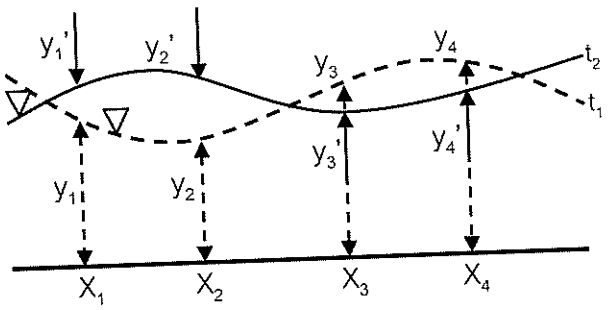
หรือ $y_1 \neq y_2 \neq y_3 \neq y_4$ ก็ได้ หรือ $y'_1 = y'_2 = y'_3 = y'_4$ หรือ $y'_1 \neq y'_2 \neq y'_3 \neq y'_4$ ก็ได้ ดังภาพที่ 7.3



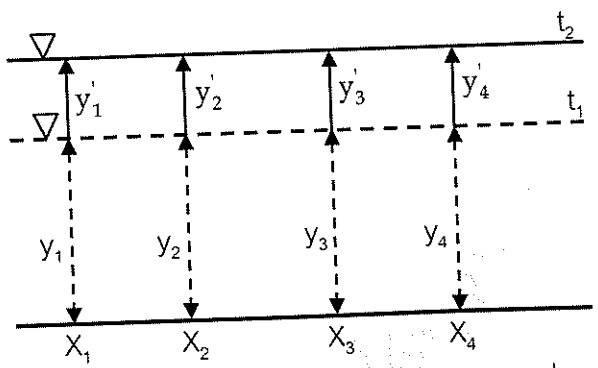
ภาพที่ 7.3 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่คงตัว

7.1.2 เกณฑ์ของระยะทาง

การพิจารณาด้วยเกณฑ์ของระยะทางนั้นจะพิจารณาว่าที่ระยะทางต่าง ๆ ของการไหลมีความเร็วของการไหลเปลี่ยนแปลงหรือไม่ โดยรูปแบบของการไหลมี 2 แบบ คือ การไหลสม่ำเสมอ และการไหลไม่สม่ำเสมอ ดังนี้

การไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) คือ การไหลที่มีความเร็วของการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง $(\frac{dv}{dx} = 0)$ นั่นคือ ความลึกของการไหลที่ทุก ๆ หน้าตัดการไหลมีค่าเท่ากัน

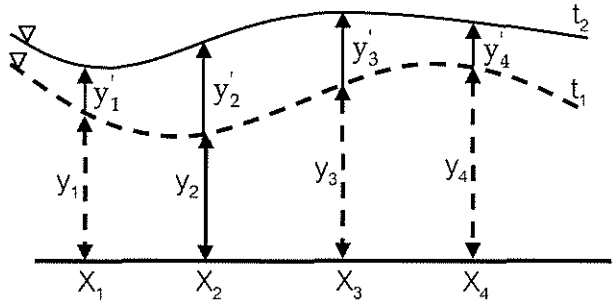
ณ เวลา t_1 มีความลึกการไหล y_1, y_2, y_3, y_4 และ ณ เวลา t_2 ก็มีความลึกการไหล y'_1, y'_2, y'_3, y'_4 ซึ่ง ณ เวลา t_1 ที่ระยะใด ๆ $y_1 = y_2 = y_3 = y_4$ และ ณ เวลา t_2 ที่ระยะใด ๆ $y'_1 \neq y'_2 \neq y'_3 \neq y'_4$ นอกจากนี้ $y_1 = y'_1, y_2 = y'_2, y_3 = y'_3, y_4 = y'_4$ หรือ $y_1 \neq y'_1, y_2 \neq y'_2, y_3 \neq y'_3, y_4 \neq y'_4$ ก็ได้ ดังภาพที่ 7.4



ภาพที่ 7.4 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลสม่ำเสมอ

การไหลไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform flow) คือ การไหลที่มีความเร็วของการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ($\frac{dv}{dx} \neq 0$) นั่นคือ ความลึกของการไหลที่ทุก ๆ หน้าตัดการไหลมีค่าไม่เท่ากัน

ณ เวลา t_1 ที่ระยะใด ๆ $y_1 \neq y_2 \neq y_3 \neq y_4$ และ ณ เวลา t_2 ที่ระยะใด ๆ $y'_1 \neq y'_2 \neq y'_3 \neq y'_4$ นอกจากนี้ $y_1 = y'_1, y_2 = y'_2, y_3 = y'_3, y_4 = y'_4$ หรือ $y_1 \neq y'_1$, $y_2 \neq y'_2, y_3 \neq y'_3, y_4 \neq y'_4$ ก็ได้ ดังภาพที่ 7.5



ภาพที่ 7.5 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่สม่ำเสมอ

ในสภาพการไหลจริงแล้วจะเกิดทั้งการเปลี่ยนแปลงความลึกการไหลทั้งเกณฑ์เวลาและระยะทาง กำหนดให้

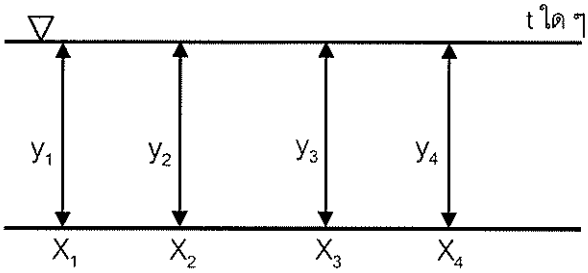
RVF คือ Rapidly Varied Flow

คือ ความลึกของการไหลเปลี่ยนทันทีทันใดจากหน้าตัดการไหลหนึ่งไปสู่อีกหน้าตัดการไหลหนึ่ง

GVF คือ Gradually Varied Flow

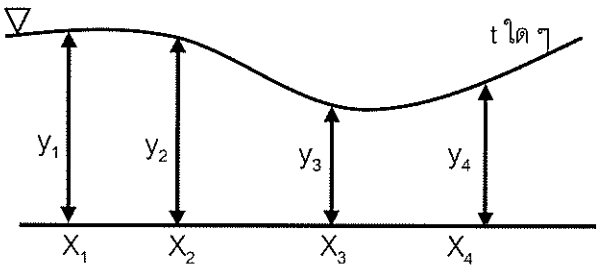
คือ ความลึกของการไหลที่ค่อย ๆ เปลี่ยนจากหน้าตัดการไหลหนึ่งไปสู่อีกหน้าตัดการไหลหนึ่ง

การไหลคงตัว สม่ำเสมอ (Steady Uniform Flow) ณ ที่เวลา t ใด ๆ ที่ทำการวัดค่าความลึกการไหล (y) จะไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะทำการวัดที่หน้าตัดใด ๆ นั้นคือ น้ำจะนิ่งตลอดเวลา ซึ่ง ณ เวลา t_1 ที่ระยะใด ๆ $y_1 = y_2 = y_3 = y_4$ และ ณ เวลา t_2 ที่ระยะใด ๆ $y_1 = y_2 = y_3 = y_4$ นั่นเอง ดังภาพที่ 7.6



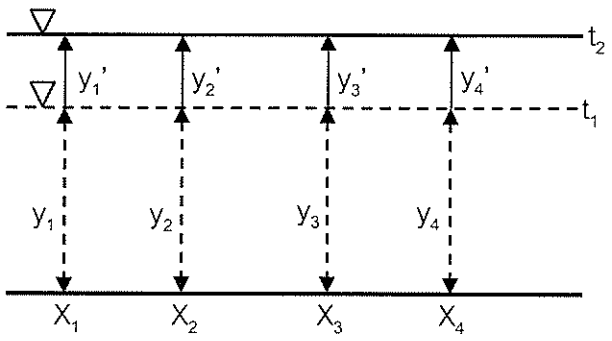
ภาพที่ 7.6 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลคงตัว สม่ำเสมอ

การไหลคงตัว ไม่สม่ำเสมอ (Steady non-uniform flow) ณ ที่เวลา t ใด ๆ ที่ทำการวัดค่าความลึกการไหลจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าความลึกการไหลที่วัดมาได้ในแต่ละหน้าตัดการไหลจะไม่เท่ากัน ซึ่ง ณ เวลา t_1 ที่ระยะใด ๆ $y_1 \neq y_2 \neq y_3 \neq y_4$ และ ณ เวลา t_2 ที่ระยะใด ๆ $y_1 \neq y_2 \neq y_3 \neq y_4$ นอกจากนี้ การไหลคงตัว ไม่สม่ำเสมอจะมีการไหลทั้งแบบ GVF และ RVF ดังภาพที่ 7.7



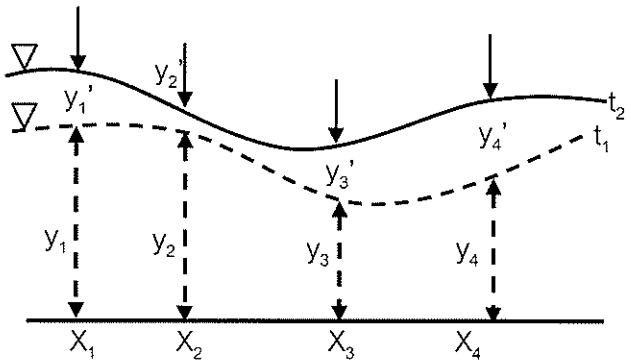
ภาพที่ 7.7 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลคงตัว ไม่สม่ำเสมอ

การไหลไม่คงตัว สม่ำเสมอ (Unsteady uniform flow) ณ ที่เวลา t ใด ๆ ค่าความลึกการไหลจะเปลี่ยนแปลง แต่ค่าความลึกการไหลที่ระยะต่าง ๆ จะเท่ากัน นั้นคือ ณ เวลา t_1 ที่ระยะใด ๆ $y_1 = y_2 = y_3 = y_4$ และ ณ เวลา t_2 ที่ระยะใด ๆ $y'_1 = y'_2 = y'_3 = y'_4$ ซึ่ง $y_1 \neq y_1'$, $y_2 \neq y_2'$, $y_3 \neq y_3'$, $y_4 \neq y_4'$ ดังภาพที่ 7.8



ภาพที่ 7.8 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่คงตัว สม่ำเสมอ

การไหลไม่คงตัว ไม่สม่ำเสมอ (Unsteady Non-uniform Flow) ค่าความลึกการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามทั้งเวลาและระยะทาง ซึ่ง ณ เวลา t_1 ที่ระยะใด ๆ $y_1 \neq y_2 \neq y_3 \neq y_4$ และ ณ เวลา t_2 ที่ระยะใด ๆ $y'_1 \neq y'_2 \neq y'_3 \neq y'_4$ นอกจากนี้ การไหลไม่คงตัว ไม่สม่ำเสมอจะมีการไหลทั้งแบบ GVF และ RVF ดังภาพที่ 7.9



ภาพที่ 7.9 ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่คงตัว ไม่สม่ำเสมอ

7.2 การแบ่งประเภทของการไหลในทางน้ำเปิด

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เป็นค่าที่ใช้แสดงรูปแบบการไหลของการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน ดังสมการต่อไปนี้

$$Re = \frac{vD}{\upsilon} \qquad (7.1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

υ คือ ความหนืดจลน์

จากสมการดังกล่าวข้างบน สำหรับการไหลในทางน้ำเปิด

$Re < 2{,}000$ คือ การไหลแบบราบเรียบ

$2{,}000 < Re < 4{,}000$ คือ การไหลในช่วงเปลี่ยนแปลง

$Re > 4{,}000$ คือ การไหลแบบปั่นป่วน

ตัวเลขฟรุด (F_r) เป็นค่าที่ใช้แสดงรูปแบบการไหลของการไหลใต้วิกฤต (Subcritical flow), การไหลวิกฤต (Critical flow) และการไหลเหนือวิกฤต (Supercritical flow) จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gy_h}} \qquad (7.2)$$

เมื่อ y_h คือ ความลึกชลศาสตร์ $= \frac{A}{T}$

T คือ ความกว้างของหน้าตัดการไหล

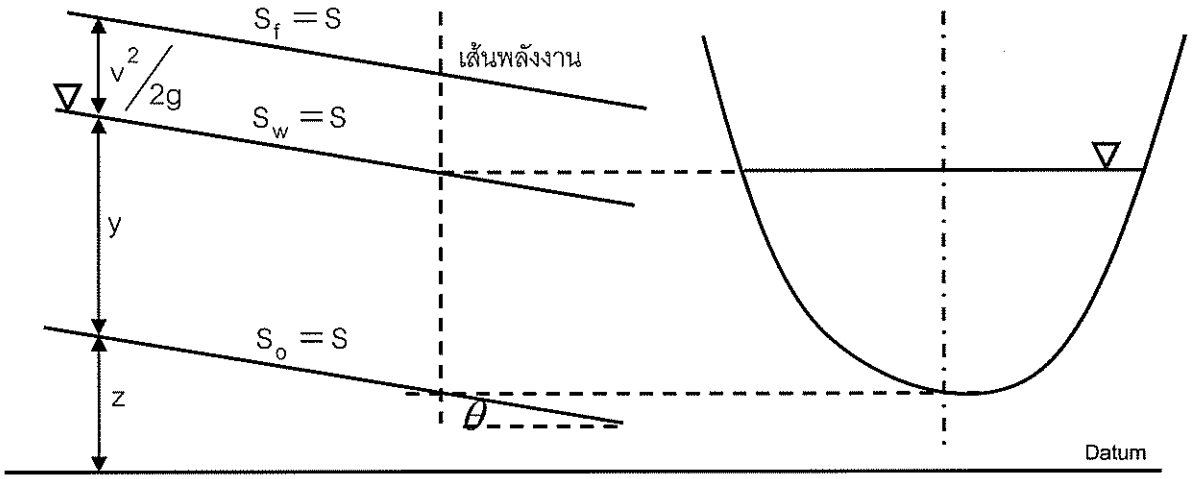
$F_r < 1.0$ คือ การไหลใต้วิกฤต

$F_r = 1.0$ คือ การไหลวิกฤต

$F_r > 1.0$ คือ การไหลเหนือวิกฤต

7.3 สมการแมนนิ่ง (Manning equation)

การไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) หรือการไหลปกติ (Normal flow) คือ การไหลในทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดแนวการไหล โดยมีความลึกเท่ากันในช่วงการไหลที่พิจารณาดังภาพที่ 7.10 โดยค่าความเร็วของการไหลชนิดนี้ สามารถหาค่าได้จากสมการของแมนนิ่ง ดังนี้



ภาพที่ 7.10 การไหลสม่ำเสมอการไหลในทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่

ระบบ SI: $$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (7.3)$$

ระบบอังกฤษ: $$v = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (7.4)$$

เมื่อ n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง

R คือ รัศมีชลศาสตร์ = $\frac{A}{P}$

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

P คือ เส้นขอบเปียก

S คือ ความลาดชัน

จากคุณสมบัติของสมการต่อเนื่องที่กล่าวว่า ในช่วงทางน้ำที่พิจารณาอัตราการไหลเข้าจะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออก นั่นคือ

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

จากสมการแมนนิ่งและสมการต่อเนื่อง จะได้ว่า

ระบบ SI: $$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \qquad (7.5)$$

ระบบอังกฤษ: $$Q = \frac{1.49}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \qquad (7.6)$$

ตัวอย่าง 7.1 จงคำนวณหาอัตราการไหล สำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาด 200 mm แนวท่อมีความลาดชัน เท่ากับ 0.001 และ n = 0.013 และมีน้ำอยู่ครึ่งท่อ

วิธีทำ

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{4} D^2\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{4}(200\,\text{mm})^2\right) = 5{,}000\pi\,\text{mm}^2 = 0.0157\,\text{m}^2$$

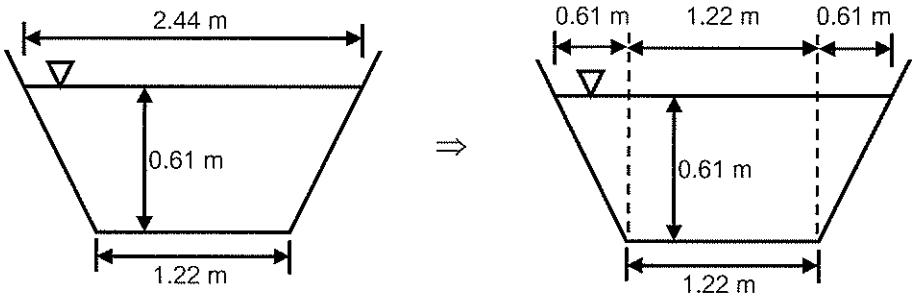
$$P = \frac{\pi D}{2} = \frac{\pi(200\,\text{mm})}{2} = 100\pi\,\text{mm}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{5{,}000\pi\,\text{mm}^2}{100\pi\,\text{mm}} = 0.05\,\text{m}$$

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

$$Q = \frac{1}{0.013}\left(0.0157\,\text{m}^2\right)(0.05\,\text{m})^{2/3}(0.001)^{1/2} = 5.18 \times 10^{-3}\,\text{m}^3/\text{s}$$ ตอบ

ตัวอย่าง 7.2 จงคำนวณหาความลาดชันที่น้อยที่สุดที่จะทำให้คลองรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สามารถส่งน้ำได้ด้วยอัตราการไหล 1.416 m^3/s เมื่อ n = 0.017



วิธีทำ

จาก $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$

$$S = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}}$$

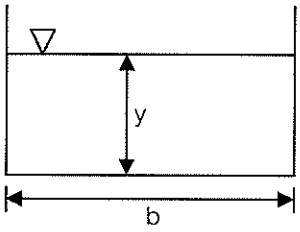
$$A = WD + XD = (1.22\,m \times 0.61\,m) + (0.61\,m \times 0.61\,m) = 1.116\,m^2$$

$$P = W + 2L = 1.22\,m + \left(2 \times \sqrt{(0.61\,m)^2 + (0.61\,m)^2}\right) = 2.945\,m$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{1.116\,m^2}{2.945\,m^2} = 0.379\,m$$

$$\therefore S = \frac{\left(1.416 \frac{m^3}{2}\right)^2 (0.017)^2}{(1.116\,m^2)(0.379\,m)^{4/3}} = 0.0016$$ ตอบ

ตัวอย่าง 7.3 จงออกแบบคลองรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถลำเลียงน้ำได้ 5.75 m^3/s เมื่อ n = 0.017, S = 1.2% และ b = 2y



วิธีทำ

จาก $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$

$$AR^{2/3} = \frac{Qn}{S^{1/2}} = \frac{\left(5.75 \frac{m^3}{s}\right)(0.017)}{\left(\frac{1.2}{100}\right)^{1/2}} = 0.892 \quad (1)$$

$$A = by = \frac{b^2}{2}$$

$$P = b + 2y = 2b$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\left(\frac{b^2}{2}\right)}{2b} = \frac{b}{4}$$

จากสมการที่ (1)

$$\left(\frac{b^2}{2}\right)\left(\frac{b}{4}\right)^{2/3} = 0.892$$

b= 1.76 m ตอบ

ตัวอย่าง 7.4 จากตัวอย่าง 7.3 จงคำนวณหาค่าความลึกของการไหล เมื่ออัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 12 m^3/s และ b = 2 m

วิธีทำ

$$AR^{2/3} = \frac{Qn}{S^{1/2}} = \frac{\left(12\frac{m^3}{s}\right)(0.017)}{\left(\frac{1.2}{100}\right)^{1/2}} = 1.86 \qquad (1)$$

$$A = by = 2y$$

$$P = b + 2y = 2 + 2y$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{2y}{2+2y}$$

จากสมการที่ (1) $1.86 = (2y)\left(\frac{2y}{2+2y}\right)^{2/3}$ และใช้วิธี Trial & Error

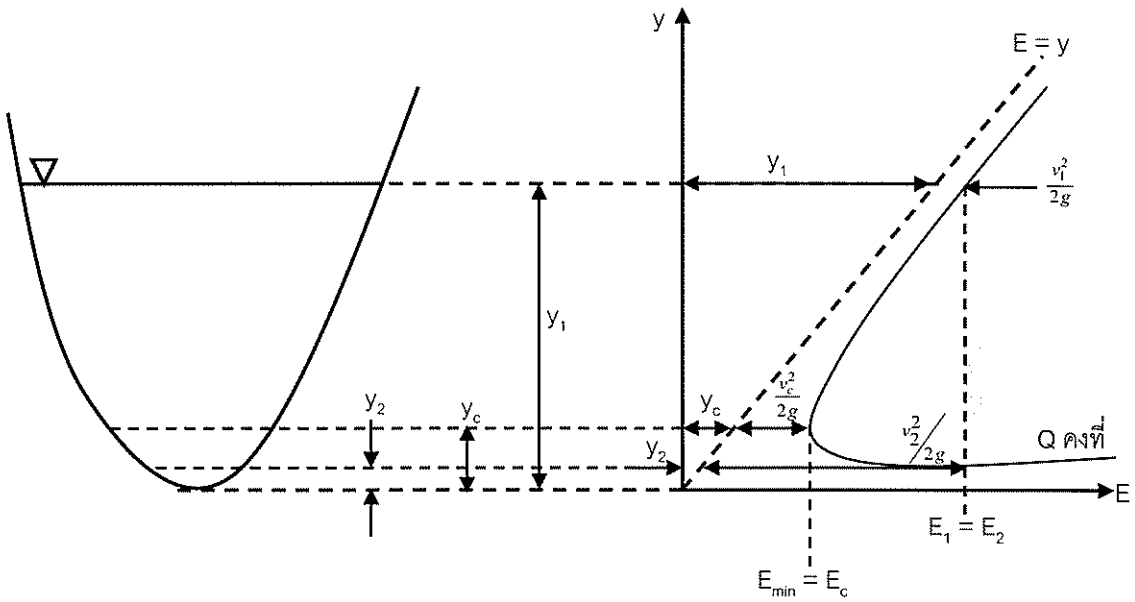
กำหนด y	A=2y	P=2+2y	R	$\left(\frac{2y}{2+2y}\right)^{2/3}$	$AR^{2/3} = 1.86?$
2.00	4.0	6.0	0.667	0.763	3.05
1.50	3.0	5.0	0.600	0.711	2.13
1.35	2.7	4.7	0.574	0.691	1.86 (OK)

7.4 พลังงานจำเพาะ (Specific Energy)

จากเฮดทั้งหมดเท่ากับ $E = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g}$

สำหรับการไหลในทางน้ำเปิด $E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}$ เรียกว่า พลังงานจำเพาะ เมื่อให้ z = 0

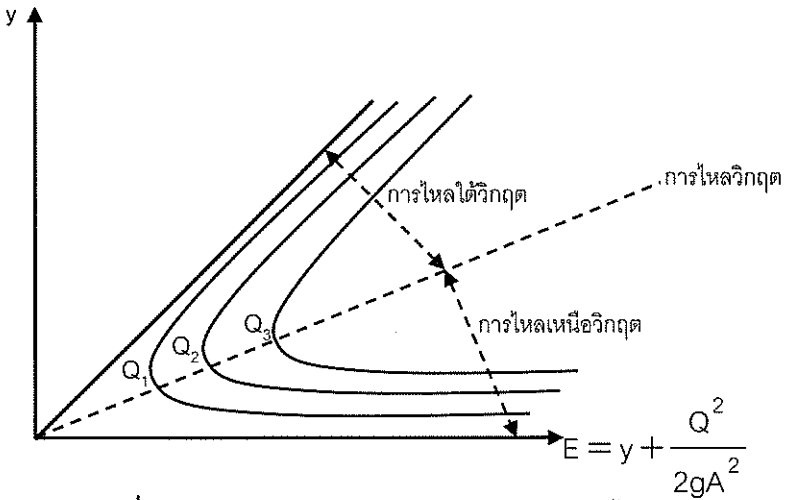
จากสมการข้างต้น พบว่า เมื่อสมมุติค่าความลึกการไหล (y) หลายค่า จะได้ค่าพลังงานจำเพาะ (E) หลายค่า ซึ่งถ้า Q คงที่ $E \propto y$ และ A ดังกราฟพลังงานจำเพาะ



ภาพที่ 7.11 พลังงานจำเพาะ

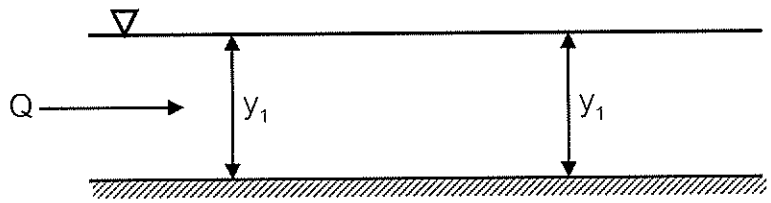
เมื่อ y_c คือ ความลึกวิกฤต

ในกรณีที่มีค่าอัตราการไหล (Q) หลายค่า จะทำให้ค่าพลังงานจำเพาะที่เกิดขึ้น ดังกราฟ



ภาพที่ 7.12 กราฟพลังงานจำเพาะ ณ อัตราการไหลต่าง ๆ

ในกรณีที่ท้องคลองอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน และตามกฎอนุรักษ์พลังงาน พลังงานจำเพาะที่ความลึกการไหล y_1 และ y_2 สามารถพิจารณาค่าได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

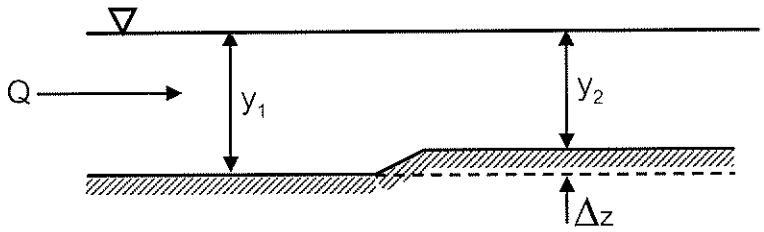


ภาพที่ 7.13 ท้องคลองอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน

$$E_1 = E_2$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \tag{7.7}$$

ในกรณีที่ท้องคลองถูกยกระดับขึ้น Δz และตามกฎอนุรักษ์พลังงาน พลังงานจำเพาะที่ความลึกการไหล y_1 และ y_2 สามารถพิจารณาค่าได้จากสมการ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 7.14 ท้องคลองถูกยกระดับขึ้น

$$E_1 = E_2$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = \left(y_2 + \Delta z\right) + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \tag{7.8}$$

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อ Q = 0, E = y เส้นกราฟเป็นเส้นตรงทำมุม 45°
2. เมื่อ $Q \rangle 0$, E จะได้ค่าความลึก 2 ค่า หรือเรียกว่า ความลึกสลับ (Alternate depth)
   ค่ามาก หรือ y_1 เรียกว่า ความลึกระดับสูง (High stage)
   ค่าน้อย หรือ y_2 เรียกว่า ความลึกระดับต่ำ (Low stage)

3. ที่การไหลวิกฤตจะมี ความลึกวิกฤต (Critical depth; y_c) ความเร็ววิกฤต (Critical velocity; v_c) อัตราการไหลวิกฤต (Critical discharge; Q_c) และ ความลาดชันวิกฤต (Critical slope; S_c),

4. การไหลวิกฤต จะมีค่า F_r เท่ากับ 1.0

5. เมื่อ $y = y_1 > y_c$ เรียกว่า การไหลใต้วิกฤต และมี F_r น้อยกว่า 1.0

   $y = y_2 < y_c$ เรียกว่า การไหลเหนือวิกฤต และมี F_r มากกว่า 1.0

6. สมการที่ใช้หาค่า y_c สำหรับทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; \qquad \text{เมื่อ } q = \frac{Q}{b} = \text{อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง}$$

$$F_r = 1 = \frac{v_c^2}{gy_c}$$

$$E_c = y_c + \frac{v_c^2}{2g} = y_c + \frac{y_c}{2} = \frac{3}{2}y_c$$

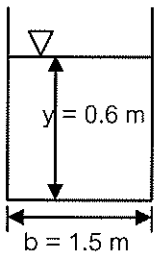
ตัวอย่าง 7.5 น้ำที่ถูกปล่อยจากประตูเข้าสู่ช่องทางการไหลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.5 m ที่ความลึก 0.6 m ด้วยความเร็ว 4.5 m/s จงหา

(ก) ความลึกวิกฤตที่พลังงานจำเพาะนี้

(ข) ความลึกวิกฤตที่อัตราการไหล

(ค) ชนิดของการไหลและค่าความลึกสลับ (Alternate depth)

วิธีทำ



$$\text{(ก) } E = y + \frac{v^2}{2g} = (0.6\,\text{m}) + \frac{\left(4.5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \times 9.81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1.632\,\text{m}$$

ที่สภาพการไหลตามโจทย์จะมีค่า E = 1.632 m ถ้าพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะดังกล่าวนี้เป็นการไหลวิกฤต จะได้ว่า $E_{min} = E_c = E = 1.632\,\text{m}$

จาก $E_c = \frac{3}{2} y_c$

$\therefore y_c = \frac{2}{3}(1.632\,m) = 1.09\,m$ ตอบ

(ข) จาก $Q = Av = byv$

เมื่อ $q = \frac{Q}{b} = \frac{byv}{b} = yv \frac{m^3/s}{m} = \left(4.5 \frac{m^3}{s}\right)(0.6\,m) = 2.7 \frac{m^3/s}{m}$

จาก $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt{\frac{\left(2.7 \frac{m^3/s}{m}\right)^2}{9.81 \frac{m}{s^2}}} = 0.906\,m$ ตอบ

ที่สภาพการไหลตามโจทย์จะมีค่า $y_c = 0.906\,m$

จากทั้งข้อ (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าที่สภาพการไหลตามโจทย์นั้นไม่ใช่ของการไหลวิกฤต

(ค) $F_r = \frac{v}{\sqrt{gy}} = \frac{4.5 \frac{m}{s}}{\sqrt{\left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)(0.6\,m)}} = 1.854 > 1$

เพราะฉะนั้นที่สภาพการไหลตามโจทย์เป็นการไหลเหนือวิกฤต ตอบ

พิจารณาหาความลึกทางเลือก (Alternate Depth)

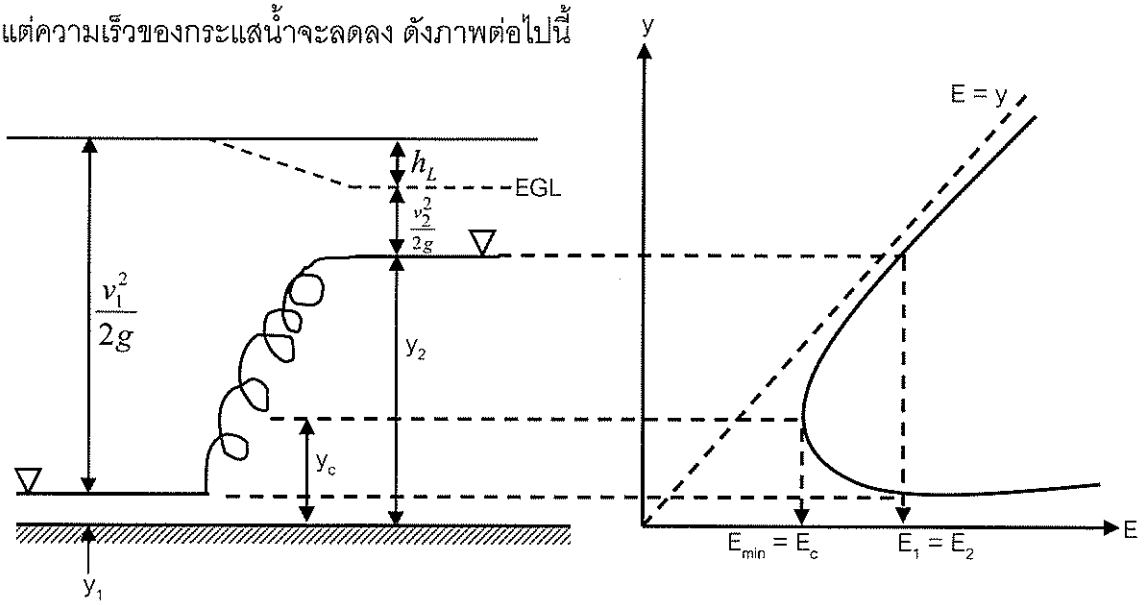
จาก $E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$

แทนค่า $1.632\,m = y + \frac{\left(2.7 \frac{m^3/s}{m}\right)^2}{2\left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)y^2}$

ใช้วิธี Trial & Error จะได้ y = 1.46 m ตอบ

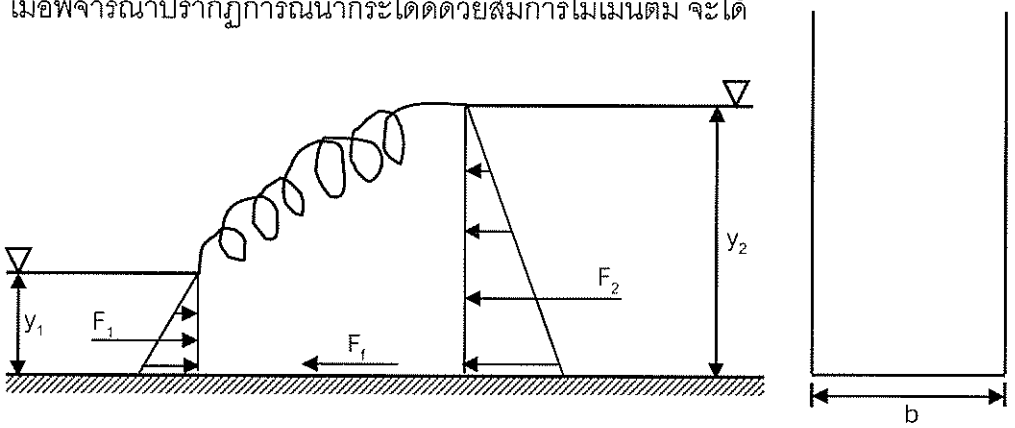
7.5 ปรากฏการณ์น้ำกระโดด (Hydraulic jump)

ปรากฏการณ์น้ำกระโดดเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของน้ำ มักจะเกิดขึ้นบริเวณท้ายฝายน้ำล้น ท่อลอด และประตูน้ำแบบไหลลอดทั้งประตูบานตรงและประตูบานโค้ง โดยปรากฏการณ์น้ำกระโดดมีคุณสมบัติของการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลจากการไหลเหนือวิกฤตเป็นการไหลวิกฤต และสุดท้ายเป็นการไหลใต้วิกฤต ทั้งนี้ ความลึกของการไหลจะมากขึ้น แต่ความเร็วของกระแสน้ำจะลดลง ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 7.15 ปรากฏการณ์น้ำกระโดด

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์น้ำกระโดดด้วยสมการโมเมนตัม จะได้



ภาพที่ 7.16 ปรากฏการณ์น้ำกระโดดและแรงที่เกิดขึ้น

สมการโมเมนตัม: $\sum F = \rho Q(v_2 - v_1)$

จะได้ $F_1 - F_2 - F_f = \rho Q(v_2 - v_1)$

เมื่อ $F_1 = \frac{1}{2}\gamma y_1^2 b$ (7.9)

$F_2 = \frac{1}{2}\gamma y_2^2 b$ (7.10)

$F_f = 0$ คือ แรงเสียดทาน (ระยะทางในการเกิดน้ำกระโดด ไม่มากจึงให้เป็นศูนย์)

สมการต่อเนื่อง: $Q_1 = Q_2$

$$by_1v_1 = by_2v_2$$

แทนค่า $\frac{1}{2}\gamma y_1^2 b - \frac{1}{2}\gamma y_2^2 b = \rho by_1v_1\left(\frac{y_1v_1}{y_2} - v_1\right)$

ถ้าทราบ y_1, v_1 หา y_2 ได้

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8F_{r1}^2} - 1\right) \qquad \text{เมื่อ} \quad F_{r1} = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} \tag{7.11}$$

ถ้าทราบ y_2, v_2 หา y_1 ได้

$$\frac{y_1}{y_2} = \left(\sqrt{1+8F_{r2}^2} - 1\right) \qquad \text{เมื่อ} \quad F_{r2} = \frac{v_2}{\sqrt{gy_2}} \tag{7.12}$$

พลังงานที่สูญเสียไป

$$h_L = \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right) \text{ หรือ } h_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \tag{7.13}$$

ปรากฏการณ์น้ำกระโดด มีความสำคัญต่อการไหลในทางน้ำเปิด ดังนี้

1. ทำให้การไหลมีการสูญเสียพลังงาน เช่น การไหลออกจากเขื่อน ฝายน้ำล้น เป็นต้น
2. ยกระดับน้ำให้สูงขึ้น สำหรับจ่ายน้ำให้คลองส่งน้ำ
3. เพิ่มอัตราการไหลลอดประตูน้ำ โดยปรากฏการณ์น้ำกระโดด จะรักษาระดับน้ำเดิมหลังประตูน้ำให้ต่ำ โดยไม่เกิดการไหลจมน้ำลอดประตู (Submerged flow)
4. ลดแรงดันจากน้ำใต้ดิน (Uplift pressure) ที่ดันอาคารชลศาสตร์ โดยการทำให้ระดับน้ำบนอาคารสูงขึ้น
5. ช่วยในการผสมสารเคมี สำหรับบำบัดน้ำเสีย
6. ช่วยให้น้ำสัมผัสอากาศมากขึ้นและใช้ในขบวนการเติมคลอรีนในการขัดน้ำเสีย
7. ช่วยขจัดฟองอากาศจากการไหลในทางน้ำเปิดรูปวงกลม
8. ปรากฏการณ์น้ำกระโดด เกิดขึ้นที่ใด จะทำให้ระบุคุณสมบัติพิเศษของการไหลได้ เช่น การไหลเหนือหรือใต้วิกฤต และตำแหน่งหน้าตัดควบคุม เป็นต้น

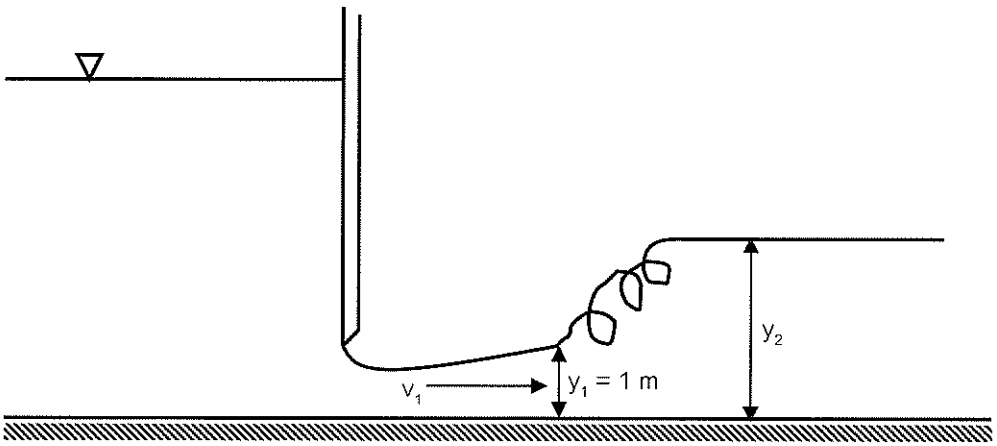
ตัวอย่าง 7.6 จากภาพ น้ำไหลออกจากอ่างเก็บน้ำด้วยอัตราการไหล 18 m^3/s ไปยังคลองส่งน้ำรูปสี่เหลี่ยม โดยท้องคลองกว้าง 3 m เมื่อ ณ ที่ความลึก 1 m เกิดปรากฏการณ์น้ำกระโดด จงคำนวณ

(ก) ความเร็วของการไหลก่อนการเกิดปรากฏการณ์น้ำกระโดด

(ข) ความลึกการไหลหลังการเกิดปรากฏการณ์น้ำกระโดด

(ค) ความเร็วของการไหลหลังการเกิดปรากฏการณ์น้ำกระโดด

(ง) พลังงานที่สูญเสียไปจากการเกิดปรากฏการณ์น้ำกระโดด



วิธีทำ

(ก) $$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{18\,\frac{m^3}{s}}{(3\,m)(1\,m)} = 6.0\,\frac{m}{s}$$ ตอบ

(ข) $$F_{r1} = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{6.0\,\frac{m}{s}}{\sqrt{\left(9.81\,\frac{m}{s^2}\right)(1\,m)}} = 1.92$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8F_{r1}^2} - 1\right)$$

แทนค่า $$\frac{y_2}{1\,m} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8(1.92)^2} - 1\right)$$

$$y_2 = 2.26\,m$$ ตอบ

(ค) $$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{18\,\frac{m^3}{s}}{(3\,m)(2.26\,m)} = 2.65\,m/s$$ ตอบ

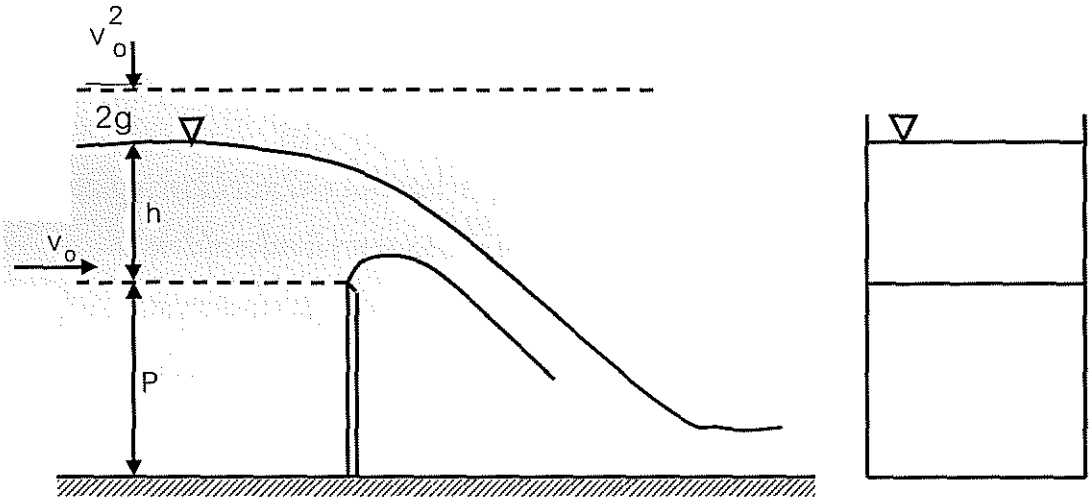
(ง) $$h_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} = \frac{(2.26\,m - 1.0\,m)^3}{4(2.26\,m)(1.0\,m)} = 0.221\,m$$ ตอบ

7.6 การวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิด

ในแม่น้ำหรือคลองธรรมชาติขนาดใหญ่ สามารถหาอัตราการไหลได้ โดยใช้เครื่องมือวัดกระแสน้ำ (Current meter) พร้อมกับเครื่องมือหยั่งความลึกของน้ำจุดต่าง ๆ ซึ่งอาจจะเป็นสายเทป หรือเครื่องมือวัดความลึกด้วยระบบคลื่นเสียงสะท้อน โดยหลักการหาอัตราการไหลจะเป็นการแบ่งพื้นที่ย่อยของทางน้ำเปิดแล้วหาความเร็วเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อย จากนั้นก็จะหาอัตราการไหลในแต่ละพื้นที่ย่อย แล้วจึงรวมเป็นอัตราการไหลผ่านหน้าตัดทางน้ำที่ต้องการได้ นอกจากนี้การวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิดยังสามารถวัดได้ด้วยอาคารชลศาสตร์ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

7.6.1 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular weir)

ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้หาอัตราการไหลผ่านฝายจะมีผิวของฝายวัดน้ำทางด้านเหนือน้ำในแนวดิ่ง และวางแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลดังภาพที่ 7.17 โดยจะต้องมีความดันบรรยากาศบริเวณใต้แนวน้ำล้น (Nappe) และแนวทางน้ำควรจะอยู่ในแนวเส้นตรง โดยไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล ซึ่งความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย h จะต้องวัดที่ระยะห่างจากสันฝายไปทางด้านเหนือน้ำยังจุดที่มีระดับผิวน้ำอยู่ในแนวราบ เพื่อหลีกเลี่ยงผลของความโค้งของผิวน้ำในบริเวณใกล้ ๆ กับฝายวัดน้ำ



ภาพที่ 7.17 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยม

สมการมาตรฐานในการคำนวณอัตราการไหลผ่านฝายวัดน้ำรูปสี่เหลี่ยมที่ไม่มีการบีบด้านข้าง มีความสัมพันธ์กับความยาวสันฝายความลึกของการไหลเหนือสันฝาย และความเร็วในทางน้ำทางด้านเหนือฝาย ดังนี้

$$Q = C_d\left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{2g}L\left[\left(h+\frac{v_0^2}{2g}\right)^{3/2}-\left(\frac{v_0^2}{2g}\right)^{3/2}\right] \qquad (7.14)$$

เมื่อ C_d คือ สัมประสิทธิ์อัตราการไหลขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลข้ามฝาย

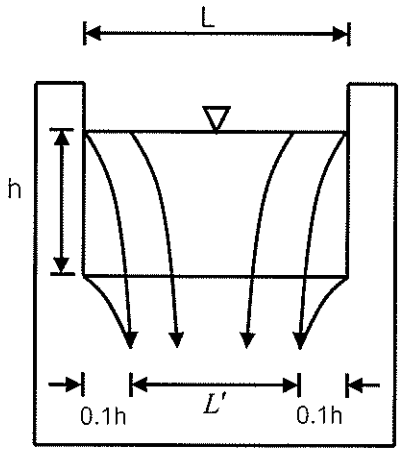
L คือ ความยาวสันฝาย

h คือ ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย

v_o คือ ความเร็วในทางน้ำเปิดทางด้านเหนือฝาย

ในกรณีที่ P >> h จะทำให้ $\frac{v_o^2}{2g}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น $Q = C_d\left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{2g}Lh^{3/2}$

สำหรับในกรณีที่ฝายวัดน้ำมีส่วนด้านข้างที่ขวางทางน้ำ



ภาพที่ 7.18 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมที่มีส่วนด้านข้างที่ขวางทางน้ำ

$$Q = C_d\left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{2g}L'\left[\left(h+\frac{v_0^2}{2g}\right)^{3/2}-\left(\frac{v_0^2}{2g}\right)^{3/2}\right] \qquad (7.15)$$

เมื่อ L' คือ ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $L-(0.1\cdot n\cdot h)$

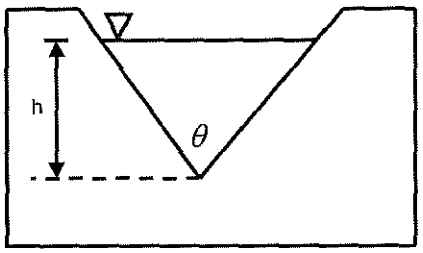
n คือ จำนวนด้านที่เกิดการบีบตัว (ในที่นี้มี n =2)

จากสมการข้างต้น จะสมมุติว่า การบีบตัวทางด้านข้างแต่ละด้านเท่ากับ 10% ของความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย หรือเท่ากับ 0.1h

7.6.2 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม (Triangular weir)

ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมเป็นฝายสันคมที่ใช้สำหรับการไหลที่มีอัตราการไหลไม่มาก สมการที่ใช้หาค่าอัตราการไหลของฝายชนิดนี้ คือ

$$Q = C_d\left(\frac{8}{15}\right)\sqrt{2g}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)h^{5/2} \qquad (7.16)$$

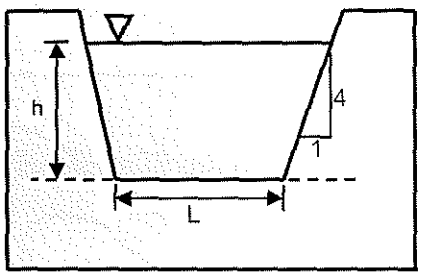


ภาพที่ 7.19 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม

7.6.3 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Cipolletti weir)

ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีสมการที่ใช้หาค่าอัตราการไหล คือ

$$Q = 1.86Lh^{3/2} \qquad (7.17)$$



ภาพที่ 7.20 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

7.6.4 รางวัดน้ำ (Measuring flume)

ถ้ามีน้ำตะกอนแขวนลอยปะปนมาด้วย จะมีตะกอนบางส่วนตกทับถมและสะสมอยู่ทางด้านเหนือฝายวัดน้ำ เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ฝายวัดน้ำ นอกจากนี้ ยังทำให้การใช้งานของฝายวัดน้ำมีการสูญเสียพลังงานมาก ซึ่งการแก้ปัญหาในกรณีดังกล่าว สามารถทำได้โดยใช้รางน้ำเวนจูรี (Venturi flume) แทนฝายวัดน้ำ โดยรางน้ำแบบพาร์แชล (Parshall flume) เป็นรางน้ำเวนจูรีแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในคลองชลประทาน

ลักษณะการไหลผ่านรางวัดน้ำแบบพาร์แชลนี้ โดยปกติจะเป็นการไหลแบบอิสระ ที่มีความลึกวิกฤตที่ส้นฝาย และมีน้ำกระโดดที่หน้าตัดทางออก ซึ่งคอคอด (Throat) ของรางน้ำแบบพาร์แชล จะมีขนาดแปรเปลี่ยนตั้งแต่ความกว้าง W = 3 in จนถึง W = 50 ft โดยในกรณีที่คอคอดกว้าง 8 ft สามารถใช้วัดอัตราการไหลได้สูงถึง 140 cfs จะมีสมการอัตราการไหลผ่านรางน้ำแบบพาร์แชล ขึ้นอยู่กับความกว้างของคอคอด (W) และความลึกทางด้านหนือน้ำ (h_a) ดังนี้

สำหรับในกรณีที่รางน้ำแบบพาร์แชลที่มีคอคอดกว้าง 1 ft ถึง 8 ft (0.30 m ≤ W ≤ 2.4 m)

หน่วยอังกฤษ; (W, h_a = ft และ Q = cfs) $Q = 4Wh_a^{1.522W^{0.026}}$

หน่วย SI; (W, h_a = m และ Q = cms) $Q = 0.3716\,W\left(3.281h_a\right)^{1.57W^{0.026}}$

สำหรับในกรณีที่รางน้ำแบบพาร์แชลที่มีคอคอดกว้าง 8 ft ถึง 50 ft (2.4 m ≤ W ≤ 15.20 m)

หน่วยอังกฤษ; (W, h_a = ft และ Q = cfs) $Q = (3.688\,W + 2.5)\,h_a^{1.6}$

หน่วย SI; (W, h_a = m และ Q = cms) $Q = (2.293\,W + 0.474)\,h_a^{1.6}$

ถ้าความลึกทางด้านท้ายน้ำมีมากจนท่วมน้ำกระโดด และเกิดการไหลแบบจมก็จะต้องวัดความลึก h_a แล้วจึงคำนวณอัตราการไหลใหม่ ในกรณีนี้จะทำให้อัตราการไหลลดลง

ในการติดตั้งหรือก่อสร้างรางน้ำแบบพาร์แชล ควรจะอยู่ในแนวที่มีทางน้ำตรง และมีสภาพการไหลสม่ำเสมอ โดยส่วนมากในงานชลประทานมักจะสร้างด้วยคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ถ้าเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ทั่ว ๆ ไป ก็มักจะทำจากพลาสติกเพราะจะได้เห็นพฤติกรรมการไหลทั้ง 3 มิติ