

## 430 451 Hydraulic Engineering

### ทบทวนชลศาสตร์

#### คุณสมบัติพื้นฐานของของไหล

คุณสมบัติของของไหลเป็นลักษณะเฉพาะของของไหลขึ้นกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับในชลศาสตร์วิศวกรรม คุณสมบัติของน้ำจัดว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งอาจจะประมาณให้คงที่หรือเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ คุณสมบัติพื้นฐานในที่นี้คือ ความหนาแน่น น้ำหนักจำเพาะ ความหนืดพลวัต ความหนืดจลศาสตร์

ความหนาแน่น (Mass density):  $\rho$

$$\rho =$$

$m$  = มวล       $v$  = ปริมาตร

โดยปกติที่ความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศ น้ำจะมีความหนาแน่น  $1,000 \text{ kg/m}^3$  ที่อุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$

ส่วนกลับของความหนาแน่นเรียกว่าปริมาตรจำเพาะ ใช้สัญลักษณ์  $v_s = 1 / \rho$

น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) คือ น้ำหนักของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร:  $\gamma$

$$\gamma =$$

$w$  = น้ำหนักของของไหล ;  $v$  = ปริมาตรของของไหล

น้ำหนักจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$  มีค่า  $= 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^3$

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น

$$S =$$

โดยที่  $s$  = ความถ่วงจำเพาะ (ไม่มีหน่วย)

$w$  = น้ำหนักของวัตถุ

$w_w$  = น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุ

$\gamma, \gamma_w$  = น้ำหนักจำเพาะของวัตถุและของน้ำตามลำดับ

$\rho, \rho_w$  = ความหนาแน่นของวัตถุและของน้ำตามลำดับ

ความหนืด (Viscosity) เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงแรงต้านทานต่อการไหล เมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำโดยแบ่งความหนืดออกเป็น 2 ชนิดคือ

ความหนืดสมบูรณ์ (Absolute viscosity) หรือบางครั้งเรียกว่า ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity):  $\mu$  (mu) ขนาดของ  $\mu$  จะเป็นสัดส่วนกับแรงเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

$$\tau =$$

$$\mu \text{ คือ } \text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$$

ความหนืดจลน์ศาสตร์ (Kinematic viscosity) คือ อัตราส่วนของความหนืดพลวัตต่อความหนาแน่น:  $\nu$  (nu)

$$\nu =$$

$$\text{มิติของ } \nu \text{ คือ } \text{L}^2\text{T}^{-1}$$

**สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)**

**สมการพลังงาน (Energy Equation)**

สมการเบอร์นูลลีในเทอมของพลังงานต่อหน่วยปริมาตร

การเรียกชื่อในเทอมต่าง ๆ

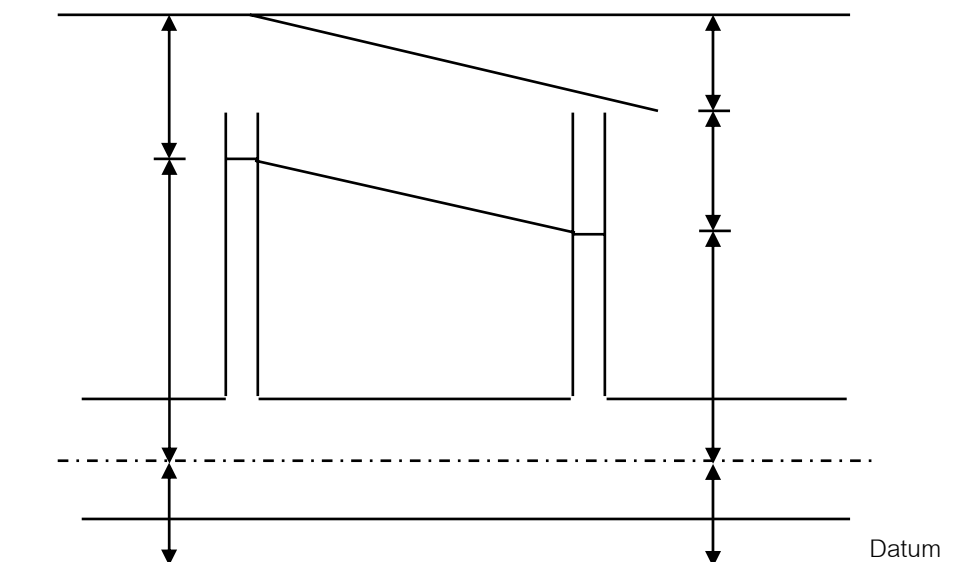
= Pressure Head

= Velocity Head

= Elevation Head

แนวเส้นเป็นผิวของของไหลคือ  $z + \frac{P}{\gamma}$  เรียกเส้นระดับชลศาสตร์ (Hydraulic Grade Line);

H.G.L. และแนวเส้นที่เป็นผลรวมของ  $z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$  เรียกว่าเส้นระดับพลังงาน (Energy Grade Line) ; E.G.L.



กรณีที่มีการสูญเสียพลังงานเมื่อของไหลไหลจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 สมการพลังงานคือ

การสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากความหนืดภายในท่อ หรือมีการติดตั้ง Turbine หรือเกิด Hydraulic jump ในทางน้ำเปิด กรณีการติดตั้งปั๊มสูบน้ำเพื่อนเพิ่ม Head ให้กับระบบจะได้สมการพลังงานคือ

เมื่อ  $H_p$  = Head ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการติดตั้งปั๊มสูบน้ำ

กำลังของของไหล ( $P_w$ ) เนื่องจากเครื่องสูบน้ำหาได้จาก

เมื่อ	$\gamma$	=	น้ำหนักจำเพาะ ( $N/m^3$ )
	$Q$	=	อัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊ม ( $m^3/s$ )
	$H_p$	=	พลังงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปั๊ม (m)
	$\eta$	=	ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

สมการโมเมนตัม (Momentum equation )

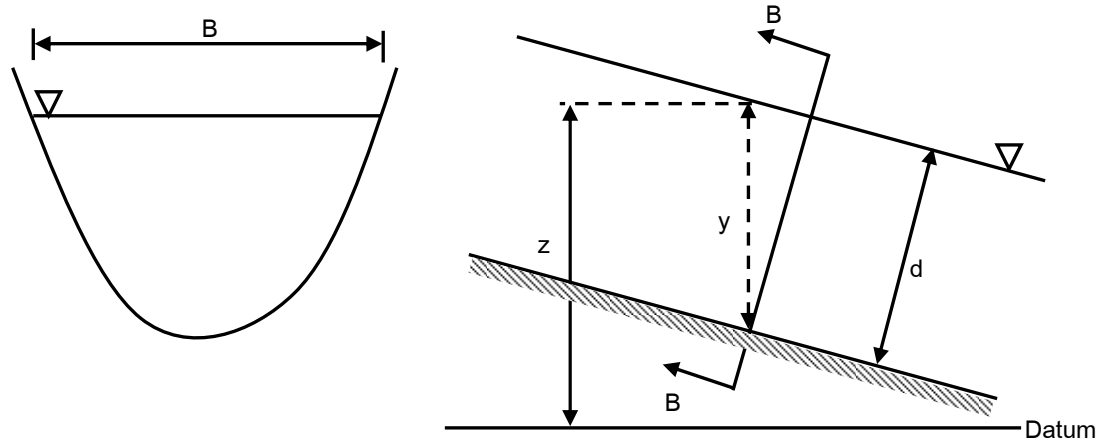
## 430 451 Hydraulic Engineering

### การไหลในทางน้ำเปิด

การไหลในทางน้ำเปิด คือ การไหลของของไหลในทางน้ำธรรมชาติ หรือการไหลในทางน้ำที่สร้างขึ้น หรือการไหลในท่อที่มีน้ำไหลไม่เต็มท่อ

สิ่งสำคัญที่แสดงว่าเป็นการไหลในทางน้ำเปิด คือ ผิวอิสระของการไหลจะต้องสัมผัสกับบรรยากาศ หลักที่ทำให้เกิดการไหลประกอบด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อมวลของไหล แรงเนื่องจากความดันน้ำและแรงเฉือนที่ต้านทานการไหลของของไหล

#### คุณสมบัติของหน้าตัด



ทางน้ำไหลแบบปริซึม (Prismatic channel) คือ ทางน้ำที่มีหน้าตัดการไหล และความลาดท้องคลองคงที่หน้าตัดที่สร้างขึ้นอาจจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม

ทางน้ำเปิดแบบไม่เป็นปริซึม (Non Prismatic channel) คือ ทางน้ำที่มีหน้าตัดการไหลและความลาดท้องคลองไม่คงที่ เช่น คลองธรรมชาติ หรือแม่น้ำ

หน้าตัดท้องน้ำ (Channel section) คือ พื้นที่หน้าตัดของทางน้ำที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ (หน้าตัด B-B)

ความลึกการไหล (Depth of flow) สัญลักษณ์  $y$  คือ ระยะทางที่วัดในแนวตั้ง จากท้องคลองถึงผิวอิสระของการไหล

ความลึกการไหลในหน้าตัดของทางน้ำ (Depth of flow section) สัญลักษณ์  $d$  คือ ระยะที่วัดแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลจากท้องคลองถึงผิวอิสระ

ความกว้างทางน้ำ (Top width) สัญลักษณ์  $B$  คือ ความกว้างของหน้าตัดการไหลวัด ณ ผิวอิสระของการไหล

พื้นที่หน้าตัดการไหล (Flow area) สัญลักษณ์  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

เส้นรอบรูปเปียก (Wetted perimeter) สัญลักษณ์  $P$  คือ ความยาวของเส้นรอบรูปของหน้าตัดการไหลที่วัดระหว่างของอิสระทั้งสองข้าง

รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic radius) สัญลักษณ์  $R$  คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดน้ำกับเส้นรอบรูปเปียก  $R = A/P$

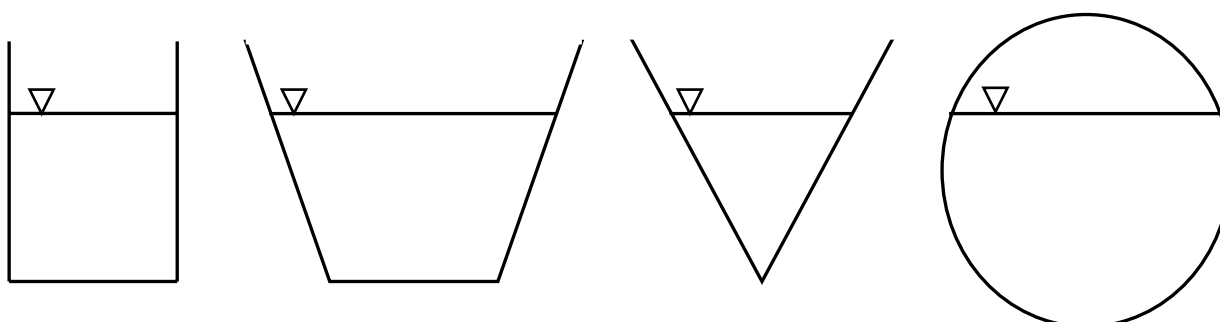
ความลึกชลศาสตร์ (Hydraulic depth) สัญลักษณ์  $D$  คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดกับความกว้าง  $D = A/B$

แฟกเตอร์หน้าตัดการไหลวิกฤต (Section factor for critical flow) สัญลักษณ์  $z$  คือ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดกับรากที่สองของความลึกชลศาสตร์  $Z = AD^{1/2}$

แฟกเตอร์หน้าตัดการไหลสม่ำเสมอ (Section factor for uniform flow) สัญลักษณ์  $U$  คือ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดผืนน้ำกับรัศมีชลศาสตร์ยกกำลังสองส่วนสาม  $U = AR^{2/3}$

ตารางคุณสมบัติของหน้าตัดการไหลชนิดต่าง ๆ

Section	Symbol	Rectangular	Trapezoidal	Triangular	Circular
Area	$A$	$by$	$(b + zy)y$	$zy^2$	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$
Wetted perimeter	$P$	$b + 2y$	$(b + zy)\sqrt{1 + z^2}$	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{1}{2}\theta D^2$
Hydraulic Radius	$R$	$\frac{by}{b + 2y}$	$\frac{(b + zy)y}{(b + zy)\sqrt{1 + z^2}}$	$\frac{zy^2}{2y\sqrt{1 + z^2}}$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)D$
Top width	$B$	$b$	$b + 2zy$	$2zy$	$D \sin \frac{\theta}{2}$
Hydraulic depth	$D$	$y$	$\frac{(b + 2zy)y}{(b + 2zy)}$	$\frac{y}{2}$	$\left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2}}\right) \frac{D}{8}$



## การจำแนกประเภทของการไหล

### 1. เกณฑ์ของเวลา

Steady flow;  $\frac{dV}{dt} = 0$  การไหลของน้ำนิ่ง

Unsteady flow;  $\frac{dV}{dt} \neq 0$  ระดับของน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

### 2. เกณฑ์ของระยะทาง

Uniform flow;  $\frac{dV}{dx} = 0$

Non-Uniform flow;  $\frac{dV}{dx} \neq 0$

ตามความเป็นจริงแล้วจะเกิดทั้งตาม Space and Time โดย

RVF = Rapidly Varied Flow

= ความลึกของการไหลเปลี่ยนทันทีทันใดจาก section หนึ่งไปสู่อีก section หนึ่ง

GVF = Gradually Varied Flow

= ความลึกของการไหลที่ค่อย ๆ เปลี่ยนจาก section หนึ่งไปสู่อีก section หนึ่ง

Steady Uniform Flow

Steady Non-uniform Flow



### Unsteady Uniform Flow

### Unsteady Non-uniform Flow

#### การกระจายความเร็วในทางน้ำเปิด

อัตราความเร็วของการไหลจะกระจายไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณใกล้ ๆ กับขอบทางน้ำเปิดมีความเร็วน้อยกว่าบริเวณกลางหน้าตัดที่เยื้องขึ้นไปทางผิวน้ำ เนื่องจากแรงเสียดทานของการไหลระหว่างของไหลกับเส้นขอบเปียก

### ตำแหน่งที่วัดความเร็วเฉลี่ย

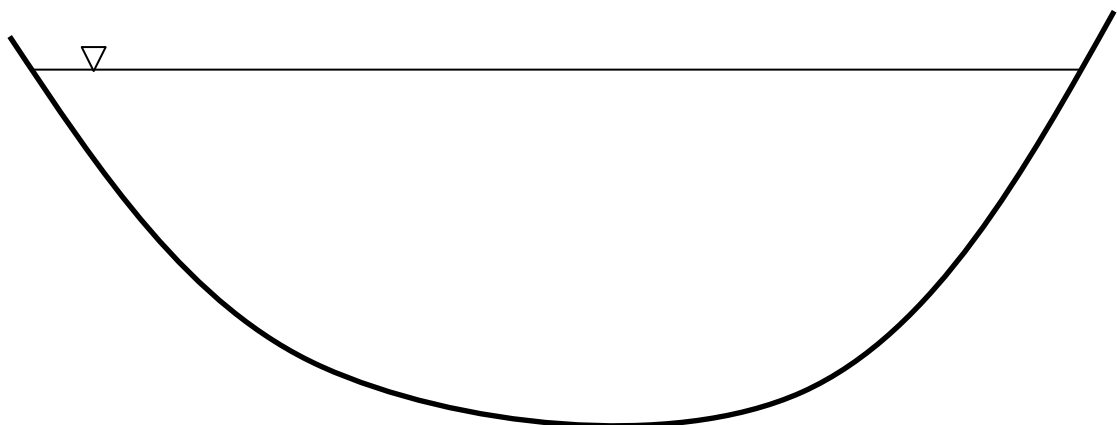
สำหรับวัด 2 จุด (น้ำลึก)

สำหรับวัด 1 จุด (น้ำตื้น)

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการแผ่กระจายความเร็ว ทำให้ velocity head ในสมการพลังงานที่ถูกต้อง คือ  $\frac{\alpha V^2}{2g}$  เมื่อ  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์ของ velocity head (Kinetic energy correction)

### หลักการอนุรักษ์มวลหรือสมการต่อเนื่อง (Principles of Mass or Continuous Equation)

การวัดความเร็วของการไหลบนหน้าตัดการไหล



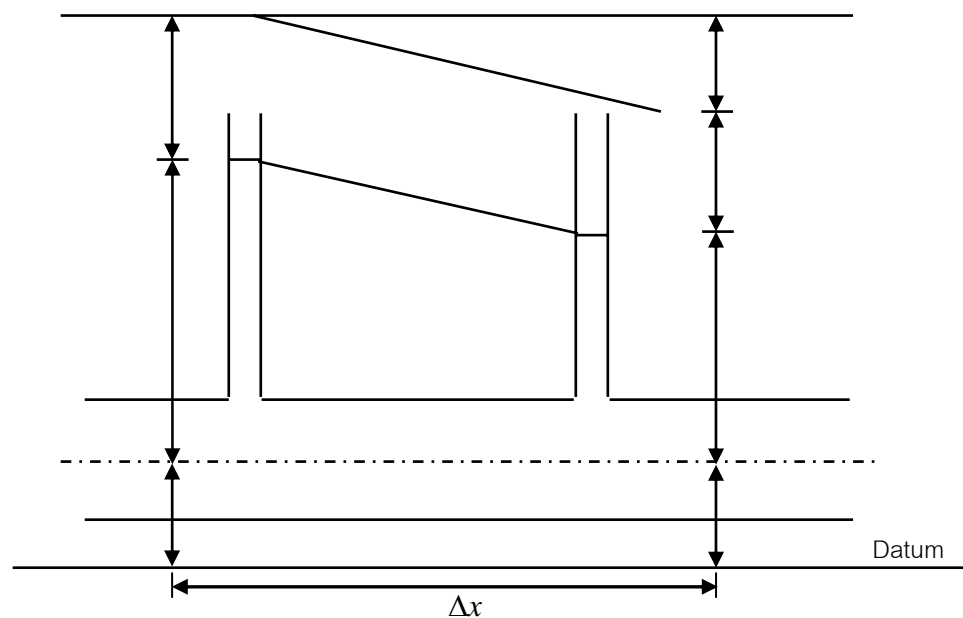
$V_i$  = mean of velocity at 0.2 and 0.8 depth

เมื่อ  $V_m$  = ความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดการไหล

เพราะฉะนั้น

จะได้

### สมการพลังงานของการไหลในทางน้ำเปิด (Principle of Energy)



Energy Eq.;

เมื่อ  $z$  = ระดับท้องน้ำของทางน้ำเปิดเหนือระดับอ้างอิง (ft,m)

$y$  = ความลึกของการไหล หรือ Pressure head =  $\frac{P}{\gamma}$

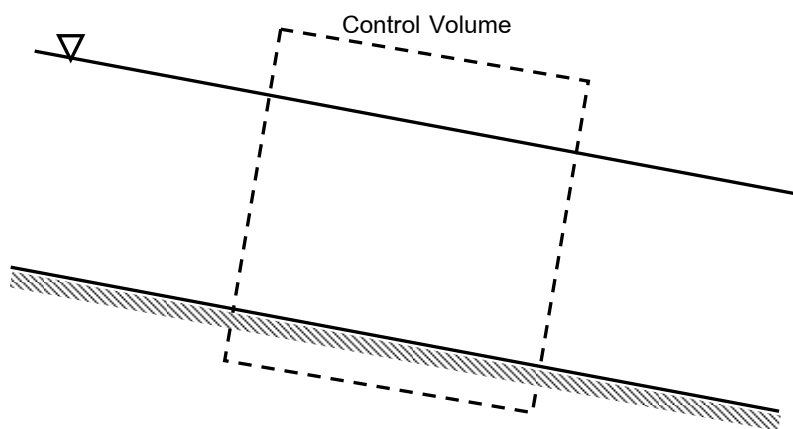
$V$  = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (ft/s, m/s)

$h_L$  = การสูญเสียพลังงาน (Head loss)

ตัวอย่าง จงคำนวณหาอัตราการไหล  $Q$  ที่ผ่านประตูน้ำ ซึ่งมีความกว้าง 5 m ความลึกด้านเหนือน้ำ และท้ายน้ำเท่ากับ 3 และ 1 m ตามลำดับ สมมติว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานเมื่อน้ำไหลผ่านประตู

## หลักการโมเมนตัมการไหลในทางน้ำเปิด (Principle of Momentum)

เมื่อเป็นการไหลคงที่และมีอัตราการไหล  $Q$  ไหลด้วยความเร็ว  $V$  ผ่านหน้าตัดการไหล



$$\text{จาก } \sum F = ma = m \frac{dV}{dt} = \frac{mV_2 - mV_1}{\Delta t}$$

สมการทั่วไปของโมเมนตัม คือ

เนื่องจาก การกระจายความเร็วไม่สม่ำเสมอ  
เมื่อ  $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์โมเมนตัม

ความดัน (Pressure:  $P$ )

$$P = \frac{F}{A}$$

จากรูปข้างบน

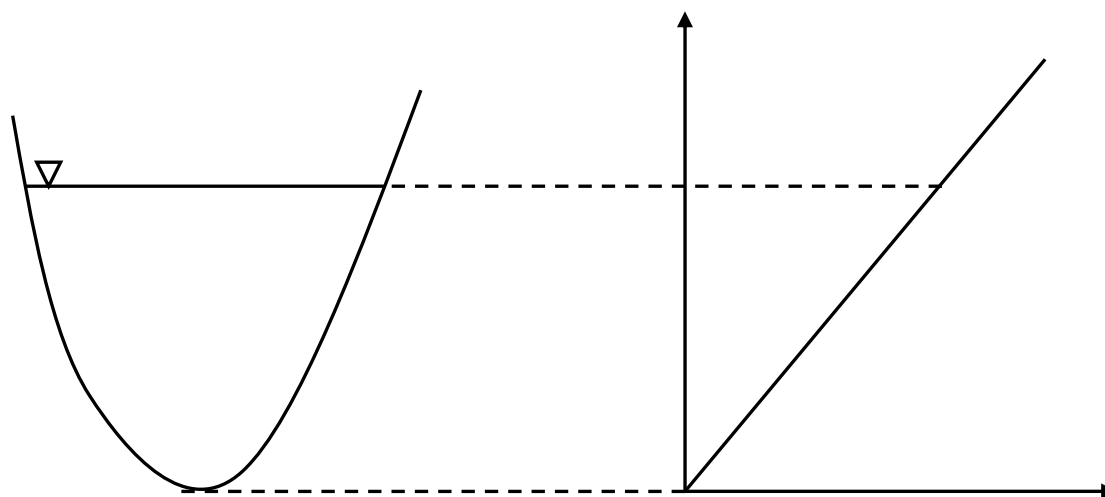
**ตัวอย่าง** จากตัวอย่างที่ผ่านมา จงคำนวณหาแรงที่กระทำต่อบานประตู

## พลังงานจำเพาะ (Specific Energy)

จาก Total Head:  $E = Z + y + \frac{\alpha V^2}{2g}$

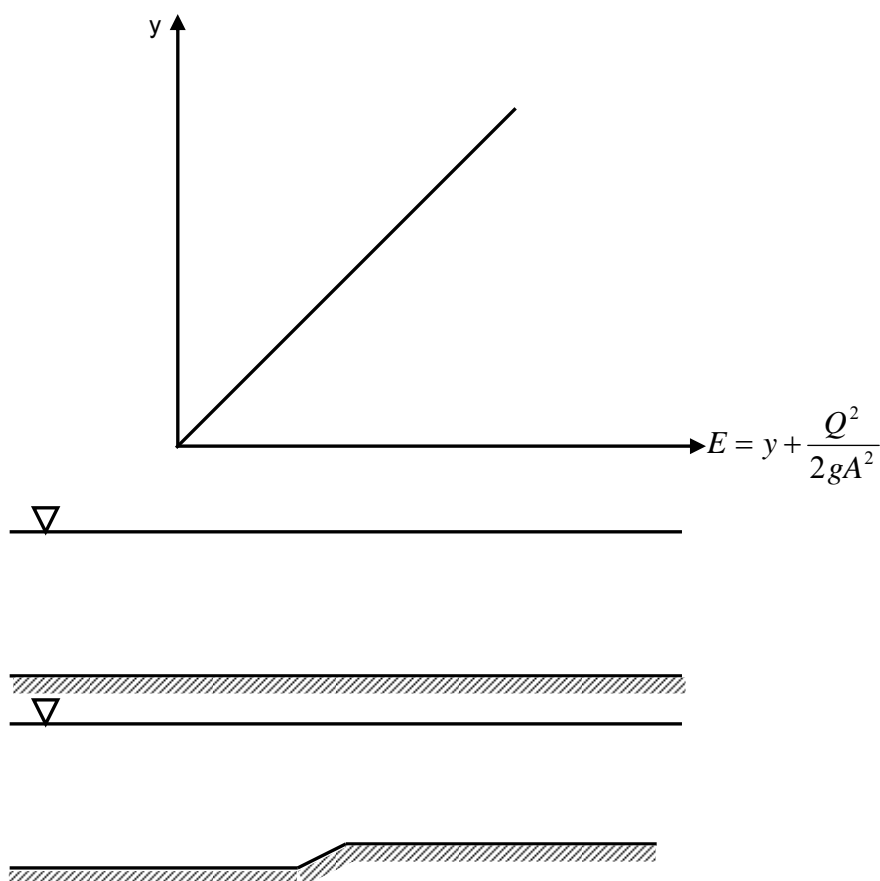
สำหรับ Open Chanel  $E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}$  เมื่อ  $Z = 0$

จากสมการข้างต้น เมื่อสมมุติ  $y$  หลายค่า จะได้  $E$  หลายค่า ซึ่งถ้า  $Q$  คงที่  $E \propto y, A$  ดังกราฟพลังงานจำเพาะ



$y_c$  = Critical depth

ถ้า  $Q$  เปลี่ยนไป จะหาค่า  $E$  ได้ ถ้า plot กราฟจะได้



สรุป

1. เมื่อ  $Q = 0$ ,  $E=y$  เส้นกราฟเป็นเส้นตรงทำมุม  $45^\circ$
2. เมื่อ  $Q > 0$ ,  $E$  จะได้ค่าความลึก 2 ค่า (Alternate depth)

ค่ามาก หรือ  $y_1$  เรียกว่า High stage

ค่าน้อย หรือ  $y_2$  เรียกว่า Low stage

3. ที่ Critical flow จะมี Critical depth ( $y_c$ ), Critical velocity ( $V_c$ ), Critical discharge ( $Q_c$ ), และ Critical slope ( $S_c$ ),

4. ที่ Critical flow;  $F_r = 1.0$

5. เมื่อ  $y = y_1 > y_c$  เรียกว่า Subcritical flow  $F_r < 1.0$

$y = y_2 < y_c$  เรียกว่า Supercritical flow  $F_r > 1.0$

6. สมการที่ใช้หาค่า  $y_c$  สำหรับทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; \quad q = \frac{Q}{b} = \text{อัตราการไหลต่อ 1 หน่วยความกว้าง}$$

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

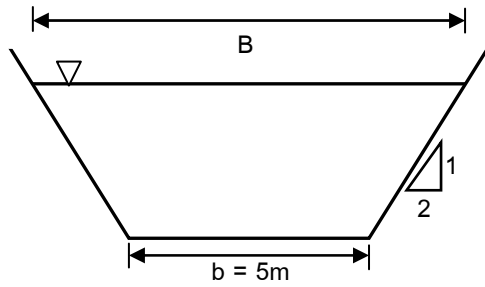
$$E_c = y_c + \frac{V_c^2}{2g} = y_c + \frac{y_c}{2} = \frac{3}{2}y_c$$



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

- ก) ความลึกวิกฤตที่พลังงานจำเพาะนี้
- ข) ความลึกวิกฤตที่อัตราการไหล
- ค) ชนิดของการไหลและค่า Alternate depth

ตัวอย่าง เมื่อ  $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  จงหา  $y_c$

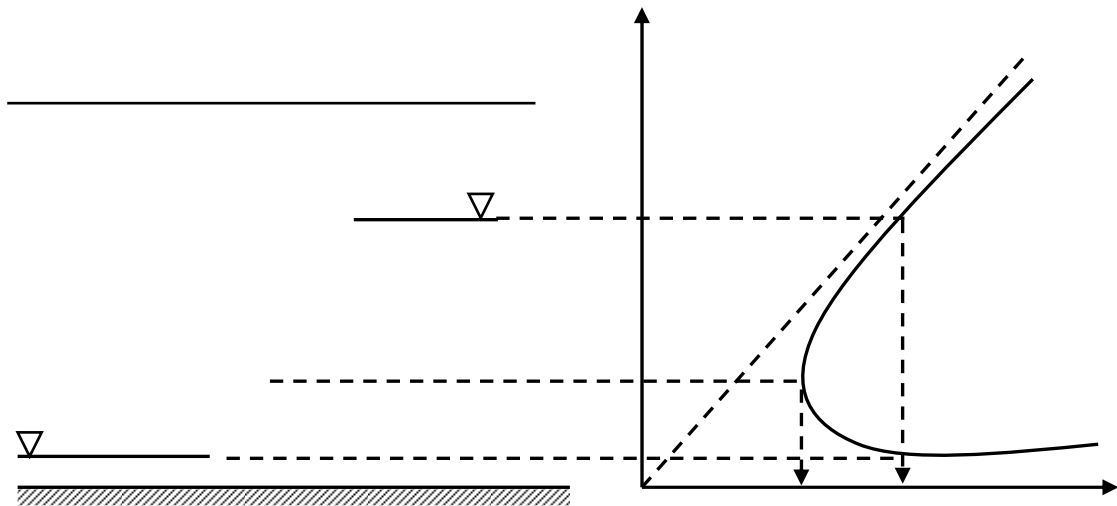


**ตัวอย่าง** ทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 12 ft มีน้ำไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 300 cfs โดยที่ทางด้านเหนือน้ำมีความลึก 4 ft และท้ายน้ำมีระดับท้องน้ำสูงขึ้น 0.5 ft จงหาความลึกทางด้านท้ายน้ำ

## Hydraulic Jump

เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของน้ำ มักจะเกิดขึ้นบริเวณท้ายฝายน้ำล้น ท่อลอด และประตูน้ำแบบไหลลอดทั้งประตูบานตรงและประตูบานโค้ง

มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลจาก Supercritical flow เป็น Critical flow เป็น Subcritical flow



ความลึกของการไหลจะมากขึ้น แต่ความเร็วของกระแสจะลดลง



สมการโมเมนตัม:  $F_1 - F_2 - F_f = \rho Q(V_2 - V_1)$

$F_f = 0$  คือ แรงเสียดทาน (ระยะทางในการเกิด Hydraulic jump ไม่มากจึงให้เป็นศูนย์)

สมการต่อเนื่อง:

ถ้าทราบ  $y_1$ ,  $V_1$  หา  $y_2$  ได้

ถ้าทราบ  $y_2$ ,  $V_2$  หา  $y_1$  ได้

Head Loss;

Momentum Eq. + Continous Eq.;

Hydraulic jump มีความสำคัญต่อ open Chanel ดังนี้

1. ทำให้การไหลมีการสูญเสียพลังงาน เช่น การไหลออกจากเขื่อน ฝายน้ำล้น เป็นต้น
2. ยกกระต๊บน้ำให้สูงขึ้น สำหรับจ่ายน้ำให้คลองส่งน้ำ
3. เพื่ออัตราการไหลลดประตุน้ำ โดย Hydraulic jump จะรักษาระดับน้ำเดิมหลังประตุน้ำให้ต่ำ โดยไม่เกิดการไหลจมน้ำลอดประตุน้ำ (Submerged Flow)
4. ลดแรงดันจากน้ำใต้ดิน (Uplift pressure) ที่ตันท่ออาคารชลศาสตร์ โดยการทำให้ระดับน้ำบนอาคารสูงขึ้น
5. ช่วยในการผสมสารเคมี สำหรับบำบัดน้ำเสีย
6. ช่วยให้น้ำสัมผัสอากาศมากขึ้นและใช้ในขบวนการเติมคลอรีนในการฆ่าเชื้อ
7. ช่วยขจัดฟองอากาศจากการไหลในทางน้ำเปิดรูปวงกลม
8. Hydraulic jump เกิดขึ้นที่ใด จะทำให้ระบุคุณสมบัติพิเศษของการไหลได้ เช่น การไหลเหนือหรือใต้วิกฤต ตำแหน่งหน้าตัดควบคุม เป็นต้น

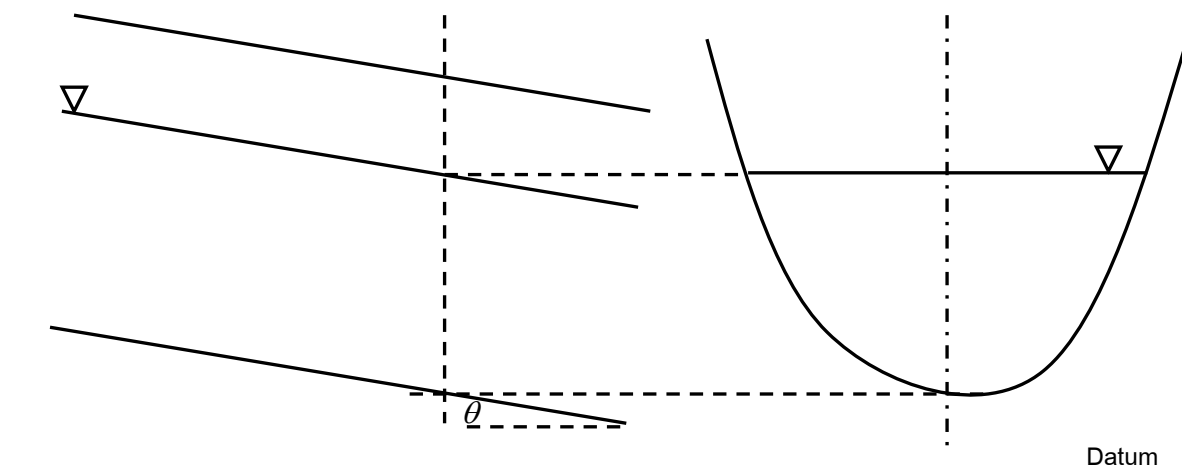
**ตัวอย่าง** แอ่งน้ำนิ่งหน้าตึกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นเรียบแห่งหนึ่ง มีความกว้าง 4 m อัตราการไหล 7.5 m<sup>3</sup>/s ความลึกก่อนเกิด Hydraulic jump คือ 0.20 m จงหา ความลึกหลังเกิด Hydraulic jump, Froude number ก่อนและหลังเกิด Hydraulic jump และ Head Loss จาก Hydraulic jump

## 430 451 Hydraulic Engineering

### การไหลสม่ำเสมอ

#### Uniform Flow

การไหลสม่ำเสมอ (Uniform Flow) หรือการไหลปกติ (Normal flow) คือการไหลในทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดแนวการไหล โดยมีความลึกเท่ากันในช่วงการไหลที่พิจารณา



Uniform Flow Eq.:

Chezy Eq.:

เมื่อ  $V$  = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล,  $C$  = สัมประสิทธิ์ของ Chezy,  $R$  = รัศมีชลศาสตร์,  $S$  = Slope

Manning Eq.: ระบบ SI:

ระบบอังกฤษ:

เมื่อ  $n$  = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

Problems of uniform flow computation

- มักใช้ Continuity Eq. และ Manning Eq.
- ตัวแปรที่ต้องการหาค่า คือ

Normal depth ( $y_n$ : ความลึกปกติ)

คือ ความลึกของน้ำที่ทำการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด

ตัวอย่าง ทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มี  $b = 20$  ft,  $z = 2$ ,  $S_o = 0.0016$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q = 400$  cfs  
จงหา  $y_n$





## การออกแบบหน้าตัดคลองสำหรับการไหลสม่ำเสมอ

ตัวแปรที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบ

1. ชนิดของวัสดุที่ลาดผิว เช่น คอนกรีต หรือดินเหนียว ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ( $n$ ) ตลอดจนความเร็วการไหลสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการกัดเซาะ
2. ความลาดด้านข้างขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ
3. ความเร็วต่ำสุด เพื่อไม่ให้เกิดการตกตะกอนและมีพืชน้ำเจริญเติบโต
  - ความเร็วเฉลี่ย 2- 3 ft/s สำหรับน้ำไหลที่ค่อนข้างใสไม่ค่อยมีตะกอน
  - ความเร็วเฉลี่ย  $\geq 2.5$  ft/s เพื่อป้องกันพืชน้ำเจริญเติบโต
  - ความเร็ว  $0.63y^{0.64}$  สำหรับดินทราย ดินเหนียวผสมดินร่วน
  - ความเร็วที่ให้ค่า  $F_r > 0.12$  จะไม่ทำให้เกิดการตกตะกอน
4. ความลาดท้องน้ำ จะขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ ตลอดจนความเร็วสูงสุด/ต่ำสุด ที่ยอมได้ ขึ้นอยู่กับวัสดุลาดผิวและคุณลักษณะของน้ำที่ต้องการให้เป็นไป เช่น ยอมให้มีตะกอนหรือไม่ มี เป็นต้น
5. อัตราการไหลสำหรับออกแบบส่วนมากจะกำหนดที่  $Q_{\max}$
6. ความสูงพ้นน้ำ (freeboard) ซึ่งหมายถึงระยะจากผิวน้ำอิสระที่  $Q_{\max}$  ถึงบนตลิ่งของทางน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นตลิ่งจะอยู่ระหว่าง 5-30 % ของความลึกการไหล  $y_n$

## หน้าตัดที่ดีที่สุดและหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุด (The best hydraulic section and the most efficient cross section)

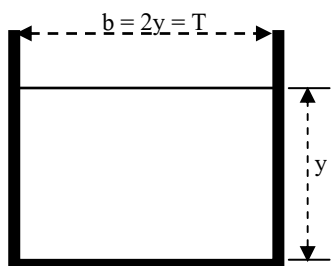
หน้าตัดที่ดีที่สุด คือ หน้าตัดที่มีประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์มากที่สุด ทั้งนี้หากพิจารณาจากสมการของ Manning คือ  $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$  เมื่อกำหนดให้  $A$ ,  $S$  และ  $n$  คงที่ พบว่า อัตราการไหล  $Q$  จะมากที่สุดเมื่อ  $R$  มีค่ามากที่สุด หรือโดยนัยคือ  $P$  จะมีค่าน้อยที่สุด เหตุผลคือ เมื่อเกิดความเสียดทานที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุดจะทำให้เกิดการไหลที่สะดวกที่สุด และประหยัดงบประมาณในการลาดผิวคลองด้วย

หน้าตัดคลองรูปครึ่งวงกลมจะมีประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์ที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับหน้าตัดรูปอื่นๆ แต่หน้าตัดที่ดีที่สุดในทางชลศาสตร์ มิใช่หน้าตัดที่ดีที่สุดในทางปฏิบัติเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยุ่งยากในการก่อสร้าง และวัสดุที่ใช้ลาด เพราะอัตราการไหลที่มากที่สุดก็คือ ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติจะต้องมีการดัดแปลงเพื่อให้เหมาะสมกับเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น คลองที่ไม่ได้ลาดผิว (Lining) ความเร็วของน้ำจะถูกจำกัดด้วยชนิดของวัสดุที่เป็นทางน้ำ เพราะถ้าความเร็วสูงเกินไป ทางน้ำจะถูกกัดเซาะได้ แต่ถ้าเป็นทางน้ำสำเร็จรูปที่สร้างด้วยคอนกรีตก็จะใช้ออกแบบได้ผลดี

ในทางปฏิบัติแล้วหน้าตัดที่ดีที่สุดในทางชลศาสตร์บางกรณีอาจจะไม่ประหยัดที่สุด ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปริมาตรของดินขุด และดินถม ในปัจจุบันนี้นิยมที่จะออกแบบเป็นคลองลอย (ถมดินขึ้นมา

ก่อนแล้วค่อยขุดคลองที่เหลือ) เพราะการบำรุงรักษาง่ายกว่าคลองขุด (คลองถม) ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จึงควรเลือกใช้หน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดแม้จะไม่ใช่น้ำที่ดีที่สุด

### ตัวอย่างหน้าตัดที่ดีที่สุดในทางชลศาสตร์



$$A = 1.682 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/4} = 2y^2$$

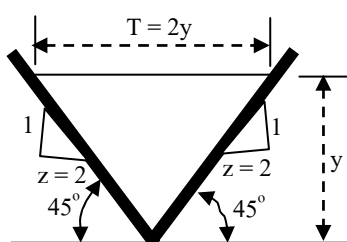
$$P = 4y$$

$$R = \frac{y}{2}$$

$$D = y$$

$$AR^{2/3} = 2y^{2.5}$$

$$y = 0.917 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/8} \quad (\text{หรือ ความลึกปกติ } y_n)$$



$$A = 1.682 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/4} = y^2$$

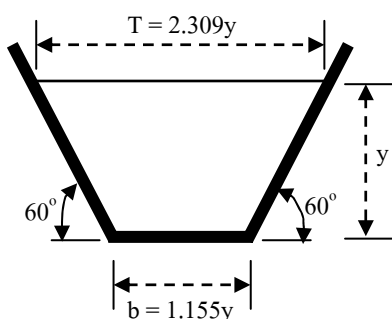
$$P = 2.83y$$

$$R = 0.354y$$

$$D = 0.5y$$

$$AR^{2/3} = 0.707y^{2.5}$$

$$y = 1.297 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/8}$$



$$A = 1.622 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/4} = 1.73y^2$$

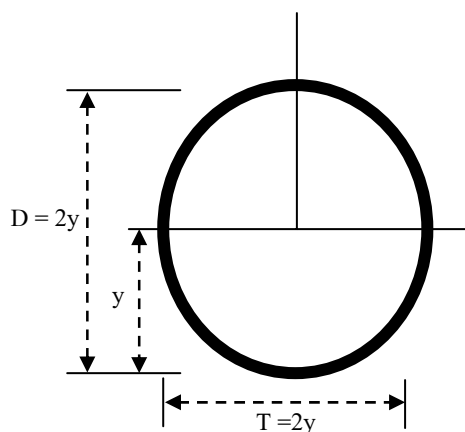
$$P = 3.46y$$

$$R = \frac{y}{2}$$

$$D = 0.75y$$

$$AR^{2/3} = 1.5y^{2.5}$$

$$y = 0.968 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/8}$$



$$A = 1.583 \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/4} = \frac{1}{2} \pi y^2$$

$$P = \pi y$$

$$R = \frac{y}{2}$$

$$D = 0.786y$$

$$AR^{2/3} = 0.785y^{2.5}$$

$$y = \left[ \frac{nQ}{S_o^{1/2}} \right]^{3/8}$$

หน้าตัดการไหลที่ดีที่สุดทางชลศาสตร์ของท่อน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เมื่อกำหนดความลาดด้านข้าง (z) ให้ต่าง ๆ กัน

z	$\frac{b}{y}$	$\frac{y}{A^{1/2}}$	$\frac{b}{A^{1/2}}$	$\frac{T}{A^{1/2}}$	$\frac{S_o}{A^{1/2}}$	$\frac{P}{A^{1/2}}$	$\frac{R}{A^{1/2}}$
0.00	2.0000	0.7071	1.4142	1.4142	0.7071	2.8284	0.3536
0.50	1.2361	0.7590	0.9382	1.6972	0.8486	2.6352	0.3795
0.58	1.1521	0.7598	0.8574	1.7567	0.8784	2.6321	0.3799
1.00	0.8284	0.7158	0.6127	2.0919	1.0460	2.7044	0.3698
1.25	0.7016	0.7158	0.5022	2.2917	1.1459	2.7939	0.3579
1.50	0.6056	0.6891	0.4173	2.4846	1.2423	2.9021	0.3446
1.75	0.5309	0.6621	0.3515	2.6689	1.3345	3.0206	0.3311
2.00	0.4721	0.6361	0.3003	2.8444	1.4222	3.1446	0.3180
2.50	0.3852	0.5887	0.2268	3.1702	1.5851	3.3971	0.2944
3.00	0.3246	0.5485	0.1780	3.4690	1.7345	3.6467	0.2742
4.00	0.2462	0.4853	0.1195	4.0019	2.0010	4.1213	0.2426
5.00	0.1979	0.4386	0.0868	4.4728	2.2364	4.5597	0.2193
6.00	0.1654	0.4027	0.0666	4.8990	2.4495	4.9661	0.2013

**ตัวอย่าง** จงหาสัดส่วนของทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เหมาะสมที่สุดทางชลศาสตร์ โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

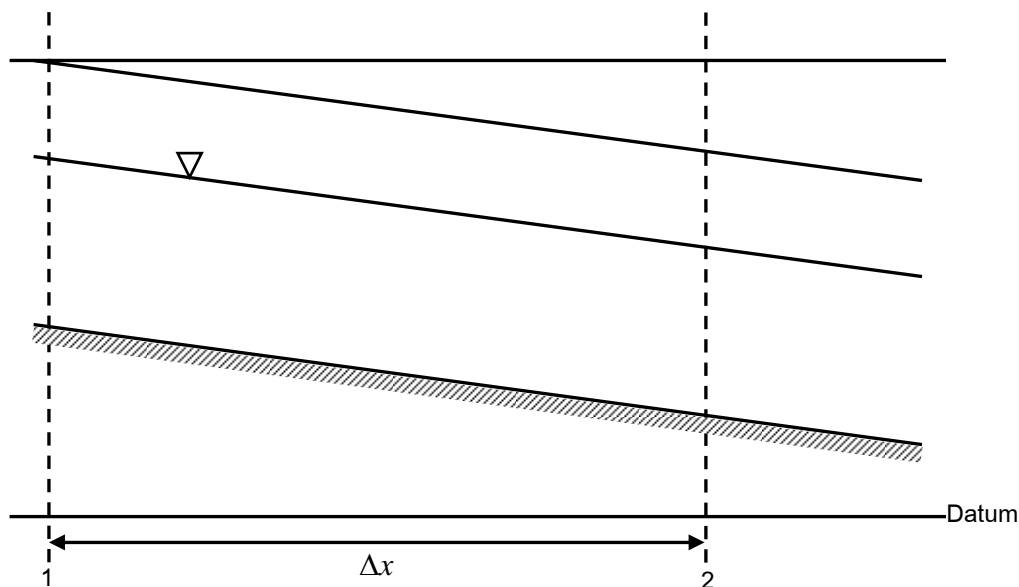
อัตราการไหล, $Q$	$= 20 \text{ m}^3/\text{s}$
ความลาดด้านข้าง	$= 1:1.5$
ความลาดท้องน้ำ, $S_o$	$= 0.5 \text{ m/Km}$
สัมประสิทธิ์ความขรุขระ, $n$	$= 0.025$

**ตัวอย่าง** ทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมูมีอัตราการไหล  $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$  ให้หาขนาดของทางน้ำที่มีค่าทางชลศาสตร์สูงสุดและกำหนดค่าความลาดด้วย เมื่อกำหนดความเร็วในทางน้ำเท่ากับ  $0.80 \text{ m/s}$  เพื่อป้องกันการตกละลอก,  $n = 0.025$ ,  $b = 0.98 \text{ m}$ ,  $z = 2$  และ  $y = 2.07 \text{ m}$

## 430 451 Hydraulic Engineering

### การไหลแบบเปลี่ยนแปลงในทางน้ำเปิด

#### Equation of Gradually Varied Flow



จาก

เมื่อกำหนดให้  $\alpha = 1$

หาอนุพันธ์ของสมการดังกล่าวเทียบกับระยะทาง  $x$

เมื่อ  $\frac{dH}{dx}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานทั้งหมดเทียบกับระยะทางหรือความลาด  
 ชั้นการสูญเสียพลังงาน (Friction slope)

$$\frac{dH}{dx} = -S_f$$

$\frac{dz}{dx}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับทางน้ำเปิดเทียบกับระยะทางหรือความลาด  
 ชั้นท้องน้ำ (Bottom slope)

$$\frac{dz}{dx} = -S_o$$

สำหรับอัตราการไหล  $Q$  เขียนเทอม  $\frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right)$  ใหม่ได้ดังนี้

จะได้

สำหรับ Uniform flow กำหนดให้  $S_f = 0$  แต่สำหรับการคำนวณหาความลึกการไหล เปลี่ยนไปตามระยะทาง กำหนดให้  $S_f \neq 0$  และมีเงื่อนไขตามข้อกำหนด ดังนี้

1. การสูญเสียพลังงาน คำนวณได้จากการสูญเสียพลังงานเช่นเดียวกับการไหลสม่ำเสมอ

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (\text{สำหรับ Manning Eq.})$$

2. ความลาดชันของทางน้ำเปิดมีค่าน้อย ดังนั้น ความลึกการไหล  $y$  ประมาณเท่ากับ ความลึกในการไหลของหน้าตัด (d) นั่นคือ  $y \cong d$

3. การไหลไม่มีส่วนผสมของน้ำและอากาศ

4. การกระจายความเร็วในหน้าตัดการไหลคงที่ ดังนั้น สัมประสิทธิ์พลังงาน ( $\alpha$ ) คงที่ด้วย

5. สัมประสิทธิ์เสียดทานการไหลไม่ขึ้นอยู่กับความลึกการไหลและมีค่าคงที่ ตลอดช่วงลำน้ำที่พิจารณา



## Classification of Water Surface Profile

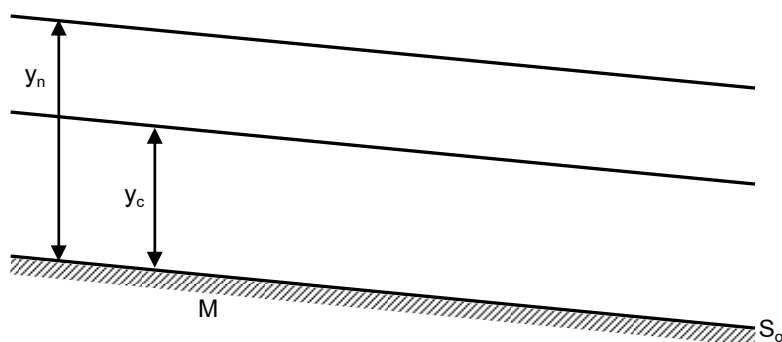
การแบ่งประเภทเส้นระดับน้ำและในการกำหนดชื่อเส้นระดับน้ำ จำเป็นต้องแบ่งประเภทความลาดชันท้องน้ำ ตามข้อกำหนดดังนี้

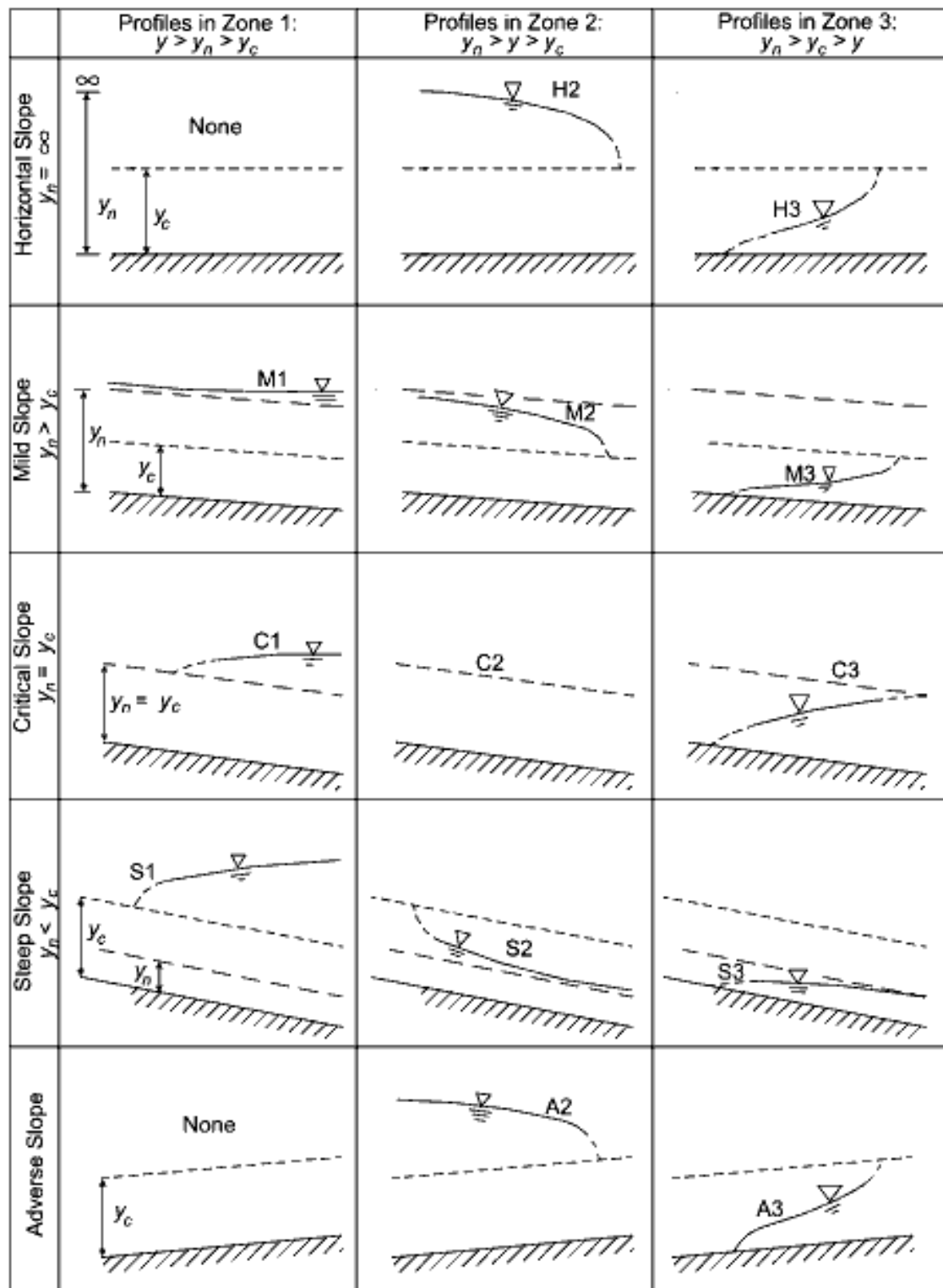
1. ทางน้ำความลาดชันมาก (Steep slope, S)
2. ทางน้ำความลาดชันวิกฤต (Critical slope, C)
3. ทางน้ำความลาดชันน้อย (Mild slope, M)
4. ทางน้ำความลาดชันในแนวราบ (Horizontal slope, H)
5. ทางน้ำความลาดชันสูงขึ้น (Adverse slope, A)

สำหรับรูปตัดของทางน้ำเปิด อัตราการไหลและความลาดชันท้องน้ำที่กำหนดให้ สามารถคำนวณหาความลึกปกติและความลึกวิกฤตได้ ความลึกการไหลทั้งสองชนิดนี้แบ่งช่องทางน้ำเป็น 3 zones คือ

- Zone I: ช่วงเหนือเส้นสูงสุด  
 Zone II: ช่วงระหว่างเส้นสองเส้น  
 Zone III: ช่วงใต้เส้นต่ำสุด

เช่น สำหรับ Mild slope; M





ภาพที่ 1 Examples of flow profiles.

(ที่มา: [www.haestad.com/library/books/fmras/floodplai...](http://www.haestad.com/library/books/fmras/floodplai...))

ตารางที่ 1 Water Surface Profiles

Slope Type	Surface Type	Flow Depth	Flow Type
Mild (M) ( $0 < S < S_c$ )	M1	$y > y_o > y_c$	Subcritical ( $Fr < 1$ )
	M2	$y_o > y > y_c$	Subcritical ( $Fr < 1$ )
	M3	$y_o > y_c > y$	Supercritical ( $Fr > 1$ )
Steep (S) ( $S > S_c > 0$ )	S1	$y > y_c > y_o$	Subcritical ( $Fr < 1$ )
	S2	$y_c > y > y_o$	Supercritical ( $Fr > 1$ )
	S3	$y_c > y_o > y$	Supercritical ( $Fr > 1$ )
Critical (C) ( $S = S_c = S_o$ )	C1	$y > y_o = y_c$	Subcritical ( $Fr < 1$ )
	C3	$y_c = y_o > y$	Supercritical ( $Fr > 1$ )
Horizontal (H) ( $S = 0$ )	H2	$y > y_c$	Subcritical ( $Fr < 1$ )
	H3	$y_c > y$	Supercritical ( $Fr > 1$ )
Adverse (A) ( $S < 0$ )	A2	$y > y_c$	Subcritical ( $Fr < 1$ )
	A3	$y_c > y$	Supercritical ( $Fr > 1$ )

$$\text{จาก } \frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_r^2}$$

สำหรับ M3 Profile ( $y < y_n$ ;  $y < y_c$ )

เป็น Supercritical flow และมี  $F_r > 1$  และ  $S_f > S_o$  เนื่องจาก  $V > V_n$  (Normal velocity)

จากสมการข้างต้น  $\frac{dy}{dx}$  จะเป็น positive นั่นคือ ความลึกการไหลเพิ่มขึ้นตามทิศทางการไหล

สำหรับ Critical flow;  $1 - F_r^2 = 0$  ดังนั้น  $\frac{dy}{dx} \Rightarrow \alpha$  ซึ่งจริง ๆ แล้วจะเกิด

Hydraulic jump นั้นเอง

สำหรับความลึกของน้ำมาก ๆ ๆ ๆ ค่า velocity  $\Rightarrow 0$  ทำให้  $F_r \Rightarrow 0$  และ  $S_f \Rightarrow 0$  จะได้

ว่า  $\frac{dy}{dx} \cong S_o$  นั่นคือ การเพิ่มขึ้นของความลึกการไหลจะเท่ากับ  $S_o$  ซึ่งจะทำให้เส้นระดับผิวน้ำ/ผิว

การไหล (Water surface) เป็น Horizontal

ประเภทเส้นระดับน้ำบนความลาดชันต่าง ๆ ในแต่ละ zone สามารถที่จะแยกประเภทได้โดยใช้สมการต่อไปนี้ประกอบการพิจารณา

จากนิยาม  $S_f = S_o$  เมื่อ  $y = y_n$  และ  $F_r = 1$  เมื่อ  $y = y_c$  จะได้ว่า

การเกิดการไหลวิกฤต

$$\text{จาก } \frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_r^2}$$

พิจารณากรณี  $S_o = S_f$  ซึ่งหมายถึง  $\frac{dy}{dx} = 0$  หรือ  $F_r = 1$

จากภาพที่ 1 การวิเคราะห์เส้นระดับน้ำในแต่ละโซน สำหรับความลาดชันน้อย (M) ได้ดังนี้

**Zone I:**  $y > y_n > y_c$  จะได้  $S_o > S_f$ ,  $F_r < 1$  ดังนั้น  $\frac{dy}{dx}$  เป็นบวก คือ ความลึกการ

ไหลเพิ่มขึ้นตามระยะทาง

ในช่วงเหนือน้ำ (Upstream) เมื่อ

ในช่วงท้ายน้ำ (Downstream) เมื่อ

จาก

จะทำให้  $F_r$  น้อยมาก ๆ คือ  $F_r \Rightarrow 0$

จะทำให้  $S_f$  น้อยมาก ๆ คือ  $S_f \Rightarrow 0$

อัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกการไหลตามทิศ  
ทางการไหลมีค่าเท่ากับ  $S_o$  หรือ M1

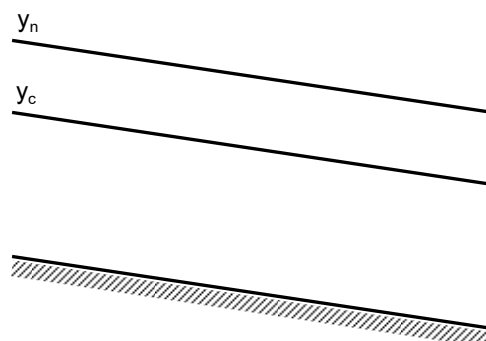
**Zone II:**  $y_n > y > y_c$

ในช่วงเหนือน้ำ (Upstream) เมื่อ

ในช่วงท้ายน้ำ (Downstream) เมื่อ

ดังนั้น  $\frac{dy}{dx} = 0$  ซึ่งกำหนดค่าไม่ได้ทางคณิตศาสตร์ ในทางกายภาพเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น คือ

น้ำตกอิสระ (Free overfall) หรือ M2



**Zone III:**  $y_n > y_c > y$   
 ในช่วงเหนือน้ำ (Upstream) เมื่อ

ในช่วงท้ายน้ำ (Downstream) เมื่อ

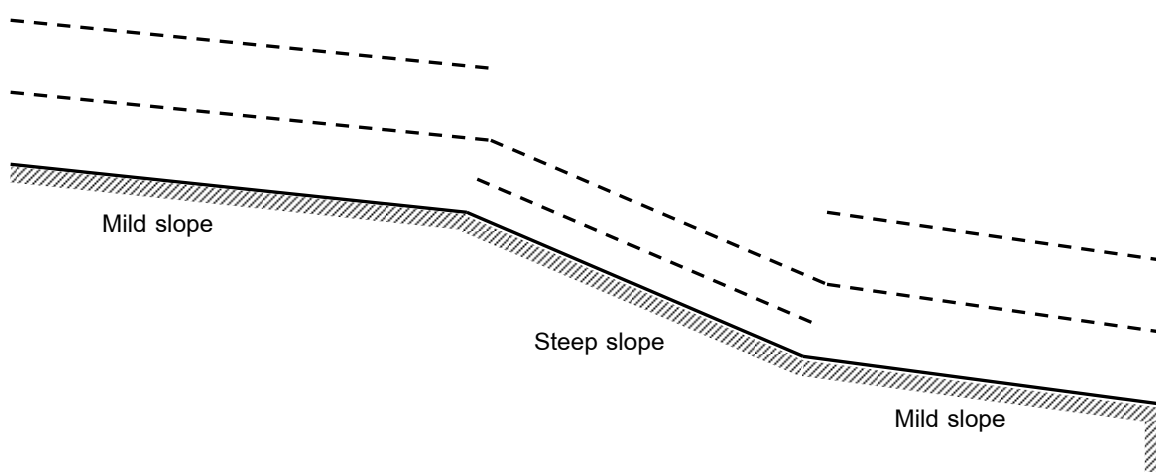
ดังนั้น  $\frac{dy}{dx} \Rightarrow \alpha$  ในความเป็นจริงจะไม่เกิดขึ้น การที่  $\frac{dy}{dx}$  มีค่ามาก ทำให้ Streamline มีความโค้งมาก ดัง M3

### การประกอบกันของเส้นระดับน้ำ (Compound Flow Profiles)

การเขียนเส้นระดับน้ำในทางน้ำเปิดที่ประกอบด้วยความลาดชันหลายชนิดมีหลักเกณฑ์ในการเขียน ดังต่อไปนี้

1. วาดความลาดชันท้องน้ำทั้งหมด โดยให้มาตรฐานในแนวตั้งมากกว่ามาตรฐานในแนวนอน
2. จากรูปตัดทางน้ำเปิด อัตราการไหล ความลาดชันท้องน้ำ ความเสียดทาน ที่กำหนดให้ คำนวณหาความลึกวิกฤต ความลึกปกติ ในแต่ละช่วงลำน้ำ
3. ลากเส้นความลึกวิกฤตในช่วงลำน้ำที่พิจารณา และลากเส้นความลึกปกติในแต่ละช่วงความลาดชัน
4. กำหนดหน้าตัดควบคุมในช่วงลำน้ำที่พิจารณา
5. เริ่มต้นจากหน้าตัดควบคุมในแต่ละหน้าตัด วาดเส้นระดับน้ำออกไปทางเหนือน้ำและท้ายน้ำตามชนิดความลาดชัน
6. เมื่อการไหลเปลี่ยนจากการไหลเหนือวิกฤตต้นน้ำเป็นการไหลใต้วิกฤตท้ายน้ำจะเกิดปรากฏการณ์น้ำกระโดดขึ้น

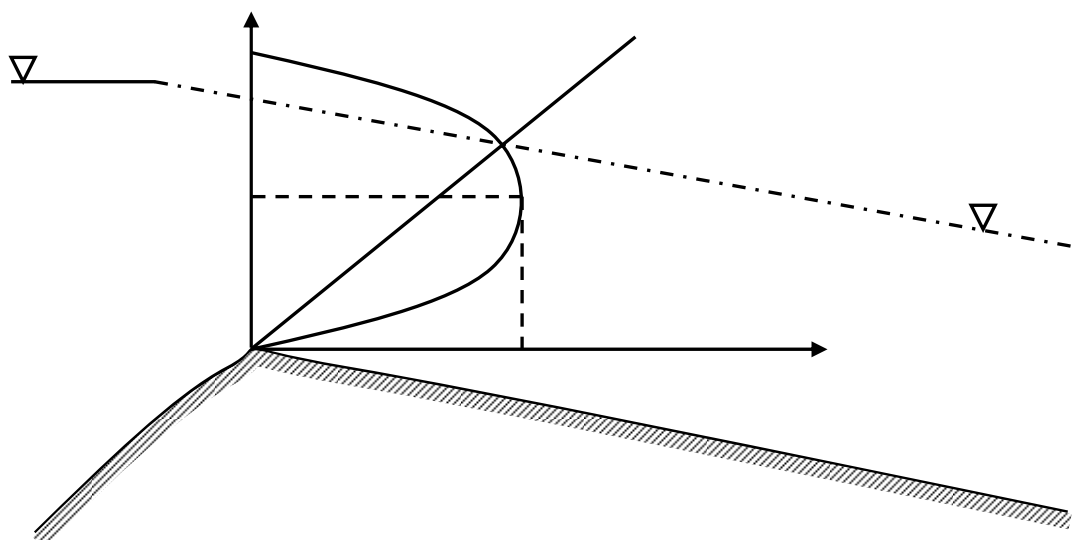
#### ตัวอย่างการวาดเส้นระดับน้ำ



1. วาดเส้นความลาดชันท้องน้ำซึ่งประกอบด้วยความลาดชันชนิด M, S และ M ตามลำดับจากเหนือน้ำไปท้ายน้ำ
2. คำนวณความลึกวิกฤติ จะเห็นว่าความลึกวิกฤติที่คำนวณได้มีค่าเท่ากันทุกช่วงความลาดชันและคำนวณความลึกปกติในแต่ละช่วงความลาดชัน
3. ลากเส้นความลึกวิกฤติตามเส้นประแบบสั้นในแต่ละช่วงความลาดชัน และลากเส้นความลึกปกติตามเส้นประแบบยาวตลอดช่วงลำน้ำ
4. กำหนดหน้าตัดควบคุม U.C.1 คือการไหลสม่ำเสมอ U.C.2 คือการไหลวิกฤติ A.C คือหน้าตัดควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นมา (ประตูน้ำแบบเลื่อนขึ้นลง) และ D.C คือการไหลวิกฤติที่เกิดจากการไหลตกอิสระ
5. วาดเส้นระดับน้ำเริ่มจากหน้าตัดควบคุมแต่ละหน้าตัด ดังนี้
  - a. ที่หน้าตัด U.C.1 วาดเส้นระดับน้ำ M2 ไปทางท้ายน้ำ เพราะว่า  $y_n > y > y_c$
  - b. ที่หน้าตัด U.C.2 วาดเส้นระดับน้ำ S2 ไปทางท้ายน้ำ เพราะว่า  $y_c > y > y_n$  ความลึกการไหล  $y$  พยายามปรับเปลี่ยนไปเป็นการไหลสม่ำเสมอ
  - c. ที่หน้าตัด A.C วาดเส้นระดับน้ำไปทางต้นน้ำเป็น S1 เส้นระดับน้ำต่อกับ S2 ด้วยน้ำกระโดด การไหลออกจากประตูน้ำไปทางท้ายน้ำเป็น S3 เนื่องจากบานประตูเปิดต่ำกว่า  $y_0$  และต่อด้วย M3 บนความลาดชันชนิด M
  - d. ที่หน้าตัด D.C ความลึกการไหลเท่ากับ  $y_c$  วาดเส้นระดับน้ำไปทางต้นน้ำเป็น M2 และต่อเส้นระดับน้ำด้วยน้ำกระโดดกับ M3

### การไหลออกจากอ่างเก็บน้ำ (Discharge Problem)

การวาดเส้นระดับน้ำจะต้องทราบข้อมูลรูปตัดการไหล อัตราการไหล ความลาดชันท้องน้ำ เป็นต้น เพื่อจะคำนวณหา ความลึกวิกฤติและความลึกปกติ ปัญหาการไหลออกจากอ่างเก็บน้ำต้องการที่จะหาอัตราการไหลเมื่อทราบระดับน้ำในอ่างเหนือจุดเปลี่ยนความลาดชัน พิจารณารูป จุด O เป็นจุดต่อระหว่างอ่างเก็บน้ำและคลองส่งน้ำ ระดับน้ำเหนือจุดต่อเท่ากับ  $h$  ต้องการทราบอัตราการไหลและความลึกการไหลในคลอง ปัญหานี้แยกได้เป็น 2 กรณีคือ



1. ถ้าความลาดชันท้องคลองเป็นชนิด Steep slope จะเกิดการไหลวิกฤตระหว่างจุดต่ออ่างเก็บน้ำกับคลองส่งน้ำ

2. ถ้าความลาดชันท้องคลองเป็นชนิด Mild slope และคลองมีความยาวมาก จะเกิดการไหลสม่ำเสมอขึ้นในคลอง และความลึกการไหลปกติจะเกิดตั้งแต่จุดต่อเรื่อยไปทางท้ายน้ำ

สมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการไหล คือ

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

สมการพลังงาน 
$$h = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

ค่า Q และ y ที่หาได้จากการแก้สมการทั้งสองจะถูกตัดออก ถ้าความลาดชันท้องน้ำเป็นแบบ Mild slope ซึ่งอธิบายได้จากการพิจารณารูปประกอบ จากสมการแมนนิงโดยการกำหนดค่า y สามารถที่จะคำนวณหา Q ได้ ให้กำหนดค่า y หลาย ๆ ค่า จะคำนวณหา Q ได้หลายค่า เช่นเดียวกัน นำไปเขียนกราฟ y-Q จากสมการพลังงานกำหนดค่า y หลาย ๆ ค่า จะคำนวณหา Q ได้หลายค่าเช่นเดียวกัน นำไปเขียนกราฟ y-Q ที่ Q มากที่สุด ( $Q_{max}$ ) จะได้ความลึกการไหลวิกฤต จุดตัดของกราฟทั้งสองเส้น คือคำตอบที่ได้จากการแก้สมการทั้งสอง แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. ถ้าจุดตัดอยู่บนช่วงบนของกราฟ y-Q ที่ได้จากสมการพลังงาน (ก่อนถึงจุดเปลี่ยนโค้ง) ค่า y และ Q ที่ได้จะเป็นค่าที่ถูกต้อง เนื่องจาก y ที่ได้เป็นความลึกปกติ ซึ่งมากกว่าความลึกวิกฤต ความลาดชันท้องน้ำเป็น Mild slope

2. ถ้าจุดตัดอยู่บนช่วงล่างของกราฟ y-Q ที่ได้จากสมการพลังงาน ค่า y และ Q ที่ได้จะไม่เป็นคำตอบ เนื่องจาก y ที่ได้เป็นความลึกปกติ ซึ่งน้อยกว่าความลึกวิกฤต ความลาดชันท้องน้ำเป็น Steep slope การไหลจาก Adverse slope ไปสู่ Steep slope จะเกิดการไหลวิกฤตที่จุดต่อ ดังนั้น y ที่ได้คือความลึกวิกฤต และ Q ที่ได้คือ  $Q_{max}$



ตัวอย่าง น้ำไหลออกจากทะเลสาบเข้าสู่ทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 3.0 ม ความลาดชันท้องน้ำ 0.001  $n = 0.014$  ระดับน้ำในทะเลสาบเหนือจุดต่อระหว่างทะเลสาบและทางน้ำ 3.0 ม จงคำนวณหา อัตราการไหล

## การคำนวณเส้นระดับน้ำ (Flow Profile Computation)

การคำนวณเส้นระดับน้ำเพื่อที่จะหาความลึกการไหล  $y$  ที่ระยะทางใด ๆ ในทางน้ำเปิด วิธีคำนวณมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกันและมีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาที่ต่างกัน หัวข้อนี้จะกล่าวถึงบางวิธีที่เป็นพื้นฐาน ง่ายต่อการเข้าใจและประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

### 1. วิธีขั้นตอนโดยตรง (Step Method)

สำหรับวิธีขั้นตอนโดยตรง แบ่งได้เป็น 2 กรณีย่อย คือ

- วิธีขั้นตอนโดยตรง
- ระยะทางคำนวณจากความลึกการไหล (Distance calculated from depth)
  - ความลึกการไหลคำนวณจากระยะทาง (Depth calculated from distance)

#### 1.1 วิธีขั้นตอนโดยตรง – ระยะทางคำนวณจากความลึกการไหล

วิธีนี้เหมาะสำหรับทางน้ำคงรูปที่มีความลาดชันและความเสียดทานคงที่ การคำนวณจะต้องกำหนดความลึกการไหล  $y$  แล้วคำนวณหาระยะทาง  $\Delta X$  ดังสมการที่จะอธิบายต่อไปนี้

จากสมการ

หรือ

เขียนในรูป Finite difference

อักษรห้อยท้าย  $m$  หมายถึงค่าเฉลี่ยระหว่างสองหน้าตัดที่พิจารณา

**ตัวอย่าง** ทางน้ำสี่เหลี่ยมคางหมูกว้าง 20.0 ฟุต (6.1 ม)  $n = 0.025$   $z = 2$  และ  $S_o = 0.001$  มีอัตราการไหล 1000 ลบ.ฟ/วินาที (28.0 ลบ.ม./วินาที) ถ้าทำน้ำเป็นน้ำตกอิสระ (Free overfall) จงคำนวณหาเส้นระดับน้ำ

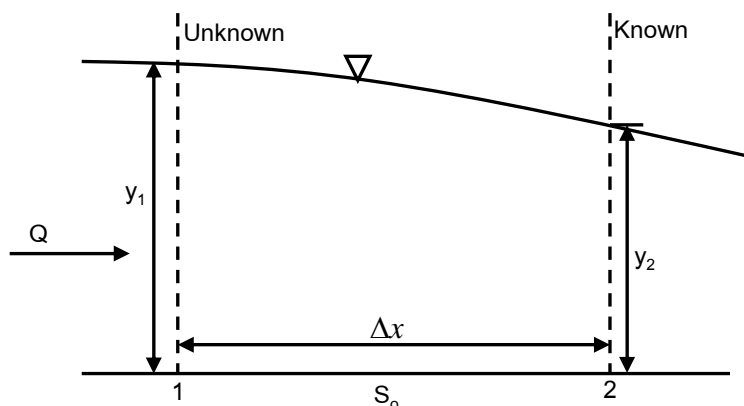






## 1.2 วิธีขั้นตอนโดยตรง – ความลึกการไหลคำนวณจากระยะทาง

การคำนวณเส้นระดับน้ำวิธีนี้จะใช้การลองผิดลองถูกหรือเขียนกราฟช่วยคำนวณก็ได้ แต่กรณีหลังจะสะดวกและง่ายกว่า การคำนวณจะกำหนดช่วงระยะทาง  $\Delta X$  แล้วคำนวณหาความลึกการไหล  $y$  พิจารณารูปประกอบการหาสมการคำนวณ กรณีการคำนวณไปทางต้นน้ำ



เมื่อ

การคำนวณการไหลแปรเปลี่ยนอย่างช้าไปทางเหนือ (จากหน้าตัด 2 ไปทางหน้าตัด 1) จะต้องทราบความลึกการไหลที่หน้าตัด 2 แล้วคำนวณหาความลึกการไหลที่หน้าตัด 1 จัดรูปสมการใหม่

กำหนดให้

ดังนั้น

จะเห็นได้ว่า  $U$  เป็นฟังก์ชันของ  $y$  และ  $\Delta X$  สมการดัง กล่าวข้างต้นใช้สำหรับการคำนวณไปทางต้นน้ำเท่านั้น ถ้าการคำนวณไปทางท้ายน้ำ จะต้องทราบความลึกการไหลที่หน้าตัด 1 แล้วคำนวณหาความลึกการไหลที่หน้าตัด 2 เมื่อจัดสมการใหม่

กำหนดให้

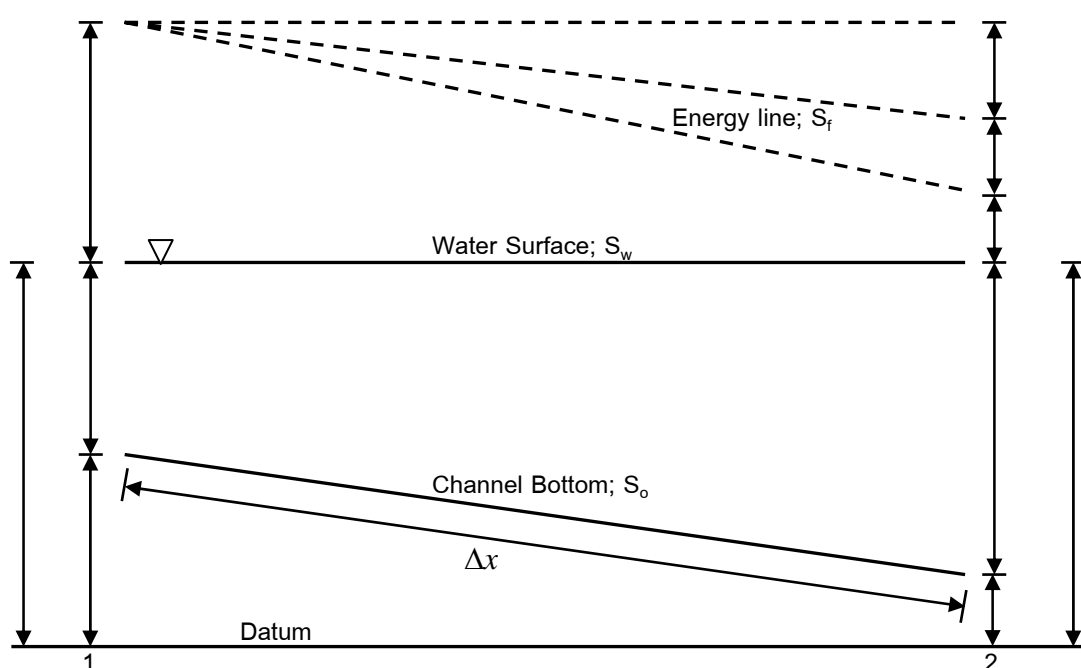
ดังนั้น

ความแตกต่างที่สำคัญของตัวแปร  $U$  และ  $V$  คือค่า  $\Delta X$  ที่เป็นค่าบวกและค่าลบ ถ้าการคำนวณไปทางเหนือ  $\Delta X$  เป็นค่าลบ ถ้าการคำนวณไปทางท้ายน้ำ  $\Delta X$  เป็นค่าบวก ถึงแม้ว่าตัวแปร  $U$  และ  $V$  จะเหมือนกัน แต่เขียนแยกสมการเพื่อความสะดวกในการคำนวณ

ตัวอย่าง ทางน้ำสี่เหลี่ยมคางหมูกว้าง 20.0 ฟุต (6.1 ม)  $n = 0.025$   $z = 2$  และ  $S_o = 0.001$  มีอัตราการไหล 1000 ลบ.ฟ/วินาที (28.0 ลบ.ม./วินาที) ถ้าท้ายน้ำเป็นน้ำตกอิสระ (Free overfall) จงคำนวณหาเส้นระดับน้ำโดยวิธีขั้นตอนโดยตรง – ความลึกการไหลคำนวณจากระยะทาง

## 2. วิธีขั้นตอนมาตรฐาน (Standard Step Method)

วิธีนี้เหมาะสำหรับคำนวณเส้นระดับน้ำในทางน้ำไม่คงรูป (Non prismatic channel) เนื่องจากรูปตัดที่ระยะทางต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน การคำนวณเส้นระดับน้ำโดยกำหนดช่วงระยะทาง (อาจจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้) ตลอดช่วงลำน้ำที่พิจารณา การหาสมการคำนวณได้โดยพิจารณารูปข้างล่างประกอบ





จากสมการ

เมื่อ  $Z_1$  และ  $Z_2$  = ระดับน้ำจากระดับอ้างอิงที่หน้าตัด 1 และ 2 ตามลำดับ

$h_e$  = การสูญเสียอลวน (Eddy loss)

$h_f$  = การสูญเสียพลังงานในช่วงลำน้ำ

$K$  = 0.5 เมื่อทางน้ำเปิดหุบเข้าหรือผายออกทันทีทันใด  
= 0 – 0.2 เมื่อทางน้ำเปิดค่อย ๆ หุบเข้าหรือผายออก

กำหนดให้

และ

ดังนั้น

การแก้สมการข้างต้น ใช้วิธีลองผิดลองถูก โดยกำหนดให้ทางน้ำเปิดเป็นทางน้ำคงรูป  
 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$  และ  $h_e = 0$

**ตัวอย่าง** ทางน้ำสี่เหลี่ยมคางหมูกว้าง 20.0 ฟุต (6.1 ม)  $n = 0.025$   $z = 2$  และ  $S_o = 0.001$  มีอัตราการไหล 1000 ลบ.ฟ/วินาที (28.0 ลบ.ม./วินาที) ถ้าทำน้ำเป็นน้ำตกอิสระ (Free overfall) จงคำนวณหาเส้นระดับน้ำโดยวิธีขั้นตอนมาตรฐาน





## การวัดการไหลในทางน้ำเปิด (Measurement of flow in open channel)

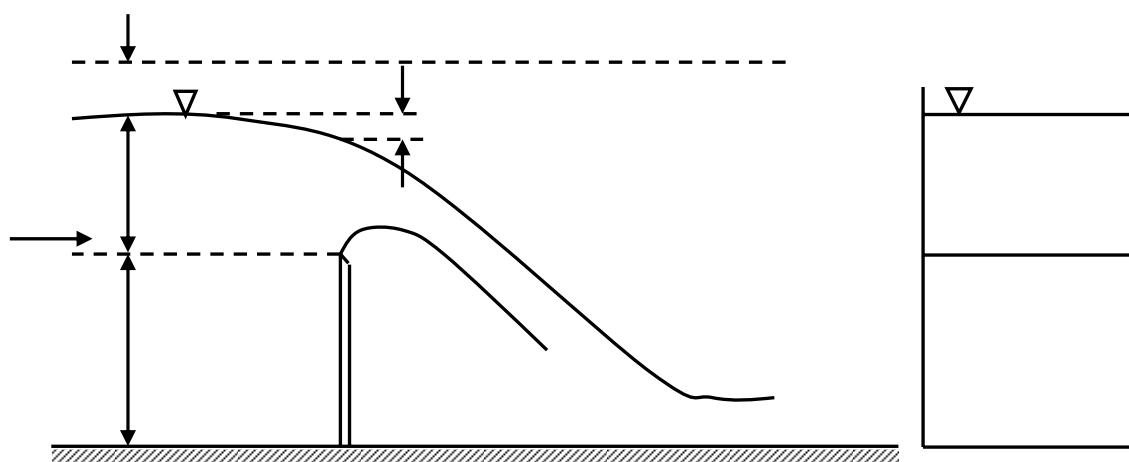
ในแม่น้ำหรือคลองธรรมชาติขนาดใหญ่ สามารถหาอัตราการไหลได้ โดยใช้เครื่องมือวัดกระแส (Current meter) พร้อมกับเครื่องมือหยั่งความลึกของน้ำจุดต่าง ๆ ซึ่งอาจจะเป็นสายเทปหรือเครื่องมือวัดความลึกด้วยระบบคลื่นเสียงสะท้อน โดยหลักการหาอัตราการไหลจะเป็นการแบ่งพื้นที่ย่อยของทางน้ำเปิดแล้วหาความเร็วเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อย จากนั้นก็จะหาอัตราการไหลในแต่ละพื้นที่ย่อย แล้วจึงรวมเป็นอัตราการไหลผ่านหน้าตัดทางน้ำที่ต้องการได้

สำหรับในทางน้ำเปิดขนาดเล็ก ก็มีวิธีการวัดอัตราการไหลได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ การก่อสร้างหรือติดตั้งฝายวัดน้ำ (Weirs) รางวัดน้ำ (Measuring flumes) และประตูน้ำแบบไหลลอด โดยมีรายละเอียดของเครื่องมือแต่ละชนิดดังนี้ไปนี้

### 1. ฝายวัดน้ำ (Weirs)

#### 1.1 ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular weir)

ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้หาอัตราการไหลผ่านฝายจะมีผิวของฝายวัดน้ำทางด้านเหนือน้ำในแนวตั้ง และวางแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลดังภาพข้างล่าง โดยจะต้องมีความดันบรรยากาศบริเวณใต้แนวน้ำล้น (Nappe) และแนวทางน้ำควรอยู่ในแนวเส้นตรง โดยไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล ซึ่งความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย  $h$  จะต้องวัดที่ระยะห่างจากสันฝายไปทางด้านเหนือน้ำยังจุดที่มีระดับผิวน้ำอยู่ในแนวราบ เพื่อหลีกเลี่ยงผลของความโค้งของผิวน้ำในบริเวณใกล้ ๆ กับฝายวัดน้ำ



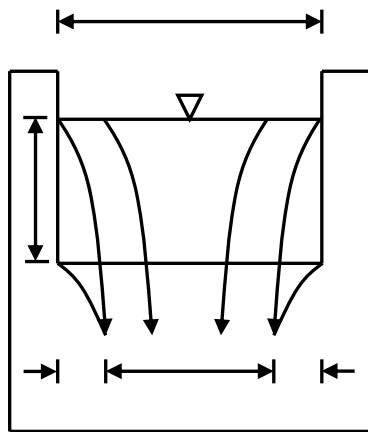
สมการมาตรฐานในการคำนวณอัตราการไหลผ่านฝายวัดน้ำรูปสี่เหลี่ยมที่ไม่มีการบีบด้านข้าง มีความสัมพันธ์กับความยาวสันฝายความลึกของการไหลเหนือสันฝาย และความเร็วในทางน้ำทางด้านเหนือฝาย ดังนี้

เมื่อ  $C_d$  = สัมประสิทธิ์อัตราการไหลขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลข้ามฝาย  
 $L$  = ความยาวสันฝาย  
 $h$  = ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย  
 $V_o$  = ความเร็วในทางน้ำเปิดทางด้านเหนือฝาย

ในกรณีที่  $P \gg h$  จะทำให้  $\frac{V_o^2}{2g} \Rightarrow 0$

ดังนั้น

สำหรับในกรณีที่ฝายวัดน้ำมีส่วนด้านข้างที่ขวางทางน้ำ



เมื่อ  $L'$  คือ ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย

และ  $n$  คือ จำนวนด้านที่เกิดการบีบตัว

(ในที่นี้มี  $n = 2$ )

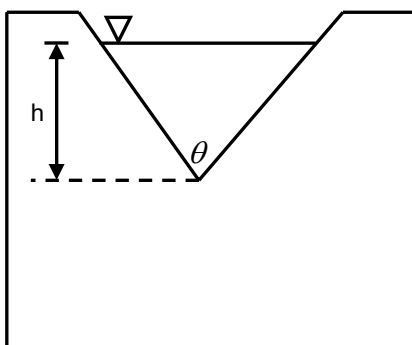
จากสมการข้างต้น จะสมมุติว่า การบีบตัวทาง

ด้านข้างแต่ละด้านเท่ากับ 10% ของความสูง

ของระดับน้ำเหนือสันฝาย หรือเท่ากับ  $0.1h$

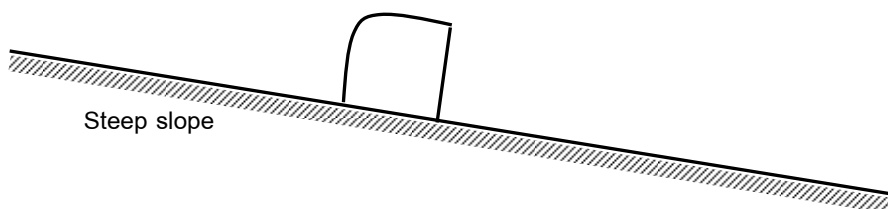
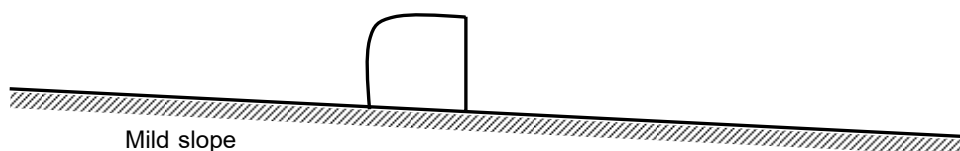
## 1.2 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม (Triangular weir)

ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมเป็นฝายสันคมที่ใช้สำหรับการไหลที่มีอัตราการไหลไม่มาก



### 1.3 ฝายสันหนา (Broad crested weir)

เนื่องจากการกีดกั้นบริเวณสันฝายสันคม หรือความเสียหายที่เกิดจากตะกอน ลอยน้ำมากระแทกหรืออุดตันสันฝาย ซึ่งมีผลจะทำให้สัมประสิทธิ์ฝายเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น จึงมีวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการสร้างฝายสันหนาวางทางน้ำแทน ซึ่งมักจะสร้างด้วยไม้หรือคอนกรีต เพราะมีความคงทนสูง สำหรับแนวการไหลของกระแสน้ำผ่านฝายสันหนามีลักษณะดังภาพข้างล่าง ซึ่งการไหลผ่านฝายสันหนาที่ตั้งขวางทางน้ำที่มีความลาดน้อย (Mild slope) และทางน้ำที่มีความลาดชัน (Steep slope)



อัตราการไหลผ่านฝายสันหนา ( $Q$ ) สามารถหาได้จาก

เมื่อ  $C_w$  = สัมประสิทธิ์ของฝายสันหนา เป็นค่าเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับรูปร่างขนาดวัสดุ และ ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย เช่น ฝายสันหนาที่มีรูปร่างและความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย ต่าง ๆ

$B$  = ความกว้างของสันฝาย

$h$  = ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย

นอกจากนี้ ถ้าหากพิจารณาการไหลผ่านฝายสันหนา ดังภาพข้างบน จะพบว่า บริเวณสันฝายมีการไหลวิกฤต (Critical flow) ซึ่งสามารถวัดความลึกวิกฤต  $y_c$  ได้ ดังนั้น ถ้าจะหา อัตราการไหลผ่านฝายสันหนา ก็สามารถใช้สมการการไหลวิกฤตได้ดังนี้

ตัวอย่าง ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแห่งหนึ่งมี  $C_w = 1.84$  และมีความสูง 1 m ถ้าวัดความสูงของ ระดับน้ำเหนือสันฝายได้ 0.5 m จงหาอัตราการไหล โดยไม่คิดผลของความเร็วด้านเหนือน้ำจะมี เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่างจากกรณีที่คำนวณโดยคิดความเร็วด้านเหนือน้ำเท่าไร



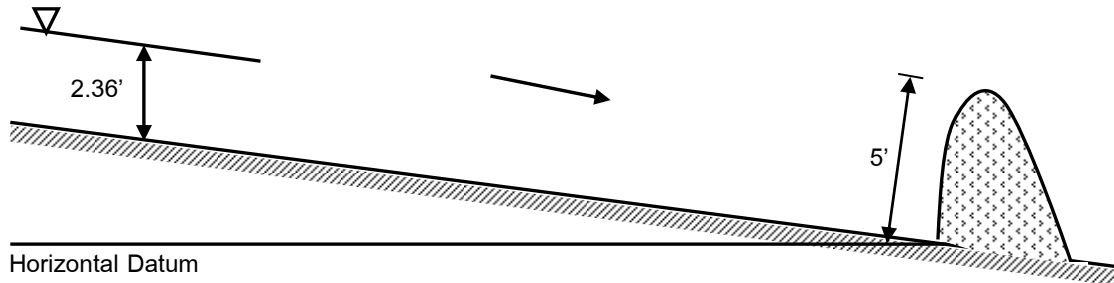
**ตัวอย่าง** ฝ่ายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแห่งหนึ่งมีความสูง 2 ft และความกว้าง 4 ft ถ้าผลการวัดความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝายได้ค่าที่ได้ไม่ถูกต้องเท่ากับ 0.38 ft ในขณะที่ค่าที่ถูกต้องเท่ากับ 0.40 ft จงหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลผ่านฝ่ายสันคมนี้

ตัวอย่าง (ก) น้ำไหลผ่านฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ( $C_w = 3.30$ ) ที่มีความยาวสันฝาย 4 ft ด้วยอัตราการไหล 10 cfs จงหาว่า ถ้าระดับน้ำเหนือสันฝายผิด โดยวัดได้สูงกว่าค่าจริง 0.02 ft จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณอัตราการไหลเท่าไร

(ข) เช่นเดียวกับข้อ (ก) แต่เป็นการไหลผ่านฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม ( $C_d = 0.58$ ) ที่มีมุมสันฝาย  $60^\circ$

ตัวอย่าง ฝ่ายสันหนาแห่งนี้ มีรูปร่างเป็นกรณีที่ 42 ของตาราง ซึ่งมีความกว้าง 10.5 m จงหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) กับความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h$ ) ในช่วงตั้งแต่ 0.15 m ถึง 0.90 m

**ตัวอย่าง** ทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 10 ft คัดด้วยหินเรียงที่มีสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง 0.017 และมีความลาดท้องน้ำ 0.020 ดังภาพข้างล่าง ที่บริเวณท้ายน้ำมีฝายสันนสูง 5 ft ที่มีสัมประสิทธิ์อัตราการไหล 3.8 ถ้ามีการไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 400 cfs จงหาว่าจะเกิดน้ำกระโดดหรือไม่ ถ้าเกิดน้ำกระโดดจะเกิดที่ไหนของทางน้ำเปิด





## 2. รางวัดน้ำ (Measuring flume)

ถ้ามีน้ำตะกอนแขวนลอยปะปนมาด้วย จะมีตะกอนบางส่วนตกทับถมและสะสมอยู่ทางด้านเหนือฝายวัดน้ำ เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ฝายวัดน้ำ นอกจากนี้ ยังทำให้การใช้งานของฝายวัดน้ำมีการสูญเสียพลังงานมาก (Large head loss) ซึ่งการแก้ปัญหาในกรณีดังกล่าว สามารถทำได้โดยใช้รางน้ำเวนจูรี (Venturi flume) แทนฝายวัดน้ำ โดยรางน้ำแบบพาร์แชล (Parshall flume) ดังภาพข้างล่าง เป็นรางน้ำเวนจูรีแบบหนึ่งที่ถูกใช้กันมากในคลองชลประทาน

ลักษณะการไหลผ่านรางวัดน้ำแบบพาร์แชลนี้ โดยปกติจะเป็นการไหลแบบอิสระ (Free-flow) โดยมีความลึกวิกฤตที่สันฝาย และมีน้ำกระโดดที่หน้าตัดทางออก ซึ่งคอคอด (Throat) ของรางน้ำแบบพาร์แชล จะมีขนาดแปรเปลี่ยนตั้งแต่ความกว้าง  $W = 3$  in จนถึง  $W = 50$  ft อย่างไรก็ตาม รูปแบบและระยะต่าง ๆ ที่แสดงในภาพข้างล่างนี้เป็นกรณีที่มีคอคอดกว้าง 1 ft ถึง 8 ft ( $0.30 \text{ m} \leq W \leq 2.4 \text{ m}$ ) โดยในกรณีที่คอคอดกว้าง 8 ft สามารถใช้วัดอัตราการไหลได้สูงถึง 140 cfs จะมีสมการอัตราการไหลผ่านรางน้ำแบบพาร์แชล ขึ้นอยู่กับความกว้างของคอคอด ( $W$ ) และความลึกทางด้านเหนือน้ำ ( $h_a$ ) ดังนี้

สำหรับหน่วยอังกฤษ

$$(W, h_a = \text{ft และ } Q = \text{cfs})$$

สำหรับหน่วย SI

$$(W, h_a = \text{m และ } Q = \text{cms})$$

สำหรับในกรณีที่รางน้ำแบบพาร์แชลที่มี 8 ft ถึง 50 ft ( $2.4 \text{ m} \leq W \leq 15.20 \text{ m}$ )

สำหรับหน่วยอังกฤษ

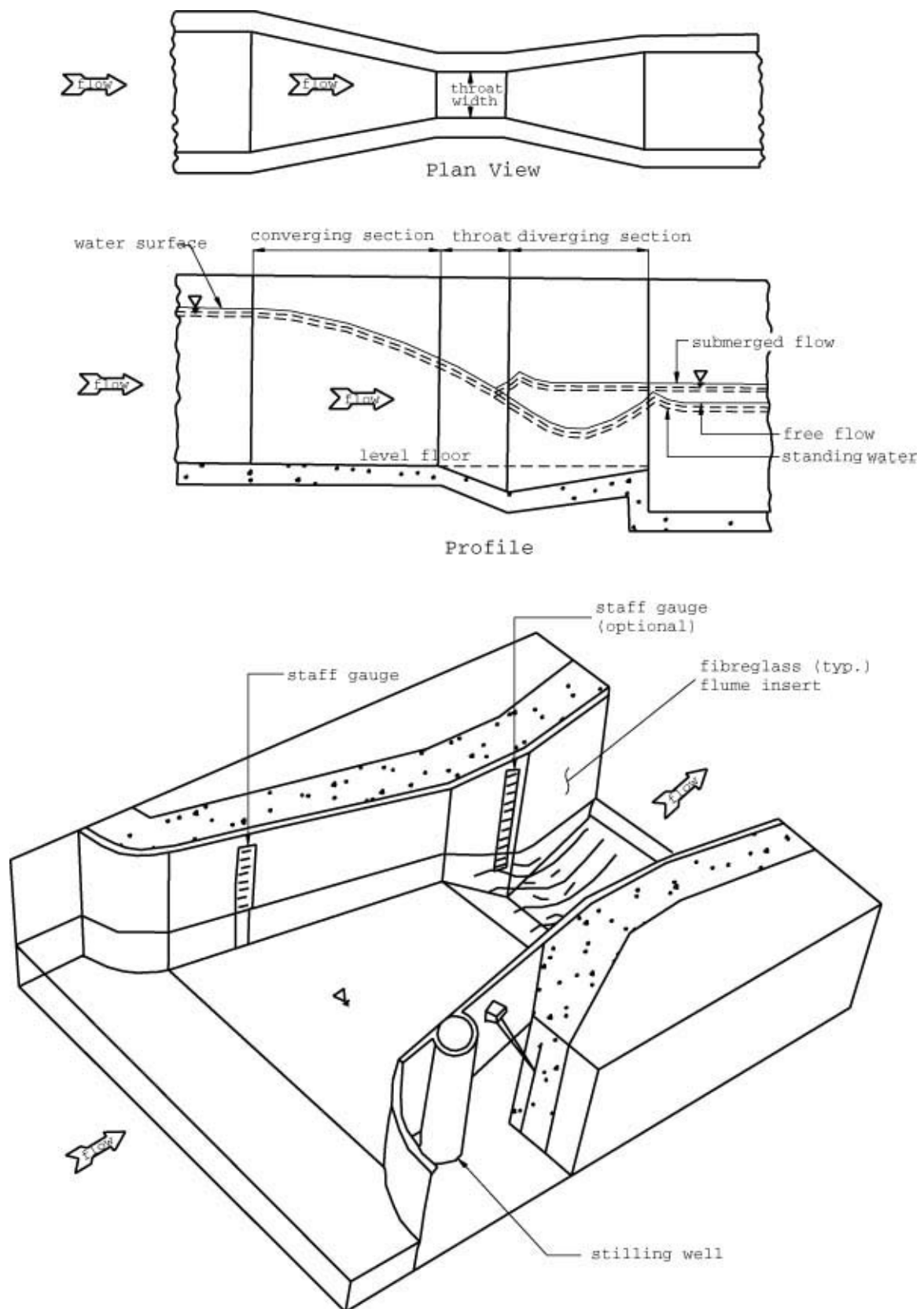
$$(W, h_a = \text{ft และ } Q = \text{cfs})$$

สำหรับหน่วย SI

$$(W, h_a = \text{m และ } Q = \text{cms})$$

ถ้าความลึกทางด้านท้ายน้ำมีมากจนท่วมน้ำกระโดด และเกิดการไหลแบบจมน้ำก็จะต้องวัดความลึก  $h_s$  แล้วจึงคำนวณอัตราการไหลใหม่ ในกรณีนี้จะทำให้อัตราการไหลลดลง

ในการติดตั้งหรือก่อสร้างรางน้ำแบบพาร์แชล ควรจะอยู่ในแนวที่มีทางน้ำตรง และมีสภาพการไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) โดยส่วนมากในงานชลประทานมักจะสร้างด้วยคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ถ้าเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ทั่ว ๆ ไป ก็มักจะทำจากพลาสติกเพราะจะได้เห็นพฤติกรรมการไหลทั้ง 3 มิติ



### 3. ประตูน้ำแบบไหลลอด

ประตูน้ำแบบไหลลอดเป็นประตูน้ำควบคุม (Control gates) การไหลในทางน้ำเปิดแบบหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะทั่วไปดังภาพข้างล่าง

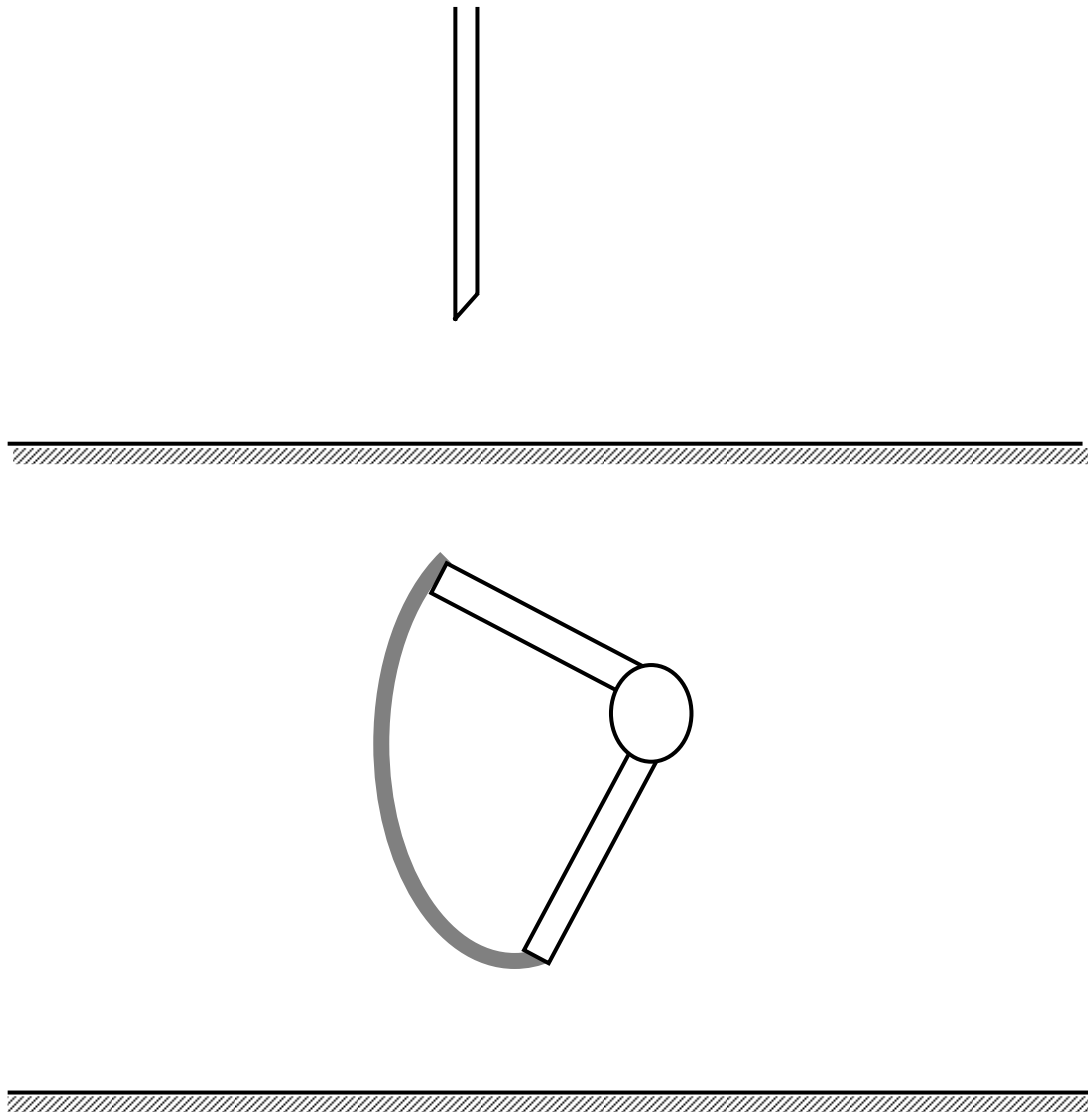


การเลือกจะใช้ประตูน้ำแบบไหลลอดแบบใดนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะการประยุกต์ใช้งาน ดังเช่นประตูน้ำในแนวตั้ง (Vertical gate) จะวางในแนวตั้งที่มีตอม่อหรือตลิ่งวางคู่ในแนวตั้งเป็นฐานรองรับ ซึ่งประตูจะเคลื่อนที่โดยมีลูกกลิ้ง (Roller wheel) รองรับทั้ง 2 ด้าน และลักษณะการรับแรงมี 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 เมื่อประตูปิดลงสนิท จะมีแรงดันน้ำสถิต (Hydrostatic force) กระทำในแนวตั้งฉากกับบานประตู และกรณีที่ 2 เมื่อเปิดประตูขึ้น กระแสน้ำจะไหลลอดบานประตู ทำให้เกิดโมเมนต์ต้านของน้ำกระทำต่อบานประตู เป็นแรงพลศาสตร์ (Dynamic force) ซึ่งในบริเวณที่มีอากาศหนาวจัด น้ำที่กลายเป็นน้ำแข็ง ก็สามารถเกาะติดลูกกลิ้ง ทำให้ยากต่อการปิดเปิดประตูได้ ประกอบกับการใช้แรงปิดเปิดประตูน้ำจะต้องใช้แรงเป็นจำนวนมากเพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน น้ำหนักประตู และแรงกระทำของน้ำต่อบานประตู ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบเป็นประตูบานโค้ง (Radial gate or tainter gate) ดังภาพ (ข) ประกอบด้วยแผ่นประตูโค้งที่มีค้ำยันรองรับเป็นแขนตามแนวรัศมีไปยังจุดหมุน ลักษณะเช่นนี้จะทำให้แนวแรงดันน้ำที่กระทำตั้งฉากกับแผ่นประตูโค้งมีทิศทางเข้าหาจุดหมุน ทำให้ไม่เกิดโมเมนต์เนื่องจากแรงดันน้ำ ดังนั้นแรงที่ใช้ในการเปิดประตูน้ำ จึงมีเพียงแรงที่ต้องใช้เพื่อชนะโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของบานประตู แรงเสียดทานที่จุดหมุนและแรงเสียดทานระหว่างประตูกับผนังด้านข้างทั้ง 2 ด้านเท่านั้น สำหรับประตูน้ำรูปกลอง (Drum gate) หรือประตูน้ำรูปทรงกระบอก ก็มีข้ออยู่บ้าง แต่ไม่มากนัก

คุณลักษณะทางชลศาสตร์ (Hydraulic characteristics) ของการไหลลอดประตูน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1. การไหลอิสระ (Free flow) คือ การไหลลอดบานประตูน้ำอย่างอิสระโดยไม่มีอิทธิพลของน้ำทางด้านท้ายน้ำมาเกี่ยวข้อง





อัตราการใช้ตลอดประตูน้ำทั้งประตูน้ำในแนวตั้ง และประตูน้ำบานโค้ง สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบพลังงานระหว่างหน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้ประตูน้ำมีความกว้าง  $b$  จากสมการการใช้ต่อเนื่อง คือ

แทนค่า  $V_1$  และ  $V_2$  จะได้

เนื่องจากการหดตัวของกระแสน้ำ ทำให้

เมื่อ  $C_c$  คือ สัมประสิทธิ์การหดตัวของกระแสน้ำ ดังนั้น เมื่อแทนค่า  $y_2 = C_c y_G$  ในสมการข้างต้น แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้

หรือ

โดยที่

เมื่อ  $C_d$  คือ สัมประสิทธิ์อัตราการไหล (Discharge coefficient)

2. การไหลแบบจม (Submerged flow) คือ การไหลลอดบานประตูน้ำแล้วทำให้บริเวณทางออกจากประตูน้ำจมอยู่ใต้น้ำทั้งหมด ดังภาพข้างล่าง ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความลึกท้ายน้ำ (Downstream depth,  $y_3$ ) มีค่ามากกว่าความลึกตาม (Conjugate depth) ของ  $y_2$



สำหรับการวิเคราะห์การไหลอย่างประมาณ (Approximate analysis) สามารถหาได้โดยการสมมติว่า การสูญเสียพลังงานทั้งหมดเกิดขึ้นในช่วงการขยายการไหล ไปยังท้ายน้ำของบานประตูจากหน้าตัด 2 ไปยังหน้าตัด 3 ซึ่งจากสมการพลังงานระหว่างหน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 จะมี

เมื่อให้เทอมแรงดันสถิตของกระแสทางด้านขวาของบานประตูเป็นแรงดันน้ำที่ความลึก  $y$  (ไม่ใช่  $y_2$ ) ดังนั้น สามารถประยุกต์ใช้สมการโมเมนตัมระหว่างหน้าตัด 2 และหน้าตัด 3 ได้

ในทางปฏิบัติมักจะรู้ค่า  $y_1$  และ  $y_3$  จากไม้วัดระดับน้ำในสนาม ในขณะที่ความลึกน้ำ  $y_2$  สามารถประมาณค่าได้จากการรู้ค่า  $y_G$  และ  $C_c$

ประตูน้ำควบคุมมีการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมแหล่งน้ำอย่างกว้างขวาง เช่น การนำมาใช้ควบคุมการปล่อยน้ำชลประทานและการไหลผ่านฝายน้ำล้น ดังนี้

1) การควบคุมการปล่อยน้ำชลประทาน สามารถเปิดปิดหมุนเวียนการใช้น้ำชลประทานได้ ซึ่งมีจุดที่ต้องระวัง คือในกรณีที่เป็นการไหลลดประตูน้ำอย่างอิสระ กระแสน้ำจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูงและมีสภาพการไหลเหนือวิกฤต (Supercritical flow) ทำให้ในกรณีนี้ จะต้องมีการควบคุมไม่ให้กระแสน้ำแรงไปยังท้ายน้ำ โดยการสร้างอาคารสลายพลังงานเป็นลักษณะแอ่งน้ำนิ่ง (Stilling basins) เพื่อบังคับให้เกิดน้ำกระโดดในบริเวณแอ่งน้ำนิ่งที่เป็นคอนกรีต ซึ่งจะช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำที่จะไหลต่อไปยังท้ายน้ำได้

2) การควบคุมการไหลผ่านฝายน้ำล้น การมีประตูควบคุมบนสันฝายจะช่วยเก็บกักน้ำได้มากขึ้น ขณะเดียวกันในช่วงที่มีน้ำหลาก ก็ยังช่วยควบคุมปริมาณน้ำทั้งทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำไม่ให้เกิดน้ำท่วมมากได้ ซึ่งการที่จะเปิดปิดประตูน้ำมากน้อยเพียงใดนั้น ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำหลากทางด้านเหนือน้ำ ระดับน้ำท่วม สภาพพื้นที่ และขีดความสามารถในการระบายน้ำทางด้านท้ายน้ำ เป็นต้น ซึ่งแต่ละบริเวณและแต่ละเวลาจะมีเงื่อนไขของการควบคุมการเปิดปิดประตูน้ำที่แตกต่างกัน

**ตัวอย่าง** คลองชลประทานแห่งหนึ่งเป็นคลองอิฐซีเมนต์ ( $n=0.028$ ) ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมหน้ากว้าง 4 m และมีความลาดท้องคลอง 0.002 ผันน้ำจากแม่น้ำเข้าคลองโดยใช้ประตูน้ำบานตรงแบบไหลลอดที่มีความกว้างประตูน้ำเท่ากับความกว้างของหน้าตัดคลองพอดี จงหาว่าจะต้องเปิดประตูน้ำ  $y_c$  เท่าไรและสภาพการไหลทางด้านท้ายน้ำของบานประตูน้ำเป็นอย่างไรในเงื่อนไขต่อไปนี้ ( $C_c = 0.61$ ,  $C_d = 0.60$ )

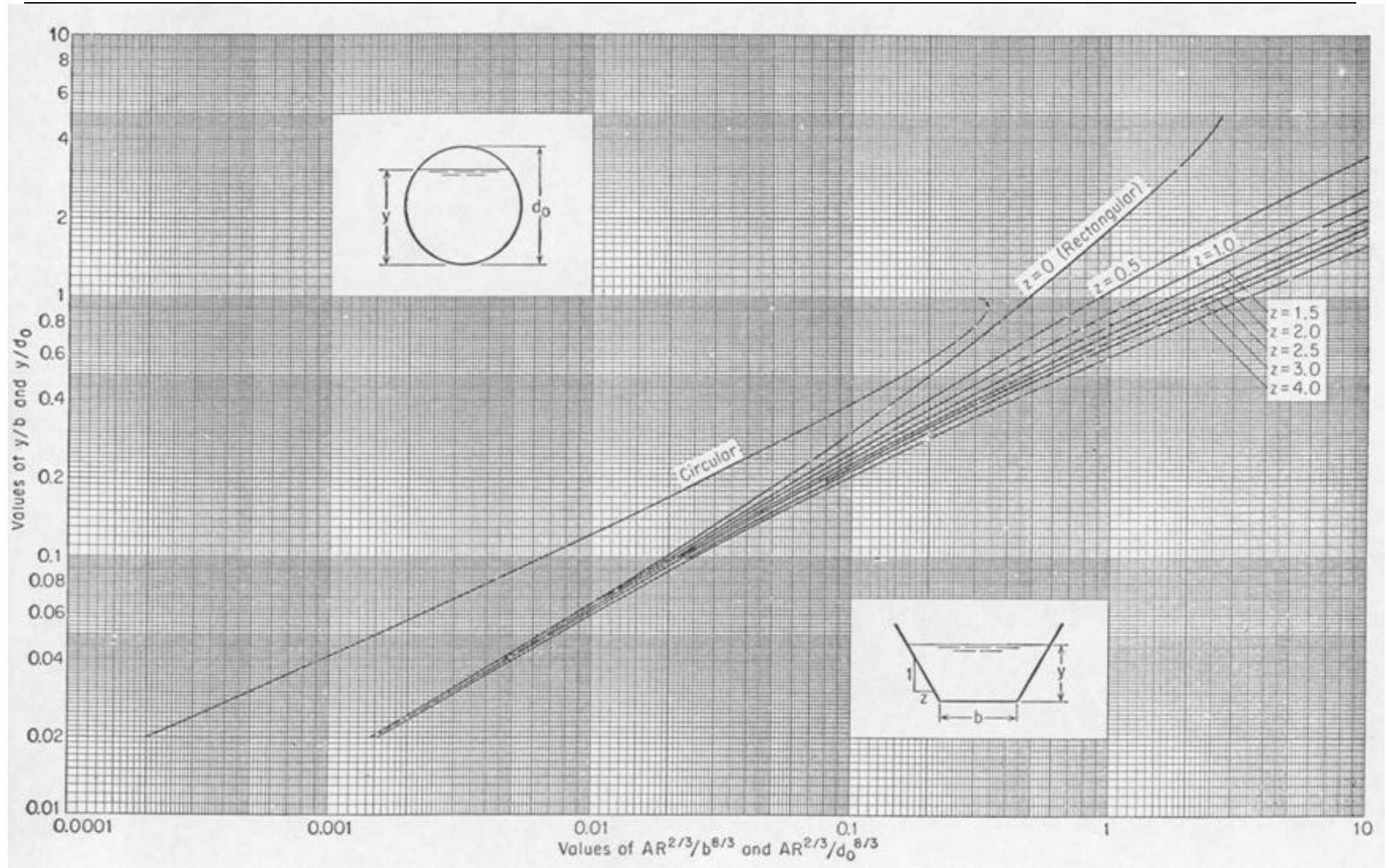
(ก) เมื่อความลึกของการไหลในแม่น้ำเท่ากับ 2 m และมีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 11 cms

(ข) เมื่อความลึกของการไหลในแม่น้ำเท่ากับ 3 m และมีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 5 cms





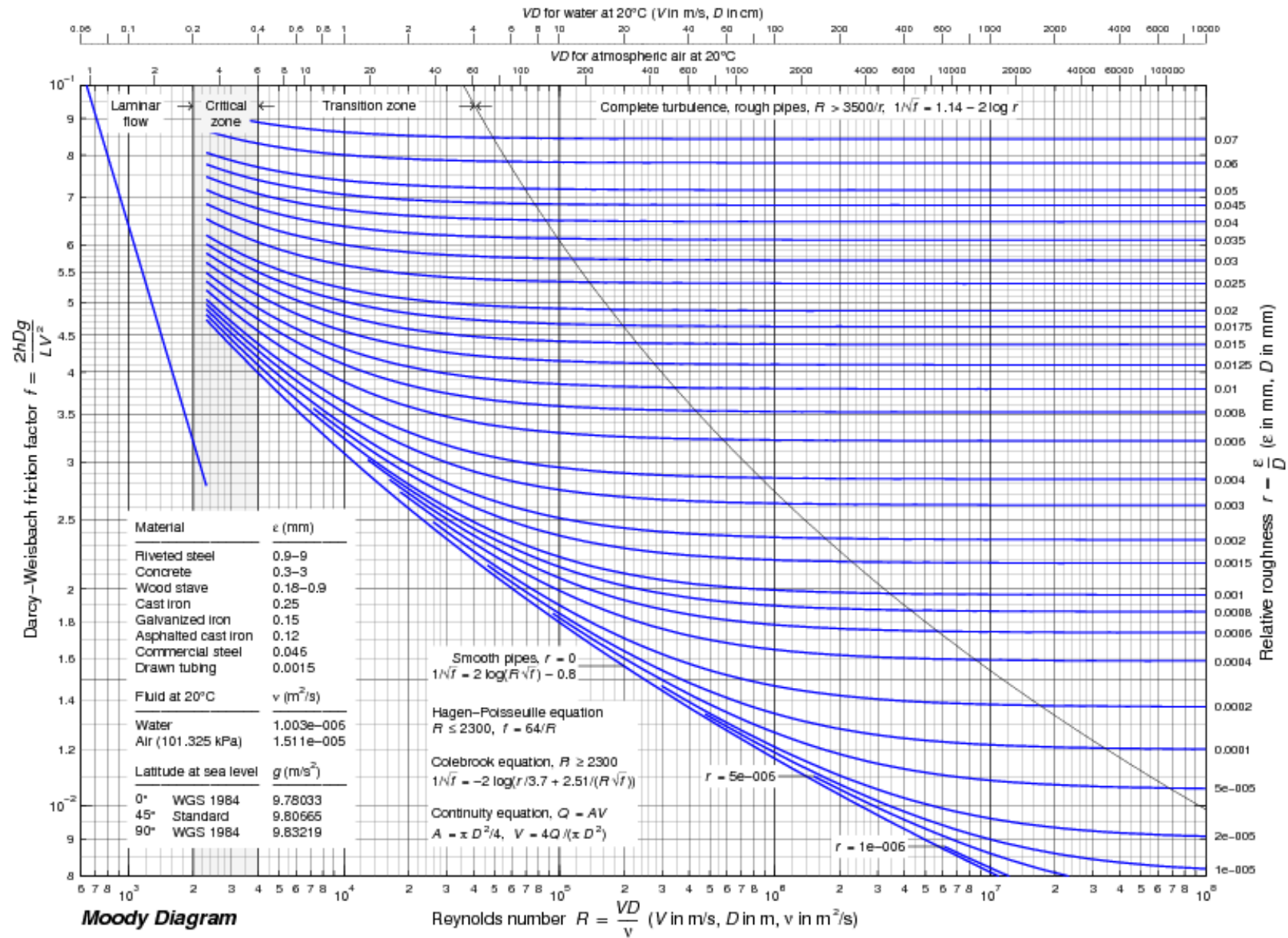




เส้นโค้งสำหรับหาความลึกปกติ (Normal depth)







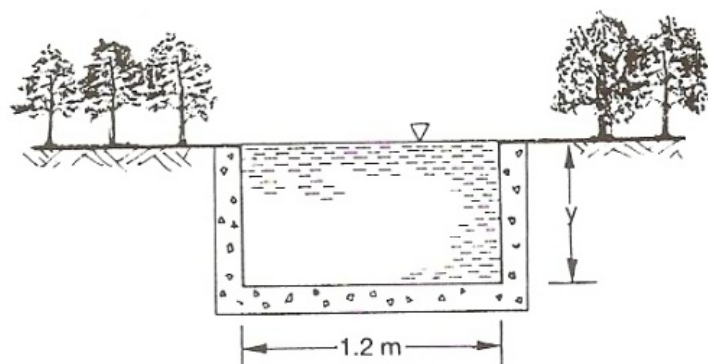


### แบบฝึกหัด

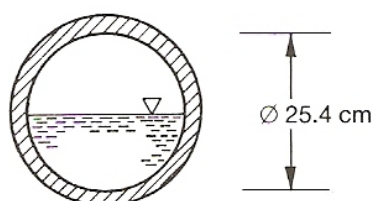
1.) ถ้าต้องการระบายน้ำออกจากสนามกอล์ฟแห่งหนึ่งด้วยอัตราการไหล  $1.35 \text{ cms}$  โดยใช้รางคอนกรีตผิวหยาบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางในแนวความลาด  $0.0025$  และมีความกว้างของรางระบายน้ำ  $1.2 \text{ m}$

(ก) จงออกแบบความลึกของรางคอนกรีต

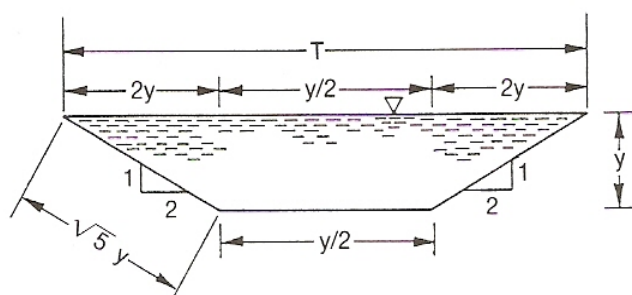
(ข) ตรวจสอบว่าเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอที่มีสภาพการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์หรือไม่



2.) ท่อเหล็กหล่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $25.4 \text{ cm}$  วางในแนวความลาด  $0.002$  ในขณะที่มีน้ำไหลผ่านครึ่งท่อแล้วเกิดสภาพการไหลแบบสม่ำเสมอ จงหาอัตราการไหลในท่อเหล็กหล่อ

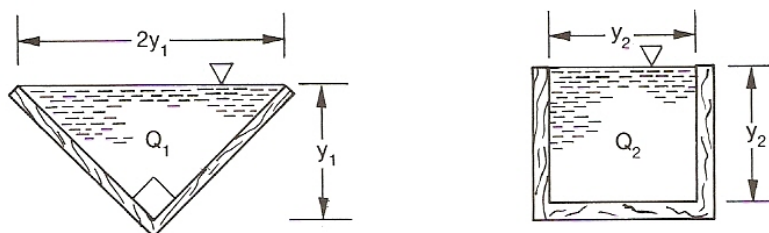


3.) จงออกแบบความลึก ความกว้างผิวน้ำ และความกว้างท้องคลองดินชุด เพื่อส่งน้ำสำหรับปลูกข้าวด้วยอัตราการไหล  $5.4 \text{ cms}$  โดยให้มีความลาดด้านข้างในแนวตั้งต่อแนวนอนเท่ากับ  $1$  ต่อ  $2$  และความลาดท้องคลองเป็นไปตามสภาพภูมิประเทศ คือมีความลาด  $2 \text{ m}$  ต่อความยาว  $5 \text{ km}$  โดยความกว้างท้องคลองเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึก



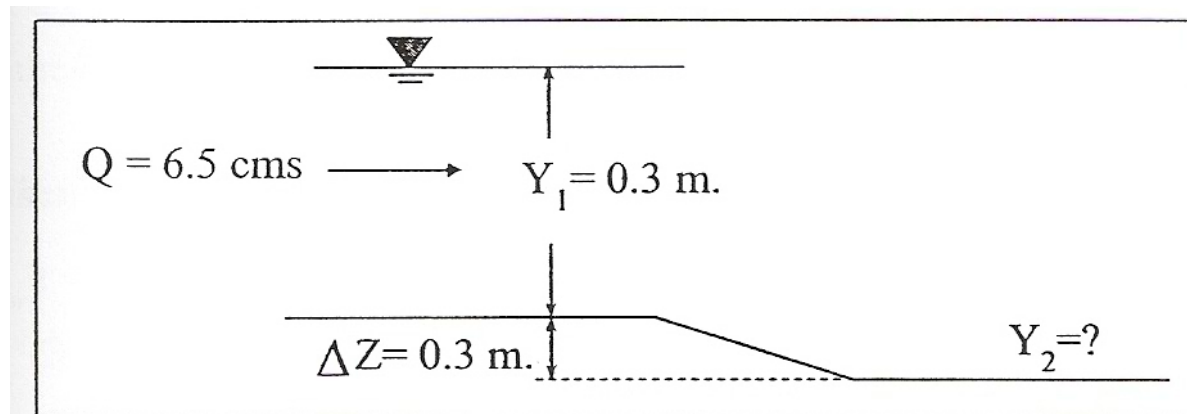
4.) น้ำไหลผ่านคลองดินที่มีหญ้าขึ้นด้วยอัตราการไหล 30 cms ถ้าถอนหญ้าออกทั้งหมด จงหาอัตราการไหลในคลองดินที่มีความลึกกระแสน้ำเท่ากัน

5.) วิศวกรคนหนึ่งต้องการออกแบบรางไม้สำหรับส่งน้ำด้วยอัตราการไหล 2 cms โดยมีความลาด 10 m ต่อระยะทาง 800 m ถ้าวาระหว่างรางรูปสามเหลี่ยมมุมฉากกับรางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะเลือกรางไม้รูปใดจึงจะประหยัดไม้มากที่สุด และประหยัดได้กี่เปอร์เซ็นต์

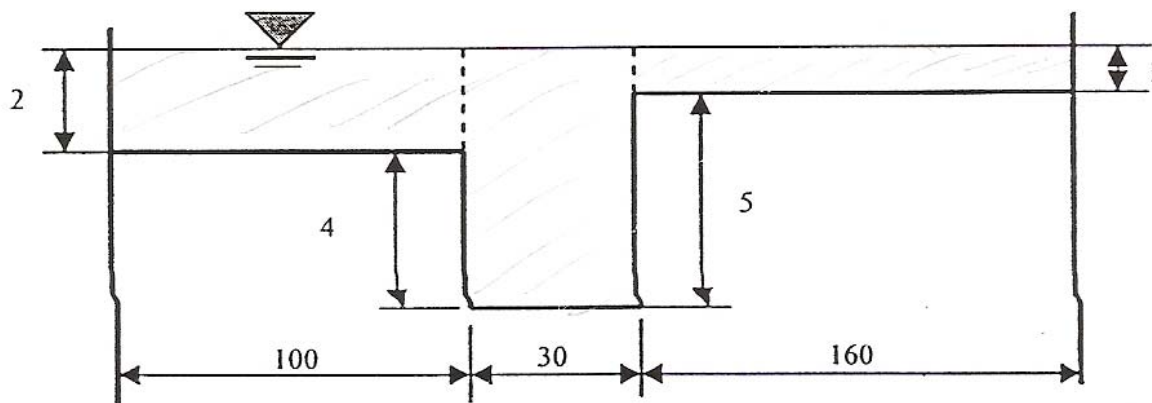


6) ทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแห่งหนึ่งมีหน้าตัดเปลี่ยนแปลงจากความกว้าง 3m เป็น 2.5m ในระยะทางสั้นๆ ถ้าทางด้านเหนือน้ำมีอัตราการไหล 6.5cms และมีความลึก 0.4m จงหาความลึกทางด้านท้ายน้ำ

7) จากข้อ 6) ถ้าทางน้ำเปิดมีระดับท้องน้ำลดลง 0.3m โดยตัวแปรอื่นๆไม่เปลี่ยน จงหาความลึกท้ายน้ำ



8) ทางน้ำเปิดแห่งหนึ่ง ในขณะที่เกิดน้ำหลากมีหน้าตัดการไหลดังรูป



ถ้าตรงกลางทางน้ำเปิดเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ( $n=0.013$ ) และมีตลิ่งทั้งสองด้านเป็นดินธรรมชาติ ( $n=0.065$ ) โดยมีทางลาดท้องน้ำ 0.0005 จงหาอัตราการไหลในขณะที่เกิดน้ำหลากในทางน้ำเปิดสายนี้

9) ทางด้านเหนือน้ำเป็นอ่างเก็บน้ำที่มีทางน้ำล้นความกว้าง 30 m มีอัตราการไหล  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  ที่ระดับ El. 200m ส่วนทางด้านท้ายน้ำเป็นแม่น้ำมีอัตราการไหลเท่ากันที่ระดับ El. 100m จงหา ระดับของ stilling basin ซึ่งมีความกว้างเท่ากับทางน้ำล้น และเกิดไฮดรอลิกจัมใน stilling basin (สมมุติว่าไม่มีการสูญเสียในทางน้ำล้น)

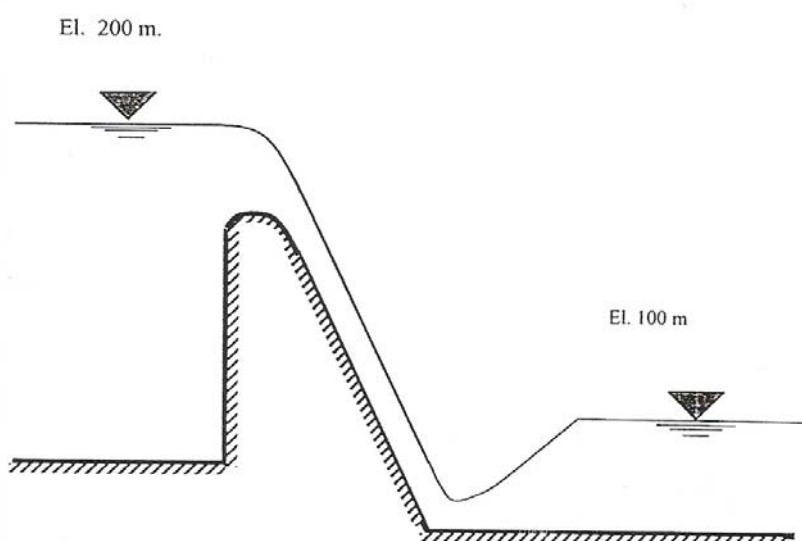
กำหนดให้  $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$

$B=30 \text{ m}$

ระดับด้านเหนือน้ำ El. 200m

ระดับด้านท้ายน้ำ El. 100m

ให้หา ระดับของ stilling basin



10) Hydraulic jump เกิดด้านท้ายน้ำของประตูน้ำ ซึ่งกว้าง 5 m ถ้าความลึกด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำของประตูน้ำคือ 10 m และ 20 m ตามลำดับ และอัตราการไหลประตูน้ำเท่ากับ  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  จงหา

- a. ความลึกด้านท้ายน้ำหลังจากเกิด Hydraulic jump
- b. แรงที่กระทำต่อประตูน้ำ
- c. พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากเกิด Hydraulic jump  
( สมมติว่าไม่มีการสูญเสียในการไหลตลอดผ่านประตู )

11. For a trapezoidal channel with base width  $b = 6.0 \text{ m}$  and side slope  $z = 2$ , calculate the critical depth of flow if  $Q = 17 \text{ m}^3/\text{s}$ .

12. A circular channel 3.0 ft in diameter conveys a flow of  $25 \text{ ft}^3/\text{s}$ ; estimate the critical depth of flow using graph.

13. A trapezoidal channel has a bottom width of 6.1 m and side slopes of 2 horizontal to 1 vertical. When the depth of water is 1.07 m, the flow is  $10.47 \text{ m}^3/\text{s}$ . (a) What is the specific energy? (b) Is the flow subcritical or supercritical?

14. A rectangular channel, 3 m wide, carries  $11.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . (a) Tabulate depth of flow against specific energy for depths from 0.3 m to 2.4 m and plot graph. (b) Determine the minimum specific energy.

15. A rectangular channel, 6.1 m wide, carries  $11.32 \text{ m}^3/\text{s}$  and discharges onto a 6.1 m wide apron with no slope with a mean velocity of 6.1 m/s. What is the height of the hydraulic jump? What energy is absorbed (lost) in the jump?

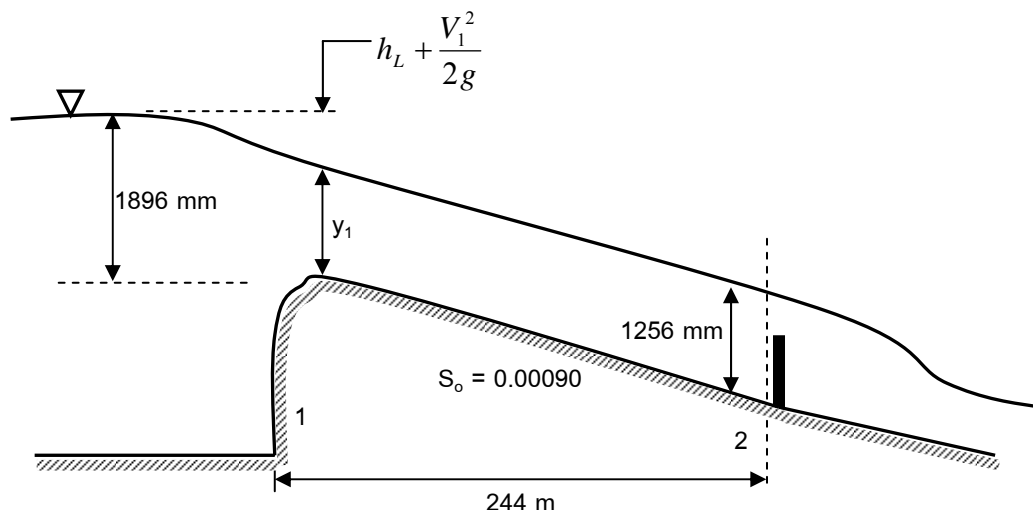
16. An average vitrified sewer pipe is laid on a slope of 0.00020 and is to carry  $2.36 \text{ m}^3/\text{s}$  when the pipe flows 0.90 full. What size pipe should be used?

17. A trapezoidal channel has a bottom width of 6.096 m, side slopes of 1 to 1, and flows at a depth of 914 mm. For  $n = 0.015$ , and a discharge of  $10.19 \text{ m}^3/\text{s}$ , calculate (a) the normal slope, (b) the critical slope and critical depth for  $10.19 \text{ m}^3/\text{s}$ , and (c) the critical slope at the normal depth of 914 mm.

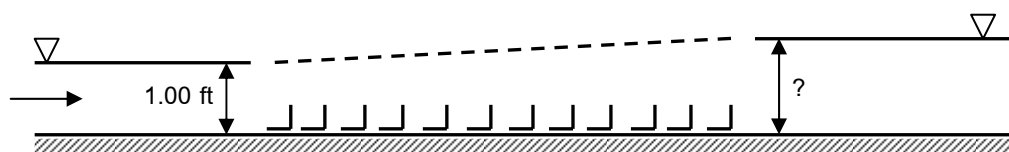
18. A channel with a trapezoidal cross section is to carry  $25.47 \text{ m}^3/\text{s}$ . If slope  $S = 0.000144$ ,  $n = 0.015$ , base width  $b = 6.1 \text{ m}$  and the side slopes are 1 vertical to  $1\frac{1}{2}$  horizontal, determine the normal depth of flow.
19. Determine the most efficient section of a trapezoidal channel,  $n = 0.025$ , to carry  $12.74 \text{ m}^3/\text{s}$ . To prevent scouring, the maximum velocity is to be  $920 \text{ mm/s}$  and the side slopes of the trapezoidal channel are 1 vertical to 2 horizontal.
20. A trapezoidal channel has a bottom width of  $6.1 \text{ m}$  and side slopes of 2 horizontal to 1 vertical. When the depth of water is  $1.07 \text{ m}$ , the flow is  $10.47 \text{ m}^3/\text{s}$ . (a) What is the specific energy? (b) Is the flow subcritical or supercritical?
21. The discharge through a rectangular channel ( $n=0.012$ )  $4.57 \text{ m}$  wide is  $11.32 \text{ m}^3/\text{s}$  when the slope is 1 m in 100 m. Is the flow subcritical or supercritical?
22. A rectangular flume ( $n = 0.013$ ) is  $1.83 \text{ m}$  wide and carries  $1.87 \text{ m}^3/\text{s}$  of water. At a certain section F the depth is  $975 \text{ mm}$ . If the slope of the channel bed is constant at  $0.0004$ , determine the distance from F where the depth is  $823 \text{ mm}$ . (Use one reach.)
23. A rectangular channel,  $12.2 \text{ m}$  wide, carries  $25.47 \text{ m}^3/\text{s}$  of water. The slope of the channel is  $0.00283$ . At section 1 the depth is  $1.37 \text{ m}$  and at section 2,  $92 \text{ m}$  downstream, the depth is  $1.52 \text{ m}$ . What is the average value of roughness factor  $n$ ?
24. A rectangular channel,  $6.1 \text{ m}$  wide, has a slope of 1 m per 1000 m. The depth at section 1 is  $2.59 \text{ m}$  and at section 2,  $610 \text{ m}$  downstream, the depth is  $3.13 \text{ m}$ . If  $n = 0.011$ , determine the probable flow in  $\text{m}^3/\text{s}$ .



25. A reservoir feeds a rectangular channel, 4572 mm wide,  $n = 0.015$ . At entrance, the depth of water in the reservoir is 1896 mm above the channel bottom. The flume is 244 m long and drops 0.22 m in this length. The depth behind a weir at the discharge end of the channel is 1256 mm. Determine, using one reach, the capacity of the channel assuming the loss at entrance to be  $\frac{0.25V_1^2}{2g}$ .



26. A 10-ft wide rectangular channel is very smooth except for a small reach that is roughened with angle irons attached to the bottom of the channel (see figure below). Water flows in the channel at a rate of 200 cfs and at a depth of 1.00 ft. Assume frictionless flow except over the roughened part where the total drag of all the roughness (all the angel irons) is assumed to be 2000 lb. Determine the depth at the end of the roughness elements for the assumed conditions.



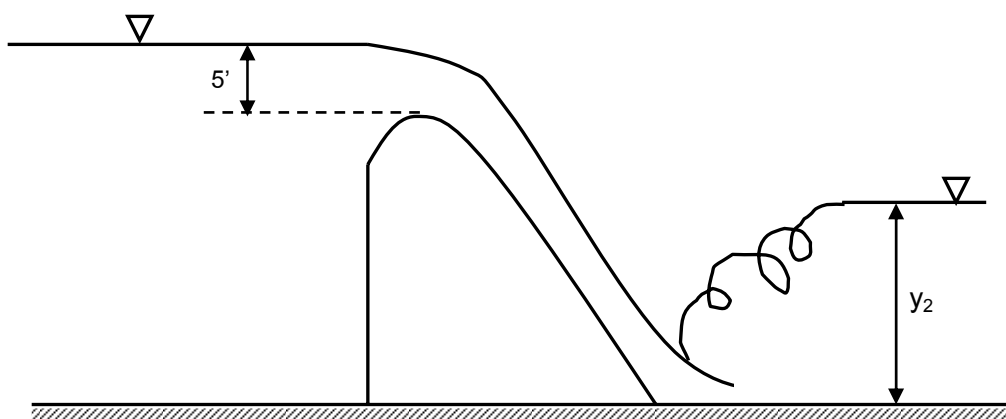
27. Water flows with a velocity of 3 m/s and at a depth of 3 m in a rectangular channel. What is the change in depth and in water surface elevation produced by a gradual upward change in bottom elevation (upstep) of 30 cm? What would be the depth and elevation changes if there were a gradual downstep of 30 cm? What is the maximum size of upstep that could exist before upstream depth changes would result? Neglect head losses.

28. Water flows with a velocity of 2 m/s and at a depth of 3 m in a rectangular channel. What is the change in depth and in water surface elevation produced by a gradual upward change in bottom elevation (upstep) of 60 cm? What would be the depth and elevation changes if there were a gradual downstep of 15 cm? What is the maximum size of upstep that could exist before upstream changes would result? Neglect head losses.

29. Water flows with a velocity of 3 m/s in rectangular channel 3 m wide at a depth of 3 m. What is the change in depth and in water surface elevation produced when a gradual contraction in the channel to a width of 2.6 m takes place? Determine the greatest contraction allowable without altering the specified upstream conditions. Neglect head losses.

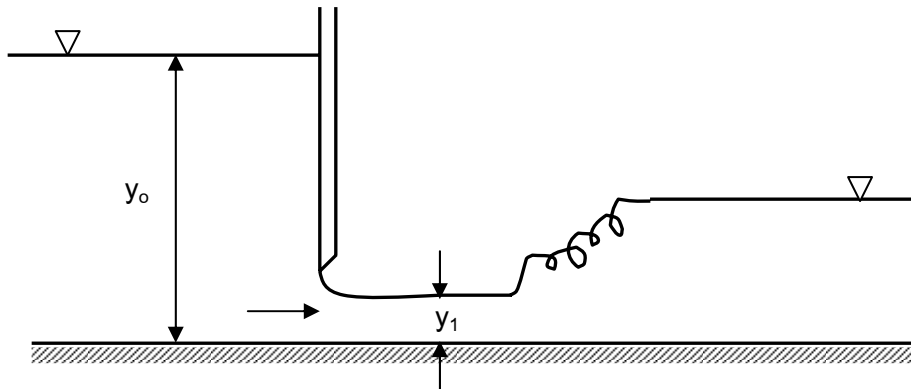
30. Design a cylinder quadrant inlet transition to joint a trapezoidal concrete-lined channel and a concrete flume of rectangular cross section. Assume the channel is on a slope of 0.0005, has side slopes 1 vertical to 2 horizontal, and the depth of flow therein is 5 ft. The bottom width of the channel is 10 ft. The depth in the flume is to be equal to the width of flume. Assume that the Froude number in the flume is to be equal to or less than 0.60.

31. The spillway shown has a discharge of  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  per meter of width occurring over it. What depth  $y_2$  will exist downstream of the hydraulic jump? Assume negligible energy loss over the spillway.



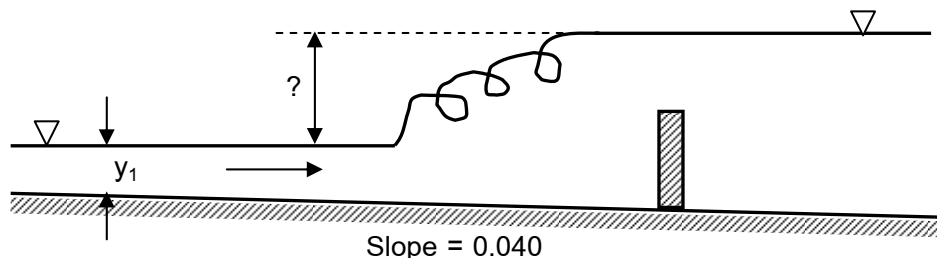
32. A hydraulic jump occurs in a rectangular channel that is 12 ft wide. If the depth upstream of the jump is 1 ft and the depth downstream of it is 8 ft, what rate of energy loss, in horsepower, is produced by the jump?

33. Water is flowing as shown under the sluice gate in a horizontal rectangular channel that is 6 ft wide. The depths  $y_0$  and  $y_1$  are 65 ft and 1 ft, respectively. What will be the horsepower lost in the hydraulic jump?

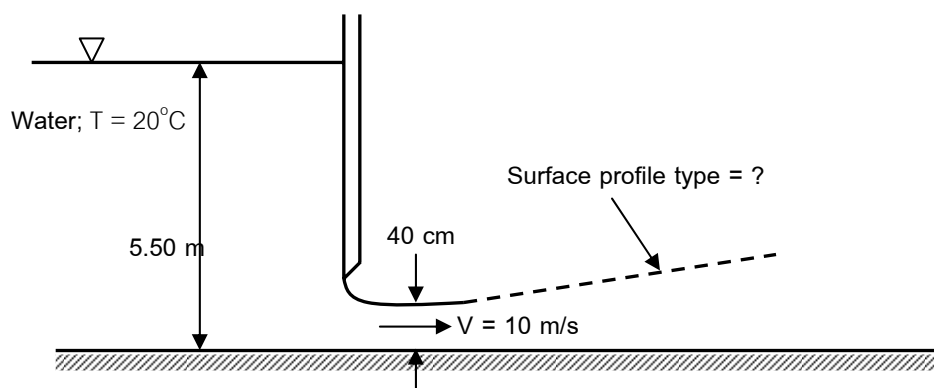


34. In prob. 33, if  $y_0$  is changed so that  $y_1$  and  $V_1$  are 1 ft and 16 ft/s, respectively, what will be the depth and velocity downstream of the jump? Also, what will be the head loss produced by the jump?

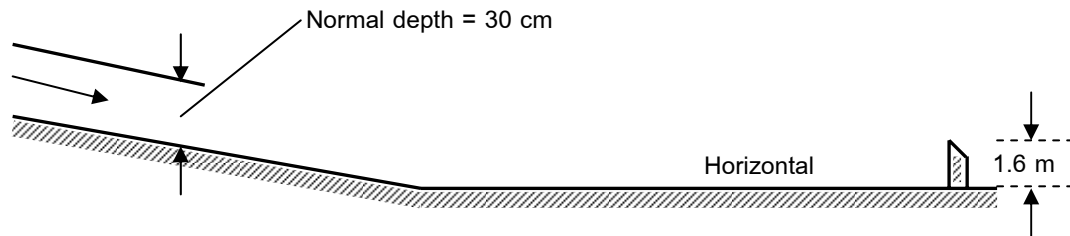
35. Water flows uniformly at a depth  $y_1 = 40$  cm in the concrete channel, which is 10 m wide. Estimate the height of the hydraulic jump that will form when a sill is installed to force it to form.



36. The normal depth in the channel downstream of the sluice gate shown is 1 m. What type of water surface profile occurs downstream of the sluice gate?

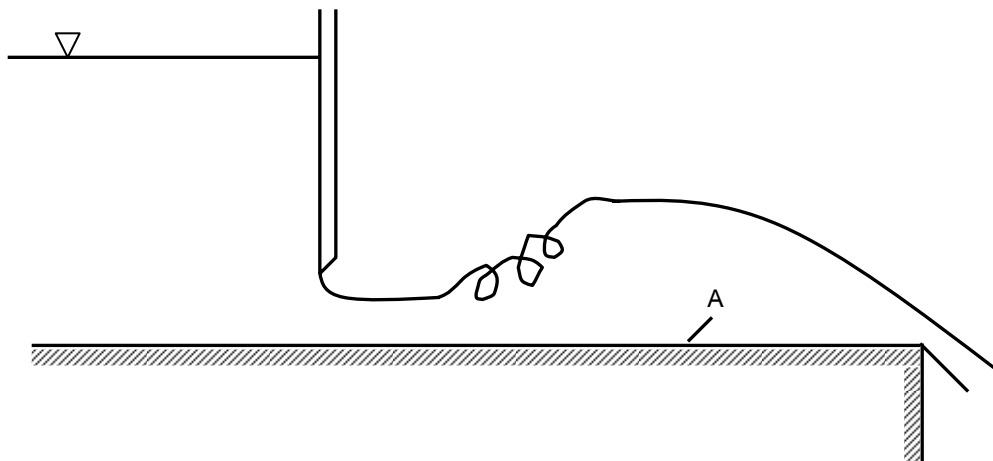


37. The partial water surface profile shown is for a rectangular channel that is 3 m wide and has water flowing in it at a rate of  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sketch in the missing part of water surface profile and identify the type(s).



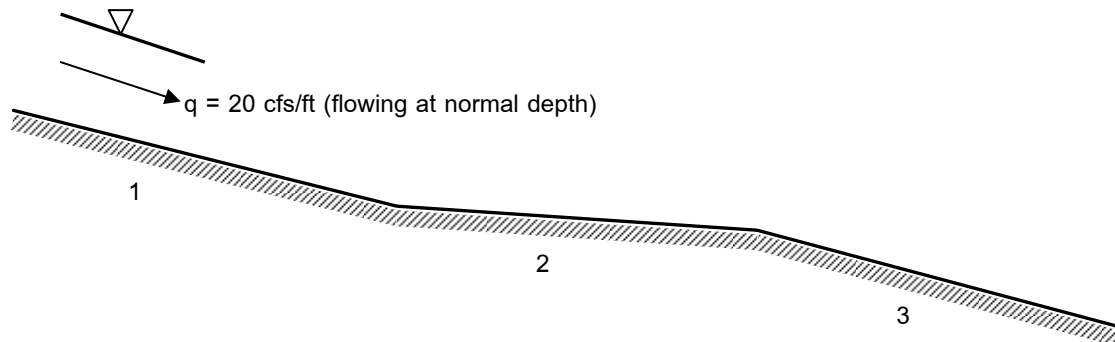
38. A horizontal rectangular concrete channel terminates in a free outfall. The channel is 4 m wide and carries a discharge of water  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ . What is the water depth 300 m upstream from the outfall?

39. Given the hydraulic jump shown for the long horizontal rectangular channel, what kind of water surface profile (classification) is upstream of the jump? What kind of water surface profile is downstream of the jump? If baffle blocks are put on the bottom of the channel in the vicinity of A to increase the bottom resistance, what changes are apt to occur given the same gate opening? Explain or sketch the change.

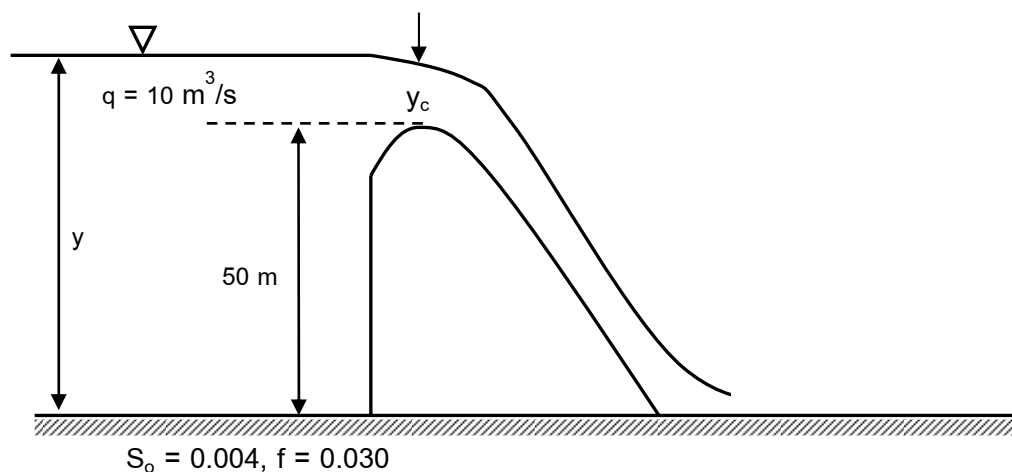


40. A very long 10 ft wide concrete rectangular channel with a slope of 0.0002 ends with a free overfall. The discharge in the channel is 120 cfs. One mile upstream the flow is uniform. What kind (classification) of water surface profile occurs upstream of the brink?

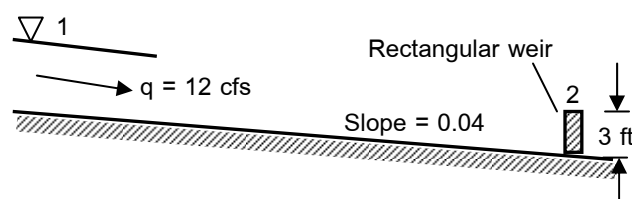
41. The discharge per foot of width in this rectangular channel is 20 cfs. The normal depths for parts 1 and 3 are 0.5 ft and 1.00 ft, respectively. The slope for part 2 is 0.001 (sloping upward in the direction of flow). Sketch all possible water surface profiles for flow in this channel, and label each part with its classification.



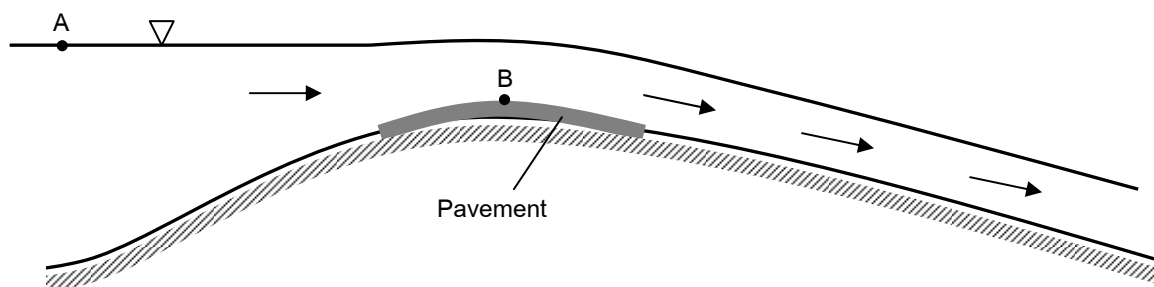
42. A dam 50 m high backs up water in a river valley as shown. During flood flow, the discharge per meter of width,  $q$ , is equal to  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Making the simplifying assumptions that  $R = y$  and  $f = 0.030$ , determine the water surface profile upstream from the dam to a depth of 6 m. In your numerical calculations, let the first increment of depth change by  $y_c$ ; use increments of depth change of 10 m until a depth of 10 m is reached; and then use 2-m increments until the desired limit is reached.



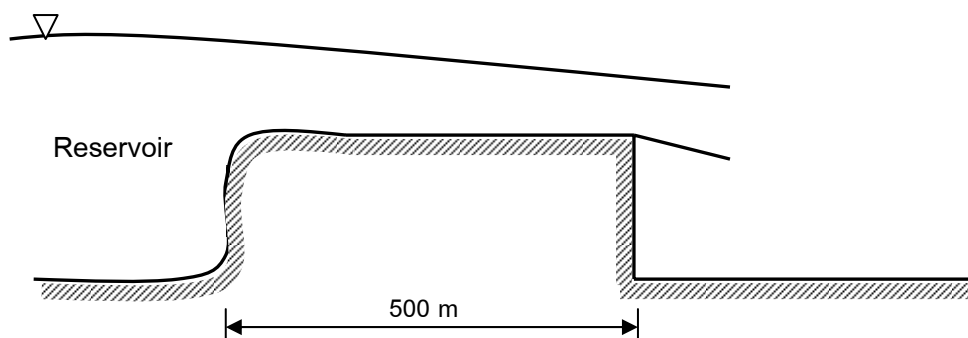
43. Water flows at a steady rate of 12 cfs per foot of width ( $q = 12 \text{ ft}^2/\text{s}$ ) in the wide rectangular concrete channel shown. Determine the water surface profile from section 1 to section 2.



44. A flood caused water to flow over a highway as shown below. The water surface elevation upstream of the highway (at A) was measured to be 101.00 ft. The elevation at the top of the crown of the pavement of the highway is 100.10 ft. Estimate the discharge over a stretch of highway with this elevation, which is 100 ft long. What was the depth of flow at the crown of the highway?



45. The steep rectangular concrete channel shown is 4 m wide and 500 m long. It conveys water from a reservoir and delivers it to a free outfall. The channel entrance is rounded and smooth (negligible head loss at the entrance). If the water surface elevation in the reservoir is 2 m above the channel bottom at its entrance, what will the discharge in the channel be?



46. The concrete rectangular shown is 3.5 m wide and has a bottom slope of 0.001. The channel entrance is rounded and smooth (negligible head loss at the entrance), and the reservoir water surface is 2.5 m above the bed of the channel at the entrance.

- If the channel is 3000 m long, estimate the discharge in it.
- If the channel is only 100 m long, tell how you would solve for the discharge in it.

