

ผลของความขรุขระของผิวรางเทต่อพฤติกรรมการไหลของทางระบายน้ำฝน



นายสยามชัย ไชวติเวชย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1672-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON FLOW BEHAVIORS OF A SPILLWAY CHUTE



Mr.Siamchai Sawtiwat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1672-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของความขรุขระของผิวงาเทต่อพฤติกรรมการไหลของทางระบายน้ำล้น
โดย นายสยามชัย ไชวดีเวชย์
สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สยามชัย ไชวติเวชย์ : ผลของความขรุขระของผิวรางเทต่อพฤติกรรมการไหลของทางระบายน้ำล้น
(EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON FLOW BEHAVIORS OF A SPILLWAY CHUTE)
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เสรี จันทโรยธา, 142 หน้า, ISBN 974-03-1672-7

สร้างแบบจำลองทางกายภาพทางชลศาสตร์ของทางระบายน้ำล้นของโครงการน้ำแห้งและส่วนประกอบ ชั้นที่ ห้องทดลองแบบจำลองทางชลศาสตร์และชายฝั่ง ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลบนทางระบายน้ำล้น อันได้แก่ รูปตัดการไหลและพลังงานการไหล ที่อัตราการไหลต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบพลังงานการไหลและรูปตัดการไหล จากที่วัดได้ในแบบจำลองกับ การคำนวณโดยใช้สูตรของแมนนิ่งและทฤษฎี boundary layer รวมไปถึงผลของความขรุขระต่อพฤติกรรมการไหล โดยใช้กระดาษทรายเป็นผิวรางเทเพื่อจำลองสภาพความขรุขระ

จากการศึกษาพบว่า พลังงานสูญเสียบนรางเทของทางระบายน้ำล้นที่วัดได้จริงในแบบจำลองมีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองนั้นแตกต่างกันเล็กน้อยสำคัญเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง ค่าพลังงานสูญเสียที่วัดได้จริงในแบบจำลองและค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าเมื่อค่าความขรุขระสูงขึ้นจะทำให้พลังงานสูญเสียบนรางเทมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....

4170566621 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD : PHYSICAL HYDRAULIC MODEL / SPILLWAY CHUTE ROUGHNESS / FLOW ON SPILLWAY CHUTE

SIAMCHAI SAWTIWAT : EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON FLOW BEHAVIORS OF A SPILLWAY CHUTE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SEREE CHANYOTHA, 142 pp.

ISBN 974-03-1672-7

Physical hydraulic model of Nam Haeng spillway and its components was built in hydraulic and coastal model laboratory, department of water resources engineering, faculty of engineering, Chulalongkorn University. In order to study flow behaviors of the spillway chute. Flow profile and flow energy of various discharges were investigated. Comparison of flow energy and flow profiles obtained from model measurement and other two methods of estimation namely, Manning's formula and boundary layer theory were made. In addition, effects of spillway surface roughness on flow energy and flow profile were investigated. Four commercially available sand papers were used as the chute bottom materials.

The experiment results indicated that the spillway chute energy losses obtained from the model measurement were higher than the computed values from the Manning's formula and the boundary layer theory. However, flow energy computed from the two estimation methods mentioned above was insignificantly different. Average percent difference of energy losses between model measurement and the other two methods was about 80%. It also found that higher values of spillway chute surface roughness yielded higher flow energy losses and flow profile than the lower values.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Water Resources Engineering..... Student's signature.....
Field of study..... Water Resources Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year.....2001.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รัถวิชัย ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล กรรมการ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธาท กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาคำแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ ทั้งในด้านหลักวิชาการและแนวทางการศึกษาและปฏิบัติ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านและอาจารย์ทุกท่านที่พร่ำเพียรให้ความรู้และแนะนำข้อคิดต่างๆในการศึกษาของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำการวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งอำนวยความสะดวกทั้งในเรื่องสถานที่ และอุปกรณ์ในการทดลอง ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเลทุกท่าน ที่มอบความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี รวมทั้งขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้อง ในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำที่คอยช่วยเหลือกันตลอดมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้บังเกิดเกล้าที่มอบทุกสิ่งทุกอย่างแก่ข้าพเจ้าตลอดมา วิทยานิพนธ์นี้คงมีประโยชน์แก่ผู้สนใจ ถ้าวิทยานิพนธ์นี้มีความดีอยู่ข้าพเจ้าขอมอบให้ บิดา มารดา บุรพจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

สยามชัย ไชวติเวชย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบข่ายการศึกษา.....	3
1.4 การดำเนินการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา.....	6
2.1 กฎความคล้ายคลึงกัน และแบบจำลองทางกายภาพ.....	6
2.2 การคำนวณการไหลในทางน้ำเปิด.....	8
2.3 การประมาณค่าการสูญเสียพลังงานบนทางระบายน้ำล้น.....	15
2.4 การผสมของอากาศบนรางเทของทางระบายน้ำล้น.....	17
2.5 การศึกษาที่ผ่านมา.....	20
บทที่ 3 แบบจำลองและเงื่อนไขในการทดลอง.....	22
3.1 รายละเอียดของโครงการน้ำแห่ง.....	22
3.2 แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้น.....	24
3.3 การปรับปรุงแบบจำลอง.....	26
3.4 ขั้นตอนการทำการทดลอง.....	28
3.5 การวัดข้อมูลทางชลศาสตร์.....	28
3.6 เงื่อนไขการทดลองในแบบจำลอง.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	32
4.1 ผลของการดำเนินการทดลอง.....	32
4.2 ค่าความขรุขระและสัมประสิทธิ์ของ Manning.....	35
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
5.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบหน้าตัดการไหล ของผิวยางเทที่มีความขรุขระต่างกัน.....	37
5.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของที่วัดจริงในแบบจำลอง และการคำนวณจากสูตรของ Manning.....	46
5.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประมาณค่าพลังงานสูญเสีย.....	52
5.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียบนรางเทของผิวขรุขระต่าง ๆ	54
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	57
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อไป.....	58
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดลองจากแบบจำลอง.....	62
ภาคผนวก ข การสอบเทียบค่าความขรุขระ.....	86
ภาคผนวก ค ภาพการทดลองในแบบจำลอง.....	91
ภาคผนวก ง ผลการคำนวณจากสูตรของแมนนิ่ง.....	98
ภาคผนวก จ ผลการคำนวณจากเกณฑ์การออกแบบ.....	124
ภาคผนวก ฉ รูปตัดการไหลบนรางเท.....	130
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ของพื้นผิวต่าง ๆ.....	11
2-2 แสดงค่า k_s ของลักษณะพื้นผิวต่าง ๆ.....	12
3-1 แสดงอัตราส่วนย่อยของตัวแปรทางชลศาสตร์ของแบบจำลอง.....	24
3-2 แสดงค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3-3 แสดงสัญลักษณ์ของการทดลองทั้งหมด.....	31
4-1 สรุปผลการทดลองจากแบบจำลอง.....	33
4-2 แสดงค่าความขรุขระแบบต่าง ๆ ของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลอง.....	35
4-3 แสดงการเปรียบเทียบ Manning 'n ของแบบจำลองและต้นแบบ.....	36
5-1 แสดงเปอร์เซ็นต์แตกต่างของ y / y_c ของผิวเรียบกับผิวขรุขระต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที.....	42
5-2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความลึกการไหลที่ Station 10m และ Station 110 m.....	50
5-3 เปรียบเทียบพลังงานสูญเสียบนรางเทของทางระบายน้ำล้น.....	48
5-4 พลังงานสูญเสียที่ $0.70 Q_d$ ของผิวรางเทต่างๆ.....	48

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
2-1 การพิสูจน์สมการการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย.....	9
2-2 พิจารณาการคำนวณหาระดับน้ำในทางน้ำเปิดโดยวิธีการขั้นตอนมาตรฐาน.....	14
2-3 แสดงรูปแบบการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำล้น.....	18
3-1 โครงการอ่างเก็บน้ำน้ำแห่ง จ.น่าน.....	22
3-2 แผนที่แสดงหัวงานของโครงการน้ำแห่ง.....	23
3-3 แปลนและรูปตัดตามแนวศูนย์กลางของแบบจำลอง.....	25
5-1 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวเรียบพลาสติกใส่.....	38
5-2 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ 400.....	39
5-3 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ 280.....	40
5-4 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ 180.....	41
5-5 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ 80.....	41
5-6 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที.....	43
5-7 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที.....	44
5-8 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที.....	45
5-9 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที.....	45
5-10 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที.....	46
5-11 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง กับ การคำนวณ จากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $164.58 \text{ m}^3/\text{s}$	47
5-12 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง กับ การคำนวณ จากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $318.56 \text{ m}^3/\text{s}$	47
5-13 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง กับ การคำนวณ จากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $416.50 \text{ m}^3/\text{s}$	48
5-14 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง กับ การคำนวณ	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
จากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $500.28 \text{ m}^3 / \text{s}$	48
5-15 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง กับ การคำนวณ จากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $542.70 \text{ m}^3 / \text{s}$	49
5-16 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการคำนวณของอัตราการไหลต่าง ๆ.....	49
5-17 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงของอัตราการไหลต่าง ๆ.....	50
5-18 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง กับ การคำนวณ จากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $542.70 \text{ m}^3 / \text{s}$ เมื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ของ แมนนิ่ง.....	51
5-19 แสดงการเปรียบเทียบค่าพลังงานสูญเสียของผิวรางเทต่าง ๆ.....	55



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทางระบายน้ำล้น (spillway) เป็นอาคารทางชลศาสตร์ มีหน้าที่ระบายน้ำส่วนเกินออกจากอ่างเก็บน้ำ เพื่อป้องกันการไหลข้ามสันเขื่อน (overtopping) ที่เป็นสาเหตุสำคัญสาเหตุหนึ่งต่อการวิบัติของเขื่อน รางของทางระบายน้ำล้น (spillway chute) เป็นส่วนเชื่อมต่อยกขึ้นระหว่างอาคารระบายน้ำล้นและอาคารสลายพลังงาน (energy dissipator) พฤติกรรมการไหลบนรางของที่มีความลาดชันสูงนั้นมีความซับซ้อน ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เพียงลำพัง ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลดังกล่าวจึงต้องอาศัยแบบจำลองทางกายภาพ (physical models) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์

การไหลในทางน้ำเปิดและรางเขื่อน พลังงานที่สูญเสีย (energy loss) จากการไหลผ่านผิวรางของทางระบายน้ำล้นตลอดไปตามรางจนถึงก่อนตำแหน่งเข้าอาคารสลายพลังงาน เกิดจากความต้านทานการไหล (flow resistance) เนื่องจากความฝืดของของผิวสัมผัส (surface resistance) และความต้านทานจากการแยกตัวของการไหล (flow separation) ดังนั้นการพิจารณาลักษณะการไหลตามข้างต้นเพื่อให้ทราบถึงรูปตัดการไหล (flow profile) ตลอดจนพลังงานการไหล (energy of flow) โดยเฉพาะพลังงานการไหลก่อนเข้าสู่อาคารสลายพลังงาน ที่จะนำไปสู่การออกแบบอาคารสลายพลังงานที่ถูกต้องและเหมาะสม จึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

ที่ผ่านมาการพิจารณารูปตัดการไหลและพลังงานการไหลนั้น จะนิยมใช้การประยุกต์สมการการไหลของแมนนิง (Manning formula) หรือ สมการการไหลของเชซี (Chezy formula) บนสมมุติฐานการไหลที่พลังงานสูญเสียเนื่องจากความต้านทานการไหลจากความฝืดเพียงอย่างเดียว หรือในบางครั้งก็ตั้งสมมุติฐานว่ามีการสูญเสียพลังงานน้อยมาก และไม่คิดค่าพลังงานสูญเสียที่ทำให้พลังงานการไหลลดลงจากการไหลบนรางของทางระบายน้ำล้น

โดยทั่วไปทางระบายน้ำล้นและรางของทางระบายน้ำล้น มักจะก่อสร้างด้วยคอนกรีตที่มีลักษณะผิวที่มีความขรุขระทางด้านชลศาสตร์ (hydraulic surface roughness) อยู่ค่าๆหนึ่งซึ่งมักนิยามอธิบายอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (roughness

coefficient of Manning, n) ในสมการการไหลของแมนนิง ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการคำนวณสภาพการไหลในทางน้ำเปิด หรือใช้สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction factor, f) ในสมการของ Darcy-Weisbach ซึ่งใช้คำนวณการไหลในท่อปิด (closed conduits) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์ความขรุขระดังกล่าวขึ้นกับองค์ประกอบมากมาย ทั้งองค์ประกอบของลักษณะทางกายภาพของทางน้ำเปิด ชนิดของวัสดุท้องน้ำ ความคดเคี้ยว และตลอดจนพฤติกรรมของการไหลเอง อันได้แก่ ความเร็ว ความลึกการไหล เป็นต้น (ชัยพันธุ์, 2526)

นอกจากดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วการไหลบริเวณรางเทของทางระบายน้ำล้นที่มีความลาดชัน ยังมีผลของการผสมของอากาศ (air entrainment) ต่อรูปตัดการไหลที่เกิดขึ้นจากการไหลของทางน้ำเปิดที่มีความลาดชัน ในการคำนวณหารูปตัดและพลังงานการไหลที่ใช้กันอยู่จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง (Chanson, 1992)

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของผิวทางน้ำเปิดหรือท่อปิดไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก ขบวนการทางธรรมชาติตามระยะเวลาของการใช้งาน ซึ่งเกิดการกัดกร่อนของผิววัสดุจากการเสียดสี ระหว่างผิววัสดุกับน้ำ และในบางครั้งเกิดจากการตกตะกอนของดินและขยะที่มากับน้ำ หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีของวัสดุกับน้ำ หรือความจงใจจากการทำขึ้นของมนุษย์เอง ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปตัดการไหลและพลังงานการไหล จึงน่าจะมีการศึกษาถึงผลดังกล่าวเพื่อที่จะได้เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบก่อสร้างทางระบายน้ำล้น ตลอดจนการพิจารณาการดำเนินการของโครงการให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด

โครงการน้ำแห่งเป็นโครงการชลประทานขนาดกลางโครงการหนึ่งที่มีอ่างเก็บน้ำ และอาคารระบายน้ำล้นแบบสันโอ๊ก (ogee crest wier) โดยมีแนวสันฝายโค้งมีรางเทเชื่อมต่อกับอาคารระบายน้ำล้นดังกล่าว ซึ่งเป็นรูปแบบของอาคารระบายน้ำล้นที่พบเห็นกันมากรูปแบบหนึ่งที่พบเห็นกันมากในประเทศไทย ดังนั้นการทราบพฤติกรรมการไหล (flow behavior) ซึ่งรวมถึงพลังงานการไหลและรูปตัดการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำล้น ของโครงการที่มีลักษณะดังที่กล่าวข้างต้น ย่อมเป็นประโยชน์ในการพิจารณาออกแบบก่อสร้าง ตลอดจนการดำเนินงานของโครงการและโครงการดังกล่าวให้ได้ประโยชน์สูงสุด

ในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาพฤติกรรมการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำล้น โดยใช้โครงการน้ำแห่งเป็นกรณีศึกษา โดยการจำลองอาคารระบายน้ำล้นของโครงการทางกายภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ต้องการเปรียบเทียบการหาพลังงานสูญเสียของการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำล้นของโครงการน้ำแหวง ระหว่างการพิจารณาตามหลักของสมการแมนนิ่ง การพิจารณาตามหลักการของทฤษฎี boundary layer ใน Hydraulic Design Criteria(HDC) สำหรับทางระบายน้ำล้นโดย U.S. Army, Corps of Engineers และ จากการวัดจริงในแบบจำลอง
2. ต้องการเปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำล้น ระหว่างการใช้สมการของแมนนิ่งและที่วัดจริงในแบบจำลอง
3. ต้องการเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงความขรุขระที่ผิวรางเทระบายน้ำล้น ต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานการไหลและรูปตัดการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำล้น

1.3 ขอบข่ายการศึกษา

ในการศึกษาเพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้มีขอบข่ายการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เป็นการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ โดยจำลองอาคารระบายน้ำล้นของโครงการน้ำแหวง ที่มีทางระบายน้ำล้นสันโค้งแบบ ogee และมีรางเทของทางระบายน้ำล้นที่สามารถพบเห็นในโครงการชลประทานขนาดเล็กและขนาดกลางอยู่มากมาย ซึ่งมีอัตราส่วนย่อเท่ากับ 1:50 ในห้องปฏิบัติการแบบจำลองทางชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลในแบบจำลอง มุ่งเน้นที่รูปตัดการไหลและพลังงานการไหลในส่วนของรางเทของทางระบายน้ำล้น
3. ในการศึกษาผลของความขรุขระต่อพฤติกรรมการไหล จะจำลองความขรุขระของผิวรางเทโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280, เบอร์ 180 และ เบอร์ 80 จากความขรุขระน้อยไปมากตามลำดับ และผิวรางเทพลาสติกผิวเรียบ รวมทั้งสิ้น 5 ผิว
4. ในการศึกษาสภาพการไหลในแบบจำลอง จะเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงน้อย (gradually varied flow) และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady flow)

5. การศึกษาจะอยู่ภายใต้อัตราการไหล ที่จำลองมาจากอัตราการไหลออกแบบของโครงการน้ำแห่งเป็นหลัก เปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 5 อัตราการไหลสำหรับแต่ละผิวความขรุขระ โดยให้มีค่าหนึ่งทีใกล้เคียงกับอัตราการไหลออกแบบของโครงการน้ำแห่ง

1.4 การดำเนินการศึกษา

1. ศึกษารวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ การศึกษาประยุกต์ใช้แบบจำลองทางกายภาพที่มุ่งเน้นในการจำลองอาคารระบายน้ำล้นและจำลองค่าความขรุขระของผิวสัมผัส
2. ศึกษาและทบทวนทฤษฎีทางชลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ หลักการพิจารณาพลังงานสูญเสีย สมการที่อธิบายความต้านทานการไหลแบบต่างๆ และกฎความคล้ายคลึง
3. ทำการปรับปรุงแบบจำลองที่มีข้อบกพร่องและความเสียหายที่เกิดขึ้นจากกาลเวลา
4. ทำการทดสอบแบบจำลองว่าพร้อมที่จะทดลองโดยไม่มีกรรวัชมีม รวมทั้งทดสอบว่าผิวรางที่ประกอบขึ้นเพื่อจำลองความขรุขระนั้นมีความคงทนและจะไม่เกิดการเสียหายระหว่างการทดลอง ถ้ายังพบข้อบกพร่องก็ทำการปรับปรุงแก้ไข
5. ทำการออกแบบการทดลอง โดยแผนการทดลองที่ออกแบบไว้คือทำการทดลองเปลี่ยนแปลงผิวราง 5 ค่าความขรุขระ และแต่ละผิวทำการทดลอง 5 อัตราการไหลโดยที่อัตราการไหลสูงสุดให้มีค่าใกล้เคียงอัตราการไหลออกแบบของโครงการน้ำแห่ง
6. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความลึกการไหลบนรางเทพพร้อมด้วยรางเลื่อน และเครื่องมือวัดระดับน้ำของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
7. ทำการทดลองตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้
8. วิเคราะห์ผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ตั้งไว้
9. สรุปผลการทดลองจากการวิเคราะห์ผลการทดลองและเสนอแนะแนวทางการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลจากการศึกษาน่าจะเป็นข้อมูลที่ใช้สนับสนุนการกำหนดกฎเกณฑ์การออกแบบ และสามารถนำข้อมูลไปพิจารณาการดำเนินการของโครงการน้ำแห้งหรือโครงการอื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

2. เป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางกายภาพ และการจำลองสภาพความขรุขระ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 กฎความคล้ายคลึงกันและแบบจำลองทางกายภาพ

ในบางครั้งปัญหาทางด้านกลศาสตร์ที่ซับซ้อน ไม่สามารถหาคำตอบได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์หรือหลักเกณฑ์จากประสบการณ์ ดังนั้นแบบจำลองทางกายภาพ จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบ หรือวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล

กฎความคล้ายคลึงกันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษา การวิเคราะห์ และการทดสอบผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลอง (models) กับต้นแบบ (prototypes) ซึ่งทั้งสองจะมีความคล้ายคลึงกันสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันใน 3 ลักษณะดังนี้

- ความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต (geometric similitude)
- ความคล้ายคลึงกันทางจลนศาสตร์ (kinematics similitude)
- ความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์ (dynamic similitude)

กฎของฟรูด(Froude law) ใช้ในการจำลองสภาพที่แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) โดดเด่นและมีความสำคัญ ให้นำแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และแรงเฉื่อย (inertia force) มาพิจารณานั้นคือ อัตราส่วนของแรงเนื่องจากแรงเฉื่อย(F_i) ต่อแรงดึงดูดของโลก (F_g) หรือ ฟรูดนัมเบอร์(Fr) ในแบบจำลองจะต้องเท่ากับในต้นแบบ ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{F_i}{F_g} \right)_m = \left(\frac{F_i}{F_g} \right)_p \quad (2-1)$$

$$\left(\frac{\rho v^2 L^2}{\rho g L^3} \right)_m = \left(\frac{\rho v^2 L^2}{\rho g L^3} \right)_p \quad (2-2)$$

$$\left(\frac{v^2}{gL} \right)_m = \left(\frac{v^2}{gL} \right)_p \quad (2-3)$$

$$\frac{(v_m/v_p)^2}{(g_m/g_p)(L_m/L_p)} = 1 \quad (2-4)$$

$$\frac{v_r^2}{g_r L_r} = 1 \quad \text{หรือ} \quad \frac{v_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1$$

สำหรับการไหลในทางน้ำเปิดเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของฟรูด ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างแบบจำลองและต้นแบบจริง สามารถหาได้ดังนี้

อัตราส่วนของความยาว หรือมาตราส่วนของแบบจำลอง (model ratio, L_r)

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (2-5)$$

อัตราส่วนของความเร็ว (velocity ratio)

$$v_r = L_r^{1/2} \quad (2-6)$$

อัตราส่วนของเวลา (time ratio)

$$t_r = \frac{L_r}{v_r} = L_r^{1/2} \quad (2-7)$$

อัตราส่วนของอัตราการไหล (discharge ratio)

$$Q_r = \frac{L_r^3}{t_r} = L_r^{5/2} \quad (2-8)$$

อัตราส่วนของมวล (mass ratio)

$$m_r = L_r^3 \quad (2-9)$$

อัตราส่วนของแรง (forces ratio)

$$F_r = L_r^3 \quad (2-10)$$

อัตราส่วนของพลังงาน (energy ratio)

$$E_r = L_r^4 \quad (2-11)$$

อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง

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

$$n_r = \frac{L_r^{2/3}}{L_r^{1/2}}$$

$$n_r = L_r^{1/6} \quad (2-12)$$

เมื่อ	สัญลักษณ์ m	หมายถึง	แบบจำลอง
	สัญลักษณ์ p	หมายถึง	ต้นแบบ
	สัญลักษณ์ r	หมายถึง	อัตราส่วนระหว่างแบบจำลองและต้นแบบ
v	=		ความเร็วการไหล
ρ	=		ความหนาแน่น
L	=		ความยาว
g	=		ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
t	=		เวลา
Q	=		อัตราการไหล
m	=		มวล
F	=		แรง
E	=		พลังงาน
n	=		ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

2.2 การคำนวณการไหลในทางน้ำเปิด

2.2.1 สูตรของแมนนิง

วิศวกรเห็นถึงความสำคัญที่จะต้องมีสูตรสำหรับช่วยคำนวณการไหลในทางน้ำเปิด โดยสูตรดังกล่าวต้องง่ายต่อการประยุกต์ใช้และได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง รูปแบบของสูตรที่ได้รับความนิยมคือสูตรของแมนนิง

$$\text{ระบบเมตริก} \quad v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad \text{m/s} \quad (2-13)$$

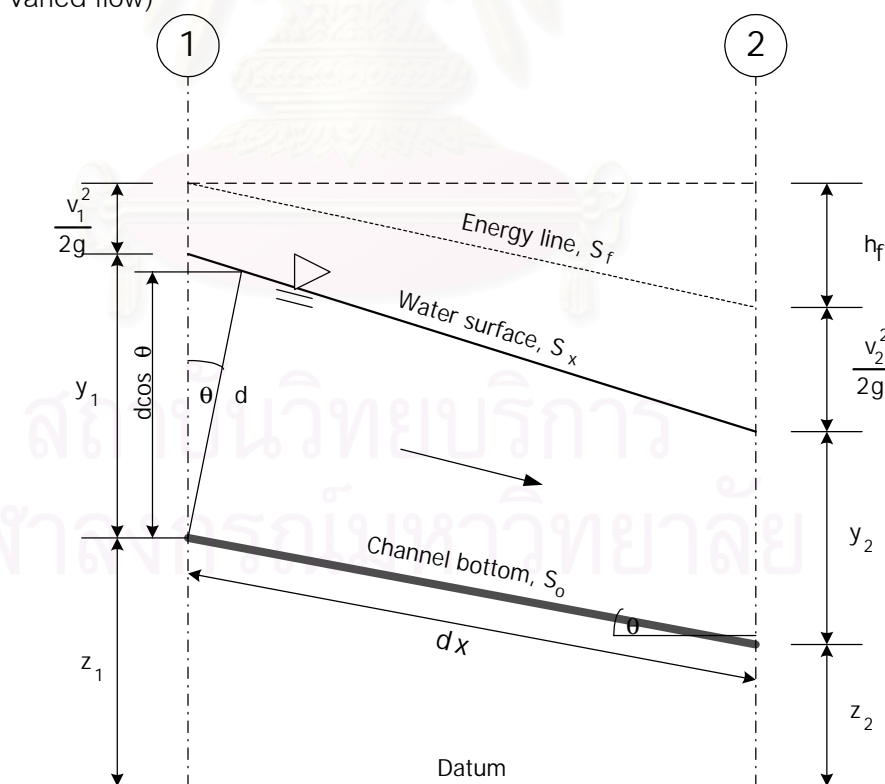
$$\text{ระบบอังกฤษ} \quad v = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad \text{ft/s} \quad (2-14)$$

เมื่อ	v	=	ความเร็วเฉลี่ยของการไหล
	n	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง
	R	=	รัศมีชลศาสตร์
	S_f	=	ความชันของเส้นพลังงาน

โดยทั่วไปถือว่าคุณสมบัติความขรุขระของแมนนิ่งไม่มีหน่วย ดังนั้นค่าดังกล่าวจึงมีค่าเท่ากันในระบบเมตริกและระบบอังกฤษ แต่สูตรที่ใช้ในแต่ละระบบมีความแตกต่างกันแสดงไว้ในสมการ (2-13) และ (2-14)

จากการวิเคราะห์หน่วย (dimensional analysis) ค่า n หรือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง มีมิติเป็น $L^{1/6}$ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง นั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่ชัดเจน วิศวกรต้องยึดหลักที่ว่า การตัดสินใจเลือก ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง ก็หมายถึงการประเมินสภาพความเสียหายของทางน้ำเปิด ดังนั้นการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง ต้องอาศัยประสบการณ์และการตัดสินใจที่เหมาะสม และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง ของลักษณะผิวต่าง ๆ ไว้ในตาราง 2-1

2.2.2 สมการทั่วไปของการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย (general equation for gradually varied flow)



รูป 2-1 การพิสูจน์สมการการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย

จากรูป 2-1 พิจารณาการไหลเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วงความยาว dx หัวพลังงาน การไหลทั้งหมดที่จุดใด ๆ เท่ากับ

$$H = z + d \cos \theta + \frac{v^2}{2g} \quad (2-15)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{d}{dx}(d \cos \theta) + \frac{d}{dx} \left[\frac{v^2}{2g} \right]$$

จากรูปพบว่า

$$\text{ความลาดเอียงเส้นพลังงานพลังงาน} \quad S_f = -\frac{dH}{dx}$$

$$\text{ความลาดเอียงท้องน้ำ} \quad S_0 = -\frac{dz}{dx}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$-S_f = -S_0 + \frac{d}{dx}(d \cos \theta) + \frac{d}{dx} \left[\frac{v^2}{2g} \right]$$

$$\frac{dd}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{\cos \theta + \frac{d}{dx} \left[\frac{v^2}{2g} \right]} \quad (2-16)$$

สมการ (2-15) เรียกว่า สมการพลังงานการไหลในทางน้ำเปิด และสมการ (2-16) เรียกว่า สมการทั่วไปของการไหลเปลี่ยนแปลงน้อยของการไหลในทางน้ำเปิด และในกรณีที่ทางน้ำเปิดมีความลาดเอียงน้อย ($\theta < 6^\circ$) สามารถเขียนสมการ (2-15) และ (2-16) ได้เป็น

$$H = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (2-17)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 + \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right)} \quad (2-18)$$

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระต่างๆ

ตาราง 2-1 แสดงค่า k_s ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ (Henderson,1966)

พื้นผิว	k_s (ft.)
Concrete Class 4 (monolithic construction, cast against oil steel forms with no surface irregularities).	0.0005
Very Smooth cement-plastered surface, all joints and seam hand-finished flush with surface.	0.001
Concrete cast in lubricated steel molds, with carefully smoothed or pointed seam and joints.	0.0016
Wood-stave pipes, planed-wood flume, and concrete class 3 (cast against steel forms or spun-precast pipe.)	0.002
Concrete class 2 (monolithic construction against rough forms or smooth-finished cement-gun surface).	0.005
Short lengths of concrete pipe of small diameter without special facing of butt joints	0.008
Concrete class 1 (precast pipes mortar squeeze at the joints)	0.01
Roughly made concrete conduits	0.014
Rubble masonry	0.02
Untreated gunite	0.01-0.03

ตาราง 2-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ของพื้นผิวต่างๆ
(Henderson, 1966)

พื้นผิว	Manning'n
Glass, plastic, machined metal	0.010
Dressed timber, joints flush	0.011
Sawn timber, joints uneven	0.014
Cement plaster	0.011
Concrete, steel troweled	0.012
Concrete timber form, unfinished	0.014
Untreated gunite	0.015 - 0.017
Brickwork or dressed masonry	0.014
Rubble set in cement	0.017
Earth, some stones , no weeds	0.020
Earth, some stones and weeds	0.025

2.2.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง

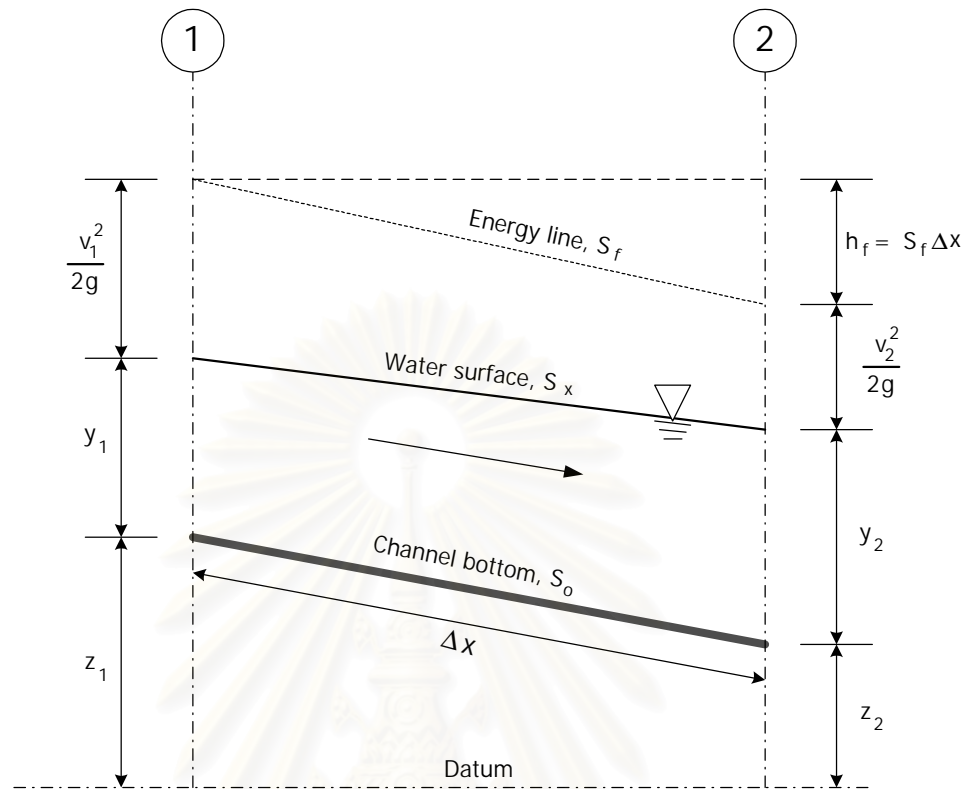
เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าทางน้ำเปิดหนึ่ง ๆ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงไม่คงที่ และมีความผันแปรด้วยองค์ประกอบหลายประการ ดังต่อไปนี้ (ชัยพันธุ์, 2526)

- ความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด ซึ่งหมายถึงขนาดและรูปร่างของเม็ดวัสดุที่เส้นขอบเปียกของทางน้ำเปิด คือ ทางน้ำเปิดที่ประกอบด้วยวัสดุเม็ดละเอียดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระและความแปรผันของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระน้อยกว่าทางน้ำเปิดที่ประกอบด้วยวัสดุเม็ดหยาบกว่า
- ความลึกการไหลและอัตราการไหลสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระจะลดลง
- ขนาดและรูปร่างของทางน้ำเปิด อาจมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ เช่นการเพิ่มคาร์ซีเมนต์ศาสตร์ อาจเพิ่มหรือลดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระก็ได้แล้วแต่สภาพของทางน้ำเปิด

- ความผันแปรของทางน้ำเปิดซึ่งอาจหมายถึง ความแปรเปลี่ยนของ เส้นขอบเปียก ขนาด รูปปร่าง ตามความยาวของทางน้ำเปิด และยังอาจหมายถึงสภาพท้องน้ำ เช่น สันทรายทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมากขึ้น
- ความคดเคี้ยวของทางน้ำเปิด ถ้าทางน้ำเปิดมีความคดเคี้ยวมากก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมากขึ้น
- สิ่งกีดขวางการไหลจะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระให้มากขึ้น

2.2.5 การคำนวณหารูปตัดการไหลในทางน้ำเปิดด้วยวิธีขั้นตอนมาตรฐาน

วิธีการขั้นตอนมาตรฐาน (standard step method) เป็นวิธีหนึ่งในการแก้สมการทั่วไปการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้แก้สมการดังกล่าวด้วยวิธีการของ finite difference ซึ่งวิธีขั้นตอนมาตรฐานนี้สามารถใช้คำนวณรูปตัดการไหลในทางน้ำเปิดได้ทั้งทางน้ำเปิดที่คงรูป (prismatic) และทางน้ำเปิดที่ไม่คงรูป (non prismatic) วิธีการคำนวณมีหลายขั้นตอนเพราะว่าจะต้องทำด้วยวิธีเดาซ้ำซาก (trial and error) การคำนวณเริ่มจากการกำหนดระยะทางระหว่างหน้าตัดเสียก่อน แล้วทำการเดาค่าความลึกการไหล ทำการคำนวณแล้วตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขว่าถูกต้อง และถ้าไม่ถูกต้อง จะต้องกลับไปเดาค่าความลึกการไหลใหม่อย่างมีหลักเกณฑ์



รูป 2-2 พิจารณาการคำนวณหาระดับน้ำในทางน้ำเปิดโดยวิธีการขั้นตอนมาตรฐาน

$$h_f = S_f \Delta x = \left(\frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \right) \Delta x \quad (2-19)$$

$$S_f = \frac{n^2 v^2}{R^{2/3}} \quad (2-20)$$

$$H_1 = z_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (2-21)$$

$$H_2 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2-22)$$

$$H_1 = H_2 + h_f \quad (2-23)$$

เมื่อ	ΔX	=	ระยะทางระหว่างหน้าตัด 1 และ 2
	h_f	=	พลังงานงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน
	S_f	=	ความลาดเอียงของเส้นชั้นพลังงาน
	S_o	=	ความลาดเอียงของทางน้ำ
	H	=	ค่าพลังงานทั้งหมดที่หน้าตัด
	v	=	ความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัด

ขั้นตอนการคำนวณ

1. ทราบตำแหน่งหน้าตัด 1 และ 2 ตลอดจนคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตของหน้าตัด
2. ที่หน้าตัด 1 ทราบค่า y_1 คำนวณหาค่า H_1 ได้
3. เดาค่า y_2 คำนวณหาค่า H_2 และ h_f
4. ตรวจสอบเงื่อนไขการไหล ถ้าไม่ถูกต้องให้กลับไปเดาค่า y_2 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าที่ถูกต้องตามเงื่อนไข
5. คำนวณช่วงต่อ ๆ ไปของทางน้ำเปิด

2.3 การประมาณค่าการสูญเสียพลังงานบนทางระบายน้ำล้น

การประมาณค่าการสูญเสียพลังงานบนทางระบายน้ำล้น มีความสำคัญมากในการออกแบบอาคารสลายพลังงาน (energy dissipator) ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายของอาคารระบายน้ำล้น เพื่อให้สามารถทำงานได้ตามหน้าที่และประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างซึ่งสามารถพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) พิจารณาการสูญเสียพลังงานในสภาพการไหลชั้นขอบเขตที่ปั่นป่วน (turbulent boundary layer) 2) พิจารณาการสูญเสียพลังงานในสภาพการไหลชั้นขอบเขตที่ปั่นป่วนสมบูรณ์ (fully turbulent boundary layer)

ในตอนต้นนั้นการประมาณค่าการสูญเสียพลังงานนั้นใช้สมการของแมนนิง (Manning's equation) หรือสูตรเอมไพริคอล (empirical) ซึ่งมีความถูกต้องน้อยมากปัจจุบันได้มีการนำทฤษฎีชั้นขอบเขตมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการสูญเสียพลังงานดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{2} \rho u^3 \delta_3 = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\delta} u(U^2 - u^2) dy \quad (2-24)$$

$$\delta_3 = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u^2}{U^2} \right) dy \quad (2-25)$$

$$E_L = \frac{1}{2} \rho U^3 \delta_3 \quad (2-26)$$

$$H_L = \frac{U^3 \delta_3}{2gq} \quad (2-27)$$

Keulegan ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของ Bauer ซึ่งได้ทำการทดลองไว้มากมายเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นขอบเขต และ ระยะทางในแนวราบ บนพื้นผิวขรุขระ จากการวิเคราะห์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\delta}{X} = 0.96 \left(\frac{X}{k} \right)^{-0.25} \quad (2-28)$$

หลังจากนั้น Water Experiment Station ของ U.S. Army, Corps of Engineers ได้ทำการพัฒนาการประมาณค่าการสูญเสียพลังงานจากข้อมูลของ Bauer, การวิเคราะห์ของ Keulegan และข้อมูลภาคสนาม จากการศึกษาได้เกณฑ์การออกแบบในการประมาณค่าการสูญเสียพลังงานปรากฏอยู่ใน Hydraulic Design Criteria สำหรับทางระบายน้ำคันโดย U.S. Army, Corps of Engineer ตามที่ปรากฏใน Hydraulic Design Criteria (HDC 111-18) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\delta}{L} = 0.08 \left(\frac{L}{k} \right)^{-0.233} \quad (2-29)$$

และความสัมพันธ์ของความหนาชั้นต่างๆดังนี้

$$\delta_1 = 0.18\delta \quad (2-30)$$

$$\delta_3 = 0.22\delta \quad (2-31)$$

เมื่อ	δ_3	=	energy thickness
	q	=	อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง
	ρ	=	ความหนาแน่น
	δ	=	ความหนาของชั้นขอบเขต

u	=	ความเร็วที่จุดใดๆ
y	=	ระยะจากเส้นชั้นขอบเขต
U	=	ความเร็วที่เส้นชั้นขอบเขต
E_L	=	ค่าการสูญเสียพลังงาน
H_L	=	ค่าพลังงานสูญเสีย
δ_1	=	displacement thickness

ขั้นตอนการประมาณค่าการสูญเสียพลังงานจาก Hydraulic Design Criteria

1. พิจารณารูปร่างเรขาคณิตของสันฝายอันได้แก่ค่า L_C และ L_T จาก HDC 111-18/1 และ HDC 111-1 ตามลำดับ
2. หาค่าความยาวรวม $L = L_C + L_T$ ซึ่งจะนำไปพิจารณาค่าการสูญเสียพลังงานจาก HDC 111-18/3
3. หาค่าความหนาของชั้นขอบเขตต่างๆจาก HDC 111-18
4. หาค่า energy thickness จาก HDC 111-18 ถึง HDC 11-18/5
5. หาค่า potential depth ด้วยวิธีเดาซ้ำซาก (trial & error)
6. หาค่าการสูญเสียพลังงานจาก HDC 111-18 ถึง HDC 111-18/5
7. หาค่าพลังงานก่อนถึงอาคารสลายพลังงาน $H_b = H + H_d - H_L$
8. หาค่าความลึกการไหลจาก $d = d_p + \delta_1$

หมายเหตุ ได้นำเสนอ Hydraulic Design Chart บางส่วนที่เกี่ยวข้องไว้ในภาคผนวก จ.

2.4 การผสมของอากาศบนรางเทของทางระบายน้ำล้น

2.4.1 กลไกการผสมของอากาศบนรางเทบนทางระบายน้ำล้น

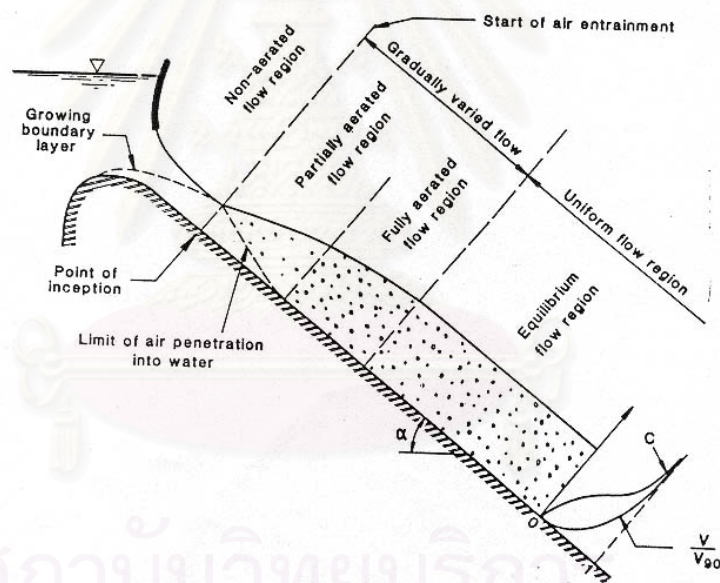
(mechanism of air entrainment on spillway chute)

การไหลบนรางเทซึ่งมีความลาดเอียงมากและมีความเร็วสูงจึงทำให้อากาศที่ผิวเข้ามาผสมกับน้ำซึ่งขบวนการนี้เรียกว่า self-aeration ซึ่งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อระดับความปั่นป่วน (turbulent level) มากเพียงพอที่จะมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วง กล่าวคือ ความเร็วที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (v') จะต้องมีค่ามากกว่าที่จะเอาชนะแรงตึงผิวและมีค่ามากกว่าความเร็วของฟองอากาศที่ลอยขึ้น จากข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2-30) และ (2-31) ได้ดังนี้ (Chanson, 1992)

$$v' > \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho d_b}} \quad (2-32)$$

$$v' > u_r \cos \alpha \quad (2-33)$$

เมื่อ	σ	=	ค่าความตึงผิว
	ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ
	d_b	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ
	u_r	=	ความเร็วของฟองอากาศที่ลอยขึ้น
	α	=	มุมลาดของรางเท



รูปที่ 2-3 แสดงรูปแบบการไหลบนรางเทของทางระบายน้ำดำน

ในช่วงการไหลแรกยังไม่มีผลผสมของอากาศ แต่จะเห็นว่าชั้นขอบเขต (boundary layer) มีค่าสูงขึ้นตามระยะทางจนมีค่าเท่ากับความลึกการไหลที่จุดๆหนึ่ง เราเรียกจุดนี้ว่า point of inception เมื่อเลยจุดนี้ไปจะเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงน้อย (gradually varied flow) ซึ่งจะมีอากาศเข้าไปผสมเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหล เรียกช่วงนี้ว่า partially aerated flow region จนกระทั่งจุดๆหนึ่งความเข้มข้นของอากาศจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง เรียกช่วงนี้

ว่า fully aerated flow region ช่วงท้ายของการไหลบนรางเทจะเป็นการไหลสม่ำเสมอ(uniform flow)

เมื่อมีอากาศมาผสมจะทำให้ความลึกการไหลมีการเปลี่ยนแปลงคือมีค่าเพิ่มขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2-34) คือ

$$\frac{d}{d_B} = 1 - C_e \quad (2-34)$$

เมื่อ d = ความลึกการไหลที่ไม่มีการผสมของอากาศ
 d_B = ความลึกการไหลที่มีการผสมของอากาศ

การประมาณค่าความเข้มข้นอากาศเฉลี่ย (average air concentration ; C_e) พบว่าค่าความเข้มข้นของอากาศเฉลี่ยนั้นเป็นฟังก์ชันของความลาดเอียงเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากสูตร เมื่อมุมลาดเอียงน้อยกว่า 50 องศา (Chanson, 1992)

$$C_e = 0.9S \quad (2-34)$$

ส่วนของ Douma formula(1943) ได้สมการที่หาปริมาณความเข้มข้นของอากาศเป็นฟังก์ชันของความเร็วการไหลและรัศมีชลศาสตร์ ได้สมการ (2-35) โดยความเร็วการไหลอยู่ในหน่วยฟุต-วินาที รัศมีชลศาสตร์มีหน่วยเป็นฟุต

$$C_e = 10 \sqrt{\frac{0.2v^2}{gR} - 1} \quad (2-35)$$

ASCE(1961) เสนอสมการหาปริมาณความเข้มข้นของอากาศ สำหรับทางระบายน้ำล้นที่มีผิวเรียบคือสมการ (2-36) และ ที่มีค่าความขรุขระ(k_s)เท่ากับ 1.2 มิลลิเมตรคือสมการ(2-37) โดยปริมาณความเข้มข้นของอากาศเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้างและความลาดเอียง ซึ่งอยู่ในหน่วย SI

$$C_e = 0.7226 + 0.743 \log\left(\frac{S}{q^{1/5}}\right) + 0.876 \quad (2-36)$$

$$\text{สำหรับ } 0.16 < S/q^{1/5} < 1.4 \quad C_e = 0.5027(S/q^{1/5})^{0.385} \quad (2-37)$$

เมื่อ	C_e	=	อัตราส่วนของปริมาตรอากาศต่อปริมาตรทั้งหมด
	v	=	ความเร็วการไหล
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
	R	=	รัศมีชลศาสตร์
	S	=	ความลาดเอียง
	q	=	อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

2.4.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การผสมของอากาศมีผลโดยตรงต่อค่าแรงเฉือนที่ผิว กล่าวคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอากาศเพิ่มขึ้น

2.5 การศึกษาที่ผ่านมา

Rajaratnam (1968) ศึกษาผลกระทบของความขรุขระในอาคารสลายพลังงานที่มีต่อความลึกการไหลทำน้ำและการกระจายความเร็ว ในส่วนของความลึกทำน้ำจากการศึกษาได้นำเสนอสูตร $y = F_1 + 0.41(F_1 - 1)^{-6k_s}$ โดยที่ y คือ ความลึกทำน้ำ, F_1 คือ ฟลูตัมเบอร์ก่อนเข้าอาคารสลายพลังงาน และ k_s คือ ค่าความขรุขระ (roughness height) และในส่วนของความขรุขระที่ผิวนั้นมีผลต่อการกระจายความเร็วอย่างไม่มีนัยสำคัญ

Rajaratnam (1976) ศึกษาผลกระทบของความขรุขระของการไหลตกอย่างอิสระ (free overfall) ในทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมที่มีต่อการกระจายความเร็วและความลึกการไหลโดยใช้รางน้ำ(flume)ขนาดกว้าง 18 นิ้ว สูง 15 นิ้ว และยาว 20 ฟุต รางน้ำทำจากแผ่นกระจกทนความร้อน (plexiglass) ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบโดยเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระจากความสูงของแถบไม้ที่ท้องน้ำ จากการศึกษพบว่า ถ้าค่า k_s/y_c มากกว่า 0.1 จะทำให้ความลึกการไหลที่จุดตกมีค่าต่ำกว่าการไหลบนท้องน้ำที่เรียบอย่างมีนัยสำคัญและมีการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเร็ว

Hughes and Flack (1984) ศึกษาผลกระทบของความขรุขระของท้องน้ำต่อคุณลักษณะของน้ำกระโดด (hydraulic jump) ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองของเขาทั้งสองกับสมการของ Leutheusse and Kartha (1972) โดยใช้รางน้ำขนาดกว้าง 12 นิ้ว โดยมีค่า

ความขรุขระ 2 ประเภท คือ กรวดอัดแน่นผสมซีเมนต์และลวดที่ท่อน้ำจากการศึกษาพบว่าความขรุขระมีผลกระทบต่อความลึกทำynnน้ำและความยาวของน้ำกระโดด

Knight and McDonald (1979) ศึกษาความต้านทานการไหล (hydraulic resistance) ที่เกิดจากความขรุขระของท่อน้ำ โดยติดตั้งลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันโดยใช้รางน้ำ ขนาดกว้าง 0.46 เมตร สูง 0.38 เมตร และยาว 15.25 เมตร จากการศึกษาสามารถแบ่งรูปแบบการไหลบนท่อน้ำขรุขระได้ 6 แบบ และคุณลักษณะของการไหลแบบต่างๆ

Kouwen (1973) ศึกษาผลกระทบของความขรุขระของท่อน้ำที่เกิดจากพีซีไต้น้ำโดยใช้แถบพลาสติกจำลองเป็นพีซีไต้น้ำ จากการศึกษาพบว่าความขรุขระมีผลกระทบต่อ การกระจายความเร็ว

Mohamed Ali (1991) ศึกษาผลกระทบของความขรุขระในอาคารสลายพลังงานเพื่อประโยชน์ในการออกแบบอาคารสลายพลังงานได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้รางน้ำ ขนาดกว้าง 0.80 เมตร สูง 0.70 เมตร และยาว 16.70 เมตร ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบโดยเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระจากขนาดของก้อนลูกบาศก์ทองเหลือง จากการศึกษาทำให้สามารถออกแบบอาคารสลายพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พิเชษฐ รัตนปราสาทกุล (2541) ศึกษาแบบจำลองทางระบายน้ำล้นที่มีสันฝายในแนวไม่ตรงด้วยมาตราส่วน 1:50 ของโครงการน้ำแหวง จ.น่าน ผลการศึกษาเสนอให้ปรับปรุงด้านเหนือน้ำโดยการเพิ่มความลาดชัน หรือความกว้างในอ่างรับน้ำด้านบนและทำการปรับปรุงอาคารสลายพลังงานโดยการยกระดับของพื้นอาคารสลายพลังงานเพื่อเพิ่มความลึกทำynnน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

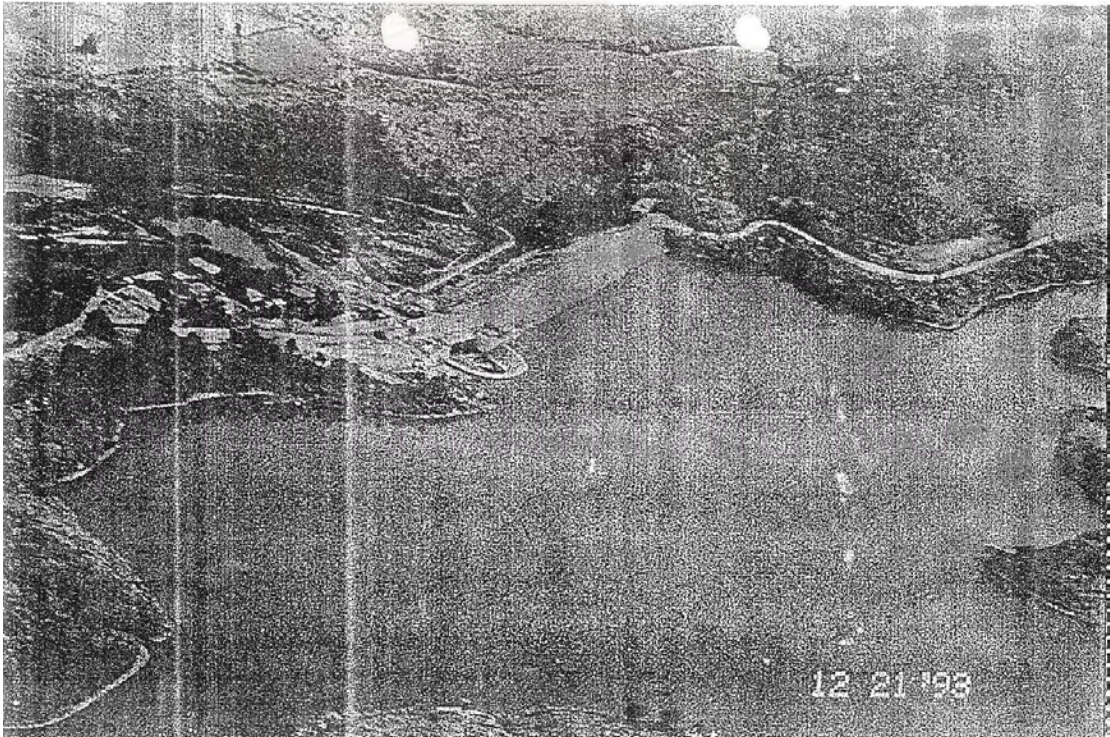
บทที่ 3

แบบจำลองและเงื่อนไขในการทดลอง

การสร้างแบบจำลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูล ที่ต้องการนำไปใช้ออกแบบและก่อสร้าง เมื่อทราบข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองในแบบจำลอง เราสามารถแปลงข้อมูลต่าง ๆ เหล่านั้นเป็นข้อมูลของต้นแบบโดยใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึง ทำให้เราสามารถทำการออกแบบและแก้ไขสิ่งผิดพลาดหรือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ทำให้สามารถก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้แบบจำลองของทางระบายน้ำล้นของโครงการอ่างเก็บน้ำน้ำแหวง โดยมีรายละเอียดของโครงการและแบบจำลองดังต่อไปนี้

3.1 รายละเอียดของโครงการน้ำแหวง

โครงการอ่างเก็บน้ำน้ำแหวง ตั้งอยู่ที่ หมู่บ้านนาอุดม ตำบลนาน้อย จังหวัดน่าน ระยะเวลาก่อสร้างทั้งหมด 10 ปี เริ่มดำเนินการปี พ.ศ.2525 เสร็จปี พ.ศ.2534 ราคาค่าก่อสร้างทั้งสิ้น 163,000,000 บาท พื้นที่เพาะปลูกได้รับประโยชน์จากโครงการ 6,000 ไร่ (พิเชษฐ, 2541)



รูปที่ 3-1 โครงการอ่างเก็บน้ำน้ำแหวง จังหวัดน่าน

วัตถุประสงค์ของโครงการน้ำแห้ง คือ เพื่อเป็นแหล่งกักเก็บน้ำไว้ใช้เสริมการเพาะปลูกในฤดูฝนและการปลูกพืชในฤดูแล้ง เป็นแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค เป็นแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์น้ำ เป็นแหล่งพักผ่อนหย่อนใจของราษฎรในบริเวณใกล้เคียง เป็นแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อบรรเทาอุทกภัย และเป็นแหล่งน้ำสำหรับผลิตน้ำประปา เพื่อใช้ในเขตสุขาภิบาลน่าน้อย

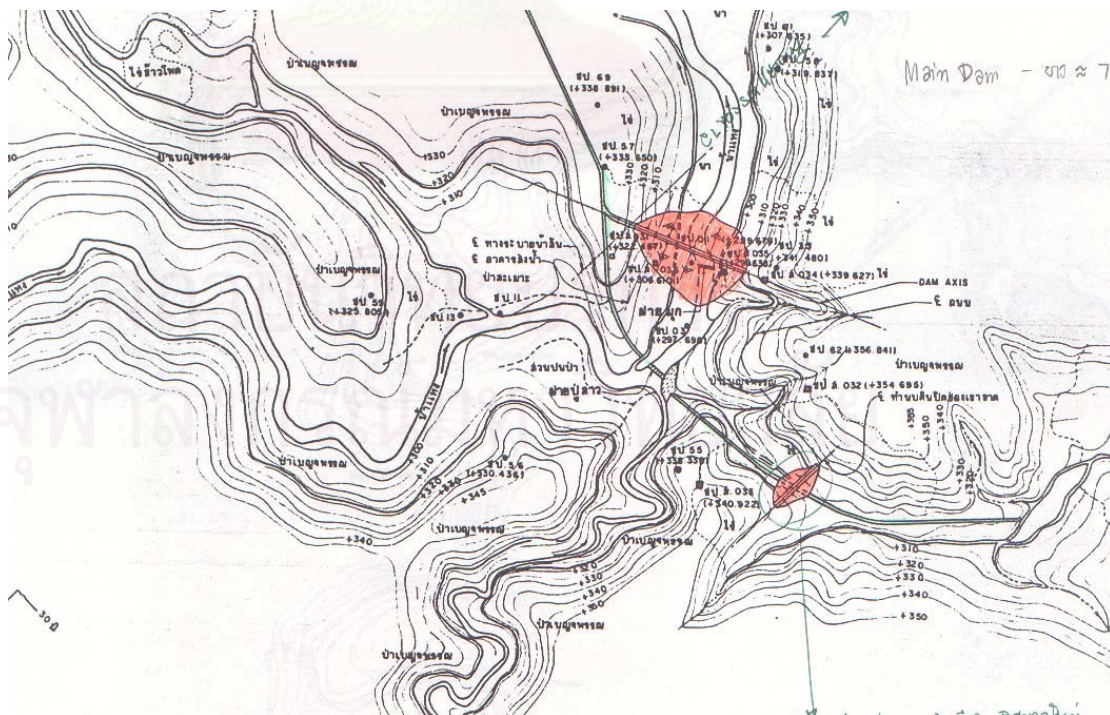
รายละเอียดของโครงสร้าง ประกอบด้วย

- อาคารระบายน้ำล้นเป็นชนิด ogee weir

สันฝายโค้งยาว	93.54	เมตร
ความกว้างรางระบายน้ำ	25.00	เมตร
ความยาวรางระบายน้ำ	195.00	เมตร
ระบายน้ำสูงสุด	710.00	ลบ.ม./วินาที

- อาคารห้วงงาน

ระดับสันเขื่อน	+323.00	ร.ท.ก.
ระดับน้ำสูงสุด	+321.00	ร.ท.ก.
ระดับกักเก็บ	+318.00	ร.ท.ก.
ระดับน้ำต่ำสุด	+307.50	ร.ท.ก.



รูปที่ 3-2 แผนที่แสดงห้วงงานของโครงการน้ำแห้ง

3.2 แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้น

รูปแบบของแบบจำลองเป็นไปตามกฎความคล้ายคลึงกัน แบบจำลองที่ใช้ในศึกษาใช้มาตราส่วนความยาวแบบจำลอง 1 หน่วย ต่อ ความยาวจริง 50 หน่วย หรือ $L_r = 1:50$ โดยที่อัตราส่วนย่อยของตัวแปรทางชลศาสตร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองเป็นไปตามตาราง 3-1 แปลนและรูปตัดตามแนวศูนย์กลาง แสดงไว้ในรูป 3-1

ตาราง 3-1 แสดงอัตราส่วนย่อยของตัวแปรทางชลศาสตร์ของแบบจำลอง

ตัวแปรทางชลศาสตร์		Scale ratio
ความยาว	L_r	1:50
พื้นที่	$A_r = L_r^2$	1:2,500
เวลา	$T_r = L_r^{1/2}$	1:7.071
ความเร็ว	$V_r = L_r^{1/2}$	1:7.071
อัตราการไหล	$Q_r = L_r^{5/2}$	1:17,677.67
ปริมาตร	$V_r = L_r^3$	1:125,000
Manning' n	$n_r = L_r^{1/6}$	1:1.919



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองอาคารระบายน้ำฝนเขื่อนน้ำแห่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- ส่วนของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
- ส่วนของแบบจำลองอาคารระบายน้ำฝน
- ส่วนของแบบจำลองทำynnน้ำ

3.4.1 แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

ก่อสร้างด้วยอิฐบล็อก ฉาบปูนเรียบ ผิวด้านในฉาบด้วยวัสดุกันซึม สูง 80 เซนติเมตร กว้าง 235 เซนติเมตร ยาว 400 เซนติเมตร และภายในมีแนวหินสลายคลื่น เพื่อทำให้น้ำในอ่างเก็บน้ำและมีคลื่นน้อยที่สุด

3.4.2 แบบจำลองอาคารระบายน้ำฝน

ในส่วนนี้ทำการจำลองจากต้นแบบโดยใช้มาตราส่วน 1: 50 ทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง ในส่วนของสันฝายหล่อด้วยซีเมนต์มีความยาวสันฝายทั้งสิ้น 187 เซนติเมตร และในส่วนของรางเทและอาคารสลายพลังงานใช้พลาสติกใสมีความหนา 5 มิลลิเมตร

3.4.3 แบบจำลองทำynnน้ำ

ประกอบขึ้นจากอิฐบล็อก และซีเมนต์เป็นตัวปรับระดับ ในการควบคุมความสูงทำynnน้ำใช้แผ่นไม้เป็นตัวปรับระดับ

3.3 การปรับปรุงแบบจำลอง

แบบจำลองทางระบายน้ำฝนของโครงการน้ำแห่งนี้แบบจำลองที่มีอยู่แล้วที่ห้องปฏิบัติการชายฝั่ง ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ อาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ใช้ในการศึกษาเรื่อง “การจำลองพฤติกรรมการไหลทางชลศาสตร์ของทางระบายน้ำฝนที่มีสันฝายไม่ตรง” ของนายพิเชษฐ รัตนปราสาทกุล พ.ศ. 2541 แต่แบบจำลองมีสภาพทรุดโทรมเนื่องจากกาลเวลาจึงต้องทำการปรับปรุงให้ใช้งานได้ดี ซึ่งมีรายละเอียดการปรับปรุง ซ่อมแซมและเพิ่มเติมส่วนต่างๆ ที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

เกิดการรั่วซึมเพราะประกอบขึ้นมาจากอิฐบล็อก ฉาบปูนเรียบ และส่วนที่เป็นกันซึมไม่สามารถใช้งานได้ทำให้มีน้ำจำนวนเล็กน้อยซึมออกมาระหว่างการทดลอง ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลองและเกิดอุบัติเหตุระหว่างการทดลองได้ ผู้ศึกษาจึงได้นำวัสดุกันซึมมาฉาบบริเวณภายในอ่าง และทำการเปลี่ยนแนวหินสลายคลื่นที่มีความกว้างน้อยเกินไป ทำให้น้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำไม่รั่ว เมื่อเปลี่ยนแล้วสามารถสังเกตเห็นได้ว่าน้ำในแบบจำลองนี้เป็นที่น่าพอใจ

3.5.2 แบบจำลองสันฝาย

เกิดการรั่วซึมและพื้นผิวไม่เรียบ จึงทำการปรับปรุงโดยใช้เครื่องมือเจียรนำมาลบเนินและเหลี่ยมมุมที่ไม่ต้องการออก และส่วนที่เป็นร่องหรือแอ่งก็ใช้วัสดุฉาบตัวถังรถยนต์มาฉาบให้พื้นผิวอยู่ในระดับและรูปร่างที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำให้พื้นผิวเรียบ

3.5.3 แบบจำลองรางเท

แบบจำลองรางเทประกอบขึ้นด้วยพลาสติกใสและติดเข้ากันด้วยซิลิโคน เมื่อผ่านการใช้งานมาแล้วทำให้ซิลิโคนบางส่วนร่อนหลุดออก เกิดการรั่วซึมจึงต้องลอกซิลิโคนที่เสื่อมสภาพออกและทำการตีใหม่ให้ใช้งานได้โดยไม่มีกรั่วซึม และทำการปรับระดับให้ถูกต้อง

3.5.3 แบบจำลองทำynnน้ำ

ซีเมนต์ที่เป็นตัวปรับระดับเกิดการแตกร้าวจึงต้องนำของเก่าส่วนที่แตกร้าวออกและฉาบใหม่ให้ได้ระดับทำynnน้ำตามเดิม ในการควบคุมความสูงทำynnน้ำที่ใช้แผ่นไม้เป็นตัวปรับระดับนั้น ได้ทำการก่ออิฐเป็นช่องเพื่อใส่แผ่นไม้ได้ง่ายและแผ่นไม้จะได้ไม่เคลื่อนไหว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการทำงานทดลอง

1. เตรียมแบบจำลองให้พร้อม ทดสอบว่าไม่มีการรั่วซึมและปรับระดับทำให้น้ำให้อยู่ในระดับที่พร้อมทดลอง
2. ตรวจสอบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดข้อมูลให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
3. เปิดน้ำเข้าแบบจำลองโดยค่อย ๆ เพิ่มอัตราการไหล เพื่อป้องกันการเกิด water hammer ซึ่งอาจทำให้ท่อส่งน้ำเกิดการชำรุดได้
4. รอจนการไหลสม่ำเสมอแล้วทำการบันทึกค่าความลึกการไหล ระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ และวัดอุณหภูมิของน้ำ
5. วัดอัตราการไหลด้วยฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม
6. ทำการทดลองจนครบ 5 อัตราการไหล
7. ทำการเปลี่ยนผิวรางเทและจะต้องทิ้งไว้อย่างน้อย 1 วันจึงจะทำการทดลองได้
8. ทำการทดลองตามขั้นตอนทั้งหมดอีกครั้ง สำหรับแต่ละพื้นผิวรางเทจนครบตามที่กำหนดไว้

3.5 การวัดข้อมูลทางชลศาสตร์

ในการวัดข้อมูลแต่ละพื้นผิวของรางเทนั้นจะทำการทดลอง 5 อัตราการไหล โดยทำการวัดข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.6.1 ส่วนของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ทำการวัดระดับน้ำด้วย Point gate Kenex แบบธรรมดา ความละเอียด 1/10 ซม. ในการวัดต้องรอจนการไหลอยู่ในสภาพคงที่ สังเกตจากระดับที่วัดได้นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในเวลา 2 นาทีจึงบันทึกข้อมูลระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ

3.6.2 ส่วนของแบบจำลองของรางเท ใช้ Point gate Kenex แบบดิจิตอล ความละเอียด 5/100 ซม. ทำการวัดความลึกการไหล ตั้งแต่สถานีที่ +20 cm. ถึงสถานีที่ +280 cm.

รวมทั้งสิ้น 14 หน้าตัด โดยแต่ละหน้าตัดที่ทำการวัดข้อมูลมีระยะทาง 20 cm. ซึ่งแต่ละหน้าตัดทำการวัด 5 จุด แต่ละจุดวัด 3 ครั้ง และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเป็นความลึกการไหลที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยเครื่องมือวัดนี้ในหลักการทางไฟฟ้า จำเป็นต้องมีสายกราวด์แช่อยู่ในน้ำ ซึ่งในบางครั้งที่อัตราการไหลน้อยๆ จะทำให้สายกราวด์ไหลล้นน้ำทำให้เครื่องมือวัดไม่แสดงผลออกมา

3.6.3 ส่วนอาคารสลายพลังงานทำการวัดระดับทำynnน้ำด้วย Point gate Kenex แบบธรรมดา ความละเอียด 1/10 ซม มีความละเอียดที่เหมาะสมแต่ต้องทำการวัด 3 ครั้ง ห่างกัน 1 นาที และทำการวัด 2 ตำแหน่งเพื่อลดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัด

3.6 เงื่อนไขในการทดลองในแบบจำลอง

ในการทดลองมีข้อจำกัดจากเครื่องมือวัด อุปกรณ์ประกอบ และแบบจำลองเอง ทำให้เงื่อนไขการทดลองมีข้อจำกัดโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.8.1 อัตราการไหล

ในการทดลองในแบบจำลองนั้นแต่ละพื้นผิวความขรุขระ ทำการทดลอง 5 อัตราการไหลด้วยกัน โดยมีอัตราการไหลต่ำสุด คือ 5 ลิตรต่อวินาที เนื่องด้วยถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำกว่านี้ จะทำให้ความลึกการไหลต่ำมาก ไม่สามารถวัดด้วยเครื่องมือวัด Point gate แบบดิจิตอลได้ และในส่วนของอัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 35 ลิตรต่อวินาที โดยไม่สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้มากกว่านี้อันเนื่องมาจากขนาดท่อส่งน้ำ แต่ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่ต้องการศึกษา

3.6.2 ความลึกการไหล

โดยทั่วไปแล้วลักษณะการไหลบนรางเทเป็นแบบการไหลเหนือวิกฤติ ซึ่งมีค่าความลึกการไหลต่ำ อีกทั้งยังเกิดคลื่นบริเวณผิวน้ำอีกด้วย ทำให้การวัดความลึกการไหลบนรางนั้นจะผิดพลาดไปจากความเป็นจริงได้ ดังนั้นผู้ศึกษาได้ทำการวัดทุกหน้าตัดๆละ 5 ตำแหน่ง โดยที่แต่ละตำแหน่งทำการวัด 3 ครั้ง และนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดความผิดพลาดจากการวัดให้เหลือน้อยที่สุด และใช้ค่าเฉลี่ยนี้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.6.3 ผิวของรางเท (surface roughness)

ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นและให้ความสำคัญกับลักษณะผิวรางเทที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหล ดังนั้นผู้ศึกษาจึงมีความต้องการที่จะใช้ผิวของรางเทที่มีความขรุขระแตกต่างกันหลายค่า โดยทดลองใช้ผิวของรางเทที่ประกอบขึ้นด้วยทรายหลายขนาด โดยทำการร่อนทรายหลายขนาดเพื่อนำมาประกอบเป็นผิวรางเท โดยใช้กาวติดกับแผ่นพลาสติก แต่ผลที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจเพราะผิวที่ประกอบขึ้นมาไม่สม่ำเสมอและไม่ทนต่อการกัดเซาะที่เกิดจากการไหลที่มีความเร็วสูง ดังนั้นผู้ศึกษาจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนมาใช้ผิวรางเทที่ประกอบจากกระดาษทรายกันน้ำที่มีความสามารถทนทานต่อการกัดเซาะได้และมีความสม่ำเสมอ

ผู้ศึกษาเลือกกระดาษทรายกันน้ำที่มีความขรุขระมากที่สุดและน้อยที่สุดคือ กระดาษทรายเบอร์ 80 และเบอร์ 100 ตามลำดับ และเลือกกระดาษทรายเบอร์ 180 และ เบอร์ 280 ที่มีความขรุขระอยู่ระหว่างกระดาษทรายที่มีความขรุขระมากที่สุดและน้อยที่สุด โดยแสดงค่าความขรุขระและค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ในตาราง 3-2

ตาราง 3-2 แสดงค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลอง

พื้นผิวของรางเท	Roughness height , k_s (cm.)	Manning' n
ผิวเรียบ	-	0.00624
กระดาษทรายเบอร์ 400	0.0083	0.00672
กระดาษทรายเบอร์ 280	0.01178	0.00755
กระดาษทรายเบอร์ 180	0.02355	0.00880
กระดาษทรายเบอร์ 80	0.04416	0.01025

สรุปได้ว่า ในการศึกษาทำการทดลองทั้งหมด 25 การทดลอง โดยมีอัตราการไหลตั้งแต่ 5 – 35 ลิตรต่อวินาที โดยทำการทดลองเปลี่ยนพื้นผิวของรางเท 5 พื้นผิวที่ประกอบขึ้นจากกระดาษทรายเบอร์ต่างกัน 4 ขนาดและพื้นผิวพลาสติกใส และพื้นผิวมีค่ารวมพื้นผิวที่ทดลองทั้งหมด 5 พื้นผิว และแสดงไว้ในตาราง 3-3

ตาราง 3-3 แสดงสัญลักษณ์ของการทดลองทั้งหมด

พื้นผิวของรางเท	อัตราการใช้				
	1	2	3	4	5
A Smooth	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
B No.400	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
C No.280	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
D No.180	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
E No.80	E-1	E-2	E-3	E-4	E-4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลของการดำเนินการทดลอง

การศึกษาผลของความขรุขระของผิวรางเทของทางระบายน้ำล้นต่อพฤติกรรมการไหล ได้ทำการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เป็นทางระบายน้ำล้นของโครงการน้ำแห่งเป็นกรณีศึกษา และจำลองและเปลี่ยนแปลงพื้นผิวความขรุขระของรางเท ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 280, 180 และ 80 จากค่าความขรุขระน้อยไปมากตามลำดับ เมื่อทำการทดลองเสร็จจึงสิ้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้ง 25 การทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก สามารถสรุปได้ดังนี้

จำนวนการทดลอง	25	การทดลอง
จำนวนผิวรางเทที่ทดลอง	5	ผิว
ระยะเวลาในแต่ละการทดลอง	90	นาที
อัตราการไหล	5-35	ลิตรต่อวินาที
ความลึกการไหล	1-9	เซนติเมตร
อุณหภูมิของน้ำ	28	องศาเซลเซียส

เมื่อแบ่งผลการทดลองตามผิวความขรุขระสามารถสรุปได้ดังตาราง 4-1 โดยที่อัตราการไหลสูงสุดในแบบจำลอง คือ 40.16 ลิตรต่อวินาที (อัตราการไหลสูงสุดในต้นแบบที่ออกแบบไว้คือ 710 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) ในส่วนของรูปตัดการไหลนั้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4-1 สรุปผลการทดลองจากแบบจำลอง

ผิวรางเท	k_s (cm)	อัตราการไหล (l/s)	พลังงานก่อน เข้ารางเท (cm)	พลังงานก่อน เข้าอาคาร สลายพลังงาน (cm)	พลังงาน สูญเสียบน รางเท (cm)
ผิวเรียบ	พลาสติก	9.31(0.23Qmax)	41.15	26.27	14.88
		18.02(0.45Qmax)	43.67	26.38	17.29
		23.56(0.59Qmax)	45.16	28.03	17.13
		28.30(0.70Qmax)	46.47	31.42	15.05
		30.70(0.79Qmax)	46.97	31.25	15.72
กระดาดทราย เบอร์ 400	0.00883	12.72(0.32Qmax)	42.06	24.00	18.06
		14.00(0.35Qmax)	42.47	24.43	18.04
		19.06(0.47Qmax)	43.95	26.26	17.69
		25.39(0.63Qmax)	45.61	28.64	16.97
		33.55(0.84Qmax)	47.61	31.61	16.00
กระดาดทราย เบอร์ 280	0.01178	14.66(0.37Qmax)	42.67	24.59	18.08
		17.27(0.43Qmax)	43.43	25.33	18.10
		22.09(0.55Qmax)	44.76	27.41	17.35
		26.98(0.67Qmax)	46.01	29.46	16.55
		27.60(0.69Qmax)	46.17	29.38	16.79
กระดาดทราย เบอร์ 180	0.02355	10.93(0.27Qmax)	41.49	23.56	17.93
		14.44(0.36Qmax)	42.62	24.65	17.97
		18.28(0.46Qmax)	43.73	25.98	17.75
		28.29(0.70Qmax)	43.64	29.78	16.56
		28.96(0.72Qmax)	46.50	29.71	16.79
กระดาดทราย เบอร์ 80	0.04416	8.97(0.22Qmax)	40.83	25.92	14.91
		12.10(0.30Qmax)	41.88	24.08	17.80
		12.93(0.32Qmax)	42.14	23.99	18.15
		18.8(0.47Qmax)	43.87	26.12	17.75
		29.00(0.72Qmax)	46.52	29.87	16.65

การทดลองในแบบจำลองรางเทของทางระบายน้ำล้น ทำการทดลอง 5 ค่าความขรุขระ โดยที่การทดลองผิวรางเทพลาสติกใสเรียบ มีค่า $n = 0.00624$ ทดลอง 5 อัตราการไหลต่ำสุดคือ 9.31 ลิตรต่อวินาที หรือ 23 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ ส่วนอัตราการไหลสูงสุด 30.70 ลิตรต่อวินาที หรือ 79 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ โดยที่พลังงานการสูญเสียบนรางเทมีค่าอยู่ระหว่าง 31.04 เซนติเมตร ถึง 35.49 เซนติเมตร โดยพลังงานสูญเสียบนรางเทมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

ในการทดลองไม่สามารถเพิ่มอัตราการไหลให้เท่ากับอัตราการไหลออกแบบอันเนื่องมาจากขีดจำกัดของท่อส่งน้ำมายังแบบจำลอง ในแบบจำลองที่มีผิวรางเทที่มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นอันได้แก่แบบจำลองผิวรางเทเป็นกระดาษทรายเบอร์ต่างๆเป็นดังต่อไปนี้

ผิวรางเทเป็นกระดาษทรายเบอร์ 400 ซึ่งมีค่า $k_s = 0.00883$ เซนติเมตร หรือ $n = 0.00672$ อัตราการไหลต่ำสุดคือ 12.72 ลิตรต่อวินาที หรือ 32 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ ส่วนอัตราการไหลสูงสุด 33.55 ลิตรต่อวินาที หรือ 84 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ โดยที่พลังงานการสูญเสียบนรางเทมีค่าอยู่ระหว่าง 33.50 เซนติเมตร ถึง 34.38 เซนติเมตร โดยพลังงานสูญเสียบนรางเทมีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล

ผิวรางเทเป็นกระดาษทรายเบอร์ 280 ที่มีความขรุขระมากกว่ากระดาษทรายเบอร์ 400 ซึ่งมีค่า $k_s = 0.01178$ เซนติเมตร หรือ $n = 0.00775$ อัตราการไหลต่ำสุดคือ 14.66 ลิตรต่อวินาที หรือ 37 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ ส่วนอัตราการไหลสูงสุด 27.60 ลิตรต่อวินาที หรือ 69 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ โดยที่พลังงานการสูญเสียบนรางเทมีค่าอยู่ระหว่าง 34.26 เซนติเมตร ถึง 34.73 เซนติเมตร โดยพลังงานสูญเสียบนรางเทมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแคบเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

ต่อมาเป็นผิวรางเทกระดาษทรายเบอร์ 180 มีค่า $k_s = 0.02355$ เซนติเมตร หรือ $n = 0.00755$ อัตราการไหลต่ำสุดคือ 10.93 ลิตรต่อวินาที หรือ 27 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ ส่วนอัตราการไหลสูงสุด 28.96 ลิตรต่อวินาที หรือ 72 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ โดยที่พลังงานการสูญเสียบนรางเทมีค่าอยู่ระหว่าง 29.26 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลต่ำสุด และ 34.72 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลสูงสุด โดยพลังงานสูญเสียบนรางเทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น

สุดท้ายเป็นผิวรางเทที่มีค่าความขรุขระสูงสุดคือ ผิวรางเทกระดาดทรายเบอร์ 80 มีค่า $k_s = 0.04416$ เซนติเมตร หรือ $n = 0.01025$ อัตราการไหลต่ำสุดคือ 8.97 ลิตรต่อวินาที หรือ 22 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ ส่วนอัตราการไหลสูงสุด 29 ลิตรต่อวินาที หรือ 72 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ โดยที่พลังงานการสูญเสียบนรางเทมีค่าอยู่ระหว่าง 30.62 เซนติเมตร ถึง 34.46 เซนติเมตร โดยพลังงานการสูญเสียบนรางเทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2 ค่าความขรุขระและสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง

ค่าความขรุขระ (roughness height) และ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง ของกระดาดทรายเบอร์ต่างๆที่ใช้จำลองสภาพความขรุขระของผิวรางเทของทางระบายน้ำล้น ทำการสอบเทียบ แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง 4-2 แสดงค่าความขรุขระแบบต่างๆของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะผิว	k_s (cm)	f	n
ผิวเรียบ	พลาสติก	0.0157	0.00624
กระดาดทรายเบอร์ 400	0.00883	0.0183	0.00672
กระดาดทรายเบอร์ 280	0.01178	0.0230	0.00755
กระดาดทรายเบอร์ 180	0.02355	0.0313	0.00880
กระดาดทรายเบอร์ 80	0.04416	0.0425	0.01025

ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง ของพลาสติกใสมีค่าอยู่ในช่วง 0.009-0.01 (Chow, 1959) จากผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิง เฉลี่ยที่คำนวณได้ของพลาสติกใส มีค่า 0.00624 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า

ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ทั้ง 5 ผิวรางเทมีค่าตั้งแต่ 0.00624 ถึง 0.01025 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ที่ทำการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ในแบบจำลองเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ของต้นแบบโดยใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึง และได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ของต้นแบบตามตาราง 4-2

ตาราง 4-3 แสดงการเปรียบเทียบ Manning 'n' ของแบบจำลองและต้นแบบ

ลักษณะผิว	n (model)	n (prototype)
ผิวเรียบ	0.00624	0.0120
กระดาศทรายเบอร์ 400	0.00672	0.0129
กระดาศทรายเบอร์ 280	0.00755	0.0145
กระดาศทรายเบอร์ 180	0.00880	0.0169
กระดาศทรายเบอร์ 80	0.01025	0.0197

จากตาราง 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง ทั้ง 5 ผิววางเทเมื่อแปลงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง ของต้นแบบแล้วมีค่าตั้งแต่ 0.0120 ถึง 0.0197 ซึ่งค่าเหล่านี้นำไปใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จริงในแบบจำลอง และค่าที่คำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่งและ จากหลักเกณฑ์การออกแบบ

โดยทั่วไปคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างโดยทั่วไปของรางเทของทางระบายน้ำล้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง 0.0120-0.0140

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของฝิวรางเทที่มีค่าความขรุขระแตกต่างกัน

ในการพิจารณานั้น จะวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงอิทธิพลของความขรุขระต่อความลึกการไหล เมื่อฝิวรางเทมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ทำให้รูปตัดการไหลบนรางเทเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ในการเปรียบเทียบ ทำการแบ่งรางเทออกเป็น 3 ส่วน ตามลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน คือ

- รางที่ 1 มีความลาดเอียงเท่ากับ 0.02 ความกว้างของรางเทเท่ากับ 50 เซนติเมตร เริ่มตั้งแต่ Station 0 cm. ถึง Station 100 cm.
- รางที่ 2 มีความลาดเอียงเท่ากับ 0.17 ความกว้างของรางเทเท่ากับ 50 เซนติเมตร เริ่มตั้งแต่ Station 100 cm. ถึง Station 235 cm.
- รางที่ 3 มีความลาดเอียงเท่ากับ 0.17 ความกว้างของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง คือ มีความกว้าง 50 เซนติเมตร ที่ Station 235 cm. และมีขนาดเพิ่มขึ้นจน ถึง 70 เซนติเมตร ที่ Station 280 cm.

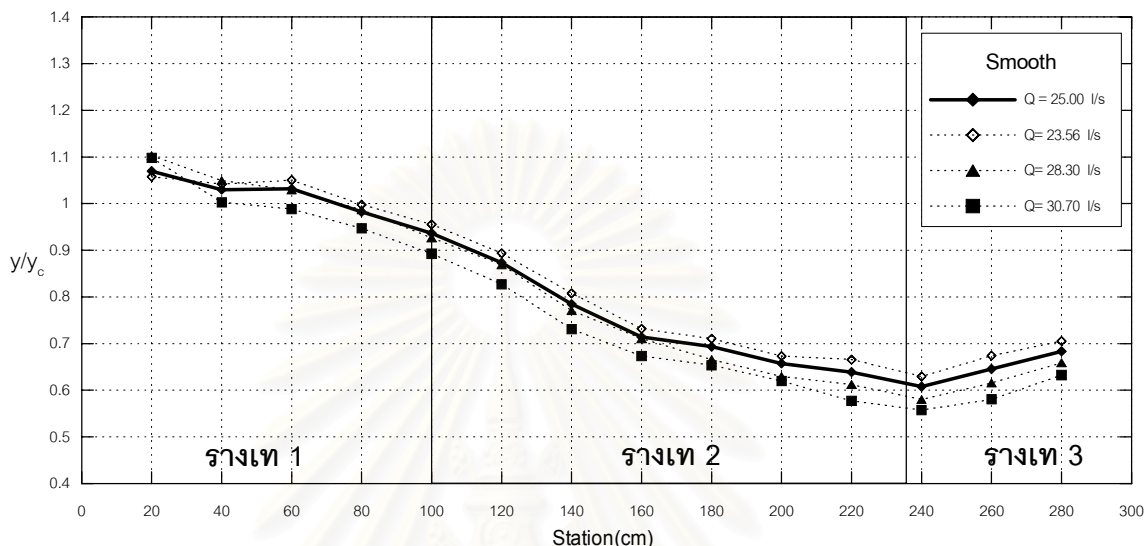
5.1.1 วิเคราะห์รูปตัดการไหลแต่ละฝิวรางเท

ในการวิเคราะห์รูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทนั้น จะได้เส้นรูปตัดการไหล y/y_c ของแต่ละอัตราการไหลเรียงกันอยู่ โดยที่ที่ Station เดียวกัน อัตราการไหลสูงจะมีค่า y/y_c ต่ำกว่า และต้องการนำรูปตัดการไหล y/y_c ของแต่ละฝิวมาเปรียบเทียบกันใน 5.1.2 จึงต้องการรูปตัดการไหล y/y_c ที่อัตราการไหลเดียวกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบ ในที่นี้เลือกอัตราการไหล = 25 ลิตร / วินาที เป็นอัตราการไหลในการเปรียบเทียบ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลออกแบบ (Q_d) ของทางระบายน้ำล้น อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที เท่ากับ $0.62 Q_d$ ซึ่งรูป 5-1 ถึงรูป 5-5 จะแสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของอัตราการไหลเท่ากับ 25 ลิตร / วินาที ด้วยเส้นหนา ในการพิจารณาค่า y/y_c ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาทีนั้น ใช้วิธีเทียบสัดส่วน (Interporation) โดยสมมติให้อัตราการไหลและ y/y_c มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงที่พิจารณาในช่วงแคบ ๆ

เมื่อพิจารณารูปตัดการไหล y/y_c ที่อัตราการไหลต่ำกว่า 20 ลิตร / วินาที จะเห็นว่า การไหลที่บริเวณรางเท 1 นั้น มีค่า y/y_c เข้าใกล้ 1 รูปแบบการไหลในบริเวณนั้นจะอยู่ในช่วงเปลี่ยน

แปลงจากการไหลได้วิกฤตเป็นการไหลเหนือวิกฤต และไม่มีเสถียรภาพ จึงตัดชุดข้อมูลเหล่านั้นออกในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหล

5.1.1.1 รูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวเรียบพลาสติกใส



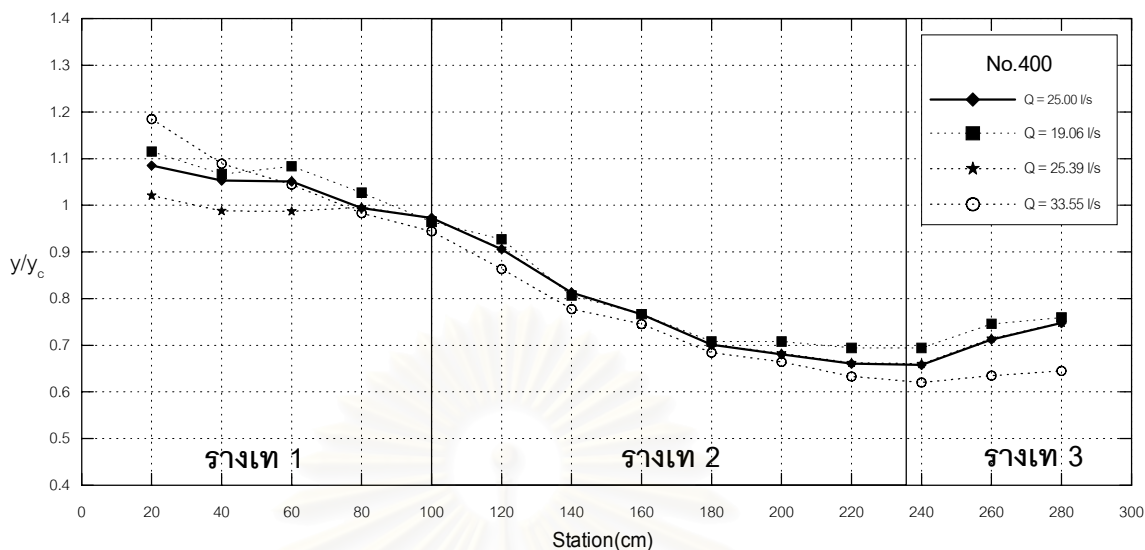
รูปที่ 5-1 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวเรียบพลาสติกใส

รางเท 1 มีการไหล 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการไหลแบบได้วิกฤต ($y/y_c > 1$) และช่วงหลังเป็นการไหลแบบเหนือวิกฤต ($y/y_c < 1$) โดยระยะเฉลี่ยที่เป็นการลึกลงการไหลวิกฤต ($y/y_c = 1$) คือที่ Station 70 cm. การไหลบริเวณ Station 20 ถึง Station 40 เป็นช่วงที่รูปแบบการไหลมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจทำให้การวัดความลึกการไหลผิดพลาดไปจากความเป็นจริงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ

รางเท 2 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความลาดเอียงสูง ($S_o = 0.17$) การไหลในช่วงรางเท 2 นี้จึงเป็นการไหลแบบเหนือวิกฤต ($y/y_c < 1$) โดยค่าความลึกการไหล (y) มีค่าลดลงตลอดช่วงรางเท 2 ค่า y/y_c ของแต่ละอัตราการไหลมีการกระจายตัวในช่วงแคบ ๆ โดยที่อัตราการไหลสูงจะมีค่า y/y_c ต่ำกว่าในกรณีที่อัตราการไหลต่ำ

รางเท 3 มีการเพิ่มขึ้นของค่า y/y_c เพราะมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด ค่าความลึกวิกฤตลดลง เมื่อความกว้างของทางน้ำเปิดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า y/y_c มีแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.1.2 รูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ 400

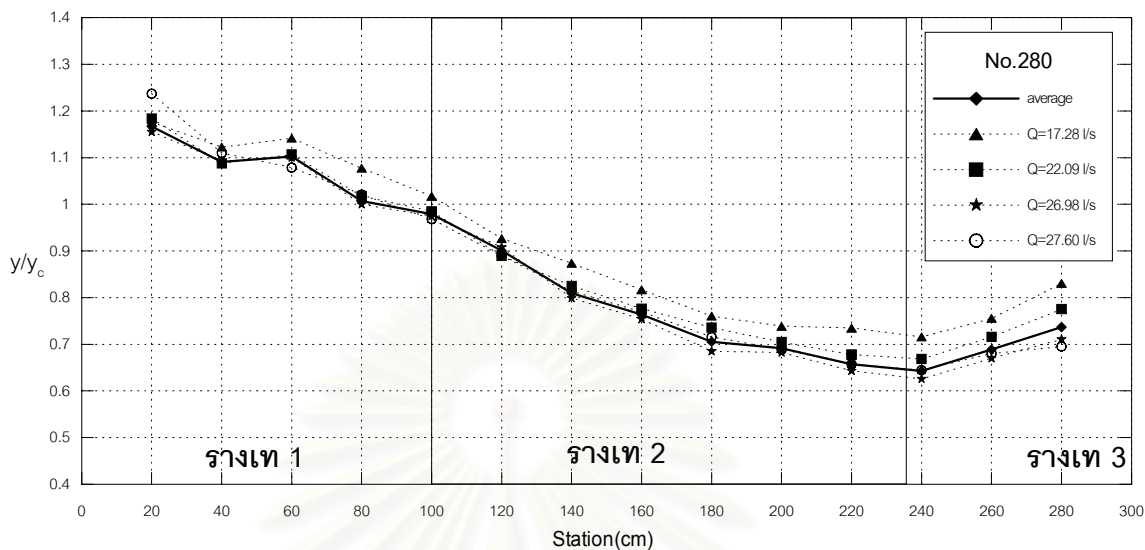


รูปที่ 5-2 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ 400

ช่วงรางเท 1 นั้นเกิดความแปรผันของค่า y/y_c สูง เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล จากการไหลได้วิกฤตเป็นการไหลเหนือวิกฤต และในรูป 5-2 บริเวณรางเท 1 เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนของความแปรผันของค่า y/y_c โดยผิวรางเทกระดาศทรายเบอร์ 400 นี้ การไหลในช่วงรางเท 1 เกือบทั้งหมดเป็นการไหลแบบได้วิกฤต ($y/y_c > 1$) และระยะเฉลี่ยที่เกิดความลึกวิกฤต ($y/y_c = 1$) อยู่ระหว่าง Station 80 cm. กับ Station 100 cm. เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดเท ค่า y/y_c ของทุกๆ อัตราการไหลมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

ที่รางเท 3 ค่า y/y_c มีค่าสูงขึ้น ตามเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น และที่อัตราการไหลสูงสุด (33.55 ลิตร/วินาที) มีค่า y/y_c ต่ำกว่าที่อัตราการไหลอื่นๆ ตลอดรางเท 2 และรางเท 3

5.1.1.3 รูปตัดการไหล y/y_c ของฝิวกระดาศทรายเบอร์ 280



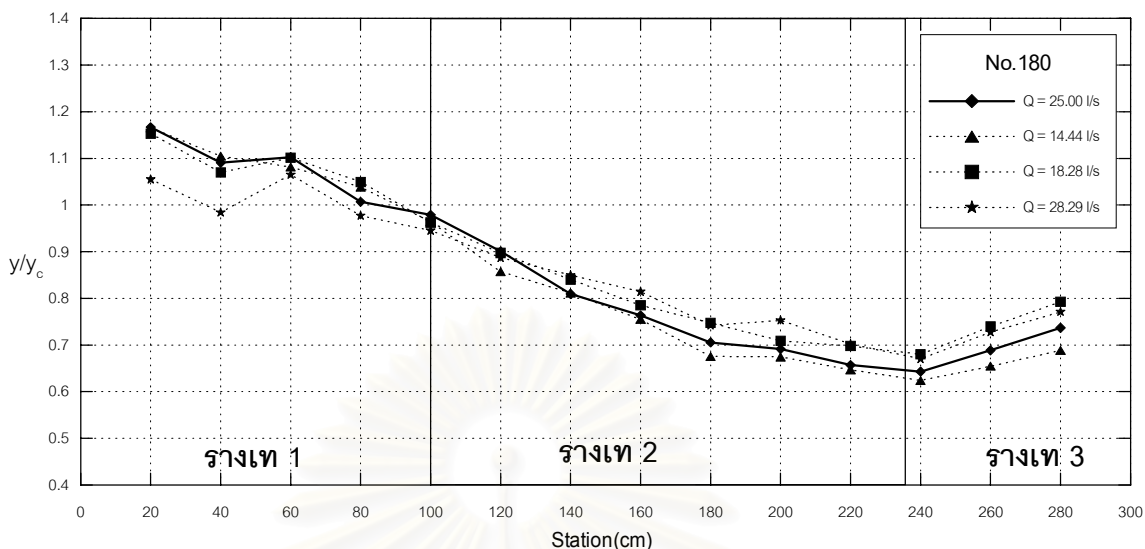
รูปที่ 5-3 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทฝิวกระดาศทรายเบอร์ 280

รางเท 1 เห็นการแปรผันของค่า y/y_c มาก เช่นเดียวกับฝิวรางเทอื่น ๆ และเกิดความลึกวิกฤตที่ Station 100 cm.

รางเท 2 มีการแปรผันของค่า y/y_c น้อยกว่าฝิวรางเทเบอร์ 180 เพราะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในช่วงที่ไม่กว้าง ในการทดลองพื้นฝิวนี้

รางเท 3 ค่า y/y_c มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับพื้นฝิวอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว

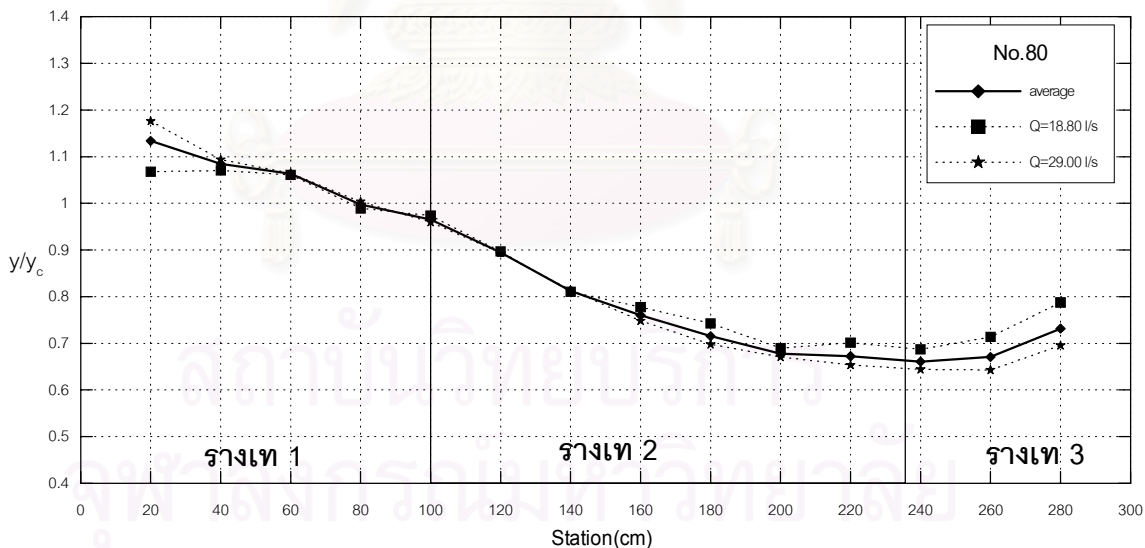
5.1.1.4 รูปตัดการไหล y/y_c ของฝิวรางเทกระดาดาชทรายเบอร์ 180



รูปที่ 5-4 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทฝิวกระดาดาชทรายเบอร์ 180

รางเท 1 มีการแปรผันของค่า y/y_c มาก เนื่องจากการเกิดคลื่นในช่วงนี้

5.1.1.5 รูปตัดการไหล y/y_c ของฝิวรางเทกระดาดาชทรายเบอร์ 80



รูปที่ 5-5 แสดงรูปตัดการไหล y/y_c ของรางเทฝิวกระดาดาชทรายเบอร์ 80

รางเท 1 มีการแปรผันของค่า y/y_c มาก เนื่องจากการเกิดคลื่นในช่วงนี้

รางเท 3 ที่อัตราการไหล 12.10 ลิตร / วินาที ที่ Station 280 อาจเกิดการผิวดลาดจาก

การวัด

5.1.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ต่างๆ

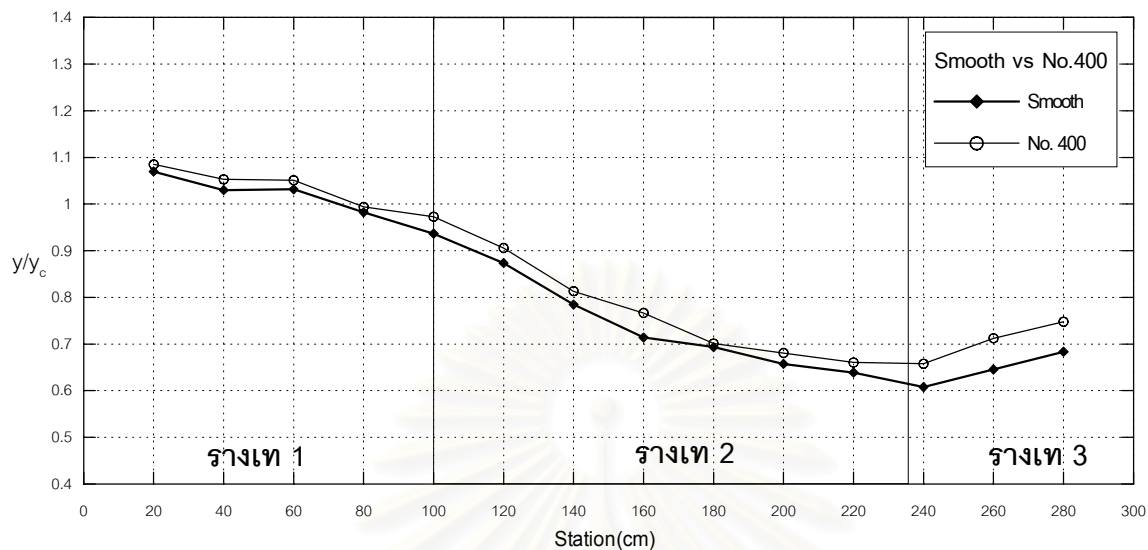
ในการเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของผิวรางเทที่มีความขรุขระแตกต่างกัน จะนำรูปตัดการไหลที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที มาทำการเปรียบเทียบ ซึ่งได้จากการเทียบสัดส่วน โดยจะพิจารณาความแตกต่างจากผิวเรียบเป็นหลัก ได้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังในตารางต่อไปนี้

ตาราง 5-1 แสดงเปอร์เซ็นต์แตกต่างของ y/y_c ของผิวเรียบกับผิวขรุขระต่างๆ ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที

Station (cm)	y/y_c ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที					เปอร์เซ็นต์แตกต่างจากผิวเรียบ (%)			
	ผิวเรียบ	No.400	No.280	No.180	No.80	No.400	No.280	No.180	No.80
20	1.070	1.085	1.167	1.087	1.134	1	9	2	6
40	1.030	1.053	1.091	1.080	1.085	2	6	5	5
60	1.031	1.051	1.103	1.077	1.063	2	7	4	3
80	0.982	0.994	1.007	1.001	0.998	1	3	2	2
100	0.936	0.973	0.979	0.951	0.965	4	5	2	3
120	0.874	0.906	0.901	0.890	0.895	4	3	2	2
140	0.784	0.813	0.810	0.847	0.813	4	3	8	4
160	0.714	0.767	0.763	0.805	0.760	7	7	13	6
180	0.693	0.701	0.705	0.744	0.715	1	2	7	3
200	0.657	0.681	0.691	0.738	0.678	4	5	12	3
220	0.639	0.660	0.657	0.701	0.672	3	3	10	5
240	0.608	0.658	0.643	0.673	0.661	8	6	11	9
260	0.646	0.712	0.689	0.731	0.671	10	7	13	4
280	0.683	0.748	0.737	0.778	0.732	9	8	14	7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 400



รูป 5-6 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที

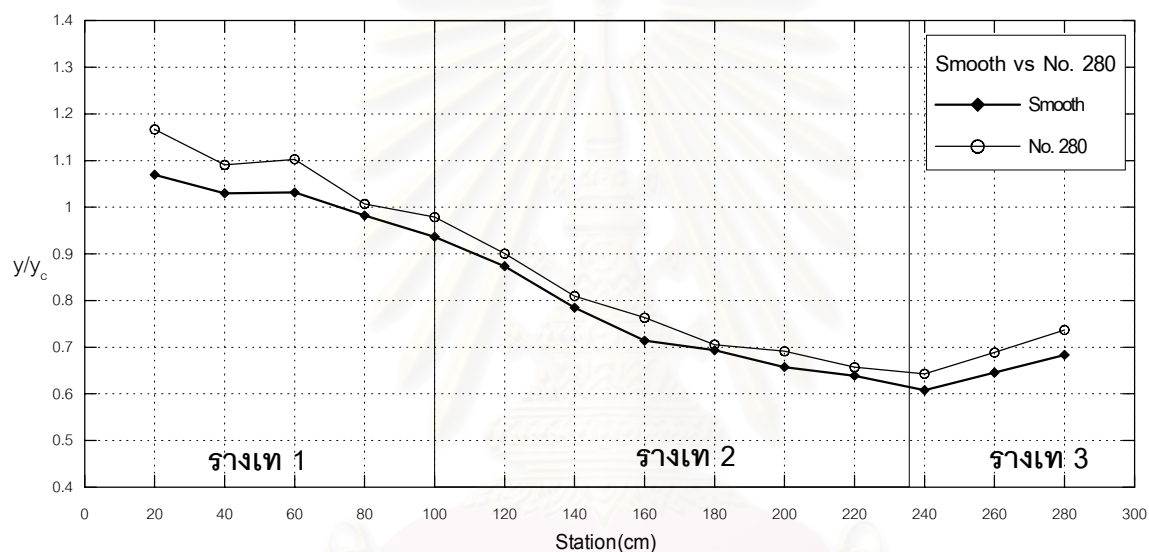
รางเท 1 ในช่วง 3 หน้าตัดแรกมีค่า y/y_c มากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าเป็นการไหลแบบใต้วิกฤติ และ 3 หน้าตัดต่อมามีค่า y/y_c น้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าเป็นการไหลแบบเหนือวิกฤติ เมื่อเปรียบเทียบค่า y/y_c ระหว่าง ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 400 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลเดียวกันนั้นความลึกการไหลบนรางเทกระดาศทรายเบอร์ 400 จะมีค่ามากกว่ารางเทผิวเรียบ 1 – 2 เปอร์เซ็นต์

รางเท 2 เป็นส่วนที่มีความลาดชันสูงการไหลเป็นการไหลเหนือวิกฤติทั้งสิ้น ความลึกการไหลเมื่อเปรียบเทียบค่า y/y_c ระหว่าง ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 400 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลเดียวกันนั้นความลึกการไหลบนรางเทกระดาศทรายเบอร์ 400 จะมีค่ามากกว่ารางเทผิวเรียบ ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์

รางเท 3 เป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางเท การไหลเป็นการไหลเหนือวิกฤติทั้งสิ้น ความลึกการไหลเมื่อเปรียบเทียบค่า y/y_c ระหว่าง ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 400 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลเดียวกันนั้นความลึกการไหลบนรางเทกระดาศทรายเบอร์ 400 จะมีค่ามากกว่ารางเทผิวเรียบ 8 - 10 เปอร์เซ็นต์

จากรูป 5-6 และการวิเคราะห์ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าความขรุขระมีผลต่อความลึกการไหลบนรางเทคือเมื่อ ความขรุขระของผิวรางเทเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความลึกการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเห็นว่าช่วงที่มีความลาดชันสูงจะมีความแตกต่างของความลึกการไหลมากกว่าช่วงที่มีความลาดชันต่ำกว่า และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางเทเป็นช่วงที่มีความแตกต่างของความลึกการไหลมากที่สุด

5.1.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 280



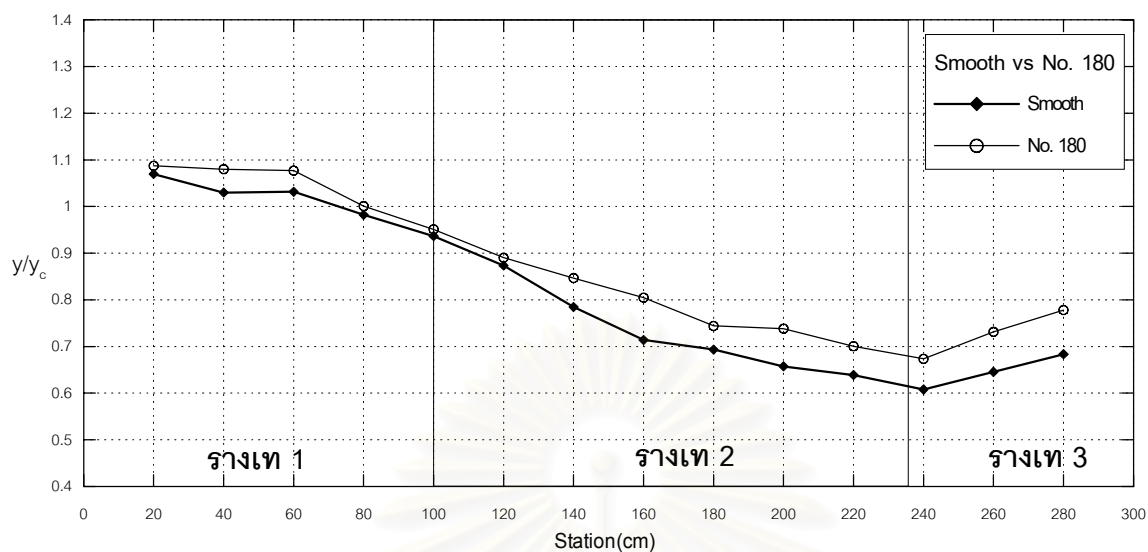
รูป 5-7 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที

รางเท 1 มีรูปแบบของรูปตัดการไหล เปรียบเทียบคล้ายกับกระดาศทรายเบอร์ 400 คือ มีทั้งการไหลแบบใต้วิกฤต และเหนือวิกฤต มีความแตกต่างของความลึกการไหลใน Station 20 cm. ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดจากความลึกการไหลที่หน้าตัดนี้ มีความผันแปรมาก จากการเกิดคลื่น ส่วนหน้าตัดอื่น ๆ มีความแตกต่างของความลึกการไหล 3 - 7 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลเดียวกัน

รางเท 2 เป็นการไหลแบบเหนือวิกฤต มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง 2 - 7 เปอร์เซ็นต์

รางเท 3 เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลเดียวกัน ค่าความลึกการไหลแตกต่างกัน 6 - 8 เปอร์เซ็นต์ จากตาราง 5-1 จะเห็นว่าความแตกต่างกับผิวเรียบของรางเททั้ง 3 ช่วงมีค่าความแตกต่างที่ใกล้เคียงกัน

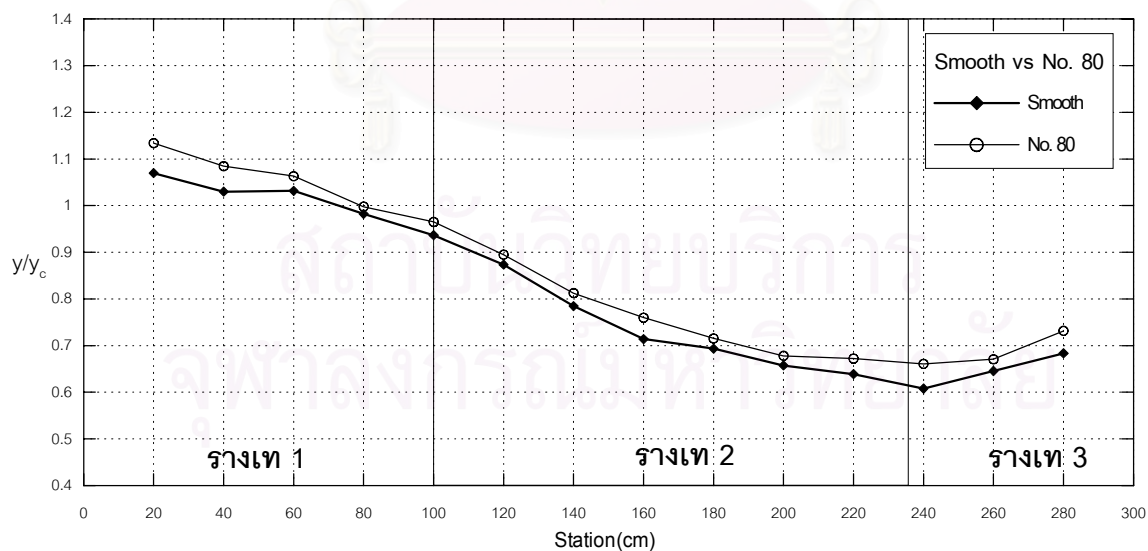
5.1.2.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของฝิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 180



รูป 5-8 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทฝิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที

รางเท 1 มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างต่ำ คือ 2 – 5 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะมากในช่วงรางเท 3 คือ 11 – 14 เปอร์เซ็นต์

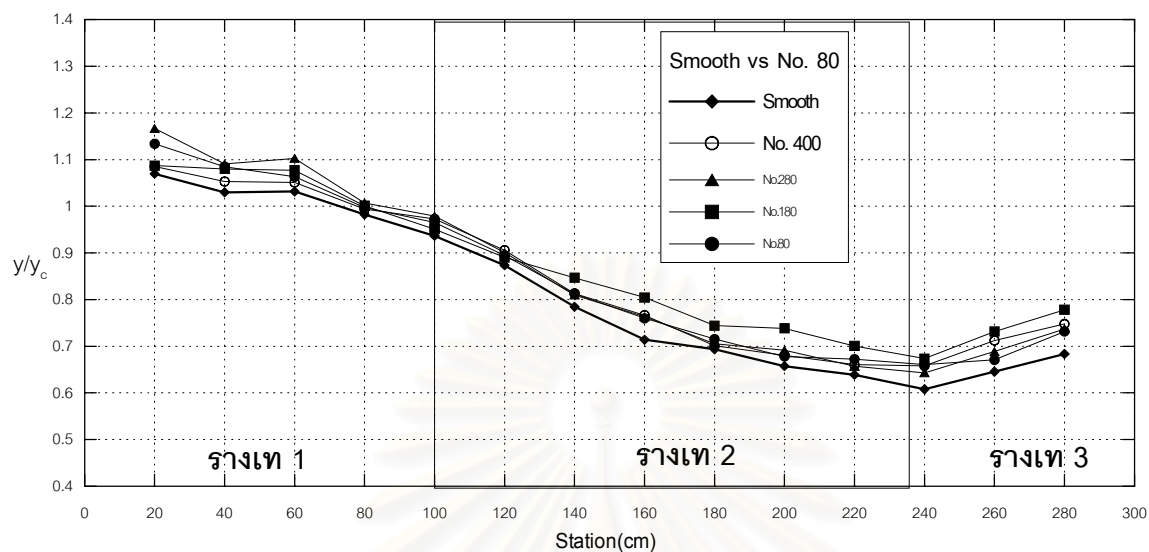
5.1.2.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของฝิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 80



รูป 5-9 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทฝิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/วินาที

ทั้ง 3 ช่วงรางเทมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 2 – 9 เปอร์เซ็นต์

5.1.2.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ต่าง ๆ



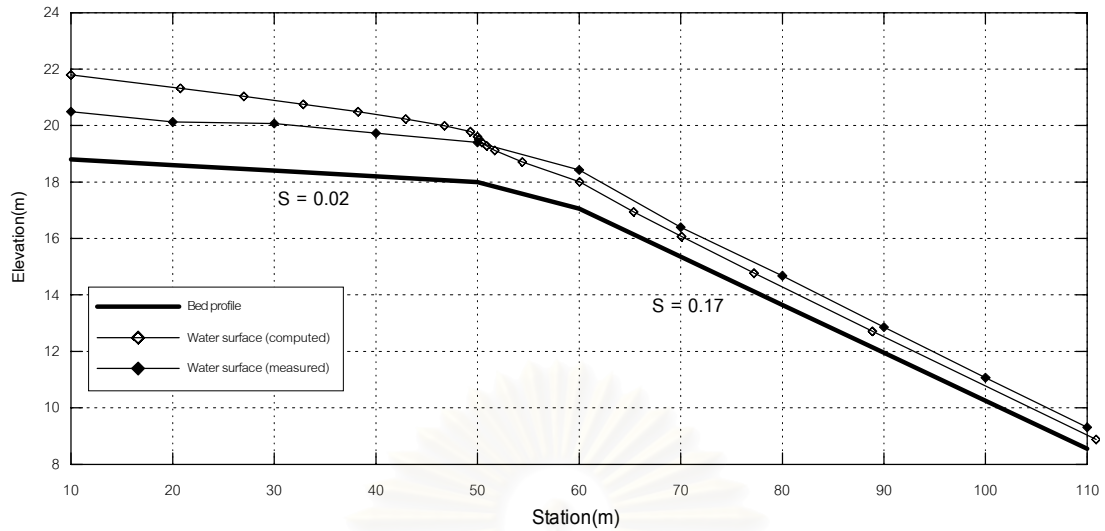
รูป 5-10 แสดงรูปตัด y/y_c ของรางเทผิวเรียบและกระดาศทรายเบอร์ต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที

เมื่อเปรียบเทียบรูปตัดการไหล y/y_c ของทุก ๆ ผิวความขรุขระที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที จะเห็นว่า รูปตัดการไหล y/y_c ของกระดาศทรายทุก ๆ เบอร์มีค่าสูงกว่าผิวเรียบ และมีค่าใกล้เคียงกัน

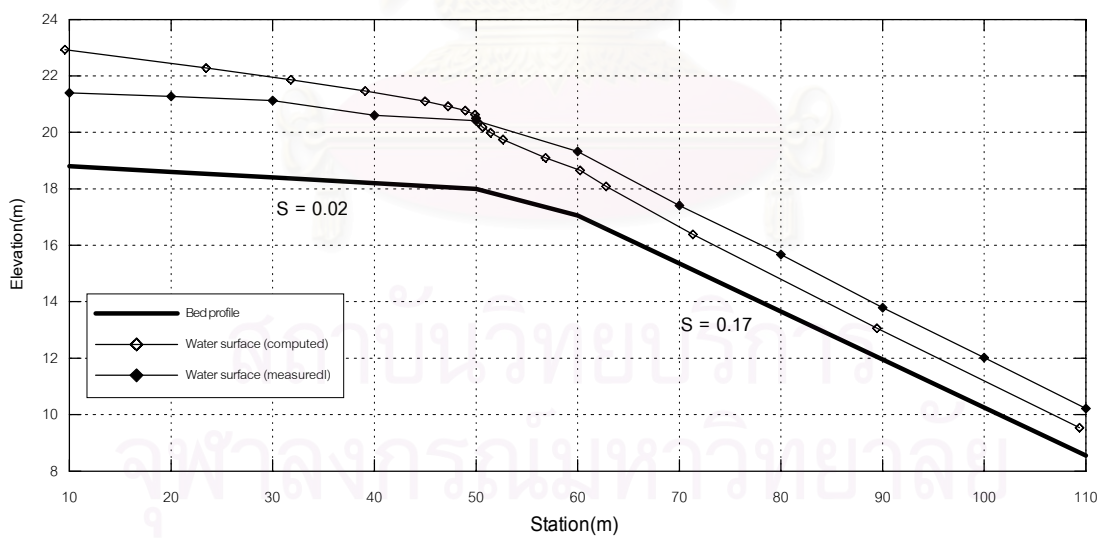
5.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของที่วัดจริงในแบบจำลองและการคำนวณจากสูตรของ Manning

การออกแบบกำแพงของรางเทของทางระบายน้ำล้นนั้น นิยมใช้สูตรของ Manning ในการออกแบบ ซึ่งใช้ร่วมกับสมการทั่วไปของการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย (general equation of gradually varied flow) และทำการประเมินค่าความขรุขระเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

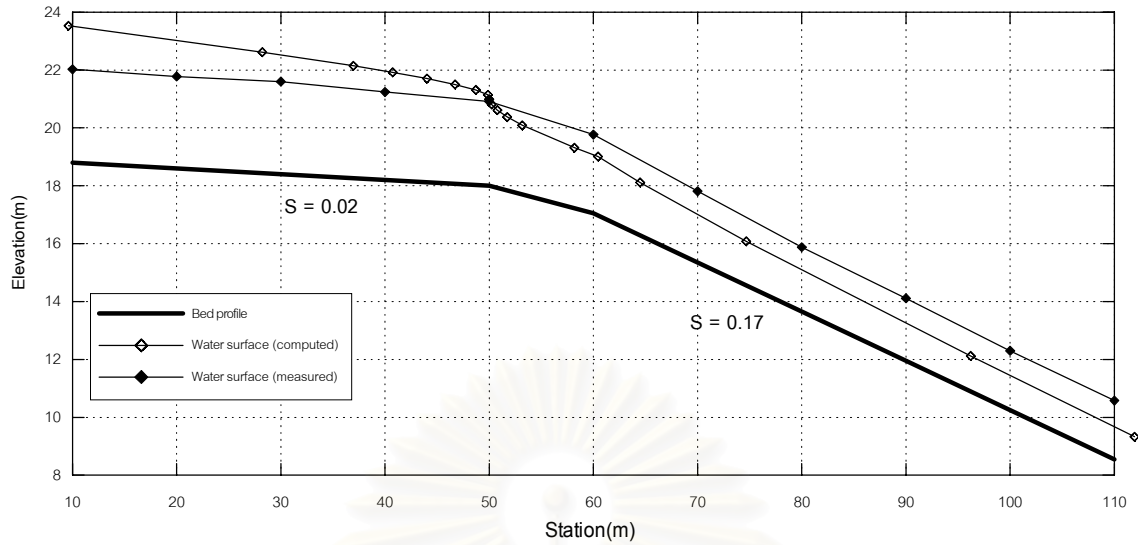
การวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของที่วัดได้จริงในแบบจำลองของรางเทผิวเรียบ กับการคำนวณจากสูตรของ Manning ของแต่ละอัตราการไหล เมื่อเทียบกับอัตราการไหลออกแบบ (design discharge ; Q_d)



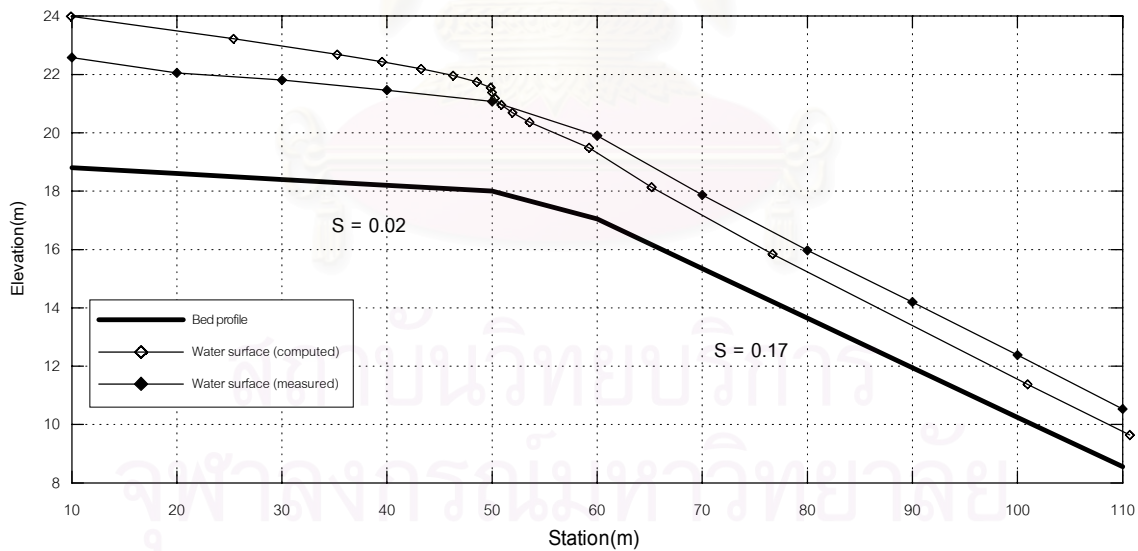
รูป 5-11 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $164.58 \text{ m}^3/\text{s}$



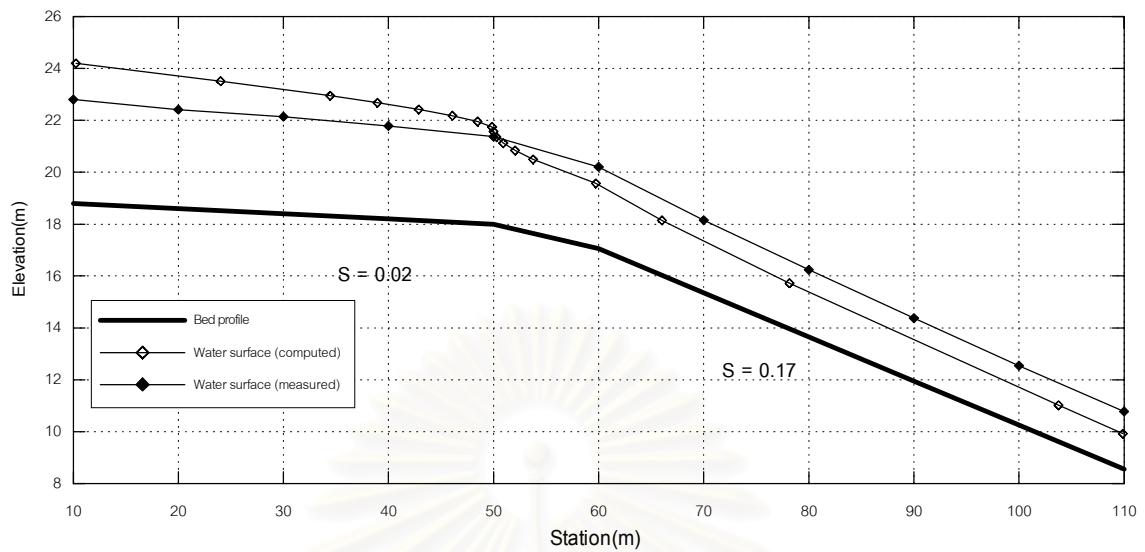
รูป 5-12 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $318.56 \text{ m}^3/\text{s}$



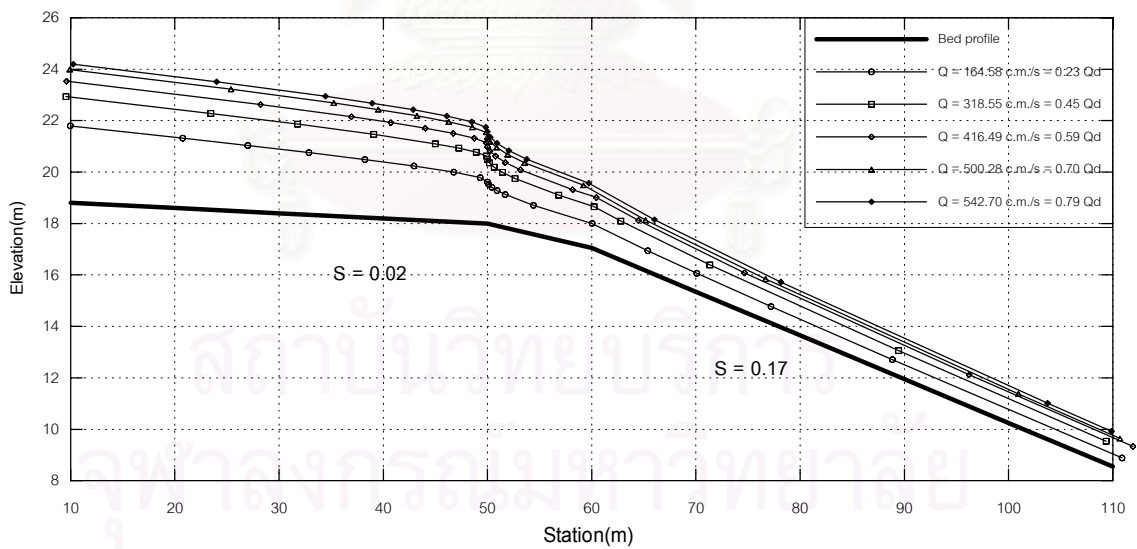
รูป 5-13 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางที่ไดจากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล 416.50 m³ / s



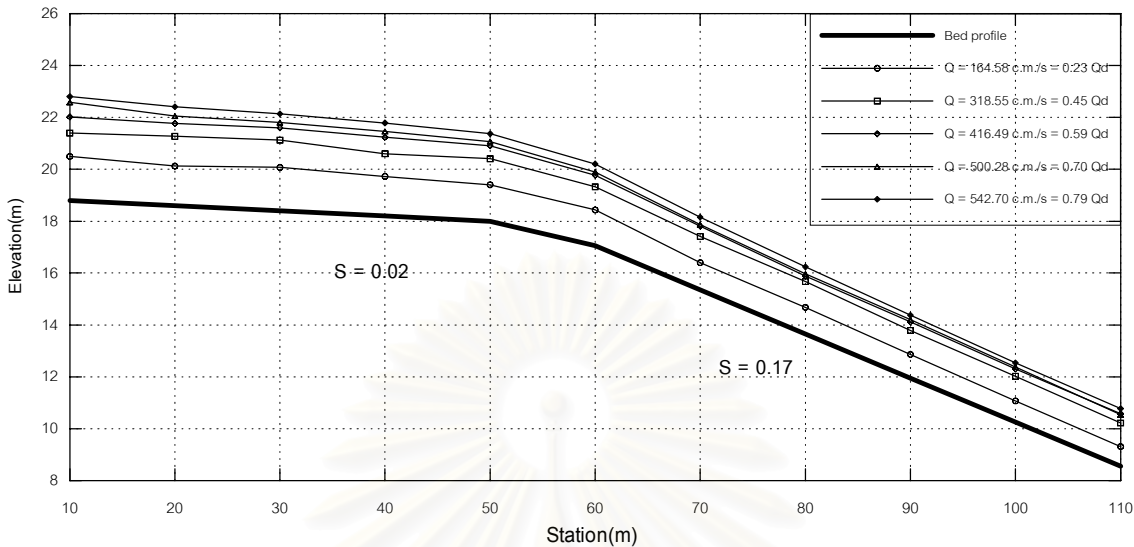
รูป 5-14 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางที่ไดจากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล 500.28 m³ / s



รูป 5-15 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $542.70 \text{ m}^3/\text{s}$



รูป 5-16 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการคำนวณของอัตราการไหลต่าง ๆ



รูป 5-17 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงของอัตราการไหลต่าง ๆ

ตาราง 5-2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความลึกการไหลที่ Station 10 m และ Station 110 m

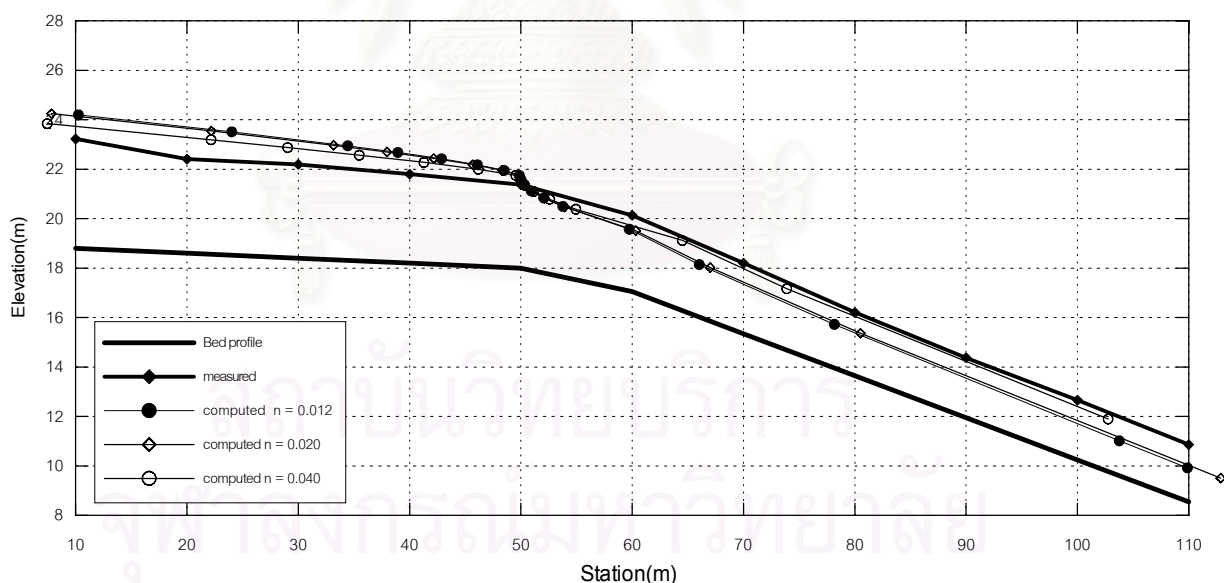
Q (m ³ /s)	y ₁ (m) ที่ Station 10 m.			y ₂ (m) ที่ Station 110 m.		
	แบบจำลอง	Manning	%diff	แบบจำลอง	Manning	%diff
164.58	1.697	3.00	55	0.760	0.48	84
318.55	2.600	4.11	36	1.669	0.86	79
416.49	3.222	4.72	37	2.029	1.08	77
500.28	3.781	5.18	47	1.987	1.27	75
542.70	4.001	5.40	44	2.225	1.37	75

จากรูป 5-11 ถึง 5-15 สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงของรางเท โดยที่รางเทด้านเหนือน้ำที่มีความลาดเอียงน้อย ($S_o = 0.02$) มีการไหลแบบใต้วิกฤต และส่วนของรางเทด้านท้ายน้ำที่มีความลาดเอียงมาก ($S_o = 0.17$) มีการไหลแบบเหนือวิกฤต

พิจารณารางเท้าน้ำด้านเหนือน้ำ จากรูป 5-11 ถึง 5-15 และตาราง 5-2 จะเห็นว่า ความลึกการไหลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรของแมนนิง มีค่ามากกว่าที่วัดได้จริงในแบบทดลอง 36 – 55 เปอร์เซ็นต์ โดยเปอร์เซ็นต์ความต่างที่นั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหล เมื่อพิจารณารางเท้าน้ำ จะเห็นว่าความลึกการไหลที่วัดได้จริงในแบบจำลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณของแมนนิง 75 – 84 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราการไหลเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ความต่างมีแนวโน้มที่จะลดลง

จากรูป 5-11 ถึง 5-15 จะเห็นว่าความลึกการไหลวิกฤติที่เกิดขึ้นในแบบจำลองนั้นจะเกิดขึ้นที่หน้าตัดการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียง ซึ่งเป็นหน้าตัดควบคุมในการคำนวณรูปตัดการไหลจากสูตรของแมนนิง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำหนดหน้าตัดการไหลที่จุดเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงนั้นถูกต้องและยืนยันการวัดความลึกการไหลในแบบจำลองว่าเป็นค่าที่มีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับหนึ่ง

จากรูป 5-11 ถึง 5-15 จะเห็นว่ารูปตัดการไหลที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลองและจากการคำนวณจากสูตรของแมนนิงมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งเบื้องต้นคาดว่าอาจเกิดจากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิงได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงจึงได้ทดลองปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงจาก 0.0120 เป็น 0.020 และ 0.040 ตามลำดับ จะได้รูปตัดการไหลดังรูป 5-18



รูป 5-18 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเท้าน้ำที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับการคำนวณจากสูตรของ Manning ที่อัตราการไหล $542.70 \text{ m}^3 / \text{s}$
เมื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิง

จากรูป 5-18 จะเห็นว่ารูปตัดการไหลที่ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่งมากขึ้นจะทำให้รูปตัดการไหลของที่วัดได้จริงในแบบจำลองและจากการคำนวณจากสูตรของแมนนิ่ง มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นแต่ยังมีความแตกต่างกันอยู่ในระดับหนึ่ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่งเท่ากับ 0.040 รูปตัดการไหลมีค่าใกล้เคียงกับที่วัดจริงในแบบจำลองมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่งต่ำ อาจทำให้ค่าที่คำนวณได้มีความแตกต่างจากที่วัดได้จริงในแบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่งที่ใช้ ($n=0.040$ ใน ต้นแบบ และ $n=0.021$ ในแบบจำลอง) มีค่าสูงมากเกินไปความเป็นจริงไม่น่าจะเป็นค่าที่ถูกต้อง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของพลาสติกที่ทำแบบจำลอง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีค่าประมาณ 0.010 ดังแสดงในตาราง 2-2

นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเมื่อมีการผสมของอากาศในการไหลบนรางเทที่มีความลาดชันแล้วจะทำให้สัมประสิทธิ์ความฝืดลดลง ดังนั้นจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของพลาสติกที่หาได้และที่ใช้ในการคำนวณนั้นเป็นค่าที่สมเหตุสมผล จากข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของรูปตัดการไหลที่วัดได้จริงในแบบจำลองและที่คำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่ง นั้นไม่น่าจะมาจากผลของการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่งที่ไม่ถูกต้อง

แสดงให้เห็นว่า ไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่งเพียงอย่างเดียวที่ทำให้รูปตัดการไหลที่วัดได้จริงในแบบจำลองและที่คำนวณได้แตกต่างกัน แต่อาจเกิดจากการคำนวณจากสูตรของแมนนิ่งนั้นคำนึงถึงความเสียดทานของการไหลเพียงอย่างเดียว และไม่ได้คำนึงถึงการแยกตัวจากการไหลและการผสมกันของอากาศที่เกิดขึ้นจึงทำให้รูปตัดการไหลมีความแตกต่างกันมาก อีกทั้งการไหลในแบบจำลองไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลบางส่วนอันเนื่องมาจากใช้อัตราส่วนย่อสูง หรือแบบจำลองมีขนาดเล็กเกินไป และอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการวัดอีกส่วนหนึ่ง

5.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประมาณค่าพลังงานสูญเสีย

พลังงานสูญเสียที่วัดได้ในแบบจำลองมีค่ามากกว่าการประมาณค่าจากสูตรของ Manning เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น พลังงานสูญเสียจากสูตรของ Manning มีค่าลดลง ต่างกับค่าที่วัดได้จริงในแบบจำลอง ที่ไม่มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล และเมื่อพิจารณาถึงหลักการใน HDC นั้น มีค่าพลังงานสูญเสียต่ำกว่าที่วัดได้จริงในแบบจำลอง แต่มีค่ามากกว่าค่าจากสูตรของ Manning อย่างไม่มีนัยสำคัญ จะเห็นว่าพลังงานสูญเสียมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลักษณะคล้ายกับค่าจากสูตรของ Manning

ตาราง 5-3 เปรียบเทียบพลังงานสูญเสียบนรางของทางระบายน้ำล้น

ผิวรางเท	อัตราการไหล (m^3/s)	พลังงานสูญเสียบนรางเท(m)		
		แบบจำลอง	Manning	HDC
ผิวเรียบ $n = 0.0120$	164.58($0.23Q_d$)	7.440	1.95	-
	318.55($0.45Q_d$)	8.645	1.16	-
	416.49($0.59Q_d$)	8.565	0.73	-
	500.28($0.70Q_d$)	7.525	0.69	-
	542.70($0.79Q_d$)	7.860	0.53	-
กระดาดทราย เบอร์ 400 $k_s = 0.004415$ m $n = 0.0129$	224.86($0.32Q_d$)	9.030	1.77	2.346
	247.49($0.35Q_d$)	9.020	1.71	2.170
	336.94($0.47Q_d$)	8.845	1.29	1.698
	448.84($0.63Q_d$)	8.485	0.94	1.368
	628.45($0.84Q_d$)	8.000	0.69	1.069
กระดาดทราย เบอร์ 280 $k_s = 0.005890$ m $n = 0.0145$	259.16($0.37Q_d$)	9.040	1.89	2.234
	305.30($0.43Q_d$)	9.050	1.81	1.970
	390.51($0.55Q_d$)	8.675	1.39	1.627
	476.95($0.67Q_d$)	8.275	1.21	1.397
	487.91($0.69Q_d$)	8.395	1.09	1.373
กระดาดทราย เบอร์ 180 $k_s = 0.011750$ m $n = 0.0169$	193.22($0.27Q_d$)	8.965	2.98	3.339
	255.27($0.36Q_d$)	8.985	2.46	2.652
	323.15($0.46Q_d$)	8.875	2.08	2.195
	500.10($0.70Q_d$)	8.280	1.54	1.577
	511.95($0.72Q_d$)	8.395	1.41	1.556
กระดาดทราย เบอร์ 80 $k_s = 0.022080$ m $n = 0.0197$	158.57($0.22Q_d$)	7.455	4.12	4.518
	213.90($0.30Q_d$)	8.900	3.42	3.553
	228.57($0.32Q_d$)	9.075	3.39	3.373
	332.34($0.47Q_d$)	8.875	2.63	2.505
	511.20($0.72Q_d$)	8.325	1.98	1.805

5.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียบนรางของผิวขรุขระต่าง ๆ

ในการพิจารณาเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียของแต่ละผิวรางเท อันได้แก่ ผิวเรียบ กระดาษทรายเบอร์ 400 , 280 , 180 และ 80 ตามลำดับ ได้ทำการเทียบสัดส่วน (interpolation) เพื่อที่จะเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียที่อัตราการไหลเดียวกัน ในการวิเคราะห์นี้เลือก 70 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราการไหลออกแบบ ($0.70Q_d$) ได้ค่าพลังงานสูญเสียของผิวรางเทต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยพลังงานสูญเสียที่วัดได้ในแบบจำลองที่คิดและไม่คิดการผสมของอากาศ สูตรของแมนนิ่งและจากเกณฑ์การออกแบบ ได้ค่าพลังงานสูญเสียและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับที่วัดได้จริงในแบบจำลองที่ไม่คิดการผสมของอากาศ ดังในตาราง 5-4 และรูป 5-18

ตาราง 5-4 พลังงานสูญเสียบนรางเทที่ $0.70 Q_d$ ของผิวรางเทต่าง ๆ

ผิว	พลังงานสูญเสียบนรางเท (m) ที่ $0.70 Q_d$							
	แบบจำลอง			Manning (3)	%diff ²	HDC (4)	%diff ³	%diff ⁴
	ผลของ air entrainment และ ความลาดเอียง							
	พิจารณา (1)	ไม่พิจารณา (2)	%diff ¹					
ผิวเรียบ	7.525	6.010	20	0.690	89	-	-	-
กระดาษทรายเบอร์ 400	8.323	6.980	16	0.857	88	1.268	82	1
กระดาษทรายเบอร์ 280	8.455	7.550	11	1.030	87	1.365	82	3
กระดาษทรายเบอร์ 180	8.280	6.940	16	1.540	78	1.577	77	1
กระดาษทรายเบอร์ 80	8.369	7.002	16	2.030	71	1.861	73	1
		เฉลี่ย	15.8		82.6		78.5	1.5

หมายเหตุ %diff¹ คือ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง (1) และ (2)

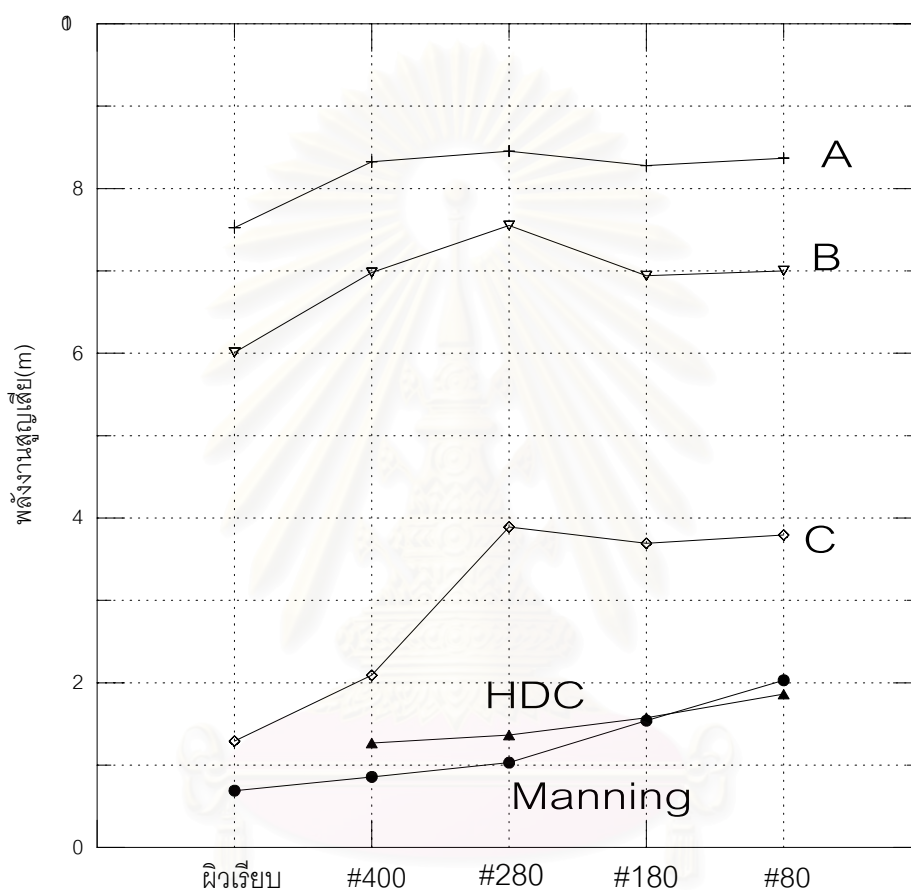
%diff² คือ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง (2) และ (3)

%diff³ คือ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง (2) และ (4)

%diff⁴ คือ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง (3) และ (4)

จากตาราง 5-4 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาผลของการผสมของอากาศ และ ผลของความลาดเอียง จะทำให้ค่าพลังงานสูญเสียที่วัดได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงทุกๆผิวความขรุขระ ที่อัตราการไหล $0.70 Q_d$ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 15.8 เปอร์เซ็นต์ พลังงานสูญเสียที่คำนวณได้จาก 2 วิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ย 1.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความแตก

ต่างระหว่างที่คำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่งและที่วัดได้ในแบบจำลอง ที่พิจารณาผลของการผสมของอากาศ และ ผลของความลาดเอียง นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 82.6 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับความแตกต่างระหว่างที่คำนวณได้จากหลักการใน HDC และที่วัดได้ในแบบจำลอง ที่พิจารณาผลของการผสมของอากาศ และ ผลของความลาดเอียง นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 78.5 เปอร์เซ็นต์



รูป 5-19 แสดงการเปรียบเทียบค่าพลังงานสูญเสียของผิวรางเทต่าง ๆ

เส้น A คือ ที่วัดได้จากแบบจำลองโดยไม่พิจารณาผลของการผสมของอากาศและความลาดเอียง

เส้น B คือ ที่วัดได้จากแบบจำลองโดยพิจารณาผลของการผสมของอากาศและความลาดเอียง โดยมี $C_e = 0.153$

เส้น C คือ ที่วัดได้จากแบบจำลองโดยพิจารณาผลของการผสมของอากาศและความลาดเอียง โดยมี $C_e = 0.380$

จากตาราง 5-4 และรูป 5-18 ค่าพลังงานสูญเสียที่ได้จากการวัด เมื่อค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น พลังงานสูญเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวรางเทเรียบ ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างผิวกระดาดทรายเบอร์ต่าง ๆ ค่าพลังงานสูญเสียมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าความขรุขระมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานสูญเสียที่คำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่ง มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้จากทฤษฎี boundary layer ในเกณฑ์การออกแบบ แต่มีค่าที่แตกต่างจากที่วัดจริงในแบบจำลองมาก ซึ่งที่วัดได้จริงในแบบจำลองมีค่าสูงกว่าจากการคำนวณทั้ง 2 วิธี ผลของค่าที่แตกต่างกันอาจมาจาก พลังงานสูญเสียที่คำนวณจากสูตรของแมนนิ่งและทฤษฎี boundary layer ในเกณฑ์การออกแบบคำนึงถึงความเสียดทานของการไหลเพียงอย่างเดียว ไม่ได้คำนึงถึงพลังงานสูญเสียจากการแยกตัวจากการไหลที่เกิดขึ้นจึงทำให้พลังงานสูญเสียที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จริงในแบบจำลอง

จากการคำนวณหาปริมาณของอากาศใช้สูตร $C_e = 0.9S$ เมื่อพิจารณาการผสมของอากาศ จะเห็นว่า พลังงานสูญเสียที่วัดได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงประมาณ 15.8 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการผสมของอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าพลังงานสูญเสียที่วัดได้ในแบบจำลองมีค่าสูงกว่า 2 วิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ส่วนพลังงานสูญเสียที่ยังมีค่าแตกต่างกันนั้นอาจมาจากการประเมินปริมาณอากาศที่ผสมคลาดเคลื่อนไปจากที่เกิดขึ้นจริงในแบบจำลอง เมื่อพิจารณาหาปริมาณอากาศที่ทำให้พลังงานสูญเสียมีค่าใกล้เคียงกันจะได้ปริมาณอากาศที่ผสม 38 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นในรูป 5-19 และแสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก จ.

ซึ่งปริมาณอากาศที่ทำให้พลังงานสูญเสียมีค่าใกล้เคียงกันนั้นสูงกว่าที่คำนวณได้ 22.2 เปอร์เซ็นต์ถือว่าแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สมเหตุผลผลที่จะเกิดขึ้นในแบบจำลอง ดังนั้นแสดงว่าพลังงานสูญเสียที่ยังแตกต่างกันอยู่ ระหว่างที่วัดในแบบจำลองซึ่งพิจารณาถึงผลของการผสมของอากาศและความลาดเอียงแล้ว กับ ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 วิธีนั้น ไม่ได้เกิดจากการประเมินปริมาณของอากาศที่เข้ามาผสมบนรางเทผิวดินเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากแบบจำลองอาจมีขนาดเล็กไป ทำให้ผลของความหนืดและผลของแรงตึงผิวที่ไม่ได้พิจารณาในการจำลองการไหลเพื่อสร้างแบบจำลอง โดยการจำลองสภาพการไหลเฉพาะผลของแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นกรณีทั่วไปของการจำลองการไหลในทางน้ำเปิด ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ของความเร็วและความลึกการไหลของแบบจำลองจากต้นแบบได้ ซึ่งจะทำให้ค่าพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดจากการไหล มีค่ามากกว่าที่เป็นจริง นอกจากนี้ผลของความหนืดและแรงตึงผิวที่จะมีค่อนข้างมากในแบบจำลองที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ไม่สามารถจำลองสภาพการไหลที่มีอากาศเข้าผสมผสมกันได้ ดังนั้นการหาปริมาณอากาศที่เข้าผสมกับน้ำในกรณีศึกษาจึงคำนวณจากการไหลที่แปลงมาจากข้อมูลการไหลที่วัดได้ในแบบจำลอง ก็น่าจะมีความคลาดเคลื่อน ทำให้ค่าของพลังงานสูญเสีย ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงไป

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

1. จากการวิเคราะห์รูปตัดความลึกการไหลต่อความลึกการไหลวิกฤติ ที่อัตราการไหล 25 ลิตร / วินาที หรือ 62 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลออกแบบ ได้ว่า ร่องทิวเรียบมีความลึกการไหลต่ำกว่ารางเทระดาศทรายเบอร์ 400 , เบอร์ 280 , เบอร์ 180 และ เบอร์ 80 ซึ่งความลึกการไหลมีแตกต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะสูงบริเวณรางเทที่มีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของหน้าตัดรางเท ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความลึกการไหลจะอยู่ในช่วง 6 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์

2. จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปตัดการไหลของที่วัดจริงในแบบจำลอง และการคำนวณจากสูตรของ Manning นั้น มีความแตกต่างกัน โดยรางเทเหนือน้ำที่มีความลาดเอียงเท่ากับ 0.02 ความลึกการไหลที่คำนวณจากสูตรของ Manning มีค่ามากกว่าที่วัดได้จริงในแบบจำลอง 36 – 55 เปอร์เซ็นต์ และรางเทด้านท้ายน้ำที่มีความลาดเอียงเท่ากับ 0.17 ความลึกการไหลที่วัดได้จริงในแบบจำลอง มีค่ามากกว่าที่คำนวณจากสูตรของ Manning 75 – 84 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้น อาจเกิดจากการคำนวณจากสูตรของแมนนิ่งนั้นคำนึงถึงความเสียดทานของการไหลเพียงอย่างเดียว และไม่ได้คำนึงถึงการแยกตัวจากการไหลและการผสมกันของอากาศที่เกิดขึ้นบนรางเทที่มีความลาดชัน จึงทำให้รูปตัดการไหลมีความแตกต่างกันมาก อีกทั้งการไหลในแบบจำลองไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของการไหลบางส่วนอันเนื่องมาจากใช้อัตราส่วนย่อสูง หรือแบบจำลองมีขนาดเล็กเกินไป และอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการวัดอีกส่วนหนึ่ง

3. จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าพลังงานสูญเสียใน ค่าพลังงานสูญเสียที่วัดได้จริงในแบบจำลองเมื่อ มีค่ามากกว่าการคำนวณจากสูตรของ Manning และทฤษฎี boundary layer ใน HDC พลังงานสูญเสียจากการคำนวณทั้ง 2 วิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ย 1.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความแตกต่างระหว่างที่คำนวณได้จากสูตรของแมนนิ่งและที่วัดได้ในแบบจำลอง ที่พิจารณาผลของการผสมของอากาศ และ ผลของความลาดเอียง นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 82.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพลังงานสูญเสียที่วัดได้จริงในแบบจำลองและที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธีนั้นแตกต่างกัน อาจเกิดจากการคำนวณนั้นคำนึงถึงพลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียด

ทานเพียงอย่างเดียว ไม่ได้คำนึงถึงพลังงานสูญเสียเนื่องจากการแยกตัวจากการไหล และ การผสมกันของอากาศที่เกิดขึ้นจึงทำให้พลังงานสูญเสียมีค่าแตกต่างกันมาก อีกทั้งการทดลองในแบบจำลองที่มีขนาดเล็กเกินไป ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลได้เหมือนจริงทั้งหมด

4. พลังงานสูญเสียที่วัดได้จริงในแบบจำลองรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ต่าง ๆ มีค่ามากกว่าพลังงานสูญเสียของผิวรางเทเรียบ และความแตกต่างของพลังงานสูญเสียบนรางเทผิวกระดาศทรายเบอร์ต่าง ๆ นั้น ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระและพลังงานสูญเสียบนรางเทได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อไป

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป มีดังนี้

1. การศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลองทางระบายน้ำล้นของโครงการน้ำแหง ซึ่งมีทางระบายน้ำล้นแบบสันโค้งแบบโอ๊ก ที่สามารถพบเห็นในโครงการชลประทานขนาดเล็กและขนาดกลางอยู่มากมาย ดังนั้นการศึกษานี้ น่าจะเป็นแนวทางในการดำเนินงานและการออกแบบปรับปรุงในโครงการที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของคุณค่าความขรุขระที่ผิวของรางเทในช่วงค่าที่แตกต่างจากการศึกษาครั้งนี้ และการจำลองความขรุขระทางชลศาสตร์ของวัสดุอื่นๆหลายหลากชนิดไม่จำกัดเฉพาะกระดาศทราย

3. พฤติกรรมการไหลบนรางเทมีความซับซ้อน ไม่สามารถคำนวณจากสูตรต่างๆหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นในการศึกษาออกแบบโครงสร้างนั้น แบบจำลองทางกายภาพมีความสำคัญทำให้ การออกแบบก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและประหยัดค่าใช้จ่าย ดังการศึกษานี้เป็นตัวอย่าง ถ้าใช้สมการของแมนนิ่งในการหารูปตัดการไหลเพื่อออกแบบกำแพงของทางระบายน้ำล้นก็จะทำให้กำแพงมีขนาดไม่เหมาะสมและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง หรือ ถ้าใช้สมการของแมนนิ่งในการหาพลังงานสูญเสียบนรางเทก็จะได้อาคารสลายพลังงานที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น

4. เนื่องจากผลของความหนืดและแรงตึงผิวที่ก่อให้เกิดความผิดเพี้ยน ของความเร็วและความลึกการไหล ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมการไหลจากแบบจำลอง ควรจะต้องมีการคำนึงถึง

ขนาดของแบบจำลองด้วย ควรจะใช้ขนาดที่เหมาะสมเพื่อจะได้ข้อมูลที่ถูกต้อง ตลอดจนการปรับแบบจำลองให้เกิดสภาพการไหลที่มีความเหมือนต้นแบบ

5. หน่วยงานและบุคลากรที่เกี่ยวข้อง ควรให้ความสำคัญและความสนใจในการหาคำตอบของพฤติกรรมการไหลบนรางเททางระบายน้ำฝน จากการศึกษาจากแบบจำลองที่เหมาะสม และจากการศึกษาจากต้นแบบจริงที่มีปรากฏอยู่ เพื่อที่จะก่อให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมการไหลอย่างแท้จริง อันเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณากำหนดเกณฑ์การดำเนินการ และปรับปรุงโครงการที่มีอยู่แล้วให้ได้ประสิทธิภาพของโครงการสูงสุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชัยพันธุ์ รักรวิชัย, ชลศาสตร์ของทางน้ำเปิด, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
- ธงชัย บุญสม, 2527, การเพิ่มตัวทำลายพลังงานเข้าไปใน ฟลอร์ บล็อก, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิเชษฐ รัตนปราสาทกุล, 2541, การจำลองพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของทางระบายน้ำล้นที่มีสัน ฝายแนวไม่ตรง, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิญญู กุลศิริมงคล, 2525, การไหลในทางน้ำเปิดที่มีพื้นผิวเป็นสังกะสีลูกฟูก, วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาต่างประเทศ

- Chanson, H., "Air Entrainment in Chutes and spillway," Research Report No.CE133, The University of Queensland, 1992.
- Chow, V. T., Open Channel Hydraulic, McGraw-Hill Company, 1959.
- Hager, W. H., Energy Dissipaters and Hydraulic jump, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- Henderson, F. M., Open Channel Flow, Mac Millan Publishing, 1966.
- Hughes, W. C., Flack, J. E., "Hydraulic Jump Properties Over Rough Bed," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110, No.12, 1984, pp.1755-1771.
- U.S. Army Corps of Engineering, Hydraulic Design Criteria.
- U.S. Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratory Techniques, reprint 1986.
- U.S. Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratory Practice, Engineering Monograph No.18, 1953.
- Ivicsics, L., Hydraulic Models, Budapest: Research Institute for Water Resources Development, 1975.

- Knight, D. W., Macdonald, J.A., "Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness," *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol.105, No.6, 1979, pp.675-690.
- Kouwen, N., "Flexible Roughness in Open Channel," *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol.99, No.5, 1973, pp.713-728.
- Mohamed Ali, H. S. "Effect of Roughened-Bed Stilling Basin on Length of Rectangular Hydraulic Jump," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.117, No.1, 1991, pp.83-93.
- Novak, P., and others, *Hydraulic Structures*, E & FN Spon, 1996
- Rajaratnam, N., Muralidhar, D., "Roughness Effects on Rectangular Free Overfall," *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol.102, No.5, 1976, pp. 599-614.
- Streeter, V. L., and others, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Company, 1981.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

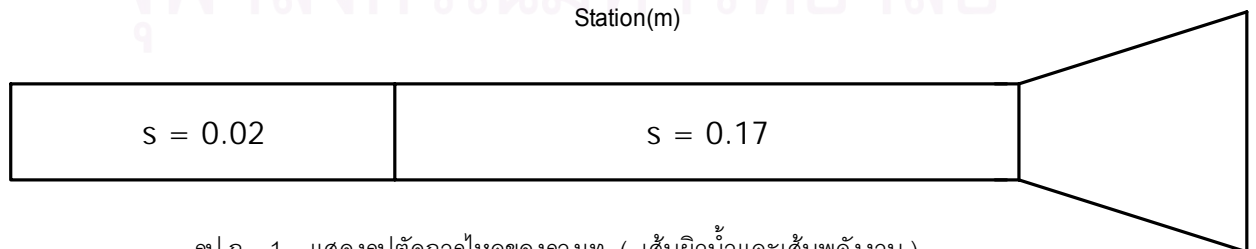
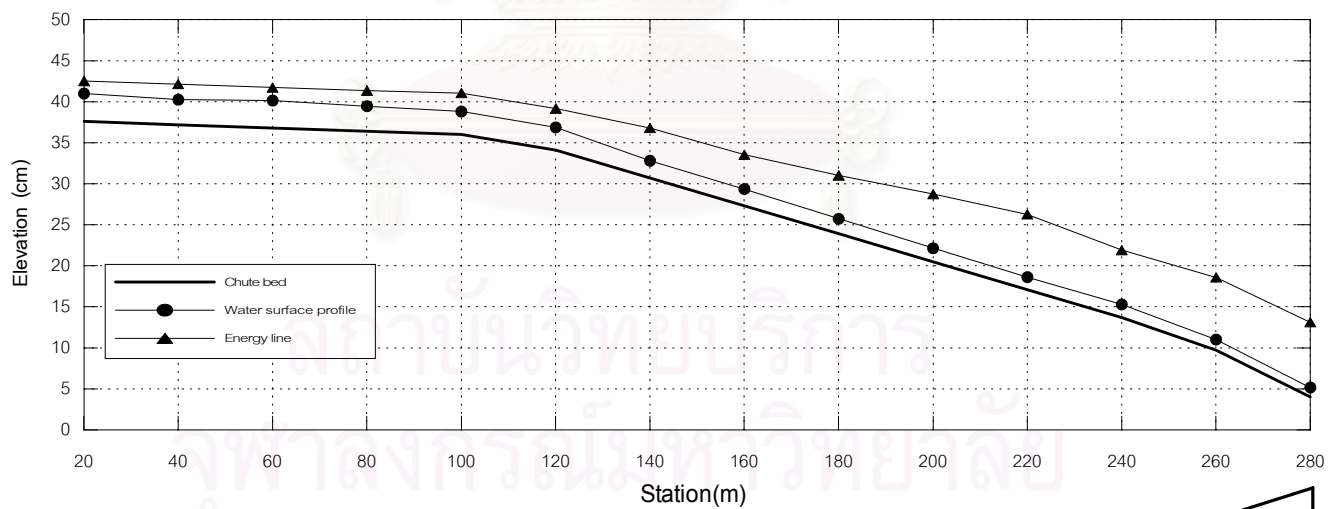
ผลการทดลองจากแบบจำลอง

ผลจากการทดลองที่อัตราการไหลต่าง ๆ และ ผิวของรางเทชนิดต่างๆนำมาคำนวณได้ค่าตามตาราง ก-1 ถึง ก-25 ดังนี้คือ

1. ลำดับของข้อมูลในแต่ละการทดลอง
2. ระยะทางตามแนวศูนย์กลางที่ทำการวัดข้อมูลในแบบจำลอง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
3. ระดับพื้นของแบบจำลอง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร อ้างอิงจากระดับพื้นห้องปฏิบัติการเป็นระดับ +0.00 เซนติเมตร
4. ความลึกการไหลที่วัดได้จากแบบจำลอง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
5. ความกว้างของรางเทของแบบจำลอง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
6. อัตราการไหลต่อความกว้าง 1 เมตร มีหน่วยเป็น ลิตรต่อวินาทีต่อเมตร
7. ความลึกวิกฤติที่คำนวณได้จาก $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
8. พื้นที่หน้าตัดการไหล มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
9. ความเร็วการไหลได้จากการคำนวณ มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที
10. ระดับพลังงาน มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
11. อัตราส่วนระหว่าง ความลึกการไหลต่อความลึกวิกฤติ
12. อัตราส่วนระหว่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุท้องน้ำต่อความลึกการไหล
13. ฟรูดนัมเบอร์ คำนวณได้จาก $F = \frac{v}{\sqrt{gy}}$

ตาราง ก-1 ผลการทดลอง A-1

smooth $Q = 9.31$ l/s overflow depth = 1.95 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	3.394	50.00	18.62	3.282	169.72	54.85	42.528	1.034	-	0.95
2	40	37.20	3.050	50.00	18.62	3.282	152.50	61.05	42.150	0.929	-	1.12
3	60	36.80	3.344	50.00	18.62	3.282	167.22	55.67	41.724	1.019	-	0.97
4	80	36.40	3.057	50.00	18.62	3.282	152.83	60.92	41.348	0.931	-	1.11
5	100	36.00	2.803	50.00	18.62	3.282	140.17	66.42	41.052	0.854	-	1.27
6	120	34.10	2.767	50.00	18.62	3.282	138.33	67.30	39.175	0.843	-	1.29
7	140	30.70	2.100	50.00	18.62	3.282	105.00	88.67	36.807	0.640	-	1.95
8	160	27.30	2.057	50.00	18.62	3.282	102.83	90.53	33.534	0.627	-	2.02
9	180	23.90	1.827	50.00	18.62	3.282	91.33	101.9	31.023	0.557	-	2.41
10	200	20.50	1.637	50.00	18.62	3.282	81.83	113.8	28.734	0.499	-	2.84
11	220	17.10	1.520	50.00	18.62	3.282	76.00	122.5	26.268	0.463	-	3.17
12	240	13.70	1.580	51.67	18.02	3.211	81.63	114	21.909	0.492	-	2.90
13	260	9.70	1.310	58.33	15.96	2.961	76.42	121.8	18.575	0.442	-	3.40
14	280	4.02	1.147	65.00	14.32	2.755	74.53	124.9	13.119	0.416	-	3.72

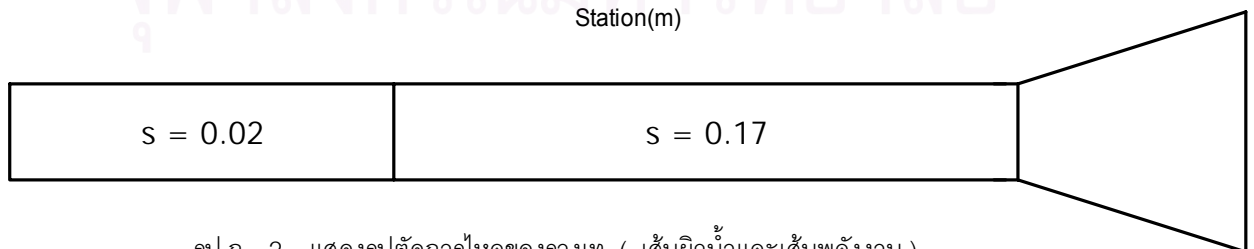
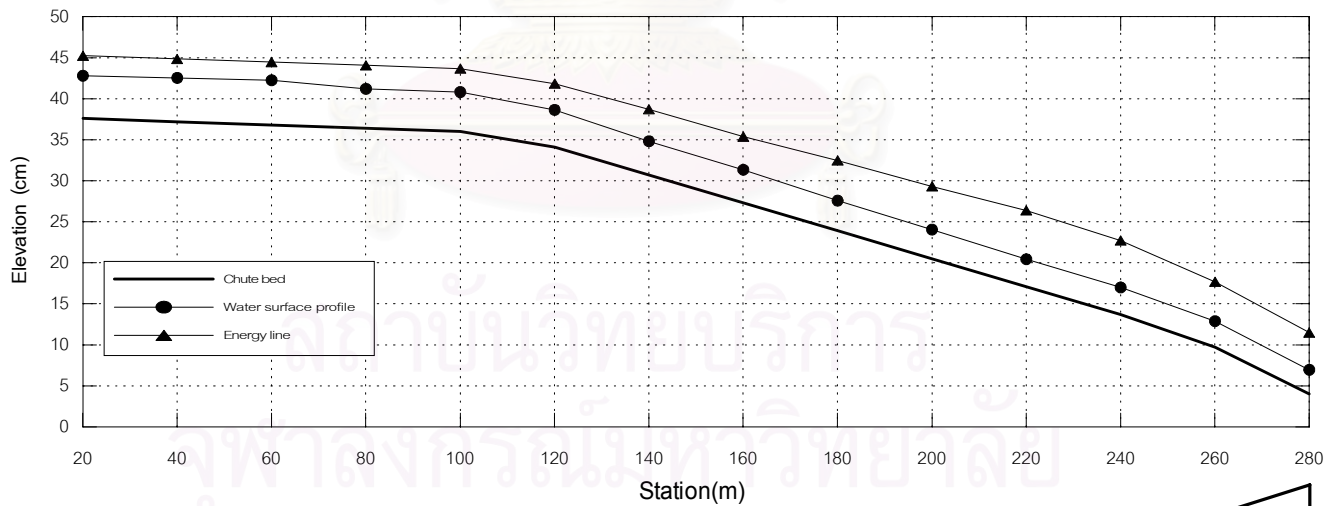


รูป ก-1 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวน้ำเรียบ อัตราการไหล = 9.31 l/s

ตาราง ก-2 ผลการทดลอง A-2

smooth $Q = 18.02 \text{ l/s}$ overflow depth = 2.90 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	5.200	50.00	36.04	5.097	260.00	69.31	45.248	1.020	-	0.97
2	40	37.20	5.344	50.00	36.04	5.097	267.22	67.43	44.862	1.049	-	0.93
3	60	36.80	5.450	50.00	36.04	5.097	272.50	66.13	44.479	1.069	-	0.90
4	80	36.40	4.803	50.00	36.04	5.097	240.17	75.03	44.073	0.942	-	1.09
5	100	36.00	4.813	50.00	36.04	5.097	240.67	74.88	43.671	0.944	-	1.09
6	120	34.10	4.540	50.00	36.04	5.097	227.00	79.38	41.852	0.891	-	1.19
7	140	30.70	4.120	50.00	36.04	5.097	206.00	87.48	38.720	0.808	-	1.38
8	160	27.30	4.043	50.00	36.04	5.097	202.17	89.13	35.393	0.793	-	1.42
9	180	23.90	3.677	50.00	36.04	5.097	183.83	98.02	32.474	0.721	-	1.63
10	200	20.50	3.543	50.00	36.04	5.097	177.17	101.71	29.316	0.695	-	1.73
11	220	17.10	3.337	50.00	36.04	5.097	166.83	108.01	26.383	0.655	-	1.89
12	240	13.70	3.293	51.67	34.88	4.987	170.16	105.90	22.710	0.660	-	1.86
13	260	9.70	3.187	58.33	30.89	4.599	185.89	96.94	17.676	0.693	-	1.73
14	280	4.02	2.940	65.00	27.72	4.279	191.10	94.30	11.492	0.687	-	1.76

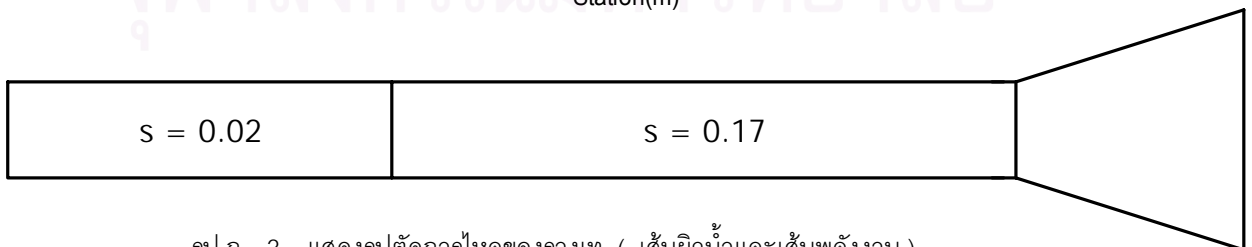
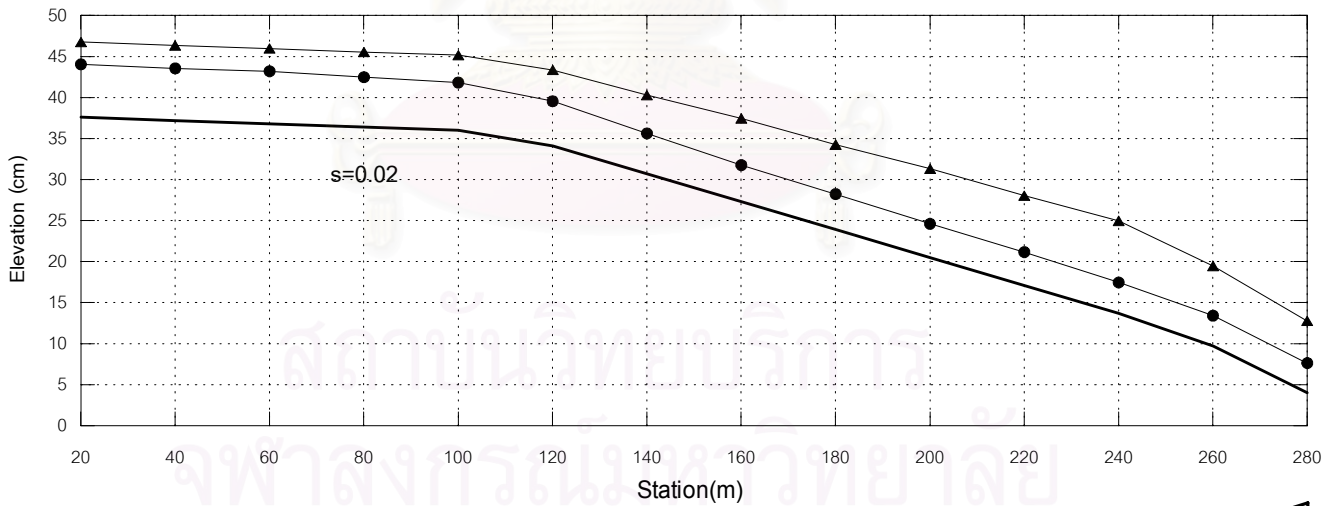


รูป ก-2 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวรางเทเรียบ อัตราการไหล = 18.02 l/s

ตาราง ก-3 ผลการทดลอง A-3

smooth Q = 23.56 l/s overflow depth = 3.46 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	6.444	50.00	47.12	6.094	322.22	73.12	46.769	1.057	-	0.92
2	40	37.20	6.350	50.00	47.12	6.094	317.50	74.20	46.356	1.042	-	0.94
3	60	36.80	6.400	50.00	47.12	6.094	320.00	73.63	45.963	1.050	-	0.93
4	80	36.40	6.080	50.00	47.12	6.094	304.00	77.50	45.541	0.998	-	1.00
5	100	36.00	5.823	50.00	47.12	6.094	291.17	80.92	45.100	0.956	-	1.07
6	120	34.10	5.447	50.00	47.12	6.094	272.33	86.51	43.361	0.894	-	1.18
7	140	30.70	4.923	50.00	47.12	6.094	246.17	95.71	40.292	0.808	-	1.38
8	160	27.30	4.460	50.00	47.12	6.094	223.00	105.65	37.441	0.732	-	1.60
9	180	23.90	4.330	50.00	47.12	6.094	216.50	108.80	34.266	0.711	-	1.67
10	200	20.50	4.103	50.00	47.12	6.094	205.17	114.83	31.324	0.673	-	1.81
11	220	17.10	4.057	50.00	47.12	6.094	202.83	116.15	28.033	0.666	-	1.84
12	240	13.70	3.753	51.67	45.60	5.962	193.92	121.49	24.976	0.630	-	2.00
13	260	9.70	3.707	58.33	40.39	5.499	216.22	108.96	19.458	0.674	-	1.81
14	280	4.02	3.610	65.00	36.25	5.116	234.65	100.40	12.768	0.706	-	1.69

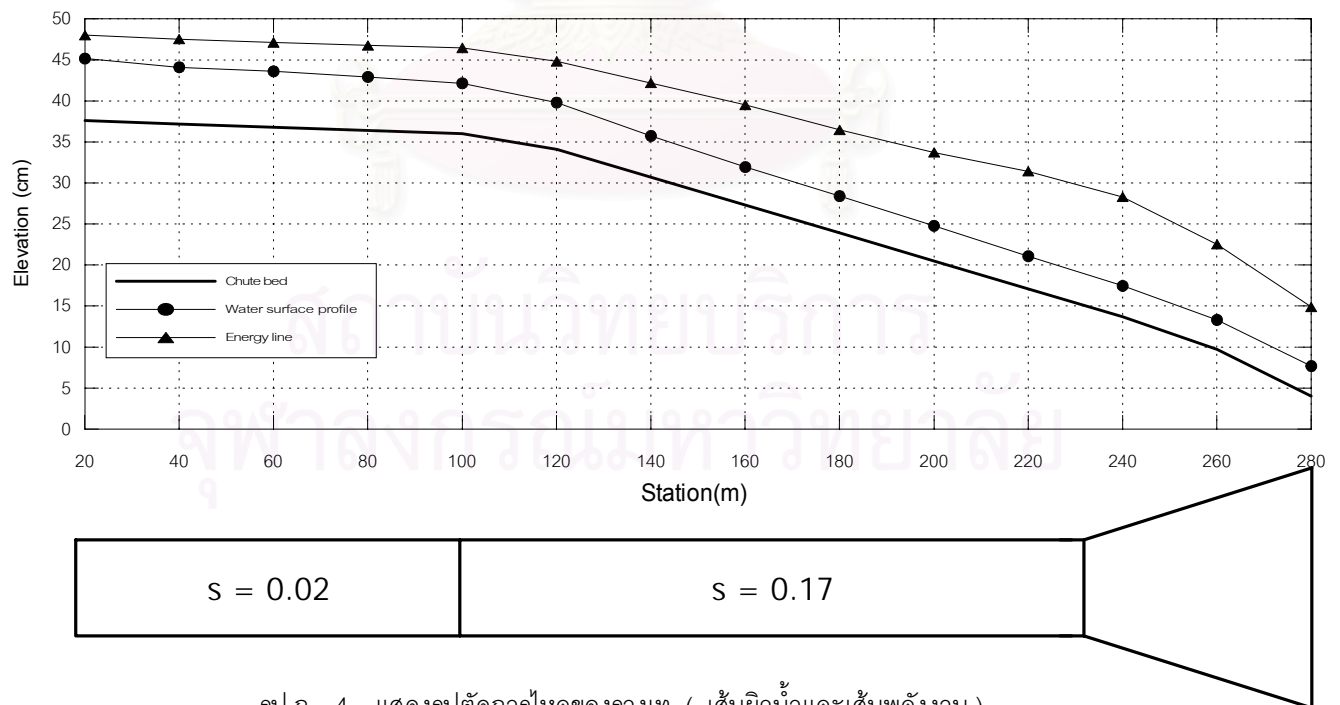


รูป ก-3 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวงูรางเทเรียบ อัตราการไหล = 23.56 l/s

ตาราง ก-4 ผลการทดลอง A-4

smooth $Q = 28.30 \text{ l/s}$ overflow depth = 3.62 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	7.561	50.00	56.60	6.886	378.06	74.86	48.017	1.098	-	0.87
2	40	37.20	6.906	50.00	56.60	6.886	345.28	81.96	47.530	1.003	-	1.00
3	60	36.80	6.806	50.00	56.60	6.886	340.28	83.17	47.131	0.988	-	1.02
4	80	36.40	6.520	50.00	56.60	6.886	326.00	86.81	46.761	0.947	-	1.09
5	100	36.00	6.147	50.00	56.60	6.886	307.33	92.08	46.468	0.893	-	1.19
6	120	34.10	5.697	50.00	56.60	6.886	284.83	99.36	44.828	0.827	-	1.33
7	140	30.70	5.033	50.00	56.60	6.886	251.67	112.5	42.178	0.731	-	1.60
8	160	27.30	4.637	50.00	56.60	6.886	231.83	122.1	39.532	0.673	-	1.81
9	180	23.90	4.500	50.00	56.60	6.886	225.00	125.8	36.463	0.653	-	1.89
10	200	20.50	4.270	50.00	56.60	6.886	213.50	132.6	33.725	0.620	-	2.05
11	220	17.10	3.973	50.00	56.60	6.886	198.67	142.4	31.416	0.577	-	2.28
12	240	13.70	3.757	51.67	54.77	6.737	194.09	145.8	28.292	0.558	-	2.40
13	260	9.70	3.607	58.33	48.51	6.214	210.39	134.5	22.529	0.580	-	2.26
14	280	4.02	3.657	65.00	43.54	5.781	237.68	119.1	14.902	0.632	-	1.99

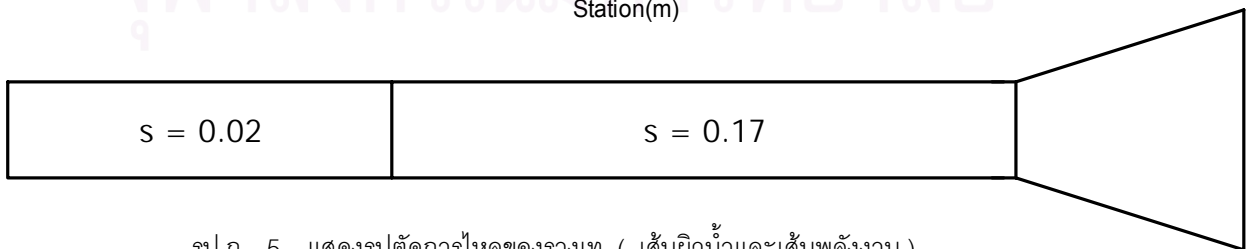
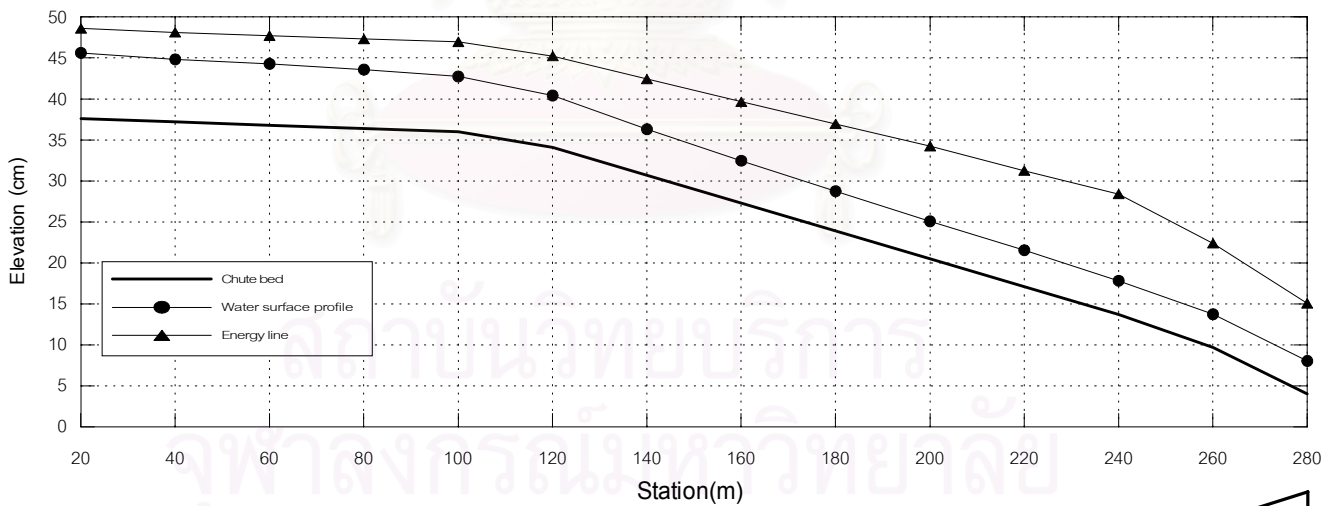


รูป ก-4 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวนางเทเรียบ อัตราการไหล = 28.30 l/s

ตาราง ก-5 ผลการทดลอง A-5

smooth Q = 30.70 l/s overflow depth = 3.98 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	8.017	50.00	61.40	7.270	400.83	76.59	48.607	1.103	-	0.86
2	40	37.20	7.628	50.00	61.40	7.270	381.39	80.50	48.130	1.049	-	0.93
3	60	36.80	7.483	50.00	61.40	7.270	374.17	82.05	47.715	1.029	-	0.96
4	80	36.40	7.173	50.00	61.40	7.270	358.67	85.59	47.308	0.987	-	1.02
5	100	36.00	6.737	50.00	61.40	7.270	336.83	91.14	46.971	0.927	-	1.12
6	120	34.10	6.317	50.00	61.40	7.270	315.83	97.2	45.232	0.869	-	1.23
7	140	30.70	5.603	50.00	61.40	7.270	280.17	109.6	42.423	0.771	-	1.48
8	160	27.30	5.167	50.00	61.40	7.270	258.33	118.8	39.665	0.711	-	1.67
9	180	23.90	4.840	50.00	61.40	7.270	242.00	126.9	36.943	0.666	-	1.84
10	200	20.50	4.577	50.00	61.40	7.270	228.83	134.2	34.250	0.629	-	2.00
11	220	17.10	4.450	50.00	61.40	7.270	222.50	138	31.253	0.612	-	2.09
12	240	13.70	4.127	51.67	59.42	7.113	213.21	144	28.394	0.580	-	2.26
13	260	9.70	6.390	58.33	52.63	6.560	372.75	82.36	19.547	0.974	-	1.04
14	280	4.02	4.020	65.00	47.23	6.104	261.30	117.5	15.076	0.659	-	1.87

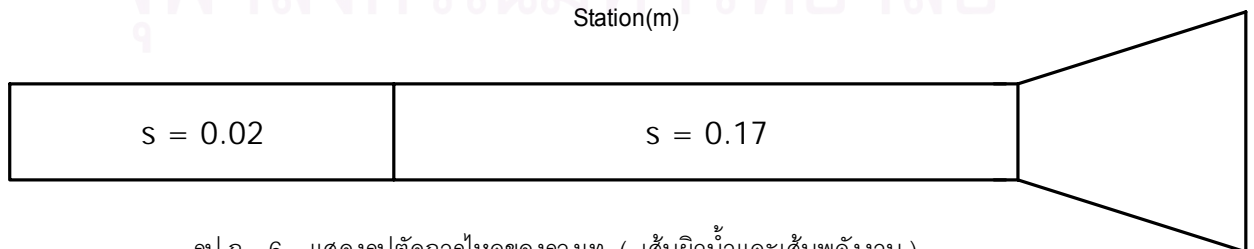
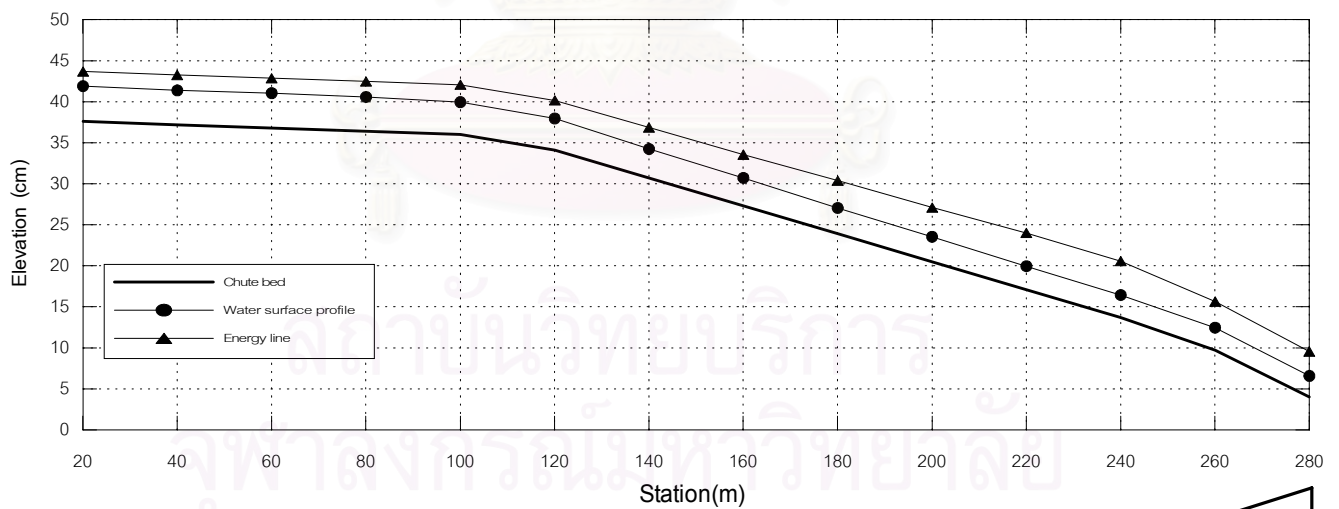


รูป ก-5 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวนางเทเรียบ อัตราการไหล = 30.70 l/s

ตาราง ก-6 ผลการทดลอง B - 1

No.400 $Q = 12.72 \text{ l/s}$ overflow depth = 2.34 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	4.300	50.00	25.44	4.041	215.00	59.16	43.684	1.064	0.00093	0.91
2	40	37.20	4.178	50.00	25.44	4.041	208.89	60.89	43.268	1.034	0.00093	0.95
3	60	36.80	4.244	50.00	25.44	4.041	212.22	59.94	42.875	1.050	0.00093	0.93
4	80	36.40	4.177	50.00	25.44	4.041	208.83	60.91	42.468	1.034	0.00093	0.95
5	100	36.00	3.947	50.00	25.44	4.041	197.33	64.46	42.064	0.977	0.00093	1.04
6	120	34.10	3.857	50.00	25.44	4.041	192.83	65.96	40.174	0.954	0.00093	1.07
7	140	30.70	3.537	50.00	25.44	4.041	176.83	71.93	36.874	0.875	0.00093	1.22
8	160	27.30	3.413	50.00	25.44	4.041	170.67	74.53	33.545	0.845	0.00093	1.29
9	180	23.90	3.150	50.00	25.44	4.041	157.50	80.76	30.374	0.780	0.00093	1.45
10	200	20.50	3.040	50.00	25.44	4.041	152.00	83.68	27.109	0.752	0.00093	1.53
11	220	17.10	2.853	50.00	25.44	4.041	142.67	89.16	24.005	0.706	0.00093	1.69
12	240	13.70	2.733	51.67	24.62	3.953	141.22	90.07	20.568	0.691	0.00095	1.74
13	260	9.70	2.760	58.33	21.81	3.646	161.00	79.01	15.641	0.757	0.00103	1.52
14	280	4.02	2.557	65.00	19.57	3.392	166.18	76.54	9.563	0.754	0.00111	1.53

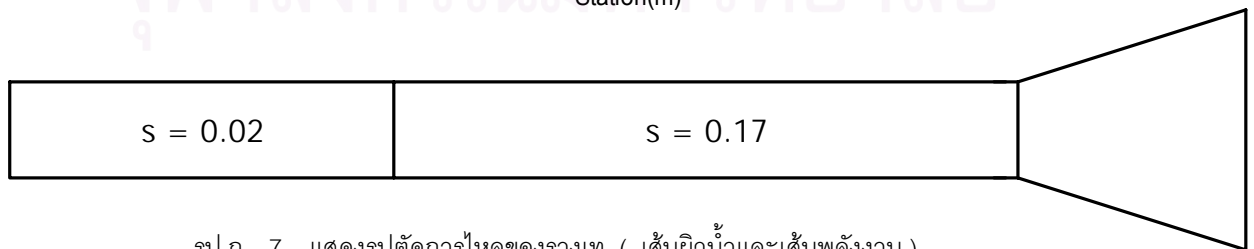
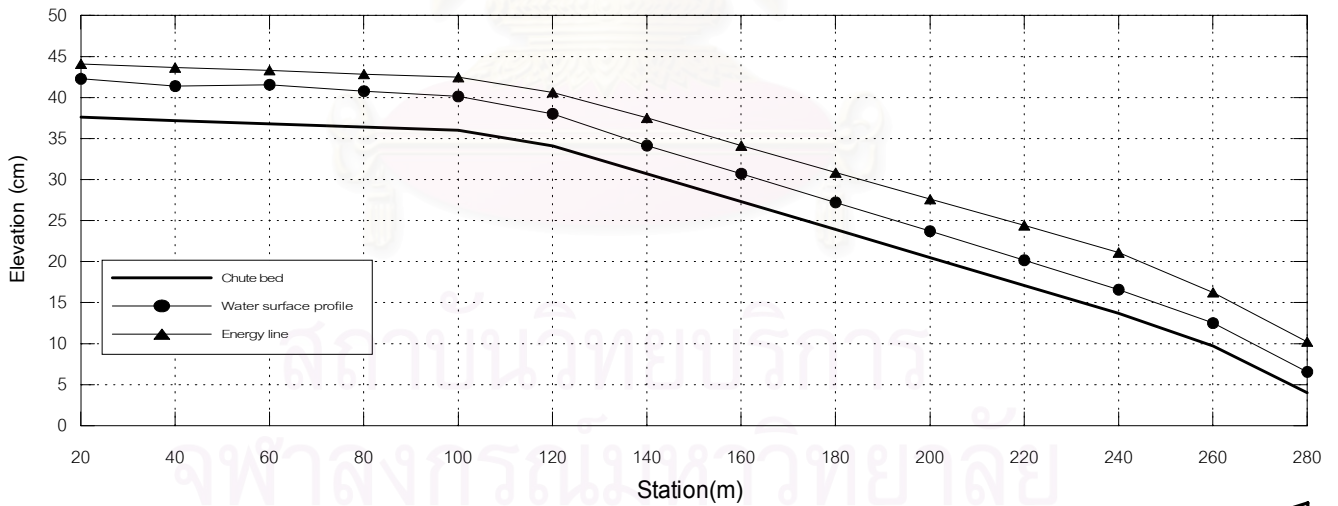


รูป ก-6 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดทรายเบอร์ 400 อัตราการไหล = 12.72 l/s

ตาราง ก-7 ผลการทดลอง B - 2

No.400 Q = 14.00 l/s overflow depth = 2.52 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	4.678	50.00	28.00	4.307	233.89	59.86	44.104	1.086	0.00087	0.88
2	40	37.20	4.189	50.00	28.00	4.307	209.44	66.84	43.666	0.972	0.00087	1.04
3	60	36.80	4.756	50.00	28.00	4.307	237.78	58.88	43.322	1.104	0.00087	0.86
4	80	36.40	4.373	50.00	28.00	4.307	218.67	64.02	42.863	1.015	0.00087	0.98
5	100	36.00	4.127	50.00	28.00	4.307	206.33	67.85	42.473	0.958	0.00087	1.07
6	120	34.10	3.913	50.00	28.00	4.307	195.67	71.55	40.623	0.909	0.00087	1.15
7	140	30.70	3.437	50.00	28.00	4.307	171.83	81.47	37.520	0.798	0.00087	1.40
8	160	27.30	3.417	50.00	28.00	4.307	170.83	81.95	34.140	0.793	0.00087	1.42
9	180	23.90	3.317	50.00	28.00	4.307	165.83	84.42	30.849	0.770	0.00087	1.48
10	200	20.50	3.200	50.00	28.00	4.307	160.00	87.50	27.602	0.743	0.00087	1.56
11	220	17.10	3.060	50.00	28.00	4.307	153.00	91.50	24.428	0.710	0.00087	1.67
12	240	13.70	2.873	51.67	27.10	4.214	148.46	94.30	21.106	0.682	0.00089	1.78
13	260	9.70	2.800	58.33	24.00	3.887	163.33	85.71	16.245	0.720	0.00096	1.64
14	280	4.02	2.537	65.00	21.54	3.616	164.88	84.91	10.231	0.701	0.00104	1.70

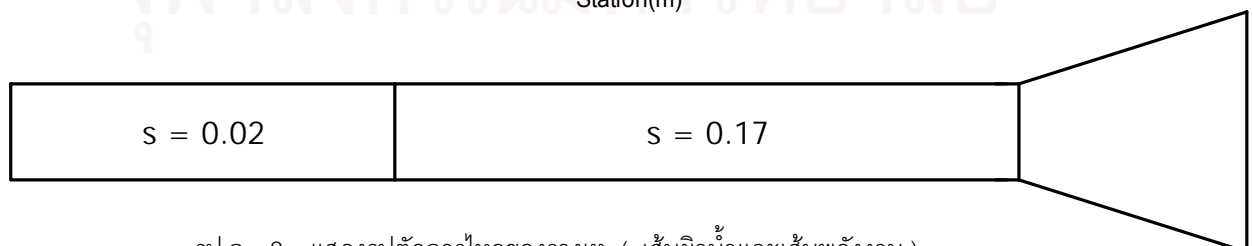
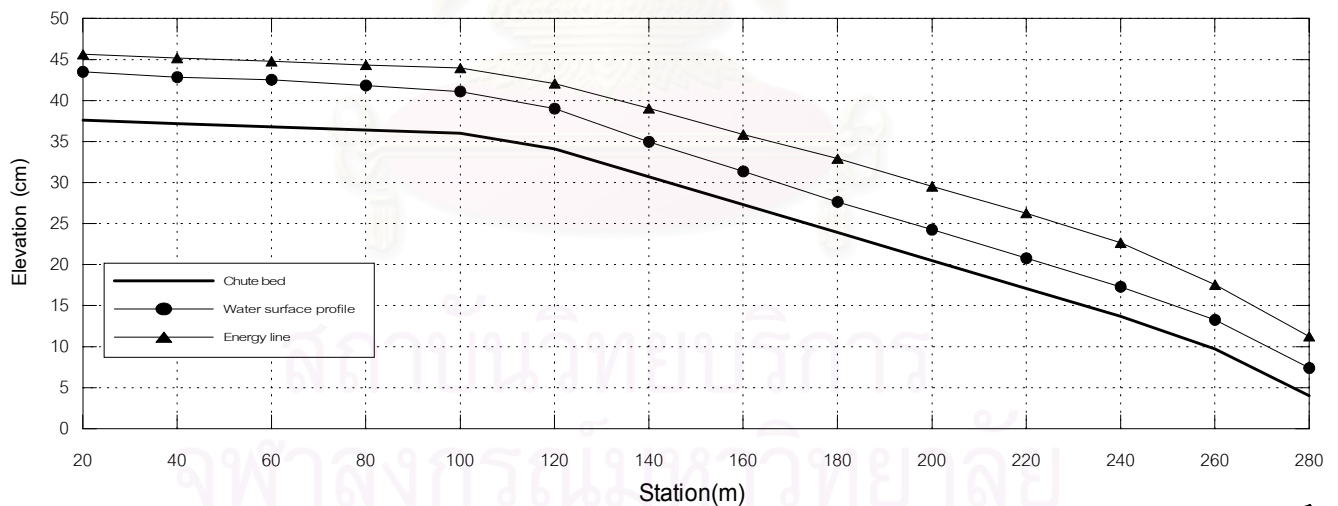


รูป ก-7 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 อัตราการไหล = 14.00 l/s

ตาราง ก-8 ผลการทดลอง B-3

No.400 $Q = 19.06 \text{ l/s}$ overflow depth = 3.13 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	5.900	50.00	38.12	5.291	295.00	64.61	45.628	1.115	0.00071	0.85
2	40	37.20	5.644	50.00	38.12	5.291	282.22	67.54	45.169	1.067	0.00071	0.91
3	60	36.80	5.733	50.00	38.12	5.291	286.67	66.49	44.786	1.084	0.00071	0.89
4	80	36.40	5.433	50.00	38.12	5.291	271.67	70.16	44.342	1.027	0.00071	0.96
5	100	36.00	5.103	50.00	38.12	5.291	255.17	74.70	43.947	0.965	0.00071	1.06
6	120	34.10	4.907	50.00	38.12	5.291	245.33	77.69	42.083	0.927	0.00071	1.12
7	140	30.70	4.267	50.00	38.12	5.291	213.33	89.34	39.035	0.806	0.00071	1.38
8	160	27.30	4.057	50.00	38.12	5.291	202.83	93.97	35.857	0.767	0.00071	1.49
9	180	23.90	3.747	50.00	38.12	5.291	187.33	101.7	32.923	0.708	0.00071	1.68
10	200	20.50	3.747	50.00	38.12	5.291	187.33	101.7	29.523	0.708	0.00071	1.68
11	220	17.10	3.673	50.00	38.12	5.291	183.67	103.8	26.262	0.694	0.00071	1.73
12	240	13.70	3.593	51.67	36.89	5.177	185.66	102.7	22.665	0.694	0.00072	1.73
13	260	9.70	3.560	58.33	32.67	4.774	207.67	91.78	17.554	0.746	0.00079	1.55
14	280	4.02	3.373	65.00	29.32	4.442	219.27	86.93	11.245	0.759	0.00084	1.51

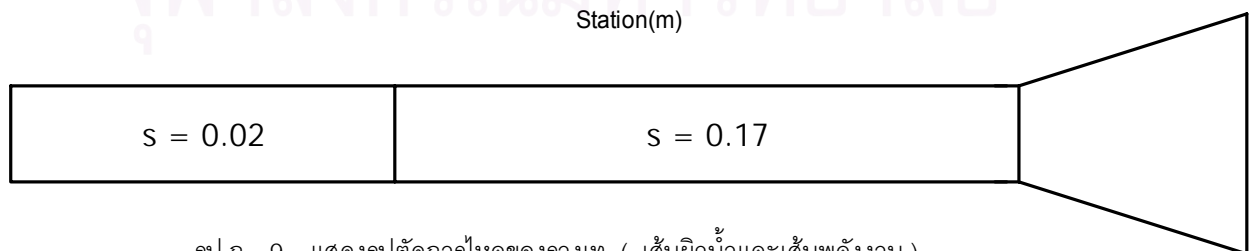
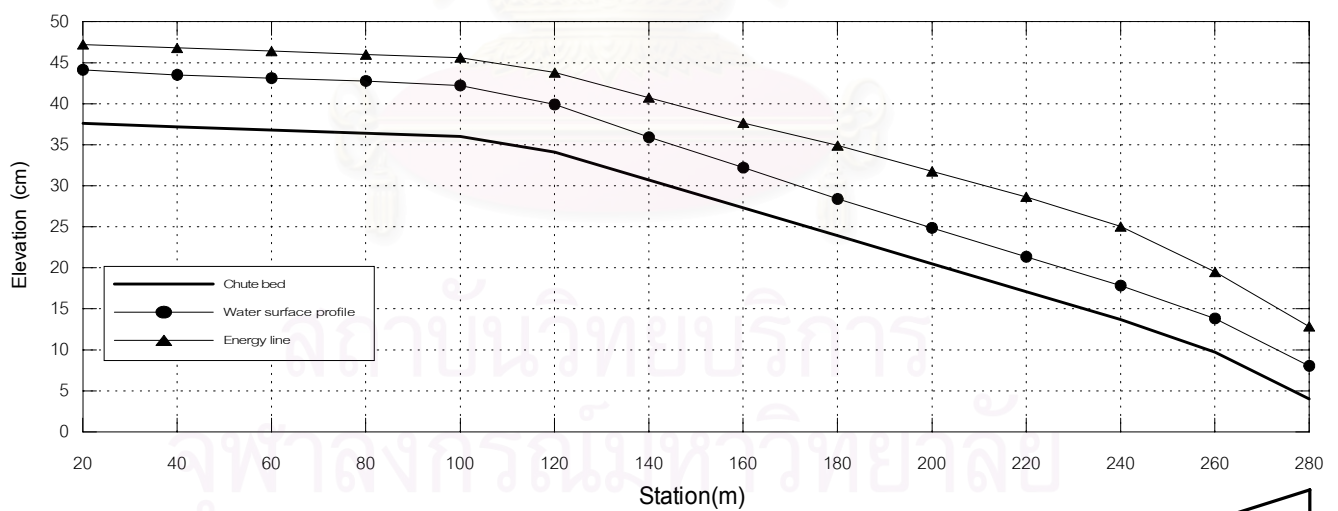


รูป ก-8 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดทรายเบอร์ 400 อัตราการไหล = 19.06 l/s

ตาราง ก-9 ผลการทดลอง B - 4

No.400 $Q = 25.39 \text{ l/s}$ overflow depth = 3.71 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	6.539	50.00	50.78	6.406	326.94	77.66	47.212	1.021	0.00059	0.97
2	40	37.20	6.328	50.00	50.78	6.406	316.39	80.25	46.810	0.988	0.00059	1.02
3	60	36.80	6.322	50.00	50.78	6.406	316.11	80.32	46.410	0.987	0.00059	1.02
4	80	36.40	6.379	50.00	50.78	6.406	318.93	79.61	46.008	0.996	0.00059	1.01
5	100	36.00	6.229	50.00	50.78	6.406	311.43	81.53	45.616	0.972	0.00059	1.04
6	120	34.10	5.811	50.00	50.78	6.406	290.54	87.39	43.803	0.907	0.00059	1.16
7	140	30.70	5.207	50.00	50.78	6.406	260.37	97.52	40.754	0.813	0.00059	1.36
8	160	27.30	4.911	50.00	50.78	6.406	245.54	103.4	37.660	.0767	0.00059	1.49
9	180	23.90	4.493	50.00	50.78	6.406	224.64	113.0	34.903	0.701	0.00059	1.70
10	200	20.50	4.371	50.00	50.78	6.406	218.57	116.2	31.749	0.682	0.00059	1.77
11	220	17.10	4.243	50.00	50.78	6.406	212.14	119.7	28.643	0.662	0.00059	1.86
12	240	13.70	4.136	51.67	49.14	6.267	213.68	118.8	25.031	0.660	0.00060	1.87
13	260	9.70	4.129	58.33	43.53	5.780	240.83	105.4	19.493	0.714	0.00065	1.66
14	280	4.02	4.025	65.00	39.06	5.378	261.63	97.05	12.845	0.748	0.00070	1.54

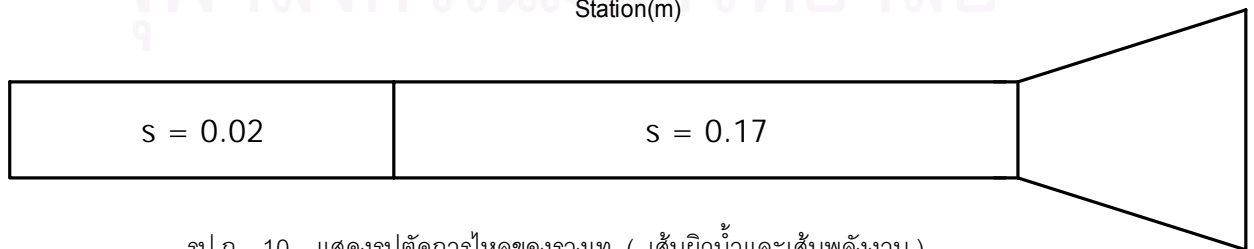
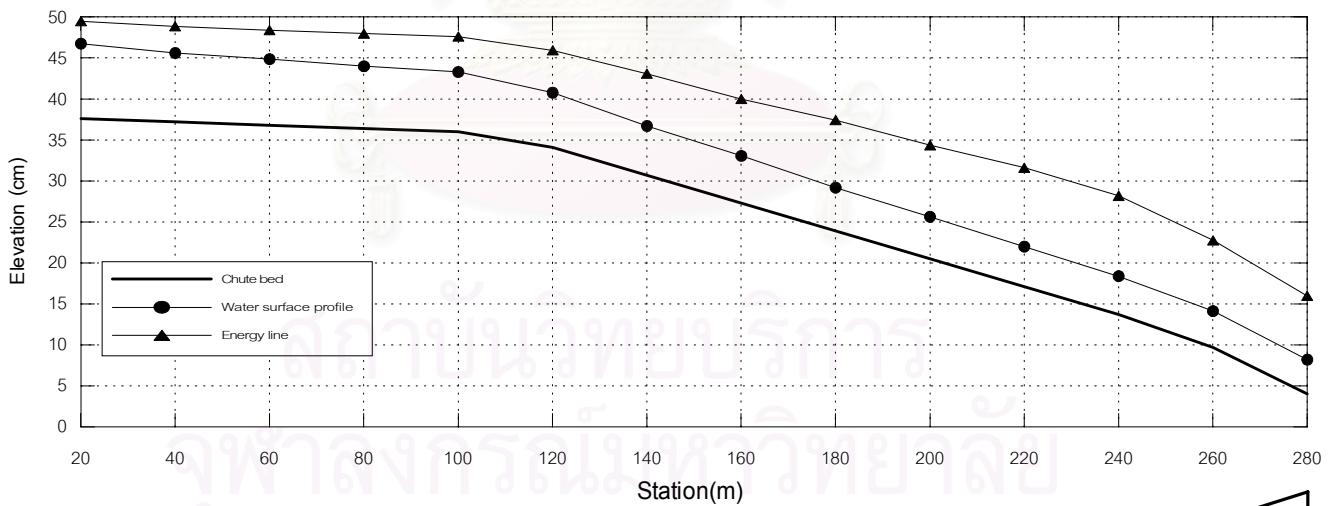


รูป ก-9 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 อัตราการไหล = 25.39 l/s

ตาราง ก-10 ผลการทดลอง B-5

No.400 Q = 33.55 l/s overflow depth = 4.29 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y/y _c	k _s /y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(cm)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	9.139	50.00	67.10	7.714	456.94	73.42	49.486	1.185	0.00049	0.78
2	40	37.20	8.400	50.00	67.10	7.714	520.00	79.88	48.852	1.089	0.00049	0.88
3	60	36.80	8.056	50.00	67.10	7.714	402.78	83.30	48.391	1.044	0.00049	0.94
4	80	36.40	7.583	50.00	67.10	7.714	379.17	88.48	47.973	0.983	0.00049	1.03
5	100	36.00	7.283	50.00	67.10	7.714	364.17	92.13	47.609	0.944	0.00049	1.09
6	120	34.10	6.660	50.00	67.10	7.714	333.00	100.8	45.933	0.863	0.00049	1.25
7	140	30.70	5.997	50.00	67.10	7.714	299.83	111.9	43.078	0.777	0.00049	1.46
8	160	27.30	5.750	50.00	67.10	7.714	287.50	116.7	39.990	0.745	0.00049	1.55
9	180	23.90	5.277	50.00	67.10	7.714	263.83	127.2	37.418	0.684	0.00049	1.77
10	200	20.50	5.123	50.00	67.10	7.714	256.17	131.0	34.365	0.664	0.00049	1.85
11	220	17.10	4.883	50.00	67.10	7.714	244.17	137.4	31.606	0.633	0.00049	1.99
12	240	13.70	4.680	51.67	64.94	7.547	241.80	138.8	28.192	0.620	0.00050	2.05
13	260	9.70	4.420	58.33	57.51	6.960	257.83	130.1	22.749	0.635	0.00054	1.98
14	280	4.02	4.177	65.00	51.62	6.476	271.48	123.6	15.980	0.645	0.00058	1.93

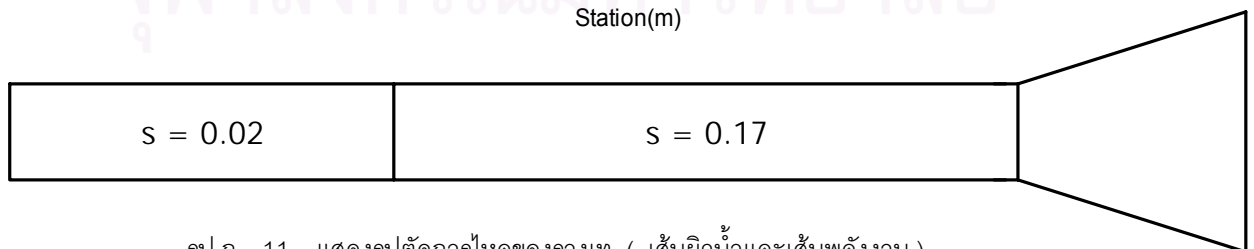
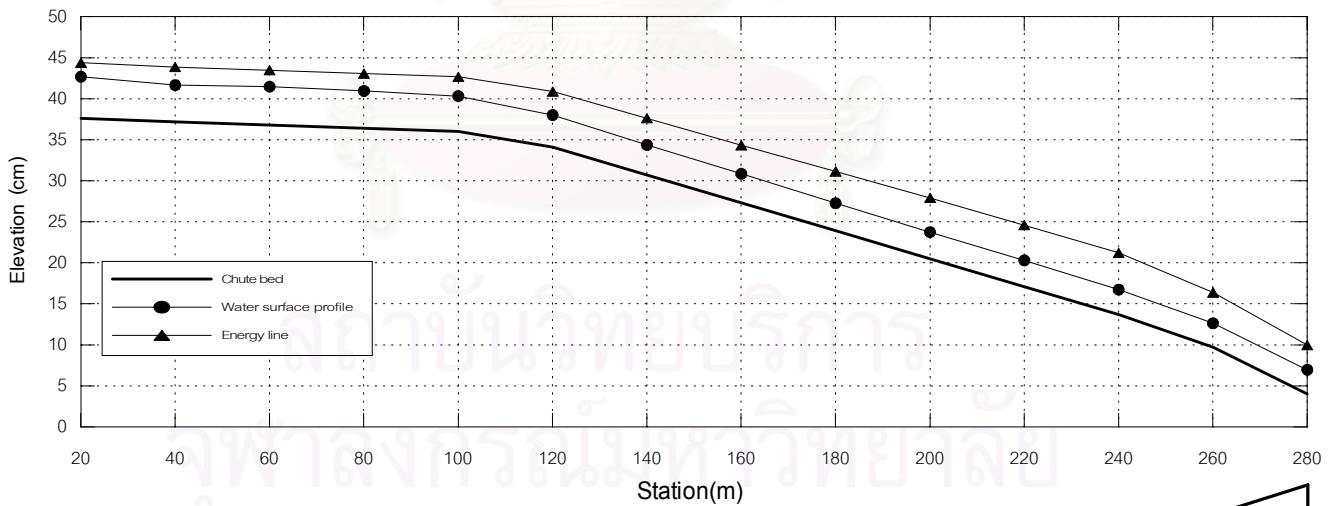


รูป ก-10 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดทรายเบอร์ 400 อัตราการไหล = 33.55 l/s

ตาราง ก-11 ผลการทดลอง C-1

No.280 Q = 14.66 l/s overflow depth = 2.43 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y/y _c	k _s /y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	5.078	50.00	29.32	4.442	253.89	57.74	44.377	1.143	0.00119	0.82
2	40	37.20	4.456	50.00	29.32	4.442	222.79	65.80	43.963	1.003	0.00119	1.00
3	60	36.80	4.667	50.00	29.32	4.442	233.33	62.83	43.479	1.051	0.00119	0.93
4	80	36.40	4.547	50.00	29.32	4.442	227.33	64.49	43.066	1.024	0.00119	0.97
5	100	36.00	4.317	50.00	29.32	4.442	215.83	67.92	42.668	0.972	0.00119	1.04
6	120	34.10	3.903	50.00	29.32	4.442	195.17	75.12	40.879	0.879	0.00119	1.21
7	140	30.70	3.663	50.00	29.32	4.442	183.17	80.04	37.628	0.825	0.00119	1.34
8	160	27.30	3.547	50.00	29.32	4.442	177.33	82.67	34.330	0.798	0.00119	1.40
9	180	23.90	3.360	50.00	29.32	4.442	168.00	87.26	31.141	0.756	0.00119	1.52
10	200	20.50	3.243	50.00	29.32	4.442	162.17	90.40	27.909	0.730	0.00119	1.60
11	220	17.10	3.193	50.00	29.32	4.442	159.67	91.82	24.590	0.719	0.00119	1.64
12	240	13.70	3.023	51.67	29.37	4.346	156.21	93.85	21.213	0.696	0.00122	1.72
13	260	9.70	2.923	58.33	25.13	4.008	170.53	85.97	16.390	0.729	0.00132	1.61
14	280	4.02	2.937	65.00	22.55	3.729	190.88	76.80	9.963	0.788	0.00142	1.43

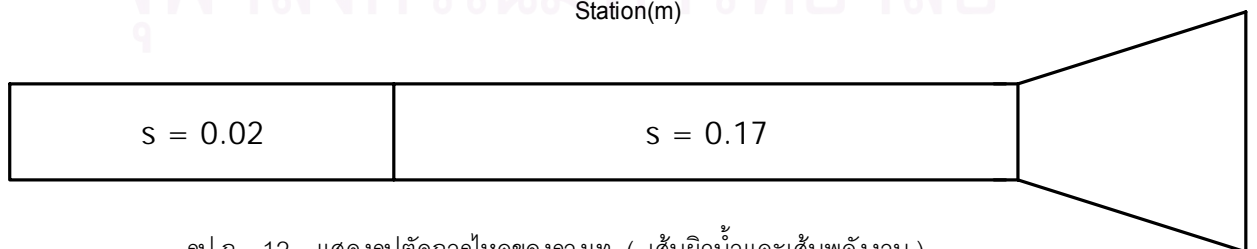
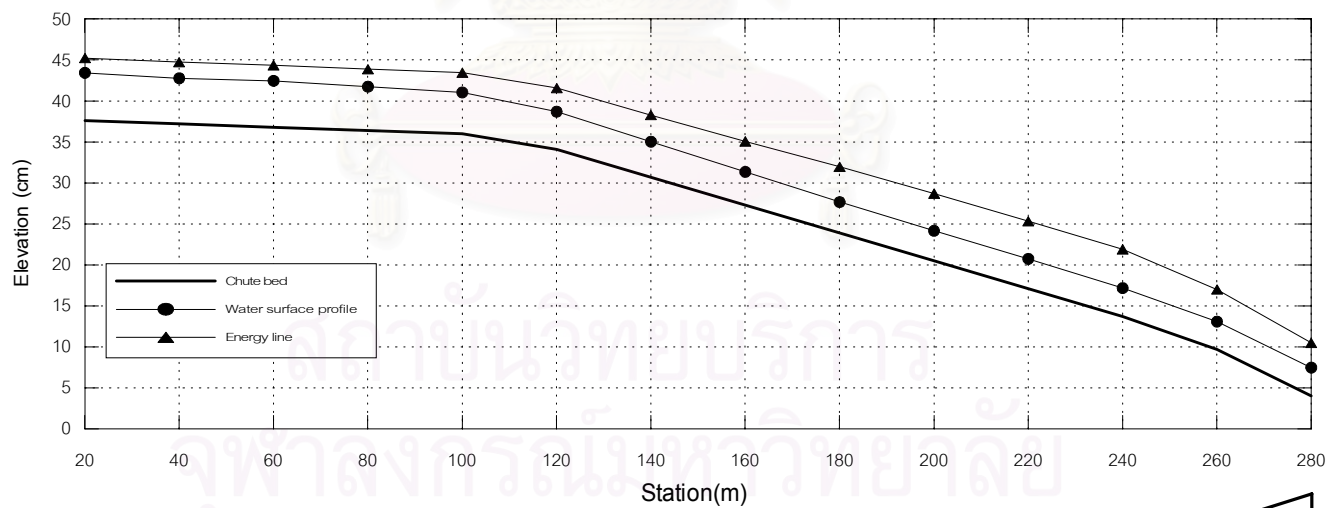


รูป ก-11 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 อัตราการไหล = 14.66 l/s

ตาราง ก-12 ผลการทดลอง C-2

No.280 $Q = 17.27$ l/s overflow depth = 3.06 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	5.828	50.00	34.54	4.954	291.39	59.27	45.218	1.176	0.00107	0.78
2	40	37.20	5.561	50.00	34.54	4.954	278.06	62.11	44.727	1.122	0.00107	0.84
3	60	36.80	5.656	50.00	34.54	4.954	282.78	61.07	44.357	1.142	0.00107	0.82
4	80	36.40	5.337	50.00	34.54	4.954	266.83	64.72	43.872	1.077	0.00107	0.89
5	100	36.00	5.040	50.00	34.54	4.954	252.00	68.53	43.434	1.017	0.00107	0.97
6	120	34.10	4.590	50.00	34.54	4.954	229.50	75.25	41.576	0.926	0.00107	1.12
7	140	30.70	4.327	50.00	34.54	4.954	216.33	79.83	38.275	0.873	0.00107	1.23
8	160	27.30	4.046	50.00	34.54	4.954	202.31	85.36	35.060	0.817	0.00107	1.35
9	180	23.90	3.767	50.00	34.54	4.954	188.35	91.69	31.952	0.760	0.00107	1.51
10	200	20.50	3.660	50.00	34.54	4.954	183.00	94.37	28.699	0.739	0.00107	1.57
11	220	17.10	3.640	50.00	34.54	4.954	182.00	94.89	25.329	0.735	0.00107	1.59
12	240	13.70	3.470	51.67	33.43	4.847	179.28	96.33	21.899	0.716	0.00109	1.65
13	260	9.70	3.377	58.33	29.61	4.471	196.97	87.68	16.995	0.755	0.00119	1.52
14	280	4.02	3.453	65.00	26.57	4.159	224.47	76.94	10.490	0.830	0.00127	1.32

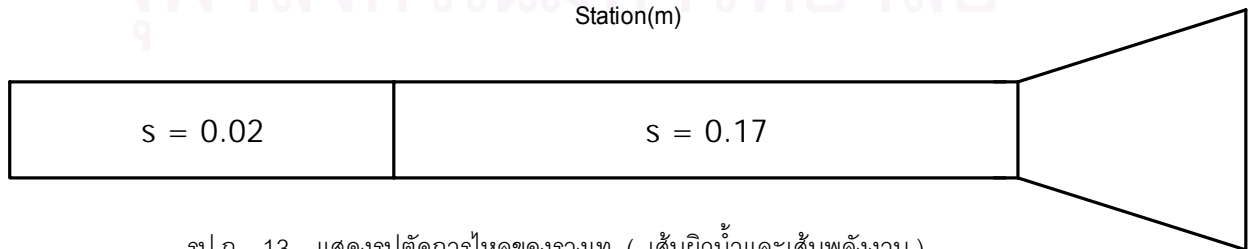
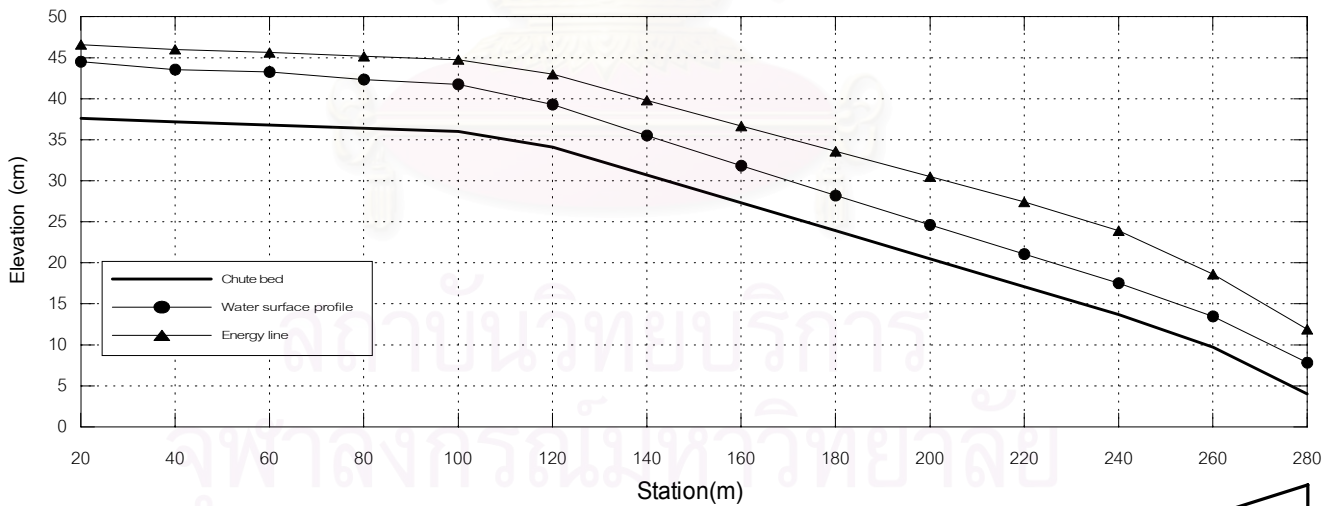


รูป ก-12 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 อัตราการไหล = 17.27 l/s

ตาราง ก-13 ผลการทดลอง C-3

No.280 Q = 22.09 l/s overflow depth = 3.48 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	6.911	50.00	44.18	5.838	345.56	63.93	46.594	1.184	0.00091	0.78
2	40	37.20	6.350	50.00	44.18	5.838	317.50	69.57	46.017	1.088	0.00091	0.88
3	60	36.80	6.461	50.00	44.18	5.838	323.06	68.38	45.644	1.107	0.00091	0.86
4	80	36.40	5.940	50.00	44.18	5.838	297.02	74.37	45.160	1.018	0.00091	0.97
5	100	36.00	5.750	50.00	44.18	5.838	287.52	76.83	44.759	0.985	0.00091	1.02
6	120	34.10	5.193	50.00	44.18	5.838	259.67	85.07	42.982	0.890	0.00091	1.19
7	140	30.70	4.817	50.00	44.18	5.838	240.83	91.72	39.805	0.825	0.00091	1.33
8	160	27.30	4.533	50.00	44.18	5.838	226.67	97.46	36.674	0.777	0.00091	1.46
9	180	23.90	4.293	50.00	44.18	5.838	214.67	102.9	33.590	0.735	0.00091	1.59
10	200	20.50	4.113	50.00	44.18	5.838	205.67	107.4	30.493	0.705	0.00091	1.69
11	220	17.10	3.957	50.00	44.18	5.838	197.83	111.7	27.411	0.678	0.00091	1.79
12	240	13.70	3.817	51.67	42.75	5.712	197.19	112.0	23.913	0.668	0.00093	1.83
13	260	9.70	3.770	58.33	37.87	5.268	219.92	100.4	18.613	0.716	0.00101	1.65
14	280	4.02	3.800	65.00	33.98	4.901	247.00	89.43	11.897	0.775	0.00108	1.46

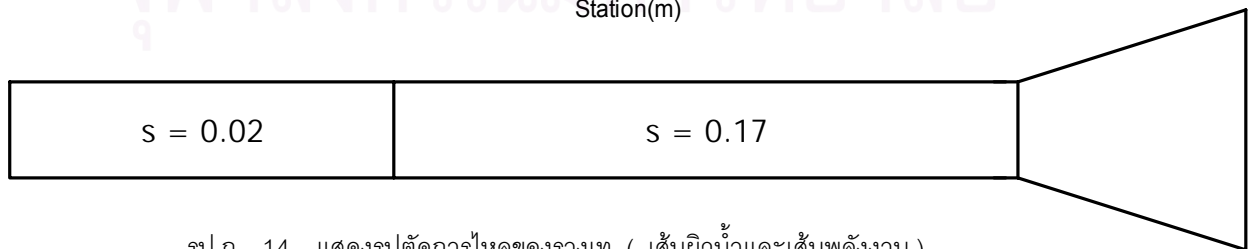
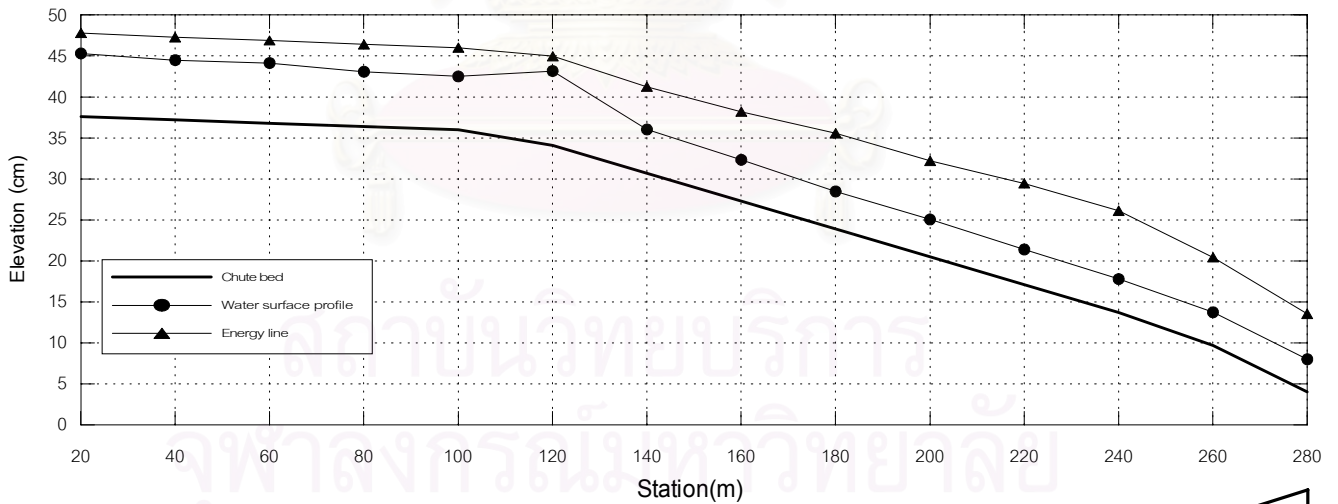


รูป ก-13 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 อัตราการไหล = 22.09 l/s

ตาราง ก-14 ผลการทดลอง C-4

No.280 Q = 26.98 l/s overflow depth = 3.72 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y/y _c	k _s /y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	7.706	50.00	53.96	6.67	385.28	70.03	47.805	1.155	0.00079	0.81
2	40	37.20	7.289	50.00	53.96	6.67	364.44	74.03	47.282	1.093	0.00079	0.88
3	60	36.80	7.339	50.00	53.96	6.67	366.94	73.53	46.894	1.100	0.00079	0.87
4	80	36.40	6.670	50.00	53.96	6.67	333.50	80.90	46.406	1.000	0.00079	1.00
5	100	36.00	6.500	50.00	53.96	6.67	325.00	83.02	46.013	0.974	0.00079	1.04
6	120	34.10	6.060	50.00	53.96	6.67	453.00	89.04	44.201	0.908	0.00079	0.63
7	140	30.70	5.330	50.00	53.96	6.67	266.50	101.2	41.254	0.799	0.00079	1.40
8	160	27.30	5.030	50.00	53.96	6.67	251.50	107.3	38.196	0.754	0.00079	1.53
9	180	23.90	4.570	50.00	53.96	6.67	228.50	118.1	35.576	0.685	0.00079	1.76
10	200	20.50	4.550	50.00	53.96	6.67	227.52	118.6	32.218	0.682	0.00079	1.77
11	220	17.10	4.289	50.00	53.96	6.67	214.47	125.8	29.455	0.643	0.00079	1.94
12	240	13.70	4.083	51.67	52.22	6.526	210.97	127.9	26.119	0.626	0.00081	2.02
13	260	9.70	4.033	58.33	46.25	6.016	235.28	114.7	20.436	0.670	0.00088	1.82
14	280	4.02	3.980	65.00	41.51	5.600	258.70	104.3	13.544	0.711	0.00095	1.67

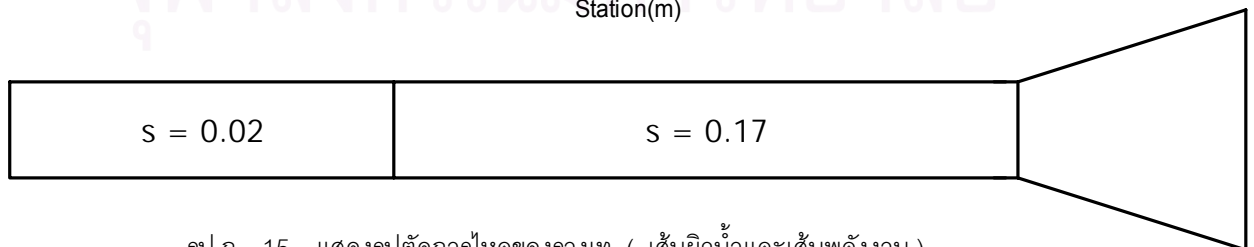
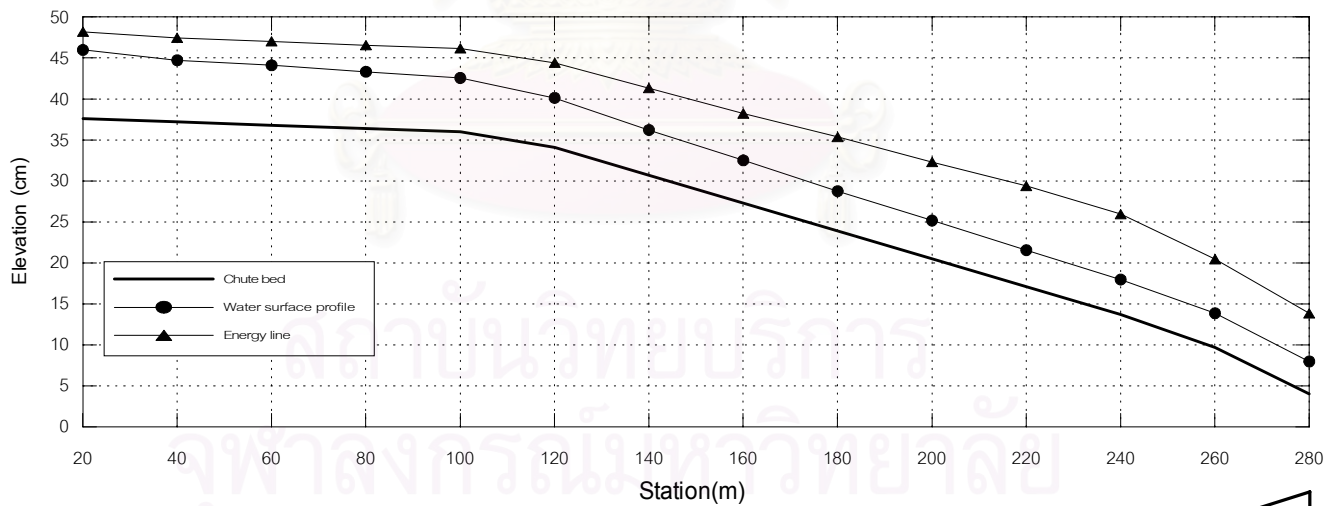


รูป ก-14 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 อัตราการไหล = 26.98 l/s

ตาราง ก-15 ผลการทดลอง C-5

No.280 $Q = 27.60 \text{ l/s}$ overflow depth = 3.90 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	8.378	50.00	55.20	6.772	418.91	65.89	48.191	1.237	0.00078	0.73
2	40	37.20	7.517	50.00	55.20	6.772	375.83	73.44	17.465	1.110	0.00078	0.86
3	60	36.80	7.306	50.00	55.20	6.772	365.28	75.56	47.015	1.079	0.00078	0.89
4	80	36.40	6.913	50.00	55.20	6.772	345.67	79.85	46.563	1.021	0.00078	0.97
5	100	36.00	6.557	50.00	55.20	6.772	327.83	84.19	46.619	0.968	0.00078	1.05
6	120	34.10	6.023	50.00	55.20	6.772	301.17	91.64	44.404	0.889	0.00078	1.19
7	140	30.70	5.513	50.00	55.20	6.772	275.67	100.1	41.323	0.814	0.00078	1.36
8	160	27.30	5.210	50.00	55.20	6.772	260.50	106.0	38.231	0.769	0.00078	1.48
9	180	23.90	4.847	50.00	55.20	6.772	242.33	113.9	35.358	0.716	0.00078	1.65
10	200	20.50	4.667	50.00	55.20	6.772	233.33	118.3	32.298	0.689	0.00078	1.75
11	220	17.10	4.453	50.00	55.20	6.772	222.67	124.0	29.384	0.658	0.00078	1.88
12	240	13.70	4.270	51.67	53.42	6.626	220.67	125.1	25.947	0.64	0.00080	1.93
13	260	9.70	4.157	58.33	58.33	6.111	242.47	113.8	20.460	0.680	0.00087	1.78
14	280	4.02	3.953	65.00	65.00	5.686	256.97	107.4	13.853	0.695	0.00093	1.72

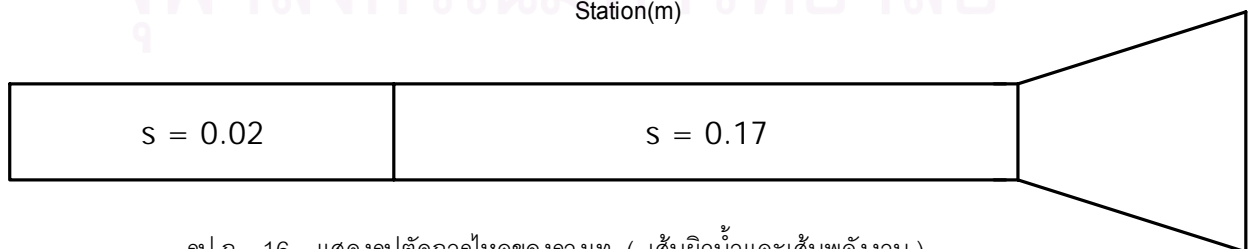
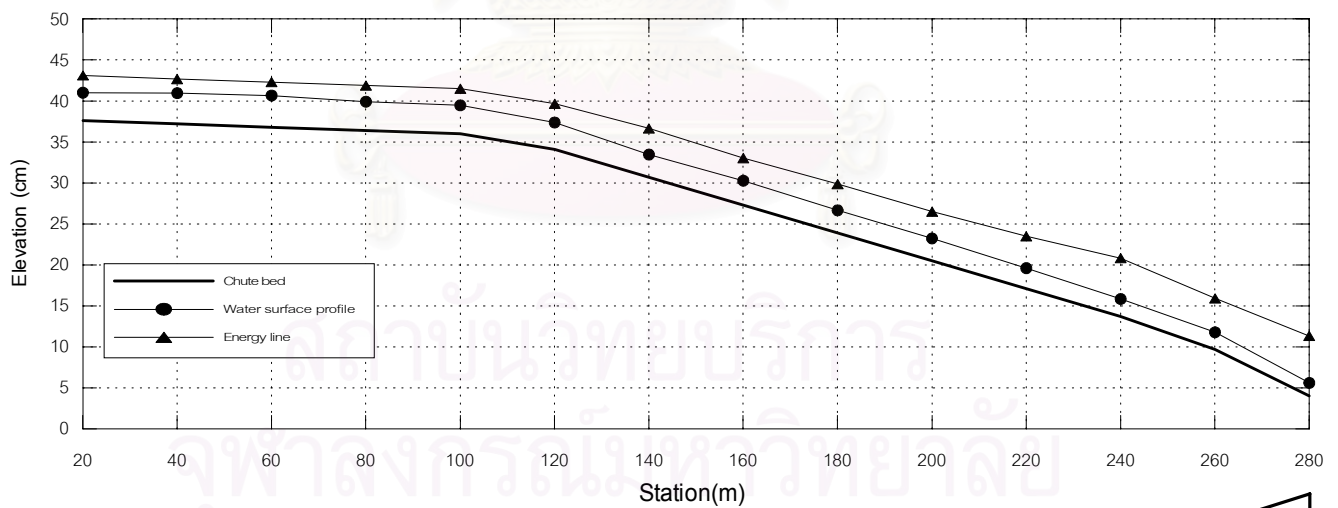


รูป ก-15 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 อัตราการไหล = 27.60 l/s

ตาราง ก-16 ผลการทดลอง D-1

No.180 $Q = 10.93 \text{ l/s}$ overflow depth = 2.23 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	8.378	50.00	55.20	6.772	418.91	65.89	48.191	1.237	0.00078	0.73
2	40	37.20	7.517	50.00	55.20	6.772	375.83	73.44	47.465	1.110	0.00078	0.86
3	60	36.80	7.306	50.00	55.20	6.772	365.28	45.56	47.015	1.079	0.00078	0.89
4	80	36.40	6.913	50.00	55.20	6.772	345.67	79.85	46.653	1.021	0.00078	0.97
5	100	36.00	6.557	50.00	55.20	6.772	327.83	84.19	46.169	0.968	0.00078	1.05
6	120	34.10	6.023	50.00	55.20	6.772	301.17	91.64	44.404	0.889	0.00078	1.19
7	140	30.70	5.513	50.00	55.20	6.772	275.67	100.1	41.323	0.814	0.00078	1.36
8	160	27.30	5.210	50.00	55.20	6.772	260.50	106.0	38.231	0.769	0.00078	1.48
9	180	23.90	4.847	50.00	55.20	6.772	242.33	113.9	35.358	0.716	0.00078	1.65
10	200	20.50	4.667	50.00	55.20	6.772	233.33	118.3	32.298	0.689	0.00078	1.75
11	220	17.10	4.453	50.00	55.20	6.772	222.67	124.0	29.384	0.658	0.00078	1.88
12	240	13.70	4.270	51.67	53.42	6.626	220.62	125.1	25.947	0.644	0.00080	1.93
13	260	9.70	4.157	58.33	47.31	6.111	242.47	113.8	20.460	0.680	0.00087	1.78
14	280	4.02	3.953	65.00	42.46	5.686	256.97	107.4	13.853	0.695	0.00093	1.72

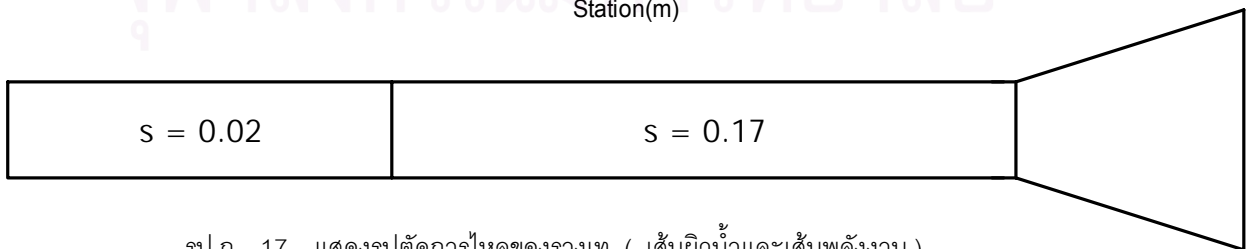
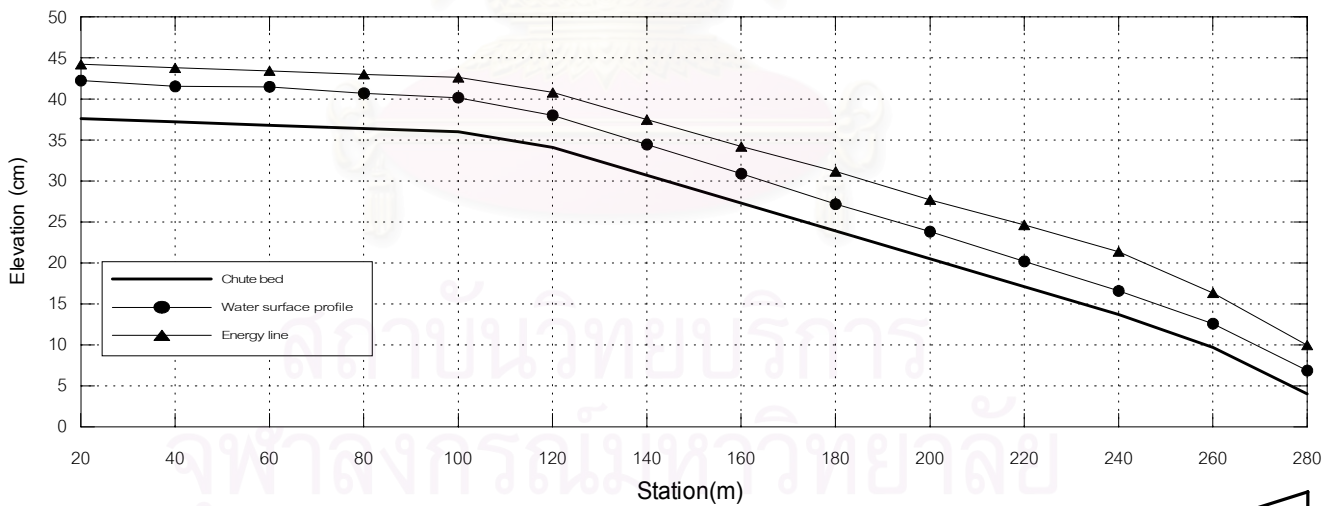


รูป ก-16 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 180 อัตราการไหล = 10.93 l/s

ตาราง ก-17 ผลการทดลอง D-2

No.180 Q = 14.44 l/s overflow depth = 2.58 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y/y _c	k _s /y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	4.639	50.00	28.88	4.397	231.94	62.26	44.214	1.055	0.00200	0.92
2	40	37.20	4.328	50.00	28.88	4.397	216.39	66.73	43.797	0.984	0.00200	1.02
3	60	36.80	4.683	50.00	28.88	4.397	234.17	61.67	43.421	1.065	0.00200	0.91
4	80	36.40	4.297	50.00	28.88	4.397	214.83	67.21	42.999	0.977	0.00200	1.04
5	100	36.00	4.157	50.00	28.88	4.397	207.83	69.48	42.617	0.945	0.00200	1.09
6	120	34.10	3.900	50.00	28.88	4.397	195.00	74.05	40.795	0.887	0.00200	1.20
7	140	30.70	3.737	50.00	28.88	4.397	186.83	77.29	37.481	0.850	0.00200	1.28
8	160	27.30	3.580	50.00	28.88	4.397	179.00	80.67	34.197	0.814	0.00200	1.36
9	180	23.90	3.263	50.00	28.88	4.397	163.17	88.50	31.155	0.742	0.00200	1.56
10	200	20.50	3.310	50.00	28.88	4.397	165.50	87.25	27.690	0.753	0.00200	1.53
11	220	17.10	3.087	50.00	28.88	4.397	154.33	93.56	24.649	0.702	0.00200	1.70
12	240	13.70	2.883	51.67	27.95	4.302	148.97	96.93	21.372	0.670	0.00205	1.82
13	260	9.70	2.887	58.33	24.75	3.968	168.39	85.75	16.335	0.728	0.00222	1.61
14	280	4.02	2.847	65.00	22.22	3.692	185.03	78.04	9.971	0.771	0.00238	1.48

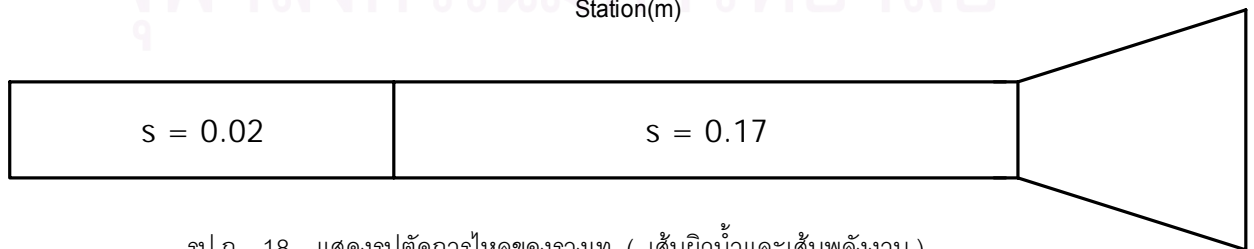
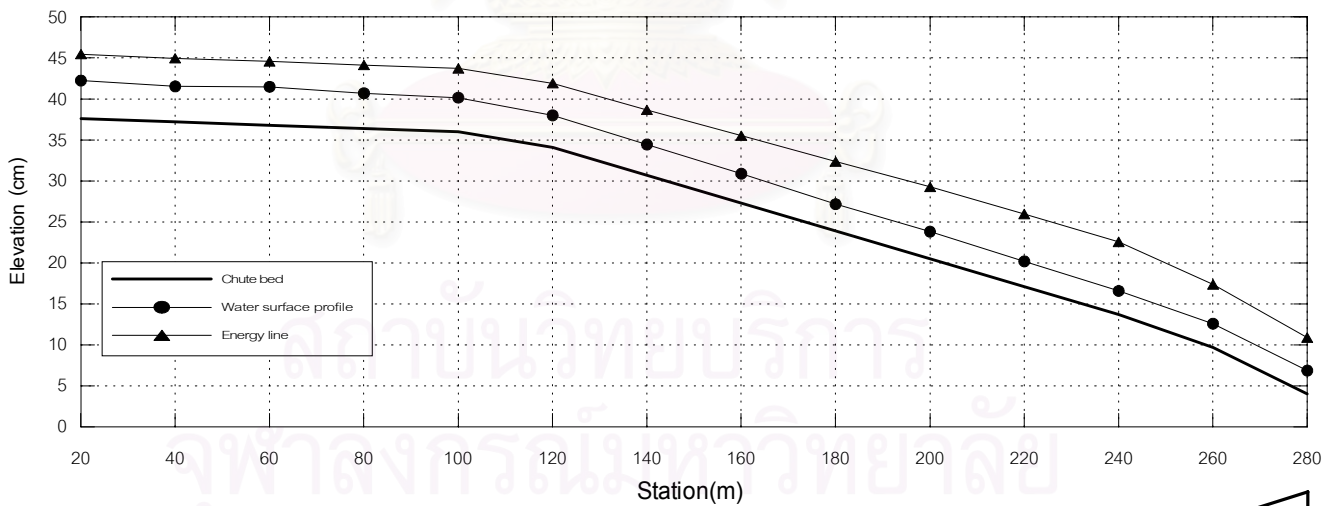


รูป ก-17 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 180 อัตราการไหล = 14.44 l/s

ตาราง ก-18 ผลการทดลอง D-3

No.180 Q = 18.28 l/s overflow depth = 3.11 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	5.933	50.00	36.56	5.146	296.67	61.62	45.468	1.153	0.00171	0.81
2	40	37.20	5.506	50.00	36.56	5.146	275.28	66.41	44.953	1.070	0.00171	0.90
3	60	36.80	5.667	50.00	36.56	5.146	283.33	64.52	44.588	1.101	0.00171	0.87
4	80	36.40	5.400	50.00	36.56	5.146	270.00	67.70	44.136	1.049	0.00171	0.93
5	100	36.00	4.953	50.00	36.56	5.146	247.67	73.81	43.730	0.963	0.00171	1.06
6	120	34.10	4.617	50.00	36.56	5.146	230.83	79.19	41.913	0.897	0.00171	1.18
7	140	30.70	4.323	50.00	36.56	5.146	216.17	84.56	38.668	0.840	0.00171	1.30
8	160	27.30	4.040	50.00	36.56	5.146	202.00	90.50	35.514	0.785	0.00171	1.44
9	180	23.90	3.847	50.00	36.56	5.146	192.33	95.04	32.351	0.748	0.00171	1.55
10	200	20.50	3.647	50.00	36.56	5.146	182.33	100.3	29.270	0.709	0.00171	1.68
11	220	17.10	3.590	50.00	36.56	5.146	179.50	101.8	25.976	0.698	0.00171	1.72
12	240	13.70	3.423	51.67	35.38	5.034	176.87	103.4	22.568	0.680	0.00175	1.78
13	260	9.70	3.433	58.33	31.34	4.643	200.28	91.27	17.379	0.739	0.00190	1.57
14	280	4.02	3.423	65.00	28.12	4.320	222.52	82.15	10.883	0.792	0.00204	1.42

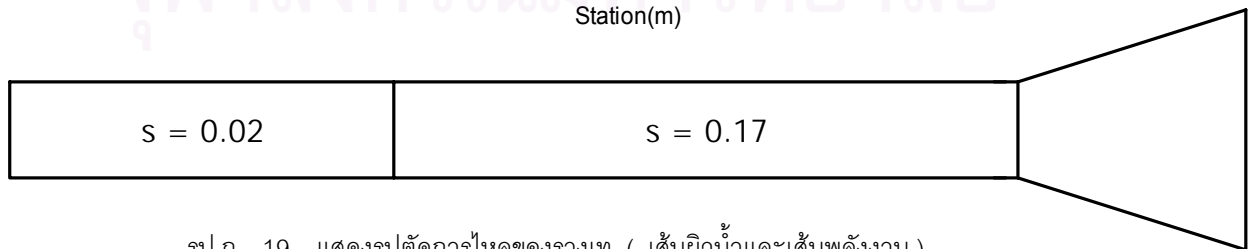
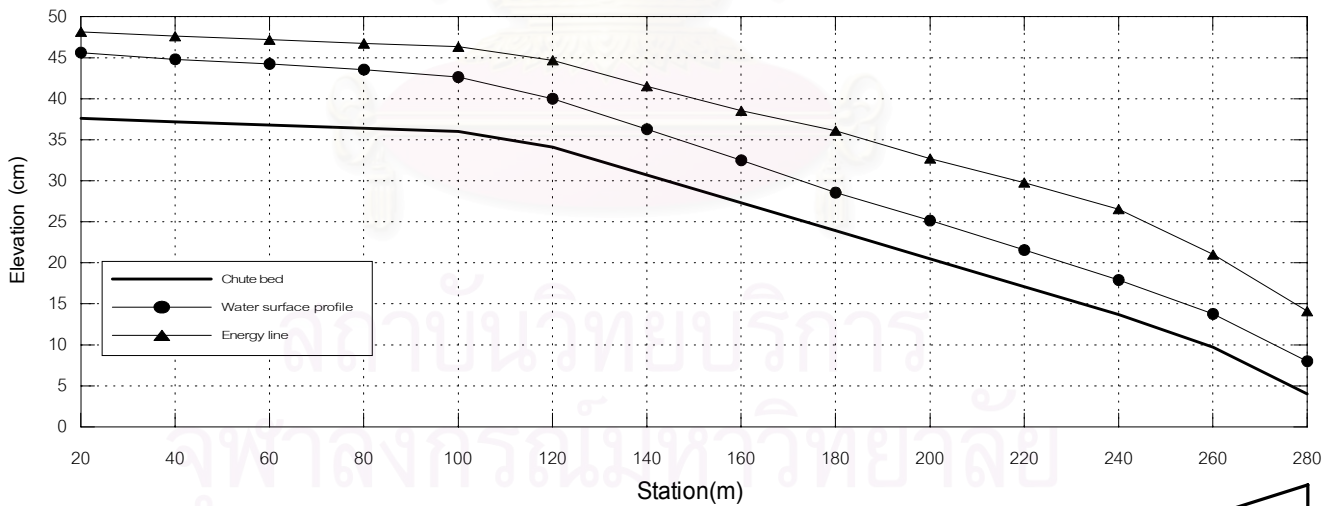


รูป ก-18 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 180 อัตราการไหล = 18.28 l/s

ตาราง ก-19 ผลการทดลอง D - 4

No.180 Q = 28.29 l/s overflow depth = 4.01 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	8.022	50.00	56.58	6.885	404.11	70.53	48.458	1.165	0.00128	0.80
2	40	37.20	7.606	50.00	56.58	6.885	380.28	74.39	47.626	1.105	0.00128	0.86
3	60	36.80	7.444	50.00	56.58	6.885	372.22	76.00	47.189	1.081	0.00128	0.89
4	80	36.40	7.150	50.00	56.58	6.885	357.50	79.13	46.742	1.039	0.00128	0.94
5	100	36.00	6.637	50.00	56.58	6.885	331.83	85.25	46.341	0.964	0.00128	1.06
6	120	34.10	5.900	50.00	56.58	6.885	295.00	95.90	44.687	0.857	0.00128	1.26
7	140	30.70	5.587	50.00	56.58	6.885	279.33	101.3	41.514	0.811	0.00128	1.37
8	160	27.30	5.197	50.00	56.58	6.885	259.83	108.9	38.539	0.755	0.00128	1.52
9	180	23.90	4.650	50.00	56.58	6.885	232.50	121.7	36.096	0.675	0.00128	1.80
10	200	20.50	4.643	50.00	56.58	6.885	232.17	121.9	32.711	0.674	0.00128	1.81
11	220	17.10	4.453	50.00	56.58	6.885	222.67	127.1	29.781	0.647	0.00128	1.92
12	240	13.70	4.203	51.67	54.75	6.736	217.17	130.3	26.552	0.624	0.00131	2.03
13	260	9.70	4.067	58.33	48.50	6.212	237.22	119.3	21.015	0.655	0.00142	1.89
14	280	4.02	3.980	65.00	43.52	5.780	258.70	109.4	14.095	0.689	0.00152	1.75

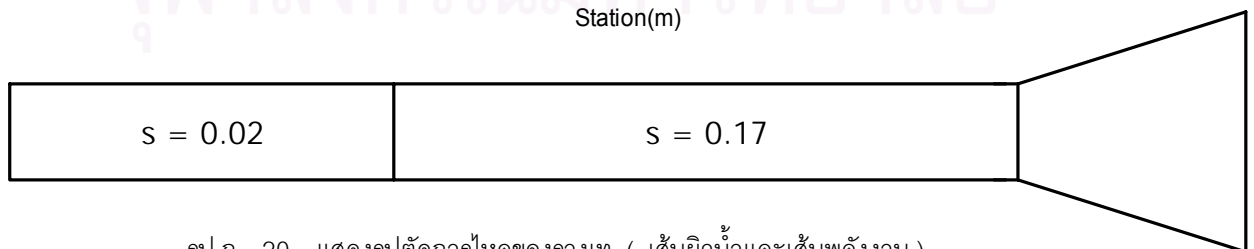
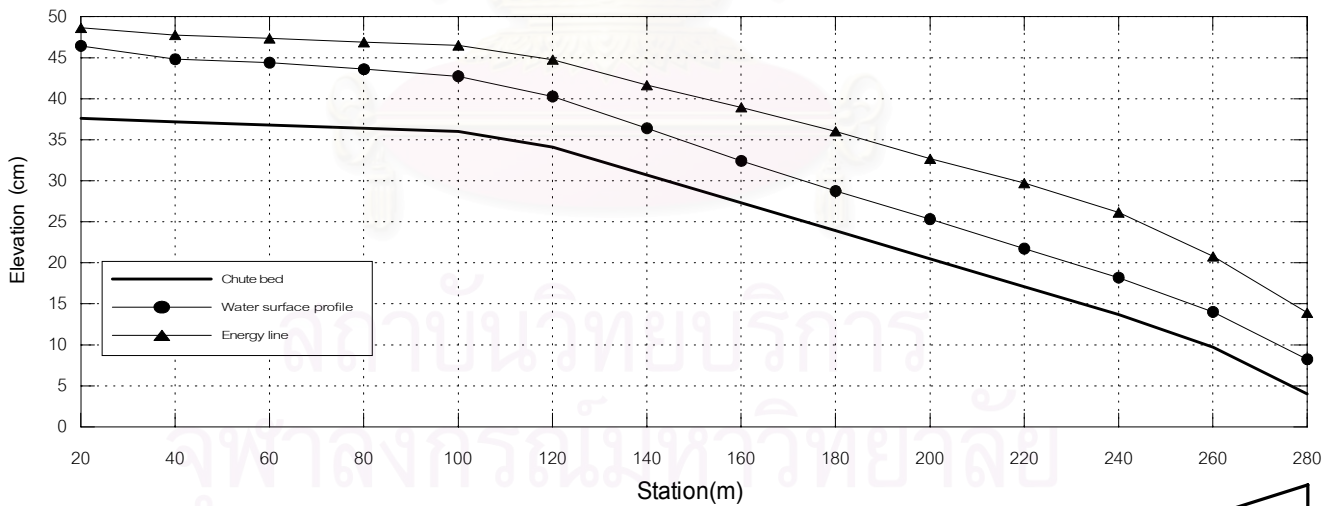


รูป ก-19 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 180 อัตราการไหล = 28.29 l/s

ตาราง ก-20 ผลการทดลอง D - 5

No.180 Q = 28.96 l/s overflow depth = 4.01 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	8.844	50.00	57.92	6.993	442.22	65.49	48.630	1.265	0.00126	0.70
2	40	37.20	7.611	50.00	57.92	6.993	380.56	76.10	47.763	1.088	0.00126	0.88
3	60	36.80	7.594	50.00	57.92	6.993	379.72	76.27	47.359	1.086	0.00126	0.88
4	80	36.40	7.197	50.00	57.92	6.993	359.83	80.48	46.898	1.029	0.00126	0.96
5	100	36.00	6.740	50.00	57.92	6.993	337.00	85.93	46.504	0.964	0.00126	1.06
6	120	34.10	6.170	50.00	57.92	6.993	308.50	93.97	44.761	0.882	0.00126	1.21
7	140	30.70	5.700	50.00	57.92	6.993	285.00	101.6	41.663	0.815	0.00126	1.36
8	160	27.30	5.120	50.00	57.92	6.993	256.00	113.1	38.943	0.732	0.00126	1.60
9	180	23.90	4.847	50.00	57.92	6.993	242.33	119.5	36.026	0.693	0.00126	1.73
10	200	20.50	4.817	50.00	57.92	6.993	240.83	120.2	32.687	0.689	0.00126	1.75
11	220	17.10	4.627	50.00	57.92	6.993	231.33	125.2	29.714	0.662	0.00126	1.86
12	240	13.70	1.490	51.67	56.05	6.842	231.98	124.8	26.133	0.656	0.00129	1.88
13	260	9.70	4.310	58.33	49.65	6.310	251.42	115.2	20.773	0.683	0.00139	1.77
14	280	4.02	4.223	65.00	44.55	5.871	274.52	105.5	13.916	0.719	0.00150	1.64

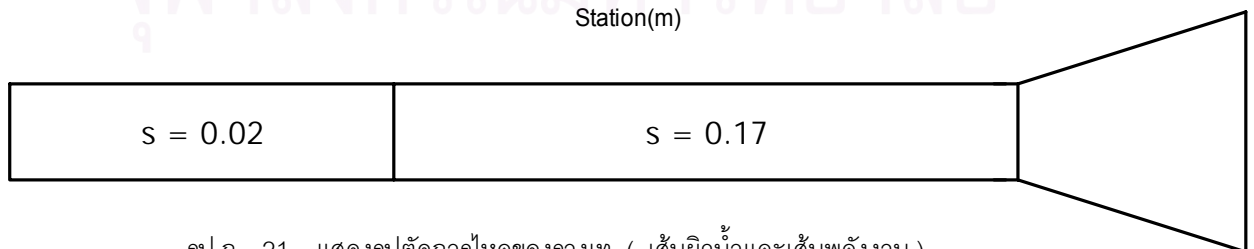
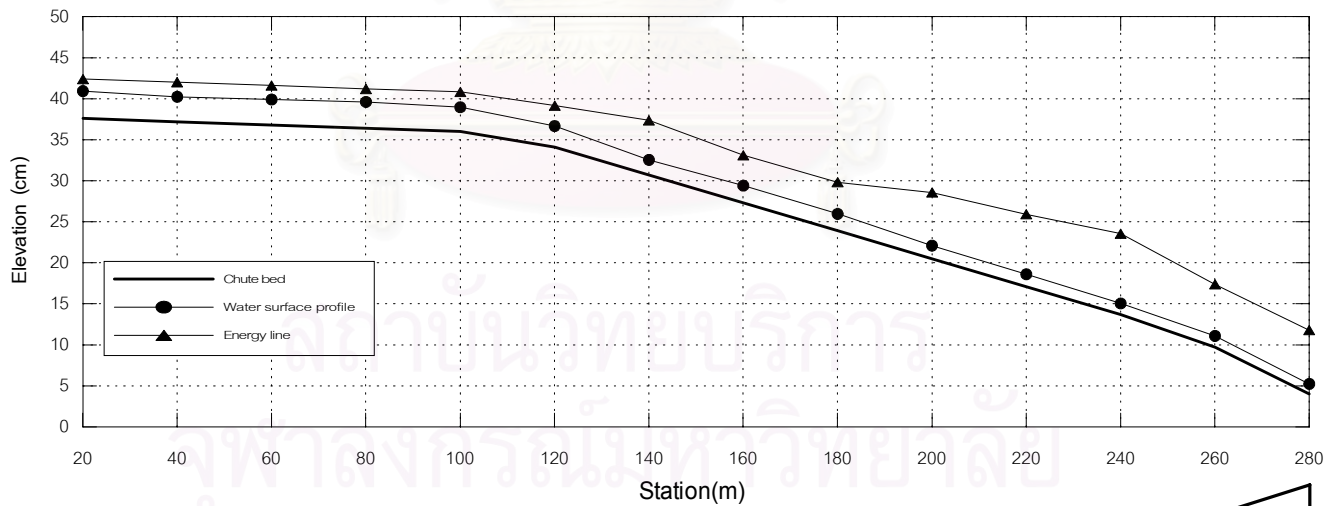


รูป ก-20 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาษทรายเบอร์ 180 อัตราการไหล = 28.96 l/s

ตาราง ก-21 ผลการทดลอง E - 1

No.80 $Q = 8.97 \text{ l/s}$ overflow depth = 1.98 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	3.328	50.00	17.94	3.201	166.39	53.91	42.409	1.040	0.00562	0.94
2	40	37.20	3.033	50.00	17.94	3.201	151.67	59.14	42.016	0.948	0.00562	1.08
3	60	36.80	3.100	50.00	17.94	3.201	155.00	57.87	41.607	0.968	0.00562	1.05
4	80	36.40	3.210	50.00	17.94	3.201	160.50	55.89	41.202	1.003	0.00562	1.00
5	100	36.00	2.963	50.00	17.94	3.201	148.17	60.54	40.831	0.926	0.00562	1.12
6	120	34.10	2.573	50.00	17.94	3.201	128.67	69.72	39.150	0.804	0.00562	1.39
7	140	30.70	1.843	50.00	17.94	3.201	92.17	97.32	37.371	0.576	0.00562	2.29
8	160	27.30	2.100	50.00	17.94	3.201	105.00	85.43	33.120	0.656	0.00562	1.88
9	180	23.90	2.063	50.00	17.94	3.201	103.17	86.95	29.816	0.645	0.00562	1.93
10	200	20.50	1.590	50.00	17.94	3.201	79.50	112.8	28.579	0.497	0.00562	2.86
11	220	17.10	1.497	50.00	17.94	3.201	74.83	119.9	25.920	0.468	0.00562	3.13
12	240	13.70	1.343	51.67	17.36	3.132	69.41	129.2	23.557	0.429	0.00575	3.56
13	260	9.70	1.383	58.33	15.38	2.889	80.69	111.2	17.381	0.479	0.00623	3.02
14	280	4.02	1.217	65.00	13.80	2.688	79.08	113.4	11.794	0.453	0.00670	3.28

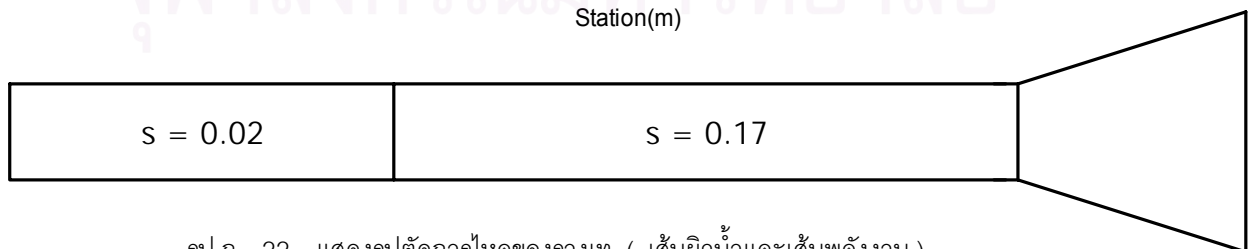
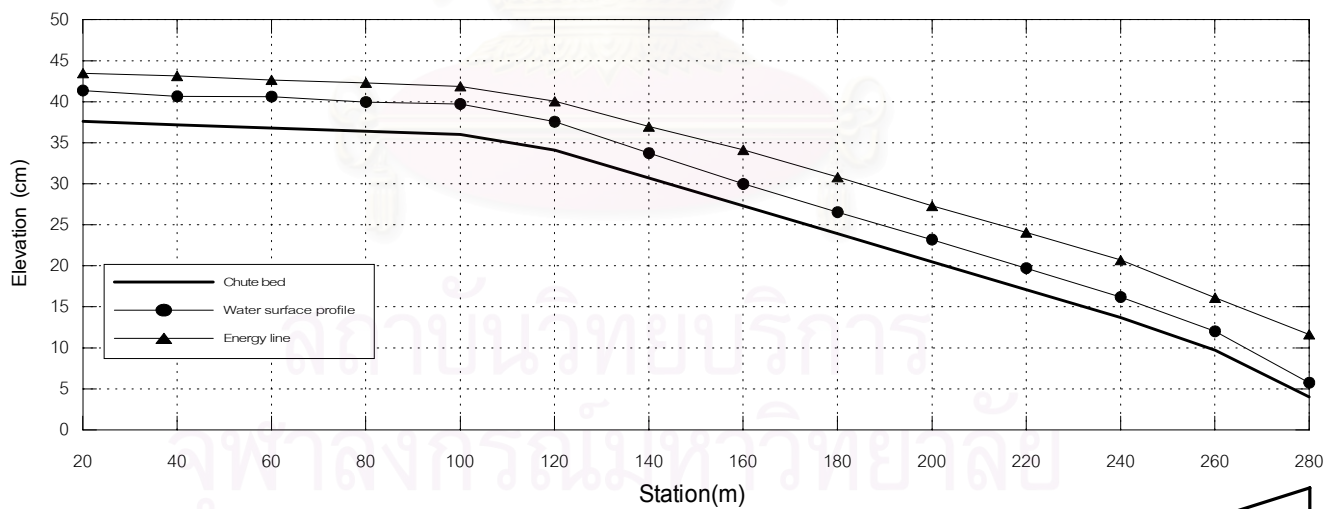


รูป ก-21 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดหยาบเบอร์ 80 อัตราการไหล = 8.97 l/s

ตาราง ก-22 ผลการทดลอง E - 2

No.80 Q = 12.10 l/s overflow depth = 2.30 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	3.767	50.00	24.20	3.908	188.33	64.25	43.471	0.964	0.00461	1.06
2	40	37.20	3.461	50.00	24.20	3.908	173.06	69.92	43.153	0.886	0.00461	1.20
3	60	36.80	3.833	50.00	24.20	3.908	191.67	63.13	42.665	0.981	0.00461	1.03
4	80	36.40	3.570	50.00	24.20	3.908	178.50	67.79	42.312	0.913	0.00461	1.15
5	100	36.00	3.723	50.00	24.20	3.908	186.17	65.00	41.876	0.953	0.00461	1.08
6	120	34.10	3.463	50.00	24.20	3.908	173.17	69.87	40.050	0.886	0.00461	1.20
7	140	30.70	3.033	50.00	24.20	3.908	151.67	79.78	36.977	0.776	0.00461	1.46
8	160	27.30	2.677	50.00	24.20	3.908	133.83	90.41	34.143	0.685	0.00461	1.76
9	180	23.90	2.643	50.00	24.20	3.908	132.17	91.55	30.815	0.676	0.00461	1.80
10	200	20.50	2.697	50.00	24.20	3.908	134.83	89.74	27.301	0.690	0.00461	1.74
11	220	17.10	2.617	50.00	24.20	3.908	130.83	92.48	24.076	0.670	0.00461	1.83
12	240	13.70	2.493	51.67	23.42	3.824	128.82	93.93	20.690	0.652	0.00471	1.90
13	260	9.70	2.317	58.33	20.74	3.527	135.14	89.54	16.103	0.657	0.00510	1.88
14	280	4.02	1.733	65.00	18.62	3.281	112.67	107.4	11.632	0.528	0.00549	2.60

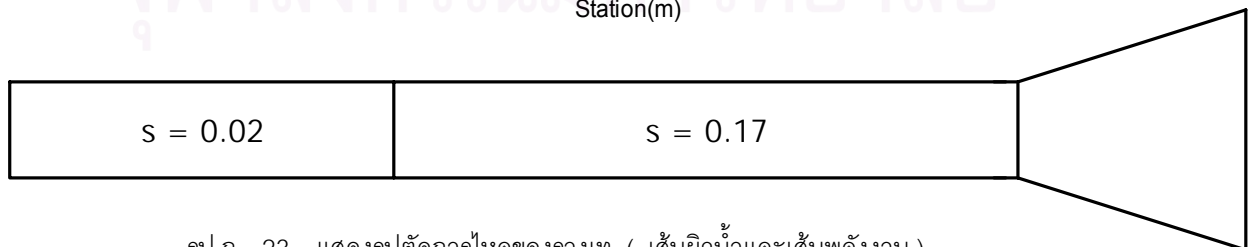
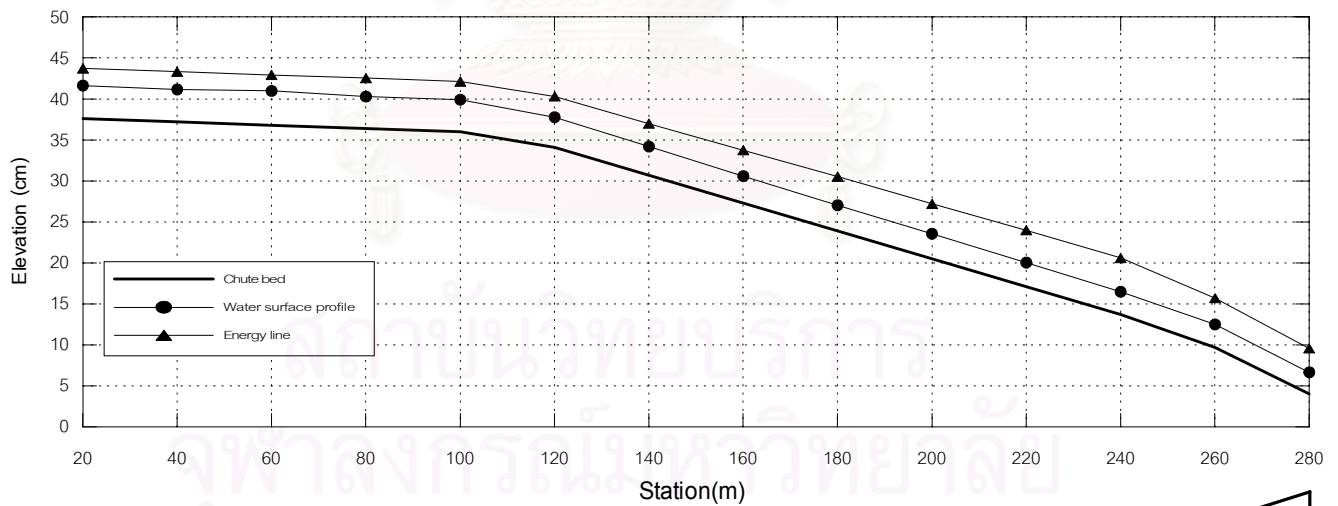


รูป ก-22 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดทรายเบอร์ 80 อัตราการไหล = 12.10 l/s

ตาราง ก-23 ผลการทดลอง E - 3

No.80 Q = 12.93 l/s overflow depth = 2.43 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y / y _c	k _s / y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	4.028	50.00	25.86	4.085	201.39	64.20	43.729	0.986	0.00441	1.02
2	40	37.20	3.956	50.00	25.86	4.085	197.78	65.38	43.334	0.968	0.00441	1.05
3	60	36.80	4.172	50.00	25.86	4.085	208.61	61.98	42.930	1.021	0.00441	0.97
4	80	36.40	3.887	50.00	25.86	4.085	194.33	66.54	42.543	0.951	0.00441	1.08
5	100	36.00	3.907	50.00	25.86	4.085	195.33	66.19	42.140	0.956	0.00441	1.07
6	120	34.10	3.670	50.00	25.86	4.085	183.50	70.76	40.301	0.898	0.00441	1.17
7	140	30.70	3.487	50.00	25.86	4.085	174.33	74.17	36.990	0.854	0.00441	1.27
8	160	27.30	3.287	50.00	25.86	4.085	164.33	78.68	33.742	0.805	0.00441	1.39
9	180	23.90	3.130	50.00	25.86	4.085	156.50	82.62	30.509	0.766	0.00441	1.49
10	200	20.50	3.057	50.00	25.86	4.085	152.83	84.60	27.205	0.748	0.00441	1.54
11	220	17.10	2.937	50.00	25.86	4.085	146.83	88.06	23.989	0.719	0.00441	1.64
12	240	13.70	2.780	51.67	25.03	3.997	143.63	90.02	20.610	0.696	0.00450	1.72
13	260	9.70	2.797	58.33	22.17	3.686	163.14	79.26	15.698	0.759	0.00488	1.51
14	280	4.02	2.627	65.00	19.89	3.430	170.73	75.73	9.570	0.766	0.00525	1.49

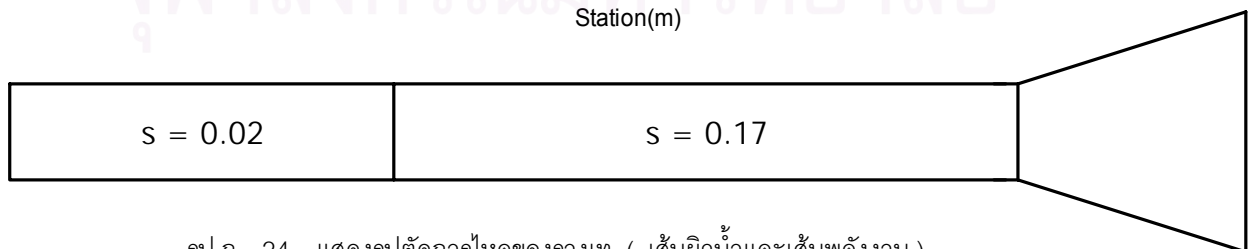
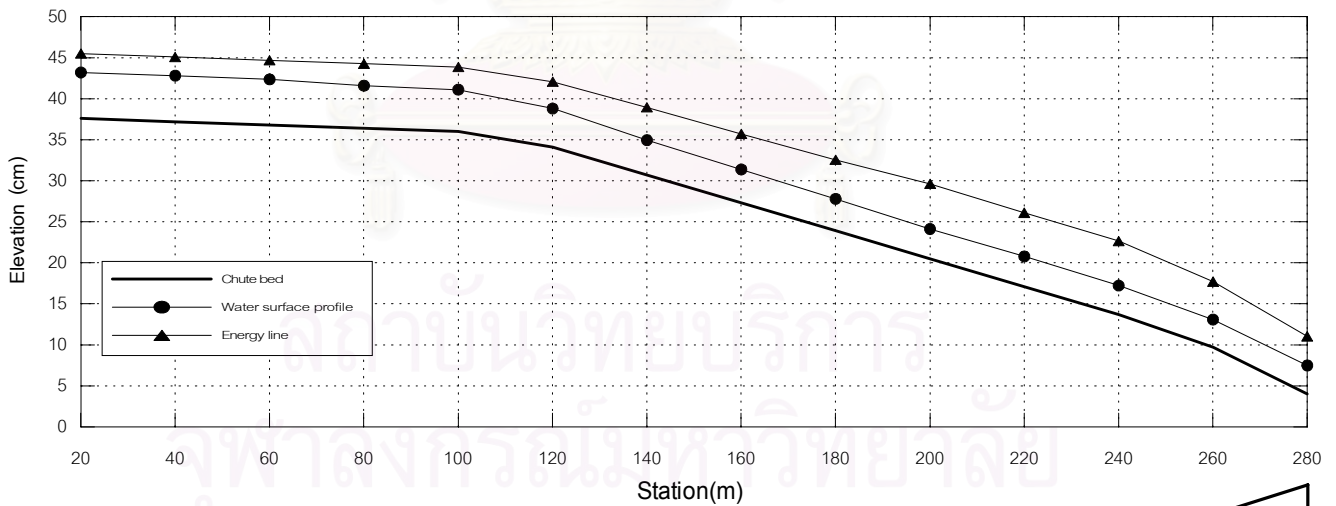


รูป ก-23 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดหยาบเบอร์ 80 อัตราการไหล = 12.93 l/s

ตาราง ก-24 ผลการทดลอง E - 4

No.80 Q = 18.80 l/s overflow depth = 3.14 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y _c	A	v	E	y/y _c	k _s /y _c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	l/(s.m)	(7)	(cm ²)	cm/s	(cm)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	5.600	50.00	37.60	5.243	280.00	67.14	45.498	1.068	0.00343	0.91
2	40	37.20	5.611	50.00	37.60	5.243	280.56	67.01	45.100	1.070	0.00343	0.90
3	60	36.80	5.561	50.00	37.60	5.243	278.06	67.61	44.691	1.061	0.00343	0.92
4	80	36.40	5.187	50.00	37.60	5.243	259.33	72.49	44.265	0.989	0.00343	1.02
5	100	36.00	5.103	50.00	37.60	5.243	255.17	73.68	43.870	0.973	0.00343	1.04
6	120	34.10	4.703	50.00	37.60	5.243	235.17	79.94	42.061	0.897	0.00343	1.18
7	140	30.70	4.250	50.00	37.60	5.243	212.50	88.47	38.939	0.811	0.00343	1.37
8	160	27.30	4.077	50.00	37.60	5.243	203.83	92.23	35.712	0.778	0.00343	1.46
9	180	23.90	3.893	50.00	37.60	5.243	194.67	96.58	32.547	0.743	0.00343	1.56
10	200	20.50	3.617	50.00	37.60	5.243	180.83	104.0	29.626	0.690	0.00343	1.75
11	220	17.10	3.677	50.00	37.60	5.243	183.83	102.3	26.107	0.701	0.00343	1.70
12	240	13.70	3.525	51.67	36.39	5.130	182.04	103.3	22.659	0.687	0.00351	1.76
13	260	9.70	3.377	58.33	32.23	4.731	196.97	95.44	17.720	0.714	0.00380	1.66
14	280	4.02	3.467	65.00	28.92	4.402	225.33	83.43	11.035	0.788	0.00409	1.43

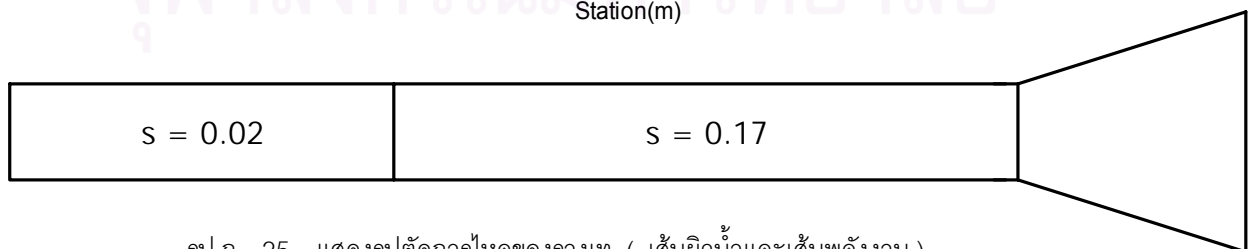
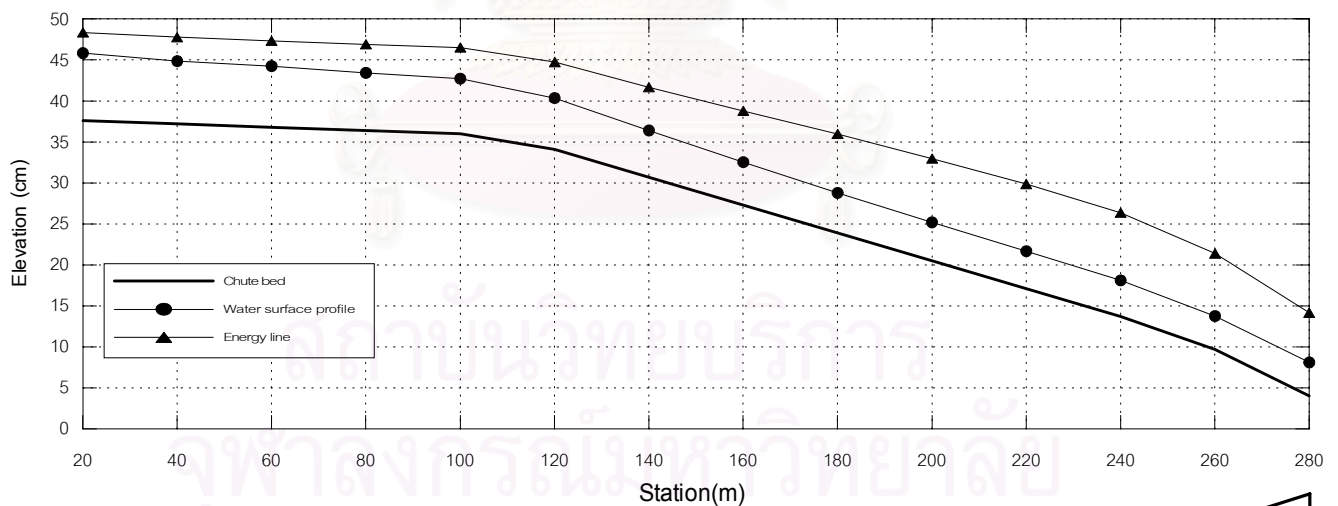


รูป ก-24 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดทรายเบอร์ 80 อัตราการไหล = 18.80 l/s

ตาราง ก-25 ผลการทดลอง E - 5

No.80 Q = 29.00 l/s overflow depth = 4.01 cm.												
No.	Sta.	El_B	y	B	q	y_c	A	v	E	y/y_c	k_s/y_c	Fr
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	20	37.60	8.233	50.00	58.00	6.999	411.67	70.45	48.363	1.176	0.00257	0.78
2	40	37.20	7.656	50.00	58.00	6.999	382.72	75.76	47.781	1.094	0.00257	0.87
3	60	36.80	7.450	50.00	58.00	6.999	372.50	77.85	47.339	1.064	0.00257	0.91
4	80	36.40	7.023	50.00	58.00	6.999	351.17	82.58	46.899	1.003	0.00257	0.99
5	100	36.00	6.717	50.00	58.00	6.999	335.83	86.35	46.517	0.960	0.00257	1.06
6	120	34.10	6.253	50.00	58.00	6.999	312.67	92.75	44.738	0.893	0.00257	1.18
7	140	30.70	5.697	50.00	58.00	6.999	284.83	101.8	41.680	0.814	0.00257	1.36
8	160	27.30	5.237	50.00	58.00	6.999	261.83	110.8	38.789	0.748	0.00257	1.55
9	180	23.90	4.883	50.00	58.00	6.999	244.17	118.8	35.973	0.698	0.00257	1.72
10	200	20.50	4.693	50.00	58.00	6.999	237.67	123.6	32.977	0.671	0.00257	1.82
11	220	17.10	4.573	50.00	58.00	6.999	228.67	126.8	29.871	0.653	0.00257	1.89
12	240	13.70	4.410	51.67	56.13	6.848	227.85	127.3	26.367	0.644	0.00263	1.94
13	260	9.70	4.060	58.33	49.71	6.316	236.83	122.4	21.402	0.643	0.00285	1.94
14	280	4.02	4.087	65.00	44.62	5.876	265.63	109.2	14.181	0.695	0.00306	1.72



รูป ก-25 แสดงรูปตัดการไหลของรางเท (เส้นผิวน้ำและเส้นพลังงาน)

ผิวกระดาดทรายเบอร์ 80 อัตราการไหล = 29.00 l/s

ภาคผนวก ข

การสอบเทียบเพื่อหาค่าความขรุขระ

ทำการสอบเทียบเพื่อหาค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness, k_s) ของลักษณะผิวรางเทแบบต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของการไหลของน้ำผ่านท่อพลาสติกวงกลม (PVC) และลักษณะผิวภายในท่อใช้กระดาษทรายเบอร์ 400, 280, 180 และ 80 ซึ่งเป็นลักษณะผิวเดียวกับผิวรางเท เมื่อให้น้ำไหลผ่านท่อพลาสติก ทำการวัดค่าความแตกต่างของพลังงานการไหลของน้ำระหว่างจุด 2 จุด โดยใช้มาโนมิเตอร์ และวัดค่าอัตราการไหลของน้ำ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (resistance coefficient, f) ในสมการ

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (\text{ข-1})$$

เมื่อ	h_f	คือ พลังงานสูญเสียในการไหล
	f	คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล
	L	คือ ความยาวของท่อ
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ
	v	คือ ความเร็วการไหล
	g	คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

นำค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลที่ได้ ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์กับเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold Number) และนำกราฟที่ได้เทียบกับกราฟความสัมพันธ์เดียวกันซึ่งเสนอโดย Nikuradse (1933) ดังรูป ข.1 ทำให้ทราบค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness, k_s/D) ค่าความขรุขระสัมพัทธ์และค่าความขรุขระของลักษณะผิวต่าง ๆ และนำค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลแปลงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ตามสมการ ข-1

$$n = \sqrt{\frac{f}{8g}} R^{1/6} \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อ n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง

R คือ รัศมีชลศาสตร์

ค่าต่างๆที่ได้แสดงไว้ดังตาราง ข-1 ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังตาราง ข-2 ถึง ข-6 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการทดลองนี้แสดงไว้ดังรูป ข-2

ตาราง ข-1 แสดงค่าความขรุขระและ Manning' n ของลักษณะผิวต่าง ๆ

ลักษณะผิว	k_s/D	k_s (cm)	f	n
ผิวเรียบ	-	-	0.0157	0.00624
เบอร์ 400	0.003	0.00883	0.0183	0.00672
เบอร์ 280	0.004	0.01178	0.0230	0.00755
เบอร์ 180	0.008	0.02355	0.0313	0.00880
เบอร์ 80	0.015	0.04416	0.0425	0.01025

ตาราง ข-2 แสดงการหาค่า Manning' n และ f ของลักษณะผิวเรียบ

ลักษณะผิว ผิวเรียบ (PVC)							
ความยาวช่วงที่พิจารณา = 1.41 ม.							
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.				พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.			
อุณหภูมิน้ำ = 30 ⁰ C				ความหนืดของน้ำ (ν) = 8×10^{-7} ม. ² /วินาที			
Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H_f (mm)	v (m/s)	Re	f	n
0.96	485	407	78	1.42	5.2×10^4	0.0159	0.00628
1.24	524	398	126	1.82	6.7×10^4	0.0156	0.00622
2.20	560	385	175	2.20	8.1×10^4	0.0149	0.00608
2.55	620	370	250	2.55	9.4×10^4	0.0158	0.00626
2.80	660	355	305	2.80	10.3×10^4	0.0160	0.00630
3.20	730	330	400	3.20	11.8×10^4	0.0160	0.00630
ค่าเฉลี่ย						0.0157	0.00624

ตาราง ข-3 แสดงการหาค่า Manning' n และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 400

ลักษณะผิว ผิวกระดาดทรายเบอร์ 400							
ความยาวช่วงที่พิจารณา = 1.52 ม.							
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.				พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.			
อุณหภูมิน้ำ = 30 ⁰ C				ความหนืดของน้ำ (v) = 8×10 ⁻⁷ ม. ² /วินาที			
Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H _f (mm)	v (m/s)	Re	f	n
1.00	595	503	92	1.47	5.4×10 ⁴	0.0164	0.00637
1.45	677	482	195	2.13	7.8×10 ⁴	0.0164	0.00635
1.79	775	444	331	2.63	9.7×10 ⁴	0.0183	0.00673
1.89	823	424	399	2.77	10.2×10 ⁴	0.0197	0.00699
2.03	880	396	484	2.99	11.0×10 ⁴	0.0207	0.00716
ค่าเฉลี่ย						0.0183	0.00672

ตาราง ข-4 แสดงการหาค่า Manning' n และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 280

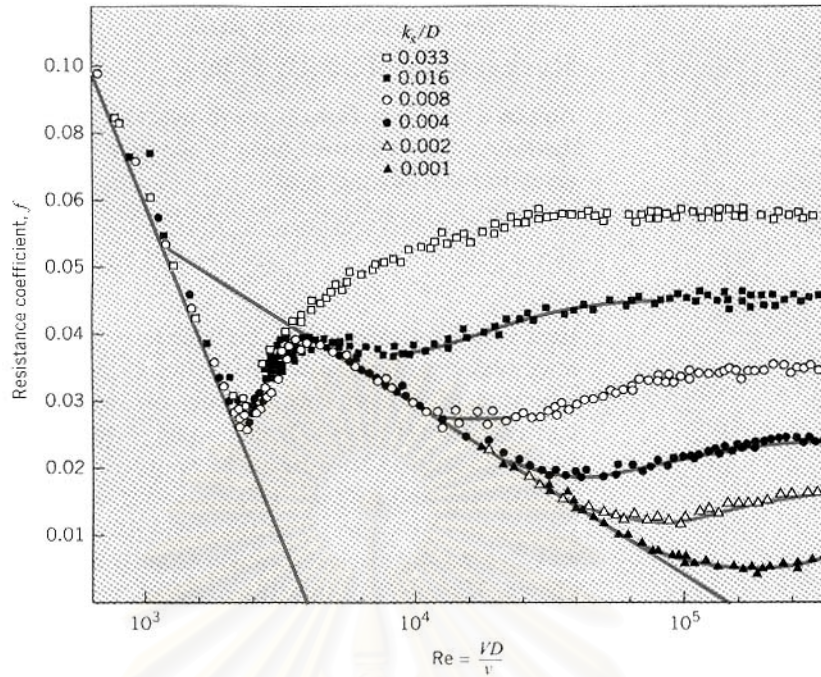
ลักษณะผิว ผิวกระดาดทรายเบอร์ 280							
ความยาวช่วงที่พิจารณา = 1.53 ม.							
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.				พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.			
อุณหภูมิน้ำ = 30 ⁰ C				ความหนืดของน้ำ (v) = 8×10 ⁻⁷ ม. ² /วินาที			
Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H _f (mm)	V (m/s)	Re	f	n
0.81	433	359	74	1.19	4.4×10 ⁴	0.0225	0.00747
1.11	478	357	121	1.63	6.0×10 ⁴	0.0201	0.00706
1.28	537	329	208	1.88	6.9×10 ⁴	0.0249	0.00785
1.63	615	308	307	2.40	8.8×10 ⁴	0.0230	0.00755
1.89	703	272	431	2.77	10.2×10 ⁴	0.0239	0.00769
2.22	825	231	594	3.26	12.0×10 ⁴	0.0238	0.00768
ค่าเฉลี่ย						0.0230	0.00755

ตาราง ข-5 แสดงการหาค่า Manning' n และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 180

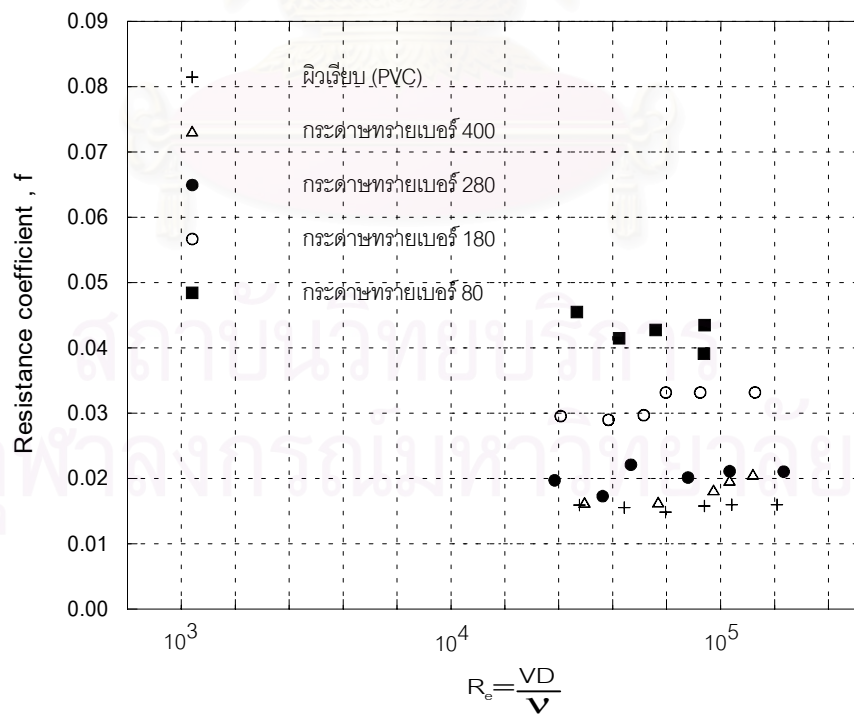
ลักษณะผิว ผิวกระดาดทรายเบอร์ 180							
ความยาวช่วงที่พิจารณา = 1.51 ม.							
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.				พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.			
อุณหภูมิน้ำ = 30 ⁰ C				ความหนืดของน้ำ (v) = 8×10 ⁻⁷ ม. ² /วินาที			
Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H _f (mm)	v (m/s)	Re	f	n
0.85	475	355	120	1.25	4.6×10 ⁴	0.0296	0.00856
1.14	545	331	214	1.68	6.2×10 ⁴	0.0290	0.00848
1.36	613	303	310	2.00	7.4×10 ⁴	0.0297	0.00858
1.50	685	266	419	2.20	8.1×10 ⁴	0.0332	0.00907
1.71	775	229	546	2.51	9.2×10 ⁴	0.0332	0.00907
2.05	935	152	783	3.00	11.1×10 ⁴	0.0332	0.00907
ค่าเฉลี่ย						0.0313	0.00880

ตาราง ข.6 แสดงการหาค่า Manning' n และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 80

ลักษณะผิว ผิวกระดาดทรายเบอร์ 80							
ความยาวช่วงที่พิจารณา = 1.54 ม.							
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.				พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.			
อุณหภูมิน้ำ = 30 ⁰ C				ความหนืดของน้ำ (v) = 8×10 ⁻⁷ ม. ² /วินาที			
Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H _f (mm)	v (m/s)	Re	f	n
0.95	654	418	236	1.40	5.1×10 ⁴	0.0455	0.01062
1.21	728	379	349	1.78	6.5×10 ⁴	0.0415	0.01014
1.43	828	323	505	2.10	7.7×10 ⁴	0.0428	0.01030
1.73	938	263	675	2.54	9.4×10 ⁴	0.0391	0.00984
1.74	995	241	754	2.55	9.4×10 ⁴	0.0435	0.01038
ค่าเฉลี่ย						0.425	0.01025



รูป ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง resistance coefficient, f และค่า Reynold Number
ซึ่งเสนอโดย Nikuradse (1933)



รูป ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง resistance coefficient, f และค่า Reynold Number
ของการศึกษาชิ้นนี้

ภาคผนวก ค.

ภาพการทดลองในแบบจำลอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ค-1 แบบจำลองรางเทของทางระบายน้ำล้นด้านบน



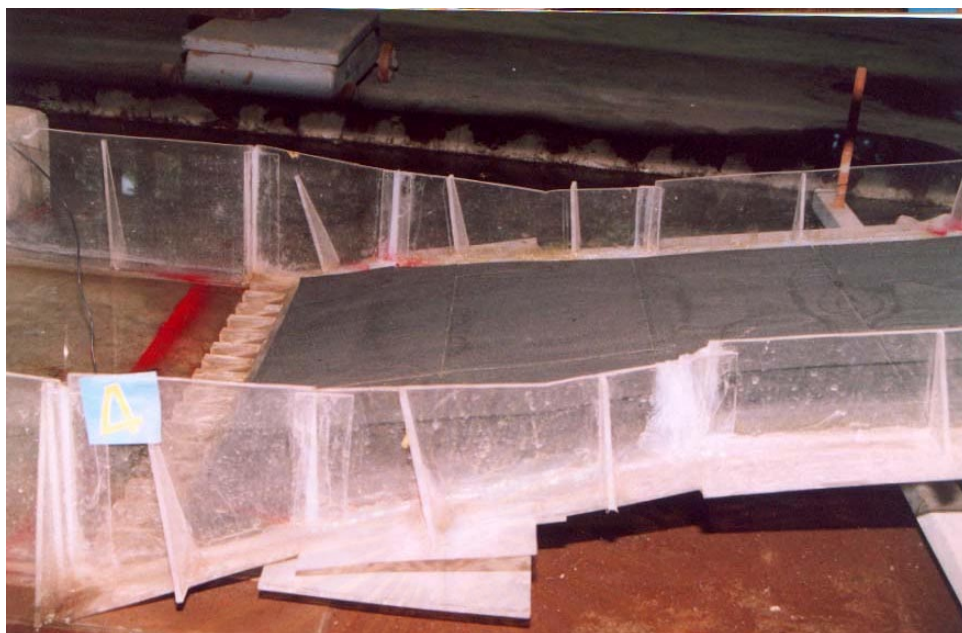
รูป ค-2 แบบจำลองรางเทของทางระบายน้ำล้นด้านข้าง



รูป ค-3 ทางน้ำเข้ารางเทของทางระบายน้ำล้น



รูป ค-4 ทางน้ำเข้ารางเทของทางระบายน้ำล้นขณะทำการทดลอง



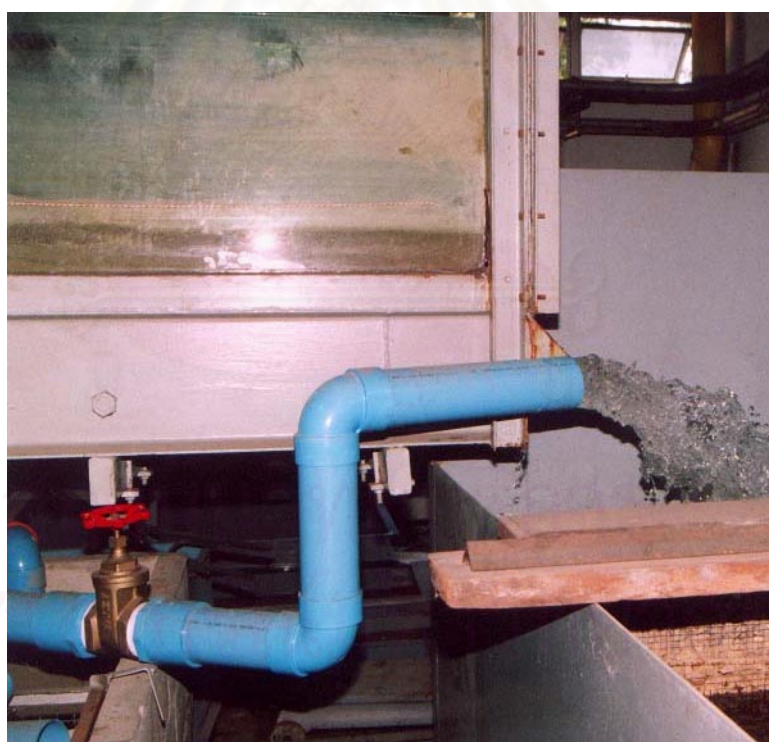
รูป ค-5 ทำयน้ำของทางระบายน้ำล้น



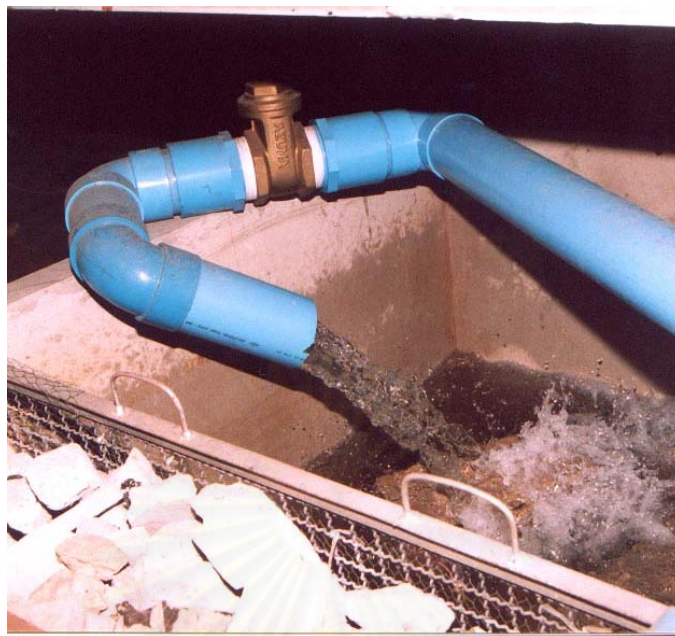
รูป ค-6 ทำยน้ำของทางระบายน้ำล้นขณะทำการทดลอง



รูป ค-7 ทำน้ำของทางระบายน้ำล้นขณะทำการทดลอง



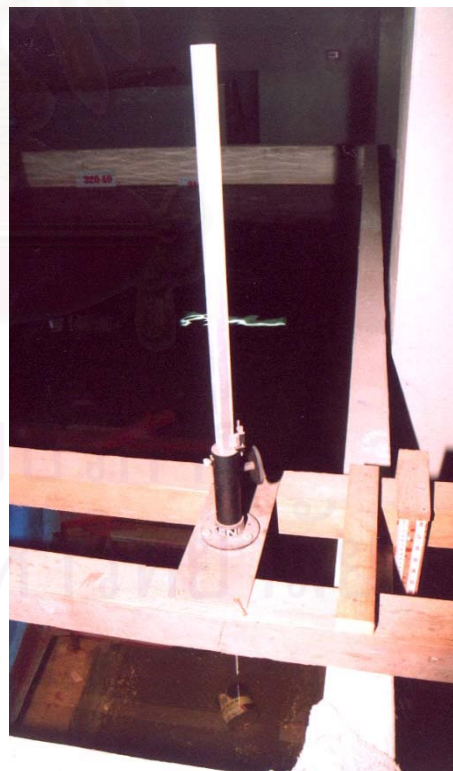
รูป ค-7 ท่อสำหรับวัดอัตราการไหลในการทดลอง



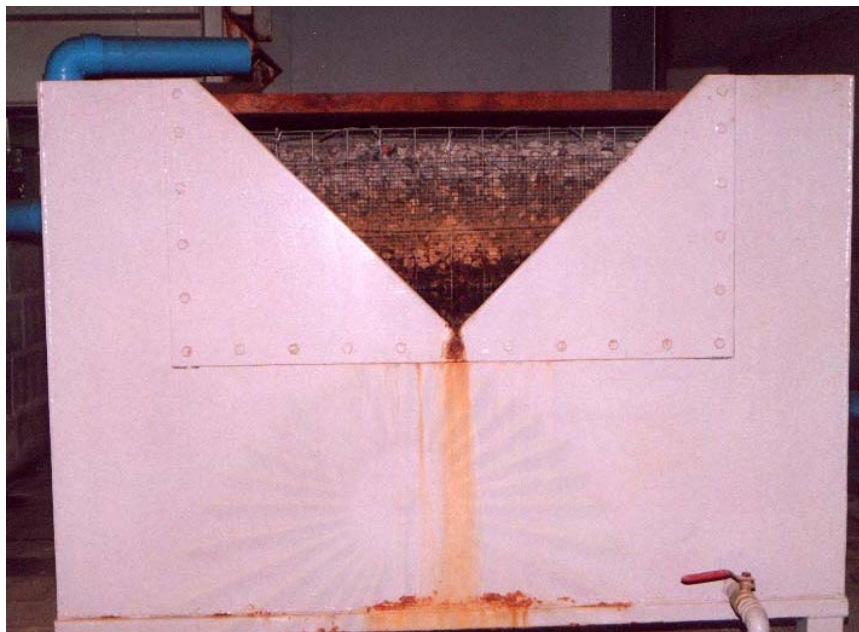
รูป ค-8 ท่อสำหรับวัดอัตราการไหลในการทดลอง



รูป ค-9 วัดอัตราการไหลเข้าฝายสามเหลี่ยม



รูป ค-10 วัดระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ



รูป ค-11 ฝ่ายสามเหลี่ยมใช้วัดอัตราการไหลในการทดลอง



รูป ค-8 ฝ่ายสันโค้งของทางระบายน้ำด้นในแบบจำลองท่อสำหรับวัดอัตราการไหลในการทดลอง

ภาคผนวก ง.

ผลการคำนวณจากสูตรของ Manning



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-1 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิวเรียบ $Q = 164.58 \text{ m}^3/\text{s} = 0.23 Q_d$, $y_c = 1.61 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.61	40.24	1.43	4.09	0.8526	2.4622		0.0015				50.00
1.77	44.26	1.55	3.72	0.7046	2.4752	-0.0130	0.0011	0.0013	0.0187	-0.6948	49.31
1.93	48.29	1.67	3.41	0.5921	2.5236	-0.0484	0.0008	0.0010	0.0190	-2.5450	46.76
2.09	52.31	1.79	3.15	0.5045	2.5970	-0.0734	0.0007	0.0007	0.0193	-3.8114	42.95
2.25	56.34	1.91	2.92	0.4350	2.6884	-0.0915	0.0005	0.0006	0.0194	-4.7114	38.24
2.41	60.36	2.02	2.73	0.3789	2.7933	-0.1049	0.0004	0.0005	0.0195	-5.3705	32.87
2.58	64.38	2.14	2.56	0.3330	2.9084	-0.1151	0.0003	0.0004	0.0196	-5.8652	27.00
2.74	68.41	2.24	2.41	0.2950	3.0313	-0.1229	0.0003	0.0003	0.0197	-6.2442	20.76
3.00	74.97	2.42	2.20	0.2456	3.2443	-0.2130	0.0002	0.0002	0.0198	-10.7841	9.97

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.61	40.24	1.43	4.09	0.8526	2.4622		0.0015				50.00
1.53	38.23	1.36	4.31	0.9447	2.4738	-0.0116	0.0018	0.0016	0.0934	-0.1245	50.12
1.45	36.22	1.30	4.54	1.0526	2.5012	-0.0274	0.0021	0.0019	0.0931	-0.2944	50.42
1.37	34.20	1.23	4.81	1.1801	2.5482	-0.0470	0.0025	0.0023	0.0927	-0.5070	50.93
1.29	32.19	1.17	5.11	1.3322	2.6198	-0.0716	0.0031	0.0028	0.0922	-0.7769	51.70
1.13	28.17	1.03	5.84	1.7400	2.8667	-0.2468	0.0047	0.0039	0.0911	-2.7091	54.41
0.96	23.94	0.89	6.87	2.4083	3.3660	-0.4993	0.0080	0.0063	0.0887	-5.6308	60.04

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
0.96	23.94	0.89	6.87	2.4083	3.3660		0.0080				60.04
0.80	20.12	0.76	8.18	3.4104	4.2152	-0.8492	0.0140	0.0110	0.1590	-5.3397	65.38
0.72	18.11	0.68	9.09	4.2103	4.9346	-0.7195	0.0197	0.0169	0.1531	-4.6979	70.08
0.64	16.10	0.61	10.22	5.3287	5.9725	-1.0379	0.0290	0.0243	0.1457	-7.1251	77.21
0.56	14.08	0.54	11.69	6.9599	7.5233	-1.5507	0.0448	0.0369	0.1331	-11.6499	88.86
0.48	12.07	0.46	13.63	9.4732	9.9561	-2.4328	0.0743	0.0596	0.1104	-22.0296	110.88

ตาราง ง-2 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิวเรียบ $Q = 318.55 \text{ m}^3/\text{s} = 0.45 Q_d$, $y_c = 2.50 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.50	62.50	2.08	5.10	1.3241	3.8240		0.0014				50.00
2.62	65.62	2.17	4.85	1.2010	3.8259	-0.0019	0.0012	0.0013	0.0187	-0.1010	49.90
2.75	68.75	2.25	4.63	1.0943	3.8442	-0.0183	0.0010	0.0011	0.0189	-0.9691	48.93
2.87	71.87	2.34	4.43	1.0012	3.8761	-0.0319	0.0009	0.0010	0.0190	-1.6773	47.25
3.00	75.00	2.42	4.25	0.9195	3.9194	-0.0433	0.0008	0.0009	0.0191	-2.2616	44.99
3.25	81.25	2.58	3.92	0.7835	4.0334	-0.1140	0.0006	0.0007	0.0193	-5.9086	39.08
3.50	87.50	2.73	3.64	0.6756	4.1754	-0.1421	0.0005	0.0006	0.0194	-7.3083	31.77
3.75	93.75	2.88	3.40	0.5885	4.3383	-0.1629	0.0004	0.0005	0.0195	-8.3340	23.44
4.11	102.81	3.09	3.10	0.4893	4.6016	-0.2633	0.0003	0.0004	0.0196	-13.4037	10.04

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.50	62.50	2.08	5.10	1.3241	3.8240		0.0014				50.00
2.37	59.37	2.00	5.37	1.4672	3.8421	-0.0181	0.0016	0.0015	0.0935	-0.1932	50.19
2.25	56.25	1.91	5.66	1.6348	3.8846	-0.0426	0.0020	0.0018	0.0932	-0.4566	50.65
2.12	53.12	1.82	6.00	1.8327	3.9576	-0.0730	0.0023	0.0021	0.0929	-0.7860	51.44
2.00	50.00	1.72	6.37	2.0690	4.0689	-0.1113	0.0028	0.0026	0.0924	-1.2038	52.64
1.75	43.75	1.54	7.28	2.7023	4.4523	-0.3834	0.0043	0.0036	0.0914	-4.1931	56.83
1.63	40.87	1.45	7.79	3.0959	4.7308	-0.2785	0.0054	0.0048	0.0902	-3.0889	59.92

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.63	40.87	1.45	7.79	3.0959	4.7308		0.0054				59.92
1.50	37.50	1.34	8.50	3.6782	5.1781	-0.4473	0.0070	0.0062	0.1638	-2.7309	62.65
1.25	31.25	1.14	10.19	5.2966	6.5465	-1.3684	0.0126	0.0098	0.1602	-8.5435	71.20
1.00	25.00	0.93	12.74	8.2759	9.2759	-2.7293	0.0259	0.0193	0.1507	-18.1069	89.30
0.86	21.44	0.80	14.86	11.2551	12.1125	-2.8367	0.0426	0.0343	0.1357	-20.9005	110.20

ตาราง ง-3 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิวเรียบ $Q = 416.49 \text{ m}^3/\text{s} = 0.59 Q_d$, $y_c = 2.99 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.99	74.73	2.41	5.57	1.5834	4.5724		0.0014				50.00
3.14	78.46	2.51	5.31	1.4361	4.5746	-0.0022	0.0012	0.0013	0.0187	-0.1199	49.88
3.29	82.20	2.60	5.07	1.3086	4.5965	-0.0219	0.0010	0.0011	0.0189	-1.1572	48.72
3.44	85.93	2.70	4.85	1.1972	4.6346	-0.0381	0.0009	0.0010	0.0190	-2.0037	46.72
3.59	89.67	2.79	4.64	1.0996	4.6864	-0.0518	0.0008	0.0008	0.0192	-2.7023	44.02
3.74	93.41	2.88	4.46	1.0133	4.7496	-0.0632	0.0007	0.0007	0.0193	-3.2848	40.73
3.89	97.14	2.96	4.29	0.9369	4.8226	-0.0730	0.0006	0.0007	0.0193	-3.7747	36.96
4.18	104.62	3.14	3.98	0.8078	4.9924	-0.1698	0.0005	0.0006	0.0194	-8.7363	28.22
4.72	118.07	3.43	3.53	0.6343	5.3569	-0.3644	0.0003	0.0004	0.0196	-18.6149	9.61

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.99	74.73	2.41	5.57	1.5834	4.5724		0.0014				50.00
2.84	70.99	2.31	5.87	1.7544	4.5940	-0.0216	0.0016	0.0015	0.0935	-0.2311	50.23
2.69	67.25	2.21	6.19	1.9548	4.6449	-0.0509	0.0019	0.0018	0.0932	-0.5459	50.78
2.54	63.52	2.11	6.56	2.1915	4.7321	-0.0873	0.0023	0.0021	0.0929	-0.9396	51.72
2.39	59.78	2.01	6.97	2.4740	4.8652	-0.1330	0.0028	0.0025	0.0925	-1.4387	53.16
2.09	52.31	1.79	7.96	3.2313	5.3236	-0.4584	0.0042	0.0035	0.0915	-5.0091	58.16
2.00	50.07	1.73	8.32	3.5272	5.5298	-0.2062	0.0048	0.0045	0.0905	-2.2783	60.44

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.00	50.07	1.73	8.32	3.5272	5.5298		0.0048				60.44
1.79	44.84	1.57	9.29	4.3982	6.1916	-0.6618	0.0068	0.0058	0.1642	-4.0308	64.47
1.49	37.36	1.33	11.15	6.3334	7.8279	-1.6363	0.0122	0.0095	0.1605	-10.1949	74.67
1.20	29.89	1.09	13.93	9.8960	11.0916	-3.2636	0.0249	0.0185	0.1515	-21.5466	96.21
1.08	26.90	0.99	15.48	12.2172	13.2933	-2.2017	0.0349	0.0299	0.1401	-15.7172	111.93

ตาราง ง-4 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิวเรียบ $Q = 500.28 \text{ m}^3/\text{s} = 0.70 Q_d$, $y_c = 3.38 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.38	84.44	2.66	5.92	1.7891	5.1667		0.0014				50.00
3.55	88.66	2.76	5.64	1.6228	5.1692	-0.0025	0.0012	0.0013	0.0187	-0.1361	49.86
3.72	92.88	2.86	5.39	1.4786	5.1939	-0.0247	0.0010	0.0011	0.0189	-1.3077	48.56
3.88	97.11	2.96	5.15	1.3528	5.2370	-0.0431	0.0009	0.0010	0.0190	-2.2641	46.29
4.05	101.33	3.06	4.94	1.2424	5.2955	-0.0585	0.0008	0.0008	0.0192	-3.0536	43.24
4.22	105.55	3.16	4.74	1.1450	5.3670	-0.0715	0.0007	0.0007	0.0193	-3.7119	39.53
4.39	109.77	3.25	4.56	1.0586	5.4495	-0.0825	0.0006	0.0007	0.0193	-4.2656	35.26
4.73	118.22	3.43	4.23	0.9128	5.6414	-0.1919	0.0005	0.0006	0.0194	-9.8728	25.39
5.18	129.62	3.66	3.86	0.7593	5.9439	-0.3025	0.0004	0.0004	0.0196	-15.4634	9.92

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.38	84.44	2.66	5.92	1.7891	5.1667		0.0014				50.00
3.21	80.22	2.55	6.24	1.9824	5.1911	-0.0244	0.0016	0.0015	0.0935	-0.2609	50.26
3.04	76.00	2.45	6.58	2.2087	5.2486	-0.0575	0.0019	0.0017	0.0933	-0.6166	50.88
2.87	71.77	2.33	6.97	2.4762	5.3472	-0.0986	0.0023	0.0021	0.0929	-1.0613	51.94
2.70	67.55	2.22	7.41	2.7954	5.4975	-0.1503	0.0027	0.0025	0.0925	-1.6250	53.56
2.36	59.11	1.99	8.46	3.6512	6.0155	-0.5180	0.0041	0.0034	0.0916	-5.6564	59.22

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.36	59.11	1.99	8.46	3.6512	6.0155		0.0041				59.22
2.03	50.66	1.74	9.87	4.9697	6.9962	-0.9807	0.0067	0.0054	0.1646	-5.9585	65.18
1.69	42.22	1.49	11.85	7.1563	8.8451	-1.8489	0.0119	0.0093	0.1607	-11.5050	76.68
1.35	33.78	1.22	14.81	11.1818	12.5328	-3.6877	0.0243	0.0181	0.1519	-24.2736	100.96
1.27	31.75	1.15	15.76	12.6548	13.9248	-1.3920	0.0296	0.0269	0.1431	-9.7282	110.69

ตาราง ง-5 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิวเรียบ $Q = 542.70 \text{ m}^3/\text{s} = 0.79Q_d$, $y_c = 3.57 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.57	89.15	2.77	6.09	1.8889	5.4548		0.0014				50.00
3.74	93.60	2.88	5.80	1.7133	5.4575	-0.0027	0.0012	0.0013	0.0187	-0.1434	49.86
3.92	98.06	2.99	5.53	1.5611	5.4835	-0.0261	0.0010	0.0011	0.0189	-1.3803	48.48
4.10	102.52	3.09	5.29	1.4283	5.5290	-0.0455	0.0009	0.0010	0.0190	-2.3900	46.09
4.28	106.98	3.19	5.07	1.3117	5.5908	-0.0618	0.0008	0.0008	0.0192	-3.2236	42.86
4.46	111.43	3.29	4.87	1.2089	5.6663	-0.0755	0.0007	0.0007	0.0193	-3.9187	38.94
4.64	115.89	3.38	4.68	1.1177	5.7533	-0.0871	0.0006	0.0007	0.0193	-4.5034	34.44
4.99	124.81	3.57	4.35	0.9637	5.9560	-0.2026	0.0005	0.0006	0.0194	-10.4235	24.02
5.40	135.06	3.77	4.02	0.8230	6.2253	-0.2693	0.0004	0.0004	0.0196	-13.7746	10.24

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.57	89.15	2.77	6.09	1.8889	5.4548		0.0014				50.00
3.39	84.69	2.67	6.41	2.0929	5.4805	-0.0258	0.0016	0.0015	0.0935	-0.2755	50.28
3.21	80.23	2.55	6.76	2.3319	5.5412	-0.0607	0.0019	0.0017	0.0933	-0.6510	50.93
3.03	75.78	2.44	7.16	2.6144	5.6454	-0.1041	0.0022	0.0021	0.0929	-1.1204	52.05
2.85	71.32	2.32	7.61	2.9514	5.8041	-0.1587	0.0027	0.0025	0.0925	-1.7154	53.76
2.50	62.40	2.08	8.70	3.8548	6.3510	-0.5469	0.0041	0.0034	0.0916	-5.9708	59.73

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.50	62.40	2.08	8.70	3.8548	6.3510		0.0041				59.73
2.14	53.49	1.83	10.15	5.2469	7.3864	-1.0354	0.0066	0.0054	0.1646	-6.2894	66.02
1.78	44.57	1.56	12.18	7.5555	9.3384	-1.9520	0.0118	0.0092	0.1608	-12.1407	78.16
1.43	35.66	1.28	15.22	11.8054	13.2318	-3.8934	0.0240	0.0179	0.1521	-25.5963	103.76
1.37	34.32	1.24	15.81	12.7433	14.1161	-0.8843	0.0271	0.0256	0.1444	-6.1222	109.88

ตาราง ง-6 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #400 $Q = 224.86 \text{ m}^3/\text{s} = 0.32 Q_d, y_c = 1.98 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.98	49.55	1.71	4.54	1.0497	3.0316		0.0017				50.00
2.08	52.02	1.78	4.32	0.9521	3.0331	-0.0015	0.0014	0.0016	0.0184	-0.0813	49.92
2.18	54.50	1.86	4.13	0.8676	3.0476	-0.0145	0.0012	0.0013	0.0187	-0.7772	49.14
2.28	56.98	1.93	3.95	0.7938	3.0729	-0.0253	0.0011	0.0012	0.0188	-1.3427	47.80
2.38	59.46	2.00	3.78	0.7290	3.1073	-0.0343	0.0009	0.0010	0.0190	-1.8079	45.99
2.58	64.41	2.14	3.49	0.6211	3.1976	-0.0904	0.0007	0.0008	0.0192	-4.7160	41.27
2.77	69.37	2.27	3.24	0.5356	3.3102	-0.1126	0.0006	0.0007	0.0193	-5.8238	35.45
2.97	74.32	2.40	3.03	0.4666	3.4394	-0.1292	0.0005	0.0005	0.0195	-6.6337	28.82
3.17	79.28	2.53	2.84	0.4101	3.5811	-0.1417	0.0004	0.0004	0.0196	-7.2407	21.58
3.47	86.71	2.72	2.59	0.3428	3.8111	-0.2300	0.0003	0.0003	0.0197	-11.7002	9.876

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.98	49.55	1.71	4.54	1.0497	3.0316		0.0017				50.00
1.88	47.07	1.64	4.78	1.1631	3.0460	-0.0143	0.0020	0.0018	0.0932	-0.1536	50.15
1.78	44.59	1.56	5.04	1.2960	3.0797	-0.0337	0.0023	0.0022	0.0928	-0.3633	50.52
1.68	42.12	1.48	5.34	1.4529	3.1375	-0.0579	0.0028	0.0026	0.0924	-0.6259	51.14
1.59	39.64	1.41	5.67	1.6402	3.2257	-0.0882	0.0034	0.0031	0.0919	-0.9597	52.10
1.39	34.68	1.25	6.48	2.1423	3.5297	-0.3039	0.0052	0.0043	0.0907	-3.3508	55.45
1.24	30.97	1.13	7.26	2.6873	3.9260	-0.3964	0.0075	0.0063	0.0887	-4.4707	59.92

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.24	30.97	1.13	7.26	2.6873	3.9260		0.0075				59.92
1.19	29.73	1.09	7.56	2.9159	4.1051	-0.1791	0.0085	0.0080	0.1620	-1.1054	61.03
0.99	24.77	0.92	9.08	4.1990	5.1899	-1.0848	0.0154	0.0119	0.1581	-6.8637	67.89
0.79	19.82	0.75	11.35	6.5609	7.3536	-2.1637	0.0317	0.0235	0.1465	-14.7721	82.67
0.69	17.34	0.66	12.97	8.5693	9.2630	-1.9093	0.0490	0.0403	0.1297	-14.7244	97.39
0.63	15.86	0.60	14.18	10.2514	10.8856	-1.6226	0.0656	0.0573	0.1127	-14.3964	111.79

ตาราง ง-7 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #400 $Q = 247.49 \text{ m}^3/\text{s} = 0.35Q_d$, $y_c = 2.11 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.11	52.82	1.81	4.69	1.1191	3.2318		0.0017				50.00
2.22	55.46	1.88	4.46	1.0150	3.2334	-0.0016	0.0014	0.0015	0.0185	-0.0863	49.91
2.32	58.10	1.96	4.26	0.9249	3.2488	-0.0155	0.0012	0.0013	0.0187	-0.8278	49.09
2.43	60.74	2.03	4.07	0.8462	3.2758	-0.0270	0.0011	0.0012	0.0188	-1.4304	47.66
2.54	63.38	2.11	3.90	0.7771	3.3124	-0.0366	0.0009	0.0010	0.0190	-1.9263	45.73
2.75	68.66	2.25	3.60	0.6622	3.4087	-0.0963	0.0007	0.0008	0.0192	-5.0254	40.70
2.96	73.94	2.39	3.35	0.5710	3.5287	-0.1201	0.0006	0.0007	0.0193	-6.2067	34.50
3.17	79.23	2.53	3.12	0.4974	3.6664	-0.1377	0.0005	0.0005	0.0195	-7.0703	27.43
3.38	84.51	2.66	2.93	0.4371	3.8175	-0.1510	0.0004	0.0004	0.0196	-7.7178	19.71
3.63	90.85	2.82	2.7243	0.3783	4.0121	-0.1947	0.0003	0.0003	0.0197	-9.9056	9.80

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.11	52.82	1.81	4.69	1.1191	3.2318		0.0017				50.00
2.01	50.18	1.73	4.93	1.2400	3.2470	-0.0153	0.0020	0.0018	0.0932	-0.1638	50.16
1.90	47.54	1.65	5.21	1.3816	3.2830	-0.0360	0.0023	0.0021	0.0929	-0.3873	50.55
1.80	44.89	1.57	5.51	1.5489	3.3447	-0.0617	0.0028	0.0025	0.0925	-0.6672	51.22
1.69	42.25	1.49	5.86	1.7486	3.4387	-0.0940	0.0034	0.0031	0.0919	-1.0228	52.24
1.48	36.97	1.32	6.69	2.2838	3.7627	-0.3240	0.0051	0.0042	0.0908	-3.5702	55.81
1.34	33.54	1.21	7.38	2.7753	4.1169	-0.3542	0.0070	0.0061	0.0889	-3.9828	59.79

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.34	33.54	1.21	7.38	2.7753	4.1169		0.0070				59.79
1.27	31.69	1.15	7.81	3.1086	4.3762	-0.2593	0.0084	0.0077	0.1623	-1.5977	61.39
0.95	23.77	0.88	10.41	5.5263	6.4770	-2.1009	0.0213	0.0148	0.1552	-13.5407	74.93
0.85	21.13	0.79	11.71	6.9942	7.8393	-1.3623	0.0312	0.0262	0.1438	-9.4758	84.41
0.74	18.49	0.70	13.39	9.1353	9.8748	-2.0355	0.0482	0.0397	0.1303	-15.6181	100.03

0.70	17.43	0.66	14.20	10.2762	10.9734	-1.0986	0.0583	0.0533	0.1167	-9.4101	109.44
------	-------	------	-------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	---------	--------

ตาราง ง-8 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #400 $Q = 336.94 \text{ m}^3/\text{s} = 0.47 Q_d, y_c = 2.60 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}, b = 25 \text{ m}$

d	A	R	V	$V^2/2g$	E	ΔE	S_f	\bar{S}_f	$S_o - \bar{S}_f$	Δx	Station
(m)	(m^2)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
2.60	64.88	2.15	5.19	1.3748	3.9698		0.0016				50.00
2.72	68.12	2.24	4.95	1.2470	3.9718	-0.0019	0.0014	0.0015	0.0185	-0.1044	49.90
2.85	71.36	2.32	4.72	1.1362	3.9907	-0.0190	0.0012	0.0013	0.0187	-1.0139	48.88
2.98	74.61	2.41	4.52	1.0396	4.0238	-0.0331	0.0011	0.0011	0.0189	-1.7537	47.13
3.11	77.85	2.49	4.33	0.9547	4.0687	-0.0449	0.0009	0.0010	0.0190	-2.3627	44.77
3.37	84.34	2.66	4.00	0.8135	4.1870	-0.1183	0.0007	0.0008	0.0192	-6.1667	38.60
3.63	90.83	2.81	3.71	0.7014	4.3344	-0.1474	0.0006	0.0006	0.0194	-7.6190	30.98
3.89	97.31	2.97	3.46	0.6110	4.5035	-0.1691	0.0005	0.0005	0.0195	-8.6811	22.30
4.15	103.80	3.12	3.25	0.5370	4.6890	-0.1855	0.0004	0.0004	0.0196	-9.4774	12.82
4.20	105.10	3.15	3.21	0.5239	4.7278	-0.0387	0.0004	0.0004	0.0196	-1.9734	10.85

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095, b = 25 \text{ m}$

d	A	R	V	$V^2/2g$	E	ΔE	S_f	\bar{S}_f	$S_o - \bar{S}_f$	Δx	Station
(m)	(m^2)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
2.60	64.88	2.15	5.19	1.3748	3.9698		0.0016				50.00
2.47	61.63	2.06	5.47	1.5234	3.9886	-0.0188	0.0019	0.0018	0.0932	-0.2014	50.20
2.34	58.39	1.97	5.77	1.6973	4.0328	-0.0442	0.0022	0.0021	0.0929	-0.4758	50.68
2.21	55.14	1.87	6.11	1.9029	4.1086	-0.0758	0.0027	0.0025	0.0925	-0.8193	51.50
2.08	51.90	1.78	6.49	2.1482	4.2242	-0.1155	0.0033	0.0030	0.0920	-1.2555	52.75
1.82	45.41	1.59	7.42	2.8058	4.6223	-0.3981	0.0050	0.0041	0.0909	-4.3797	57.13
1.71	42.82	1.51	7.87	3.1562	4.8689	-0.2466	0.0060	0.0055	0.0895	-2.7541	59.89

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17, b = 25 \text{ m}$

d	A	R	V	$V^2/2g$	E	ΔE	S_f	\bar{S}_f	$S_o - \bar{S}_f$	Δx	Station
(m)	(m^2)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1.71	42.82	1.51	7.87	3.1562	4.8689		0.0060				59.89
1.56	38.93	1.38	8.66	3.8190	5.3760	-0.5071	0.0081	0.0070	0.1630	-3.1115	63.00
1.43	35.68	1.28	9.44	4.5449	5.9722	-0.5962	0.0107	0.0094	0.1606	-3.7115	66.71
1.30	32.44	1.18	10.39	5.4994	6.7969	-0.8247	0.0145	0.0126	0.1574	-5.2384	71.95
1.17	29.19	1.07	11.54	6.7893	7.9571	-1.1602	0.0203	0.0174	0.1526	-7.6025	79.55
0.91	22.71	0.85	14.84	11.2232	12.1314	-4.1743	0.0457	0.0330	0.1370	-30.4752	110.02

ตาราง ง.9 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #400 $Q = 448.84 \text{ m}^3/\text{s} = 0.63Q_d$, $y_c = 3.14 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.14	78.55	2.51	5.71	1.6643	4.8062		0.0016				50.00
3.30	82.47	2.61	5.44	1.5095	4.8085	-0.0024	0.0014	0.0015	0.0185	-0.1279	49.87
3.46	86.40	2.71	5.19	1.3754	4.8315	-0.0230	0.0012	0.0013	0.0187	-1.2278	48.64
3.61	90.33	2.80	4.97	1.2584	4.8716	-0.0401	0.0010	0.0011	0.0189	-2.1230	46.52
3.77	94.26	2.90	4.76	1.1557	4.9260	-0.0544	0.0009	0.0010	0.0190	-2.8603	43.66
3.93	98.18	2.99	4.57	1.0651	4.9925	-0.0665	0.0008	0.0009	0.0191	-3.4738	40.19
4.08	102.11	3.08	4.40	0.9848	5.0692	-0.0767	0.0007	0.0008	0.0192	-3.9891	36.20
4.40	109.97	3.25	4.08	0.8491	5.2478	-0.1785	0.0006	0.0006	0.0194	-9.2249	26.97
4.71	117.82	3.42	3.81	0.7397	5.4525	-0.2047	0.0005	0.0005	0.0195	-10.5116	16.46
4.87	121.75	3.50	3.69	0.69272	5.56266	-0.11014	0.00042	0.00045	0.01955	-5.6330	10.83

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.14	78.55	2.51	5.71	1.6643	4.8062		0.0016				50.00
2.98	74.62	2.41	6.01	1.8440	4.8289	-0.0227	0.0019	0.0017	0.0933	-0.2434	50.24
2.83	70.69	2.31	6.35	2.0546	4.8823	-0.0535	0.0022	0.0020	0.0930	-0.5754	50.82
2.67	66.77	2.20	6.72	2.3035	4.9741	-0.0917	0.0026	0.0024	0.0926	-0.9908	51.81
2.51	62.84	2.09	7.14	2.6004	5.1139	-0.1398	0.0032	0.0029	0.0921	-1.5183	53.33
2.20	54.98	1.87	8.16	3.3964	5.5958	-0.4818	0.0048	0.0040	0.0910	-5.2946	58.62
2.14	53.41	1.82	8.40	3.5992	5.7357	-0.1399	0.0053	0.0050	0.0900	-1.5551	60.18

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.14	53.41	1.82	8.40	3.5992	5.7357		0.0053				60.18
1.89	47.13	1.64	9.52	4.6229	6.5081	-0.7724	0.0078	0.0065	0.1635	-4.7255	64.90
1.73	43.20	1.52	10.39	5.5017	7.2297	-0.7216	0.0103	0.0091	0.1609	-4.4838	69.39
1.57	39.27	1.40	11.43	6.6570	8.2280	-0.9983	0.0139	0.0121	0.1579	-6.3227	75.71
1.41	35.35	1.27	12.70	8.2185	9.6324	-1.4044	0.0195	0.0167	0.1533	-9.1626	84.87
1.57	39.32	1.40	15.98	13.0181	14.5911	-5.3246	0.0272	0.0189	0.1511	-35.2328	109.55

ตาราง ง-10 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #400 $Q = 628.45 \text{ m}^3/\text{s} = 0.84Q_c$, $y_c = 3.93 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.93	98.31	2.99	6.39	2.0829	6.0152		0.0016				50.00
4.13	103.22	3.10	6.09	1.8893	6.0182	-0.0030	0.0014	0.0015	0.0185	-0.1601	49.84
4.33	108.14	3.21	5.81	1.7214	6.0469	-0.0288	0.0012	0.0013	0.0187	-1.5362	48.30
4.52	113.05	3.32	5.56	1.5750	6.0971	-0.0502	0.0010	0.0011	0.0189	-2.6567	45.65
4.72	117.97	3.43	5.33	1.4465	6.1652	-0.0681	0.0009	0.0010	0.0190	-3.5798	42.07
4.92	122.88	3.53	5.11	1.3331	6.2484	-0.0832	0.0008	0.0009	0.0191	-4.3481	37.72
5.11	127.80	3.63	4.92	1.2325	6.3445	-0.0960	0.0007	0.0008	0.0192	-4.9935	32.73
5.31	132.72	3.73	4.74	1.1429	6.4515	-0.1070	0.0006	0.0007	0.0193	-5.5399	27.19
5.51	137.63	3.82	4.57	1.0627	6.5679	-0.1164	0.0006	0.0006	0.0194	-6.0061	21.18
5.86	146.48	3.99	4.29	0.9382	6.7973	-0.2294	0.0005	0.0005	0.0195	-11.7839	9.40

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.93	98.31	2.99	6.39	2.0829	6.0152		0.0016				50.00
3.74	93.39	2.88	6.73	2.3079	6.0436	-0.0284	0.0018	0.0017	0.0933	-0.3045	50.30
3.54	88.48	2.76	7.10	2.5715	6.1106	-0.0669	0.0022	0.0020	0.0930	-0.7199	51.02
3.34	83.56	2.64	7.52	2.8829	6.2254	-0.1148	0.0026	0.0024	0.0926	-1.2395	52.26
3.15	78.65	2.51	7.99	3.2545	6.4004	-0.1750	0.0031	0.0028	0.0922	-1.8991	54.16
2.95	73.73	2.39	8.52	3.7029	6.6522	-0.2518	0.0038	0.0035	0.0915	-2.7503	56.91
2.79	69.80	2.28	9.00	4.1319	6.9239	-0.2717	0.0045	0.0041	0.0909	-2.9903	59.90

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.79	69.80	2.28	9.00	4.1319	6.9239		0.0045				59.90
2.56	63.90	2.12	9.83	4.9299	7.4859	-0.5621	0.0059	0.0052	0.1648	-3.4106	63.31
2.36	58.98	1.98	10.65	5.7858	8.1452	-0.6593	0.0076	0.0067	0.1633	-4.0382	67.35
2.16	54.07	1.84	11.62	6.8856	9.0484	-0.9032	0.0099	0.0088	0.1612	-5.6014	72.95
2.12	53.09	1.82	11.84	7.1430	9.2665	-0.2181	0.0105	0.0102	0.1598	-1.3649	74.32
1.57	39.32	1.40	15.98	13.0181	14.5911	-5.3246	0.0272	0.0189	0.1511	-35.2328	109.55

ตาราง ง-11 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #280 $Q = 259.16 \text{ m}^3/\text{s} = 0.37Q_c$, $y_c = 2.18 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.18	54.48	1.86	4.76	1.1536	3.3326		0.0021				50.00
2.29	57.20	1.93	4.53	1.0463	3.3343	-0.0017	0.0018	0.0019	0.0181	-0.0943	49.91
2.40	59.92	2.01	4.32	0.9534	3.3503	-0.0160	0.0015	0.0017	0.0183	-0.8725	49.03
2.51	62.65	2.09	4.14	0.8723	3.3781	-0.0279	0.0013	0.0014	0.0186	-1.5013	47.53
2.61	65.37	2.16	3.96	0.8011	3.4159	-0.0378	0.0012	0.0013	0.0187	-2.0164	45.52
2.83	70.82	2.31	3.66	0.6826	3.5153	-0.0994	0.0009	0.0011	0.0189	-5.2457	40.27
3.05	76.27	2.45	3.40	0.5886	3.6392	-0.1239	0.0007	0.0008	0.0192	-6.4611	33.81
3.27	81.71	2.59	3.17	0.5127	3.7812	-0.1420	0.0006	0.0007	0.0193	-7.3461	26.46
3.49	87.16	2.73	2.97	0.4506	3.9370	-0.1558	0.0005	0.0005	0.0195	-8.0075	18.46
3.70	92.61	2.86	2.80	0.3992	4.1035	-0.1664	0.0004	0.0004	0.0196	-8.5126	9.943

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.18	54.48	1.86	4.76	1.1536	3.3326		0.0021				50.00
2.07	51.75	1.78	5.01	1.2782	3.3482	-0.0157	0.0025	0.0023	0.0927	-0.1690	50.17
1.96	49.03	1.70	5.29	1.4242	3.3853	-0.0370	0.0029	0.0027	0.0923	-0.4010	50.57
1.85	46.30	1.61	5.60	1.5966	3.4488	-0.0635	0.0035	0.0032	0.0918	-0.6920	51.26
1.74	43.58	1.53	5.95	1.8024	3.5456	-0.0969	0.0042	0.0038	0.0912	-1.0627	52.32
1.53	38.13	1.36	6.80	2.3542	3.8795	-0.3339	0.0064	0.0053	0.0897	-3.7235	56.05
1.39	34.86	1.25	7.43	2.8163	4.2109	-0.3314	0.0086	0.0075	0.0875	-3.7878	59.84

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.39	34.86	1.25	7.43	2.8163	4.2109		0.0086				59.84
1.31	32.69	1.18	7.93	3.2044	4.5118	-0.3009	0.0106	0.0096	0.1604	-1.8754	61.71
1.20	29.96	1.09	8.65	3.8134	5.0119	-0.5001	0.0140	0.0123	0.1577	-3.1707	64.88
1.09	27.24	1.00	9.51	4.6143	5.7038	-0.6919	0.0190	0.0165	0.1535	-4.5065	69.39
0.87	21.79	0.81	11.89	7.2098	8.0814	-2.3776	0.0391	0.0290	0.1410	-16.8662	86.25
0.73	18.25	0.69	14.20	10.2790	11.0090	-2.9276	0.0696	0.0543	0.1157	-25.3108	111.57

ตาราง ง-12 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #280 $Q = 305.30 \text{ m}^3/\text{s} = 0.43Q_d$, $y_c = 2.43 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.43	60.75	2.03	5.03	1.2872	3.7172		0.0021				50.00
2.55	63.79	2.12	4.79	1.1676	3.7191	-0.0018	0.0018	0.0019	0.0181	-0.1009	49.90
2.67	66.83	2.20	4.57	1.0638	3.7368	-0.0178	0.0015	0.0017	0.0183	-0.9684	48.93
2.79	69.86	2.28	4.37	0.9733	3.7678	-0.0310	0.0013	0.0014	0.0186	-1.6698	47.26
2.92	72.90	2.36	4.19	0.8939	3.8099	-0.0421	0.0012	0.0013	0.0187	-2.2445	45.02
3.16	78.98	2.52	3.87	0.7617	3.9207	-0.1108	0.0009	0.0010	0.0190	-5.8429	39.17
3.40	85.05	2.67	3.59	0.6568	4.0588	-0.1381	0.0007	0.0008	0.0192	-7.1998	31.97
3.65	91.13	2.82	3.35	0.5721	4.2171	-0.1584	0.0006	0.0007	0.0193	-8.1881	23.79
3.89	97.20	2.97	3.14	0.5028	4.3908	-0.1737	0.0005	0.0005	0.0195	-8.9268	14.86
4.01	100.24	3.04	3.0458	0.4728	4.4823	-0.0915	0.0004	0.0005	0.0195	-4.6833	10.18

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.43	60.75	2.03	5.03	1.2872	3.7172		0.0021				50.00
2.31	57.71	1.95	5.29	1.4263	3.7348	-0.0176	0.0024	0.0022	0.0928	-0.1894	50.19
2.19	54.68	1.86	5.58	1.5892	3.7762	-0.0414	0.0029	0.0026	0.0924	-0.4480	50.64
2.07	51.64	1.77	5.91	1.7817	3.8472	-0.0710	0.0034	0.0031	0.0919	-0.7726	51.41
1.94	48.60	1.68	6.28	2.0113	3.9553	-0.1082	0.0041	0.0038	0.0912	-1.1859	52.60
1.70	42.53	1.50	7.18	2.6270	4.3280	-0.3727	0.0063	0.0052	0.0898	-4.1522	56.75
1.56	38.88	1.38	7.85	3.1427	4.6979	-0.3699	0.0084	0.0074	0.0876	-4.2207	60.97

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.56	38.88	1.38	7.85	3.1427	4.6979		0.0084				60.97
1.46	36.45	1.31	8.38	3.5757	5.0337	-0.3358	0.0103	0.0094	0.1606	-2.0905	63.06
1.34	33.41	1.21	9.14	4.2554	5.5919	-0.5582	0.0137	0.0120	0.1580	-3.5326	66.59
1.22	30.38	1.11	10.05	5.1490	6.3640	-0.7721	0.0185	0.0161	0.1539	-5.0169	71.61
0.97	24.30	0.90	12.56	8.0453	9.0173	-2.6533	0.0381	0.0283	0.1417	-18.7266	90.34
0.85	21.26	0.80	14.36	10.5081	11.3586	-2.3413	0.0587	0.0484	0.1216	-19.2557	109.59

ตาราง ง-13 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #280 $Q = 390.51 \text{ m}^3/\text{s} = 0.55Q_d$, $y_c = 2.86 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.86	71.58	2.33	5.46	1.5172	4.3802		0.0020				50.00
3.01	75.15	2.42	5.20	1.3761	4.3823	-0.0021	0.0017	0.0019	0.0181	-0.1157	49.88
3.15	78.73	2.52	4.96	1.2539	4.4032	-0.0209	0.0015	0.0016	0.0184	-1.1370	48.75
3.29	82.31	2.61	4.74	1.1472	4.4397	-0.0365	0.0013	0.0014	0.0186	-1.9633	46.78
3.44	85.89	2.69	4.55	1.0536	4.4892	-0.0495	0.0012	0.0012	0.0188	-2.6406	44.14
3.72	93.05	2.87	4.20	0.8978	4.6197	-0.1304	0.0009	0.0010	0.0190	-6.8776	37.27
4.01	100.21	3.04	3.90	0.7741	4.7823	-0.1626	0.0007	0.0008	0.0192	-8.4782	28.79
4.29	107.36	3.20	3.64	0.6743	4.9688	-0.1865	0.0006	0.0007	0.0193	-9.6441	19.14
4.55	113.80	3.34	3.43	0.6001	5.1523	-0.1835	0.0005	0.0005	0.0195	-9.4310	9.71

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.86	71.58	2.33	5.46	1.5172	4.3802		0.0020				50.00
2.72	68.00	2.23	5.74	1.6811	4.4010	-0.0208	0.0024	0.0022	0.0928	-0.2237	50.22
2.58	64.42	2.14	6.06	1.8731	4.4498	-0.0488	0.0028	0.0026	0.0924	-0.5284	50.75
2.43	60.84	2.04	6.42	2.0999	4.5335	-0.0837	0.0034	0.0031	0.0919	-0.9105	51.66
2.29	57.26	1.94	6.82	2.3706	4.6610	-0.1275	0.0041	0.0037	0.0913	-1.3970	53.06
2.00	50.10	1.73	7.79	3.0963	5.1004	-0.4394	0.0062	0.0051	0.0899	-4.8881	57.95
1.92	47.96	1.66	8.14	3.3798	5.2980	-0.1976	0.0071	0.0066	0.0884	-2.2358	60.18

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.92	47.96	1.66	8.14	3.3798	5.2980		0.0071				60.18
1.72	42.95	1.51	9.09	4.2144	5.9322	-0.6342	0.0100	0.0086	0.1614	-3.9284	64.11
1.57	39.37	1.40	9.92	5.0155	6.5902	-0.6579	0.0132	0.0116	0.1584	-4.1545	68.27
1.43	35.79	1.28	10.91	6.0688	7.5003	-0.9101	0.0179	0.0156	0.1544	-5.8938	74.16
1.29	32.21	1.17	12.12	7.4923	8.7807	-1.2804	0.0251	0.0215	0.1485	-8.6239	82.78
1.04	26.12	0.96	14.95	11.3882	12.4332	-3.6526	0.0493	0.0372	0.1328	-27.5076	110.29

ตาราง ง-14 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #280 $Q = 476.95 \text{ m}^3/\text{s} = 0.67Q_c$, $y_c = 3.27 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.27	81.80	2.59	5.83	1.7328	5.0048		0.0020				50.00
3.44	85.89	2.69	5.55	1.5717	5.0073	-0.0025	0.0017	0.0019	0.0181	-0.1381	49.86
3.60	89.98	2.79	5.30	1.4320	5.0312	-0.0240	0.0015	0.0016	0.0184	-1.3037	48.56
3.76	94.07	2.89	5.07	1.3102	5.0730	-0.0418	0.0013	0.0014	0.0186	-2.2471	46.31
3.93	98.16	2.99	4.86	1.2033	5.1297	-0.0567	0.0012	0.0012	0.0188	-3.0206	43.29
4.09	102.25	3.08	4.66	1.1090	5.1990	-0.0693	0.0010	0.0011	0.0189	-3.6620	39.63
4.25	106.34	3.17	4.49	1.0253	5.2789	-0.0799	0.0009	0.0010	0.0190	-4.1990	35.43
4.42	110.43	3.26	4.32	0.9508	5.3680	-0.0891	0.0008	0.0009	0.0191	-4.6526	30.78
4.58	114.52	3.35	4.16	0.8841	5.4649	-0.0969	0.0007	0.0008	0.0192	-5.0387	25.74
5.04	125.97	3.59	3.79	0.73063	5.76951	-0.30465	0.00055	0.00064	0.01936	-15.7338	10.00

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.27	81.80	2.59	5.83	1.7328	5.0048		0.0020				50.00
3.11	77.71	2.49	6.14	1.9200	5.0284	-0.0236	0.0023	0.0022	0.0928	-0.2542	50.25
2.94	73.62	2.38	6.48	2.1392	5.0840	-0.0557	0.0028	0.0026	0.0924	-0.6021	50.86
2.78	69.53	2.28	6.86	2.3983	5.1795	-0.0955	0.0033	0.0030	0.0920	-1.0382	51.89
2.62	65.44	2.16	7.29	2.7074	5.3250	-0.1456	0.0040	0.0036	0.0914	-1.5933	53.49
2.29	57.26	1.94	8.33	3.5363	5.8267	-0.5016	0.0060	0.0050	0.0900	-5.5746	59.06
2.26	56.44	1.91	8.45	3.6395	5.8972	-0.0705	0.0063	0.0062	0.0888	-0.7941	59.86

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.26	56.44	1.91	8.45	3.6395	5.8972		0.0063				59.86
1.96	49.08	1.70	9.72	4.8132	6.7764	-0.8793	0.0098	0.0081	0.1619	-5.4298	65.29
1.80	44.99	1.57	10.60	5.7282	7.5278	-0.7513	0.0129	0.0114	0.1586	-4.7361	70.02
1.64	40.90	1.45	11.66	6.9311	8.5671	-1.0393	0.0175	0.0152	0.1548	-6.7137	76.74
1.47	36.81	1.32	12.96	8.5569	10.0293	-1.4622	0.0244	0.0210	0.1490	-9.8108	86.55
1.24	31.08	1.13	15.34	11.9998	13.2431	-3.2139	0.0420	0.0332	0.1368	-23.4982	110.05

ตาราง ง-15 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #280 $Q = 487.91 \text{ m}^3/\text{s} = 0.69Q_c$, $y_c = 3.32 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.32	83.05	2.62	5.87	1.7591	5.0811		0.0020				50.00
3.49	87.20	2.73	5.60	1.5956	5.0837	-0.0026	0.0017	0.0019	0.0181	-0.1407	49.86
3.65	91.36	2.83	5.34	1.4538	5.1080	-0.0243	0.0015	0.0016	0.0184	-1.3240	48.54
3.82	95.51	2.93	5.11	1.3302	5.1505	-0.0424	0.0013	0.0014	0.0186	-2.2817	46.25
3.99	99.66	3.02	4.90	1.2216	5.2080	-0.0576	0.0012	0.0012	0.0188	-3.0671	43.19
4.15	103.81	3.12	4.70	1.1259	5.2784	-0.0703	0.0010	0.0011	0.0189	-3.7182	39.47
4.32	107.97	3.21	4.52	1.0409	5.3595	-0.0812	0.0009	0.0010	0.0190	-4.2635	35.20
4.48	112.12	3.30	4.35	0.9652	5.4499	-0.0904	0.0008	0.0009	0.0191	-4.7240	30.48
4.65	116.27	3.39	4.20	0.8975	5.5483	-0.0984	0.0007	0.0008	0.0192	-5.1159	25.36
5.10	127.48	3.62	3.83	0.7466	5.8459	-0.2975	0.0006	0.0006	0.0194	-15.3692	10.00

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.32	83.05	2.62	5.87	1.7591	5.0811		0.0020				50.00
3.16	78.90	2.52	6.18	1.9492	5.1051	-0.0239	0.0023	0.0022	0.0928	-0.2580	50.26
2.99	74.75	2.41	6.53	2.1718	5.1616	-0.0565	0.0028	0.0026	0.0924	-0.6111	50.87
2.82	70.59	2.30	6.91	2.4348	5.2585	-0.0969	0.0033	0.0030	0.0920	-1.0539	51.92
2.66	66.44	2.19	7.34	2.7487	5.4063	-0.1478	0.0040	0.0036	0.0914	-1.6174	53.54
2.33	58.14	1.96	8.39	3.5901	5.9155	-0.5092	0.0060	0.0050	0.0900	-5.6586	59.20
2.29	57.30	1.94	8.51	3.6949	5.9871	-0.0716	0.0063	0.0062	0.0888	-0.8060	60.00

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.29	57.30	1.94	8.51	3.6949	5.9871		0.0063				60.00
2.13	53.15	1.82	9.18	4.2948	6.4209	-0.4338	0.0080	0.0072	0.1628	-2.6637	62.67
1.99	49.83	1.72	9.79	4.8865	6.8797	-0.4588	0.0098	0.0089	0.1611	-2.8480	65.52
1.83	45.68	1.59	10.68	5.8153	7.6424	-0.7627	0.0129	0.0113	0.1587	-4.8072	70.32
1.49	37.37	1.34	13.06	8.6871	10.1820	-2.5396	0.0244	0.0186	0.1514	-16.7770	87.10
1.26	31.56	1.15	15.46	12.1824	13.4448	-3.2628	0.0419	0.0331	0.1369	-23.8375	110.94

ตาราง ง-16 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #180 $Q = 193.22 \text{ m}^3/\text{s} = 0.27Q_c$, $y_c = 1.79 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.79	44.78	1.57	4.31	0.9488	2.7401		0.0029				50.00
1.88	47.02	1.63	4.11	0.8606	2.7415	-0.0014	0.0025	0.0027	0.0173	-0.0782	49.92
1.97	49.26	1.70	3.92	0.7842	2.7546	-0.0131	0.0022	0.0023	0.0177	-0.7418	49.18
2.06	51.50	1.77	3.75	0.7175	2.7774	-0.0229	0.0019	0.0020	0.0180	-1.2715	47.91
2.15	53.74	1.83	3.60	0.6589	2.8085	-0.0310	0.0016	0.0018	0.0182	-1.7010	46.21
2.33	58.22	1.96	3.32	0.5614	2.8901	-0.0817	0.0013	0.0015	0.0185	-4.4050	41.80
2.51	62.70	2.09	3.08	0.4841	2.9919	-0.1018	0.0010	0.0011	0.0189	-5.3994	36.40
2.69	67.17	2.21	2.88	0.4217	3.1087	-0.1167	0.0008	0.0009	0.0191	-6.1176	30.29
2.87	71.65	2.33	2.70	0.3706	3.2367	-0.1281	0.0007	0.0007	0.0193	-6.6513	23.63
3.22	80.61	2.56	2.40	0.2928	3.5172	-0.2805	0.0005	0.0006	0.0194	-14.4349	9.199

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.79	44.78	1.57	4.31	0.9488	2.7401		0.0029				50.00
1.70	42.54	1.50	4.54	1.0513	2.7531	-0.0129	0.0034	0.0032	0.0918	-0.1409	50.14
1.61	40.30	1.43	4.79	1.1714	2.7836	-0.0305	0.0041	0.0038	0.0912	-0.3342	50.48
1.52	38.07	1.36	5.08	1.3133	2.8359	-0.0523	0.0049	0.0045	0.0905	-0.5778	51.05
1.43	35.83	1.29	5.39	1.4825	2.9156	-0.0797	0.0059	0.0054	0.0896	-0.8900	51.94
1.25	31.35	1.14	6.16	1.9364	3.1903	-0.2747	0.0091	0.0075	0.0875	-3.1406	55.08
1.09	27.32	1.00	7.07	2.5499	3.6426	-0.4523	0.0142	0.0117	0.0833	-5.4273	60.51

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.09	27.32	1.00	7.07	2.5499	3.6426		0.0142				60.51
1.07	26.87	0.99	7.19	2.6356	3.7104	-0.0678	0.0150	0.0146	0.1554	-0.4362	60.95
0.99	24.63	0.91	7.84	3.1366	4.1218	-0.4114	0.0198	0.0174	0.1526	-2.6962	63.64
0.90	22.39	0.84	8.63	3.7953	4.6910	-0.5691	0.0270	0.0234	0.1466	-3.8829	67.53
0.72	17.91	0.68	10.79	5.9302	6.6467	-1.9557	0.0558	0.0414	0.1286	-15.2104	82.74
0.59	14.87	0.57	13.00	8.6082	9.2029	-2.5562	0.1026	0.0792	0.0908	-28.1590	110.90

ตาราง ง-17 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #180 $Q = 255.27 \text{ m}^3/\text{s} = 0.36Q_d$, $y_c = 2.16 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.16	53.93	1.84	4.73	1.1421	3.2991		0.0028				50.00
2.26	56.62	1.92	4.51	1.0360	3.3008	-0.0017	0.0024	0.0026	0.0174	-0.0959	49.90
2.37	59.32	1.99	4.30	0.9439	3.3166	-0.0158	0.0021	0.0023	0.0177	-0.8920	49.01
2.48	62.01	2.07	4.12	0.8636	3.3442	-0.0276	0.0018	0.0020	0.0180	-1.5283	47.48
2.59	64.71	2.14	3.94	0.7932	3.3816	-0.0374	0.0016	0.0017	0.0183	-2.0450	45.44
2.80	70.10	2.29	3.64	0.6758	3.4799	-0.0984	0.0013	0.0014	0.0186	-5.2975	40.14
3.02	75.50	2.43	3.38	0.5827	3.6025	-0.1226	0.0010	0.0011	0.0189	-6.4959	33.65
3.24	80.89	2.57	3.16	0.5076	3.7431	-0.1406	0.0008	0.0009	0.0191	-7.3621	26.28
3.45	86.28	2.70	2.96	0.4461	3.8973	-0.1542	0.0007	0.0007	0.0193	-8.0060	18.28
3.67	91.67	2.84	2.7846	0.3952	4.0621	-0.1648	0.0006	0.0006	0.0194	-8.4959	9.78

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.16	53.93	1.84	4.73	1.1421	3.2991		0.0028				50.00
2.05	51.23	1.76	4.98	1.2655	3.3147	-0.0155	0.0033	0.0031	0.0919	-0.1691	50.17
1.94	48.53	1.68	5.26	1.4101	3.3514	-0.0367	0.0040	0.0036	0.0914	-0.4014	50.57
1.83	45.84	1.60	5.57	1.5808	3.4143	-0.0629	0.0047	0.0043	0.0907	-0.6940	51.26
1.73	43.14	1.52	5.92	1.7846	3.5102	-0.0959	0.0057	0.0052	0.0898	-1.0687	52.33
1.51	37.75	1.35	6.76	2.3309	3.8408	-0.3306	0.0088	0.0073	0.0877	-3.7680	56.10
1.38	34.51	1.24	7.40	2.7884	4.1689	-0.3281	0.0117	0.0102	0.0848	-3.8708	59.97

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.38	34.51	1.24	7.40	2.7884	4.1689		0.0117				59.97
1.29	32.36	1.17	7.89	3.1726	4.4668	-0.2979	0.0144	0.0130	0.1570	-1.8979	61.87
1.19	29.66	1.08	8.61	3.7757	4.9620	-0.4952	0.0190	0.0167	0.1533	-3.2302	65.10
1.08	26.96	0.99	9.47	4.5686	5.6471	-0.6850	0.0258	0.0224	0.1476	-4.6421	69.74
0.86	21.57	0.81	11.83	7.1384	8.0012	-2.3541	0.0532	0.0395	0.1305	-18.0447	87.79
0.75	18.66	0.70	13.68	9.5404	10.2868	-2.2856	0.0853	0.0693	0.1007	-22.6914	110.48

ตาราง ง-18 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #180 $Q = 323.15 \text{ m}^3/\text{s} = 0.46Q_d$, $y_c = 2.52 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.52	63.10	2.10	5.12	1.3368	3.8608		0.0028				50.00
2.65	66.26	2.19	4.88	1.2125	3.8627	-0.0019	0.0024	0.0026	0.0174	-0.1104	49.89
2.78	69.41	2.27	4.66	1.1048	3.8812	-0.0185	0.0021	0.0022	0.0178	-1.0402	48.85
2.90	72.57	2.36	4.45	1.0108	3.9134	-0.0322	0.0018	0.0019	0.0181	-1.7842	47.07
3.03	75.72	2.44	4.27	0.9283	3.9571	-0.0437	0.0016	0.0017	0.0183	-2.3888	44.68
3.28	82.03	2.60	3.94	0.7910	4.0722	-0.1151	0.0012	0.0014	0.0186	-6.1912	38.49
3.53	88.34	2.75	3.66	0.6820	4.2156	-0.1434	0.0010	0.0011	0.0189	-7.5954	30.89
3.79	94.65	2.91	3.41	0.5941	4.3801	-0.1645	0.0008	0.0009	0.0191	-8.6106	22.28
4.04	100.96	3.05	3.20	0.5222	4.5606	-0.1805	0.0007	0.0007	0.0193	-9.3656	12.91
4.11	102.85	3.10	3.14	0.5031	4.6172	-0.0567	0.0006	0.0006	0.0194	-2.9279	9.99

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.52	63.10	2.10	5.12	1.3368	3.8608		0.0028				50.00
2.40	59.95	2.01	5.39	1.4812	3.8790	-0.0182	0.0033	0.0030	0.0920	-0.1980	50.20
2.27	56.79	1.92	5.69	1.6503	3.9219	-0.0429	0.0039	0.0036	0.0914	-0.4697	50.67
2.15	53.64	1.83	6.02	1.8502	3.9956	-0.0737	0.0046	0.0042	0.0908	-0.8117	51.48
2.02	50.48	1.74	6.40	2.0887	4.1079	-0.1123	0.0056	0.0051	0.0899	-1.2493	52.73
1.77	44.17	1.55	7.32	2.7281	4.4949	-0.3870	0.0085	0.0071	0.0879	-4.4010	57.13
1.67	41.65	1.47	7.76	3.0688	4.7346	-0.2397	0.0103	0.0094	0.0856	-2.8011	59.93

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.67	41.65	1.47	7.76	3.0688	4.7346		0.0103				59.93
1.51	37.86	1.35	8.54	3.7132	5.2276	-0.4930	0.0139	0.0121	0.1579	-3.1225	63.05
1.39	34.71	1.25	9.31	4.4190	5.8072	-0.5796	0.0184	0.0162	0.1538	-3.7678	66.82
1.26	31.55	1.15	10.24	5.3470	6.6090	-0.8018	0.0250	0.0217	0.1483	-5.4062	72.23
1.01	25.24	0.93	12.80	8.3547	9.3643	-2.7553	0.0513	0.0381	0.1319	-20.8928	93.12
0.91	22.72	0.85	14.23	10.3144	11.2231	-1.8588	0.0721	0.0617	0.1083	-17.1620	110.28

ตาราง ง-19 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #180 $Q = 500.10 \text{ m}^3/\text{s} = 0.70Q_c$, $y_c = 3.38 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.38	84.43	2.66	5.92	1.7884	5.1654		0.0027				50.00
3.55	88.65	2.76	5.64	1.6222	5.1680	-0.0026	0.0023	0.0025	0.0175	-0.1476	49.85
3.71	92.87	2.86	5.39	1.4780	5.1927	-0.0247	0.0020	0.0022	0.0178	-1.3888	48.46
3.88	97.09	2.96	5.15	1.3523	5.2359	-0.0431	0.0018	0.0019	0.0181	-2.3834	46.08
4.05	101.31	3.06	4.94	1.2420	5.2944	-0.0585	0.0016	0.0017	0.0183	-3.1924	42.89
4.22	105.53	3.16	4.74	1.1446	5.3658	-0.0715	0.0014	0.0015	0.0185	-3.8588	39.03
4.39	109.75	3.25	4.56	1.0582	5.4483	-0.0825	0.0012	0.0013	0.0187	-4.4138	34.62
4.73	118.20	3.43	4.23	0.9125	5.6403	-0.1919	0.0010	0.0011	0.0189	-10.1601	24.46
5.07	126.64	3.60	3.95	0.7949	5.8604	-0.2201	0.0008	0.0009	0.0191	-11.5215	12.93
5.13	128.33	3.64	3.90	0.77408	5.90712	-0.04676	0.00078	0.00079	0.01921	-2.4342	10.50

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.38	84.43	2.66	5.92	1.7884	5.1654		0.0027				50.00
3.21	80.20	2.55	6.24	1.9816	5.1898	-0.0244	0.0032	0.0030	0.0920	-0.2646	50.26
3.04	75.98	2.44	6.58	2.2079	5.2472	-0.0574	0.0038	0.0035	0.0915	-0.6276	50.89
2.87	71.76	2.33	6.97	2.4753	5.3458	-0.0985	0.0045	0.0041	0.0909	-1.0843	51.98
2.70	67.54	2.22	7.40	2.7944	5.4960	-0.1502	0.0054	0.0049	0.0901	-1.6682	53.64
2.53	63.32	2.11	7.90	3.1794	5.7122	-0.2162	0.0066	0.0060	0.0890	-2.4288	56.07
2.36	59.10	1.99	8.46	3.6499	6.0138	-0.3016	0.0082	0.0074	0.0876	-3.4423	59.52

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.36	59.10	1.99	8.46	3.6499	6.0138		0.0082				59.52
2.20	54.88	1.87	9.11	4.2330	6.4280	-0.4143	0.0103	0.0092	0.1608	-2.5771	62.09
2.03	50.66	1.74	9.87	4.9679	6.9941	-0.5660	0.0133	0.0118	0.1582	-3.5778	65.67
1.86	46.43	1.62	10.77	5.9122	7.7695	-0.7755	0.0175	0.0154	0.1546	-5.0146	70.69
1.69	42.21	1.49	11.85	7.1537	8.8422	-1.0727	0.0236	0.0205	0.1495	-7.1768	77.86
1.32	32.93	1.19	15.19	11.7583	13.0753	-4.2331	0.0522	0.0379	0.1321	-32.0407	109.90

ตาราง ง-20 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #180 $Q = 511.95 \text{ m}^3/\text{s} = 0.72Q_{cr}$, $y_c = 3.43 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.43	85.75	2.69	5.97	1.8167	5.2467		0.0027				50.00
3.60	90.04	2.80	5.69	1.6478	5.2493	-0.0026	0.0023	0.0025	0.0175	-0.1488	49.85
3.77	94.33	2.90	5.43	1.5014	5.2744	-0.0251	0.0020	0.0022	0.0178	-1.4095	48.44
3.94	98.61	3.00	5.19	1.3737	5.3182	-0.0438	0.0018	0.0019	0.0181	-2.4199	46.02
4.12	102.90	3.10	4.98	1.2616	5.3776	-0.0594	0.0016	0.0017	0.0183	-3.2417	42.78
4.29	107.19	3.19	4.78	1.1627	5.4502	-0.0726	0.0014	0.0015	0.0185	-3.9187	38.86
4.46	111.48	3.29	4.59	1.0750	5.5340	-0.0838	0.0012	0.0013	0.0187	-4.4825	34.38
4.63	115.76	3.38	4.42	0.9968	5.6273	-0.0933	0.0011	0.0012	0.0188	-4.9566	29.42
4.80	120.05	3.47	4.26	0.9269	5.7289	-0.1016	0.0010	0.0010	0.0190	-5.3586	24.06
5.21	130.34	3.68	3.93	0.7863	5.9999	-0.2710	0.0008	0.0009	0.0191	-14.1767	9.89

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.43	85.75	2.69	5.97	1.8167	5.2467		0.0027				50.00
3.26	81.46	2.58	6.28	2.0130	5.2715	-0.0248	0.0032	0.0029	0.0921	-0.2690	50.27
3.09	77.18	2.48	6.63	2.2429	5.3299	-0.0584	0.0038	0.0035	0.0915	-0.6378	50.91
2.92	72.89	2.36	7.02	2.5145	5.4300	-0.1001	0.0045	0.0041	0.0909	-1.1017	52.01
2.74	68.60	2.25	7.46	2.8386	5.5826	-0.1526	0.0054	0.0049	0.0901	-1.6947	53.70
2.57	64.31	2.13	7.96	3.2297	5.8022	-0.2196	0.0066	0.0060	0.0890	-2.4672	56.17
2.40	60.03	2.01	8.53	3.7076	6.1086	-0.3064	0.0082	0.0074	0.0876	-3.4965	59.67

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.40	60.03	2.01	8.53	3.7076	6.1086		0.0082				59.67
2.23	55.74	1.89	9.19	4.2999	6.5294	-0.4208	0.0103	0.0092	0.1608	-2.6177	62.28
2.06	51.45	1.77	9.95	5.0464	7.1044	-0.5750	0.0132	0.0118	0.1582	-3.6340	65.92
1.89	47.16	1.64	10.86	6.0057	7.8922	-0.7877	0.0174	0.0153	0.1547	-5.0929	71.01
1.72	42.88	1.51	11.94	7.2669	8.9819	-1.0897	0.0235	0.0205	0.1495	-7.2879	78.30
1.34	33.44	1.21	15.31	11.9442	13.2819	-4.3001	0.0520	0.0378	0.1322	-32.5206	110.82

ตาราง ง-21 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #80 $Q = 158.57 \text{ m}^3/\text{s} = 0.22Q_c$, $y_c = 1.57 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.57	39.25	1.39	4.04	0.8319	2.4019		0.0041				50.00
1.65	41.21	1.46	3.85	0.7545	2.4030	-0.0012	0.0035	0.0038	0.0162	-0.0714	49.93
1.73	43.18	1.52	3.67	0.6875	2.4145	-0.0115	0.0030	0.0032	0.0168	-0.6841	49.24
1.81	45.14	1.58	3.51	0.6290	2.4345	-0.0200	0.0026	0.0028	0.0172	-1.1641	48.08
1.88	47.10	1.64	3.37	0.5777	2.4617	-0.0272	0.0023	0.0024	0.0176	-1.5478	46.53
2.04	51.03	1.75	3.11	0.4922	2.5332	-0.0715	0.0018	0.0020	0.0180	-3.9801	42.55
2.20	54.95	1.87	2.89	0.4244	2.6224	-0.0892	0.0014	0.0016	0.0184	-4.8440	37.71
2.36	58.88	1.98	2.69	0.3697	2.7247	-0.1023	0.0011	0.0013	0.0187	-5.4608	32.25
2.67	66.73	2.20	2.38	0.2878	2.9568	-0.2321	0.0008	0.0009	0.0191	-12.1841	20.06
2.90	72.61	2.36	2.18	0.2431	3.1476	-0.1907	0.0006	0.0007	0.0193	-9.8704	10.193

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.57	39.25	1.39	4.04	0.8319	2.4019		0.0041				50.00
1.49	37.29	1.33	4.25	0.9218	2.4133	-0.0114	0.0048	0.0044	0.0906	-0.1255	50.13
1.41	35.33	1.27	4.49	1.0270	2.4400	-0.0268	0.0057	0.0052	0.0898	-0.2981	50.42
1.33	33.36	1.21	4.75	1.1514	2.4859	-0.0459	0.0068	0.0063	0.0887	-0.5170	50.94
1.26	31.40	1.14	5.05	1.2998	2.5558	-0.0699	0.0083	0.0076	0.0874	-0.7997	51.74
1.10	27.48	1.01	5.77	1.6977	2.7967	-0.2409	0.0128	0.0105	0.0845	-2.8518	54.59
0.94	23.55	0.88	6.73	2.3108	3.2528	-0.4561	0.0210	0.0169	0.0781	-5.8375	60.43

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
0.94	23.55	0.88	6.73	2.3108	3.2528		0.0210				60.43
0.86	21.59	0.81	7.35	2.7500	3.6135	-0.3607	0.0278	0.0244	0.1456	-2.4779	62.91
0.79	19.63	0.74	8.08	3.3275	4.1125	-0.4990	0.0379	0.0329	0.1371	-3.6396	66.55
0.71	17.66	0.67	8.98	4.1081	4.8146	-0.7020	0.0535	0.0457	0.1243	-5.6488	72.20
0.63	15.70	0.60	10.10	5.1993	5.8273	-1.0127	0.0786	0.0660	0.1040	-9.7413	81.94
0.54	13.42	0.51	11.81	7.1123	7.6493	-1.8220	0.1312	0.1049	0.0651	-27.9950	109.93

ตาราง ง-22 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #80 $Q = 213.90 \text{ m}^3/\text{s} = 0.30Q_u$, $y_c = 1.92 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.92	47.93	1.66	4.46	1.0153	2.9323		0.0039				50.00
2.01	50.32	1.73	4.25	0.9209	2.9338	-0.0015	0.0034	0.0036	0.0164	-0.0890	49.91
2.11	52.72	1.80	4.06	0.8391	2.9478	-0.0140	0.0029	0.0031	0.0169	-0.8322	49.08
2.20	55.11	1.87	3.88	0.7677	2.9723	-0.0245	0.0025	0.0027	0.0173	-1.4161	47.66
2.30	57.51	1.94	3.72	0.7051	3.0055	-0.0332	0.0022	0.0024	0.0176	-1.8838	45.78
2.49	62.30	2.08	3.43	0.6008	3.0929	-0.0874	0.0017	0.0020	0.0180	-4.8474	40.93
2.68	67.10	2.21	3.19	0.5180	3.2018	-0.1089	0.0014	0.0015	0.0185	-5.9040	35.03
2.88	71.89	2.34	2.98	0.4512	3.3267	-0.1249	0.0011	0.0012	0.0188	-6.6592	28.37
3.07	76.68	2.46	2.79	0.3966	3.4638	-0.1371	0.0009	0.0010	0.0190	-7.2164	21.15
3.35	83.87	2.64	2.5504	0.3315	3.6863	-0.2225	0.0007	0.0008	0.0192	-11.5866	9.57

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.92	47.93	1.66	4.46	1.0153	2.9323		0.0039				50.00
1.82	45.53	1.59	4.70	1.1250	2.9461	-0.0138	0.0046	0.0043	0.0907	-0.1525	50.15
1.73	43.13	1.52	4.96	1.2535	2.9788	-0.0326	0.0055	0.0050	0.0900	-0.3627	50.52
1.63	40.74	1.44	5.25	1.4053	3.0347	-0.0560	0.0066	0.0060	0.0890	-0.6289	51.14
1.53	38.34	1.37	5.58	1.5864	3.1200	-0.0853	0.0080	0.0073	0.0877	-0.9723	52.12
1.44	35.94	1.29	5.95	1.8050	3.2427	-0.1227	0.0098	0.0089	0.0861	-1.4251	53.54
1.21	30.19	1.10	7.08	2.5581	3.7658	-0.5231	0.0171	0.0135	0.0815	-6.4148	59.96

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.21	30.19	1.10	7.08	2.5581	3.7658		0.0171				59.96
1.15	28.76	1.05	7.44	2.8203	3.9705	-0.2047	0.0200	0.0186	0.1514	-1.3519	61.31
1.05	26.36	0.97	8.11	3.3564	4.4107	-0.4402	0.0265	0.0233	0.1467	-3.0006	64.31
0.96	23.96	0.89	8.93	4.0612	5.0197	-0.6090	0.0361	0.0313	0.1387	-4.3913	68.70
0.86	21.57	0.81	9.92	5.0139	5.8765	-0.8568	0.0508	0.0435	0.1265	-6.7710	75.47
0.67	16.77	0.64	12.75	8.2882	8.9592	-3.0827	0.1152	0.0830	0.0870	-35.4361	110.91

ตาราง ง-23 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #80 $Q = 228.57 \text{ m}^3/\text{s} = 0.32Q_d$, $y_c = 2.00 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.00	50.10	1.73	4.56	1.0609	3.0649		0.0039				50.00
2.10	52.61	1.80	4.35	0.9622	3.0664	-0.0016	0.0033	0.0036	0.0164	-0.0959	49.90
2.20	55.11	1.87	4.15	0.8768	3.0812	-0.0147	0.0029	0.0031	0.0169	-0.8714	49.03
2.30	57.62	1.95	3.97	0.8022	3.1068	-0.0256	0.0025	0.0027	0.0173	-1.4810	47.55
2.40	60.12	2.02	3.80	0.7367	3.1415	-0.0347	0.0022	0.0024	0.0176	-1.9694	45.58
2.61	65.13	2.16	3.51	0.6277	3.2329	-0.0914	0.0017	0.0020	0.0180	-5.0672	40.52
2.81	70.14	2.29	3.26	0.5413	3.3469	-0.1139	0.0014	0.0015	0.0185	-6.1716	34.34
3.01	75.15	2.42	3.04	0.4715	3.4775	-0.1306	0.0011	0.0012	0.0188	-6.9613	27.38
3.21	80.16	2.55	2.85	0.4144	3.6208	-0.1433	0.0009	0.0010	0.0190	-7.5439	19.84
3.47	86.67	2.71	2.64	0.3545	3.8214	-0.2006	0.0007	0.0008	0.0192	-10.4517	9.39

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.00	50.10	1.73	4.56	1.0609	3.0649		0.0039				50.00
1.90	47.60	1.65	4.80	1.1755	3.0793	-0.0144	0.0046	0.0042	0.0908	-0.1588	50.16
1.80	45.09	1.58	5.07	1.3097	3.1133	-0.0340	0.0054	0.0050	0.0900	-0.3782	50.54
1.70	42.59	1.50	5.37	1.4683	3.1717	-0.0584	0.0065	0.0060	0.0890	-0.6562	51.19
1.60	40.08	1.42	5.70	1.6576	3.2608	-0.0891	0.0079	0.0072	0.0878	-1.0147	52.21
1.50	37.58	1.34	6.08	1.8860	3.3890	-0.1282	0.0097	0.0088	0.0862	-1.4871	53.69
1.26	31.56	1.15	7.24	2.6729	3.9354	-0.5464	0.0170	0.0133	0.0817	-6.6907	60.39

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.26	31.56	1.15	7.24	2.6729	3.9354		0.0170				60.39
1.20	30.06	1.10	7.60	2.9469	4.1493	-0.2139	0.0198	0.0184	0.1516	-1.4106	61.80
1.10	27.56	1.01	8.30	3.5070	4.6092	-0.4599	0.0263	0.0230	0.1470	-3.1298	64.93
1.00	25.05	0.93	9.12	4.2435	5.2455	-0.6363	0.0357	0.0310	0.1390	-4.5770	69.50
0.90	22.55	0.84	10.14	5.2389	6.1407	-0.8952	0.0502	0.0430	0.1270	-7.0475	76.55
0.71	17.79	0.67	12.85	8.4180	9.1294	-2.9887	0.1087	0.0794	0.0906	-33.0057	109.56

ตาราง ง-24 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #80 $Q = 332.34 \text{ m}^3/\text{s} = 0.47Q_c$, $y_c = 2.57 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.57	64.29	2.13	5.17	1.3621	3.9336		0.0038				50.00
2.70	67.50	2.22	4.92	1.2355	3.9356	-0.0019	0.0032	0.0035	0.0165	-0.1176	49.88
2.83	70.72	2.31	4.70	1.1257	3.9544	-0.0188	0.0028	0.0030	0.0170	-1.1085	48.77
2.96	73.93	2.39	4.50	1.0300	3.9872	-0.0328	0.0025	0.0026	0.0174	-1.8894	46.88
3.09	77.15	2.47	4.31	0.9459	4.0317	-0.0445	0.0022	0.0023	0.0177	-2.5163	44.37
3.34	83.57	2.64	3.98	0.8060	4.1489	-0.1172	0.0017	0.0019	0.0181	-6.4827	37.89
3.60	90.00	2.80	3.69	0.6950	4.2951	-0.1461	0.0013	0.0015	0.0185	-7.9045	29.98
3.86	96.43	2.95	3.45	0.6054	4.4626	-0.1676	0.0011	0.0012	0.0188	-8.9219	21.06
4.14	103.50	3.11	3.21	0.5255	4.6656	-0.2030	0.0009	0.0010	0.0190	-10.6747	10.38

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.57	64.29	2.13	5.17	1.3621	3.9336		0.0038				50.00
2.44	61.07	2.04	5.44	1.5093	3.9522	-0.0186	0.0044	0.0041	0.0909	-0.2044	50.20
2.31	57.86	1.95	5.74	1.6816	3.9960	-0.0438	0.0052	0.0048	0.0902	-0.4856	50.69
2.19	54.64	1.86	6.08	1.8853	4.0711	-0.0751	0.0063	0.0058	0.0892	-0.8413	51.53
2.06	51.43	1.77	6.46	2.1283	4.1855	-0.1144	0.0076	0.0069	0.0881	-1.2995	52.83
1.93	48.22	1.67	6.89	2.4215	4.3502	-0.1647	0.0093	0.0084	0.0866	-1.9023	54.73
1.70	42.43	1.49	7.83	3.1270	4.8242	-0.4740	0.0139	0.0116	0.0834	-5.6849	60.42

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m ²)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
1.70	42.43	1.49	7.83	3.1270	4.8242		0.0139				60.42
1.54	38.57	1.37	8.62	3.7836	5.3265	-0.5024	0.0189	0.0164	0.1536	-3.2708	63.69
1.41	35.36	1.27	9.40	4.5029	5.9172	-0.5906	0.0249	0.0219	0.1481	-3.9879	67.68
1.29	32.14	1.17	10.34	5.4485	6.7342	-0.8170	0.0338	0.0294	0.1406	-5.8094	73.49
1.16	28.93	1.06	11.49	6.7265	7.8837	-1.1495	0.0474	0.0406	0.1294	-8.8848	82.37
0.96	23.98	0.89	13.86	9.7903	10.7495	-2.8658	0.0870	0.0672	0.1028	-27.8792	110.25

ตาราง ง-25 แสดงการคำนวณรูปตัดการไหล ในกรณีผิว #80 $Q = 511.20 \text{ m}^3/\text{s} = 0.72Q_c$, $y_c = 3.43 \text{ m}$

Sta 50 - Sta 10, $S_o = 0.02 \text{ m/m}$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.43	85.68	2.69	5.97	1.8146	5.2416		0.0037				50.00
3.60	89.96	2.79	5.68	1.6459	5.2442	-0.0026	0.0032	0.0034	0.0166	-0.1599	49.84
3.77	94.24	2.90	5.42	1.4996	5.2693	-0.0251	0.0028	0.0030	0.0170	-1.4758	48.36
3.94	98.53	3.00	5.19	1.3721	5.3131	-0.0438	0.0024	0.0026	0.0174	-2.5150	45.85
4.11	102.81	3.09	4.97	1.2601	5.3725	-0.0594	0.0021	0.0023	0.0177	-3.3504	42.50
4.28	107.09	3.19	4.77	1.1613	5.4451	-0.0726	0.0019	0.0020	0.0180	-4.0321	38.47
4.46	111.38	3.28	4.59	1.0737	5.5288	-0.0837	0.0017	0.0018	0.0182	-4.5954	33.87
4.63	115.66	3.38	4.42	0.9957	5.6221	-0.0933	0.0015	0.0016	0.0184	-5.0661	28.81
4.80	119.95	3.47	4.26	0.9258	5.7236	-0.1015	0.0013	0.0014	0.0186	-5.4630	23.34
5.17	129.37	3.66	3.95	0.7958	5.9706	-0.2470	0.0011	0.0012	0.0188	-13.1444	10.20

Sta 50 - Sta 60, $S_o = 0.095$, $b = 25 \text{ m}$

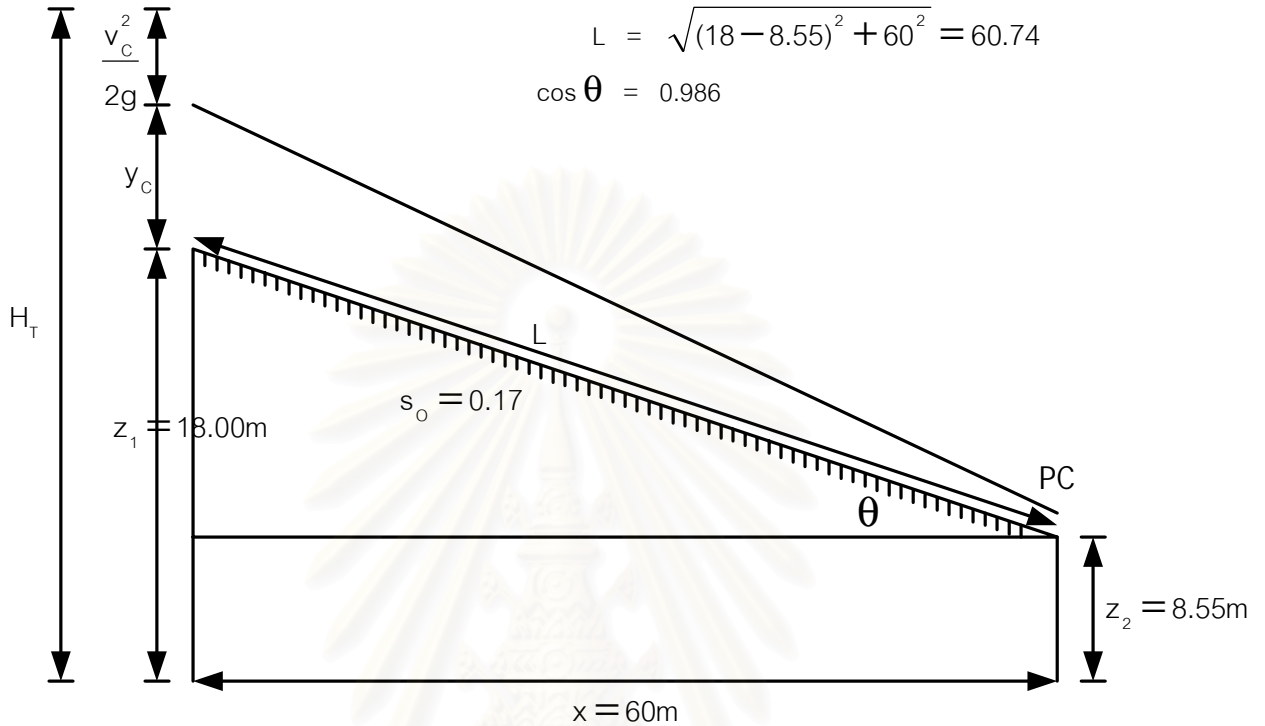
d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
3.43	85.68	2.69	5.97	1.8146	5.2416		0.0037				50.00
3.26	81.39	2.58	6.28	2.0106	5.2663	-0.0247	0.0043	0.0040	0.0910	-0.2713	50.27
3.08	77.11	2.47	6.63	2.2402	5.3245	-0.0583	0.0051	0.0047	0.0903	-0.6452	50.92
2.91	72.82	2.36	7.02	2.5115	5.4245	-0.1000	0.0061	0.0056	0.0894	-1.1179	52.03
2.74	68.54	2.25	7.46	2.8353	5.5769	-0.1524	0.0073	0.0067	0.0883	-1.7260	53.76
2.57	64.26	2.13	7.96	3.2259	5.7962	-0.2193	0.0090	0.0081	0.0869	-2.5246	56.29
2.40	59.97	2.01	8.52	3.7032	6.1021	-0.3060	0.0111	0.0100	0.0850	-3.6005	59.89

Sta 60 - Sta 110, $S_o = 0.17$, $b = 25 \text{ m}$

d (m)	A (m^2)	R (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f (m)	\bar{S}_f (m)	$S_o - \bar{S}_f$ (m)	Δx (m)	Station (m)
2.40	59.97	2.01	8.52	3.7032	6.1021		0.0111				59.89
2.23	55.69	1.89	9.18	4.2948	6.5224	-0.4203	0.0140	0.0125	0.1575	-2.6692	62.55
2.06	51.41	1.77	9.94	5.0405	7.0967	-0.5743	0.0180	0.0160	0.1540	-3.7288	66.28
1.88	47.12	1.64	10.85	5.9986	7.8834	-0.7868	0.0237	0.0208	0.1492	-5.2739	71.56
1.71	42.84	1.51	11.93	7.2583	8.9718	-1.0884	0.0320	0.0278	0.1422	-7.6550	79.21
1.37	34.27	1.24	14.92	11.3411	12.7119	-3.7401	0.0651	0.0486	0.1214	-30.8002	110.01

ภาคผนวก จ.

ผลการคำนวณจากเกณฑ์การออกแบบ



- 1) k_s ได้จากการทดลองสอบเทียบในภาคผนวก ข.
- 2) อัตราการไหล
- 3) อัตราการไหลต่อเมตร
- 4) ค่าความลึกวิกฤต

5) boundary layer thickness, δ จากสมการ (2-27) $\frac{\delta}{L} = 0.08 \left(\frac{L}{k_s} \right)^{-0.233}$

6) energy thickness, δ_3 จากสมการ (2-29) $\delta_3 = 0.22\delta$

7) พลังงานทั้งหมดก่อนเข้ารางเท $H_T = z + y + \frac{v^2}{2g}$

8) ความเร็วการไหลที่จุด PC ได้จากการเดาซ้ำซาก (trial and error)

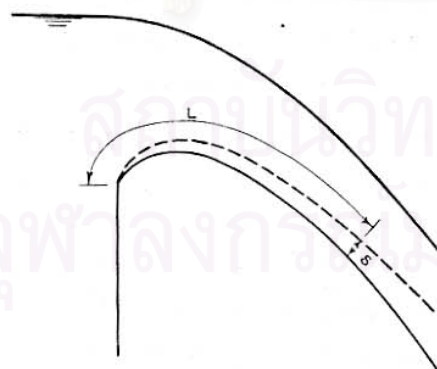
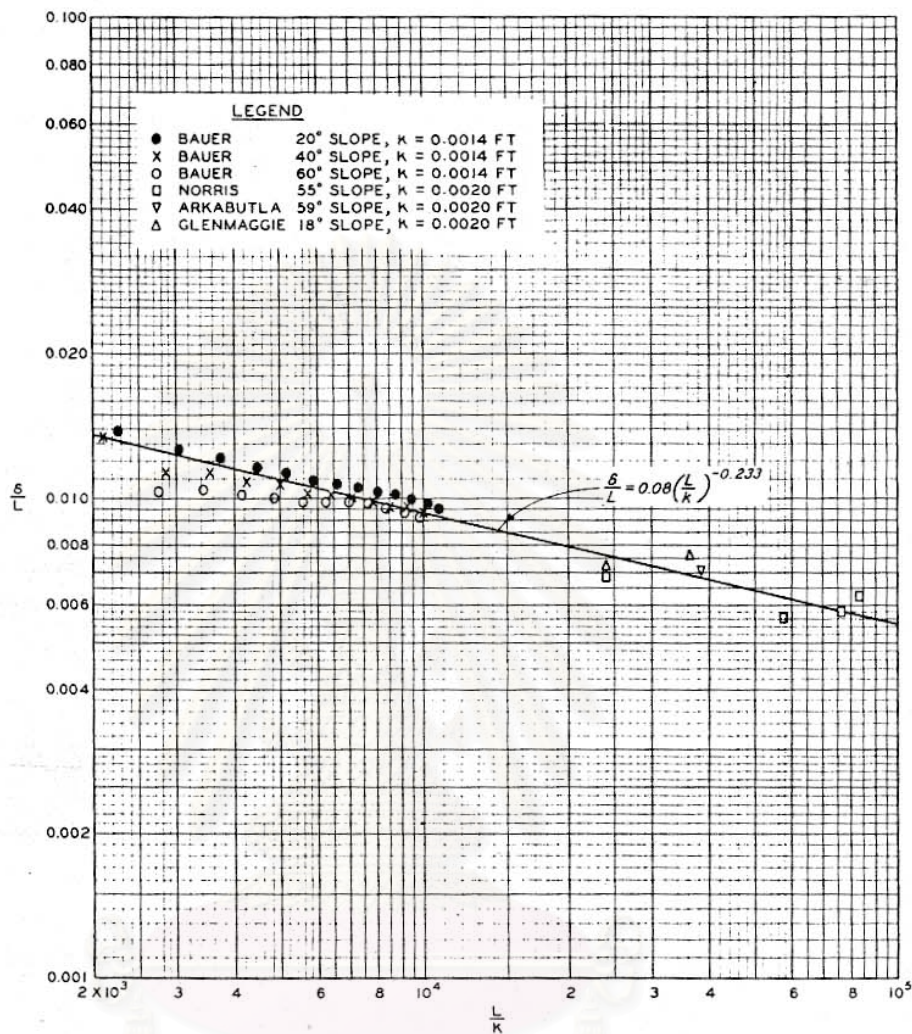
9) potential flow depth $d_p = H_T - \frac{U^2}{2g}$

10) $q' = U \cdot d_p$ เพื่อตรวจสอบค่า U ที่ได้จากการเดาว่า $q = q'$

11) พลังงานสูญเสียรางเท ตามสมการ (2-25) $H_L = \frac{U^3 \delta_3}{2gq}$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
k_s (m)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	y_c (m)	δ (m)	δ_3 (m)	H_T (m)	U (m/s)	d_p (m)	q' (m ² /s)	H_L (m)
0.004415	224.86	8.994	2.020	0.528	0.116	12.481	15.280	0.589	8.996	2.346
	247.49	9.900	2.154	0.528	0.116	12.681	15.373	0.644	9.904	2.170
	336.94	13.478	2.646	0.528	0.116	13.418	15.705	0.859	13.493	1.698
	448.84	17.954	3.203	0.528	0.116	14.254	16.065	1.116	17.926	1.368
	628.45	25.138	4.009	0.528	0.116	15.463	16.554	1.517	25.114	1.069
0.005890	259.16	10.366	2.221	0.965	0.212	12.781	15.419	0.673	10.381	2.234
	305.30	12.212	2.477	0.965	0.212	13.166	15.595	0.781	12.181	1.970
	390.51	15.620	2.919	0.965	0.212	13.829	15.885	0.981	15.587	1.627
	476.95	19.078	3.335	0.965	0.212	14.453	16.147	1.181	19.064	1.397
	487.91	19.516	3.386	0.965	0.212	14.529	16.178	1.206	19.516	1.373
0.011750	193.22	7.729	1.826	0.663	0.146	12.189	15.142	0.510	7.726	3.339
	255.27	10.211	2.199	0.663	0.146	12.748	15.403	0.665	10.241	2.652
	323.15	12.926	2.573	0.663	0.146	13.309	15.655	0.830	12.988	2.195
	500.10	20.004	3.442	0.663	0.146	14.614	16.210	1.238	20.071	1.577
	511.95	20.478	3.497	0.663	0.146	14.695	16.246	1.260	20.473	1.556
0.022080	158.57	6.343	1.601	0.768	0.169	11.851	14.975	0.427	6.398	4.518
	213.90	8.556	1.954	0.768	0.169	12.381	15.233	0.562	8.563	3.553
	228.57	9.143	2.043	0.768	0.169	12.514	15.296	0.597	9.134	3.373
	332.34	13.294	2.621	0.768	0.169	13.382	15.690	0.847	13.286	2.502
	511.20	20.448	3.493	0.768	0.169	14.690	16.244	1.258	20.441	1.805

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

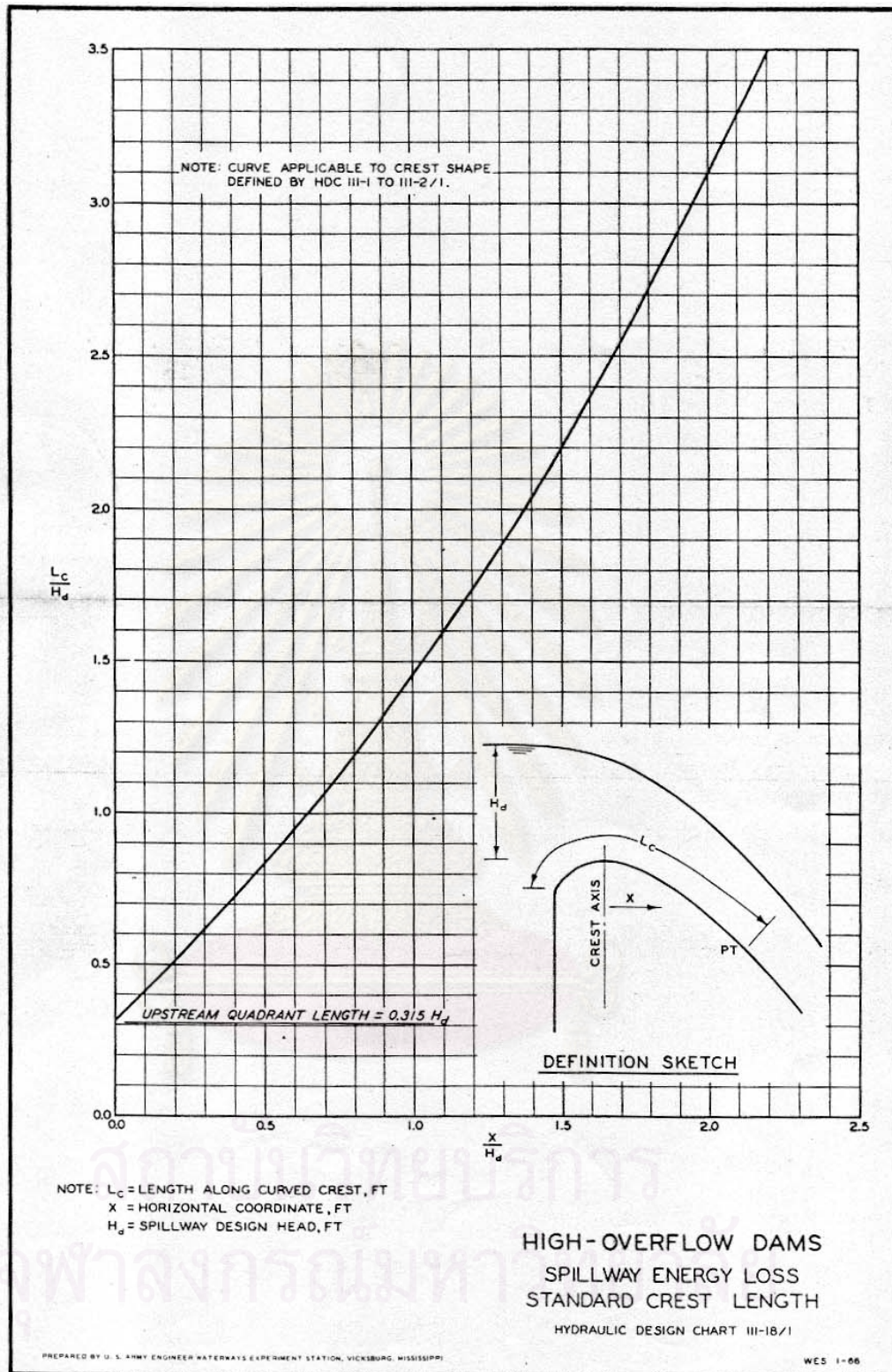


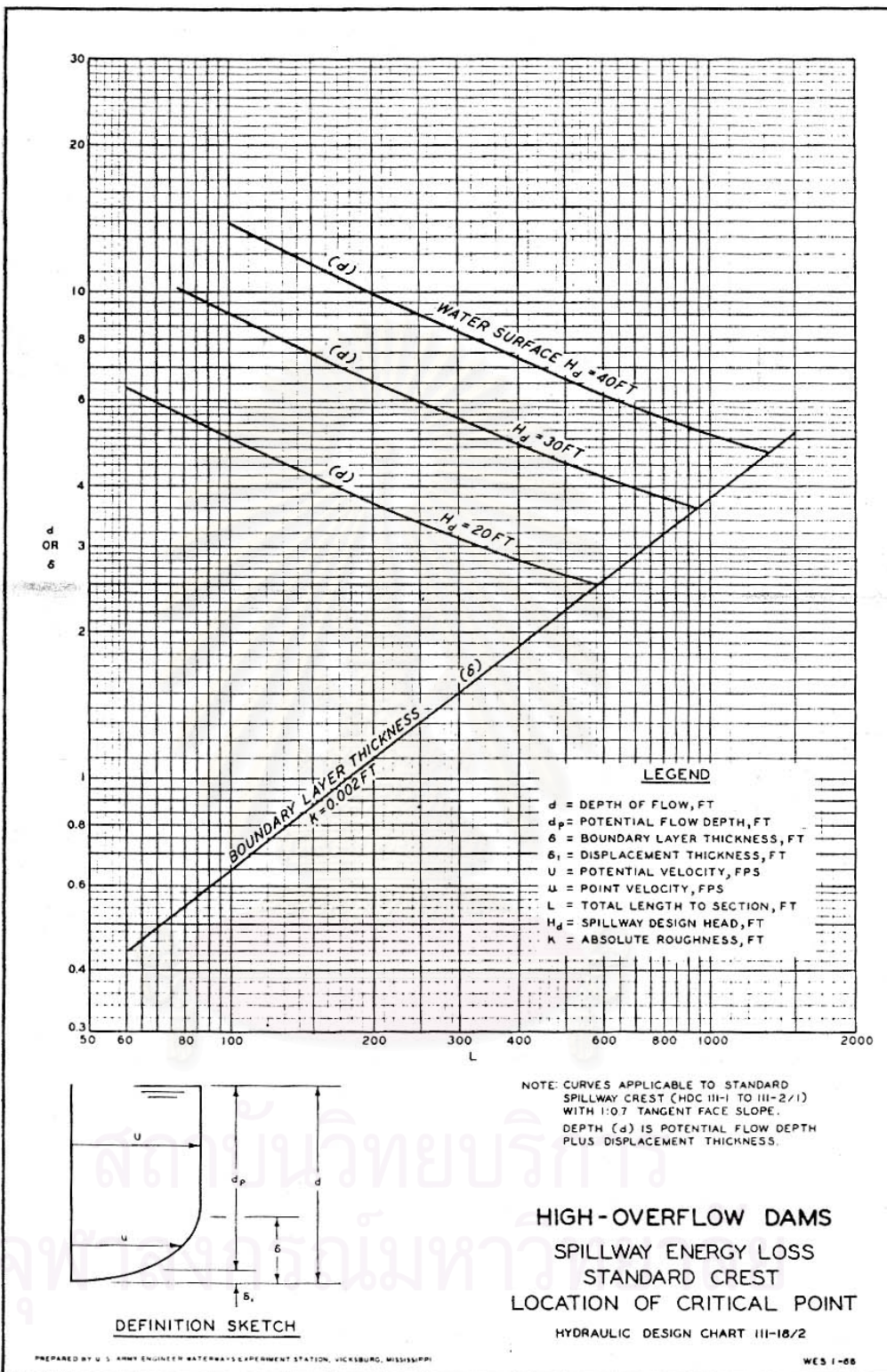
DEFINITION SKETCH

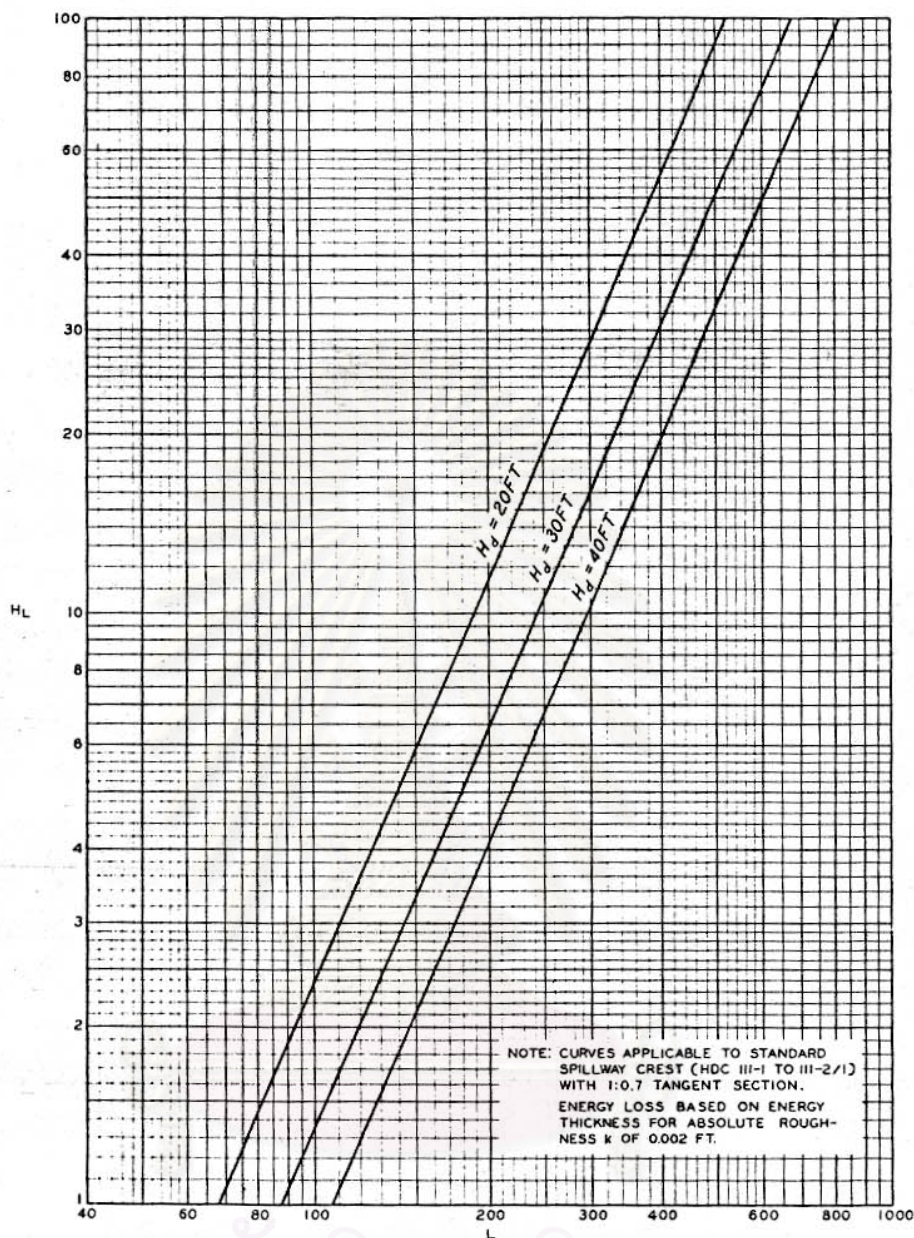
δ = BOUNDARY LAYER THICKNESS, FT
 L = SURFACE LENGTH, FT
 k = ABSOLUTE SURFACE ROUGHNESS HEIGHT, FT

**HIGH OVERFLOW DAMS
 SPILLWAY ENERGY LOSS
 BOUNDARY LAYER DEVELOPMENT**

HYDRAULIC DESIGN CHART III-18







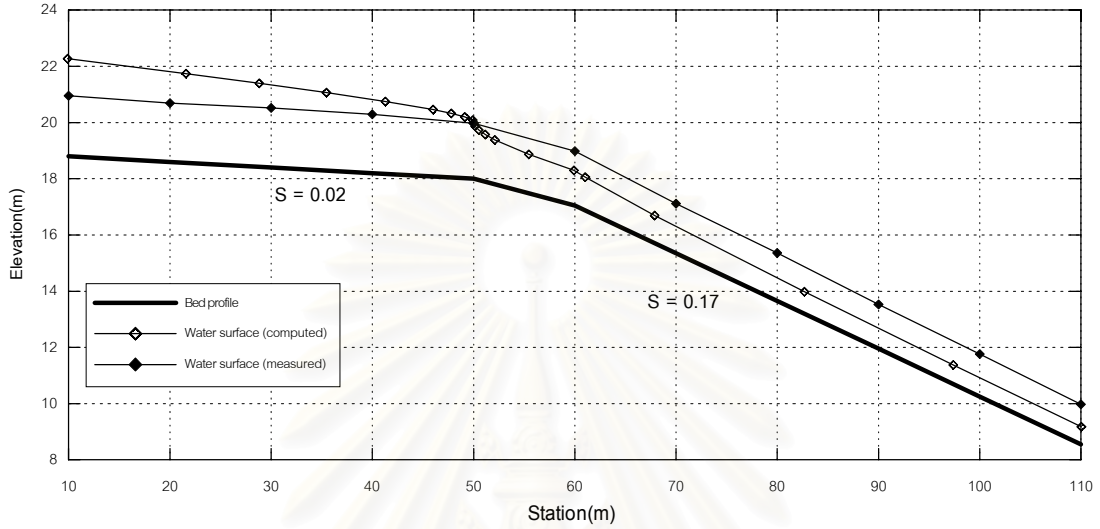
LEGEND

HL = ENERGY HEAD LOSS, FT
 L = TOTAL LENGTH TO SECTION, FT
 H_d = SPILLWAY DESIGN HEAD, FT

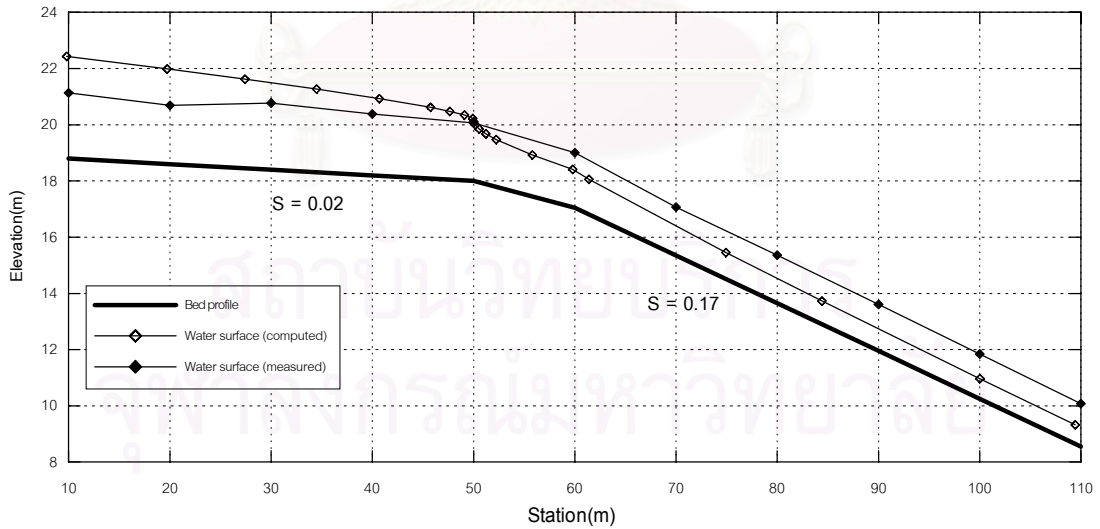
HIGH-OVERFLOW DAMS
 SPILLWAY ENERGY LOSS
 STANDARD CREST
 FACE SLOPE 1:0.7
 HYDRAULIC DESIGN CHART III-18/3

ภาคผนวก จ.

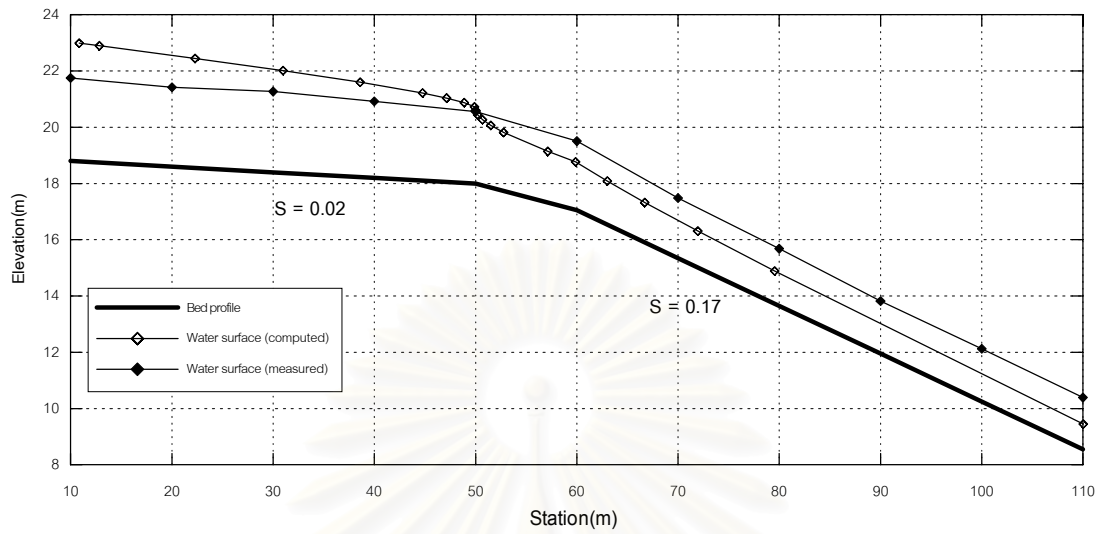
รูปตัดการไหลบนรางเท



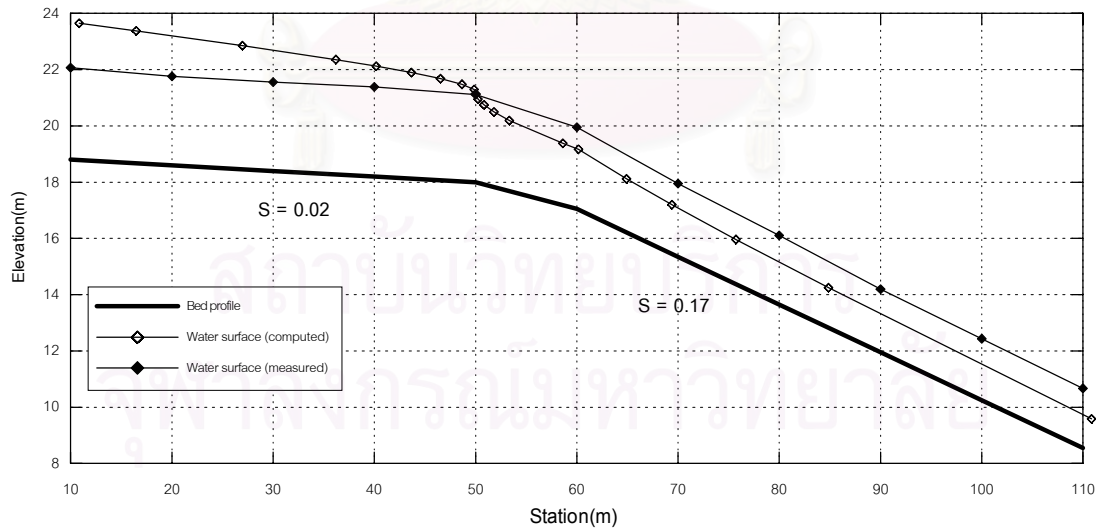
รูป จ-1 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับการคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล 224.86 m³ / s



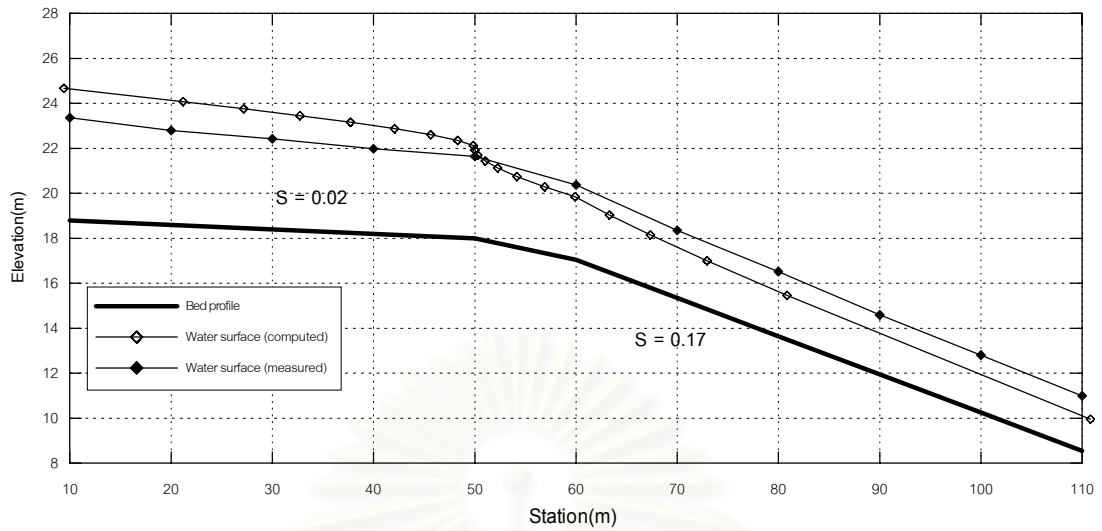
รูป จ-2 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับการคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล 247.49 m³ / s



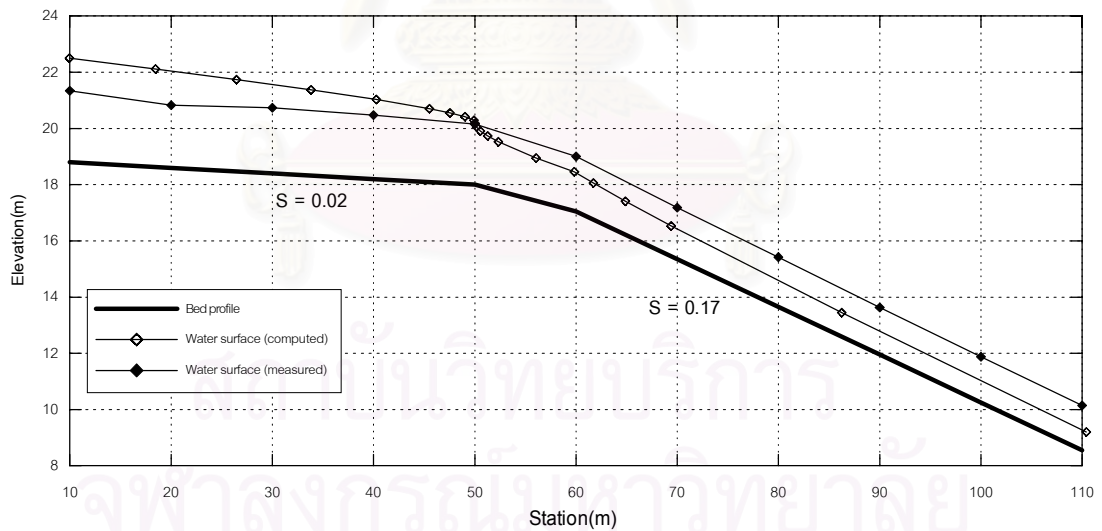
รูป ๓-3 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางรถไฟ กระดาษทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล 336.94 m³/s



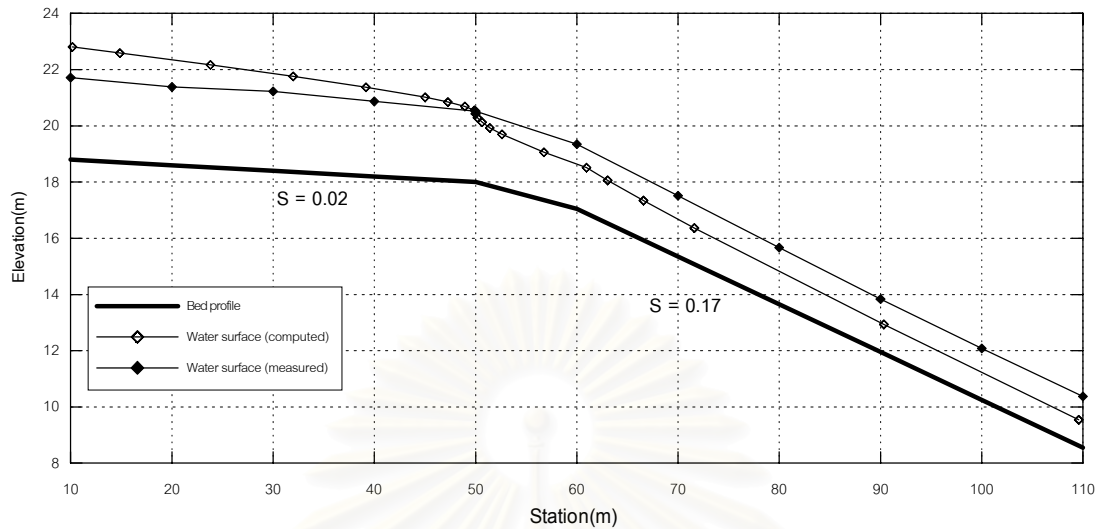
รูป ๓-4 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางรถไฟ กระดาษทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล 448.84 m³/s



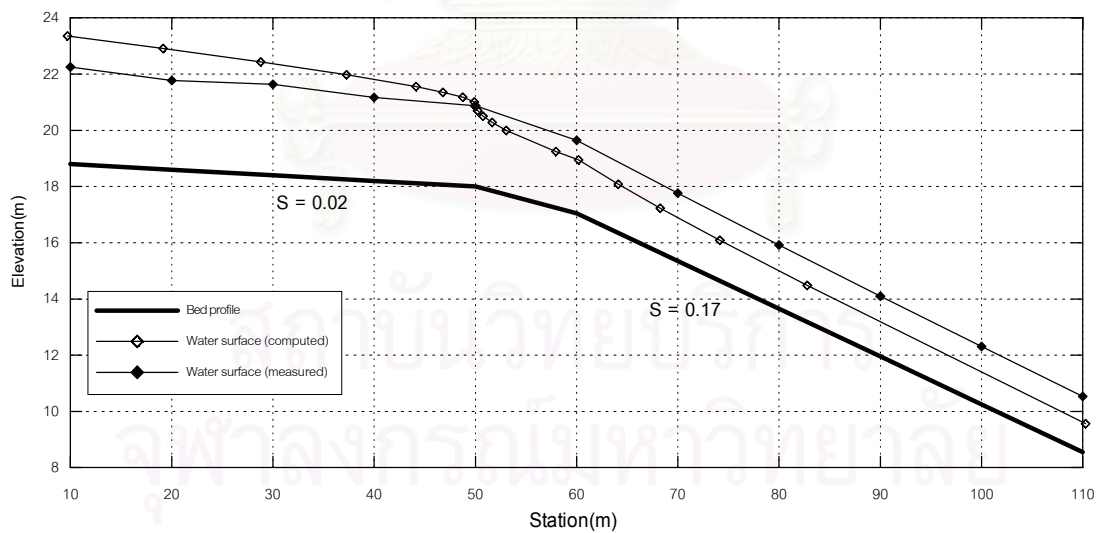
รูป ฉ-5 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 400 ที่อัตราการไหล $628.45 \text{ m}^3/\text{s}$



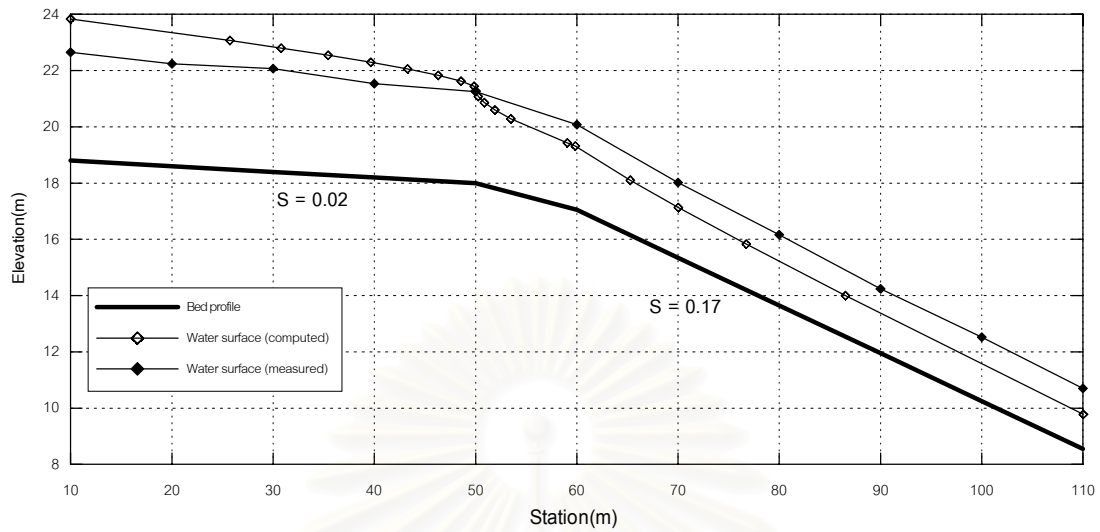
รูป ฉ-6 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล $259.16 \text{ m}^3/\text{s}$



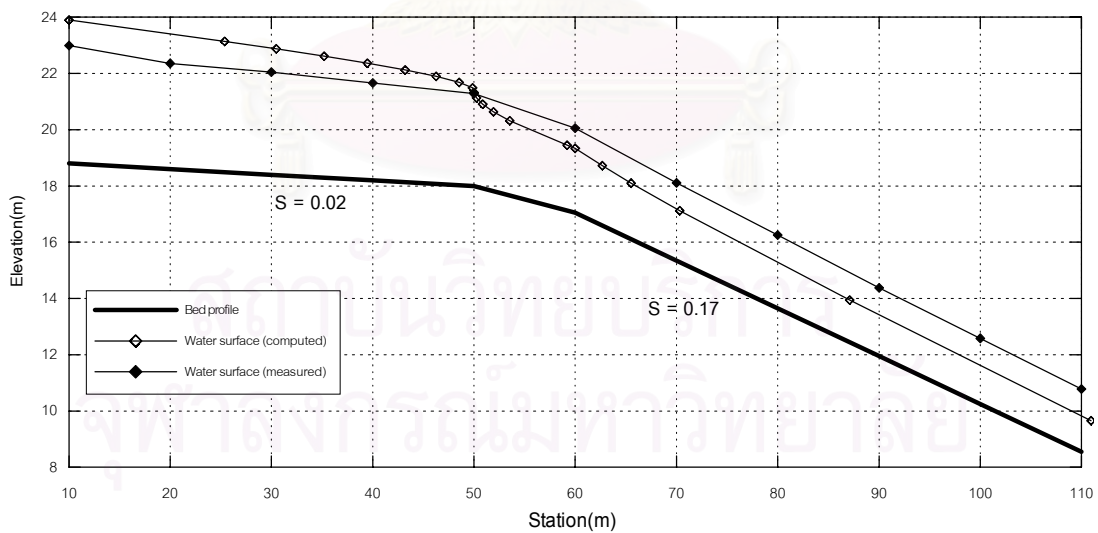
รูป ๗-7 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางที่ไดจากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ผิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล $305.30 \text{ m}^3/\text{s}$



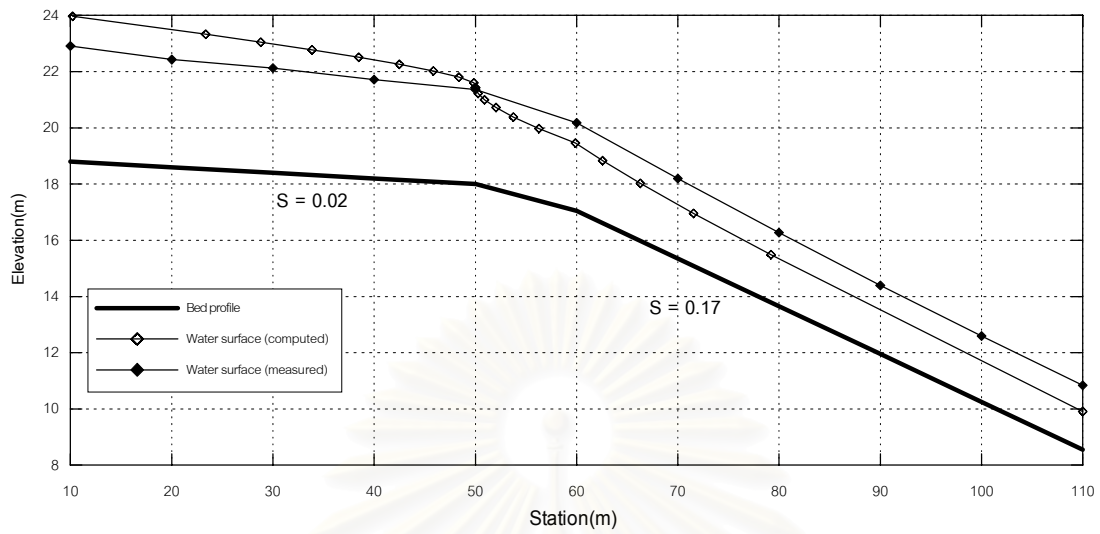
รูป ๗-8 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางที่ไดจากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ผิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล $390.51 \text{ m}^3/\text{s}$



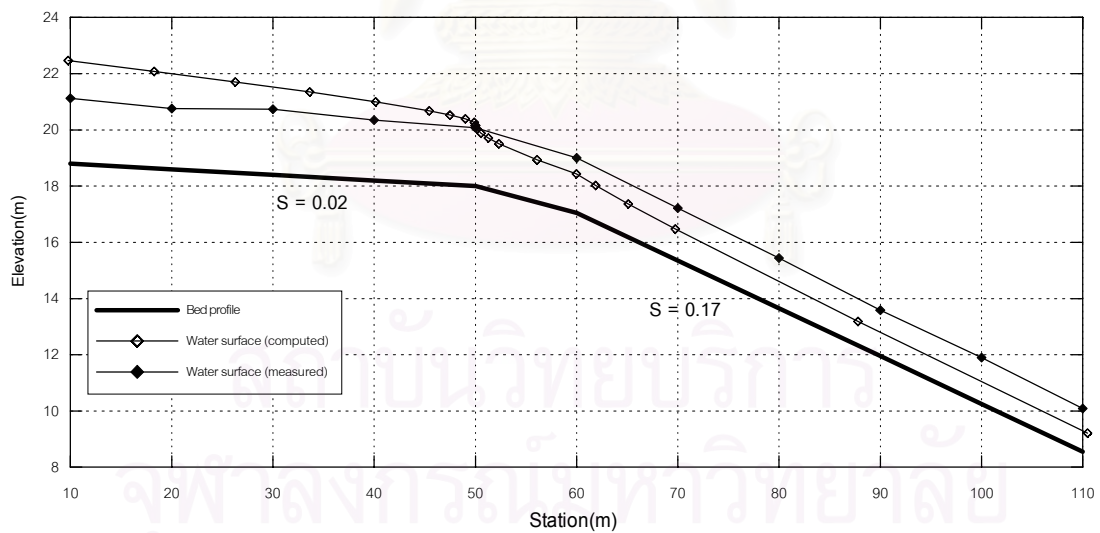
รูป ๙-9 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางรถไฟ กระดาษทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล 476.95 m³ / s



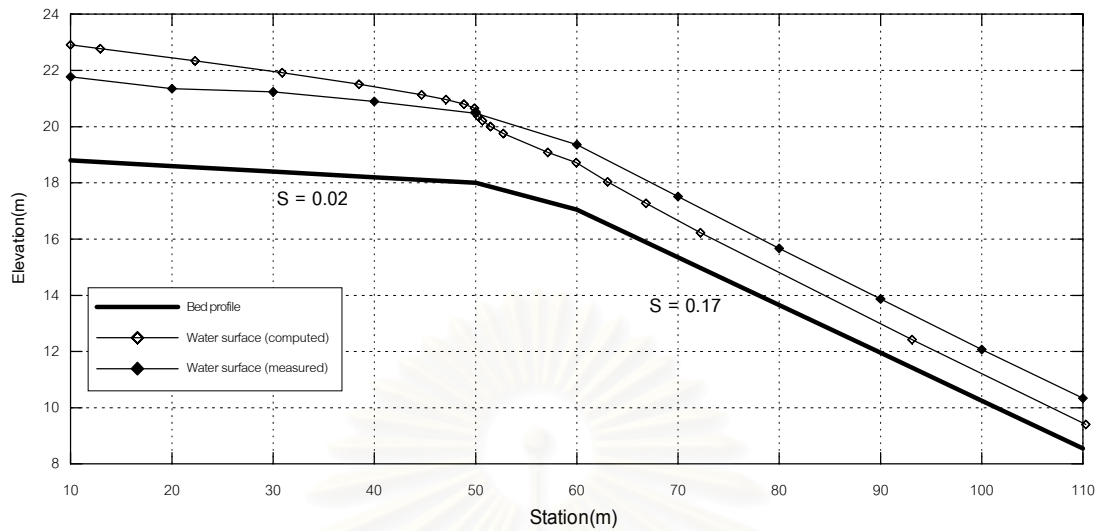
รูป ๙-10 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางรถไฟที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางรถไฟ กระดาษทรายเบอร์ 280 ที่อัตราการไหล 487.91 m³ / s



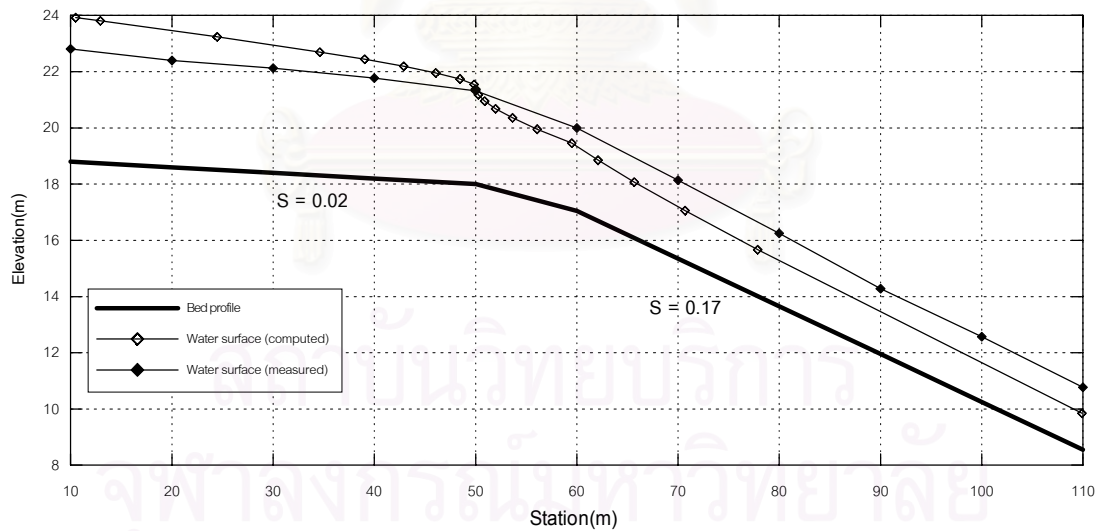
รูป ด-11 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล $193.22 \text{ m}^3/\text{s}$



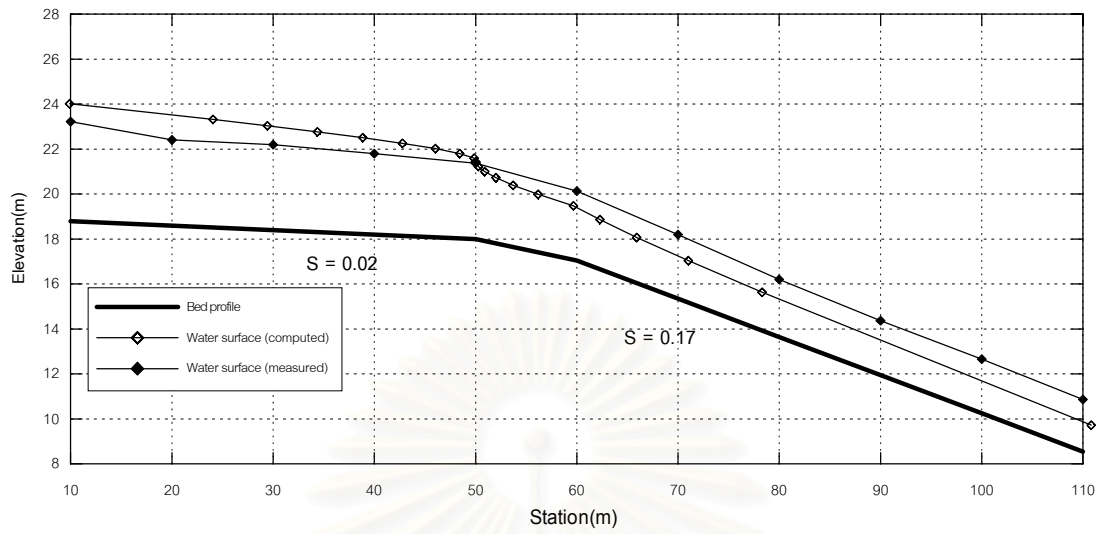
รูป ด-12 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล $255.27 \text{ m}^3/\text{s}$



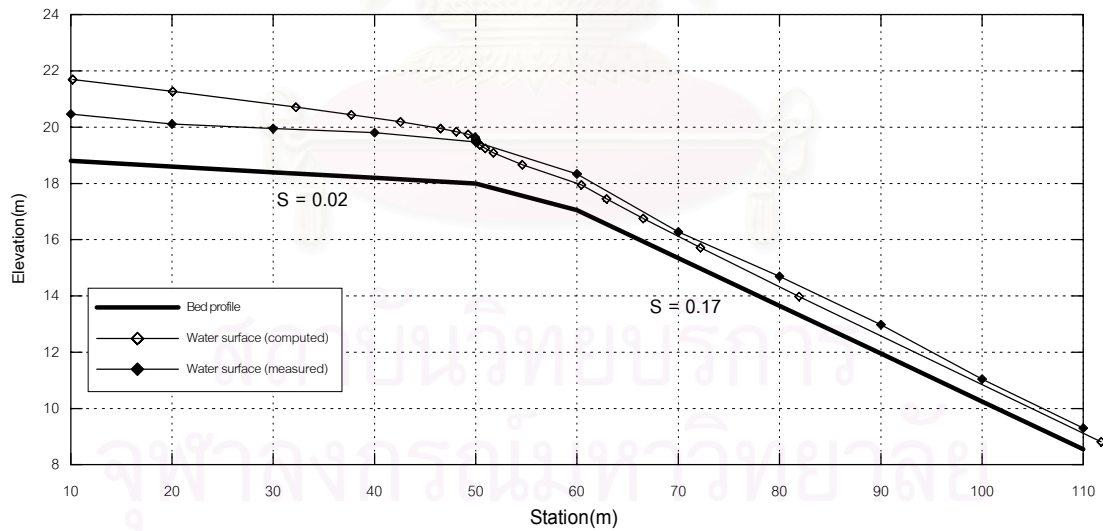
รูป ด-13 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล 2323.15 m³/s



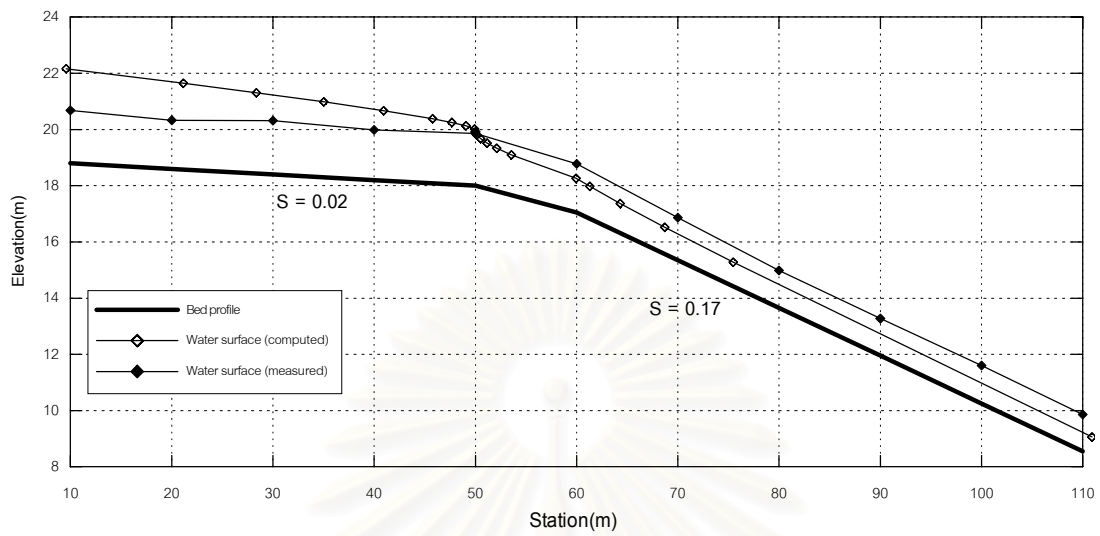
รูป ด-14 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล 500.10 m³/s



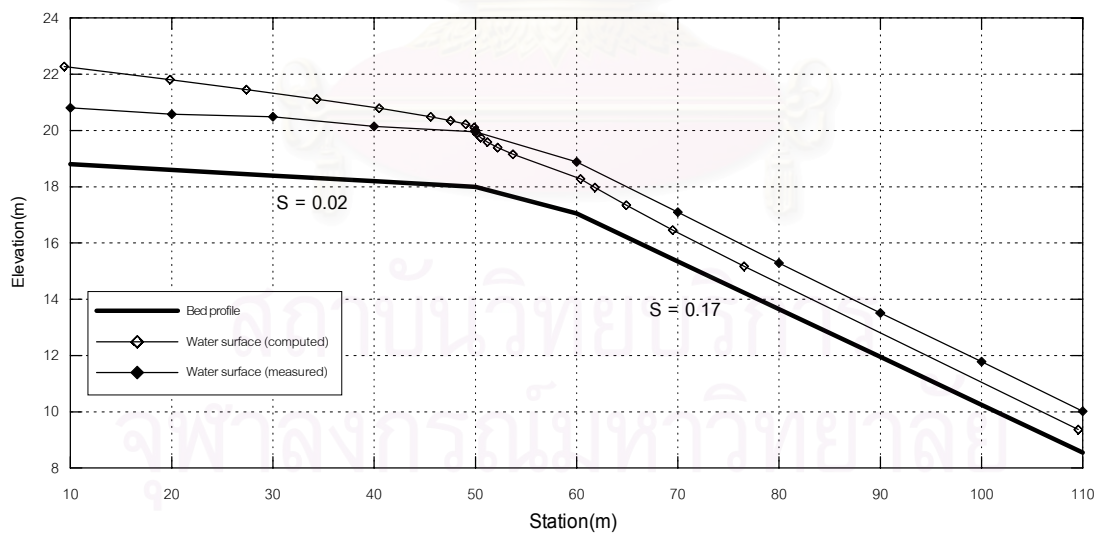
รูป ด-15 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 180 ที่อัตราการไหล 511.95 m³/s



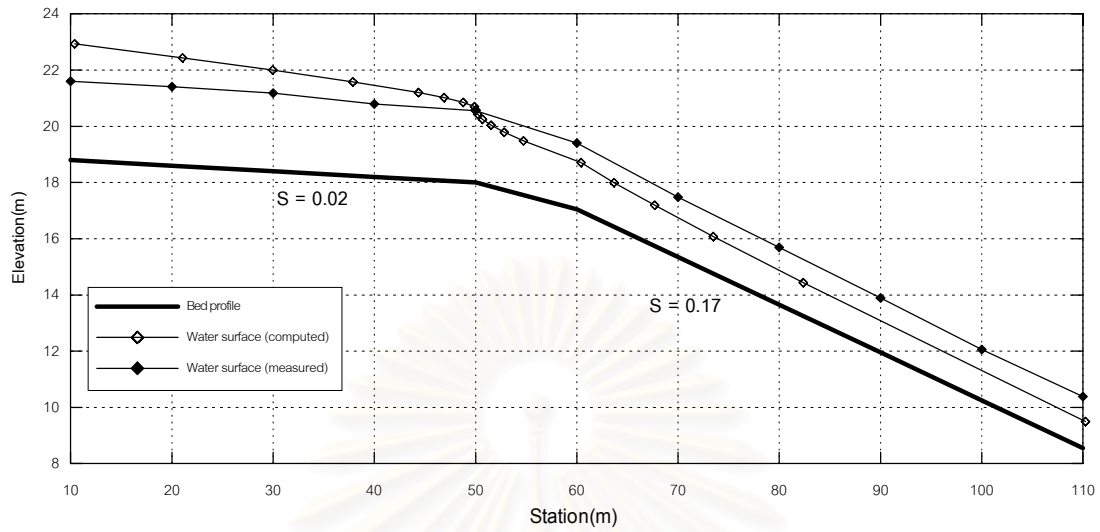
รูป ด-16 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล 158.57 m³/s



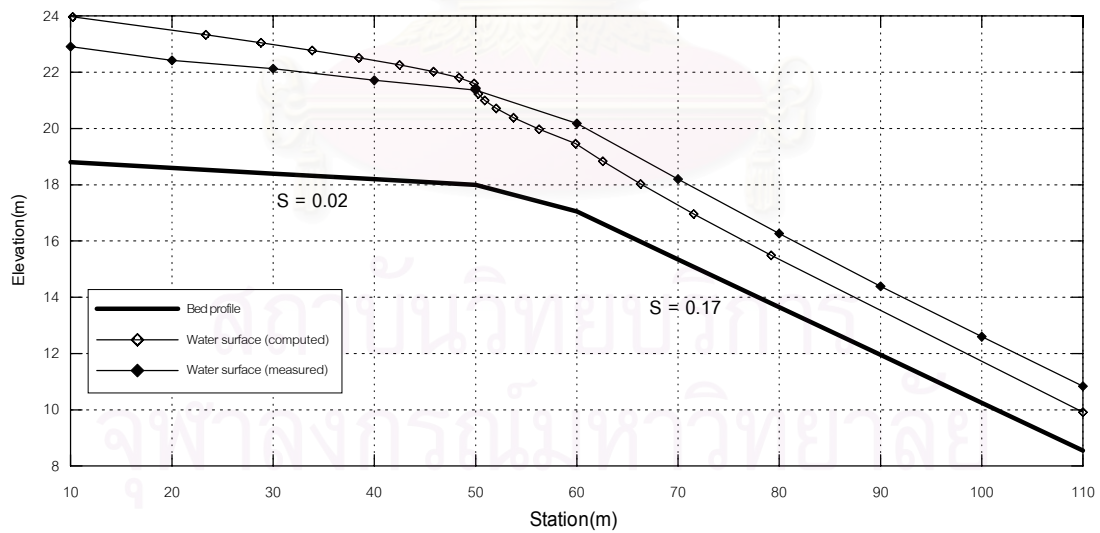
รูป น-17 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล $213.90 \text{ m}^3/\text{s}$



รูป น-18 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล $228.57 \text{ m}^3/\text{s}$



รูป น-19 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล $332.34 \text{ m}^3/\text{s}$



รูป น-20 เปรียบเทียบรูปตัดการไหลบนรางเทที่ได้จากการวัดจริงในแบบจำลอง
กับ การคำนวณจากสูตรของ Manning
ฝิวรางเท กระดาษทรายเบอร์ 80 ที่อัตราการไหล $511.20 \text{ m}^3/\text{s}$

ตาราง ด-1 การคำนวณพลังงานสูญเสียที่มีความเข้มข้นของอากาศ 15.3 เปอร์เซ็นต์

ผิว	Q	Station	z	y_B	y	d	$d\cos\theta$	v	E	H	HI
Smooth	500.28	10	18.8	3.781	3.781	3.781	3.781	5.293	1.428	24.009	6.397
		110	8.55	1.987	1.683	1.657	1.633	12.073	7.429	17.612	
#400	628.45	10	18.8	4.569	4.569	4.569	4.569	5.501	1.543	24.912	6.594
		110	8.55	2.442	2.068	2.037	2.007	12.340	7.762	18.318	
#400	448.84	10	18.8	3.269	3.269	3.269	3.269	5.491	1.537	23.606	8.068
		110	8.55	2.121	1.797	1.770	1.743	10.144	5.245	15.538	
#280	487.91	10	18.8	4.189	4.189	4.189	4.189	4.659	1.106	24.095	8.087
		110	8.55	2.226	1.885	1.857	1.829	10.509	5.629	16.008	
#180	500.1	10	18.8	4.011	4.011	4.011	4.011	6.267	2.002	24.813	5.100
		110	8.55	2.227	1.886	1.858	1.830	13.532	9.333	19.713	
#80	511.2	10	18.8	4.117	4.117	4.117	4.117	6.106	1.901	24.817	5.539
		110	8.55	2.287	1.937	1.908	1.879	13.177	8.849	19.279	

ตาราง ด-2 การคำนวณพลังงานสูญเสียที่มีความเข้มข้นของอากาศ 30 เปอร์เซ็นต์

ผิว	Q	Station	z	y_B	y	d	$d\cos\theta$	v	E	H	HI
Smooth	500.28	10	18.8	3.781	3.781	3.781	3.781	5.293	1.428	24.009	3.232
		110	8.55	1.987	1.391	1.370	1.349	14.609	10.877	20.777	
#400	628.45	10	18.8	4.569	4.569	4.569	4.569	5.501	1.543	24.912	3.340
		110	8.55	2.442	1.709	1.684	1.658	14.932	11.364	21.572	
#400	448.84	10	18.8	3.269	3.269	3.269	3.269	6.715	2.298	24.368	2.896
		110	8.55	2.121	1.485	1.463	1.441	15.009	11.481	21.472	
#280	487.91	10	18.8	4.189	4.189	4.189	4.189	4.659	1.106	24.095	5.792
		110	8.55	2.226	1.558	1.535	1.512	12.716	8.241	18.303	
#180	500.1	10	18.8	4.011	4.011	4.011	4.011	4.987	1.268	24.079	5.364
		110	8.55	2.227	1.559	1.535	1.512	13.029	8.653	18.715	
#80	511.2	10	18.8	4.117	4.117	4.117	4.117	4.967	1.258	24.174	5.498
		110	8.55	2.287	1.601	1.577	1.553	12.969	8.573	18.676	

ตาราง ข-3 การคำนวณพลังงานสูญเสียที่มีความเข้มข้นของอากาศ 38 เปอร์เซ็นต์

ผิว	Q	Station	z	y_B	y	d	$d\cos\theta$	v	E	H	HI
Smooth	500.28	10	18.8	3.781	3.781	3.781	3.781	5.293	1.428	24.009	1.590
		110	8.55	1.987	1.291	1.272	1.253	15.733	12.615	22.418	
#400	628.45	10	18.8	4.569	4.569	4.569	4.569	5.501	1.543	24.912	1.643
		110	8.55	2.442	1.587	1.563	1.540	16.080	13.179	23.269	
#400	448.84	10	18.8	3.269	3.269	3.269	3.269	6.715	2.298	24.368	1.164
		110	8.55	2.121	1.379	1.358	1.338	16.163	13.315	23.203	
#280	487.91	10	18.8	4.189	4.189	4.189	4.189	4.659	1.106	24.095	4.584
		110	8.55	2.226	1.447	1.425	1.404	13.694	9.558	19.511	
#180	500.1	10	18.8	4.011	4.011	4.011	4.011	4.987	1.268	24.079	4.089
		110	8.55	2.227	1.447	1.426	1.404	14.032	10.035	19.989	
#80	511.2	10	18.8	4.117	4.117	4.117	4.117	4.967	1.258	24.174	4.240
		110	8.55	2.287	1.486	1.464	1.442	13.967	9.943	19.935	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสยามชัย ไชวติเวชย์ เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ.2518 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย