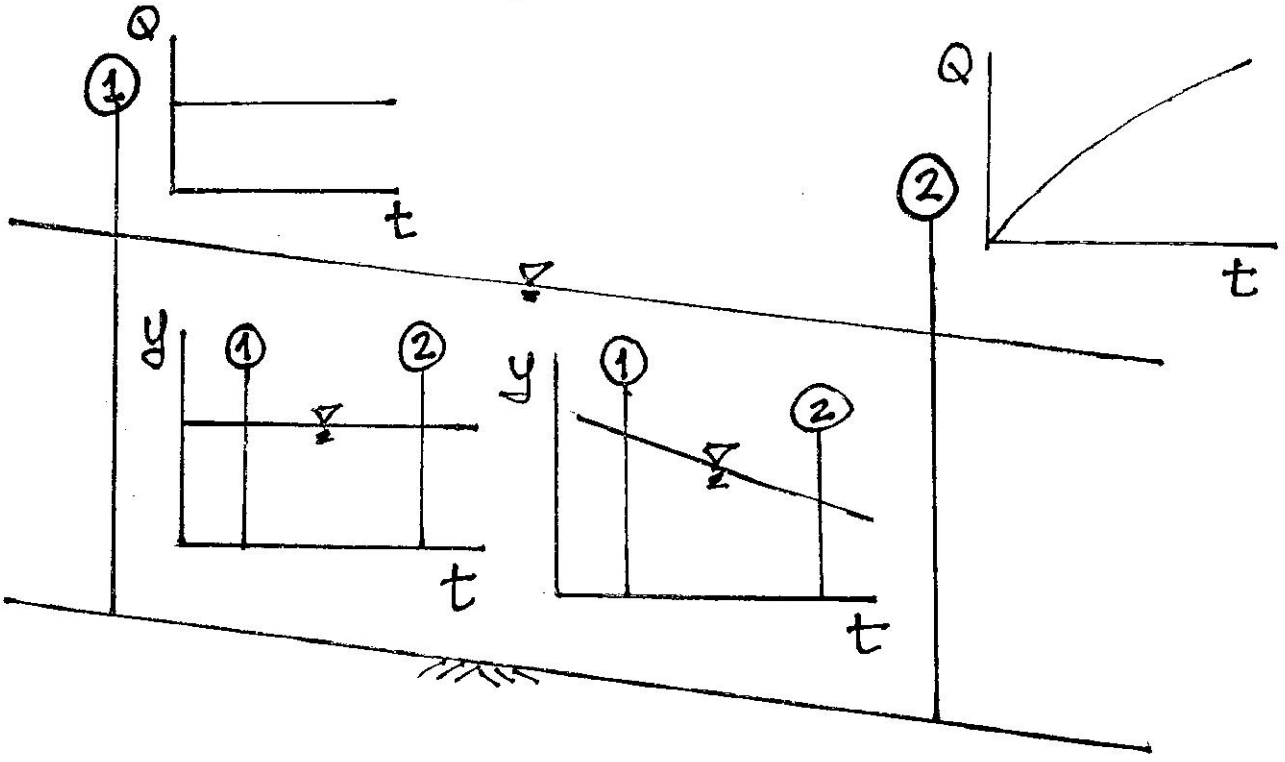
การไหลในทางน้ำเปิด
Open Channel Flow

- Types of Flow
- Basic Equation
- Basic Analysis
- Normal Depth
- Critical Flow
- Hydraulic Jump
- Water Surface Profile

โดย รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์
ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2551

Types of Flow

		พิจารณาจากระยะทาง (x)		
		Uniform Flow dy/dx=0	Non-uniform Flow dy/dx=0	
			dy/dx ~ 0 Gradually Varied	dy/dx >> 0 Rapid Varied
พิจารณาจากเวลา (t)	Steady dQ/dt=0	Canal Design	Water Surface Profile	Hydraulic Jump
	Unsteady dQ/dt=0	Rare	Wave Problems -Dam Break -Gate Operations -Oscillating Wave	

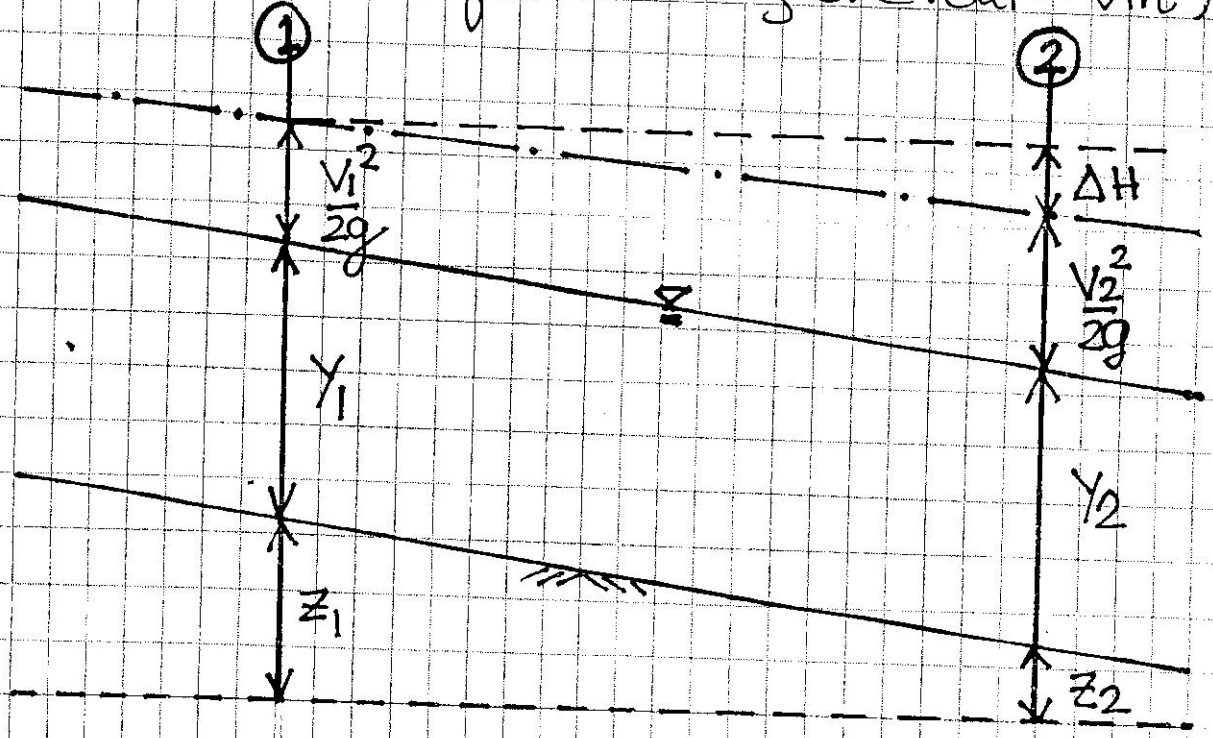


สมการพื้นฐานในการวิเคราะห์การไหลในทางน้ำเปิด

(1) Continuity Eq. : $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$

(2) Energy Eq. : $z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$

(3) Momentum Eq. : $\sum F = \rho Q (V_{out} - V_{in})$



Continuity Eq.

Steady Flow : $Q_1 = Q_2$

$V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$

$V_1 y_1 = V_2 y_2 = q$ (Rectangular)

Unsteady Flow : $\frac{\partial Q}{\partial x} + B\frac{\partial h}{\partial t} = 0$

Energy Eq. (Steady Flow)

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

Assume no energy loss $\rightarrow \Delta H = 0$

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \text{Constant}$$

$$\left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right) - \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) = z_1 - z_2 = \Delta z$$

$$E_1 - E_2 = \Delta z$$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = \text{Specific Energy}$$

$$= y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{(Rectangular Channel, } q = V$$

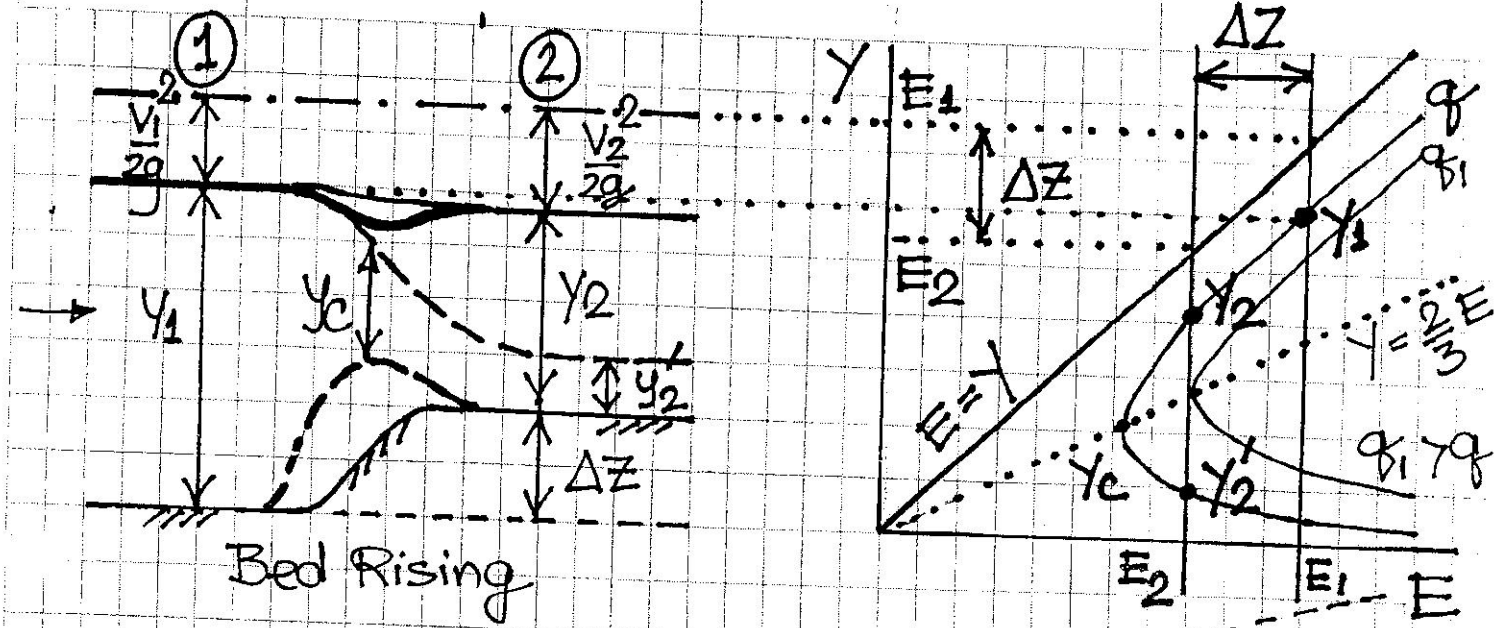
$$(E - y)y^2 = \frac{q^2}{2g} = \text{Constant} \quad \text{----(1)}$$

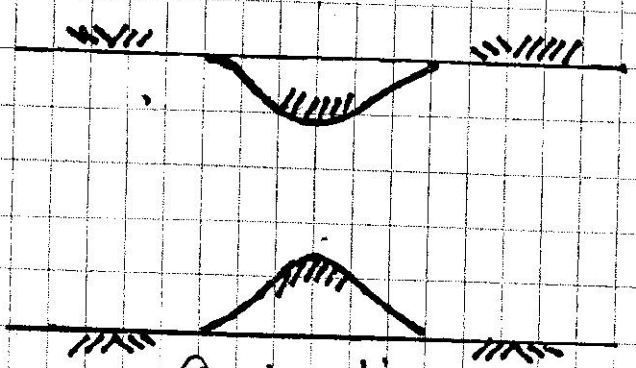
↓ Specific Energy Curve

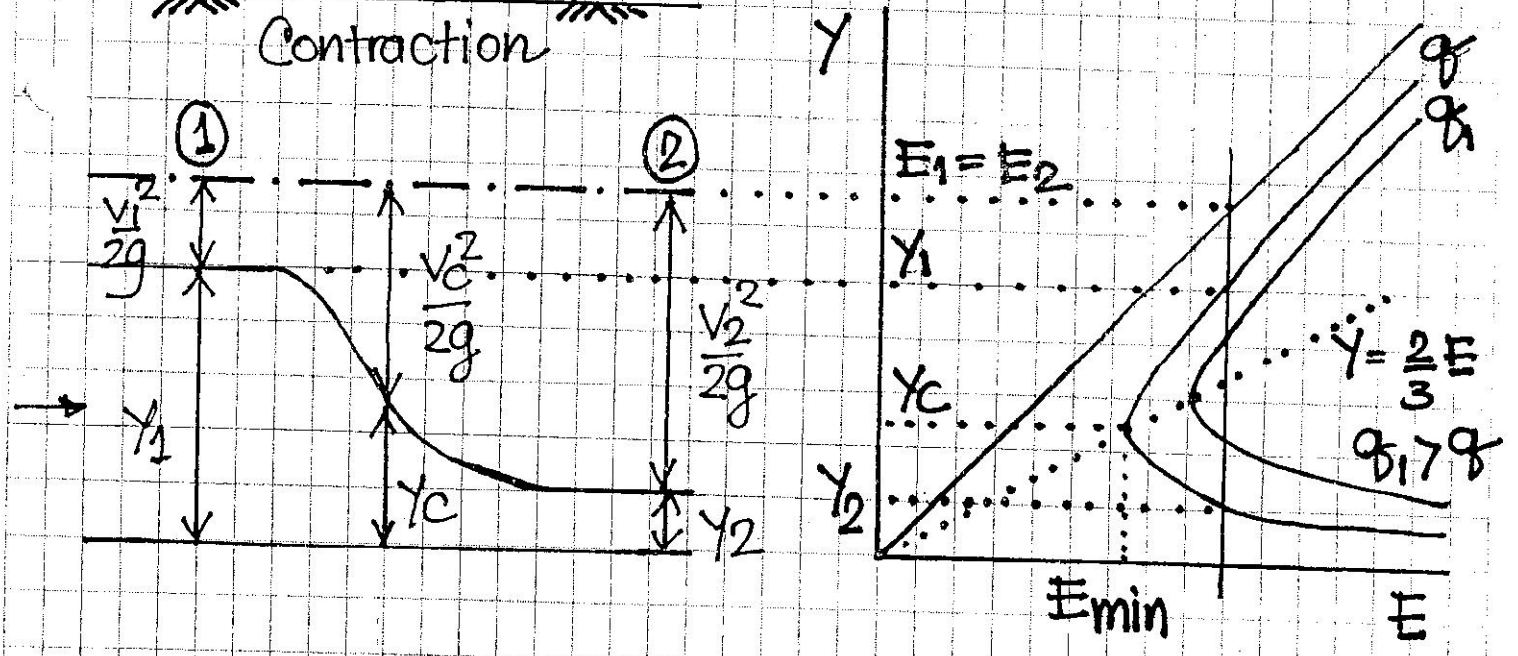
↓ Alternate Depths
(Subcritical / Supercritical Depths)

↓ Transition Problem

Given E, q $\rightarrow$ y มี 3 ค่า
(+, +, −)


1
2
$\frac{V_1^2}{2g}$
$\frac{V_2^2}{2g}$
y_1
y_c
y_2
Δz
Bed Rising
Y
E_1
E_2
Δz
q
q_1
y_1
y_2
$y = \frac{2}{3}E$
$E = Y$
y_c
$q_1 > q$
E_2
E_1
E


Contraction


1
2
$\frac{V_1^2}{2g}$
$\frac{V_c^2}{2g}$
$\frac{V_2^2}{2g}$
y_1
y_c
y_2
Y
$E_1 = E_2$
y_1
y_c
y_2
q
q_1
$y = \frac{2}{3}E$
$q_1 > q$
E_{min}
E
E-Y plane

Specific Energy (Rectangular Channel)

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{q^2}{gy^3} \quad (E = \text{Minimum at Critical Flow})$$

$$q^2 = gy_c^3 \longrightarrow y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

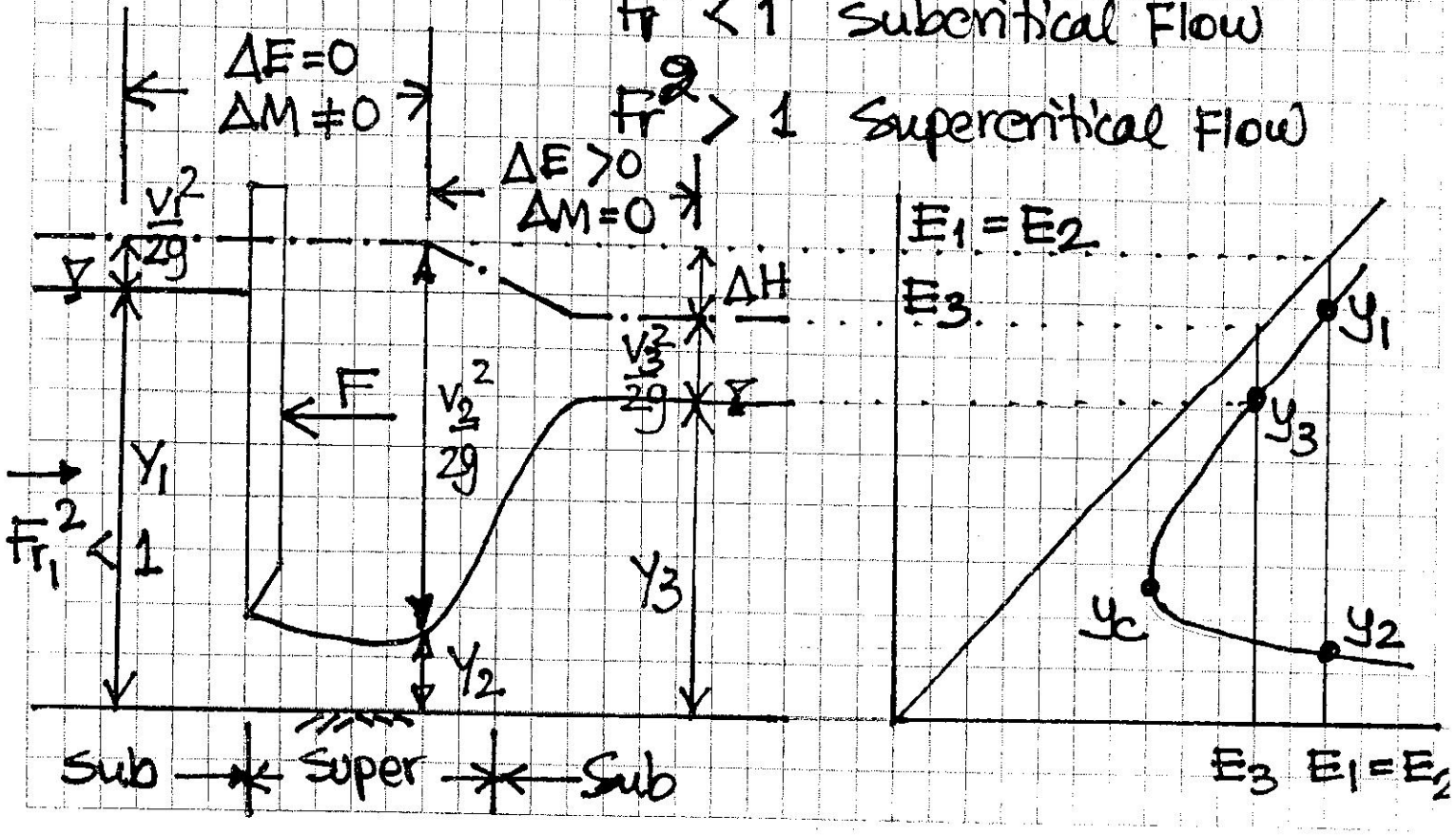
$$V_c^2 = gy_c \longrightarrow V_c = \sqrt{gy_c}$$

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

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gy} = \frac{q^2}{gy^3} = 1 \quad \text{at critical Flow}$$

$Fr^2 < 1$ Subcritical Flow

$Fr^2 > 1$ Supercritical Flow



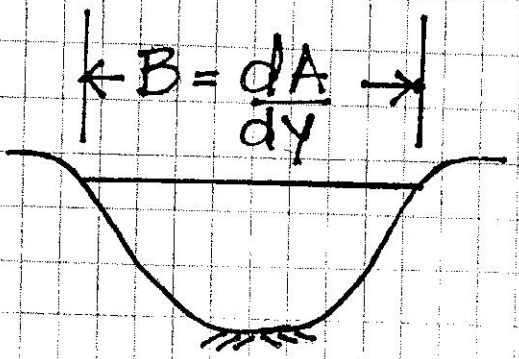
Non-rectangular channel

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

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

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3}\frac{dA}{dy}$$

$$= 1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}$$



Critical Flow $\frac{dE}{dy} = 0$ (E = min.)

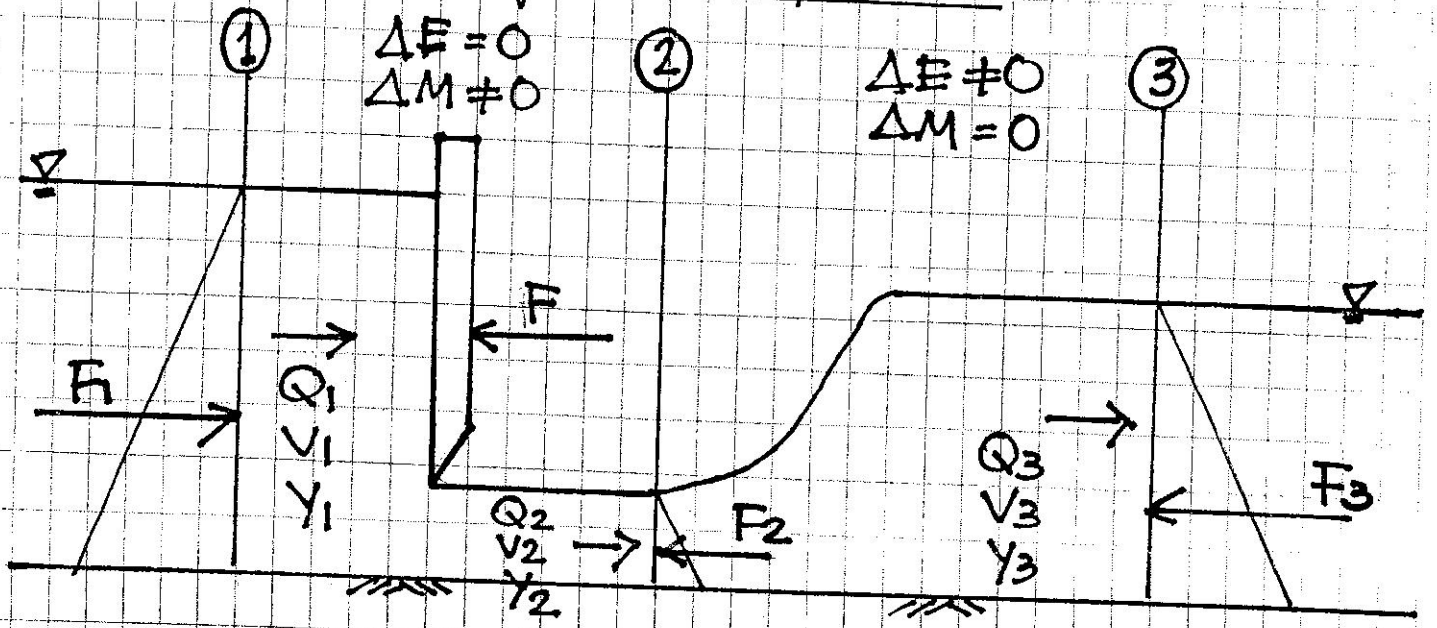
$$\frac{Q^2 B}{gA^3} = 1 = F_r^2$$

$$V_c = \sqrt{g\frac{A}{B}} = \sqrt{gD}$$

$$D = \frac{A}{B}$$

= Hydraulic Depth

Momentum Eq. (Steady Flow)



- Section ① - ②

$$\Sigma F = \rho Q(V_2 - V_1)$$

$$F_1 - F - F_2 = \rho Q(V_2 - V_1)$$

$$F = F_1 - F_2 - \rho Q(V_2 - V_1)$$

สมการรูปทั่วไป Unit Width (Rectangular Channel)

$$F = \frac{1}{2}\gamma Y_1^2 - \frac{1}{2}\gamma Y_2^2 - \rho q V_2 + \rho q V_1$$

$$= \frac{1}{2}\gamma Y_1^2 - \frac{1}{2}\gamma Y_2^2 - \rho \frac{q^2}{Y_2} + \rho \frac{q^2}{Y_1}$$

$$= \left(\rho \frac{q^2}{Y_1} + \frac{\gamma Y_1^2}{2}\right) - \left(\rho \frac{q^2}{Y_2} + \frac{\gamma Y_2^2}{2}\right)$$

$$\frac{F}{\gamma} = \left(\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2}\right) - \left(\frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2}\right)$$

$$\frac{F}{\gamma} = M_1 - M_2 = \Delta M$$

$$M = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2} = \text{Momentum Function (Rectangular)}$$

$$M = \frac{Q^2}{gA} + A\bar{y} \quad \text{(Non-rectangular)}$$

Hydraulic Jump (Section ② - ③)

$$F = 0$$

$$M_1 = M_2$$

$$\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2}$$

$$\frac{q^2}{g}\left(\frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2}\right) = \frac{1}{2}(y_2^2 - y_1^2)$$

$$\frac{q^2}{g}\left(\frac{y_2 - y_1}{y_1 y_2}\right) = \frac{1}{2}(y_2^2 - y_1^2)$$

$$\frac{q^2}{gy_1y_2} = \frac{1}{2}(y_2 + y_1)$$

$$Fr_1^2 = \frac{q^2}{gy_1^3} = \frac{1}{2}\frac{y_2}{y_1}\left(\frac{y_2}{y_1} + 1\right)$$

$$Fr_1^2 = \frac{1}{2}\frac{y_2}{y_1}\left(\frac{y_2}{y_1}+1\right)$$

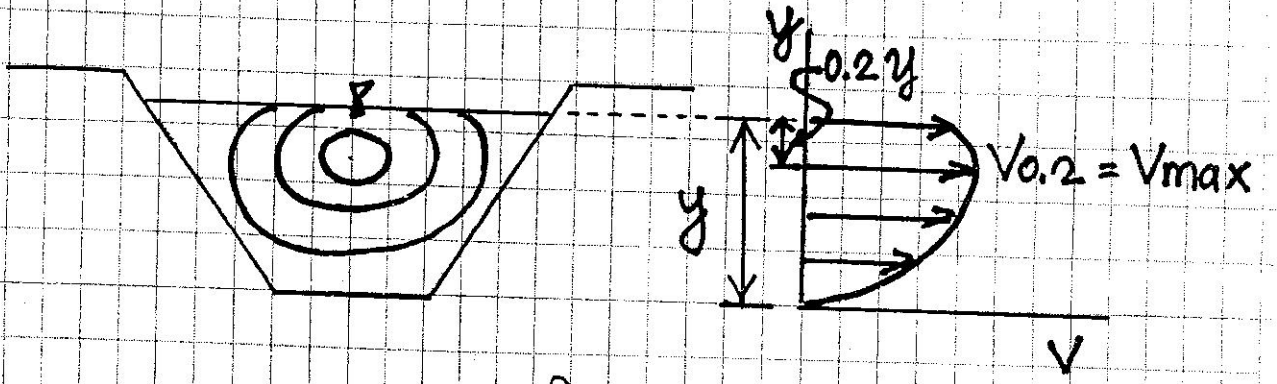
$$2Fr_1^2 = \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)$$

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right) - 2Fr_1^2 = 0$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{-1 \pm \sqrt{1+8Fr_1^2}}{2}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1\right)$$

กรณีที่ V ในหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ



Velocity Head $= \alpha \frac{V^2}{2g}$; α = Velocity Correction Coef

Momentum $= \beta \rho Q V_m$; β = Momentum Correction Coef.

$$\alpha = \frac{\sum V_i^3 A_i}{V_m^3 \sum A_i}$$

$$\beta = \frac{\sum V_i^2 A_i}{V_m^2 \sum A_i}$$

ค่า ศ.ปส. α และ β ของทางน้ำ

ทางน้ำเปิด	α			β		
	Min	Max	Mean	Min.	Max.	Mean
1. คลองส่งน้ำ รางน้ำ ฝาย	1.10	1.20	1.15	1.03	1.07	1.05
2. ทางน้ำธรรมชาติ	1.15	1.50	1.30	1.05	1.17	1.10
3. อ่องน้ำที่ไหลตามหุบเขา มีน้ำหลาก	1.50	2.00	1.75	1.27	1.33	1.25

Open Channel Hydraulics

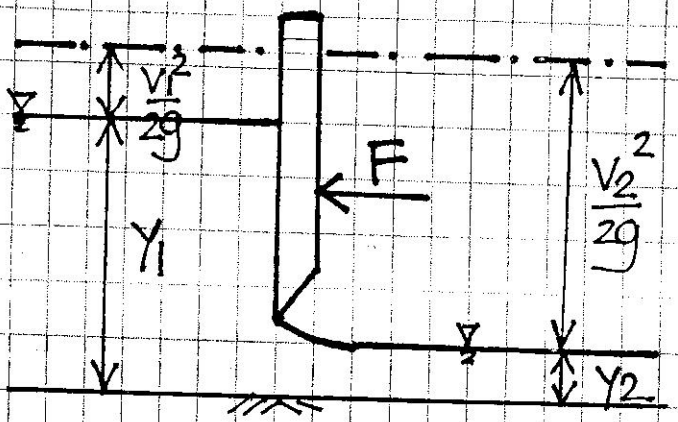
(1) Basic Analysis
Flow Through Structure
(Sluice gate)
(2) Normal Depth
Canal Design
(3) Critical Flow
Flow Control and
Flow Measurement
(4) Hydraulic Jump
Energy Dissipator
(5) Water Surface Profile
Direct Step Method

(1) Basic Analysis

การไหลของน้ำผ่าน ปตร.

EX. 5.2 จงคำนวณ Q ที่ไหลผ่าน Sluice Gate และหาแรง F ที่กระทำต่อ ปตร.

$B = 5$ m.
$y_1 = 3$ m.
$y_2 = 1$ m.
$\Delta E = 0$
$\alpha = 1$
$\beta = 1$



Assume Rectangular Channel ($A = By$)

Energy Eq.

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$3 + \frac{V_1^2}{2g} = 1 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{.....(1)}$$

Continuity Eq.

$$V_1 y_1 B = V_2 y_2 B$$

$$V_1 = \frac{V_2}{3}$$

แทนค่า $V_1 = \frac{V_2}{3}$ ลงใน (1)

$$3 + \frac{V_2^2}{18g} = 1 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{9V_2^2 - V_2^2}{18g} = 3 - 1$$

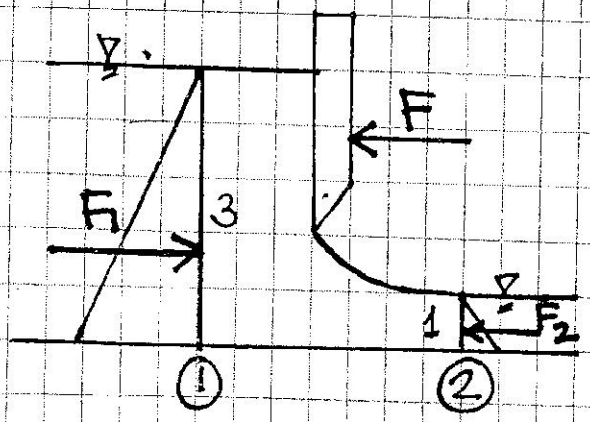
$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \times 18 \times 9.81}{8}} = 3\sqrt{\frac{9.81}{2}}$$

$$= 6.6 \text{ m/s}$$

$$V_1 = \frac{6.6}{3} = 2.2 \text{ m/s}$$

$$Q = V_2 A_2 = 6.6 \times 1 \times 5 = 33 \text{ m}^3/\text{s}$$

Momentum Eq.



$$q = V_1 Y_1 = V_2 Y_2$$

$$= 2.2 \times 3 = 6.6 \text{ m}^2/\text{s/m}$$

$$\Sigma F = \rho q (V_2 - V_1)$$

$$F_1 - F_2 - F = \rho q (V_2 - V_1)$$

$$F = \frac{1}{2}\gamma Y_1^2 - \frac{1}{2}\gamma Y_2^2 - \rho q (V_2 - V_1)$$

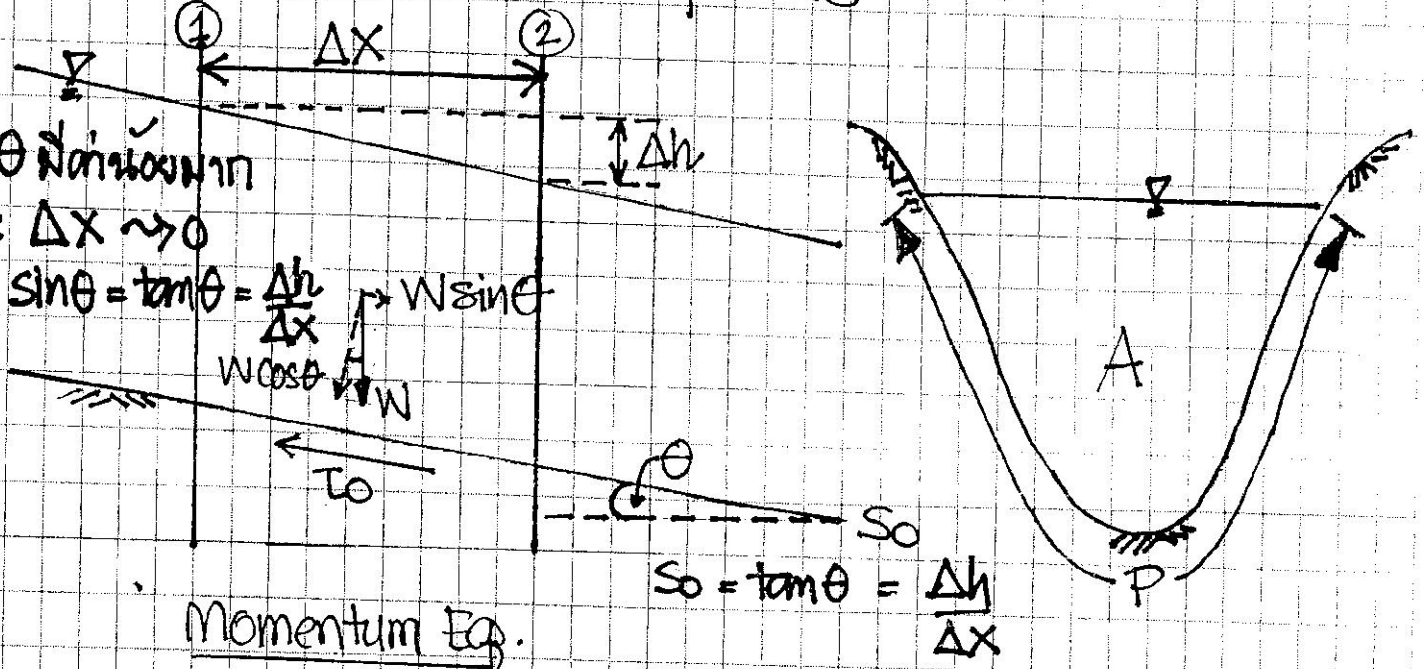
$$= \frac{1}{2} \times 9.81 \times 3^2 - \frac{1}{2} \times 9.81 \times 1^2 - 1 \times 6.6 (6.6 - 2.2)$$

$$= 10.2 \text{ kN/m}$$

$$F = 10.2 \times 5 = 51 \text{ kN}$$

(2) Normal Depth

• Uniform Flow : $S_f = S_o$



$$S_o = \tan\theta = \frac{\Delta h}{\Delta X}$$

Momentum Eq.

$$F_1 - F_2 - F_f + F_g = \rho Q(V_2 - V_1)$$

ที่ $F_1 = F_2$ และ $V_2 = V_1$

$$F_f = F_g$$

$$\tau_o . P \Delta X = \gamma A \Delta X \sin\theta$$

$$= \gamma A \Delta X \frac{\Delta h}{\Delta X}$$

$$\tau_o = \gamma . \frac{A}{P} . \frac{\Delta h}{\Delta X}$$

$$= \gamma . R . S_o$$

$$\tau_o = kV^2$$

$$kV^2 = \gamma R S_o$$

$$V = \sqrt{\frac{\gamma}{k}} \sqrt{R S_o}$$

$$= C\sqrt{R S_o} \quad \text{(Chezy)}$$

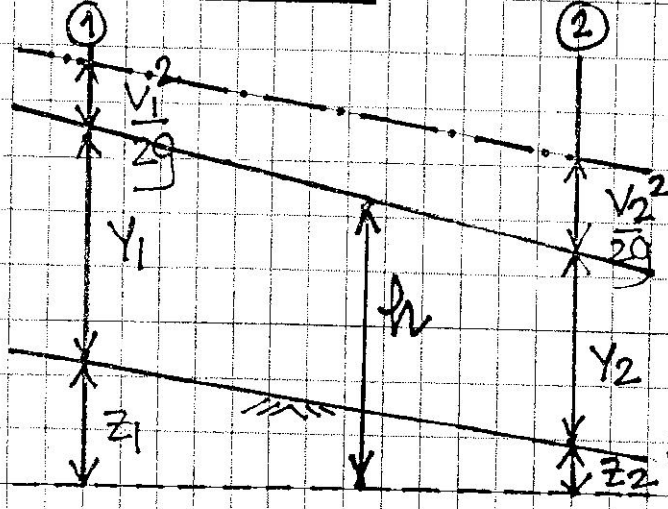
Manning's $C = \frac{R^{1/6}}{n}$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} \quad \text{(Metric)}$$

$$V = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} \quad \text{(English)}$$

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_o^{1/2} \quad \text{(Uniform Flow)}$$

General Form



$$\tau_o = \gamma R S_f$$

$$S_f = -\frac{\partial}{\partial x}\left(z + y + \frac{V^2}{2g}\right) - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$$

$$= -\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\frac{V^2}{2g} - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$$

$$= S_o - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial V^2/2g}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$$

Steady Uniform Flow

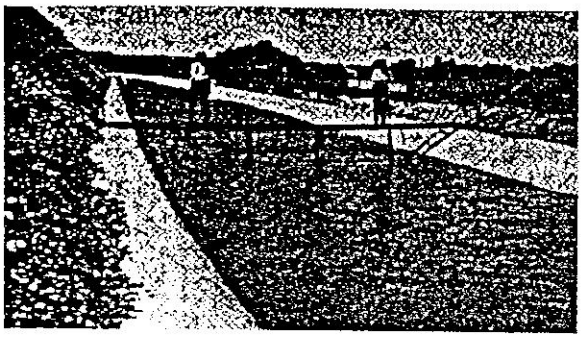
Steady Nonuniform Flow

Unsteady Nonuniform Flow

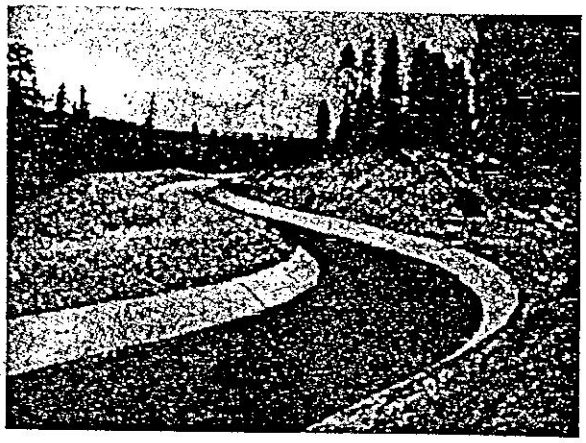
(Saint Venant Eq.)

ตารางที่ 5.5 สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning (อ้างอิง 40)

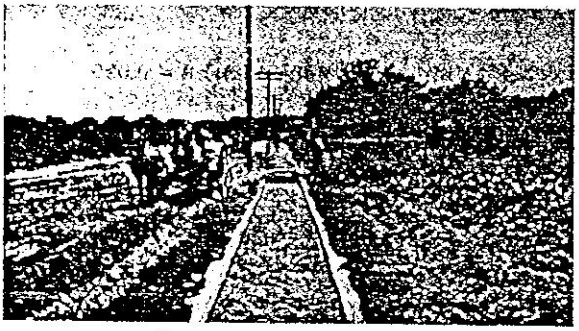
ลักษณะของผิวทางน้ำเปิด	n		
	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
(1) ทางน้ำเปิดธรรมชาติ (natural channel)			
- ท้องน้ำค่อนข้างเรียบ แนวตรง ระดับน้ำลึก	0.025	0.030	0.033
- ไหลช้าเนื่องจากท้องน้ำลึกเป็นช่วง ๆ	0.033	0.040	0.045
- ท้องน้ำมีหิน ข้าง ๆ มีวัชพืชรก	0.035	0.045	0.050
- ทางน้ำมีความชัน ท้องน้ำมีกรวดด้านข้าง ปกคลุมด้วยวัชพืช	0.030	0.040	0.050
(2) ฝั่งแม่น้ำที่มีน้ำท่วมถึง (flood plains)			
- ทุ่งหญ้าไม่สูงนัก	0.030	0.035	0.040
- ป่าละเมาะ หญ้ารก	0.035	0.050	0.070
- ไม้พุ่มเตี้ย	0.045	0.070	0.110
- ต้นไม้หนาแน่น	0.110	0.150	0.200
(3) ทางน้ำเปิดดินขุด (excavated earth channel)			
- แนวตรง หน้าตัดสม่ำเสมอ	0.018	0.022	0.025
- มีกรวดบ้าง	0.022	0.025	0.030
- เต็มไปด้วยหญ้าปกคลุม	0.025	0.030	0.033
- ขุดในหินและแต่งผิวค่อนข้างเรียบ	0.025	0.035	0.040
(4) ทางน้ำเปิดดาดผิว หรือแต่งผิวด้วยวัสดุใด ๆ (artificially lined channels)			
- ซีเมนต์ผิวเรียบ	0.010	0.011	0.013
- เหล็กลอนลูกฟูก	0.021	0.025	0.030
- เหล็กผิวเรียบไม่ทาสี	0.011	0.012	0.014
- เหล็กผิวเรียบทาสี	0.012	0.014	0.017
- เหล็กมีหมุดย้ำ	0.013	0.015	0.017
- เหล็กหล่อเคลือบผิว	0.010	0.013	0.014
- คอนกรีตขัดผิวเรียบ	0.011	0.013	0.015
- คอนกรีตผิวขัดหยาบ	0.013	0.015	0.016
- คอนกรีตด้านข้างมีกรวดที่ท้องคลอง	0.015	0.017	0.020
- ดาดคอนกรีตท้องคลองด้านข้างเรียงหิน	0.020	0.030	0.035
- คอนกรีตไม่ได้แต่งผิว	0.014	0.017	0.020
- ไม้ไสเรียบ	0.010	0.012	0.015
- ไม้ไม่ได้ไส	0.011	0.013	0.015
- ก่ออิฐฉาบปูนผิวเรียบ	0.011	0.013	0.015
- ก่ออิฐไม่ฉาบปูน	0.012	0.015	0.018
- ท้องคลองเป็นกรวดด้านข้างดาดคอนกรีต	0.017	0.020	0.025
- ท้องคลองเป็นกรวดด้านข้างปูหินยาแนว	0.020	0.023	0.026
- ท้องคลองเป็นกรวดด้านข้างเรียงอิฐหรือหิน	0.023	0.033	0.036



(ก) คลองดาดคอนกรีตแต่งผิวเรียบ n = 0.012



(ข) คลองที่ผนังคอนกรีตหล่อด้วยแบบผิวเรียบ n = 0.014



(ค) คลองส่งน้ำขนาดเล็กดาดด้วยคอนกรีต หน้าตัดคงรูปในแนวตรง n = 0.016

(ง) คลองขุดในดินเหนียว มีการตกตะกอนของโคลนทรายบริเวณท้องน้ำ n = 0.018

รูปที่ 5.11 ค่า n ของหน้าตัดทางน้ำเปิดลักษณะต่าง ๆ (อ้างอิง 40)

คำแนะนำ ค่า 'n' ที่ใช้การออกแบบ

n = 0.035 สำหรับทางน้ำที่มีก้อนกรวด หินขรุขระทั่วไป มีดินขรุขระเว้าแหว่งมาก หรือมีวัชพืชรกตลอดทาง

n = 0.030 ทางน้ำเป็นหินขุดหรือระเบิด คลองดินที่มีพืชปกคลุมบางแห่ง เช่น คู น้ำในแปลงนา

n = 0.025 ทางน้ำที่เป็นดินมีรูปตัดเรียบร้อยพอสมควร เช่น ท้าย spillway ซึ่งจะนำน้ำไปทิ้งลงลำน้ำเดิม

n = 0.016-0.018 คลองส่งน้ำดาดด้วยคอนกรีต

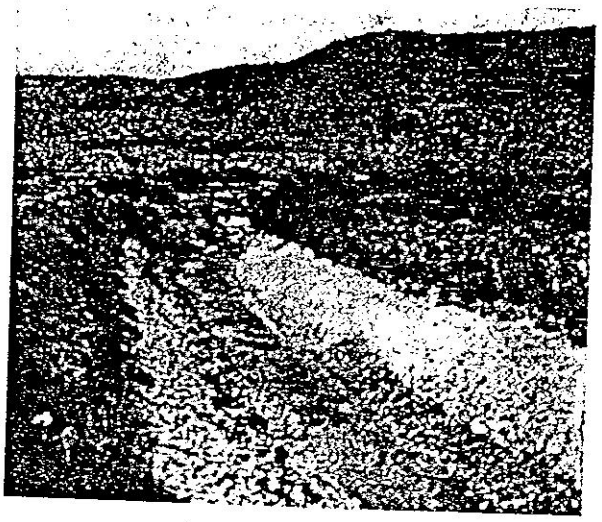
(ที่มา: กองออกแบบ กรมชลประทาน)

5.7.4 สัมประสิทธิ์ความขรุขระเทียบเท่า (equivalent roughness : n_e)

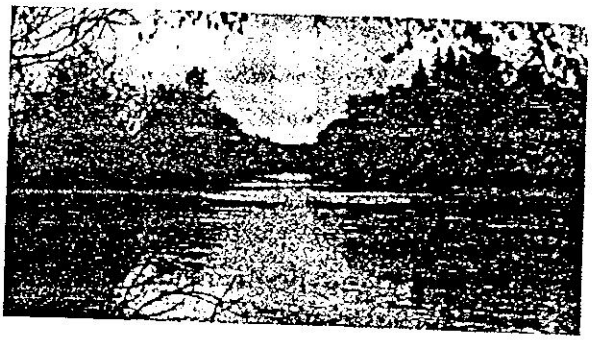
ในกรณีที่ทางน้ำมีค่า n หลายค่าดังรูปที่ 5.12 จึงต้องทำค่า 'n' ให้มีค่าเดียวเรียกว่า equivalent (n_e) สมการที่ใช้คำนวณได้แก่ สมการ (5.30), (5.31) และ (5.32) โดยอาศัยสมมติฐาน

$V_1 = V_2 = ... = V_n = V$ = ความเร็วเฉลี่ยเท่ากันทุก ๆ จุดบนหน้าตัดของการไหล

(จ) คลองขุดในดินเหนียวอ่อน มีการตกตะกอนที่ท้องน้ำ และมีวัชพืชด้านข้าง n = 0.029

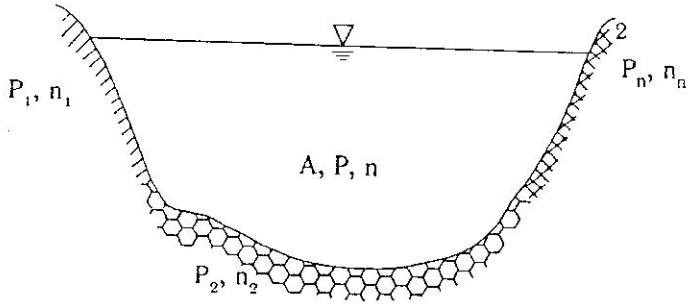


(ฉ) คลองที่มีหินคลอดท้องน้ำ n = 0.030



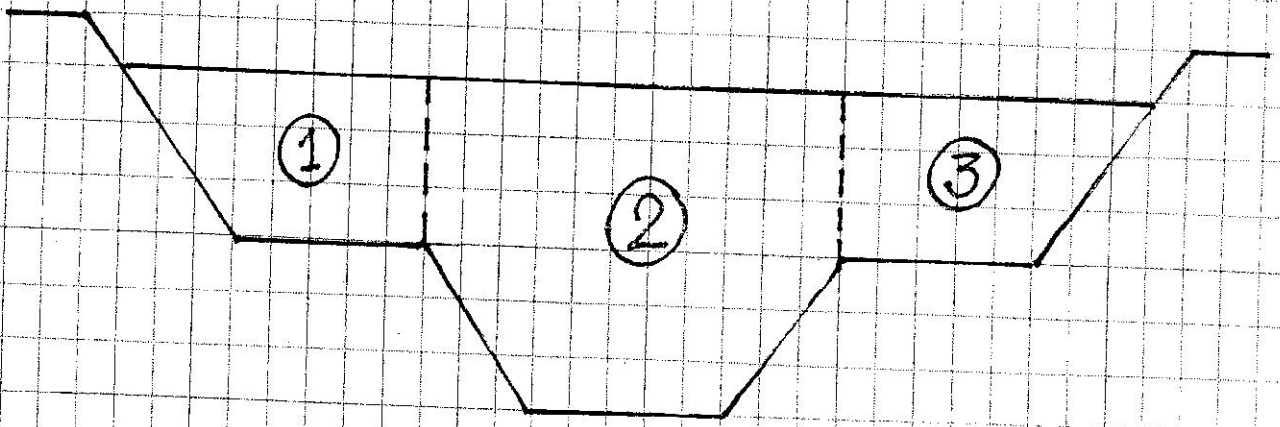
(ช) คลองธรรมชาติที่มีลาดด้านข้างและขนาดหน้าตัดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีทรายที่ท้องน้ำ n = 0.035

รูปที่ 5.11 (ต่อ)



รูปที่ 5.12 ทางน้ำเปิดที่มีวัสดุท้องน้ำหลายชนิด

กรณี Composite Section

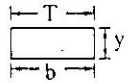
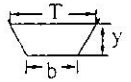
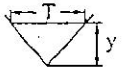
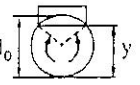
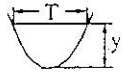
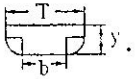
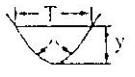


$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

$$= \frac{1}{n_1} A_1 R_1^{2/3} S^{1/2} + \frac{1}{n_2} A_2 R_2^{2/3} S^{1/2} + \frac{1}{n_3} A_3 R_3^{2/3} S^{1/2}$$

$$n = \frac{A R^{2/3}}{\frac{A_1 R_1^{2/3}}{n_1} + \frac{A_2 R_2^{2/3}}{n_2} + \frac{A_3 R_3^{2/3}}{n_3}}$$

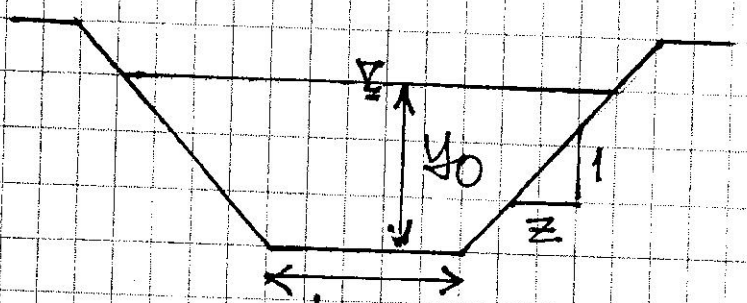
ตารางที่ 5.3 รูปร่างหน้าตัดทางน้ำเปิดและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (อ้างอิง 40)

หน้าตัด	พื้นที่ A	เส้นขอบเปียก P	รัศมีชลศาสตร์ R	ความกว้างผิวน้ำ T	ความลึกชลศาสตร์ D	ปัจจัยหน้าตัด Z
 สี่เหลี่ยมพื้นผ้า	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	$by^{1.5}$
 สี่เหลี่ยมคางหมู	$(b + Zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)\,y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
 สามเหลี่ยม	Zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	$\frac{y}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} zy^{2.5}$
 วงกลม	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)d_o^2$	$\frac{1}{2}\theta d_o$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)d_o$	$\frac{(\sin\frac{1}{2}\theta)d_o}{2\sqrt{y\,(d_o - y)}}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \sin\theta}{\sin\frac{\theta}{2}}\right)d_o$	$\frac{\sqrt{2}}{32}\frac{(\theta - \sin\theta)^{1.5}}{\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^{0.5}} d_o^{2.5}$
 โค้งพาราโบลา	$\frac{2}{3} Ty$	$T + \frac{8}{3}\frac{y^2}{T}$ *	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3}{2}\frac{A}{y}$	$\frac{2}{3} y$	$\frac{2}{9}\sqrt{6}Ty^{1.5}$
 สี่เหลี่ยมมุมโค้ง (y>r)	$\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)\,y$	$(\pi - 2)r + b + 2y$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2 + (b+2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	$b + 2r$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2}{b - 2r} + y$	$\frac{[(\pi/2 - 2)r^2 + (b+2r)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$
 สามเหลี่ยมมุมโค้ง	$\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z\cot^{-1}z)$	$\frac{T}{z}\sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z\cot^{-1}z)$	$\frac{A}{P}$	$2\left[z\,(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}\right]$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{T}}$

หมายเหตุ * ใช้ประมาณได้ในช่วง $0 < x \leq 1$ โดยที่ $x = 4y/T$ ส่วนในกรณีที่ $x > 1$ สามารถหาเส้นขอบเปียกได้จาก $P = (T/2)\,[\sqrt{1 + x^2} + 1/x\,\ln\,(x + \sqrt{1 + x^2})]$

Ex 5.10 จงหา y_o ของรางรูป □ คางหมู

$Q = 400$ cms
$S_o = 0.0016$
$z = 2$
$n = 0.017$
$b = 20$ m.



$$A = (b + zy_o)y_o$$

$$P = b + 2\sqrt{1+z^2}\,y_o$$

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

$$400 = \frac{1}{0.017}(20+2y_o)y_o\left[\frac{(20+2y_o)y_o}{20+2\sqrt{5}\,y_o}\right]^{2/3}(0.0016)^{1/2}$$

Trial & Error

$y_o = 3.36$ m.

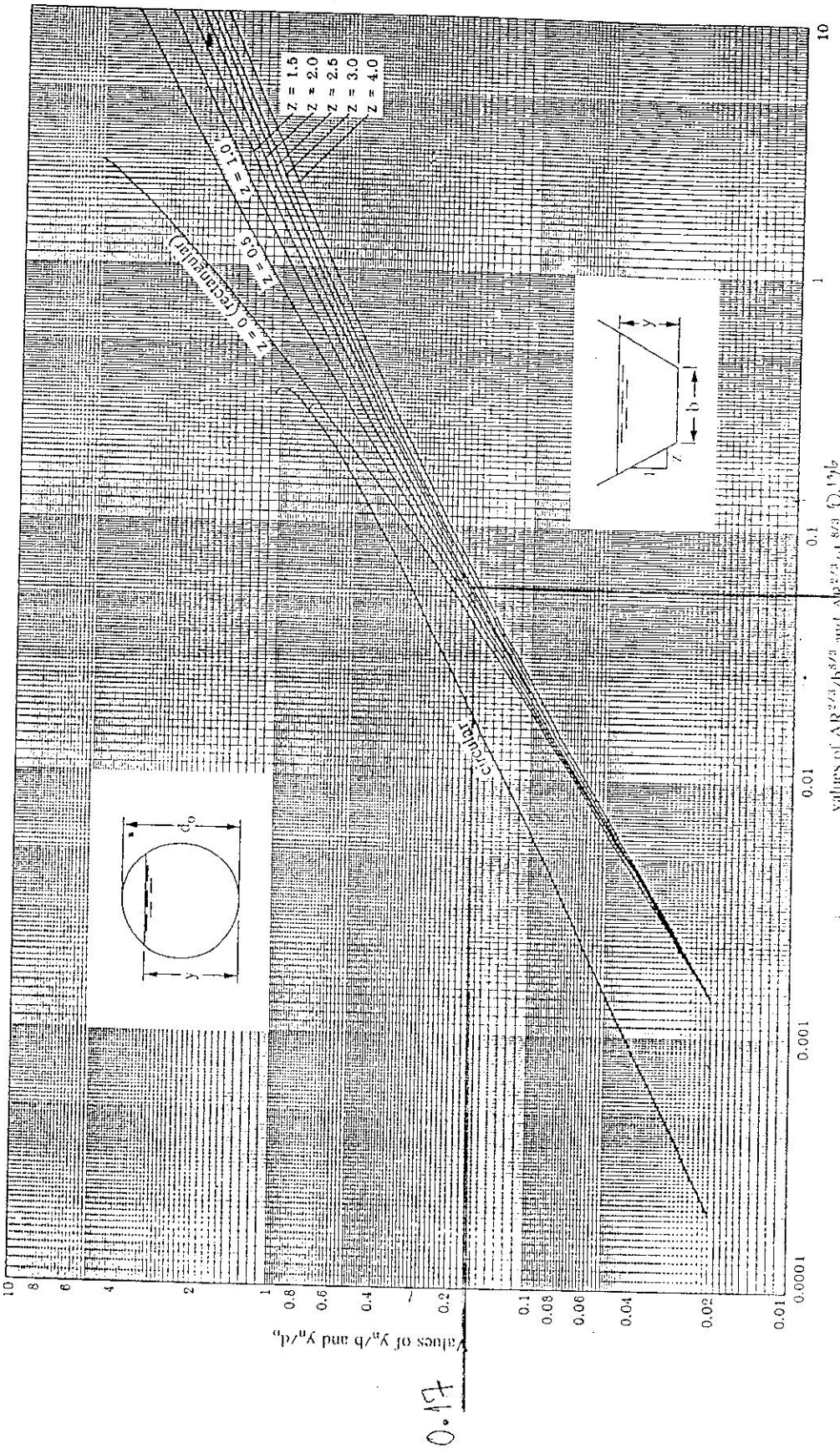
หรือ Graph

$$AR^{2/3} = \frac{Qn}{\sqrt{S_o}} = \text{Section Factor}$$

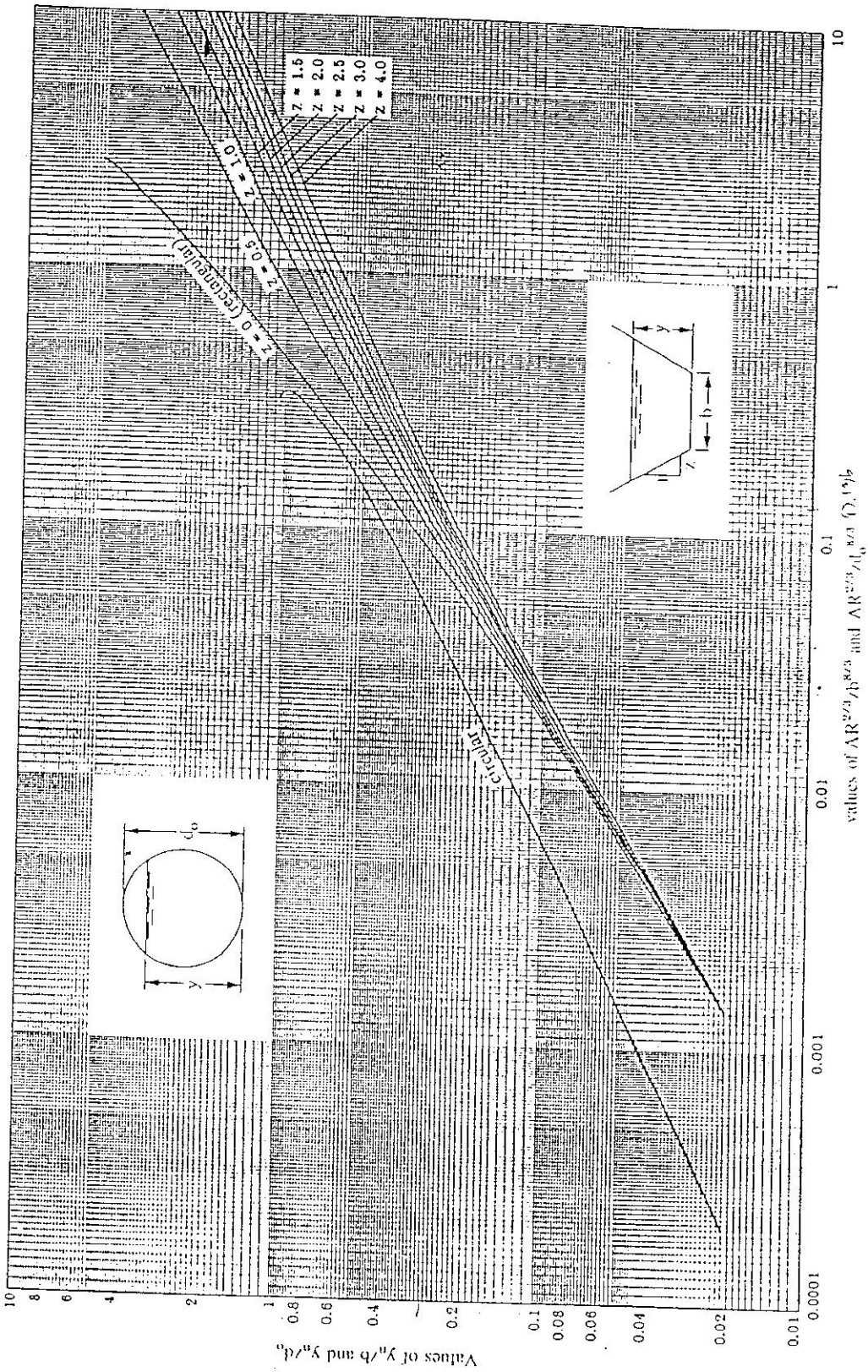
$$= \frac{400(0.017)}{\sqrt{0.0016}} = 170$$

$$\frac{AR^{2/3}}{b^{8/3}} = \frac{170}{20^{8/3}} = 0.05468$$

จาก Graph $\frac{y_o}{b} = 0.17 \longrightarrow y_o = 0.17 \times 5 = 3.4$ m



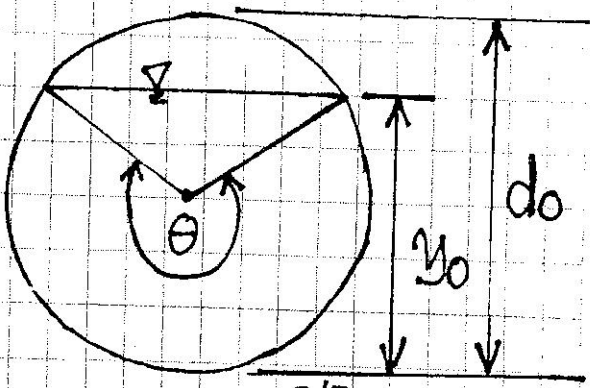
รูปที่ 5.14 แผนภูมิสำหรับหาค่าความลึกปกติ (ต่อจาก 40)



รูปที่ 5.14 แผนภูมิสำหรับหาค่าความลึกปกติ (ข้างอิง 40)

EX หาค่า y_0 ของท่อกลม ⊙

$Q = 400$ cms
$S_0 = 0.0016$
$d_0 = 10$ m.
$n = 0.017$



$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2}$$

$$400 = \frac{1}{0.017}\left(\frac{1}{8}\theta - \sin\theta\right)(10)^2\left[\frac{1}{4}\left(1-\frac{\sin\theta}{\theta}\right)10\right]^{2/3}(0.0016)^{1/2}$$

Trial & Error

$\theta = 3.566457$ radian
$= 204.3429°$

$$y_0 = \frac{d_0}{2}\left[1+\cos\left(\frac{360-\theta}{2}\right)\right]$$

$$= \frac{10}{2}\left[1+\cos\left(\frac{360-204.3429}{2}\right)\right]$$

$$= 5(1+0.2108) = 6.05 \text{ m.}$$

ใช้ Graph

$$AR^{2/3} = 170$$

$$\frac{AR^{2/3}}{d_0^{8/3}} = \frac{170}{10^{8/3}} = 0.36625$$

$$\frac{y_0}{d_0} = 0.61$$

$$y_0 = 0.61 \times 10 = 6.1 \text{ m.}$$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{q^2}{2gy^2} = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

$$\rightarrow \quad Fr^2 = \frac{V^2}{gy} = \frac{q^2}{gy^3} = \frac{Q^2 B}{gA^3} = 1 \quad \text{(Critical Flow)}$$

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

$$M = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2} = \frac{Q^2}{gA} + A\bar{y}$$

$$M_1 = M_2$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right)$$

$$\rightarrow \quad \frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1\right)$$

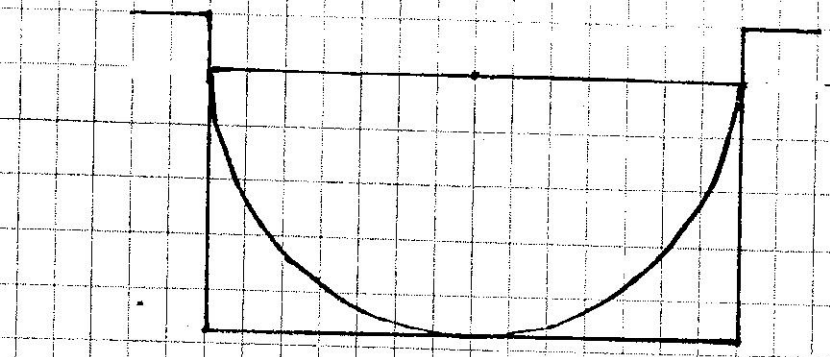
$$\rightarrow \quad V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2}$$

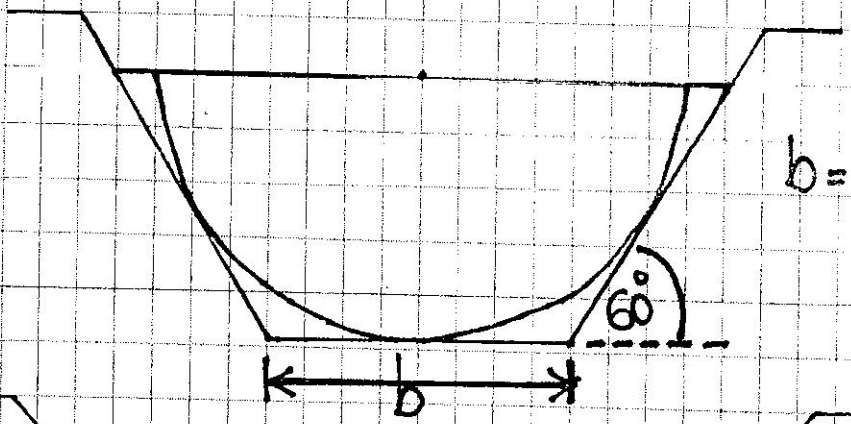
$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \qquad (n = 0.013 - 0.016)$$

Best Hydraulic Section

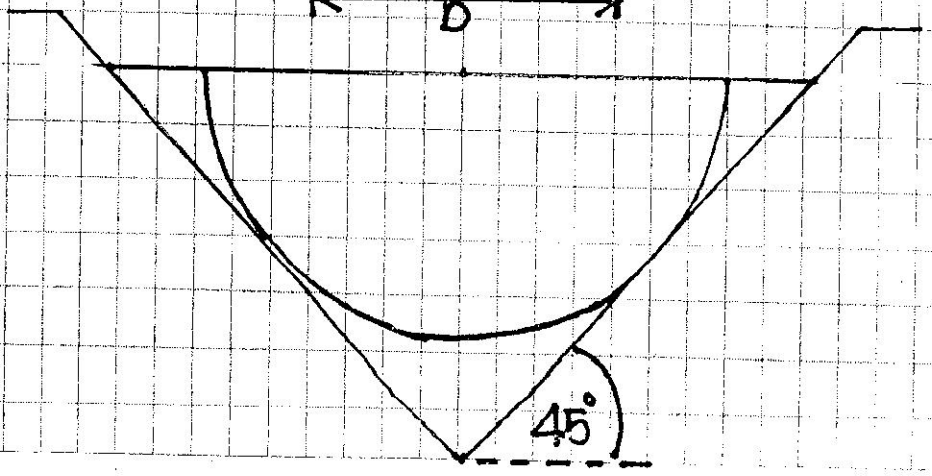
$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

P_{min} ← $R_{Max} \rightarrow V_{max}$
P_{min} ← Min. Friction
P_{min} → Min. Cost of Lining

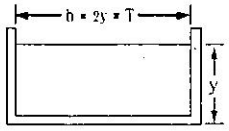
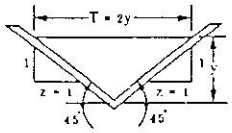
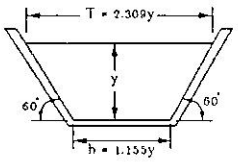
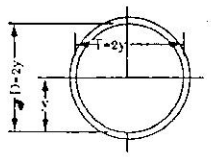




$$b = 2y\left(\sqrt{1+m^2} - m\right)$$



ตารางที่ 5.8 ตัวอย่างหน้าตัดที่ดีที่สุดทางชลศาสตร์

หน้าตัดทางน้ำเปิด	พื้นที่ A	เส้นขอบเปียก P	รัศมีชลศาสตร์ R	รัศมีชลศาสตร์ D	$AR^{2/3}$	ความลึกปกติ y หรือ y_n
	$1.682\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/4}$ หรือ $2y^2$	4y	y/2	y	$2y^{2.5}$	$0.917\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/8}$
	$1.682\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/4}$ หรือ y^2	2.83y	0.354y	0.5y	$0.707y^{2.5}$	$1.297\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/8}$
	$1.622\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/4}$ หรือ $1.73y^2$	3.46y	y/2	0.75y	$1.5y^{2.5}$	$0.968\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/8}$
	$1.583\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/4}$ หรือ $\frac{1}{2}\pi y^2$	πy	y/2	0.786y	$0.785y^{2.5}$	$\left[\frac{nQ}{S_o^{1/2}}\right]^{3/8}$

(ปรับปรุงจากอ้างอิง 2 และอ้างอิง 26)

Erodible Channel

$$\tau_o = \gamma R S_o \quad \text{(Max. Shear Stress)}$$

$$R = \frac{\tau_o}{\gamma S_o}$$

$$V_o = \frac{1}{n}\left(\frac{\tau_o}{\gamma S_o}\right)^{2/3} S_o^{1/2} \quad \text{(Max. Velocity)}$$

Table Tractive Force (τ_o)

Type of Soil	τ_o (kg/m^2)	
	Clean Water	Water Containing Colloids
Fine Sand, Sandy Loam	0.15	0.35
Silty Loam, Loam	0.25	0.75
Clay, Fine Gravel	0.35	0.75
Mixture of Silt and Gravel	1.20	2.20
Hard Clay, Gravel	1.50	3.30

ตารางที่ 5.6
ความเร็วของการไหลสูงสุดและหน่วยแรงฉุดสูงสุดที่ยอมให้สำหรับผิวคลองที่กัดเซาะได้ชนิดต่างๆ ซึ่งความลึกของการไหลไม่เกิน 0.9 ม.(3ft) (Fortier และ Scobey)

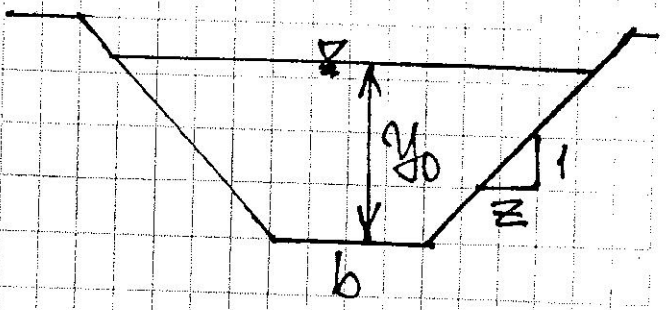
วัสดุ (material)	n	น้ำใส (Clear water)		น้ำมีตะกอนทรายปะปน(water transporting colloidal silts)	
		V m/s	τ_o N/m^2	V m/s	τ_o N/m^2
ทรายละเอียด	0.020	0.457	1.292	0.762	3.591
ดินเหนียวแข็งปนทราย	0.020	0.533	1.771	0.762	3.591
ดินเหนียวแข็งปนทรายละเอียด	0.020	0.610	2.298	0.914	5.267
ดินตะกอนแข็ง	0.020	0.610	2.298	1.067	7.182
ดินเหนียว	0.020	0.762	3.591	1.067	7.182
ขี้เถาภูเขาไฟ	0.020	0.762	3.591	1.067	7.182
ดินเหนียวแข็ง	0.025	1.143	12.448	1.524	22.024
ดินตะกอนร่วน	0.025	1.143	12.448	1.524	22.024
หินหรือดินดาน	0.025	1.829	32.078	1.829	32.078
กรวดขนาดเล็ก	0.020	0.762	3.591	1.524	15.321
ดินเหนียวปนกรวด	0.030	1.143	18.193	1.524	31.559
ดินทรายปนกรวด	0.030	1.219	20.587	1.676	38.302
กรวดหยาบ	0.025	1.219	14.363	1.829	32.078
กรวดหรือหินใหญ่	0.035	1.524	43.669	1.676	52.666

ตารางที่ 5.7

ความลาดด้านข้างที่เหมาะสมสำหรับผิวคลองชนิดต่างๆ (อ้างอิง 40)

วัสดุ (material)	ลาดด้านข้าง (side slope) (x : y)
หินแข็ง	เกือบเป็นแนวดิ่ง
ดินร่วนมีวัชพืชปน	0.25:1
ดินเหนียวแข็งดาดคอนกรีต	0.5:1 to 1:1
ดาดด้วยหินใหญ่หรือคลองที่มีหน้าตัดกว้าง	1:1
ดาดด้วยดินเหนียวหรือคลองขนาดเล็ก	1.5:1
ทรายหลวม	2:1
ทรายละเอียดหรือดินเหนียวที่น้ำซึมผ่านได้	3:1

EX $Q = 50\ m^3/s$
$S_0 = 0.0015$
$n = 0.025$
$z = 2$
$\tau_0 = 2\ kg/m^2$



หาค่า b และ y_0

$$R = \frac{\tau_0}{\gamma S} = \frac{2}{1{,}000 \times 0.0015}$$

$$= \frac{4}{3}\ m.$$

$$V_0 = \frac{1}{0.025}\left(\frac{4}{3}\right)^{2/3}(0.0015)^{1/2}$$

$$= 1.88\ m/s$$

$$A = \frac{Q}{V_0} = \frac{50}{1.88} = 26.6\ m^2$$

$$P = \frac{A}{R} = \frac{26.6}{\frac{4}{3}} = 20\ m$$

$$(b + 2y_0)y_0 = 26.6$$

$$b + 2\sqrt{5}\,y_0 = 20.0$$

$$b = 20 - 2\sqrt{5}\,y_0$$

$$(20 - 2\sqrt{5}\,y_0 + 2y_0)y_0 = 26.6$$

$$[20 - 2(\sqrt{5}-1)y_0]y_0 = 26.6$$

$$20y_0 - 2(\sqrt{5}-1)y_0^2 = 26.6$$

$$2(\sqrt{5}-1)y_0^2 - 20y_0 + 26.6 = 0$$

$$y_0 = \frac{-(-20) \pm \sqrt{(-20)^2 - 4 \times 2(\sqrt{5}-1)26.6}}{2 \times 2(\sqrt{5}-1)}$$

$$= \frac{20 \pm 11.703}{4.9443}$$

$$= 6.41, 1.68 \text{ m.}$$

$y_0 = 6.41$; $b = 20 - 2\sqrt{5}(6.41) = -8.68$ m (Not OK)

→ $y_0 = 1.68$; $b = 20 - 2\sqrt{5}(1.68) = 12.50$ m (OK)

การออกแบบคลอง (Canal Design)

1. สมมติ Uniform Flow
2. Vmax < Vo (Erodible Velocity)
   ดู Vo จากตารางที่ 5.6
3. Vmin > Vo' (Silting Velocity)
   Vo' = 0.6-0.9 m/s น้ำค่อนข้างใส ไม่มีตะกอน
   Vo' = 0.76 m/s ป้องกันวัชพืชน้ำเจริญเติบโต
   F_f > 0.12 ป้องกันตกตะกอน

จากตำราการวางแผนและออกแบบระบบส่งน้ำชลประทาน

$V_o = CD^m$ m/s (Kennedy Critical Velocity)

$C = 0.365 - 0.770$

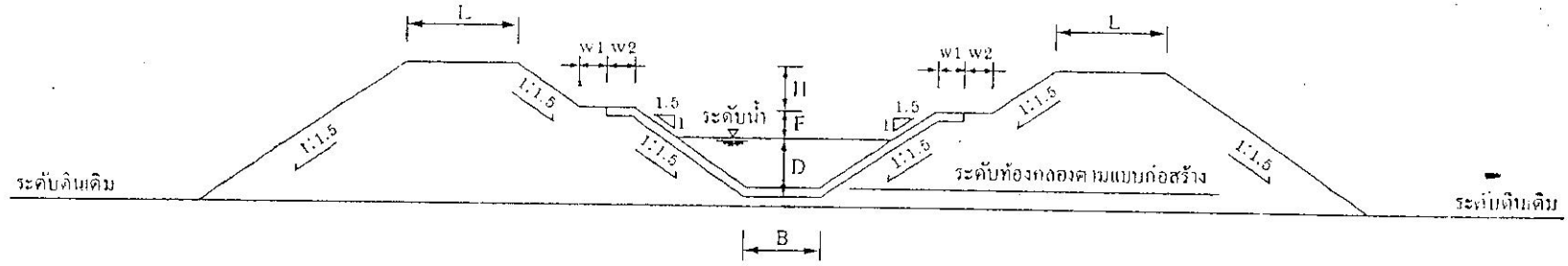
- 0.770 ใช้: กรณีทางชลศาสตร์และชลน้ำ
- 0.365 ใช้: กรณีทั่วไปและเหมาะ

$m = 0.64 - 0.66$

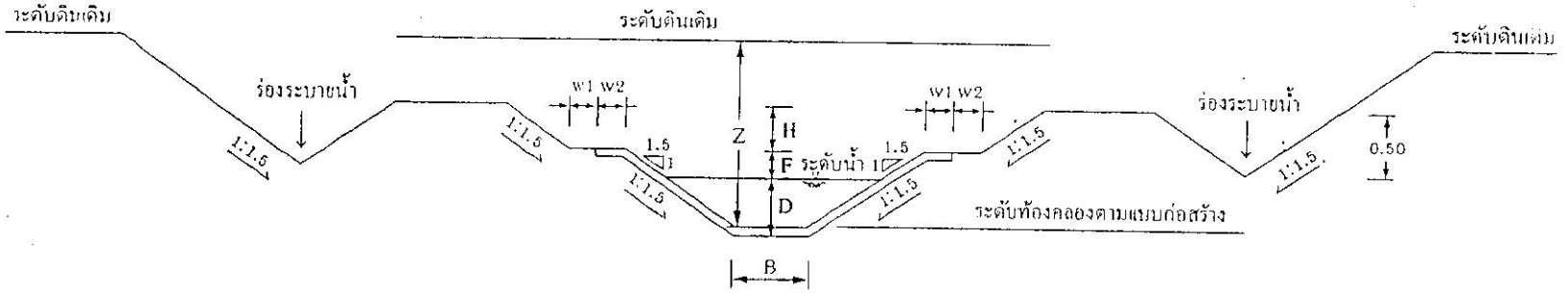
$D = \frac{A}{T}$ = Hydraulic Depth

$\frac{V}{V_o} = 0.8 - 1.10$

	Freeboard (F), m.
คูน้ำขนาดเล็ก	0.30
คลองขนาดเล็ก	0.50
คลองขนาดกลาง	$0.30 + 0.25 y_o$
คลองขนาดใหญ่	1.50 - 2.0



รูปตัดทั่วไปของคลองลอย



รูปตัดทั่วไปของคลองจม

(ข) รูปตัดทั่วไปของคลองส่งน้ำดาดคอนกรีต (กรมชลประทาน)

รูปที่ 5.17 (ต่อ)

Critical Flow

- Transition Problem (E-y Diagram)
- Flow Control
- Flow Measurement

Critical Flow

$$Fr^2 = 1$$

- Non-rectangular

$$\frac{Q^2 B}{g A^3} = 1$$

$$\frac{V_c^2 B}{g A} = \frac{V_c^2}{g \frac{A}{B}} = \frac{V_c^2}{gD} = 1 \; ; \left(D = \frac{A}{B}\right)$$

$$V_c = \sqrt{gD}$$

Rectangular

$$D = \frac{A}{B} = y$$

$$\frac{V_c^2}{g y_c} = 1 \longrightarrow V_c = \sqrt{g y_c}$$

$$\frac{q^2}{g y_c^3} = 1 \longrightarrow y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \longrightarrow q = \sqrt{g y_c^3}$$

$$\longrightarrow y_c = \frac{2}{3} E$$

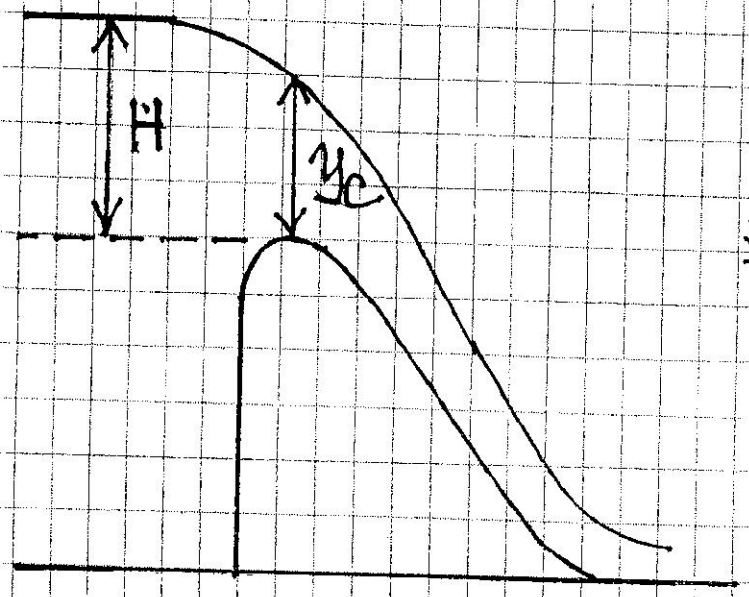
$$q = \sqrt{g y_c^3}$$

$$= \sqrt{g}\, y_c^{3/2}$$

$$Q = \sqrt{g}\, L y_c^{3/2}$$

$$= \sqrt{9.81}\, L y_c^{3/2}$$

$$= 3.132\, L y_c^{3/2}$$



Spillway Discharge

$$Q = C L H^{3/2}$$

$$C \approx 2.197$$

Ex ทางน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

$B = 5$ m., $z = 2$, $Q = 45$ cms

หา y_c

$$\frac{Q^2 B}{g A^3} = 1$$

$$\frac{45^2 (5)}{9.81[(5+2y_c)y_c]^3} = 1$$

$$\frac{1032.11}{[(5+2y_c)y_c]^3} = 1$$

$$(5+2y_c)y_c = 10.11$$

$$5y_c + 2y_c^2 = 10.11$$

$$2y_c^2 + 5y_c - 10.11 = 0$$

$$y_c = \frac{-5 \pm \sqrt{25+4(2)(10.11)}}{2(2)}$$

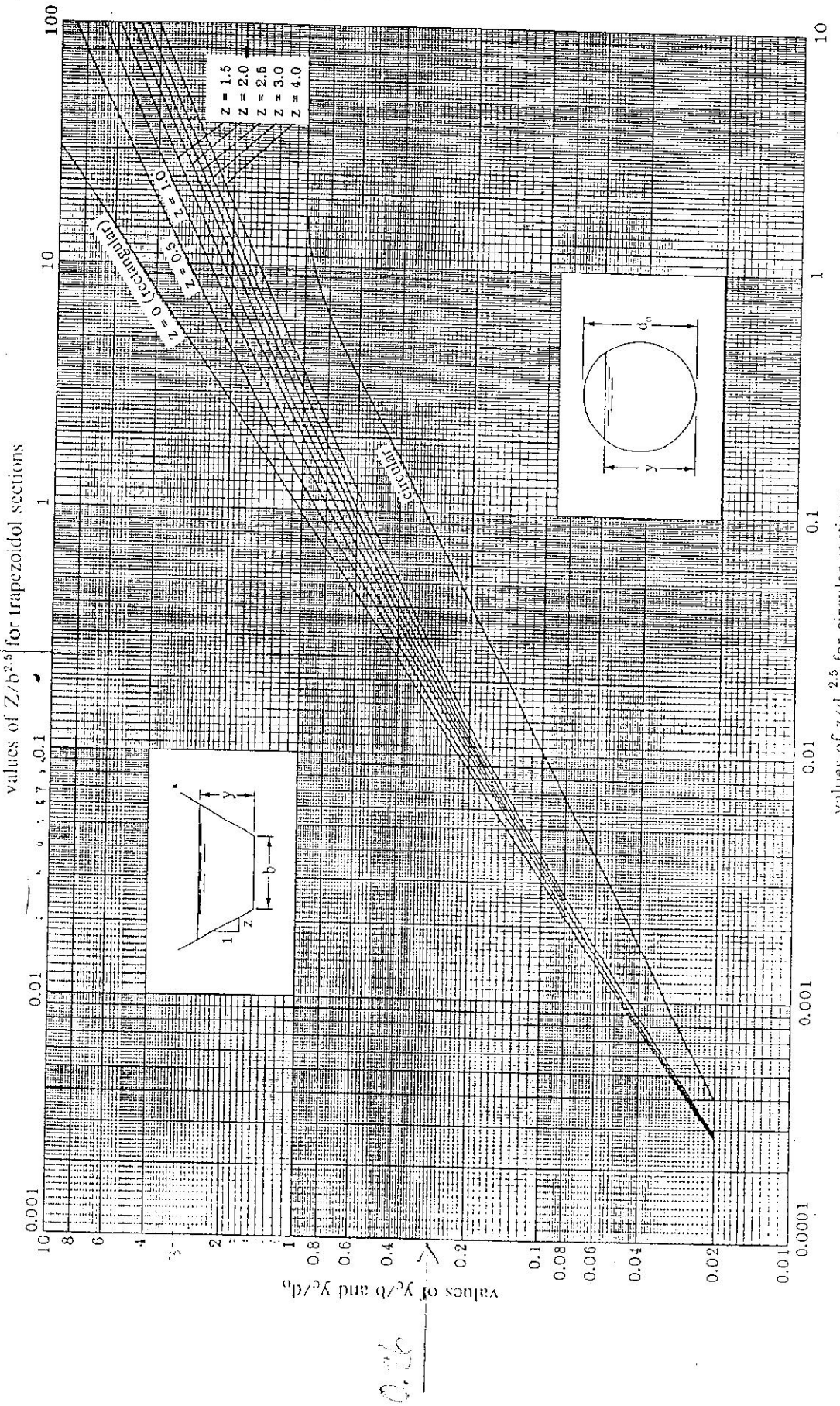
$$= \frac{-5 \pm 10.29}{4} = 1.32 \text{ m.}$$

หรือ Graph

$$\frac{z}{B^{2.5}} = \frac{\sqrt{\frac{Q^2}{g}}}{B^{2.5}} = \frac{\sqrt{\frac{45^2}{9.81}}}{5^{2.5}} = 0.257$$

จาก Graph ② $z = 2 \rightarrow \frac{y_c}{B} = 0.26 \rightarrow y_c = 0.26 \times 5$

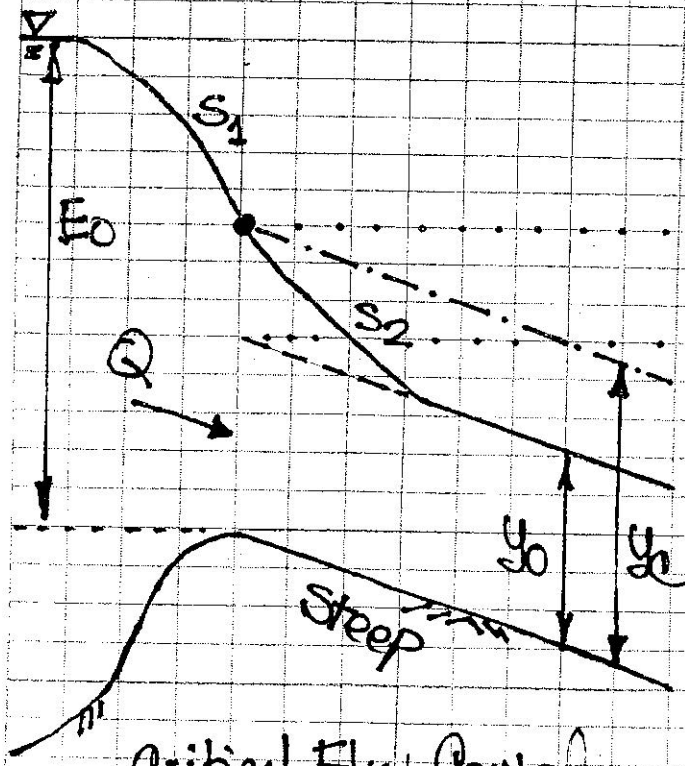
$= 1.3$



รูปที่ 5.10 แผนภูมิสำหรับหาค่าความลึกวิกฤต (critical depth) (อ้างอิง 40)

Discharge Problem

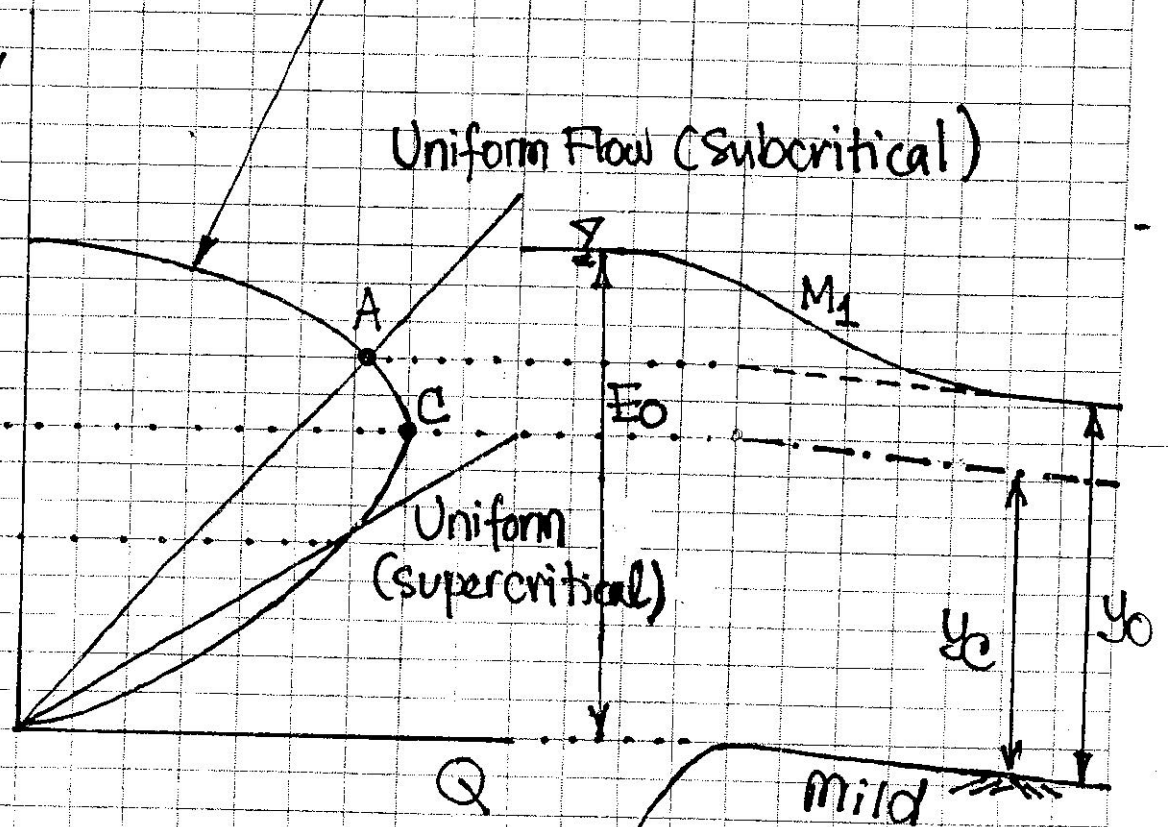
- Long Channel (No d/s Effect)
- Q ∝ Channel Slope

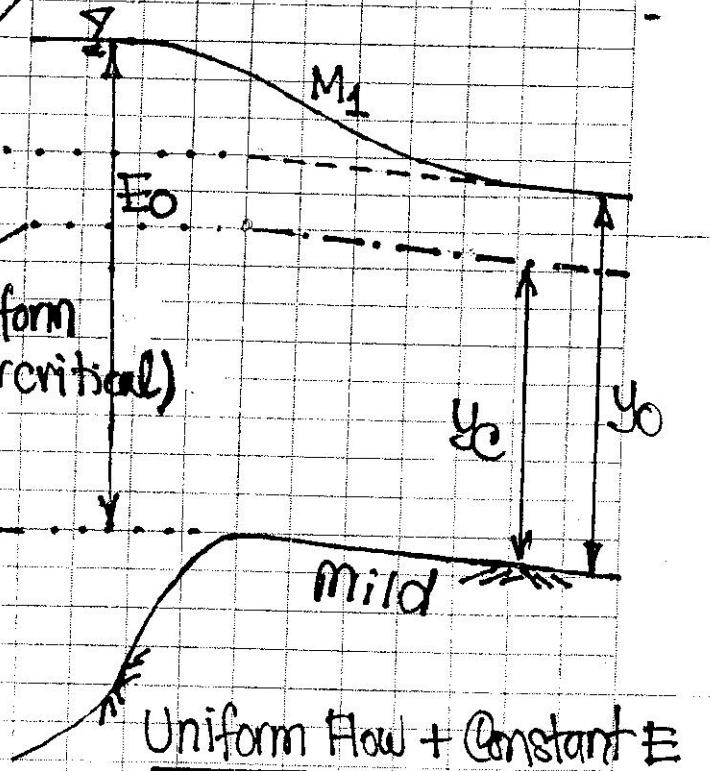


Critical Flow Control

$$y_c = \frac{2}{3} E_0$$

$$q_f = \sqrt{g y_c^3}$$



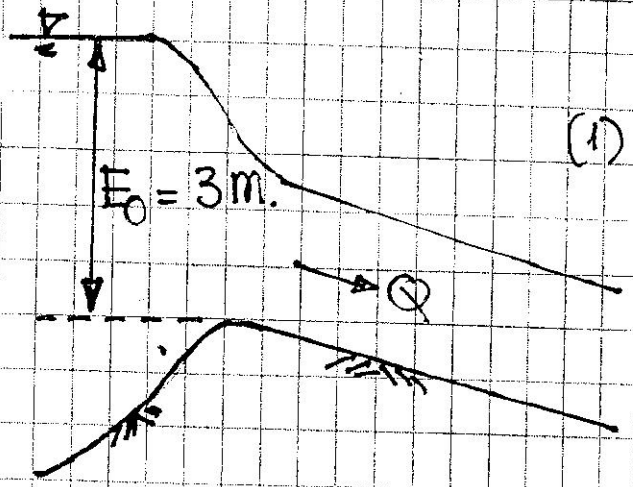


Uniform Flow + Constant E

$$E_0 = y_0 + \frac{V^2}{2g}$$

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

EX ช่องน้ำไหลออกจากทะเลสาบ (แหล่งน้ำ) เข้าสู่ทางน้ำ [ม]
กว้าง (B) = 5 m. , n = 0.014 ก้นระดับน้ำในทะเลสาบสูงกว่าก้นทางน้ำ 3 m.
จงหา Q ที่ (1) $S_0 = 0.01$
(2) $S_0 = 0.001$



(1) สมมติ $S_0 = 0.01$ = Steep

$$y_c = \frac{2}{3} E_0$$

$$= \frac{2}{3} \times 3 = 2 \text{ m}$$

$$q = \sqrt{g y_c^3}$$

$$= \sqrt{9.81 \times 2^3}$$

$$= 8.86 \text{ CMS/m}$$

$$Q = qB$$

$$= 8.86 \times 5$$

$$= 44.3 \text{ CMS}$$

ตรวจสอบว่า $S_0 = 0.01$ = Steep slope $\left[Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2}\right]$

$$44.3 = \frac{1}{0.014} (5y_0) \left[\frac{5y_0}{5+2y_0}\right]^{2/3} \sqrt{0.01}$$

Trial & Error

$y_0 = 1.35$ m $< y_c$ (Steep Slope)

$\therefore Q = 44.3$ cms

(2) $S_0 = 0.001$

$$44.3 = \frac{1}{0.014}(5y_0)\left[\frac{5y_0}{5+2y_0}\right]^{2/3}\sqrt{0.001}$$

$y_0 = 3.15$ m $> y_c$ (Mild Slope)

แสดงว่า Q น้อยกว่า 44.3 cms

$$3 = y_0 + \frac{V^2}{2g} \quad \text{...(1)}$$

$$V = \frac{1}{0.014}\left[\frac{5y_0}{5+2y_0}\right]^{2/3}\sqrt{0.001} \quad \text{...(2)}$$

แทนค่า (2) ลงใน (1)

$y_0 = 2.64$ m

$V = 2.67$ m/s

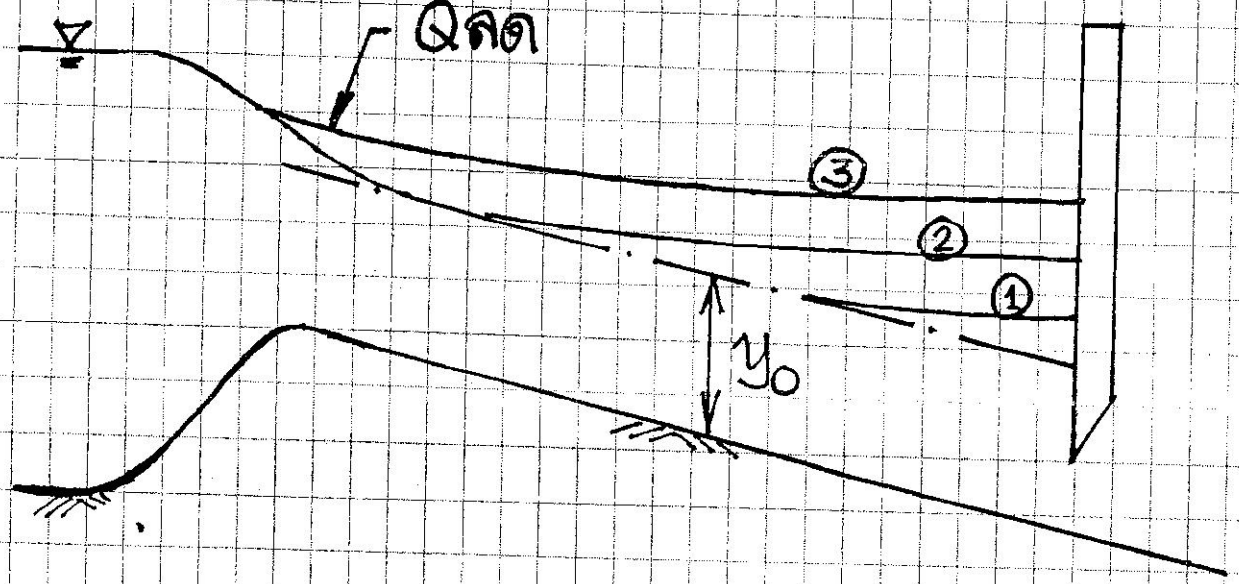
$Fr = \frac{2.67^2}{9.81 \times 2.64} = 0.52 < 1$

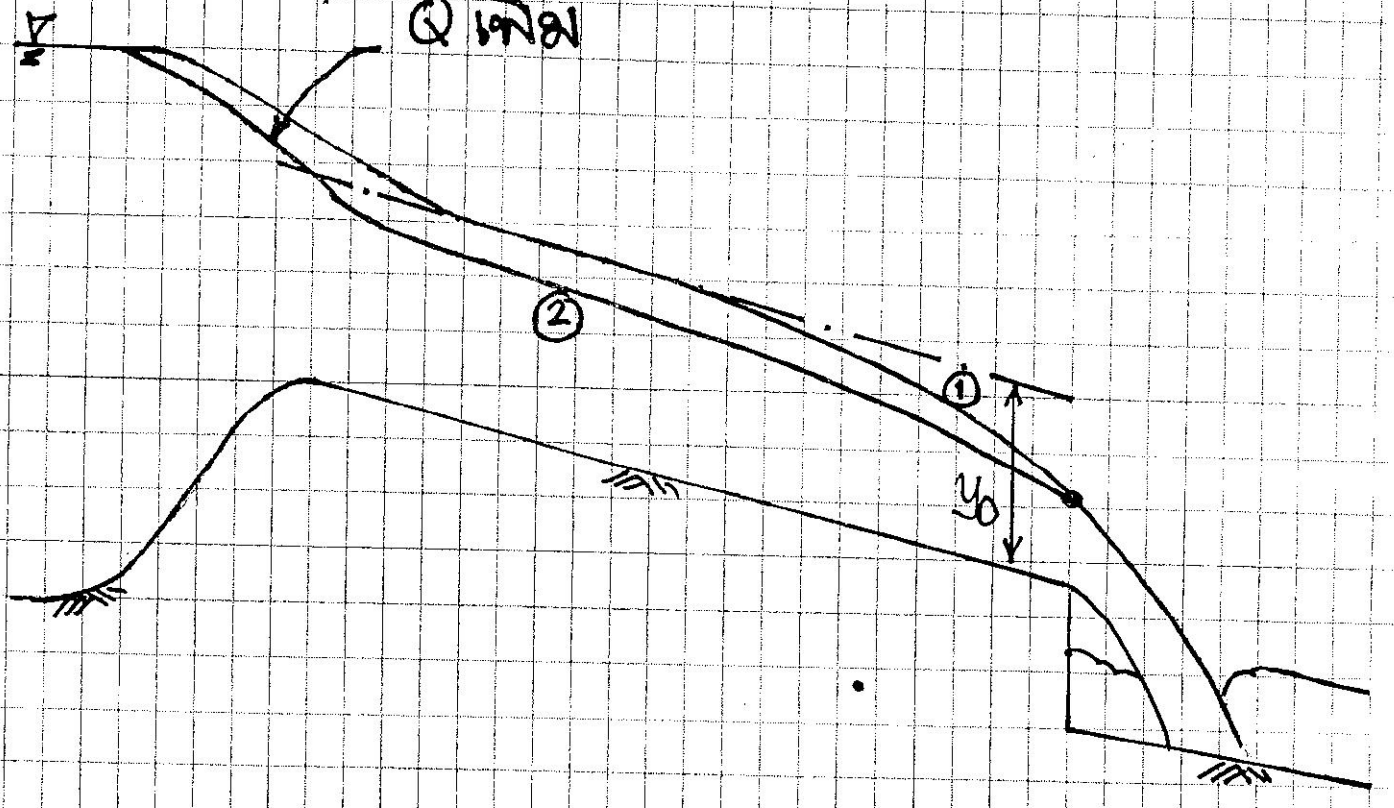
$Q = 2.67 \times (5 \times 2.64)$

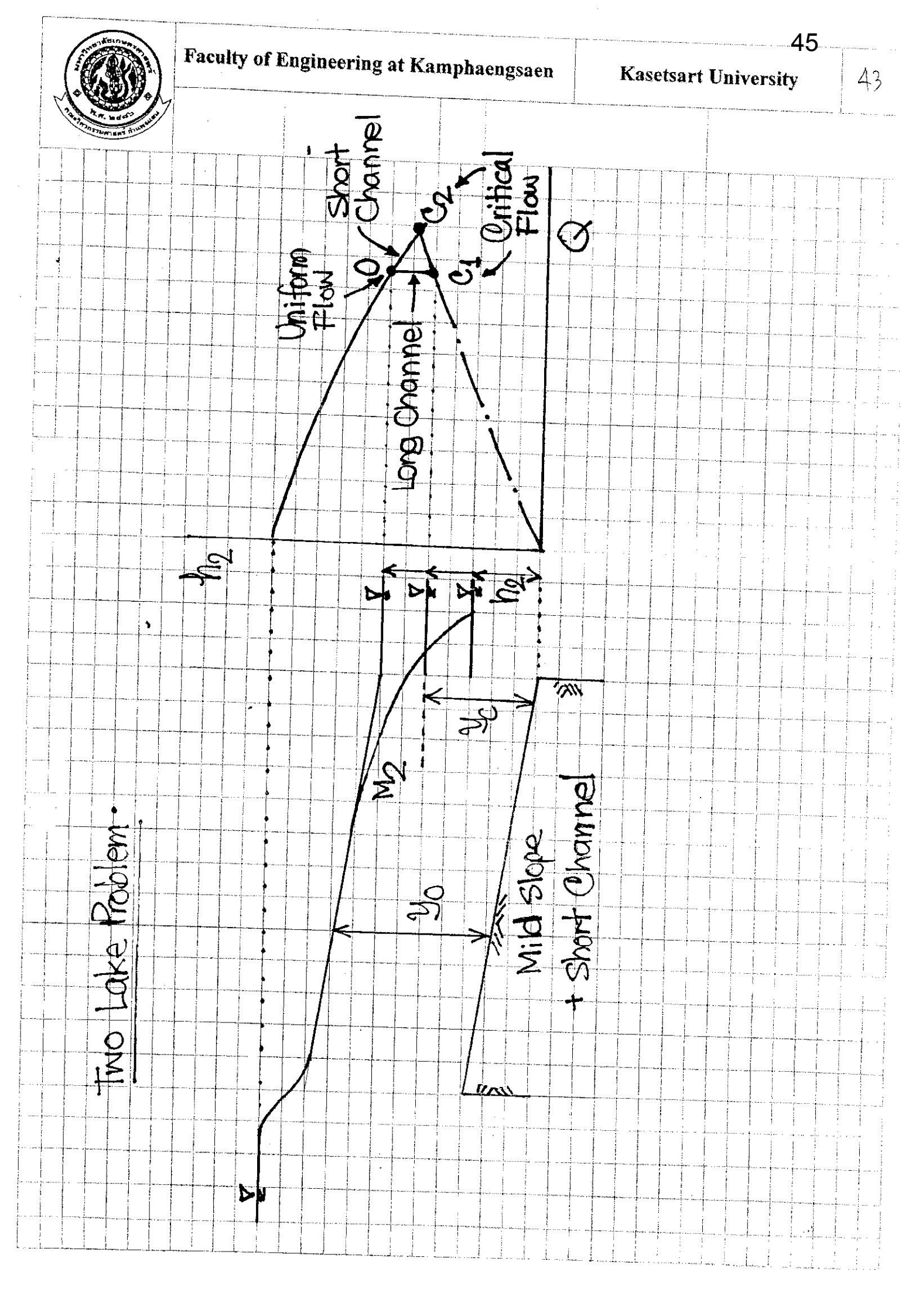
$= 35.18$ cms

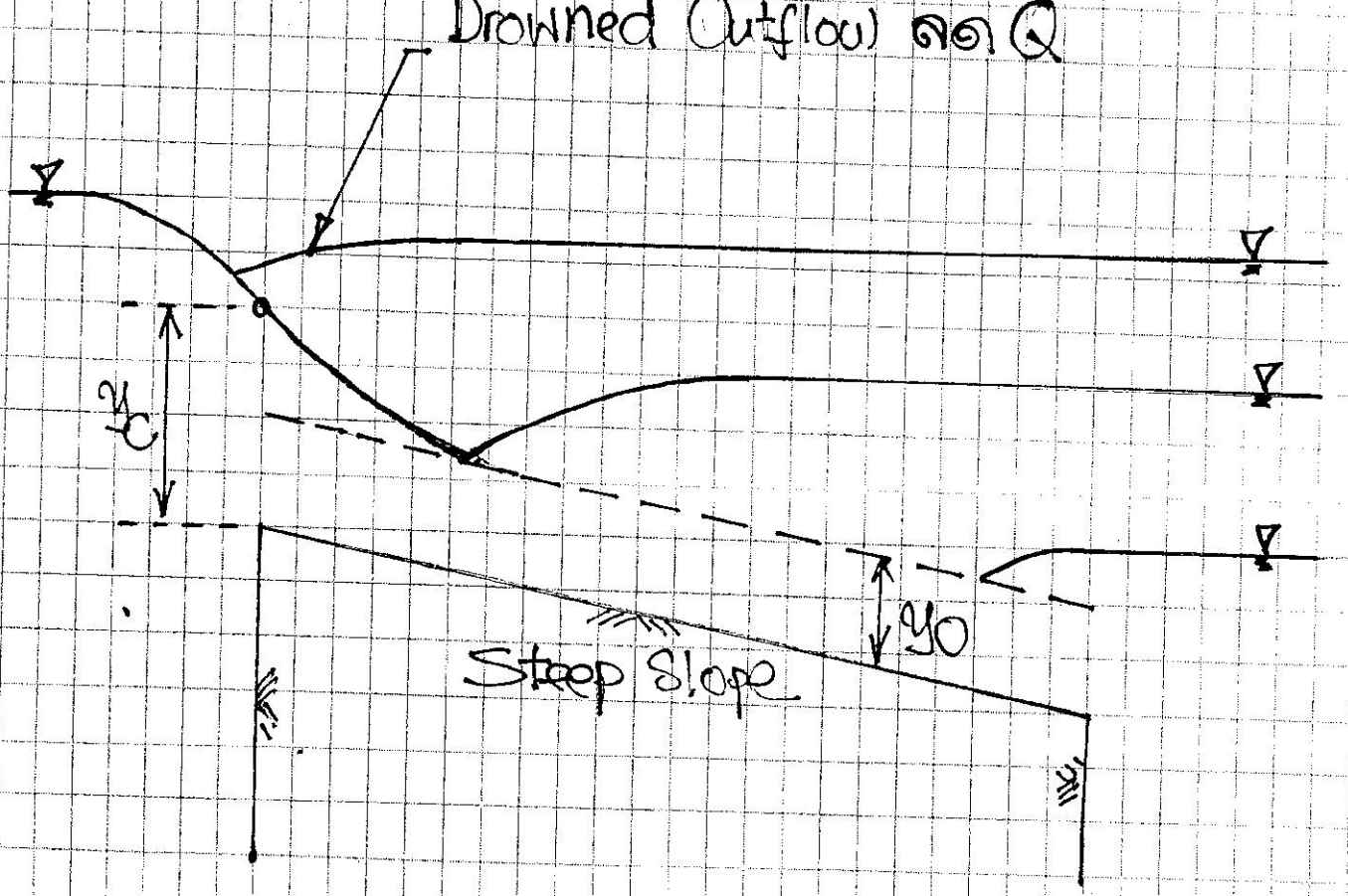
Discharge Problem

- Short Channel หรือ D/S Effect



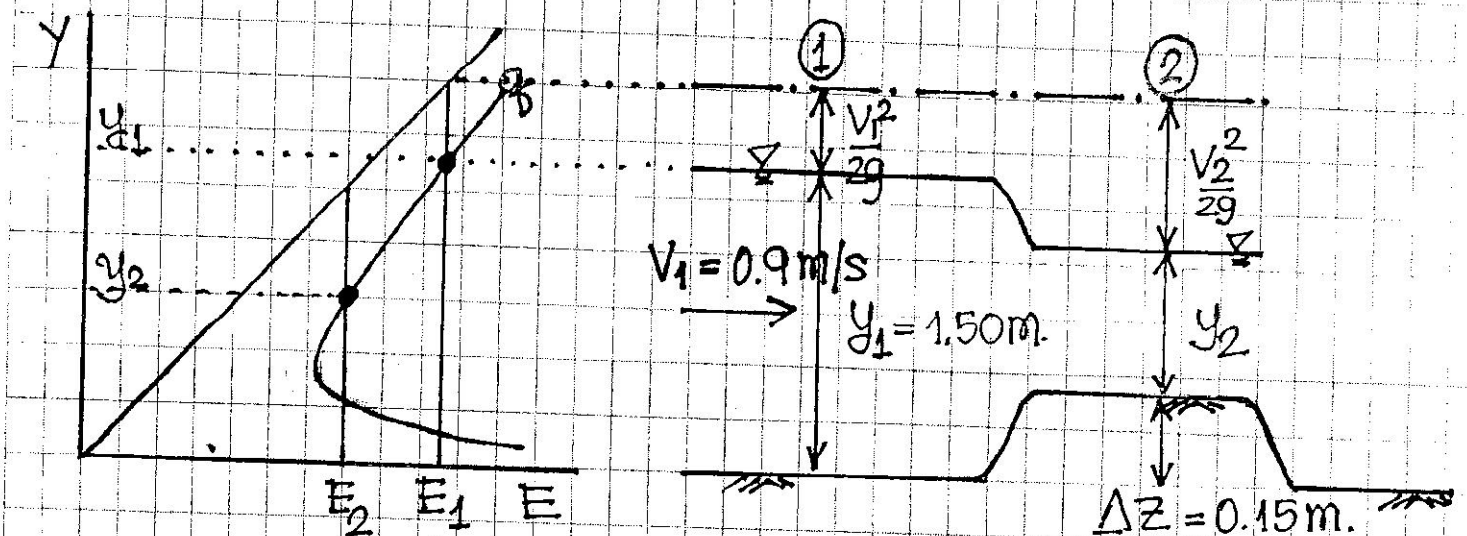



Two Lake Problem
Short Channel + Mild slope
Long Channel
Uniform Flow
Critical Flow
Q
C_2
C_1
M_2
y_0
y_c
y_{n_2}
Δ


Drowned Outflow ของ Q
yc
yo
Steep Slope

Transition Problem

EX.6.4 ทางน้ำรูป ▣ ด้านล่างน้ำที่จุด ② ยกขึ้น 0.15 m. จงหา y_2



$$Fr_1 = \sqrt{\frac{V_1^2}{gy_1}} = \sqrt{\frac{(0.9)^2}{9.81 \times 1.5}}$$

$$= 0.235 < 1.0 \text{ (Subcritical)}$$

$$q = V_1 y_1 = 0.9 \times 1.50 = 1.35 \text{ m}^3/\text{s/m}.$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{(1.35)^2}{9.81}} = 0.571 \text{ m}.$$

$q = 1.35 =$ Constant → Section ②

เป็น Suberitical Flow

$$E_2 = E_1 - \Delta Z$$

$$y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} - \Delta Z$$

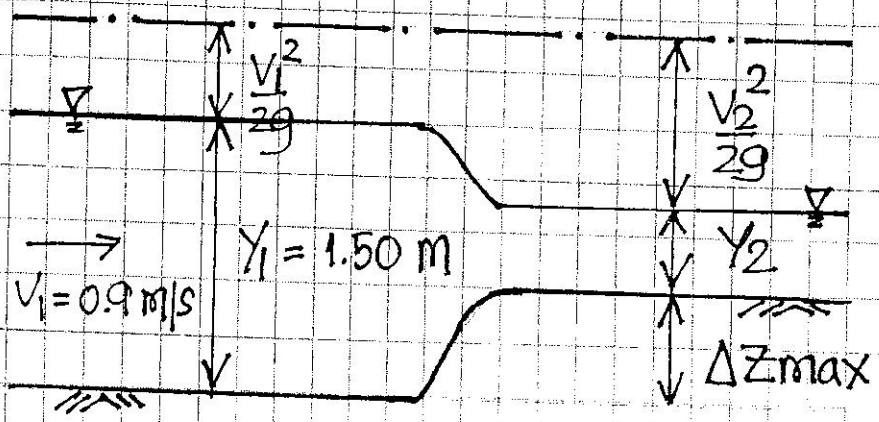
$$y_2 + \frac{1.35^2}{2\times 9.81\times y_2^2} = 1.5 + \frac{1.35^2}{2\times 9.81\times 1.5^2} - 0.15$$

$$y_2 + \frac{0.0929}{y_2^2} = 1.5412 - 0.15 = 1.3912$$

Trial & Error

$y_2 =$ (1.339), 0.29 (Subcritical)

EX. 6.4(a) จงหา ΔZ_{max} ที่จะไม่ทำให้เกิด Choking Effect (ที่เอ่ออ่าน)



$$y_2 = y_c = 0.571 \text{ m.}$$

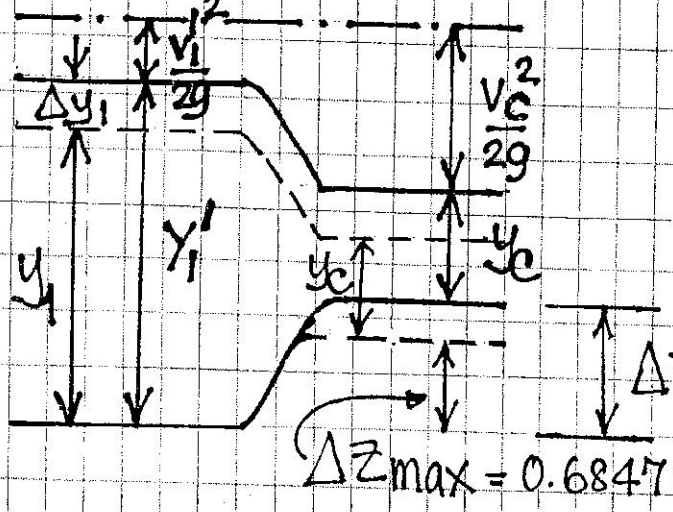
$$E_c = \frac{3}{2} y_c = \frac{3}{2} \times 0.571 = 0.8565 \text{ m.}$$

$$\Delta Z_{max} = E_1 - E_c$$

$$= 1.5412 - 0.8565$$

$$= 0.6847 \text{ m.}$$

EX 6.4(2) จงหา Choking Effect ของระดับน้ำที่ 1 เมื่อเทียบกับระดับเดิม ที่ $\Delta Z = 0.80$ m.



$$E_1' = E_c + \Delta Z$$
$$= 0.8565 + 0.80$$
$$= 1.6565 \text{ m.}$$

$$y_1' + \frac{q^2}{2g y_1'^2} = 1.6565$$

$$y_1' + \frac{1.35^2}{2 \times 9.81 \times y_1'^2} = 1.6565$$

$$y_1' + \frac{0.0929}{y_1'^2} = 1.6565$$

Trial & Error

$y_1' = (1.62), 0.258$ m.

Δy_1 = ระยะต่างของ 2 = $y_1' - y_1$

$= 1.62 - 1.50$

$= 0.12$ m.

จาก $M_1 = M_2$

$$\frac{q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gy_2} + \frac{y_2^2}{2}$$

$$\frac{q^2}{g}\left(\frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2}\right) = \frac{y_2^2 - y_1^2}{2}$$

$$\frac{q^2}{g} = \frac{y_2^2 - y_1^2}{2}\left(\frac{y_1 y_2}{y_2 - y_1}\right)$$

$$= \frac{y_1 y_2}{2}(y_2 + y_1) \quad \text{---(2)}$$

แทนค่า $\frac{q^2}{g}$ ลงใน (1)

$$\Delta E = (y_1 - y_2) + \frac{1}{2}\frac{y_1 y_2}{2}(y_2 + y_1)\left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2}\right)$$

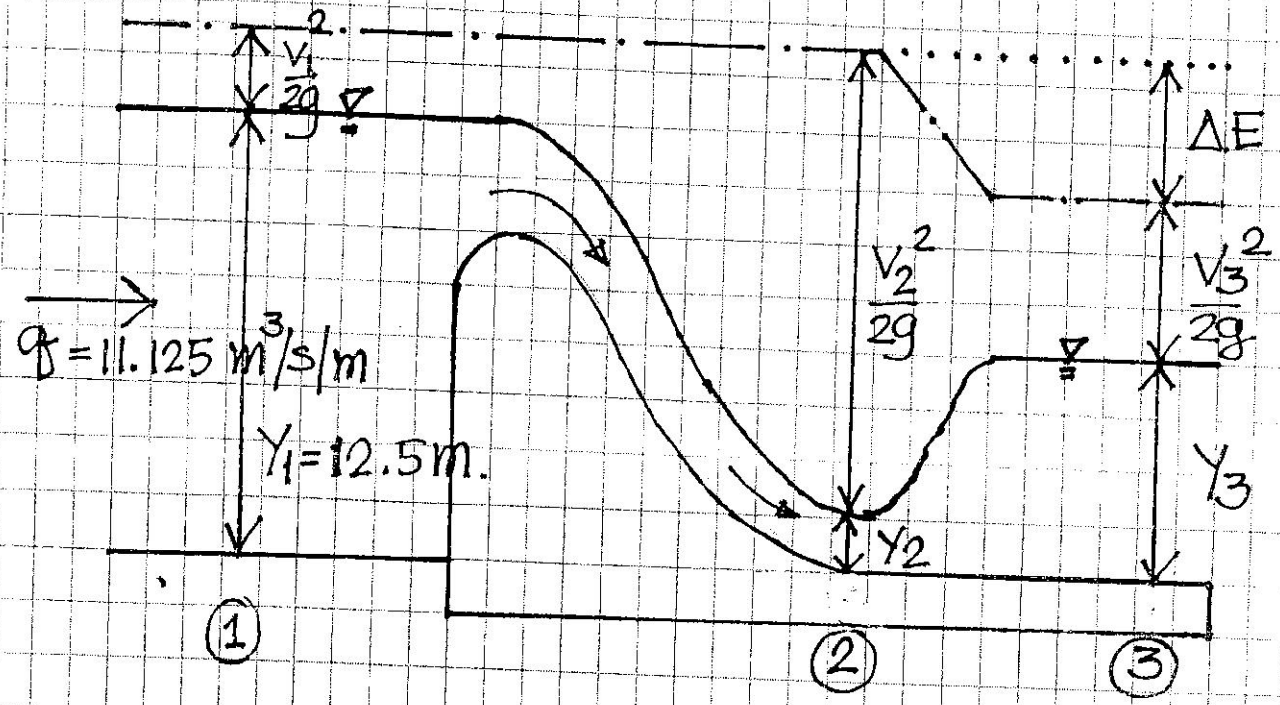
$$= (y_1 - y_2) + \frac{y_1 y_2}{4}(y_2 + y_1)\left(\frac{y_2^2 - y_1^2}{y_1^2 y_2^2}\right)$$

$$= \frac{(y_2 + y_1)^2(y_2 - y_1)}{4y_1 y_2} - (y_2 - y_1)$$

$$= (y_2 - y_1)\left(\frac{y_2^2 + 2y_2 y_1 + y_1^2 - 4y_1 y_2}{4y_1 y_2}\right)$$

$$= \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2}$$

EX 6.7 น้ำไหลล้นฝายน้ำล้นดังรูป จงคำนวณหา y_2 และ y_3 และการสูญเสียพลังงานใน Jump.



$$E_1 = E_2$$

$$y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2}$$

$$12.5 + \frac{11.125^2}{2\times 9.81(12.5)^2} = y_2 + \frac{11.125^2}{2\times 9.81\times y_2^2}$$

$$12.54 = y_2 + \frac{6.308}{y_2^2}$$

$$y_2 = 0.73\ m.$$

$$V_2 = \frac{11.125}{0.73} = 15.24\ m/s$$

$$Fr_2 = \frac{V_2^2}{\sqrt{gy_2}} = \frac{15.24^2}{\sqrt{9.81\times 0.73}} = 5.73$$

$$\frac{y_3}{y_2} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_2^2} - 1\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8(5.73)^2} - 1\right)$$

$$= \frac{1}{2}(16.844 - 1) = 7.62$$

$$y_3 = 7.62(0.73) = 5.564 \text{ m.}$$

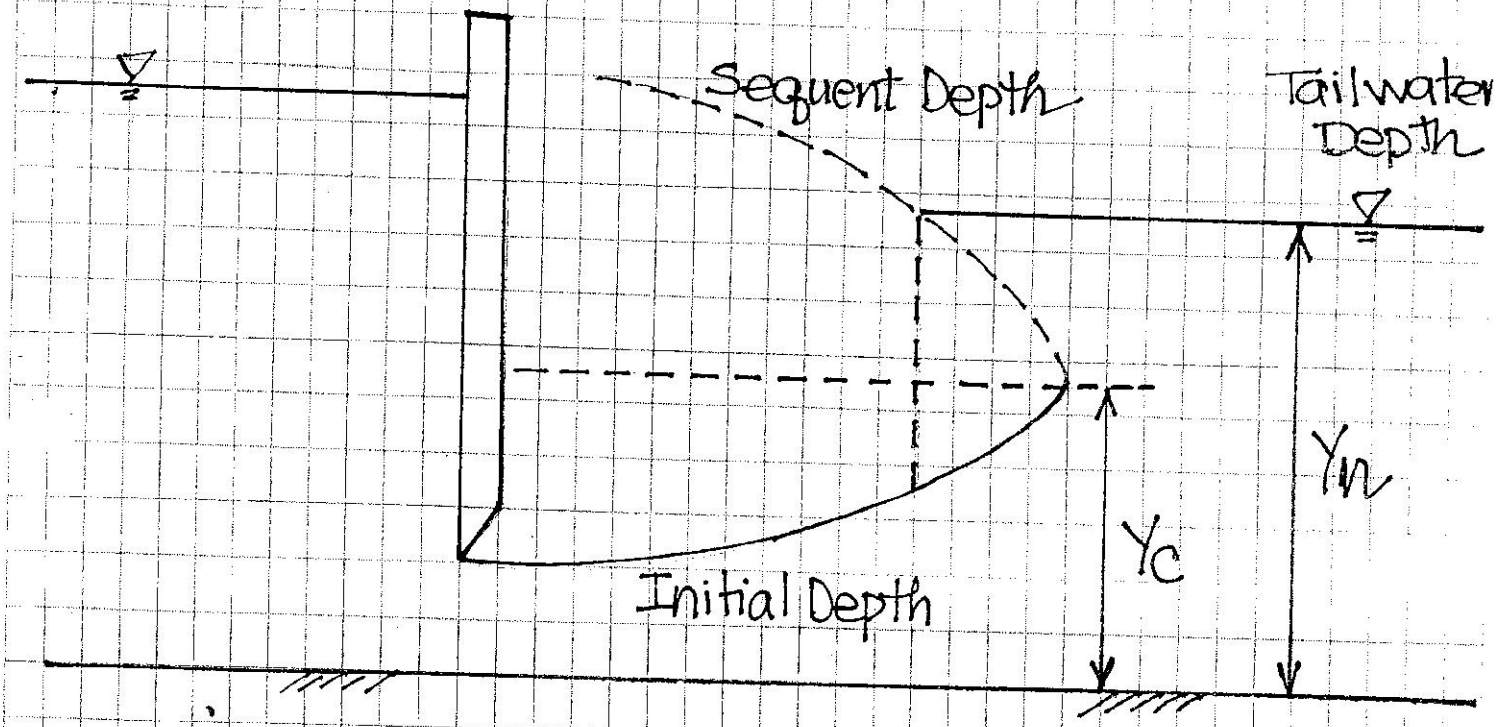
$$\Delta E = \frac{(y_3 - y_2)^2}{4y_2y_3}$$

$$= \frac{(5.564 - 0.73)^2}{4(0.73)(5.564)}$$

$$= 1.438 \text{ m.}$$

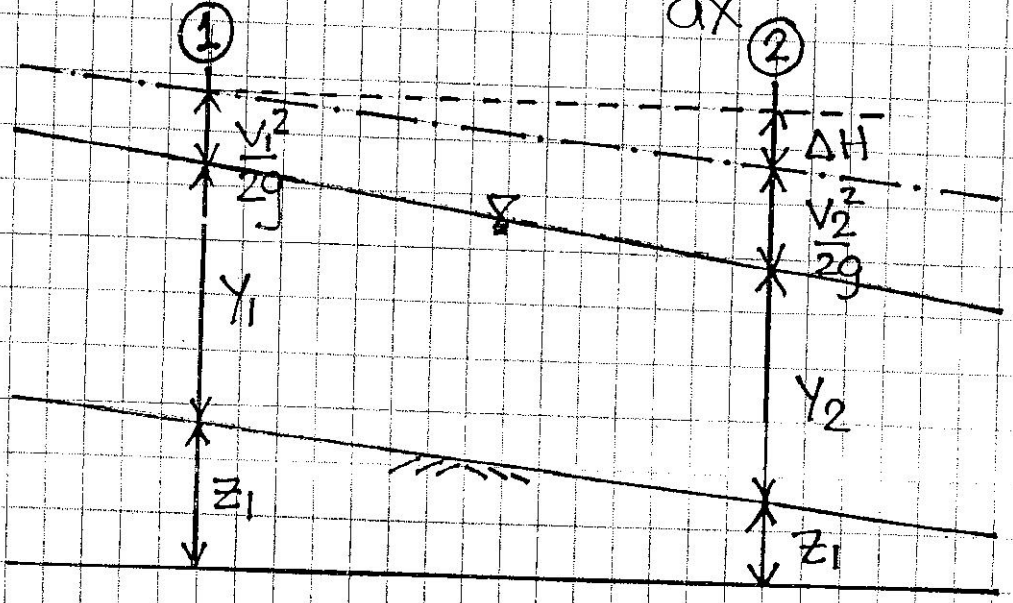
M-y
$M = \frac{Q^2}{gA} + \frac{\bar{y}A}{2}$
Sequent Depth
Initial Depth
ΔM
$M_2 = M_3$ M_1
E-y
$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$
ΔE
E_3 $E_1 = E_2$
$E_1 = E_2$
$M_1 \neq M_2$
$E_2 \neq E_3$
$M_2 = M_3$
1
2
3
$\frac{y_3}{y_2} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8F_2^2} - 1\right)$
y_2 = Initial Depth
y_3 = Sequent Depth

Position of Hydraulic Jump.



Water Surface Profile

- Non-uniform Flow, $\frac{dy}{dx} \neq 0$



- Longitudinal Profile

$$H = Z + Y + \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx}\left(Z + Y + \frac{V^2}{2g}\right)$$

$$-S_f = -S_o + \frac{dE}{dx}$$

$$\frac{dE}{dx} = S_o - S_f$$

$$\frac{dE}{dy}\cdot\frac{dy}{dx} = S_o - S_f$$

$$(1-F_r^2)\frac{dy}{dx} = S_o - S_f \longrightarrow \boxed{\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1-F_r^2}}$$

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy}\left(Y + \frac{V^2}{2g}\right)$$

$$= 1 + \frac{1}{2g}\frac{d}{dy}\frac{q^2}{y^2}$$

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

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

$$= 1 - Fr^2$$

$\frac{dy}{dx}$ มี 5 ประเภท

(1) M Curve (Mild; $y_o > y_c$, $s_o < s_c$)
(2) S Curve (Steep; $y_o < y_c$, $s_o > s_c$)
(3) C Curve (Critical; $y_o = y_c$, $s_o = s_c$)
(4) H Curve (Horizontal; $y_o = \infty$, $s_o = 0$)
(5) A Curve (Adverse ; $y_o = \infty$, $s_o < 0$)

วิธีการคำนวณ $\frac{dy}{dx} = \frac{s_o - s_f}{1 - F_r^2}$

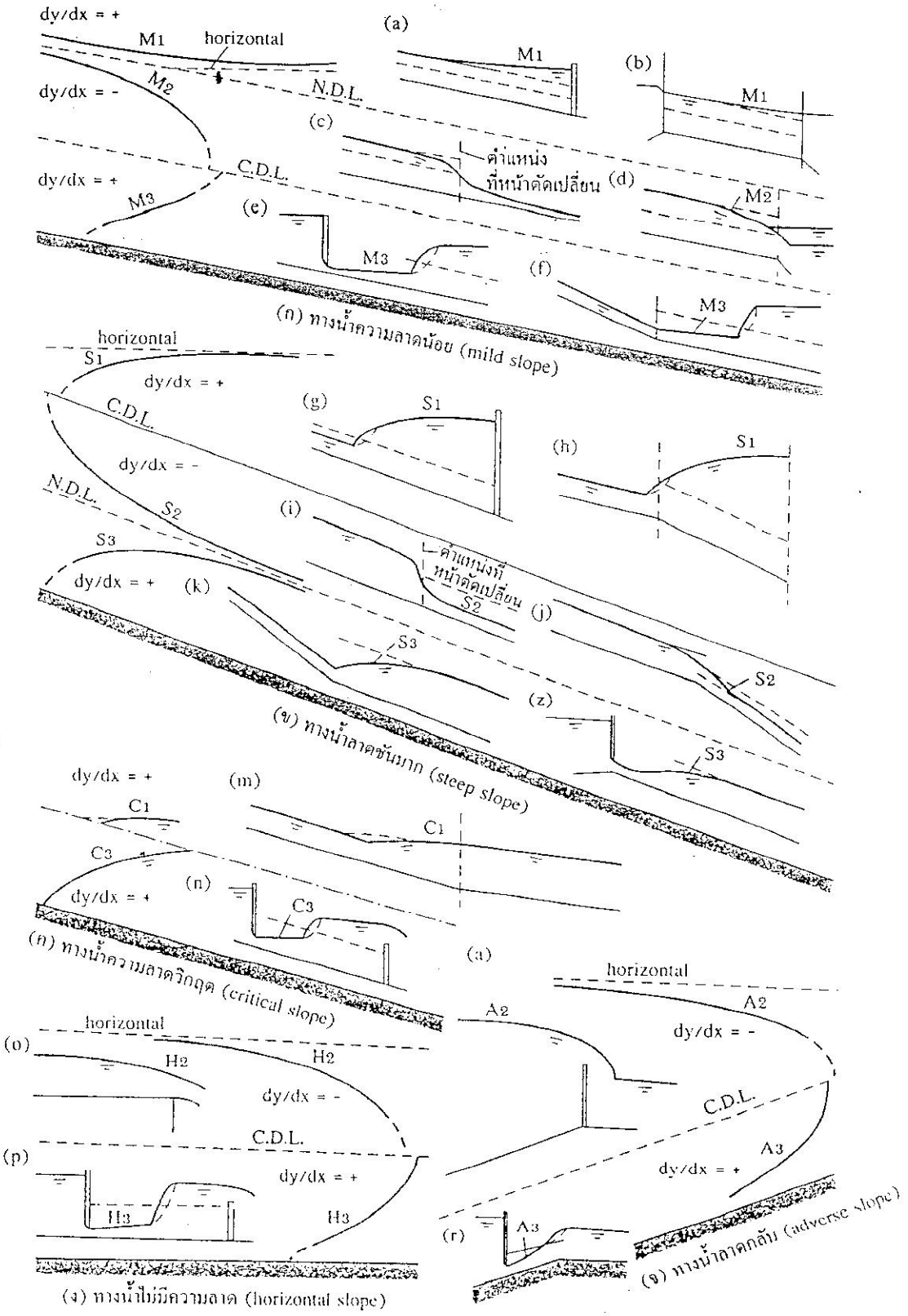
(1) Step Method

$$x = f(y)$$
$$y = f(x)$$

(2) Direct Integration Method (Bresse Function

$$x = \int \frac{1 - F_r^2}{s_o - s_f} dy$$

(3) วิธีอื่นๆ เช่น ของ Ezra, Grimm, Escoffier

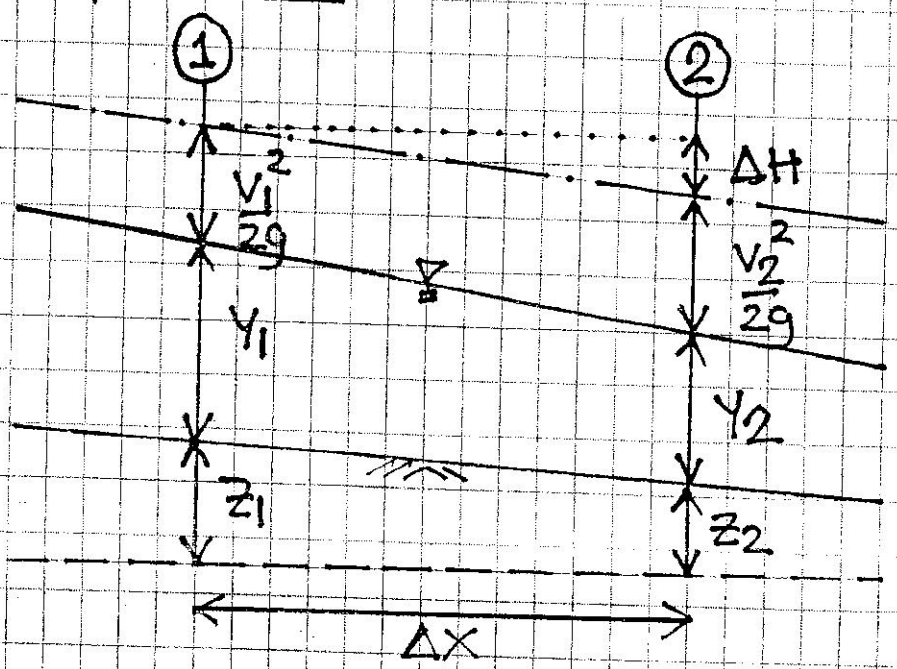


รูปที่ 6.4 ตัวอย่างรูปตัดการไหลเปลี่ยนแปลงตามแนวยาว (อ้างอิง 40)

ตารางที่ 6.1 หน้าตัดการไหล (flow profile) ทั้ง 12 ชนิดของการไหลแบบเปลี่ยนแปลงช้า

ความลาดท้องน้ำ (channel slope)	ความลึกของการไหล (depth relations)	$\frac{dy}{dx}$	ชนิดของหน้าตัดการไหล (type of profile)	สัญลักษณ์ (symbol)	ชนิดของการไหล (type of flow)
ความลาดน้อย (mild) $O > S > S_c$	$y > y_n > y_c$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	M1	ใต้วิกฤต (subcritical)
	$y_n > y > y_c$	-	ความลึกลดลง (dropdown)	M2	ใต้วิกฤต (subcritical)
	$y_n > y_c > y$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	M3	เหนือวิกฤต (supercritical)
ความลาดชัน (steep) $S > S_c > O$	$y > y_c > y_n$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	S1	ใต้วิกฤต (subcritical)
	$y_c > y > y_n$	-	ความลึกลดลง (dropdown)	S2	เหนือวิกฤต (supercritical)
	$y_c > y_n > y$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	S3	เหนือวิกฤต (supercritical)
ความลาดวิกฤต (critical) $S_n = S_c$ $y_c = y_c$	$y > y_c = y_n$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	C1	ใต้วิกฤต (subcritical)
	$y_c = y = y_n$	-	ขนานท้องน้ำ (parallel to bed)	C2	สม่ำเสมอ, วิกฤต (uniform, critical)
	$y_c = y_n > y$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	C3	เหนือวิกฤต (supercritical)
ความลาดเป็นศูนย์ (horizontal) $S = 0$ $y_n = \infty$	$y > y_c$	-	ความลึกลดลง (dropdown)	H2	ใต้วิกฤต (subcritical)
	$y_c > y$	+	ความลึกลดลง (dropdown)	H3	เหนือวิกฤต (supercritical)
ความลาดกลับ (adverse) $S > O$ $y_n = \infty$	$y > y_c$	-	ความลึกลดลง (dropdown)	A2	ใต้วิกฤต (subcritical)
	$y_c > y$	+	การเอ่อของน้ำ (backwater)	A3	เหนือวิกฤต (supercritical)

Step Method



$$S_f = \frac{\Delta H}{\Delta x}$$

$$S_o = \frac{\Delta z}{\Delta x}$$

$$\frac{dE}{dx} = S_o - S_f$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = S_o - S_f$$

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_o - S_f} = \frac{E_2 - E_1}{S_o - S_f}$$

Manning's $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$

$$S_f = \left(\frac{nV}{R^{2/3}}\right)^2 = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2}$$

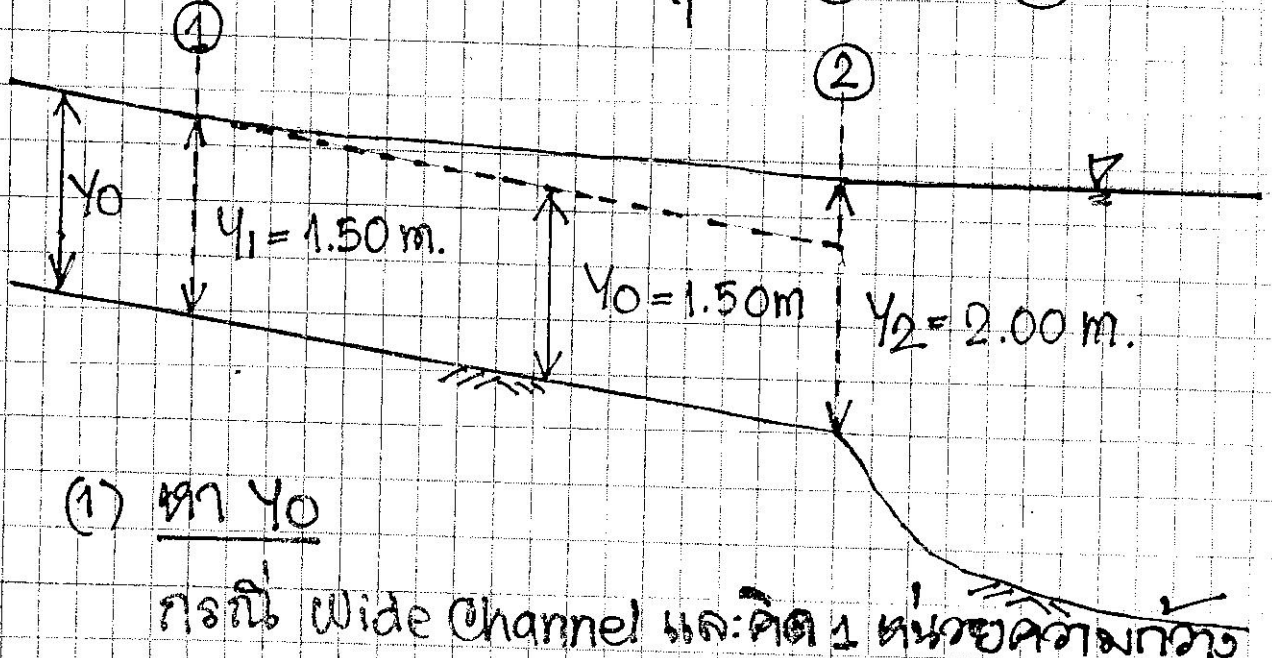
Ex 6.1 ทางน้ำกว้างมาก (Wide) ดังรูป

$q = 2.5$ cms/m

$S_o = 0.001$

$n = 0.025$

จงหา ΔX ระหว่างจุด (1) และ (2)



(1) หา y_0

กรณี Wide Channel และคิด 1 หน่วยความกว้าง

$$R = \frac{A}{P} = y$$

$$A = 1 \times y = y$$

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_o^{1/2}$$

$$2.5 = \frac{1}{0.025} y_0 y_0^{2/3} \sqrt{0.001}$$

$$y_0^{5/3} = \frac{2.5 \times 0.025}{\sqrt{0.001}} = 1.98$$

$$y_0 = 1.50 \text{ m.}$$

(2) หา y_c

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{(2.5)^2}{9.81}} = 0.86\ m$$

$\therefore y_0 > y_c$ แสดงว่า Mild Slope

y_1 และ $y_2 > y_0 \longrightarrow$ M1 Curve

(3) หา $\Delta X = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S_f}$

$$S_f = \left(\frac{nV}{R^{2/3}}\right)^2 = \left(\frac{0.025V}{y^{2/3}}\right)^2$$

y(m)	$V = \frac{2.5}{y}$	$\frac{V^2}{2g}$	E	ΔE	S_{f_i}	S_f
2.00	1.25	0.08	2.08	–	0.000388	–
1.50	1.67	0.142	1.642	0.438	0.001000	0.000694

$$\Delta X = \frac{0.438}{0.001 - 0.000694} = 1,431.3\ m.$$

Step Method

q=	2.5	n=	0.025	So=	0.001

y	V	V2/2g	E	ΔE	Sf	Mean Sf	So-Sf	Δx	L
m	m/s	m	m	m				m	m
2.00	1.250	0.080	2.080		0.000388				0.000
1.94	1.289	0.085	2.025	0.054998	0.000429	0.000408	0.000592	92.942	92.942
1.88	1.330	0.090	1.970	0.054511	0.000476	0.000453	0.000547	99.590	192.532
1.82	1.374	0.096	1.916	0.053959	0.000531	0.000504	0.000496	108.683	301.215
1.76	1.420	0.103	1.863	0.053331	0.000593	0.000562	0.000438	121.783	422.997
1.70	1.471	0.110	1.810	0.052613	0.000666	0.000630	0.000370	142.127	565.125
1.64	1.524	0.118	1.758	0.051787	0.000751	0.000709	0.000291	177.701	742.826
1.58	1.582	0.128	1.708	0.050834	0.000850	0.000801	0.000199	254.966	997.792
1.50	1.667	0.142	1.642	0.066026	0.001011	0.000931	0.000069	952.642	1950.434