

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 กฎความคล้ายคลึงกัน (law of similitude)

ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ยี่สิบ แบบจำลองทางด้านชลศาสตร์ได้เริ่มมีบทบาทในการศึกษาปัญหาทางด้านชลศาสตร์ต่างๆ ที่ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยอาศัยการวิเคราะห์จากทฤษฎีแต่เพียงลำพัง การค้นคว้าและวิจัยได้มีการนำเอาแบบจำลองมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เพราะแบบจำลองสามารถให้คำตอบได้อย่างมีเหตุผลและประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าก่อสร้างแบบของจริงซึ่งปกติมีขนาดใหญ่กว่าแบบจำลอง ส่วนรูปร่างลักษณะและคุณสมบัติต่าง ๆ มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งความคล้ายคลึงกันนี้ ทางด้านชลศาสตร์มีกฎเกณฑ์ว่า แบบจำลองและของจริงจะมีความคล้ายคลึงกันอย่างสมบูรณ์ต่อเมื่อระบบทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันในลักษณะต่างๆ ได้ 3 แบบคือ

2.1.1 ความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิต (geometrical similarity)

วัตถุสองชิ้นหรือระบบมีลักษณะคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิตได้ต่อเมื่ออัตราส่วนของความยาวที่สัมพันธ์กันในแบบจำลองต่อแบบของจริงมีค่าคงที่ ดังตัวอย่าง รูป 2-1 เมื่อแบบจำลอง (model) กับแบบของจริง (prototype) มีความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิต จะได้ว่า

$$\frac{d_m}{d} = \frac{l_m}{l} = L_r \dots\dots\dots (2.1)$$

L_r = อัตราย่อส่วนเป็นค่าคงที่

ผลที่ตามมาของความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิต คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่และอัตราส่วนระหว่างปริมาตร ของแบบจำลองกับแบบของจริงแปรผันในรูปกำลังสองและกำลังสามของอัตราส่วนความยาวตามลำดับดังนี้

$$\frac{A_m}{A} = \left(\frac{d_m}{d}\right)^2 = \left(\frac{l_m}{l}\right)^2 = L_r^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\frac{V_m}{V} = \left(\frac{d_m}{d}\right)^3 = \left(\frac{l_m}{l}\right)^3 = L_r^3 \dots\dots\dots (2.3)$$

2.1.2 ความคล้ายคลึงกันทางด้านจลศาสตร์ (kinematic similarity)

จากรูป 2-1 ถ้าระบบทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันทางด้านจลศาสตร์แล้ว การไหลของของไหลผ่านแบบจำลอง และแบบของจริงมีลักษณะการไหลเหมือนกัน กล่าวคืออัตราส่วนความเร็ว และความเร่งของการไหลของอนุภาคของของไหลที่สัมพันธ์กันมีค่าคงที่ นั่นคือ

$$\frac{V_{1m}}{V_1} = \frac{V_{2m}}{V_2} = \text{ค่าคงที่} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\frac{a_{3m}}{a_3} = \frac{a_{4m}}{a_4} = \text{ค่าคงที่} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.1.3 ความคล้ายคลึงกันทางด้านพลศาสตร์ (dynamic similarity)

ความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิต และด้านจลศาสตร์ของระบบทั้งสองจะดำรงอยู่คู่กันได้ นั้นแรงที่กระทำกับมวลของของไหลที่สัมพันธ์กันต้องมีอัตราส่วนคงที่ด้วย ความคล้ายคลึงกันเช่นนี้เรียกว่า ความคล้ายคลึงกันทางด้านพลศาสตร์ จากรูป 2-1 มวลของของไหล M และ M_m มีแรง F_1, F_2, F_3 และแรง $F_{1m}, F_{2m}, F_{3m}, \dots$ มากระทำตามลำดับ ทำให้มวลของของไหลมีความเร่ง a_4 และ a_{4m} ผลรวมของแรงมีค่า $M \cdot a_4$ และ $M_m \cdot a_{4m}$ ตามลำดับ เมื่อเขียนประกอบเป็นรูปหลายเหลี่ยมแทนแรงในแต่ละระบบแล้วใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน เมื่อทั้งสองระบบมีความคล้ายคลึงกันทางด้านไดนามิค จะได้ว่า

$$\frac{F_{1m}}{F_1} = \frac{F_{2m}}{F_2} = \frac{F_{3m}}{F_3} = \frac{M_m \cdot a_{4m}}{M \cdot a_4} = \text{ค่าคงที่} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\frac{M \cdot a_4}{F_2} = \frac{M_m \cdot a_{4m}}{F_{2m}} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\frac{M \cdot a_4}{F_4} = \frac{M_m \cdot a_{4m}}{F_{4m}} \dots\dots\dots (2.8)$$

แรงในระบบข้างต้นทั้งหมดที่มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบการไหลของของไหลได้แก่

- F_p = แรงที่เกิดจากความดันของของไหล (pressure force)
- F_i = แรงที่เกิดจากความเฉื่อยของวัตถุ (inertia force)
- F_g = แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีต่อมวลวัตถุ (gravity force)
- F_v = แรงที่เกิดจากแรงเฉื่อย (viscosity force)
- F_e = แรงที่เกิดจากการยืดตัวของของไหล (elasticity force)
- F_s = แรงที่เกิดจากแรงตึงผิวของของไหล (surface tension force)

โดยที่

$$F_p = (\Delta p)A = (\Delta p)l^2$$

$$F_i = Ma = \rho l^3 \left(\frac{V^2}{l} \right) = \rho V^2 l^2$$

$$F_G = Mg = \rho l^3 g$$

$$F_v = \rho \left(\frac{dv}{dy} \right) A = \rho \left(\frac{V}{l} \right) l^2 = \rho V l$$

$$F_E = EA = El^2$$

$$F_T = \sigma l$$

เมื่อแรงทั้งหมดกระทำกับระบบทั้งสองซึ่งมีความคล้ายคลึงกันทางด้านไดนามิก เราสามารถเขียนอัตราส่วนแรงต่าง ๆ จากสมการ (2.7) และ (2.8) ได้ดังนี้

$$\left(\frac{F_i}{F_p} \right)_p = \left(\frac{F_i}{F_p} \right)_m = \left(\rho \frac{V^2}{\Delta P} \right)_m ; E_p = E_m \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\left(\frac{F_v}{F_p} \right)_p = \left(\frac{F_v}{F_p} \right)_m = \left(\frac{Vl\rho}{\mu} \right)_m ; R_p = R_m \dots \dots \dots (2.10)$$

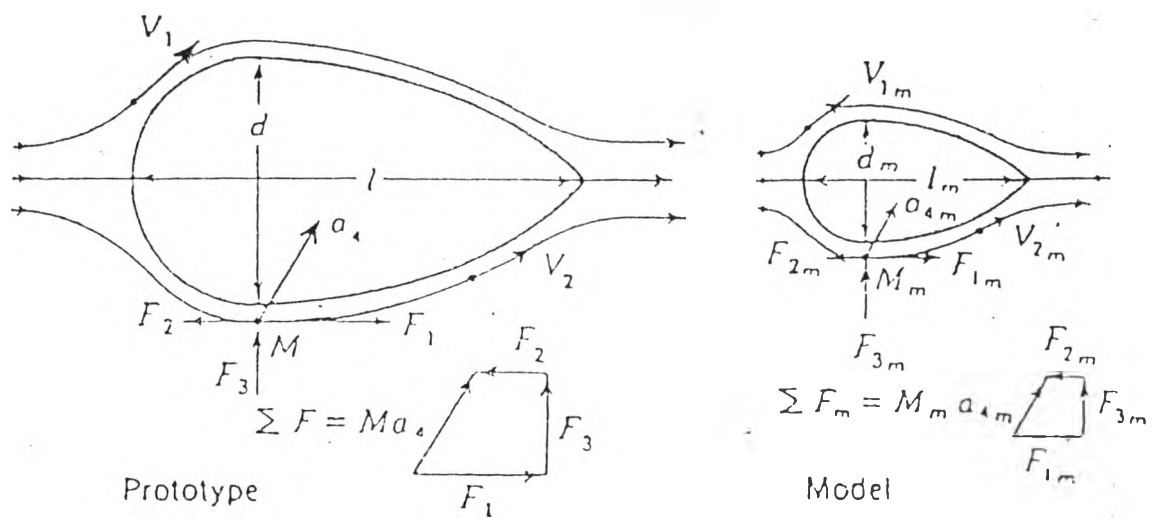
$$\left(\frac{F_i}{F_G} \right)_p = \left(\frac{F_i}{F_G} \right)_m = \left(\frac{V^2}{gl} \right)_p = \left(\frac{V^2}{gl} \right)_m ; F_p = F_m \dots \dots \dots (2.11)$$

$$\left(\frac{F_i}{F_E} \right)_p = \left(\frac{F_i}{F_E} \right)_m = \left(\frac{\rho V^2}{E} \right)_p = \left(\frac{\rho V^2}{E} \right)_m ; M_p = M_m \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\left(\frac{F_i}{F_T} \right)_p = \left(\frac{F_i}{F_T} \right)_m = \left(\frac{\rho l V^2}{\sigma} \right)_p = \left(\frac{\rho l V^2}{\sigma} \right)_m ; W_p = W_m \dots \dots \dots (2.13)$$

โดยที่

Euler number ,	E	=	$V\sqrt{\rho/2\Delta p}$
Reynolds number,	R	=	Vl/ν
Froude number,	F	=	V/\sqrt{gl}
Weber number,	W	=	$\rho l V^2 / \sigma$



รูป 2-1 ความคล้ายคลึงกันของแบบจำลองและแบบจริง

ตาราง 2-1 มิติตัวแปรทางชลศาสตร์

คุณลักษณะ	หน่วย SI	สัญลักษณ์	มิติ	
			ระบบ F-L-T	ระบบ M-L-T
ก. เกี่ยวข้องทางเรขาคณิต				
ความยาว	ม.	L	L	L
พื้นที่	ตร.ม.	A	L^2	L^2
ปริมาตร	ลบ.ม.	V	L^3	L^3
ข. คุณสมบัติของของไหล				
มวล	กก.	M	FT^2/L	M
น้ำหนักจำเพาะ	นิวตัน/ม. ³	γ	FL^3	ML^2T^{-2}
ความหนาแน่น	กก./ม. ³	ρ	FT^2/L^4	ML^3
ความหนืดสมบูรณ์	กก./วินาที	μ	FTL^2	MLT
ความหนืดคีนีเมติก	ม. ² /วินาที	ν	L^2/T	L^2/T
แรงตึงผิว	นิวตัน/ม.	σ	FL	MT^2
ค. คุณลักษณะทางการไหล				
ความเร็ว	ม./วินาที	V	L/T	L/T
ความเร็วเชิงมุม	เรเดียน/วินาที	ω	$1/T$	$1/T$
อัตราเร่ง	ม./(วินาที) ²	g	L/T^2	L/T^2
ความกดตัน	นิวตัน/ม. ²	p	FL^2	MLT^{-2}
แรง	นิวตัน	F	F	MLT^{-2}
ปริมาณการไหล	ม. ³ /วินาที	Q	L^3/T	L^3/T
งานหรือพลังงาน	นิวตัน-ม.	E	FL	ML^2/T^2
ความหนายาบ		n	$L^{1/6}$	$L^{1/6}$

2.2 ทฤษฎีการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบ ogee ชนิดไม่มีบานประตู
 ปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบ ogee ชนิดไม่มีบานประตูกำหนดได้จาก

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_0^{3/2} \dots\dots\dots (2.14 a)$$

$$Q = C_o L H_0^{3/2} \dots\dots\dots (2.14 b)$$

Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารระบายน้ำแบบ ogee

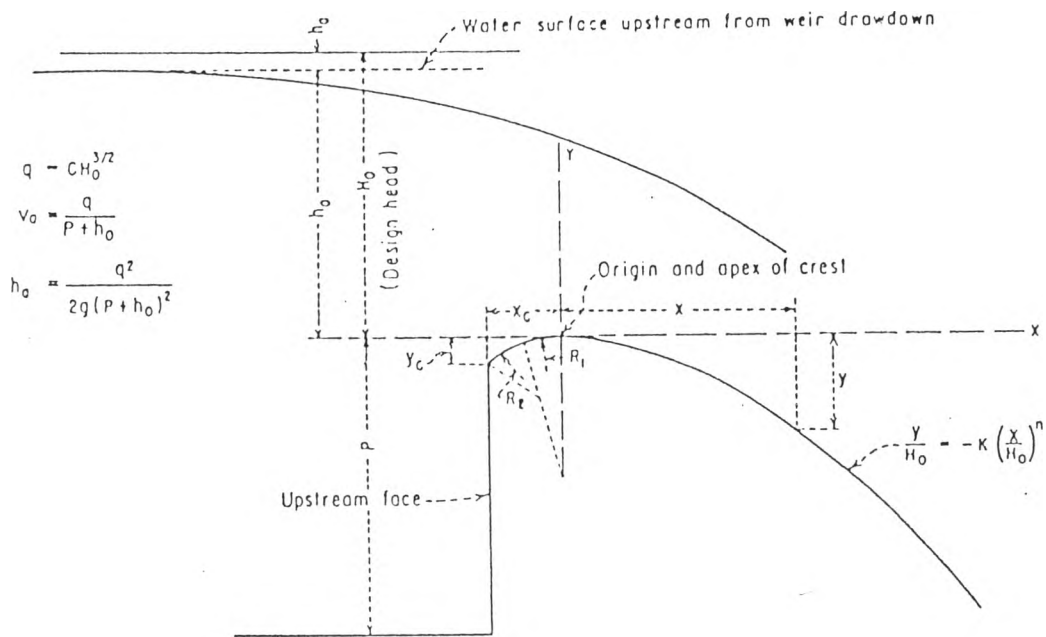
C_o = สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านสันฝายแบบ ogee

C_d = สัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าอัตราการไหล

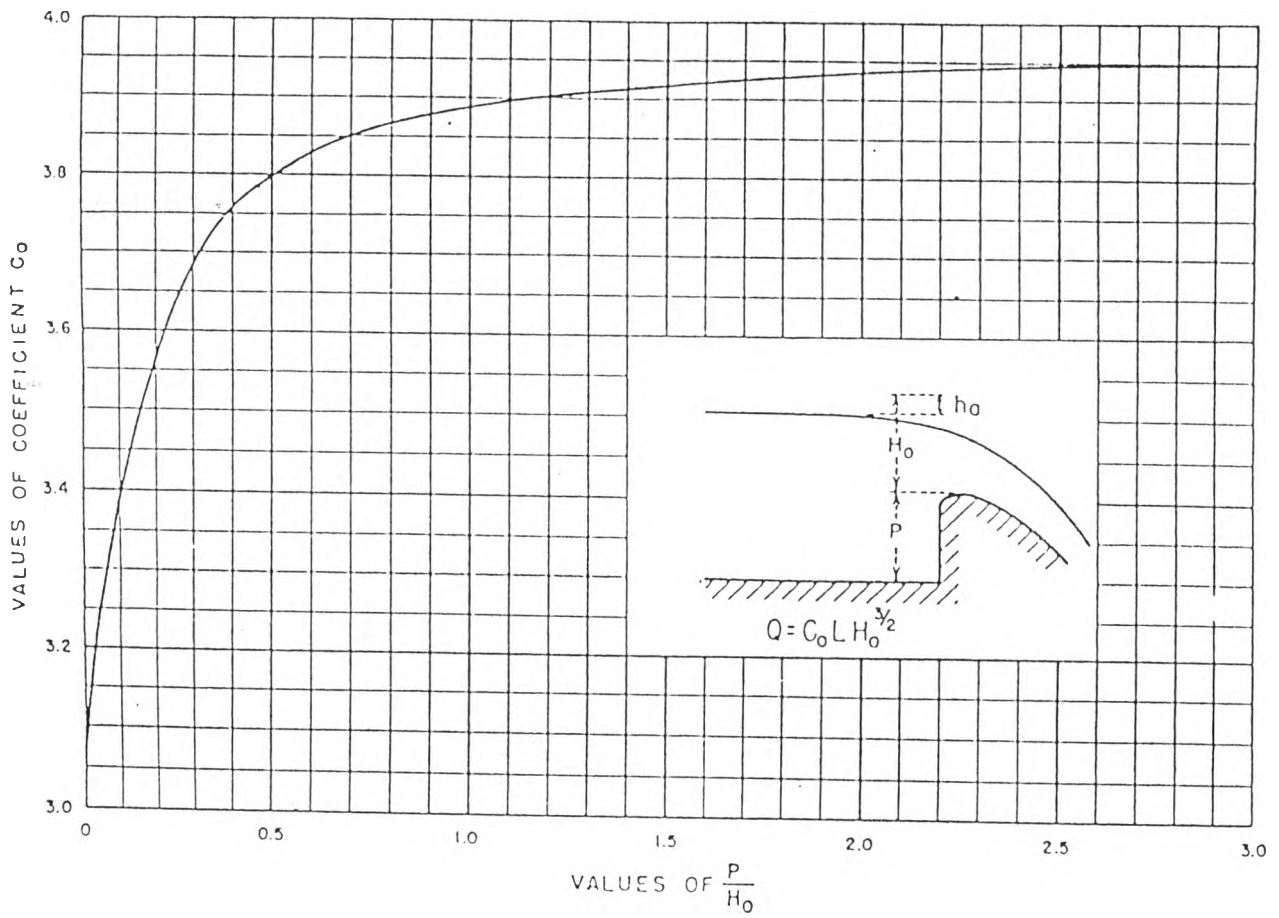
L = ความยาวประสิทธิผลของสันทางระบายน้ำล้น

H_0 = ความลึกของน้ำเหนือสันฝายแบบ ogee

ค่าสัมประสิทธิ์ C_o และ C_d ขึ้นอยู่กับปัจจัยความลึกของน้ำเหนือสันทางระบายน้ำล้น ความลึกของน้ำจากสันทางระบายน้ำถึงพื้นด้านหน้า ความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของสันทางระบายน้ำล้นกับลักษณะการไหลข้ามฝายจริง, ลักษณะของความลาดชันด้านเหนือน้ำของฝาย ลักษณะพื้นที่ท้ายน้ำ และการไหลทางด้านท้ายน้ำในกรณีเกิด submerge flow สำหรับในกรณีที่เกิด submerge flow น้ำท้ายฝายจะต้านการไหล ทำให้การไหลของน้ำมีปริมาณน้อยลง ในการออกแบบจะให้ $\frac{H_d + d}{H_e} \geq 1.7$ ระดับน้ำจะไม่มีผลกระทบต่อการไหล (free flow) ดังแสดงในรูป 2-2



รูป 2-2 หน้าตัดฝายแบบ ogee



รูป 2-3 สัมประสิทธิ์การไหลผ่านสันฝายแบบ ogee

2.3 การจำแนกรูปตัดการไหล

การจำแนกรูปตัดได้อาศัยเงื่อนไขทางด้าน ความลาดท้องน้ำ (S_o) และย่าน (zone) ของความลึกการไหล โดยมีรายละเอียดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ความลาดท้องน้ำ (S_o) แบ่งความลาดออกเป็น 5 ชนิดคือ
 - S – ทางน้ำเปิดความลาดชัน (steep slope) ซึ่งมี $Y_n < Y_c$ และ $S_o > S_c$
 - C – ทางน้ำเปิดความลาดวิกฤต (critical slope) ซึ่งมี $Y_n = Y_c$ และ $S_o = S_c$
 - M – ทางน้ำเปิดความลาดน้อย (mild slope) ซึ่งมี $Y_n > Y_c$ และ $S_o < S_c$
 - H – ทางน้ำเปิดแนวราบ (horizontal slope) ซึ่งมี $Y_n = \infty$ และ $S_o = 0$
 - A – ทางน้ำเปิดความลาดกลับ (adverse slope) ซึ่งมี $Y_n = \infty$ และ $S_o < 0$

โดยที่ S_c = ความลาดวิกฤต (critical slope)
2. ย่านความลึก (zone) เป็นการแบ่งย่านความลึกจากมากไปหาน้อย โดยอาศัย ความลึกปกติ (normal depth) Y_n สำหรับกรณีสม่ำเสมอ และความลึกวิกฤต (critical depth) Y_c สำหรับกรณีการไหลวิกฤต จากความลึกการไหลสมมุติทั้งสอง เมื่อเปรียบเทียบกับความลึกจริง จะมีความเป็นไปได้ของความลึกการไหลอยู่ 3 ย่าน (zone) คือ

เมื่อ $S_o < S_c$

- zone 1 – $Y > Y_n$
- zone 2 – $Y_n > Y > Y_c$
- zone 3 – $Y < Y_c$

เมื่อ $S_o > S_c$

- zone 1 – $Y > Y_c$
- zone 2 – $Y_c > Y > Y_n$
- zone 3 – $Y < Y_n$

โดยที่ Y_n = ความลึกปกติ (normal depth)

Y_c = ความลึกวิกฤต (critical depth)

การจำแนกรูปตัดการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย จะเรียกตามความลาดของท้องน้ำและหมายเลขย่านความลึกการไหล คือ

1. ทางน้ำเปิดความลาดชัน ($Y_n < Y_c$) มีรูปตัดการไหล S1 S2 และ S3
2. ทางน้ำเปิดความลาดชัน ($Y_n = Y_c$) มีรูปตัดการไหล C1 C2 และ C3
3. ทางน้ำเปิดความลาดชัน ($Y_n > Y_c$) มีรูปตัดการไหล M1 M2 และ M3
4. ทางน้ำเปิดความลาดชัน ($Y_n = \infty, S_o = 0$) มีรูปตัดการไหล H2 และ H3
5. ทางน้ำเปิดความลาดชัน ($Y_n = \infty, S_o < 0$) มีรูปตัดการไหล A2 และ A3

ผลการจำแนกหน้าตัดการไหล สรุปได้ดัง รูป 2-4

- ความลึกปกติ (normal depth)

ความลึกปกติ (normal depth) เป็นตัวแปรชื่อเรียกพิเศษเกี่ยวกับการไหลสม่ำเสมอ (steady flow) การไหลสม่ำเสมอสามารถจำแนกด้วยคุณสมบัติการไหล เช่น ความลึก พื้นที่หน้าตัดการไหล ความเร็วการไหล และอัตราการไหล มีค่าคงที่ ที่ทุกๆหน้าตัดของทางน้ำ การไหลสม่ำเสมอ เส้นระดับพลังงาน เส้นผิวน้ำอิสระ และเส้นท้องน้ำ ต้องขนานกันตลอดช่วงความยาว หรืออีกนัยหนึ่งความลาดของทุกเส้นเท่ากัน

ค่าความลึกปกติในทางน้ำรูปสี่เหลี่ยม สามารถหาได้จากสมการของ Manning

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}$$

หรือ
$$Q = \frac{1}{n} (y_n B) \left(\frac{y_n B}{2y_n + B} \right)^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2-15)$$

- โดยที่ y_n = ความลึกปกติ (normal depth)
- n = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Manning
- B = ความกว้างทางน้ำรูปสี่เหลี่ยม
- S_0 = ความลาดทางน้ำรูปสี่เหลี่ยม

- ความลึกวิกฤต (critical depth)

การไหลในสภาวะวิกฤตในทางน้ำเปิดใดๆ จะเรียกสั้นๆว่า การไหลวิกฤต และหน้าตัดที่เกิดการไหลวิกฤตขึ้นจะเรียกว่า หน้าตัดวิกฤต (critical section) ความลึกการไหลที่หน้าตัดวิกฤตเมื่อพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำสุด (E_c) เรียกความลึกนี้ว่า ความลึกวิกฤต (critical depth) จากสมการพลังงาน

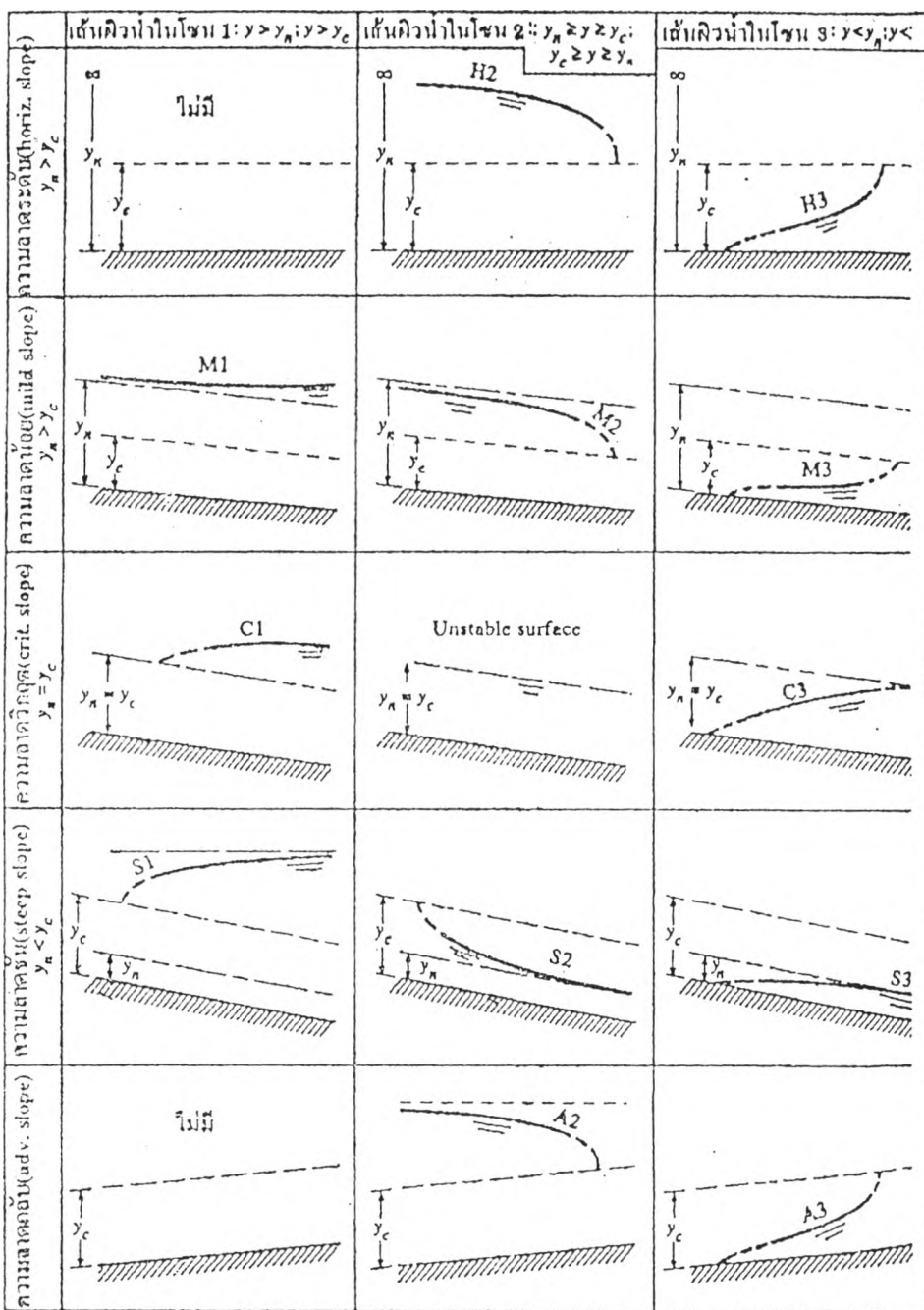
$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

หรือ
$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$
 เมื่อคิดต่อ 1 หน่วยความกว้าง

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{q^2}{gy^3}$$
 เมื่อ E มีค่าต่ำสุด $\frac{dE}{dy} = 0$

นั่นคือ
$$1 - \frac{q^2}{gy^3} = 0$$

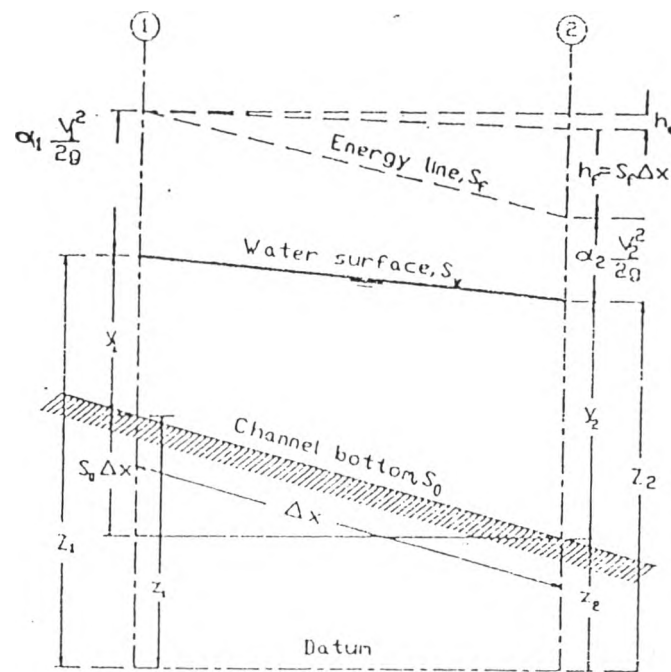
หรือ
$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \dots\dots\dots (2-16)$$



รูป 2-4 การแบ่งและเรียกเส้นผิวน้ำของการไหล

2.4 วิธีการคำนวณหาระดับน้ำในทางน้ำเปิด

Standard step method เป็นวิธีคำนวณหาระดับน้ำในทางน้ำเปิด ใช้คำนวณระดับผิวน้ำที่เป็น Prismatic และ Nonprismatic ได้ด้วย ทางน้ำประเภทนี้ลักษณะทางชลศาสตร์ของทางน้ำไม่ขึ้นกับระยะทางตามแนวทางน้ำ สำหรับทางน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปต้องสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลในสนามในแต่ละรูปตัดที่นำมาใช้คำนวณ การคำนวณจะดำเนินไปเป็นขั้นๆ ในแต่ละรูปตัดซึ่งสามารถทราบคุณสมบัติทางชลศาสตร์ ในแต่ละกรณีจะทราบระยะระหว่างรูปตัด แล้วคำนวณหาความลึกของการไหลในแต่ละรูปตัด โดยการ trial and error ในการคำนวณโดยวิธีนี้ ระดับผิวน้ำของรูปตัดสองข้างหน้าตัด 1 และ 2 เหนือระดับอ้างอิง ดังรูป 2-5



$$z_1 = s_0 \Delta x + y_1 + z_2$$

$$z_2 = y_2 + z_2$$

รูป 2-5 การคำนวณหาระดับน้ำของทางน้ำเปิดโดยวิธี standard step

$$hf = \text{friction loss} = S_f \Delta x = \left(\frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \right) \Delta x$$

Δx = ระยะทางระหว่างหน้าตัด 1 และ 2

y = ความลึกการไหล

V = ความเร็วเฉลี่ย

α = สัมประสิทธิ์พลังงาน

S_0 = ความลาดเทของทางน้ำ

S_f = friction slope = $\frac{n^2 V^2}{R^{4/3}}$

n = สัมประสิทธิ์ Manning

ค่า friction slope (S_f) หาได้จากค่าเฉลี่ยของ friction slope ที่รูปตัดทั้งสองข้าง เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปแทนค่าในสมการ

$$S_0 \Delta x + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + S_f \Delta x$$

จะได้

$$Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_e$$

ซึ่ง h_e คือ eddy loss ซึ่งอาจเกิดขึ้นในทางน้ำ nonprismatic ยังไม่มีวิธีการใดที่จะให้ค่า eddy loss โดยตรง แต่ eddy loss ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของ velocity head และแสดงได้ในรูป $k \left(\Delta \alpha \frac{V^2}{2g} \right)$ k คือค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับช่องทางที่ค่อยๆ เล็กลง และในช่องทางที่ค่อยๆ ฝายออก ค่า k มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.1 และ 0.2 ตามลำดับ สำหรับช่องทางน้ำที่ขยายอย่างรวดเร็วหรือเล็กลงอย่างรวดเร็ว k มีค่าประมาณ 0.5 สำหรับทางน้ำ prismatic หรือทางน้ำไม่เปลี่ยนรูปค่า $k = 0$ เพื่อสะดวกในการคำนวณ ดังนั้นค่า h_e อาจพิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของ friction loss และค่า Manning's n อาจมีค่าสูงขึ้นในการคำนวณค่า h , ดังนั้นในการคำนวณ h_e จะมีค่าเป็น 0

$$H_1 = Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}$$

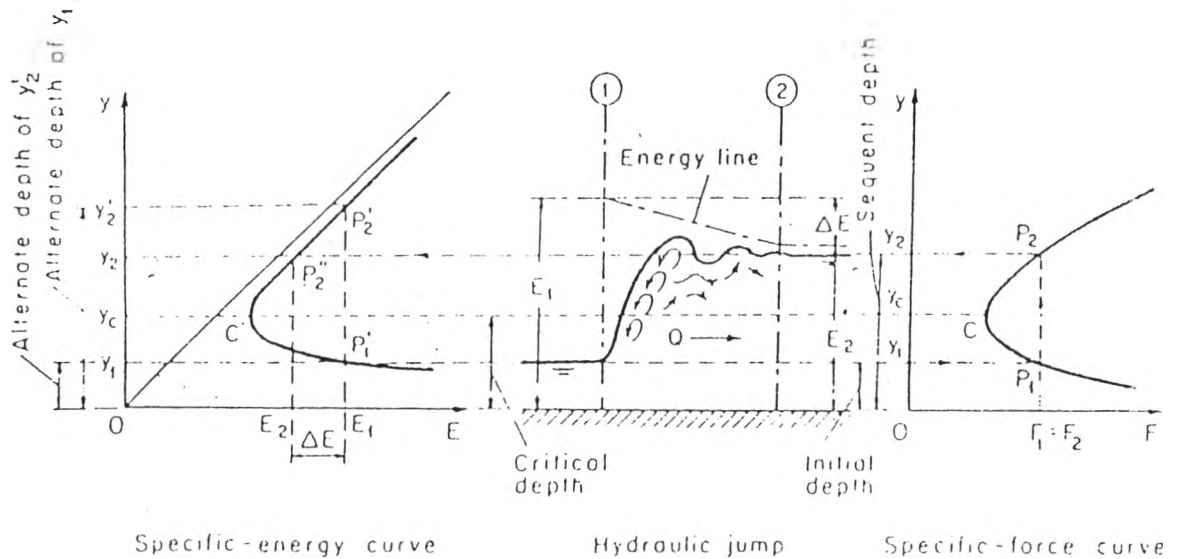
$$H_2 = Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g}$$

$$H_1 = H_2 + h_f + h_e$$

เมื่อ H = head ทั้งหมดที่รูปตัดทั้งสองข้าง

2.5 ทฤษฎีน้ำกระโดด (hydraulic jump)

น้ำกระโดด (hydraulic jump) คือปรากฏการณ์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก ความลึกวิกฤต (critical depth) เป็น subcritical หรือ supercritical หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นปรากฏการณ์ที่มวลน้ำซึ่งไหลด้วยความเร็วสูงแล้วเปลี่ยนเป็นความเร็วต่ำอย่างกะทันหัน ทำให้เกิดพื่นน้ำตดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลใหญ่ขึ้น และระดับสูงขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเกิดขึ้น คือจากพลังงานจลน์ (kinetic energy) มาเป็นพลังงานศักย์ (potential energy) และทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน

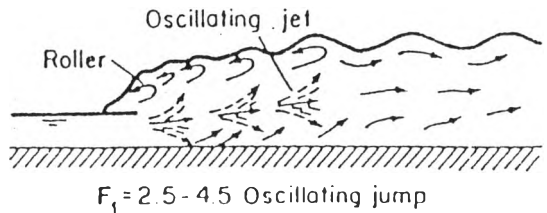
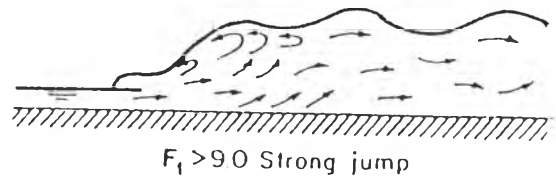
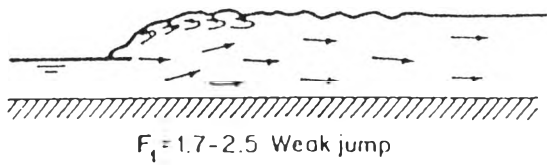
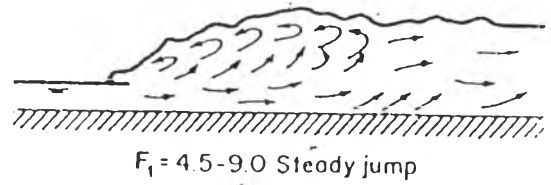
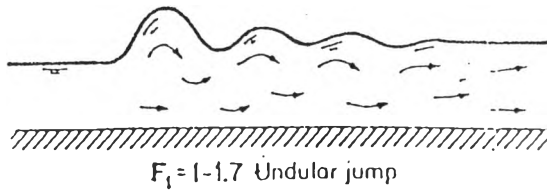


รูป 2-6 น้ำกระโดด (hydraulic jump)

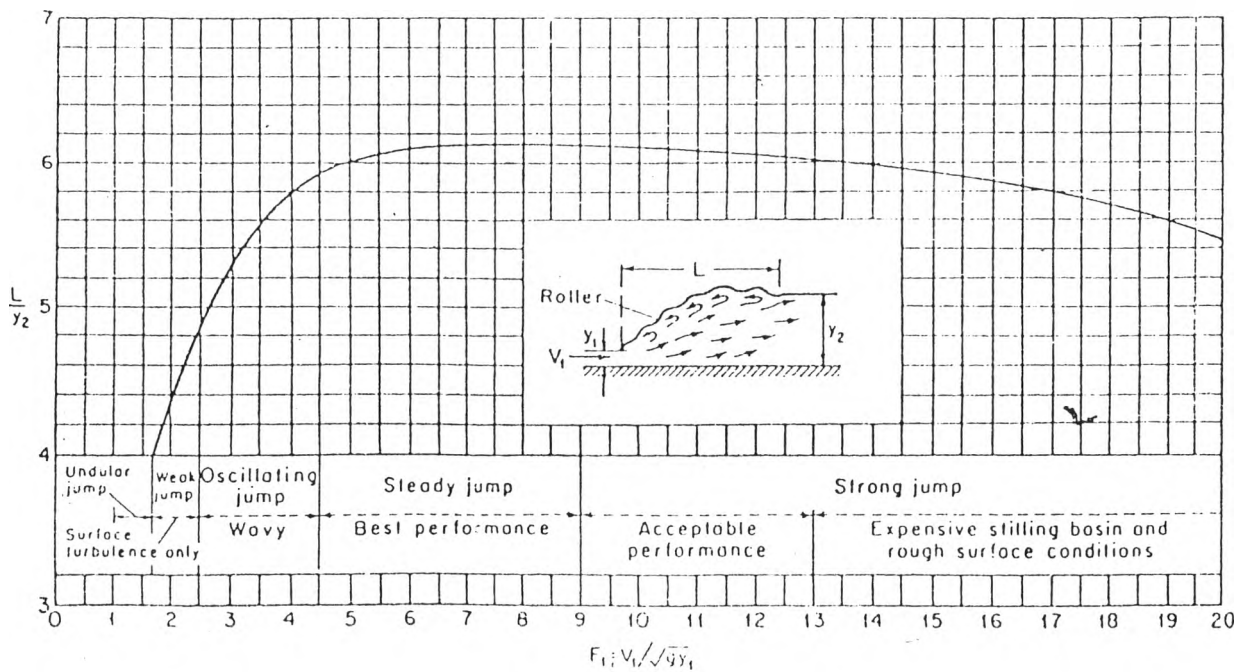
ชนิดของน้ำกระโดด (hydraulic jump)

1. $Fr = 1$ การไหลของน้ำจะอยู่ที่ความลึกวิกฤต (critical depth) ซึ่งไม่เกิดน้ำกระโดด
2. $Fr = 1.0$ ถึง 1.70 ความลึกของ y_1 และ y_2 จะแตกต่างกันเล็กน้อย จะเกิดการปั่นป่วนบนผิวน้ำเล็กน้อย เป็นเพียงปรากฏการณ์บอกให้ทราบว่าการไหลพ้นความลึกวิกฤต เรียกว่า น้ำกระโดด ชนิดนี้ว่า undular jump
3. $Fr = 1.7-2.5$ ผิวน้ำราบเรียบและหน้าตดความเร็วของน้ำมีความเร็วสม่ำเสมอ เรียกว่า น้ำกระโดดชนิดนี้ว่า weak jump
4. $Fr = 2.5-4.5$ จะเกิด jet oscillates กลับ และพุ่งจากข้างใต้ผิวน้ำและกลับลงไปใบบางครั้ง อาจเกิดระยะทางเป็นไมล์ ไปตามลำคลอง ซึ่งทำความเสียหายให้กับชายฝั่งเรียก น้ำกระโดด ชนิดนี้ว่า oscillating jump
5. $Fr = 4.5-9.0$ จะเกิด steady jump ซึ่ง น้ำกระโดดรูปแบบนี้สามารถจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของน้ำร้อยละ 40

6. $Fr > 9$ จะเกิด stong jump หรือบางทีเรียก choppy jump ซึ่งมีลำน้ำพุ่งความเร็วสูงไหลต่อเนื่องกันไปตลอดความยาวของท้ายผิวน้ำและขรุขระไม่ราบเรียบ เมื่อเกิดน้ำกระโดด ควรสร้างแอ่งน้ำนิ่งให้ลึกพอ ทั้งนี้เนื่องจากค่า Y_2 มีค่ามากนั่นเอง



รูป 2-7 ชนิดของ hydraulic jump



รูป 2-8 ความสัมพันธ์ L/y_2 กับ Fr ในทางน้ำแนวราบ

2.5.1 พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากน้ำกระโดด

เมื่อพิจารณาสมการพลังงานหน้าตัด 1 และ 2 จากรูป 2-5

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad \dots\dots\dots (2-17)$$

เนื่องจากทางน้ำอยู่ในแนวระดับ $z_1 = z_2$

$$h_e = y_1 - y_2 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2-18)$$

เนื่องจาก $V_1 y_1 = V_2 y_2$ หรือ $V_2 = V_1 y_1 / y_2$ แทนค่าในสมการ (2-18) ได้ $V_2 = \frac{V_1 y_1}{y_2}$

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

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$h_e = (y_2 - y_1) \left\{ \frac{V_1^2}{2g y_1^2} (y_2 + y_1) - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

โดยที่

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \frac{V_1^2}{g y_1}} - 1 \right)$$

หรือ

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{y_2}{4y_1} (y_2 - y_1)$$

แทนค่าในสมการ (2-19) และจัดสมการใหม่จะได้

$$h_e = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

2.6 อาคารสลายพลังงาน

การกำหนดลักษณะและขนาดของอาคารสลายพลังงาน USBR เสนอชนิดของอาคารสลายพลังงานที่มีความสัมพันธ์กับ ฟรุตนัมเบอร์ ดังนี้

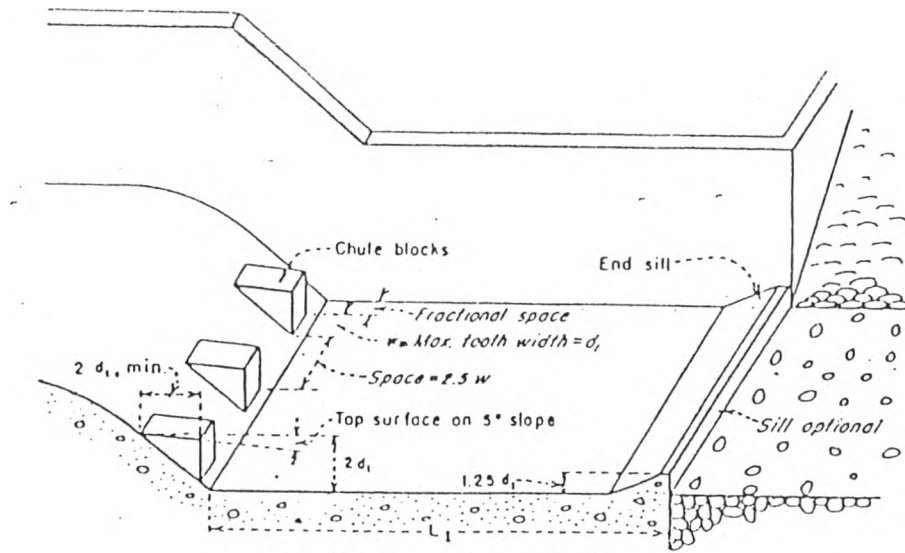
1. อาคารสลายพลังงาน USBR type 1 ใช้กับอาคารที่มีค่า ฟรุตนัมเบอร์อยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 4.5 ประกอบด้วย chute blocks และ endsill ระดับทำynnน้ำควรมีค่ามากกว่า ความลึก เนื่องจากการเกิดน้ำกระโดด (d2) ประมาณร้อยละ 10 เพื่อเป็นการควบคุมน้ำกระโดด ดังแสดงในรูป 2-9
2. อาคารสลายพลังงาน USBR type 2 ใช้กับอาคารเล็กๆ เช่น อาคารลดระดับน้ำในคลองในอาคารส่งน้ำ หรือในอาคารระบายน้ำที่ไม่สูงมาก ความเร็วก่อนการเกิดน้ำกระโดดต้องน้อยกว่า 15 เมตร/วินาที ฟรุตนัมเบอร์มากกว่า 4.5 ประกอบด้วย chute blocks , floor blocks (baffle piers) และ endsill อาคารสลายพลังงานแบบนี้ประหยัดที่สุด สามารถลดความยาวน้ำกระโดดได้ร้อยละ 60 ดังแสดงในรูป 2-10
3. อาคารสลายพลังงาน USBR type 3 ใช้กับอาคารระบายน้ำของเขื่อนสูง ความเร็วก่อนการเกิดน้ำกระโดดมากกว่า 15 เมตร/วินาที ฟรุตนัมเบอร์มากกว่า 4.5 ประกอบด้วย chute blocks และ dentalsill ระดับทำynnน้ำควรมีค่ามากกว่าความลึกเนื่องจากการเกิดน้ำกระโดด (d2) ประมาณร้อยละ 5 เพื่อเป็นการควบคุมน้ำกระโดด ดังแสดงในรูป 2-11

กำหนดให้ freeboard ของอาคารสลายพลังงาน = $0.1(V1+d2)$ ฟุต

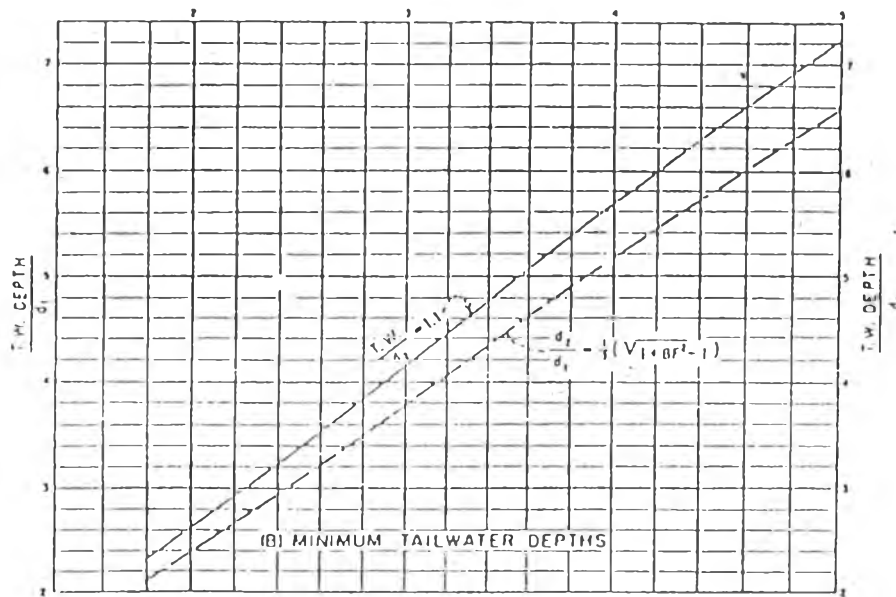
เมื่อ $V1$ = ความเร็วก่อนเข้าอาคารสลายพลังงาน

$d2$ = ความลึกเนื่องจากการเกิดน้ำกระโดด

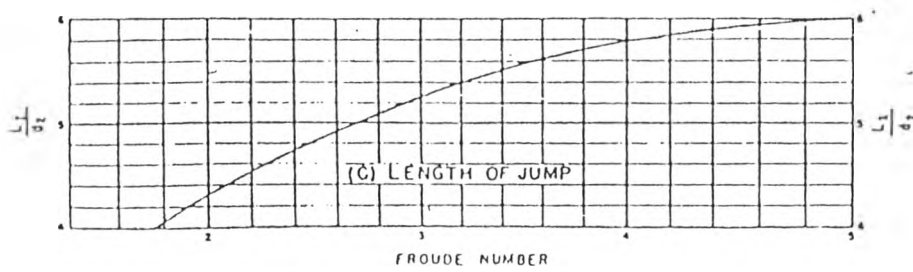
จากรูป 2-9 ถึง 2-10 USBR (United States Department of the Interior Bureau of Reclamation) ได้กำหนดขนาดของอาคารสลายพลังงาน พร้อมอาคารที่เกี่ยวข้อง ระดับทำynnน้ำ และ ความยาวของน้ำกระโดดที่สัมพันธ์กับ ค่า ฟรุตนัมเบอร์ ในปัจจุบันกรมชลประทานก็ใช้รูปแบบจากอาคารสลายพลังงานของ USBR ในการดำเนินการออกแบบอาคารสลายพลังงาน (การรณ 2535)



(A) TYPE I BASIN DIMENSIONS
FROUDE NUMBER



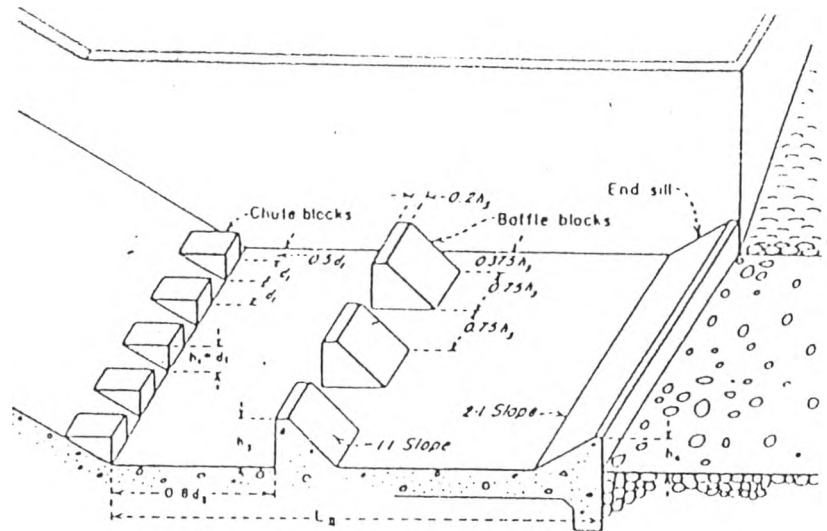
(B) MINIMUM TAILWATER DEPTHS



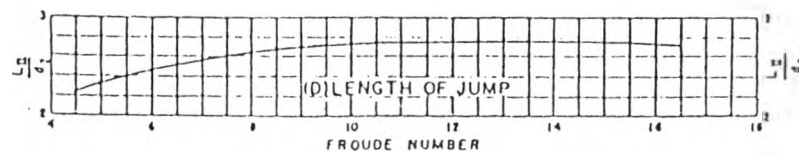
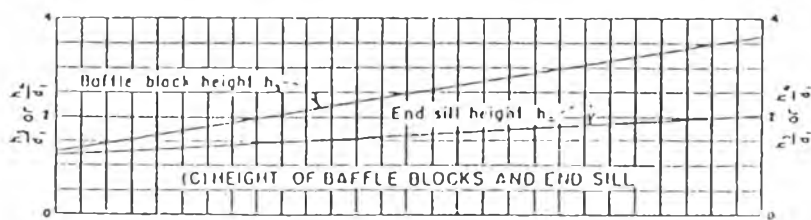
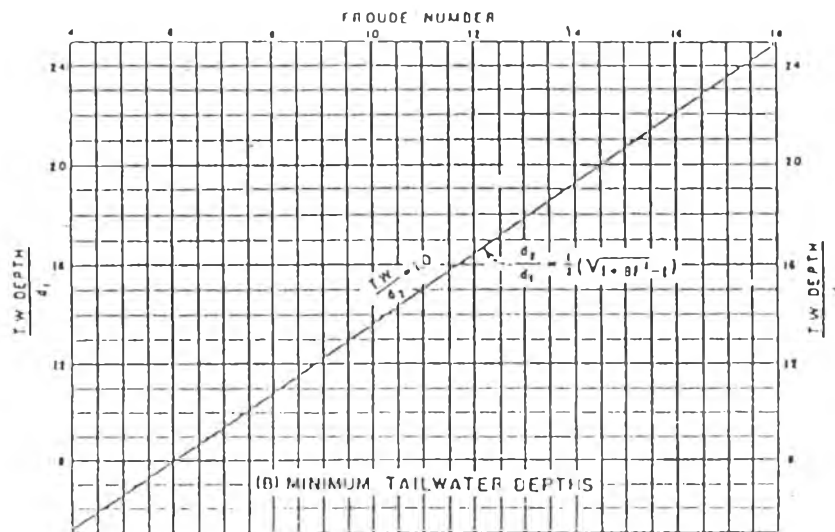
(C) LENGTH OF JUMP

(design of small dam, 1987)

รูป 2-9 อาคารสลายพลังงาน USBR type 1

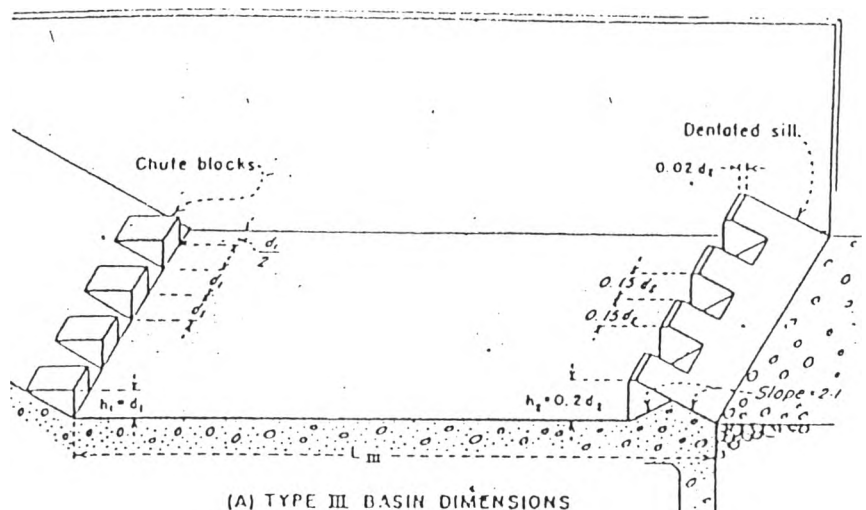


(A) TYPE II BASIN DIMENSIONS

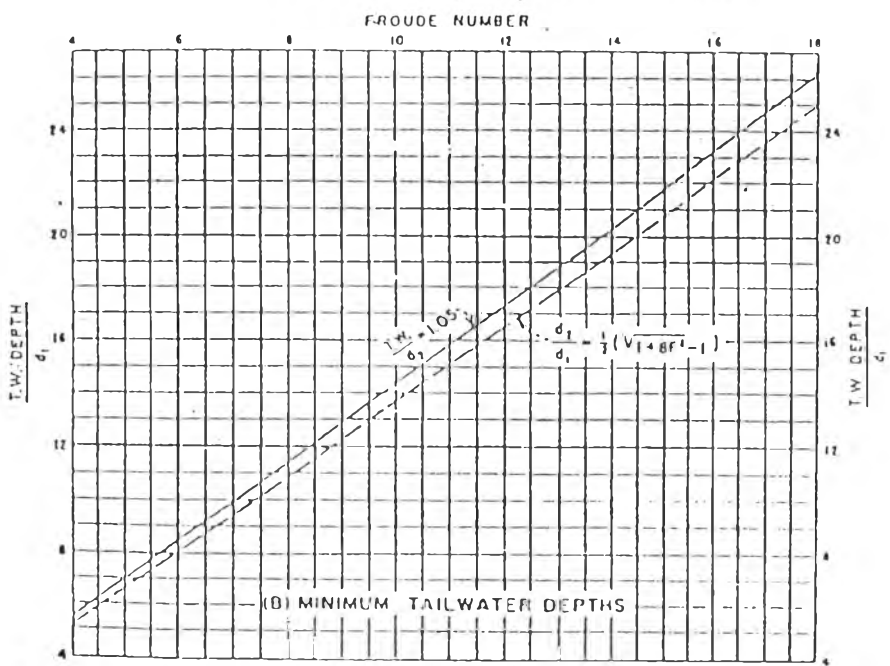


(design of small dam, 1987)

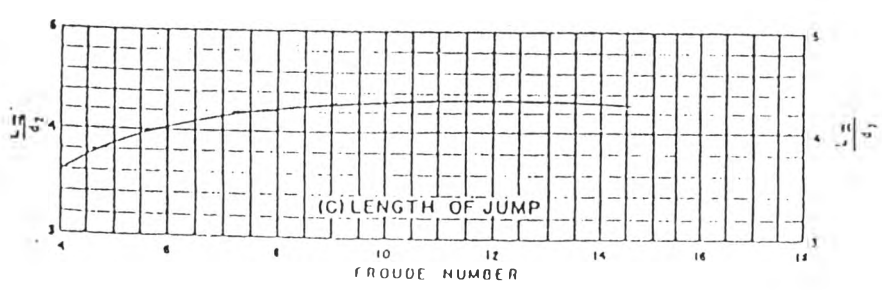
รูป 2-10 อาคารสลายพลังงาน USBR type 2



(A) TYPE III BASIN DIMENSIONS



(B) MINIMUM TAILWATER DEPTHS



(C) LENGTH OF JUMP

(design of small dam, 1987)

รูป 2-11 อาคารสลายพลังงาน USBR type 3