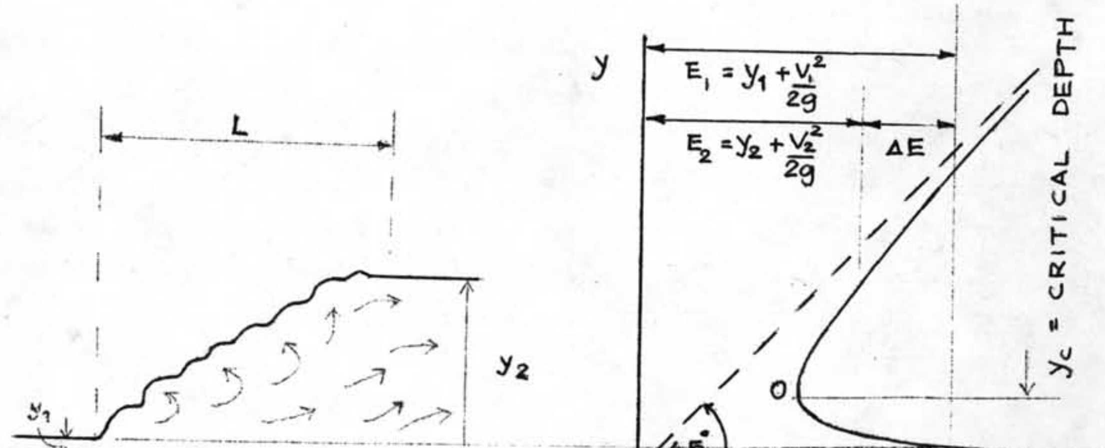
บทที่ 2

ทฤษฎีบท

2.1 ไฮดรอลิคจั๊ม (HYDRAULIC JUMP)

ไฮดรอลิคจั๊ม คือ ปรากฏการณ์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากสภาวะขั้นต่ำใต้จุดความลึกวิกฤต(CRITICAL DEPTH) เป็นสภาวะขั้นสูงเหนือจุดความลึกวิกฤต หรืออาจกล่าวได้ว่า" เป็นปรากฏการณ์ที่มวลน้ำซึ่งไหลด้วยความเร็วสูงแล้วเปลี่ยนแปลงเป็นความเร็วต่ำอย่างกระทันหัน ทำให้เกิดพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลใหญ่ขึ้น และระดับน้ำสูงขึ้น"[1] ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเกิดขึ้น คือจากพลังงานจลน์(KINETIC ENERGY) มาเป็นพลังงานศักย์(POTENTIAL ENERGY) และทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น



รูป 2.1.1 HYDRAULIC JUMP

---

[1] รองศาสตราจารย์ วรุณ คุณวาสี, "ทางน้ำล้น(SPILLWAY) " 2519 p.56.

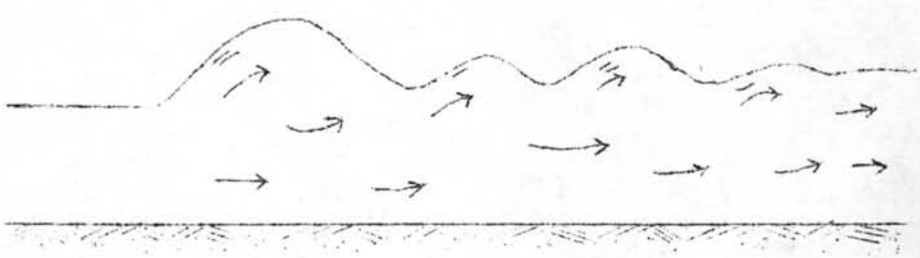
รูป 2.1.1(a)เป็นรูปไฮดรอลิคจัมที่เกิดบนพื้นแนวราบ รูป 2.1.1(b) เป็นการนำผลการเกิดไฮดรอลิคจั๊มมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง SPECIFIC ENERGY กับความลึกของการไหล จะเห็นว่ามีการเกิดการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น

2.2 ชนิดของไฮดรอลิคจั๊ม(TYPES OF HYDRAULIC JUMP)

ไฮดรกลิคจั๊มที่เกิดบนพื้นราบจะมีหลายรูปแบบ แบ่งรูปแบบตาม FROUDE NUMBER ($\mathbb{F}$) **USBR.** ได้ศึกษาค้นคว้าและเรียกชื่อ JUMP ตามรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้คือ

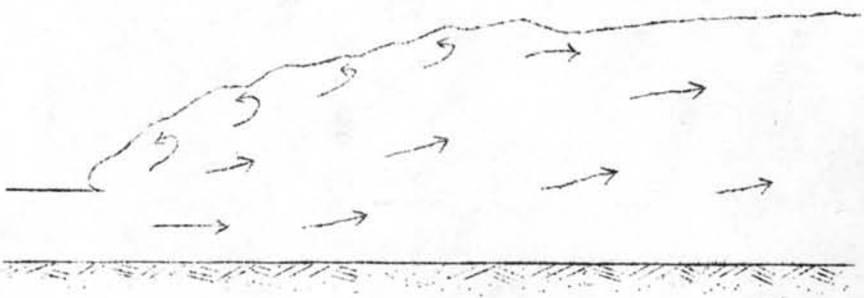
2.2.1 เมื่อ $\mathbb{F} = 1$ การไหลของน้ำจะอยู่ที่ความลึกวิกฤต(CRITICAL DEPTH) ซึ่งจะไม่เกิดรูปแบบไฮดรอลิคจั๊มเปรียบการไหลเหมือนอยู่ที่จุด O ตามแผนภาพ SPECIFIC ENERGY (รูป 2.1.1b)

2.2.2 เมื่อ $\mathbb{F} = 1.0$ ถึง 1.7 ความลึกของ y_1 และ y_2 จะแตกต่างกันเล็กน้อย จะเกิดความปั่นป่วนบนผิวน้ำเล็กน้อย เป็นเพียงปรากฏการณ์บอกให้ทราบว่าการไหลพ้นจุดลึกวิกฤติ เรียก JUMP ชนิดนี้ว่า UNDULAR JUMP



รูป 2.2.2 UNDULAR JUMP

2.2.3 เมื่อ F = 1.7 – 2.5 ผิวน้ำราบเรียบและหน้าตัดความเร็วของน้ำมีความเร็วสม่ำเสมอ เรียก JUMP ชนิดนี้ว่า WEAK JUMP

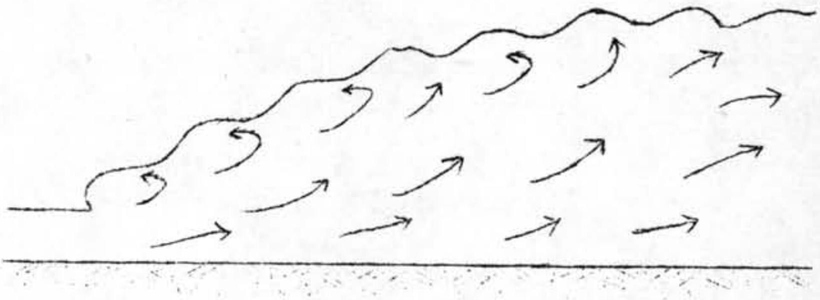


รูป 2.2.3 WEAK JUMP

2.2.4 เมื่อ F = 2.5 – 4.5 จะเกิด JET OSCILLATES กลับและพุ่งจากข้างใต้ถึงผิวน้ำและกลับลงไปอีกในบางครั้ง มันเกิดขึ้นเป็นระยะทางไมล์ ๆ ไปตามลำคลอง ซึ่งทำความเสียหายให้กับชายฝั่ง เรียก JUMP ชนิดนี้ว่า OSCILLATING JUMP

รูป 2.2.4 OSCILLATING JUMP

2.2.5 เมื่อ F = 4.5 ถึง 9.0 จะเกิด STEADY JUMP ซึ่ง JUMP รูปแบบนี้สามารถจะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานของน้ำ 40 – 70 % ได้



รูป 2.2.5 STEADY JUMP

2.2.6 รูปแบบรูปสุดท้าย ได้แก่ F > 9.0 จะเกิด STRONG JUMP หรือบางทีเรียก CHOPPY JUMP ซึ่งมี JET ความเร็วสูงไหลต่อเนื่องไปตลอดความยาวของท้ายน้ำ ผิวน้ำดูคล้าย SPRAY และขรุขระไม่ราบเรียบ เมื่อ JUMP ในรูปแบบนี้ ควรสร้างแอ่งน้ำนิ่งให้ลึกพอ ทั้งนี้เนื่องจากค่า y_2 มีค่ามากนั่นเอง

รูป 2.2.6 STRONG JUMP

2.3 FROUDE NUMBER AND KINETIC FLOW FACTOR

ความเร็วของการไหลอาจเป็น subcritical, critical หรือ supercritical ซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่าง GRAVITATIONAL และ INERTIAL FORCES ค่าของ FROUDE NUMBER สามารถวัดค่าของมันโดย

$$\mathbb{F} = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad - - - - - - - - - - - - - (2.1)$$

เมื่อ V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลของลำน้ำที่ต้องการหา

g = อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก

y = ความลึกของลำน้ำที่ต้องการหา ซึ่งเป็น LINEAR DIMENSION ซึ่งหาได้โดยการนำเอาความกว้างของลำน้ำที่ระดับผิวน้ำไปหารพื้นที่หน้าตัดการไหลของลำน้ำ

"สูตรสมการของ FROUDE NUMBER นี้ได้ถูกค้นพบโดยผู้ชำนาญในการออกแบบสร้างเรือรบชาวอังกฤษชื่อ WILLIAM FROUDE เมื่อ ค.ศ. 1810 – 1879 โดยการทดลองงานของเขาเกี่ยวกับแรงเสียดทานของคลื่น"[1]

ถ้า $\mathbb{F}$ ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 1 เรียก subcritical flow หรือ streaming flow

$\mathbb{F} = 1$ เป็น critical flow

$\mathbb{F} > 1$ เป็น supercritical หรือ shooting flow

[1] FLUID MECHANICS RICHARD H.F. PAO; Ph.D/ หน้า 459 PROFESSOR OF CIVIL ENGINEERING ROSE POLYTECHNIC INSTITUTE ไม่มีสำนักพิมพ์ (พิมพ์จากไต้หวัน)

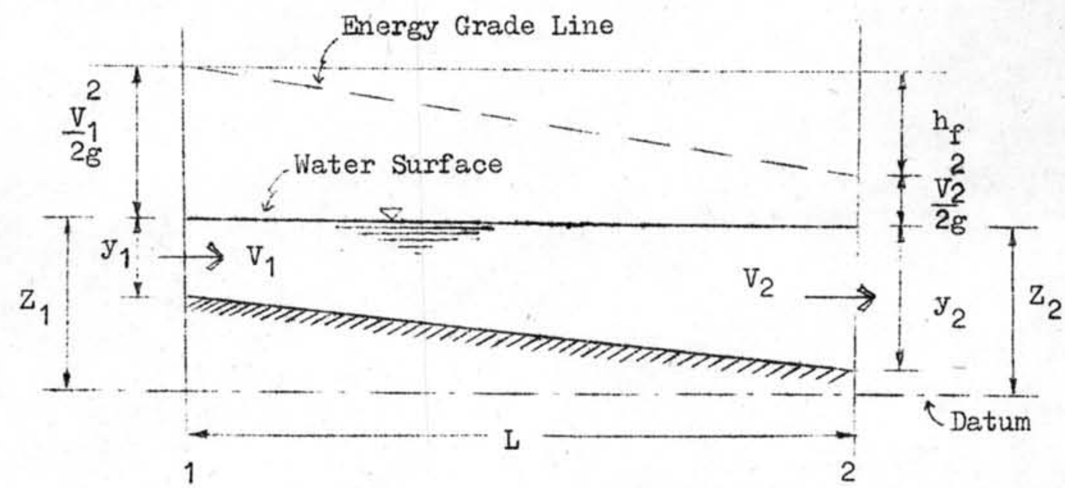
การศึกษาเกี่ยวกับ Model ของโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่จะเห็นในบทต่อไป ค่าอัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลกจะมีค่าเดียวกันทั้งใน Prototype และ Model

"ในบางกรณีมีผู้นิยมยกกำลัง 2 ของ Froude Number โดยเรียกชื่อใหม่ว่า Kinetic-Flow Factor "[1] ใช้สัญลักษณ์ว่า λ ทั้งนี้เพื่อให้สูตรมันดูง่าย และได้เขียนในรูปแบบดังนี้

$$\lambda = \mathbb{F}^2 \quad ; \quad \lambda = \frac{V^2}{gy}$$

2.4 ทฤษฎีบทของ Bernoulli นำมาดัดแปลงใช้กับการไหลของทางน้ำเปิด

ในจำนวนทฤษฎีบทต่างๆ เกี่ยวกับพลังงานของการไหลของน้ำนั้น มีอยู่ทฤษฎีบทของ Bernoulli ซึ่งเป็นที่รู้จักแพร่หลายมากทีเดียว ทฤษฎีของ Bernoulli ได้กล่าวว่า ถ้าน้ำไหลเคลื่อนที่ในลำน้ำจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่เส้น Datum เดียวกัน ผลรวมของเฮดสถิต (Static Head) และเฮดความเร็ว (Velocity Head) ที่จุด 1 จะเท่ากับผลรวมของเฮดสถิต (Static Head) และเฮดความเร็ว (Velocity Head) ที่จุด 2 บวกกับพลังงานที่สูญเสียไป ซึ่งดูภาพ 2.4.1 ประกอบจะเข้าใจยิ่งขึ้น



รูป 2.4.1 การไหลของน้ำจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง

[1] Hydraulic Energy Dissipators Edward A. Elevatorski pp.13 McGraw-Hill Book Company.

ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวจะใช้ได้ เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขสมมุติฐาน ดังนี้คือ

1. จากจุด 1 มาถึงจุดที่ 2 ไม่ได้รับพลังงานเพิ่มจากไหน มีเพียงแต่การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานต่าง ๆ

2. ความเร็วตลอดพื้นที่หน้าตัดคงที่

3. พลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำคงที่

4. ของไหลเป็นของเหลวบีบตัวยาก(INCOMPRESSIBLE)

ในแต่ละหน้าตัด จะมีพลังงานเกิดขึ้น 3 ชนิด คือ POTENTIAL, PRESSUREและ KINETIC ซึ่งแต่ละชนิดจะอธิบายโดยละเอียด ดังนี้

1) POTENTIAL ENERGY ขึ้นกับระดับของของเหลว ที่ความสูง z เหนือ PLANE ที่กำหนดให้(DATUM PLANE) จะมี POTENTIAL ENERGY เท่ากับ mgz เมื่อ m เป็นมวลและ g เป็นอัตราเร่งขึ้นกับความโน้มถ่วงของโลก

2) PRESSURE ENERGY จะมีค่าเท่ากับ $mg\,(P/\gamma)$ ซึ่ง P/γ เป็นเฮดสถิต (STATIC HEAD) P เป็นความกดดันท้องน้ำ และ γ น้ำหนักจำเพาะของของเหลว หรือน้ำหนักของของเหลวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

3) KINETIC ENERGY ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของของเหลว และมีค่า $\frac{1}{2}mv^2$ ซึ่ง v เป็นความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดนั้น

ดังนั้น รวมพลังงานทั้งหมดตลอดหน้าตัดนั้นจะมีค่าเท่ากับ E ซึ่ง

$$E = mgz + mg\frac{P}{\gamma} + \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{------------}(2.2)$$

รูปแบบที่ทำให้ดูง่ายก็โดยการนำสมการ (2.2) หารด้วย mg ซึ่งจะทำให้เปลี่ยนรูปพลังงานเทียบเป็นความสูงจะได้

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad \text{------------}(2.3)$$

เมื่อดัดแปลงทฤษฎีของ BERNOULLI'S ระหว่างจุดตัด 1 และ 2 ตามรูปที่ 2.4.1 เราจะได้

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad \text{----}(2.4)$$

เทอม h_f นี้เป็น HEAD LOSS ที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานของของเหลวที่ด้านข้าง และด้านใต้ของลำน้ำ และมันจะมีค่าเท่ากับผลคูณของความลาดเอียงของเส้นลาดพลัง(SLOPE OF ENERGY GRADE LINE) กับความยาวระหว่างจุดตัดทั้ง 2 ของลำน้ำ

เพราะฉะนั้น $h_f = S_e L$ - - - - - - - - - - - - - -(2.5)

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ในลำน้ำเปิดความลาดเอียงของเส้นลาดพลังจะเป็นเครื่องชี้บอกถึงการสูญเสียพลังงานของลำน้ำจากจุดตัดหนึ่งไปยังอีกจุดตัดหนึ่ง

ในทางน้ำไหลแบบเปิดความดันที่ผิวจะเท่ากันตลอดและเท่ากับความดันที่บรรยากาศ

ดังนั้น $\frac{P}{\gamma} = 0$, ตามสมการ 2.4 จะต้องลดรูปแบบบางรูปกลายเป็นดังสมการ 2.6

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \text{ - - - - - - - - - - - -(2.6)}$$

2.5 การคงสภาพของโมเมนตัม(CONSERVATION OF MOMENTUM)

ความสำคัญขั้นมูลฐานของการเปลี่ยนความเร็วของทุกกรณี คือการรักษาหรือการคงสภาพของ MOMENTUM MOMENTUM จะไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ภายในตัวมันเอง แต่มันจะเปลี่ยนโดยแรงจากภายนอกมากระทำซึ่งจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนของ MOMENTUM ตามรูป 2.4.1 การที่ความเร็วลดลงจาก v_1 ไป v_2 ผลก็คือการสูญเสีย MOMENTUM ดังนั้นแรงภายนอกที่มากระทำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง MOMENTUM ในเวลา T คือ

$$F = m \frac{V_1 - V_2}{T} \text{ - - - - - - - - - - - (2.7)}$$

ในสมการ(2.7), m เป็นมวลของปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านจากหน้าตัด 1 ไป 2 ดังนั้น

$$m = \frac{Q\gamma T}{g} \text{ - - - - - - - - - - - - - -(2.8)}$$

เมื่อนำสมการ(2.8) ไปแทนค่าใน(2.7) จะได้

$$F = Q\gamma \frac{V_1 - V_2}{g} \text{ - - - - - - - - - - - - -(2.9)}$$

ซึ่งความสำคัญของ MOMENTUM จะถูกใช้แก้ปัญหาสำหรับหาความลึกของลำน้ำภายหลัง

เกิด HYDRAULIC JUMP ทั้งนี้เนื่องจากการลดความเร็ว เนื่องจากการ JUMP จะเป็นไปตามกฎเกณฑ์การคงสภาพของ MOMENTUM

2.6 แฟคเตอร์ของเฮดความเร็วและของโมเมนตั้ม (VELOCITY-HEAD AND MOMENTUM CORRECTIVE FACTORS)

เนื่องจากการแพร่กระจายของความเร็วของลำน้ำในพื้นที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่ง การแพร่กระจายจะไม่เสมอกัน(nonuniform) ดังนั้นเฮดของความเร็วของลำน้ำเปิดโดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ตามสูตร $V^2/_{2g}$; เมื่อใช้กฎของพลังงานมาคำนวณค่าจริง ๆ ของเฮดความเร็วจะต้องเป็น $\propto \frac{V^2}{2g}$ ซึ่ง V เป็น mean velocity และ $\propto$ เป็น velocity-head correction factor บางทีเรียกสั้น ๆ ว่า energy coefficient หรือบางทีเรียก "Coriolis coefficient ทั้งนี้เพื่อเป็นเกียรติแก่ G. CORIOLIS ผู้เป็นคนแรกที่ค้นพบได้จากการทดลองว่ามีค่าระหว่าง 1.03 – 1.36 โดยการจำลองรูปลำน้ำเป็นแก้วและลำน้ำเป็นลำน้ำตรง และเขายังได้กล่าวว่า ให้ใช้ค่ามากสำหรับลำน้ำแคบ และให้ใช้ค่าน้อยสำหรับลำน้ำกว้างเมื่อเทียบกับความลึกของมัน"[1]

"นอกจากนี้ยังมี JOHNSON AND O' BRIEN ได้ทำการทดลองเหมือนกันเกี่ยวกับ VELOCITY-HEAD CORRECTION FACTOR($\propto$)"[2] ว่ามีค่าเขียนตามสมการ 2.10 ได้ดังนี้

$$\propto = 1 + \left[\frac{V_{max}}{V_{mean}} - 1 \right]^2 \quad \text{- - - - - - - -}(2.10)$$

---

[1] ON THE BACKWATER CURVE EQUATION AND THE CORRECTIONS TO BE -INTRODUCED TO ACCOUNT FOR THE DIFFERENCE OF THE VELOCITY. Mémoire NO. 268, Annales des ponts et chaussées, Vol.11, ser 1. pp.314-335, 1836.

[2] JOHNSON, J.W., and M.P.O'Brien : VELOCITY-HEAD CORRECTION FACTORS FOR HYDRAULIC FLOW, Eng. NEW Record, p.214 Aug.16, 1934.

การแพร่กระจายของความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอกันนี้ มีผลทำให้การคำนวณ MOMENTUM ในลำน้ำเปิด ดังนี้คือ จากทาง MECHANICS ; MOMENTUM ของของเหลวผ่านหน้าตัดหนึ่ง ต่อหนึ่งหน่วยเวลา สามารถหาได้จากสูตร $\beta \frac{Q\gamma v}{g}$ ซึ่ง" β เป็น MOMENTUM COEFFCIENT หรือเรียกว่า BOUSSINESQ COEFFICIENT ซึ่งค้นพบโดย J. BOUSSINESQ"[1]

γ เป็นน้ำหนักจำเพาะของน้ำ, Q เป็นปริมาณน้ำที่ไหล, v เป็น mean velocity และค่าของมันที่หาได้จากรูปจำลองของลำน้ำตรงที่เป็นแก้ว มีค่าประมาณ 1.01 – 1.12 "จากการทดลอง REHBOCK ได้กำหนดค่าดังสมการ (2.11)"[2]

$$\beta = 1 + \epsilon^2/3 \qquad \text{-------------(2.11)}$$

ซึ่ง ϵ มีค่าเท่ากับ $\frac{V_{max}}{V_{mean}} - 1$

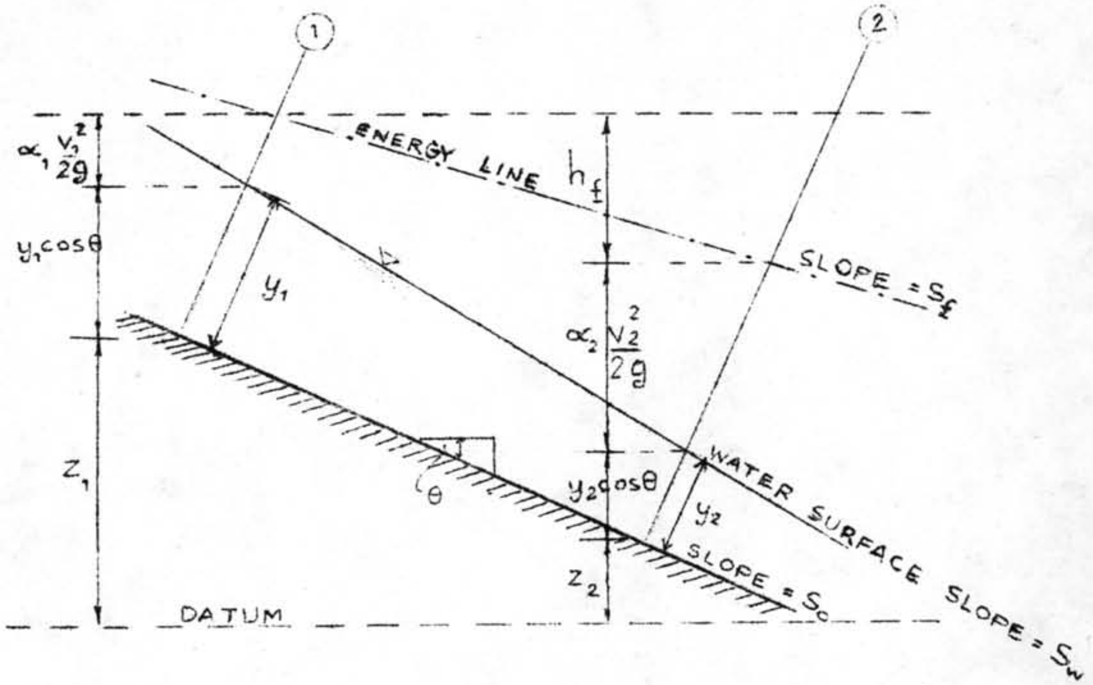
สำหรับลำน้ำที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ และมีแนวลำน้ำตรง ผลการคำนวณหาค่าเฮดความเร็วและ MOMENTUM เมื่อนำการแพร่กระจายความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ(nonuniform velocity distribution) มาเกี่ยวข้องกับการไม่คิด ผลการแพร่กระจายความเร็วมาเกี่ยวข้อง ค่าเฮดความเร็วและ MOMENTUM มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นส่วนใหญ่เขาจึงนิยมใช้ค่า α และ β มีค่าเท่ากับ 1

---

[1] J. BOUSSINESQ : ON THE THEORY OF FLOWING WATERS Mémoires présentés par divers savants a' l' Académic des Science, Paris, 1877

[2] TH. REHBOCK : THE DETERMINATION OF THE POSITION OF THE ENERGY LINE IN FLOWING WATER WITH AID OF VELOCITY-HEAD ADJUSTMENT, BERLIN, Vol 3, no.15 pp.453-455, Aug. 15, 1922

2.7 พลังงานจำเพาะ(SPECIFIC ENERGY)



รูป 2.7.1 พลังงานของลำน้ำเปิดที่มีพื้นน้ำลาดเอียง

ตามที่เคยกล่าวมาแล้วว่าพลังงานของลำน้ำที่ผ่านหน้าตัดหนึ่ง ๆ สามารถเขียนเทียบเป็นระดับความสูงของน้ำเป็นฟุต ซึ่งเท่ากับผลรวมของระดับเหนือเส้นที่กำหนดให้(DATUM LINE) กับค่าเฮดความดัน(PRESSURE HEAD) และเฮดความเร็ว ดังรูป 2.7.1 เป็นการไหลของน้ำที่มีความลาดเอียงมาก ดังนั้นสามารถจะเขียนสมการพลังงานเมื่อเป็นความสูงที่จุดตัดที่ 1 ได้ดังนี้

$$H = Z_1 + y_1 \cos\theta + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \text{ -------(2.12)}$$

เมื่อ Z = ระดับความสูงเมื่อเทียบจากเส้นที่กำหนดถึงระดับท้องน้ำ

y_1 = ความลึกของลำน้ำที่จุดตัด

θ = มุมของท้องน้ำที่ทำกับแนวนอน

"พลังงานจำเพาะนี้ผู้ที่ค้นคิดคนแรกคือ BAKHMETEFF ในปี ค.ศ.1912 ซึ่งได้ให้คำจำกัดไว้ว่า พลังงานจำเพาะของลำน้ำในหน้าตัดหนึ่งหน้าตัดใด คือ พลังงานต่อหน่วยปอนด์ของน้ำที่วัดเทียบกับท้องน้ำ ดังนั้นตามสมการที่ 2.12 ค่า $Z_1 = 0$ พลังงานจำเพาะจะเป็นดังสมการ 2.13 "[1]

$$E = y\cos\theta + \alpha\frac{V^2}{2g} \quad \text{-----------} \quad (2.13)$$

ส่วนใหญ่ท้องลำน้ำจะมีค่า SLOPE น้อย, $\theta \approx 0$ และ $\alpha = 1$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad E = y + \frac{V^2}{2g} \quad \text{---------------} \quad (2.14)$$

ในเมื่อ y = ความลึกของลำน้ำ ฟุต

V = ความเร็วของกระแสน้ำโดยเฉลี่ย ฟุต/วินาที

q = ปริมาณน้ำที่ไหลต่อความกว้างของลำน้ำหนึ่งหน่วยลูกบาศก์ฟุตต่อวินาทีต่อความกว้างหนึ่งฟุต

E = พลังงานจำเพาะ(SPECIFIC ENERGY) โดยวัดเทียบกับท้องแม่น้ำหรือลำคลองเป็นเกณฑ์ ไม่ได้เทียบกับเส้นกำหนดให้(DATUM-LINE)

ในเทอมของ q สมการ 2.14 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{---------------} \quad (2.15)$$

ซึ่งโดยการนำค่า V ไปแทนค่านั้นเอง คือ $V = \frac{q}{y}$

ถ้าค่า q คงที่ ค่า E จะน้อยที่สุดก็ต่อเมื่อ $\frac{dE}{dy} = 0$

---

[1] BORIS A. BAKHMETEFF " VARIED FLOW IN OPEN CHANNEL" ST. PETERSBURG, RUSSIA, 1912.

เพราะฉะนั้น โดยวิธีดีฟเฟอเรนชิเอตเทียบกับตัวแปร y

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

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

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

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

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

นั่นคือ $y = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$

y ในที่นี้คือ y ที่มีค่า E น้อยที่สุด ให้สัญลักษณ์เป็น y_c หรือที่เรียกว่าความลึกวิกฤติ(CRITICAL DEPTH)

เพราะฉะนั้น $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ --------(2.16)

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

$$y_c = \frac{q^2}{gy_c^2}$$

$$y_c = \frac{V_c^2}{g} \text{ --------(2.17)---} \left(V_c^2 = \frac{q^2}{y_c^2}\right)$$

$$\frac{yc}{2} = \frac{V_c^2}{2g} \text{ --------(2.18)}$$

ความเร็วของกระแสน้ำที่ความลึกวิกฤต(y_c) เรียกว่าความเร็ววิกฤตด้วย(CRITICAL VELOCITY)

เพราะฉะนั้น จากสมการที่ (2.14)

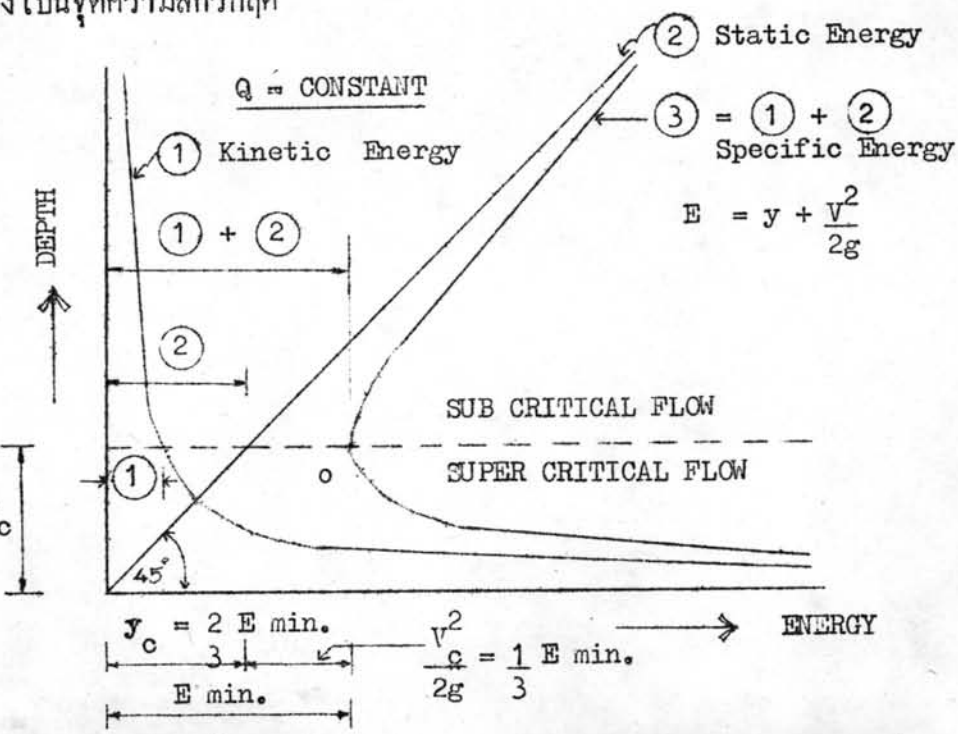
$$E \text{ น้อยที่สุด} = y_c + \frac{V_c^2}{2g}$$

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

นั่นคือ E น้อยที่สุด $= \frac{3}{2} y_c$ ....(2.19)

เมื่อเรากำหนดให้ค่า Q คงที่ แล้วให้ความลึกเปลี่ยนแปลงได้คือ น้อยลงหรือมากขึ้น ค่าพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเสมอซึ่งจะเห็นได้จากแผนภูมิพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Diagram) รูป 2.7.2 เมื่อเขียนแผนภูมินี้จากลำน้ำรูปสี่เหลี่ยม ให้ความลึก y อยู่ในแกน Y และพลังงานจำเพาะในแกน X ดังนั้น Curve (1) จะชี้ให้เห็นว่าระหว่างความลึก y กับพลังงานจลน์(Kinetic Energy) เมื่อปริมาณการไหลของน้ำคงที่ (Constant Discharge) ค่า y จะเป็นปฏิภาคกลับกับตัว V นั่นคือ $y \propto \frac{1}{V}$ ดังนั้น Curve ระหว่าง y กับ $\frac{V^2}{2g}$ จะเป็นรูป Parabola, Curve (2) จะชี้ให้เห็นว่า ระหว่างความลึก y กับพลังงานศักย์ ค่า y จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานศักย์ ดังนั้นมันจะเป็น Curve เส้นตรงทำมุม 45° กับจุด Origin, Curve (3) เป็นการรวมเอาค่าของ Curve (1) และ (2) คือค่าพลังงานจลน์และค่าพลังงานศักย์ที่จุดความลึกเดียวกัน

ที่จุด o เป็นจุดที่มีพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดซึ่งตรงกันกับความลึก y_c มีค่าน้อยสุดด้วย ซึ่งเป็นจุดความลึกวิกฤต



รูป 2.7.2 แผนภูมิของพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Diagram)

2.7.1 ความลึกที่ให้ค่าปริมาณน้ำไหล(Q) สูงสุดเมื่อกำหนดค่าพลังงานจำเพาะให้

จากหัวข้อ 2.7 ข้างต้น เราได้กล่าวถึง การกำหนดค่า Q คงที่ หาค่า y ที่ให้ค่า E น้อยที่สุด เรียกค่า y ที่ได้เป็น y_c (CRITICAL DEPTH) ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากเรากำหนดค่า E คงที่ หาค่า y ที่ทำให้ค่า Q มากที่สุด ค่า y ที่ได้นั้นจะเป็น y_c (CRITICAL DEPTH)

จากสมการพลังงานจำเพาะที่ (2.4) $$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad ----(a)$$

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

เพราะฉะนั้น $$Q = AV$$

$$Q = by\sqrt{2g\,(E - y)}$$

$$= b\sqrt{2g\,(Ey^2 - y^3)} \quad ------(b)$$

จากสมการ(b) Q จะมากที่สุดก็ต่อเมื่อ$(Ey^2 - y^3)$ มีค่ามากที่สุด โดยวิธีดิฟ-เฟอเรนชิเอต $Ey^2 - y^3$ เทียบกับค่าตัวแปรค่าy และให้เท่ากับศูนย์ สำหรับค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด จะได้

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

$$E2y - 3y^2 = 0$$

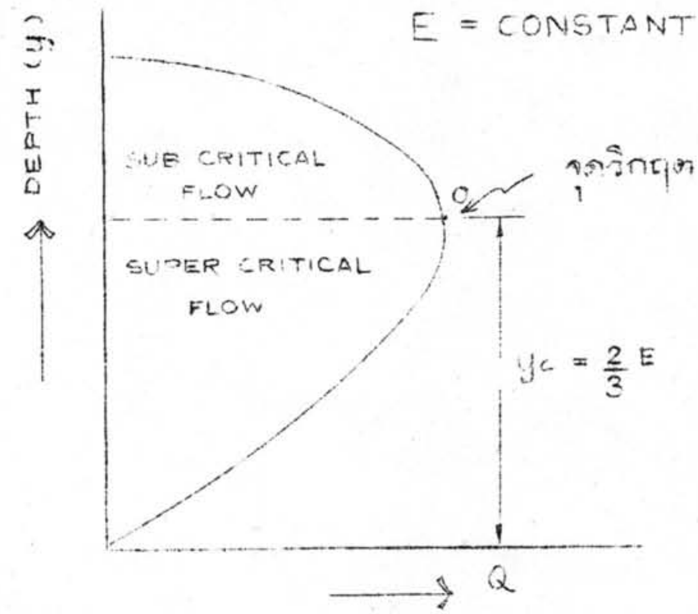
$$2E - 3y = 0$$

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

หรือ $$y_c, = \frac{2}{3}E \quad ------(c)$$

จากสมการ(c) จะพบว่า เมื่อกำหนดค่าพลังงานจำเพาะ(E) ให้ ความลึกของน้ำ (y) ที่จะให้ค่า Q มากที่สุด จะเท่ากับ $\frac{2}{3}$ ของค่าพลังงานจำเพาะนั้น ความลึก(y) ในที่นี้ก็จะเป็นความลึกวิกฤติ (y_c) ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถจะเขียนเป็นผังภาพ(ดังรูปที่ 2.7.3) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหล(Q) กับความลึกโดยให้พลังงานจำเพาะคงที่ ค่าของ Q ในตอนแรกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤติ(จุด O) และเริ่ม

ค่อย ๆ ลดลงทั้ง ๆ ที่ ความลึก (y) ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



รูป 2.7.3 ผังภาพพลังงานจำเพาะ เมื่อกำหนดให้พลังงานจำเพาะคงที่

ถ้านำค่า $E = \frac{3}{2}y$ ไปแทนในสมการ (a) จะได้ $\frac{3}{2}y = y + \frac{V^2}{2g}$

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

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

หารตลอดด้วย y ; $\frac{V^2}{gy} = 1$

หรือ $\frac{V}{\sqrt{gy}} = 1$ - - - - - - - - - - - - - (d)

ถ้าให้ $\mathbb{F}$ เป็นสัญลักษณ์ฟรัดนัมเบอร์ (FROUDE NUMBER) ซึ่งมีค่า

$= \frac{V}{\sqrt{gy}}$ สมการ(d) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\mathbb{F} = 1$$

2.8 น็อชและเวีย (Notch & Weir)

น็อช (Notch) คือ ออริฟิซที่ระดับผิวน้ำอยู่ต่ำกว่าขอบบน ใช้เป็นเครื่องมือในการวัดหาปริมาณการไหลของน้ำ จากที่เก็บกัก หรืออ่างกักน้ำฯลฯ มักมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปสามเหลี่ยม

เวีย (Weir) เป็นชื่อของทำนบกั้นน้ำสำหรับให้น้ำไหลผ่าน ตามทฤษฎีแทบจะไม่มีความแตกต่างกันระหว่างเวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับน็อชรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นอกจากขอบของน็อชมักมีความคม

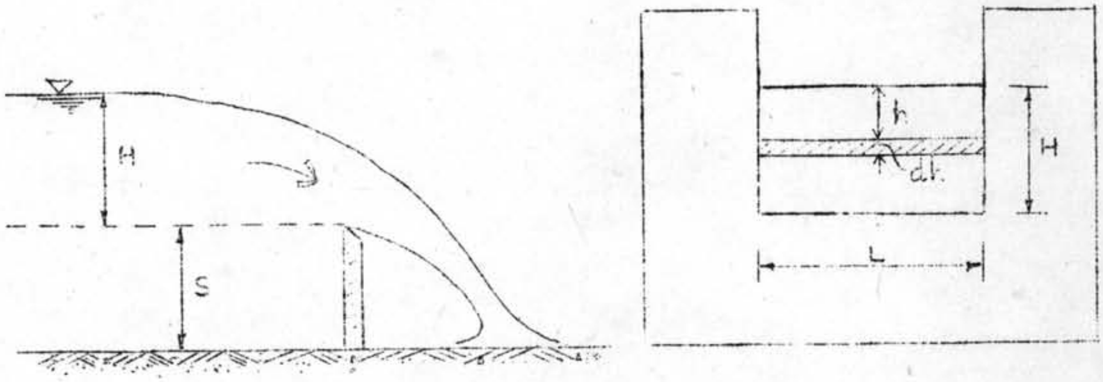
เวียสามารถจะแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

เวีย (Weir)

- เวียที่มีขอบล่างคม (Sharp-Crested Weir)
  - เวียสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Weir)
  - เวียรูปสามเหลี่ยม (Triangular Weir)
  - เวียรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Weir)
  - เวียรูปพาราโบลิค (Parabolic Weir)
- เวียที่ขอบล่างหนา (Thick-Crested Weir)
  - เวียขอบล่างกว้าง (Broad Crested Weir
  - เวียที่จมใต้น้ำ (Submerge Weir)

2.8.1 การไหลผ่านเวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Flow Over Rectangular Weir)

เมื่อน้ำไหลผ่านเวียดังรูป 2.8.1 จะเกิดการลดขนาดของหน้าตัดที่วีนาคอนแทร็กตา ขณะเดียวกันที่ขอบของเวีย จะมีแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานด้วย เป็นเหตุให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเวียออกมาจริงๆ มีปริมาณน้อยกว่าค่าที่ได้ตามทฤษฎี



รูป 2.8.1 เวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูป ถ้า L = ความกว้างของเวีย

H = ความสูงที่ระดับผิวน้ำเหนือขอบล่าง SILL

C_d = สัมประสิทธิ์แห่งการไหล

ถ้าสมมุติให้ความหนาของแถบเล็ก ๆ หนา dh และอยู่ใต้ระดับน้ำ = h, พื้นที่แถบเล็ก ๆ (dA) = Ldh , ความเร็วของกระแสน้ำตามทฤษฎีจะเท่ากับ $\sqrt{2gh}$

เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่แถบเล็ก ๆ = พื้นที่แถบเล็ก ๆ x ความเร็วของกระแสน้ำ

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

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลผ่าน $= C_d L \sqrt{2g} \int_0^H h^{1/2}\, dh$ - - -(2.8.1

$$= C_d L \sqrt{2g} \left[\frac{h^{3/2}}{\frac{3}{2}} \right]_0^H$$

นั่นคือ $Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \; LH^{3/2}$ - - - - - -(2.8.1 ข)

ซึ่งสมการ(2.8.1) นี้เราไม่นำ VELOCITY OF APPROACH มาเกี่ยวข้อง "สมการนี้ถูกค้นพบโดย M.G.POLENI ชาวอิต... BUAT ชาวฝรั่งเศส ในเวลาเดียวกัน"[1]

C_d คือสัมประสิทธิ์แห่งการไหล(COEFFICIENT OF DISCHARGE) ซึ่งเกิดจาก FRICTIONAL LOSSES ค่าหยาบ ๆ โดยทั่วไปจะมีค่า = 0.6 อย่างไรก็ตามถ้าต้องการนำ WEIR ชนิดนี้ไปใช้ในการหาปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำเวียไปทำการทดสอบหาค่าคงที่ของมันในห้องปฏิบัติการ เสียก่อน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง โดยการ CALIBRATE ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 2.8.3 ต่อไป

2.8.2 การไหลผ่านเวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อคำนึงถึงความเร็วขณะเข้าใกล้ (VELOCITY OF APPROACH) พื้นที่หน้าตัดของช่องทางน้ำไหลก่อนจะถึงเวียนั้นมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของเวีย ดังนั้นเมื่อมวลน้ำไหลผ่านเวียจะไหลด้วยความเร็วที่เรียกว่า ความเร็วขณะเข้าใกล้(VELOCITY OF APPROACH)ความเร็วที่ว่านี้สมมุติว่ามีค่า เท่ากันทั่วพื้นที่หน้าตัดของเวีย ซึ่งตามสมการ(2.8.1) มิได้นำสิ่งเหล่านี้มาคำนึงถึง เราอินทิเกรตจาก 0 ถึง H โดย H วัดจากเฮด POTENTIAL ตามรูป 2.8.1 ดังนั้นถ้าเรานำเอาความเร็วขณะเข้าใกล้มาเกี่ยวข้อง ค่าเฮดจริง ๆ ในการหาปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเวียจะเป็นผลรวมของเฮด H และเฮดที่เกิดจาก VELOCITY OF APPROACH $\frac{V_o^2}{2g}$ ดังนั้น limit ในการอินทิเกรตสมการ 2.8.1 จะเป็นจาก $\frac{V_o^2}{2g}$ ถึง($H + \frac{V_o^2}{2g}$) และดังนั้นสมการจะเป็น

$$Q = C_d \sqrt{2g}\,L \int_{\frac{V_o^2}{2g}}^{H + \frac{V_o^2}{2g}} h^{\frac{1}{2}} \cdot dh$$

---

[1]DR. JAGDISH LAL, HYDRAULICS AND FLUID MECHANICS, METROPOLITAN BOOK CO. PRIVATE Ltd. p. 472.

หรือ $$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \; L \left[\left(H + \frac{V_o^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{V_o^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad \text{--(2.8.2)}$$

เพื่อให้สมการดูแลไม่ยุ่งยาก กำหนดให้เฮดเนื่องจาก VELOCITY OF APPROACH $\left(\frac{V_o^2}{2g}\right)$ เขียนแทนเป็น h_a ดังนั้นสมการ 2.8.2 เขียนใหม่ได้เป็น

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \; L \left[(H+h_a)^{\frac{3}{2}} - h_a^{\frac{3}{2}} \right] \quad \text{----(2.8.3)}$$

ซึ่งเฮด $H + h_a$ คือ เฮดของน้ำที่ระดับน้ำนิ่ง VELOCITY OF APPROACH สามารถจะหาได้โดยนำเอาปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ

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

โดยที่ค่า $A = L\,(H + S)$

S = ความสูงของเวีย หรือ WEIR BOARD (ตามรูป 2.8.1)

เพราะฉะนั้น $$V_o = \frac{Q}{L\,(H + S)} \quad \text{--------(2.8.4)}$$

ถ้าเฮดของ VELOCITY OF APPROACH มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฮดที่วัดได้ ค่าเฮดของ VELOCITY OF APPROACH ให้ละทิ้งไม่ต้องนำมาคำนึงถึง จากสมการ (2.8.4) จะเห็นได้ว่าค่า VELOCITY OF APPROACH จะหาได้ก็ต่อเมื่อเรารู้ปริมาณการไหลของน้ำก่อน ดังนั้นในการคำนวณครั้งแรก เราจะต้องไม่คิดค่า VELOCITY OF APPROACH ให้ทำการคำนวณหาค่า Q โดยประมาณจากสมการ 2.8.1a จากนั้นนำค่า Q ที่ได้ไปแทนในสมการ 2.8.3 เพื่อหาค่าโดยประมาณของ VELOCITY OF APPROACH ทำวิธีการแบบนี้ซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนกระทั่งค่าสุดท้ายของ Q ใกล้เคียง 1% ของค่า Q ที่คำนวณได้จากครั้งแรก

2.8.3 การ CALIBRATE เวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (CALIBRATION OF RECTANGULAR WEIR)

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.8.1 เกี่ยวกับการใช้เวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการหาปริมาณการไหลของน้ำว่าจะให้ได้ค่าผลที่แน่นอนควรจะ CALIBRATE ก่อน จากสมการ 2.8.1 a

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \; LH^{\frac{3}{2}}$$

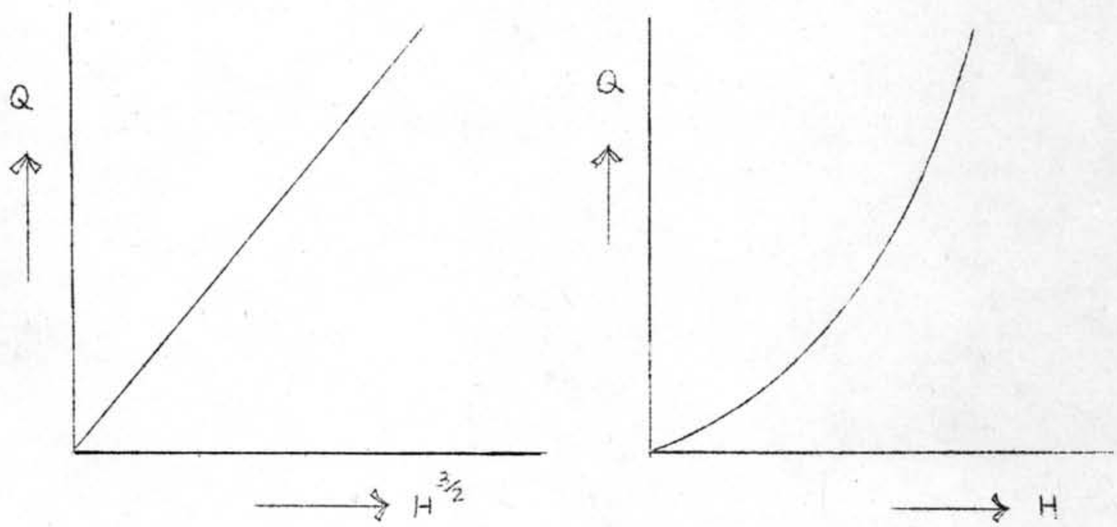
ซึ่งค่า $\frac{2}{3} \sqrt{2g} \; L$ เป็นค่าคงที่เฉพาะเวียหนึ่ง ๆ

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

เพราะฉะนั้น $Q = KH^{\frac{3}{2}}$ - - - - - - - - - - (2.8.4)

ถ้านำค่า Q มา plot กับ H (ตามรูป 2.8.2) มันจะเป็น SEMI-CUBICAL

ถ้านำค่า Q มา plot กับ $H^{\frac{3}{2}}$ มันจะให้ curve เส้นตรง(ดังรูป 2.8.2)



รูป 2.8.2 การ **CALIBRATE** ของเวียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าคงที่ของ K สามารถเขียนได้

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

$$\text{และ } C_d = \frac{K}{\frac{2}{3}\sqrt{2g} \; L}$$

ในทางปฏิบัติค่า C_d จะผันแปรตามค่าเฮด H ดังนั้นอาจเป็นไปได้ที่ค่า $Q = f(H^{\frac{3}{2}})$ ไม่เป็นเส้นตรงเลยทีเดียว

ดังนั้นสมมุติ $Q = KH^n$ - - - - - - - - - - - (2.8.5)

หรือ $\log Q = \log K + n \log H$ - - - - - (2.8.5 a)

$\log Q = f(H)$ จะให้ curve เป็นเส้นตรง ซึ่งค่า K & n สามารถจะหาค่าได้คือ

จากสมการ(2.8.5 a)

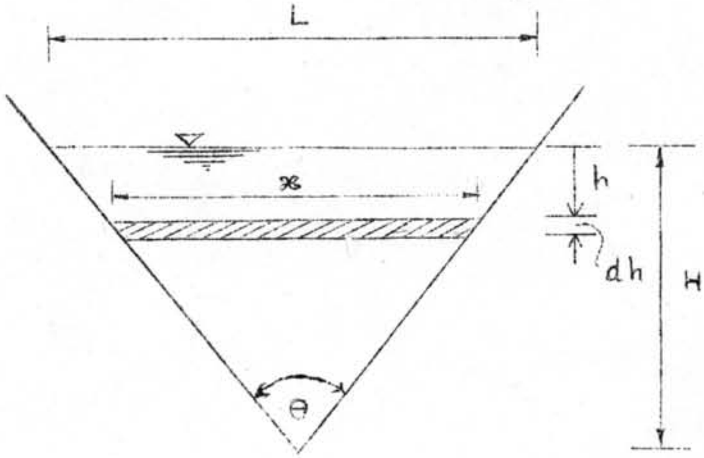
เมื่อ $H = 1$ ค่า $\log H = 0$

เพราะฉะนั้น $\log Q = \log K$ **ซึ่งสามารถหาค่า K ได้**

และเพราะว่า $n = \dfrac{\log Q - \log K}{\log H}$ - - - - - - -(2.8.6)

เลือกค่าจุดใดจุดหนึ่งบน curve มาแทนค่า ก็จะได้ค่า n ซึ่งวิธีการหาค่าK & n ต่าง ๆ จะแสดงให้เห็นในบททดลองต่อไป

2.9 เวียรูปสามเหลี่ยม หรือน็อชรูปตัว V (TRIANGULAR WEIR OR V-NOTCH) เมื่อปริมาณการไหลต่ำ ค่าเฮดเหนือ SILL ของเวียรูปสี่เหลี่ยมจะน้อยมากยากต่อการวัดค่าที่แท้จริง ในกรณีเช่นนี้ เวียรูปสามเหลี่ยมจึงมักถูกนำมาใช้ ทั้งนี้เพราะเฮดจะเพิ่มเร็วกว่าเฮดของเวียรูปสี่เหลี่ยม**ผืนผ้า** เมื่อปริมาณการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และจะพบอีกว่าเวียในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านั้น ความยาวของขอบที่แตะน้ำมิได้ขึ้นอยู่กับ **H** เพราะความยาวที่ขอบล่างคงที่ตลอดเวลา เมื่อ H มีค่าต่าง ๆ กัน ดังนั้น ค่า C_c ซึ่งขึ้นอยู่กับขอบที่แตะน้ำจึงไม่คงที่สำหรับค่า H ใด ๆ แต่ในกรณีเวียรูปสามเหลี่ยม ไม่มีขอบล่างเหมือนเวียรูปรูปสี่เหลี่ยม เวียรูปสามเหลี่ยมนี้ผลของมันจะขึ้นกับด้านข้างเพียงอย่างเดียว ค่า C_c จะคงที่สำหรับทุกเฮดของน้ำ ด้วยเหตุนี้เวียรูปสามเหลี่ยมจึงเป็นที่นิยมใช้ในการวัดหาค่าปริมาณน้ำที่ไหล



รูป 2.9.1 เวียรูปสามเหลี่ยม

ให้ H = ความสูงของระดับผิวน้ำ

θ = มุมของเวีย

ถ้าพิจารณาพื้นที่แถบเล็ก ๆ พื้นที่ = $x \cdot dh$ และอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ = h
ความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่แถบเล็ก ๆ ดังกล่าว = V_T หรือ = $\sqrt{2gh}$

เพราะฉะนั้น ปริมาณการไหลผ่านพื้นที่แถบเล็ก ๆ นั้น = $C_d A_s V_T$

$$dQ = C_d\,(x \cdot dh)\sqrt{2gh}$$

และปริมาณการไหลของเวียรูปสามเหลี่ยมทั้งหมดคือ

$$Q = \int_0^H dQ = \int_0^H C_d\,(x \cdot dh)\sqrt{2gh}$$

ค่าของ x ในเทอมของ H และ h หาได้จากสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{L}{H} = \frac{x}{H-h} \quad \text{หรือ} \quad x = \frac{L(H-h)}{H}$$

ดังนั้น $Q = C_d \sqrt{2g}\ \frac{L}{H} \int_0^H (H-h)h^{1/2}\, dh$

$$= C_d \sqrt{2g}\ \frac{L}{H} \left[\frac{2}{3} Hh^{3/2} - \frac{2}{5} h^{5/2} \right]_0^H$$

$$= C_d \sqrt{2g}\ \frac{L}{H} \times \frac{4}{15}\ H^{5/2}$$

$$= C_d \sqrt{2g}\ L \times \frac{4}{15} \times H^{3/2} \text{ - - - - - - } (2.9.1)$$

เพราะว่า $\frac{L/2}{H} = \tan \frac{\theta}{2}$; เพราะฉะนั้น $L = 2H \tan \frac{\theta}{2}$

นำค่า L ที่ได้ไปแทนสมการที่ (2.9.1)

เพราะฉะนั้น $Q = C_d \sqrt{2g}\ \frac{4}{15} \times 2\ H \tan \frac{\theta}{2}\ H^{3/2}$

$$= \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g}\ \tan \frac{\theta}{2}\ H^{5/2} \text{ - - - - } (2.9.2)$$