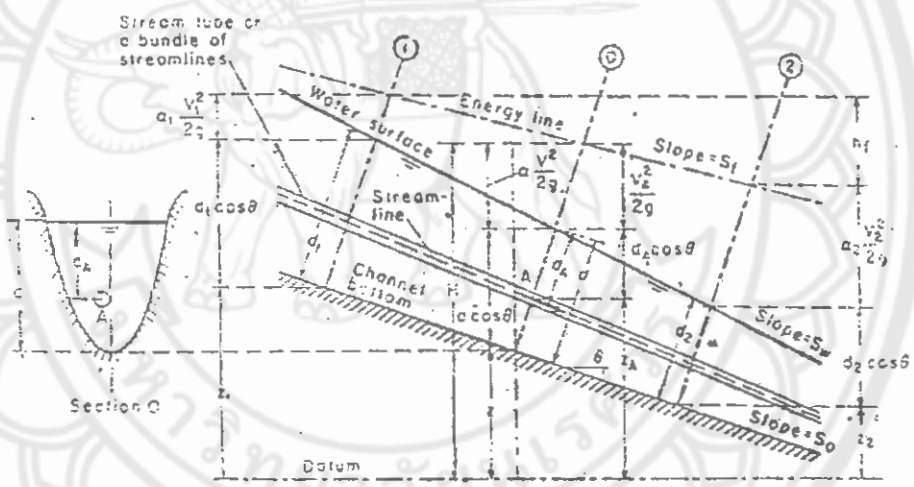
# บทที่ 3

# หลักของ ENERGY และ MOMENTUM

## 3.1 Energy ของการไหลใน open-channel

ดังเป็นที่ทราบกันในวิชาชลศาสตร์ขั้นต้นว่า energy ทั้งหมดเป็นฟุต-ปอนด์ของน้ำใน streamline ใดๆ ที่ผ่านรูปตัดทางน้ำ อาจแสดงได้ในรูปของ head ทั้งหมดเป็นฟุตของน้ำ ซึ่งเท่ากับผลรวมของความสูงเหนือเส้นสมมติ (datum) กับ pressure head และ velocity headดังตัวอย่าง head ทั้งหมด Hจากเส้นสมติที่รูปตัด Oซึ่งมีจุด A อยู่บน streamline ของการไหลในทางน้ำซึ่งมีความลาดเทสูงดังรูปที่ 3-1




รูปที่ 3-1Energy ใน open-channel ที่การไหลเป็น gradually varied

$$H = Z_A + d_A \cos\theta + v^2/2g \qquad (3\text{-}1)$$

ซึ่ง $Z_A$คือความสูงของจุด A จากเส้นสมมติ, $d_A$คือความลึกของจุด A ใต้ผิวน้ำวัดตามรูปตัดทางน้ำ, $\theta$ คือมุมเอียงของทางน้ำ และ $v^2/2g$คือ velocity head ของการไหลใน streamline ผ่าน A

โดยทั่วไปทุก streamline ที่ผ่านรูปตัดทางน้ำจะมี velocity head ที่แตกต่างทั้งนี้เนื่องจากการแผ่กระจายของอัตราความเร็วของการไหลจริงๆ ไม่เท่ากัน จะเป็นไปได้เฉพาะ ideal parallel flow ซึ่งอัตราความเร็วแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้ Velocity head ที่จุดต่างๆ ในรูปตัดของการ

ไหลเหมือนกัน อย่างไรก็ตามในกรณีของการไหล Gradually varied เพื่อประโยชน์ในทางปฏิบัติจึงสมมติให้ velocity head ที่จุดต่างๆ ของการไหลในรูปตัดทางน้ำเท่ากัน และใช้สัมประสิทธิ์ของ energy ทั้งหมดที่รูปตัดของการไหลจึงกลายเป็น

$$H = z + d\cos\theta + \alpha v^2/2g \qquad (3\text{-}2)$$

สำหรับทางน้ำที่มีความลาดเทน้อยๆ , $\theta \approx 0$ , ดังนั้น energy ทั้งหมดที่รูปตัดของการไหลจึงกลายเป็น

$$H = z + d + \alpha v^2/2g \qquad (3\text{-}3)$$

เมื่อพิจารณาถึงทางน้ำ prismatic ที่มีความลาดเทมาก (รูปที่ 3-1 ) เส้นจึงลากแทนความสูงของ head ทั้งหมดของการไหลคือเส้น energy ความลาดเทของเส้นนี้เรียกว่า" energy gradient" ใช้แทนด้วย $S_f$ ส่วนความลาดเทของผิวน้ำใช้แทนด้วย $S_w$ และ ความลาดเทของก้นทางน้ำใช้แทนด้วย $S_o$ ซึ่งเท่ากับ $\sin\theta$ การไหลใน uniform $S_f = S_w = S_o = \sin\theta$

จากหลักของ conservation ของ energy ,energy head ทั้งหมดที่รูปตัด 1 ด้านเหนือน้ำควรเท่ากับ energy head ทั้งหมดที่รูปตัด2 ท้ายน้ำรวมกับ energy ที่สูญเสียระหว่างรูปตัดทั้งสอง หรือ

$$z_1 + d_1\cos\theta + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + d_2\cos\theta + \alpha_2 v_2^2/2g + h_f \qquad (3\text{-}4)$$

สมการนี้ใช้กับการไหล parallel หรือ gradually varied สำหรับทางน้ำที่มีความลาดเทน้อยๆ จะกลายเป็น

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + y_2 + \alpha_2 v_2^2/2g + h_f \qquad (3\text{-}5)$$

สมการทั้งสองดังกล่าวนี้เรียกว่าสมการ energy เมื่อ $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ และ $h_f = 0$ สมการ (3-5) กลายเป็น

$$z_1 + y_1 + v_1^2/2g = z_2 + y_2 + v_2^2/2g = \text{ค่าคงที่} \qquad (3\text{-}6)$$

## 3.2 Specific energy

Specific energy ในรูปทางตัดน้ำก็คือ energy ต่อปอนด์ของน้ำที่รูปตัดของทางน้ำใดๆ วัดจากก้นทางน้ำนั้น จากสมการ (3-2) เมื่อ z =0 Specific energy กลายเป็น

$$E = d \cos\theta + \alpha v^2/2g \qquad (3\text{-}7)$$

สำหรับทางน้ำที่มีความลาดเทน้อยๆ และ $\alpha$=1

$$E = y + v_1^2/2g \qquad (3\text{-}8)$$

ซึ่งแสดงว่า Specific energy เท่ากับผลรวมของความลึกของน้ำและ velocity head เพื่อให้ง่ายขึ้น ส่วนที่จะกล่าวต่อไปใช้สมการ (3-8) ซึ่งเป็นทางน้ำที่มีความลาดเทน้อยเป็นบรรทัดฐานเพราะว่า V=Q/A ,สมการ (3-8) กลายเป็น $E=y+Q^2/(2gA^2)$ จะเห็นว่าสำหรับ รูปตัดทางน้ำเท่ากับ Q ที่กำหนดให้ Specific energy ในรูปตัดทางน้ำจะขึ้นอยู่กับความลึกของการไหลเท่านั้น

เมื่อนำความลึกของการไหลกับ Specific energy ของรูปตัดทางน้ำและปริมาณน้ำที่กำหนดให้มา plot ก็จะได้ curve ของ Specific energy ดังรูปที่ (3-2) curve นี้มี2 ส่วนคือ AC และ BC ส่วน AC ใกล้แนวราบมากขึ้นเมื่อเคลื่อนไปทางขวา ส่วน BC ใกล้เส้น OD เมื่อต่อสูงขึ้นไปทางขวา เส้น OD ลากผ่านจุดตัดและมีความลาดเท 45 องศา ที่จุด P บน curve นี้ ระยะตามแกนดิ่งแทนความลึกและระยะตามแกนนอนแทน Specific energy ซึ่งเท่ากับผลรวมของ pressure head y และ velocity head $v^2/2g$

curve แสดงว่า,สำหรับ Specific energy ที่กำหนดให้, จะมีความลึกได้ 2 ค่า คือระดับต่ำ $y_1$ และระดับสูง $y_2$ ระดับต่ำเป็น alternate depth ของระดับสูง และระดับสูงเป็น alternate depth ของระดับต่ำที่จุด C Specific energy มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะพิสูจน์ต่อไปว่าค่า Specific energy น้อยที่สุดสัมพันธ์กับสถานะการไหล critical ดังนั้นที่สถานะ critical , alternate depth เหลือเพียงหนึ่งค่าซึ่งเรียกว่า critical depth $y_c$สำหรับปริมาณน้ำที่กำหนดให้เมื่อความลึกของการไหลมากกว่าความลึก critical อัตราความเร็วของการไหลน้อยกว่าความลึก critical การไหลเป็น supercritical ดังนั้น $y_1$ เป็นความลึกของการไหล supercritical และ $y_2$ เป็นความลึกของการไหล subcritical

ถ้าปริมาณน้ำเปลี่ยนแปลง Specific energy ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย curves A'B'และ A"B" (รูปที่3-2) แทนตำแหน่งของ Specific energy curve เมื่อปริมาณน้ำน้อยกว่าและมากกว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการก่อสร้าง curve AB

## 3.3 ข้อกำหนดของการไหลที่สถานะเป็น Critical

การไหลที่มีสถานะเป็น critical ได้ให้คำจำกัดความไว้แล้วในตอนต้นซึ่งเป็นสถานะการไหลที่มี Froude number เท่ากับหนึ่ง ส่วนคำจำกัดความทั่วๆ ไปก็คือสถานะการไหลที่มี Specific

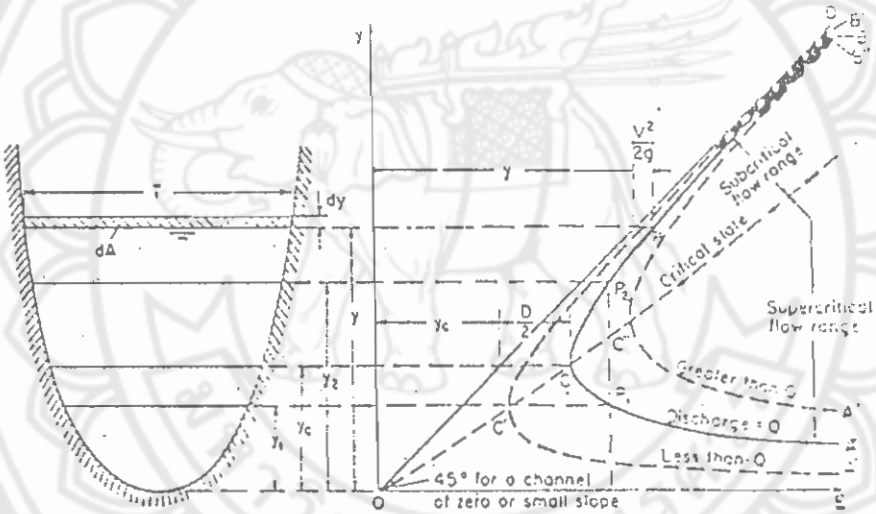
energy น้อยที่สุดสำหนับปริมาณน้ำที่กำหนดให้ ข้อกำหนดทางทฤษฎีสำหรับการไหล critical อาจพัฒนามาจากคำจำกัดความดังกล่าวแล้ว

เพราะว่า V = Q/A ,สมการสำหรับ Specific energy ในทางน้ำซึ่งมีความลาดเทเล็กน้อยมี $\alpha$=1,อาจเขียนได้เป็น

$$E = y+Q^2/2gA^2 \qquad (3\text{-}9)$$

Differentiating with respect to y และให้ Q คงที่จะได้

$$dE/dy = 1-Q^2/gA^3\,(dA/dy) = 1-v^2/gA(\,dA/dy)$$




รูปที่ 3-2 Specific-energy curve

พื้นที่น้ำเล็กๆ dA ใกล้ผิวน้ำอิสระ (รูปที่3-2) เท่ากับ Tdy หรือ dA/dy =T ,และ hydraulic depth D= A/T ดังนั้นสมการดังกล่าวแล้วกลายเป็น

$$dE/dy = 1 - v^2T/gA = 1 - v^2/gD$$

ที่สถานะของการไหล critical ,specific energy มีค่าน้อยที่สุดหรือ dE/dy=0,จะได้

$$V^2/2g = D/2 \qquad (3\text{-}10)$$

ซึ่งเป็นข้อกำหนดของการไหล critical ซึ่งแสดงว่าที่สถานะการไหล critical ,velocity head เท่ากับครึ่งหนึ่งของ hydraulic depth จากสมการดังกล่าวแล้วอาจเขียนได้เป็น F = 1 ซึ่งความหมายของ F = 1 นี้คือคำจำกัดความของการไหล critical ที่ได้กล่าว

ถ้าจะใช้ข้อกำหนดดังกล่าวในการแก้ปัญหา จะต้องสนับสนุนด้วยหลักต่างๆ นี้คือ (1) การไหลเป็น parallel หรือ gradually varied (2) ทางน้ำมีความลาดเทน้อย (3) สัมประสิทธิ์ของ energy สมมติให้เท่ากับหนึ่ง ถ้าไม่สมมติสัมประสิทธิ์ของ energy ให้เท่าข้อหนึ่ง ข้อกำหนดของการไหล critical คือ

$$\alpha = v^2/2g = D/2 \qquad (3\text{-}11)$$

สำหรับทางน้ำที่มีความลาดเทมากด้วยมุม $\theta$ และสัมประสิทธิ์กำลังงาน $\alpha$ ข้อกำหนดสำหรับการไหล critical ก็จะกลายเป็น

$$v^2/2g = D(\cos\theta)/2 \qquad (3\text{-}12)$$

ซึ่ง D คือ hydraulic depth ของพื้นที่น้ำซึ่งตั้งฉากกับก้นทางน้ำในกรณีนี้ Froud number อาจเขียนเป็น

$$F = V/(gD\cos(\theta/\alpha))^{1/2} \qquad (3\text{-}13)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ $\alpha$ ของรูปตัดทางน้ำจริงๆ ผันแปรไปตามความลึก ที่ได้กล่าวมาแล้ว สมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์คงที่ ดังนั้นสมการที่หามาได้จึงไม่จริงเสมอไป

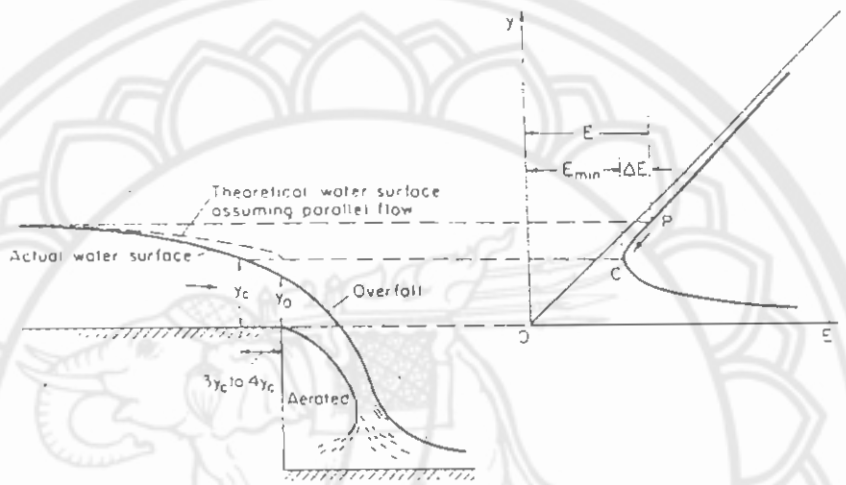
3.4 ความหมายของLocal Phenomena

การเปลี่ยนสถานะของการไหลจาก subcritical ไปเป็น supercritical หรือในทางกลับกันเกิดขึ้นบ่อยๆ ใน open channel การเปลี่ยนดังกล่าว สัมพันธ์กับการเปลี่ยนความลึก ของการไหลจากระดับน้ำสูงไปสู่ระดับน้ำต่ำหรือกลับกัน ถ้าการเปลี่ยนเกิดขึ้นรวดเร็วในระยะทางสั้นๆ การไหลจะเป็น rapidly raried และเรียกว่า Local Phenomena ,hydraulic drop และ hydraulic jump เป็น Local Phenomena 2 ชนิด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

Hydraulic drop การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วต่อความลึกของการไหลจากระดับสูงไปสู่ระดับต่ำจะทำให้เกิดการกดขันที่ผิวน้ำ ปรากฏการณ์เช่นนี้โดยทั่วไป เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความลาดเทหรือรูปตัดโดยทันทีทันใดซึ่งเรียกว่า hydraulic drop ที่บริเวณรอยต่อของ hydraulic drop จะเกิดโค้งกลับทางเชื่อมผิวน้ำทั้งก่อนและหลัง drop จุดเชื่อมของโค้งทั้งสองเป็นตำแหน่งประมาณ

ของความลึก critical ที่ซึ่ง Specific energy น้อยที่สุดและการไหลเปลี่ยนจากสถานะ subcritical เป็น supercritical

Free overfall (ดังรูปที่3-3) เป็นกรณีพิเศษของ hydraulic drop เกิดที่ซึ่งกันทางน้ำแบนราบสิ้นสุดเมื่อ free overfall พุ่งสู่อากาศ ซึ่งจะไม่มีโค้งกลับทางของผิวน้ำจนกระทบวัตถุที่ระดับต่ำ เป็นกฎธรรมชาติที่ว่าถ้าไม่มี energy เพิ่มจากภาวะ

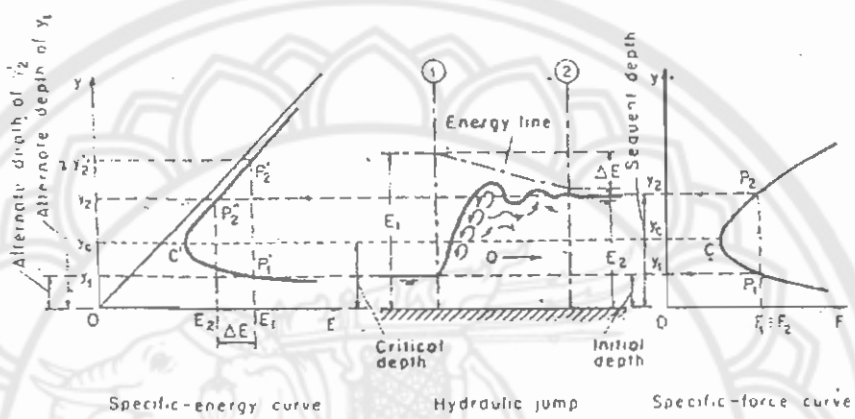



รูปที่ 3-3. Specific-energy curve ที่ free overfall

ผิวน้ำจะลงสู่จุดต่ำสุดสมพันธ์กับ energy ที่รวมเหลืออยู่ ถ้า specific energy ที่รูปตัดเหนือน้ำเป็น E ดังแสดงในรูป specific-energy curve ซึ่งจะถูกขจัดอยู่ตลอดเวลา เมื่อเคลื่อนที่ไปทางท้ายน้ำและสุดท้ายจะถึงจุดที่ energy ต่ำสุด $E_{min.}$ specific-energy curve แสดงว่ารูปตัดที่ energy ต่ำสุดหรือรูปตัด critical ควรจะอยู่ที่ระดับพื้นเปลี่ยน (brink) ความลึกที่ brink จะไม่น้อยกว่าความลึก critical เพราะว่าถ้าความลึกยังลดลงตลอดไปจะเพิ่ม specific energy ซึ่งเป็นไปไม่ได้นอกเสียจากมี energy ภายนอกเข้ามาทดแทน ทฤษฎีของ curve ของผิวน้ำของ overfall แสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 3-3.

ควรจำได้ว่าการหาความลึก critical จากสมการ (3-10) และ (3-11)ขึ้นอยู่กับสมมติฐานของ parallel flow และใช้กับกรณีที่การไหลใกล้เคียงกับ gradually varied flow การไหลที่ brink โดยแท้จริงเป็น curvilinear สำหรับการไหลโค้งที่เห็นเด่นชัด วิธีหาความลึก critical เช่นเดียวกับความลึกที่ brink จึงไม่ถูกต้องนัก การเกิดจริงๆ ที่รูปตัด brink เป็นรูปตัดที่มี energy น้อยที่สุดจริง แต่ไม่ใช่รูปตัด critical ที่คำนวณโดยใช้หลักของ parallel-flow ซึ่งพบว่า สำหรับความลาดเทเล็กน้อย ความลึก

critical ที่คำนวณได้ประมาณ 1.4 เท่าของความลึก brink,หรือ $y_c = 1.4y_0$ และอยู่ที่ประมาณ 3 $y_c$ ถึง 4$y_c$ ในทางน้ำเหนือ brink ผิวน้ำที่แท้จริงของ overfall แสดงด้วยเส้นเต็ม (ในรูปที่3-3.)




รูปที่ 3-4. Hydraulic jump สัมพันธ์กับ specific-energy และ specific-force curves

Hydraulic jump เมื่อความลึกของการไหลเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากความลึกน้อย ๆไปสู่ความลึกมากๆ ซึ่งทำให้ผิวน้ำสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว(รูปที่3-4.) local phenomenaนี้คือ hydraulic jump ซึ่งเกิดบ่อยๆ ในคลองท้ายประตูระบาย,ที่ฐานของ spillway หรือที่ทางน้ำซึ่งมีความลาดเทชันเปลี่ยนเป็นแบราบโดยทันทีทันใด

ถ้า jump น้อยนั่นคือความลึกเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย น้ำจะไม่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและทันทีทันใด แต่จะผ่านจากระดับต่ำไประดับสูง โดยหมู่ของคลื่นซึ่งค่อยๆ จางหายไปในที่สุด jump เตี้ยๆ ดังกล่าวเรียกว่า undular jump

เมื่อ jump สูงขึ้นหรือเมื่อความลึกเปลี่ยนแปลงมากซึ่งเรียกว่าdirect jump, jumpชนิดนี้มีการศูนย์เสีย energy ผ่านการหมุนวนของก้อนน้ำใน jump มาก และ energy การไหลภายหลัง jump น้อยกว่าก่อนเกิด jump

ความลึกก่อนเกิด jump จะน้อยกว่าความลึกภายหลัง jump ความลึกก่อน jump ว่า initial depth $y_1$ และภายหลัง jump เรียกว่า sequence depth $y_2$ ความลึกทั้งสองดังกล่าวนี้แสดงไว้ใน specific-energy curve (รูปที่ 3-4.) ซึ่งแตกต่างกับ alternate depth $y_1$ และ $y_2$ ซึ่งเป็นความลึกที่มี specific energy เท่ากัน initial และ sequence depths คือความลึกจริงๆ ก่อนและหลัง jump ซึ่งมี

energy loss $\Delta E$ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยหรือ specific energy $E_1$ ที่ initial depth $y_1$ มากกว่า specific energy $E_2$ ที่ sequence depth $y_2$ เท่ากับ energy loss $\Delta E$ ถ้าไม่มี energy loss initial และ sequence depth จะเท่ากับ alternate depth ในทางน้ำ prismatic

รูปที่ 3-5 รูปคลองจำลองที่ทำการทดลอง

**ลักษณะ**ของเครื่อง

1. ความกว้างของท้องน้ำ = 5.5 cm
2. ความลึกสูงสุด = 12 cm
3. **ความยาวของรางระบายน้ำ = 2.5 m**

**(หมายเหตุ บานประตูน้ำอยู่ห่างจากจุดปล่อยน้ำ 1 m)**