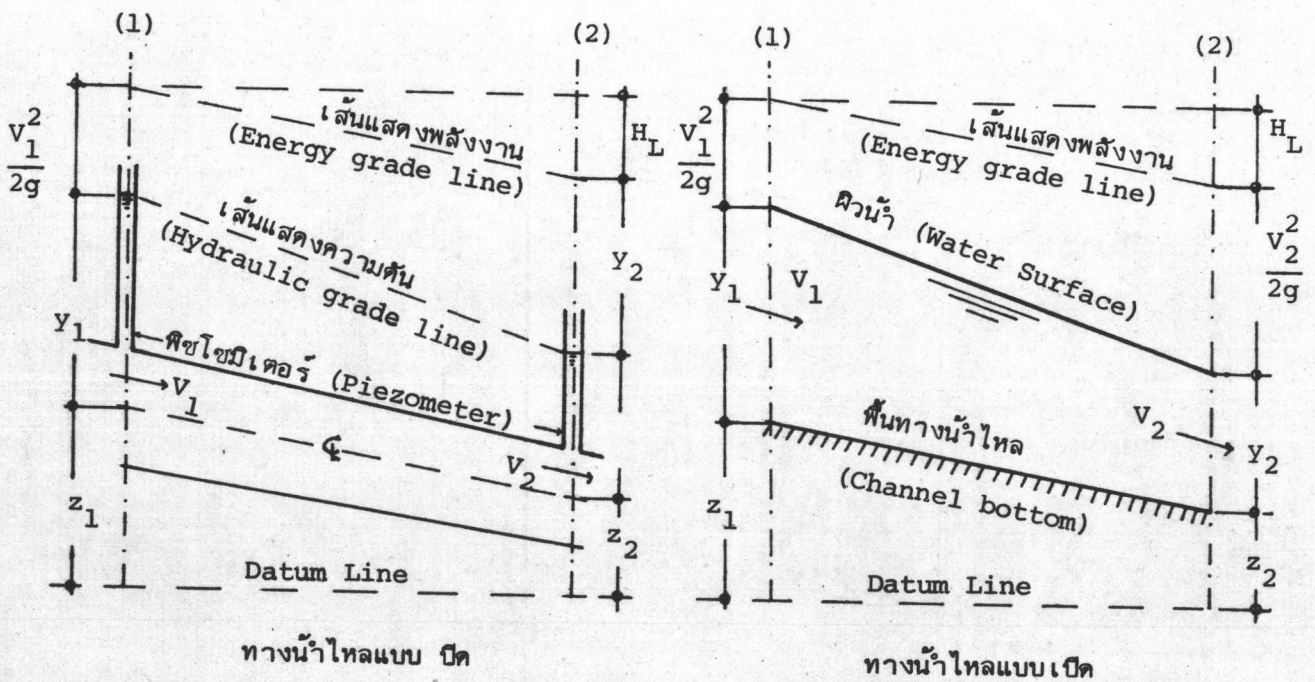


2.1 การเปรียบเทียบทางน้ำไหลปิดและเปิด (Comparison Between Pipe Flow And Open Channel Flow)

การไหลของน้ำในท่ออาจเป็นการไหลแบบทางน้ำไหลเปิด (Open Channel Flow) หรือแบบทางน้ำไหลปิด (Pipe Flow) การไหลทั้งสองแบบมีลักษณะการไหลคล้ายกันแต่มีข้อแตกต่างบ้าง ทางน้ำไหลแบบเปิดจะมีผิวน้ำอิสระ (Free Surface) สัมผัสกับอากาศและมวลน้ำที่ไหลอยู่ภายใต้ความดันของบรรยากาศ (Atmospheric Pressure) เป็นลักษณะการไหลของน้ำที่ไม่เต็มท่อ เช่น น้ำที่ไหลในท่อระบายน้ำ เป็นต้น ส่วนทางน้ำไหลแบบปิดผิวน้ำไม่ได้สัมผัสกับอากาศ การไหลของน้ำเป็นการไหลเต็มท่อมี่ความดันของของเหลวภายในท่อด้วย



รูป 2-1 การเปรียบเทียบทางน้ำไหลแบบปิดและแบบเปิด

2.2 ชนิดต่าง ๆ ของทางน้ำไหลเปิด (Kinds of Open Channel)

ทางน้ำไหลที่มีผิวน้ำอิสระสัมผัสกับบรรยากาศ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ทางน้ำไหลเปิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Channels) และทางน้ำไหลเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial Channels)

2.2.1 ทางน้ำไหลเปิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Channels) ได้แก่ แม่น้ำ คู คลองซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติบนโลก มีรูปร่างลักษณะขนาดต่าง ๆ กัน เช่น ทางน้ำไหลเล็ก ๆ ตามดินเขา ลำธาร ห้วย แม่น้ำขนาดเล็กและใหญ่ตลอดจนทางน้ำไหลของน้ำใต้ดินที่มีผิวน้ำอิสระสัมผัสกับบรรยากาศ ซึ่งถือว่าเป็นทางน้ำไหลเปิดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติด้วย โดยทั่วไปรูปร่างลักษณะทางน้ำไหลที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติขรุขระมากและมีพื้นผิวท่อน้ำไม่สม่ำเสมอ จากการสังเกตและประสบการณ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับสภาวะการไหลมีเหตุผลตรงกับสมมุติฐานที่ตั้งขึ้น สามารถนำมาตั้งเป็นกฎเกณฑ์ในทฤษฎีทางชลศาสตร์ได้ ซึ่งในการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของทางน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ต้องรู้สภาวะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องทางอุทกวิทยาและทางธรณีวิทยามาประกอบด้วย เป็นต้น

2.2.2 ทางน้ำไหลเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial Channels) มีชื่อเรียกแตกต่างกันไป แล้วแต่สภาพการใช้งาน ได้แก่ คลอง (Canal) สะพานน้ำ (Flume) รางเท (Chute) ภูม่น้ำตก (Drop and Fall) ท่อส่งน้ำ (Irrigation Culvert) และฝายทค่น้ำ (Open Weir) ฯลฯ การก่อสร้างทางน้ำเปิดนั้นจะต้องศึกษาคุณสมบัติการไหลของน้ำและสร้างทางน้ำไหลรูปจำลองขึ้นมา เพื่อทดลองในห้องปฏิบัติการหาคุณลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้ โดยนำข้อมูลมาออกแบบและคำนวณหาขนาดทางน้ำไหลให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

2.3 แบบต่าง ๆ ของการไหล (Types of Flow) ทางน้ำไหลเปิดแบ่งการไหลออกได้หลายแบบ ในรูปลักษณะต่าง ๆ กัน แล้วแต่ชนิดของการไหล การแบ่งชนิดของการไหลขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความลึกและเวลาของการไหลในทางน้ำไหลเปิด ซึ่งแยกเป็นหลักใหญ่ได้เป็น 4 แบบ คือ

2.3.1 การไหลแบบสม่ำเสมอและไม่เปลี่ยนไปตามกาลเวลา (Steady Uniform Flow) การไหลแบบนี้เกิดขึ้นในทางน้ำไหลเปิดที่มีความยาวเป็นเส้นตรง มีขนาดของพื้นที่หน้าตัด และท้องรางลาดเอินเท่ากันตลอด การสูญเสียของพลังงานในขณะที่น้ำไหลเท่ากับการลดของพลังงานศักย์ (Potential Energy) พอดี ความลึกของน้ำและความเร็วของการไหลไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางเวลา โดยมีความลึกของน้ำเท่ากันตลอดทางน้ำไหล เรียกว่าความลึกปกติ " y_n " (Normal Depth) ลักษณะการไหลแบบนี้สามารถนำมาศึกษาและค้นคว้าได้สะดวก

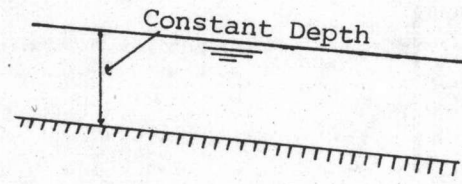
2.3.2 การไหลแบบไม่สม่ำเสมอ แต่ไม่เปลี่ยนไปตามกาลเวลา (Steady-Nonuniform Flow) สภาวะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นได้ในทางน้ำไหลเปิดที่มีพื้นที่หน้าตัดของทางน้ำไหลไม่เท่ากันตลอด ลักษณะความลึกในการไหลเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของทางน้ำไหล และมีความเร็วของมวลน้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลงตลอดทิศทางการไหล แต่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางเวลา ถ้าการเปลี่ยนแปลงความลึกเป็นไปอย่างช้า ๆ (Gradually Varied Flow) การไหลแบบนี้สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงสั้นโดยวิธีค่อยทำค่อยไป (Step-by-Step) ส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Rapidly Varied Flow) อาจศึกษาและวิเคราะห์โดยสร้างรูปจำลองทางน้ำไหลขึ้นมา

2.3.3 การไหลแบบสม่ำเสมอแต่เปลี่ยนแปลงกับกาลเวลา (Unsteady Uniform Flow)

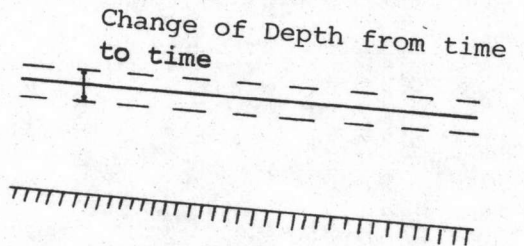
การไหลแบบนี้เกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกับกาลเวลาแล้ว ความลึกการไหลของน้ำจะเท่ากันตลอดทางน้ำไหลเป็นไปไม่ได้ เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นแบบอย่างการไหลซึ่งยากแก่การวิเคราะห์ เมื่อนำค่าความเสียดทานมาคิดด้วย

2.3.4 การไหลแบบไม่สม่ำเสมอและเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา (Unsteady Nonuniform Flow)

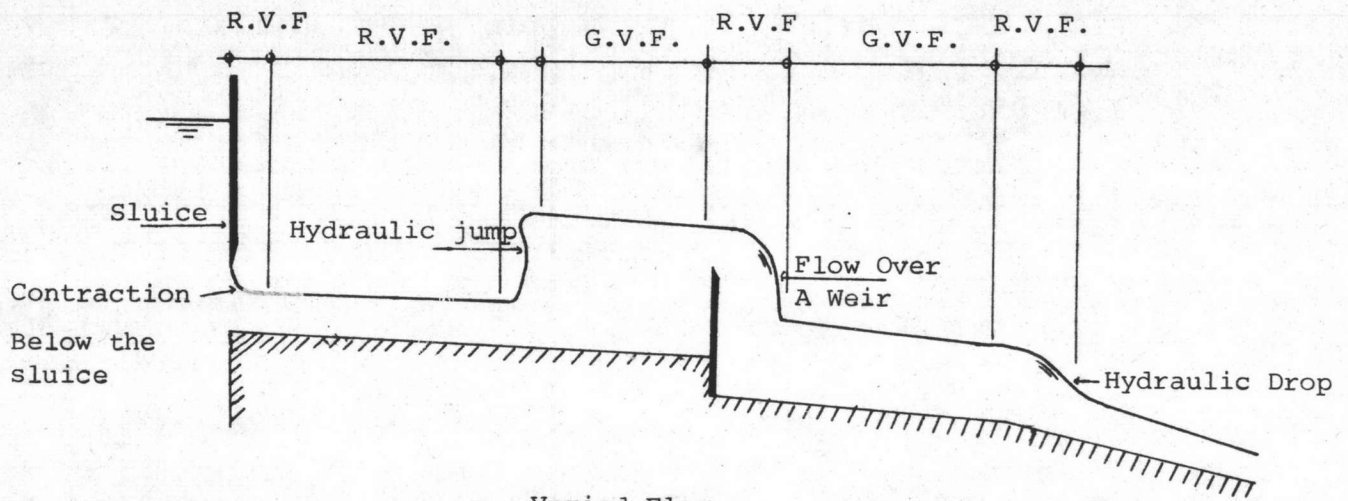
การไหลแบบนี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาและทุกสถานที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างเฉียบพลัน เช่น เกิดคลื่น เกิดการปั่นป่วนและอื่น ๆ เป็นแบบที่ศึกษาได้ยาก



Uniform Flow - Flow in A Laboratory Channel



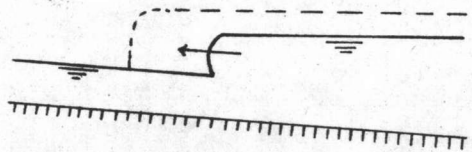
Unsteady Uniform Flow-Rare



Varied Flow



Gradually varied Flow (G.V.F.) - Flood Wave



Rapidly varied Flow (R.V.F.) - Bore

Unsteady Flow

รูป 2-2 แบบต่าง ๆ ของการไหลในทางน้ำเปิด

2.4 สภาวะการไหลของทางน้ำไหลเปิด (State of Open Channel Flow)

สภาวะหรือคุณสมบัติของการไหลในทางน้ำเปิดเป็นรากฐานขึ้นอยู่กับผลของความหนืด (Viscosity) และการดึงดูดของโลก (Gravity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงเฉื่อย (Inertial Force) ของการไหล ภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมที่แน่นอนแรงดึงดูดของโลกของน้ำอาจจะมียธิพลต่อคุณสมบัติการไหลของน้ำก็ได้ แต่ไม่ค่อยมีบทบาทสำคัญมากนักในการไหลแบบทางน้ำเปิด

2.4.1 ผลของความหนืด (Effect of Viscosity) มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับแรงเฉื่อย (Inertial Force) การไหลอาจเป็นแบบไหลช้าราบเรียบ (Laminar Flow) แบบไหลเปลี่ยนรูป (Transitional Flow) และแบบไหลรุนแรง (Turbulent Flow)

2.4.2 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) หมายถึงการไหลของของไหลชนิดที่อนุภาคของไหลไม่ว่าจะเป็นอนุภาคเล็กหรือใหญ่ เคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบ ๆ โดยที่แผ่นหนึ่งเลื่อนเรียบเหนือแผ่นอื่น ลักษณะการเกิดการไหลแบบราบเรียบ คือ การไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของเลือดและการดูดน้ำของต้นไม้ เป็นต้น

2.4.3 การไหลแบบรุนแรง (Turbulent Flow) หมายถึงการไหลของของไหลชนิดที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่ในลักษณะหรือทิศทางไม่แน่นอน โดยเคลื่อนที่ขึ้นลงและมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม จากส่วนหนึ่งของของไหลไปยังส่วนอื่น ๆ ลักษณะการไหลของของไหลทั่วไปเกือบ 95 % จะเป็นการไหลแบบนี้ ตัวอย่าง การไหลของน้ำตามแม่น้ำลำคลอง การไหลของอากาศในท่อลม เป็นต้น สภาวะการไหลที่อยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบรุนแรง เรียกว่า การไหลแบบเปลี่ยนรูป

2.4.4 เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) มีสัญลักษณ์ย่อ คือ R_e เป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดเนื่องจากความหนืดของของไหล R_e เป็นตัวสำคัญที่จะแสดงถึงลักษณะการไหลในทางน้ำไหลเปิดเป็นแบบใด คือ ไหลแบบราบเรียบหรือไหลแบบรุนแรง และเป็นตัวสำคัญในการหาแฟกเตอร์ความเสียดทาน

สำหรับทางน้ำไหลเปิด ถ้า R_e น้อยกว่า 500 การไหลของน้ำเป็นแบบราบเรียบ ถ้า R_e อยู่ระหว่าง 500 และ 2000 การไหลของน้ำเป็นแบบเปลี่ยนรูป ถ้า R_e มากกว่า 2000 การไหลของน้ำเป็นแบบรุนแรง เป็นต้น

สำหรับทางน้ำไหลเปิดรูปครึ่งวงกลม

$$R_e = \frac{RV\rho}{\mu} \quad \text{หรือ} \quad \frac{RV}{\nu}$$

- เมื่อ R_e = เรย์โนลด์นัมเบอร์
 V = ความเร็วในการไหลของน้ำ, m/s
 R = ไฮดรอลิครเดียม (Hydraulic Radius); m
 ρ = ความหนาแน่นของน้ำ; kg/m³
 μ = ความหนืดสมบูรณ์ของน้ำ; kg.s/m²
 ν = ความหนืดจลน์ของน้ำ; m²/s

2.4.5 ผลของการดึงดูดของโลก (Effect of Gravity) ขึ้นอยู่กับสถานะการไหลของอัตราส่วนแรงเฉื่อยต่อแรงดึงดูดของโลก อัตราส่วนนี้เรียกว่า ฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า การไหลในทางน้ำไหลเปิดเป็นรูปลักษณะแบบใดดังสมการ

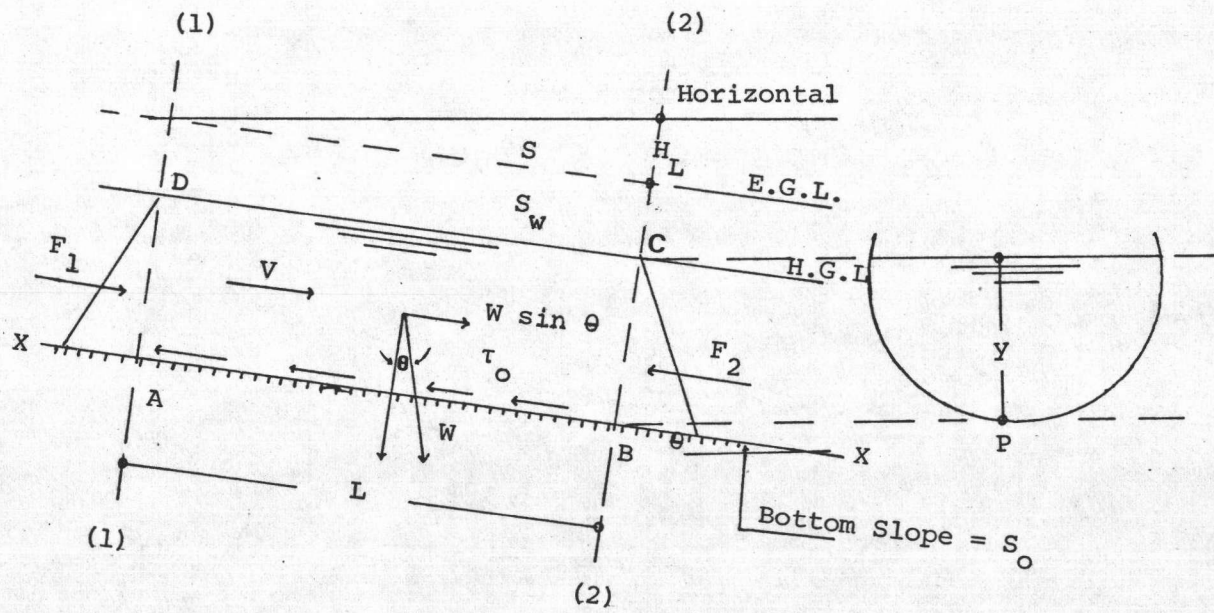
$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

- เมื่อ F_r = ฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number)
 V = ความเร็วในการไหลของน้ำ, m/s
 g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, m/s²
 D = Hydraulic Depth
 $= \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของทางน้ำไหลเปิด}}{\text{ความกว้างของทางน้ำไหลเปิด}} \left(\frac{A}{b}\right), m$

ถ้า Froude Number (F_r) มีค่าน้อยกว่า 1 หรือ $V < \sqrt{gD}$ เป็นการไหลได้วิกฤติ (Subcritical Flow) ซึ่งความเร็วในการไหลของน้ำต่ำ เป็นแบบการไหลเฉื่อย (Tranquil Flow) เนื่องจากอิทธิพลแรงดึงดูดของโลก ถ้า Froude Number (F_r) มีค่าเท่ากับ 1 หรือ $V = \sqrt{gD}$ เป็นการไหลวิกฤติ (Critical Flow) หรือ Froude Number (F_r) มีค่ามากกว่า 1 หรือ $V > \sqrt{gD}$ แล้วเป็นการไหลเหนือวิกฤติ (Supercritical Flow) ซึ่งความเร็วในการไหลของน้ำสูง เป็นแบบการไหลรวดเร็ว (Rapid Flow) เนื่องจากอิทธิพลของแรงเฉื่อย

2.5 การหาสมการปริมาณการไหลในทางน้ำไหลเปิด (Formula For Flow In Open Channels)

2.5.1 การไหลสม่ำเสมอและไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา (Steady Uniform Flow)



รูป 2-3 แสดงหน้าตัดด้านข้างของทางน้ำไหลที่มีพื้นที่ต้งน้ำลาดเอิน

007458

จากรูปจะเห็นว่า มีแรงกระทำต่อก่อนของไหลปริมาตรควบคุม(1)-(2) อยู่ 4 แรง ใช้สมการโมเมนตัมในทิศทางขนานกับพื้นทางน้ำไหลระหว่างจุด(1) และจุด(2) ให้ ABCD เป็น Free-body

$$\Sigma F = \frac{d}{dt} (MV)$$

$$\Sigma F_x = \rho Q_2 V_2 - \rho Q_1 V_1 \dots\dots\dots (2-1)$$

เนื่องจากหน้าตัดของทางน้ำไหลที่จุด(1)และ(2) เท่ากัน $Q_1 = Q_2$ ค่าโมเมนตัมระหว่างจุด(1) และ(2) จึงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการ (2-1) เขียนใหม่ได้

$$\Sigma F_x = 0$$

หรือ $F_1 + W \sin \theta - F_2 - F_3 = 0 \dots\dots\dots (2-2)$

เมื่อ $F_1 =$ แรงกดดันรวมของน้ำที่จุด (1)

$F_2 =$ แรงกดดันรวมของน้ำที่จุด (2)

$W =$ น้ำหนักของมวลน้ำ ABCD

$F_3 =$ แรงเฉือนที่พื้น = $PL \tau_o$



เนื่องจากความลึกของน้ำที่จุด(1)=(2) $F_1 = F_2$ จากสมการ (2-2) เขียนใหม่เป็น

$$W \sin \theta - PL \tau_o = 0$$

$$\gamma AL \sin \theta - PL \tau_o = 0$$

$$\gamma AL \frac{H_L}{L} - PL \tau_o = 0$$

$$\gamma A H_L - PL \tau_o = 0$$

$$\tau_o = \frac{\gamma A H_L}{P \cdot L}$$

$$\tau_o = \gamma R \cdot S \dots\dots\dots (2-3)$$

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

$$\frac{H_L}{L} = S = \text{ความลาดชันของเส้นแสดงพลังงาน}$$

จาก Fluid Mechanics แต่งโดย Victor L. Streeter

$$\tau_o = f \cdot \rho \frac{V^2}{8} \dots\dots\dots (2-4)$$

สมการ (2-3) = (2-4)

$$f \cdot \rho \frac{V^2}{8} = \tau R S$$

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \times \sqrt{R \cdot S}$$

ให้ $C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$

ได้ $V = C \sqrt{R \cdot S} \dots\dots\dots (2-5)$

Chezy ได้ติดตั้งสมการนี้ขึ้นในปี ค.ศ. 1775 และเขาได้พบว่า ความเร็วของ
ทางน้ำไหลเปิด แปรผันกับ $\sqrt{R \cdot S}$.

2.6 การหาตัวประกอบความต้านทานของ Chezy (Determination of Chezy's Resistance Factor)

2.6.1 สูตร G.K. หรือ Kutter

ในปี ค.ศ. 1869 ได้มีวิศวกรชาวสวิส 2 คน ชื่อ Ganguillet และ Kutter ได้ศึกษาค้นคว้าทางน้ำไหลที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แบบต่าง ๆ โดยทดลองและ

หาข้อมูลที่แม่น้ำมิสซิสซิปปี (Mississippi) พร้อมก่อสร้างแบบรูปจำลองขึ้นมาเพื่อศึกษาและค้นพบสูตร G.K หรือ Kutter ดังนี้

หน่วยอังกฤษ

$$C = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{S} + \frac{1.8112}{n}}{1 + (41.65 + \frac{0.00281}{S}) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

หน่วยเมตริก

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.000155}{S}}{1 + (23 + \frac{0.000155}{S}) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$



จะเห็นว่าค่า C แปรผันตามความลาดเอียงของเส้นแสดงพลังงาน (S) ไฮดรอลิก เรเดียส (R) และ ส.ป.ส. ความหยาบของผนังทางน้ำไหล (n) ทั้งนี้ วิศวกรชาวอเมริกัน เยอรมันและอังกฤษ นิยมใช้สูตรนี้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากให้ค่าผลลัพธ์แน่นอนเพื่อใช้กับทางน้ำไหลเปิดแบบสมอและแม่น้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สูตรนี้ได้เคยนำมาใช้ในการออกแบบและคำนวณคลองในประเทศต่าง ๆ มาแล้ว เช่น ประเทศอินเดีย อิตาลี ออสเตรเลียและอเมริกาใต้ เป็นต้น

2.6.2 การหาค่า C โดย Manning

ในปี ค.ศ. 1890 มีวิศวกรชาวเยอรมัน ชื่อ G.H.L. Hagen, วิศวกรชาวฝรั่งเศส ชื่อ P.G. Gauikler และวิศวกรชาวไอริช ชื่อ Robert Manning ได้ร่วมกันศึกษาค้นคว้าและทดลอง ได้สมการทางน้ำไหลเปิด ดังนี้

หน่วยเมตริก

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

- ซึ่ง
- $V =$ ความเร็วในการไหลของน้ำ, m/s
- $R =$ ไฮดรอลิกเรเดียส, m
- $S =$ ความลาดชันของเส้นแสดงพลังงาน
- $n =$ สัมประสิทธิ์ความหยาบของผนังทางน้ำไหล

เมื่อเปรียบเทียบสมการ Chezy กับสมการ Manning ได้ค่า C ดังนี้

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

สูตรนี้เหมาะสำหรับแม่น้ำหรือลำธารที่กว้างและค่า n ของสูตร Manning มีค่าเหมือนกับค่า n ของสูตร Kutter เนื่องจากตัวเลขยกกำลังของค่าไฮดรอลิกเรเดียส (R) ในสูตร Manning ไม่คงที่และแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับรูปร่างและความหยาบของผนังทางน้ำไหลเปิด ด้วยเหตุนี้ วิศวกร ชลศาสตร์ชอบที่จะใช้ค่าตัวเลขยกกำลังที่เปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพลักษณะของทางน้ำไหลเปิด ต่อมาในปี ค.ศ. 1925 Pavlovskie ได้เสนอสูตรทางน้ำไหลเปิดที่มีการไหลแบบสม่ำเสมอและใช้กันอย่างกว้างขวางในประเทศรัสเซีย ดังนี้

หน่วยเมตริก

$$C = \frac{1}{n} R^y$$

ซึ่ง

$$y = 2.5 \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \sqrt{R} (\sqrt{R} - 0.10)$$

- เมื่อ
- $C =$ สัมประสิทธิ์ความต้านทานของทางน้ำไหลเปิด
- $y =$ ค่าตัวเลขยกกำลังเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ R และ n
- $R =$ ค่าไฮดรอลิกเรเดียสที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.10 และ 0.30 m.
- $n =$ สัมประสิทธิ์ความหยาบของผนังทางน้ำไหลเปิดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.011 และ 0.040

ในทางปฏิบัติสามารถใช้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ได้คือ

$$y = 1.5 \sqrt{n} \quad \text{เมื่อ} \quad R < 1.00 \text{ m.}$$

$$y = 1.3 \sqrt{n} \quad \text{เมื่อ} \quad R > 1.00 \text{ m.}$$

ตารางที่ 2.1 ค่า n ต่าง ๆ ในสูตร Kutter และ Manning

Nature Of Surface	Range in n	Commonly used
Uncoated cast-iron.....	0.012 -0.015	0.014
Coated cast-iron.....	0.011 -0.013	0.012
Riveted steel.....	0.013 -0.017	0.015
Vitrified sewer pipe.....	0.010 -0.017	0.013
Brick in cement mortar.....	0.012 -0.017	0.015
Neat cement.....	0.010 -0.013	0.011
Cement mortar.....	0.011 -0.015	0.013
Concrete pipe.....	0.012 -0.016	0.013
Concrete channels.....	0.012 -0.018	0.014
Wood-stave pipe.....	0.010 -0.013	0.011
Plank flumes		
Planed.....	0.010 -0.014	0.012
Unplaned.....	0.011 -0.015	0.013
Cement-rubble masonry.....	0.017 -0.030	
Dry rubble masonry.....	0.025 -0.035	
Dressed ashlar masonry.....	0.013 -0.017	
Semi-circular metal flumes		
Smooth.....	0.011 -0.015	0.013
Corrugated.....	0.0225-0.030	0.028
Canals and ditches		
Earth, straight and uniform.....	0.017 -0.025	0.0225
Rock cuts, smooth and uniform.....	0.025 -0.035	0.033
Rock cuts, jagged and irregular.....	0.035 -0.045	
Dredged in earth.....	0.025 -0.033	0.0275
Earth bottom, rubble sides.....	0.028 -0.035	0.032
Natural streams		
(1) Clean, straight, uniform.....	0.025 -0.033	
(2) Same as (1) but some weeds and stones....	0.030 -0.040	
(3) Winding with pools and shoals.....	0.033 -0.045	
(4) Same as (3), some weeds and stones.....	0.035 -0.050	
(5) Sluggish river reaches, rather weedy.....	0.050 -0.080	
(6) Sluggish river reaches, very weedy.....	0.075 -0.150	

2.6.3 การหาค่า C โดยเบซิน (Bazin)

ในปี ค.ศ. 1897 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ H. Bazin ได้ศึกษาและทดลองหาค่า C ดังนี้

หน่วยอังกฤษ

$$C = \frac{157.60}{1 + \frac{1.81Y}{\sqrt{R}}}$$

หน่วยเมตริก

$$C = \frac{87}{1 + \frac{Y}{\sqrt{R}}}$$

เมื่อ R = ไฮดรอลิกเรเดียส (Hydraulic Radius), m

Y = ส.ป.ส. ความหยาบของผนังทางน้ำไหล



จะเห็นว่าสูตร Bazin มีค่า C ไม่ขึ้นอยู่กับความลาดเอียงของเส้นแสดงพลังงาน (S) สามารถแทนค่าได้ง่ายกว่าและได้ผลลัพธ์น้อยกว่าค่า C ในสูตร Kutter ในประเทศฝรั่งเศส นิยมใช้สูตรนี้อย่างแพร่หลายแต่การใช้อยู่ในวงจำกัดเฉพาะทางน้ำไหลเปิดขนาดเล็กเท่านั้น

2.7 การเปรียบเทียบสูตรต่าง ๆ ของทางน้ำไหลเปิด (Comparison of Open Channel Formulas) แบบสูตร Kutter, Manning และ Basin

เดิมทีเดียวการคำนวณหาค่าความเร็วของน้ำในทางน้ำไหลเปิด นิยมใช้สูตร Chezy ดังนี้ $V = C \sqrt{R.S}$ ต่อมาเมื่อมีสูตรที่ใช้คำนวณหาค่าความเร็วของน้ำในทางน้ำไหลเปิดเกิดขึ้นหลายสูตร เช่น สูตร Manning, Kutter และ Bazin ส่วน Kutter กับ Bazin ได้ยึดถือสูตรของ Chezy เป็นหลักใหญ่ เพียงแต่คิดค้นและทดลองหาค่า C ขึ้นใหม่เท่านั้น ค่า C ของสูตรต่าง ๆ ในหน่วยเมตริกมีดังนี้

$$\text{สูตร Kutter } C = \frac{23 + \frac{0.00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

$$\text{สูตร Bazin } C = \frac{87}{1 + \frac{Y}{\sqrt{R}}}$$

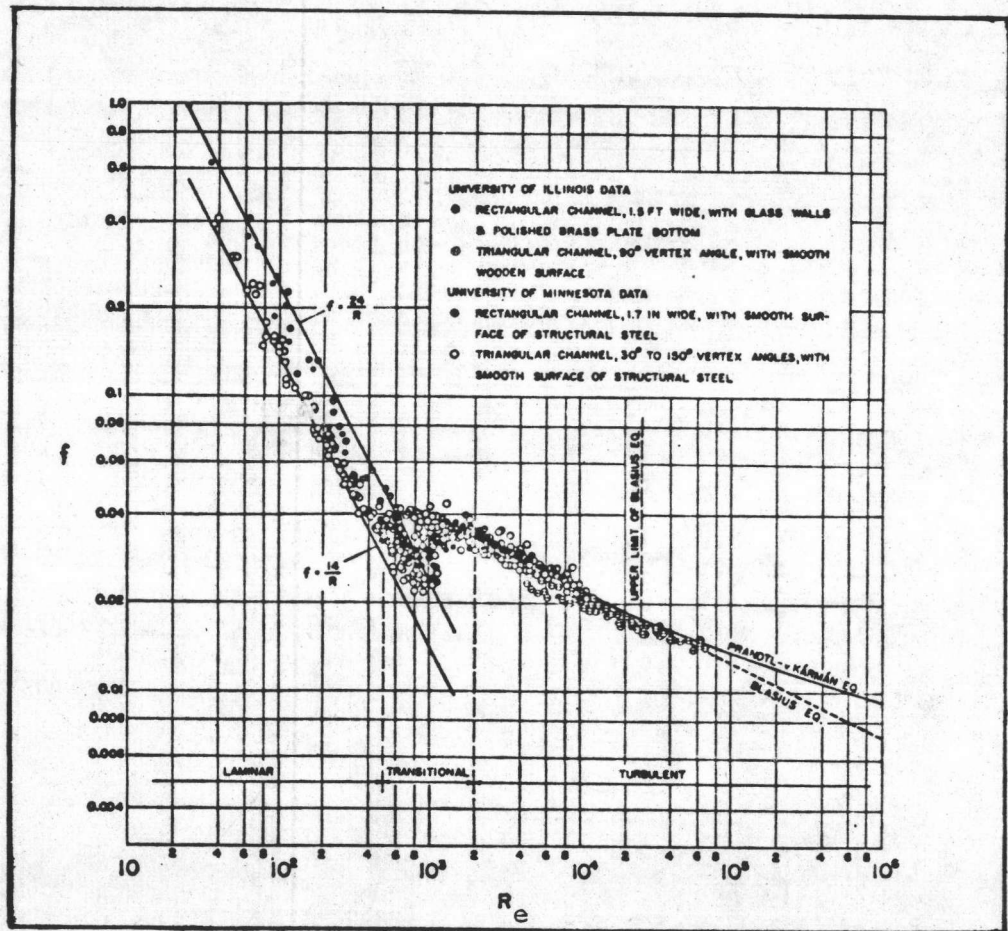
$$\text{สูตร Manning } C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

จะเห็นว่า ค่า C ของสูตร Kutter ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงตามความลาดเอียงของเส้นแสดงพลังงาน (S) สัมประสิทธิ์ความหยาบของผนังทางน้ำไหล (n) และไฮดรอลิกเรเดียส (R) ส่วนค่า C ของสูตร Bazin และ Manning ไม่มี S มาเกี่ยวข้องทำให้การคำนวณง่ายกว่าสูตร Kutter มาก ยิ่งกว่านั้น บางท่านยังวิจารณ์ว่าค่าตัว C ของ Kutter ผิดในการที่นำเอา S มาเกี่ยวข้อง บางท่านก็วิจารณ์ว่า Kutter ทำการทดลองหาค่า C โดยอาศัยทดลองในแม่น้ำมิสซิสซิปปีและมีความผิดพลาดประมาณ 10 หรือ 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่น่าจะนำไปใช้คำนวณสำหรับแม่น้ำหรือลำคลองอื่น ๆ ได้ทั่วไปหมด ส่วนสูตรของ Bazin ได้ข้อมูลจากผลทดลองของทางน้ำไหลขนาดเล็กและการใช้สูตรนี้อยู่ในวงจำกัด ดังนั้น การที่จะนำสูตรนี้มาใช้ทั่วไปจึงไม่เหมาะสม สรุปแล้ว มีหลายท่านไม่นิยมใช้สูตร Kutter กับสูตร Bazin ซึ่งในปัจจุบันการใช้สูตรเหล่านี้กำลังจะหมดไป ส่วนสูตรของ Manning กำลังเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาก

2.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า f (Friction Factor) และ R_e (Reynolds Number) ของทางน้ำไหลที่มีพื้นที่ท้องน้ำเรียบและขรุขระ

Ven Te Chow ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า f และ R_e โดยอาศัยข้อมูลต่าง ๆ จากวิศวกรชลศาสตร์หลายท่านด้วยกันมาเป็นแนวทางจากรูป 2-4 และรูป 2-5 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า f และ R_e ของทางน้ำไหลที่มีพื้นที่ท้องน้ำเรียบและขรุขระ

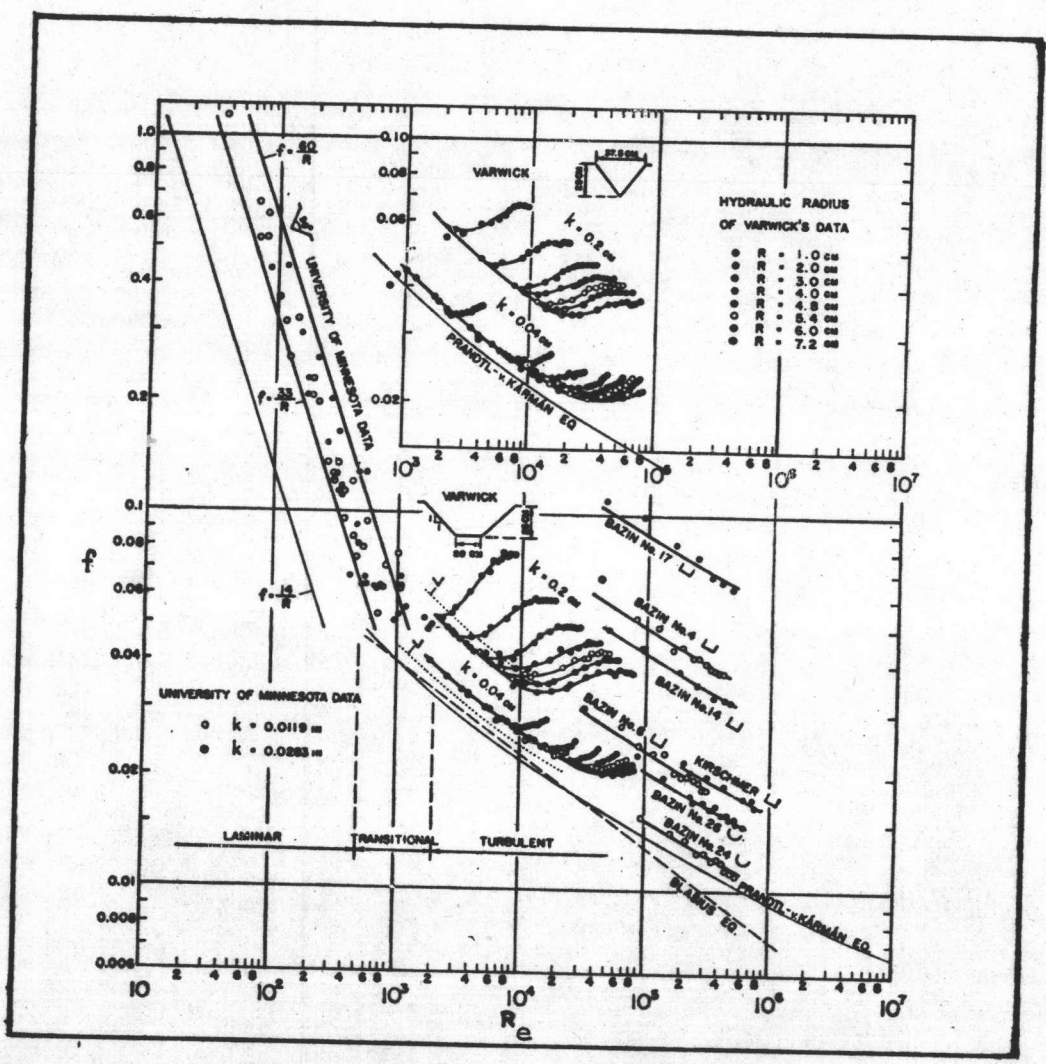
2.8.1 บริเวณที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ค่า K ในพื้นที่ท้องน้ำขรุขระอยู่ระหว่าง 33 ถึง 60 และในพื้นที่ท้องน้ำเรียบอยู่ระหว่าง 14 ถึง 24 แสดงให้เห็นว่า



รูป 2-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า f และ Re ในทางน้ำไหลที่มีพื้นท้องน้ำเรียบ
แบบต่าง ๆ

จากหนังสือ Open-Channel Hydraulics หน้า 10 แต่งโดย Ven Te Chow

ค.ศ. 1959



รูป 2-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า f และ Re ในทางน้ำไหลที่มีพื้นท้องน้ำ
ขรุขระแบบต่าง ๆ

จากหนังสือ Open-Channel Hydraulics หน้า 11 แต่งโดย Ven Te Chow
ค.ศ. 1959

ค่า K ในพื้นที่ของน้ำขรุขระโดยปกติแล้วจะมีค่าสูงกว่าค่า K ในพื้นที่ของน้ำเรียบ ตามที่กล่าวมานี้จะเห็นว่า ลักษณะของพื้นที่ของน้ำขรุขระมีอิทธิพลต่อค่า Friction Factor ในบริเวณการไหลแบบราบเรียบ

2.8.2 เมื่อความหยาบของพื้นที่ของน้ำคงที่ ในบริเวณที่มีการไหลแบบรุนแรง (Turbulent Flow) ค่า Friction Factor จะลดลงตามลักษณะรูปร่างของทางน้ำไหลแบบต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้คือ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมคางหมูและรูปร่างกลม แสดงว่าลักษณะรูปร่างของทางน้ำไหลมีอิทธิพลต่อค่า Friction Factor

2.8.3 เมื่อ R_e (Reynolds Number) มีค่าสูงมาก เส้นกราฟที่โค้งจะเริ่มเปลี่ยนเป็นเส้นในแนวราบ มาถึงสถานะนี้ เรียกว่าเป็นลักษณะการไหลแบบ Complete Turbulent แสดงว่า f ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ R_e แต่ขึ้นอยู่กับความหยาบ, ไฮดรอลิกเรเดียส และรูปร่างทางน้ำไหล จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นการไหลแบบจำกัดความเร็วต่ำ (Sub-critical Flow) โดยที่แรงตึงผิวไม่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลแบบนี้

ตามปกติการไหลแบบราบเรียบนี้จะไม่ค่อยเกิดขึ้นกับทางน้ำไหลเปิด การไหลแบบราบเรียบที่เกิดขึ้นได้นั้นต้องมีรูปหน้าตัดของทางน้ำไหลเล็กมาก ความเร็วของน้ำน้อยมากหรือมีความหนืดจลน์สูงมาก เช่น การไหลของน้ำที่เคลื่อนที่ในลักษณะตามกันเป็นชั้นเรียบ ๆ บนพื้นดิน โดยทั่วไปแล้ว การไหลแบบรุนแรงส่วนมากจะเกิดขึ้นในทางน้ำไหลเปิด ซึ่งศึกษาได้โดยจำลองสภาพทางน้ำไหลให้คล้ายของจริง และออกแบบให้ทางน้ำไหลจำลองมีลักษณะการไหลเพื่อให้ได้ R_e (Reynolds Number) มีค่าอยู่ในระหว่างช่วงการไหลแบบรุนแรง

2.9 วิธีหารูปหน้าตัดทางน้ำไหลเปิดที่ดีที่สุด (The Best Channel Section)

การออกแบบทางน้ำไหลเพื่อทำเป็นคลองส่งน้ำนั้น ต้องวางหลักเกณฑ์ในการออกแบบให้ประหยัดที่สุดและได้รูปหน้าตัดของทางน้ำไหลที่ดีที่สุดด้วย ทางน้ำไหลเปิดที่มีรูปหน้าตัดดีนั้นจะต้องคาดพื้นที่ของคลองสั้นและมีเส้นรอบรูปน้อยที่สุด โดยให้มีค่าไฮดรอลิกเรเดียส (Hydraulic Radius) อัตราความเร็วและอัตราการไหลมากที่สุด เช่น ทางน้ำไหลเปิดรูปครึ่งวงกลมมีเส้น

รอบรูปน้อยที่สุดและสามารถรับอัตราการไหลของน้ำมากกว่ารูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้า สามเหลี่ยมและพาราโบลาที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันเป็นต้น

การคำนวณหน้าตัดที่ดีที่สุดและค่าพื้นที่ท้องคลองสั้นที่สุด หาได้จากสูตร Chezy

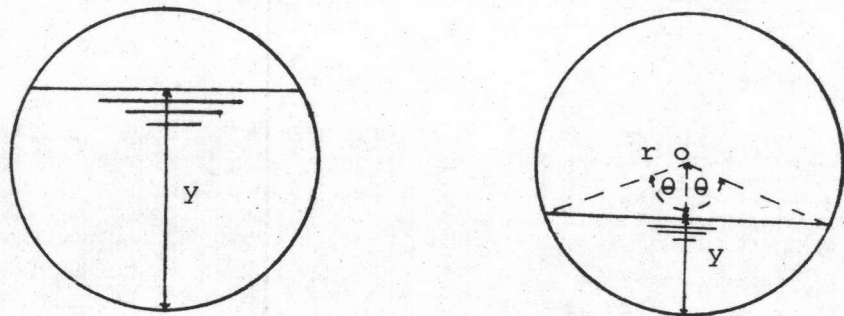
$$V = C \sqrt{R.S.} = C \sqrt{\frac{A}{P} S}$$

หรือ $Q = A.C. \sqrt{\frac{A}{P} S}$

จะเห็นได้ว่าเมื่อเส้นรอบรูป (P) น้อยที่สุด ความเร็วในการไหล (V) หรืออัตราการไหล (Q) จะมากที่สุดด้วย

2.9.1 ทางน้ำไหลที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม (Circular Section Channel)

ก. ความลึกที่ให้ความเร็วมากที่สุด (Depth for Maximum Velocity)



รูป 2-6 การไหลของน้ำในท่อระบาย

ให้ y = ความลึกของน้ำในท่อระบาย

r = รัศมีของท่อน้ำไหล

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} (2\theta r)r - \frac{1}{2} (2r \sin \theta) r \cos \theta \\ &= \theta r^2 - r^2 \sin \theta \cos \theta \end{aligned}$$

$$A = r^2 \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right)$$

โดยวิธี Differentiate A เทียบตัวแปร θ

$$\frac{dA}{d\theta} = r^2 \frac{d\theta}{d\theta} - \frac{1}{2} r^2 \cos 2\theta (2) \frac{d\theta}{d\theta}$$

$$\frac{dA}{d\theta} = r^2 (1 - \cos 2\theta) \dots\dots\dots (2-6)$$

ให้ $P = 2\theta r, \frac{dP}{d\theta} = 2r$

$$R = \frac{A}{P}, R = r^2 \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right)$$

จากสูตร Chezy

$$V = C \sqrt{R.S.}$$

ให้ C และ S คงที่ $\therefore V$ มากที่สุดเมื่อ R มากที่สุดด้วย

โดยวิธี Differentiate R เทียบกับตัวแปร θ

$$\frac{dR}{d\theta} = \frac{P \frac{dA}{d\theta} - A \frac{dP}{d\theta}}{P^2} = 0 \dots\dots\dots (2-7)$$

แทนค่า $\frac{dA}{d\theta}, \frac{dP}{d\theta}$ ในสมการ (2-7)

$$\frac{2\theta r^3 (1 - \cos 2\theta) - r^2 \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right) 2r}{4\theta^2 r^2} = 0$$

$$2\theta r^3 (1 - \cos 2\theta) - 2r^3 \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right) = 0$$

หารด้วย $2r^3$

$$\theta (1 - \cos 2\theta) - \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right) = 0$$

$$\frac{\sin 2\theta}{2} = \theta \cos 2\theta$$

$$\tan 2\theta = 2\theta$$

$$\text{สมมติให้ } 2\theta = 157.50^\circ$$

$$\tan 157.50^\circ = \frac{2r}{360^\circ} (157.50^\circ)$$

$$4.5107 \approx 4.4942$$

$$2\theta = 157.50^\circ$$

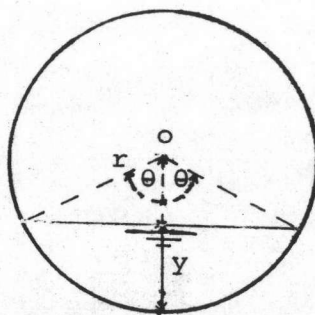
ให้

$$y = r - r \cos \theta$$

$$y = 0.81 D$$

นั่นคือความลึกของน้ำในท่อน้ำไหลรูปหน้าตัดทรงกลมที่ให้ความเร็วน้ำมากที่สุด
 = 0.81 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

ข. ความลึกที่ให้ค่าอัตราการไหล (θ) มากที่สุด (Depth for Maximum Discharge)



รูป 2-7 การไหลของน้ำในท่อระบาย

จากสูตร Chezy

$$\begin{aligned} Q &= A.C.\sqrt{R.S.} = AC\sqrt{\frac{A}{P}.S} \\ &= C\sqrt{\frac{A^3}{P}.S} \end{aligned}$$

ให้ค่า C และ S คงที่ Q มีค่ามากที่สุดเมื่อ $\frac{A^3}{P}$ มากที่สุด

โดยวิธี Differentiate $\frac{A^3}{P}$ เทียบกับตัวแปร θ

$$\frac{d\left(\frac{A^3}{P}\right)}{d\theta} = \frac{P \cdot 3A^2 \frac{dA}{d\theta} - A^3 \frac{dP}{d\theta}}{P^2} = 0 \dots\dots (2-8)$$

$$3A^2 \cdot P \cdot \frac{dA}{d\theta} - A^3 \frac{dP}{d\theta} = 0$$

หารตลอดด้วย A^2

$$3P \cdot \frac{dA}{d\theta} - A \cdot \frac{dP}{d\theta} = 0 \dots\dots\dots (2-9)$$

ให้ $A = r^2 \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}\right)$, $P = 2\theta r$

$$\frac{dA}{d\theta} = r^2 (1 - \cos 2\theta) , \quad \frac{dP}{d\theta} = 2r$$

แทนค่า $A, P \frac{dA}{d\theta}$, $\frac{dP}{d\theta}$ ในสมการ (2-9)

$$3(2\theta r)r^2(1 - \cos 2\theta) - r^2\left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}\right)2r = 0$$

$$6\theta r^3(1 - \cos 2\theta) - 2r^3\left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}\right) = 0$$

หารตลอดด้วย $2r^3$

$$3\theta(1 - \cos 2\theta) - \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}\right) = 0$$

$$3\theta(1 - \cos 2\theta) = \left(\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}\right)$$

สมมติให้ $\theta = 154^\circ$

$$8.0634(1 - 0.6157) = (2.6878 + 0.3940)$$

$$3.0988 \approx 3.0818$$

Q มากที่สุด เมื่อ

$$y = r - r \cos \theta$$

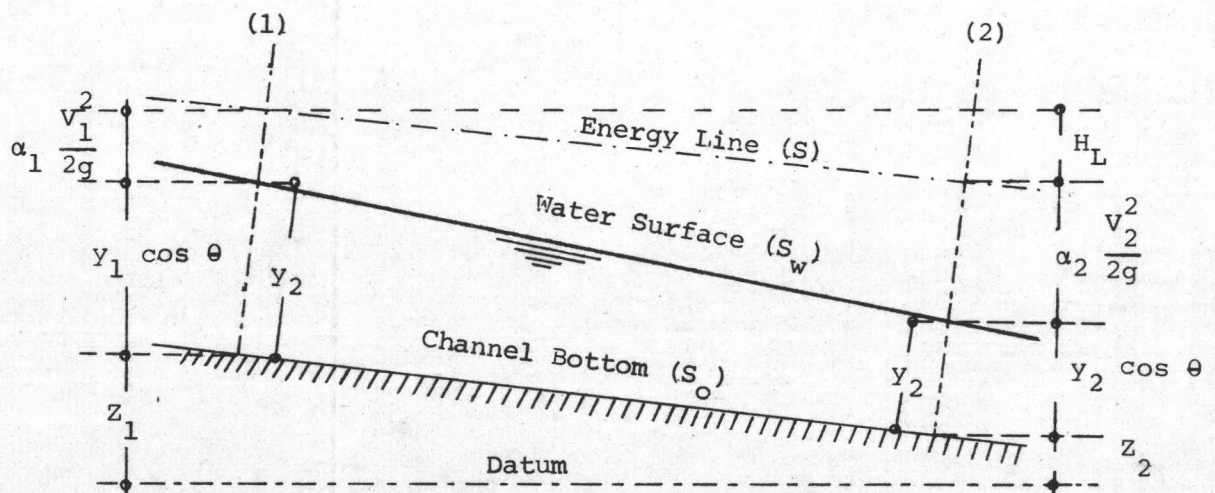
$$= r(1 - \cos 154^\circ) = 1.90 r$$

$$y = 0.95 D$$

นั่นคือเมื่อน้ำไหลในท่อหน้าตัดทรงกลม ความลึกที่ให้อัตราการไหล (Q) มากที่สุด เท่ากับ 0.95 เท่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

2.10 พลังงานจำเพาะ (Specific Energy)

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ทฤษฎีบทเบื้องต้นของจำนวนพลังงานทางน้ำไหลทั้งหมด ที่ไหลผ่านรูปหน้าตัดหนึ่ง สามารถแสดงเป็นสัญลักษณ์ระดับความสูงของน้ำทั้งหมด (H) มีค่าเท่ากับผลรวมความสูงของจุดที่พิจารณาจากเส้นพื้นฐานระดับสมมุติ (Z) กับเฮดความดัน (P/γ) และเฮดความเร็ว ($\frac{V^2}{2g}$)



รูป 2-8 พลังงานทางน้ำไหลเปิดที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกที่ละน้อย

จากรูป 2-8 สามารถเขียนสมการพลังงานระดับความสูงของน้ำที่จุดตัด (1)

ดังนี้

$$H = Z_1 + y_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \dots\dots\dots (2-10)$$

เมื่อ Z_1 = ความสูงเมื่อเทียบจากเส้นพื้นฐานระดับสมมุติถึงระดับท้องน้ำ

y_1 = ความลึกของลำนน้ำถึงจุดตัด (1)

θ = ความลาดเอินของมุมท้องน้ำทำกับแนวราบ

$\frac{V_1^2}{2g}$ = เสดความเร็วการไหลของลำนน้ำผ่านตรงจุด (1)

โดยทั่วไปลำนน้ำที่ไหลผ่านรูปหน้าตัดหนึ่งจะมีเสดความเร็วแตกต่างกัน เนื่องจากทางน้ำไหลจริงนั้นการแพร่กระจายของความเร็วในการไหลของลำนน้ำไม่สม่ำเสมอ ส่วนการไหลของทางน้ำไหลทางทฤษฎีการแพร่กระจายของความเร็วของลำนน้ำสม่ำเสมอ จึงทำให้เสดความเร็วเท่ากันตลอดหน้าตัดของลำนน้ำ ในกรณีทางน้ำไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกที่เล็กน้อย (Gradually Varied Flow) สำหรับทางปฏิบัติอาจสมมุติให้เสดความเร็วตลอดทุกจุดของรูป หน้าตัดในทางน้ำไหลเท่ากัน เมื่อใช้กฎของพลังงานมาคำนวณค่าจริงของเสดความเร็วจะต้องเป็น $\frac{\alpha V^2}{2g}$ ซึ่ง V เป็น Mean Velocity และ α เป็น Energy Coefficient

ดังนั้น พลังงานทั้งหมดที่หน้าตัดใด ๆ คือ

$$H = Z + y \cos \theta + \frac{\alpha V^2}{2g} \dots\dots\dots (2-11)$$

สำหรับทางน้ำไหลที่มีความลาดเอินน้อย $\theta = 0$ และ $\alpha = 1$

$$H = Z + y + \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2-12)$$

พลังงานจำเพาะของลำนน้ำในหน้าตัดหนึ่งหน้าตัดใดประกอบด้วย พลังงานศักย์ เนื่องจากความลึกของลำนน้ำและพลังงานจลน์ โดยคิดท้องน้ำเป็น เส้นพื้นฐานระดับสมมุติ

ดังนั้นตามสมการ (2-12) เมื่อ $z = 0$ ได้สมการพลังงานจำเพาะดังนี้

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2-13)$$

เมื่อ $E =$ พลังงานจำเพาะ (Specific Energy) โดยวัดเทียบกับ
ท้องแม่น้ำและลำคลองเป็นเกณฑ์

$y =$ ความลึกของน้ำ

$v =$ ความเร็วของกระแส น้ำโดยเฉลี่ย $= q/y$

$q =$ ปริมาณน้ำที่ไหลต่อความกว้างของลำน้ำหนึ่งหน่วย
 $= \frac{Q}{b}$

จากสมการ (2-13) ในเทอมของ q

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \dots\dots\dots (2-14)$$

ถ้า q คงที่ ค่า E จะน้อยที่สุดต่อเมื่อ $\frac{dE}{dy} = 0$

โดยวิธี Differentiate E เทียบกับตัวแปร y

$$\frac{dE}{dy} = \frac{dy}{dy} + \frac{q^2}{2g} \frac{dy^{-2}}{dy} = 0$$

$$1 - \frac{q^2}{g} y^{-3} = 0$$

$$\frac{q^2}{gy^3} = 1$$

นั่นคือ $y = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$

y ที่ให้ค่า E น้อยที่สุด เรียกว่า y_c หรือความลึกวิกฤติ (Critical Depth)

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \dots\dots\dots (2-15)$$

$$y_c^3 = \frac{q^2}{g}$$



$$y_c = \frac{q^2}{y_c^2 g} = \frac{V_c^2}{g}$$

$$\frac{y_c}{z} = \frac{V_c^2}{2g}$$

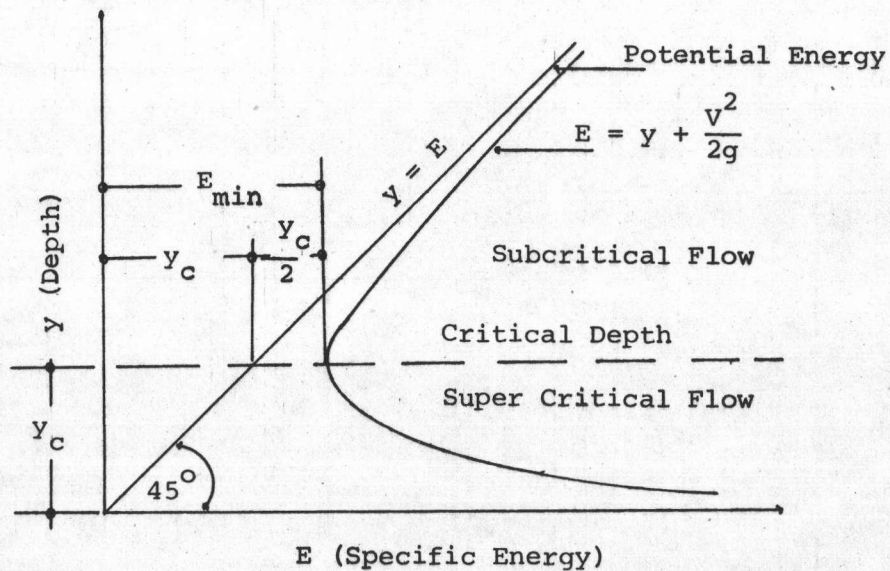
ความเร็วของกระแสน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความลึกวิกฤติ (y_c) เรียกว่าความเร็ววิกฤติ (Critical Velocity) ด้วย

จากสมการ (2-13)

$$E_{min} = y_c + \frac{V_c^2}{2g}$$

$$= y_c + \frac{y_c}{2}$$

$$E_{min} = \frac{2}{3} y_c \dots\dots\dots (2-16)$$



รูป 2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า y และ E เมื่อค่า Q คงที่

2.10.1 ความลึกที่ให้ค่าปริมาณการไหล (Q) มากที่สุดเมื่อกำหนดค่าพลังงานจำเพาะ

(E) ให้

จากสมการ (2-14) เมื่อกำหนดค่า Q คงที่หาค่า y ที่ให้ค่า E น้อยที่สุด เรียกว่า y_c (Critical Depth) ในทำนองเดียวกัน เมื่อกำหนดค่า E คงที่ หาค่า y ที่ให้ค่า Q มากที่สุด เรียกว่า y_c (Critical Depth) ด้วย

จากสมการพลังงานจำเพาะ

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2-17)$$

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

แต่ $Q = AV$

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

$$Q = b \sqrt{2g(Ey^2 - y^3)} \dots\dots\dots (2-18)$$

จากสมการ (2-18) ค่า Q มากที่สุด เมื่อกำหนดค่า $(Ey^2 - y^3)$ มากที่สุดด้วย ให้ Differentiate $(Ey^2 - y^3)$ เทียบกับตัวแปร y

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

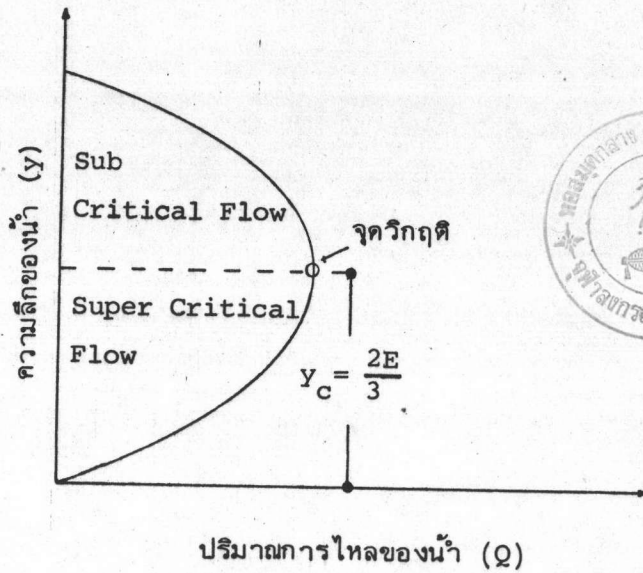
$$2Ey - 3y^2 = 0$$

$$2E - 3y = 0$$

$$E = \frac{3}{2} y$$

หรือ $y_c = \frac{2}{3} E \dots\dots\dots (2-19)$

จากสมการ (2-19) เมื่อกำหนดค่าพลังงานจำเพาะ (E) คงที่ และให้ค่าปริมาณการไหล (Q) มากที่สุด จะได้ค่าความลึกวิกฤติ (y_c) มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3}$ เท่าของค่าพลังงานจำเพาะ (E) นั้น จากรูป (2-10) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการไหล (Q) กับค่าความลึก (y) โดยให้ค่าพลังงานจำเพาะ (E) คงที่ ค่าของ Q จะค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤติและเริ่มค่อย ๆ ลดลงขณะที่ค่า y ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



รูป 2-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q และ y เมื่อค่า E คงที่

นำค่า $E = \frac{3}{2} y$ ไปแทนสมการ (2-17)

$$\frac{3}{2} y = y + \frac{v^2}{2g}$$

$$\frac{y}{2} = \frac{v^2}{2g}$$

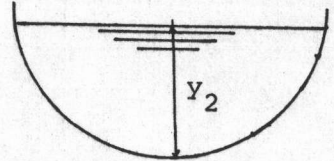
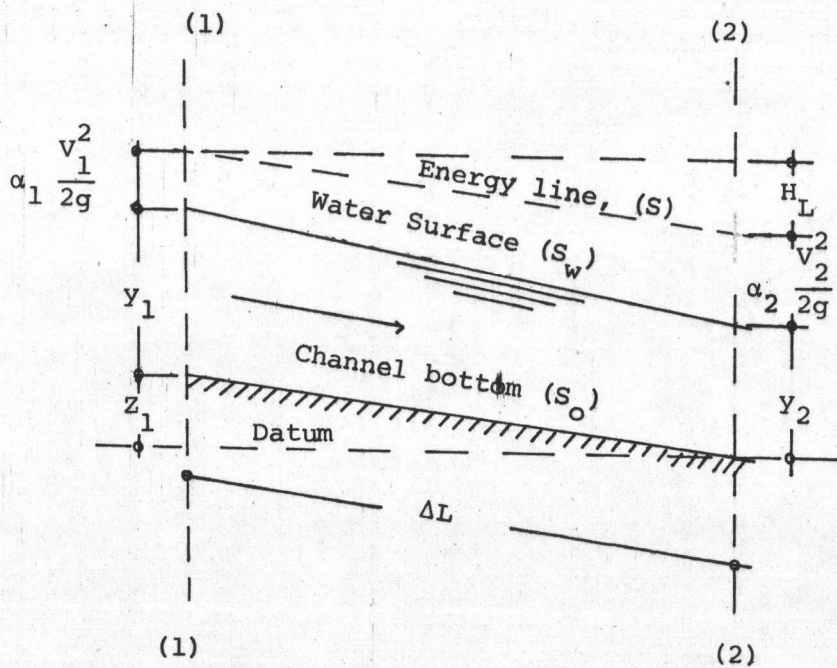
$$\frac{v^2}{gy} = 1$$

หรือ $\frac{v}{\sqrt{gy}} = 1$ (2-20)

ถ้าให้ F_r เป็นสัญลักษณ์ของฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number) มีค่า $= \frac{V}{\sqrt{gy}}$ สมการ (2-20) เขียนใหม่เป็น $F_r = 1$ ค่า F_r นี้ยังแบ่งลักษณะการไหลของทางน้ำเปิดอีกด้วย (ดังได้กล่าวรายละเอียดในข้อ 2.4.5 ไว้แล้ว)

2.11 ทางน้ำไหลเปิดแบบไม่สม่ำเสมอและไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา (Steady Nonuniform Flow)

2.11.1 การไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกทีละน้อย (Gradually Varied Flow) คือการไหลที่มีความลึก พื้นทีหน้าตัด ความลาดเออนของพื้นที่ท้องน้ำค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปตลอดความยาวของทางน้ำไหล สามารถคำนวณหาโดยวิธี Standard Step Method ได้



รูป 2-11 แสดงทางน้ำไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกทีละน้อย

กำหนดให้เส้น Datum ผ่านที่จุด (2)

ใช้บทพิสูจน์สมการพลังงาน Bernoulli ระหว่างจุด (1) และจุด (2) มีระยะห่างกัน = ΔL โดยพิจารณาเฮด (Head) ที่สูญเสียด้วย

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + H_L \quad \dots\dots\dots (2-21)$$

เมื่อ $Z_1 =$ เฮดศักดา (Potential Head) ที่จุด (1) = $S_o \Delta L$

$Z_2 =$ เฮดศักดา (Potential Head) ที่จุด (2)

$\frac{P_1}{\gamma} =$ เฮดความดัน (Pressure Head) ที่จุด (1)

$\frac{P_2}{\gamma_2} =$ เฮดความดัน (Pressure Head) ที่จุด (2)

$\frac{V_1^2}{2g} =$ เฮดความเร็ว (Velocity Head) ที่จุด (1)

$\frac{V_2^2}{2g} =$ เฮดความเร็ว (Velocity Head) ที่จุด (2)

$H_L =$ เฮดที่สูญเสียระหว่างจุด (1) และจุด (2) = $S \Delta L$

ให้ $Z_1 = S_o \Delta L$ แทนสมการ (2-21) สมมติ $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ได้สมการใหม่

$$S_o \Delta L + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 0 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_L$$

$$H_L = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) + S_o \Delta L$$

$$H_L = E_1 - E_2 + S_o \Delta L = \Delta E + S_o \Delta L \quad \dots\dots\dots (2-22)$$

ให้ $E_1 =$ พลังงานจำเพาะที่จุด (1)

$E_2 =$ พลังงานจำเพาะที่จุด (2)

เปรียบเทียบการไหลในท่อตามสมการของ Darcy-Weisbach

$$H_L = f \frac{\Delta L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

สมการ (2-22) = สมการ (2-23)

$$f \frac{\Delta L}{D} \frac{V^2}{2g} = \Delta E + S_o \Delta L$$

$$f = \frac{2gD}{\Delta LV^2} (\Delta E + S_o \Delta L) \dots\dots\dots (2-24)$$

ให้ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของทางน้ำไหลรูปครึ่งวงกลม = $4R$

R = ไฮดรอลิกเรเดียส (Hydraulic Radius)

แทนค่า D ในสมการ (2-24) ได้

$$f = 2g \frac{(4R)}{\Delta LV^2} (\Delta E + S_o \Delta L)$$

หรือ $f = 8 \frac{gR}{\Delta LV_m^2} (\Delta E + S_o \Delta L) \dots\dots\dots (2-25)$

ได้สมการแฟคเตอร์ความเสียดทาน (f) ของทางน้ำไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกที่เล็กน้อย