

ชุดทดลองการไหลในช่องทางเปิด



นายสุวิทย์ สุขมิ่ง  
นายประภาส แก้วเจ็ย

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2538

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

โดย

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ชุดทดลองการไหลในช่องทางเปิด

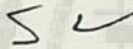
นายสุวิทย์ สุขมิ่ง

นายประภาส แก้วเจ้ย

วิศวกรรมเครื่องกล

อ.สมสิทธิ์ มูลสถาน

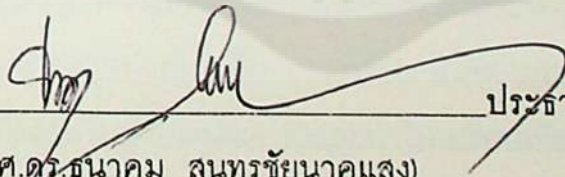
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นำโครงการ  
วิศวกรรมศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

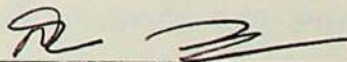
(รศ.ดร.สมบัติ ทีฆทรัพย์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์



ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง)



กรรมการ

(ผศ.สราวุธ วรสุมันต์)



กรรมการ

(อ.อารีย์ หาญสืบสาย)

ชุดทดลองการไหลในทางน้ำเปิด  
ปีการศึกษา 2538

โดย

นายสุวิทย์ สุขมิ่ง

นายประภาส แก้วเจ็ย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.สมสิทธิ์ มูลสถาน

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักวิชาเบื้องต้นเกี่ยวกับการไหลของของไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) ซึ่งชุดทดลองที่ได้สร้างขึ้นจะมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ห่ออกแบบ และการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด โดยจำลองลักษณะการไหลเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นฝายน้ำล้นแบบต่าง ๆ เช่น ฝายแบบสามเหลี่ยม ฝายแบบสี่เหลี่ยม และฝายแบบสี่เหลี่ยมคางหมู เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการระบายน้ำออกจากพื้นที่ การชลประทาน การควบคุมการไหลในแม่น้ำ และเขื่อนกั้นน้ำต่าง ๆ

ซึ่งการทดสอบการไหลผ่านฝายแต่ละแบบนี้จะนำค่าอัตราการไหลที่ได้เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราการไหลที่สามารถคำนวณได้ตามทฤษฎีที่ระดับความสูงของน้ำระดับเดียวกันที่ไหลผ่านฝายแต่ละแบบและนำไปเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหล ( $C_d$ ) ของฝายแต่ละแบบค่า  $C_d$  ที่ใช้สำหรับการออกแบบฝายสี่เหลี่ยมคางหมูและสี่เหลี่ยมจะเท่ากับ 0.62 ส่วนฝายแบบสามเหลี่ยมนั้นใช้ค่า  $C_d$  ในการออกแบบเท่ากับ 0.61 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นั้นค่า  $C_d$  ของฝายแต่ละแบบจะอยู่ระหว่าง 0.64-0.68 ตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในเนื้อหาของชุดทดลองของฝายแต่ละแบบนี้ค่า  $C_d$  จะอยู่ระหว่าง 0.60-0.75 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีจริง

Open Channel Flow Apparatus  
Academic Year 1995

by

Mr. Prapas Keawjury

Mr. Suvit Sukming

Project Report Advisor

Mr. Somsit Moonsatan

ABSTRACT

This engineering project relate to basic principle of fluid flow in open channel flow. This simulated experimental instrument can be utilized in design analysis and study of water flow behavior in open channel flow in many types of weirs namely, triangle weir, rectangular weir and trapezoid weir for application in water drainage, irrigation and the flow control of river and dams.

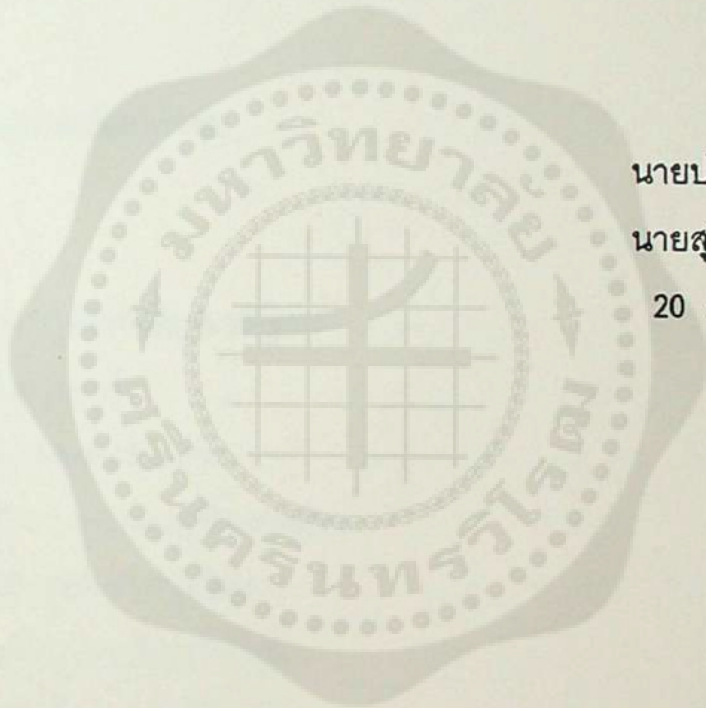
The water flow rate of the same height obtained in this experiment will be compared to that obtained in theory. The flow rate of each type will be used to calculate the friction coefficient of flow rate ( $C_d$ ).

In general, the  $C_d$  of trapezoid and rectangular weir design is 0.62, whereas triangle weir is 0.61.

The result of this experiment gave the  $C_d$  of is wier between 0.64-0.68, while the calculate  $C_d$  is between 0.60-0.75. This result is corresponding to the theory.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์สมสิทธิ์ มูลสถาน ที่ให้คำแนะนำตลอดจน  
ตรวจสอบข้อแก้ไข จนทำให้โครงการวิศวกรรมฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอ  
ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ท่านได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้  
แก่ผู้เขียนมาตั้งแต่ต้นจนกระทั่งทำให้ผู้เขียนมีโอกาสเขียนโครงการวิศวกรรมฉบับนี้ได้  
สำเร็จ



นายประภาส แก้วเจ็ย

นายสุวิทย์ สุขมิ่ง

20 ธันวาคม 2538

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่	
1. บทนำ	
แนวความคิดหรือสมมติฐาน	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของโครงการ	2
หลักการงานของเครื่องทดสอบ	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	3
สมการการเคลื่อนที่ของน้ำ	3
ความเสียดทานต่อการไหล	4
การไหลในทางน้ำเปิด	6
การจำแนกการไหลในทางน้ำเปิด	7
สภาวะการไหล	9
ตัวแปรเรขาคณิตของหน้าตัดทางน้ำเปิด	11
พลังงานการไหลในทางน้ำเปิด	12
พลังงานจำเพาะและการไหลวิกฤต	13
การไหลผ่านฝายคมสัน	16
ฝายแบบรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ลำนน้ำไม่เกิดการคอดตัว	17

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ฝายซีโพลเลตตี	20
3. การออกแบบฝาย สำหรับวัดอัตราการไหล	23
การออกแบบฝายสี่เหลี่ยม	25
การออกแบบฝายสามเหลี่ยมที่มีมุม 45 องศา	26
การออกแบบฝายสี่เหลี่ยมคางหมู	26
4. วิธีการทดลอง	30
อุปกรณ์การทดลอง	30
วิธีการทดลอง	30
ผลการทดลองการไหลผ่านฝายแบบสี่เหลี่ยม	32
ผลการทดลองการไหลผ่านฝายแบบสี่เหลี่ยมคางหมู	33
ผลการทดลองการไหลผ่านฝายแบบสามเหลี่ยมมุม 45 องศา	34
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	35
สรุปผลการทดลอง	35
ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้จัดทำโครงการวิศวกรรมศาสตร์	

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบเส้นกระแสสำหรับพิสูจน์สมการการเคลื่อนที่ของน้ำ	3
2.2 แรงกระทบกับวัตถุทรงกระบอก	3
2.3 การไหลผ่านวัสดุผิวเรียบ	5
2.4 การไหลทางน้ำเปิด	5
2.5 การไหลแบบท่อ	7
2.6 การไหลแบบทางน้ำเปิด	7
2.7 คุณสมบัติทางเรขาคณิตและตัวแปรหน้าตัดทางน้ำเปิด	11
2.8 พลังงานการไหลเปลี่ยนแปลงในทางน้ำเปิด	12
2.9 พลังงานจำเพาะการไหลในทางน้ำเปิด	15
2.10 ฝ่ายแบบรอยบากเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า	16
2.11 สัดส่วนของฝ่ายที่เกิดคอคอด	20
2.12 ฝ่ายรูปตัววี	21
2.13 สัมประสิทธิ์ Cd ของฝ่ายรูปตัววี	22
3.1 ลักษณะของฝายน้ำล้น	24
3.2 แสดงการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสี่เหลี่ยม	25
3.3 แสดงการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสามเหลี่ยม	26
3.4 แสดงการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู	27
3.5 ชุดทดลองการไหลในช่องทางเปิด	28
3.6 ลักษณะการไหลของลำน้ำ	29
3.7 ฝ่ายรูปแบบต่าง ๆ	29

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$a$	ความเร่ง	$\frac{m}{s^2}$
$A$	พื้นที่หน้าตัด	$m^2$
$L$	ความกว้างของทางน้ำเปิด	$m$
$c$	ค่าเบี่ยงเบนกระจายความดันสถิตย	$m$
$Cd$	ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานการไหล	-
$Cf$	ความลึกการไหลของหน้าตัดการไหลซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของการไหล	$m$
$D$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$m$
$E$	พลังงานจำเพาะ	$m$
$f$	ค่าความเสียดทาน	-
$F$	แรง	$N$
$Fd$	แรงขับเคลื่อนการเคลื่อนที่	$N$
$Ff$	แรงต้านการเคลื่อนที่จากความเสียดทาน	$N$
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	$\frac{m}{s^2}$
$hf$	พลังงานที่สูญเสีย	$m$
$h_s$	ความสูงสถิตย	$m$
$h_T$	พลังงานทั้งหมด	$m$
$H_v$	พลังงานความเร็ว	$m$
$m$	มวล	$kg$
$M$	กำลังชลศาสตร์	-
$p$	ความดัน	$\frac{N}{m^2}$
$P$	ความยาวรอบรูปผิวเปียก	$m$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$Q$	อัตราการไหล	$\frac{m^3}{s}$
$r$	รัศมี	$m$
$R$	รัศมีชลศาสตร์	$m$
Re	Reynold Number	-
$S$	ระยะทาง	$m$
$S_c$	ความลาดวิกฤต	-
$S_o$	ความลาดชันของท้องน้ำ	-
$S_w$	ความลาดผิวน้ำอิสระ	-
$t$	เวลา	$s$
$T$	ความกว้างผิวน้ำ	$m$
$V$	ความเร็ว	$\frac{m}{s}$
$y$	ความลึกของการไหล	$m$
$y_c$	ความลึกวิกฤต	$m$
$z$	ระยะพิกัดในแนวดิ่ง	$m$
$\alpha$	สัมประสิทธิ์ของพลังงาน	-
$\beta$	สัมประสิทธิ์โมเมนต์ตัมเนื่องจากความโค้ง	-
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ	$\frac{N}{m^3}$
$\theta$	มุมความลาดเอียงตามความยาวทางน้ำเปิด	Degree
$v$	ความหนืดจลน์	$\frac{m^2}{s}$
$\rho$	ความหนาแน่น	$\frac{kg}{m^3}$

## บทที่ 1

### บทนำ

#### แนวความคิดหรือสมมติฐาน

การศึกษาวิชาชลศาสตร์ทางน้ำเปิด (Hydraulics of Open Channel) มีบทบาทสำคัญต่อมวลมนุษย์ในด้านการควบคุมการไหลในแม่น้ำ การสัญจรทางน้ำเปิด (Inland Navition) การระบายน้ำออกจากพื้นที่ (Land Drainage) การชลประทาน (Irrigation) การจัดหาน้ำอุปโภค (Water Supply) ตลอดจนการสุขาภิบาล (Sanitation)

แม้กระนั้นความรู้ทางด้านชลศาสตร์ทางน้ำเปิดที่มีอยู่ในโลกปัจจุบันก็ยังไม่เพียงพอทฤษฎีกฎเกณฑ์ตลอดจนสูตรความสำคัญต่าง ๆ ยังขึ้นอยู่กับการคาดเดา โดยอาศัยขบวนการทดลองผิดซ้ำซาก (Trial and error approach) ในหลาย ๆ กรณีทางน้ำเปิด (Open Channel) หมายถึง การไหลของของเหลวซึ่งส่วนมากจะเป็นน้ำ โดยที่มีผิวส่วนหนึ่งสัมผัสกับอากาศ ที่เรียกว่าผิวการไหลอิสระ (Free - surface) ทางน้ำเปิดที่เห็นกันทั่วไปอาจเป็นทางน้ำเปิดธรรมชาติหรือทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น

ทางน้ำเปิดที่ปรากฏขึ้นตามธรรมชาติ (Natural Open Channel) ได้แก่ ร่องน้ำเล็ก เช่น ตามย่านภูเขาต้นน้ำลำธาร ลำห้วย คลอง แม่น้ำ และปากอ่าวของแม่น้ำสู่ทะเล

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของการไหลในทางน้ำเปิดในธรรมชาติ มีความสลับซับซ้อนและมีความผันแปรสูงมาก ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ และการศึกษาทางวิชาการ นอกจากทฤษฎีต่าง ๆ ทางชลศาสตร์แล้วการวิเคราะห์และการศึกษาที่เหมาะสมยังต้องอาศัยการสังเกต หรือการสำรวจในสนาม (Field Observation) และประสบการณ์ ตลอดจนข้อสมมติฐานต่าง ๆ

สำหรับทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial Channel) เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการพัฒนา เช่น ทางน้ำเดินเรือ (Navigation Channel) คลองและรางน้ำในระบบชลประทาน (Irrigation and Flume) เป็นต้น ทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial Channel) มักมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ที่ควบคุม หรือกำหนดให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตลอดจนความสม่ำเสมอได้ ดังนั้นการนำทฤษฎีด้านชลศาสตร์มาใช้วิเคราะห์

และศึกษาพฤติกรรมของการไหล ได้อย่างถูกต้องและ ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงได้มากขึ้นเพียงพอต่อการออกแบบและก่อสร้างทางวิศวกรรม

การวิเคราะห์การไหลของน้ำในทางน้ำเปิด เป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำที่เป็นของเหลวไม่ยุบตัว (Incompressible Fluid) ที่มีผิวน้ำผิวหนึ่งเป็นอิสระ (Free Surface) โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นสามประการอันได้แก่ หลักการคงตัวของมวล (Mass Conservation Principle) หลักการคงตัวของพลังงาน (Energy Conservation Principle) และหลักการคงตัวของโมเมนตัม (Momentum Conservation Principle)

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราการไหลผ่านฝายแต่ละแบบ
2. เพื่อศึกษาอัตราการไหลจริงเปรียบเทียบกับอัตราการไหลตามทฤษฎี
3. เพื่อออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์การไหลผ่านฝาย

### ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาอัตราการไหลผ่านฝายแบบสามเหลี่ยมแบบสี่เหลี่ยม และแบบสี่เหลี่ยม

### คามหุ

2. ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองการไหลผ่านฝาย

### ✓ หลักการทำงานของเครื่องทดสอบ

ปั้มน้ำจากถังพักน้ำเข้าเครื่องทดสอบโดยน้ำจะไหลไปตามรางน้ำผ่านฝายที่จะใช้ทำการทดสอบ (ซึ่งฝายที่จะใช้ในการทดสอบสามารถถอดเปลี่ยนได้) และจะผ่านไปยังถังวัดปริมาณซึ่งจะวัดปริมาณน้ำเปรียบเทียบกับเวลา และในขณะเดียวกันก็อ่านระดับความสูงของน้ำที่ไหลผ่านฝายเพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ไหลได้จริงและสรุปผลการทดลอง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### สมการการเคลื่อนที่ของน้ำ (Equation of Flow)

สมการที่มีสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำโดยทั่วไปจะใช้อยู่ 3 สมการ ได้แก่ สมการการต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการพลังงานหรือสมการของเบอร์นูลลี (Energy Bernoulli Equation) และสมการโมเมนต์ตัม (Momentum Equation)

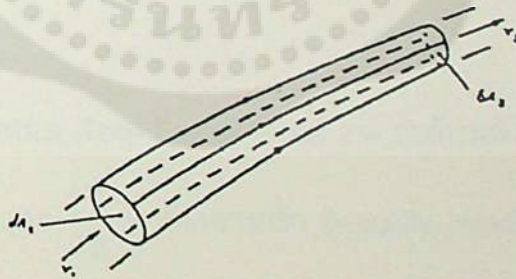
สำหรับสมการต่อเนื่องได้จากการพิจารณาการไหลเข้าและไหลออกจากกลุ่มกระแสน้ำ (Elemental stream tube) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องจากเส้นกระแสน้ำไม่ตัดกันซึ่งจะได้ว่า

$$Q = V_1 dA_1 = V_2 dA_2$$

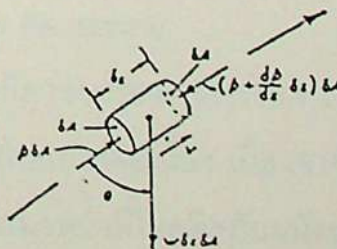
อินทิเกรตทั้งหน้าตัดการไหลจะได้ว่า

$$Q = V_1 dA_1 = V_2 dA_2 = \text{ค่าคงที่} \tag{1}$$

สมการที่ (1) เรียกว่าสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation)



รูปที่ 2.1 เส้นกระแสน้ำสำหรับพิสูจน์สมการการเคลื่อนที่ของน้ำ [3]



รูปที่ 2.2 แรงกระทำกับวัตถุทรงกระบอก [4]

สำหรับสมการพลังงาน (Energy Equation) หรือสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) จะได้รับการพิจารณาแรงที่กระทำบนมวล  $\delta A$  ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $V$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และประยุกต์กฎของนิวตันข้อที่ 2 ที่ว่า  $F = ma$  จะได้ว่า

$$-\gamma \delta A \cos \theta + P \delta A - [P + \delta s \frac{dP}{ds}] \delta A = [-\rho \delta s \delta A] \frac{dV}{dt} - \gamma \cos \theta - \frac{dP}{ds} = \rho \frac{dV}{dt}$$

ถ้า  $z =$  ระยะพิกัดในแนวตั้ง (Vertical Coordinate) ดังนั้น  $\cos \theta = \frac{dz}{ds}$  และ

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = V \frac{dV}{ds} \text{ จะได้ว่า}$$

$$\gamma \frac{dz}{ds} + \frac{dP}{ds} + \gamma \frac{VdV}{gds} = \gamma \frac{d}{ds} \left[ z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \right] = 0$$

โดยการอินทิเกรตตามเส้นกระแสจะได้อสมการพลังงานว่า

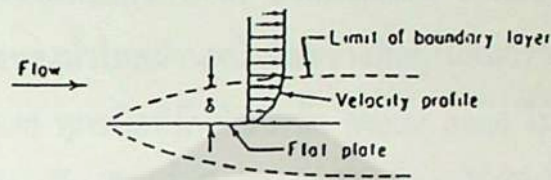
$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{ค่าคงที่} = H_T \quad (2)$$

ซึ่งค่า  $H_T =$  หัวพลังงานทั้งหมด (Total Energy Head)  $z =$  ระดับพลังงานศักย์  $\frac{P}{\gamma} =$  หัวความดัน (Pressure Head) และ  $\frac{V^2}{2g} =$  หัวความเร็ว (Velocity Head) โดยทุกเทอมจะมีหน่วยเป็นความสูงของน้ำ

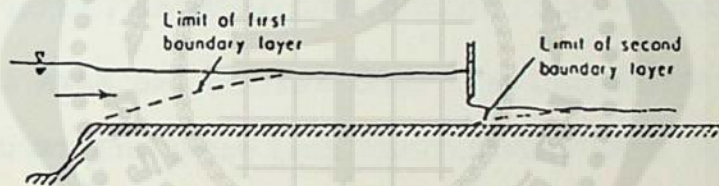
#### ความเสียดทานต่อการไหล (Flow Resistance)

ในการไหลของน้ำซึ่งจะต้องมีภาชนะรองรับการไหล เช่น ท่อทางน้ำเปิด เป็นต้น พลังงานของการไหลจะต้องสูญเสียไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความเสียดทาน หรือแรงเฉือน (Shear Stress) ที่กระทำบนผิวมวลน้ำที่ไหลติดกับผนังของภาชนะรองรับมวลไหลของน้ำ ทั้งนี้เพราะว่าน้ำมีความหนืด (Viscosity) ผลรวมของแรงเสียดทานการไหลรอบผิวมวลน้ำไหลจะให้เกิดการสูญเสียพลังงาน  $h_L$  (Internal Energy) ที่สะสมภายในมวล

ดังนั้นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำ จากตำแหน่ง 1 ไปสู่ตำแหน่งที่ 2 สมการที่ (2) จะกลายเป็น  $H_T = H_2 + h_L$  และเมื่อพิจารณาการไหลโดยสมการโมเมนตัมได้ว่า  $Fd - Ff = \rho Q \Delta V$  ในทิศทางการไหลโดย  $Fd =$  แรงขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ และ  $Ff =$  แรงต้านการเคลื่อนที่อันเป็นผลมาจากความเสียดทานระหว่าง ผิวมวลน้ำไหลกับผนังของภาชนะรองรับ



รูปที่ 2.3 การไหลผ่านวัสดุผิวเรียบ [3]



รูปที่ 2.4 การไหลในทางน้ำเปิด [3]

แรงกระทำอันเนื่องมาจากความเสียดทาน ยังผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ชั้นขอบเขต (Boundary Layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งหมายถึง ชั้นที่ผลของความเสียดทานการไหลเริ่มเกิดขึ้นเมื่อน้ำไหลผ่านเข้าไปในบริเวณที่มีภาชนะรองรับ เช่น แผ่นเรียบ (Flat Plate) ในรูปที่ 2.3 และทางน้ำเปิดในรูปที่ 2.4 การกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) จะเท่ากันตลอดทุกความลึกที่จุดเริ่มต้นของการไหลผ่านภาชนะ และค่อยเปลี่ยนทิศทางการไหล ด้วยอิทธิพลของความเสียดทาน จนกระทั่งสิ้นสุดระยะทางของชั้นขอบเขต (Boundary Layer) จึงจะคงที่และการไหลต่อไปจะเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ โดยมีรูปแบบการกระจายความเร็ว การไหลคงที่ขณะที่มีมวลน้ำเคลื่อนที่ต่อไป จนกระทั่งเกิดเงื่อนไขเพิ่มขึ้นขึ้นมาใหม่ เช่น ดังรูปที่ 2.4 ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ชั้นขอบเขตขึ้นมาใหม่อีก เป็นเช่นนี้เรื่อยไป

## การไหลในทางน้ำเปิด

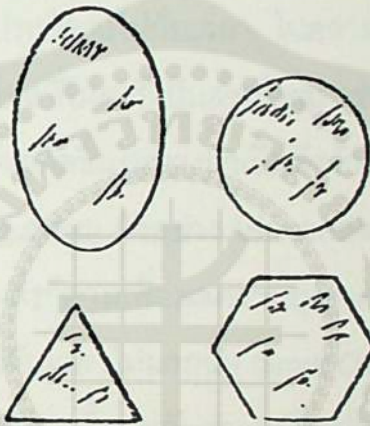
การไหลของน้ำจะมีอยู่สองประเภท ได้แก่ การไหลแบบท่อ (Pipe Flow) และการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) การไหลแบบท่อเป็นการไหลภายใต้ความดัน และมีหน้าตัดการไหลเต็มท่อไม่ว่าจะเป็นท่อกลม ท่อสี่เหลี่ยม หรืออื่น ๆ ก็ตาม การไหลแบบทางน้ำเปิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากการไหลแบบท่อ คือ มีผิวด้านหนึ่งสัมผัสกับอากาศ ซึ่งเรียกว่า ผิวน้ำอิสระ (Free Water Surface) ความดันที่กระทำบนผิวน้ำอิสระจะเป็นความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure) โดยปกติแล้วผิวน้ำอิสระจะเป็นผิวน้ำบนสุดของน้ำไหลผ่านหน้าตัดขวางที่อยู่ในแนวราบ (Horizontal) การไหลในท่อ (Closed Conduit) ทุกชนิดที่มีหน้าตัดน้ำ (Water Area) ไม่เต็มท่อก็ถือว่าเป็นการไหลแบบทางน้ำเปิดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะว่ามีผิวน้ำอิสระสัมผัสกับอากาศและความดันเป็นความดันบรรยากาศ รูปที่ 2.5 - 2.6 แสดงการเปรียบเทียบการไหลแบบทางน้ำเปิดในกรณีของการไหลแบบท่อหากติดตั้งท่อปิไซมิเตอร์ (Piezometer) ระดับน้ำในท่อปิไซมิเตอร์ซึ่งเป็นตัวแทนความดันของน้ำในท่อ (ในหน่วยความสูง  $\frac{P}{\gamma}$ ) จะเป็นระดับของเส้นที่เรียกว่า เส้นลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Grade Line) เส้นระดับชลศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับระดับมาตรฐาน (Datum Line) จะหมายถึงพลังงานศักย์ (Potential Energy) ของการไหล ณ จุดนั้น พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของการไหลในหน่วยของความสูงของน้ำจะเท่ากับ หัวความเร็ว (Velocity Head)  $\frac{V^2}{2g}$  โดยที่  $V = \frac{Q}{A}$  หัวพลังงานทั้งหมด (Total Energy Head) ในหน่วยความสูงของน้ำ  $H$  ที่หน้าตัดการไหลใด ๆ จะเท่ากับ

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

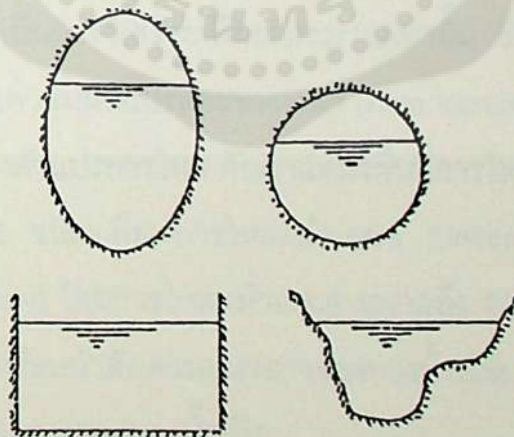
โดย  $H$  จะเป็นจุดกำหนดระดับของเส้นลาดพลังงาน (Energy Grade Line) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นระดับมาตรฐาน ความแตกต่างของระดับเส้นพลังงานระหว่าง 2 หน้าตัดการไหล  $h_f = H_1 - H_2$  จะหมายถึงค่าพลังงานที่ต้องสูญเสีย (Energy Loss) ไปเนื่องจากการไหลระหว่างหน้าตัด 1 และ 2

ในกรณีการไหลในทางน้ำเปิด ดังรูปที่ 2.6 เป็นการแสดงคุณสมบัติของการไหล

จะทำได้เช่นเดียวกับการไหลแบบท่อดังกล่าวข้างบน โดยเส้นแสดงผิวน้ำอิสระ (Free Water Surface) จะเป็นเส้นลาดชลศาสตร์ ในความหมายของการไหลแบบท่อ การวิเคราะห์ปัญหาการไหลในทางน้ำเปิดจะเป็นการหาความสัมพันธ์ ระหว่างความลาดเอียงของท้องน้ำ  $S_o$  (Channel Bottom Slope) อัตราการไหล  $Q$  (Discharge) ความลึกของการไหล  $y$  ลักษณะเชิงเรขาคณิตของหน้าตัดทางน้ำเปิด (Channel Section Geometry) ลักษณะความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด (Channel Surface Roughness) ที่ตั้ง และลักษณะการใช้งานของอาคารชลศาสตร์ที่มีอยู่ในทางน้ำเปิด (Hydraulic Structures) และ สภาพเงื่อนไขอื่น ๆ ของทางน้ำเปิด



รูปที่ 2.5 การไหลแบบท่อ [3]



รูปที่ 2.6 การไหลแบบทางน้ำเปิด [3]

### การจำแนกการไหลในทางน้ำเปิด (Classification of Open Channel Flow)

การจำแนกการไหลในทางน้ำเปิดทำได้ 2 ประการ คือ ชนิดการไหล (Type of Flow) ซึ่งพิจารณาเกณฑ์เกี่ยวกับเวลา (Time Criterion) และเกณฑ์เกี่ยวกับตำแหน่ง

พื้นที่ (Space Criterion) ของการไหล และสถานะการไหล (State of Flow)

### ชนิดของการไหล (Types of Flow)

เช่นเดียวกับการไหลของของไหลทั่วไป (Fluid Flow) เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์การไหลกับเวลา จะพบว่าสามารถแบ่งชนิดของการไหลด้วยเวลาแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ การไหลคงที่ (Steady Flow) ซึ่งมีตัวแปรการไหลทุกตัวแปร เช่น อัตราการไหล  $Q$  หรือความลึกการไหล  $y$  เป็นต้น คงที่ กับเวลา อีกชนิดเมื่อเทียบกับเวลาได้แก่ การไหลไม่คงที่ (Unsteady Flow) หมายถึงกรณีการไหลที่มีตัวแปร เช่น ความลึกการไหล  $y$  อัตราการไหล  $Q$  เป็นต้น แปรเปลี่ยนไปกับเวลา ในความจริงแล้ว การไหลในทางน้ำเปิดธรรมชาติ มักจะเป็นการไหลที่ไม่คงที่เป็นส่วนใหญ่ เช่น น้ำไหลในแม่น้ำในช่วงฤดูฝน เป็นต้น ส่วนการไหลคงที่จะเกิดขึ้นในทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้นและควบคุมการไหลด้วยมนุษย์ (Human Operated Regulated) ตัวอย่าง เช่น คลองชลประทานที่มีประตูน้ำควบคุมการปล่อยน้ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ปัญหา การไหลที่ไม่คงที่ ที่มีความแปรผันกับเวลาไม่มากนัก (Small Changes with Time) อาจถือได้ว่าเป็นการไหลคงที่ในเวลาอันสั้น (ขึ้นอยู่กับความผันแปรกับเวลา) เช่น การไหลในแม่น้ำธรรมชาติในช่วงฤดูแล้ง อย่างไรก็ตามขอให้เป็นที่เข้าใจกันว่าการวิเคราะห์ด้วยข้อสมมติฐานดังกล่าว เป็นการวิเคราะห์โดยประมาณเท่านั้น ชีตความถูกต้องของการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับขีดความผันแปรและช่วงเวลา (Time Increment) ที่ใช้เมื่อพิจารณาเฉพาะความสัมพันธ์ของตัวแปรการไหล กับตำแหน่งพื้นที่การไหล (Flow Stage) จะแบ่งชนิดการไหลออกเป็น 2 ชนิด คือ การไหลสม่ำเสมอ (Uniform Flow) และการไหลเปลี่ยนแปลง (Varied Flow) โดยการไหลสม่ำเสมอ หมายถึง การไหลที่มีความลึก การไหลคงที่ทุก ๆ จุด หรือหน้าตัดตามแนวยาวของทางน้ำเปิด และความลึกการไหลเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของทางน้ำเปิด

การไหลเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาขีดความเปลี่ยนแปลง (Degree of Change) ต่อระยะทาง ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การไหลเปลี่ยนแปลงน้อย (Gradually Varied Flow ; GVF) ซึ่งมีความลึกเปรียบเทียบกับระยะทางน้อย และการเปลี่ยนแปลงเร็ว (Rapidly Varied Flow ; RVF) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความลึกการไหลทันทีทันใดในระยะทางสั้น ๆ ซึ่งจะเกิดกรณีที่เรียกว่าปรากฏการณ์เฉพาะแห่ง (Local Phenomrna) ได้แก่ น้ำ

กระโดด (Hydraulic Jump) และน้ำตก (Hydraulic drop)

โดยสรุปแล้ว เมื่อพิจารณาการไหลด้วยเกณฑ์เวลาและตำแหน่งพื้นที่ (Time and Space Criteria) แล้ว จะพบว่าชนิดของการไหล จะมี 2 ชนิดด้วยกันคือ

ก) การไหลคงที่ (Steady Flow)  $d(Q, y, \dots) / dt = 0$

ก.1 การไหลสม่ำเสมอ (Uniform Flow)  $dy / dx = 0$

ก.2 การไหลเปลี่ยนแปลงน้อย (Gradually Varied Flow)  $dy / dx \sim 0$

ก.3 การไหลเปลี่ยนแปลงเร็ว (Rapidly Varied Flow)  $dy / dx \gg 0$

ข) การไหลไม่คงที่ (Unsteady Flow)  $d(Q, y, \dots) / dt \neq 0$

ข.1 การไหลที่ไม่คงที่สม่ำเสมอ (Uniform Unsteady Flow)  $dy / dx = 0$

ข.2 การไหลไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย (Gradually Varied Unsteady Flow)  $dy / dx \sim 0$

ข.3 การไหลไม่คงที่เปลี่ยนแปลงเร็ว (Rapidly Varied Unsteady Flow)  $dy / dx \gg 0$

### ✓ สภาวะการไหล (States of Flow)

การจำแนกการไหลด้วยสภาวะการไหล เป็นการพิจารณาผลของแรงกระทำ 3 ชนิด ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของเหลว ซึ่งได้ศึกษามาแล้วจากกลศาสตร์ หรือ กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น (Hydraulics of Mechanics) แรงกระทำดังกล่าวประกอบด้วย แรงจากความหนืด (Viscous Force) แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) และแรงเนื่องจากความเฉื่อยของมวล (Inertial Force) ดังมีรายละเอียดดังนี้

ผลของความหนืดต่อการไหล ซึ่งสำคัญในการไหลแบบท่อเมื่อเปรียบเทียบกับ ความเฉื่อยของมวลการไหล จะแบ่งการไหลออกเป็น 3 สภาวะคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งมีผลต่อการไหลของแรงกระทำเนื่องจากความหนืด (Viscous Force) สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงเนื่องจากความเฉื่อยของมวล (Inertial Force) อนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่ในแนวที่แน่นอนและราบเรียบซึ่งเรียกว่า เส้นกระแส และ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งมีแรงกระทำเนื่องจากความหนืดน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแรงเนื่องจากความเฉื่อย และจะมีอนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางที่ไม่แน่นอน (Irregular) การไหลซึ่งผสมกันอยู่ระหว่างสภาวะทั้งสองเรียกว่า การไหล

แบบผสม (Transitional Flow) การจำแนกสถานะการไหลด้วยผลเนื่องจากความหนืด จะทำได้โดยการพิจารณา Reynold Number

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \text{ เช่นเดียวกับ การไหลในท่อโดย}$$

$\rho$  = ความหนาแน่นของการไหล

$V$  = ความเร็วการไหล

$E$  = ความยาวจำกัดคุณสมบัติ (Characteristic Length)

$\mu$  = ความหนืดของน้ำ

ในการไหลแบบท่อ  $L = D =$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ สำหรับการไหลแบบทางน้ำเปิด จะใช้รัศมีไฮดรอลิก  $L = R = \frac{A}{P}$  เป็นหลักพิจารณา สำหรับการไหลแบบท่อ

$$\text{จะพบว่า } R = \frac{A}{P} = \frac{\pi D^2}{4(\pi D)} = \frac{D}{4} \text{ ดังนั้น } D = 4R$$

จากสูตร Darcy-Weisbach ของการไหลแบบท่อ

$$hf = f \frac{LV^2}{2Dg}$$

$$\text{ค่าความเสียดทาน } f = \frac{2gDhf}{V^2L}$$

เมื่อพิจารณาการไหลในท่อเสมือนหนึ่งการไหลแบบทางน้ำเปิด  $D = 4R, S_o = \frac{hf}{L}$  จะได้ความเสียดทาน

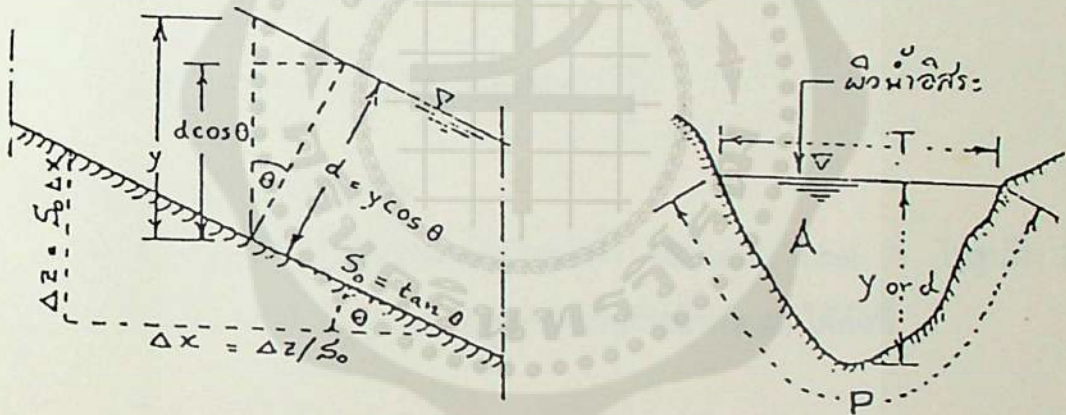
$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad (3)$$

$$\text{ค่า Reynold Number } Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{\rho VR}{\mu} \quad (4)$$

	การไหลแบบท่อ	การไหลทางน้ำเปิด
1. การไหลแบบราบเรียบ	$Re \leq 2000$	$Re \leq 500$
2. การไหลแบบผสม	$2000 \leq Re \leq 4000$	$500 \leq Re \leq 2000$
3. การไหลแบบปั่นป่วน	$Re \geq 4000$	$Re \geq 2000$

ซึ่งการไหลในทางน้ำเปิดที่พบเห็นอยู่ทั่วไป จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการไหลในทางน้ำเปิด จะเป็นการไหลภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลกเป็นหลัก การศึกษา วิเคราะห์ปัญหาในทางน้ำเปิด โดยสร้างแบบจำลองชลศาสตร์ (Hydraulic Model) จึงมักจะกำหนดให้  $Fr$  ของแบบจำลอง (Model) เท่ากับของจริง (Prototype)

### ตัวแปรเรขาคณิตของหน้าตัดทางน้ำเปิด



รูปที่ 2.7 คุณสมบัติเชิงเรขาคณิตและตัวแปรหน้าตัดทางน้ำเปิด [3]

ตัวแปรเชิงเรขาคณิตของหน้าตัดทางน้ำเปิด ซึ่งจะนำไปใช้ในทางคำนวณชลศาสตร์ สามารถคำนวณหาได้จากลักษณะทางเรขาคณิตของหน้าตัดได้ทั้งสิ้น ตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการไหลมีดังนี้ และได้แสดงรูปที่ 2.7

1. ความลึกการไหล (Depth of Flow) - ( $y$ ) คือ ระยะในแนวตั้ง (Vertical Depth) จากจุดต่ำสุดของหน้าตัดการไหลจนถึงผิวอิสระ (Free Surface)

2. ความลึกของหน้าตัดการไหล (Depth of Flow Section) - ( $d$ ) คือ ความลึกการไหลของหน้าตัดทางน้ำไหลจะตั้งฉากกับทิศทางของการไหล ดังนั้น  $d = y \cos \theta$  ค่า  $\theta$  คือ มุมของการลาดเอียงตามความยาวของน้ำเปิด

3. ระดับน้ำ (Stage) คือ ระดับของผิวน้ำอิสระ (Free Surface) วัดในแนวตั้ง จากระดับอ้างอิงมาตรฐาน (Referance Datum)

4. ความกว้างผิวน้ำ (Top Width) - ( $T$ ) คือความกว้างในแนวราบของหน้าตัดที่ผิวน้ำอิสระ

5. พื้นที่หน้าตัดการไหล (Water Area) - ( $A$ ) หมายถึง พื้นที่ส่วนที่เป็นน้ำในหน้าตัดขวางของการไหล ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

6. ความยาวของเส้นขอบเปียก (Wetted Perimeter) - ( $P$ ) หมายถึง ความยาวของเส้นรอบรูปของหน้าตัดการไหลที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังรูป 2.7

ตัวแปรที่ได้กล่าวมาข้างบนสามารถที่จะหามาได้จากการวัด และคำนวณทางเรขาคณิตนอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่สำคัญเชิงกลศาสตร์ของการไหลคือ

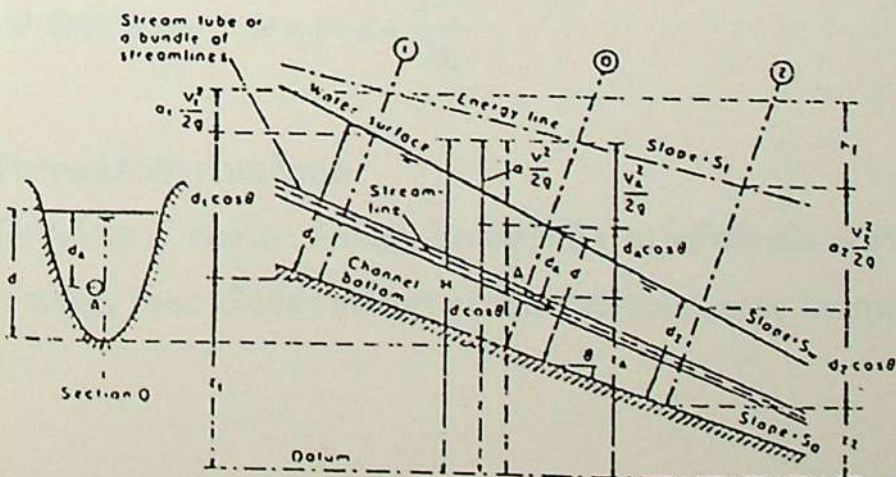
รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius)  $R = \frac{A}{P}$

ความลึกชลศาสตร์ (Hydraulic Depth)  $D = \frac{A}{T}$  (5)

**พลังงานการไหลในทางน้ำเปิด**

โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของลำกระแส (Stream Tube) A ในรูปที่ 2.8 สามารถเขียนนิพจน์ (Bernoulli) สำหรับหัวพลังงานที่หน้าตัด (0) ได้ดังนี้

$$H_T = z_A + d_A \cos \theta + \frac{V^2}{2g}$$
 (6)



รูปที่ 2.8 พลังงานของการไหลเปลี่ยนแปลงในทางน้ำเปิดใด ๆ [3]

จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าพลังงานศักย์  $PE = z + d \cos \theta$  จะมีค่าคงที่ ที่ทุกระดับ ความลึก  $d$ , ของลำกระแส น้ำ บนหน้าตัด (0) และระดับของพลังงานศักย์จะอยู่ที่ผิวหน้าอิสระ ด้วยเหตุนี้ Hydraulic Line ของการไหลในทางน้ำเปิดจึงอยู่ที่ผิวอิสระ ดังรูปที่ 2.8 และพลังงานศักย์ในการไหลผ่านหน้าตัด (0) นิยมให้

$$PE = z + d \cos \theta$$

ระดับท้องน้ำที่หน้าตัด (0) และ  $d =$  ความลึกของน้ำบนหน้าตัด (0)

ในประเด็นของหัวความเร็ว  $\frac{V^2}{2g}$  จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่คงที่บนทุกจุดของหน้าตัด (0) เนื่องมาจากการกระจายความเร็วไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในเชิงปฏิบัติ อาจสมมติได้ว่า ให้ค่าหัวความเร็ว  $\frac{\alpha V^2}{2g}$  เป็นค่าเฉลี่ยคงที่ ณ.ทุก ๆ จุดบนหน้าตัด (0) โดย  $\alpha =$  ค่าความเร็วเฉลี่ย และค่า  $\alpha$  เป็นการปรับค่าเนื่องจากลักษณะการกระจายความเร็ว ดังนั้นค่าพลังงานทั้งหมดของการไหล ณ.หน้าตัดการไหลใด ๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H = z + d \cos \theta + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (7)$$

$$\text{ถ้า } \theta \text{ Small Slope, } H = z + d + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (8)$$

### พลังงานจำเพาะและการไหลวิกฤต

พลังงานจำเพาะ (Specific Energy) ในทางน้ำเปิด ณ.หน้าตัดหนึ่ง หมายถึงค่าหัวพลังงาน (Energy Head) เมื่อวัดจากกันทางน้ำเปิด (Channel Bottom) โดยสมการ (7) ถ้า  $z = 0$

$$\text{Specific Energy } E = d \cos \theta + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (9)$$

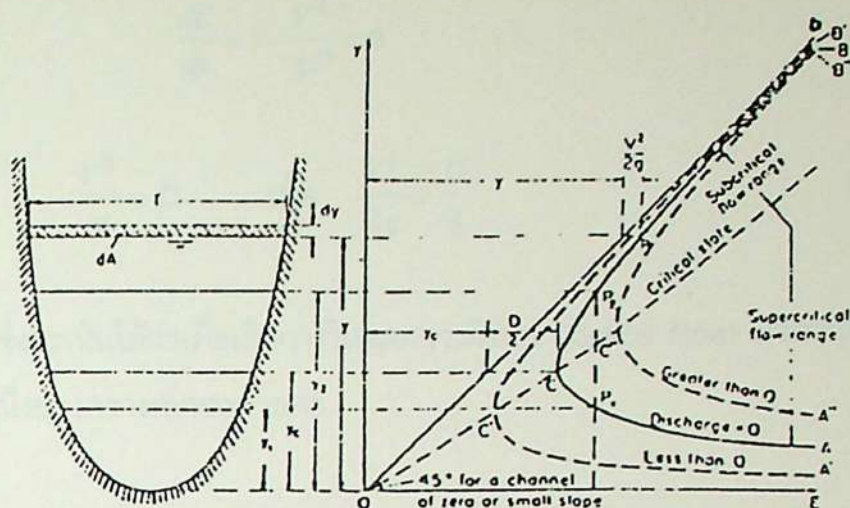
และสำหรับทางน้ำเปิดลาดชันน้อย  $\theta$  เข้าใกล้ศูนย์และค่า  $\alpha \sim 1.0$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

ซึ่งหมายความว่า พลังงานจำเพาะ  $E$  คือผลบวกของความลึกการไหล และหัวความเร็ว เพื่อความสะดวกต่อการอธิบาย จะใช้นิพจน์ของสมการ (10) ในการแสดงเนื้อหาต่อไป เนื่องจากความเร็วเฉลี่ย  $V = \frac{Q}{A}$  จะได้ว่า

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (11)$$

ซึ่งค่า  $Q =$  ค่าคงที่ในการไหลคงที่ (Steady Flow) จะได้ว่าค่าพลังงานจำเพาะ  $E$  ของหน้าตัดที่กำหนดให้ จะเป็นฟังก์ชันของความลึกการไหล  $y$  เท่านั้น ดังแสดงด้วยเส้น ABC ในรูปที่ 2.9 ถ้าค่า  $Q$  น้อยลง เส้นโค้ง  $E = f(y)$  จะได้แก่เส้น A'B'C' และถ้าค่า  $Q$  มากขึ้นจะได้แก่เส้น A''B''C'' ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นโค้ง  $E = f(y)$  จะอยู่ระหว่างเส้นแกน  $E$  และเส้น OD ซึ่งทำมุม 45 องศา กับแกน  $E$  สำหรับทางน้ำเปิดลาดชันน้อย แต่ถ้าเป็นกรณีของทางน้ำเปิดลาดชันมาก จะพบว่ามุมดังกล่าวจะมีค่ามากกว่า 45 องศา ตามรูปที่ 2.9 ที่ค่า  $Q$  มีกำหนดให้จะพบว่าที่ค่า  $E$  ใด ๆ ค่าหนึ่งจะมีความลึกการไหลได้ สองค่า เช่นที่จุด  $P_1$  และ  $P_2$  เป็นเส้นโค้ง  $E = f(y)$  ที่ค่าความลึก  $y_1$  ที่เรียกว่า ระดับน้ำต่ำ (Low Stage) และ  $y_2$  จะเรียกว่า ระดับน้ำสูง (High Stage) โดยที่  $y_1$  และ  $y_2$  จะมีค่าความลึกสลับ (Alternate Depth) ของกันและกันและเมื่อค่า  $E$  ลดต่ำลงจนกระทั่ง  $y_1 = y_2$  ที่จุด C ซึ่งมีค่าพลังงานจำเพาะ  $Q$  เป็นค่าต่ำสุดสำหรับอัตราการไหล  $Q$  ที่กำหนดค่าหนึ่ง ๆ และการไหลที่จุด C นี้ จะเรียกว่า การไหลสภาวะวิกฤต (Critical State Flow) โดยมีความลึกการไหล  $v_c = y_1 = y_2$  การไหลที่เกิดขึ้นภายใต้เส้นเชื่อมจุด C'C''C'' จะเป็นการไหลที่มีความลึกการไหล  $y_1 < v_c$  ซึ่งเรียกว่า การไหลเหนือสภาวะวิกฤต (Supercritical Flow) และการไหลที่มีความลึก  $y_2 > v_c$  จะเรียกว่า การไหลสภาวะใต้วิกฤต (Subcritical Flow) โดยจะมี  $v_1 = v_c = v_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พลังงานจำเพาะการไหลในทางน้ำเปิด [3]

การไหลวิกฤต ( Critical Flow ) เป็นการไหลในทางน้ำเปิดที่มี พลังงานจำเพาะ  $E$  เป็นค่าต่ำสุด สำหรับอัตราการไหล  $Q$  ที่กำหนดให้ และมี  $Fr = 1$  ซึ่งอาจจะพิสูจน์ได้ดังนี้ จากสมการ (11)

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

เนื่องจาก  $Q =$  ค่าคงที่ และ  $E = f(y)$  โดยมี  $E_{\min}$  ที่  $\frac{dE}{dy} = 0$  ดังนั้น

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^2} \left( \frac{dA}{dy} \right) = 1 - \frac{V^2}{gA} \left( \frac{dA}{dy} \right)$$

จากรูปที่ 2.9 จะพบว่า  $dA = Tdy$  ดังนั้น  $\frac{dA}{dy} = T$  ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2 T}{gA}$$

โดยคำนิยามของความลึกชลศาสตร์  $D = \frac{A}{T}$  ดังนั้น

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2}{gD} = 0$$

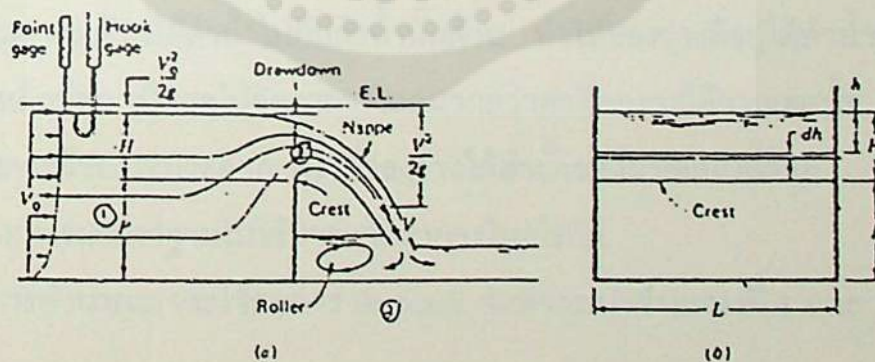
$$\frac{V^2}{g} = D \quad \text{หรือ} \quad \frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2} \quad (12)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการไหลสภาวะวิกฤต (Critical Flow) หัวความเร็วจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึกชลศาสตร์

### การไหลผ่านฝายสันคม (Flow Over Sharp-Crested Weir)

ฝายสันคม (Sharp-Crested Weir) ได้แก่โครงสร้างมีลักษณะเป็นแผ่นกั้นขวางทางน้ำเปิด ให้น้ำไหลข้ามฝายที่มีความหนาน้อย ในงานวิศวกรรมฝายสันคมอาจจะมีฟังก์ชัน การใช้อายุ 2 กรณี ได้แก่ เพื่อกักขังน้ำและยกระดับน้ำให้สูงขึ้น และเป็นเครื่องมือวัดทั้งในรูปถาวรและชั่วคราว

จากรูปแบบของน้ำที่ล้นผ่านสันฝายในรูปที่ 2.10 ทำให้สามารถหาอัตราการไหลได้จากระดับความสูง  $H$  ของน้ำที่อยู่เหนือสันฝายตำแหน่งที่จะวัดความสูง  $H$  นี้จะต้องอยู่ทางต้นน้ำอย่างน้อยเป็น 4 เท่า ของ  $H$  โดยทั่ว ๆ ไปแล้วระยะที่ลาดต่ำลง (Draw Down) ในรูปนี้จะมีค่าประมาณ  $0.15H$



รูปที่ 2.10 ฝายรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [3]

(a) มองด้านข้าง (b) มองด้านหน้า

ลักษณะของฝายที่ดีนั้นผิวทางด้านต้นน้ำจะต้องเรียบตัวฝายนั้นจะต้องอยู่ในแนวตั้งจริง ๆ และสันฝายจะต้องเป็นสันคม โดยทำขอบทางด้านต้นน้ำเป็นมุมฉาก

และทางได้นำเป็นมุมป้าน ทั้งนี้เพื่อให้ลำน้ำ (Nappe) ล้นออกมาผละออกจากสันฝายได้หมด ทำให้ลำน้ำสัมผัสกับสันฝายได้หมด ทำให้หน้าสัมผัสกับสันฝายในลักษณะที่สัมผัสเป็นเส้น แม้ว่าจะมีระดับน้ำเหนือสันฝายเพียงนิดเดียวก็ตาม แต่ถ้าลำน้ำไม่ผละออกมาจากสันฝาย ก็จะไม่ถือว่าเป็นการไหลผ่านฝาย และจะนำสัมประสิทธิ์จากการทดลองมาใช้ไม่ได้ สำหรับความเร็วที่จุดใด ๆ ของลำน้ำที่ไหลผ่านฝายมาแล้วนั้น สามารถหาได้จากสมการพลังงานระหว่างจุดดังกล่าวนั้น กับจุดที่อยู่เหนือขึ้นไปทางด้านต้นน้ำ สำหรับร่องน้ำก็ควรจะมีเพียงพอ จนกระทั่งลักษณะการกระจายความเร็วเป็นไปอย่างปกติ และผิวของน้ำก็ควรเรียบไม่มีคลื่นมารบกวน

#### X ฝายแบบรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ลำน้ำไม่เกิดการคอดตัว

ฝายแบบนี้จะมีขนาดกว้างเท่ากับร่องน้ำจะมีขนาดของลำน้ำที่ล้นผ่านสันฝายกว้างเท่ากับความยาวของสันฝายนั้น เนื่องจากลำน้ำที่ล้นผ่านสันฝายนี้ ไม่เกิดการคอดตัวขึ้นทางด้านข้างของลำน้ำดังนั้นก็เรียกคอดคอดด้านข้างว่าถูก Suppressed ลำน้ำที่ล้นออกมานี้จะไม่เกิดการคอดตัวที่ด้านข้างก็ต่อเมื่อผนังด้านข้างของร่องน้ำทางด้านต้นน้ำของสันฝายที่มีผิวเรียบและไม่มีสภาพที่ผิดปกติ โดยปกติแล้วผนังด้านข้างของร่องน้ำที่จะยื่นเลยออกไปทางด้านใต้ของสันฝายนี้ด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อบังคับให้น้ำที่ล้นออกมานั้นให้ไหลไปตามแนวของผนัง น้ำที่ไหลล้นผ่านสันฝายนี้จะพยายามดึงเอาลมด้านใต้ลำน้ำไปกับลำน้ำนั้นด้วย ทำให้ช่องว่างที่อยู่ใต้ลำน้ำนั้นเป็นสูญญากาศเล็กน้อย เป็นผลให้อัตราการไหลมากกว่าค่าที่ควรจะได้จากเสตนันท์ ๆ ด้วยเหตุนี้เองจึงควรมีช่องระบายอากาศไว้ที่ช่องว่างใต้ลำน้ำของฝายแบบนี้ด้วย มิฉะนั้นแล้วจะนำสมการมาตรฐานไปใช้หาค่าอัตราการไหลไม่ได้

ในการคำนวณเราจะใช้สมการ Bernoulli จะพิจารณาดำแหน่งที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 2.10a

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (13)$$

ที่ตำแหน่ง 2 ซึ่ง  $P_2$  เป็นความดันบรรยากาศ  $z_2 = P + H - h$

แต่ที่ตำแหน่ง 1 ; 
$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = P + H + \frac{V_1^2}{2g}$$

นำค่าที่ได้ทั้งหมดแทนในสมการ (13) ถ้าหากความเร็วทางด้านต้นน้ำของฝายน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ ความเร็วของของไหลในจินตนาการของชุด 2 ก็จะเท่ากับ

$$V_2 = \sqrt{2gh} \quad (14)$$

ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.10b จะเห็นได้ว่าพื้นที่เล็กในระนาบเดียวกันกับฝายคือ  $dA = L \cdot dh$  ดังนั้น อัตราการไหล ที่ไหลผ่านพื้นที่เล็ก ๆ คือ

$$dQ = L \cdot dh \sqrt{2gh} = L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \cdot dh \quad (15)$$

เมื่ออินทิเกรตตลอดทั่วทั้งพื้นที่หรืออินทิเกรตจาก  $H = 0$  ไป  $H$  จะได้อัตราการไหลในจินตนาการทั้งหมดเป็น

$$Q = \sqrt{2g} \cdot L \int_0^H h^{3/2} dh \quad (16)$$

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (17)$$

แต่อัตราการไหลจริงนั้นจะน้อยกว่าค่าดังกล่าว ทั้งนี้เพราะพื้นที่ที่น้ำไหลผ่านจริง ๆ นั้นจะมีขนาดเล็กกว่า  $L \times H$  ด้วยเนื่องจากระดับน้ำที่อยู่เหนือสันฝายนั้นน้อยกว่า  $H$  และ ลำน้ำเกิดคอคอดขึ้นที่ทางด้านล่างของสันฝาย ดังนั้นอัตราการไหลจริงก็ต้องคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล ( $Cd$ ) เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่ถูกต้อง เพราะฉะนั้น

$$Q = Cd \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot LH^{3/2} \quad (18)$$

จากห้องทดลองไฮดรอลิกที่ Karlsruhe ในประเทศเยอรมันได้ใช้อุปกรณ์ทดลอง

ขนาดเล็ก เพื่อให้การทดลองที่ละเอียดถูกต้องในการทดลองหาค่า  $C_d$  และสร้างเป็นสมการสำหรับหาค่า  $C_d$  ดังนี้

$$C_d = 0.605 + \frac{1}{305H} + 0.08 \frac{H}{P} \quad (19)$$

สมการดังกล่าวนี้ Rehbock สร้างมาจากเส้นกราฟของ  $C_d$  ที่พลอตค่าที่ได้จากการทดลองล้วน ๆ เทอมที่สองเป็นเทอมที่มาจากความดันของระดับน้ำเหนือสันฝาย เทอมสุดท้าย เป็นผลกระทบที่เกิดจากความเร็วของน้ำทางด้านเหนือน้ำของฝาย ซึ่งสมมติว่ามีขนาดสม่ำเสมอ สมการของ Rehbock นี้ ให้ค่าถูกต้องภายใน 0.5% เมื่อ  $P$  มีค่าจาก 0.1 - 1 เมตร และเมื่อค่า  $H$  มีค่าจาก 0.025 - 0.60 เมตร โดยมีค่า  $\frac{H}{P}$  ไม่มากกว่า 1.0 แต่ถ้าหากว่ากันของช่องทางน้ำทางด้านใต้ของฝายต่ำ จนกระทั่งน้ำที่ไหลผ่านฝายไม่มีผลกระทบต่อระดับน้ำทางด้านต้นน้ำแล้ว สมการดังกล่าวก็จะให้ค่าได้ถูกต้องแม้ว่า  $\frac{H}{P}$  จะมากกว่า 1 ก็ตาม

เพื่อความสะดวกจึงมักเขียนสมการ (19) สั้น ๆ ว่า

$$Q = C_w \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (20)$$

เมื่อ :  $C_w =$  สัมประสิทธิ์ของฝายมีค่าเท่ากับ  $C_d \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g}$

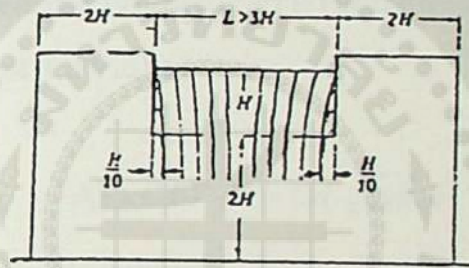
ถ้าหากแทนค่า  $C_d$  ในสมการ (18) ด้วย 0.62 แล้วก็จะได้

$$Q = 1.184 L H^{3/2} \quad (21)$$

สมการ (21) จะให้ค่าที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อ  $\frac{H}{P} < 0.4$  ซึ่งเป็นช่วงการไหลใช้งานปกติ สำหรับในกรณีที่ความเร็วทางด้านเหนือน้ำไม่เป็นศูนย์ ก็จะต้องเปลี่ยนสมการ

ต่าง ๆ ข้างต้นนั้นใหม่อาจจะโดยการเปลี่ยนรูปร่างของสมการเหล่านั้น หรือจะโดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ก็ได้ฝ่ายแบบรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดคอคอด

ลำน้ำที่ไหลผ่านสันฝายที่สั้นกว่าความกว้างของช่องทางน้ำจะเกิดคอคอดตามแนวขวางขึ้น ดังนั้นความกว้างของลำน้ำที่ไหลผ่านก็จะแคบกว่ารอยบาก  $L$  ของฝาย จากการทดลองของ Francis ภายใต้เงื่อนไขในรูป 2.11 นั้นปรากฏว่าการคอดที่แต่ละด้านนั้น ทำให้ความกว้างประสิทธิผลของลำน้ำที่ไหลผ่านฝายลดลง  $0.1H$  ดังนั้นในการหาอัตราการไหลของการไหลแบบนี้ก็ต้องแทนค่า  $L$  ในสมการข้างต้นด้วย  $(L - 0.1nH)$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนของด้านที่เกิดการคอดตัว ปกติแล้วจะมีค่าเท่ากับ 2 แต่บางครั้งก็จะเท่ากับ 1



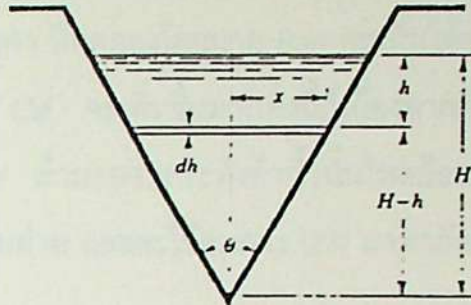
รูปที่ 2.11 สัดส่วนของฝายที่เกิดคอคอด [3]

#### ✓ ฝายแบบซิโพลเลตติ (Cipolletti Weir)

เพื่อหลีกเลี่ยงในการแก้อัตราการไหล เนื่องจากการคอดของลำน้ำ จึงได้นำเอาฝายแบบซิโพลเลตติมาใช้แทน ฝายแบบนี้จะเป็นรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ด้านข้าง มีความลาดเอียงเป็นสูง 4 นอน 1 พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นนี้จะไปชดเชยพื้นที่หายไปจากการคอดตัวของลำน้ำฝายแบบรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือรูปตัววี

ถ้าฝายแบบรอยบากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาวัดอัตราการไหลที่มีค่าต่ำแล้วรอยบากนั้นก็ต้องเป็นรอยบากแคบ ๆ ดังนั้นขนาดรอยบากจึงเป็นตัวจำกัดอัตราการไหล แต่ถ้าหากไม่ใช้รอยบากแคบ ๆ แล้ว ระดับน้ำเหนือสันฝายก็จะต่ำ อาจต่ำจนทำให้ลำน้ำที่ไหลผ่านฝายไม่สามารถติดตัวผละออกมาจากสันฝายได้ แต่จะไหลย่อยลงไปตามผิวของฝาย ดังนั้นในกรณีที่มีอัตราการไหลต่ำ จึงควรใช้ฝายรูปตัววีเป็นตัววัด ทั้งนี้เพราะฝายรูปตัววีนี้ใช้งานที่อัตราการไหลต่ำ ๆ ได้ดี เท่ากับอัตราการไหลที่สูงไม่

มากนัก ปกติแล้วมุมระหว่างรอยบากนี้จะมีค่าอยู่ในระหว่าง 10 และ 90 องศา แต่มุมใหญ่ ๆ นั้นนิยมใช้กันน้อย



รูปที่ 2.12 ฝ่ายรูปตัววี [3]

ในรูปที่ 2.12 เป็นฝ่ายรูปตัววีที่มีมุมระหว่างรอยบากเป็น  $\theta$  ในกรณีนี้อัตราการไหลที่ไหลผ่านพื้นที่เล็ก ๆ  $dA$  ที่มีค่าเป็น :

$$dQ = Cd \cdot V \cdot dA = Cd \cdot \sqrt{2gh} \cdot dA$$

$$dA = 2x \cdot dh$$

$$x = (H - h) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$Q = Cd \cdot 2 \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \int_0^H (H - h) h^{1/2} \cdot dh$$

$$Q = Cd \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} H^{3/2}$$

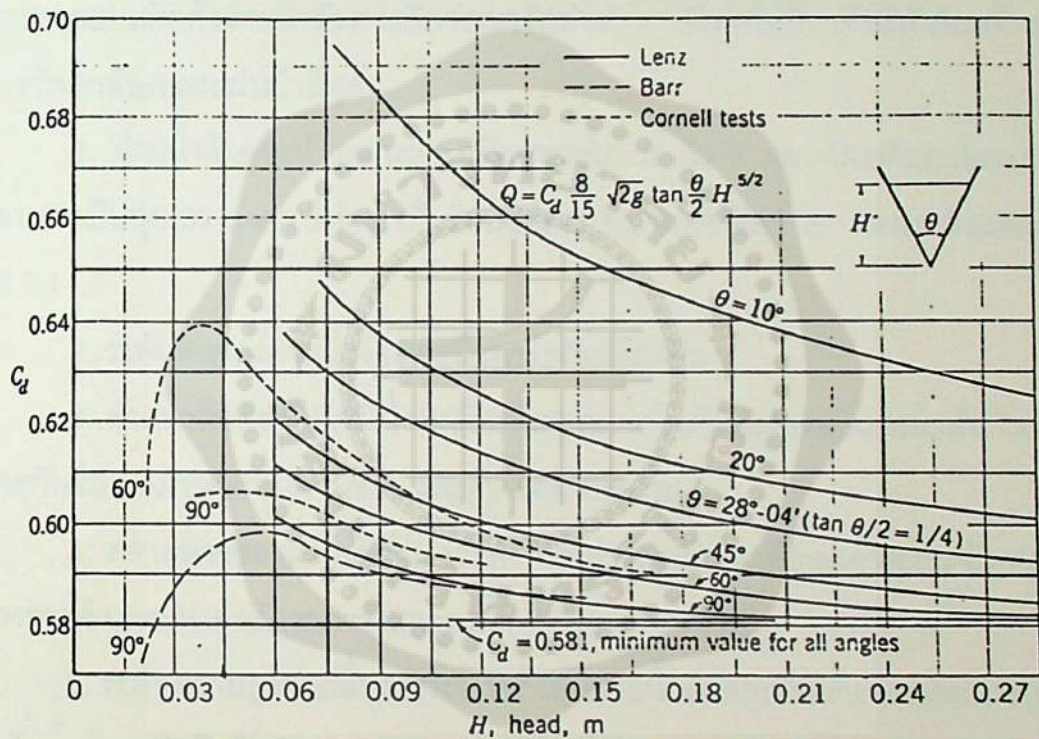
(22)

ถ้าหาก  $Cd$  ของแต่ละมุม  $\theta$  มีค่าคงที่แล้ว ก็สามารถเขียนสมการ (22) ใหม่ได้เป็น :

$$Q = KH^{3/2} \quad (23)$$

ค่าคงที่  $K$  ในระบบอังกฤษ จะแตกต่างกับค่า  $K$  ในระบบเอสไอ รูปที่ 2.13 เป็นค่า  $Cd$  ที่หาได้จากการทดลองด้วยการให้น้ำไหลผ่านฝ่ายรูปตัววีที่มุม  $\theta$  ตั้งแต่ 10-90

องศา เส้นกราฟที่เป็นเส้นเต็มนั้นได้มาจากการทดลองของนาย Lenz ส่วนเส้นประได้จากการทดลองของมหาวิทยาลัย Cornell และเส้นประขีดยาว เป็นค่า  $C_d$  ของฝ่ายขอบคมที่มีมุม  $\theta = 90$  องศา ที่ทดลองโดยนาย Barr จะเห็นได้จากรูป 2.13 ว่ามีค่า  $H$  ต่ำกว่า 0.15 เมตรนั้น ค่า  $C_d$  จะเพิ่มขึ้นมากทั้งนี้ก็เนื่องจากการคอดตัวของลำน้ำไม่เรียบนั่นเอง ถ้าหากค่า  $H$  ต่ำมากจนกระทั่งลำน้ำนั้นไหลย่อยลงไปตามตัวฝายแล้วก็จะไม่ถือว่าเป็นการไหลผ่านฝาย และจะใช้สมการ (23) มาหาอัตราการไหลไม่ได้



รูปที่ 2.13 สัมประสิทธิ์  $C_d$  ของฝายรูปตัววี [3]

### บทที่ 3

#### ✓ การออกแบบฝาย (Weir) สำหรับวัดอัตราการไหล

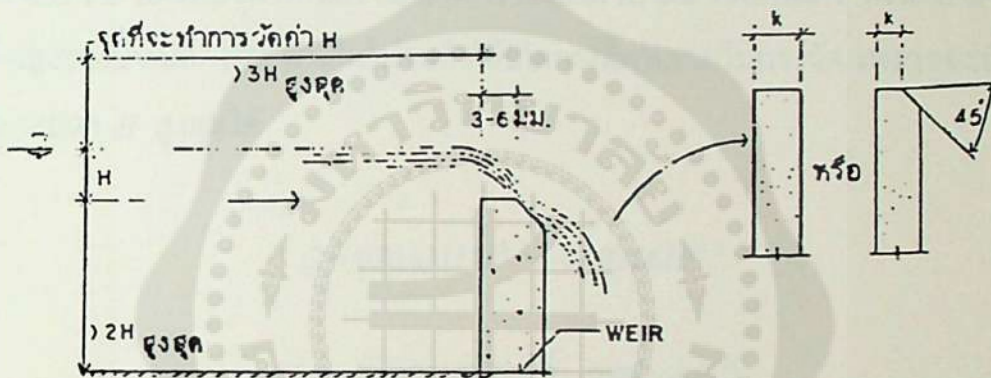
ลักษณะของฝายน้ำล้นที่มีอยู่หลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อหรือรางระบายน้ำ การแปรเปลี่ยนลักษณะการไหลของน้ำ ฯลฯ แต่โดยทั่วไปฝายน้ำล้นจะมีแผ่นกันทางน้ำไหลบริเวณสันฝายน้ำล้น โดยมากมีลักษณะเป็นคมสัน เพื่อให้สามารถอ่านค่าระดับน้ำล้นเหนือสันคมได้อย่างแม่นยำที่สุด ซึ่งเป็นค่า  $H$  ที่จะทำการวัด ในการออกแบบติดตั้งฝายน้ำล้นควรพิจารณาข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ เพื่อให้ได้ผลที่จะทำการวัดถูกต้องและแม่นยำที่สุด

1. ฝายน้ำล้นควรเป็นแผ่นบางที่มีความหนา 3 ถึง 6 มม. โดยสันฝายควรเป็นขอบคมเป็นมุม 90 องศา ไม่ควรเป็นขอบโค้ง เพราะจะทำให้ค่า  $H$  ลดลง ดังแสดงในรูป 3.1
2. ระดับสันของฝายน้ำล้นควรมีแนวระดับเดียวกัน
3. ฝายน้ำล้นต้องไม่ให้น้ำไหลซึมรั่วออกมาทางด้านหลังของฝายน้ำล้น โดยใช้วัสดุกันซึมทาบบริเวณขอบด้านข้าง และด้านล่างของฝาย
4. ความยาวของฝายน้ำล้น ควรทำกันอย่างละเอียด เพื่อลดค่าความผิดพลาดของการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำ
5. ระดับความสูงจากพื้นรางระบายถึงสันฝายน้ำล้นควรมีอย่างน้อยสองเท่าของระดับน้ำล้นเหนือสันฝายสูงสุด  $2H_{max}$
6. ด้านหน้าบริเวณทางน้ำไหลเข้าฝายน้ำล้น ควรมีระยะที่น้ำไหลเข้าอย่างน้อย 20 เท่าของระดับน้ำที่ล้นเหนือสันฝายสูงสุด  $20H_{max}$  และพื้นรางระบายบริเวณนี้ไม่ควรมีความลาด หรือถ้าหากจะมีก็ควรมีความลาดน้อยที่สุด
7. ระดับสันของฝายน้ำล้นควรจะอยู่เหนือระดับน้ำสูงสุดของบริเวณทางน้ำไหลออกอย่างน้อย 5 ซม. เพื่อให้เกิดการไหลล้นออกแบบอิสระ
8. ตำแหน่งที่จะวัดค่า  $H$  ควรวัดที่ตำแหน่งห่างจากสันฝายน้ำล้นทางด้านน้ำอย่างน้อย 3 เท่าของ  $H_{max}$  และควรเป็นตำแหน่งที่มีสภาพน้ำนิ่ง ซึ่งนิยมใช้บ่อพักติดตั้งไว้ข้าง ๆ รางระบาย

9. บริเวณขอบสันฝายน้ำล้นต้องปราศจากตะไคร่น้ำ หรือสิ่งสกปรกเกาะบริเวณนี้

10. การออกแบบขนาดของกล่องฝายน้ำล้น (Weir Box) ควรทราบอัตราการไหลของน้ำอย่างประมาณเสียก่อน

11. ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของรางระบายบริเวณต้นน้ำ ควรมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่าของพื้นที่หน้าตัดของน้ำส่วนที่ไหลล้นออก ณ ตำแหน่งสันฝายน้ำล้น ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการปั่นป่วนของบริเวณที่น้ำไหลล้นออกถ้าจำเป็นอาจติดตั้งแผ่นกันขวางไว้บริเวณต้นน้ำก่อนที่น้ำสูงสุดและต่ำสุด จะไหลล้นออก



รูปที่ 3.1 ลักษณะของฝายน้ำล้น [1]

การออกแบบฝายน้ำล้น ซึ่งมีรูปแบบหน้าตัด ต่าง ๆ ได้แก่ แบบสี่เหลี่ยม แบบสามเหลี่ยม และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู โดยในที่นี้หมายถึง ฝายน้ำล้นที่มีคมสันบางการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสี่เหลี่ยมน้ำล้นเฉพาะส่วนของความกว้างของร่องน้ำ

แบบนี้จะแตกต่างจากแบบที่ฝายน้ำล้นเต็มความกว้างของราง ซึ่งการไหลล้นของน้ำผ่านฝายแบบนี้ ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จะเกิดการคอดตัวของด้านข้างของลำน้ำ เพราะฉะนั้นความกว้างของราง  $L$  จะต้องลบด้วยส่วนที่คอดไป ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่า เท่ากับ  $0.1nH$  เมื่อ  $n$  เท่ากับ 2 เพราะฉะนั้นจะได้

$$L = L - 0.2H$$

สำหรับค่า  $Cd$  นั้นจะใช้เท่ากับ 0.62 ซึ่งเป็นค่า  $Cd$  ของฝายคมสัน แทนค่าในสมการ 21 จะได้

$$Q = 1.831(L - 0.2H)H^{3/2}$$

$$\text{หรือ } Q = 0.01831LH^{3/2} - 0.00366H^{5/2}$$

เมื่อ :  $Q =$  อัตราการไหลของน้ำ ;  $l/s$

$L =$  ความยาวของฝายน้ำล้น ; cm.

### การออกแบบฝายแบบสี่เหลี่ยม

ในที่นี้ อัตราการไหลสูงสุดของน้ำที่ปัมสามารถทำได้ เท่ากับ 150 ลิตรต่อวินาที หรือ เท่ากับ 2.5 ลิตรต่อวินาที และใช้ความกว้างของฝาย 8.5 เซนติเมตร ทั้งนี้ เพื่อไม่ให้ความสูงของน้ำที่ล้น ( $H$ ) ดำเนินไปจนทำให้เกิดการผิพลาตในการวัด เพราะฉะนั้น เราสามารถหา  $H$  สูงสุดได้

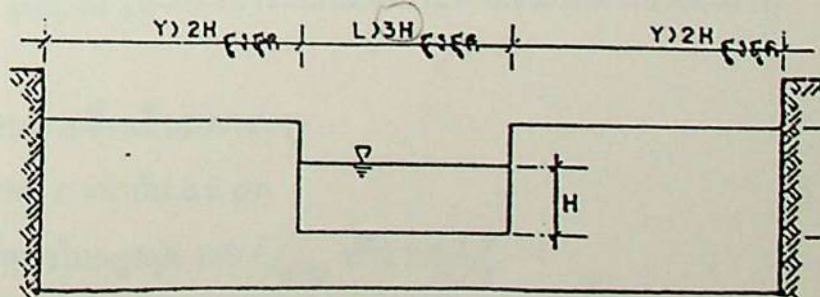
$$Q = 0.01831LH^{3/2} - 0.00366H^{5/2}$$

$$2.5 = 0.01831(8.5)H^{3/2} - 0.00366H^{5/2}$$

สามารถหาค่าของ  $H$  โดยการลองผิดลองถูก  
จะได้ :

$$H_{\max} = 7.21 \text{ cm.}$$

เมื่อได้ค่า  $H$  สูงสุดเราสามารถออกแบบขนาดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ตามรูปที่ 3.2 ได้



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสี่เหลี่ยม (1)

✓ การออกแบบฝายสามเหลี่ยมที่มีมุม 45 องศา

อัตราการไหลสูงสุด  $150 \text{ l/min} = 2.5 \text{ l/sec}$  ค่า  $C_d$  นั้น จะใช้ค่า  $C_d$  จากรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นค่า  $C_d$  ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะใช้กราฟที่ได้จากการทดลองของนาย Lenz ที่มีมุม  $45^\circ$  องศา และ  $H$  โดยประมาณ  $9 \text{ cm}$  จะได้ค่า  $C_d = 0.61$  แทนค่าในสมการที่ 22

$$Q = C_d \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} H^{3/2}$$

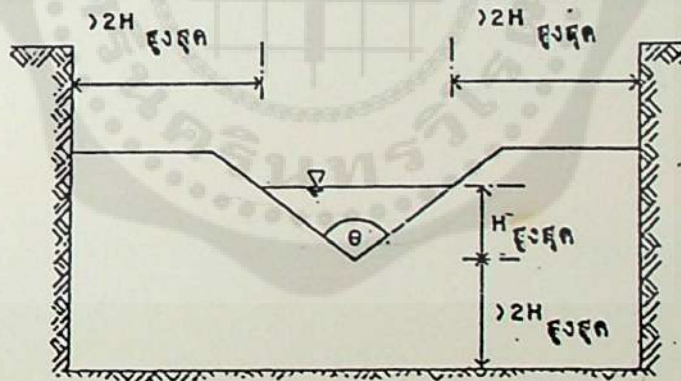
แทนค่า

$$0.0025 = C_d \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{45}{2} \cdot H^{3/2}$$

จะได้

$$H_{\max} = 11.2 \text{ cm.}$$

ซึ่งเมื่อทราบค่า  $H_{\max}$  ก็สามารถออกแบบฝายน้ำล้นได้ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแสดงการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสามเหลี่ยม (1)

✗ การออกแบบฝายสี่เหลี่ยมคางหมู

ให้ระยะ  $L$  เท่ากับ  $8.5 \text{ cm}$ .

อัตราการไหลสูงสุด  $150 \text{ l/min}$  หรือ  $2.5 \text{ l/s}$

ใช้ค่า  $C_d = 0.62$

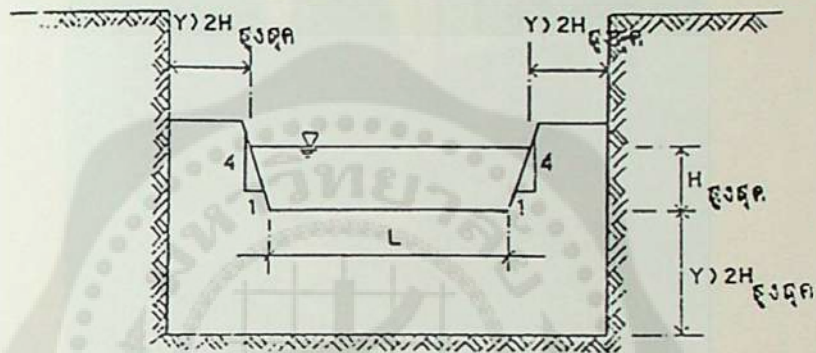
แทนค่าในสูตรที่ 21 จะได้ :

$$Q = Cd \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot LH^{3/2}$$

$$2.5 = 0.01831 \times 8.5 \times H^{3/2}$$

$$H_{\max} = 6.4 \text{ cm.}$$

เมื่อทราบค่า  $H$  สูงสุด ก็สามารถที่จะออกแบบฝายน้ำล้นได้ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแสดงการออกแบบฝายน้ำล้นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู [1]



รูปที่ 3.5 ชุดทดลองการไหลในช่องทางเปิด



รูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลของลำน้ำ



รูปที่ 3.7 ฝ่ายรูปแบบต่าง ๆ

บทที่ 4  
วิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

1. ถังเปรียบ
2. ถังเก็บน้ำเหนือฝาย
3. ถังเก็บน้ำ
4. วาล์วควบคุมการไหลของน้ำ
5. ปัมขนาด  $150 \text{ l/min}$
6. ไม้บรรทัดวัดระดับน้ำ
7. ฝายน้ำล้น
8. Pitot Tube
  - แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า  $30$
  - แบบสามเหลี่ยมมีมุม  $45$  องศา
  - แบบสี่เหลี่ยมคางหมู  $60$

วิธีการทดลอง

1. ตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์
2. ติดตั้งแบบของฝายที่จะทดลองเข้ากับลำรางการไหล
3. เดินปัม (เพื่อปรับระดับความสูงของน้ำให้เท่ากับระดับปากฝาย)
4. ปรับไม้บรรทัดเพื่อเตรียมพร้อมที่จะวัดระดับน้ำ
5. ปรับอัตราการไหลให้ได้ความสูงของระดับน้ำตามที่จะทดลอง
6. จับเวลาเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการไหลในหนึ่งหน่วยเวลาที่ถังเปรียบเทียบ

ปริมาณการไหล

- \*7. วัดความเร็วของน้ำที่ระยะ  $30$  cm จากหน้าฝายและที่ความลึกต่างกัน

ด้วย Pitot Tube

8. บันทึกค่าความสูงของระดับน้ำ และอัตราการไหลที่ถังเปรียบเทียบ

9. ทำการทดลองที่ระดับความสูงต่าง ๆ กัน ตามข้อที่ 4,5 และ 6 ตามลำดับ
10. เปลี่ยนแบบของฝายที่จะทดลอง และทดลองตามข้อที่ 3,4,5,6 และ 7
11. คำนวณหาอัตราการไหลจากความสูงของระดับน้ำที่ทดลองคำนวณหาความเร็วของน้ำ และหาค่า  $C_d$  จากการทดลอง
12. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



ตารางที่ 1 ตารางบันทึกผลการทดลองฝาย แบบสี่เหลี่ยม วันที่..24...เดือน...พฤศจิกายน...พ.ศ.2538.

ความสูงของน้ำเหนือฝาย $H.(cm)$	ปริมาณน้ำที่ทดสอบ ( $l$ )	เวลา (Sec)	ตำแหน่งความลึกที่วัดหัวความเร็ว ( $cm.$ )	หัวความเร็ว $H_v.(cmH_2O)$	ความเร็วที่ตำแหน่งความลึก $V.(m/s)$	อัตราการไหลตามทฤษฎี $Q_{th}.(l/s)$	อัตราการไหลจริง $Q_{act}.(l/s)$	$C_d$
4	10	7.63	1	0.2540	0.2232	1.8190	1.3587	0.7469
	15	12.00	2	0.2032	0.1997	1.8190	1.2500	0.6872
	20	16.01	3	0.1524	0.1729	1.8190	1.2492	0.6868
	25	19.52	4	0.0762	0.1223	1.8190	1.2807	0.7041
	30	22.99	5	0.0508	0.0100	1.8190	1.3049	0.7174
5	10	5.89	1	0.2794	0.2341	2.4761	1.6978	0.6857
	15	8.87	2	0.2540	0.2232	2.4761	1.6911	0.6830
	20	11.80	3	0.1778	0.1868	2.4761	1.6949	0.6845
	25	14.39	4	0.0762	0.1223	2.4761	1.7373	0.7016
	30	17.27	5	0.0508	0.0100	2.4761	1.7371	0.7016
5.5	10	5.20	1	0.2794	0.2341	2.8186	1.9231	0.6823
	15	7.47	2	0.2540	0.2232	2.8186	2.0080	0.7124
	20	10.35	3	0.2286	0.2118	2.8186	1.9324	0.6856
	25	12.80	4	0.1778	0.1868	2.8186	1.9531	0.6929
	30	15.23	5	0.0504	0.0100	2.8186	1.9698	0.6989

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกผลการทดลอง ฝ่ายแบบสี่เหลี่ยมคางหมู วันที่...24...เดือน...พฤศจิกายน...พ.ศ..2538.

ความสูงของน้ำ เหนือฝาย $H.(cm)$	ปริมาณน้ำที่ ทดสอบ $(l)$	เวลา (Sec)	ตำแหน่ง ความลึก ที่วัดความเร็ว เร็ว $(cm.)$	หัวความเร็ว $Hv.(cmH_2O)$	ความเร็วที่ ตำแหน่งความ ลึก $V.(m/s)$	อัตราการไหล ตาม ทฤษฎี $Q_{th} (l/s)$	อัตราการไหล จริง $Q_{act} (l/s)$	$Cd$
4	10	7.28	1	0.2286	0.2118	2.0080	1.3736	0.6841
	15	12.32	2	0.2794	0.2341	2.0080	1.2175	0.6063
	20	14.74	3	0.2032	0.1997	2.0080	1.3966	0.6955
	25	18.47	4	0.1524	0.1729	2.0080	1.3535	0.6741
	30	21.84	5	0.0762	0.0150	2.0080	1.3736	0.6841
5	10	5.22	1	0.2540	0.2232	2.8063	1.9157	0.6826
	15	8.52	2	0.2286	0.2118	2.8063	1.7606	0.6274
	20	10.68	3	0.2032	0.1997	2.8063	1.8727	0.6673
	25	13.61	4	0.1270	0.1578	2.8063	1.8369	0.6546
	30	15.90	5	0.0508	0.0100	3.2376	1.8868	0.6723
5.5	10	4.74	1	0.3048	0.2445	3.2376	2.1097	0.6516
	15	6.97	2	0.2794	0.2341	3.2376	2.1521	0.6647
	20	9.06	3	0.1524	0.2118	3.2376	2.2075	0.6818
	25	11.88	4	0.1524	0.1729	3.2376	2.1044	0.6500
	30	13.99	5	0.1016	0.1412	3.2376	2.1444	0.6623

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกผลการทดลอง ฝ่ายแบบสามเหลี่ยมมุม 45° วันที่..24 เดือน.พฤศจิกายน..พศ..2538.

ความสูงของน้ำ เหนือฝาย $H.(cm)$	ปริมาณน้ำที่ ทดสอบ ( $l$ )	เวลา (Sec)	ตำแหน่ง ความลึก ที่วัดหัวความ เร็ว ( $cm.$ )	หัวความเร็ว $H_v.(cmH_2O)$	ความเร็วที่ ตำแหน่งความ ลึก $V.(m/s)$	อัตราการไหล ตาม ทฤษฎี $Q_{th}.(l/s)$	อัตราการไหล จริง $Q_{act}.(l/s)$	$C_d$
5	10	28.44	1	0.1778	0.1868	0.5470	0.3516	0.6428
	15	40.69	2	0.1524	0.1729	0.5470	0.3686	0.6739
	20	54.66	3	0.1016	0.1412	0.5470	0.3659	0.6689
	25	70.15	4	0.0508	0.100	0.5470	0.3564	0.6516
	30	83.42	5	0.0254	0.0706	0.5470	0.3596	0.6574
6	10	15.70	1	0.2032	0.1997	0.8629	0.6369	0.7381
	15	22.59	2	0.1524	0.1729	0.8629	0.6640	0.7695
	20	31.81	3	0.1016	0.1412	0.8629	0.6287	0.7286
	25	39.45	4	0.0762	0.1223	0.8629	0.6337	0.7344
	30	46.09	5	0.0254	0.0706	0.8629	0.6509	0.7543
7	10	11.45	1	0.2540	0.2232	1.2686	0.8734	0.6884
	15	17.61	2	0.2032	0.1997	1.2686	0.8518	0.6714
	20	23.24	3	0.1270	0.1579	1.2686	0.8606	0.6784
	25	28.87	4	0.1016	0.1412	1.2686	0.8660	0.6826
	30	35.25	5	0.0508	0.0100	1.2686	0.8511	0.6709

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองของแบบจำลองชุดการไหลในช่องทางเปิด โดยการทดสอบฝายแบบสี่เหลี่ยมคางหมูได้ทำการวัดที่ระดับความสูงของน้ำที่เหนือระดับของฝายที่ระดับความสูงแตกต่างกัน และวัดหัวความเร็วจากระดับความลึกต่าง ๆ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราการไหล และความเร็ว แล้วนำค่าอัตราการไหลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลจริง เพื่อหาค่า  $Cd$  จากการทดลอง ค่า  $Cd$  สามารถหาได้จาก

$$Q_{actual} = Cd \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot LH^{3/2}$$

$$Q_{theorem} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot LH^{3/2}$$

$$Cd = \frac{Q_{actual}}{Q_{theorem}}$$

ปรากฏว่าได้ค่า  $Cd \approx 0.68$  ซึ่งมีค่าตรงตามทฤษฎีโดยทฤษฎีนั้นค่า  $Cd$  อยู่ระหว่าง 0.62 ถึง 0.75 ซึ่งการทดลองถูกต้องตรงตามทฤษฎี

2. จากการทดลองแบบจำลองชุดการไหลในช่องทางเปิดโดยการทดสอบฝายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อนำค่าต่าง ๆ ที่วัดได้มาคำนวณในลักษณะเดียวกันกับฝายแบบสี่เหลี่ยมคางหมูค่า  $Cd \approx 0.66$

3. และจากการทดลองฝายแบบสามเหลี่ยมที่มีมุม  $45^\circ$  และนำค่าที่วัดได้มาหาค่า  $Cd$  ที่ได้จากการทดสอบจาก

$$Q_{actual} = Cd \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot H^{3/2}$$

$$Q_{theorem} = \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \cdot H^{3/2}$$

$$Cd = \frac{Q_{actual}}{Q_{theorem}}$$

ปรากฏว่าค่า  $Cd$  ที่ได้จะอยู่ประมาณ 0.67

ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า  $Cd$  ที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่า  $Cd$  ที่ได้ทำการออกแบบชุดอุปกรณ์ แต่ทว่าค่า  $Cd$  ที่ได้จากการทดลองจะมีความแปรปรวนอยู่มาก ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับความผิดพลาดจากการทดลองและการอ่านเครื่องมือวัด ซึ่งสามารถแก้ไขให้มีความผิดพลาดลดลงได้

4. จากตารางผลการทดลอง ค่าความลึกและค่าหัวความเร็วของน้ำในทางน้ำเปิดที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน จะเห็นได้ว่าที่ระดับความลึกลงไปจะมีค่าหัวความเร็วลดลงเรื่อย ๆ

#### ข้อเสนอแนะ

1. ชุดการทดลองการไหลในช่องทางเปิด มีข้อผิดพลาดที่ควรแก้ไข เช่น เครื่องวัดระดับและ การจับเวลาเพื่อหาค่าอัตราการไหลจริงของผู้ทดลองควรจะมีความแม่นยำจึงจะได้ค่าจากการทดลองถูกต้องยิ่งขึ้น

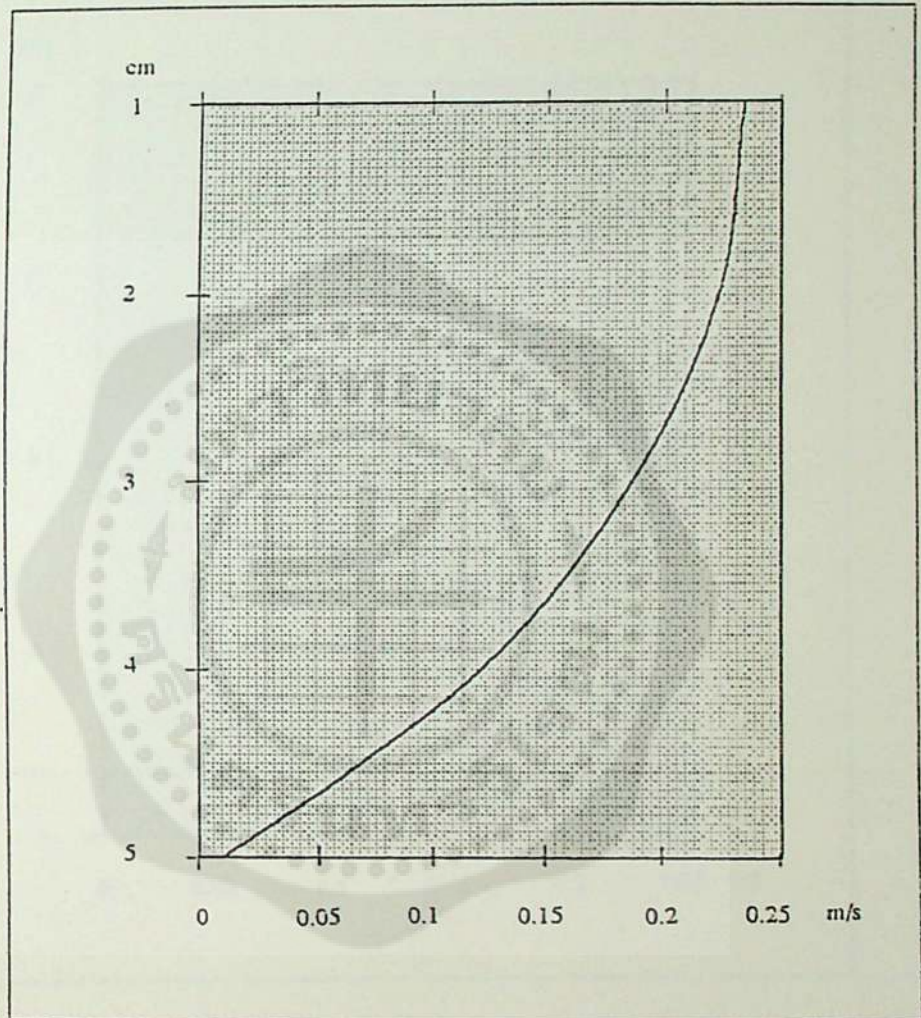
2. น้ำที่ปั๊มส่งขึ้นมาสู่รางน้ำควรมีชุดควบคุมความปั่นป่วนของกระแสน้ำเพื่อลดความปั่นป่วนของน้ำลงจะช่วยให้การไหลของน้ำมีความราบเรียบยิ่งขึ้น และจะได้ค่าจากการทดลองมีความถูกต้องยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

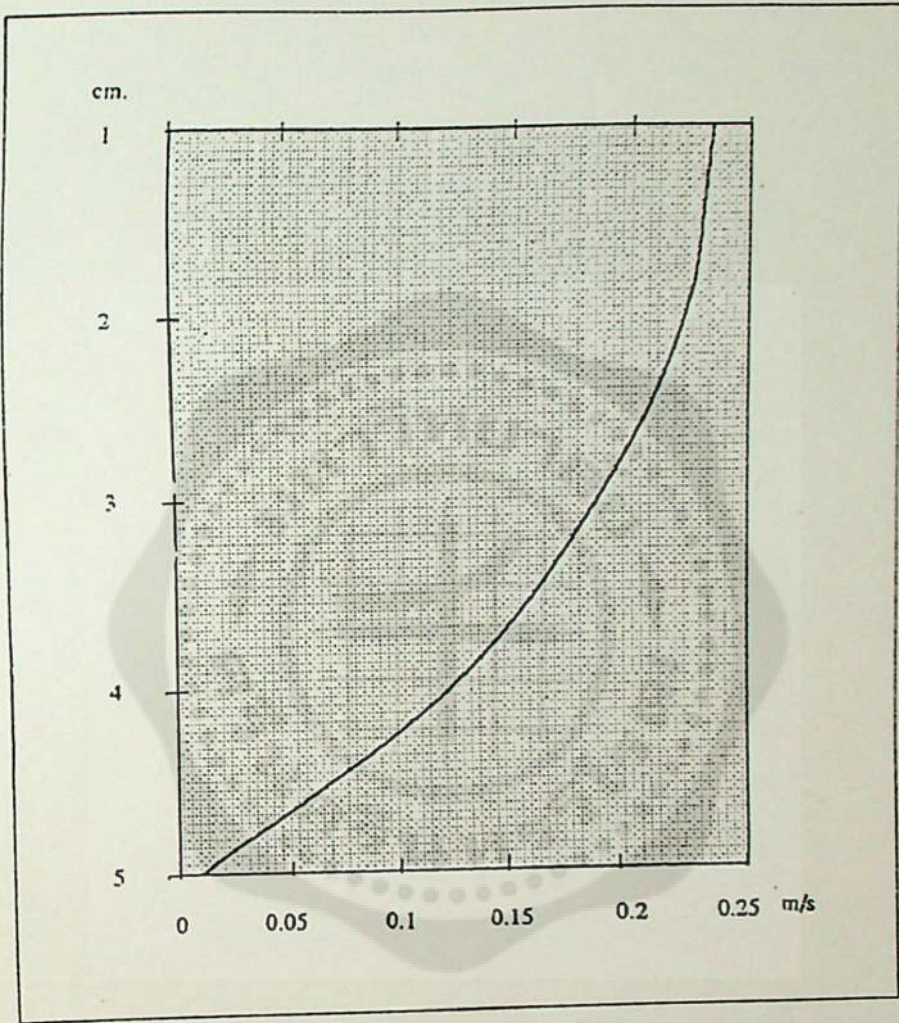
1. ดร. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์, การออกแบบระบบท่ออาคารและสิ่งแวดล้อมอาคาร, เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มิตรนราการพิมพ์, 2537.
2. กীরติ ลีวัจนกุล, ชลศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์. หจก.เอช-เอน การพิมพ์ พ.ศ. 2534.
3. E.Jonh Finnemore, Robert L. Daugherty, Joseph B. Franzini, FLUID MECHANICS WITH THE ENGINEERING APPLICATION Metric Ed. Singapore: McGraw-Hill 1985.
4. Frank M. White, FLUID MECHANICS, 2rd Ed. New York: McGraw Hill 1986.



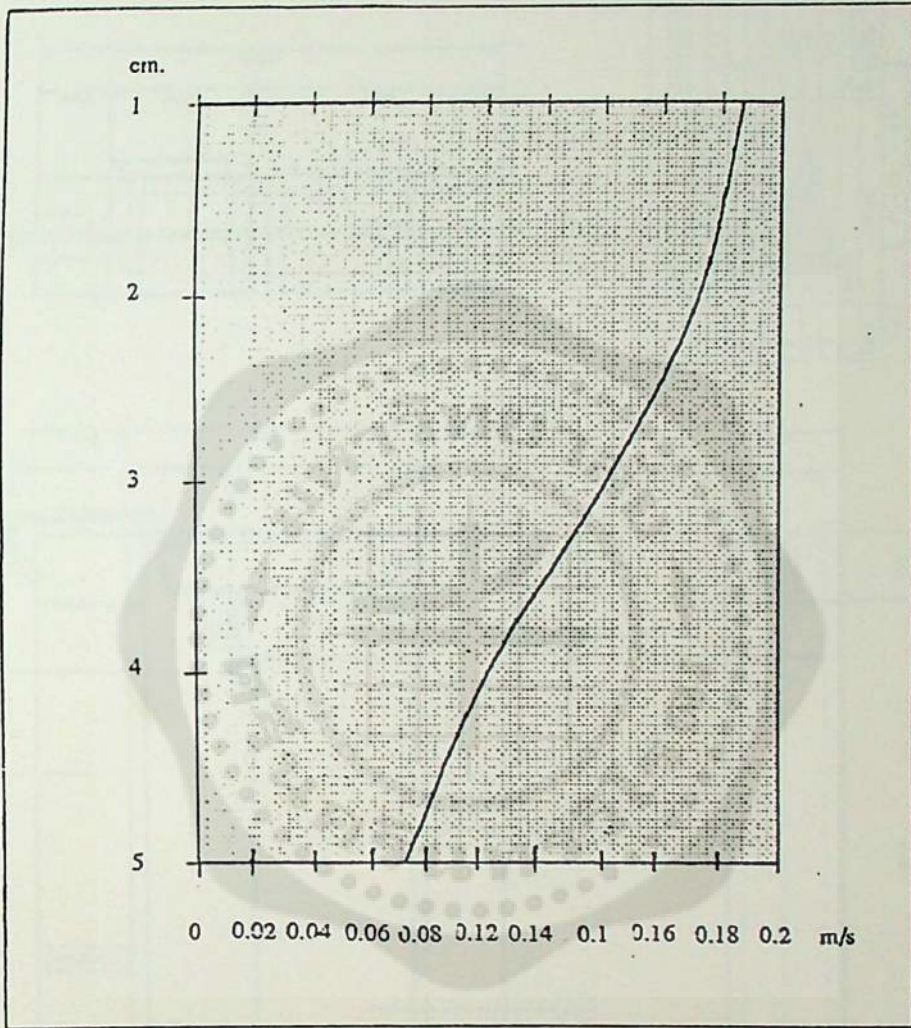
ภาคผนวก



แสดงความเร็วของลำน้ำที่ระดับความลึกต่าง ๆ  
ของฝายสี่เหลี่ยมทางมุมที่  $H = 5$  cm.



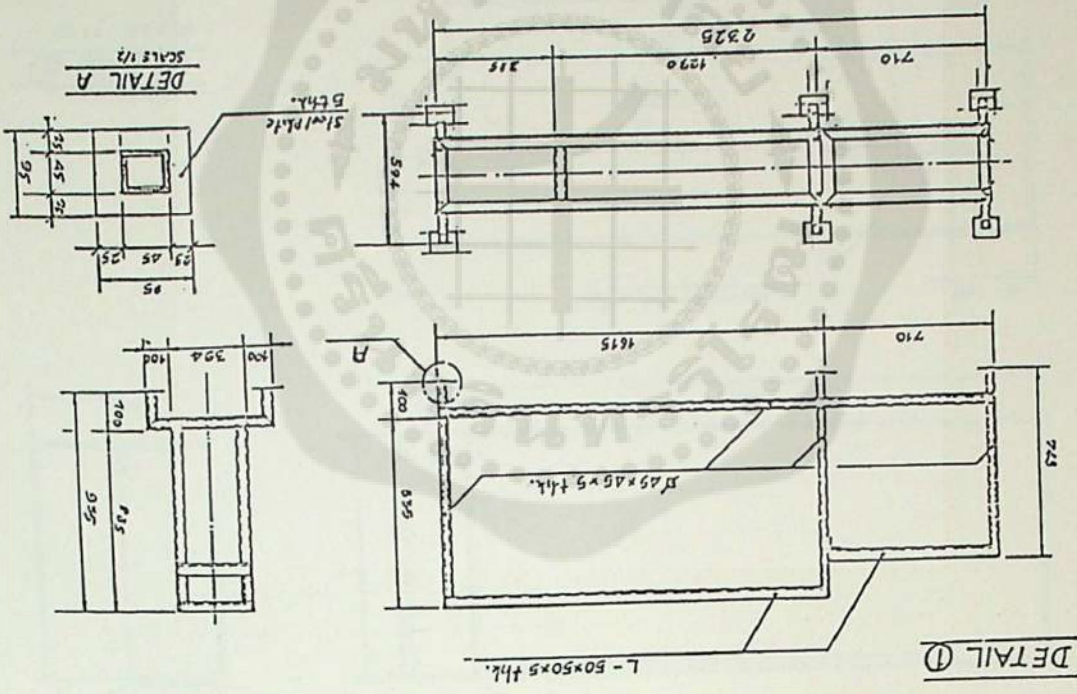
แสดงความเร็วของลำน้ำที่ระดับความลึกต่าง ๆ  
ของฝายสี่เหลี่ยม ที่  $H = 5 \text{ cm}$ .

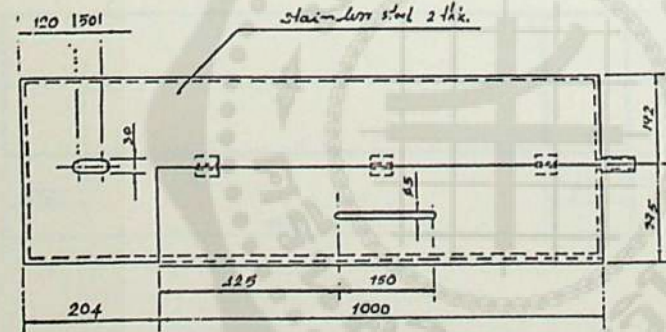
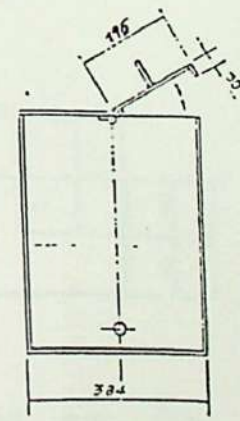
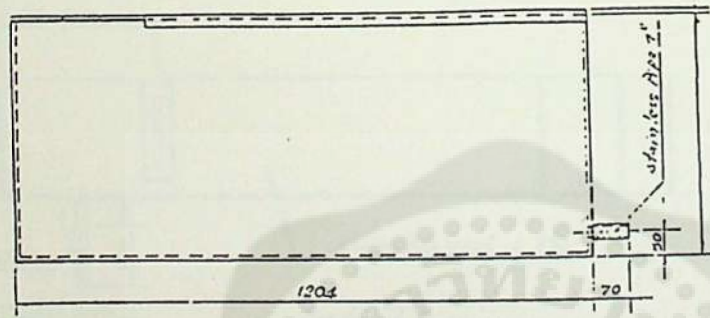


แสดงความเร็วของลำน้ำที่ระดับความลึกต่าง ๆ  
ของฝายสามเหลี่ยม ที่  $H = 5$  cm.



МАТЕРИАЛЫ МЕ 2А		ВЕРСИИ 1/2	
УСТАНОВКА ПОД ПОДПОРКУ		МАТЕРИАЛ	КОЛИЧЕСТВО
		МАТЕРИАЛ	КОЛИЧЕСТВО
		МАТЕРИАЛ	КОЛИЧЕСТВО
		МАТЕРИАЛ	КОЛИЧЕСТВО
МАТЕРИАЛ	КОЛИЧЕСТВО	МАТЕРИАЛ	КОЛИЧЕСТВО
1	1	1	1

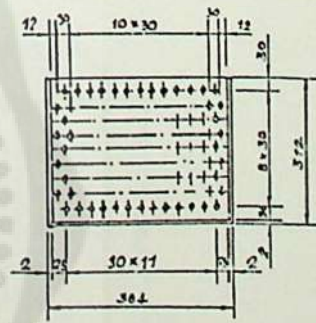
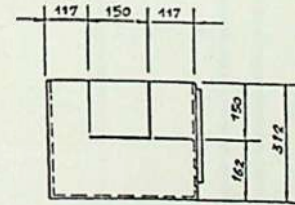
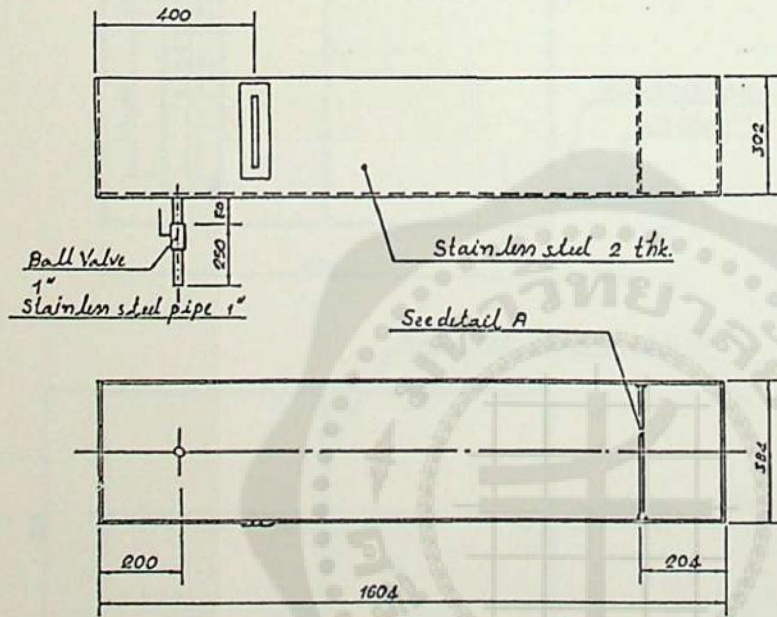




DETAIL ②  
SCALE 1:10

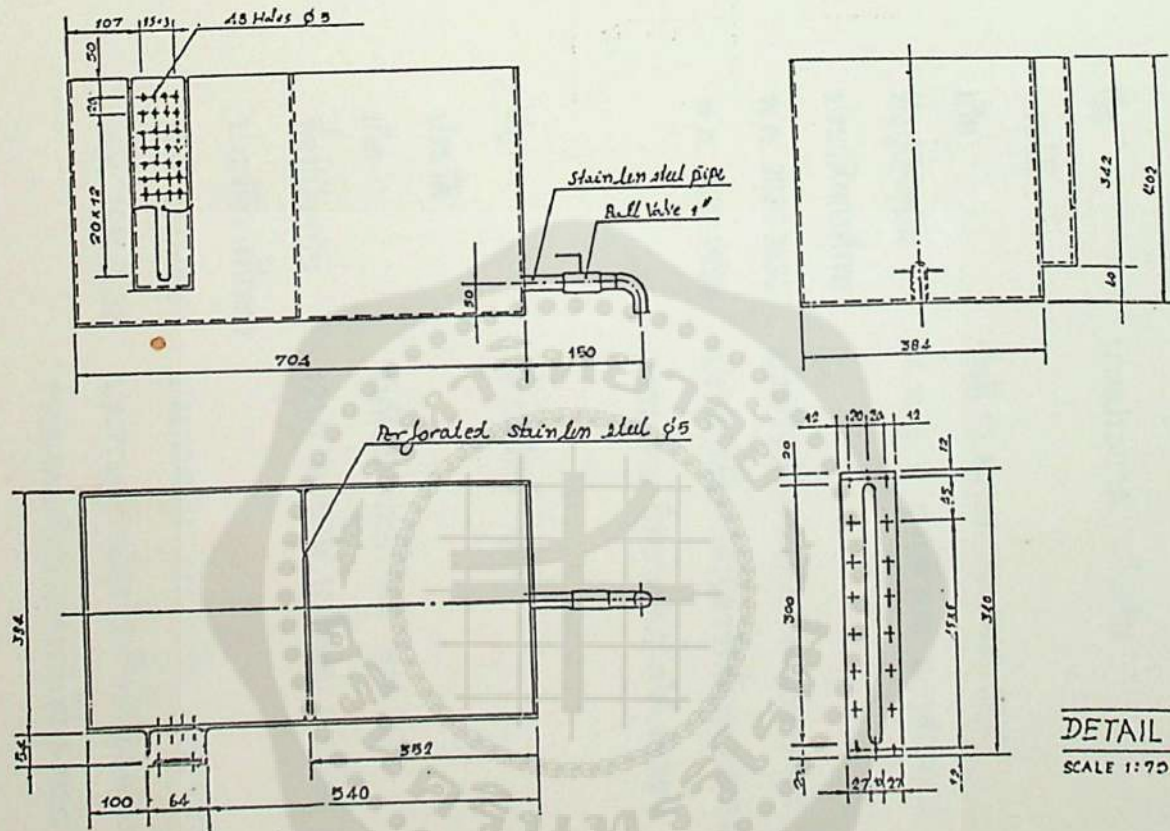
2.	กัณฑ์	ท3	AISI 304	002	1
ชนิด	รายการ	หมวดหมู่	วัสดุ	ขนาด/แบบ	จำนวน
วันที่	1-12-95	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขต ประสานมิตร			
ผู้เขียน	วิวัฒน์ งาม				
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มท.					
ผู้ควบคุม					
มาตราส่วน	1/10	ชื่อชิ้นงาน	ชุดอุปกรณ์/หลอดไฟ/...	ขนาด/แบบ	ME 2A

DETAIL ③



DETAIL A

3	ถังเก็บที่หอพักอพยพ	ท.3	AISI 304	003	1
วันที่	วางแผนการ	ตรวจวัด	วัสดุ	ขนาดและแบบ	จำนวน
วันที่	1-12-95	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขต ประสานมิตร			
ผู้เขียน	<i>[Signature]</i>				
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มร.					
ผู้ควบคุมแบบ					
มาตรฐานงาน	ยึดอินงาน	มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง		ขนาดและแบบ	ME 2A
1/7.5					



4.	ท่อน้ำร้อน/ท่อน้ำเย็น	ท.3	AISI 304	004	1
ชนิดที่	รวมการ	ขนาดท่อ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
วันที่	1-12-95	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขต ประสานมิตร			
ผู้เขียน	สมชาย งาม				
ผู้ตรวจ					
ผู้ควบคุม					
มาตรฐาน	ซีดีอีเนท	ชุดท่อน้ำร้อน/ท่อน้ำเย็น		หมายเลขแบบ ME 2A	
1/75					

## ประวัติผู้จัดทำโครงการวิศวกรรม

1. ชื่อ นายประกาศ แก้วเจ็ย

ประวัติ

เกิด วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2513

ที่อยู่ปัจจุบัน 41 ม. 2 ต. สามตำบล อ. จุฬารัตน์ จ. นครศรีธรรมราช

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2529-2532 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) จาก วิทยาลัยเทคนิคพัทลุง

พ.ศ. 2532-2534 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) จาก สถาบันเทคโนโลยี  
ราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ สงขลา
2. ชื่อ นายสุวิทย์ สุขมิ่ง

ประวัติ

เกิด วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2511

ที่อยู่ปัจจุบัน 121/1 ม. 8 ต. นาโหนด อ. เมือง จ. พัทลุง

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2527-2530 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) จาก วิทยาลัยเทคนิคพัทลุง

พ.ศ. 2530-2532 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) จาก สถาบันเทคโนโลยี  
ราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ สงขลา

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2532-2538 บริษัท ไทยแมลลอนโพลีเอสเตอ์ จำกัด (มหาชน)  
13/98 ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี