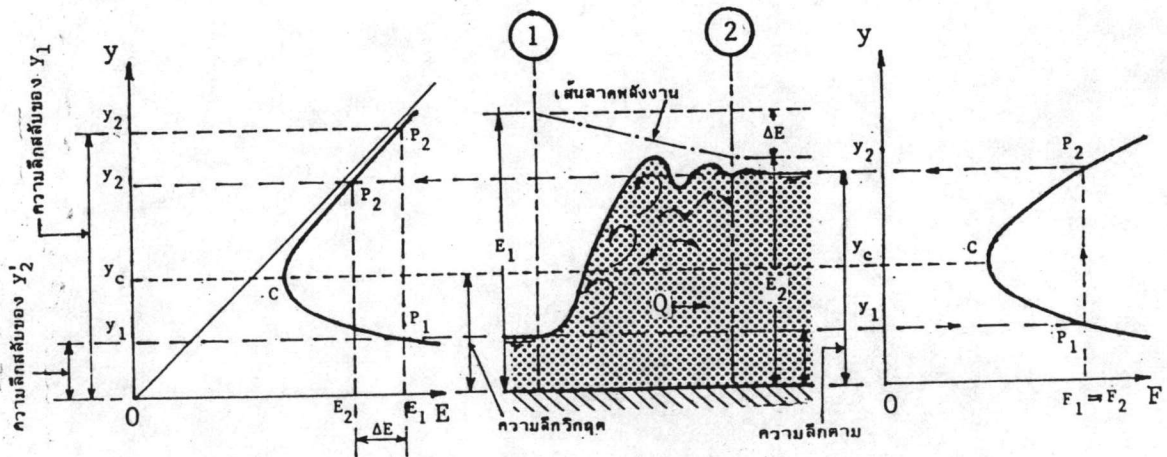


2.1 ไฮดรอลิกจัมป์ (Hydraulic jump)

ไฮดรอลิกจัมป์เป็นปรากฏการณ์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากการไหลของน้ำในระดับต่ำ (low stage) หรือการไหลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต (supercritical flow) ไปสู่การไหลของน้ำในระดับสูง (high stage) หรือการไหลในสภาวะใต้จุดวิกฤต (Sub-critical flow) ภายในช่วงระยะทางสั้น ๆ หรืออาจกล่าวได้ว่า "เป็นปรากฏการณ์ที่มวลน้ำซึ่งไหลด้วยความเร็วสูงแล้วเปลี่ยนแปลงเป็นความเร็วต่ำอย่างกะทันหัน ทำให้เกิดพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลใหญ่ขึ้นและระดับน้ำสูงขึ้น"⁴ ปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดการไหลย้อนกลับ ดังแสดงในรูป 2.1.1 (b) มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน จากพลังงานจลน์ (Kinetic energy) มาเป็นพลังงานศักย์ (Potential energy) ดังรูป 2.1.1 (a) โดยนำมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงจำเพาะกับความลึกของการไหลในรูป 2.1.1 (c) สำหรับการสูญเสียพลังงานนี้จะเนื่องมาจาก eddy viscosity เป็นส่วนใหญ่



a) เส้นโค้งพลังงานจำเพาะ b) ไฮดรอลิกจัมป์ c) เส้นโค้งแรงจำเพาะ

รูป 2.1.1 แสดงการวิเคราะห์ไฮดรอลิกจัมป์โดยใช้กราฟของพลังงานจำเพาะและแรงจำเพาะ

2.2 ชนิดของไฮดรอลิกจัมป์ (Types of Hydraulic Jump)

รูปแบบการเกิดไฮดรอลิกจัมป์บนพื้นราบมีด้วยกันหลายแบบ ดังแสดงในรูป 2.2.1 ซึ่ง USBR ได้เรียกชื่อรูปร่างและลักษณะของ Jump โดยพิจารณาจากค่าของ Froude Number (Fr) ดังนี้

(a) สำหรับ $Fr = 1$ การไหลของน้ำจะอยู่ที่ความลึกวิกฤติ (Critical depth) มีลักษณะเป็นคลื่นและไม่เกิด Jump

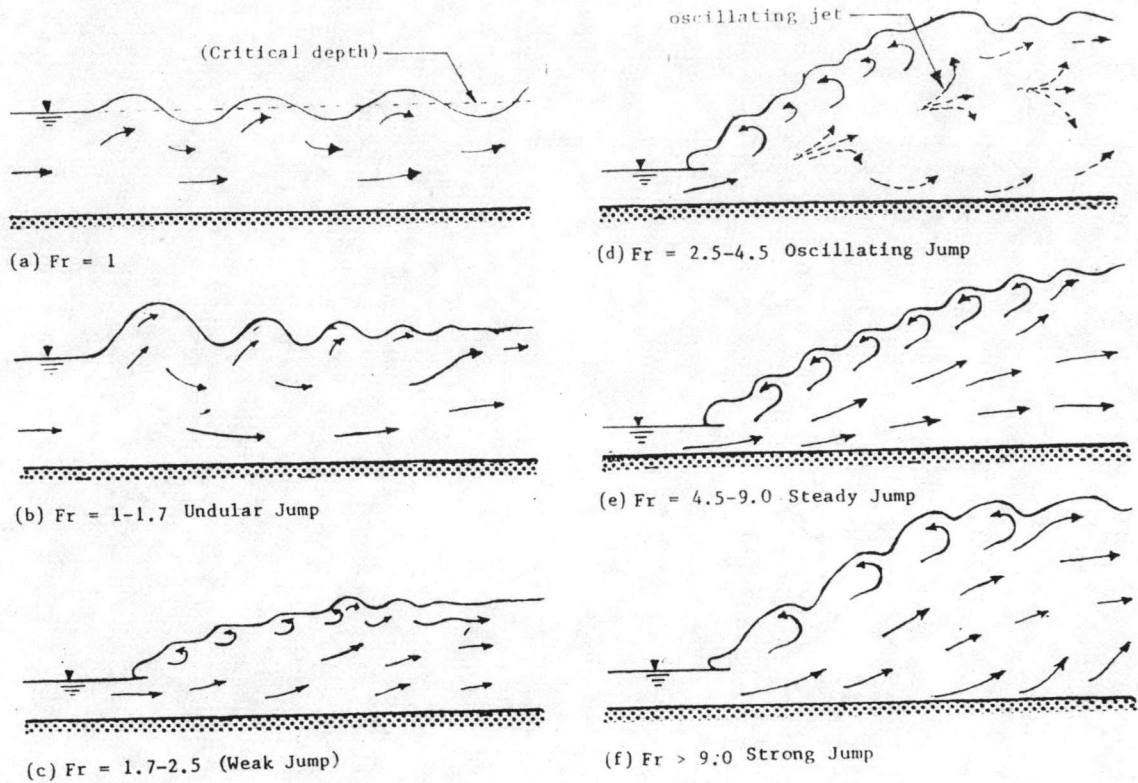
(b) สำหรับ $Fr = 1-1.7$ เกิดความปั่นป่วนบนผิวน้ำเพียงเล็กน้อย โดยที่ความลึกทางค้ำนเหนือหน้าและท้ายน้ำแตกต่างกันเล็กน้อย เรียก Jump ชนิดนี้ว่า Undular Jump

(c) สำหรับ $Fr = 1.7-2.5$ เกิดการหมุนปั่นป่วนบนผิวน้ำของ Jump เล็กน้อย แต่ผิวน้ำทางค้ำนท้ายน้ำยังคงราบเรียบ พลังงานสูญหายไปค่อนข้างต่ำ เรียก Jump ชนิดนี้ว่า (Weak Jump)

(d) สำหรับ $Fr = 2.5-4.5$ จะเกิด oscillating jet พุ่งจากท้องน้ำไปยังผิวน้ำแล้ววกกลับลงมาอีก ในคาบเวลาไม่ปกติทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนไปทางค้ำนท้ายน้ำเป็นระยะทางยาว เรียก Jump ชนิดนี้ว่า Oscillating Jump

(e) สำหรับ $Fr = 4.5-9.0$ เกิด Jump ที่ค่อนข้างเสถียรภาพ มีผลเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับท้ายน้ำ พลังงานของน้ำจะสูญเสียไปประมาณ 40-70 % เรียก Jump ชนิดนี้ว่า Steady Jump

(f) สำหรับ $Fr > 9.0$ เกิด Jump ซึ่งมี jet ความเร็วสูงไหลต่อเนื่องไปทางค้ำนท้ายน้ำ ผิวน้ำไม่ราบเรียบ เรียก Jump ชนิดนี้ว่า Strong Jump



รูป 2.2.1 แสดงรูปแบบลักษณะของ Hydraulic Jump

2.3 FROUDE NUMBER AND KINETIC FLOW FACTOR

การไหลของน้ำในลำน้ำเปิดมีผลเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำจากความเฉื่อย (Inertial force) ค่าอัตราส่วนที่ได้คือ Froude Number ซึ่งค้นพบโดยชาวอังกฤษ ชื่อ WILLIAM FROUDE ค.ศ. 1810-1879 สูตรสมการของ Froude Number คือ

$$Fr = V/\sqrt{gL} \text{ หรือ } Fr = V/\sqrt{gD} \dots\dots\dots(2.3.1)$$

- เมื่อ V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลของลำน้ำ ณ หน้าตัดที่พิจารณา
- g = อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก
- L = Linear dimension ในที่นี้คือ ความลึกของลำน้ำ (D)
- D = ความลึกของลำน้ำ = A/T
- A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล
- T = ความกว้างของผิวน้ำอิสระบนหน้าตัดของการไหล

การจำแนกผลที่มีต่อการไหลของน้ำ โดยใช้ Froude Number มีดังนี้

$Fr < 1$ เป็นการไหลในสถานะได้จุดวิกฤต (subcritical flow)

$Fr = 1$ เป็นการไหลในสถานะ ณ จุดวิกฤต (critical flow)

$Fr > 1$ เป็นการไหลในสถานะเหนือจุดวิกฤต (supercritical flow)

การศึกษาแบบจำลองของโครงสร้างทางชลศาสตร์นั้น ค่าของ Froude Number จะมีค่าเดียวกันทั้งในแบบของจริงและแบบจำลอง

ถ้านำค่า Froude Number มายกกำลัง 2 เราเรียกว่า Kinetic flow factor ใช้สัญลักษณ์ว่า λ ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย Rehbock สูตรสมการนี้คือ

$$\lambda = Fr^2 = V^2/gD \quad \dots\dots(2.3.2)$$

2.4 สมการการไหลต่อเนื่อง (Continuity Equation)

น้ำเป็นของเหลวบีบตัวยาก (Incompressible flow) กรณีที่การไหลของน้ำเป็นการไหลแบบ Steady flow อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งเท่ากับผลคูณของความเร็วเฉลี่ยของน้ำกับพื้นที่หน้าตัดนั้น โดยที่ความเร็วของน้ำมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดซึ่งพิจารณาภายใน stream tube นั่นคือ

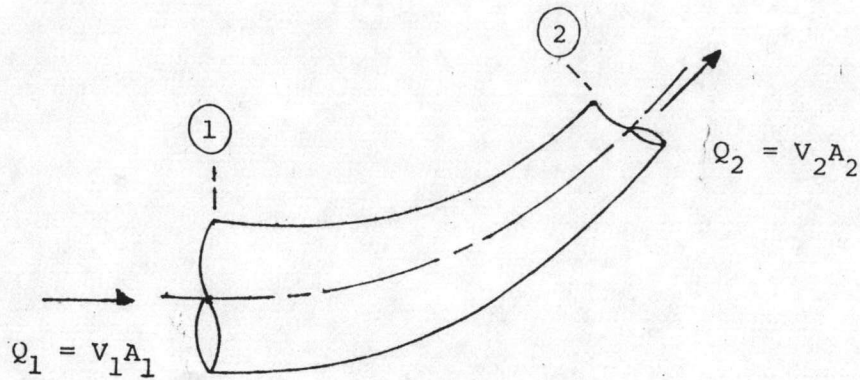
$$Q = VA \quad \dots\dots(2.4.1)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหลของน้ำ , $m^3/sec.$

V = ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ , $m/sec.$

A = พื้นที่หน้าตัด , m^2

หรืออาจกล่าวได้ว่า อัตราการไหลของน้ำซึ่งไหลผ่านทุก ๆ หน้าตัดในลำน้ำเดียวกันอย่างต่อเนื่อง จะมีค่าเท่ากัน ดังรูป 2.4.1



รูป 2.4.1 แสดงการไหลอย่างต่อเนื่องของของเหลว

$$Q_1 = Q_2 \dots\dots(2.4.2)$$

จากสมการ 2.4.1, 2.4.2 จะได้ $Q = v_1A_1 = v_2A_2 = \text{ค่าคงที่} \dots\dots(2.4.3)$

ช่วงการไหลของน้ำซึ่งไหลมาบรรจบหรือแยกออกจากกัน อัตราการไหลของน้ำจะมีค่าคงที่ ดังได้กล่าวมาแล้ว จะได้

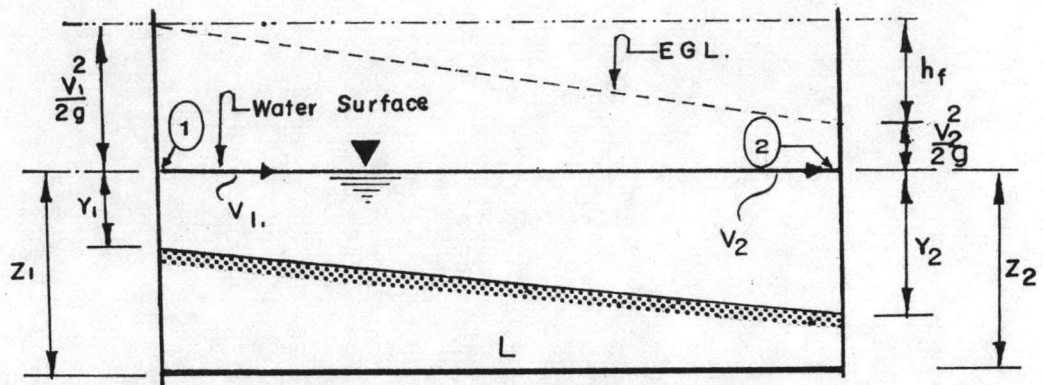
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \dots\dots(2.4.4)$$

ในเมื่อ $Q =$ อัตราการไหลของน้ำรวม

$Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n =$ อัตราการไหลของน้ำในลำดับสาขาที่แยกออกไปหรือเข้ามาบรรจบกัน

2.5 ทฤษฎีบทของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Theorem)

หลักการคงตัวของพลังงานในการไหล (Energy conservation principal) จะอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของ BERNOULLI ซึ่งกล่าวว่า "พลังงานการไหลของน้ำ ณ จุดใดจุดหนึ่งตามเส้น stream-line จะเท่ากับผลรวมของพลังงานการไหลที่จุดทางด้านท้ายน้ำกับพลังงานที่สูญเสียไป" ดังรูป 2.5.1



รูป 2.5.1 แสดงพลังงานของการไหลเปลี่ยนแปลงในลำน้ำเปิด

สมมติฐานสำหรับทฤษฎีนี้คือ

1. ไม่มีพลังงานเพิ่มเข้าไประหว่างสองหน้าตัดที่พิจารณา มีแต่การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานต่าง ๆ
2. ความเร็วตลอดพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่
3. พลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำมีค่าคงที่
4. ของไหลเป็นของเหลวบีบตัวยาก (Incompressible)

พลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดมี 3 ชนิดคือ

1. พลังงานศักย์ (Potential Energy) ขึ้นกับระดับผิวน้ำที่ความสูง z เทียบเส้นระดับที่กำหนดให้ (Datum Line) ดังนั้นพลังงานศักย์จะเท่ากับ mgz
2. พลังงานของความดัน (Pressure Energy) มีค่าเท่ากับ $mg(p/\gamma)$ ซึ่ง p/γ เป็นเฮดสถิตย (Static Head)

3. พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของของเหลว จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} mV^2$ ในเมื่อ V เป็นความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดนั้น

พลังงานทั้งหมดตลอดหน้าตัดมีค่าเท่ากับ E คือ

$$E = mgz + mg p/\gamma + \frac{1}{2} mV^2 \quad \dots\dots(2.5.1)$$

เพื่อให้พลังงานของมวลน้ำอยู่ในเทอมของความสูงของน้ำ จึงให้ $H = E/mg$ ดังนั้นจากสมการ 2.5.1 จะได้

$$H = z + p/\gamma + V^2/2g \quad \dots\dots(2.5.2)$$

จากรูป 2.5.1 เปรียบเทียบการไหลของน้ำระหว่างจุด (1) และ (2) ตามทฤษฎีของเบอร์นูลลี จะได้

$$z_1 + p_1/\gamma + V_1^2/2g = z_2 + p_2/\gamma + V_2^2/2g \quad \dots(2.5.3)$$

สำหรับในลำน้ำเปิด ความดันที่ผิวน้ำจะเท่ากันตลอดคือ เท่ากับความดันบรรยากาศ คือ $p/\gamma = 0$ จากสมการ 2.5.3 จะได้ (ในกรณีคิดถึงการสูญเสียพลังงาน)

$$z_1 + V_1^2/2g = z_2 + V_2^2/2g + h_f \quad \dots\dots(2.5.4)$$

โดยที่ h_f เป็นพลังงานความสูงที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานทั้งค้ำข้างและค้ำท้องน้ำ จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของความลาดชันของเส้นลาดพลัง (Slope of energy grade line), S_e , กับความยาวในแนวราบระหว่างจุดทั้ง 2 ของลำน้ำ, L

$$h_f = S_e L \quad \dots\dots(2.5.5)$$

2.6 การคงสภาพโมเมนตัม (Conservation of Momentum)

การคงสภาพของโมเมนตัมจะไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ภายในตัวมันเอง แต่มันจะเปลี่ยนแปลงโดยแรงภายนอกมากระทำซึ่งจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตัน (NEWTON'S SECOND LAW OF MOTION) จากรูป 2.6.1 จะได้

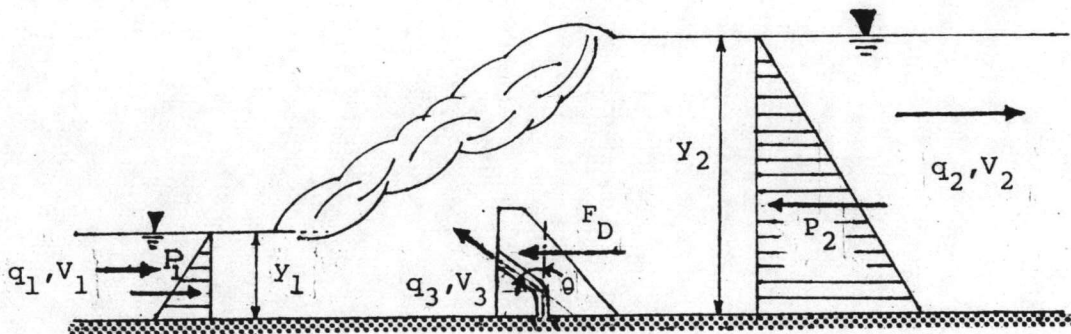
$$\Sigma F = \frac{d(mV)}{dt} \quad \dots\dots(2.6.1)$$

เมื่อ m = มวลของน้ำที่ไหลผ่านจากหน้าตัด (1) ไปยังหน้าตัด (2) ดังนั้น

$$m = \gamma Q T / g \quad \dots\dots(2.6.2)$$

จากสมการ 2.6.1, 2.6.2

$$F = \gamma Q (V_1 - V_2) / g \quad \dots\dots(2.6.3)$$



รูป 2.6.1 แสดงแรงที่กระทำต่อ Floor Blocks

จากรูป 2.6.1 การเกิดไฮดรอลิคจัม เนื่องจากมีตัวทำลายพลังงานที่เพิ่มเข้าไปในฟลอร์บล็อก (Floor Blocks) จากหลักการคงสภาพของโมเมนตัม จะได้

$$P_1 - P_2 - F_D/b = \rho q_2 V_2^2 - \rho q_1 V_1^2 + \rho q_3 V_3^2 \sin \theta \quad \dots\dots(2.6.4)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{2} \gamma y_1^2 - \frac{1}{2} \gamma y_2^2 - \frac{C_D 1/2 \cdot \rho V_1^2 A}{b} = \rho q_2 V_2^2 - \rho q_1 V_1^2 + \rho q_3 V_3^2 \sin \theta \quad (2.6.5)$$

โดยที่ y_1, P_1 = ความสูงและแรงดันด้านเหนือน้ำ

y_2, P_2 = ความสูงและแรงดันด้านท้ายน้ำ

F_D = แรงต้านทานของ Floor Blocks

b = ความกว้างของลำน้ำ

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

q_1 = อัตราการไหลของน้ำด้านเหนือน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

q_2 = อัตราการไหลของน้ำด้านท้ายน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

q_3 = อัตราการไหลของน้ำซึ่งออกจากท่อต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

C_D = สัมประสิทธิ์แรงต้านทานของ Floor blocks

A = พื้นที่หน้าตัดของ Floor blocks

V = ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ

θ = มุมของท่อซึ่งกระทำต่อแนวตั้ง

ความสำคัญของโมเมนต์จะถูกใช้แก้ปัญหาการไหลของน้ำ คือ

ก. หาแรงลัพท์ที่กระทำเนื่องจากการไหลของน้ำเปลี่ยนทิศทาง, ขนาดและความเร็ว เช่น ข้อโค้งงอ

ข. หาความลึกของระดับน้ำภายหลังเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น ไฮดรอลิคจัม

2.7 สัมประสิทธิ์ของพลังงานและโมเมนตัม (Energy and Momentum Coefficient)

เนื่องจากการแพร่กระจายความเร็วการไหลของน้ำเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform) ดังนั้นการคำนวณค่าพลังงานความสูงของความเร็ว (Velocity Head, $V^2/2g$) ที่ใช้ในสมการของ BERNOULLI จะไม่เท่ากับค่าเฉลี่ยของพลังงานความสูงของความเร็ว $(V^2/2g)_{avg}$. เมื่อใช้กฎของพลังงานมาคำนวณจริง ๆ จะได้เป็น $\alpha V^2/2g$ โดยที่ V เป็นความเร็วเฉลี่ย α เป็น Velocity Head Correction Factor หรือ Energy Coefficient หรือ Coriolis Coefficient เพื่อเป็นเกียรติแก่ G. CORIOLIS¹⁶ ซึ่งเป็นคนแรกที่ค้นพบ

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{V^3 A} \quad \dots\dots(2.7.1)$$

dA = พื้นที่แถบเล็ก ๆ

v = ความเร็วเฉลี่ยในช่วงพื้นที่แถบเล็ก ๆ

A = พื้นที่ทั้งหมด

V = ความเร็วเฉลี่ย

ในทำนองเดียวกันสูตรการคำนวณโมเมนตัมของการไหล ($\gamma QV/g$) จึงต้องมีการปรับแก้ความถูกต้องเนื่องจากการแพร่กระจายความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอเช่นนี้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม (Momentum Coefficient หรือ Boussinesq Coefficient) ซึ่งค้นพบโดย J. BOUSSINESQ¹⁶ จึงได้เป็น $\beta \gamma QV/g$

$$\beta = \frac{\int v^2 dA}{V^2 A} \quad \dots\dots(2.7.2)$$

การคำนวณค่า α, β โดยประมาณจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\alpha = 1 + 3\epsilon^2 - 2\epsilon^3 \quad \dots\dots(2.7.3)$$

$$\beta = 1 + \epsilon^2 \quad \dots\dots(2.7.4)$$

เมื่อ $\epsilon = \frac{V_{max}}{V} - 1$ (V_{max} = ความเร็วสูงสุด, V = ความเร็วเฉลี่ย)

สำหรับลำน้ำซึ่งมีหน้าตัดสม่ำเสมอในทางปฏิบัติส่วนใหญ่นิยมให้ใช้ค่า α & β เท่ากับ 1.0 เสมอ

2.8 พลังงานจำเพาะ (Specific Energy)

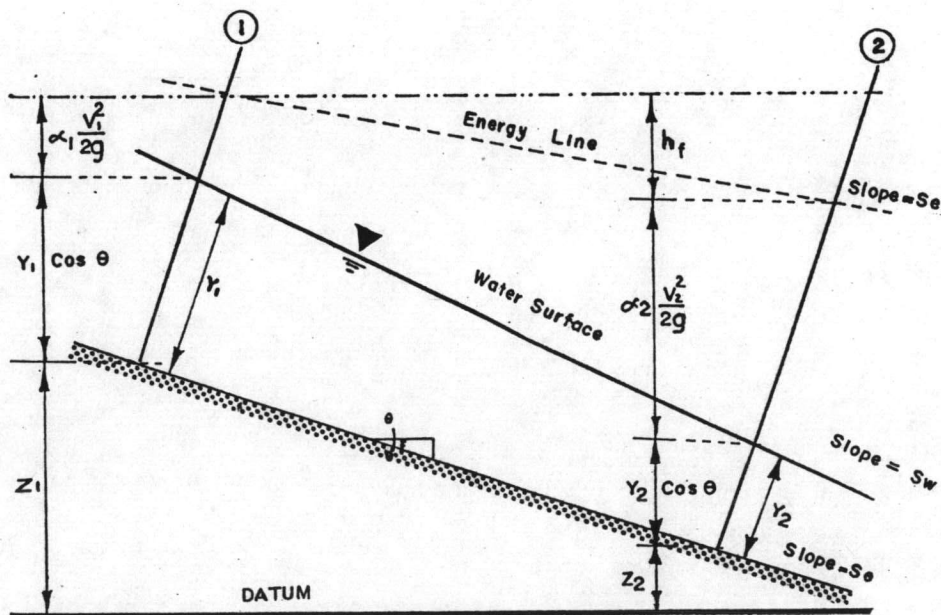
ในปี ค.ศ. 1912 BORIS A. BAKHMETEFF เป็นผู้ให้คำจำกัดความของพลังงานจำเพาะเป็นคนแรก มีใจความว่า พลังงานจำเพาะของลำน้ำในหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่ง คือ พลังงานต่อหน่วยมวลของน้ำเมื่อวัด เปรียบเทียบกับท้องน้ำ ดังรูป 2.8.1 ท้องน้ำมีความลาดชันมากตาม BERNOULLI's Equation จะได้

$$H = z_1 + y_1 \cos \theta + \alpha V_1^2 / 2g \quad \dots\dots(2.8.1)$$

เมื่อ Z = ระดับความสูง เมื่อ เทียบจากเส้นที่กำหนดถึงระดับท้องน้ำ

y_1 = ความลึกของน้ำ

θ = มุมของท้องน้ำที่ทำกับแนวนอน



รูป 2.8.1 แสดงพลังงานการไหลที่มีพื้นที่ลาดเอียง

เมื่อ $z = 0,$

พลังงานจำเพาะ , $E = y_1 \cos \theta + \alpha v_1^2 / 2g$ (2.8.2)

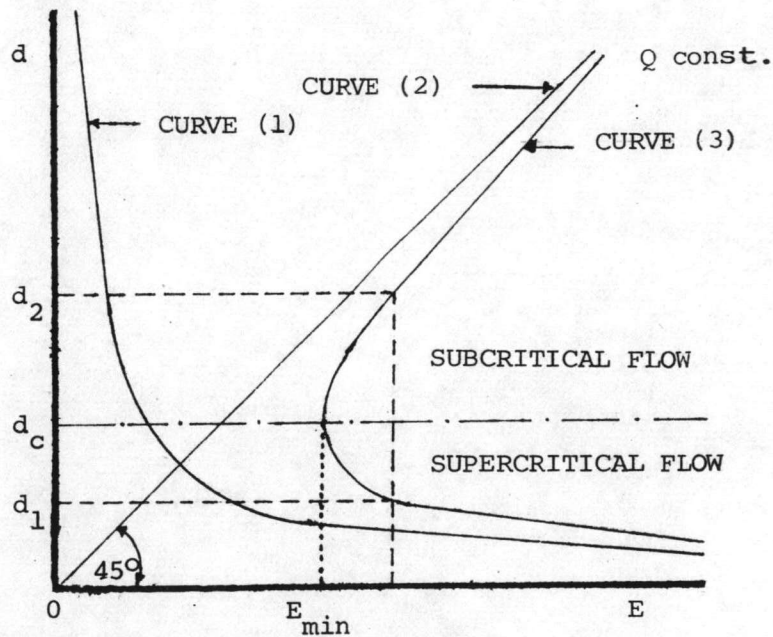
สำหรับท้องน้ำมีความลาดชันน้อย $\theta \approx 0$ และค่า $\alpha = 1$

$E = y + v^2 / 2g$ (2.8.3)

$q =$ อัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของลำน้ำ

ตามทฤษฎีการไหลต่อเนื่อง $q = vy$ หรือ $v = q/y$ นำไปแทนในสมการ 2.8.3 จะได้

$E = y + q^2 / 2gy^2$ (2.8.4)



รูป 2.8.2 แสดงแผนภูมิของพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Diagram)

ตามรูป 2.8.2 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

Curve (1) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึก y กับพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) เมื่ออัตราการไหลของน้ำมีอัตราคงที่ q จะเป็นปฏิภาคกลับกับ V คือ q^2 / V curve จะเป็นรูป Hyperbola

Curve (2) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึก y กับพลังงานศักย์ (Potential Energy) y จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานศักย์ ดังนั้นกราฟจะเป็นเส้นตรงทำมุม 45° กับแกน X

Curve (3) เป็นการรวมค่าของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ณ จุดความลึกเดียวกันคือ เป็นผลบวกของ Curve (1) และ Curve (2)

2.8.1 ค่าต่ำสุดของพลังงานจำเพาะ เมื่ออัตราการไหลมีค่าคงที่ จากรูป 2.8.2 สรุปได้ว่า

1. ความลึกของการไหล ณ จุดที่พลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุด เรียกว่า ความลึกวิกฤต (y_c) พลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุด เมื่อ $dE/dy = 0$ จากสมการ 2.8.4 จะได้

$$V_0^2/2g = y_c/2 \quad \dots\dots(2.8.5)$$

$$\begin{aligned} E_{\min} &= y_c + V_c^2/2g = y_c + y_c/2 \\ &= 3/2 y_c \quad \dots\dots(2.8.6) \end{aligned}$$

2. ความเร็วของการไหล ณ จุดที่ความลึกมากกว่าความลึกวิกฤตจะมีค่าน้อยกว่าความเร็ว ณ จุดวิกฤต เรียกว่า ความเร็วใต้จุดวิกฤต (Subcritical Velocity) จากรูป 2.8.2 การไหลในสภาวะใต้จุดวิกฤตจะอยู่เหนือเส้นระดับความลึกวิกฤตจนถึงกราฟของพลังงานจำเพาะที่เข้าใกล้เส้นตรง 45°

3. ความเร็วของการไหล ณ จุดที่ความลึกน้อยกว่าความลึกวิกฤตจะมีค่ามากกว่าความเร็ว ณ จุดวิกฤต เรียกว่า ความเร็วเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Velocity) จากรูป 2.8.2 การไหลในสภาวะเหนือจุดวิกฤตจะอยู่ต่ำกว่าเส้นระดับความลึกวิกฤตจนถึงกราฟของพลังงานจำเพาะที่เข้าใกล้แกน E

4. กราฟนี้แสดงว่า Q ค่าหนึ่งทำให้เกิดความลึกสลับ (Alternate Depth) 2 ค่า คือ y_1 เรียกว่าระดับน้ำต่ำ (Low stage) และ y_2 เรียกว่าระดับน้ำสูง (High stage) ยกเว้นที่จุดความลึกวิกฤต ความลึกสลับจะมีจุดเดียวในที่นี้คือ จุด 0

2.8.2 ค่าสูงสุดของอัตราการไหลของน้ำ เมื่อพลังงานจำเพาะมีค่าคงที่

ค่า y ณ จุดที่ทำให้ Q มีค่ามากที่สุดจะเป็นความลึกวิกฤต (y_c)

จากสมการ 2.8.3 พลังงานจำเพาะ, $E = y + V^2/2g \quad \dots\dots(2.8.7)$

$$V = \sqrt{2g(E-y)}$$

Continuity's Equation, $Q = VA = by\sqrt{2g(E-y)}$
 $= b\sqrt{2g(Ey^2-y^3)} \quad \dots\dots(2.8.8)$

จากสมการ 2.8.8, Q จะมีค่ามากที่สุดต่อเมื่อ (Ey^2-y^3) มีค่ามากที่สุด ดังนั้น

$$\frac{d}{dy}(Ey^2-y^3) = 0$$

จะได้ $E = 3/2 y$

หรือ $y_c = 2/3 E \quad \dots\dots(2.8.9)$

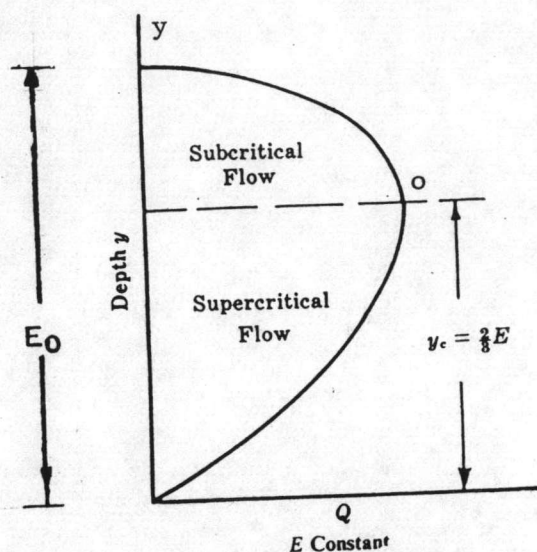
จากสมการ 2.8.9 เมื่อกำหนดค่าพลังงานจำเพาะให้ความลึกที่จะให้ค่า Q มากที่สุดจะเท่ากับ $2/3$ ของค่าพลังงานจำเพาะนั้น ซึ่งความลึก ณ จุดนี้จะเป็นความลึกวิกฤต ดังรูป 2.8.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหล (Q) กับความลึก (y) โดยมีพลังงานจำเพาะเป็นค่าคงที่ ค่าของ Q จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤต (จุด 0) ต่อจากนั้น Q เริ่มลดลง ทั้ง ๆ ที่ y เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

ถ้านำค่า $E = 3/2 y$ แทนในสมการ 2.8.3 จะได้

$$3/2 y = y + V^2/2g, \quad y/2 = V^2/2g$$

$$V^2/gy = 1 \quad \text{หรือ} \quad V/\sqrt{gy} = 1 \quad (\text{Froude Number, } Fr = V/\sqrt{gy} = 1)$$

นั่นคือ ณ จุดที่ให้ค่า Q มากที่สุด ความลึกจะเป็นความลึกวิกฤต (Critical Depth)



รูป 2.8.3 แสดงฟังก์ชันพลังงานจำเพาะ เมื่อพลังงานจำเพาะมีค่าคงที่

2.9 เรโนลด์ นัมเบอร์ และการไหลของน้ำในท่อ (Reynolds Number and Flow in Pipes)

ในปี ค.ศ. 1883 OSBORNE REYNOLDS เป็นผู้ค้นพบ โดยการนำเอาแรงที่กระทำเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial force) มาเปรียบเทียบกับแรงเนื่องจากความหนืดของของเหลว (Viscous force) จะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \text{หรือ} \quad Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad \dots\dots(2.9.1)$$

ในเมื่อ Re = ค่าของ Reynolds Number

V = ความเร็วการไหลของน้ำ, ม./วินาที

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, ม.

ν = ความหนืดเชิงจลน์, $\text{ม}^2/\text{วินาที}$

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, กก.-วินาที²/ม.⁴

μ = ความหนืดสัมบูรณ์, กก.-วินาที/ม.².

การไหลของน้ำในท่อ ทฤษฎีที่เรานำมาใช้เป็นทฤษฎีเดียวกับที่ใช้สำหรับลำน้ำเปิด ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เช่น ทฤษฎีการไหลต่อเนื่อง (Continuity) ทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Bernoulli) และทฤษฎีของโมเมนตัม (Momentum) เป็นต้น การไหลของน้ำมีอยู่ 3 ลักษณะซึ่งแบ่งแยกตามค่าของ Reynolds Number คือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เส้นแสดงการไหลของน้ำ (Stream Line) จะขนานกันและราบเรียบ การไหลแบบนี้ค่า Reynolds Number น้อยกว่า 2000
2. การไหลแบบผสม (Transitional Flow) ช่วงนี้จะมีการไหลไม่แน่นอน ค่าของ Reynolds Number ระหว่าง 2000 ถึง 4000 จะเป็นช่วงเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
3. การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เส้นแสดงการไหลของน้ำ (Stream Line) ทิศทางไม่แน่นอน ค่า Reynolds Number มากกว่า 4000

2.10 การสูญเสียพลังงานในท่อ

การไหลของน้ำภายในท่อจะมีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 อย่างคือ

1. การสูญเสียพลังงานหลัก (Major Losses) เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิววัตถุของท่อที่สัมผัส สำหรับสมการที่นำมาใช้เป็นส่วนใหญ่เป็นสมการของ Darcy-Weisbach คือ

$$h_f = \frac{fL}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots(2.10.1)$$

- ในเมื่อ
- h_f = พลังงานของน้ำที่สูญเสีย, ม.
 - L = ความยาวของท่อ, ม.
 - D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ, ม.
 - V = ความเร็วการไหลของน้ำ, ม./วินาที
 - g = ความเร่งของโลก, ม./วินาที²
 - f = ค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, f สำหรับท่อเรียบขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของน้ำ คือ

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

$$f = 64/R_e \quad (R_e < 2000) \quad \dots\dots\dots(2.10.2)$$

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในปี ค.ศ. 1911 P.R.H. BLASIUS

ได้ทดลองแล้วพบว่า

$$f = 0.3164 R_e^{-1/4} \quad (4000 < R_e < 10^5) \quad \dots\dots\dots(2.10.3)$$

$$\text{PRANDTL พบว่า } 1/\sqrt{f_s} = 2 \log(R_e \sqrt{f_s}) - 0.8 \quad (R_e > 4000) \quad \dots\dots\dots(2.10.4)$$

ต่อมา LOUIS F. MOODY ในปี 1944 ได้รวบรวมความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่า Reynolds Number ดังกล่าวข้างต้น แล้วนำมาปรับปรุงเขียนกราฟขึ้นใหม่ดังรูป 2.10.1 ซึ่งเรียกว่า Moody Diagram

2. การสูญเสียพลังงานรอง¹² (Minor Losses) เป็นการสูญเสียอย่างกระตันทันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของทิศทางหรือขนาดความเร็วการไหลของน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปสมการ

$$h_L = K \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots(2.10.5)$$

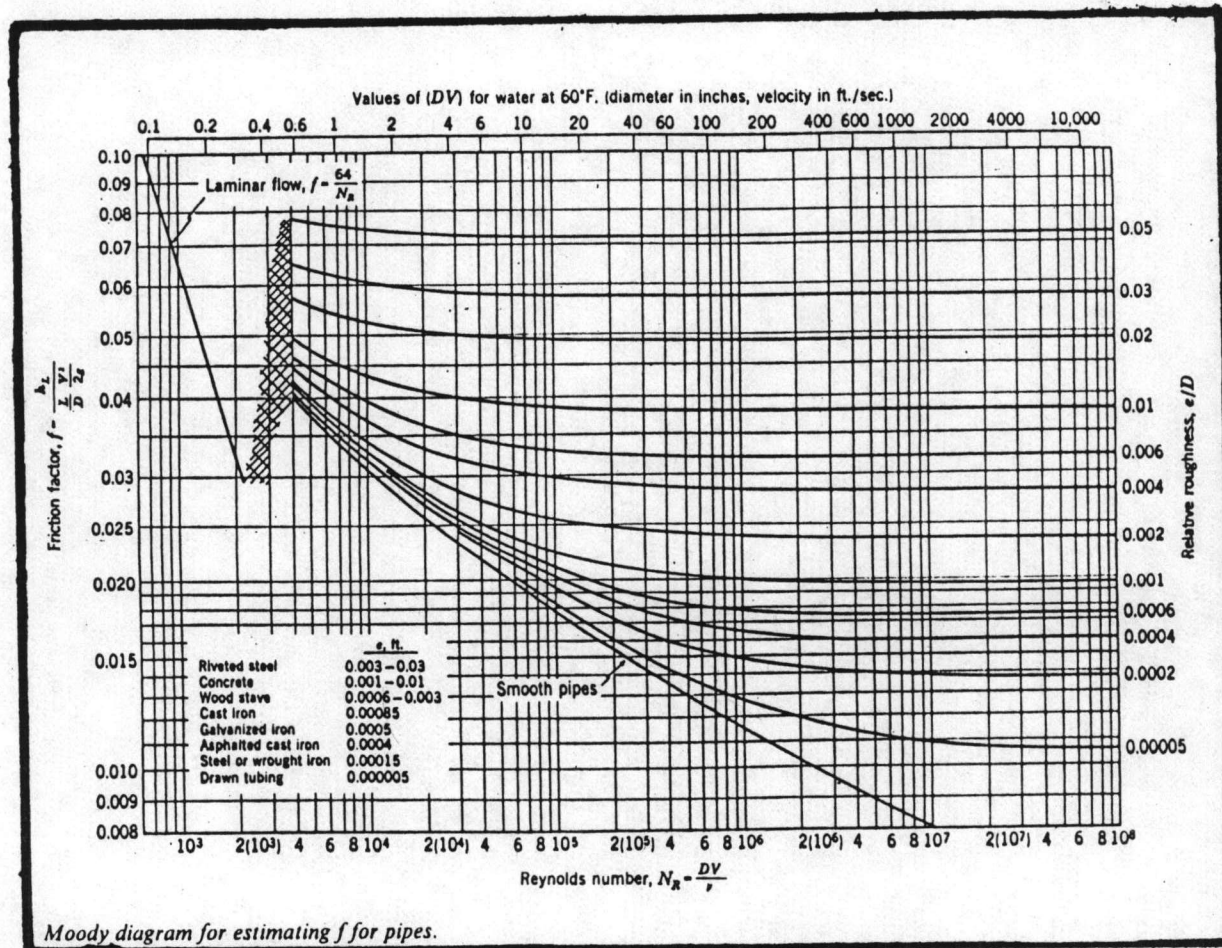
$$K = K_1 + K_2 + K_g + K_b \quad \dots\dots\dots(2.10.6)$$

K = ค่าสัมประสิทธิ์รวมเนื่องจากการสูญเสียทางเข้าท่อ, การลดขนาดของท่อ, ทางออก, ประตูน้ำและข้องอ

K_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการไหลจากถังเก็บน้ำเข้าไปในท่อที่มีค่า
= 0.50

K_2 = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการลดขนาดของท่อ มีค่า = $(\frac{1}{C} - 1)^2$

โดยที่ $C = 0.582 + \frac{0.0418}{1.1-r} \quad (r = d_1/d_2)$ จาก MANSFIELD MERRIMAN¹²



รูป 2.10.1 แสดง MOODY DIAGRAM สำหรับหาความเสียดทานภายในท่อ ²⁵

d_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนาดเล็ก

d_2 = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนาดใหญ่

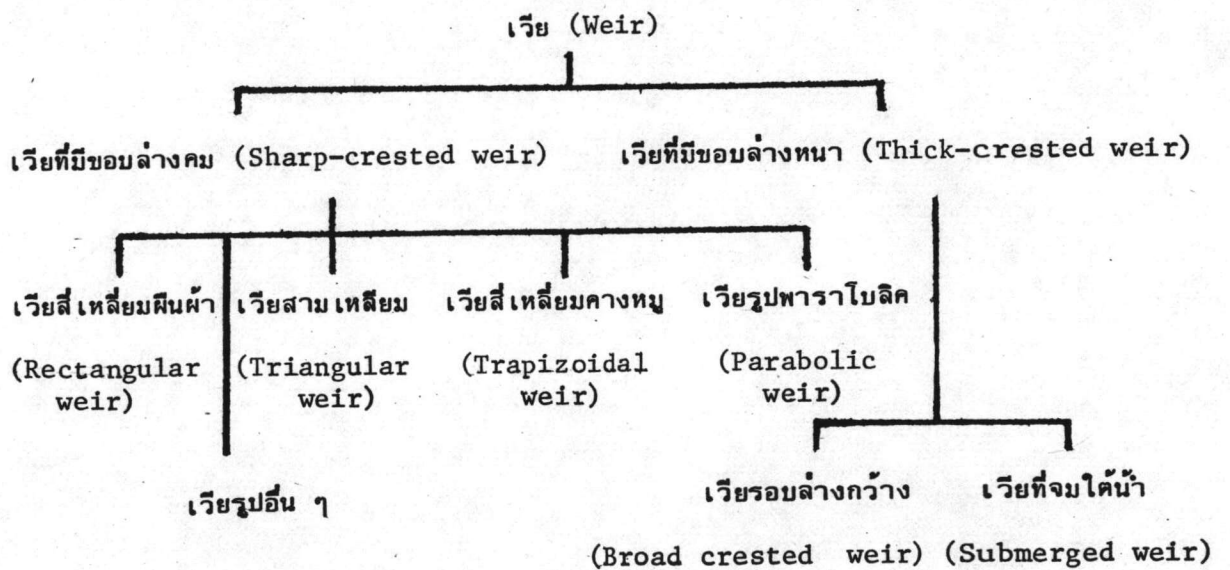
K_3 = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เนื่องจากการไหลออกจากท่อที่ปลายทางออกมีค่า = 1.0

K_g = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เนื่องจากการไหลผ่านประตูน้ำ มีค่า = 0.19

K_b = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เนื่องจากการไหลผ่านข้อโค้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของรัศมี ความโค้งต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ (R/d)

2.11 เวีย (Weirs)

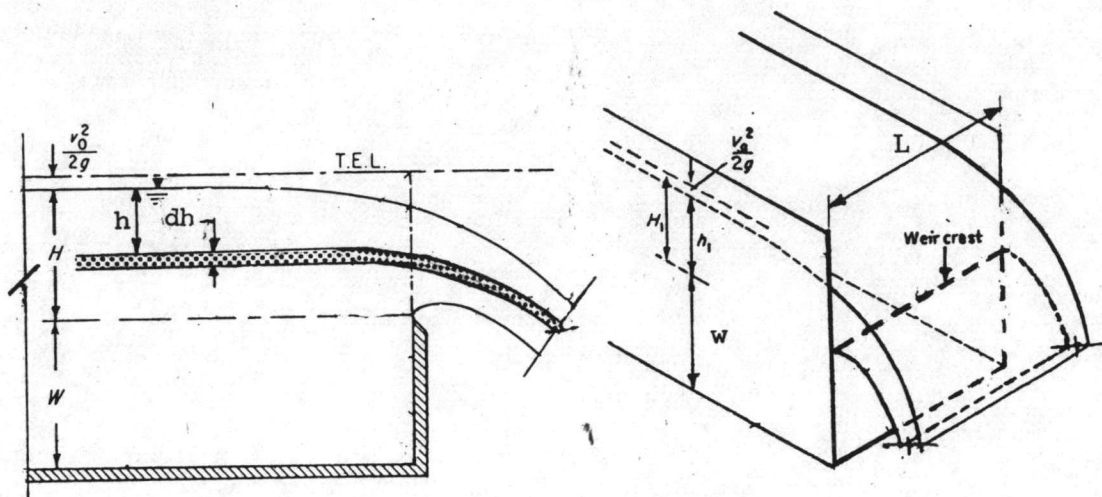
เป็นท่ำนกั้นน้ำ เพื่อให้ น้ำ ไหลผ่าน เวียแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้



2.11.1 การไหลผ่านเวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เมื่อมีน้ำไหลผ่านเวียซึ่งมีความกว้างของเวียเท่ากับ ความกว้างของลำน้ำ ดังรูป

2.11.1 จะเกิดแรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทานที่ขอบของเวีย เป็นสาเหตุให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเวียจริง ๆ มีปริมาณน้อยกว่าค่าที่ได้ตามทฤษฎี



รูป 2.11.1 แสดงการไหลของน้ำผ่านเวयरูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

L = ความกว้างของเวयर

H = ความสูงที่ระดับผิวน้ำเหนือขอบบนของเวयर

C_d = สัมประสิทธิ์การไหล

ถ้าสมมติให้ความหนาของแถบเล็ก ๆ หนา dh อยู่ใต้ระดับน้ำ h , พื้นที่แถบเล็ก ๆ

$$(dA) = L \cdot dh, \text{ ความเร็วของกระแสที่ตามทฤษฎี} = \sqrt{2gh}$$

ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่แถบเล็ก ๆ = พื้นที่แถบเล็ก ๆ \times ความเร็วของกระแสน้ำ

$$dQ = Ldh\sqrt{2gh}$$

$$\text{ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลผ่าน} = C_d \cdot L \sqrt{2g} \int_0^H h^{1/2} dh$$

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

$$\dots\dots(2.11.1)$$



เมื่อคำนึงถึงความเร็วขณะเข้าใกล้ (Velocity of Approach) ซึ่งเป็นความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านเวียเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของทางน้ำไหลก่อนถึง เวียมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ พื้นที่หน้าตัดของเวีย ความเร็วนี้สมมติว่ามีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเวีย ซึ่งตามสมการ 2.11.1 ไม่ได้คำนึงถึงค่านี้มาคำนึงถึง ดังนั้นพลังงานความสูงของน้ำที่ไหลผ่านเวียจะเป็นผลรวมของความสูงของน้ำกับความสูงของน้ำเนื่องจากความเร็วขณะเข้าใกล้ นั่นคือ

$$\text{พลังงานความสูงของน้ำที่ไหลผ่านเวีย} = H + V_o^2/2g \quad (V_o = \text{ความเร็วขณะเข้าใกล้})$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad Q &= C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot L \int \frac{H + V_o^2/2g}{V_o^2/2g} h^{1/2} \cdot dh \\ &= \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \cdot L \left[(H + V_o^2/2g)^{3/2} - (V_o^2/2g)^{3/2} \right] \\ &\dots\dots (2.11.2) \end{aligned}$$

2.11.2 การหาค่าถูกต้อง (Calibrate) เวียสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\text{จากสมการ 2.11.1} \quad Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \sqrt{2g} \cdot L \cdot H^{3/2}$$

ให้ $K = \frac{2}{3} \cdot C_d \sqrt{2g} \cdot L$ เพราะว่าเป็นค่าคงที่สำหรับเวียชนิดที่พิจารณา

$$Q = KH^{3/2} \quad \dots\dots (2.11.3)$$

เมื่อนำค่า Q, H มาเขียนกราฟตามรูป 2.11.2 (a) จะได้รูป Semi-cubical

เมื่อนำค่า $Q, H^{3/2}$ มาเขียนกราฟตามรูป 2.11.2 (b) จะได้กราฟเป็นเส้นตรง

ค่าคงที่ K สามารถเขียนได้

$$K = Q/H^{3/2}$$

$$C_d = K/2/3 \cdot \sqrt{2g} \cdot L$$

ในทางปฏิบัติค่า C_d แปรผันตามค่า H ดังนั้นค่า $Q = f(H^{3/2})$ ซึ่งไม่เป็นเส้นตรงเลย
ที่เดียว

$$\text{สมมติ } Q = KH^n \quad \dots\dots\dots(2.11.4)$$

$$\text{หรือ } \log Q = \log K + n \log H \quad \dots\dots\dots(2.11.5)$$

$\log Q = f(H)$ ได้กราฟเส้นตรง ซึ่งค่า k & n หาได้ดังนี้

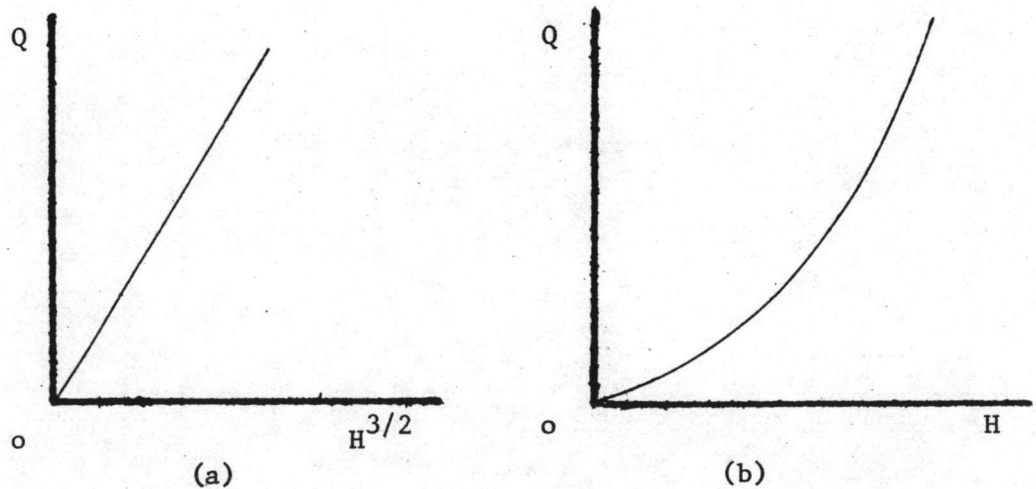
จากสมการ 2.11.5 เมื่อ $H = 1$ ค่า $\log H = 0$

$$\log Q = \log K$$

$$K = Q$$

$$n = \frac{\log Q - \log K}{\log H} \quad \dots\dots\dots(2.11.6)$$

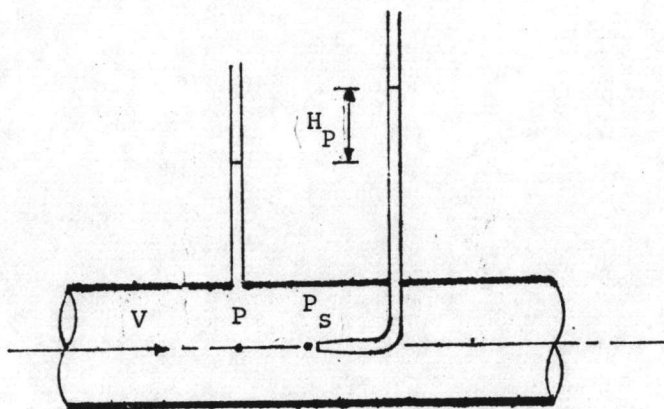
เลือกค่าจุดใดจุดหนึ่งบนกราฟมาแทนค่าก็จะได้ค่า n ซึ่งวิธีการหาค่า k & n จะแสดงให้เห็นต่อไปในภาคผนวก ข.



รูป 2.11.2 การ CALIBRATE เวย์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2.12 Pitot Tube

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดหาความเร็วของน้ำซึ่ง HENRI PITOT เป็นผู้ค้นพบในปี ค.ศ. 1730 ซึ่งมีลักษณะเป็นหลอดแก้วขนาดเล็กงอ 90° มีปลายตีบ สำหรับการวัดความเร็วของน้ำภายในท่อ ต้องใช้ติดตั้งคู่กับหลอด Piezometer ดังรูป



รูป 2.12.1 แสดงการวัดความเร็วของน้ำในท่อ โดยใช้ Pitot Tube

$$P_s = P + V^2/2g$$

$$P_s - P = V^2/2g$$

ซึ่ง P วัดโดย Piezometer และ P_s ถูกวัดโดย Pitot Tube ดังนั้นความแตกต่างของ P_s และ P คือ $V^2/2g$ ซึ่งเท่ากับ H_p

$$V^2/2g = H_p \therefore V = \sqrt{2gH_p}$$

ซึ่งค่าความเร็วที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของของจริง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่าความถูกต้อง นั่นคือ

$$V = C_p \sqrt{2gH_p} \dots\dots\dots(2.12.1)$$

ในเมื่อ C_p = Coefficient of Pitot Tube

สำหรับรายละเอียดการทำค่าความถูกต้องของ Pitot Tube นี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.