



การหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ในคลองชลประทาน
Determination of Manning 's n Coefficient in Irrigation Channels



โดย

นายประเสริฐ ภัทรวงศ์สกุล

นายศิพัฒน์ ชันศิริ

วัน เดือน ปี..... 29 ก.ย. 2541
เลขทะเบียน..... 038062
เลขเรียกหนังสือ..... T 94092 418ก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038062

ปีการศึกษา 2539

การหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning's n ในคลองชลประทาน

(Determination of Manning's n Coefficient in Irrigation Channels)



อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ปรีชานันท์ ศรีแก้ว

อาจารย์ ภัทราภรณ์ เมฆพฤกษาวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning's n ในคลองชลประทาน

(Determination of Manning's n Coefficient in Irrigation channels)

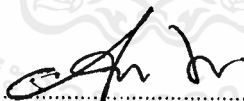
ผู้จัดทำ

1. ประเสริฐ ภัทรวรงค์สกุล
2. ศิพัฒน์ ชันศิริ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. ปริชานันท์ ศรีแก้ว)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. ภัทรวรรณ เมฆพฤกษาวงศ์)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ในคลองชลประทาน

ประเสริฐ ภัทรวงศ์สกุล

ศิพัฒน์ ชั้นศิริ

อ.ปรีชานันท์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ภัทราภรณ์ เมฆพฤษามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

2539

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ในรางน้ำเปิด ชนิดภาคตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีความลาดเอียงตามยาว 1 : 500 วัสดุที่เลือกใช้ทำรางน้ำคือ 1. แผ่นพลาสติก และ 2. แผ่นไม้อัด

ในการทดลองได้ปรับอัตราไหลหลายค่า ระหว่าง 1.3 - 4.5 l/sec (ลิตร/วินาที) และจดบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็น ผลจากการคำนวณโดยใช้สูตร Manning พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ของรางน้ำที่ทำจากแผ่นพลาสติก และที่ทำจากแผ่นไม้อัด มีค่าเท่ากับ 0.017 และ 0.011 ตามลำดับ

Determination of Manning 's n coefficient in Irrigation Channels

Prasert Patravongsakul

Sipat Chansiri

Prechanan Srikeaw Advisor

Patraporn makpruksavong Advisor

1996

Abstract

The thesis aims at determining. The Manning 's n roughness coefficient in open channels. Two rectangular testing channel have been constructed with different materials, one of Plastic sheets and the other of Plywood boards.

With longitudinal slope of 1 in 500, the supplying flow rates have been varied. between 1.3 and 4.5 liters/sec and the concerned data were recorded. The Manning 's n computed by using the manning formula are 0.017 and 0.011 for the plastic and plywood channel respectively

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(ก)
สารบัญรูปภาพ	(ข)
สารบัญตาราง	(ค)
บทที่ 1 บทนำ และวัตถุประสงค์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง	19
บทที่ 4 บทวิจารณ์ และสรุป	32
ภาคผนวก	33
กิตติกรรมประกาศ	39
เอกสารอ้างอิง	40



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ทางน้ำเปิดตามธรรมชาติ	2
2	ตัวอย่างของทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น	3
3	การไหลคงที่ในทางน้ำเปิด	4
4	การไหลไม่คงที่ในทางน้ำเปิด	4
5	การไหลแบบสม่ำเสมอ	5
6	การไหลแบบเปลี่ยนแปลง	5
7	ตัวอย่างของการไหลในทางน้ำเปิด	6
8	การไหลแบบสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด	7
9	การเกิดการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิดคงรูปและยาว	8
10	การพิสูจน์สูตร Chezy สำหรับการไหลสม่ำเสมอ	9
11	การผันแปรของ ส.ป.ส.ความขรุขระ Manning's n กับความลึก	14
12	ลักษณะของสันฝายคม และการไหลผ่านสันฝายชนิดนี้	16
13	รูปตัดตามแนวยาวของทางน้ำเพื่อการติดตั้งฝาย และหลักวัดระดับน้ำสำหรับอ่านค่า เฮด (H)	16
14	ฝายสามเหลี่ยม	17
15	กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยหน้าตัดการไหลสม่ำเสมอและความลึกปกติ	18
16	flume ที่ใช้ในการทดลอง	22
17	ปล่อยน้ำให้ไหลผ่าน flume	23
18	วัดความลึกของน้ำ (H_v) ที่ฝายสามเหลี่ยม 90°	24
19	ตวงน้ำจากท้าย flume	25
20	รางไม้ขัด	26-27
21	แบบของ flume ที่ใช้ในการทดลอง	28
22	รูปหน้าตัดในรางไม้ขัด	29

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการทดลองของทางน้ำเปิดที่สร้างจากไม้ขัด	30
2	ผลการทดลองของทางน้ำเปิดที่สร้างจากแผ่นพลาสติก	31
ตารางที่ (ภาคผนวก)		
1	ค่าองค์ประกอบต่างๆสำหรับการคำนวณค่า n	34
2	ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning 's n	35-38



บทที่ 1

บทนำ และวัตถุประสงค์

บทนำ

การศึกษาวิชาชลศาสตร์ของทางน้ำเปิด (hydraulic of open channel) เป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นแขนงวิชาหนึ่งอันเก่าแก่ที่สุด และเป็นรากฐานดั้งเดิมของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ความรู้ทางด้านชลศาสตร์ที่ได้นำมาศึกษากันอยู่ปัจจุบัน เป็นมรดกตกทอดจากการค้นคว้า / ทดลอง ของนักวิศวกร นักวิทยาศาสตร์ และนักพัฒนา อย่างต่อเนื่องมานับหลายพันปีนับแต่โบราณกาลมนุษย์ได้อาศัย แม่น้ำ ลำธาร เป็นจุดกำหนด ในการตั้งหลักแหล่งอยู่อาศัยและทำมาหากิน เป็นเช่นนี้กระทั่งปัจจุบัน และยังคงเป็นเช่นกันในอนาคต ตราบที่สังคมมนุษย์ยังดำรงอยู่

ทางน้ำเปิดมีบทบาทสำคัญต่อมวลมนุษย์ ในด้านการควบคุมการไหลในแม่น้ำ (river control) การสัญจรทางน้ำ (inland navigation) การระบายน้ำออกจากพื้นที่ (land drainage) การชลประทาน (irrigation) การจัดหาอุปโภค (water supply) ตลอดจนการจัดระบบสุขาภิบาล (sanitation) มนุษย์ทุกคนที่เกิดมาบนโลกนี้ จะต้องเกี่ยวข้องโดยตรงหรือโดยทางอ้อมกับทางน้ำเปิด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพยายามทำการศึกษา / ทดลอง / ค้นคว้า มาเป็นเวลาหลายพันปี เพื่อที่จะเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับกฎเกณฑ์อธิบายการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด

แม้กระนั้นความรู้ด้านชลศาสตร์ของทางน้ำเปิด ที่มีอยู่ในโลกปัจจุบันก็ยังไม่เพียงพอ ทฤษฎีกฎเกณฑ์ ตลอดจนสูตรความสัมพันธ์ต่าง ๆ ยังขึ้นอยู่กับหลักการของการคาดเดาโดยอาศัยเหตุผล (empirical approach) เป็นส่วนมาก การปฏิบัติงานเชิงวิศวกรรมยังอาศัยขบวนการทดลองผิดพลาดซ้ำซาก (trial and error approach) ในหลาย ๆ กรณี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ของรางน้ำเปิดที่ทำจากแผ่นพลาสติก (Plastic Sheets) และแผ่นไม้อัด (Plywood Boards)
2. เพื่อทราบถึงขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ในห้องทดลองและสามารถประยุกต์ใช้ในสนามได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

การไหลในทางน้ำเปิด

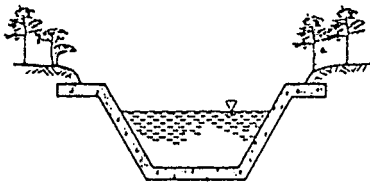
การไหลในทางน้ำเปิด หมายถึง การไหลที่มีผิวของไหลสัมผัสกับอากาศ ซึ่งเรียกผิวของไหลนี้ว่า ผิวของไหลอิสระ โดยมีความดันบรรยากาศกระทำต่อผิวของไหลอิสระ ดังนั้นผิวของไหลอิสระตามแนวยาวของทางน้ำเปิดจึงเป็นเส้นระดับชลศาสตร์ (hydraulic grade line) ทางน้ำเปิดที่พบเห็นโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะคือ

1. ทางน้ำเปิดตามธรรมชาติ (natural open channel) เป็นทางน้ำเปิดที่มีสภาพลึบซับซ้อน เปลี่ยนแปลงไปตามสถานที่ ลักษณะไม่แน่นอน เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ร่องน้ำเล็ก ๆ คลอง และแม่น้ำเป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 1

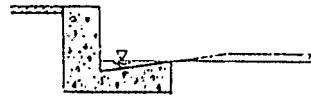


รูปที่ 1. ทางน้ำเปิดตามธรรมชาติ

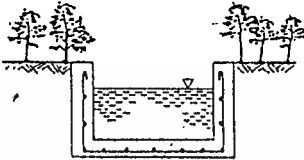
2. ทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น (artificial channel) เป็นทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ซึ่งการวางแผนทางการไหลสามารถกำหนดได้จากเส้นระดับชั้นความสูง (contour) ของพื้นที่ โดยอาศัยหลักการที่ว่าของไหลย่อมไหลจากที่สูงไปต่ำกว่าตามแรงโน้มถ่วงของโลก ตัวอย่างของทางน้ำเปิดที่เพิ่มขึ้น เช่น ร่องน้ำ คลอง แม่น้ำ รางระบายน้ำ (drainage ditch) รางระบายน้ำข้างถนน (roadsite gutter) และท่อที่มีน้ำไหลไม่เต็ม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.



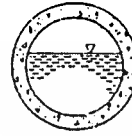
(ก) คลองคอนกรีต



(ข) รางระบายน้ำข้างถนน



(ค) รางคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ง) ท่อระบายน้ำ

รูปที่ 2. ตัวอย่างของทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น

ประเภทของการไหลในทางน้ำเปิด

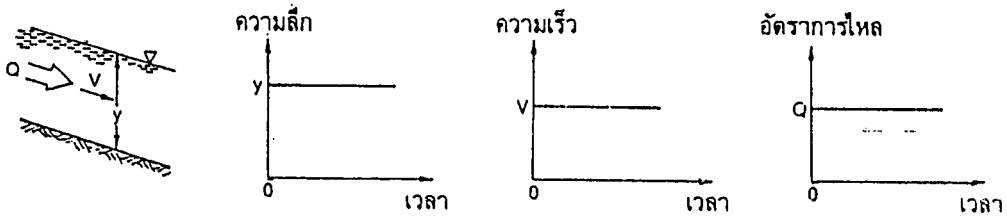
ในทางชลศาสตร์สามารถแบ่งการไหลในทางน้ำเปิดได้ 2 ประเภทคือ การแบ่งตามชนิดของการไหล (type of flow) และการแบ่งตามสภาวะการไหล (state of flow) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การแบ่งตามชนิดของการไหล มีหลักเกณฑ์ในการแบ่ง 2 ประการคือ

- * 1.1 เกณฑ์เกี่ยวกับเวลา (time onterion) มี 2 ลักษณะคือ
 - * การไหลคงที่ (steady flow) คือการไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา กล่าวคือ ตัวแปรต่าง ๆ ของการไหล เช่น ความลึก y ความเร็ว v และอัตราการไหล q ที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของทางน้ำเปิดคงที่ในช่วงเวลาที่กำหนด (dt) หรือ

$$\frac{d (Y, V, Q, \dots)}{dt} = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ลักษณะการไหลคงที่มักเกิดในทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น เพราะสามารถควบคุมปริมาณการไหลคงที่ได้ด้วยประตูน้ำต่าง ๆ ส่วนทางน้ำเปิดตามธรรมชาติก็อาจเกิดการไหลคงที่ได้ในกรณีที่พิจารณาการไหลในช่วงสั้น ๆ ดังนั้นภาพของสมการที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3

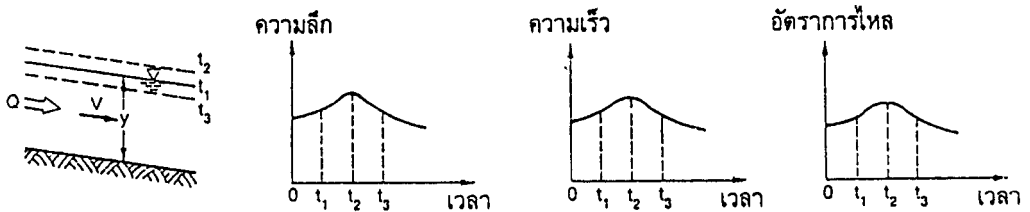


รูปที่ 3 การไหลคงที่ในทางน้ำเปิด

* การไหลไม่คงที่ (unsteady flow) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา กล่าวคือตัวแปรต่าง ๆ ของการไหล เช่น ความลึก y ความเร็ว v และอัตราการไหล q ที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของทางน้ำเปิดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือ

$$\frac{d (Y, V, Q, \dots)}{dt} = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

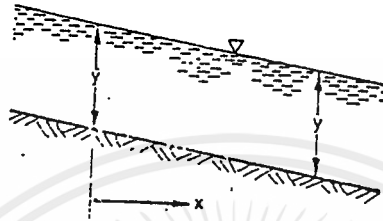
ลักษณะการไหลไม่คงที่ มักจะเกิดขึ้นกับทางน้ำเปิดธรรมชาติ ซึ่งมีความผันแปรของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาก เช่น ปริมาณน้ำไหลนองลงทางน้ำเปิดที่เกิดจากน้ำฝน การรั่วซึม และการระเหยเป็นต้น จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความลึก ความเร็ว และอัตราการไหลในทางน้ำเปิด ส่วนในทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้นก็อาจจะเกิดการไหลไม่คงที่ได้ ดังนั้น ภาพของสมการที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การไหลไม่คงที่ในทางน้ำเปิด

1.2 เกณฑ์เกี่ยวกับตำแหน่งพื้นที่การไหล (space ontion) แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

* การไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) คือ การไหลที่มีความลึกของของไหล y คงที่ตลอดระยะทาง x ของทางน้ำเปิดดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การไหลแบบสม่ำเสมอ.

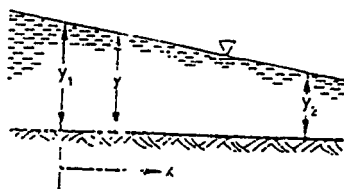
จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าความลึก y ไม่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง x หรือ

$$y \neq f(x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ลักษณะการไหลแบบสม่ำเสมอมักจะพบเห็นโดยทั่วไปในทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้นในช่วงระยะทางที่ไม่มากนัก

* การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (varied flow) หรือการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (nonuniform flow) คือการไหลที่มีความลึกของของไหลเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของทางน้ำเปิด ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การไหลแบบเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าความลึก y เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง x หรือ

$$y = f(x) \quad \dots\dots\dots (5)$$

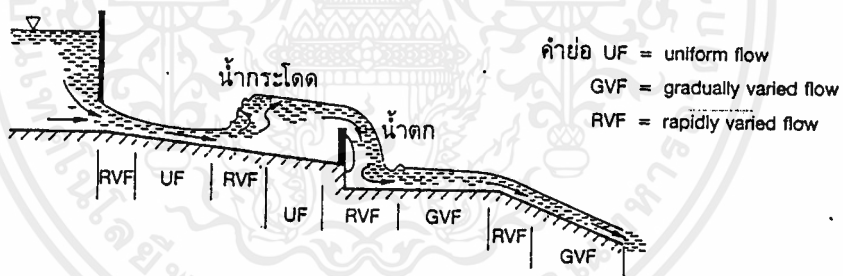
$$\frac{dy}{dx} \neq 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

นอกจากนี้การไหลแบบเปลี่ยนแปลงยังแบ่งได้อีก 2 ชนิดคือ

1. การไหลแบบเปลี่ยนแปลงน้อย (gradually varied flow, GVF) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกตามระยะทางน้อย

2. การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (rapidly varied flow, RVF) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกตามระยะทางอย่างทันทีทันใด เช่น น้ำกระโดด (hydraulic jump) น้ำตก (hydraulic drop) และบริเวณที่น้ำไหลลอดจากประตูระบายน้ำเป็นต้น

สำหรับตัวอย่างของการไหลในทางน้ำเปิดชนิดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7



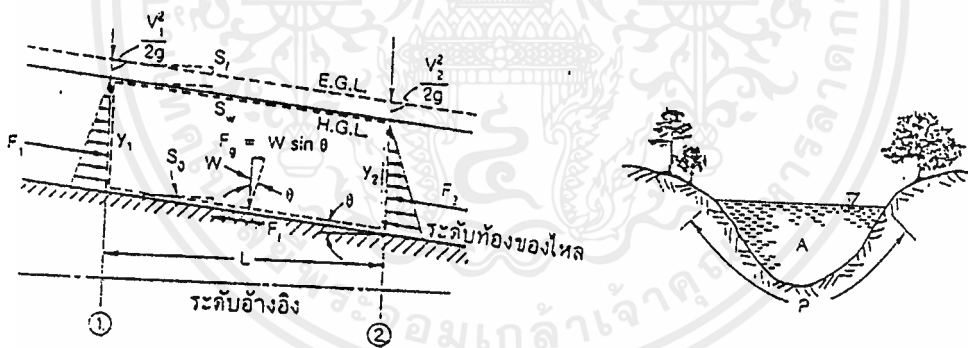
ที่มา : Bruce, [1]

รูปที่ 7 ตัวอย่างของการไหลในทางน้ำเปิด

การไหลแบบสม่ำเสมอ

การไหลในทางน้ำเปิด เป็นการเคลื่อนที่ของของไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) จากที่ที่มีพลังงานสูงไปสู่บริเวณที่มีพลังงานต่ำ ขณะที่ของไหลเคลื่อนที่จะเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากมีแรงเสียดทานบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับทางน้ำเปิด แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการไหล ซึ่งการไหลแบบสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นเมื่อแรงเสียดทานเท่ากับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในทิศทางการไหลดังรูปที่ 8 โดยที่การไหลแบบสม่ำเสมอนี้ บางครั้งก็เรียกว่า การไหลแบบปกติ (normal flow)

จากรูปที่ 8 สำหรับทางน้ำเปิดคงรูป (prismatic channel) หรือทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดแนวการไหล จะมีการไหลแบบสม่ำเสมอ เมื่อความลึกของของไหล y_1 เท่ากับ y_2 ทำให้ความลาดของระดับท้องของของไหล (bottom slope, S_0) ขนานกับความลาดผิวของไหล (surface slope, S_w) หรือความลาดของเส้นระดับชลศาสตร์ (hydraulic grade line) และจากการไหลอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลเท่ากันทุกหน้าตัดการไหลตลอดความยาวของทางน้ำเปิด ทำให้ความเร็วของเส้นระดับพลังงาน (energy grade line, S_f)

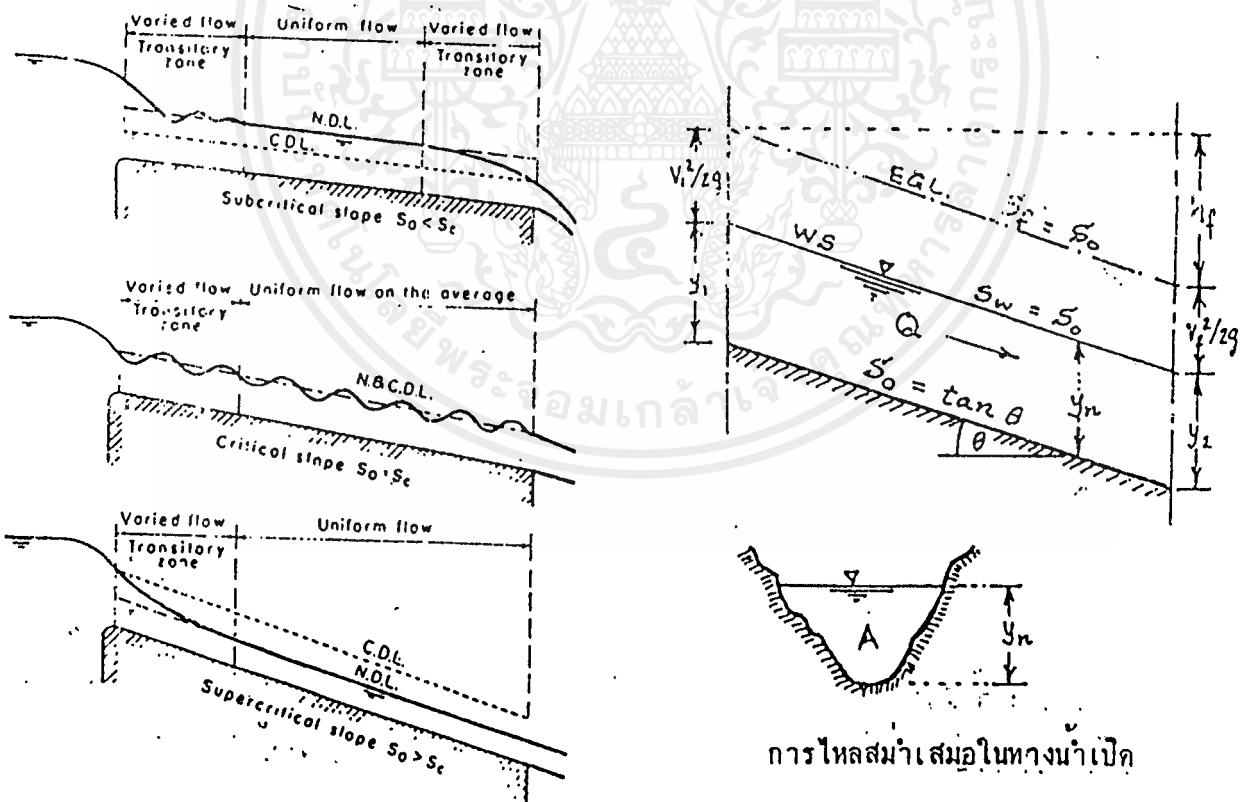


รูปที่ 8 การแบบสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด

โดยสรุปแล้ว การไหลแบบสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นเมื่อ

1. คุณสมบัติทางเรขาคณิต และสภาพการไหลในทางน้ำเปิดคือ y , A , Q และ V คงที่ทุกหน้าตัดการไหล
2. ความลาด $S_0 = S_w = S_f$ เท่ากับความลาด S ตลอดช่วงความยาวที่เกิดการไหลแบบสม่ำเสมอ

โดยทั่วไปแล้ว การไหลสม่ำเสมอจะเป็นการไหลคงที่ (steady flow) เสมอไป การไหลไม่คงที่ (unsteady flow) โดยสภาพความเป็นจริงแล้วไม่มี ในทางน้ำเปิดธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง การไหลสม่ำเสมอและคงที่ (steady uniform flow) ก็ยากที่จะเกิดขึ้นตามเงื่อนไขดังกล่าวไว้ข้างบน อย่างไรก็ตาม สภาพการไหลสม่ำเสมอก็มักจะนำไปประยุกต์ใช้กับทางน้ำเปิดธรรมชาติเสมอในทางปฏิบัติ ยกเว้นในกรณีพิเศษ และเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าได้ให้ผลลัพธ์ที่ง่ายต่อการคำนวณและความถูกต้องพอประมาณในปัญหาเชิงปฏิบัติ ในปัญหาด้านวิศวกรรมโดยทั่วไป จะพบว่ามีการไหลสม่ำเสมอแบบปั่นป่วน (Turbulent uniform flow) เป็นส่วนมาก การไหลสม่ำเสมอแบบราบเรียบ (laminar uniform flow) มีน้อยมาก ดังนั้นในที่นี้ให้เป็นที่เข้าใจกันว่าการกล่าวถึงการไหลสม่ำเสมอ ก็คือ แบบปั่นป่วน ยกเว้นจะระบุว่าเป็นแบบราบเรียบ (laminar) และการไหลที่ความเร็วสูง ๆ เช่นในทางระบายน้ำล้นที่สูงมาก ๆ จะไม่สามารถคงสภาพการไหลสม่ำเสมอได้ เพราะเวลาที่ความเร็วสูงมากกว่า 20 ฟุต/วินาที หรือ 6 ม/วินาที น้ำที่เคลื่อนที่จะผสมตัวกับอากาศ (air entrainment) และการไหลเริ่มจะไม่คงที่ (unsteady) และกระชอกไปมา



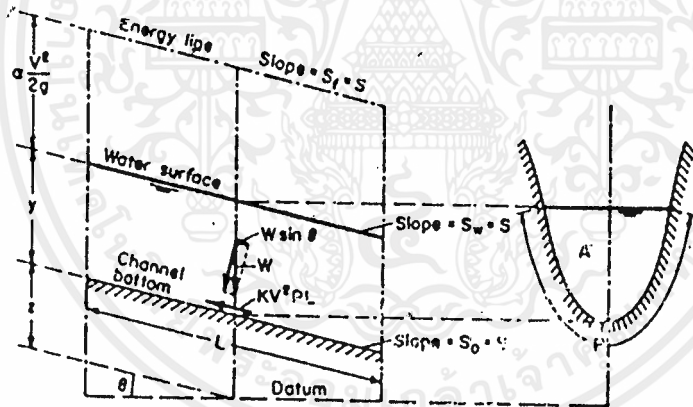
รูปที่ 9 การเกิดการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิดคงรูปและยาว

สูตรคำนวณการไหลสม่ำเสมอ

ในยุคเริ่มแรกของวิทยาการชลศาสตร์ วิศวกรตระหนักดีถึงความสำคัญที่จะต้องมีสูตรการไหลสำหรับช่วยในการคำนวณออกแบบทางน้ำเปิด โดยที่สูตรดังกล่าวจะต้องง่ายต่อการประยุกต์ และในขณะเดียวกันต้องให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงพอสมควร ก่อพัฒนาปรับปรุงสูตรคำนวณการไหลสม่ำเสมอ ได้ดำเนินมาเป็นเวลามากกว่าสองศตวรรษ เท่าที่มีการบันทึกหลักฐานอาจจะเริ่มก่อน ค.ศ. 1700 จนกระทั่งเริ่มต้นศตวรรษที่ 19 ได้มีสมการ/สูตรสำหรับการคำนวณมากมาย แต่ละสมการ/สูตร ก็ได้รับความนิยมเป็นระยะ ๆ ไป รูปแบบของสูตรที่ยังคงได้รับความนิยมยอมรับมากที่สุด มีอยู่ 2 รูป คือ สูตร Chezy และสูตร Manning

สูตร Chezy

Antoine Chezy วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้เป็นผู้คิดค้นสูตรนี้ เมื่อราวปี ค.ศ. 1769 ซึ่งอาจจะถือได้ว่าเป็นสูตรการไหลสม่ำเสมอสูตรแรก และได้รับการยอมรับจนกระทั่งปัจจุบัน กาวิเคราะห์ที่มาของสูตร อาจทำได้โดยการวิเคราะห์หน่วย (dimensional analysis) ดังต่อไปนี้



Derivation of the Chezy formula for uniform flow in open channel.

รูปที่ 10 การพิสูจน์สูตร Chezy สำหรับการไหลสม่ำเสมอ

จากรูป 10 พิจารณาการไหลสม่ำเสมอระหว่างสองหน้าตัด 1-2 สูตร Chezy จะขึ้นอยู่กับข้อสมมุติฐาน 2 ข้อ ดังนี้

- 1) แรงเสียดทานการไหลต่อหน่วยพื้นที่ τ แปรผันตามกำลังสองของความเร็ว

$$\tau \propto V^2 \text{ หรือ } \tau = KV^2 \text{ โดย } K = \text{ค่าคงที่}$$

$$\text{แรงกระทำรอบผิวของมวลน้ำระหว่าง 1 - 2} = \tau PL = KV^2 PL = F_\tau$$

2) ในการไหลสม่ำเสมอแรงขับเคลื่อนเนื่องจากความถ่วงของโลก. (Gravity force) ในทางทิศทางการไหลสม่ำเสมอเท่ากับแรงเสียดทานไหลรอบ ๆ มวลน้ำที่เคลื่อนที่

$$\text{จากรูปที่ 9 น้ำหนักของมวลน้ำระหว่างหน้าตัด 1 - 2} = W = \gamma AL$$

$$\text{แรงขับเคลื่อน เนื่องจากความถ่วง} F_d = W \sin \theta$$

$$\text{เพราะว่า } \theta \text{ มีค่าน้อย } \sin \theta \approx \tan \theta = S \text{ (ความลาดเส้นพลังงาน)}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad F_d = WS = ALS$$

จากสมมติฐานข้อ 2

$$F_r = F_d$$

$$KV^2 PL = \gamma ALS$$

$$V^2 = \frac{\gamma}{K} \frac{A}{P} S = \frac{\gamma}{K} RS = C^2 RS$$

ดังนั้น

$$V = C \sqrt{RS} \quad (7)$$

โดย $R =$ รัศมีชลศาสตร์ $= A/P$ $S =$ ความลาดเส้นพลังงาน (energy slope) และ ค่า C มีชื่อเรียกว่าสัมประสิทธิ์ Chezy โดย $C =$ รุทสองของ γ/K ซึ่งเป็นตัวเลขที่ขึ้นกับสภาพทางน้ำเปิดและสภาพการไหล โดยวิเคราะห์หน่วยจะพบว่า C มีหน่วยเป็น $L^{0.5} T^{-1}$ หรือ (หน่วยความเร่ง-acceleration) $^{0.5}$ ค่า C มักจะหาได้จากตารางทางด้านชลศาสตร์ กลศาสตร์ของไหลหรือการไหลในทางน้ำเปิดโดยทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่จะให้ค่า สำหรับหน่วยในระบบอังกฤษ การนำมาใช้ระบบเมตริก ควรได้ตรวจสอบ/แปลงหน่วยให้ถูกต้องเสียก่อน

สูตรสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ Chezy

ในภายหลัง Chezy ได้คิดค้นสูตรในสมการ (7) แล้ว ได้มีผู้คิดค้นวิธีการที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของ Chezy C เพื่อนำไปวิเคราะห์การไหลในท่อ และทางน้ำเปิดอย่างมากมายหลายวิธีการ วิธีการที่สำคัญสำหรับการไหลในทางน้ำมีดังนี้

1) สูตร Ganguillet และ Kutter (1869) ได้ให้สูตรในระบบอังกฤษ

$$c = \frac{41.65 + 1.811/n + 0.00281/S}{1 + (n/\text{Sqr}.R) (41.65 + 0.00281/S)} \quad (8)$$

$n =$ สปส. Kutter หรือ นิยมเรียกว่า Kutter's-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด

2) สูตร Bazin (1897) ได้ให้สูตรหาค่า C ว่า

$$C = \frac{157.6}{1 + m/\text{Sqr}.R} \quad (9)$$

m = สปส. ของ Bazin หรือ Bazin's m

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด

3) สูตร Powell (1950) ได้เสนอสูตรหาค่า C ดังนี้

$$C = -42 \log (C + E) \quad (10)$$

$$4 \text{Re } R$$

Re = Reynold Number

E = ตัวแปรสำหรับความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด

สูตร Manning

ในปี 1889 วิศวกรชาวไอริช Robert Manning ได้เสนอสูตรการไหลสม่ำเสมอ คล้ายกับสูตร Chezy ในรูป $V = C R^{2/3} S^{1/2}$ ซึ่งต่อมาได้ถูกดัดแปลงมาอยู่ในรูปแบบของสูตรปัจจุบัน ได้รับความนิยมนิยมรับมากที่สุด ที่เรียกว่าสูตร Manning (Manning's Formula) ดังนี้

ระบบเมตริก (MKS) $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$ ม/วินาที (11)

ระบบอังกฤษ (FPS) $V = 1.486 R^{2/3} S^{1/2}$ ฟุต/วินาที (12)

โดย V = ความเร็วเฉลี่ย R = รัศมีชลศาสตร์ S = ความลาดพลังงาน และ n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระทางน้ำเปิด ซึ่งเรียกว่า Manning's n สำหรับ 1.486 นั้นเป็นค่าแปลงหน่วยจากระบบเมตริก (MKS) และระบบอังกฤษ (FPS)

สำหรับค่า n อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ หน่วย (dimensional analysis) ของตัวแปรในสมการ (11) และ (12) จะพบว่าค่า n มีหน่วยในรูปของ $TL^{-1/3}$ บางคนก็ได้วิเคราะห์ต่อไปว่า หน่วยของค่า n เป็นหน่วยของ (ความเร็ว) $^{-1/2}$ x (ความยาว) $^{1/6}$ และได้สรุปต่อไปว่า ค่า n ได้เทอม g ซ่อนอยู่แล้วดังนั้น ค่า n จึงมีหน่วยเป็น $L^{1/6}$

ตัวเลขยกกำลัง $2/3$ ของรัศมีชลศาสตร์ R Manning ได้ศึกษามาจากข้อมูลการทดลองของ Basin ในทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้นที่มีรูปร่างและความขรุขระเปลี่ยนแปลง และพบว่าค่ายกกำลังของ R อยู่ในระหว่าง 0.6499-0.8395 และ Manning จึงได้เสนอให้ใช้ตัวยกกำลังของ R ใช้สูตร เท่ากับ $2/3$

สำหรับทางน้ำเปิดที่มีความลาดและรัศมีชลศาสตร์ที่พบโดยทั่วไป จะพบว่าค่า Manning 's n และ Kutter's n จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในการปฏิบัติค่า n ทั้งสองถือว่าเท่ากัน ในช่วง $s \geq 0.0001$ และ $0.30 \text{ m} \leq R \leq 9.15 \text{ m}$. ค่าของสัมประสิทธิ์ความขรุขระ n (Manning หรือ Kutter) ได้แสดงไว้ในตาราง 1

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning 's n

การประยุกต์สูตร Manning ในการคำนวณเกี่ยวกับการไหลสม่ำเสมอความยุ่งยากที่จะมีขึ้น จะได้แก่การตัดสินใจเลือก ค่า Manning 's n ทั้งนี้เพราะว่าไม่มีกฎเกณฑ์ที่ชัดเจนที่จะยึดถือในการเลือกค่า n วิศวกรจะต้องตระหนักถึงความจริงที่สำคัญประการหนึ่ง นั่นคือ การตัดสินใจเลือกค่า สปส. ความขรุขระ n ก็หมายถึงการประเมิน (estimate) สภาพความเสียดทานการไหลของทางน้ำเปิดที่กำลังพิจารณา ซึ่งไม่มีวิธีใด ๆ ที่จะทำการประเมินได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการเลือกค่า สปส. ความขรุขระ n จะต้องอาศัยประสบการณ์ และการตัดสินใจที่เหมาะสมของวิศวกร และวิศวกรแต่ละคนจะตัดสินใจเลือกค่า n ไม่เท่ากันในกรณีที่เหมาะสม ๆ กัน

องค์ประกอบที่มีผลต่อ สปส. ความขรุขระ n

ได้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่า ทางน้ำเปิดหนึ่ง ๆ จะมีค่าสปส.ความขรุขระ n 'ไม่คงที่' และมีความผันแปรมากด้วยองค์ประกอบ (factors) หลายประการดังต่อไปนี้

1. ความขรุขระของผิวหน้าเปิด ซึ่งหมายถึงขนาดและรูปร่างของเม็ดวัสดุที่บนเส้นขอบเปียกของทางน้ำเปิด เช่น ทางน้ำเปิดที่ประกบด้วยวัสดุ เม็ดละเอียด (fine grain) จะมีค่าสปส. ความขรุขระ n และความผันแปรของค่า n ต่อกำลังการไหล น้อยกว่าทางน้ำเปิดที่ประกบด้วยวัสดุเม็ดหยาบกว่า

2. พืชปกคลุม (vegetation) จะมีผลต่อความขรุขระของทางน้ำเปิด ลดพื้นที่หน้าตัดการไหล และยังทำให้การไหลช้าลงด้วย ผลของพืชปกคลุมต่อการไหลจะขึ้นอยู่กับ ความสูง ความหนาแน่น การกระจาย และชนิดของพืชปกคลุม ซึ่งสำคัญมากสำหรับการออกแบบคลองระบายน้ำขนาดเล็ก และคลองที่ทำการลาด (lining) ด้วยต้นพืช การกำหนดค่า n ยังจะเป็นระบบการบำรุง รักษาอีกด้วย เช่นช่วงระยะเวลาในการตัดหญ้าแต่ละครั้ง เป็นต้น

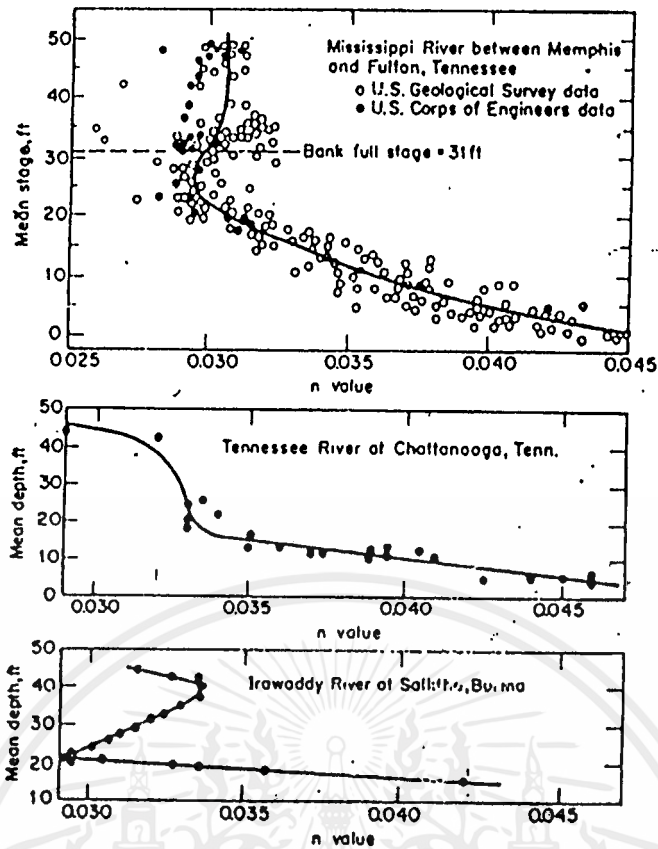
3. ความผันแปรของทางน้ำเปิด (channel irregularities) ซึ่งอาจหมายถึง ความแปรเปลี่ยน ของเส้นขอบเปียกหน้าตัด ขนาด รูปร่าง ตามความยาวของน้ำเปิด และยังอาจหมายถึง สภาพท้องน้ำ เช่น สันทราย หลุมบ่อต่าง ๆ ในท้องน้ำ ทางน้ำเปิดที่มีความผันแปรสูง ก็จะทำให้ค่า สปส.ค่าขรุขระ n มากขึ้น

4. ความคดเคี้ยวของทางน้ำเปิด (channel alignment) ทางน้ำเปิดที่มีความคดเคี้ยวมากก็จะทำให้ค่า สปส. ความขรุขระ n สูงตามไปด้วย และทางน้ำเปิดที่มีแนวโค้ง ค่า n จะน้อยลงเมื่อรัศมีมีความโค้งมากขึ้น ได้เสนอแนะว่า ค่า n ควรเพิ่มขึ้น 0.001 ต่อทุกๆ 20 องศาของความโค้ง 100 ฟุต ในทางน้ำเปิด ทางน้ำเปิดที่ค่อนข้างคดเคี้ยวอาจจะต้องเพิ่มค่าของ n มากถึง 30 % ก็ได้

5. การตกตะกอนและกัดเซาะ (siltng and scouring) การตกตะกอนโดยมาก จะมีแนวโน้มทำให้สภาพทางน้ำเปิดสม่ำเสมอและราบเรียบมากขึ้น จึงเป็นการลดความขรุขระ ในทางตรงกันข้ามการกัดเซาะมักจะเพิ่ม ค่า สปส. ความขรุขระ n อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวก็ยังจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ตกตะกอนอีกด้วย การตกตะกอนเป็นสันหรือ คลื่นทราย (sand bar and wave) จะเป็นการเพิ่มความขรุขระขึ้นอีก ในขณะที่การกัดเซาะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ครอบคลุมพื้นที่กว้าง จะทำให้ทางน้ำเปิดมีความสม่ำเสมอมากขึ้น จึงเป็นการลดค่า สปส. ความขรุขระ n ด้วยเช่นกัน

6. สิ่งกีดขวาง (obstruotion) การไหล เช่น ท่อนซุง ตอม่อสะพาน และอื่น ๆ จะเพิ่มค่า n โดยอัตราเพิ่มจะขึ้นอยู่กับ สภาพสิ่งกีดขวาง ขนาด รูปร่าง จำนวนและการกระจาย เป็นต้น

7. ขนาดและรูปร่างของทางน้ำเปิด ก็อาจมีผลต่อค่า n ได้มีการสันนิษฐาน การเพิ่มรัศมีชลศาสตร์ R อาจเพิ่มหรือลดค่า n ก็ได้แล้วแต่สภาพของทางน้ำเปิด ดังได้แสดงเปรียบเทียบค่า n ของแม่น้ำ 3 สาย ในรูป 11



Variations of the n value with the mean stage or depth.

รูปที่ 11 การผันแปรของ สปส. ความขรุขระ Manning's n กับความลึก

8. ความลึกและอัตราการไหล เมื่อสูงขึ้นค่า n จะลดลงไปโดยทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้อาจยกเว้นในกรณีของน้ำล้นตลิ่ง เมื่ออัตราการไหลมากขึ้น เช่นกรณี ของน้ำหลาก (flood)

9. การแปรผันตามฤดูกาล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัชพืชน้ำ หญ้า และต้นไม้ ความขรุขระ อาจสูงขึ้นในฤดูของการเจริญเติบโตเช่น ฤดูฝน เป็นต้น การแปรผันต่าง ๆ ตามฤดูกาล อาจเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

10. วัสดุตะกอนแขวนลอย และตะกอนท้องน้ำ (suspended material and bed load) ซึ่งการเคลื่อนที่ตะกอนเหล่านี้ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อน ทำให้พลังงานที่มีอยู่สำหรับการไหลลดลง และจะแสดงอยู่ในรูปของความขรุขระที่เพิ่มขึ้น

การประมาณค่า สปส. ความขรุขระ ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่า สปส. ความขรุขระ n Cowan Chow ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่า n ที่เหมาะสมจาก

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_6$$

n_0 = ค่า n พื้นฐานสำหรับทางน้ำเปิดที่มีแนวตรงสม่ำเสมอ

n_1 = ค่าปรับสำหรับสภาพผิวนแปรของผิวท้องน้ำ (surface irregularities)

n_2 = ค่าปรับสำหรับความผันแปรของรูปร่างและขนาดหน้าตัด

n_3 = ค่าปรับสำหรับสิ่งกีดขวางของการไหล

n_4 = ค่าปรับสำหรับองค์ประกอบพืชปกคลุม

m_6 = ค่าปรับสำหรับขีดความคดเคี้ยวของแนวทางน้ำเปิด

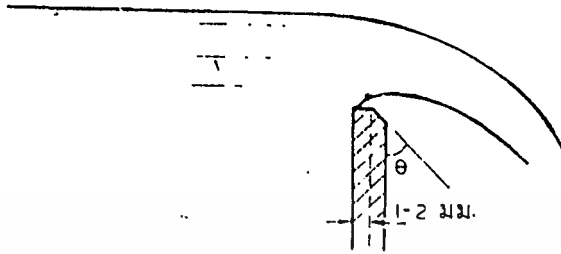
ค่า n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 , และ m_6 เลือกได้จากตารางที่ 1

การเลือกค่า n ในการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 2 ได้แสดงรายการค่า สปส. ความขรุขระ n สำหรับสูตร Manning และสำหรับทางน้ำเปิดแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุด ค่า n เฉลี่ยสำหรับทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น (artificial channel) ใช้ได้กับกรณีที่มีการบำรุงรักษาเป็นอย่างดี ตัวเลขหน้าทาบ เป็นตัวเลขที่เสนอแนะสำหรับการออกแบบ ในกรณีที่คาดหวังว่าไม่มีการบำรุงรักษาที่ดี ความใช้ค่า n สูงขึ้น

นอกจากนี้การเปรียบเทียบสภาพท้องน้ำกับ ภาพของทางน้ำเปิดที่ทราบค่า n ยังจะช่วยให้การตัดสินใจเลือกค่า n ได้ดีขึ้น

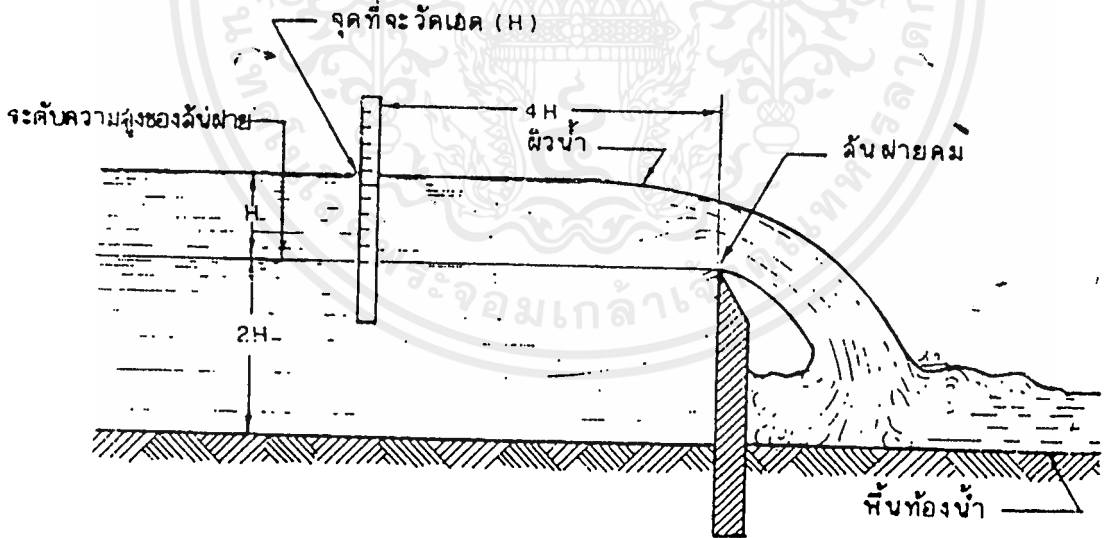
2.1 ฝ่ายวัตน้ำ



$\theta \leq 45^\circ$ สำหรับฝายลิ้นเหลี่ยมผืนผ้า และลิ้นเหลี่ยมคางหมู

$\theta \leq 30^\circ$ สำหรับฝายลิ่มเหลี่ยม

รูปที่ 12 ลักษณะของสันฝายคม



รูปที่ 13 รูปตัดตามแนวยาวของทางน้ำเพื่อแสดงการติดตั้งฝาย และหลักวัดระดับน้ำสำหรับอ่านค่า (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

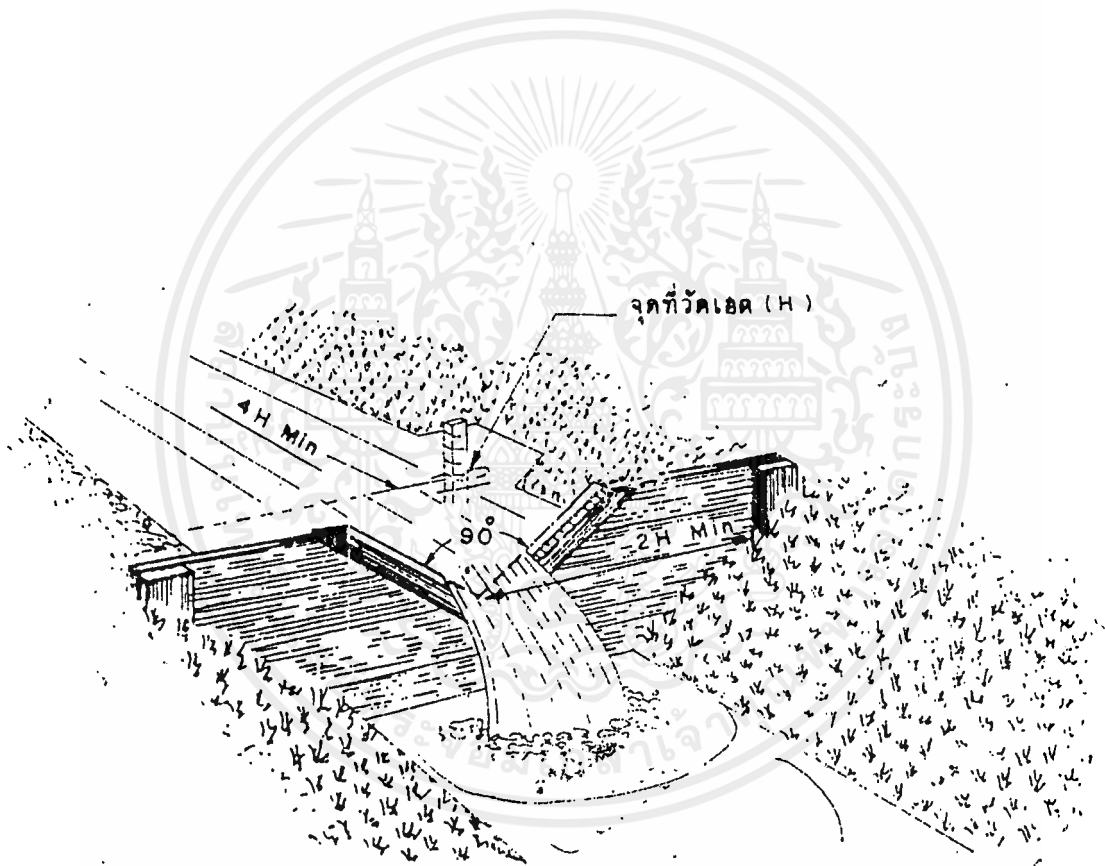
ฝายสามเหลี่ยม (Triangular or V-notch weir) เป็นฝายประเภทบีบข้าง (Contracted) ที่ช่องเปิด
 ให้น้ำไหลผ่านเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยสันฝายทั้งสองข้างทำมุม 45° กับแนวดิ่ง

อัตราการไหลผ่านฝายสามเหลี่ยม คำนวณได้โดยสมการ

$$Q = 0.0138 H^{5/2}$$

Q = อัตราการไหล (l/sec)

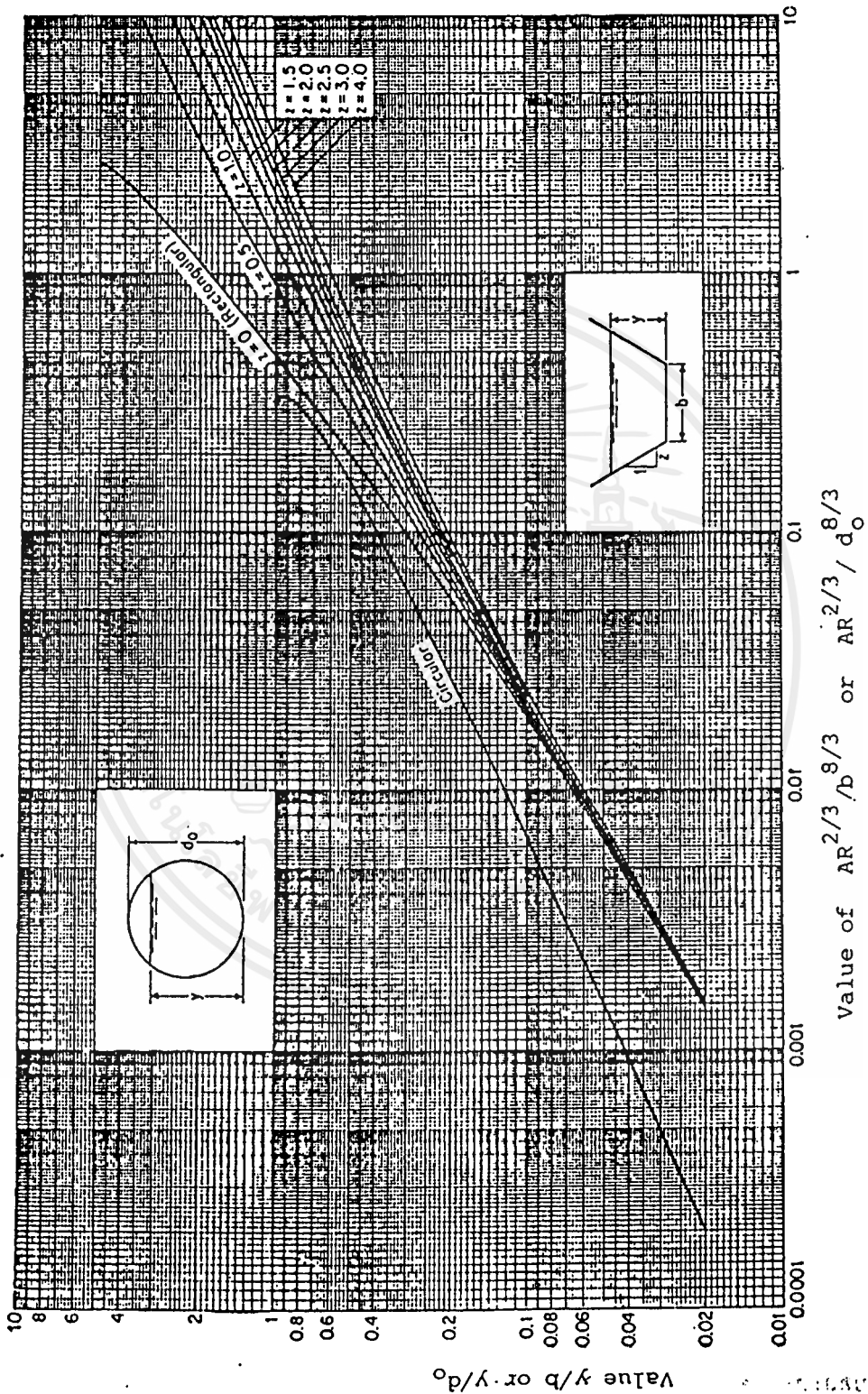
H = เสด หรือความลึกของน้ำ เหนือยอดสามเหลี่ยมของสันฝาย (C m)



รูปที่ 14 ฝายสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 15 กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยหน้าตัดการไหลสม่ำเสมอและความลึกปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทที่ 3

การออกแบบและการทดลอง

3.1 การออกแบบทางน้ำเปิด

ทางน้ำเปิดที่ออกแบบทำด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ พลาสติก และไม้โดยใช้หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับทางน้ำเปิดที่ทำด้วยพลาสติกได้ออกแบบตามแบบของกรมชลประทาน คือ กว้าง 38 cm. ยาว 6 m. สูง 33 cm. ลาดท้องคลอง 1 : 500 ติดตั้งกับโครงเหล็กและปั้มน้ำขนาด 2 hp, 50 Hz อุปกรณ์ลดความปั่นป่วนและ V-notch weir เพื่อลดอัตราการไหลของน้ำในรางดังแสดงในรูป 16 - 22

ส่วนทางน้ำเปิดที่ทำด้วยไม้ ซึ่งจะนำมาวางบนรางพลาสติก หน้าตัดของคลองคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n ตามวัสดุที่ใช้ลาดคลอง จากการทดลองที่นำมา (Chow 1959) ดังตารางที่ 2 (ภาคผนวก) ได้ค่า n ของไม้ เท่ากับ 0.012

$$3.1.2 \text{ คำนวณค่า Section factor, } AR^{2/3} = \frac{nQ}{\sqrt{S}}$$

Q คือ อัตราการไหล ซึ่งปั้มน้ำสามารถใช้ Q สูงสุดได้ 0 - 3.667 l/sec. ดังนั้นในการออกแบบ ใช้ $Q = 3 \text{ l/sec. } (3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec})$

S คือ slope ของท้องคลอง สมมติ $S = 1 : 500$

$$\begin{aligned} AR^{2/3} &= (0.012) \times (3 \times 10^{-3}) \\ &= \frac{3.6 \times 10^{-5}}{\sqrt{1/500}} \\ &= 8.05 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

3.1.3 คำนวณหาคความลึก (y) ซึ่ง ความกว้างของคลอง (b) = 30 ซม.

$$\therefore b^{2/3} = 0.040332$$

$$AR^{2/3} = 0.01996$$

จาก Design chart สำหรับคลองรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าลาดคลอง $Z = 0 : y/b = 0.1$

$$\therefore y = 0.1 \times 0.30 = 0.03 \text{ m.}$$

เนื่องจากค่า y ที่ออกแบบได้ มีค่าน้อยไปสำหรับการวัดในการทดลอง จึงต้องออกแบบใหม่ โดยสมมติ $b = 0.20 \text{ m}$

แล้วคำนวณตามลำดับ จะได้ $y = 0.05$ m. ซึ่งเหมาะสมกับการวัดหน้าตัดของทางน้ำเปิดทำด้วยไม้ที่มีรูปร่างหน้าตัดแสดงในรูปที่ 22

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ตาชั่ง
- 2) นาฬิกาจับเวลา
- 3) รางไม้
- 4) ไม้บรรทัด

3.3 วิธีทดลอง

1. ปล่อยให้ น้ำไหลผ่าน flume ซึ่งเป็นรางพลาสติกขนาดกว้าง 38 cm. สูง 33 cm ยาว 6 m. ความลาดเอียง 1:500 จนกระทั่งการไหลเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform)
2. ให้ทำการวัด ความลึกของน้ำ (H_v) ที่ฝ่ายสามเหลี่ยม 90° (V-notch weir) เมื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลที่ V-notch (Q_v) โดยใช้สมการ $Q = 0.0138H_v^{5/2}$
3. วัดความลึกของน้ำจากท้องคลองถึงผิวน้ำ (y) อย่างน้อย 5 จุด จากท้าย flume แล้วนำค่าความลึกทั้งหมดไปหาค่าความลึกเฉลี่ย ($y_{เฉลี่ย}$) เมื่อนำค่าที่ได้ไปหาพื้นที่หน้าตัด (A)
4. ทำการหาอัตราการไหล (Q) โดยการตวงน้ำจากท้าย flume จับเวลาแล้วชั่ง เพื่อเทียบหาอัตราการไหลกับอัตราการไหลที่คำนวณได้จาก V - notch weir
5. ปรับ Q ให้มีค่าต่าง ๆ กัน แล้วทำ 1-4 ซ้ำ
6. นำรางไม้ ซึ่งมีขนาด กว้าง 20 cm. ลึก 20 cm. ยาว 5 m. ความลาดเอียง 1 : 500 มาทดลองโดยทำเหมือน 1-5

วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

$$1) \text{ หาค่าความเร็วการไหลจาก } V = \frac{Q}{A}$$

โดยที่ V = ความเร็วการไหล (Flow Velocity)

Q = อัตราการไหล (discharge)

A = พื้นที่หน้าตัด (Cross - Sectional area)

2) ใช้สูตร Manning คำนวณหา n จงหา

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

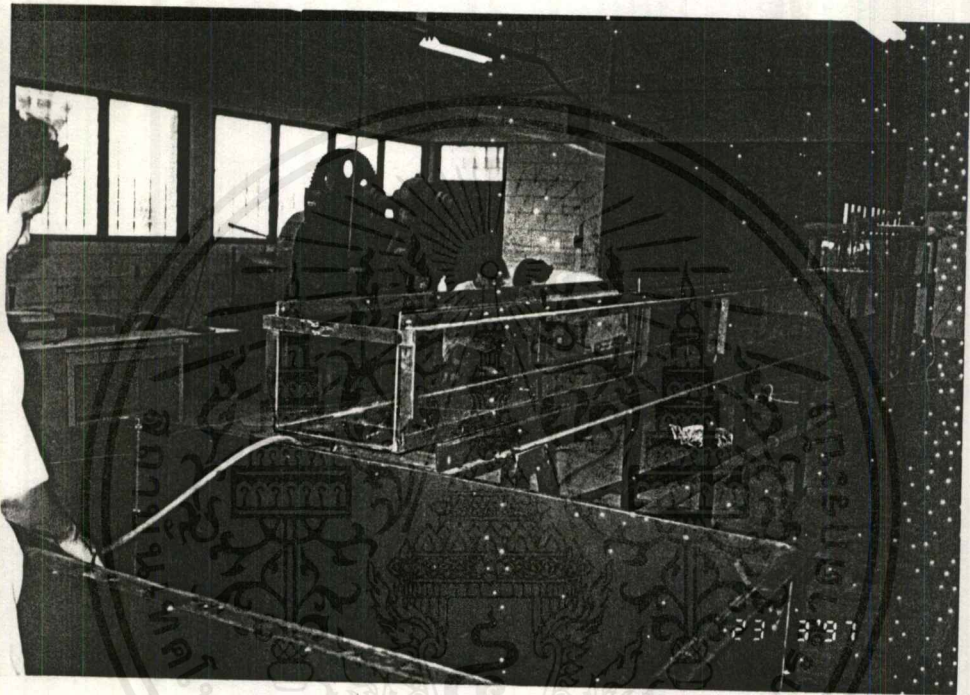
โดยที่ n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (roughness coefficient)

R = รัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius) = A/P

P = เส้นรอบรูปเปียก (wetted perimeter)

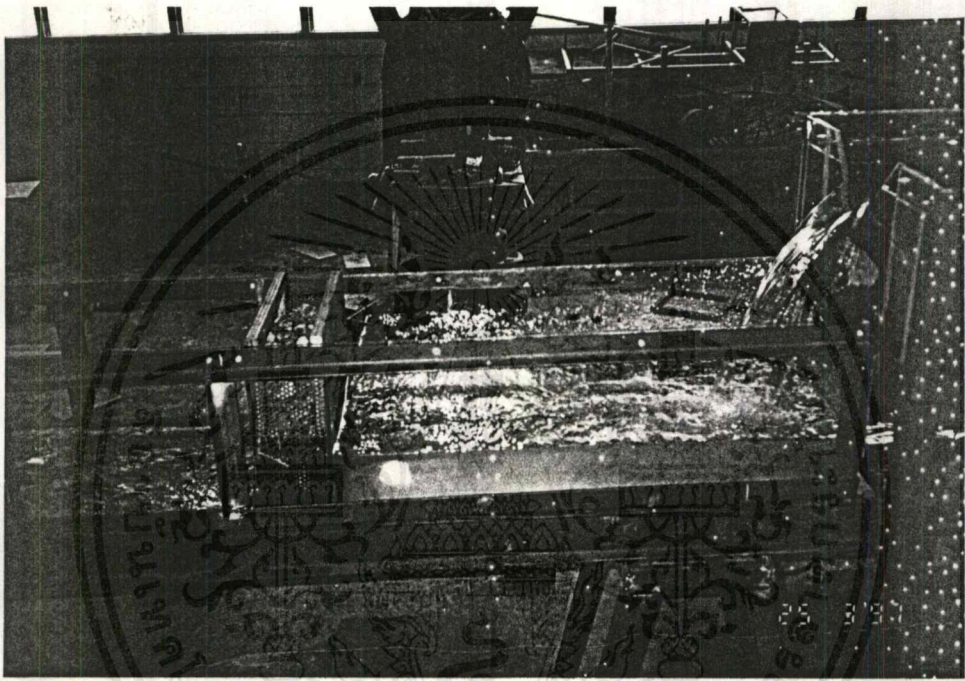
S = ความลาดเอียงของ flume (average bed slope of flume) = 1 : 500





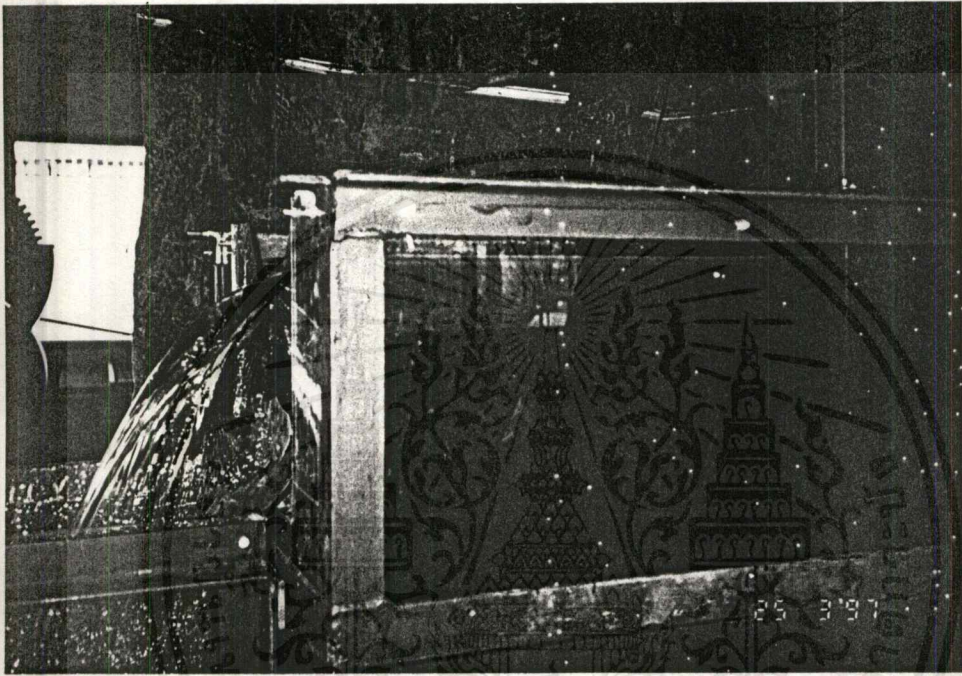
รูปที่ 16 flume ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

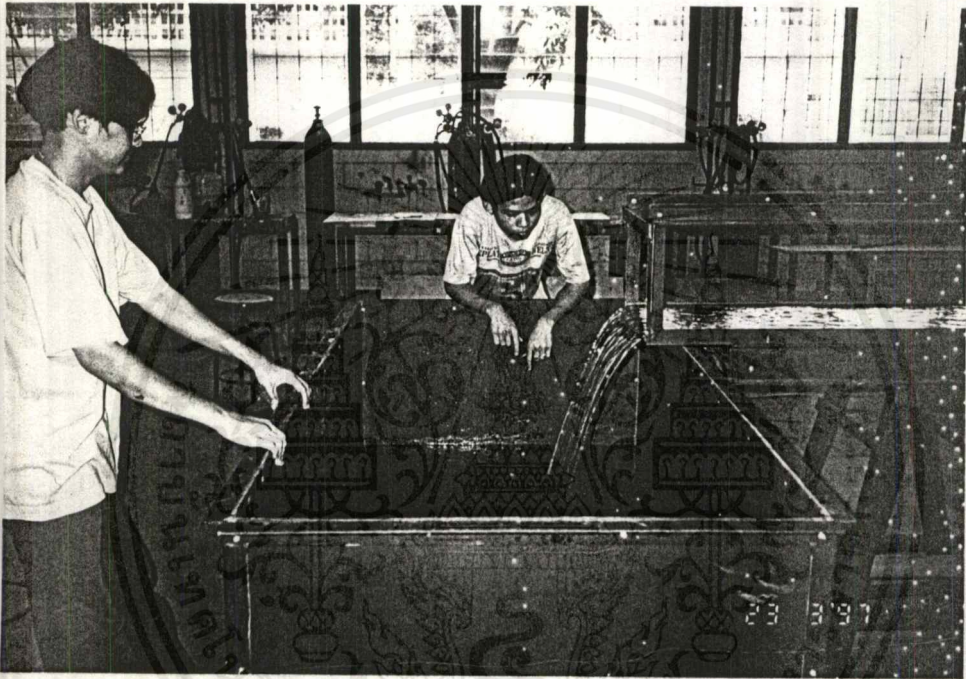


รูปที่ 17 ปล่อน้ำให้ไหลผ่าน flume

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

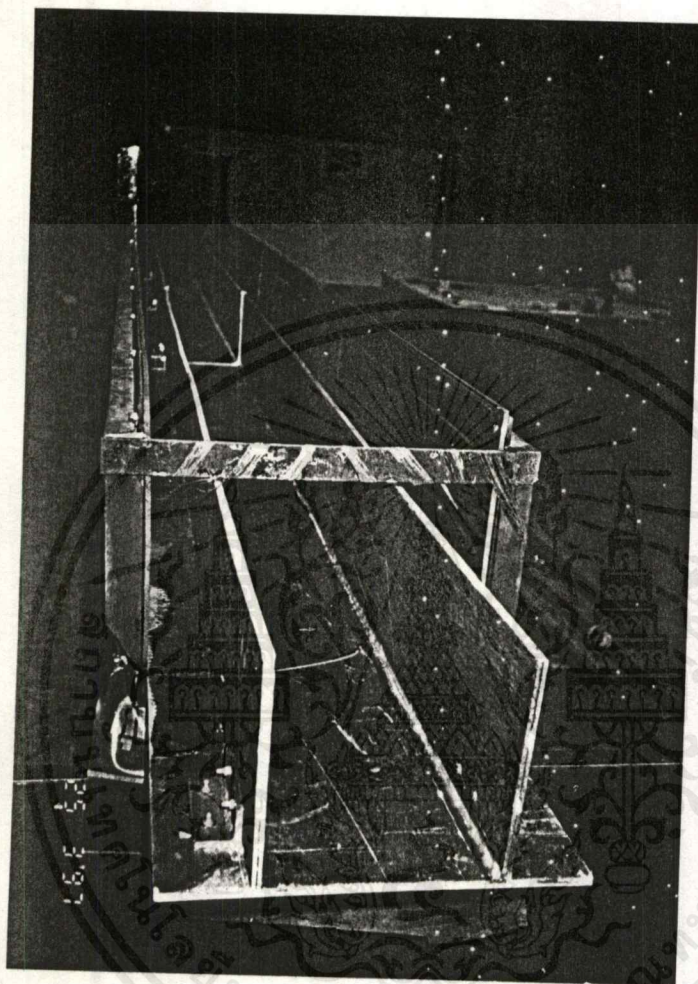


รูปที่ 18 วัดความลึกของน้ำ (Hv) ที่ฝายสามเหลี่ยม 90 องศา



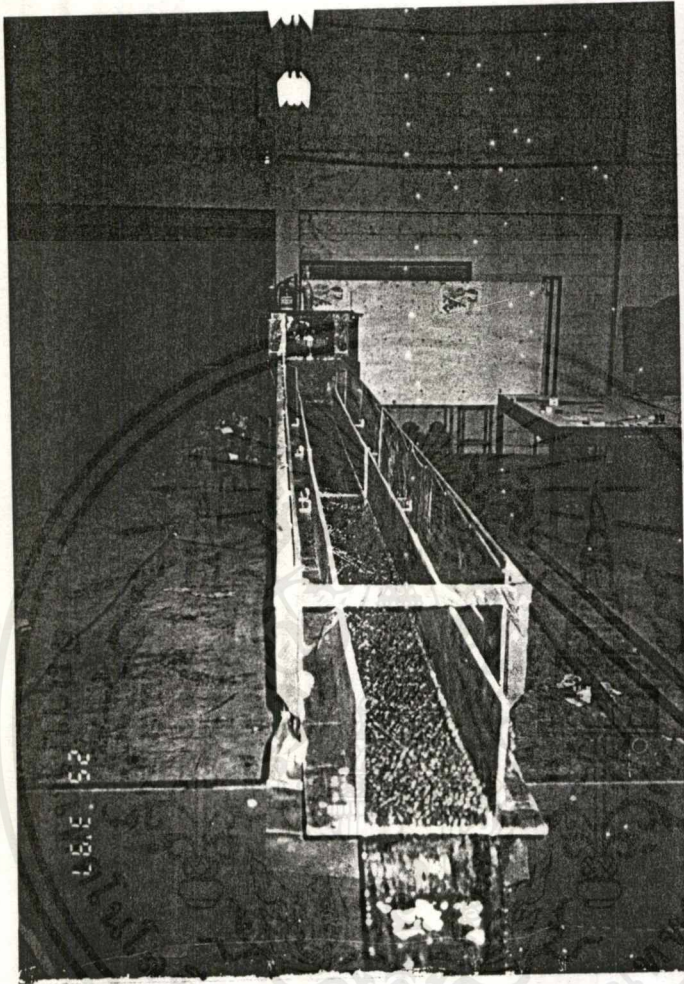
รูปที่ 19 ตวงน้ำจากท้าย flume

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



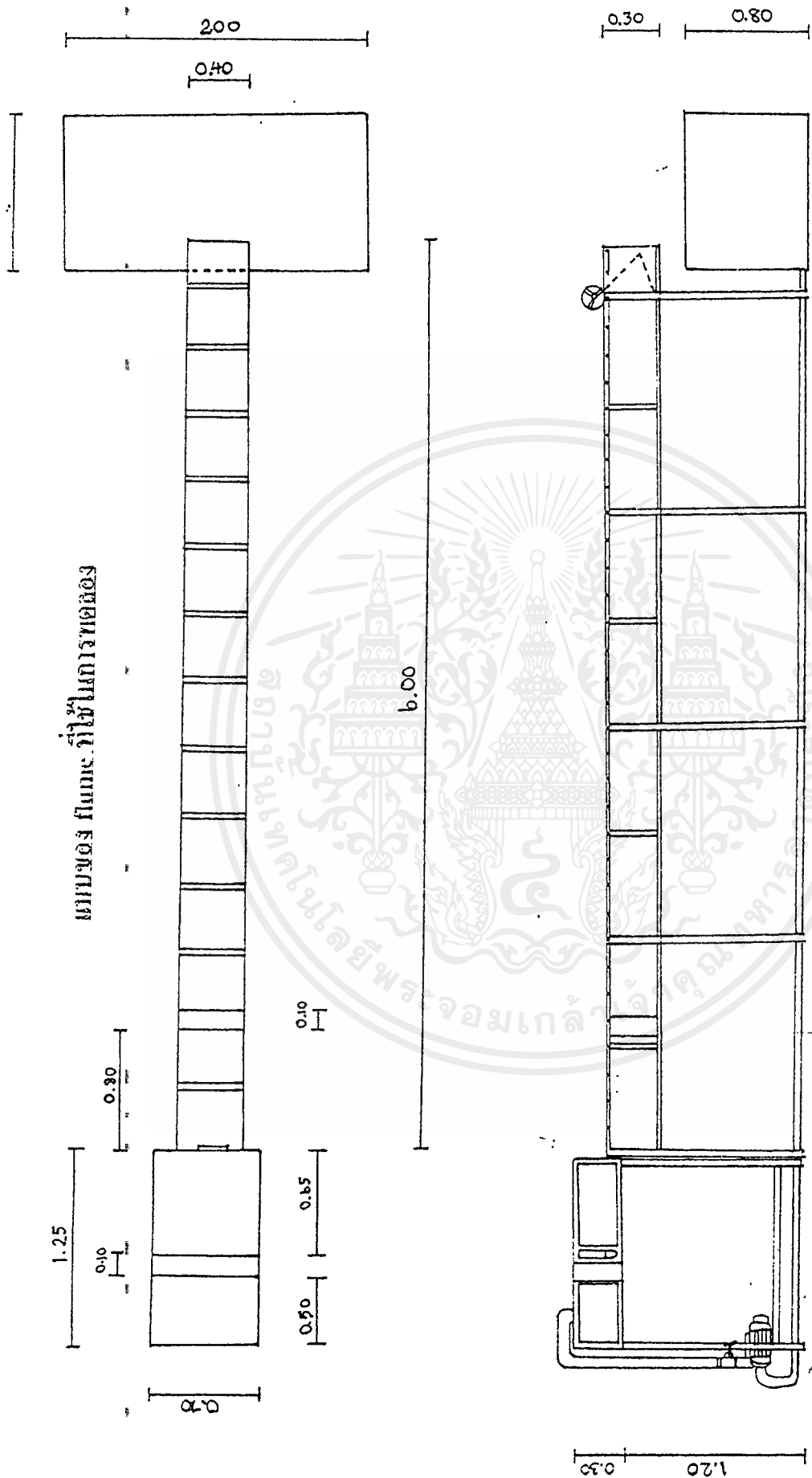
รูปที่ 20 รางไม้อัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 รางไม้อัด (ต่อ)

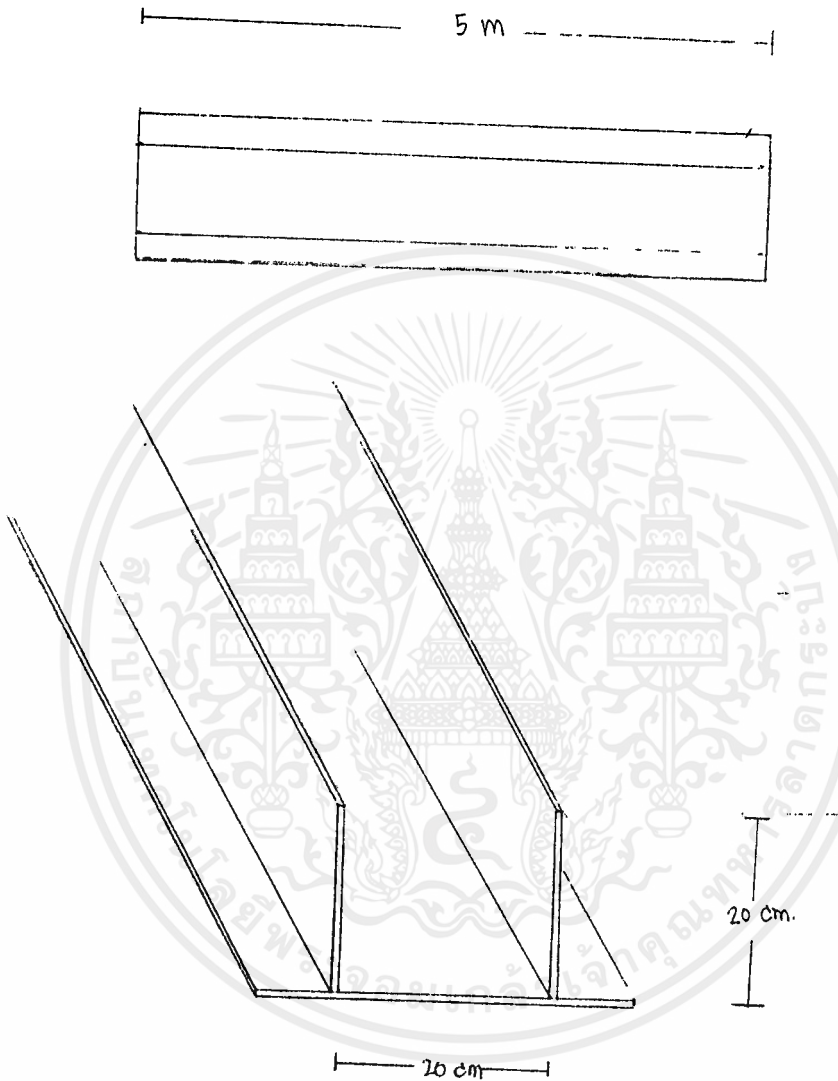
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อัตราส่วน 1 : 40

รูปที่ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 รูปหน้าตัดของไม้ขัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของทางน้ำเปิดที่สร้างจากไม้อัด

S = 1 : 500

H_v [cm]	Y_1 [cm]	Y_2 [cm]	Y_3 [cm]	Y_4 [cm]	Y_6 [cm]	Q [l/s]	Q_v [l/s]	Y (เฉลี่ย) [cm]	Area [cm ²]	R [cm]	V [cm/s]	n
10.0	6.0	5.7	5.2	3.9	3.8	4.5	4.36	4.92	98.4	29.84	45.73	0.0094
8.9	5.1	4.9	4.5	3.2	3.1	3.8	3.26	4.16	83.2	28.32	45.67	0.0091
8.1	4.4	4.2	3.8	3.0	2.7	2.8	2.58	3.62	72.4	27.24	38.67	0.0105
7.0	3.7	3.6	3.2	2.6	2.3	2.12	1.79	3.08	61.6	26.16	34.42	0.0115
5.9	2.9	2.9	2.6	2.0	1.7	1.28	1.17	2.42	48.4	24.84	26.45	0.0144

n เฉลี่ย = 0.01098

ตารางที่ 2 ผลการทดลองของทางน้ำเปิดที่สร้างจากแผ่นพลาสติก

S = 1 : 500

H_v [cm]	Y_1 [cm]	Y_2 [cm]	Y_3 [cm]	Y_4 [cm]	Y_5 [cm]	Q [l/s]	Q_v [l/s]	Yเฉลี่ย [cm]	Area [cm ²]	R [cm]	V [cm/s]	n
10.0	3.8	3.6	3.3	2.9	2.8	4.4	4.36	3.28	124.64	44.56	35.3	0.0159
9.5	3.5	3.2	2.9	2.5	2.3	3.8	3.84	2.88	109.44	43.76	34.72	0.0160
8.8	3.3	3.2	2.8	2.3	2.2	3.4	3.17	2.76	104.88	43.52	32.42	0.0170
8.4	2.9	2.8	2.5	2.1	1.9	3.0	2.82	2.44	92.72	42.88	32.35	0.0169
7.9	2.8	2.5	2.4	2.1	1.8	2.6	2.42	2.32	88.16	42.64	29.49	0.0185

$n_{เฉลี่ย} = 0.01686$

บทที่ 4 บทวิจารณ์และสรุป

จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ Manning 's n ของทางน้ำเปิดที่ทำด้วยพลาสติกและไม้ พบว่าค่า Manning 's n ของพลาสติกเท่ากับ 0.01686 และของไม้เท่ากับ 0.01098 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้กับการทดลองที่ผ่านมา (chow 1959) ค่า n ของไม้อยู่ระหว่าง 0.010 ถึง 0.014 ส่วนพลาสติกไม่พบว่าการทดลองหาค่า n ของพลาสติกมาก่อน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่า n ของแก้ว ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวใกล้เคียงกับพลาสติก แต่มีความขรุขระน้อยกว่า โดยมีค่า n อยู่ระหว่าง 0.009 ถึง 0.013 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้

เนื่องจากการทำให้น้ำไหลในสภาวะ uniform flow ค่อนข้างยาก แม้จะทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจากการทดลองก็ไม่สามารถทำให้น้ำอยู่ในสภาพที่เป็นการไหลแบบ uniform flow ได้สมบูรณ์ เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการเชื่อมรอยต่อต่าง ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึม มีความขรุขระและความหนาแน่นมากเกินไป



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1 ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการคำนวณค่า n

Channel conditions		Values	
Material involved	Earth	n_0	0.020
	Rock cut		0.025
	Fine gravel		0.024
	Coarse gravel		0.028
Degree of irregularity	Smooth	n_1	0.000
	Minor		0.005
	Moderate		0.010
	Severe		0.020
Variations of channel cross section	Gradual	n_2	0.000
	Alternating occasionally		0.005
	Alternating frequently		0.010–0.015
Relative effect of obstructions	Negligible	n_3	0.000
	Minor		0.010–0.015
	Appreciable		0.020–0.030
	Severe		0.040–0.060
Vegetation	Low	n_4	0.005–0.010
	Medium		0.010–0.025
	High		0.025–0.050
	Very high		0.050–0.100
Degree of meandering	Minor	m_5	1.000
	Appreciable		1.150
	Severe		1.300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n

(ค่าแสดงด้วยตัวเลขหนาเป็นค่าแนะนำสำหรับการออกแบบ)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
A. CLOSED CONDUITS FLOWING PARTLY FULL			
A-1. Metal			
a. Brass, smooth	0.009	0.010	0.013
b. Steel			
1. Lockbar and welded	0.010	0.012	0.014
2. Riveted and spiral	0.013	0.016	0.017
c. Cast iron			
1. Coated	0.010	0.013	0.014
2. Uncoated	0.011	0.014	0.016
d. Wrought iron			
1. Black	0.012	0.014	0.015
2. Galvanized	0.013	0.016	0.017
e. Corrugated metal			
1. Subdrain	0.017	0.019	0.021
2. Storm drain	0.021	0.024	0.030
A-2. Nonmetal			
a. Lucite	0.008	0.009	0.010
b. Glass	0.009	0.010	0.013
c. Cement			
1. Neat, surface	0.010	0.011	0.013
2. Mortar	0.011	0.013	0.015
d. Concrete			
1. Culvert, straight and free of debris	0.010	0.011	0.013
2. Culvert with bends, connections, and some debris	0.011	0.013	0.014
3. Finished	0.011	0.012	0.014
4. Sewer with manholes, inlet, etc., straight	0.013	0.015	0.017
5. Unfinished, steel form	0.012	0.013	0.014
6. Unfinished, smooth wood form	0.012	0.014	0.016
7. Unfinished, rough wood form	0.015	0.017	0.020
e. Wood			
1. Stave	0.010	0.012	0.014
2. Laminated, treated	0.015	0.017	0.020
f. Clay			
1. Common drainage tile	0.011	0.013	0.017
2. Vitrified sewer	0.011	0.014	0.017
3. Vitrified sewer with manholes, inlet, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Vitrified subdrain with open joint	0.014	0.016	0.018
g. Brickwork			
1. Glazed	0.011	0.013	0.015
2. Lined with cement mortar	0.012	0.015	0.017
h. Sanitary sewers coated with sewage slimes, with bends and connections	0.012	0.013	0.016
i. Paved invert, sewer, smooth bottom	0.016	0.019	0.020
j. Rubble masonry, cemented	0.018	0.025	0.030

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n (ต่อ)

(ค่าแสดงด้วยตัวเลขหนาเป็นค่าแนะนำสำหรับการออกแบบ)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
11. LINED OR BUILT-UP CHANNELS			
B-1. Metal			
a. Smooth steel surface			
1. Unpainted	0.011	0.012	0.014
2. Painted	0.012	0.013	0.017
b. Corrugated	0.021	0.025	0.030
B-2. Nonmetal			
a. Cement			
1. Neat, surface	0.010	0.011	0.013
2. Mortar	0.011	0.013	0.015
b. Wood			
1. Planed, untreated	0.010	0.012	0.014
2. Planed, creosoted	0.011	0.012	0.015
3. Unplaned	0.011	0.013	0.015
4. Plank with battens	0.012	0.015	0.018
5. Lined with roofing paper	0.010	0.014	0.017
c. Concrete			
1. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
2. Float finish	0.013	0.015	0.016
3. Finished, with gravel on bottom	0.015	0.017	0.020
4. Unfinished	0.014	0.017	0.020
5. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
6. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
7. On good excavated rock	0.017	0.020	
8. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
d. Concrete bottom float finished with sides of			
1. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
2. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
3. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
4. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
5. Dry rubble or riprap	0.020	0.030	0.035
e. Gravel bottom with sides of			
1. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
2. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
3. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
f. Brick			
1. Glazed	0.011	0.013	0.015
2. In cement mortar	0.012	0.016	0.018
g. Masonry			
1. Cemented rubble	0.017	0.025	0.030
2. Dry rubble	0.023	0.032	0.035
h. Dressed ashlar	0.013	0.015	0.017
i. Asphalt			
1. Smooth	0.013	0.013	
2. Rough	0.016	0.016	
j. Vegetal lining	0.030	0.500

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n (ต่อ)

(ค่าแสดงด้วยตัวเลขหนาเป็นค่าแนะนำสำหรับการออกแบบ)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
C. EXCAVATED OR DREDGED			
a. Earth, straight and uniform			
1. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
2. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
3. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
4. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
b. Earth, winding and sluggish			
1. No vegetation	0.023	0.025	0.030
2. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
3. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
4. Earth bottom and rubble sides	0.028	0.030	0.035
5. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
6. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
c. Dragline-excavated or dredged			
1. No vegetation	0.025	0.028	0.033
2. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060
d. Rock cuts			
1. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
2. Jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
e. Channels not maintained, weeds and brush uncut			
1. Dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
2. Clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
3. Same, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
4. Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140
D. NATURAL STREAMS			
D-1. Minor streams (top width at flood stage < 100 ft)			
a. Streams on plain			
1. Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
2. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
3. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
4. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
5. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
6. Same as 4, but more stones	0.045	0.050	0.060
7. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
8. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n (ต่อ)

(ค่าแสดงด้วยตัวเลขหนาเป็นค่าแนะนำสำหรับการออกแบบ)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
b. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
1. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
2. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
1)-2. Flood plains			
a. Pasture, no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. Same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. Heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. Same as above, but with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160
1)-3. Major streams (top width at flood stage >100 ft). The n value is less than that for minor streams of similar description, because banks offer less effective resistance.			
a. Regular section with no boulders or brush	0.025	0.060
b. Irregular and rough section	0.035	0.100

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จขึ้นมาได้ด้วยความอนุเคราะห์ของหลาย ๆ ท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และ ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ทางผู้จัดทำขอขอบคุณ

อาจารย์ ปรีชานันท์ ศรีแก้ว และ อาจารย์ ภัทรภรณ์ เมฆพฤษภาวงศ์ที่ได้ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่าง ๆ

พี่ ตึก พี่ แผลด ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่าง ๆ



เอกสารอ้างอิง

1. Amaraform Sricam, "Investigation of critical depths in compound channels", Asian institute of Technology Bangkok Thailand, Thesis No. WA-92-30, P.28, 108
2. รศ.ดร.วิบูลย์ บุญยชโรกุล, "หลักการชลประทาน", คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2526, หน้า 177 - 192.
3. ชัยพันธุ์ รักวิจัย, "ชลศาสตร์ของทางน้ำเปิด", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ฉบับที่ 1, 2526, หน้า 5-1 - 5-32.

