำขนาดเล็กไปสู่ทางน้ำที่ใหญ่ขึ้น ทั้งที่เป็นทางน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นได้แก่ ร่องน้ำ คูน้ำ คลอง ลำธาร ห้วย แม่น้ำ กรณีที่สองเป็นการไหลออกจากแหล่งกักเก็บน้ำที่ได้สร้างขึ้น ได้แก่ ทำนบ อ่างเก็บน้ำ เขื่อน ฝายทดน้ำ ประตูระบายน้ำ ที่มีทั้งระบายลงสู่ทางน้ำผ่านทางอาคารควบคุมชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอาคารหลักของห้วงงาน คือ ฝาย ประตูระบาย ท่อระบายน้ำ ฯลฯ และการไหลหรือการระบายในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำ

2) การไหลในระบบท่อ

3) การไหลของน้ำใต้ดิน (จะไม่กล่าวถึงในคู่มือนี้)

- การตรวจวัดคำนวณอัตราการไหลหรือปริมาณน้ำ เพื่อให้รู้ว่าน้ำไหลผ่านจุดที่ตรวจวัดในระบบดังกล่าวนี้เป็นปริมาณเท่าใดอาจทำได้หลายวิธี

1) ในระบบท่อดำเนินการเป็นการไหลภายใต้แรงดัน นอกจากการคำนวณโดยใช้หลักการชลศาสตร์การไหลในระบบท่อที่เกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานแล้ว อาจใช้เครื่องมือตรวจวัดเป็นการเฉพาะได้แก่ Venturi meter, Nozzle meter, Orifice meter, Pitometer (Pitot tube และ Prandtl tube), Rotameter, เครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์, มาตรวัดน้ำ ฯลฯ

2) ในระบบทางน้ำเปิด มีการตรวจวัดหลายรูปแบบได้แก่

2.1) การคำนวณวิธี Slope-Area method โดยอาศัยหลักการทางชลศาสตร์ของการไหลในทางน้ำโดยตรง (การใช้สมการ $Q = (1/n) A R^{2/3} S^{1/2}$)

2.2) การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดอัตราการไหล ซึ่งมีทั้งเครื่องมือวัดกระแสน้ำเชิงกล เครื่องมือวัดกระแสน้ำอิเล็กทรอนิกส์ ฝายวัดน้ำ รางวัดน้ำ การตวง ทุ่นลอย ฯลฯ ทั้งนี้รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดระดับน้ำซึ่งจะสัมพันธ์กับการวัดอัตราการไหลด้วย

2.3) การตรวจวัดโดยวิธีพิเศษ ได้แก่ การใช้สี สารเคมี ฯลฯ

2.4) การคำนวณการไหลผ่านอาคารควบคุม ได้แก่ ฝายหรือทางระบายน้ำล้น ประตูระบาย ท่อระบายน้ำ ฯลฯ

- เมื่อพิจารณาในส่วนของการตรวจวัดด้วยเครื่องมืออุปกรณ์ และอาคารควบคุม ซึ่งจะมีองค์ประกอบสำคัญของแต่ละสิ่งได้แก่ ตัวเครื่องมืออุปกรณ์และอาคารควบคุม ที่ประกอบด้วยรูปร่างรูปทรงหรือขนาดมิติ วัสดุที่ใช้สร้าง คุณสมบัติเฉพาะ (Specification) ในการใช้ตรวจวัด ได้แก่ (ก) ค่าสอบเทียบอัตราการไหลที่อาจเป็นตารางหรือกราฟหรือสมการของอุปกรณ์เครื่องมือ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล สมการใช้ในการคำนวณ ตารางหรือกราฟอัตราการไหลของอาคารควบคุม การควบคุม ที่ประกอบด้วย หลักเกณฑ์, วิธีการขั้นตอน, ค่ามาตรฐานและสภาพแวดล้อมที่กำหนดไว้จำเพาะเจาะจงเฉพาะตัว

ถ้าไม่คำนึงถึงตัวผู้ตรวจวัด องค์ประกอบดังกล่าวจะมีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กัน หากองค์ประกอบหนึ่งองค์ประกอบใดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ทั้งนี้หากองค์ประกอบทุกอย่างไม่ครบถ้วนสมบูรณ์มีส่วนหนึ่งส่วนใดชำรุดบกพร่องหรือมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การตรวจวัดก็จะไม่ถูกต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้น การแก้ปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นดังกล่าวทำได้โดยการปรับปรุงค่าความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ เหล่านั้นขึ้นมาเป็นค่าใหม่ เพื่อให้การตรวจวัดปริมาณน้ำถูกต้องดังเดิม กระบวนการในการตรวจสอบความถูกต้อง ด้วยการเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ถูกต้องของสิ่งที่ถูกวัดเรียกว่า การสอบเทียบ (Calibration) นอกจากนี้อาจเรียกอย่างอื่น เช่น การปรับเทียบ การเปรียบเทียบ การสอบวัด

15.1 การสอบเทียบอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดอัตราการไหล

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ นั้นอาจเกิดการชำรุดบกพร่องขึ้นได้ ด้วยสาเหตุต่อไปนี้

- 1) ขาดการดูแลบำรุงรักษาหรือดูแลบำรุงรักษาไม่ถูกต้องตามข้อแนะนำ
- 2) การเสื่อมสภาพจากการใช้งาน เกิดการชำรุดสึกหรอของชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามปกติ
- 3) การชำรุดจากการตก การกระแทก
- 4) การเสื่อมสภาพตามอายุ ได้แก่ การเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ผลิต, เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่อุปกรณ์ภายในบางอย่างจะเสื่อมสภาพตามระยะเวลาแม้ไม่ค่อยได้ใช้งานเครื่องมือนั้นก็ตาม
- 5) การถอดชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องมือแล้วประกอบกลับไม่ถูกต้องครบถ้วนได้ดังเดิม
- 6) เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ตกน้ำ

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ นั้นจะมีการสอบเทียบ เมื่อได้ใช้งานไปถึงระยะเวลาที่กำหนดไว้ หรือเมื่อได้พบว่าเกิดการชำรุด หรือสงสัยว่าอาจเกิดการชำรุดเสียหายกับอุปกรณ์เครื่องมือ เช่น กรณีทำตกหรือกระแทก แล้วแตกหัก บิดงอ หรือพบว่ามีความลักษณะบางอย่างต่างไปจากเดิม

การซ่อมแซมและการสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องมือวัดควรทำโดยผู้มีความชำนาญ เพราะการสอบเทียบอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ นั้นมักต้องทำในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ที่ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีความถูกต้องแม่นยำมาตรวจวัดเพื่อเปรียบเทียบ ต้องใช้เวลามาก จึงควรส่งไปซ่อมแซมหรือสอบเทียบกับหน่วยงานที่มีบริการด้านนี้หรือส่งผู้ผลิตโดยตรง

15.2 การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์

อาคารชลศาสตร์ทุกชนิดทุกประเภทสามารถตรวจวัดคำนวณอัตราการไหลผ่านตัวอาคารนั้นได้ เพราะในการออกแบบต้องใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อกำหนดขนาดมิติอาคารให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำสูงสุดที่จะไหลผ่านไปได้เพียงพอ โดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อส่วนอื่น ๆ ของระบบนั้น ๆ แต่ในทางปฏิบัติจะมีการตรวจวัดคำนวณเฉพาะจากอาคารที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำ, อาคารที่ทำหน้าที่วัดปริมาณน้ำ และอาคารที่มีความสำคัญที่กำหนดให้ต้องมีการตรวจวัดปริมาณน้ำไหลผ่านเท่านั้น อาคารชลศาสตร์ที่มีการตรวจวัดปริมาณน้ำได้แก่

- 1) ในทางน้ำ เช่น คูน้ำ คลอง ห้วย แม่น้ำ
- 2) ฝาย หรือทางระบายน้ำล้น
- 3) ประตูระบายน้ำ
- 4) ท่อระบายน้ำ ที่ใช้ควบคุมปริมาณน้ำในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำ
- 5) อาคารวัดปริมาณน้ำ เช่น ฝายวัดน้ำ รางวัดน้ำ (Flume)

การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์ในเบื้องต้นทำให้ทราบว่าอาคารมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเปลี่ยนไปจากค่าที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่ ถ้าพบว่าเปลี่ยนแปลงก็ต้องทำการสอบเทียบอย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลที่ถูกต้องมาใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำ ซึ่งทำให้สามารถวางแผนและติดตามผลการส่งน้ำหรือระบายน้ำได้อย่างถูกต้อง ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเปลี่ยนแปลงลดต่ำลงมาก ๆ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานอาคารนั้น ก็จะได้พิจารณากำหนดแนวทางในการซ่อมแซมปรับปรุงแก้ไขอาคารนั้นต่อไป หรืออาจกล่าวได้ว่า ผลการสอบเทียบเป็นดัชนีตรวจวัดว่าถึงเวลาปรับปรุง ซ่อมแซมอาคารหรือโครงการแล้วหรือยัง

15.2.1 สาเหตุสำคัญที่ทำให้ต้องสอบเทียบอาคารชลศาสตร์

1) การก่อสร้างที่ต่างไปจากการออกแบบ

การออกแบบเพื่อกำหนดรูปแบบ ขนาด มิติของอาคารชลศาสตร์ชนิดต่าง ๆ ตลอดจนการคำนวณอัตราการไหลผ่านอาคารชลศาสตร์นั้น ส่วนใหญ่เป็นผลที่ได้จากการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์โดยใช้แบบจำลอง แล้วนำผลการศึกษาที่เชื่อถือได้นั้นมา กำหนดเป็นค่ามาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ และกำหนดสมการ ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล เป็นต้น เพื่อใช้คำนวณอัตราการไหลของอาคารนั้น

ในการก่อสร้างถ้าสามารถก่อสร้างได้ถูกต้องครบถ้วนสมบูรณ์ตามรูปแบบ ขนาด มิติ ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานข้อกำหนดทุกประการ การคำนวณอัตราการไหลก็สามารถใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามมาตรฐานกำหนดมาใช้คำนวณได้เลย แต่ในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถสร้างได้เหมือนดังที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นถ้านำค่าตัวแปรตามค่ามาตรฐานมาใช้ในการคำนวณก็就会有ความผิดพลาดเกิดขึ้นได้มาก จึงมีความจำเป็นต้องสอบเทียบเพื่อหาค่าตัวแปรที่เป็นค่าจริงที่ถูกต้องซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของอาคารนั้นมาใช้

2) สภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ของอาคาร

2.1) กรณีอาคารชลศาสตร์ที่ก่อสร้างใหม่ จะเห็นได้ว่าผลการศึกษาและข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานในการออกแบบและการคำนวณอัตราการไหลตามที่กล่าวในข้อ 1) จะทำในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์โดยใช้แบบจำลอง ถ้าเป็นผลการศึกษาทดลองในรางน้ำที่ไม่ได้จำลองสภาพแวดล้อมของพื้นที่จริงด้วย ก็ย่อมมีความแตกต่างผิดพลาดจากสภาพจริงอย่างแน่นอน จึงมีความจำเป็นต้องยังต้องทำการสอบเทียบอาคารนั้นก่อนเสมอ หรือถ้าศึกษาทดลองภายใต้การสร้างสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์จำลองของพื้นที่จริง ผลที่ได้แม้จะยอมรับกันว่ามีความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ก็ยังคงต้องสุ่มสอบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้อง

2.2) กรณีอาคารชลศาสตร์ที่ได้มีการสอบเทียบแล้ว หากเวลาผ่านไปถ้าสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ในบริเวณของอาคารมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก เช่น เกิดการตกถมของตะกอน กรวด ทราย, ทางน้ำหรือพื้นที่เกิดการกัดเซาะ, มีต้นไม้ขึ้นปกคลุม, มีการก่อสร้างอาคารสิ่งปลูกสร้าง ฯลฯ ก็มีความจำเป็นต้องสอบเทียบอาคารนั้น

3) การเปลี่ยนแปลง เสื่อมสภาพ ชำรุดเสียหายของตัวอาคาร

เมื่อใช้งานอาคาร ไปนานๆ ย่อมเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง, โครงสร้างชำรุดเสียหาย, เกิดการทรุดตัว หรือมีการซ่อมแซมปรับปรุงที่ทำให้สภาพของอาคารต่างไปจากเดิม ย่อมมีความจำเป็นต้องสอบเทียบอาคารนั้นเพื่อให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ถูกต้อง

15.2.2 หลักการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์

การหาอัตราการไหลผ่านอาคารชลศาสตร์นั้น จะวัดความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำของอาคารในตำแหน่งที่กำหนดแล้วนำมาหาค่า ซึ่งทำได้ 2 รูปแบบคือ (1) การคำนวณโดยใช้สมการและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอาคารนั้น ๆ (2) การนำค่าระดับน้ำมาเทียบหาอัตราการไหลจาก H-Q table หรือ Calibration table ที่เป็นผลจากการสอบเทียบที่ได้จัดทำเอาไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นการสอบเทียบจึงต้องพิจารณาจาก 2 รูปแบบดังกล่าว

1) สอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอาคาร เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณของอาคารนั้น (ด้วยสมการ ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบ หรือค่าที่ได้จากการสอบเทียบในครั้งก่อน) กับอัตราการไหลผ่านอาคารที่ตรวจวัดได้จริง (ด้วยการใช้เครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการที่เหมาะสมตรวจวัดด้านท้ายน้ำของอาคารนั้น) ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร แล้วนำผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมากำหนดหรือปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลให้เป็นค่าที่ถูกต้องเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

2) การสอบเทียบผลจากการ Calibrate เดิม เป็นการตรวจสอบเปรียบเทียบอัตราการไหลจาก H-Q table หรือ Calibration table (อาจนำไปทำเป็น Rating curve หรือ H-Q curve หรือ Calibration curve แล้วแต่จะเรียก) ที่ได้จากการตรวจวัดหรือสอบเทียบก่อนหน้านี้ กับค่าอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจริงในครั้งนี้

15.2.3 ขั้นตอนการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์

1) ตรวจสอบข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของอาคารนั้น

อาคารนั้นใช้มาตรฐานใดมาออกแบบ การคำนวณอัตราการไหลใช้สมการและค่าสัมประสิทธิ์การไหลอย่างไร รวมทั้งมี Calibration table หรือ Rating curve หรือไม่ โดยข้อมูลข้างต้นอาจจะระบุไว้ในแบบก่อสร้าง หรืออาจดูได้จากรายการคำนวณในการออกแบบ ทั้งนี้ เพราะจะสามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบได้ถูกต้อง และทำให้การสอบเทียบทำได้รวดเร็ว

2) การเลือกวิธีการสอบเทียบ

2.1) การสอบเทียบในพื้นที่จริง

2.2) การสอบเทียบในห้องปฏิบัติการโดยการใช้แบบจำลองอาคาร ที่อาจต้องพิจารณาว่าต้องจำลองสภาพทางภูมิศาสตร์ของอาคารด้วยหรือไม่ วิธีนี้จะใช้กรณีที่มีการสอบเทียบจริงในพื้นที่ทำไม่ได้

3) การกำหนดช่วงหรือย่านของการสอบเทียบ และจำนวนการตรวจวัดซ้ำ

ช่วงหรือย่านของการสอบเทียบในที่นี้หมายถึงขอบเขตที่จะตรวจวัดอัตราการไหล ได้แก่ ช่วงของระดับน้ำสูงสุดถึงต่ำสุดเป็นเท่าใด ระยะการเปิดบานระบายเท่าใดบ้าง ฯลฯ ส่วนจำนวนการตรวจวัดซ้ำหมายถึงจำนวนครั้งที่ต้องตรวจวัดค่าใด ๆ ที่มีค่าตัวแปรเหมือนกัน เพื่อเป็นการตรวจยืนยันว่าการตรวจวัดมีความถูกต้องเชื่อถือได้

การสอบเทียบนั้นอาจไม่จำเป็นต้องดำเนินการให้คลุมตลอดช่วงหรือย่านของการใช้งานอาคารนั้น เพราะหากผลการสอบเทียบสามารถยืนยันได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลหรือค่าอัตราการไหลที่ตรวจวัดได้จริงนั้น เมื่อเทียบกับค่าที่ใช้อยู่เดิมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นสัดส่วนที่ค่อนข้างแน่นอน ก็สามารถนำมาพิจารณาใช้ปรับปรุงเป็นค่าใหม่ได้ตลอดย่านการใช้งานโดยไม่ต้องตรวจวัดครบทั้งหมด

4) การเลือกเครื่องมืออุปกรณ์มาตรฐานที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการสอบเทียบ

ต้องพิจารณาเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีว่า มีความเชื่อถือได้ มีความเหมาะสม มีจำนวนเพียงพอกับปริมาณงานที่จะใช้ปฏิบัติงานครั้งนั้นหรือไม่ ทั้งนี้รวมถึงมีเจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญเพียงพอด้วย

กรณีการสอบเทียบอาคารค่อนข้างใหญ่จะมีปริมาณงานในการตรวจวัดมาก จึงต้องเลือกชนิดของเครื่องมือตรวจวัดที่เหมาะสม และมีจำนวนที่เพียงพอซึ่งรวมถึงเจ้าหน้าที่ด้วย ยิ่งถ้าจุดที่ตรวจวัดมีอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเร็วอาจต้องใช้เครื่องมือแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตรวจวัดอัตราการไหลได้โดยตรงที่ทำงานได้อย่างรวดเร็ว

5) ทำการสอบเทียบตามวิธีที่ได้เลือกไว้ ในช่วงหรือย่านของการสอบเทียบที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน หรือตามที่ได้วางแผนไว้

6) รายงานผลการสอบเทียบ

การสอบเทียบเป็นงานหรือกิจกรรมที่ต้องมีการวางแผนล่วงหน้าโดยใช้ข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องทุกด้านที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ตรงตามที่กำหนดหรือคาดหวังไว้มาประกอบกัน ผู้รับผิดชอบต้องมีความมุ่งมั่นที่จะดำเนินการ

ในบางประเทศ เช่น อเมริกา อังกฤษ จะมีมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์แต่ละชนิดกำหนดเอาไว้ให้ปฏิบัติว่า จะต้องสอบเทียบเมื่อใด ด้วยขั้นตอนวิธีการอย่างไร ซึ่งส่วนใหญ่จะว่าจ้างบริษัทหรือหน่วยงานที่มีความเชี่ยวชาญ (Outsource) มาดำเนินการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์ต่าง ๆ ที่มีจำนวนมาก

15.3 การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์แต่ละชนิด

รายละเอียดวิธีการขั้นตอนการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์แต่ละชนิดนั้นมีมาก จึงขอแนะนำให้ศึกษาจากหนังสือ เอกสาร คู่มือ บทความ ที่เกี่ยวข้องโดยตรง ได้แก่

1) คู่มือคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานที่สร้างเสร็จแล้ว. กรมชลประทาน. 2523. โดย ฉลอง เกิดพิทักษ์ และชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ

2) เอกสารการฝึกอบรมที่ใช้ในหลักสูตรการคำนวณปริมาณน้ำ กรมชลประทาน เรียบเรียงโดย บุญยง ปิยะศิรินนท์ ที่ประกอบด้วย คู่มือทางด้านเทคนิคแบบเปรียบเทียบอาคาร, เอกสารการพัฒนาสูตรการปรับเทียบอาคาร, คู่มือแบบฟอร์มสำรวจน้ำ, บทความสูตรการหาพื้นที่หน้าตัดช่องเปิดของท่อแบบต่างๆ ฯลฯ

3) การจัดการน้ำในกลุ่มน้ำของประเทศไทย โดย ฉลอง เกิดพิทักษ์

4) รายงานการสอบวัดอาคารควบคุมน้ำโครงการศึกษาการจัดการในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา. กรมชลประทาน. 2540.

ฯลฯ

ในที่นี้จะนำเสนอในส่วนของประเด็นที่ไม่มีการกล่าวในหนังสือต่าง ๆ ที่ส่วนหนึ่งเป็นข้อมูลได้จากผู้มีประสบการณ์ในการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์ ต่อไปนี้

15.3.1 ทางน้ำธรรมชาติ

โดยทั่วไปแล้วทางน้ำธรรมชาติสายที่สำคัญไม่ว่าจะเป็นลำห้วยหรือแม่น้ำ จะมีการติดตั้งสถานีวัดปริมาณน้ำในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งจะมีการตรวจวัดหลายรูปแบบ ได้แก่

1) สถานีที่มีการสำรวจเก็บข้อมูลอัตราการไหลเอาไว้แล้วสร้างเป็น H-Q table หรือ Rating curve เพื่อใช้เทียบหาอัตราการไหลจากค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดโดยเจ้าหน้าที่

2) สถานีลักษณะรูปแบบแรก แต่ตรวจวัดระดับน้ำโดยเครื่องมืออัตโนมัติที่รายงานข้อมูลผ่านระบบการสื่อสารทางไกลแทนเจ้าหน้าที่

3) สถานีที่ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดระดับน้ำและตรวจวัดอัตราการไหลตลอดจนตรวจวัดข้อมูลอื่นๆ เช่น คุณภาพน้ำ แล้วรายงานข้อมูลผ่านระบบการสื่อสารทางไกล การตรวจวัดอาจเป็นแบบตามเวลาที่กำหนด หรือตรวจวัดต่อเนื่องตลอดเวลา (Real time)

สิ่งที่ต้องคอยติดตามตรวจสอบ

- 1) การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ ได้แก่ เกิดการกัดเซาะพังทลาย เกิดตะกอนตกถม ทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลเปลี่ยนแปลง จะเกิดปัญหากับสถานีที่ใช้ H-Q table หรือ Rating curve เทียบหาอัตราการไหล กรณีเช่นนี้ต้องสอบเทียบหาค่าอัตราการไหลใหม่
- 2) การมีสิ่งปลูกสร้างปิดขวางทางน้ำ เช่น การสร้างทำนบหรือฝายในตำแหน่งที่มีอิทธิพลต่อการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำ ก็จะทำให้การตรวจวัดผิดพลาด ที่พบบ่อยคือการสร้างฝายปิดกั้นด้านท้ายน้ำของสถานีตรวจวัด ทำให้ระดับน้ำถูกกดขึ้นสูง การเทียบอัตราการไหลจาก H-Q table หรือ Rating curve จึงมีความผิดพลาดมาก (ฤดูแล้งที่ไม่มีน้ำไหลแล้วแต่ระดับน้ำยังอยู่สูง) กรณีนี้ต้องใช้อัตราการไหลที่ผ่านฝายแทน หรือย้ายจุดตรวจวัดให้พ้นจากอิทธิพลจากฝายดังกล่าวออกไป
- 3) กรณีใช้การคำนวณโดยตรงโดยใช้สมการ $Q = (1/n) A R^{2/3} S^{1/2}$ ตามวิธี Slope-Area method ที่ค่าตัวแปร A คือพื้นที่หน้าตัดการไหลของทางน้ำ S คือลาดของท้องทางน้ำ และ n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำ มีโอกาสเปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ที่จุดตรวจวัด ค่าเหล่านี้จึงต้องคอยตรวจสอบอยู่เสมอ

15.3.2 ประตุนระบายน้ำ ฝายระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบาย (อาคารใหญ่ที่ห้วยงาน)

การสอบเทียบในพื้นที่จริงนั้นจะต้องมีการวางแผนในการดำเนินการไว้ล่วงหน้ามาอย่างดีเพราะมีตัวแปรต่าง ๆ มากเกี่ยวข้องมากมาย ผู้สอบเทียบต้องแก้ปัญหาให้สอดคล้องกับสถานการณ์และผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในขณะนั้น ซึ่งอาคารหลักขนาดใหญ่ที่ห้วยงานได้แก่ ประตุนระบายน้ำ หรือฝายระบายน้ำที่ควบคุมด้วยบานระบาย จะเป็นตัวอย่างได้เป็นอย่างดีที่จะนำมาอธิบาย ดังนี้

- 1) อาคารที่ควบคุมด้วยบานระบายจะมีตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณาซึ่งจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน ได้แก่

- 1.1) ระดับน้ำด้านเหนือน้ำ ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับความเพียงพอของปริมาณน้ำที่เก็บกักเอาไว้ด้วย ต้องคำนึงว่าการระบายน้ำออกไปนั้น ต้องมีเหตุมีผลอันสมควร และต้องไม่กระทบต่อปัจจัยอื่น ๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไปด้วย ส่วนการสอบเทียบเป็นผลพลอยได้จากการระบายน้ำในช่วงเวลานั้น เพราะการสอบเทียบอาคารขนาดใหญ่จะใช้เวลาค่อนข้างมากซึ่งต้องมีน้ำถูกระบายออกไปจำนวนมาก

1.2) ฤดูกาลและความจำเป็นในการระบายน้ำ ในฤดูฝนก่อนช่วงน้ำหลากมักมีการพร่องน้ำ และมักมีการระบายน้ำส่วนเกินในช่วงน้ำหลาก หรือต้องระบายน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ของทางน้ำหรือลุ่มน้ำ กรณีเหล่านี้ล้วนเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมแก่การสอบเทียบ

1.3) สภาพพื้นที่ด้านท้ายน้ำ ต้องไม่ทำให้เกิดผลกระทบไปท่วมพื้นที่ด้านท้ายจนเสียหาย หรือเกิดน้ำท่วมจนไม่สามารถปฏิบัติงานสอบเทียบได้

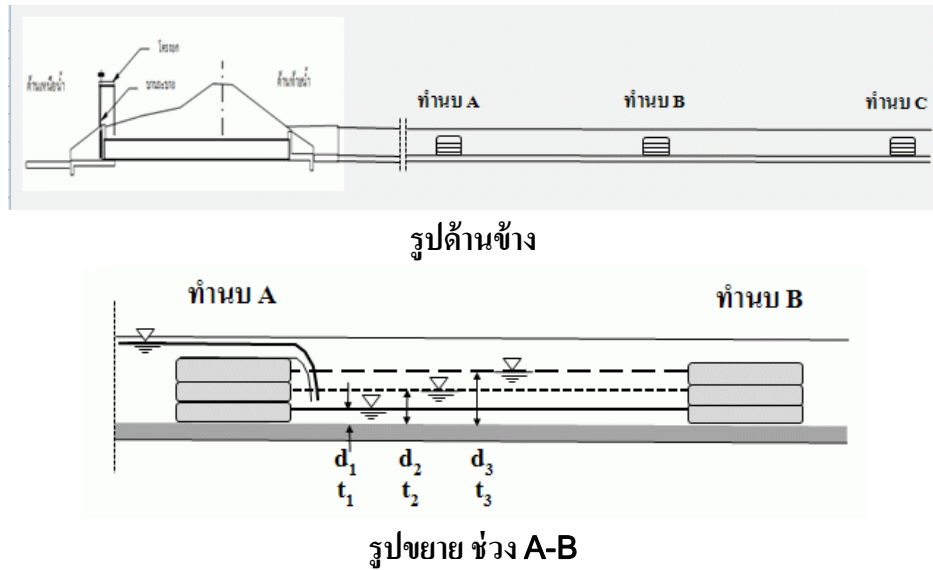
1.4) ช่วงหรือย่านการตรวจวัดสอบเทียบ ได้แก่ ช่วงของระดับน้ำด้านเหนือน้ำกับช่วงของระยะการเปิดบานระบาย ต้องกำหนดให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และปัจจัยอื่นๆ เช่น การระบายน้ำเพื่อสอบเทียบต้องไม่มากเกินไปจนเกินกว่าความจำเป็นที่ต้องระบายออกไป และทำให้เกิดน้ำท่วมพื้นที่ด้านท้ายน้ำ

2) การสอบเทียบไม่จำเป็นต้องทำให้เสร็จสมบูรณ์ตลอดช่วงหรือย่านการตรวจวัดในคราวเดียว ต้องพิจารณาความเหมาะสมในด้านต่างๆ จากตัวแปรตามข้อ 1) ที่กล่าวแล้ว และไม่จำเป็นต้องสอบเทียบให้คลุมตลอดย่านของระดับน้ำและทุกระยะการเปิดบาน เพราะในทางปฏิบัติแล้วจะมีการใช้งานอาคารผ่านการควบคุมในบางช่วงหรือบางย่านเท่านั้น เช่น การพร่องน้ำล่วงหน้าและระบายน้ำออกเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อหัวงานในช่วงฤดูฝนเมื่อมีระดับน้ำอยู่ในขอบเขตของช่วงระหว่างระดับน้ำเก็บกักกับระดับน้ำสูงสุด และระยะเปิดบานสูงสุดต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดน้ำท่วมพื้นที่ด้านท้ายน้ำ

15.3.3 ประตุน้ำ ท่อระบายน้ำ (ในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำ)

การสอบเทียบอาคารควบคุมในระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำ ถ้าไม่มีปัญหาเรื่องปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้จะสอบเทียบเมื่อไรก็ได้ แต่มักดำเนินการเมื่อมีการส่งน้ำ จะได้ไม่สูญเสียน้ำไปโดยไม่เกิดประโยชน์ สามารถปรับระยะเปิดบานคลุมตลอดช่วงหรือย่านการสอบเทียบได้ ทั้งนี้ต้องระวังไม่ให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่เพาะปลูกด้วย

กรณีที่ระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำเป็นคลองคาคอนกรีตไม่ใหญ่มาก การตรวจวัดปริมาณน้ำอาจตรวจวัดปริมาตรเทียบกับเวลา แทนการใช้เครื่องมือวัดน้ำก็ได้ พิจารณารูปที่ 15-1 โดยการใช้กระสอบทรายปิดกันเป็นท่อบนในคลองด้านท้ายอาคารเป็นช่วงๆ (ท่อบน A, B และ C) ห่างกันพอสมควรให้ระดับหลังท่อบนต่ำกว่าระดับ Free board ของคลองประมาณ 5-10 ซม. แต่ละช่วงคือ A-B และ B-C จะใช้วัดปริมาตรของน้ำ การตรวจวัดให้วัดระดับน้ำในแต่ละช่วงก่อน ช่วง A-B วัดระดับน้ำก่อนเป็น d_1 (ถ้ายังไม่มีน้ำ $d_1 = 0$) จากนั้นเปิดน้ำผ่านอาคารออกมา เริ่มจับเวลาเป็น t_1 เมื่อน้ำเริ่มล้นข้ามท่อบน A ออกไป เมื่อน้ำเข้ามาในช่วง A-B พอสมควร



รูปที่ 15-1 การตรวจวัดอัตราการไหลโดยการตรวจวัดปริมาตรเทียบกับเวลา

แล้ว วัดความลึกเป็น d_2 พร้อมกันกับอ่านเวลาเป็น t_2 เมื่อน้ำเพิ่มระดับขึ้นอีกพอสมควรแล้ว วัดความลึกเป็น d_3 พร้อมกันกับอ่านเวลาเป็น t_3 ทำลักษณะนี้จนระดับน้ำในช่วง A-B ใกล้เคียงระดับหลังทำนบ A หรือ B จากนั้นไปตรวจวัดในช่วง B-C แบบเดียวกับที่วัดในช่วง A-B ที่กล่าวข้างต้น เมื่อระบายน้ำที่ขังอยู่ออกไปก็สามารถตรวจวัดได้อีก วิธีการตรวจวัดนี้สามารถใช้ตรวจสอบอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำได้เป็นอย่างดี

เมื่อ

$$V_{d1} = \text{ปริมาตรของน้ำคิดจากความลึก } d_1$$

$$V_{d2} = \text{ปริมาตรของน้ำคิดจากความลึก } d_2$$

$$V_{d3} = \text{ปริมาตรของน้ำคิดจากความลึก } d_3$$

$$t_1 = \text{เวลาที่ปริมาตรน้ำเป็น } V_{d1}$$

$$t_2 = \text{เวลาที่ปริมาตรน้ำเป็น } V_{d2}$$

$$t_3 = \text{เวลาที่ปริมาตรน้ำเป็น } V_{d3}$$

$$Q_{1-2} = \text{อัตราการไหลในช่วงเวลา } t_1 - t_2$$

$$Q_{2-3} = \text{อัตราการไหลในช่วงเวลา } t_2 - t_3$$

ดังนั้น

$$Q_{1-2} = (V_{d2} - V_{d1}) / (t_2 - t_1)$$

$$Q_{2-3} = (V_{d3} - V_{d2}) / (t_3 - t_2)$$

หรือ

$$[Q_{n-(n+1)} = (V_{d(n+1)} - V_{dn}) / (t_{(n+1)} - t_n)]$$

15.3.4 ฝ่ายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น (ไม่มีบานควบคุม)

ฝ่ายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น จะตรวจวัดสอบเทียบเมื่อมีน้ำล้นข้ามสันออกไป โดยมีสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ที่ด้านท้ายน้ำเกิดน้ำท่วมหรือมีกระแสน้ำรุนแรงจนตรวจวัดไม่ได้หรือไม่ โดยมีช่วงหรือย่านการตรวจวัดคือระดับน้ำเหนือระดับสันฝายสันฝาย ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงไป คือ การตกจมของตะกอนหน้าอาคาร และการมีวัชพืชมาริดค้ำปกคลุมพื้นด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำของอาคาร

15.3.5 อาคารวัดน้ำ ฝ่ายวัดน้ำ และรางวัดน้ำ

กรณีทางน้ำมีขนาดใหญ่อาคารวัดน้ำมีขนาดใหญ่ อาจตรวจวัดเมื่อมีการส่งน้ำจะได้ไม่เสียน้ำไปโดยเปล่าประโยชน์ แต่มีข้อควรพิจารณาในกรณีอัตราการไหลน้อย ๆ เครื่องมือวัดกระแสน้ำที่มีอยู่สามารถตรวจวัดได้หรือไม่

การสอบเทียบอาคารชลศาสตร์นั้นจะเป็นสิ่งยากลำบากสำหรับผู้เริ่มดำเนินการในครั้งแรก ๆ ดังนั้นจึงต้องเห็นความสำคัญในการสอบเทียบ มีความมุ่งมั่นตั้งใจที่จะทำให้สำเร็จ และสิ่งที่สำคัญคือต้องมีผู้ที่มีประสบการณ์มีความเชี่ยวชาญคอยสนับสนุนให้คำแนะนำ ผู้บังคับบัญชาต้องให้ความสำคัญสนับสนุนการอบรมให้ความรู้ สนับสนุนเครื่องมือที่ทันสมัยที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การดำเนินการจึงจะประสบความสำเร็จด้วยดี

สิ่งสำคัญในการสอบเทียบอาคารชลศาสตร์จริงในสนามนั้นคือต้องมีการวางแผนที่ดี เพราะมีข้อจำกัดหลายอย่างที่จะเป็นอุปสรรค ทำให้ไม่สามารถการดำเนินงานได้ตามที่กำหนดไว้ เช่น ข้อจำกัดเรื่อง Head ของน้ำ, ปริมาณน้ำที่มีจำกัด, การระบายน้ำส่งผลกระทบต่อพื้นที่ด้านท้ายน้ำ เป็นต้น การดำเนินการครั้งหนึ่งๆ จึงอาจตรวจสอบได้ค่าเดียว หรือช่วงเดียว ไม่สามารถตรวจสอบได้ครบตลอดย่านของการใช้งาน Operate อาคารนั้น หรืออาจล้มเหลวต้องหยุดการปฏิบัติงานกลางคันก็ได้ ดังนั้นอาคารขนาดใหญ่อาจต้องใช้เวลาในการดำเนินการต่อเนื่องยาวนาน บางแห่งอาจใช้เวลาเป็น 10 ปี จึงจะได้ข้อมูลครอบคลุมตลอดทุกช่วงของการ Operate อาคาร

บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน. 2553. อภิธานศัพท์เทคนิค ด้านการชลประทานและการระบายน้ำ ฉบับปรับปรุง
พุทธศักราช 2553. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับ
ลิชิ่ง จำกัด (มหาชน).
- กัญญา อินเกลี้ยง, ปริญญา กมลสินธุ์ และสมเกียรติ อภิพัฒน์วิศว์. 2539. การศึกษาฝายสันกว้างรูป
ตัววี (The V-Shaped Broad Crested Weir). กลุ่มงานชลศาสตร์ ส่วนวิจัยและ
พัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน. นนทบุรี.
- กิริติ ลีวัจนกุล. 2534. **ชลศาสตร์ (Hydraulics)**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรม
เทคโนโลยีสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์. กรุงเทพฯ:บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น
จำกัด.
- กิริติ ลีวัจนกุล. 2539. วิศวกรรมชลศาสตร์ **Hydraulic Engineering เล่มที่ 1**. ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์
มหาวิทยาลัยรังสิต.
- กิริติ ลีวัจนกุล. 2539. วิศวกรรมชลศาสตร์ **Hydraulic Engineering เล่มที่ 2**. ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์
มหาวิทยาลัยรังสิต.
- คณะกรรมการศึกษาศักยภาพเบื้องต้น โครงการพัฒนาฝายยาง. 2547. รายงานการศึกษา
ศักยภาพเบื้องต้นโครงการพัฒนาฝายยาง. กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวง
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร.
- ฉลอง เกิดพิทักษ์ และชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ. การสอบเทียบปริมาณน้ำผ่านอาคารชลศาสตร์ใน
โครงการชลประทานน้ำอูน. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ. 2545. วิศวกรรมชลศาสตร์ **Hydraulic Engineering**. ภาควิชา
วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- ชินวัฒน์ พรหมมาณพ, นพคุณ ไสมสิน และพยอม รัตนมณี. 2551. การคำนวณปริมาณน้ำผ่าน
ประตูระบายน้ำเขื่อนปัตตานี Calibration of Pattani Gated Spillway. บทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9
พฤษภาคม 2551.

- ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล. 2527. การไหลในทางน้ำเปิด. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ, ฟิสิกส์เซนเตอร์การพิมพ์.
- เชษฐพงศ์ นันทิทรภ. การศึกษาชลศาสตร์การไหลด้วยแบบจำลองทางกายภาพของฝายแล็บบิรินซ์
แม่ฮ่องน้อย จังหวัดลำพูน. วิทยานิพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร
- นพคุณ โสมสิน และ พิเชษฐ์ วรณ โชติกุล. การคำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำ เขื่อนป่าสัก
ชลสิทธิ์ **Calibration of Pasak Gated Spillway**. สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ,
กรมชลประทาน. กรุงเทพมหานคร.
- ปราโมทย์ ไม้กลัด. 2524. คู่มืองานเขื่อนดินขนาดเล็กและฝาย. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรม
ชลประทาน. นนทบุรี.
- พงษ์ศักดิ์ เสริมสาธน์สวัสดิ์ และ ประมวล เสริมสาธน์สวัสดิ์. กลศาสตร์ของของไหล **FLUID
MECHANICS**. โครงการตำราเรียนฟิสิกส์เซนเตอร์. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์
เซนเตอร์.
- วิบูลย์ บุญยธกุล. 2526. หลักการชลประทาน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน. มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์เอเชีย.
- ศราวุธ นันทวิบูลย์. คุณลักษณะสำหรับท่อคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก
(**Specifications for Reinforced and Plain Concrete Pipe**). บทความ
วิชาการ. บริษัท เจริญกิจ เออาร์ จำกัด. นครสวรรค์.
- สันติ ทองพำนัก. 2534. การไหลในทางน้ำเปิด (**Flow in Open Channel**). ภาควิชา
วิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
กำแพงแสน. นครปฐม.
- สุรพล ชุนหวัด. การออกแบบชลศาสตร์ฝายหยัก (**Hydraulic Design of Labyrinth Weir**).
บทความวิชาการ.
- สุวัฒนา จิตตดากร. 2544. อาคารชลศาสตร์ เล่ม 2/2. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

- A. J. Aisenbrey, Jr. , R. B. Hayes, H. J. Warren, D. L. Winsett and R. B. Young. 1978. **Design of Small Canal Structures**. United States Department of The Interior, Bureau of Reclamation. Denver. Colorado.
- A. J. Clemmens, T.L. Wahl, M.G. Bos and J.A. Replogle. 2001. **Water Measurement with Flumes and Weirs**. Publication 58. International Institute for Land Reclamation and Improvement / ILRI. The Netherlands.
- A.D. Ghare, V.A. Mhaisalkar and P.D. Porey, **An Approach to Optimal Design of Trapezoidal Labyrinth Weirs**, World Applied Sciences Journal 3, IDOSI Publications, 2008.
- D. B. Kraatz and I. K. Mahajan. 1982. **Small Hydraulic structures, Irrigation and Drainage Paper 26/1**. Second Printing. Water Resources Development and Management Service. Land and Water Development Division. Food and Agriculture Organization of The United Nations. ROME.
- BJÖRN MARGEIRSSON. 2007. **Computational Modeling of Flow over a Spillway In Vatnsfellsstífla Dam in Iceland**. Department of Applied Mechanics. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg. Sweden.
- D. B. Kraatz and I. K. Mahajan. 1982. **Small Hydraulic structures. Irrigation and Drainage Paper 26/2**, Second Printing. Water Resources Development and Management Service. Land and Water Development Division. Food and Agriculture Organization of The United Nations. ROME.
- Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. 1992. **HYDRAULIC DESIGN OF SPILLWAYS**. Engineer Manual 1110-2-1603. Washington.DC.
- Food and Agriculture Organization of The United Nations. 2001. **Small dams and weirs in earth and gabion materials**. ROME.
- G. Peter. 1996. **The discharge and run off calculation of weirs under the consideration of dynamic flows**. Fachhochschule Magdeburg. Fachbereich Wasserwirtschaft Virchowstraße 24, 39104 Magdeburg. Fed. Rep. of Germany,
- Gary P. Merkley. 2004. **Irrigation Conveyance & Control: Flow Measurement & Structure Design, Lecture Notes BIE 5300/6300**. Biological & Irrigation Engineering Department Utah State University. Logan. Utah.
- H. Chanson. 1997. **A Review of the Overflow of Inflatable Flexible Membrane Dams. Vol. CE39. No.2 and 3**. Department of Civil Engineering. The University of Queensland. Australia.
- H. Chanson. 1998. **HYDRAULICS OF RUBBER DAM OVERFLOW : A SIMPLE DESIGN APPROACH**. (Paper). Department of Civil Engineering. The University of Queensland. AUSTRALIA.

IRRIGATION TRAINING AND RESEARCH CENTER. **ITRC Weir Stick**. ITRC Report No. R 03-008. California Polytechnic State University. San Luis Obispo. California.

James R. Villemonte. 1947. **Submerged-Weir Discharge Studies**, Engineering News-Record. December 25, 1947.

Larry W. Mays, **HYDRAULIC DESIGN HANDBOOK**, McGraw-Hill, USA, 1999.

M. Hanif Chaudhry. 1981. **Open-Channel Flow**. New Jersey. Prentice-Hall. Inc.

M.G. Bos. 1989. **Discharge measurement structures. Publication 20**. Third revised edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. The Netherlands.

Mahonri Lee Williams, J. Mohan Reddy and Victor Hasfurther. 1993. **Calibration of Long Crested Weir Discharge Coefficient**. Wyoming Water Resources Center. University of Wyoming. Laramie. Wyoming.

Mark Peterson and C.F. Cromwell, Jr.. 1993. **Measuring Irrigation Water in a Ditch, Stream or Reservoir**. Department of Agricultural Engineering. University of Missouri.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2007. **Sampling Guide for Environmental Analysis: Booklet 7 - FLOW MEASUREMENT METHODS IN OPEN CHANNELS**. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.

Ministry of Environment. Lands & Parks. Resources Inventory Branch. 1998. **Manual of Standard Operating Procedures for Hydrometric Surveys in British Columbia**, Version 1.1. Aquatic Inventory Task Force. Resources Inventory Committee. British Columbia.

Ministry of Environment, Science and Information Branch. 2009. **Manual of British Columbia Hydrometric Standards**. Version 1.0. Resources Information Standards Committee. British Columbia.

P. Novak, A.I.B. Moffat, C. Nalluri and R. Narayanan. 2004. **Hydraulic Structures**. Third Edition. Taylor & Francis e-Library.

Paulo C.F. Erbsti. 2004. **Design of Hydraulic Gates**. Krips The Print Force. Meppel. Netherland.

R. M. Khatsuria. 2005. **Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators**. Marcel Dekker. New York. USA.

Redahegn (Redi) Sileshi. 2009. **Flow Over a Crump Weir**, (Paper). Water Resources Engineering Laboratory. Department of Civil Construction and Environmental Engineering. The University of Alabama. USA.

Rigo Philippe et al.. 2006. **Design of Movable Weirs and Storm Surge Barriers**. The PIANC- INCOM WG26. Brussels.

- S. E. RANTZ and others. 1983. **Measurement and Computation of Streamflow : Volume 1. Measurement of Stage and Discharge.** Second printing. Geological Survey Water-Supply Paper 2175. WASHINGTON. United States Government Printing Office.
- S. E. RANTZ and others. 1983. **Measurement and Computation of Streamflow : Volume 2. Measurement of Discharge.** Second printing. Geological Survey Water-Supply Paper 2175. WASHINGTON. United States Government Printing Office
- Science Applications International Corporation Environment and Health Sciences Group Idaho Falls, ID 8340. 2001. **Performing Quality Flow Measurements at Mine Sites.** Sustainable Technology Division. National Risk Management Research Laboratory. Cincinnati. Ohio.
- Texas Department of Transportation. 2004. **Hydraulic Design Manual.** The Design Division (DES). Texas.
- Tricoli Dario. 2004. **USE OF GABIONS IN SMALL HYDRAULIC WORKS.** www.tricardi.it. ITALY.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2002. **HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual Version 3.1.** USA.
- United States Department of The Interior, Bureau of Reclamation. 1987. **Design of Small Dams.** Third Edition. A Water Resources Technical Publication. USA.
- United States Department of The Interior, Bureau of Reclamation. 2001. **WATER MEASUREMENT MANUAL.** Third Edition 1997 Revised Reprinted 2001. A Water Resources Technical Publication. USA.
- Ven Te Chow. 1959. **Open-Channel Hydraulics.** USA. McGraw-Hill Inc.
- Water, Air and Climate Change Branch Ministry of Water, Land and Air Protection Province of British Columbia. 2003. **British Columbia Field Sampling Manual.**
- Zohrab Samani and Esteban Herrera. 1996. **A Low-Cost Water Measuring Device.** Guide M-226 PH-4-205. Department of Civil, Agricultural and Geological Engineering. College of Engineering. New Mexico State University.
- Zohrab Samani, Henry Magallanez, Rhonda and Skaggs. 2006. **A Simple Flow Measuring Device for Farms.** New Mexico State University.



คำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘

ที่ ๑๐ /๒๕๕๔

เรื่อง แต่งตั้งผู้บริหารจัดการความรู้ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) และ
ทีมงานจัดการความรู้ (Knowledge Management Team หรือ KM Team)
ของสำนักชลประทานที่ ๘

เพื่อให้การดำเนินการด้านการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เป็นไปด้วยความ
เรียบร้อยครอบคลุมกระบวนการจัดการความรู้เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์กรมชลประทาน สนับสนุนการ
พัฒนาคุณภาพการบริหารจัดการภาครัฐ จึงให้ยกเลิกคำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘ ที่ ๓๒ / ๒๕๕๓ ลงวันที่ ๓๐
เมษายน ๒๕๕๓ และแต่งตั้งผู้บริหารจัดการความรู้ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) และ ทีมงาน
จัดการความรู้ (Knowledge Management Team หรือ KM Team) ของสำนักชลประทานที่ ๘ ดังนี้

๑. ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘ เป็นผู้บริหารจัดการความรู้ (Chief Knowledge Officer หรือ
CKO) โดยมีอำนาจหน้าที่ความรับผิดชอบ ดังนี้

๑. อำนาจการ กำกับ ดูแล และติดตามผลการดำเนินงานของทีมงานจัดการความรู้
ของสำนักชลประทานที่ ๘ (Knowledge Management Team หรือ KM Team)
๒. พิจารณาอนุมัติกำหนดขอบเขต เป้าหมายและแนวทางการจัดการความรู้และแผนการจัดการ
ความรู้ของสำนักให้สอดคล้องกับบริบทของสำนัก และเป็นไปตามแผนจัดการความรู้ของ
กรมชลประทาน
๓. พิจารณาสับสนุนทรัพยากรและงบประมาณในการดำเนินงานด้านการจัดการความรู้ของ
สำนักชลประทานที่ ๘
๔. แต่งตั้งทีมงาน / คณะทำงาน / คณะกรรมการ / เพิ่มเติม เพื่อมอบหมายให้รับผิดชอบการ
ดำเนินงานกิจกรรมการจัดการความรู้

๒. ทีมงานจัดการความรู้ (Knowledge Management Team หรือ KM Team) ของสำนัก
ชลประทานที่ ๘ มีองค์ประกอบและอำนาจหน้าที่ ดังนี้

องค์ประกอบ

๑. นายทวีชัย	ละอองนวลพานิช	ผวศ.ชป. ๘	ประธานทีมงาน
๒. นายไพศาล	วงศ์ฟูเพื่องขจร	ผปก.ชป. ๘	รองประธานทีมงาน
๓. นายสมชาย	พันชนะ	ผบร.ชป. ๘	รองประธานทีมงาน
๔. นายสมคิด	ทรัพย์วรารณ	ผคก.ชป. ๘	รองประธานทีมงาน
๕. นายไพฑูรย์	ไชยภูมิสกุล	ผอ.คป.ศรีสะเกษ	ทีมงานจัดการความรู้
๖. นายกิตติกุล	เสภาศิริภรณ์	ผอ.คป.ทุ่งสัมฤทธิ์	ทีมงานจัดการความรู้
๗. นายวุฒิ	วิระเศณี	ผอ.คส.๒/๐๘	ทีมงานจัดการความรู้
๘. ผอน. ภาค.ตอน. ตอนล่าง			ทีมงานจัดการความรู้
๙. นายประหยัด	กมลพัฒนะ	กอบ.ชป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๑๐. นายอนุชา	ยังตรง	ผวศ.คป. ลำปลายมาศ	ทีมงานจัดการความรู้
๑๑. นายคำรณ	เดียดระกูล	กพค.ชป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้

/๑๒. นายวิวัฒน์.....

- ๒ -

๑๒. นายวิวัฒน์	ฐิติรัตน์อัศว	ผตว.ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๑๓. นายสมบัติ	พลະศุณย์	ผจ. ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๑๔. นายปราโมทย์	พลพัฒน์นาวิ	ผจน.คป. บุรีรัมย์	ทีมงานจัดการความรู้
๑๕. นายธีทัต	สุขเกษม	ผจน.คป.ลำพระเพลิง	ทีมงานจัดการความรู้
๑๖. นายสมชาย	อังศิริลาวัลย์	กส.๓/๑/๐๘	ทีมงานจัดการความรู้
๑๗. นางอรุษา	อิศรางกูร ณ อยุธยา	ผท.ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๑๘. น.ส. นภาพรรณ	เดชะพิริยะกุล	จก.ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๑๙. นายรังสรรค์	ทองแสน	ผชน.ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๒๐. นายวัชร	ดางาม	ผสส.ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๒๑. นายโสฬจน์	จันทวาด	ผส.ขป. ๘	ทีมงานจัดการความรู้
๒๒. นายเนรมิต	เทพนอก	ผจน.ขป. ๘	เลขานุการทีมงานจัดการความรู้
๒๓. นายพัฒนศักดิ์	แก้วหอม	วิศวกรชลประทานชำนาญการ	ผู้ช่วยเลขานุการทีมงานฯ
๒๔. นางสาวนันทา	สุภากร	เจ้าพนักงานธุรการชำนาญงาน	ผู้ช่วยเลขานุการทีมงานฯ

อำนาจหน้าที่

๑. พิจารณากรอบแนวทางการจัดการความรู้ของสำนัก / กอง ตามที่ทีมงานจัดการความรู้กรมชลประทาน กำหนด และจัดทำแผนการจัดการความรู้ เสนอผู้บริหารจัดการความรู้ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) ของสำนักชลประทานที่ ๘ พิจารณาให้ความเห็นชอบ
๒. ดำเนินการตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ให้บรรลุเป้าหมายที่กำหนดไว้
๓. ติดตามประเมินผล เพื่อทบทวนสรุปบทเรียนด้านการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ แล้ว รายงานผลการดำเนินงานให้ผู้บริหารการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ รับทราบ ตลอดจน จัดทำรายงานความก้าวหน้า และรายงานผลการดำเนินการ แสดงบนหน้าเว็บบคลังความรู้ของสำนัก ตามกรอบระยะเวลาที่กำหนด
๔. ประสานงานและสนับสนุนการดำเนินการตามแผนการจัดการความรู้เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์ กรมชลประทาน ประจำปีงบประมาณ
๕. พิจารณาเสนอสำนักชลประทานที่ ๘ แต่งตั้งคณะทำงาน เพื่อมอบหมายให้รับผิดชอบกิจกรรมการจัดการความรู้เพิ่มเติมตามความเหมาะสม
๖. ดำเนินงานอื่นๆ ตามที่ผู้บริหารการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO)

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒๕ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๕๔



(หม่อมหลวงอนุมาศ ทองแถม)
ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘



บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ ส่วนวิศวกรรมบริหาร สขป. ๘ จ.นครราชสีมา โทร. ๐-๔๔๓๕-๔๓๘๙

ที่ วสข. ๔๘ / ๒๕๕๔

วันที่ ๒๔ มีนาคม ๒๕๕๔

เรื่อง ขออนุมัติแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔

เรียน ผส.ขป.๘ (ผู้บริหารการจัดการความรู้ สขป.๘)

ตามที่สำนักชลประทานที่ ๘ ได้มีคำสั่งที่ ๑๐/๒๕๕๔ ลงวันที่ ๒๕ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๔ เรื่องแต่งตั้งผู้บริหารการจัดการความรู้ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) และทีมงานจัดการความรู้ (Knowledge Management Team หรือ KM Team) ของสำนักชลประทานที่ ๘ เพื่อทำหน้าที่ในการบริหารและจัดทำแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ในปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ นั้น

บัดนี้ ทีมงานจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ได้จัดให้มีการประชุมเพื่อเผยแพร่การดำเนินงานตามแผนการจัดการความรู้ของกรมชลประทานและร่วมกันบ่งชี้ความรู้ที่จำเป็นในการจัดทำแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เมื่อวันที่ ๒๒ มีนาคม ๒๕๕๔ ณ ห้องประชุมสำนักชลประทานที่ ๘ แล้ว ดังรายละเอียดในรายงานการประชุมและแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ดังที่แนบมาพร้อมนี้

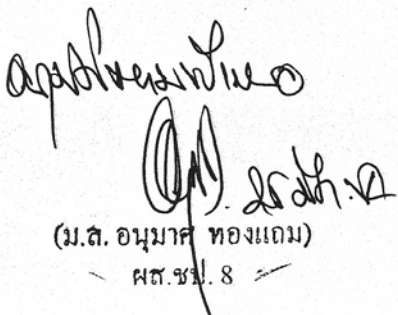
จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุมัติ ดังนี้

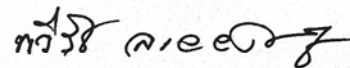
๑. อนุมัติแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์ของกรมชลประทานประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ และลงนามในแบบฟอร์มแผนงานที่แนบ ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นกรอบแนวทางในการดำเนินการจัดการความรู้ของ สขป.๘ พ.ศ.๒๕๕๔ ต่อไป

๒. ให้โครงการชลประทานฯ/โครงการส่งน้ำฯ และโครงการก่อสร้าง เสนอชื่อบุคคลเพื่อให้ สขป.๘ แต่งตั้งเป็นทีมงานเครือข่ายการจัดการความรู้ (KM Team Work) ของโครงการฯ ภายในวันที่ ๘ เมษายน ๒๕๕๔ เพื่อเป็นผู้ประสานงานและประชาสัมพันธ์กิจกรรมการจัดการความรู้ภายในโครงการฯ

๓. ให้โครงการชลประทานฯ/โครงการส่งน้ำฯ และโครงการก่อสร้าง เริ่มดำเนินการจัดการความรู้โดยแต่งตั้งผู้บริหารจัดการความรู้ (CKO) และทีมงานจัดการความรู้ (KM Team) ของโครงการฯ ภายในเดือนเมษายน ๒๕๕๔ เพื่อร่วมดำเนินการตามกิจกรรมการจัดการความรู้ของ สขป.๘ ต่อไป

๔. ให้ส่วน/โครงการต่างๆ ให้ความร่วมมือกับทีมงานจัดการความรู้ สขป.๘ เพื่อดำเนินการตามแผนการจัดการความรู้ สขป.๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ ต่อไป


(ม.ต. อนุภาค ทองแถม)
ผส.ขป. 8


(นายทวีช ละอองนวลพานิช)

ผวส.ขป.๘

ประธานทีมงานจัดการความรู้ สขป.๘

องค์ความรู้ที่จำเป็นต่อการปฏิบัติงานประเดิมยุทธศาสตร์ที่เลือกมาจัดการความรู้		
องค์ความรู้ที่ ๑	ประเด็นยุทธศาสตร์ : การบริหารจัดการน้ำ องค์ความรู้ที่จำเป็น : หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานทุกประเภท เหตุผลที่เลือกองค์ความรู้ : สำนักชลประทานที่ ๘ กรมชลประทาน ได้จัดทำกระบวนการบริหารจัดการน้ำตามเกณฑ์คุณภาพการบริหารจัดการภาครัฐ(PMQA) หมวดที่ ๖ ในปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๓ ในการนี้ เพื่อเป็นการต่อยอดพัฒนาประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน ให้สามารถบรรลุเป้าหมายตัวชี้วัดตามตัวชี้วัดตามการประเมินผลประจำปีของกรมชลประทานจึงเห็นสมควรดำเนินการจัดการความรู้ในประเด็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการน้ำในกระบวนการที่สำนักงานที่สำนักงานที่ ๘ โดยพิจารณาโดยพิจารณาจากองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานของกรมชลประทานประเด็นยุทธศาสตร์นำมาเข้าสู่กระบวนการจัดการความรู้ ให้ได้มาซึ่งองค์ความรู้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการที่สำนักงานที่สำนักงานที่ ๘ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานตามภารกิจหลักของกรมชลประทานต่อไป	
	ตัวชี้วัดตามคำรับรองและเป้าหมายที่เลือกใช้จัดการที่ KM :	เป้าหมายของตัวชี้วัด ๑.๕๔๗๕
องค์ความรู้ที่ ๒	๓.๑.๒ จำนวนพื้นที่บริหารจัดการน้ำในเขตชลประทาน(cropping intensity) (ล้านไร่) ประเด็นยุทธศาสตร์ : การป้องกันและบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำ องค์ความรู้ที่จำเป็น : สรุปบทเรียนการดำเนินการป้องกันและบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำ กรณีพื้นที่อุทกภัยในเขตจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. ๒๕๕๓ เพื่อลดความเสียหายจากอุทกภัยในปี พ.ศ. ๒๕๕๔ เหตุผลที่เลือกองค์ความรู้ : ในปี พ.ศ. ๒๕๕๓ ที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบวิกฤตการณ์อุทกภัยครั้งใหญ่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อทุกภาคส่วน เกิดความเสียหายทั้งในภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรม การท่องเที่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประชาชนในพื้นที่ที่ประสบอุทกภัยในเขตจังหวัดนครราชสีมาได้รับความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สิน จากวิกฤตการณ์ดังกล่าว กรมชลประทานเป็นหน่วยงานหนึ่งที่ได้รับผิดชอบงานด้านการป้องกันและบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำ สำนักชลประทานที่ ๘ ได้ดำเนินการตามภารกิจดังกล่าวตามบริบทของพื้นที่ที่ได้รับมอบหมายในการดำเนินการป้องกันและบรรเทาภัย อุทกภัยจากประสบการณ์ที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องจัดการความรู้โดยการสรุปบทเรียนการดำเนินการป้องกันและบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำกรณีพื้นที่อุทกภัยปี พ.ศ. ๒๕๕๓ เพื่อให้กรมชลประทานดำเนินการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เกิดขึ้น ในกระบวนการทำงานและรวบรวมจัดเก็บอย่างเป็นระบบ ให้สามารถศึกษาใช้ยังอีกประการการพิจารณาแผนการดำเนินงานจะส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการลดความเสียหายจากอุทกภัยในปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ ต่อไป	
	ตัวชี้วัดตามคำรับรองและเป้าหมายที่เลือกใช้จัดการที่ KM :	เป้าหมายของตัวชี้วัด ๕ ๐.๑๕
๓.๒.๓ จำนวนรายการป้องกันและบรรเทาอุทกภัย (รายการ) ๑.๑ ร้อยละของพื้นที่ความเสียหายของพืชเศรษฐกิจ ในเขตชลประทานจากอุทกภัยและภัยแล้ง(ร้อยละ)		
ผู้ทบทวน :	ผู้อนุมัติ	
(น.ล.นพ.ท. ทองแถม)	(น.ล.จ.นพ.ท. ทองแถม)	
ผู้อำนวยการสำนักงานที่ ๘	ผู้อำนวยการสำนักงานที่ ๘	
ผู้บริหารสูงสุดด้านการจัดการความรู้ สรป. ๘ (CKO)	ผู้บริหารสูงสุดของ สรป. ๘ (CEO)	



คำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘

ที่ ๑๘ /๒๕๕๔

เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานสร้างความรู้ตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔

ตามที่ผู้บริหารการจัดการความรู้ สำนักชลประทานที่ ๘ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) ได้อนุมัติแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์ กรมชลประทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ เมื่อวันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๕๔ ไว้แล้วนั้น

เพื่อให้มีการดำเนินการจัดการความรู้เป็นไปตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ จึงให้แต่งตั้งคณะทำงานเพื่อสร้างความรู้ตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ โดยมีองค์ประกอบและอำนาจหน้าที่ดังนี้

๑. คณะทำงานสร้างความรู้ เรื่องหลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานทุกประเภท มีองค์ประกอบและหน้าที่ความรับผิดชอบ ดังนี้

องค์ประกอบ

- | | | |
|---|---------------|-------------------|
| ๑. นายทวีวัช | ละอองนวลพานิช | ประธานคณะทำงาน |
| ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร สขป.๘ | | |
| ๒. นายเนรมิต | เทพนอก | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายบริหารและจัดการน้ำ ส่วนจัดสรรน้ำ | | |
| ๓. นายอนุชา | ยังตรง | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายวิศวกรรม | | |
| โครงการส่งน้ำฯ ลำปายมาศ | | |
| ๔. นายธีทัต | สุขเกษม | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการส่งน้ำฯ ลำพระเพลิง | | |
| ๕. นายกรรณพร | ศรีจันทร์ทอง | คณะทำงาน |
| เจ้าพนักงานอุทกวิทยาชำนาญงาน | | |
| ศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง | | |
| ๖. นายบุญเลิศ | สุขแสง | คณะทำงาน |
| วิศวกรชลประทานชำนาญการ | | |
| ส่วนวิศวกรรมบริหาร สขป.๘ | | |
| ๗. นายปราโมทย์ | พลพณนาวิ | เลขานุการคณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการชลประทานบุรีรัมย์ | | |

หน้าที่ความ/.....

หน้าที่ความรับผิดชอบ

๑. ศึกษา ค้นคว้าและรวบรวมหลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานทุกประเภท
- ๒ จัดทำคู่มือ/หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานทุกประเภทเสนอผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘ ให้ความเห็นชอบนำออกเผยแพร่
๓. เผยแพร่คู่มือ/หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทานทุกประเภทที่ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘ เห็นชอบให้ผู้เกี่ยวข้องทราบและนำไปปฏิบัติ

๒. คณะทำงานสรุปทบทวนการดำเนินการป้องกันและบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำกรณีพื้นที่อุทกภัยในเขตจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. ๒๕๕๓ เพื่อลดความเสียหายจากอุทกภัยปี พ.ศ. ๒๕๕๔ มีองค์ประกอบและหน้าที่ความรับผิดชอบดังนี้

องค์ประกอบ

- | | | |
|---|-----------|--------------------------|
| ๑. นายสมชาย | พันชนะ | ประธานคณะทำงาน |
| ผู้อำนวยการส่วนจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา สขป.๘ | | |
| ๒ นายเนรมิต | เทพนอก | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายบริหารและจัดการน้ำ ส่วนจัดสรรน้ำ | | |
| ๓. นายภาณุรินทร์ | ภาณุพินทุ | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการส่งน้ำฯ ลำตะคอง | | |
| ๔. นายธีทัต | สุขเกษม | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการส่งน้ำฯ ลำพระเพลิง | | |
| ๕. นายสมศักดิ์ | ทาบโลกา | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการชลประทานนครราชสีมา | | |
| ๖. นายสุริพงษ์ | รามโกมุท | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการส่งน้ำฯ ห้วยสัณฑ์ | | |
| ๗. นายจรงค์ศักดิ์ | ออกสุข | คณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | | |
| โครงการส่งน้ำฯ มูลบน-ลำแจะ | | |
| ๘. นายปัญญา | พลแสน | เลขานุการคณะทำงาน |
| ผู้อำนวยการศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง | | |
| ๙. นายบุญรอด | หาญองอาจ | ผู้ช่วยเลขานุการคณะทำงาน |
| หัวหน้าฝ่ายวางแผนและแก้ไขปัญหาเรื่องน้ำ ส่วนจัดสรรน้ำ | | |

หน้าที่ความรับผิดชอบ

๑. ศึกษา วิเคราะห์สาเหตุของการเกิดอุทกภัยในพื้นที่ต่าง ๆ
๒. ทบทวนการดำเนินการป้องกันและบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ต่าง ๆ โดยระบุรายละเอียดเทคนิค/วิธีการที่ดำเนินการและผลของการดำเนินการ
๓. วิเคราะห์ผลสำเร็จ ปัญหาอุปสรรค ข้อจำกัดของการดำเนินการและสิ่งที่จะต้องปรับปรุงการดำเนินการ
๔. จัดทำแนวทางและวิธีการป้องกันและบรรเทาอุทกภัยที่อาจเกิดขึ้นในปี พ.ศ. ๒๕๕๔ ในแต่ละพื้นที่ เสนอผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘ ให้ความเห็นชอบ
๕. นำแนวทางและวิธีการที่ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘ เห็นชอบแจ้งผู้เกี่ยวข้องทราบและนำไปปฏิบัติ

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒๖ เมษายน พ.ศ. ๒๕๕๔



(หม่อมหลวงอนุมาศ ทองแถม)
ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘



คำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘
ที่ ๒๘ /๒๕๕๔

เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานด้านพัฒนาคลังความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘

ตามที่ผู้บริหารการจัดการความรู้ สำนักชลประทานที่ ๘ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) ได้อนุมัติแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์กรมชลประทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ เมื่อวันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๕๔ ไว้แล้วนั้น

เพื่อให้มีการดำเนินการจัดการความรู้เป็นไปตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ โดยเฉพาะด้านการพัฒนาเว็บไซต์คลังความรู้ เพื่อให้มีการจัดรูปแบบการเก็บข้อมูลความรู้อย่างเป็นระบบ และมีการเผยแพร่ข้อมูลความรู้ที่เหมาะสมจึงขอยกเลิกคำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘ ที่ ๔๕/๒๕๕๓ และขอแต่งตั้งคณะทำงานด้านพัฒนาคลังความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ โดยมีองค์ประกอบและหน้าที่ความรับผิดชอบดังนี้

องค์ประกอบ

- | | | |
|------------------|---|-------------------|
| ๑. นายสมคิด | ทรัพย์วรารณ | ประธานคณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการส่วนเครื่องจักรกล สขป.๘ | |
| ๒. นายปราโมท | พลพณะนาวิ | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | |
| | โครงการชลประทานบุรีรัมย์ | |
| ๓. นายเนรมิต | เทพนอก | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายบริหารและจัดการน้ำ ส่วนจัดสรรน้ำ | |
| ๔. นายพิพัฒน์ | นัมเจริญนิยม | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายส่งน้ำและบำรุงรักษาที่ ๗ | |
| | โครงการชลประทานนครราชสีมา | |
| ๕. นายวงศ์สถิตย์ | บุญธัญกรณ์ | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายส่งน้ำและบำรุงรักษาที่ ๑ | |
| | โครงการชลประทานนครราชสีมา | |
| ๖. นายพัฒนศักดิ์ | แก้วหอม | คณะทำงาน |
| | วิศวกรชลประทานชำนาญการ | |
| | ส่วนวิศวกรรมบริหาร สขป.๘ | |
| ๗. นายวัชร | ดางาม | เลขานุการคณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายสื่อสาร ส่วนเครื่องจักรกล สขป.๘ | |

หน้าที่ความรับผิดชอบ

๑. วางแผนพัฒนาเว็บไซต์คลังความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ โดยการปรับปรุงเว็บไซต์คลังความรู้ที่มีอยู่ให้มีความทันสมัยเพื่อการประชาสัมพันธ์ข้อมูลความรู้อย่างเป็นหมวดหมู่ตามเกณฑ์ที่ทีมงานจัดการความรู้กรมชลประทานกำหนด และเสนอทีมงานจัดการความรู้ สขป.๘ ให้ความเห็นชอบ
๒. ดำเนินการตามแผนที่กำหนด แล้วรายงานผลการดำเนินงานให้ทีมงานจัดการความรู้ทราบเป็นระยะตามความเหมาะสม
๓. นำข้อมูลความรู้ต่าง ๆ เผยแพร่ทางเว็บไซต์คลังความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ และเชื่อมโยงกับศูนย์ความรู้กลางกรมชลประทาน
๔. ดำเนินงานอื่น ๆ ตามที่ทีมงานจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ มอบหมาย

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๕๔

(หม่อมหลวงอนูมาศ ทองแถม)
ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘



คำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘

ที่ ๒๔๙ / ๒๕๕๔

เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานด้านการกลั่นกรองความรู้และติดตามการเผยแพร่ความรู้

ตามที่ผู้บริหารการจัดการความรู้ สำนักชลประทานที่ ๘ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) ได้อนุมัติแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์ กรมชลประทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ เมื่อวันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๕๔ ไว้แล้วนั้น

เพื่อให้มีการดำเนินการจัดการความรู้เป็นไปตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ โดยเฉพาะด้านการกลั่นกรองข้อมูลจากองค์ความรู้ที่กำหนดขึ้น และความรู้อื่น ๆ ที่จะถูกเผยแพร่ทางเว็บไซต์คลังความรู้ของของสำนักชลประทานที่ ๘ รวมทั้งการติดตามข้อมูลการเผยแพร่ความรู้ดังกล่าวอย่างเหมาะสม จึงขอแต่งตั้งคณะทำงานด้านการกลั่นกรองความรู้และติดตามการเผยแพร่ความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ โดยมีองค์ประกอบและหน้าที่ความรับผิดชอบดังนี้

องค์ประกอบ

- | | | |
|-------------------------------|---|----------------|
| ๑. นายทวีวัช | ละอองนวลพานิช | ประธานคณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร สขป.๘ | |
| ๒. นายสมคิด | ทรัพย์วรารณ | คณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการส่วนเครื่องจักรกล | |
| ๓. นางอรชา อิศรางกูร ณ อยุธยา | | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายบริหารทั่วไป | |
| ๔. นายปรโมท | พลพัฒน์นาวิ | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน | |
| | โครงการชลประทานบุรีรัมย์ | |
| ๕. นายคำรณ | เตียตระกูล | คณะทำงาน |
| | หัวหน้ากลุ่มพิจารณาโครงการ ส่วนวิศวกรรมบริหาร | |
| ๖. นายเนรมิต | เทพนอก | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายบริหารและจัดการน้ำ ส่วนจัดสรรน้ำฯ | |
| ๗. นายวัชร | ดางาม | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายสื่อสาร ส่วนเครื่องจักรกล | |
| ๘. นายสมชาย | อังศิริวัลย์ | คณะทำงาน |
| | หัวหน้ากลุ่มงานก่อสร้าง ๓/๑/๐๘ | |
| ๙. นายโสพจน์ | จันทวาด | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายแผนงานและงบประมาณด้านก่อสร้าง ส่วนปฏิบัติการ | |

๑๐. นายวิวัฒน์/.....

๑๐. นายวิวัฒน์ จูติรัตนอัคร์ เลขานุการคณะกรรมการ
หัวหน้าฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ด้านวิศวกรรม ส่วนวิศวกรรมบริหาร

๑๑. นายพัฒนศักดิ์ แก้วหอม ผู้ช่วยเลขานุการคณะกรรมการ
วิศวกรชลประทานชำนาญการ ส่วนวิศวกรรมบริหาร.

หน้าที่ความรับผิดชอบ

๑. พิจารณากลับกรองข้อมูลต่าง ๆ ทั้งบทความ บทความย่อ และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องจาก
องค์ความรู้ที่ระบุไว้ในแผนการจัดการความรู้ และความรู้อื่น ๆ ที่จะถูกเผยแพร่ทางเว็บไซต์คลังความรู้ของ
สำนักชลประทานที่ ๘

๒ ติดตามผลการเผยแพร่ข้อมูลต่าง ๆ ที่ปรากฏบนเว็บไซต์คลังความรู้ของสำนักชลประทาน
ที่ ๘ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสมในการเผยแพร่ประชาสัมพันธ์

๓. ดำเนินการอื่น ๆ ตามที่ทีมงานจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ มอบหมาย

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๖ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๕๔



(หม่อมหลวงอนุมาศ ทองแถม)
ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘



คำสั่งสำนักชลประทานที่ ๘
ที่ ๙๐ /๒๕๕๔
เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานด้านการค้นหาความรู้

ตามที่ผู้บริหารการจัดการความรู้ สำนักชลประทานที่ ๘ (Chief Knowledge Officer หรือ CKO) ได้อนุมัติแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ เพื่อสนับสนุนประเด็นยุทธศาสตร์ กรมชลประทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ เมื่อวันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๕๔ ไว้แล้วนั้น

เพื่อให้มีการดำเนินการจัดการความรู้เป็นไปตามแผนการจัดการความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ โดยเฉพาะด้านการค้นหาความรู้ที่สำคัญ และจำเป็นต้องใช้ในการปฏิบัติงาน เพื่อแสดงเป็นบัญชีรายชื่อความรู้จำแนกตามหมวดหมู่ต่าง ๆ ในคลังความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ จึงขอแต่งตั้งคณะทำงานด้านการค้นหาความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘ โดยมีองค์ประกอบและหน้าที่ความรับผิดชอบดังนี้

องค์ประกอบ

- | | | |
|-------------------------------|---|----------------|
| ๑. นายทวีวัช | ละอองนวลพานิช | ประธานคณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมบริหาร สขป.๘ | |
| ๒. นายสมคิด | ทรัพย์วราภรณ์ | คณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการส่วนเครื่องจักรกล | |
| ๓. นายไพฑูรย์ | ไชยภูมิสกุล | คณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการโครงการชลประทานศรีสะเกษ | |
| ๔. นายกิตติกุล | เสภาศิริภรณ์ | คณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาทุ่งสัมฤทธิ์ | |
| ๕. นางอรชา อิศรางกูร ณ อยุธยา | | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายบริหารทั่วไป | |
| ๖. นายปัญญา | พลแสน | คณะทำงาน |
| | ผู้อำนวยการศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง | |
| ๗. นายปราโมทย์ | พลพนะนาวิ | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทานโครงการชลประทานบุรีรัมย์ | |
| ๘. นายคำรณ | เตียตระกูล | คณะทำงาน |
| | หัวหน้ากลุ่มพิจารณาโครงการ ส่วนวิศวกรรมบริหาร | |
| ๙. นายเนรมิต | เทพนอก | คณะทำงาน |
| | หัวหน้าฝ่ายบริหารและจัดการน้ำ ส่วนจัดสรรน้ำ | |

๑๐. นายธีทัต/.....

๑๐. นายธีทัต สุขเกษม คณะทำงาน
หัวหน้าฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน
โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำพระเพลิง
๑๑. นายวิวัฒน์ จูติรัตนอัคร์ คณะทำงาน
หัวหน้าฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ด้านวิศวกรรม ส่วนวิศวกรรมบริหาร
๑๒. นายโสฬจน์ จันทวาด คณะทำงาน
หัวหน้าฝ่ายแผนงานและงบประมาณด้านก่อสร้าง ส่วนปฏิบัติการ
๑๓. นายวัชร งามาม คณะทำงาน
หัวหน้าฝ่ายสื่อสาร ส่วนเครื่องจักรกล
๑๔. นายพัฒนศักดิ์ แก้วหอม คณะทำงาน
วิศวกรชลประทานชำนาญการ ส่วนวิศวกรรมบริหาร
๑๕. นายประยัด กมลพัฒนะ เลขานุการคณะทำงาน
หัวหน้ากลุ่มออกแบบ ส่วนวิศวกรรมบริหาร

หน้าที่ความรับผิดชอบ

๑. วางแผนสำรวจความรู้ที่สำคัญและจำเป็นที่ต้องใช้ในการปฏิบัติงานในหน่วยงานต่าง ๆ
๒. ค้นหาความรู้ที่สำคัญ และจำเป็นที่ต้องใช้ในการปฏิบัติงาน เพื่อให้ได้มาซึ่งความรู้โดยจำแนกเป็นหมวดหมู่ต่าง ๆ สำหรับเก็บไว้ในคลังความรู้ของสำนักชลประทานที่ ๘
๓. รวบรวมความรู้ที่ได้ตามหมวดหมู่ต่าง ๆ ส่งให้คณะทำงานด้านการกลั่นกรองความรู้และติดตามการเผยแพร่ความรู้ เพื่อพิจารณาก่อนเผยแพร่ทางเว็บไซต์สำนักชลประทานที่ ๘
๔. ดำเนินงานอื่น ๆ ตามที่ทีมงานจัดการความรู้สำนักชลประทานที่ ๘ มอบหมาย

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๕๔



(หม่อมหลวงอนมาศ ทองแถม)
ผู้อำนวยการสำนักชลประทานที่ ๘