

บทที่ 2

ประสบการณ์และการศึกษาที่ผ่านมา

2.1 ทฤษฎีของการไหลข้ามฝายสันคม

2.1.1 การไหลผ่านฝายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Flow Over Rectangular Weir)

เมื่อน้ำผ่านฝาย ดังรูป 2-1(ก) จะเกิดการลดขนาดของหน้าตัดที่ vena contracta ขณะเดียวกันที่ขอบของฝาย จะมีแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานด้วย จึงเป็นเหตุให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายออกมาจริงๆ มีปริมาณน้อยกว่าค่าที่ได้ตามทฤษฎี

จากรูป 2-1(ก) ถ้า

- L = ความกว้างของฝาย (เมตร)
- H = ความสูงที่ระดับผิวน้ำเหนือขอบล่าง sill (เมตร)
- C_d = สัมประสิทธิ์การไหล
- Q = ปริมาณการไหล (ลบ.ม./วินาที)

ความหนาของแถบเล็กๆ หนา = dh

ความลึกของน้ำ = h

พ.ท. เล็กๆ (dA) = Ldh

ความเร็ว (v) = $\sqrt{2gh}$

จะได้

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

$$= C_d L \sqrt{2g} \int_0^H h^{1/2} dh$$

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

$$\therefore Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{3/2} \dots\dots(1)$$

สมการ(1)นี้เราไม่นำค่า Velocity of Approach มาพิจารณา

C_d คือค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Coefficient of Discharge) สำหรับฝายสันคม มีค่าอยู่ระหว่าง 0.62 เมื่อ $H/P = 0.10$ ถึงประมาณ 0.75 เมื่อ $H/P = 2.0$ อย่างไรก็ตาม Rehbock แห่ง Karlsruhe Hydraulic Laboratory ประเทศเยอรมัน ได้ทำการทดลองหาค่า C_d และสรุปผลดังนี้

$$Cd = 0.605 + \frac{1}{305H} + 0.08 \frac{H}{P}$$

ซึ่งสูตรของ Rehbock นั้นมีความแม่นยำมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.5 % สำหรับค่าของ P ระหว่าง 0.33 ถึง 3.3 ฟุต และค่าของ H ระหว่าง 0.08 ถึง 2.0 ฟุต โดยมีค่า H/P ไม่เกิน 2.0

โดยทั่วไป มักจะเขียนสมการการไหลข้ามสันฝายให้อยู่ในรูปง่าย ๆ คือ

$$Q = C_w LH^{3/2}$$

โดยที่ C_w คือ สัมประสิทธิ์ของฝาย (Weir Coefficient) ซึ่งมีค่าแทนที่ $C_d (2/3)\sqrt{2g}$ และเมื่อแทนค่า $C_d = 0.62$ ลงในสมการ(2) จะได้

$$Q = 3.33LH^{3/2} \quad \text{หน่วยระบบอังกฤษ}$$

$$\text{และ} \quad Q = 1.84LH^{3/2} \quad \text{หน่วยระบบ SI}$$

ในบางกรณี H ที่ได้คำนวณในสูตรอัตราการไหลผ่านฝาย จะพิจารณาถึง Velocity of Approach ด้วยดังนี้

$$H = h + \alpha v^2 / 2g$$

โดยที่ $h =$ ระดับน้ำเหนือสันฝาย

$$\alpha = \text{ส.ป.ส. การกระจายความเร็ว (โดยปกติใช้ } \alpha = 1.0)$$

$$V^2 / 2g = \text{Velocity head}$$

นอกจากจะมีสมการของ Rehbock ในการคำนวณค่า C_d แล้วยังมีสมการของ William Smith ดังนี้

$$Cd = 0.616(1 - 0.1 \frac{h}{L})$$

การไหลผ่านฝายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อคำนึงถึงความเร็วขณะเข้าใกล้
 (Velocity of Approach ; $\frac{v_0^2}{2g}$) ค่า H จริงๆ ในการหาค่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายจะเป็นผลรวม
 ของ H และ $\frac{v_0^2}{2g}$ จะได้สมการคือ

$$Q = C_d \sqrt{2gL} \int_{\frac{v_0^2}{2g}}^{H + \frac{v_0^2}{2g}} h^{3/2} dh$$

$$\text{หรือ} \quad Q = C_d \sqrt{2gL} \left[\left(H + \frac{v_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad \dots\dots(2)$$

การ Calibrate ฝายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การใช้ฝายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการหาปริมาณการไหลของน้ำ ถ้าต้องการจะ
 ให้ได้ค่าที่แน่นอนนั้นควรที่จะ Calibrate ก่อน ตามสมการ (1)

ค่า $\frac{2}{3} \sqrt{2gL}$ เป็นค่าคงที่เฉพาะฝายหนึ่งๆ

ถ้าให้ $K = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gL}$

จะได้ $Q = KH^{3/2}$

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

$$\text{และ} \quad C_d = \frac{K}{\frac{2}{3} \sqrt{2gL}}$$

2.1.2 การไหลผ่านฝายรูปสามเหลี่ยม (Triangular Weir or V-notch)

เมื่อปริมาณการไหลต่ำๆ การไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยมจะยากต่อการวัดค่าที่แท้
 จริง ในกรณีนี้จึงใช้ฝายสามเหลี่ยม เพราะว่าค่า H จะเพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าฝายสี่เหลี่ยมผืนผ้า
 ความยาวของขอบที่แต่น้ำมีได้ขึ้นอยู่กับ H เพราะความยาวที่ขอบล่างคงที่ตลอดเวลา เมื่อ
 H มีค่าต่างๆ กัน ค่า C_c ซึ่งขึ้นอยู่กับขอบที่แต่น้ำจึงไม่คงที่สำหรับค่า H ใดๆ แต่ใน
 กรณีฝายรูปสามเหลี่ยมไม่มีขอบล่างเหมือนฝายรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นฝายรูปสามเหลี่ยมนี้ผลของ
 มันจะขึ้นอยู่กับด้ายข้างเพียงอย่างเดียว ดังรูป 2-1(ข) ค่า C_c จะคงที่สำหรับทุก H ของน้ำ
 จากรูป 2-1(ข) ซึ่งจะได้

H = ความสูงของระดับผิวน้ำ

θ = มุมของฝาย

จากขอบเล็กๆ ได้พื้นที่ = x dh

ต่ำจากผิวน้ำ = h

V ผ่านแถบเล็กๆ = Cd As Vt

dQ = Cd(xdh)√2gh

จะมีปริมาณการไหล Q = ∫ dQ = ∫ Cd(xdh)√2gh

L/H = x/(H-h) หรือ x = L(H-h)/H

ดังนั้น

Q = Cd√2g L/H ∫ (H-h)h^1/2 dh
= Cd√2g L/H [2/3 Hh^3/2 - 2/5 h^5/2]
= Cd√2g L/H * 4/15 H^5/2
= Cd√2g L * 4/15 * H^3/2(1)

L/2/H = tan θ/2

∴ L = 2H tan θ/2

เอา L แทนใน (1) ได้ Q = Cd√2g 4/15 * 2H tan θ/2 H^3/2

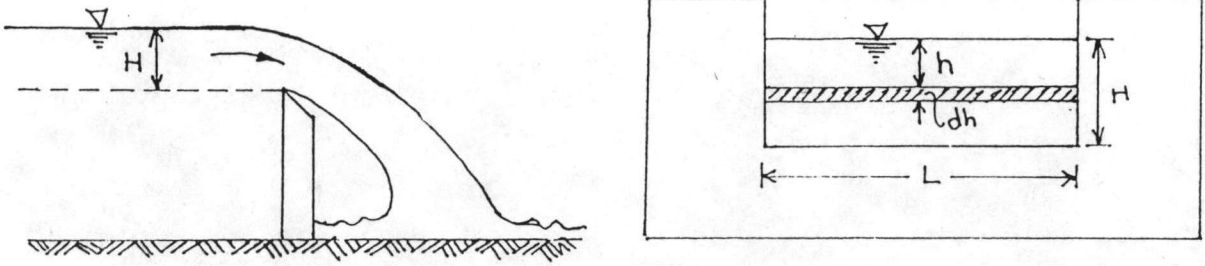
∴ Q = 8/15 Cd√2g tan θ/2 H^5/2

2.1.3 การไหลข้ามฝายสันกว้าง

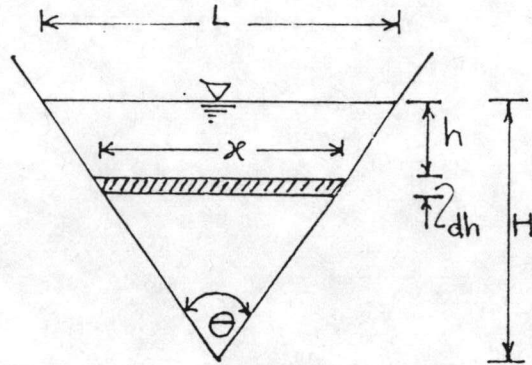
ฝายสันกว้าง (Broadcrested Weir) คือโครงสร้างที่สร้างกันทางน้ำเปิด
ดังรูป 2-3 โดยทั่วไปความกว้างจะต้องมากกว่า 2 เท่าของความสูงของน้ำด้านเหนือฝายจาก
สันฝาย ทางด้านการใช้งานมีลักษณะเดียวกันกับฝายสันคมคือ ใช้สำหรับยกระดับและเก็บกัก
น้ำเหนือฝาย และเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหล สูตรสำหรับการคำนวณอัตราการไหลกรณี
การไหลอิสระ (Free Flow) มักอยู่ในรูปของ

Q = Cd LH^3/2

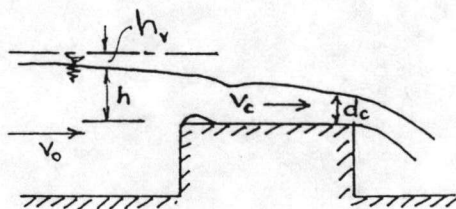
H = h + v_a^2/2g



ก) ฝายสันคัมรูปสี่เหลี่ยม



ข) ฝายสันคัมรูปสามเหลี่ยม



ค) ฝายสันกว้าง

รูป 2-1 การไหลข้ามฝายสันคัม

2.2 การออกแบบสันอาคารระบายน้ำล้น (Spillway Crest Shape Design)

การกำหนดรูปร่างของฝายโค้ง (Ogee Spillway) ที่เหมาะสมนั้นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ เช่น หลีกเลี่ยงการเกิดสุญญากาศบนหลังฝาย ประสิทธิภาพการไหลเชิง-ชลศาสตร์ ความเหมาะสมสำหรับก่อสร้าง (Practicability) ความมั่นคง (Stability) และประหยัดค่าก่อสร้าง ได้มีผู้ทำการทดลองรูปร่างของฝายโค้งด้วยแบบจำลอง โดยจำลองมาจากส่วนล่างของลักษณะการไหลของน้ำผ่านฝายสันคม (Sharp-Crest Weir) ดังรูป 2-2(ก) ตั้งแต่ปี 1886 เป็นต้นมาได้มีการเสนอวิธีการกำหนดรูปตัด lower nappe และ upper nappe หลายวิธีการจนกระทั่งช่วงปี 1932 - 1948 USBR. ได้ทำการทดลองอย่างหนักในเรื่องนี้ และต่อมา US.COE. Waterways Experiment Station ได้นำผลการทดลองดังกล่าวมาสรุปและกำหนดรูปร่างมาตรฐาน หารูปตัดของฝายสันโค้ง ดังแสดงในรูป 2-2(ข) ด้วยสมการ

$$X^n = KH_d^{n-1} Y$$

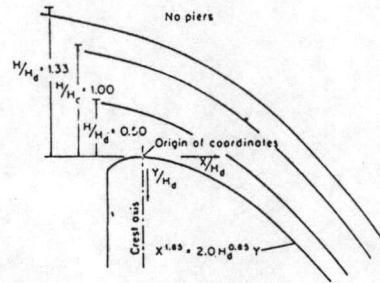
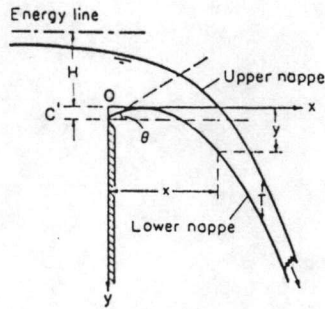
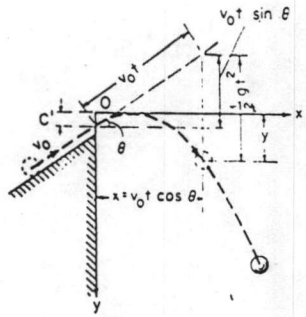
X, Y = จุดพิกัด (coordinate)

H_d = ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝายที่ Q_d

K, n = สัมประสิทธิ์ในตาราง

จากรูป 2-2(ค) ได้แสดงลักษณะรูปร่างมาตรฐานของฝายโค้ง หรือ lower nappe ของการไหลบนหลังฝาย

Slope of upstream face	K	n
Vertical	2.000	1.850
3 on 1	1.963	1.836
3 on 2	1.939	1.810
3 on 1	1.873	1.776



COORDINATES FOR UPPER NAPPE WITH NO PIERS*

$H/H_d = 0.50$		$H/H_d = 1.00$		$H/H_d = 1.33$	
X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d
-1.0	-0.490	-1.0	-0.933	-1.0	-1.210
-0.8	-0.484	-0.8	-0.915	-0.8	-1.185
-0.6	-0.475	-0.6	-0.893	-0.6	-1.151
-0.4	-0.460	-0.4	-0.865	-0.4	-1.110
-0.2	-0.425	-0.2	-0.821	-0.2	-1.060
0.0	-0.371	0.0	-0.755	0.0	-1.000
0.2	-0.300	0.2	-0.681	0.2	-0.919
0.4	-0.200	0.4	-0.586	0.4	-0.821
0.6	-0.075	0.6	-0.465	0.6	-0.705
0.8	0.075	0.8	-0.320	0.8	-0.569
1.0	0.258	1.0	-0.145	1.0	-0.411
1.2	0.470	1.2	0.055	1.2	-0.220
1.4	0.705	1.4	0.294	1.4	-0.002
1.6	0.972	1.6	0.503	1.6	0.243
1.8	1.269	1.8	0.857	1.8	0.531

* Based on CW 801 tests for negligible velocity of approach.

COORDINATES FOR UPPER NAPPE AT CENTER LINE OF BAY WITH TYPE 2 PIERS*

$H/H_d = 0.50$		$H/H_d = 1.00$		$H/H_d = 1.33$	
X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d
-1.0	-0.482	-1.0	-0.941	-1.0	-1.230
-0.8	-0.480	-0.8	-0.932	-0.8	-1.215
-0.6	-0.472	-0.6	-0.913	-0.6	-1.194
-0.4	-0.457	-0.4	-0.890	-0.4	-1.165
-0.2	-0.431	-0.2	-0.855	-0.2	-1.122
0.0	-0.384	0.0	-0.805	0.0	-1.071
0.2	-0.313	0.2	-0.735	0.2	-1.015
0.4	-0.220	0.4	-0.647	0.4	-0.944
0.6	-0.088	0.6	-0.539	0.6	-0.847
0.8	0.075	0.8	-0.389	0.8	-0.725
1.0	0.257	1.0	-0.202	1.0	-0.564
1.2	0.462	1.2	0.015	1.2	-0.356
1.4	0.705	1.4	0.266	1.4	-0.102
1.6	0.977	1.6	0.521	1.6	0.192
1.8	1.278	1.8	0.860	1.8	0.465

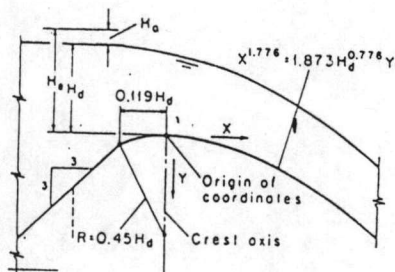
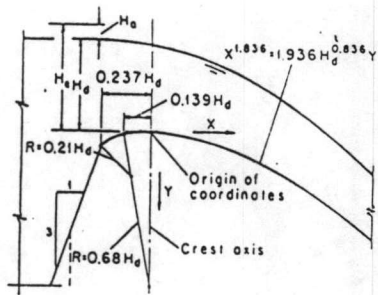
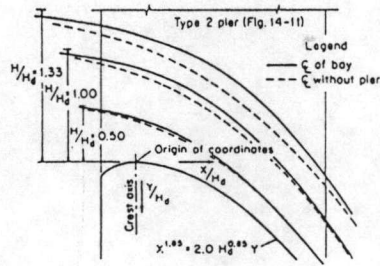
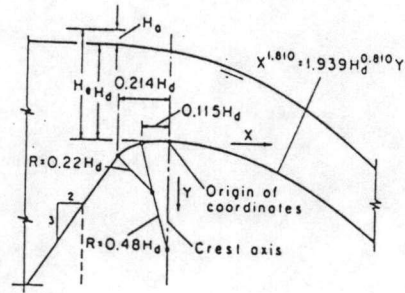
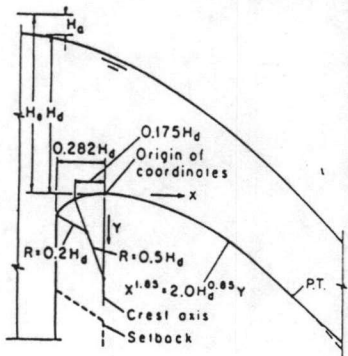
* Based on CW 801 tests for negligible velocity of approach.

COORDINATES FOR UPPER NAPPE ALONG PIERS*

$H/H_d = 0.50$		$H/H_d = 1.00$		$H/H_d = 1.33$	
X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d	X/H_d	Y/H_d
-1.0	-0.495	-1.0	-0.950	-1.0	-1.253
-0.8	-0.492	-0.8	-0.940	-0.8	-1.221
-0.6	-0.490	-0.6	-0.929	-0.6	-1.209
-0.4	-0.482	-0.4	-0.930	-0.4	-1.218
-0.2	-0.440	-0.2	-0.925	-0.2	-1.244
0.0	-0.383	0.0	-0.779	0.0	-1.103
0.2	-0.205	0.2	-0.651	0.2	-0.950
0.4	-0.185	0.4	-0.545	0.4	-0.821
0.6	-0.076	0.6	-0.425	0.6	-0.689
0.8	0.060	0.8	-0.285	0.8	-0.549
1.0	0.240	1.0	-0.121	1.0	-0.389
1.2	0.445	1.2	0.067	1.2	-0.215
1.4	0.675	1.4	0.286	1.4	0.011
1.6	0.925	1.6	0.521	1.6	0.208
1.8	1.177	1.8	0.779	1.8	0.438

* Based on CW 801 tests for negligible velocity of approach.

ก) การหา Nappe Profile การไหลข้ามฝายสันคมโดยใช้หลักโปรเจกต์ดิลล์



ข) การหา Nappe Profile การไหลข้ามฝายรูปร่างมาตรฐาน W.E.S.

รูป 2-2 การพิจารณาช่องทางน้ำสันจากการไหลผ่านฝายสันคม

ค) รูปร่างฝายน้ำสันมาตรฐานของ US. COE.-W.E.S.

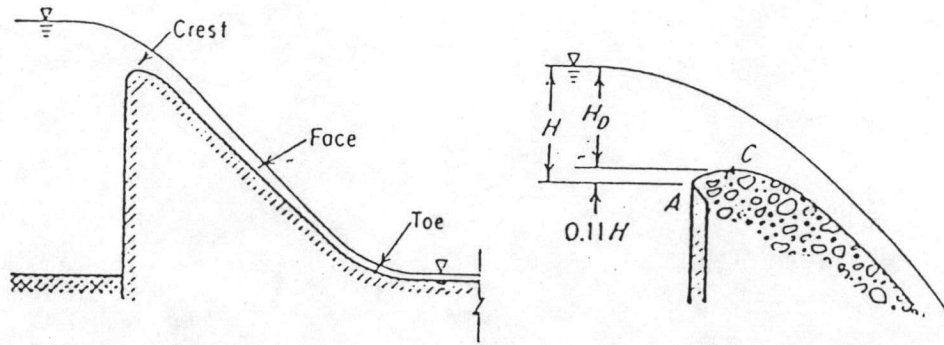
2.3 การศึกษาความดันบนฝายสันโค้ง

ความดันบนยอดทางน้ำล้น

ตามปกติยอดทางน้ำล้นจะมีรูปร่างเหมือนกับผิวล่างของส่วนโค้งที่เกิดจากน้ำไหลผ่านฝายสันคม ดังรูป 2-3(ก) ดังนั้นความดันบนยอดทางน้ำล้นจะเป็นความดันบรรยากาศ ถ้าความดันที่ผิวกระทำต่อการไหลผ่านฝายยอดทางน้ำล้นจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายความดัน ซึ่งจะเป็นไปได้ถ้าให้ติดขอบ (Boundary Layer) บนยอดทางน้ำล้นมีความหนามากเพียงพออย่างเดียวกัน และสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าชั้นติดขอบเกิดขึ้นบริเวณรอบจุด A มีปริมาณเป็นสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับความสูงของน้ำที่ไหลผ่านยอดทางน้ำล้น เพราะฉะนั้นอาจจะคาดได้ว่าความดันบนยอดทางน้ำล้นเป็นความดันบรรยากาศ เพราะถ้าความดันบนยอดทางน้ำล้นมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศก็จะลดอัตราการไหล และถ้าความดันบนยอดทางน้ำล้นมีค่าน้อยกว่าความดันบรรยากาศก็จะเพิ่มอัตราการไหล แต่จะทำให้เสี่ยงต่อการเกิดการเกิดความไม่มั่นคง และเกิดโพรง (Cavitation) ขึ้นได้

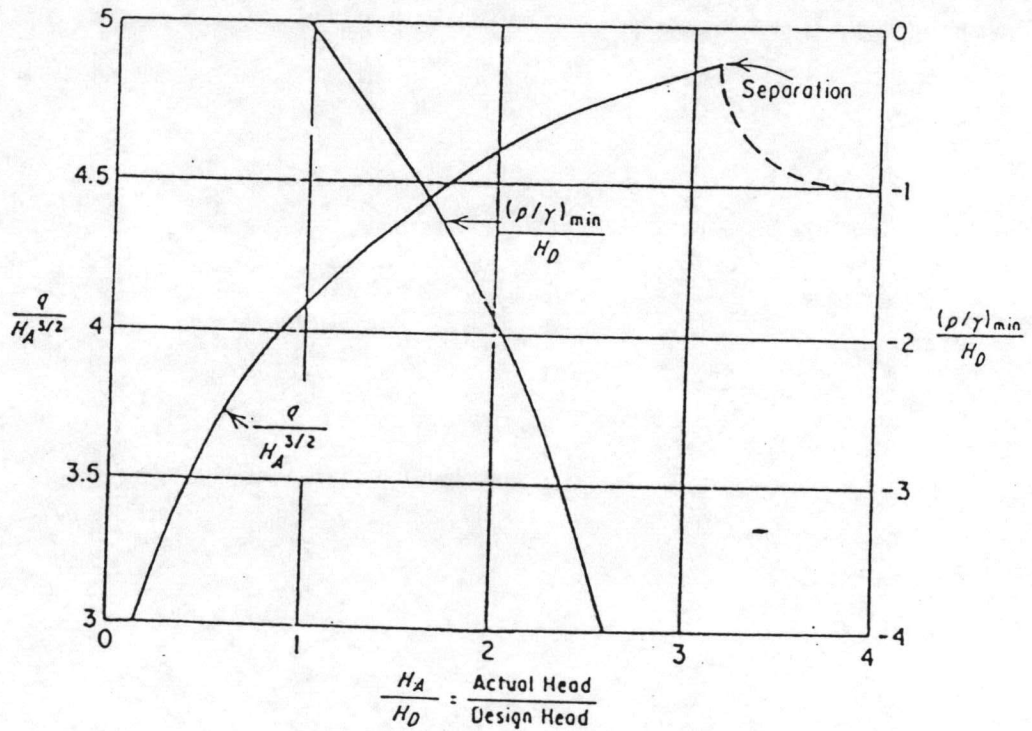
จากการทดลองพบว่าระยะจากยอดฝายสันคมถึงจุดสูงสุดของยอดทางน้ำล้นมีค่าเท่ากับ $0.11H$ ดังแสดงในรูป 2-3(ข) ฉะนั้นเมื่อแทนค่า H ในสมการ $q = 1.80H^{3/2}$ ลบ.ม./วินาที/ม. (กรณีของทางน้ำล้น จะได้ $q = 2.15H_D^{3/2}$ เมื่อ H_D คือความสูงพลังงานออกแบบ (design head) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อจัดการให้ความสูงพลังงานมีค่าเท่ากับ H_D แล้วจะทำให้ความดันบนยอดทางน้ำล้นมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

เมื่อความสูงพลังงานมีค่าสูงกว่าความสูงพลังงานออกแบบ อันตรายที่จะเกิดขึ้นจะไม่มากเมื่อตอนเกิดครั้งแรกเกี่ยวกับเรื่องนี้ Rouse, Reid, Dillman ปี 1935 ได้ยืนยันเรื่องนี้ด้วยการทดลองซึ่งได้แสดงดังรูป 2-3(ค) จากรูปจะเห็นได้ว่าความสูงพลังงานที่แท้จริง H_A อาจมีค่าเกินค่าความสูงพลังงานออกแบบ 50% ได้อย่างปลอดภัย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นเพียง 10% กำหนดให้ว่าความดันเฉพาะ (Local Pressure) จะไม่ตกลงมาต่ำกว่าระดับเกิดโพรง ขนาดของความดันเฉพาะแห่ง (ยอดทางน้ำล้นที่ได้ทำการทดลอง) ซึ่งแสดงไว้ในรูป 2-3(ค)



ก) รูปทั่วไปของฝาย

ข) ยอดทางน้ำสันและฝายสมมูล



ค) คุณสมบัติของยอดทางน้ำสันจากผลการทดลองของ Rouse, Reid, Dillman

รูป 2-3 หน้าข้างการไหลข้ามสันฝายและกราฟความสัมพันธ์จากการศึกษาของ

Rouse, Reid, Dillman

2.4 การศึกษาผิวหน้าช่องทางน้ำล้น

2.4.1 ความเร็วที่สันทางน้ำล้น

การไหลลงมาตามผิวหน้าช่องทางน้ำล้นที่มีความลาดชันมาก (Steep Slope) ตามปกติแล้วจะเป็นมุม 45° กับแนวราบ การไหลกรณีนี้จะเกิดอัตราเร่ง และชั้นติดขอบขึ้น ระหว่างที่ไหลลงมาตามผิวหน้าช่องทางน้ำล้น ดังรูป 2-4(ก) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) จะยังไม่ปรากฏเต็มที่จนกว่าชั้นติดขอบมีความหนาเต็มหน้าตัดการไหล คือจุด C ในรูป 2-4(ก) เนื่องจากช่องทางน้ำมีความลาดชันมากทำให้เกิดความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ที่สำคัญคือ การที่อากาศเข้าไป (Air Entrainment or Insufflation) เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าอากาศที่เข้าไปปะปนจะเริ่มตันที่ใกล้ๆ จุด C ซึ่งเป็นจุดที่ชั้นติดขอบมีความหนาเท่ากับความลึกของการไหล ส่วนผสมของอากาศกับน้ำ สัดส่วนของอากาศจะเพิ่มขึ้น และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจนกระทั่งเกิดการไหลแบบเสมอต้นเสมอปลาย หรือเมื่อมาถึงฐานของทางน้ำล้น

เป็นที่แน่ชัดว่าผู้ออกแบบปรารถนาที่จะทราบความเร็วการไหลเมื่อมาถึงฐาน หรือ ดินทางน้ำล้น แต่จากปรากฏการณ์ที่อธิบายแล้วข้างต้นจะเห็นว่าการคำนวณหาความเร็วจะเป็นงานที่ลำบากและยุ่งยาก ถึงแม้ว่าจะมีผู้ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับธรรมชาติการไหลได้ถูกต้องก็ตาม เกี่ยวกับเรื่องนี้ได้มีการศึกษาของกรมชลประทาน สหรัฐ (USBR.) โดย Bradley & Peterka ปี 1957 ได้เสนอผลงานออกมาในรูปของกราฟ ดังแสดงในรูป 2-4(ข)

จากกราฟนี้ทำให้การคำนวณหาความเร็วที่สันทางน้ำล้นได้โดยผลการคำนวณ มีความถูกต้องพอเพียงสำหรับการออกแบบเบื้องต้น

ความเร็วทฤษฎี (theoretical velocity) ที่ใช้ในรูป 2-4(ข) กำหนดได้ด้วย สมการ

$$V_t = \sqrt{2g\left(Z - \frac{H}{2}\right)}$$

เมื่อ Z และ H คือความสูง ดังแสดงในรูป 2-4(ก) ในกราฟรูป 2-4(ข) ใช้ได้กับช่องทางน้ำล้นที่มีความลาดชันมาก คือมีค่าระหว่าง $0.8H : 1V$ และ $0.6H : 1V$

2.4.2 การผสมอากาศกับน้ำในช่องทางน้ำล้น

กลไกของการผสมอากาศกับน้ำในช่องทางน้ำล้นยังไม่เป็นที่เข้าใจนัก และผลการเก็บรวบรวมข้อมูลสนามของความเข้มข้นของอากาศที่ผสมอยู่ในน้ำยังแตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตามก็ตีผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการทดลองโดย Straub & Anderson ปี 1960 เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มาก การทดลองดังกล่าวกระทำในรางน้ำเปิด (Flume) ยาว 15 เมตร ความขรุขระที่ผิวพื้นรางทำด้วยอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (K_s) 0.7112 มม. ผนังด้านข้างเรียบและอัตราส่วนของความกว้างต่อความลึกมีค่ามาก เพื่อให้ผลกระทบจากผนังด้านข้างมีค่าน้อย นั่นคือ การที่อากาศเข้าไปผสมกับน้ำ เนื่องจากชั้นติดขอบเรียบใหญ่จากพื้นรางน้ำอย่างเดียว ไม่ใช่จากผนังด้านข้างความลาดชันของพื้นรางน้ำ มีค่าเปลี่ยนแปลงได้จาก 7.5 องศา ถึง 75 องศา และความลึกการไหลปรับได้ด้วยประตูน้ำด้านเข้า (Inlet Gate) เพื่อทำให้เกิดการไหลด้านท้ายน้ำของประตูมีความเสมอดันเสมอปลายทั้งความเร็วการไหล ความลึกและการกระจายของอากาศที่ผสมอยู่

Straub and Anderson พบว่าการไหลเสมอดันเสมอปลายโดยไม่มีอากาศเข้ามาผสมจะเป็นตามสมการเซซี เมื่อกำหนดค่า C (สัมประสิทธิ์เซซี) เท่ากับ 49.7 ดังนั้น

$$Q = 49.7 d_m^{3/2} S^{1/2}$$

d_m คือ ความลึกเสมอดันเสมอปลาย

การกำหนดค่า d_m ก็เพื่อจะใช้เป็นความลึกอ้างอิงของการไหลเสมอดันเสมอปลายเมื่อมีอากาศผสม ทั้งนี้เพราะการไหลสม่ำเสมอเมื่อมีอากาศผสมก็เป็นไปตามสมการเซซีด้วย นอกจากนี้ยังกำหนดความลึก dy คือความลึกที่เมื่อ $C = 0.99$ และ dw ความลึกที่ประสิทธิผล (effective depth) ของน้ำเพียงอย่างเดียว โดย dw กำหนดด้วยสมการ

$$dw = \int_0^{\infty} (1 - C) dy$$

เพราะฉะนั้น $dw = q/V_m$ เมื่อ V_m เป็นความเร็วเฉลี่ยการไหลและ C กำหนดด้วยสมการ

$$C = C_1 \left(\frac{y}{dy - y} \right)^{v_b/d_v}$$

เมื่อ C_1 คือความเข้มข้นที่ $y = d_T/2$,

d_T คือความลึกเปลี่ยนแปลงระหว่างการไหล 2 ย่าน (regions) ย่านที่ 1 อยู่ข้างล่างคือย่านการไหลที่มีอากาศเป็นเม็ด (air bubbles) ผสมอยู่ ส่วนย่านที่ 2 อยู่ข้างบนเป็นย่านการไหลที่ประกอบด้วยเม็ดฝอยคล้ายสเปรย์

y คือความลึกวัดในแนวตั้งฉากกับพื้นรางน้ำ

$$v^* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$$

v_b = ความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศเป็นเม็ด (Air Bubbles Velocity) และ a คือค่าคงที่สากลของ Von Karman ' s Universal Constant มีค่าเท่ากับ 0.4 สำหรับของไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

ผลการทดลองของ Straub and Anderson สรุปได้ดังนี้คือ กำหนด q และ s จึงคำนวณค่า d_m ได้จากสมการ $Q = 49.7 d_m^{3/2} s^{1/2}$ เมื่อคำนวณ d_m ได้ก็จะสามารถคำนวณหาค่า d_T และ d_w ได้ในพิสัย $0.25 < \bar{C} < 0.75$ ดังนี้

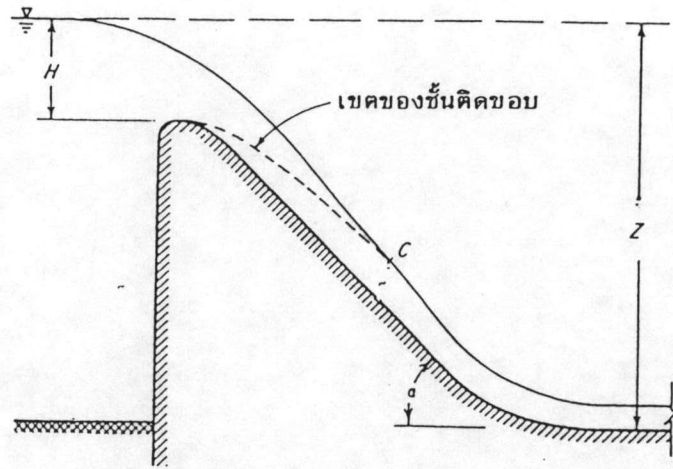
$$\frac{d_T}{d_m} = 1 + 2(\bar{C} - 0.25)^2$$

$$\frac{d_w}{d_m} = 1 - 1.3(\bar{C} - 0.25)^2$$

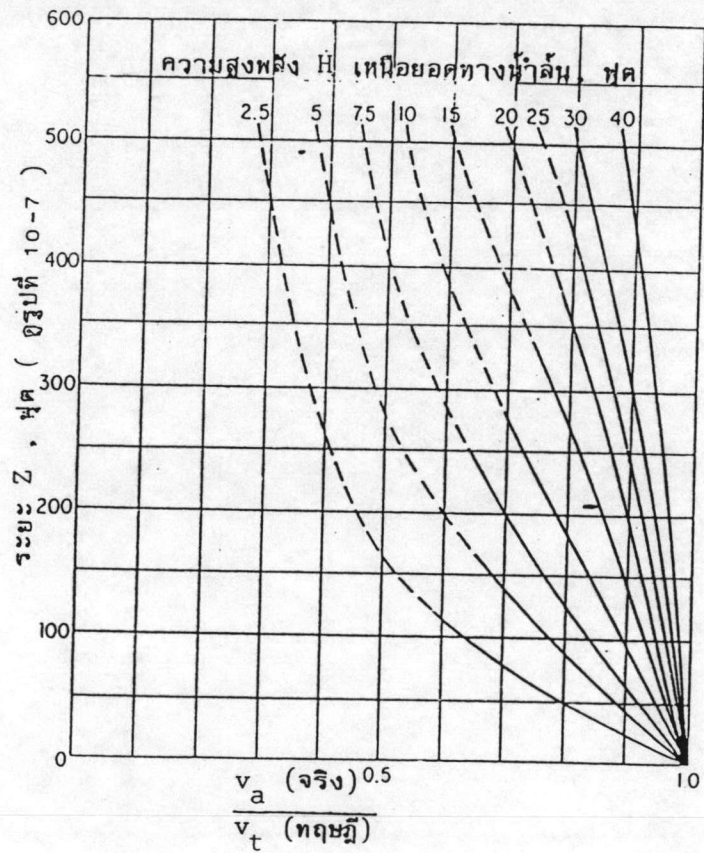
เมื่อ $\bar{C} < 0.25$ ย่านที่ 2 (สเปรย์) จะไม่เกิดขึ้น และฉะนั้น d_m d_w และ d_T จึงเป็นค่าเดียวกัน จากคำจำกัดความ, d_m หาได้จากสมการ

$$d_n = \frac{d_w}{1 - \bar{C}}$$

คำนึงไว้ว่า สมการ $Q = 49.7 d_m^{3/2} s^{1/2}$ เป็นจริงเฉพาะทางน้ำที่มีคุณสมบัติเหมือนกับ Straub and Anderson ใช้ทำการทดลอง



ก) การเกิดชั้นตติคขอบที่ผิวหน้าช่องทางน้ำล้น



ข) ความเร็วการไหลที่ตีนทางน้ำล้นเสนอโดย Bradley&Peterka

รูป 2-4 การเกิดชั้นตติคขอบและกราฟความสัมพันธ์จากการศึกษาของ Bradley & Peterka

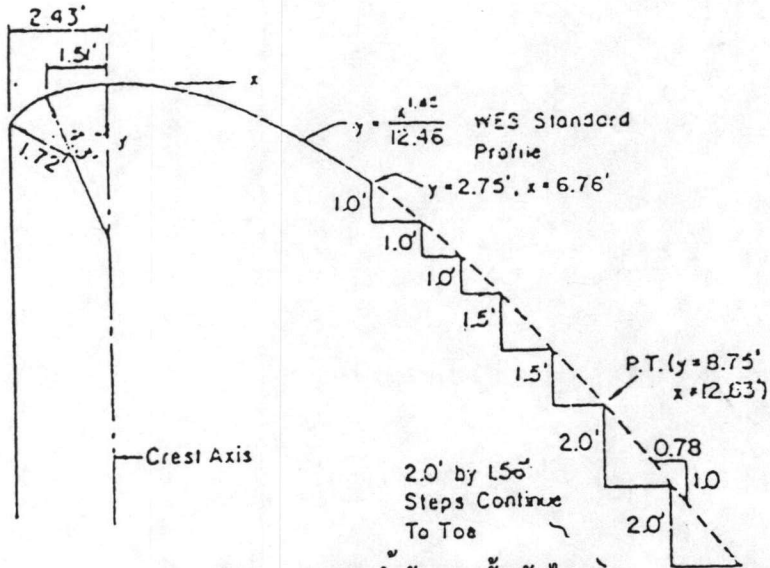
2.5 การศึกษาการสลายพลังงานของการไหลข้ามสันฝาย

ทางระบายน้ำล้นแบบขั้นบันได ศึกษาโดย Robert M. Sorensen ปี 1985
วัตถุประสงค์ของการศึกษาแบบจำลองนี้ คือ

- ผลกระทบของการไหลผ่าน Transition จากรูปตัดตามยาวของฝายน้ำที่ราบเรียบไปยังจุดต่ำสุดของยอดทางระบายน้ำล้น เป็นขั้นแรกของการเริ่มฝายหน้าของทางระบายน้ำล้น
- การสลายพลังงานในการไหลข้ามทางระบายน้ำล้น และผลของความเร็วที่ได้บริเวณตีนทางน้ำล้น (Toe)
- ความสูงของกำแพงที่ต้องการในการไหลผ่านฝายหน้าของทางระบายน้ำล้นที่เป็นรูปขั้นบันได

ให้ทางระบายน้ำล้นที่ใช้เป็นแนวตรงลงไป ออกแบบตามพื้นฐานของแบบมาตรฐานในรูปทรง Ogee Spillway ผลของการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นในเรื่องที่มีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบทางระบายน้ำล้นแบบขั้นบันได ดังแสดงในรูป 2-5(ก) ว่ามีผลกระทบอย่างไรบ้างซึ่งเป็นการออกแบบโดยทั่วๆ ไปที่นิยมใช้กัน รูปตัดของทางระบายน้ำล้นใช้แบบมาตรฐานของ WES. และมีข้อกำหนดในการไหลต่างๆ และข้อกำหนดรูปตัดฝายหน้ามาตรฐานและจุดสัมผัสของฝายหน้าทางระบายน้ำล้นซึ่งจะมีผลต่อ Design Head และ Upstream Face slope ตามรูป หลังจากจุดสัมผัสแล้วรูปตัดของทางระบายน้ำล้นจะมีความลาด 0.78H : 1V ส่วน flume ที่ใช้จะมีอ่าวเล็กๆเป็นแบบจำลองด้วยกัน 2 อ่าว ดังแสดงในรูป 2-5(ข) แบบจำลองที่ใช้มี 3 แบบด้วยกันดังนี้

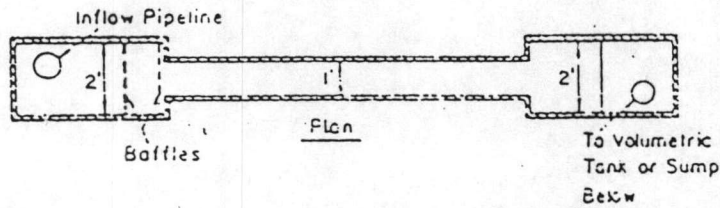
- แบบ A ใช้ค่าการไหลผ่าน Transition จากยอดทางระบายน้ำล้นหนึ่งในหลายขั้นบันไดซึ่งเป็นการไหลแบบธรรมชาติ
- แบบ B ตามมาตรฐาน WES. Ogee Spillway โดยแบบจำลองนี้ใช้อธิบายการทดสอบและเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับทางระบายน้ำล้นแบบขั้นบันได
- แบบ C ใช้หาค่าการสลายพลังงานในการไหลโดยตลอดความลึกการไหลของทางระบายน้ำล้น ข้อมูลความเร็วที่ตีนทางระบายน้ำล้น (Toe) และปริมาณน้ำ (Q) สำหรับกรณีมีขั้นบันไดและไม่มีขั้นบันได



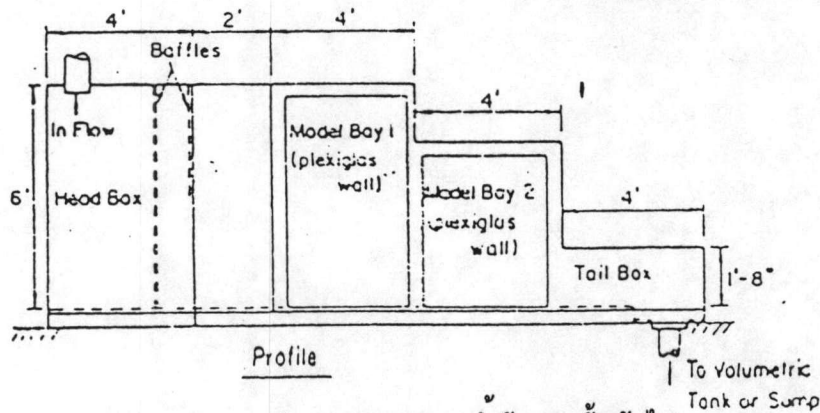
ก) สันทางระบายน้ำสันแบบขั้นบันได

—Model Test Data—Discharge, Upstream Head and Toe Velocity

Model A			Model B				Model C			
Run number (1)	Discharge (cfs/ft) (2)	Head (ft) (3)	Run number (4)	Discharge (cfs/ft) (5)	Head (ft) (6)	Toe velocity (fps) (7)	Run number (8)	Discharge (cfs/ft) (9)	Head (ft) (10)	Toe velocity (fps) (11)
A-1	2.53	0.710	B-1	1.56	0.432	21.3	C-1	1.20	0.413	7.5
A-2	2.27	0.658	B-2	1.14	0.398	17.6	C-2	1.06	0.377	6.6
A-3	1.96	0.626	B-3	0.78	0.321	16.7	C-3	0.89	0.333	7.4
A-4	1.90	0.621	B-4	0.77	0.315	16.9	C-4	0.65	0.283	6.7
A-5	1.83	0.586	B-5	0.70	0.300	16.5	C-5	0.55	0.255	5.9
A-6	1.30	0.476	B-6	0.57	0.267	15.7	C-6	0.40	0.213	4.7
A-7	0.96	0.399	B-7	0.47	0.240	17.9	C-7	0.28	0.168	4.4
A-8	0.55	0.275	B-8	0.33	0.195	15.5	C-8	0.20	0.137	3.8
A-9	0.38	0.217	B-9	0.16	0.115	15.2	C-9	0.097	0.080	2.7
A-10	0.056	0.063	B-10	0.071	0.071	10.3	C-10	0.067	0.068	2.5



ค) ตารางข้อมูลในการทำแบบจำลอง



รูป 2-5 แบบจำลองทางระบายน้ำสันแบบขั้นบันได

ข) แบบจำลองในการศึกษาทางระบายน้ำสันแบบขั้นบันได

ทางระบายน้ำล้นแบบ Ogee พร้อมด้วยผิวหน้าแบบขั้นบันไดเป็นการออกแบบที่น่าพอใจสำหรับช่วงของปริมาณน้ำที่ปะทะกันโดยทางระบายน้ำล้น ทางระบายน้ำล้นแบบขั้นบันไดมีคุณลักษณะของการสลายพลังงาน เป็นการเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นแบบไม่มีขั้นบันไดพร้อมทั้งอ้างสลายพลังงานที่ด้านท้ายของทางระบายน้ำล้น