

ผลของความขรุขระของผิวต่อม่อสะพานต่อหลุมกัศเฑาะ



นายเอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

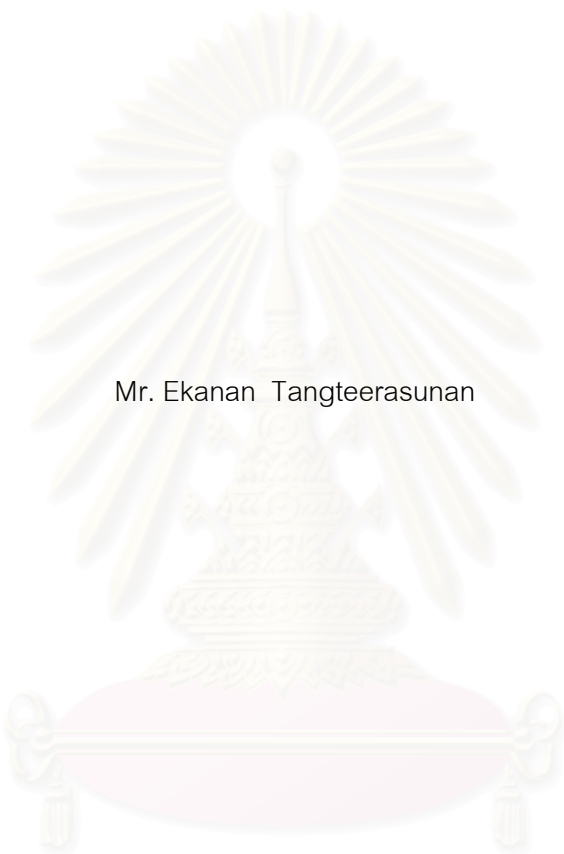
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1740-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF BRIDGE PIER SURFACE ROUGHNESS ON PIER SCOUR HOLES

Mr. Ekanan Tangteerasunan



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 974-03-1740-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์    ผลของความขรุขระของผิวต่อม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ  
โดย    นายเอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์  
สาขาวิชา    วิศวกรรมแหล่งน้ำ  
อาจารย์ที่ปรึกษา    ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธำ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธำ)

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

เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์ : ผลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ. (EFFECTS OF BRIDGE PIER SURFACE ROUGHNESS ON PIER SCOUR HOLES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เสวี จันทโรยธำ , 111 หน้า , ISBN 974-03-1740-5

การศึกษานี้ เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของค่าความขรุขระของตอม่อสะพานที่เปลี่ยนไปกับความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อทรงกระบอก และศึกษาถึงอิทธิพลของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, ฟรูดนัมเบอร์, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ, ความลึกการไหล และวัสดุท้องน้ำ ที่มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะดังกล่าว การศึกษาใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาด ได้แก่ 3.40 ซม., 4.80 ซม. และ 6.00 ซม. และวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด ได้แก่ 0.36 มม., 1.20 มม. และ 2.20 มม. โดยจำลองลักษณะความขรุขระของผิวตอม่อด้วยกระดาษทรายที่มีในท้องตลาด 3 ขนาด และทรายสม่ำเสมอขนาด 1.20 มม. หนึ่งขนาด ซึ่งได้ทำการทดลองหาค่าความขรุขระของกระดาษทรายเป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. ตามลำดับ ทำการทดลองในสภาพการไหลสม่ำเสมอที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย เป็นการไหลได้วิกฤต และภายใต้สภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความลึกหลุมกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับความลึกการไหล, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ, เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของตอม่อ, ฟรูดนัมเบอร์ และค่าความขรุขระของผิวตอม่อ และจากการศึกษาพบว่า ขนาดหลุมกัดเซาะของตอม่อที่ผิวมีค่าความขรุขระมาก จะมากกว่าขนาดหลุมกัดเซาะของตอม่อที่ผิวมีค่าความขรุขระน้อย โดยความลึกหลุมกัดเซาะของผิวตอม่อที่เป็นกระดาษทรายมีความแตกต่างจากตอม่อผิวเรียบประมาณ 10, 13 และ 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความขรุขระ 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. ตามลำดับ

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

## 4170656421 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD : LOCAL SCOUR / SURFACE ROUGHNESS / CIRCULAR PIER / BRIDGE PIER SCOUR

EKANAN TANGTEERASUNAN : EFFECTS OF BRIDGE PIER SURFACE ROUGHNESS ON PIER SCOUR HOLES. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.SEREE CHANYOTHA , 111 pp , ISBN 974-03-1740-5

Local scour at circular piers with different pier surfaces was studied experimentally in order to investigate the effects of pier surface roughnesses on the depth of scour. The effects of the Reynolds number, Froude number, pier diameters, approach flow depth, and bed material size on pier scour depth were also investigated: Three different sizes of circular pier with diameters of 3.40 cm., 4.80 cm., and 6.00 cm. were used in this study. Bed materials used were three uniform-sized sands with grain diameters of 0.36 mm., 1.20 mm., and 2.20 mm., respectively. The pier surface roughnesses used in this study were three commercially available sand papers and one 1.20 mm. uniform-sized sand. The roughness heights of the used sand papers obtained experimentally in the laboratory were 0.0883 mm., 0.1178 mm., and 0.4416 mm. The experiments were conducted under steady, gradually varied flow, subcritical flow, and clear water scour conditions.

The experiment results showed that the depth of scour holes correlate with approach flow depth, pier diameter, pier Reynolds number, Froude number, and pier surface roughness. It was also found that pier scour holes of higher surface roughness height were deeper than lower surface roughness height. The percents difference between the unroughened pier surface and three roughened pier surfaces with sand papers were about 10, 13, and 15 for surface roughnesses of 0.0883 mm., 0.1178 mm., and 0.4416 mm., respectively.

Department....Water Resources Engineering... Student's signature.....

Field of study...Water Resources Engineering... Advisor's signature.....

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวนพัน กิจไพศาลสกุล กรรมการ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธากกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาคำแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ ทั้งในด้านหลักวิชาการและหลักการปฏิบัติ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ ตลอดจนแนวทางการดำรงชีวิตแก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำการวิจัย และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งอำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่ พร้อมทั้งอุปกรณ์ในการทดลอง ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเลทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี รวมทั้งใคร่ขอขอบพระคุณ พี่ เพื่อน น้อง ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จทั้งหมดในชีวิตข้าพเจ้า ความดีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ บิดา มารดา บุรพาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 แนวทางการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา.....	7
2.1 การกีดเซาะเฉพาะแห่ง.....	7
2.2 กลศาสตร์การกีดเซาะ.....	9
2.3 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ.....	11
2.4 การศึกษาที่ผ่านมา.....	13
บทที่ 3 อุปกรณ์ เครื่องมือ และการดำเนินการทดลอง.....	25
3.1 การดำเนินการศึกษา.....	25
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	26
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	35
4.1 อัตราการไหล.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 ความลึกการไหล.....	35
4.3 ความเร็วการไหล.....	36
4.4 อุณหภูมิของน้ำ.....	36
4.5 เวลาที่ใช้ในการทดลอง.....	36
4.6 ความลึกหลุมกัดเซาะ.....	36
4.7 ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล.....	37
4.8 เรย์โนลด์นัมเบอร์.....	37
4.9 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ.....	38
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	46
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะ.....	47
5.2 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีผิวเรียบกับผิวอื่น ๆ.....	52
5.3 ผลของความขรุขระของผิวตอม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะ.....	60
5.4 ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อกับสมการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะอื่น ๆ.....	73
5.5 อิทธิพลของค่าความขรุขระสัมพัทธ์ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แบบจำลองชลศาสตร์การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน.....	84
ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง.....	94
ภาคผนวก ค การหาค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k).....	105
ภาคผนวก ง แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ.....	107
ประวัติผู้ศึกษา.....	111



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ค่าปรับแก้ $K_1$ และ $K_2$ ในสมการของ Richardson (1987).....	18
3-1 ค่า $k_s$ ของผิวตอม่อลักษณะต่าง ๆ.....	27
3-2 คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3-3 รายละเอียดการทดลอง.....	29
3-4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง.....	34
4-1 ผลการทดลองกรณี A.....	39
4-2 ผลการทดลองกรณี B.....	39
4-3 ผลการทดลองกรณี C.....	40
4-4 ผลการทดลองกรณี D.....	40
4-5 ผลการทดลองกรณี E.....	41
4-6 ผลการทดลองกรณี F.....	41
4-7 ผลการทดลองกรณี G.....	42
4-8 ผลการทดลองกรณี H.....	42
4-9 ผลการทดลองกรณี I.....	43
4-10 ผลการทดลองกรณี J.....	43
4-11 ผลการทดลองกรณี K.....	44
4-12 ผลการทดลองกรณี L.....	44
4-13 ผลการทดลองกรณี M.....	44
4-14 ผลการทดลองกรณี N.....	45
4-15 ผลการทดลองกรณี O.....	45
5-1 สรุปเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นหรือลดลงของความลึกหลุมกัดเซาะ ของลักษณะผิวขรุขระอื่น ๆ กับลักษณะผิวเรียบ.....	53
5-2 แสดงความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นเปอร์เซ็นต์ ของลักษณะผิวตอม่อเป็นกระดาดทรายเบอร์ 400 กับลักษณะผิวเรียบ.....	54
5-3 แสดงความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นเปอร์เซ็นต์ ของลักษณะผิวตอม่อเป็นกระดาดทรายเบอร์ 280 กับลักษณะผิวเรียบ.....	56
5-4 แสดงความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นเปอร์เซ็นต์ ของลักษณะผิวตอม่อเป็นกระดาดทรายเบอร์ 80 กับลักษณะผิวเรียบ.....	58

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5-5 ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะของผิวตอม่อ (K).....	63
5-6 ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) กับลักษณะผิวต่าง ๆ .....	64
5-7 ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะผิวตอม่อ (K).....	65
5-8 ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) กับลักษณะผิวต่าง ๆ .....	65
ก-1 คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลอง (ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล, 2541).....	92
ข-1 ค่าความเร็วเฉือนวิกฤตที่ได้จากการ Trial and Error ของวัสดุท้องน้ำทั้ง 3 ขนาด.....	95
ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำ $d_{50} = 0.36$ มม., $n = 0.012$ .....	97
ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำ $d_{50} = 1.20$ มม., $n = 0.014$ .....	97
ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำ $d_{50} = 2.20$ มม., $n = 0.016$ .....	98
ข-5 แสดงค่าความขรุขระสัมพัทธ์และค่าความขรุขระของผิวตอม่อต่าง ๆ.....	99
ข-6 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวเรียบ.....	100
ข-7 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 400.....	100
ข-8 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 280.....	101
ข-9 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 80.....	101
ข-10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยม.....	104
ค-1 แสดงการหาค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k).....	106
ง-1 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบ.....	107
ง-2 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ตอม่อขนาด 3.40 ซม.....	108
ง-3 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ตอม่อขนาด 3.40 ซม.....	109
ง-4 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ตอม่อขนาด 3.40 ซม.....	110

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 การพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981).	7
2-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสำหรับขนาดตอม่อและวัสดุท้องน้ำคงที่ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981).....	8
2-3 แผนภาพแสดงการไหลผ่านตอม่อสะพานและการเกิดการไหลหมุนวน โดย Raudkivi และ Sutherland (1981).....	10
2-4 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function และ Reynolds Number ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981).....	10
2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ (Jones (1983) จาก FHWA, 1988).....	17
2-6 รูปแบบของตอม่อในสมการของ Richardson (1987).....	19
2-7 ตอม่อในการทดลองของ Brunce W.Melville และ D.M.Dongol (1992).....	20
2-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $d_s/D$ และ $y/D$ จากการทดลองของ Brunce W.Melville และ D.M.Dongol (1992).....	21
2-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $d_s/D_e$ และ $y/D_e$ จากการทดลองของ Brunce W.Melville และ D.M.Dongol (1992).....	21
2-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $d_s/d_{s\epsilon}$ และ $t/t_\epsilon$ ในการทดลองของ Melville และ Chiew (1999)...	23
3-1 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ และระบบหมุนเวียนน้ำของรางน้ำ.....	32
3-2 แสดงตำแหน่งการวางตอม่อ และตำแหน่งวัดความลึกการไหล.....	33
5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับขนาดตอม่อ.....	50
5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ.....	50
5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ.....	51
5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ เปรียบเทียบกับสมการ 5.4.....	51
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ (Jones (1983) จาก FHWA, 1988).....	52
5-6 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของลักษณะผิวตอม่อ #400 กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบ.....	55

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-7 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ของฝิว #400 กับฝิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน.....	55
5-8 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของลักษณะฝิวตอม่อ #280 กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับลักษณะฝิวตอม่อแบบฝิวเรียบ.....	57
5-9 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ของฝิว #280 กับฝิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน.....	57
5-10 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของลักษณะฝิวตอม่อ #80 กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับลักษณะฝิวตอม่อแบบฝิวเรียบ.....	59
5-11 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ของฝิว #80 กับฝิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน.....	59
5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ เมื่อแยกลักษณะฝิวตอม่อต่าง ๆ ในกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดปานกลาง.....	61
5-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ เมื่อแยกลักษณะฝิวตอม่อต่าง ๆ ในกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดหยาบ.....	62
5-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ เมื่อแยกลักษณะฝิวตอม่อต่าง ๆ.....	66
5-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ฝิว #400.....	68
5-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล ฝิว #400.....	68
5-17 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ฝิว #280.....	69
5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล ฝิว #280.....	69
5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ฝิว #80.....	70

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล ผิว #80.....	70
5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล.....	71
5-22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อความลึกการไหล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล.....	71
5-23 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) และค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness) ของผิวตอม่อ.....	72
5-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ.....	74
5-25 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล ที่ได้จากการทดลองและจากสมการ 5.14.....	74
5-26 ความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ กับค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ ของตอม่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.40 ซม.....	76
5-27 ความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ กับค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ ของตอม่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.80 ซม.....	77
5-28 ความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ กับค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ ของตอม่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.00 ซม.....	77
ก-1 รางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume).....	85
ก-2 ประตูควบคุมระดับน้ำ (tail gate).....	85
ก-3 ตะแกรงกันคลื่น (wave suppressors).....	85
ก-4 ภาดติดล้อเลื่อน.....	86
ก-5 เครื่องสูบน้ำ.....	86
ก-6 ฝ่ายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม ( $90^\circ$ v-notch wier).....	86
ก-7 รางน้ำที่ใช้ทำการทดลอง.....	87
ก-8 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ และระบบหมุนเวียนของน้ำ.....	88
ก-9 เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ (sandy surface meter).....	90
ก-10 อุปกรณ์เก็บข้อมูล (data logger).....	90
ก-11 แบบจำลองตอม่อสะพาน.....	91

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ก-12 ทรายละเอียด $d_{50} = 0.36$ มม.....	93
ก-13 ทรายปานกลาง $d_{50} = 1.20$ มม.....	93
ก-14 ทรายหยาบ $d_{50} = 2.20$ มม.....	93
ข-1 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function และ Reynolds Number ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษา (รูปจาก Raudkivi และ Sutherland, 1981).....	94
ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง resistance coefficient, $f$ และค่า Reynold Number ซึ่งเสนอโดย Nikuradse (1933).....	102
ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง resistance coefficient, $f$ และค่า Reynolds Number ของลักษณะผิวตอม่อต่าง ๆในการศึกษา.....	102
ข-4 เปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง และอัตราการไหลที่ได้จากสมการของ พรมงคณ.....	103

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตอม่อสะพาน (bridge pier) เป็นโครงสร้างที่สร้างขึ้นเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกจร (live load) ที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานและน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) ของโครงสร้างสะพาน ซึ่งเป็นทางเชื่อมสำหรับการคมนาคมขนส่งระหว่างสองฝั่งของลำน้ำ ในประเทศไทยโดยเฉพาะภาคกลางและกรุงเทพมหานคร ซึ่งได้ชื่อว่าเป็นเมืองที่มีแม่น้ำมากเมืองหนึ่ง จึงจำเป็นต้องมีการก่อสร้างสะพานข้ามลำน้ำ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการคมนาคมขนส่งและการพัฒนาสองฝั่งของลำน้ำ และอาจกล่าวได้ว่า ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีสะพานมากประเทศหนึ่ง

โครงสร้างตอม่อสะพาน เป็นโครงสร้างที่สร้างขวางการไหลของน้ำ (obstruction to the flow) จึงเกิดปัญหาการขัดขวางการไหล และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของลำน้ำในธรรมชาติ ปัญหาหลักสำคัญที่เกิดขึ้น คือ ปัญหาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน (scour around the pier) ซึ่งตอม่อสะพานส่วนใหญ่ถ่ายน้ำหนักลงเสาเข็ม และเสาเข็มรับน้ำหนักโดยใช้แรงเสียดทานของชั้นดิน ถ้าบริเวณรอบตอม่อสะพานเกิดการกัดเซาะมาก จะทำให้แรงเสียดทานของเสาเข็มลดลง ส่งผลให้สะพานวิบัติในที่สุด มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการวิบัติของสะพาน ทั้งในประเทศและต่างประเทศมากมาย ซึ่งต่างชี้ให้เห็นว่าการวิบัติของสะพานส่วนใหญ่ มาจากสาเหตุจากการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน เช่น ตามรายงานการศึกษาของ Murillo (1987) ระบุว่าจากการศึกษาการพังทลายของสะพานในสหรัฐอเมริกา โดย D.W. Smith ระบุว่าในช่วงปี ค.ศ.1961-1976 มีการวิบัติของสะพานถึง 86 สะพาน และในจำนวนสะพานที่วิบัติดังกล่าว มีจำนวนสะพานถึง 48 สะพาน ที่วิบัติเนื่องจากการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน นอกจากนี้จากรายงานของ Murillo (1987) ยังระบุว่าในปี ค.ศ.1985 ปีเดียว มีสะพานวิบัติในรัฐเพนซิลเวเนีย, รัฐเวอร์จิเนีย และรัฐเวอร์จิเนีย ตะวันตก 3 รัฐ มีจำนวนถึง 73 สะพาน และในปี 1987 มีการวิบัติของสะพานในรัฐนิวยอร์กและรัฐนิวอิงแลนด์ ถึง 17 สะพาน และการวิบัติของสะพานเหล่านั้นเกิดจากการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในหน้าน้ำหลากทั้งนั้น และที่สำคัญของเหตุการณ์ดังกล่าว คือการวิบัติของสะพาน Scholarie Creek Bridge ในรัฐนิวยอร์ก ในปี ค.ศ. 1987 ทำให้มีผู้เสียชีวิตถึง 10 คน จนเป็นเหตุให้ Federal Highway Administration (FHWA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการสั่งการให้หน่วยงานทางหลวงของทุกรัฐ ทำการตรวจสอบประเมินสะพานที่มีอยู่ และสะพานที่จะก่อสร้างขึ้นใหม่ ว่ามี

ความอ่อนไหวต่อการกัดเซาะมากน้อยแค่ไหน อันนำไปสู่การศึกษาต่าง ๆ มากมาย เพื่อหาแนวทางในการประมาณค่าการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เหมาะสม

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาของ สมรักษ์ ต๋องวงศ์ไพชยนต์ (1984) พบว่า สาเหตุหลักที่ทำให้สะพานเกิดการวิบัติในกรณีศึกษาที่นำมาใช้วิเคราะห์ทั้งหมด คือ การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน อันเนื่องมาจากการศึกษาออกแบบด้านชลศาสตร์และอุทกวิทยาไม่เพียงพอ และเมื่อสะพานเกิดการวิบัติ จะทำให้เส้นทางคมนาคมถูกตัดขาด การขนถ่านหินค้ำ อาหาร เครื่องนุ่งห่ม ยารักษาโรค เกิดความล่าช้า ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม

การศึกษาและวิจัยเพื่อออกแบบตอม่อสะพาน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของการกัดเซาะนั้นมีมาตั้งแต่ปี 1929 โดยในเบื้องต้นได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ กับพื้นที่รูปตัดขวางของแม่น้ำบริเวณสะพาน (Lacey, 1929) ต่อมาเป็นการศึกษาความลึกหลุมกัดเซาะสัมพันธ์กับตัวแปรการไหลที่ซับซ้อนขึ้น เช่น ความลึกการไหล, ขนาดและลักษณะของตอม่อ (pier conditon), ค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (Froude number), ความเร็วการไหล (flow velocity), ค่าเรย์โนลด์สของตอม่อ (pier Reynolds Number) และขนาดวัสดุท้องน้ำ เพื่อใช้ในการพิจารณาออกแบบตอม่อสะพานให้มีความถูกต้อง มีเสถียรภาพ ความแข็งแรง และมั่นคงมากขึ้น หลังจากนั้นจึงได้มีการพิจารณาถึงลักษณะเฉพาะของตอม่อ เช่น มุมการไหลปะทะตอม่อ (angle of attack), ลักษณะการเรียงตัวของตอม่อ, ตอม่อกลุ่มแบบต่าง ๆ และกรณีมีสวะ (debris) มาติดอยู่บนส่วนบนของตอม่อ เป็นต้น

วัสดุที่ใช้ทำตอม่อสะพานส่วนใหญ่ คือ คอนกรีต เหล็ก และไม้ ซึ่งถูกใช้เพื่อรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน และวัสดุดังกล่าวจะต้องวางอยู่ในลำน้ำที่มีการไหลทั้งช้าและเร็วตลอดเวลา เมื่อเวลาผ่านไปนานเข้า ผิวของวัสดุที่ใช้เป็นตอม่อสะพานจะถูกน้ำที่ไหลผ่านกัดเซาะ จนทำให้ลักษณะผิวของตอม่อสะพานเปลี่ยนไป โดยมีความขรุขระของผิวดอม่อ (surface roughness) มากขึ้นหรือน้อยลง และการที่ลักษณะผิวของตอม่อเปลี่ยนไปนี้ จะส่งผลทำให้พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตอม่อเปลี่ยนไป และส่งผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะได้ จึงเป็นที่น่าสนใจว่า เมื่อลักษณะผิวของตอม่อเปลี่ยนไปจากการกัดเซาะของน้ำเนื่องจากเวลานั้น จะส่งผลต่อความลึกของหลุมกัดเซาะอย่างไร เช่น ถ้าลักษณะผิวดอม่อมีความขรุขระมากขึ้น แล้วส่งผลให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้น ดังนั้น ในการออกแบบตอม่อสะพานจึงควรพิจารณาเผื่อในส่วนของความยาวของตอม่อ เพราะความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้นจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของตอม่อลดลง เป็นสาเหตุให้



เกิดการวิบัติของตอม่อสะพานในที่สุด และอาจทำให้ตอม่อมีลักษณะผิวที่เรียบขึ้น เพื่อลดขนาดความลึกของหลุมกัดเซาะ ทำให้สามารถประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างสะพานได้

การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพาน ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในข้อกำหนดเบื้องต้น สำหรับการพิจารณาออกแบบ ตอม่อสะพาน เพื่อให้มีความแข็งแรงในส่วนของการก่อสร้าง และงบประมาณการก่อสร้าง

สำหรับในส่วนของคุณสมบัติที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ เพื่อหาข้อสรุปความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระของผิวตอม่อกับความลึกหลุมกัดเซาะนั้น ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองบนแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตอม่อสะพานนั้น มีความสลับซับซ้อน ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ และการหาคำตอบของปัญหาดังกล่าวทั้งในอดีตและปัจจุบัน นิยมใช้แบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งนับว่าได้ผลดีและเป็นที่ยอมรับทั่วไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวตอม่อ ต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ของการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด ซึ่งมีท้องน้ำเป็นวัสดุจำพวกทราย
- 2) เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) กับตัวแปรการไหลอันประกอบด้วยความลึกการไหล ( $y$ ), ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ), เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลและของตอม่อ ( $R_o$  และ  $R_p$ ) ตัวแปรลักษณะของตอม่อและตัวแปรลักษณะของวัสดุท้องน้ำ อันประกอบด้วยขนาดตอม่อ ( $D$ ) และขนาดวัสดุท้องน้ำ ( $d_{50}$ ) โดยมุ่งเน้นในส่วนของคุณสมบัติความขรุขระของผิวตอม่อ (equivalent sand roughness,  $k_s$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไป
- 3) เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการนำอิทธิพลของลักษณะผิวตอม่อต่อการกัดเซาะรอบตอม่อ มาใช้พิจารณาเพิ่มเติมในการกำหนดเกณฑ์การออกแบบทางชลศาสตร์ของการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น
- 4) เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ในการใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาทางชลศาสตร์การไหล และการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับการวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระของผิวของตอม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะนั้น จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางกายภาพ เนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ จึงทำการศึกษาและทดลองในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) ซึ่งมีขนาดดังนี้ ยาว 18 เมตร กว้าง 0.60 เมตร และลึก 0.75 เมตร ตั้งอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีข้อจำกัดทางด้านเวลาและแหล่งทุนเป็นสำคัญ ดังนั้น จึงกำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

1) ทำการศึกษาลักษณะของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน (ตอม่อเดี่ยว) ในภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water) สภาพการไหลคงที่ (steady flow) และเป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow) ความลึกวัสดุท้องน้ำประมาณ 25 ซม. จากท้องรางน้ำ

2) การศึกษานี้ใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.40 ซม., 4.80 ซม. และ 6.00 ซม. (PVC) ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวของตอม่อโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280, เบอร์ 80 เป็นผิว และใช้ทรายขนาด  $d_{50} = 1.20$  มม. ดาดรอบ

3) การศึกษานี้ใช้ทรายขนาดสม่ำเสมอจากลำน้ำธรรมชาติ 3 ขนาด ได้แก่ ทรายหยาบ (coarse sand) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.20 มม. ( $d_{50} = 2.20$  มม.) ทรายขนาดปานกลาง (medium sand) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.20 มม. ( $d_{50} = 1.20$  มม.) และ ทรายละเอียด (fine sand) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.36 มม. ( $d_{50} = 0.36$  มม.) เป็นวัสดุท้องน้ำ

4) อัตราการไหลสำหรับแต่ละลักษณะของตอม่อ จำนวน 5 อัตราการไหล และความลึกการไหลสำหรับแต่ละอัตราการไหลขึ้นกับขนาดวัสดุท้องน้ำและความชันของเส้นพลังงาน เพื่อให้การไหลอยู่ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

#### 1.4 แนวทางการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อให้ครอบคลุม ขอบข่ายและวัตถุประสงค์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ศึกษาหลักการ ทฤษฎี สมมุติฐานต่าง ๆ และการศึกษาที่ผ่านมา ที่เกี่ยวข้องกับ ชลศาสตร์การไหลและกลศาสตร์การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาและวิจัย

2) ศึกษาการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ ในการทดลองแบบจำลองทางการภาพ เริ่มจากระบบหมุนเวียนน้ำ ของรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) ซึ่งมีตะแกรงกันคลื่น (wave suppressors) เพื่อลดความแรงของน้ำทางด้านต้นน้ำ ประตูระบาย (tail gate) เพื่อควบคุมระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำ และฝายสามเหลี่ยมสันคม ( $90^{\circ}$  v-notch wier) เพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำ และศึกษาการใช้เครื่องมือวัดระดับการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ (sandy surface meter) ซึ่งควบคุมโดยกล่องเก็บข้อมูล (data logger)

3) สร้างและพัฒนาแบบจำลองทางการภาพตอม่อสะพาน โดยให้มีลักษณะความขรุขระของผิวแตกต่างกัน โดยใช้กระดาษทรายขนาดต่าง ๆ จำนวน 3 ขนาด และใช้ ทรายดาสรอบผิวตอม่ออีก 1 ลักษณะผิว รวมถึงลักษณะผิวเดิมของท่อพลาสติก (PVC) อีก 1 ลักษณะผิว

4) ทำการหาค่าเบื้องต้นต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ลักษณะผิวแบบต่าง ๆ กัน จึงต้องทำการสอบเทียบค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness,  $k_s$ ) ของลักษณะผิวนั้น ๆ และทำการหาค่าความสัมพันธ์ของความลึกการไหลและความลาดชันท้องน้ำ เพื่อให้การไหลเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

5) ทำการทดลองและเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยเริ่มทำการทดลองจากขนาดวัสดุท้องน้ำเป็นทรายปานกลาง, ทรายหยาบ และทรายละเอียดตามลำดับ และใช้ลักษณะผิวตอม่อ 5 ลักษณะผิว ขนาดตอม่อ 3 ขนาด อัตราการไหล 5 อัตราการไหล

6) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้สำหรับผิวตอม่อแบบผิวเรียบของการศึกษานี้ กับการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตของท่านอื่น และวิเคราะห์อิทธิพลของความขรุขระของผิวตอม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะเป็นประเด็นหลัก

7) จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมทางชลศาสตร์ ของขบวนการและกลไกของการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน และได้มาถึงความสัมพันธ์ของคุณลักษณะการกัดเซาะ คุณลักษณะของตอม่อสะพาน (piers characteristic), คุณลักษณะของของไหล (fluid characteristic), คุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (sediment characteristic) และคุณลักษณะของการไหลของน้ำ (flow characteristic)
- 2) เพื่อทราบถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของความขรุขระของผิวตอม่อ ต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะ
- 3) เพื่อเป็นส่วนเพิ่มเติมหรือแนวทางในการพิจารณาออกแบบตอม่อสะพาน เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงผิวของตอม่อที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต และเป็นแนวทางในการพิจารณาปรับปรุงสะพานที่มีอยู่ในปัจจุบัน ให้มีความมั่นคงและปลอดภัย จากการกัดเซาะที่เปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนแปลงของผิวตอม่อ
- 4) เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถใช้แบบจำลองทางกายภาพแก้ไขปัญหาทางชลศาสตร์ และสามารถทำการวิเคราะห์และสรุปผล ปัญหาทางชลศาสตร์การไหลที่ตั้งขึ้นอย่างเป็นระบบได้
- 5) เป็นแนวทางและแบบแผนในการปฏิบัติงานวิจัยและการดำเนินการวิจัย สำหรับผู้ทำการวิจัยตลอดจนผู้ที่สนใจ

## บทที่ 2

### หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

#### 2.1 การกัดเซาะเฉพาะแห่ง

การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (local scour) คือ การลดระดับของท้องน้ำบริเวณใกล้ส่วนของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการถูกกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลโดยส่วนของโครงสร้าง สามารถแบ่งประเภทของการกัดเซาะเฉพาะแห่ง โดยอาศัยปริมาณการเคลื่อนที่เข้า และออกจากหลุมกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำได้

กระบวนการกัดเซาะสามารถอธิบายตามหลักการคงมวลของสสาร (conservation of mass) ได้ตามความสัมพันธ์

$$Q_s = Q_{out} - Q_{in} \quad (2.1)$$

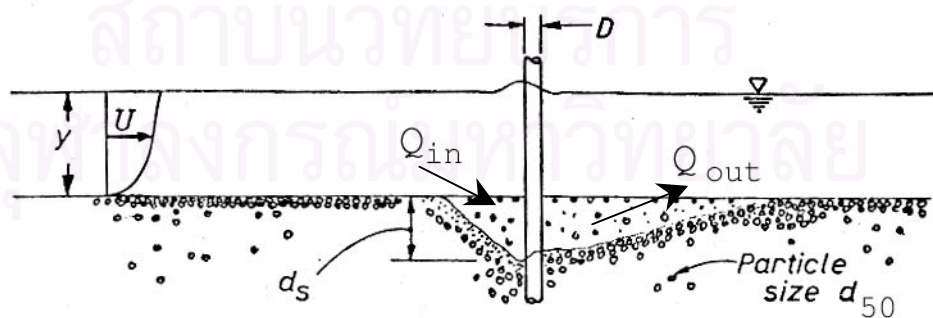
โดยที่

$Q_s$  คือ อัตราการพัดพาของตะกอนของหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

$Q_{out}$  คือ อัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

$Q_{in}$  คือ อัตราการพัดพาตะกอนลงในหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

รูป 2-1 แสดงการพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ ความเร็วการไหลปะทะตอม่อ ( $U$ ), ความลึกการไหล ( $y$ ), ขนาดตอม่อ ( $D$ ) และความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ )



รูป 2-1 การพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ

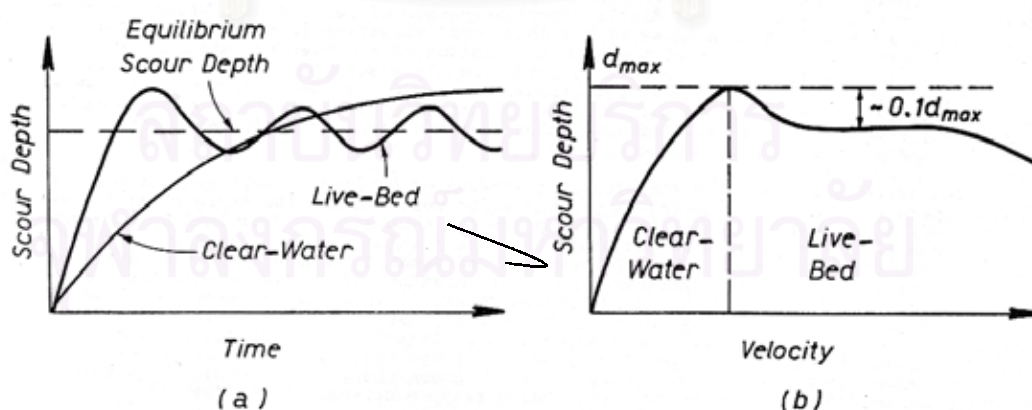
โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

ดังนั้น สามารถแบ่งประเภทของการกัดเซาะเฉพาะแห่งได้ดังนี้

1) การกัดเซาะเนื่องจากสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water scour,  $Q_{out} > 0$  และ  $Q_{in} = 0$ ) ซึ่งจะเกิดเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำของส่วนของโครงสร้าง เนื่องจากความเร็วเฉือน (shear velocity,  $U$ ) ของการไหล มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ความเร็วเฉือนวิกฤต (critical shear velocity,  $U_{*c}$ ) ของวัสดุที่เป็นตะกอนท้องน้ำ ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ การกัดเซาะในกรณีนี้จะทำให้เกิดความลึกการกัดเซาะสูงสุด เมื่อความเร็วเฉือนของการไหลไม่สามารถทำให้ตะกอนท้องน้ำเกิดการเคลื่อนที่ออกจากหลุมกัดเซาะได้

2) การกัดเซาะเนื่องจากสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour,  $Q_{out} > 0$  และ  $Q_{in} > 0$ ) เป็นการเกิดการกัดเซาะโดยมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะ ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (equilibrium scour depth) จะเกิดเมื่อปล่อยให้เกิดการกัดเซาะ จนกระทั่งอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะเท่ากับอัตราการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ (Raudkivi และ Sutherland, 1981)

ในการอธิบายความลึกของหลุมกัดเซาะ (scour depth) สัมพันธ์กับเวลา (time) และความเร็วการไหล (velocity) จะแยกพิจารณาตามประเภทของการกัดเซาะ เนื่องจากความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นตามแต่ละประเภทของการกัดเซาะมีความแตกต่างกัน รูป 2-2 แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว



รูป 2-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสำหรับขนาดตอม่อและขนาดวัสดุท้องน้ำคงที่  
(a) เป็นความสัมพันธ์กับเวลา และ (b) เป็นความสัมพันธ์กับความเร็วการไหล

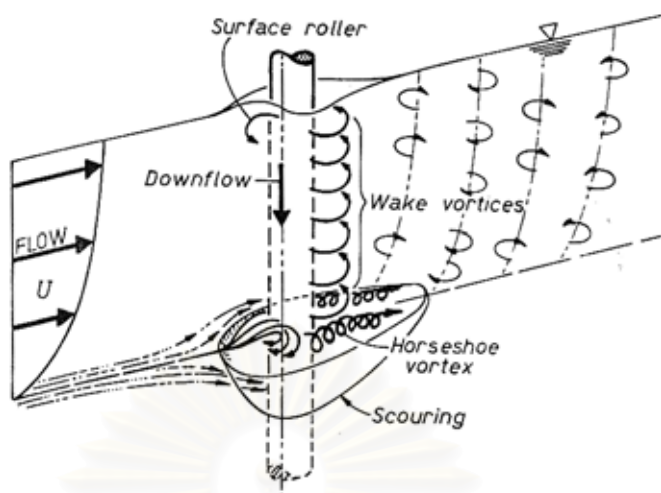
โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะกับเวลา ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water scour) ความลึกหลุมกัดเซาะจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วเฉือน (shear velocity) ของการไหลซึ่งทำให้ตะกอนท้องน้ำเกิดการเคลื่อนที่มีค่าน้อย และจะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด (maximum scour depth) เมื่อความเร็วเฉือนไม่สามารถทำให้ตะกอนท้องน้ำบริเวณหลุมกัดเซาะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ในส่วนของสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (lived-bed scour) ความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเร็วเฉือนของการไหลมีค่ามาก และในกรณีนี้จะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะด้วย ดังนั้นความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไป โดยจะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (equilibrium scour depth) เมื่ออัตราการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะเท่ากับอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ

เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะกับความเร็วการไหล ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น และความลึกหลุมกัดเซาะจะมากที่สุด เมื่อความเร็วการไหลเท่ากับความเร็วเฉือนวิกฤต (critical shear velocity) ในส่วนของสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกหลุมกัดเซาะจะน้อยลงเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะ (Raudkivi และ Sutherland, 1981)

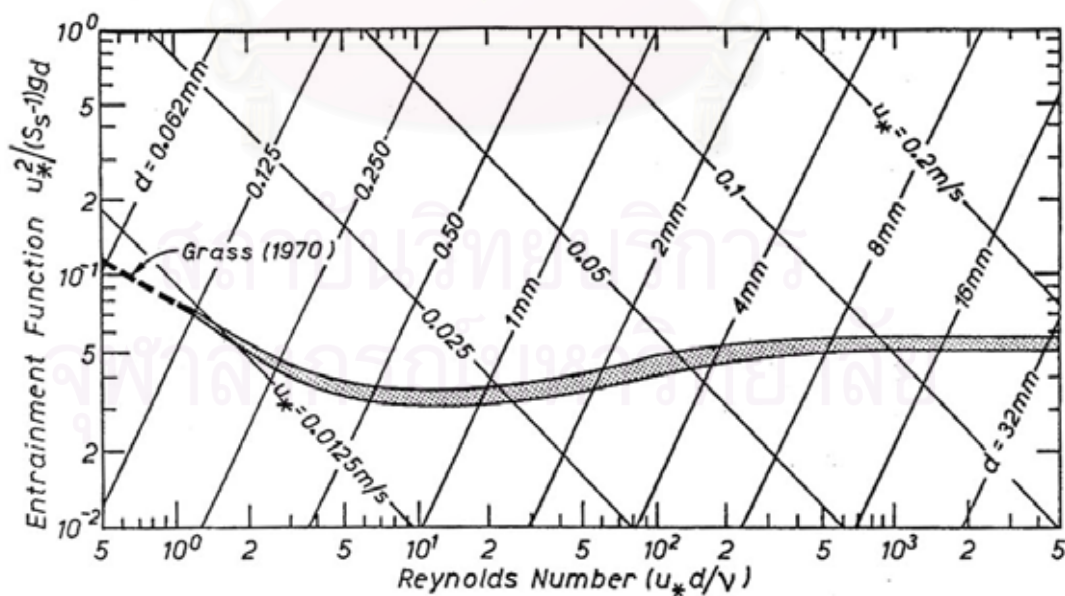
## 2.2 กลศาสตร์การกัดเซาะ

การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเป็นผลมาจากการไหลแบบหมุนวน (vortex system) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลเกิดการหมุนวนรอบผิวตอม่อ (surface roller) การไหลหมุนวนจะช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะ (scouring) ที่สันตอม่อด้านเหนือน้ำ เนื่องจากทิศทางการไหลจะพุ่งลงด้านล่าง (down flow) เมื่อกระทบกับผิวตอม่อ และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดทิศทางการไหลวนกลับในแนวราบที่ท้องน้ำ วัสดุท้องน้ำจะเคลื่อนที่โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะและหมุนวนรอบด้านข้างตอม่อในแนวราบ โดยการไหลหมุนวนจะเป็นรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) ดังแสดงในรูป 2-3



รูป 2-3 แผนภาพแสดงการไหลผ่านตอม่อสะพานและการเกิดการไหลหมุนวน โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

ความลึกการกัดเซาะสูงสุดของตอม่อสะพาน จะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water scour) และสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour) เมื่อความเร็วเฉือน (shear velocity) ของการไหลบริเวณใกล้หลุมกัดเซาะ เท่ากับความเร็ววิกฤต (critical shear velocity) สำหรับการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ



รูป 2-4 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Reynolds Number ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)



รูป 2-4 แสดงความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของความเร็วจืด (Shear Reynolds Number) ซึ่งได้ทำการศึกษาโดย Shields (1936) จากรูปแบ่งการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่อยู่เหนือเส้นที่บเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ ส่วนที่อยู่ใต้เส้นที่บเป็นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ และบริเวณเส้นที่บคือส่วนที่วัสดุท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ (threshold of movement) โดยที่

$$\text{Entrainment Function} = \frac{U_*^2}{(S_s - 1)gd} \quad (2.2)$$

$$\text{Shear Reynolds Number} = \frac{U_*d}{\nu} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $S_s$  คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ,  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $d$  คือ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ,  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) ของของไหล และ  $U_*$  คือ ความเร็วจืดของการไหล ซึ่งเท่ากับ  $\sqrt{gSy}$  เมื่อ  $S$  คือ ความชันของเส้นพลังงาน และ  $y$  คือ ความลึกการไหล

### 2.3 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

ในการศึกษาเรื่องการกัดเซาะเฉพาะแห่ง ถูกจำกัดด้วยสมมุติฐานที่ว่า การไหลของน้ำเป็นการไหลแบบคงที่ (steady flow) ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะมีดังนี้

- 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของของไหล (fluid characteristic)
  - ความหนาแน่นของของไหล (density of fluid,  $\rho$ )
  - ความหนืดจลน์ของของไหล (kinematic viscosity of fluid,  $\nu$ )
  - ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity,  $g$ )
- 2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (sediment characteristic)
  - ขนาดวัสดุท้องน้ำ (sediment size,  $d_{50}$ )
  - ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of the sediment,  $\rho_s$ )
  - การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size distribution)
  - ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (grain form)
  - แรงดึงดูดระหว่างวัสดุท้องน้ำ (cohesion of material)

- 3) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการไหลของน้ำ (flow characteristic)
  - ความลึกการไหล (depth of approach flow,  $y$ )
  - ความเร็วการไหล (mean velocity of undisturbed flow,  $U$ )
  - ค่าความขรุขระของวัสดุท้องน้ำ (roughness of the approach flow,  $k_s$ )
- 4) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของตอม่อสะพาน (pier characteristic)
  - รูปร่างของตอม่อ (pier shape)
  - เส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ (pier diameter,  $D$ )
  - ลักษณะความขรุขระที่ผิวของตอม่อ (pier surface condition,  $k_s$ )
  - มุมปะทะกับทิศทางการไหล (pier angle of attack,  $\alpha$ )

เพื่อเป็นการง่ายในการทำกรวิเคราะห์ตัวแปรจำนวนมากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงได้ตั้งสมมุติฐาน และข้อจำกัดดังนี้

1) วัสดุท้องน้ำ

วัสดุท้องน้ำเป็นทราย (non-cohesive) และสมมุติให้มีขนาดเฉลี่ยสม่ำเสมอ  $d_{50}$

2) การไหล

รางน้ำที่ทำการทดลองมีขนาดกว้าง และขนาดของตอม่อไม่ทำให้เกิดผลกระทบเนื่องจากการบีบตัวของการไหล และท้องน้ำเรียบโดยปราศจาก dunes และ ripples ดังนั้นค่าความขรุขระของท้องน้ำ (channel bottom roughness) จึงขึ้นกับขนาดของวัสดุท้องน้ำเพียงอย่างเดียว

ดังนั้น จะเหลือตัวแปรที่นำมาใช้ในการ พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังนี้

- ของไหล :  $\rho, \nu, g$
- วัสดุท้องน้ำ :  $d_{50}, \rho_s$
- การไหล :  $y, U$
- ตอม่อสะพาน :  $D, k_s$

และจะได้ว่า ความลึกการกัดเซาะสูงสุด ( $d_s$ ) ขึ้นกับตัวแปรดังต่อไปนี้

$$d_s = f(\rho, \nu, g, d_{50}, \rho_s, y, U, D, k_s) \quad (2.4)$$

การกั้ดเซาะรอบตอม่อสะพานเกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐาน 3 หน่วย คือ มวล (mass) ความยาว (length) และ เวลา (time) ดังนั้นตัวแปรอิสระ 9 ตัว สามารถลดรูปเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ได้ 3 กลุ่ม ตามทฤษฎีวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) โดยใช้ตัวแปร  $\rho$ ,  $g$  และ  $y$  เป็นตัวแปรซ้ำ จะสามารถเขียนฟังก์ชันอธิบายความสัมพันธ์ความลึกการกั้ดเซาะในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ได้ดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = \Phi \left[ \frac{Uy}{v}, \frac{y}{d_{50}}, \frac{U^2}{gD}, \frac{y}{D}, \frac{k_s}{y}, \frac{k_s}{D} \right] \quad (2.5)$$

ซึ่งกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ใช้เป็นแนวทางในการอธิบาย ความสัมพันธ์ของรูปแบบหลุมกั้ดเซาะ พฤติกรรมการไหลของน้ำ และลักษณะของตะกอนท้องน้ำในการศึกษา

## 2.4 การศึกษาที่ผ่านมา

การศึกษาและวิจัยปัญหาการกั้ดเซาะรอบตอม่อสะพานที่ผ่านมา เพื่อคาดคะเนความลึกหลุมกั้ดเซาะนั้น ได้มีการพิจารณาเป็นความสัมพันธ์ของหลาย ๆ ตัวแปร เช่น ขนาดและลักษณะต่าง ๆ ของตอม่อ, ความลึกการไหล, มุมการไหลปะทะตอม่อ, ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล, เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหล, ตอม่อกลุ่มลักษณะต่าง ๆ ฯลฯ สำหรับสภาวะการกั้ดเซาะนั้น ก็ได้พิจารณาในสองลักษณะด้วยกัน คือสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับขอบเขตและวัตถุประสงค์ของแต่ละการศึกษา โดยการศึกษาต่าง ๆ ที่ผ่านมา กล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้

การศึกษาแรกที่มีการอ้างอิงถึง คือการศึกษาของ Durang-Clay (1873, อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความลึกหลุมกั้ดเซาะ ระหว่างตอม่อรูปทรงกระบอก, ตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน และตอม่อรูปทรงสามเหลี่ยมปลายมน จากการศึกษาพบว่า ตอม่อรูปทรงกลมให้ความลึกหลุมกั้ดเซาะสูงสุด และตอม่อรูปทรงสามเหลี่ยมปลายมนให้ความลึกหลุมกั้ดเซาะน้อยสุด

Lacey (1929 อ้างถึงใน Chen, 1980) ได้ศึกษาถึงความลึกหลุมกั้ดเซาะสูงสุด ที่บริเวณสะพานและบริเวณพื้นที่อื่นที่คอดลง (contraction area) เป็นความสัมพันธ์ของพื้นที่รูปตัดขวางของแม่น้ำบริเวณสะพาน และรัศมีชลศาสตร์ของรูปตัดขวางบริเวณสะพาน

Chitale (1941 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976) ศึกษาถึงอิทธิพลของการกัดเซาะทางด้านเหนือน้ำและขนาดของทรายต่อการกัดเซาะตอม่อ โดยใช้แบบจำลองตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาว 0.925 ฟุต กว้าง 0.6 ฟุต และรูปทรงครึ่งวงกลม ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16, 0.24, 0.32, 0.68 และ 0.51 มม. ใช้อัตราการไหลคงที่ 1 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาทีต่อฟุต และความลึกของน้ำ 0.5 - 1.45 ฟุต ทดลองในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การไหลตามแนวแกน (axial flow) ความลึกการกัดเซาะสูงสุดเกิดขึ้นที่สันตอม่อ การกัดเซาะที่ด้านข้างตอม่อจะน้อยกว่าที่สันตอม่อประมาณ 5 - 15 %
2. อัตราส่วนระหว่างความลึกกัดเซาะสูงสุดกับความลึกการไหลในรางน้ำ แสดงด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายของความเร็วใกล้หลุมกัดเซาะของรางน้ำ
3. ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุที่ได้ เป็นความสัมพันธ์ของความลึกการไหล ( $y$ ) และ ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) ดังสมการ 2.6

$$\frac{d_{se}}{y} = -0.51 + 6.65Fr - 5.49Fr^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $d_{se}$  คือ ความลึกกัดเซาะสมดุภายใต้ท้องน้ำปกติ ;  $y$  คือ ความลึกของน้ำใกล้หลุมกัดเซาะ ;  $Fr$  คือ ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล

Inglis (1948, อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) ทำการศึกษาความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ที่มีมุมปะทะการไหล  $0^\circ$  วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาด 0.3 มม. และ 0.13 มม. และเสนอสมการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะดังนี้

$$\frac{y + d_s}{b} = 1.70 \left( \frac{q^{2/3}}{b} \right)^{0.78} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $y$  คือ ความลึกการไหลในหน่วยฟุต,  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะในหน่วยฟุต,  $b$  คือ ความกว้างตอม่อในหน่วยฟุต และ  $q$  คือ อัตราการไหลในหน่วยลูกบาศก์ฟุตต่อวินาทีต่อฟุต

Inglis (1949 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976) ได้พัฒนาสูตร Inglis-Poona ดังนี้

$$\frac{d_s}{y} = 4.19Fr^{0.52} \left( \frac{L}{y} \right)^{0.22} - 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $d_s$  คือ ความลึกกัดเซาะสูงสุด ;  $y$  คือ ความลึกการไหล ;  $L$  คือ Projected length ;  $Fr$  คือ ค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลใกล้หลุมกัดเซาะ

Laursen (1954 อ้างถึงใน Raudkivi, 1976) ได้ศึกษาผลกระทบของทางน้ำและลักษณะของวัสดุท้องน้ำต่อการกัดเซาะ Laursen พบว่า หลังจากเวลาผ่านไปจนกระทั่งการกัดเซาะเข้าสู่สมดุลได้วัดค่าความลึกการกัดเซาะ ความลึกการกัดเซาะสมดุลไม่ขึ้นกับความเร็วกการไหลหรือขนาดวัสดุท้องน้ำ แต่ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของตอม่อและความลึกการไหล

Laursen และ Toch (1954 อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) ได้แนะนำเกณฑ์การออกแบบสำหรับการกัดเซาะสูงสุดของทางน้ำ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = 1.35 \left( \frac{y}{D} \right)^{0.3} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $d_s$  คือ ความลึกกัดเซาะสูงสุด ;  $y$  คือ ความลึกการไหล ;  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ

Chabert และ Engeldinger (1956, อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) ทำการศึกษาพฤติกรรมของการกัดเซาะรอบตอม่อต่อตัวแปรการไหลต่าง ๆ คือ ความเร็วกการไหล, ขนาดตอม่อ (2.5 - 3.0 ซม.), ขนาดวัสดุท้องน้ำ (0.26, 0.52, 1.5 และ 3.0 มม.) และลักษณะต่าง ๆ ของตอม่อ จากการศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วกการไหล แสดงให้เห็นว่าเกิดพฤติกรรมการกัดเซาะเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ความเร็วเฉือนของการไหลน้อยกว่าความเร็วเฉือนวิกฤต และช่วงที่ความเร็วเฉือนของการไหลมากกว่าความเร็วเฉือนวิกฤต และความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดจะเกิดเมื่อความเร็วเฉือนของการไหลเท่ากับความเร็วเฉือนวิกฤต

สำหรับอิทธิพลของลักษณะตอม่อและมุมการไหลปะทะตอม่อ พบว่าที่มุมการไหลปะทะตอม่อ  $0^\circ$  ความลึกการกัดเซาะจะเกิดน้อยสุด และความลึกหลุมกัดเซาะจะมากขึ้นเมื่อมุมการไหลปะทะตอม่อเพิ่มขึ้น

Breuser (1965 อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) เสนอสมการการกัดเซาะดังนี้

$$d_s = 1.4D \quad (2.10)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อในหน่วยเซนติเมตร ซึ่งสมการดังกล่าวคล้ายคลึงกับสมการของ Larras (1963 อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบจำลองทางกายภาพ ของ Charbert และ Engeldinger (1956) โดยมุ่งเน้นในส่วนของความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เมื่อความเร็วเฉือนของการไหลเข้าใกล้ความเร็ว

เงื่อนไขวิกฤต และแสดงความสัมพันธ์ในรูปของความลึกหลุมกัดเซาะกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ โดยละอิทธิพลของความลึกการไหลและขนาดวัสดุท้องน้ำ ดังสมการ 2.11

$$d_s = 1.05KD^{0.75} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดตอม่อในหน่วยเมตร,  $K$  คือ ตัวคูณเนื่องจากลักษณะของตอม่อ และ  $K = 1$  สำหรับตอม่อรูปวงกลม,  $K = 1.4$  สำหรับตอม่อรูปทรงเหลี่ยมและมุมการไหลปะทะตอม่อเท่ากับ  $0^\circ$

Shen et al. (1966, อ้างถึงใน Breusers et al., 1977) ศึกษาถึงพฤติกรรมการกัดเซาะโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของตอม่อรูปทรงกระบอก ขนาดตอม่อ 0.15 – 0.9 เมตร วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 0.24 – 0.46 มม. โดยความลึกหลุมกัดเซาะเป็นความสัมพันธ์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ( $R_p = UD/v$ ) ดังนี้

$$d_s = 0.022R_p^{0.619} \quad (2.12)$$

โดยที่  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะในหน่วยเซนติเมตร,  $R_p$  คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ

ซึ่งความสัมพันธ์นี้ใช้เป็นขอบเขตบนเพื่อหาความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด และไม่สามารถใช้สมการนี้กับสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำได้ เนื่องจากความลึกหลุมกัดเซาะจะไม่สัมพันธ์กับความเร็วกการไหล ในช่วงที่ความเร็วเฉือนของการไหลมากกว่าความเร็วเฉือนวิกฤต ซึ่งเสนอโดย Charbert และ Engeldinger (1956)

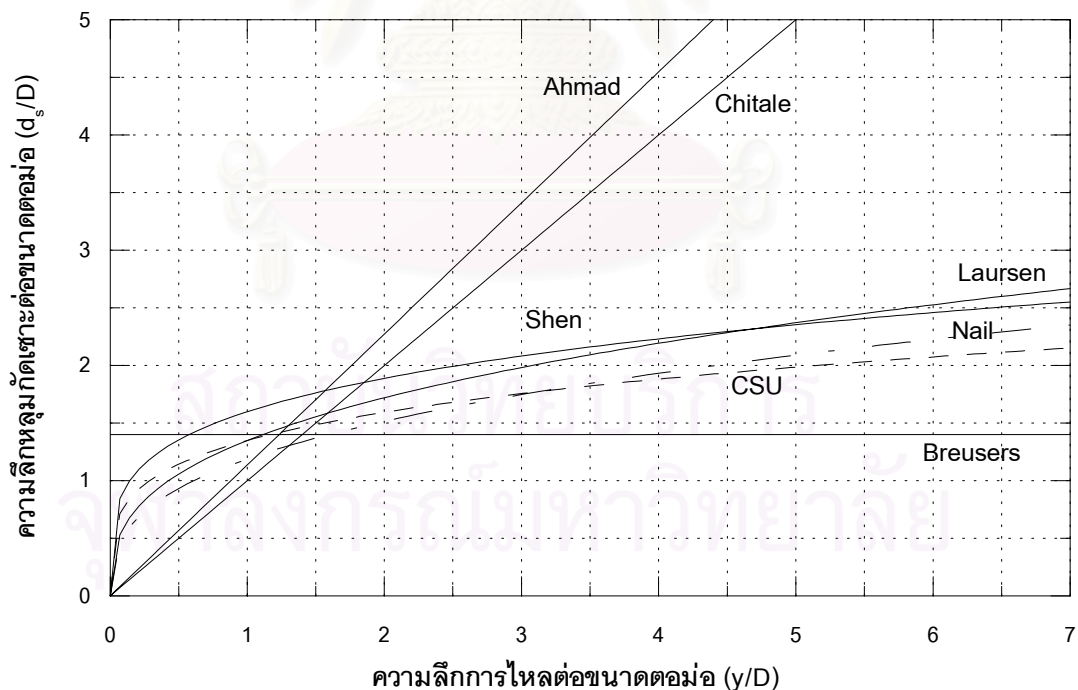
Chen, A-Han (1980) ได้ทำการทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานทรงกลม ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) โดยใช้ทราย 2 ขนาด ได้แก่  $d_{50} = 0.30$  และ 1.12 มม. และใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาด การทดลองเป็นสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดวัสดุท้องน้ำมีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งขัดแย้งกับผลการศึกษาของผู้ทำการศึกษายานที่ผ่านมา และได้ให้สมการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะในภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ โดยมีความสัมพันธ์ของขนาดวัสดุท้องน้ำ

Ruadkivi และ Ettema (1983) ศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอก โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ และวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาด 0.24 – 0.78 มม. ใช้ความลึกการไหล 600 มม. ขนาดตอม่อ 28.5, 50.8, 101.6, 150.0 และ 240.0 มม. ทดลองในสภาวะเงื่อนไขไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้อัตราส่วนของความเร็วเฉือนต่อความเร็วเฉือนวิกฤตเป็น 0.90

จากการศึกษาพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะขึ้นกับการกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ, ขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ, ขนาดตอม่อ และความลึกการไหล

**สมรักษ์ ต่อบงศ์ไพชยนต์ (1984)** ทำการศึกษาการกัดเซาะของน้ำต่อตอม่อสะพานและท่อลอด โดยเก็บข้อมูลการวิบัติของสะพานและท่อลอดที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ช่วงปี พ.ศ. 2520 – 2526 อันประกอบด้วยการวิบัติของสะพาน 4 แห่ง และการวิบัติของท่อลอด 57 แห่ง พบว่าการวิบัติของสะพานส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักจากการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน อันเนื่องมาจากการศึกษาออกแบบด้านชลศาสตร์และอุทกวิทยาไม่เพียงพอ ในกรณีของท่อลอด พบว่าเกิดการวิบัติจากการกัดเซาะด้านท้ายน้ำร้อยละ 60 และจากการกัดเซาะและการออกแบบอัตราการระบายน้ำต่ำกว่าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ร้อยละ 35

Jones (1983, อ้างถึงใน FHWA Technical Advisory) ได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ อัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) และ ความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) ของหลาย ๆ ท่านไว้ในรูปเดียวกัน ดังแสดงในรูป 2-5



รูป 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ  
กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ  
(Jones (1983) จาก FHWA, 1988)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ได้ จากการศึกษาของหลาย ๆ ท่าน โดย Jones (1983) นั้น เนื่องจากสมการเพื่อทำนายความลึกแต่ละสมการไม่เหมือนกัน บางสมการมีความเร็วการไหล ซึ่งอยู่ในรูปของฟรูดนัมเบอร์ ในขณะที่บางสมการไม่มีความเร็วการไหล ในการเปรียบเทียบจึงใช้ค่าฟรูดนัมเบอร์เท่ากับ 0.3 สำหรับสมการที่มีความเร็วการไหลเป็นตัวแปร อย่างไรก็ตาม Jones (1983) ไม่ได้แสดงรายละเอียดขอบเขตและที่มา ของการศึกษาและสมการของแต่ละท่านไว้

Richardson et al. (1987 อ้างถึงใน FHWA Technical Advisory) ได้เสนอสมการ The Colorado State University's equation เพื่อคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ ดังนี้

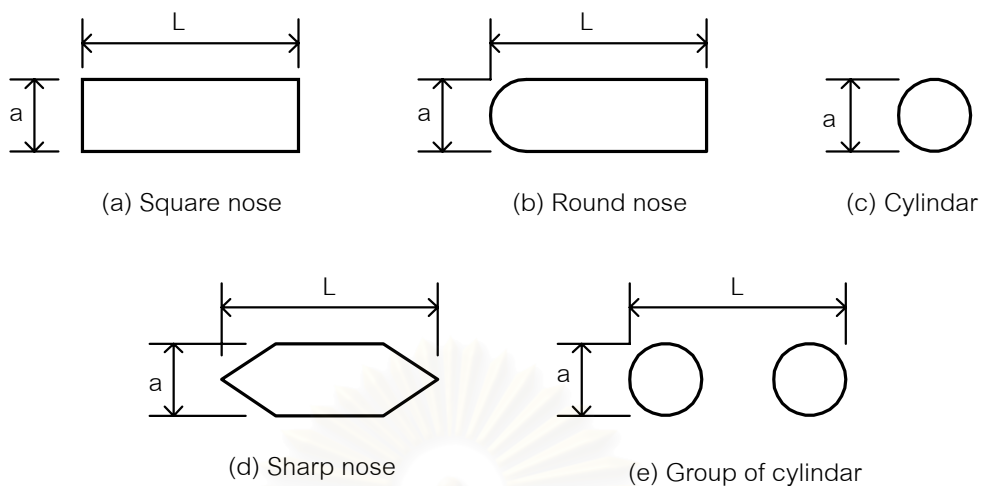
$$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2 \left( \frac{D}{y} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (2.13)$$

โดยที่  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะ ;  $y$  คือ ความลึกการไหล ;  $D$  คือ ขนาดตอม่อ ;  $Fr$  คือ ค่า ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ;  $K_1$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ ;  $K_2$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหล รายละเอียดดังตาราง 2-1 และรูป 2-6

ตาราง 2-1 ค่าปรับแก้  $K_1$  และ  $K_2$  ในสมการของ Richardson (1987)

Correction Factor, $K_1$ for Pier Type		Correction Factor, $K_2$ for angle of attack of flow			
Type of Pier	$K_1$	Angle	L/a = 4	L/a = 8	L/a = 12
(a) Square nose	1.1	0	1.0	1.0	1.0
(b) Round nose	1.0	15	1.5	2.0	2.5
(c) Circular cylinder	1.0	30	2.0	2.5	3.5
(d) Sharp nose	0.9	45	2.3	3.3	4.3
(e) Group of cylinders	1.0	90	2.5	3.9	5.0
		Angle = skew angle of flow			
		L = length of pier			





รูป 2-6 รูปแบบของตอม่อ ในสมการของ Richardson (1987)

Chang, Sin Zee (1987) ได้ทำการศึกษาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) โดยทำการศึกษาการกัดเซาะในสภาวะที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด ได้แก่ ทราย หยาบ  $d_{50} = 0.97$  มม. ทรายปานกลาง  $d_{50} = 0.43$  มม. และทรายละเอียด  $d_{50} = 0.19$  มม. และใช้ รูปทรงตอม่อ 2 แบบ ได้แก่ ตอม่อรูปทรงกระบอก และ ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน และยัง ศึกษาครอบคลุมถึงขนาดของหลุมกัดเซาะ อันเนื่องมาจากมุมในการปะทะของการวางตอม่อรูปสี่ เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนอีกด้วย

จากการศึกษาพบว่า พื้นที่หลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล, ลักษณะการไหล, ลักษณะตอม่อ และขนาดของวัสดุท้องน้ำ

Melville และ Dongol (1992) ได้ทำการศึกษาหาความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีที่มี สวะมาเกาะอยู่เหนือตอม่อสะพาน (derbis material) พบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะจะมากกว่าใน กรณีที่ไม่มีสวะมาเกาะเหนือตอม่อสะพาน ทั้งนี้เนื่องจากการที่มีสวะมาเกาะเหนือตอม่อ นั้น ทำให้ เสมือนเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อใหญ่ขึ้น และเรียกเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนนี้ว่า เส้นผ่านศูนย์กลาง ประสิทธิภาพ (effective diameter) โดยทำการทดลองบนรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 1.52 ม. สูง 1.22 ม. และยาว 45 ม. ใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $d_{50} = 1.65$  มม. ความลึกการ ไหลอยู่ระหว่าง 100 - 350 มม. และตอม่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 มม. โดยจัดวาง ลักษณะตอม่อซึ่งมีสวะเป็นรูปทรงกระบอก ดังรูป 2-7

จากการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{d_s}{D}$  และ  $\frac{y}{D}$  กับ  $\frac{d_s}{D_e}$  และ  $\frac{y}{D_e}$  ดังแสดง

ในรูป 2-8 และ 2-9 โดยแสดงเปรียบเทียบกับ Design Curve ของ Melville และ Sutherland (1988) จากกราฟจะเห็นว่า ความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีที่มีสวะอยู่เหนือตอม่อ จะมากกว่าความลึกหลุมกัดเซาะตอม่อปกติ

จากการทดลองสรุปได้ว่า สามารถหาความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากมีสวะมาเกาะเหนือตอม่อ ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล โดยพัฒนาสมการของ Melville และ Sutherland (1988) ดังนี้

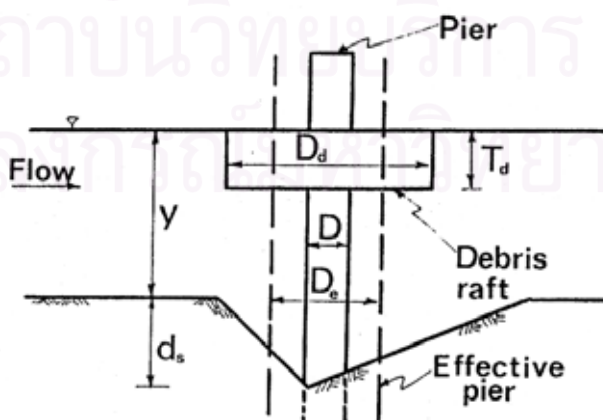
$$\frac{d_s}{D_e} = 1.875 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{0.225} \quad \left( \frac{y}{D_e} < 2.6 \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{d_s}{D_e} = 2.4 \quad \left( \frac{y}{D_e} \geq 2.6 \right) \quad (2.15)$$

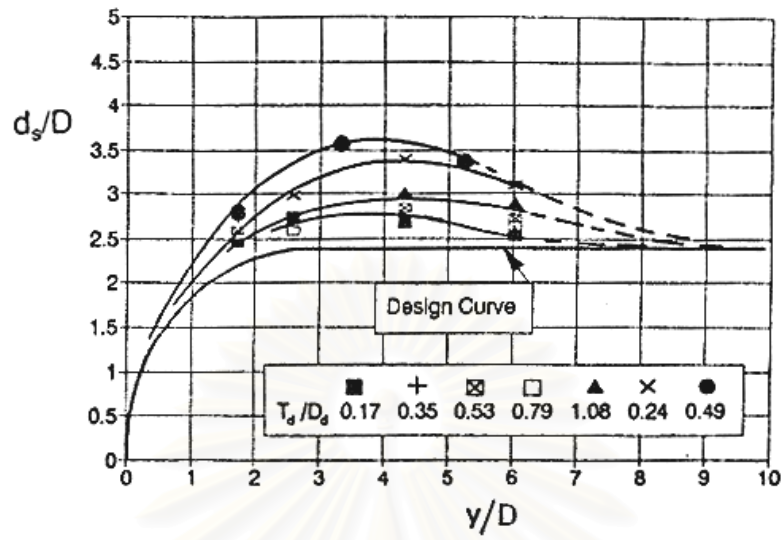
โดยที่  $D_e$  หาได้จากลักษณะรูปร่างของสวะที่มาเกาะเหนือตอม่อดังนี้

$$D_e = \frac{T_d^* D_d + (y - T_d^*) D}{y}, \quad T_d^* = 0.52 T_d \quad (2.16)$$

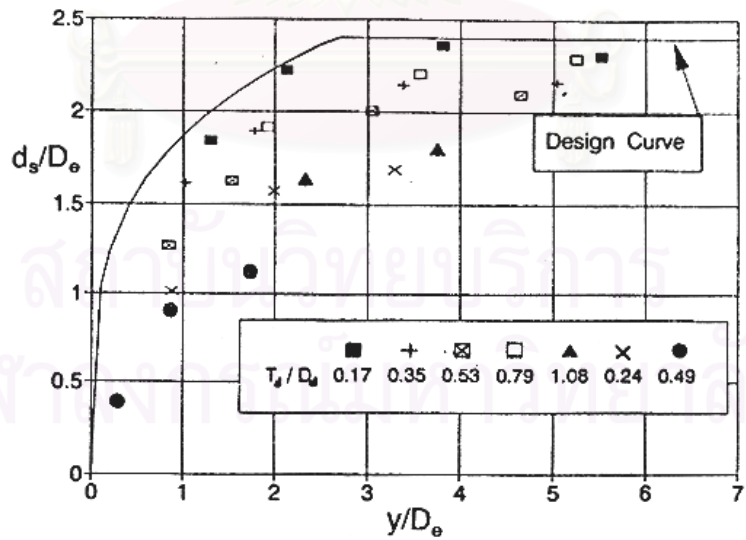
เมื่อ  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุ ;  $D_e$  คือ effective diameter ;  $y$  คือ ความลึกการไหล ;  $T_d$  คือ ความลึกของสวะ และ  $D_d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสวะ



รูป 2-7 ตอม่อในการทดลองของ Melville และ Dongol (1992)



รูป 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{d_s}{D}$  และ  $\frac{y}{D}$   
จากการทดลองของ Melville และ Dongol (1992)



รูป 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{d_s}{D_e}$  และ  $\frac{y}{D_e}$   
จากการทดลองของ Melville และ Dongol (1992)

**พรมงคล ชิดชอบ (2540)** ทำการศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) วัสดุท้องน้ำเป็นทรายธรรมชาติคละกัน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ สภาวะเงื่อนไขไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะเงื่อนไขมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้แบบจำลองตอม่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 ซม., 5.00 ซม. และ 7.50 ซม. ตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเป็น 2.0/7.5, 2.5/12.5 และ 5.0/15.0 และศึกษาลักษณะของหลุมกัดเซาะอันเนื่องมาจากมุมปะทะการไหล  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  และ  $60^\circ$  ของตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน

จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะ ได้แก่ รูปปร่าง, ขนาดตอม่อ, มุมการไหลปะทะตอม่อ และขนาดวัสดุท้องน้ำ

**ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล (2541)** ได้ทำการศึกษากัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นดับ ในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ทราย 3 ขนาด ได้แก่ ทรายละเอียด  $d_{50} = 0.36$  มม. ทรายปานกลาง  $d_{50} = 1.20$  มม. และทรายหยาบ  $d_{50} = 2.20$  มม. ทำการศึกษาทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้ตอม่อรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.8 ซม. วางเรียงกัน 3 ตอม่อ มีระยะห่างกันเป็นอัตราส่วน  $L/D = 1, 2, 3$  เมื่อ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ และ  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างตอม่อ อีกทั้งยังศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะการไหล จาก 0, 20, 40 องศา สำหรับทรายขนาด 1.20 มม.

โดยใช้อัตราการไหล 4 – 74 ลิตรต่อวินาที, ความลึกการไหล 3 – 30 เซนติเมตร และ ความลาดชันท้องน้ำ 0.0002 – 0.0036 เมตรต่อเมตร

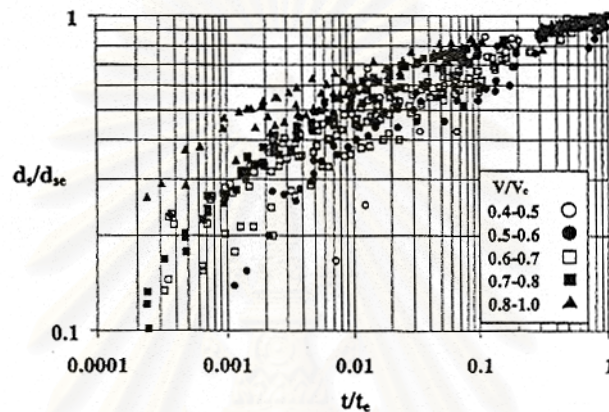
จากการศึกษาพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวแรกจะมากที่สุด และความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวที่ 2 และ 3 จะลดลงตามลำดับ และขนาดของวัสดุท้องน้ำมีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ วัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่จะให้ความลึกหลุมกัดเซาะน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดเล็ก สำหรับเงื่อนไขทางชลศาสตร์เดียวกัน

**Melville และ Chiew (1999)** ได้ทำการศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำให้หลุมกัดเซาะสมดุล โดยให้นิยามของเวลาที่ให้ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (equilibrium time,  $t_e$ ) ว่า เวลาที่ทำการทดลองจนอัตราการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะไม่เกิน 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อในเวลา 24 ชั่วโมง

$$\text{หรือสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ } \frac{d(d_{se})}{dt} \leq \frac{0.05D}{24h}$$

ในการศึกษานี้ ศึกษาเฉพาะการไหลในกรณีไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และตะกอนทรายมีขนาดสม่ำเสมอ จากการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ความลึกสมมูลของหลุมกัดเซาะเมื่อเทียบกับเวลาแสดงได้ดังรูป 2-10
2. ความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อทำการทดลองผ่าน 10% ของเวลาที่ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมมูลจะอยู่ระหว่าง 50% และ 80% ของความลึกหลุมกัดเซาะสมมูล โดยขึ้นกับความเร็วของการไหล



รูปที่ 2-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{d_s}{d_{se}}$  และ  $\frac{t}{t_e}$  ในการทดลองของ Melville และ Chiew (1999)

Francis et al. (2001) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพของการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ของวัสดุท้องน้ำที่เป็นดินเหนียว (clay, cohesive soils) โดยได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการกัดเซาะ ในกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นดินเหนียวที่ได้จากการทดลอง กับกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทราย (sand, noncohesive soils) จากการศึกษาพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำจำพวกดินเหนียว น้อยกว่าวัสดุท้องน้ำจำพวกทราย แต่เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะสมมูลจะเหมือนกันทั้งของดินเหนียวและทราย

โดยความลึกหลุมกัดเซาะของทรายที่ Francis et al. (2001) นำมาเปรียบเทียมนั้น คือสมการที่เสนอโดย Richardson และ Davis (1995) (อ้างถึงใน Francis et al., 2001) ซึ่งได้จากการปรับปรุงสมการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะของ Colorado State University equation (สมการ 2.13) ซึ่งเป็นสมการที่แนะนำให้ใช้สำหรับวัสดุท้องน้ำจำพวกทราย (noncohesive soils) ตามปรากฏการณ์ในรายงาน Hydraulic Engineering Circular No. 18 และเรียกสมการนี้ว่า HEC-18 equation ดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left( \frac{y}{D} \right)^{0.35} Fr^{0.43} \quad (2.17)$$

โดยที่  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะ,  $y$  คือ ความลึกการไหล,  $D$  คือ ขนาดตอม่อ,  $Fr$  คือ ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล,  $K_1$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ เท่ากับ 1.0 สำหรับตอม่อทรงกระบอก,  $K_2$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหล เท่ากับ 1.0 สำหรับมุมปะทะการไหล  $0^\circ$ ,  $K_3$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากสภาพท้องน้ำ (stream bed topography) และ  $K_4$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจาก armoring effect



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### อุปกรณ์ เครื่องมือ และการดำเนินการทดลอง

#### 3.1 การดำเนินการทดลอง

สำหรับการดำเนินการศึกษานี้ ทำการศึกษาและทดลองในรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว 18 ม. กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. ผนังด้านข้างทั้งสองทำด้วยกระจกใสหนา 1.20 ซม. พื้นรางน้ำทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 6 มม. ซึ่งตั้งอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลอง ชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ ควบคุมสภาพการไหลของน้ำด้วยประตูระบายทำynnน้ำ เพื่อให้เงื่อนไขการไหลเป็นไปตามที่ต้องการ และใช้ฝายสันคัมรูปสามเหลี่ยม  $90^\circ$  วัดอัตราการไหลของน้ำ สำหรับข้อมูลความลึกการไหลและระดับท้องน้ำ บันทึกด้วยเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (sandy surface meter)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด ยาว 18 ม. กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. ผนังด้านข้างทั้ง 2 ทำด้วยกระจกใสหนา 1.20 ซม. พื้นรางน้ำทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 6 มม. ความลาดเอียงของท้องรางน้ำ สามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงยก ซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.1 การจัดเตรียมแบบจำลองชลศาสตร์)

2) ประตูระบายน้ำที่ปลายสุดของรางน้ำ ทำหน้าที่ควบคุมความลึกการไหลของน้ำในรางน้ำ เพื่อกำหนดให้สภาพการไหลเป็นการไหลแบบต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow)

3) ตะแกรงและตะแกรงลดคลื่น ติดตั้งบริเวณปอด้านเหนือน้ำ เพื่อลดขนาดคลื่นและความปั่นป่วนหมุนวนของกระแส

4) ถาดติดล้อเลื่อน ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ (sandy surface meter)

5) ฝายสามเหลี่ยมสันคัม ( $90^\circ$  v-notch wier) ติดตั้งที่ด้านท้ายของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับเหนือสันฝาย (H) และนำไปคำนวณอัตราการไหลจาก

สมการ  $Q=0.016H^{2.46}$  โดยที่  $Q$  คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที  $H$  คือ ความสูงของน้ำเหนือฝายในหน่วยเซนติเมตร ซึ่งทำการสอบเทียบค่าโดย พรมงค สิดชอบ (2540)

6) เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (sandy surface meter) สามารถใช้วัดความลึกจากระดับอ้างอิงถึงระดับผิวน้ำ หรือระดับผิวน้ำถึงระดับท้องน้ำ และสามารถติดตั้งเครื่องมือวัดได้ถึง 6 ช่องสัญญาณ และแสดงผลทางจอ LCD ของแต่ละช่องสัญญาณ หรือพิมพ์ออกมาด้วยเครื่องพิมพ์ ที่ติดตั้งไว้ในเครื่อง และสามารถส่งข้อมูลสู่คอมพิวเตอร์รวมถึงการควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถตั้งเครื่องมือทำงานอัตโนมัติได้อีกด้วย ซึ่งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำนี้สามารถวัดความลึกได้สูงสุด 0.40 ม. ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.50$  มม.

รายละเอียดและรูปอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง แสดงในภาคผนวก ก.1 และ ก.2

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

#### 3.3.1 ขนาดตอม่อ

การทดลองนี้ใช้ท่อน้ำพลาสติก (PVC) 3 ขนาด ทำเป็นตอม่อทรงกระบอก โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.40 ซม., 4.80 ซม. และ 6.00 ซม. ทำการยึดฐานของตอม่อโดยใช้ที่ปิดฝาท่อสวมเข้ากับส่วนปลาย แล้วติดกาวยึดกับฐานไม้อัดขนาด 15×30 ตารางเซนติเมตร (ดู ภาคผนวก ก.3 แบบจำลองตอม่อสะพาน)

#### 3.3.2 ลักษณะผิวตอม่อ

ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวตอม่อ 5 ลักษณะผิว กับตอม่อทั้งสามขนาด ดังนี้

1. ผิวปกติของตอม่อ
2. ใช้กระดาษทรายก้นน้ำเบอร์ 400 หุ้มผิวโดยรอบ
3. ใช้กระดาษทรายก้นน้ำเบอร์ 280 หุ้มผิวโดยรอบ
4. ใช้กระดาษทรายก้นน้ำเบอร์ 80 หุ้มผิวโดยรอบ
5. ใช้ทรายขนาด  $d_{50} = 1.20$  มม. ครอบคลุมผิวตอม่อโดยใช้กาวยางเป็นตัวประสาน เพื่อจะบ่งบอกลักษณะผิวในเชิงชลศาสตร์ ได้นำกระดาษทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280 และเบอร์ 80 มาดาดผิวภายในท่อ แล้วนำไปทดลองหาค่าความขรุขระของผิวเชิงชลศาสตร์การ



ไหล ในรูปแบบของความขรุขระเทียบเท่าขนาดทราย (equivalent sand roughness height,  $k_s$ ) และได้ค่าความขรุขระที่เทียบเท่าขนาดทราย (equivalent sand roughness,  $k_s$ ) ของลักษณะผิวต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตาราง 3-1 ซึ่งรายละเอียดการสอบเทียบ แสดงไว้ในภาคผนวก ข.3

ตาราง 3-1 ค่า  $k_s$  ของผิวตอม่อลักษณะต่าง ๆ

ลักษณะผิว	$k_s$ (mm)
กระดาศทรายเบอร์ 400	0.0883
กระดาศทรายเบอร์ 280	0.1178
กระดาศทรายเบอร์ 80	0.4416
ทรายคาด	-

### 3.3.3 วัสดุท้องน้ำ

การทดลองนี้ใช้ทราย 3 ขนาดเป็นวัสดุท้องน้ำ โดยเป็นทรายที่ได้จากลำน้ำธรรมชาติ มีความถ่วงจำเพาะเป็น 2.65 และคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 3-2 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.4)

ตาราง 3-2 คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	$d_{50}$ (mm)	$\gamma_s$ ( $N/m^3$ )	$U_c$ (m/s)	$\phi$ (องศา)	n
ทรายละเอียด	0.36	$2.6 \times 10^4$	0.014	28	0.012
ทรายปานกลาง	1.20	$2.6 \times 10^4$	0.026	30	0.014
ทรายหยาบ	2.20	$2.6 \times 10^4$	0.037	35	0.016

โดยที่  $d_{50}$  = ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ

$\gamma_s$  = น้ำหนักจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ

$U_c$  = ความเร็วเฉือนวิกฤต

$\phi$  = angle of repose of sediment

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's roughness coefficient)

### 3.3.4 สภาพการไหลของน้ำ

เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของความขรุขระของผิวตอม่อ ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยที่แต่ละผิวตอม่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจำนวน 5 อัตราการไหล ทำการคำนวณค่าความลึกการไหล ( $y$ ) และความลาดชันของรางน้ำ ( $S$ ) โดยประมาณสำหรับแต่ละอัตราการไหล เพื่อให้การไหลเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ( $U < U_c$ ) โดยการแก้ระบบสมการดังนี้

$$1) \text{ สมการของแมนนิง } Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล,  $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิง,  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล,  $R$  คือ รัศมีชลศาสตร์ และ  $S$  คือ ความลาดชันท้องน้ำ

$$2) \text{ สมการความเร็วเฉือนวิกฤต } U_{c_c} = \sqrt{gSy}$$

เมื่อ  $U_{c_c}$  คือ ความเร็วเฉือนวิกฤต,  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $S$  คือ ความลาดชันท้องน้ำ,  $y$  คือ ความลึกการไหล

แสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข.1 และ ข.2

ดังนั้นจึงสามารถแบ่งการทดลองนี้เป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 : ให้ขนาดของตอม่อและลักษณะผิวของตอม่อคงที่ ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล (5 อัตราการไหล สำหรับทรายหยาบและทรายปานกลาง, 3 อัตราการไหลสำหรับทรายละเอียด)

ส่วนที่ 2 : ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวของตอม่อ (5 ลักษณะผิว) โดยให้อัตราการไหลคงที่

ส่วนที่ 3 : ทำการเปลี่ยนแปลงวัสดุท้องน้ำ (3 ขนาด) และดำเนินการซ้ำในส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2

ดังนั้นในการศึกษานี้ทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 65 การทดลอง แบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังแสดงไว้ใน ตาราง 3-3

ตาราง 3-3 รายละเอียดการทดลอง

กรณี	ขนาดทราย $d_{50}$ (mm)	ลักษณะ ผิวต่อม่อ	ขนาดต่อม่อ (cm)	อัตราการใช้				
				1	2	3	4	5
A	1.20	PVC	3.40	A1-1	A2-1	A3-1	A4-1	A5-1
			4.80	A1-2	A2-2	A3-2	A4-2	A5-2
			6.00	A1-3	A2-3	A3-3	A4-3	A5-3
B	1.20	#400	3.40	B1-1	B2-1	B3-1	B4-1	B5-1
			4.80	B1-2	B2-2	B3-2	B4-2	B5-2
			6.00	B1-3	B2-3	B3-3	B4-3	B5-3
C	1.20	#280	3.40	C1-1	C2-1	C3-1	C4-1	C5-1
			4.80	C1-2	C2-2	C3-2	C4-2	C5-2
			6.00	C1-3	C2-3	C3-3	C4-3	C5-3
D	1.20	#80	3.40	D1-1	D2-1	D3-1	D4-1	D5-1
			4.80	D1-2	D2-2	D3-2	D4-2	D5-2
			6.00	D1-3	D2-3	D3-3	D4-3	D5-3
E	1.20	ทราย	3.40	E1-1	E2-1	E3-1	E4-1	E5-1
			4.80	E1-2	E2-2	E3-2	E4-2	E5-2
			6.00	E1-3	E2-3	E3-3	E4-3	E5-3
F	2.20	PVC	3.40	F1-1	F2-1	F3-1	F4-1	F5-1
			4.80	F1-2	F2-2	F3-2	F4-2	F5-2
			6.00	F1-3	F2-3	F3-3	F4-3	F5-3
G	2.20	#400	3.40	G1-1	G2-1	G3-1	G4-1	G5-1
			4.80	G1-2	G2-2	G3-2	G4-2	G5-2
			6.00	G1-3	G2-3	G3-3	G4-3	G5-3
H	2.20	#280	3.40	H1-1	H2-1	H3-1	H4-1	H5-1
			4.80	H1-2	H2-2	H3-2	H4-2	H5-2
			6.00	H1-3	H2-3	H3-3	H4-3	H5-3
I	2.20	#80	3.40	I1-1	I2-1	I3-1	I4-1	I5-1
			4.80	I1-2	I2-2	I3-2	I4-2	I5-2
			6.00	I1-3	I2-3	I3-3	I4-3	I5-3
J	2.20	ทราย	3.40	J1-1	J2-1	J3-1	J4-1	J5-1
			4.80	J1-2	J2-2	J3-2	J4-2	J5-2
			6.00	J1-3	J2-3	J3-3	J4-3	J5-3

ตาราง 3-3 รายละเอียดการทดลอง (ต่อ)

กรณี	ขนาดทราย $d_{50}$ (mm)	ลักษณะ ผิวต่อม่อ	ขนาดต่อม่อ (cm)	อัตราการใช้				
				1	2	3	4	5
K	0.36	PVC	3.40	K1-1	K2-1	K3-1	-	-
			4.80	K1-2	K2-2	K3-2		
			6.00	K1-3	K2-3	K3-2		
L	0.36	#400	3.40	L1-1	L2-2	L3-1	-	-
			4.80	L1-2	L2-2	L3-2		
			6.00	L1-3	L2-3	L3-3		
M	0.36	#280	3.40	M1-1	M2-1	M3-1	-	-
			4.80	M1-2	M2-2	M3-2		
			6.00	M1-3	M2-3	M3-3		
N	0.36	#80	3.40	N1-1	N2-1	N3-1	-	-
			4.80	N1-2	N2-2	N3-2		
			6.00	N1-3	N2-3	N3-3		
O	0.36	ทราย	3.40	O1-1	O2-1	O3-1	-	-
			4.80	O1-2	O2-2	O3-2		
			6.00	O1-3	O2-3	O3-3		

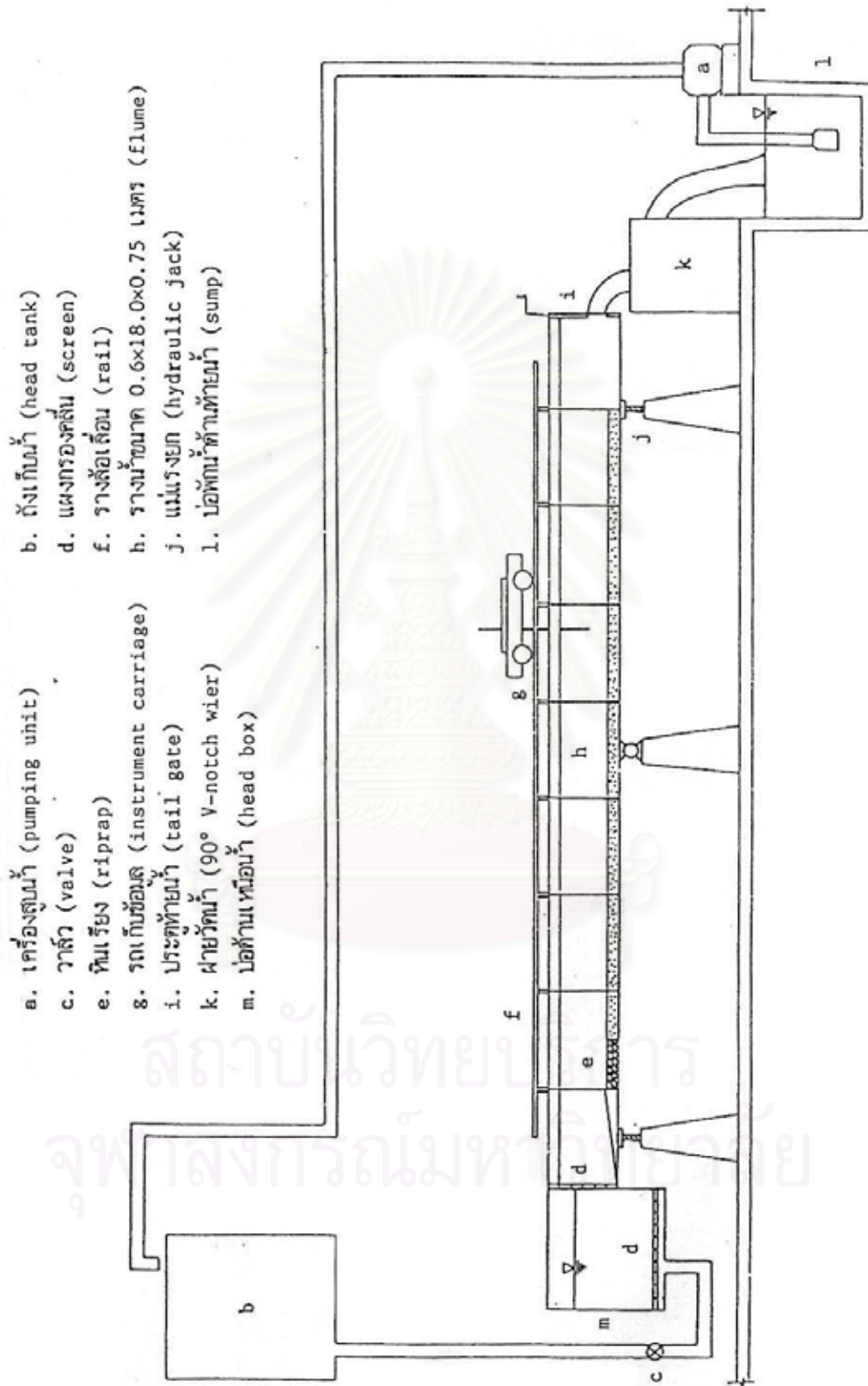
### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมการก่อนทดลอง

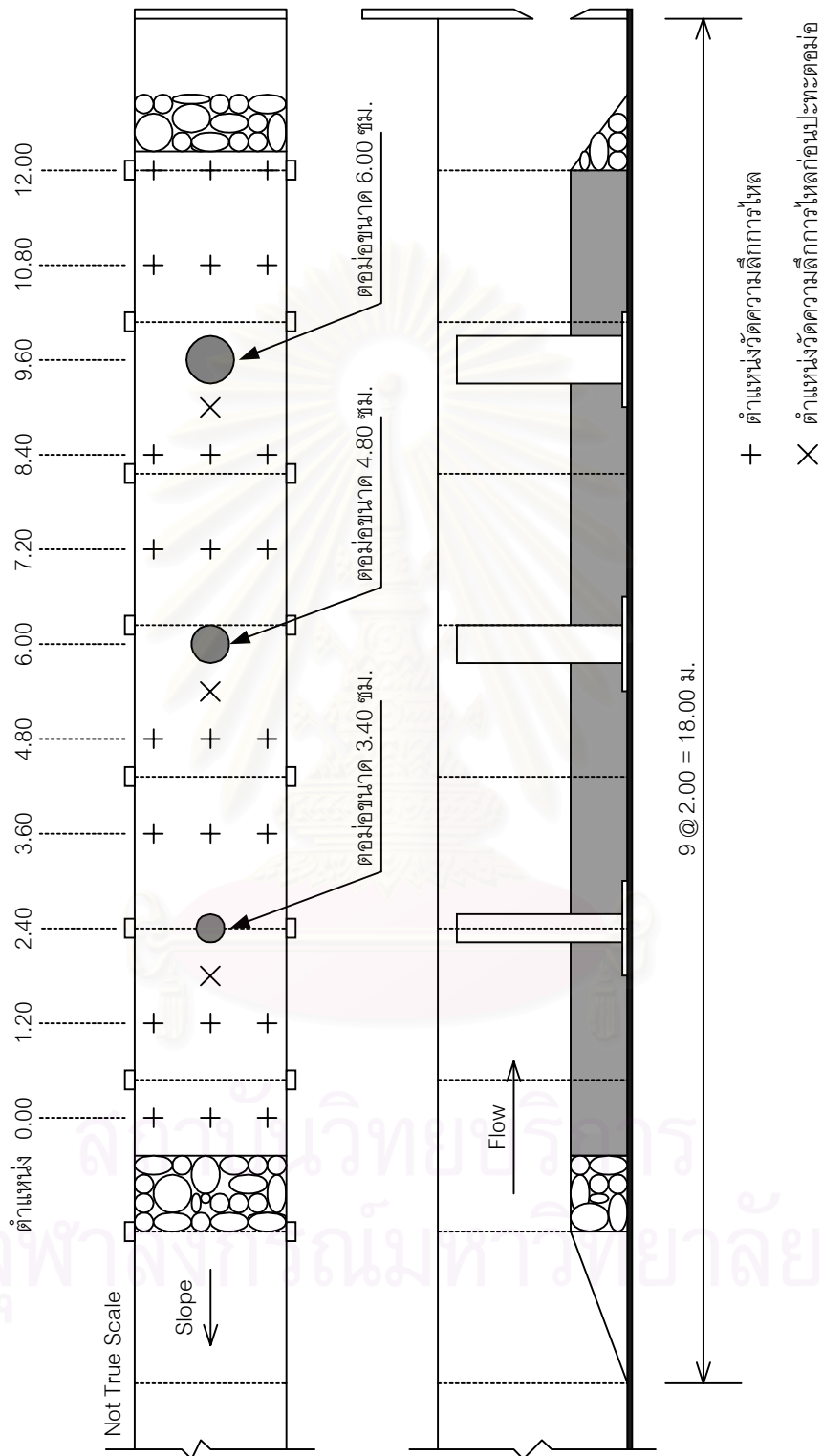
- 1) ใส่ทรายขนาดที่จะทำการทดลองลงในรางน้ำ โดยให้มีความสูงจากพื้นรางน้ำ 25 เซนติเมตร กวาดทรายให้เรียบ
- 2) วางตอม่อลักษณะผิวที่จะทำการทดลองลงในรางน้ำ ในการทดลองหนึ่ง ๆ จะทำการวางตอม่อ 3 ขนาด ที่ตั้งรางน้ำเป็นตอม่อขนาด 3.40 ซม. ที่ระยะ 2.40 ม. กลางรางน้ำเป็นตอม่อขนาด 4.80 ซม. ที่ระยะ 6.00 ม. และส่วนปลายรางน้ำเป็นตอม่อขนาด 6.00 ซม. ที่ระยะ 9.60 ม. แสดงไว้ดังรูป 3-2
- 3) จัดวางเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ (sandy surface meter) เข้ากับภาคติดต่อเลื่อน และต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล (data logger)
- 4) ปรับความชันท้องน้ำ ให้สอดคล้องกับความลึกการไหล และอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้ทำการคำนวณไว้แล้ว แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข. การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.4.2 การทดลอง

- 1) เปิดวาล์วปล่อยน้ำเข้ารางน้ำอย่างช้า ๆ เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ โดยไม่ให้เกิดผลกระทบต่อตะกอนท้องน้ำ ควบคุมการไหลโดยใช้ประตูระบายท้ายน้ำ และรักษาสภาพการไหลให้ใกล้เคียงการไหลสม่ำเสมอ (uniform flow)
- 2) บันทึกความสูงของน้ำเหนือฝายวัดน้ำ วัดอุณหภูมิน้ำ
- 3) ปล่อยให้เกิดการกัดเซาะรอบตอม่อเป็นเวลาประมาณ 120 – 180 นาที หรือจนกระทั่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความลึกหลุมกัดเซาะ เพื่อให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด
- 4) ทำการวัดความลึกการไหล ระดับผิวน้ำ และระดับท้องน้ำ ทุก ๆ ระยะ 1.20 เมตร โดยระยะหนึ่ง ๆ ที่ทำการวัดความลึกการไหล จะทำการวัด 3 ครั้ง รูป 3-2 แสดงตำแหน่งที่วัดความลึกการไหล
- 5) ปิดประตูระบายท้ายน้ำอย่างช้า ๆ , ปิดปั๊ม และ ปิดวาล์วน้ำเข้า เพื่อกักน้ำไว้ในรางน้ำ เมื่อน้ำนิ่งทำการวัดระดับน้ำทุก ๆ 1.20 เมตร
- 6) ปล่อยน้ำออกอย่างช้า ๆ เพื่อมิให้เกิดผลกระทบต่อหลุมกัดเซาะ
- 7) วัดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด
- 8) ทำการทดลองตามขั้นตอนทั้งหมดอีกครั้ง สำหรับอัตราการไหล, ลักษณะผิวตอม่อ และขนาดทรายต่าง ๆ จนครบตามที่กำหนด



รูป 3-1 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ และระบบหมุนเวียนน้ำของรางน้ำ



รูป 3-2 แสดงตำแหน่งการวางท่อ และตำแหน่งวัดความลึกการไหล

ตาราง 3-4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

Run No. : C3-3	Date : 26 ม.ค. 2544																																													
Piers surface : กระดาษทรายเบอร์ 280	Time : 12.00 น.																																													
Water Depth & Scours Depth																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Pier No 1</th> <th colspan="2">Pier No 2</th> <th colspan="2">Pier No 3</th> </tr> <tr> <th>y (mm)</th> <th>ds(cm)</th> <th>y (mm)</th> <th>ds(cm)</th> <th>y (mm)</th> <th>ds(cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>118.0</td> <td>5.6</td> <td>121.5</td> <td>6.5</td> <td>121.5</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>118.5</td> <td>5.6</td> <td>121.5</td> <td>6.5</td> <td>116.0</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>119.0</td> <td>5.5</td> <td>123.0</td> <td>6.4</td> <td>124.0</td> <td>6.5</td> </tr> </tbody> </table>						Pier No 1		Pier No 2		Pier No 3		y (mm)	ds(cm)	y (mm)	ds(cm)	y (mm)	ds(cm)	118.0	5.6	121.5	6.5	121.5	6.3	118.5	5.6	121.5	6.5	116.0	6.4	119.0	5.5	123.0	6.4	124.0	6.5	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H =</td> <td>18.6</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Q =</td> <td>21.2</td> <td>Lites/sec</td> </tr> </tbody> </table>		Flow Rate			H =	18.6	cm	Q =	21.2	Lites/sec
Pier No 1		Pier No 2		Pier No 3																																										
y (mm)	ds(cm)	y (mm)	ds(cm)	y (mm)	ds(cm)																																									
118.0	5.6	121.5	6.5	121.5	6.3																																									
118.5	5.6	121.5	6.5	116.0	6.4																																									
119.0	5.5	123.0	6.4	124.0	6.5																																									
Flow Rate																																														
H =	18.6	cm																																												
Q =	21.2	Lites/sec																																												
<p>Equi. Time = 180 นาที</p> <p>Water Temp. = 30 °C</p>																																														
Bed Slope & Water Surface Slope																																														
Station	Flows						Static																																							
	O - S			W - S			W - S																																							
0	188.0	189.0	188.0	118.5	121.5	121.5	88.5	89.0	89.0																																					
120	190.0	187.5	186.0	120.0	121.0	117.5	82.0	80.5	82.5																																					
240	ตำแหน่งตอม่อ A (D = 3.40 cm.)																																													
360	201.5	195.5	190.5	120.5	121.0	112.0	88.0	86.5	86.0																																					
480	201.0	201.0	199.5	123.0	118.5	120.5	93.0	92.5	91.5																																					
600	ตำแหน่งตอม่อ B (D = 4.80 cm.)																																													
720	192.0	192.5	196.0	117.0	128.0	130.0	95.5	96.5	95.0																																					
840	193.0	189.0	192.0	127.0	125.0	128.5	93.5	94.5	92.5																																					
960	ตำแหน่งตอม่อ C (D = 6.00 cm.)																																													
1080	196.0	194.0	188.0	122.5	134.0	128.0	110.0	110.0	112.5																																					
1200	197.5	192.0	190.0	134.5	123.5	133.0	94.0	93.5	91.5																																					
หมายเหตุ	Station คือ ตำแหน่งที่วัดระดับผิวน้ำ ระดับท้องน้ำและความลึกน้ำ																																													
	O - S คือ ระดับอ้างอิงถึงระดับท้องน้ำ (มม.)																																													
	W - S คือ ระดับผิวน้ำถึงระดับท้องน้ำ (มม.)																																													



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การทดลองนี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพของรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของความขรุขระของผิวตอม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยทำการทดลองทั้งสิ้น 65 การทดลอง ขณะทำการทดลองได้ทำการวัดอัตราการไหล (discharge,  $Q$ ), ความลึกการไหล (depth of flow,  $y$ ) เพื่อหาความลาดชันท้องน้ำ (bed slope,  $S$ ) และความเร็วการไหล (flow velocity,  $U$ ) ทำการวัดอุณหภูมิน้ำเพื่อให้ทราบค่าความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity,  $\nu$ ) วัดเวลาที่ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด และทำการวัดความลึกหลุมกัดเซาะ (scour depth,  $d_s$ ) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 อัตราการไหล (discharge, $Q$ )

วัดอัตราการไหลโดยใช้ฝายสามเหลี่ยมสันคม ( $90^\circ$  v-notch wier) ซึ่งทำการสอบเทียบโดย พรมงค ชิดชอบ (2540) ได้สมการเพื่อหาอัตราการไหลดังนี้  $Q=0.016H^{2.46}$  โดยที่  $Q$  คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที,  $H$  คือ ความสูงของน้ำเหนือฝายในหน่วยเซนติเมตร ในแต่ละลักษณะผิวตอม่อ ใช้อัตราการไหลจำนวน 5 อัตราการไหล ในการทดลองนี้มีอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 3.1 – 48.4 ลิตรต่อวินาที ซึ่งจำกัดของอัตราการไหลขึ้นกับขนาดความสูงของรางน้ำเนื่อง จากต้องปรับสภาพการไหลเป็นสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำ

#### 4.2 ความลึกการไหล (depth of flow, $y$ )

ทำการวัดความลึกการไหลทุก ๆ 1.20 ม. และแต่ละการไหลทำการวัดความลึกการไหล 3 จุด เพื่อใช้ในการหาความชันท้องน้ำ และวัดความลึกการไหลที่ระยะก่อนถึงตอม่อ 0.60 ม. เพื่อเป็นความลึกการไหลของน้ำก่อนปะทะตอม่อ โดยความลึกการไหลที่ใช้ในการทดลองนี้ จะต้องสัมพันธ์กับความชันท้องน้ำ และอัตราการไหล เพื่อให้สภาพการไหลเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ผลการทดลองที่ได้มีความลึกการไหลอยู่ระหว่าง 1.73 – 22.58 เซนติเมตร และความชันท้องน้ำอยู่ระหว่าง 0.0008 – 0.0014 เมตร/เมตร

#### 4.3 ความเร็วการไหล (flow velocity, U)

ความเร็วการไหลหาได้จากอัตราการไหล ซึ่งทำการวัดโดยฝายสามเหลี่ยมสันคม ( $90^{\circ}$  v-notch wier) ในการทดลองเดียวกัน ความเร็วการไหลของน้ำที่ปะทะตอม่อจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจาก ความลึกการไหลของน้ำก่อนถึงตอม่อแต่ละตัวไม่เท่ากันนั่นเอง จากการทดลองที่ได้ มีความเร็วการไหลอยู่ระหว่าง 14.8 – 47.7 เซนติเมตรต่อวินาที

#### 4.4 อุณหภูมิของน้ำ

ระหว่างทำการทดลองทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท เพื่อนำอุณหภูมิของน้ำไปใช้ในการหาความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity,  $\nu$ ) โดยในการทดลองนี้มีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยประมาณ  $30^{\circ}$  C และมีค่าความหนืดจลน์ (kinematics viscosity,  $\nu$ ) เท่ากับ  $8 \times 10^{-7}$  เมตร<sup>2</sup>/วินาที

#### 4.5 เวลาที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองนี้พิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ช่วงต้นของการกัดเซาะพบว่าความลึกของหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็ว (ประมาณ 60 นาทีแรก) หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะจะลดลง ปล่อยให้เกิดการกัดเซาะอีกประมาณ 120 นาที หรือจนกว่าจะไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ รวมเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งสิ้นประมาณ 180 นาที

#### 4.6 ความลึกหลุมกัดเซาะ (scour depth, $d_s$ )

ทำการวัดความลึกหลุมกัดเซาะโดยใช้ไม้เสกलयาว 1.00 ม. วัดจากท้องน้ำตรงส่วนหน้าของตอม่อถึงระดับอ้างอิง ทำการวัดสองครั้ง คือ วัดก่อนปล่อยน้ำเข้ารางน้ำ และหลังจากปล่อยน้ำออกจากรางน้ำเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง ความลึกหลุมกัดเซาะได้จากผลต่างของการวัดทั้งสองครั้ง ในการทดลองนี้มีความลึกหลุมกัดเซาะอยู่ระหว่าง 2.0 – 9.5 เซนติเมตร

#### 4.7 ฟรูดน์ัมเบอร์ของการไหล (Froude Number, Fr)

ฟรูดน์ัมเบอร์เป็นค่าที่บอกถึงสภาวะการไหลของน้ำ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง (gravity force) ในทางน้ำเปิดแบ่งเป็นสภาวะต่าง ๆ ดังนี้

1. การไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow,  $Fr < 1$ )
2. การไหลวิกฤต (critical flow,  $Fr = 1$ )
3. การไหลเหนือวิกฤต (supercritical flow,  $Fr > 1$ )

โดยที่

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gy}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $U$  คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที),  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81$  เมตร/วินาที<sup>2</sup>) และ  $y$  คือ ความลึกการไหล (เมตร)

การทดลองนี้ทดลองในสภาวะการไหลต่ำกว่าวิกฤต ฟรูดน์ัมเบอร์อยู่ระหว่าง  $0.15 - 0.84$

#### 4.8 เรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Reynolds Number, $R_e$ )

เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของการไหล คืออัตราส่วนของแรงเฉื่อย (inertia force) ต่อแรงหนืด (viscous force) ของการไหล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลของความหนืดของของไหลต่อการไหล แบ่งสภาวะการไหลเป็นดังนี้

1. laminar flow,  $R_e \leq 500$
2. transition flow,  $500 \leq R_e \leq 12,500$
3. turbulent flow,  $12,500 \leq R_e$

โดยที่

$$R_e = \frac{Uy}{\nu} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $U$  คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที),  $y$  คือ ความลึกการไหล (เมตร) และ  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ของน้ำ (เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

ในการทดลองนี้การไหลเป็นแบบ turbulent flow โดยมีเรย์โนลด์์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง  $6,445 - 100,859$

#### 4.9 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของตอม่อ (pier Reynolds Number, $R_p$ )

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของตอม่อ เป็นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ใช้ขนาดตอม่อแทนความลึกการไหล โดยที่

$$R_p = \frac{UD}{\nu} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $U$  คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที),  $D$  คือ ขนาดตอม่อ (เมตร) และ  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ของน้ำ (เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

ในการทดลองนี้เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของตอม่ออยู่ระหว่าง 6,369 – 33,832

ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังตาราง 4-1 – 4-15

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4-1 ผลการทดลอง case A

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 1.20$  มม., ลักษณะผิวแบบผิวเรียบ

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
A1-1	3.40	3.09	2.17	23.80	2.0	0.588	0.637	0.923	-	0.52	6445	10114
A1-2	4.80	3.09	1.73	29.75	4.2	0.875	0.361	2.423	-	0.72	6445	17849
A1-3	6.00	3.09	1.83	28.13	4.8	0.800	0.306	2.618	-	0.66	6445	21094
A2-1	3.40	6.51	3.88	27.93	4.5	1.324	1.142	1.159	-	0.45	13558	11871
A2-2	4.80	6.51	3.50	30.99	6.2	1.292	0.729	1.771	-	0.53	13558	18594
A2-3	6.00	6.51	3.58	30.27	6.6	1.100	0.597	1.842	-	0.51	13558	22702
A3-1	3.40	14.44	8.38	28.71	4.8	1.412	2.466	0.573	-	0.32	30083	12201
A3-2	4.80	14.44	7.82	30.79	6.4	1.333	1.628	0.819	-	0.35	30083	18473
A3-3	6.00	14.44	8.15	29.53	7.5	1.250	1.358	0.920	-	0.33	30083	22147
A4-1	3.40	21.52	12.20	29.40	6.2	1.824	3.588	0.508	-	0.27	44834	12495
A4-2	4.80	21.52	10.90	32.91	7.2	1.500	2.271	0.661	-	0.32	44834	19743
A4-3	6.00	21.52	10.08	35.57	8.8	1.467	1.681	0.873	-	0.36	44834	26678
A5-1	3.40	25.70	15.48	27.67	4.8	1.412	4.554	0.310	-	0.22	53548	11759
A5-2	4.80	25.70	15.40	27.82	6.0	1.250	3.208	0.390	-	0.23	53548	16690
A5-3	6.00	25.70	15.52	27.61	5.0	0.833	2.586	0.322	-	0.22	53548	20706

ตาราง 4-2 ผลการทดลอง case B

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 1.20$  มม., ลักษณะผิวหยาบทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
B1-1	3.40	3.76	2.20	28.48	3.5	1.029	0.647	1.591	0.0026	0.61	7831	12102
B1-2	4.80	3.76	2.45	25.57	5.8	1.208	0.510	2.367	0.0018	0.52	7831	15342
B1-3	6.00	3.76	2.28	27.44	6.2	1.033	0.381	2.715	0.0015	0.58	7831	20577
B2-1	3.40	8.80	5.48	26.74	4.5	1.324	1.613	0.821	0.0026	0.36	18331	11366
B2-2	4.80	8.80	5.27	27.84	6.4	1.333	1.097	1.215	0.0018	0.39	18331	16706
B2-3	6.00	8.80	4.83	30.34	6.8	1.133	0.806	1.407	0.0015	0.44	18331	22755
B3-1	3.40	17.77	9.32	31.79	5.2	1.529	2.740	0.558	0.0026	0.33	37023	13511
B3-2	4.80	17.77	9.58	30.91	6.5	1.354	1.997	0.678	0.0018	0.32	37023	18544
B3-3	6.00	17.77	6.80	43.56	6.8	1.133	1.133	1.000	0.0015	0.53	37023	32667
B4-1	3.40	25.08	12.78	32.70	5.8	1.706	3.760	0.454	0.0026	0.29	52247	13896
B4-2	4.80	25.08	12.93	32.32	6.9	1.438	2.694	0.534	0.0018	0.29	52247	19390
B4-3	6.00	25.08	13.23	31.58	8.0	1.333	2.206	0.605	0.0015	0.28	52247	23689
B5-1	3.40	35.43	17.45	33.84	5.5	1.618	5.132	0.315	0.0026	0.26	73803	14380
B5-2	4.80	35.43	17.62	33.52	6.9	1.438	3.670	0.392	0.0018	0.25	73803	20109
B5-3	6.00	35.43	18.22	32.41	7.8	1.300	3.036	0.428	0.0015	0.24	73803	24308

ตาราง 4-3 ผลการทดลอง case C

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 1.20$  มม., ลักษณะผิวกระดานทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
C1-1	3.40	5.58	2.78	33.39	4.6	1.353	0.819	1.653	0.0035	0.64	11617	14191
C1-2	4.80	5.58	3.17	29.35	6.1	1.271	0.660	1.926	0.0025	0.53	11617	17609
C1-3	6.00	5.58	2.92	31.86	7.0	1.167	0.486	2.400	0.0020	0.60	11617	23898
C2-1	3.40	8.80	4.42	33.20	5.2	1.529	1.299	1.177	0.0035	0.50	18331	14111
C2-2	4.80	8.80	4.38	33.46	6.5	1.354	0.913	1.483	0.0025	0.51	18331	20073
C2-3	6.00	8.80	4.02	36.51	7.6	1.267	0.669	1.892	0.0020	0.58	18331	27382
C3-1	3.40	21.24	11.85	29.87	5.6	1.647	3.485	0.473	0.0035	0.28	44247	12695
C3-2	4.80	21.24	12.20	29.01	6.5	1.354	2.542	0.533	0.0025	0.27	44247	17409
C3-3	6.00	21.24	12.05	29.38	6.4	1.067	2.008	0.531	0.0020	0.27	44247	22032
C4-1	3.40	26.66	11.97	37.13	6.3	1.853	3.520	0.526	0.0035	0.34	55535	15779
C4-2	4.80	26.66	11.95	37.18	7.5	1.563	2.490	0.628	0.0025	0.34	55535	22307
C4-3	6.00	26.66	11.97	37.13	9.0	1.500	1.994	0.752	0.0020	0.34	55535	27845
C5-1	3.40	31.39	15.58	33.57	5.6	1.647	4.583	0.359	0.0035	0.27	65386	14266
C5-2	4.80	31.39	15.65	33.42	7.0	1.458	3.260	0.447	0.0025	0.27	65386	20054
C5-3	6.00	31.39	15.33	34.11	8.1	1.350	2.556	0.528	0.0020	0.28	65386	25586

ตาราง 4-4 ผลการทดลอง case D

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 1.20$  มม., ลักษณะผิวกระดานทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
D1-1	3.40	3.86	2.47	26.08	4.0	1.176	0.725	1.622	0.0130	0.53	8042	11084
D1-2	4.80	3.86	2.45	26.26	6.2	1.292	0.510	2.531	0.0092	0.54	8042	15755
D1-3	6.00	3.86	2.55	25.23	6.8	1.133	0.425	2.667	0.0074	0.50	8042	18922
D2-1	3.40	7.08	4.18	28.20	4.8	1.412	1.230	1.147	0.0130	0.44	14748	11986
D2-2	4.80	7.08	3.90	30.25	6.5	1.354	0.813	1.667	0.0092	0.49	14748	18151
D2-3	6.00	7.08	4.32	27.33	7.5	1.250	0.719	1.737	0.0074	0.42	14748	20499
D3-1	3.40	20.13	10.68	31.41	5.7	1.676	3.142	0.534	0.0130	0.31	41943	13348
D3-2	4.80	20.13	10.82	31.02	6.8	1.417	2.253	0.629	0.0092	0.30	41943	18612
D3-3	6.00	20.13	11.53	29.09	7.3	1.217	1.922	0.633	0.0074	0.27	41943	21820
D4-1	3.40	26.66	13.38	33.20	6.5	1.912	3.936	0.486	0.0130	0.29	55535	14109
D4-2	4.80	26.66	13.65	32.55	7.5	1.563	2.844	0.549	0.0092	0.28	55535	19529
D4-3	6.00	26.66	14.17	31.36	8.3	1.383	2.361	0.586	0.0074	0.27	55535	23521
D5-1	3.40	40.17	18.38	36.42	6.4	1.882	5.407	0.348	0.0130	0.27	83684	15477
D5-2	4.80	40.17	18.42	36.35	7.3	1.521	3.837	0.396	0.0092	0.27	83684	21811
D5-3	6.00	40.17	18.45	36.29	8.4	1.400	3.075	0.455	0.0074	0.27	83684	27214

ตาราง 4-5 ผลการทดลอง case E

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 1.20$  มม., ลักษณะผิวทรายคาซ (ไม่ได้ทำการทดลองหาค่า  $k_s$ )

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
E1-1	3.40	3.37	2.67	21.06	2.7	0.794	0.784	1.013	-	0.41	7019	8950
E1-2	4.80	3.37	1.92	29.30	4.8	1.000	0.399	2.504	-	0.68	7019	17579
E1-3	6.00	3.37	2.60	21.60	4.2	0.700	0.433	1.615	-	0.43	7019	16199
E2-1	3.40	7.68	5.17	24.77	4.9	1.441	1.520	0.948	-	0.35	15997	10527
E2-2	4.80	7.68	4.43	28.87	6.0	1.250	0.924	1.353	-	0.44	15997	17320
E2-3	6.00	7.68	4.67	27.42	6.8	1.133	0.778	1.457	-	0.41	15997	20568
E3-1	3.40	15.58	8.60	30.20	5.5	1.618	2.529	0.640	-	0.33	32463	12834
E3-2	4.80	15.58	8.07	32.20	6.5	1.354	1.681	0.806	-	0.36	32463	19317
E3-3	6.00	15.58	8.82	29.46	7.0	1.167	1.469	0.794	-	0.32	32463	22092
E4-1	3.40	23.86	14.32	27.77	4.8	1.412	4.211	0.335	-	0.23	49701	11803
E4-2	4.80	23.86	14.07	28.27	5.4	1.125	2.931	0.384	-	0.24	49701	16960
E4-3	6.00	23.86	15.07	26.39	6.0	1.000	2.511	0.398	-	0.22	49701	19792
E5-1	3.40	38.55	18.82	34.14	5.5	1.618	5.534	0.292	-	0.25	80308	14511
E5-2	4.80	38.55	18.77	34.23	6.2	1.292	3.910	0.330	-	0.25	80308	20541
E5-3	6.00	38.55	19.55	32.86	7.2	1.200	3.258	0.368	-	0.24	80308	24647

ตาราง 4-6 ผลการทดลอง case F

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 2.20$  มม., ลักษณะผิวแบบผิวเรียบ

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
F1-1	3.40	8.97	3.88	38.48	5.8	1.706	1.142	1.494	-	0.62	18680	16355
F1-2	4.80	8.97	4.47	33.46	5.6	1.167	0.931	1.254	-	0.51	18680	20074
F1-3	6.00	8.97	4.52	33.09	6.5	1.083	0.753	1.439	-	0.50	18680	24814
F2-1	3.40	19.59	8.48	38.49	6.2	1.824	2.495	0.731	-	0.42	40818	16359
F2-2	4.80	19.59	9.10	35.88	6.0	1.250	1.896	0.659	-	0.38	40818	21530
F2-3	6.00	19.59	9.72	33.61	6.1	1.017	1.619	0.628	-	0.34	40818	25205
F3-1	3.40	29.30	12.25	39.87	5.4	1.588	3.603	0.441	-	0.36	61047	16944
F3-2	4.80	29.30	13.05	37.42	5.0	1.042	2.719	0.383	-	0.33	61047	22454
F3-3	6.00	29.30	13.37	36.54	5.0	0.833	2.228	0.374	-	0.32	61047	27403
F4-1	3.40	38.55	15.27	42.08	5.5	1.618	4.490	0.360	-	0.34	80308	17885
F4-2	4.80	38.55	15.43	41.63	6.5	1.354	3.215	0.421	-	0.34	80308	24977
F4-3	6.00	38.55	15.83	40.58	8.2	1.367	2.639	0.518	-	0.33	80308	30433
F5-1	3.40	48.41	18.05	44.70	6.5	1.912	5.309	0.360	-	0.34	100859	18998
F5-2	4.80	48.41	18.62	43.34	7.3	1.521	3.878	0.392	-	0.32	100859	26005
F5-3	6.00	48.41	18.57	43.46	9.2	1.533	3.094	0.496	-	0.32	100859	32593

ตาราง 4-7 ผลการทดลอง case G

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 2.20$  มม., ลักษณะผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_e$	$R_p$
G1-1	3.40	8.47	3.07	46.03	5.0	1.471	0.902	1.630	0.0026	0.84	17645	19563
G1-2	4.80	8.47	3.63	38.85	6.1	1.271	0.757	1.679	0.0018	0.65	17645	23310
G1-3	6.00	8.47	3.88	36.35	6.6	1.100	0.647	1.700	0.0015	0.59	17645	27262
G2-1	3.40	22.09	8.38	43.92	5.7	1.676	2.466	0.680	0.0026	0.48	46023	18665
G2-2	4.80	22.09	8.73	42.16	6.8	1.417	1.819	0.779	0.0018	0.46	46023	25295
G2-3	6.00	22.09	8.87	41.52	8.2	1.367	1.478	0.925	0.0015	0.45	46023	31143
G3-1	3.40	32.82	12.13	45.08	6.1	1.794	3.569	0.503	0.0026	0.41	68377	19160
G3-2	4.80	32.82	12.33	44.35	7.1	1.479	2.569	0.576	0.0018	0.40	68377	26611
G3-3	6.00	32.82	12.30	44.47	8.2	1.367	2.050	0.667	0.0015	0.40	68377	33354
G4-1	3.40	39.76	15.07	43.98	6.6	1.941	4.431	0.438	0.0026	0.36	82832	18692
G4-2	4.80	39.76	15.20	43.60	7.6	1.583	3.167	0.500	0.0018	0.36	82832	26157
G4-3	6.00	39.76	15.25	43.45	9.0	1.500	2.542	0.590	0.0015	0.36	82832	32590
G5-1	3.40	47.50	17.67	44.81	6.6	1.941	5.196	0.374	0.0026	0.34	98961	19045
G5-1	4.80	47.50	17.92	44.19	7.0	1.458	3.733	0.391	0.0018	0.33	98961	26512
G5-3	6.00	47.50	17.65	44.85	8.6	1.433	2.942	0.487	0.0015	0.34	98961	33641

ตาราง 4-8 ผลการทดลอง case H

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 2.20$  มม., ลักษณะผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_e$	$R_p$
H1-1	3.40	9.14	3.78	40.24	5.0	1.471	1.113	1.322	0.0035	0.66	19032	17104
H1-2	4.80	9.14	4.25	35.83	5.8	1.208	0.885	1.365	0.0025	0.55	19032	21495
H1-3	6.00	9.14	4.33	35.14	7.0	1.167	0.722	1.615	0.0020	0.54	19032	26352
H2-1	3.40	22.09	7.93	46.41	6.1	1.794	2.333	0.769	0.0035	0.53	46023	19724
H2-2	4.80	22.09	8.49	43.35	6.9	1.438	1.769	0.812	0.0025	0.47	46023	26010
H2-3	6.00	22.09	8.92	41.29	8.5	1.417	1.486	0.953	0.0020	0.44	46023	30969
H3-1	3.40	32.82	11.88	46.03	6.7	1.971	3.495	0.564	0.0035	0.43	68377	19564
H3-2	4.80	32.82	11.90	45.97	7.3	1.521	2.479	0.613	0.0025	0.43	68377	27580
H3-3	6.00	32.82	13.20	41.44	9.5	1.583	2.200	0.720	0.0020	0.36	68377	31080
H4-1	3.40	36.97	14.65	42.06	6.5	1.912	4.309	0.444	0.0035	0.35	77015	17874
H4-2	4.80	36.97	14.87	41.44	7.4	1.542	3.097	0.498	0.0025	0.34	77015	24866
H4-3	6.00	36.97	14.55	42.34	9.0	1.500	2.425	0.619	0.0020	0.35	77015	31759
H5-1	3.40	43.10	15.95	45.04	6.5	1.912	4.691	0.408	0.0035	0.36	89790	19140
H5-2	4.80	43.10	16.33	43.98	7.4	1.542	3.403	0.453	0.0025	0.35	89790	26387
H5-3	6.00	43.10	16.28	44.11	9.2	1.533	2.714	0.565	0.0020	0.35	89790	33086



ตาราง 4-9 ผลการทดลอง case I

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 2.20$  มม., ลักษณะผิวทรายทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_e$	$R_p$
I1-1	3.40	9.83	3.53	46.38	5.0	1.471	1.039	1.415	0.0130	0.79	20483	19710
I1-2	4.80	9.83	4.30	38.11	6.3	1.313	0.896	1.465	0.0092	0.59	20483	22864
I1-3	6.00	9.83	4.13	39.64	7.4	1.233	0.689	1.790	0.0074	0.62	20483	29733
I2-1	3.40	19.33	7.83	41.12	6.0	1.765	2.304	0.766	0.0130	0.47	40262	17475
I2-2	4.80	19.33	9.05	35.59	6.2	1.292	1.885	0.685	0.0092	0.38	40262	21355
I2-3	6.00	19.33	9.40	34.27	6.5	1.083	1.567	0.691	0.0074	0.36	40262	25699
I3-1	3.40	33.92	11.85	47.71	5.9	1.735	3.485	0.498	0.0130	0.44	70672	20277
I3-2	4.80	33.92	12.65	44.69	7.8	1.625	2.635	0.617	0.0092	0.40	70672	26816
I3-3	6.00	33.92	12.53	45.11	9.4	1.567	2.089	0.750	0.0074	0.41	70672	33832
I4-1	3.40	36.97	14.32	43.04	6.5	1.912	4.211	0.454	0.0130	0.36	77015	18290
I4-2	4.80	36.97	14.82	41.58	7.5	1.563	3.087	0.506	0.0092	0.34	77015	24950
I4-3	6.00	36.97	14.57	42.30	8.5	1.417	2.428	0.584	0.0074	0.35	77015	31722
I5-1	3.40	45.27	17.67	42.71	6.0	1.765	5.196	0.340	0.0130	0.32	94309	18150
I5-2	4.80	45.27	18.48	40.82	7.2	1.500	3.851	0.390	0.0092	0.30	94309	24492
I5-3	6.00	45.27	18.13	41.61	8.3	1.383	3.022	0.458	0.0074	0.31	94309	31205

ตาราง 4-10 ผลการทดลอง case J

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 2.20$  มม., ลักษณะผิวทรายทราย (ไม่ได้ทำการทดลองหาค่า  $k_s$ )

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_e$	$R_p$
J1-1	3.40	10.93	3.82	47.74	4.4	1.294	1.123	1.153	-	0.78	22778	20291
J1-2	4.80	10.93	4.40	41.41	6.0	1.250	0.917	1.364	-	0.63	22778	24848
J1-3	6.00	10.93	5.02	36.32	6.8	1.133	0.836	1.355	-	0.52	22778	27242
J2-1	3.40	21.80	8.95	40.60	6.0	1.765	2.632	0.670	-	0.43	45426	17257
J2-2	4.80	21.80	9.53	38.12	6.0	1.250	1.986	0.629	-	0.39	45426	22872
J2-3	6.00	21.80	10.02	36.28	6.2	1.033	1.669	0.619	-	0.37	45426	27210
J3-1	3.40	29.99	11.32	44.16	6.1	1.794	3.328	0.539	-	0.42	62474	18770
J3-2	4.80	29.99	12.23	40.85	6.5	1.354	2.549	0.531	-	0.37	62474	24513
J3-3	6.00	29.99	13.08	38.20	7.9	1.317	2.181	0.604	-	0.34	62474	28650
J4-1	3.40	35.43	13.58	43.47	6.5	1.912	3.995	0.479	-	0.38	73803	18473
J4-2	4.80	35.43	14.32	41.24	6.9	1.438	2.983	0.482	-	0.35	73803	24744
J4-3	6.00	35.43	14.15	41.73	8.5	1.417	2.358	0.601	-	0.35	73803	31295
J5-1	3.40	44.39	16.53	44.75	6.8	2.000	4.863	0.411	-	0.35	92486	19019
J5-2	4.80	44.39	17.33	42.69	7.5	1.563	3.611	0.433	-	0.33	92486	25612
J5-3	6.00	44.39	17.12	43.23	8.0	1.333	2.853	0.467	-	0.33	92486	32420

ตาราง 4-11 ผลการทดลอง case K

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 0.36$  มม., ลักษณะผิวแบบผิวเรียบ

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
K1-1	3.40	3.96	4.02	16.44	3.1	0.912	1.181	0.772	-	0.26	8256	6989
K1-2	4.80	3.96	3.18	20.75	4.0	0.833	0.663	1.257	-	0.37	8256	12449
K1-3	6.00	3.96	3.35	19.72	4.5	0.750	0.558	1.343	-	0.34	8256	14787
K2-1	3.40	9.48	7.85	20.13	3.5	1.029	2.309	0.446	-	0.23	19750	8554
K2-2	4.80	9.48	7.33	21.54	5.0	1.042	1.528	0.682	-	0.25	19750	12927
K2-3	6.00	9.48	7.22	21.89	6.0	1.000	1.203	0.831	-	0.26	19750	16420
K3-1	3.40	14.22	10.75	22.04	4.5	1.324	3.162	0.419	-	0.21	29619	9368
K3-2	4.80	14.22	9.72	24.39	5.0	1.042	2.024	0.515	-	0.25	29619	14632
K3-2	6.00	14.22	10.12	23.42	6.4	1.067	1.686	0.633	-	0.24	29619	17567

ตาราง 4-12 ผลการทดลอง case L

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 0.36$  มม., ลักษณะผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
L1-1	3.40	9.14	7.12	21.39	3.7	1.088	2.093	0.520	0.0026	0.26	19032	9093
L1-2	4.80	9.14	7.13	21.34	5.0	1.042	1.486	0.701	0.0018	0.26	19032	12807
L1-3	6.00	9.14	6.35	23.98	6.0	1.000	1.058	0.945	0.0015	0.30	19032	17983
L2-1	3.40	18.28	15.85	19.22	4.5	1.324	4.662	0.284	0.0026	0.15	38085	8170
L2-2	4.80	18.28	15.27	19.96	4.8	1.000	3.181	0.314	0.0018	0.16	38085	11974
L2-3	6.00	18.28	15.73	19.37	4.8	0.800	2.622	0.305	0.0015	0.16	38085	14524
L3-1	3.40	30.33	18.50	27.33	4.5	1.324	5.441	0.243	0.0026	0.20	63194	11614
L3-2	4.80	30.33	21.22	23.83	5.3	1.104	4.420	0.250	0.0018	0.17	63194	14297
L3-3	6.00	30.33	21.57	23.44	6.0	1.000	3.594	0.278	0.0015	0.16	63194	17581

ตาราง 4-13 ผลการทดลอง case M

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 0.36$  มม., ลักษณะผิวกระดาษทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_s$	$R_p$
M1-1	3.40	9.31	10.35	14.99	3.2	0.941	3.044	0.309	0.0035	0.15	19389	6369
M1-2	4.80	9.31	10.13	15.31	3.2	0.667	2.111	0.316	0.0025	0.15	19389	9184
M1-3	6.00	9.31	10.47	14.82	3.5	0.583	1.744	0.334	0.0020	0.15	19389	11115
M2-1	3.40	19.06	12.70	25.01	5.0	1.471	3.735	0.394	0.0035	0.22	39711	10631
M2-2	4.80	19.06	12.42	25.59	5.4	1.125	2.587	0.435	0.0025	0.23	39711	15351
M2-3	6.00	19.06	12.83	24.75	6.0	1.000	2.139	0.468	0.0020	0.22	39711	18566
M3-1	3.40	32.46	22.50	24.04	4.0	1.176	6.618	0.178	0.0035	0.16	67621	10218
M3-2	4.80	32.46	22.58	23.95	5.0	1.042	4.705	0.221	0.0025	0.16	67621	14373
M3-3	6.00	32.46	22.55	23.99	6.0	1.000	3.758	0.266	0.0020	0.16	67621	17992

ตาราง 4-14 ผลการทดลอง case N

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 0.36$  มม., ลักษณะผิวกระตาศทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416$  มม.)

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_e$	$R_p$
N1-1	3.40	10.01	7.95	20.99	4.5	1.324	2.338	0.566	0.0130	0.24	20855	8919
N1-2	4.80	10.01	7.02	23.78	5.5	1.146	1.462	0.784	0.0092	0.29	20855	14267
N1-2	6.00	10.01	7.33	22.75	5.8	0.967	1.222	0.791	0.0074	0.27	20855	17063
N2-1	3.40	16.29	11.57	23.48	5.2	1.529	3.402	0.450	0.0130	0.22	33944	9978
N2-2	4.80	16.29	10.72	25.34	5.8	1.208	2.233	0.541	0.0092	0.25	33944	15203
N2-3	6.00	16.29	11.53	23.54	6.2	1.033	1.922	0.538	0.0074	0.22	33944	17659
N3-1	3.40	29.99	19.90	25.12	5.2	1.529	5.853	0.261	0.0130	0.18	62474	10674
N3-2	4.80	29.99	19.83	25.20	5.8	1.208	4.132	0.292	0.0092	0.18	62474	15120
N3-3	6.00	29.99	20.07	24.91	7.5	1.250	3.344	0.374	0.0074	0.18	62474	18680

ตาราง 4-15 ผลการทดลอง case O

วัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 0.36$  มม., ลักษณะผิวทรายดาซ (ไม่ได้ทำการทดลองหาค่า  $k_s$ )

Run No.	D (cm)	Q (L/s)	y (cm)	U (cm/s)	$d_s$ (cm)	$d_s/D$	y/D	$d_s/y$	$k_s/D$	Fr	$R_e$	$R_p$
O1-1	3.40	5.08	5.17	16.39	3.3	0.971	1.520	0.639	-	0.23	10587	6967
O1-2	4.80	5.08	4.80	17.65	4.2	0.875	1.000	0.875	-	0.26	10587	10587
O1-3	6.00	5.08	4.10	20.66	4.7	0.783	0.683	1.146	-	0.33	10587	15493
O2-1	3.40	10.19	7.92	21.46	4.3	1.265	2.328	0.543	-	0.24	21232	9118
O2-2	4.80	10.19	7.48	22.70	4.8	1.000	1.559	0.641	-	0.26	21232	13618
O2-3	6.00	10.19	5.52	30.79	6.0	1.000	0.919	1.088	-	0.42	21232	23092
O3-1	3.40	14.00	10.92	21.37	4.1	1.206	3.211	0.376	-	0.21	29160	9082
O3-2	4.80	14.00	10.73	21.73	4.5	0.938	2.236	0.419	-	0.21	29160	13041
O3-3	6.00	14.00	10.75	21.70	5.2	0.867	1.792	0.484	-	0.21	29160	16276

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษานี้มุ่งเน้นเพื่อหาผลของความขรุขระของผิวตอม่อ ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยได้ทำการทดลองทั้งสิ้น 65 การทดลอง ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ทั้งนี้ในการนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ได้ตัดข้อมูลการทดลองที่ใช้ทรายละเอียด ( $d_{50} = 0.36$  mm) เป็นวัสดุท้องน้ำออก เนื่องจากในการทดลองที่ใช้ทรายละเอียดนั้น ไม่สามารถปรับสภาพการไหลเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ สำหรับตอม่อตัวที่ 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ส่วนกลางและส่วนท้ายของรางน้ำได้ เพราะได้รับผลกระทบจากการขัดขวางการไหลของตอม่อตัวที่ 1 ซึ่งวางทางด้านเหนือน้ำ ทำให้เกิดอิทธิพลจากสภาพของท้องน้ำ (stream bed topography) ดังนั้นจึงมิได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และในส่วนของลักษณะผิวตอม่อที่ใช้ทรายปานกลาง ( $d_{50} = 1.20$  mm) ดาดผิวโดยรอบนั้น ก็มีได้นำมาพิจารณารวมด้วย เนื่องจากไม่สามารถดาดผิวตอม่อที่มีขนาดแตกต่างกันให้มีลักษณะของผิวเหมือนกัน และนอกจากนี้เมื่อทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ลักษณะของผิวที่ดาดด้วยทรายก็เปลี่ยนไปเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำ ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองของผิวนี้นี้ มาทำการเปรียบเทียบกับผิวนั้น ในส่วนของผลของความขรุขระของผิวตอม่อ สะพานได้

เมื่อตัดข้อมูลดังที่กล่าวมาแล้วออก จะเหลือข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จำนวน 40 การทดลอง ดังนี้ วัสดุท้องน้ำเป็นทราย 2 ขนาด คือ ทรายปานกลาง ( $d_{50} = 1.20$  มม.) และทรายหยาบ ( $d_{50} = 2.20$  มม.) ลักษณะผิวตอม่อ 4 ลักษณะผิว คือ ผิวเรียบ, ผิวที่เป็นกระดาศทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.), ผิวที่เป็นกระดาศทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.) และ ผิวที่เป็นกระดาศทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416$  มม.) และอัตราการไหลสำหรับแต่ละกรณีจำนวน 5 อัตราการไหล

จากผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ โดยทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะของการศึกษานี้ กับการศึกษาที่ผ่านมาในอดีต และหาความสัมพันธ์ของความขรุขระของผิวตอม่อกับความลึกหลุมกัดเซาะ ดังนี้

## 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะ

จากการศึกษาที่ผ่านมา ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อ ( $d_s$ ) ขึ้นกับขนาดตอม่อ ( $D$ ), ความเร็วการไหล ( $v$ ), ความลึกการไหล ( $y$ ) และขนาดวัสดุท้องน้ำ ( $d_{50}$ ) ซึ่งจะได้ทำการเปรียบเทียบการศึกษาที่ผ่านมากับการศึกษานี้ในส่วนของการทดลองที่ใช้ลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบ

ขนาดของตอม่อ ( $D$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งในการควบคุมความลึกหลุมกัดเซาะ รูป 5-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) กับขนาดของตอม่อ ( $D$ ) ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของผิวเรียบ จากรูปจะเห็นว่าขนาดตอม่อมีผลกับความลึกหลุมกัดเซาะคือเมื่อขนาดของตอม่อเพิ่มขึ้นความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นด้วย ตามความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Breusers (1965) และ Larras (1963) ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้มีแนวโน้มตามความสัมพันธ์นี้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) กับความเร็วการไหล ( $U$ ) และขนาดตอม่อ ( $D$ ) ในรูปของตัวแปรไร้มิติเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ( $R_p$ ) รูป 5-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ในส่วนของผิวตอม่อแบบผิวเรียบ ได้สมการความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นโค้งดังสมการ 5.1

$$d_s = 0.0048R_p^{0.715} \quad (5.1)$$

โดยที่  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะ (เซนติเมตร),  $R_p$  คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ เท่ากับ  $UD/v$ ,  $U$  คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที),  $D$  คือ ขนาดตอม่อ (เมตร) และ  $v$  คือ ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematic viscosity, เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีแนวโน้มเหมือนที่ Shen และคณะ (1969) ได้เสนอสมการขอบเขตของความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ดังสมการ 5.2

$$d_s = 0.0222R_p^{0.619} \quad (5.2)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นหรือขนาดของตอม่อเพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความสัมพันธ์นี้ใช้ได้ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเท่านั้น เนื่องจากในสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำนั้น ความลึกหลุมกัดเซาะจะไม่ขึ้นกับความเร็วการไหล

จากที่ Richardson และคณะ (1995) ได้เสนอสมการความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) เป็นความสัมพันธ์ของความลึกการไหล ( $y$ ), ขนาดตอม่อ ( $D$ ) และฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) ดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left( \frac{y}{D} \right)^{0.35} Fr^{0.43} \quad (5.3)$$

โดยที่  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะ,  $y$  คือ ความลึกการไหล,  $D$  คือ ขนาดตอม่อ,  $Fr$  คือ ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล,  $K_1$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ เท่ากับ 1.0 สำหรับตอม่อทรงกระบอก,  $K_2$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหล เท่ากับ 1.0 สำหรับมุมปะทะการไหล  $0^\circ$ ,  $K_3$  คือ streambed topograph และ  $K_4$  คือ armoring effect

ทำการหาสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (multiple non-linear regression) ของการศึกษานี้ในส่วนของลักษณะผิวแบบผิวเรียบ ได้ดังสมการ 5.4

$$\frac{d_s}{D} = 1.76 \left( \frac{y}{D} \right)^{0.424} Fr^{0.626} \quad (5.4)$$

จากสมการ 5.4 ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r-squared) เป็น 0.920 และจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังที่ได้จากสมการของ Richardson และคณะ (1995) กับสมการที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากสมการและข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูป 5-3 จากรูปจะเห็นว่า จุดข้อมูลที่มีค่าฟรูดนัมเบอร์เป็น 0.2, 0.3, 0.5 และ 0.6 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ แต่ในส่วนของค่าฟรูดนัมเบอร์เป็น 0.4 นั้น ค่าที่ได้มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อมูลที่มีค่าฟรูดนัมเบอร์เป็น 0.4 มีน้อย และสมการที่ได้จะมีจุดข้อมูลที่มีค่าฟรูดนัมเบอร์มากกว่าและน้อยกว่า ซึ่งเป็นธรรมชาติของการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ

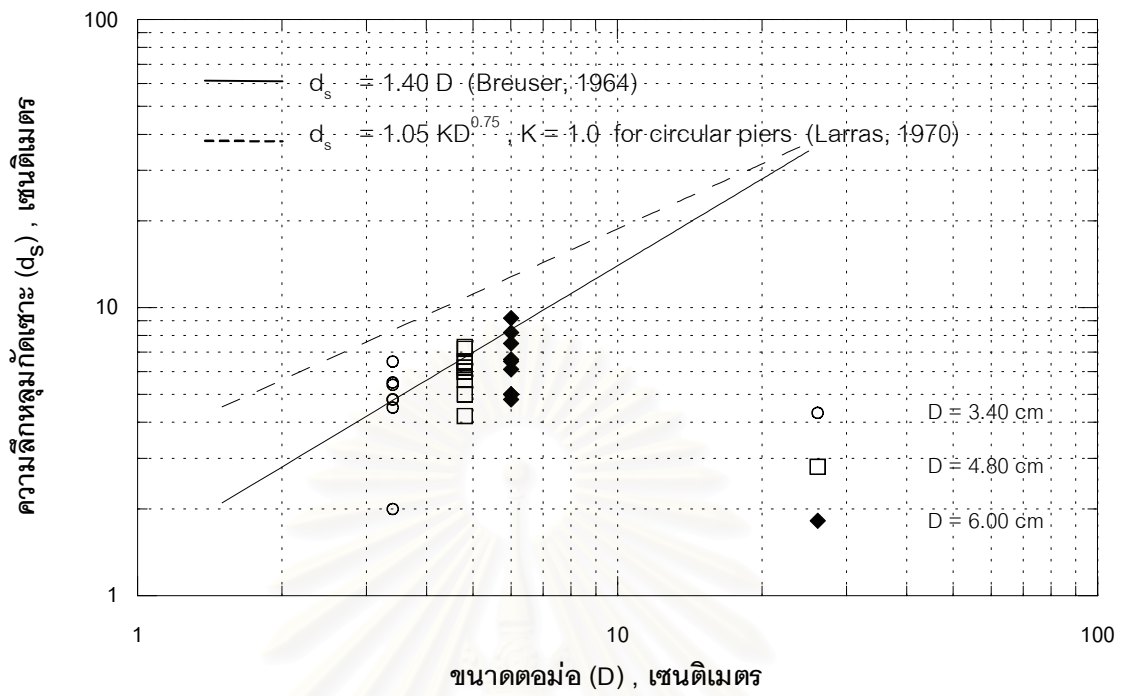
ดังนั้น ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ขึ้นกับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) และค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) ซึ่งหมายถึงเมื่อขนาดของตอม่อและความลึกการไหลเท่ากัน แต่ค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยที่เมื่อค่าฟรูดนัมเบอร์มากขึ้นความลึกหลุมกัดเซาะจะมากขึ้น แสดงความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) ของการทดลองนี้ในส่วนของลักษณะผิวเรียบ ซึ่งมีค่าฟรูดนัมเบอร์ของแต่ละข้อมูลการทดลองไว้ข้างเคียงและเปรียบเทียบกับที่ได้จากสมการ 5.4 ซึ่งแสดงเป็นเส้นแบ่งชั้นของค่าฟรูดนัมเบอร์

ต่าง ๆ ดังรูป 5-3 จากรูปจะเห็นว่าข้อมูลซึ่งกำหนดโดยค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลส่วนใหญ่มีแนวโน้มตามเส้นแบ่งชั้นที่ได้จากสมการ 5.4

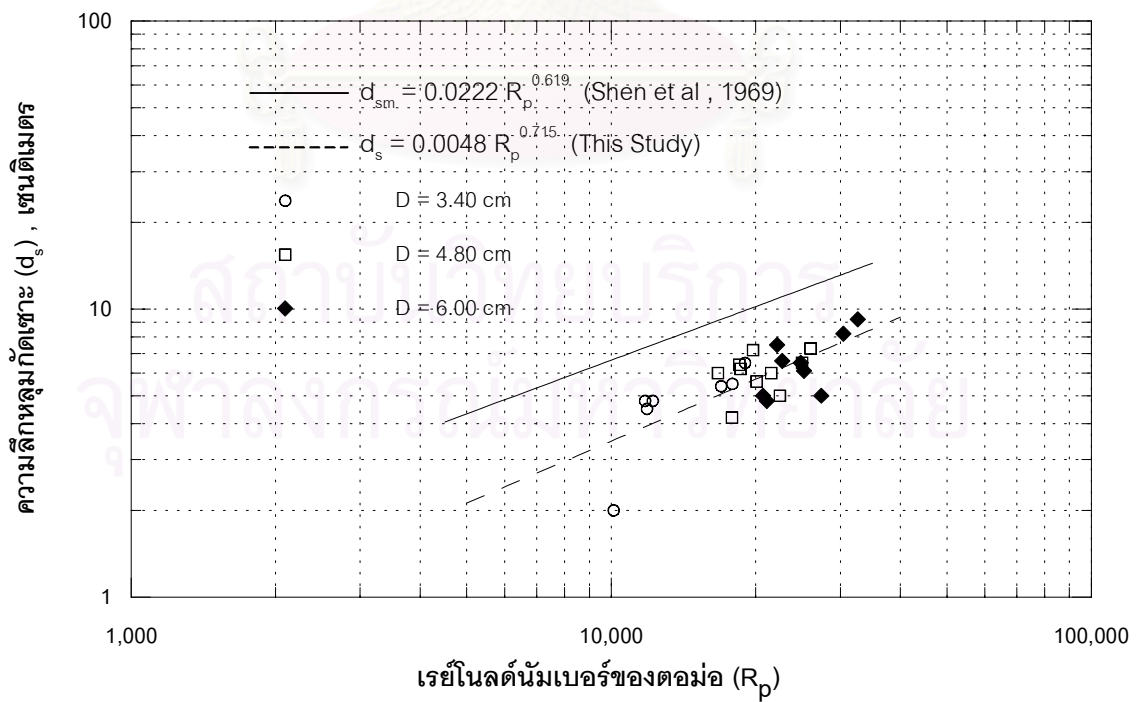
Jones (1983) ได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) ของการศึกษาที่ผ่านมาของหลาย ๆ ท่านไว้ในรูปเดียวกัน และเปรียบเทียบกับการศึกษาที่โดยสมการ 5.4 และใช้ค่าฟรูดนัมเบอร์เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในรูป 5-4 ซึ่งแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปตามที่ Jones (1983) ได้เสนอไว้

รูป 5-5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ที่ได้จากสมการของ Richardson และคณะ (1995) ดังสมการ 5.3 กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของการศึกษานี้ในส่วนของคุณลักษณะผิวแบบผิวเรียบ ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากสมการประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมการของ Richardson และคณะ (1995) ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของการศึกษาของหลาย ๆ ท่าน ความกว้างของข้อมูลมีมาก รางน้ำ (flume) ที่ใช้มีขนาดใหญ่ นำมาสรุปเป็นสมการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เพื่อให้ใช้ในการออกแบบตอม่อสะพาน ส่วนในการศึกษานี้มีข้อมูลอยู่ในช่วงแคบและจำนวนข้อมูลมีน้อยกว่า จึงทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกับที่ได้จากสมการ

ดังที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลต่าง ๆ กับความลึกหลุมกัดเซาะในส่วนของการทดลองที่ใช้ลักษณะผิวดอม่อแบบผิวเรียบของการศึกษานี้ กับการศึกษาที่ผ่านมานั้นในอดีตนี้นั้นแนวโน้มไปในทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) เป็นความสัมพันธ์ของความลึกการไหล ( $y$ ), ขนาดตอม่อ ( $D$ ), เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ( $R_p$ ) และฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) โดยจะได้แสดงการวิเคราะห์หรืออิทธิพลของความขรุขระของผิวดอม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะในหัวข้อถัดไป

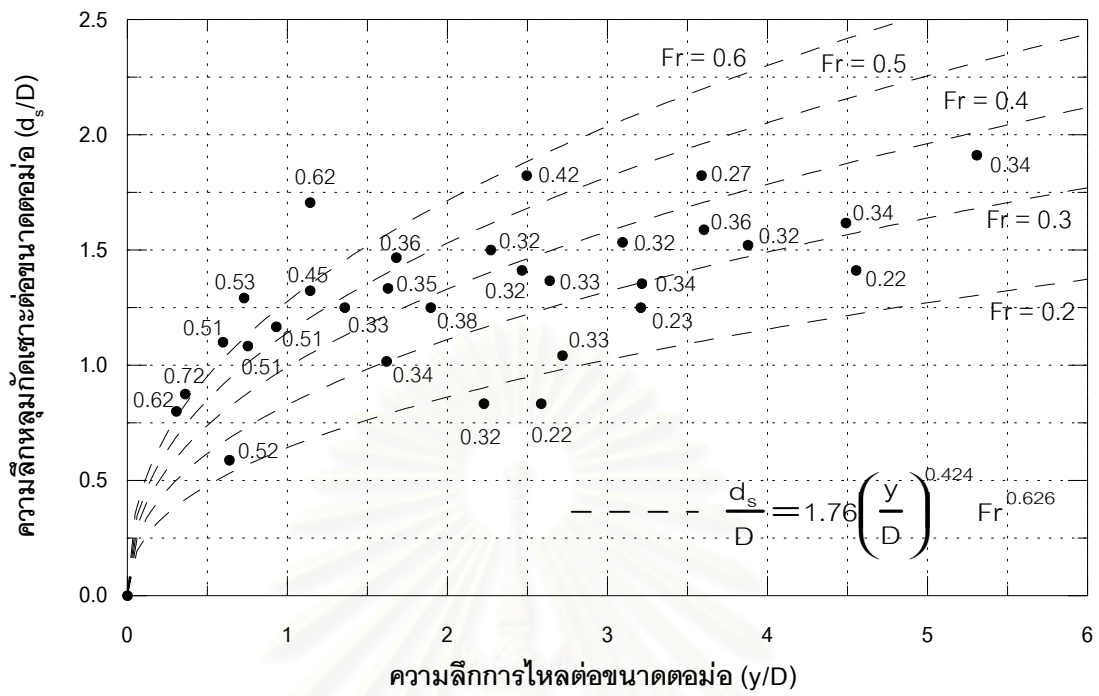


รูป 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับขนาดตอม่อ

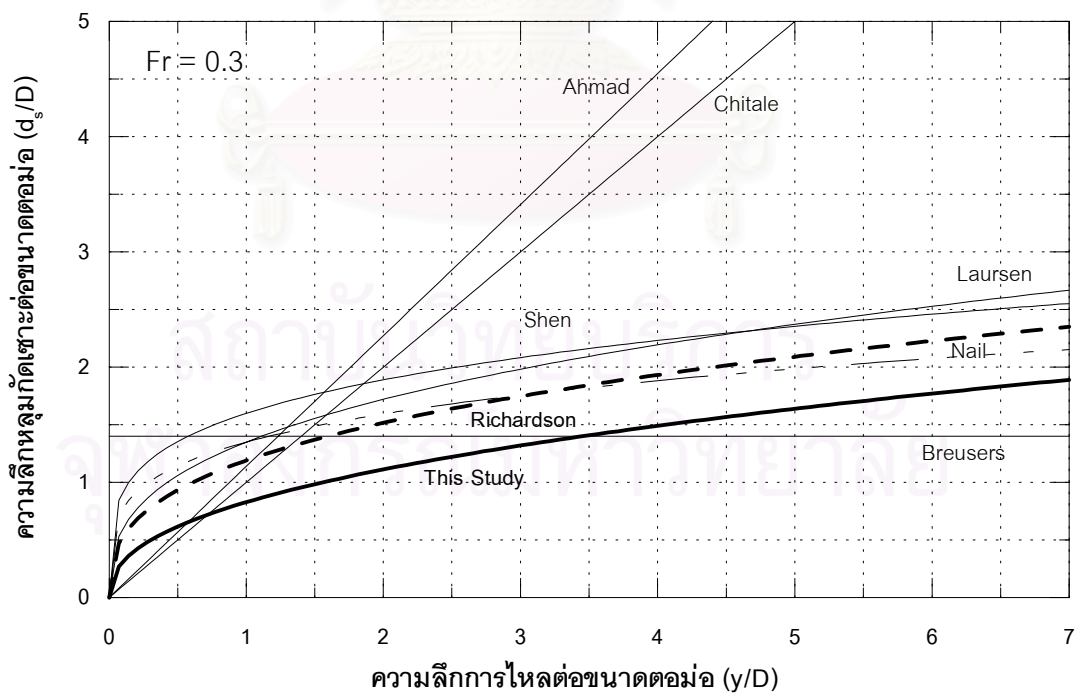


รูป 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ

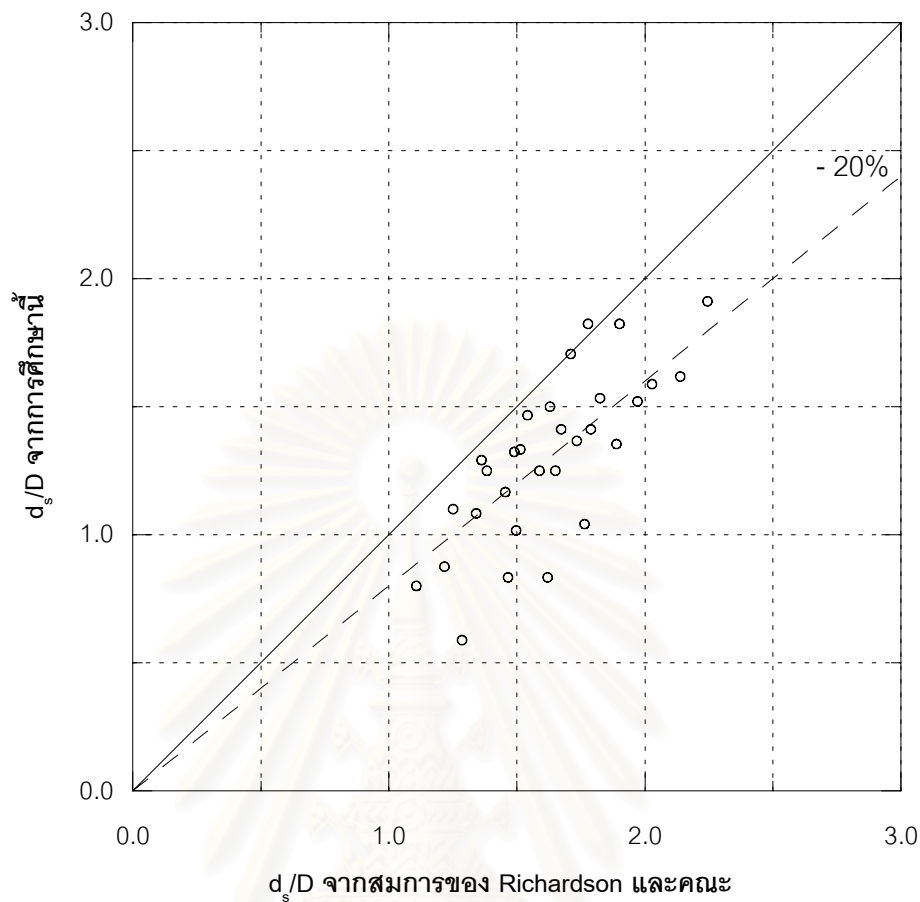




รูป 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลึกลงสู่ก้นตะกอนต่อขนาดตอม่อ กับความเร็วลึกลงต่อขนาดตอม่อ เปรียบเทียบกับสมการ 5.4



รูป 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลึกลงสู่ก้นตะกอนต่อขนาดตอม่อ กับความเร็วลึกลงต่อขนาดตอม่อ (Jones (1983) จาก FHWA, 1988)



รูป 5-5 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ จากสมการของ Richardson และคณะอ้างอิง กับที่ได้จากการศึกษา

## 5.2 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีผิวเรียบกับผิวอื่น ๆ

ทำการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้ในกรณีผิวตอม่อเป็นกระดาศทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.), กระดาศทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.) และกระดาศทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.04416$  มม.) กับผิวตอม่อเป็นแบบผิวเรียบ ในสภาวะเงื่อนไขของการทดลองเดียวกัน คือ ขนาดตอม่อเท่ากัน, ความลึกการไหลเท่ากัน และค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลเท่ากัน ในส่วนของลักษณะผิวขรุขระจะใช้ข้อมูลความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากการทดลอง และในส่วนของความลึกหลุมกัดเซาะของลักษณะผิวเรียบ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (วาล์วควบคุมการไหลของน้ำไม่ละเอียดพอ) ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองที่อัตราการไหลเดิม และความลึกการไหลเท่าเดิมได้ ดังนั้นจะใช้สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณของลักษณะผิวเรียบที่ได้เสนอไว้ ดังสมการ 5.4 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r-squared) เป็น 0.920 เป็นตัวแทนของความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีผิวตอม่อเป็นแบบผิวเรียบ

ตาราง 5-2 ถึง 5-4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ของลักษณะผิวเป็นกระดาศทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.), กระดาศทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.) และกระดาศทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.04416$  มม.) ที่ได้จากการทดลอง กับลักษณะผิวเรียบที่ได้จากสมการ 5.4 ในสภาวะเงื่อนไขของการทดลองเดียวกัน โดยทำการหาค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ของแต่ละการทดลอง และหาค่าทางสถิติเบื้องต้น คือ ช่วงของข้อมูล, ค่าเฉลี่ยเลขคณิต, มัธยฐาน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสรุปเปรียบเทียบไว้ดังตาราง 5-1

ตาราง 5-1 สรุปเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นหรือลดลงของความลึกหลุมกัดเซาะของลักษณะผิวขรุขระอื่น ๆ กับลักษณะผิวเรียบ

ลักษณะผิว	ค่าทางสถิติของความแตกต่าง (เปอร์เซ็นต์)			
	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต	มัธยฐาน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ช่วงของข้อมูล
#400 (0.0883 mm)	+10.11	+8.75	10.14	-5.70 ถึง +37.24
#280 (0.1178 mm)	+13.23	+12.48	7.89	0.40 ถึง +28.69
#80 (0.4416 mm)	+15.26	+12.63	13.41	-4.55 ถึง +44.28

รูป 5-6, 5-8 และ 5-10 แสดงความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ที่ได้จากการทดลองของตอม่อผิวกระดาศทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280 และเบอร์ 80 กับกับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับลักษณะผิวเรียบ เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล โดยมีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสมมาตร (ไม่เบี่ยงเบนทางมากหรือน้อย) และมีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็น +10.11%, +13.23% และ +15.26% ตามลำดับ

รูป 5-7, 5-9 และ 5-11 แสดงการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ของผิวกระดาศทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280 และเบอร์ 80 ที่ได้จากการทดลอง กับความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ของลักษณะผิวเรียบ ในสภาวะเงื่อนไขการไหลเดียวกัน ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่เหนือเส้น  $45^\circ$  นั่นคือ ความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้มีค่ามากกว่าความลึกหลุมกัดเซาะของลักษณะผิวเรียบ

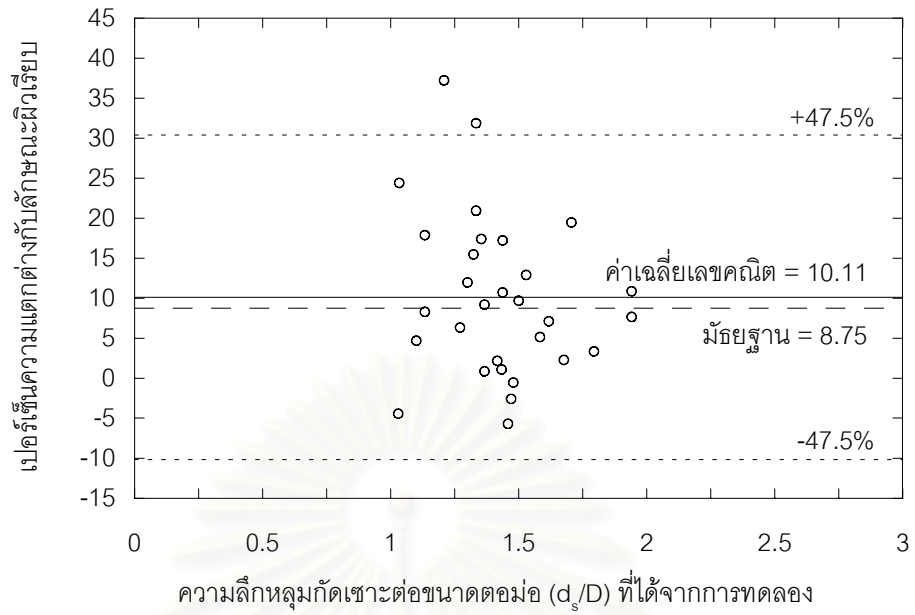
จากค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหลุมกัดเซาะที่ได้ สรุปโดยเบื้องต้นได้ว่า ความขรุขระของผิวตอม่อที่เพิ่มขึ้นทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น โดยขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของผิวกระดาศทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280 และเบอร์ 80 จะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10.11%, 13.23% และ 15.26% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผิวตอม่อแบบผิวเรียบ ที่สภาวะการไหลเดียวกัน

ตาราง 5-2 แสดงความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นเปอร์เซ็นต์

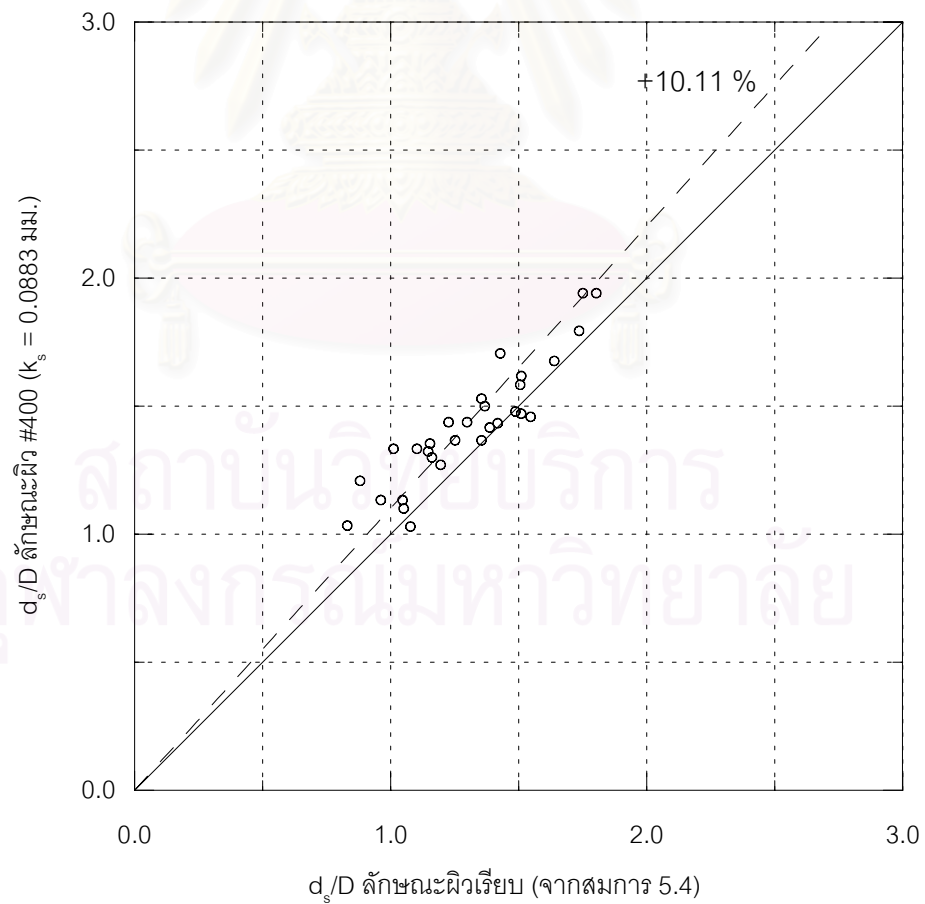
ของลักษณะผิวตอม่อเป็นกระดาศทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  mm) กับลักษณะผิวเรียบ

Run No	D (cm)	y (cm)	$d_s$ (cm)	y/D	Fr	$d_s/D$		เปอร์เซ็นต์ เพิ่ม (+) / ลด (-)
						ผิว #400	ผิวเรียบ (*)	
B1-1	3.4	2.20	3.5	0.65	0.61	1.0294	1.0772	-4.43
B1-2	4.8	2.45	5.8	0.51	0.52	1.2083	0.8804	+37.24
B1-3	6.0	2.28	6.2	0.38	0.58	1.0333	0.8306	+24.41
B2-1	3.4	5.48	4.5	1.61	0.36	1.3235	1.1462	+15.47
B2-2	4.8	5.27	6.4	1.10	0.39	1.3333	1.0110	+31.88
B2-3	6.0	4.83	6.8	0.81	0.44	1.1333	0.9614	+17.89
B3-1	3.4	9.32	5.2	2.74	0.33	1.5294	1.3546	+12.91
B3-2	4.8	9.58	6.5	2.00	0.32	1.3542	1.1534	+17.40
B3-3	6.0	9.63	6.8	1.61	0.32	1.1333	1.0465	+8.30
B4-1	3.4	12.78	5.8	3.76	0.29	1.7059	1.4279	+19.47
B4-2	4.8	12.93	6.9	2.69	0.29	1.4375	1.2263	+17.23
B4-3	6.0	13.23	8.0	2.21	0.28	1.3333	1.1025	+20.94
B5-1	3.4	17.45	5.5	5.13	0.26	1.6176	1.5101	+7.12
B5-2	4.8	17.62	6.9	3.67	0.25	1.4375	1.2983	+10.72
B5-3	6.0	18.22	7.8	3.04	0.24	1.3000	1.1609	+11.98
G1-1	3.4	3.07	5.0	0.90	0.84	1.4706	1.5096	-2.58
G1-2	4.8	3.63	6.1	0.76	0.65	1.2708	1.1952	+6.33
G1-3	6.0	3.88	6.6	0.65	0.59	1.1000	1.0507	+4.70
G2-1	3.4	8.38	5.7	2.47	0.48	1.6765	1.6390	+2.29
G2-2	4.8	8.73	6.8	1.82	0.46	1.4167	1.3865	+2.18
G2-3	6.0	8.87	8.2	1.48	0.45	1.3667	1.2515	+9.20
G3-1	3.4	12.13	6.1	3.57	0.41	1.7941	1.7358	+3.36
G3-2	4.8	12.33	7.1	2.57	0.40	1.4792	1.4871	-0.54
G3-3	6.0	12.30	8.2	2.05	0.40	1.3667	1.3548	+0.88
G4-1	3.4	15.07	6.6	4.43	0.36	1.9412	1.7507	+10.88
G4-2	4.8	15.20	7.6	3.17	0.36	1.5833	1.5057	+5.15
G4-3	6.0	15.25	9.0	2.54	0.36	1.5000	1.3675	+9.69
G5-1	3.4	17.67	6.6	5.20	0.34	1.9412	1.8029	+7.67
G5-1	4.8	17.92	7.0	3.73	0.33	1.4583	1.5465	-5.70
G5-3	6.0	17.65	8.6	2.94	0.34	1.4333	1.4178	+1.10
โดยที่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง = +10.11      มัธยฐาน = +8.75 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 10.14      ช่วงของข้อมูล -5.70 ถึง +37.24								

(\*) ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ของลักษณะผิวเรียบ จากสมการ 5.4



รูป 5-6 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของลักษณะผิวตอม่อ #400 กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบที่ได้จากสมการ 5.4



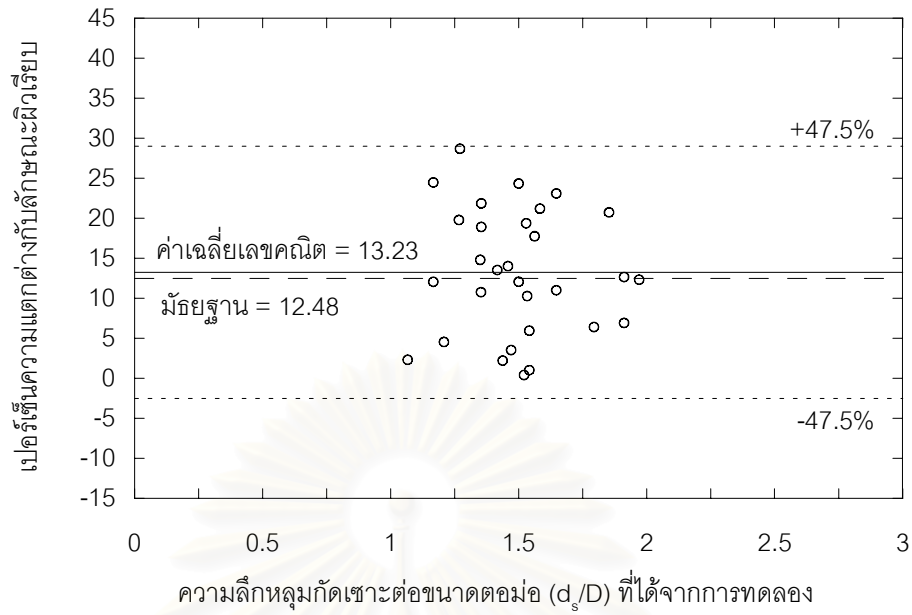
รูป 5-7 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของผิว #400 กับผิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน

ตาราง 5-3 แสดงความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นเปอร์เซ็นต์

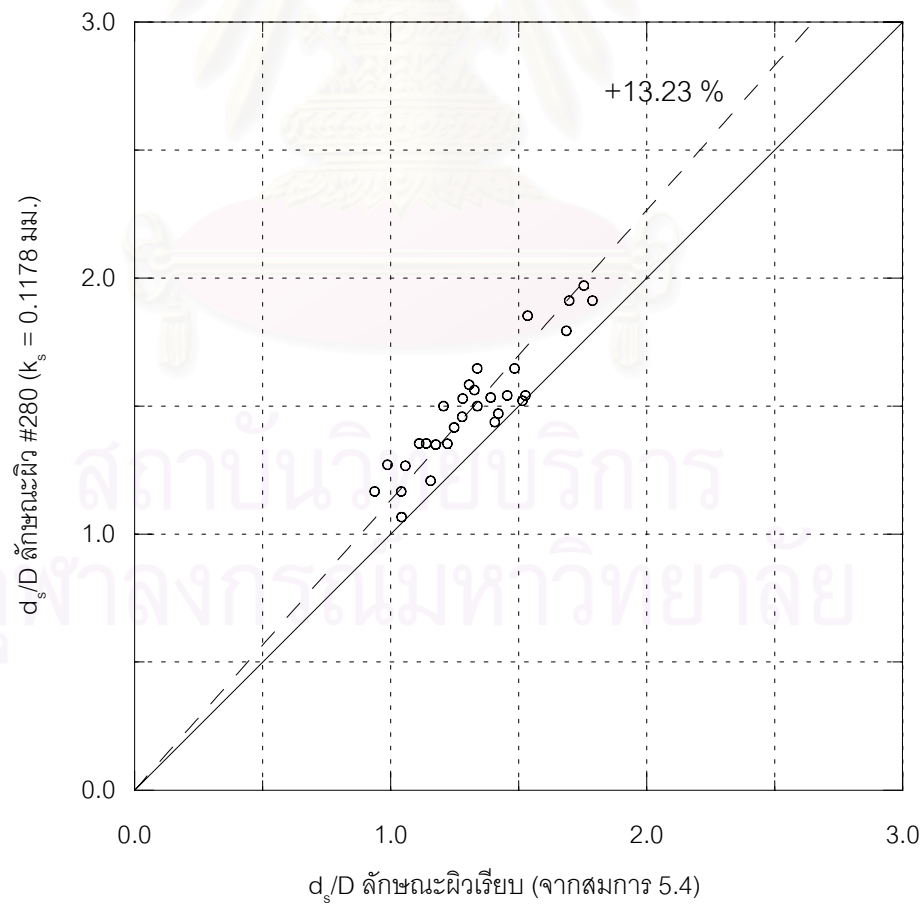
ของลักษณะผิวตอม่อเป็นกระดาศทรายเบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178 \text{ mm}$ ) กับลักษณะผิวเรียบ

Run No	D (cm)	y (cm)	$d_s$ (cm)	y/D	Fr	$d_s/D$		เปอร์เซ็นต์ เพิ่ม (+) / ลด (-)
						การทดลอง	ผิวเรียบ (*)	
C1-1	3.4	2.78	4.6	0.82	0.64	1.3529	1.2215	+10.76
C1-2	4.8	3.17	6.1	0.66	0.53	1.2708	0.9875	+28.69
C1-3	6.0	2.92	7.0	0.49	0.60	1.1667	0.9372	+24.48
C2-1	3.4	4.42	5.2	1.30	0.50	1.5294	1.2813	+19.37
C2-2	4.8	4.38	6.5	0.91	0.51	1.3542	1.1113	+21.85
C2-3	6.0	4.02	7.6	0.67	0.58	1.2667	1.0575	+19.78
C3-1	3.4	11.85	5.6	3.49	0.28	1.6471	1.3380	+23.10
C3-2	4.8	12.20	6.5	2.54	0.27	1.3542	1.1388	+18.91
C3-3	6.0	12.05	6.4	2.01	0.27	1.0667	1.0426	+2.31
C4-1	3.4	11.97	6.3	3.52	0.34	1.8529	1.5348	+20.73
C4-2	4.8	11.95	7.5	2.49	0.34	1.5625	1.3270	+17.75
C4-3	6.0	11.97	9.0	1.99	0.34	1.5000	1.2063	+24.35
C5-1	3.4	15.58	5.6	4.58	0.27	1.6471	1.4838	+11.00
C5-2	4.8	15.65	7.0	3.26	0.27	1.4583	1.2792	+14.01
C5-3	6.0	15.33	8.1	2.56	0.28	1.3500	1.1760	+14.80
H1-1	3.4	3.78	5.0	1.11	0.66	1.4706	1.4206	+3.52
H1-2	4.8	4.25	5.8	0.89	0.55	1.2083	1.1560	+4.53
H1-3	6.0	4.33	7.0	0.72	0.54	1.1667	1.0412	+12.05
H2-1	3.4	7.93	6.1	2.33	0.53	1.7941	1.6862	+6.40
H2-2	4.8	8.49	6.9	1.77	0.47	1.4375	1.4066	+2.20
H2-3	6.0	8.92	8.5	1.49	0.44	1.4167	1.2479	+13.52
H3-1	3.4	11.88	6.7	3.50	0.43	1.9706	1.7546	+12.31
H3-2	4.8	11.90	7.3	2.48	0.43	1.5208	1.5148	+0.40
H3-3	6.0	13.20	9.5	2.20	0.36	1.5833	1.3064	+21.20
H4-1	3.4	14.65	6.5	4.31	0.35	1.9118	1.6971	+12.65
H4-2	4.8	14.87	7.4	3.10	0.34	1.5417	1.4552	+5.94
H4-3	6.0	14.55	9.0	2.43	0.35	1.5000	1.3386	+12.06
H5-1	3.4	15.95	6.5	4.69	0.36	1.9118	1.7882	+6.91
H5-2	4.8	16.33	7.4	3.40	0.35	1.5417	1.5261	+1.02
H5-3	6.0	16.28	9.2	2.71	0.35	1.5333	1.3906	+10.27
โดยที่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง = +13.23      มัธยฐาน = +12.48 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 7.89      ช่วงของข้อมูล +0.40 ถึง +28.69								

(\*) ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ของลักษณะผิวเรียบ จากสมการ 5.4



รูป 5-8 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของลักษณะผิวตอม่อ #280 กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบที่ได้จากสมการ 5.4



รูป 5-9 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของผิว #280 กับผิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน

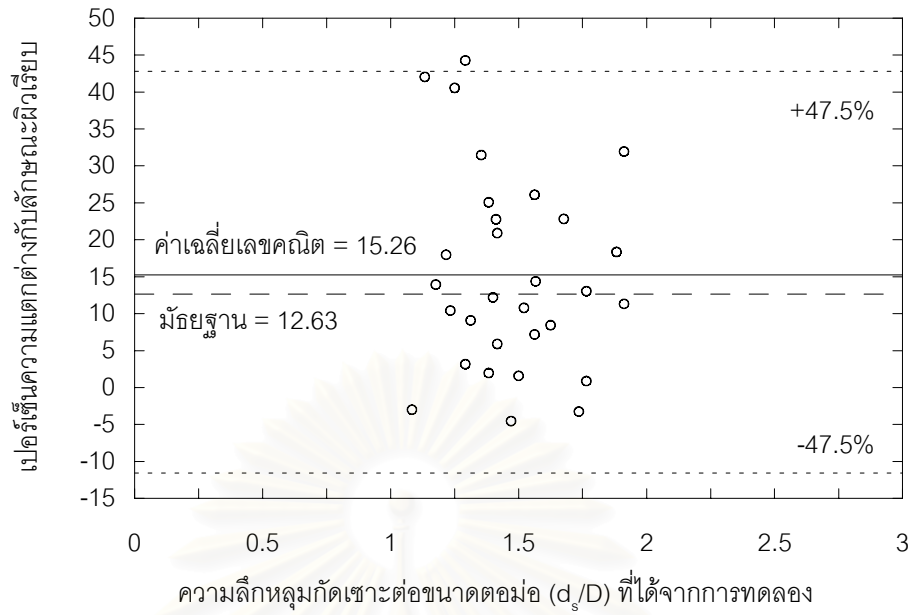
ตาราง 5-4 แสดงความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นเปอร์เซ็นต์

ของลักษณะผิวตอม่อเป็นกระดาดทรายเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416 \text{ mm}$ ) กับลักษณะผิวเรียบ

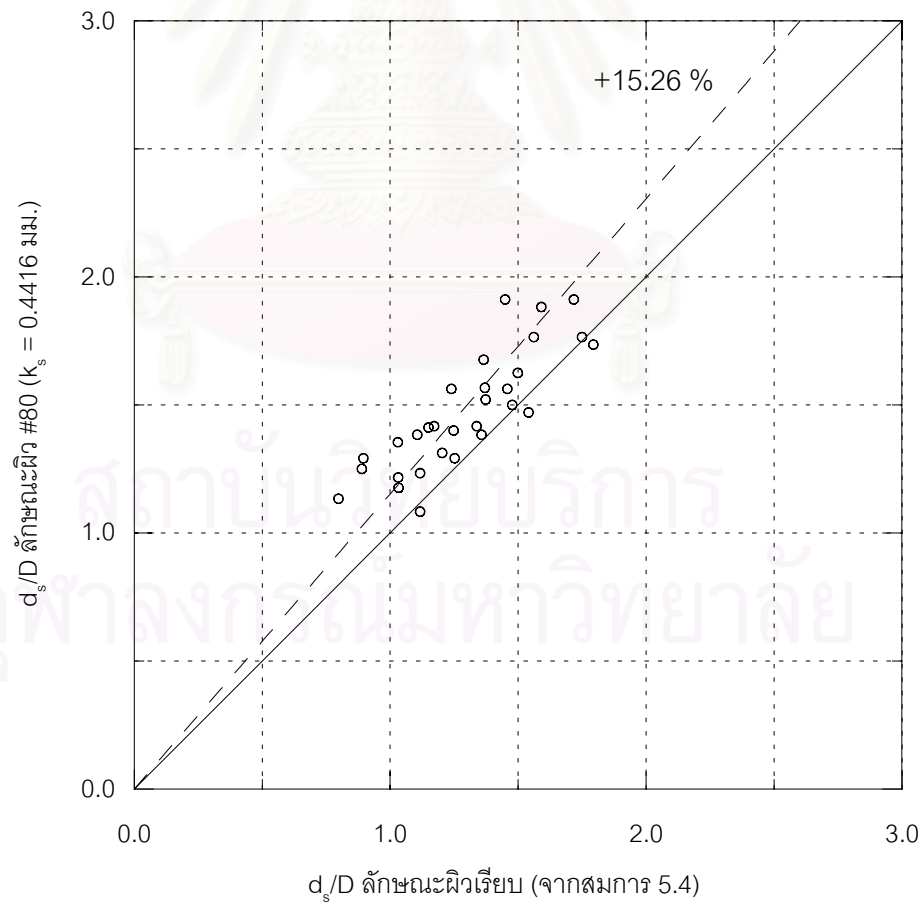
Run No	D (cm)	y (cm)	$d_s$ (cm)	y/D	Fr	$d_s/D$		เปอร์เซ็นต์ เพิ่ม (+) / ลด (-)
						การทดลอง	ผิวเรียบ (*)	
D1-1	3.4	2.47	4.0	0.73	0.53	1.1765	1.0326	+13.94
D1-2	4.8	2.45	6.2	0.51	0.54	1.2917	0.8952	+44.28
D1-3	6.0	2.55	6.8	0.43	0.50	1.1333	0.7978	+42.06
D2-1	3.4	4.18	4.8	1.23	0.44	1.4118	1.1499	+22.78
D2-2	4.8	3.90	6.5	0.81	0.49	1.3542	1.0300	+31.47
D2-3	6.0	4.32	7.5	0.72	0.42	1.2500	0.8893	+40.56
D3-1	3.4	10.68	5.7	3.14	0.31	1.6765	1.3649	+22.83
D3-2	4.8	10.82	6.8	2.25	0.30	1.4167	1.1717	+20.90
D3-3	6.0	11.53	7.3	1.92	0.27	1.2167	1.0313	+17.97
D4-1	3.4	13.38	6.5	3.94	0.29	1.9118	1.4489	+31.95
D4-2	4.8	13.65	7.5	2.84	0.28	1.5625	1.2391	+26.10
D4-3	6.0	14.17	8.3	2.36	0.27	1.3833	1.1059	+25.09
D5-1	3.4	18.38	6.4	5.41	0.27	1.8824	1.5904	+18.36
D5-2	4.8	18.42	7.3	3.84	0.27	1.5208	1.3728	+10.79
D5-3	6.0	18.45	8.4	3.08	0.27	1.4000	1.2477	+12.21
I1-1	3.4	3.53	5.0	1.04	0.79	1.4706	1.5407	-4.55
I1-2	4.8	4.30	6.3	0.90	0.59	1.3125	1.2031	+9.09
I1-3	6.0	4.13	7.4	0.69	0.62	1.2333	1.1170	+10.42
I2-1	3.4	7.83	6.0	2.30	0.47	1.7647	1.5610	+13.05
I2-2	4.8	9.05	6.2	1.89	0.38	1.2917	1.2520	+3.17
I2-3	6.0	9.40	6.5	1.57	0.36	1.0833	1.1169	-3.01
I3-1	3.4	11.85	5.9	3.49	0.44	1.7353	1.7938	-3.26
I3-2	4.8	12.65	7.8	2.64	0.40	1.6250	1.4985	+8.44
I3-3	6.0	12.53	9.4	2.09	0.41	1.5667	1.3698	+14.38
I4-1	3.4	14.32	6.5	4.21	0.36	1.9118	1.7173	+11.32
I4-2	4.8	14.82	7.5	3.09	0.34	1.5625	1.4577	+7.19
I4-3	6.0	14.57	8.5	2.43	0.35	1.4167	1.3378	+5.90
I5-1	3.4	17.67	6.0	5.20	0.32	1.7647	1.7494	+0.87
I5-2	4.8	18.48	7.2	3.85	0.30	1.5000	1.4767	+1.58
I5-3	6.0	18.13	8.3	3.02	0.31	1.3833	1.3567	+1.97
โดยที่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง = +15.26      มัธยฐาน = +12.63 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 13.41      ช่วงของข้อมูล -4.55 ถึง +44.28								

(\*) ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) ของลักษณะผิวเรียบ จากสมการ 5.4





รูป 5-10 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของลักษณะผิวตอม่อ #80 กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบที่ได้จากสมการ 5.4



รูป 5-11 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อของผิว #80 กับผิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน

### 5.3 ผลของความขรุขระของผิวต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

ความขรุขระของผิวต่อมามีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ เมื่อพิจารณาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม (d<sub>s</sub>/D) กับความลึกการไหลต่อขนาดต่อม (y/D) และเพื่อเป็นการง่ายในการวิเคราะห์เบื้องต้น จึงได้ละอิทธิพลของค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (Fr) และจะได้ว่าเมื่อความขรุขระของผิวต่อมเพิ่มขึ้น จะทำให้เส้นกราฟที่ได้ยกตัวสูงขึ้น หรือความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม (d<sub>s</sub>/D) มากขึ้นเฉลี่ย 8%, 15% และ 19% สำหรับค่าความขรุขระ (k<sub>s</sub>) เป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. ตามลำดับ โดยแยกพิจารณาในกรณีที่สุดต่อน้ำเป็นทรายปานกลาง, ทรายหยาบ และพิจารณารวมทั้งทรายปานกลางและทรายหยาบ ดังนี้

5.3.1 ผลของความขรุขระของผิวต่อม ต่อความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีที่สุดต่อน้ำเป็นทรายขนาดปานกลาง และทรายหยาบ

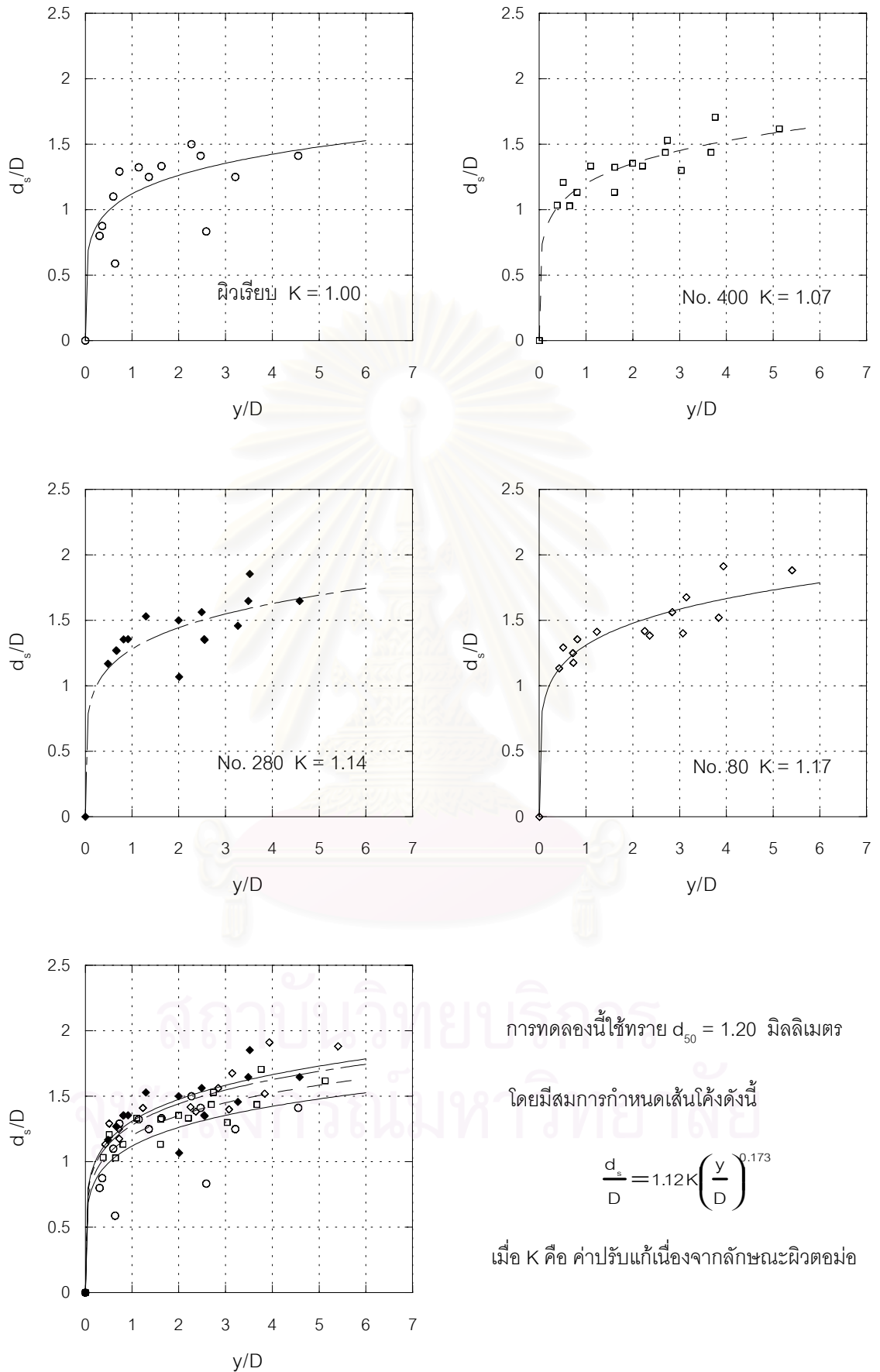
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม (d<sub>s</sub>/D) และอัตราส่วนของความลึกการไหลต่อขนาดต่อม (y/D) ของกรณีที่สุดต่อน้ำเป็นทรายขนาดปานกลาง และทรายหยาบตามลำดับ ดังรูป 5-12 และ 5-13 โดยแยกลักษณะผิวของต่อมเป็นผิวเรียบ, ผิวที่เป็นกระดาศทรายเบอร์ 400 (k<sub>s</sub> = 0.0883 มม.), ผิวที่เป็นกระดาศทรายเบอร์ 280 (k<sub>s</sub> = 0.1178 มม.) และผิวที่เป็นกระดาศทรายเบอร์ 80 (k<sub>s</sub> = 0.4416 มม.) และทุกผิวในรูปเดียวกันทำการวิเคราะห์โดยการพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ (graphical method) จะเห็นว่าเส้นกราฟจะยกตัวสูงขึ้นเมื่อค่าความขรุขระของผิวมากขึ้นตามลำดับ และทำการหาสมการกำหนดเส้นกราฟของลักษณะผิวต่าง ๆ ได้ดังสมการ 5.5 และ 5.6 สำหรับที่สุดต่อน้ำเป็นทรายปานกลาง (d<sub>50</sub> = 1.20 มม.) และทรายหยาบ (d<sub>50</sub> = 2.20 มม.)

$$\frac{d_s}{D} = 1.12K \left( \frac{y}{D} \right)^{0.173} \quad (5.5)$$

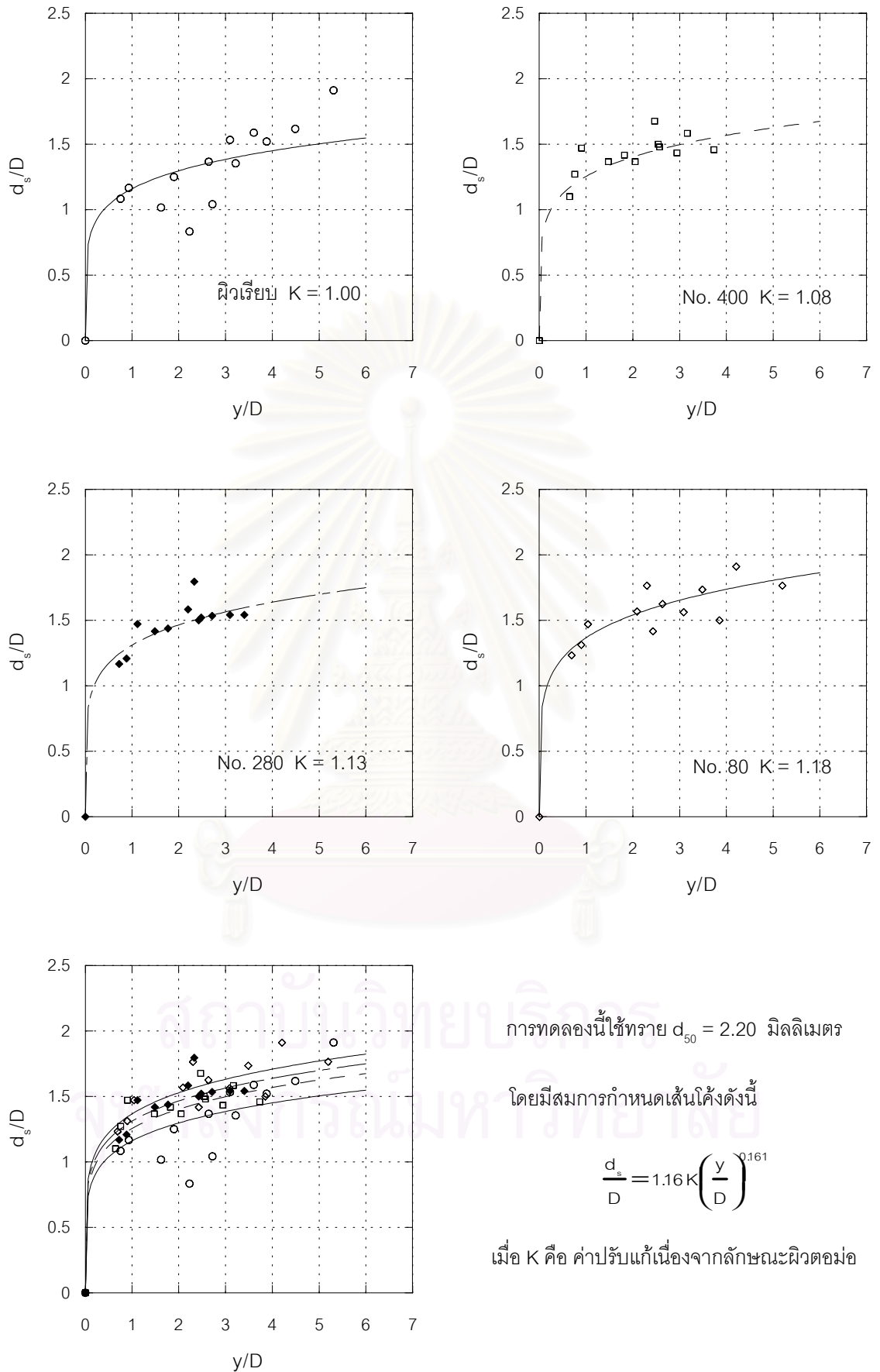
$$\frac{d_s}{D} = 1.16K \left( \frac{y}{D} \right)^{0.161} \quad (5.6)$$

โดยที่ K คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะของผิวต่อม ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อความขรุขระของผิวต่อมเพิ่มขึ้นดังแสดงในตาราง 5-5

สมการ 5.5 และ 5.6 ซึ่งเป็นสมการของทรายปานกลางและทรายหยาบ มีค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของที่สุดต่อน้ำมีอิทธิพลต่อขนาดของความลึกหลุมกัดเซาะน้อย เมื่อเทียบกับอิทธิพลของขนาดต่อมและความลึกการไหล



รูป 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม่อ กับ ความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อ เมื่อแยกตามลักษณะผิวต่อม่อต่าง ๆ ในกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดปานกลาง



รูป 5-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับ ความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ เมื่อแยกตามลักษณะผิวตอม่อต่าง ๆ ในกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดหยาบ

ตาราง 5-5 ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะของผิวตอม่อ (K)

ลักษณะผิว	$k_s$ (mm)	K	
		ทรายปานกลาง	ทรายหยาบ
ผิวเรียบ	-	1.00	1.00
No. 400	0.0883	1.07	1.08
No. 280	0.1178	1.14	1.13
No. 80	0.4416	1.17	1.18

จากกราฟที่ได้แสดงไว้แล้ว จะเห็นว่าเมื่อความขรุขระของผิวตอม่อเปลี่ยนไป สมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) ก็เปลี่ยนไป โดยสามารถใช้ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะผิวตอม่อ (K) คูณกับสมการของผิวเรียบ เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ของผิวนั้น ๆ ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อลักษณะผิวตอม่อมีค่าความขรุขระมากขึ้น ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะผิวตอม่อ (K) จะเพิ่มมากขึ้นด้วย นั่นคือความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 7.5%, 13.5% และ 17.5% สำหรับค่าความขรุขระ ( $k_s$ ) เป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. ตามลำดับ ดังนั้นลักษณะผิวของตอม่อจะมีอิทธิพลความลึกหลุมกัดเซาะ

กำหนด  $D_e$  คือ ขนาดตอม่อประสิทธิภาพ (effective diameter) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของตอม่อผิวขรุขระ ซึ่งให้ขนาดความลึกหลุมกัดเซาะเท่ากับลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบที่สภาวะการไหลเดียวกัน และให้

$$D_e = k D \quad (5.7)$$

เมื่อ  $D_e$  คือ ขนาดตอม่อประสิทธิภาพ (effective diameter)

$k$  คือ ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (แสดงรายละเอียดการหาค่า  $k$  ในภาคผนวก ค)

สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) โดยใช้ขนาดตอม่อประสิทธิภาพ ( $D_e$ ) แทนขนาดตอม่อ ( $D$ ) เพื่อให้สมการสามารถใช้ได้กับทุกลักษณะผิว จะได้สมการใหม่ของกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายปานกลาง ( $d_{50} = 1.20$  มม.) และทรายหยาบ ( $d_{50} = 2.20$  มม.) ได้ใหม่ดังสมการ 5.8 และ 5.9

$$\frac{d_s}{D_e} = 1.12 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{0.173} \quad (5.8)$$

$$\frac{d_s}{D_e} = 1.16 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{0.161} \quad (5.9)$$

ตาราง 5-6 ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) กับลักษณะผิวต่าง ๆ

ลักษณะผิว	$k_s$ (mm)	k	
		ทรายปานกลาง	ทรายหยาบ
ผิวเรียบ	-	1.00	1.00
No. 400	0.0883	1.09	1.10
No. 280	0.1178	1.17	1.16
No. 80	0.4416	1.21	1.22

ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) เพิ่มขึ้นเมื่อความขรุขระของผิวต่อม่อเพิ่มมากขึ้น (ตาราง 5-6) หรือเสมือนว่าขนาดของต่อม่อนั้นใหญ่ขึ้นเมื่อความขรุขระของผิวมากขึ้น และจะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้น โดยต่อม่อมีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 9.5%, 16.5% และ 21.5% สำหรับค่าความขรุขระ ( $k_s$ ) เป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. ตามลำดับ ตามความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับขนาดต่อม่อดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นความขรุขระของผิวต่อม่อจึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของหลุมกัดเซาะไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อความขรุขระของผิวต่อม่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น

5.3.2 ผลของความขรุขระของผิวต่อม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะ เมื่อนำกรณีที่ใช้ทรายขนาดปานกลางและทรายหยาบ มาพิจารณารวมกัน

จากตาราง 5.6 ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) ของทรายปานกลางและทรายหยาบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) ขึ้นกับขนาดต่อม่อ (D), ความลึกการไหล (y) และความขรุขระของผิวต่อม่อ ( $k_s$ ) โดยที่ขนาดของวัสดุท้องน้ำมีอิทธิพลน้อย ดังนั้นจึงพิจารณารวมระหว่างทรายปานกลางและทรายหยาบ โดยผลของวัสดุท้องน้ำ

รูป 5-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม่อ ( $d_s/D$ ) และอัตราส่วนของความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อ ( $y/D$ ) โดยแยกลักษณะผิวของต่อ

ม่อเป็นผิวเรียบ, ผิวที่เป็นกระดาษทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.), เบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.) และเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416$  มม.) และนำมาแสดงไว้ในรูปเดียวกันตามลำดับ โดยเส้นกราฟที่ได้จะยกตัวสูงขึ้นเมื่อความขรุขระของผิวตอม่อมากขึ้น หรือความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) มากขึ้น 8%, 15% และ 19% สำหรับค่าความขรุขระ ( $k_s$ ) เป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม.

จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ทำการหาสมการเพื่อกำหนดเส้นกราฟของลักษณะผิวตอม่อต่าง ๆ ได้ดังสมการ 5.10

$$\frac{d_s}{D} = 1.15K \left( \frac{y}{D} \right)^{0.156} \quad (5.10)$$

โดยที่ K คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะของผิวตอม่อ แสดงไว้ดังตาราง 5-7

ตาราง 5-7 ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะของผิวตอม่อ (K)

ลักษณะผิว	$k_s$ (mm)	K
ผิวเรียบ	-	1.00
No. 400	0.0883	1.08
No. 280	0.1178	1.15
No. 80	0.4416	1.19

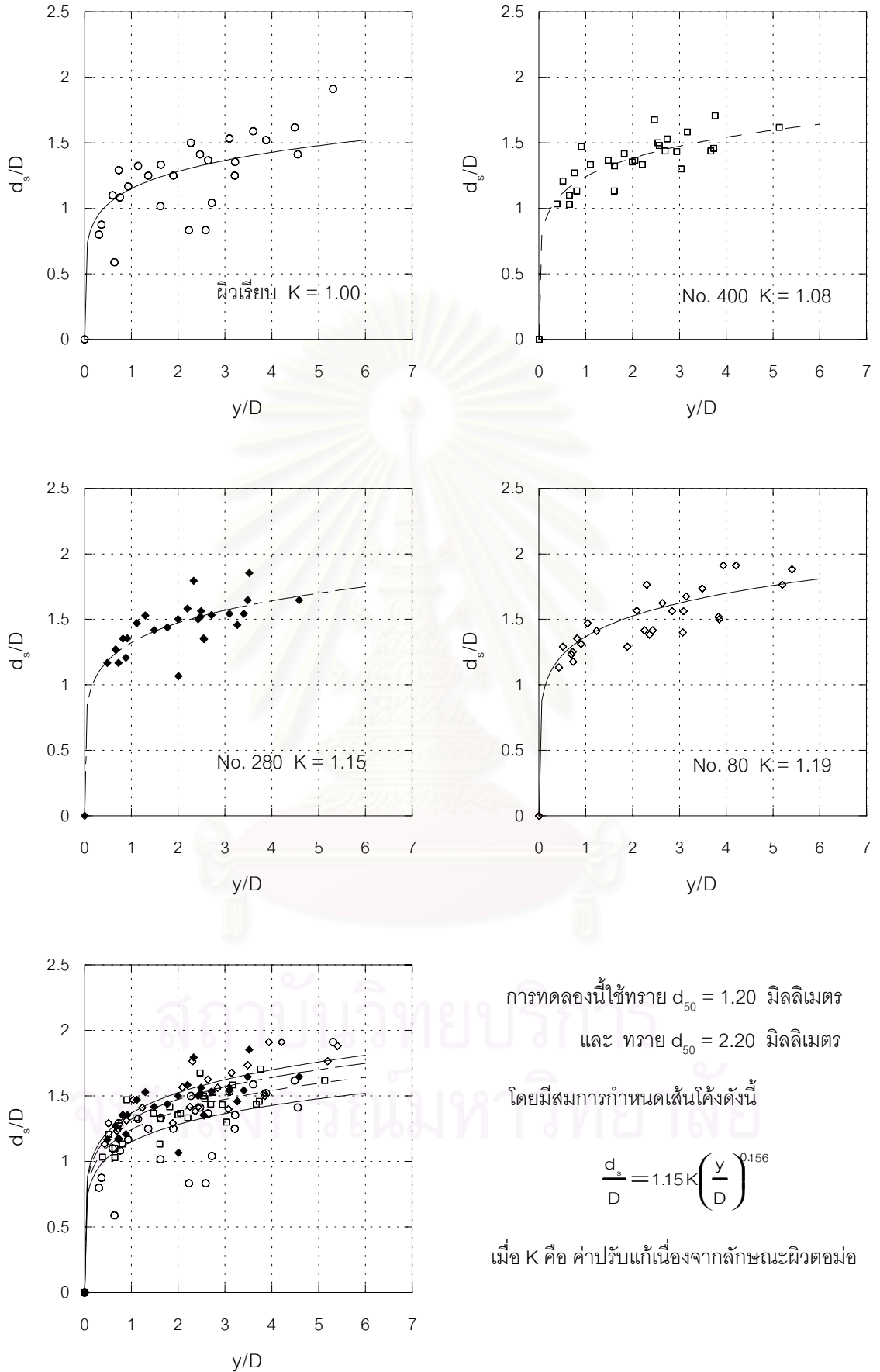
เมื่อพิจารณาเป็นขนาดตอม่อประสิทธิผล (effective diameter,  $D_e = kD$ ) จะได้สมการ 5.10 ใหม่ดังสมการ 5.11

$$\frac{d_s}{D_e} = 1.15 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{0.156} \quad (5.11)$$

โดยที่ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดของตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) แสดงไว้ดังตาราง 5-8 (แสดงรายละเอียดการหาค่า k ในภาคผนวก ค)

ตาราง 5-8 ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) กับลักษณะผิวต่าง ๆ

ลักษณะผิว	$k_s$ (mm)	k
ผิวเรียบ	-	1.00
No. 400	0.0883	1.10
No. 280	0.1178	1.18
No. 80	0.4416	1.23



รูป 5-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ กับ ความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ  
เมื่อแยกตามลักษณะผิวตอม่อต่าง ๆ



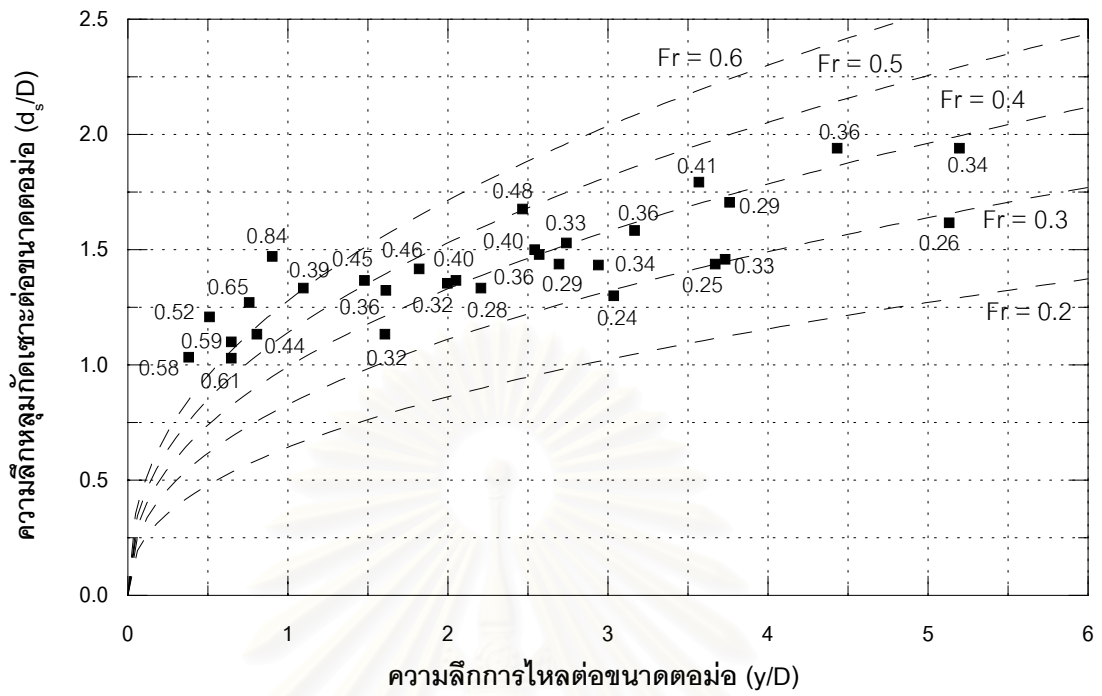
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้ทรายขนาดปานกลางเป็นวัสดุท้องน้ำ และใช้ทรายหยาบเป็นวัสดุท้องน้ำ และเมื่อรวมข้อมูลทั้งสองชุดเข้าด้วยกัน ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดของผิวต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) มีค่าใกล้เคียงกัน และสมการที่กำหนดความสัมพันธ์ในแต่ละกรณีก็มีแนวโน้มที่เหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดวัสดุท้องน้ำ ( $d_{50}$ ) มีอิทธิพลกับหลุมกักเซาะน้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของขนาดต่อม่อ ( $D$ ), ความลึกการไหล ( $y$ ) และความขรุขระของผิวต่อม่อ ( $k_s$ )

จากที่กล่าวมาแล้ว เมื่อลักษณะผิวของต่อม่อเปลี่ยนไป จะทำให้ความลึกหลุมกักเซาะมีค่าเท่ากับความลึกหลุมกักเซาะที่ได้จากลักษณะผิวต่อม่อแบบผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดของต่อม่อที่ใหญ่ขึ้นนี้ คือขนาดต่อม่อประสิทธิผล (effective diameter,  $D_e = kD$ ) นำขนาดต่อม่อประสิทธิผลไปใช้กับข้อมูลความลึกหลุมกักเซาะจากการทดลอง และทำการเปรียบเทียบสำหรับผิวต่อม่อขรุขระในกรณีที่ไม่ใช้ขนาดต่อม่อประสิทธิผล กับในกรณีที่ใช้ขนาดต่อม่อประสิทธิผล เมื่อผิวต่อม่อเป็นกระดาษทรายเบอร์ 400, เบอร์ 280 และเบอร์ 80 ตามลำดับ ดังรูป 5-15 ถึง 5-20 และทำการเขียนกราฟรวมของผิวต่อม่อทุกผิว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเซาะต่อขนาดต่อม่อประสิทธิผล ( $d_s/D_e$ ) และความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อประสิทธิผล ( $y/D_e$ ) แสดงไว้ดังรูป 5-21 ซึ่งจุดข้อมูลต่าง ๆ ของลักษณะผิวขรุขระ จะลดระดับลงมาอยู่ในระดับเดียวกับข้อมูลการทดลองของลักษณะผิวเรียบ

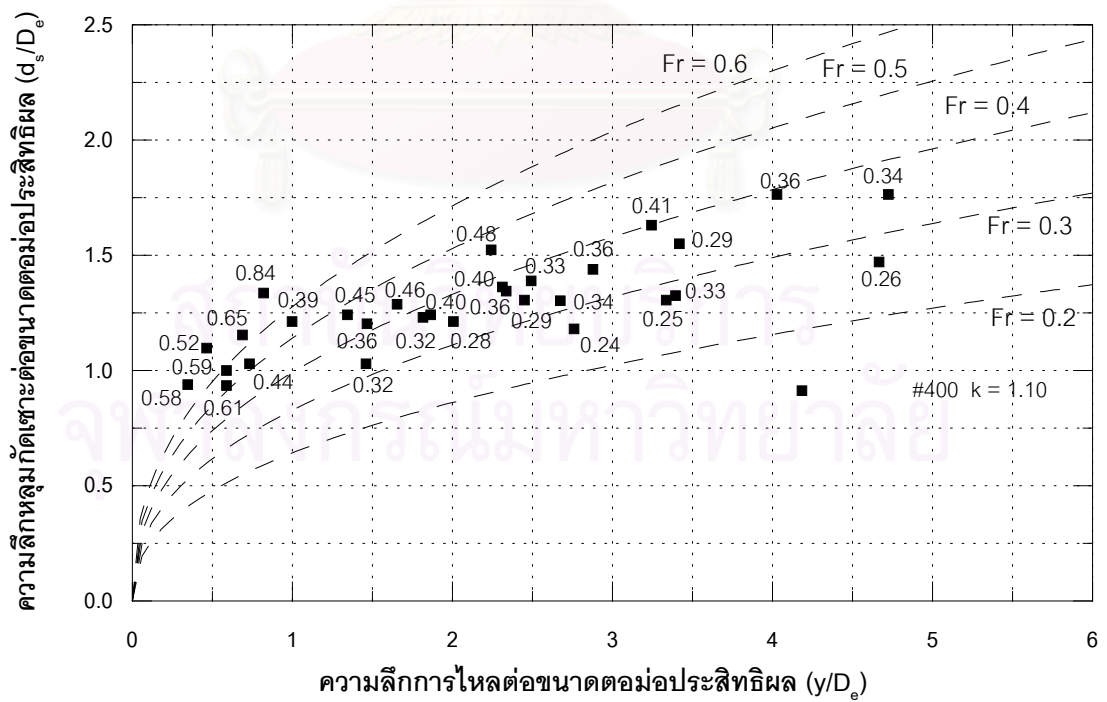
รูป 5-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกักเซาะต่อความลึกการไหล ( $d_s/y$ ) กับความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อประสิทธิผล ( $y/D_e$ ) ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองลักษณะผิวต่อม่อทั้งหมด และมีสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (non-linear regression) ดังสมการ 5.12 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r-squared) เป็น 0.96

$$\frac{d_s}{y} = 1.12 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{-0.826} \quad (5.12)$$

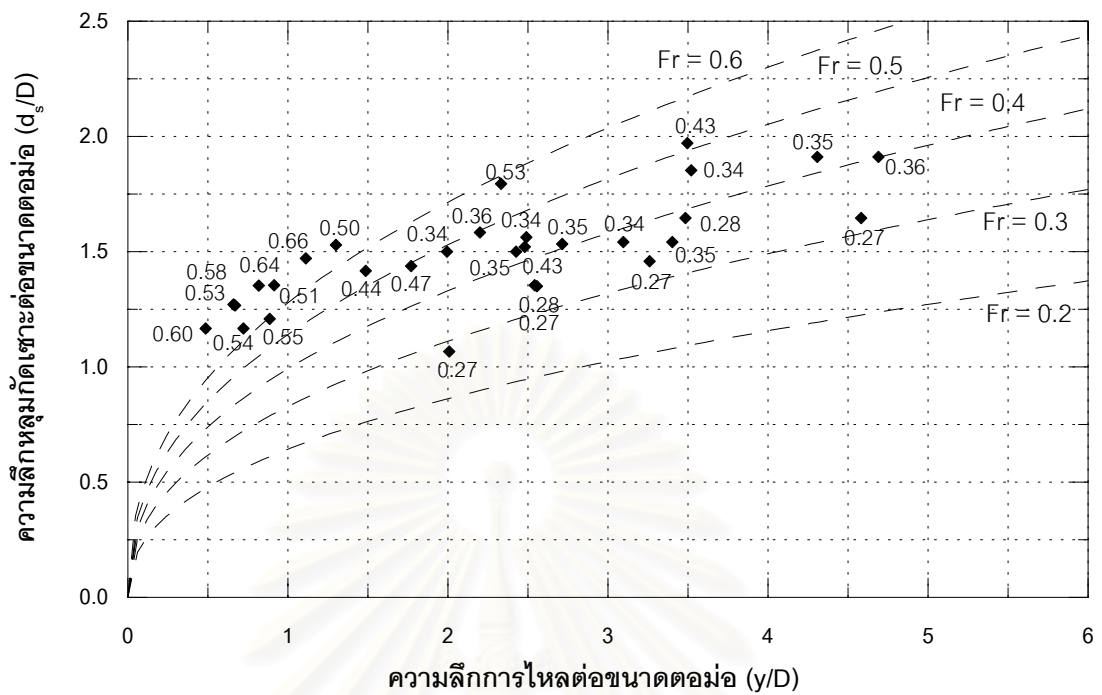
ดังนั้นค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) เมื่อนำไปใช้ปรับแก้ขนาดต่อม่อผิวขรุขระในการทดลองนี้ ทำให้พฤติกรรมของหลุมกักเซาะเป็นเหมือนลักษณะผิวต่อม่อแบบผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อค่าความขรุขระเป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. จะให้ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) เป็น 1.10, 1.18 และ 1.23 ตามลำดับ หรือเสมือนต่อม่อมีขนาดใหญ่ขึ้น 10, 18 และ 23 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือความขรุขระของผิวต่อม่อ ( $k_s$ ) จะมีอิทธิพลกับความลึกหลุมกักเซาะดังที่กล่าวมาแล้ว



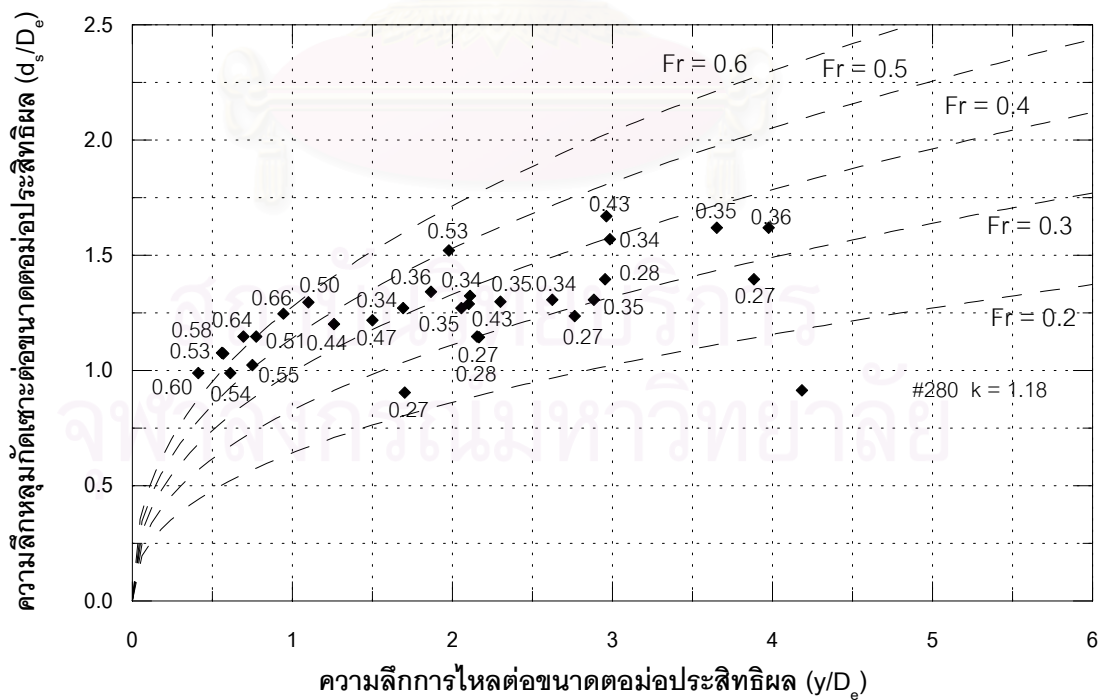
รูป 5-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม่อ  
กับความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อ ผิว #400



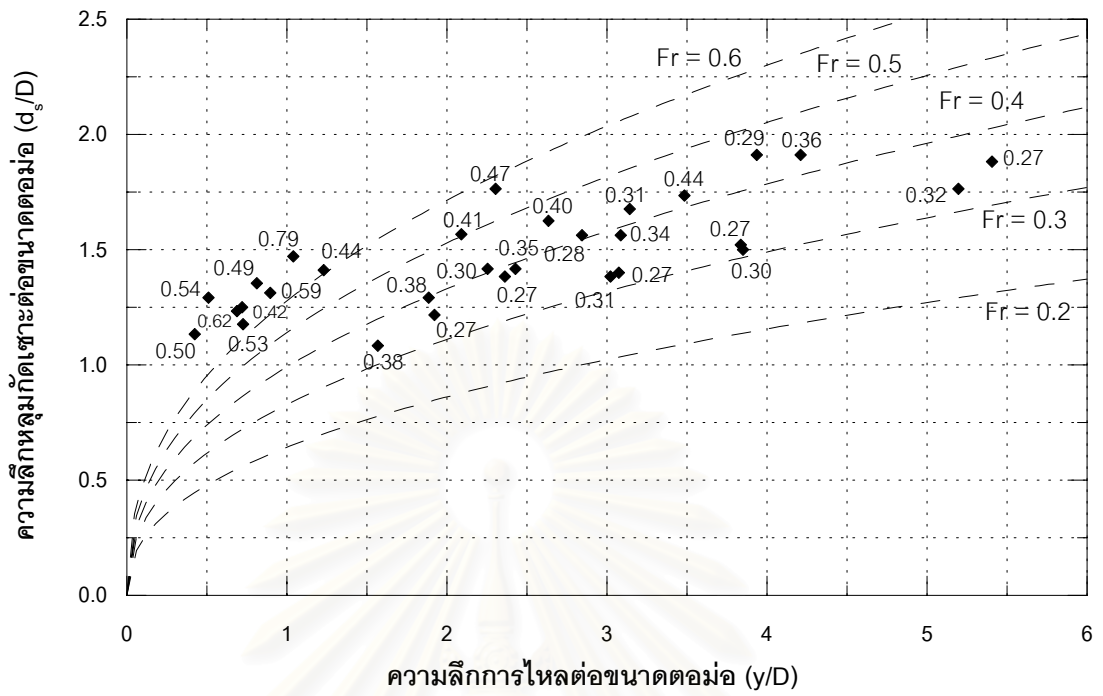
รูป 5-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม่อประสิทธิภาพ  
กับความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อประสิทธิภาพ ผิว #400



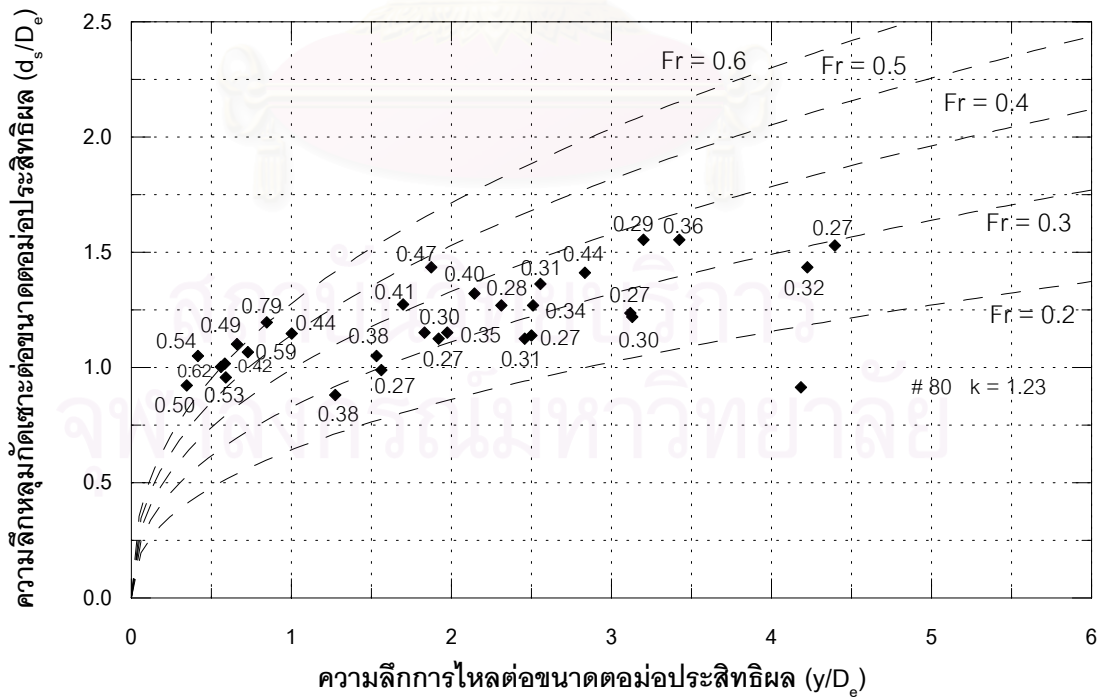
รูป 5-17 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกั้ดเซาะต่อขนาดตอม่อ  
กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ผิว #280



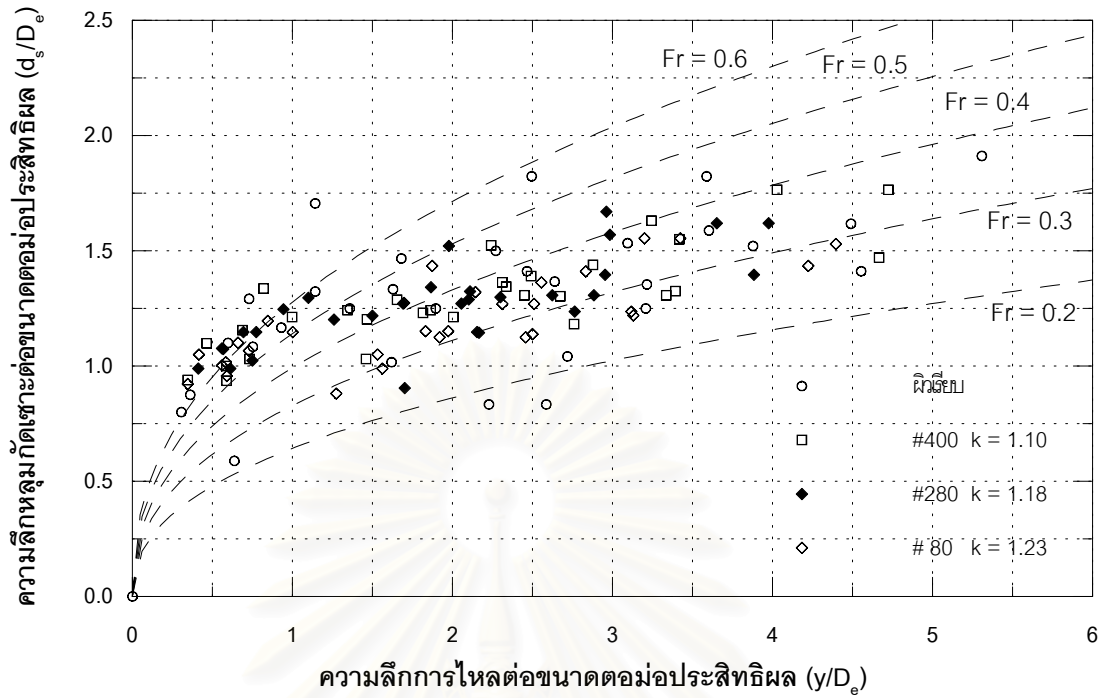
รูป 5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกั้ดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล  
กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล ผิว #280



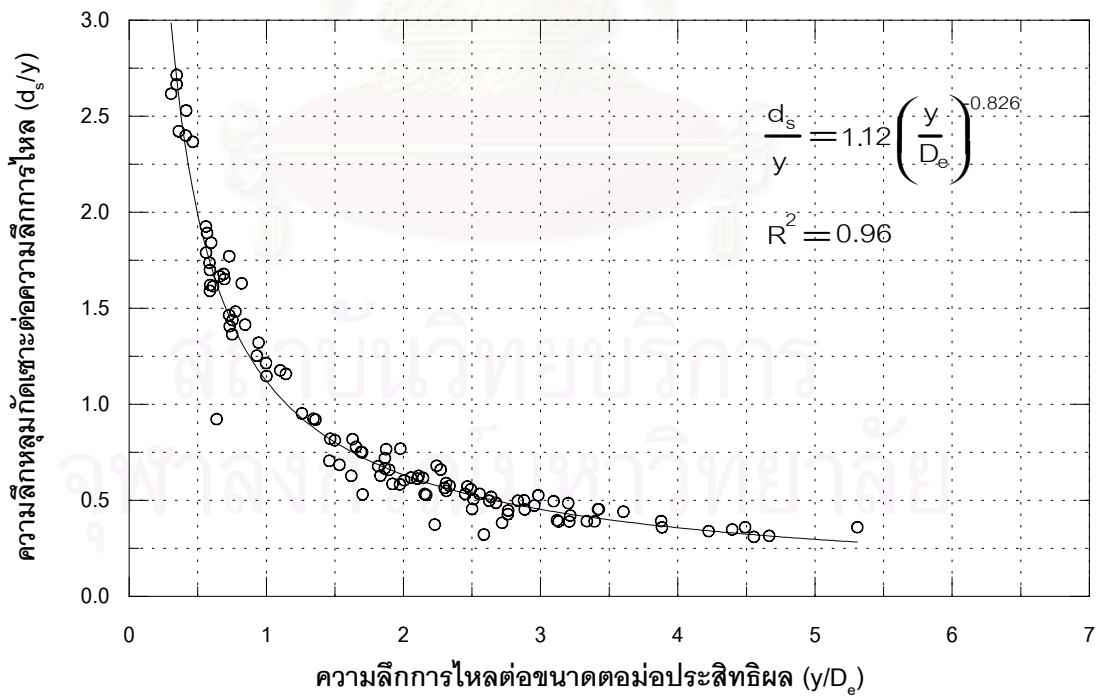
รูป 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ  
กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ผิว #80



รูป 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล  
กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล ผิว #80



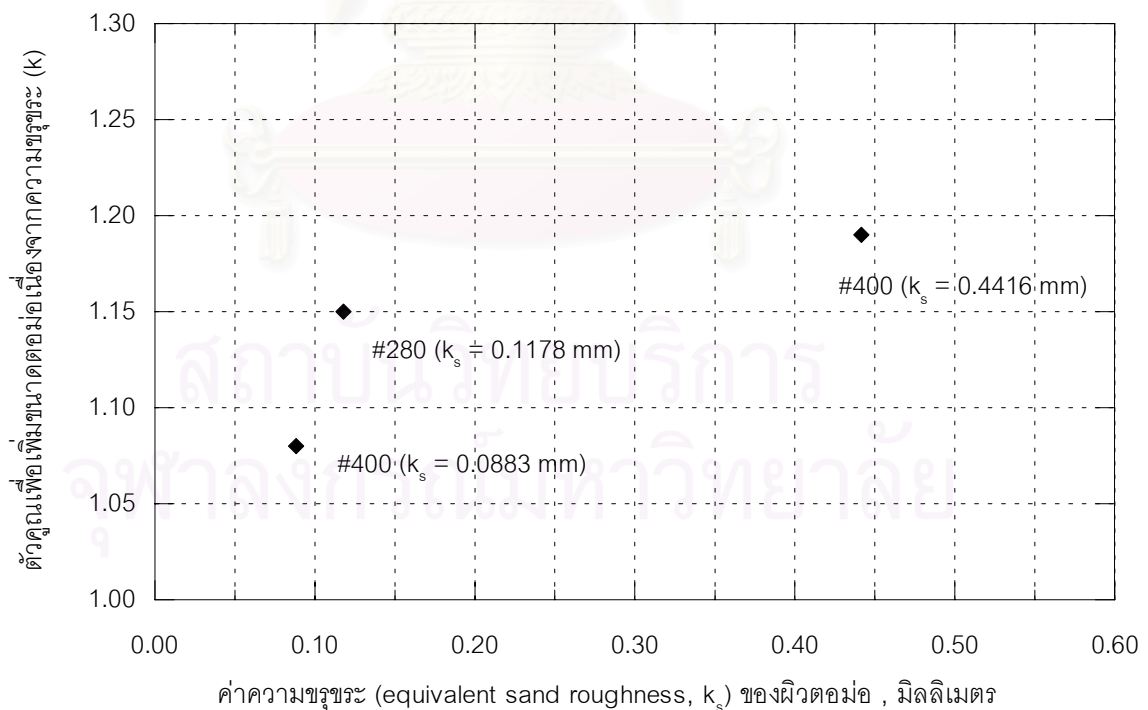
รูป 5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกลงกั้ดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล



รูป 5-22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกลงกั้ดเซาะต่อความลึกการไหล กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อประสิทธิผล

5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดของตอม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) และค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness,  $k_s$ ) ของผิวตอม่อ

ในหัวข้อ 5.3.2 ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อความขรุขระ ( $k_s$ ) ของผิวตอม่อเพิ่มขึ้นค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) จะเพิ่มขึ้นด้วย รูป 5-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log$  ของค่าความขรุขระ ( $k_s$ ) ของผิวตอม่อ กับค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) เนื่องจากการศึกษานี้ใช้ลักษณะผิวเรียบเปรียบเทียบกับลักษณะผิวจากกระดาษทราย 3 ลักษณะผิว ทำให้จำนวนจุดในกราฟมีเพียง 3 จุด ไม่เพียงพอต่อการอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งของสมการอย่างชัดเจนได้ อย่างไรก็ตาม ความลึกหลุมกัดเซาะ เมื่อลักษณะผิวตอม่อมีค่าความขรุขระอยู่ในช่วงของการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดของตอม่อ ( $k$ ) ที่เพิ่มขึ้นตามลักษณะความขรุขระของผิวที่เพิ่มขึ้น และในส่วนของการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะในช่วงความขรุขระที่ไม่ได้อยู่ในการศึกษานี้ ยังต้องอาศัยการทดลองและศึกษาเพิ่มเติมของท่านอื่นมาพิจารณาประกอบ



รูป 5-23 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดตอม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) และค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness) ของผิวตอม่อ

#### 5.4 ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อ (k) กับสมการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะอื่น ๆ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_{pe}$ ) ของลักษณะผิวต่อม่อแบบผิวเรียบ ดังแสดงในหัวข้อ 5.1 (สมการ 5.1) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับความขรุขระของผิวต่อม่ออื่น ๆ เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$d_s = 0.0048R_{pe}^{0.715} \quad (5.13)$$

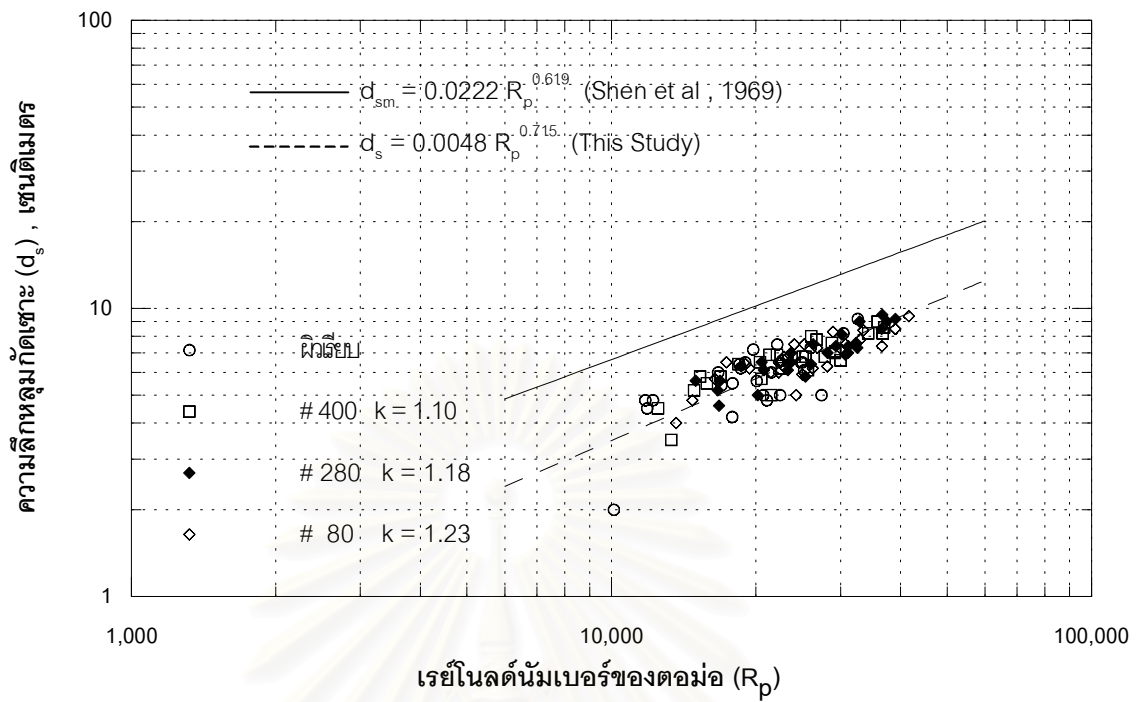
โดยที่  $d_s$  คือ ความลึกหลุมกัดเซาะ (เซนติเมตร),  $R_{pe}$  คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ซึ่งใช้ขนาดต่อม่อประสิทธิภาพ ( $R_{pe} = UD_e/\nu$ ,  $U$  คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที),  $D_e$  คือ ขนาดต่อม่อประสิทธิภาพ (เมตร) และ  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematic viscosity, เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_{pe}$ ) ดังรูป 5-24 จะเห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดต่อม่อเป็นขนาดต่อม่อประสิทธิภาพแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ได้ จะเหมือนกับความสัมพันธ์ของลักษณะผิวเรียบ ดังนั้นตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับความสัมพันธ์นี้ได้

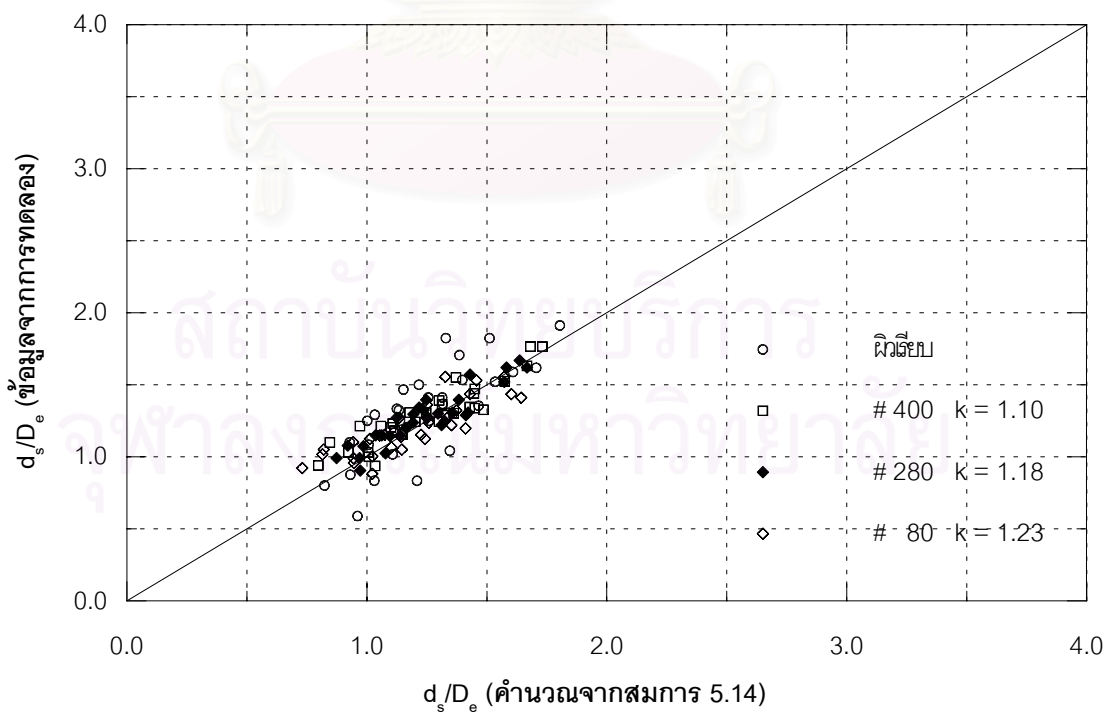
พิจารณาสมาการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ ของความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) กับความลึกการไหล ( $y$ ), ขนาดต่อม่อ ( $D$ ) และค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ 5.1 ในส่วนของลักษณะผิวต่อม่อแบบผิวเรียบ นำไปประยุกต์ใช้กับความขรุขระของผิวต่อม่ออื่น ๆ โดยการแทนค่าขนาดต่อม่อ ( $D$ ) ด้วยขนาดต่อม่อประสิทธิภาพ ( $D_e$ ) จะได้สมการใหม่ดังสมการ 5.14

$$\frac{d_s}{D_e} = 1.76 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{0.424} Fr^{0.626} \quad (5.14)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม่อประสิทธิภาพ ( $d_s/D_e$ ) ที่ได้จากสมการ 5.14 และที่ได้จากการทดลองของลักษณะผิวต่าง ๆ ได้ดังรูป 5-25 จากรูปจะเห็นว่า ความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี จึงสามารถนำค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) มาใช้กับสมการความสัมพันธ์นี้ได้



รูป 5-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ



รูป 5-25 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและจากสมการ 5.14



### 5.5 อิทธิพลของค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness) ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

ในการศึกษานี้ มุ่งเน้นเพื่อหาผลกระทบของความขรุขระของผิวต่อความลึกหลุมกัดเซาะ จากที่ได้เสนอสมการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะ ของลักษณะผิวต่อแบบผิวเรียบ จึงได้เพิ่มค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ ( $K$ ) ในสมการดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = 1.76K \left( \frac{y}{D} \right)^{0.424} Fr^{0.626} \quad (5.15)$$

กำหนดให้  $K$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ และให้เป็นความสัมพันธ์ของ ความขรุขระสัมพัทธ์ ( $k_s/D$ ) กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_p$ ) เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 5.16

$$K = f \left( \frac{k_s}{D}, R_p \right) \quad (5.16)$$

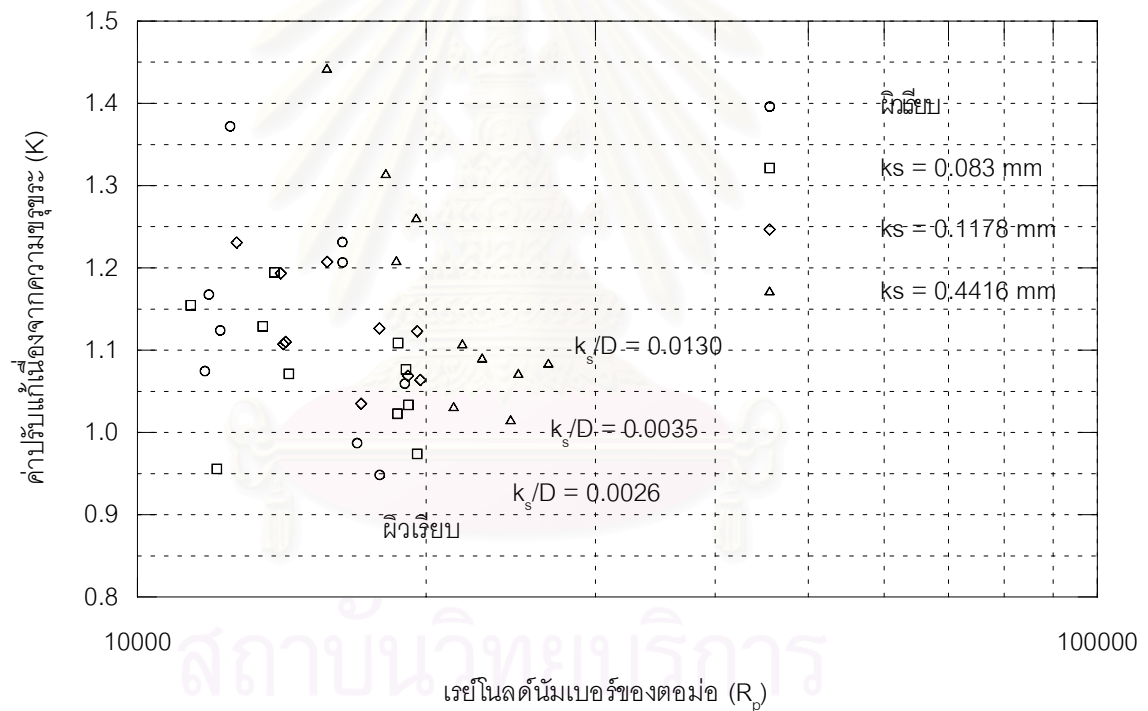
แสดงการคำนวณค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระจากสมการ 5.15 โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แยกตามค่าความขรุขระสัมพัทธ์ต่าง ๆ ในภาคผนวก ง. และค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระที่ได้บางค่าจะน้อยกว่า 1 ทั้งนี้เพราะเป็นการคำนวณจากสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าที่ได้จากสมการได้ อย่างไรก็ตามถือได้ว่าสมการดังกล่าวเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง

ทำการหาความสัมพันธ์โดยการเขียนกราฟ ระหว่างค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ ( $K$ ) กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_p$ ) โดยแยกตามความขรุขระสัมพัทธ์ของขนาดต่อม่อต่าง ๆ ดังรูป 5-26, 5-27 และ 5-28 ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณา ความสัมพันธ์ของความเร็วการไหล ( $U$ ) ในรูปของตัวแปรไร้มิติเรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_p$ ) และความขรุขระสัมพัทธ์ ( $k_s/D$ ) กับความลึกหลุมกัดเซาะในรูปของค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ ( $K$ ) จากรูปจะเห็นว่าเส้นกราฟมีการยกตัวสูงขึ้น ตามค่าความขรุขระสัมพัทธ์ที่มากขึ้นตามลำดับ

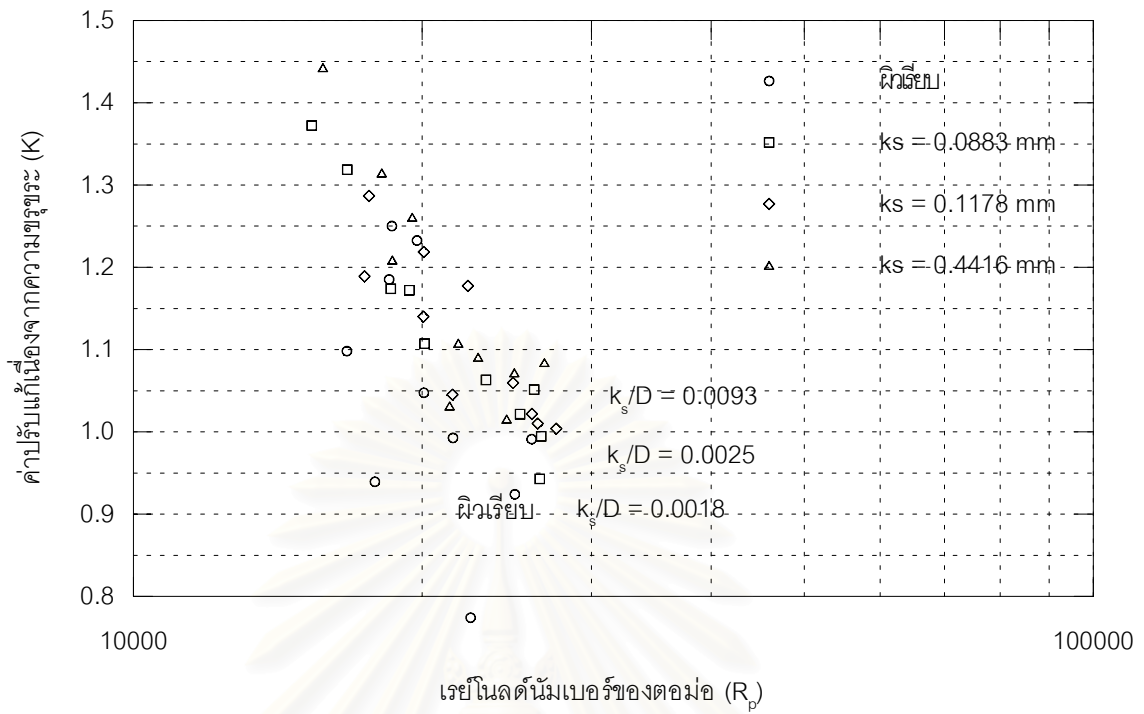
ดังนั้น ความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) จึงเป็นความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_p$ ) และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ( $k_s/D$ ) คือเมื่อค่าความขรุขระสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้น เนื่องจากลักษณะผิวต่อม่อที่เปลี่ยนไป จะทำให้พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านต่อม่อเปลี่ยนไปด้วย เพราะความขรุขระของต่อม่อมีผลต่อการกระจายความดันและความเร็ว

การไหล ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลหมุนวนบริเวณด้านหน้าตอม่อเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะของหลุมกักตะกาะจึงแตกต่างจากผิวตอม่อที่เป็นแบบผิวเรียบ

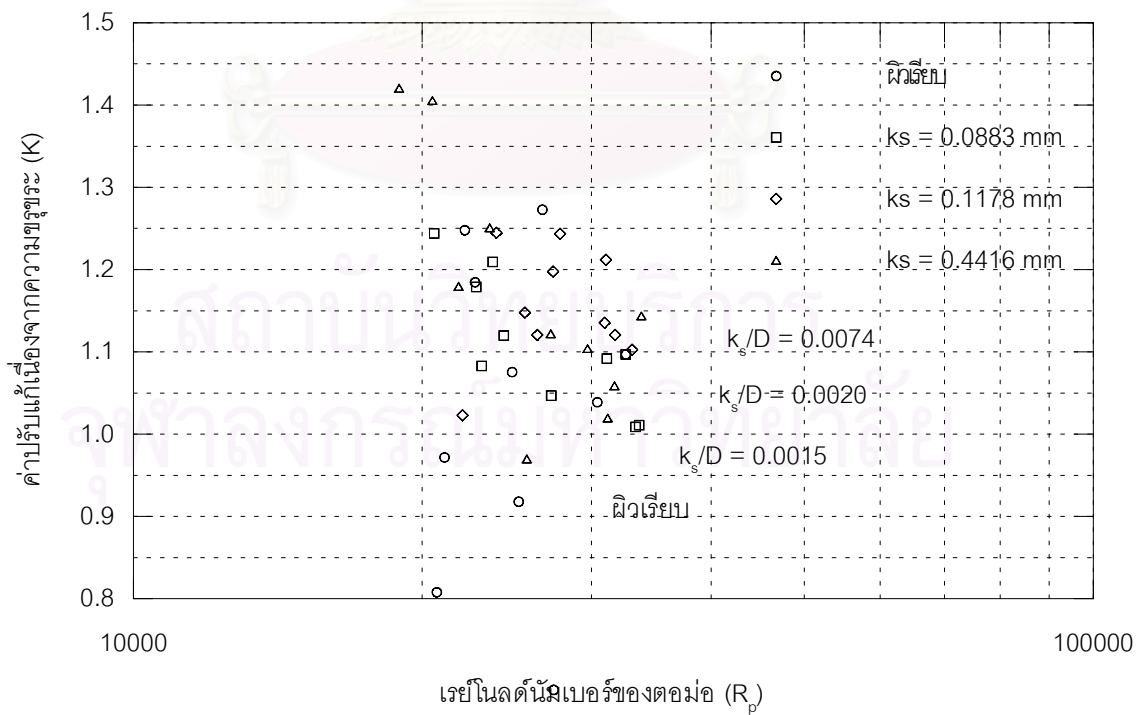
การศึกษานี้มีจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลองจำกัด และจำนวนผิวขรุขระที่ใช้เพียง 3 ผิว ดังนั้นเพื่อให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสมบูรณ์มากขึ้น จึงจำเป็นต้องอาศัยการศึกษาเพิ่มเติมโดยท่านอื่น ๆ สำหรับจำนวนค่าความขรุขระที่มากขึ้น



รูป 5-26° ความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ กับค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระของตอม่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.40 ซม.



รูป 5-27 ความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ของท่อ กับค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.80 ซม.



รูป 5-28 ความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ของท่อ กับค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.00 ซม.

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพรังก้าน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของผิวตอม่อต่อความลึกของหลุมกัดเซาะตอม่อสะพาน

ในส่วนของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้จากการทดลองโดยใช้ตอม่อ 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.40 ซม., 4.80 ซม. และ 6.00 ซม. ใช้ทรายขนาดสม่ำเสมอ 2 ขนาด คือ ทรายปานกลาง ( $d_{50} = 1.20$  มม.) และทรายหยาบ ( $d_{50} = 2.20$  มม.) ลักษณะผิวตอม่อ 4 ลักษณะ คือ ลักษณะผิวเรียบ, ผิวที่ใช้กระดาษทรายเบอร์ 400 ( $k_s = 0.0883$  มม.), เบอร์ 280 ( $k_s = 0.1178$  มม.) และเบอร์ 80 ( $k_s = 0.4416$  มม.) จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปได้ดังนี้

##### 6.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะ

ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อสะพานเมื่อลักษณะผิวเป็นแบบผิวเรียบขึ้นกับขนาดตอม่อ ( $D$ ), ความลึกการไหล ( $y$ ), ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ( $R_p$ )

พิจารณาเป็นความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ จะได้ว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อมากขึ้น เนื่องจากความเร็วการไหลหรือขนาดตอม่อเพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้น ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปตามที่ Shen และคณะ (1969) ได้เสนอไว้ แต่ความสัมพันธ์นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water scour) เท่านั้น เพราะในสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (lived-bed scour) ความลึกหลุมกัดเซาะไม่ขึ้นกับความเร็วการไหล

พิจารณาเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ), ความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) และฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ( $Fr$ ) เนื่องจากเมื่อขนาดตอม่อและความลึกการไหลเท่ากัน ความลึกหลุมกัดเซาะจะขึ้นกับฟรูดนัมเบอร์ของการไหล คือเมื่อฟรูดนัมเบอร์มากขึ้นความลึกหลุมกัดเซาะจะมากขึ้นด้วย หากสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณของความสัมพันธ์ดังกล่าว มีค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังใกล้เคียงกับที่ Richardson

และคณะ (1995) ได้เสนอไว้ โดยความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าน้อยกว่าที่ได้จากสมการของ Richardson และคณะ (1995) ประมาณ 20% ทั้งนี้เนื่องจากสมการของ Richardson และคณะ (1995) ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวนมาก และมีช่วงของข้อมูลที่กว้าง การทดลองทำในรางน้ำหลาย ๆ ขนาด แต่ในการศึกษานี้ ข้อมูลที่ได้อยู่ในช่วงแคบ และจำนวนข้อมูลมีจำกัด

### 6.1.2 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีผิวเรียบกับผิวอื่น ๆ

ในสภาวะการทดลองเดียวกัน คือ ขนาดตอม่อเท่ากัน, ความลึกการไหลเท่ากัน และพрудนัมเบอร์ของการไหลเท่ากัน เมื่อทำการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะของผิวที่มีค่าความขรุขระเป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. กับความลึกหลุมกัดเซาะของลักษณะผิวแบบผิวเรียบ จะได้ว่าผิวตอม่อแบบขรุขระให้ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10.11%, 13.23% และ 15.26% ตามลำดับ ดังนั้นความขรุขระของผิวตอม่อจึงมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะในทางทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น

### 6.1.3 ผลของความขรุขระของผิวตอม่อต่อหลุมกัดเซาะ

พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ ( $d_s/D$ ) กับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ ( $y/D$ ) ของลักษณะผิวตอม่อแบบต่าง ๆ จะได้ว่า เมื่อความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อเท่ากัน แต่ลักษณะผิวของตอม่อเปลี่ยนไป จะทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อเพิ่มขึ้นจากลักษณะผิวเรียบ ประมาณ 8%, 15% และ 19% ตามลำดับสำหรับค่าความขรุขระเป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม.

เมื่อพิจารณาให้ความลึกหลุมกัดเซาะของลักษณะผิวขรุขระ แสดงพฤติกรรมเหมือนความลึกหลุมกัดเซาะแบบผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเรียกขนาดตอม่อที่ใหญ่ขึ้นนี้ว่า ขนาดตอม่อประสิทธิภาพ (effective diameter,  $D_e$ ) สำหรับค่าความขรุขระเป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. จะเสมือนว่าตอม่อมีขนาดใหญ่ขึ้น 10%, 18% และ 23%

#### 6.1.4 ขนาดต่อม่อประสิทธิผลกับสมการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะต่าง ๆ

เมื่อลักษณะผิวของต่อม่อเปลี่ยนแปลงไป โดยมีความขรุขระของผิวมากขึ้น จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะเท่ากับลักษณะผิวแบบผิวเรียบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อม่อใหญ่ขึ้น หรือเสมือนว่าขนาดของต่อม่อใหญ่ขึ้นนั่นเอง ส่งผลให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้น และขนาดของต่อม่อที่ใหญ่ขึ้นนี้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (effective diameter,  $D_e = kD$ ) โดยที่ค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดของต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) เป็น 1.10, 1.18 และ 1.23 สำหรับค่าความขรุขระเป็น 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม.

ในการนำตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) ไปประยุกต์ใช้นั้น สามารถทำได้ โดยการแทนค่าขนาดต่อม่อ ( $D$ ) ด้วยขนาดต่อม่อประสิทธิผล ( $D_e$ ) ในสมการของลักษณะผิวต่อม่อแบบผิวเรียบ โดยความสัมพันธ์ที่ได้จะเหมือนความสัมพันธ์ของลักษณะผิวต่อม่อแบบผิวเรียบ ในส่วนของค่าความขรุขระอื่นที่ไม่ได้อยู่ในช่วงของการศึกษานี้ ยังต้องอาศัยการศึกษาเพิ่มเติมของท่านอื่น ๆ

ดังนั้น ลักษณะผิวต่อม่อที่เปลี่ยนแปลงไปโดยมีความขรุขระมากขึ้น จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้นเนื่องจากเสมือนว่าต่อม่อขนาดใหญ่ขึ้น และจากค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดของต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ ( $k$ ) สรุปได้ว่า เมื่อผิวของต่อม่อมีค่าความขรุขระเท่ากับ 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. จะเสมือนต่อม่อมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 10%, 18% และ 23%

#### 6.1.5 อิทธิพลของค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

ความลึกหลุมกัดเซาะ ( $d_s$ ) เป็นความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของต่อม่อ ( $R_p$ ) และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ( $k_s/D$ ) คือเมื่อค่าความขรุขระสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากขึ้น เนื่องจากลักษณะผิวต่อม่อที่เปลี่ยนไป จะทำให้พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านต่อม่อเปลี่ยนไปด้วย เพราะความขรุขระของต่อม่อมีผลต่อการกระจายความดันและความเร็วการไหล ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลหมุนวนบริเวณด้านหน้าต่อม่อเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะของหลุมกัดเซาะจึงแตกต่างจากผิวต่อม่อที่เป็นแบบผิวเรียบ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในคราวต่อไป มีดังนี้

1) จากการศึกษานี้พบว่า ความขรุขระของผิวตอม่อสะพานมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ แต่เนื่องจากขีดจำกัดทางด้านเวลาและแหล่งทุน ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ในช่วงค่าความขรุขระของผิวที่กว้าง ดังนั้นควรมีการศึกษาหรือทำเป็นงานวิจัยต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากพอ ตลอดจนครอบคลุมเงื่อนไขและสภาวะต่าง ๆ ทั้งลักษณะทางกายภาพของตอม่อ ลักษณะของตะกอน และลักษณะของการไหล

2) การศึกษานี้ แสดงความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness,  $k_s$ ) ของผิวตอม่อ โดยความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะ กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness,  $k_s/D$ ) ยังมีความไม่ชัดเจน อาจเนื่องมาจากข้อมูลที่ได้อาจจากการทดลองไม่เพียงพอ หรือความลึกหลุมกัดเซาะไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรนำค่าความขรุขระสัมพัทธ์ไปพิจารณาด้วย

3) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการออกแบบตอม่อสะพาน โดยนำผลของความขรุขระของผิวตอม่อที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเวลาไปพิจารณา

4) ค่าความขรุขระของผิวตอม่อ ( $k_s$ ) กับขนาดวัสดุท้องน้ำ ( $d_{50}$ ) อาจมีความสัมพันธ์กัน เช่น เมื่อค่าความขรุขระของผิวตอม่อมากกว่าขนาดวัสดุท้องน้ำ กับค่าความขรุขระของผิวตอม่อเท่ากับขนาดวัสดุท้องน้ำ และค่าความขรุขระของผิวตอม่อน้อยกว่าวัสดุท้องน้ำ ความสัมพันธ์ที่ได้กับความลึกหลุมกัดเซาะอาจแตกต่างกัน

5) การศึกษานี้เป็นการศึกษาภายใต้สภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำด้วย

6) ควรมีการศึกษาอิทธิพลของลักษณะผิวตอม่อต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยใช้รูปแบบตอม่ออื่น ๆ เช่น ตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน, ตอม่อรูปวงรี, กลุ่มของตอม่อทรงกระบอก ฯลฯ และใช้ลักษณะผิวตอม่อเป็นแบบต่าง ๆ เช่น ผิวตอม่อเป็นลอนทั้งแนวตั้งและแนวนอน, ผิวตอม่อเป็นรูปหลาย ๆ เหลี่ยม

7) ควรมีการศึกษาอิทธิพลของความขรุขระของผิวตอม่อ สำหรับวัสดุท้องน้ำจำพวกดินเหนียว ว่ามีลักษณะหลุมกัดเซาะเหมือนหรือแตกต่างจากวัสดุท้องน้ำจำพวกทรายอย่างไร

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล. การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นดับ. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.  
พรมงคล ชิดชอบ. การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชา  
วิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.  
สมรักษ์ ต๋อวงศ์ไพฑนธ์. การกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.

### ภาษาอังกฤษ

- Achenbach, E. "Influence of Surface Roughness on The Cross-Flow Around a Curcular  
Cylinder", Journal of Fluid Mechanics. 46, (June, 1970).
- Ahmed, F and Rajaratnam, N. "Flow Around Bridge Piers", Journal of Hydraulics  
Engineering. 124, 3, (March, 1998).
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen H.W. "Local Scour Around Cylindrical Piers",  
Journal of Hydraulics Research. 15, 3, (June, 1977).
- Chang, Sin Zee. The Area of Scour Hole Around Bridge Piers. Master's Thesis, Asian  
Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1987.
- Chen, A-Han. Local Scour around Circular Piers. Master's Thesis, Asian Institute of  
Technology, Bangkok, Thailand, 1987.
- Farraday, R.V. et al. Hydraulic Factors in Bridge Design. Hydraulics Research Station  
Limited, Willingford, Oxfordshire, 1983.
- FHWA Technical Advisory. Scour at Bridge. U.S. Department of Transportation,  
September, 1988.
- Francis et al. "Flume Test for Scour in Clay at Circular Piers", Journal of Hydraulics  
Engineering. 127, 11, (November, 2001).



- Guven, O., Patel, V.T. and Farrell, C. "Surface Roughness Effects on The Mean Flow Past Circular Cylinders", IIHR Report No. 175. Iowa Institute of Hydraulic Research, May, 1975.
- Jain, S.C. and Fischer, E.E. "Scour Around Circular Bridge Piers at High Frude Number", IIHR Report. No. 220. Iowa Institute of Hydraulic Research, December, 1979.
- Massey, B.S. Mechanics of Fluid. London : Van Nostrand Reinhold Company, 1970.
- Melville, B.W. "Lived-Bed Scour at Bridge Piers", Journal of Hydraulics Engineering. 110, 9, (September, 1983).
- Melville, B.W. and Dongol, D.M. "Bridge Piers Scour with Debris Accumulation", Journal of Hydraulics Engineering. 118, 9, (September, 1992).
- Melville, B.W. and Chiew, Yee-Ming. "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers", Journal of Hydraulics Engineering. 125, 1, (September, 1983).
- Munson, B.R., Young, D.F. and Okishi, T.H. Fundamental of Fluid Mechanics. USA : John Wiley & Sons, 1990.
- Murillo, J.A. "The Scourge of Scour", Civil Engineer (New York). 57, 7, (July, 1987)
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", Journal of Hydraulics Engineering. 109, 3, (March, 1983).
- Raudkivi, A.J. and Sutherland, A.J. Scour at Bridge Crossings. Willington, New Zealand : National Roads Board, 1981
- Robinson, J.A. and Crowe, C.T. Engineering Fluid Mechanics. USA : John Willey & Son, 1997.
- Shen, H.W.(ed). River Mechanics. Colorado : CSU, Fort Collins, 1971.
- Triweko, R.W. Local Scour with Angle of Attack. Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1984.
- United State Departmant of Interior. Hydraulic Laboratory Techniques. Denver, Colorado, USA : United States Government Printing Office, 1986.
- Vanoni, V.A. Sedimentation Engineering. USA : The American Society of Civil Engineers, 1975.
- Young, C.T. Sediment Transport. Singapore : McGraw-Hill, 1996.



# ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### แบบจำลองชลศาสตร์การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน

#### ก.1 การจัดเตรียมแบบจำลองทางชลศาสตร์

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน เพื่อศึกษาถึงผลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ ทำการศึกษาและทดลองในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีถังเก็บน้ำขนาดความจุ 30 ลบ.ม. ตั้งอยู่บนคานฟ้า อาคาร 5 ชั้น และมีระบบสูบน้ำหมุนเวียน โดยรักษาระดับน้ำความดันคงที่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

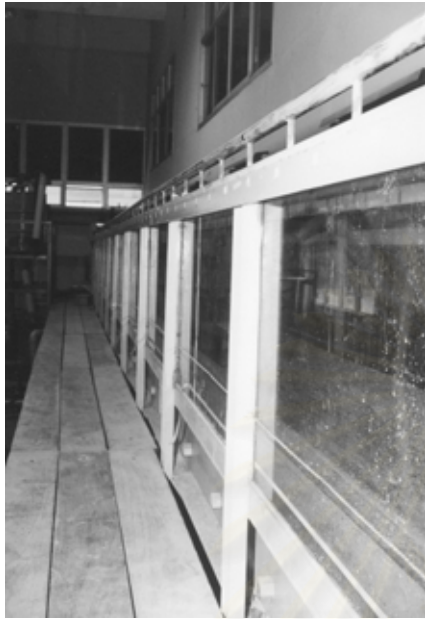
1. รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) มีความยาว 18 ม. กว้าง 0.60 ม. และลึก 0.75 ม. ผนังด้านข้างของรางน้ำทำด้วยกระจกใสหนา 1.20 ซม. ทั้ง 2 ข้าง พื้นรางน้ำทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 6 มม. และความลาดเอียงของรางน้ำสามารถปรับได้โดยใช้แม่แรง (hydraulics) การปรับแม่แรงจะควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังรูป ก-1

2. ประตูควบคุมระดับน้ำที่ปลายรางน้ำ (tail gate) มีขนาดกว้าง 0.66 ม. สูง 0.76 ม. บานประตูทำด้วยเหล็กหนา 5 มม. ติดตั้งที่ปลายสุดของรางน้ำ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมความลึกการไหลของน้ำ ดังรูป ก-2

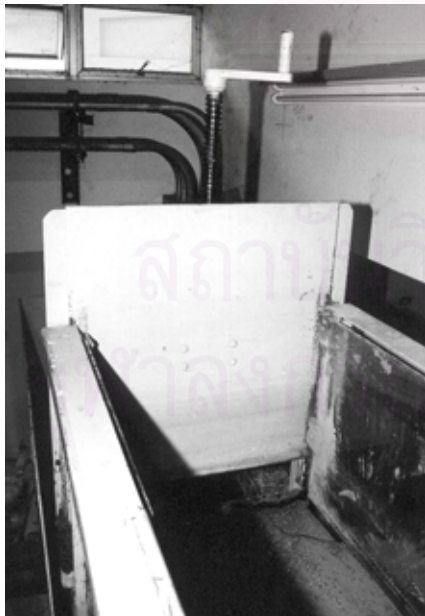
3. ตะแกรง (screens) และตะแกรงลดคลื่น (wave suppressors) ทำจากไม้ระแนงติดตั้งบริเวณบ่อพักน้ำด้านเหนือน้ำ (head box) เพื่อลดขนาดของคลื่นและความรุนแรงของกระแสน้ำ ดังรูป ก-3

4. ถาดติดล้อเลื่อน ทำจากไม้และอลูมิเนียม สามารถเลื่อนขนานไปตามความยาวของรางน้ำ ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดที่ใช้เก็บข้อมูลการทดลองต่าง ๆ เช่น เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ (sandy surface meter) ดังรูป ก-4

5. ระบบหมุนเวียนของน้ำ ประกอบด้วย ถังเก็บน้ำ (constant head tank) ความจุ 30 ลบ. ม. เครื่องสูบน้ำขนาด 25 แรงม้า จำนวน 4 เครื่อง แต่ละเครื่องสามารถสูบน้ำได้สูงสุดประมาณ 25 ลิตรต่อวินาที การหมุนเวียนของน้ำจะเริ่มจากการปล่อยน้ำจากถังเก็บน้ำผ่านท่อเหล็กกล้าผ่านวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดท่อ จนกระทั่งถึงบ่อพักด้านเหนือน้ำ น้ำจะไหลผ่านรางน้ำและไหลลงสู่บ่อพักน้ำ (sump) และถูกสูบกลับไปสู่อ่างเก็บน้ำโดยเครื่องสูบน้ำอีกครั้ง ดังรูป ก-5



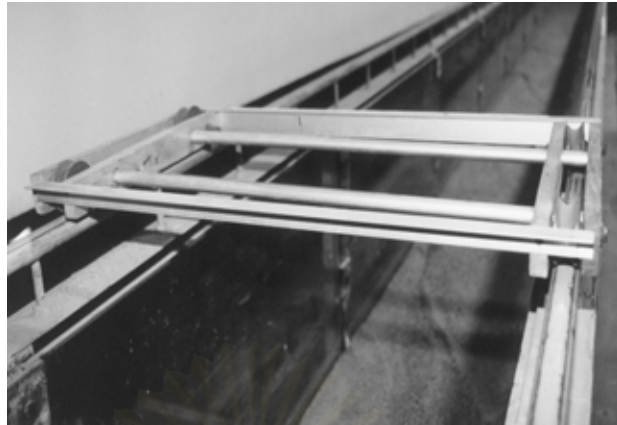
รูป ก-1 รางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume)



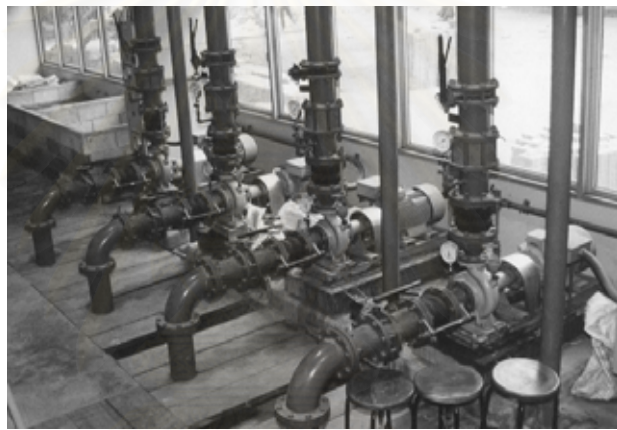
รูป ก-2 ประตูควบคุมระดับน้ำ  
(tail gate)



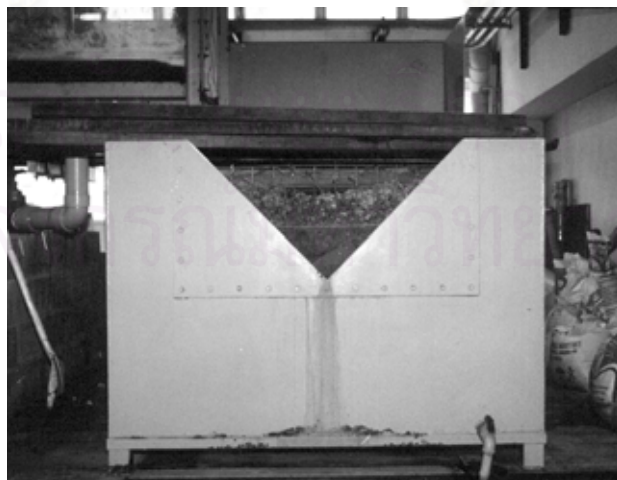
รูป ก-3 ตะแกรงกันคลื่น  
(wave suppressors)



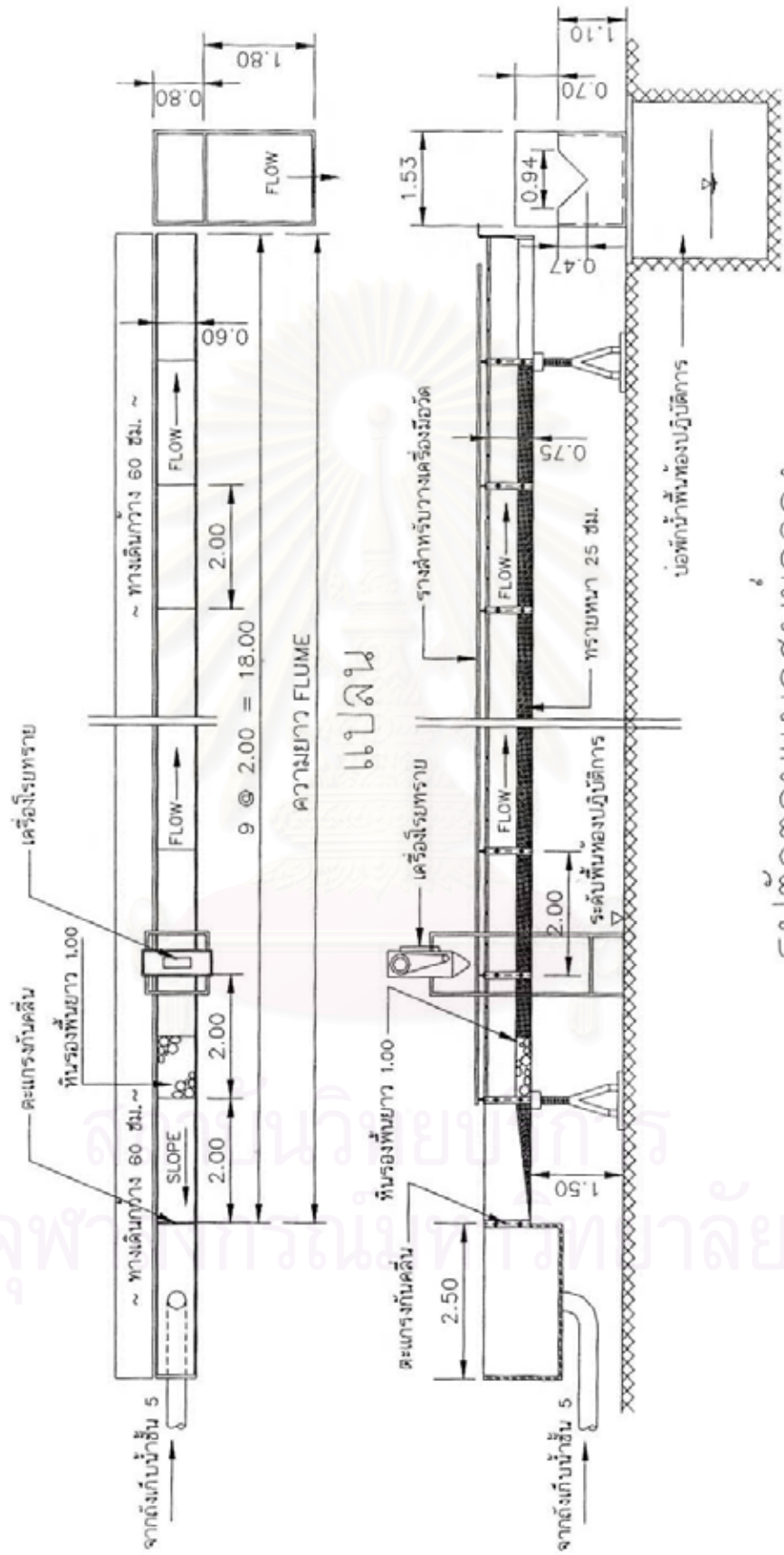
รูป ก-4 ถาดติดล้อเลื่อน



รูป ก-5 เครื่องสูบน้ำ



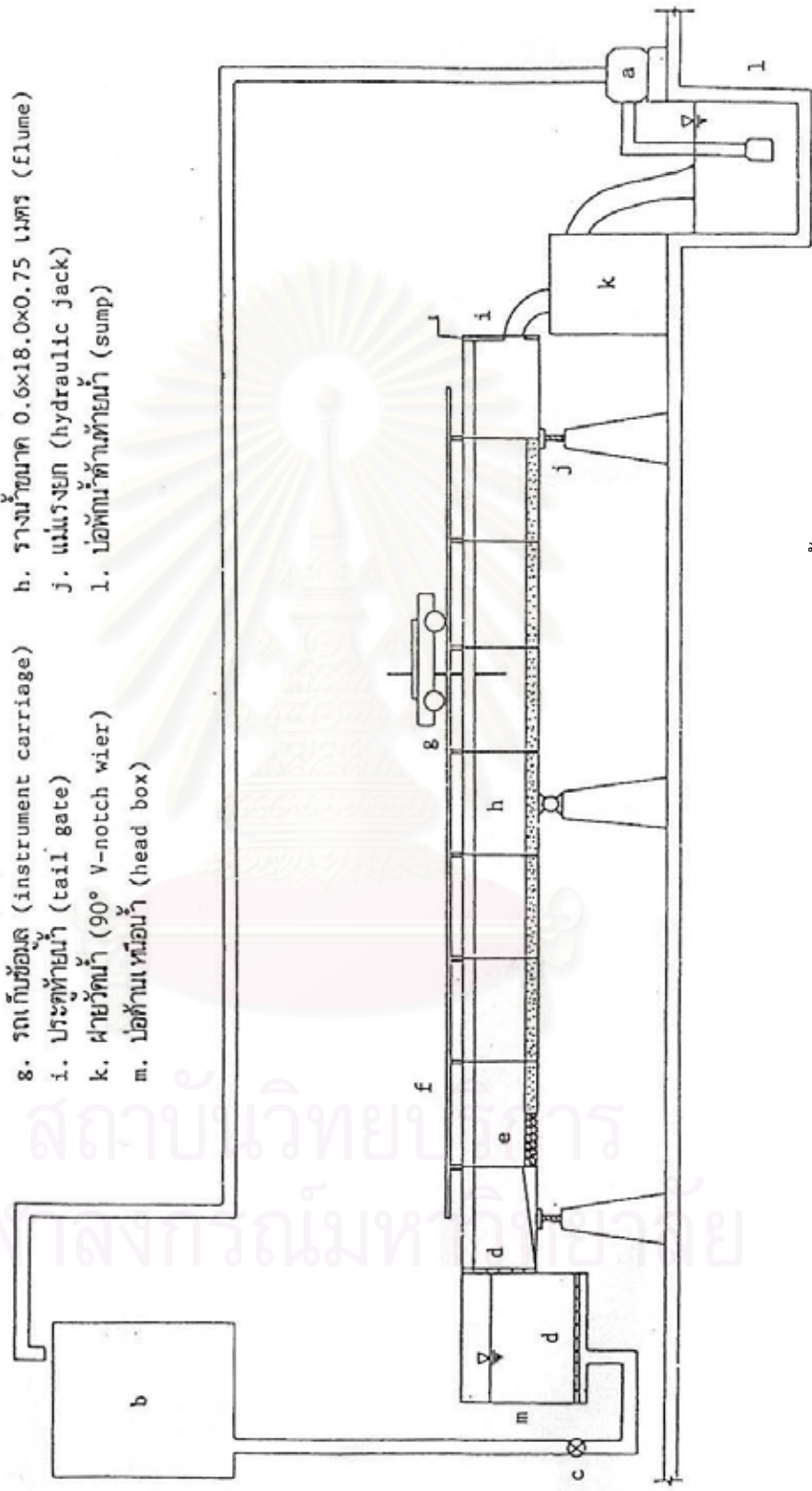
รูป ก-6 ฝ่ายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม  
(90° v-notchwier)



รูปตัดตามแนวศูนย์กลาง

รูป ก-7 รางน้ำที่ใช้ในการทดลอง

- ๑. เครื่องสูบน้ำ (pumping unit)
- ๒. วาล์ว (valve)
- ๓. หินเรียง (riprap)
- ๔. รถเก็บข้อมูล (instrument carriage)
- ๕. ประตูท้ายน้ำ (tail gate)
- ๖. ฝ่ายวัดน้ำ (90° V-notch wier)
- ๗. บ่อต้านเหนือน้ำ (head box)
- ๘. เครื่องสูบน้ำ (head tank)
- ๙. แผงกรองตะกอน (screen)
- ๑๐. รางล้อเลื่อน (rail)
- ๑๑. รางน้ำขนาด 0.6x18.0x0.75 เมตร (Flume)
- ๑๒. แจ็คไฮดรอลิก (hydraulic jack)
- ๑๓. บ่อพักน้ำท้ายน้ำ (sump)



รูป ก-8 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่างๆ และระบบการหมุนเวียนของน้ำ

## ก.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

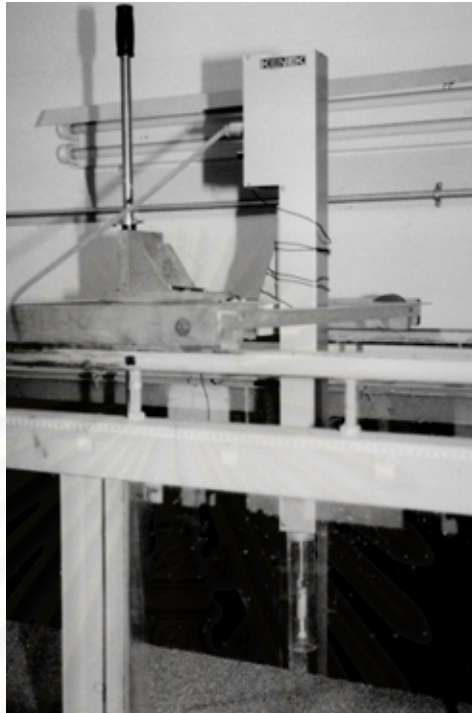
1. ฝ่ายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม ( $90^{\circ}$  v-notch wier) กว้าง 1.53 ม. ยาว 2.60 ม. ด้านหน้าสูง 1.10 ม. ด้านหลังสูง 1.80 ม. ทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 มม. สามารถวัดน้ำได้สูงสุด 75 ลิตร ต่อวินาที ติดตั้งไว้อยู่ทางด้านท้ายของรางน้ำ ใช้สำหรับวัดอัตราการไหล ภายในตัวฝ่ายติดตั้งตะแกรงลดคลื่น เพื่อลดความรุนแรงของน้ำ ทำให้สามารถอ่านค่าระดับเหนือสันฝ่ายได้ถูกต้อง ดังรูป ก-6

2. เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำ (sandy surface measuring) สามารถใช้วัดระดับผิวน้ำ ระดับท้องน้ำและความลึกของน้ำ สำหรับกล่องเก็บข้อมูล (data logger) สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดได้ถึง 6 ช่องสัญญาณ แสดงผลการวัดทางจอ LCD ของแต่ละช่องสัญญาณ และสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะส่งข้อมูลไปเก็บในคอมพิวเตอร์และควบคุมการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย ดังรูป ก-9 และ ก-10

3. เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลอง

4. นาฬิกา ใช้จับเวลาที่ทำให้หลุมกัดเซาะเข้าสู่สมดุล





รูป ก-9 เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท่อน้ำ (sandy surface meter)



รูป ก-10 อุปกรณ์เก็บข้อมูล (data logger)

### ก.3 แบบจำลองตอม่อสะพาน

แบบจำลองตอม่อสะพานสร้างขึ้นจากท่อน้ำพลาสติก PVC 3 ขนาด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.40, 4.80 และ 6.00 เซนติเมตร ทำการยึดฐานตอม่อโดยใช้ที่ปิดฝาท่อสวมเข้ากับส่วนปลาย แล้วติดกาวยึดกับฐานไม้ัดขนาด 15 × 30 ตารางเซนติเมตร ใช้ลักษณะผิวตอม่อ 5 ลักษณะผิวดังนี้

1. ผิวเรียบ เป็นผิวปกติของตอม่อ
2. ใช้กระดาษทรายกันน้ำเบอร์ 400 หุ้มผิวโดยรอบ
3. ใช้กระดาษทรายกันน้ำเบอร์ 280 หุ้มผิวโดยรอบ
4. ใช้กระดาษทรายกันน้ำเบอร์ 80 หุ้มผิวโดยรอบ
5. ใช้ทรายขนาด  $d_{50} = 1.20$  มม. ทรายรอบผิวตอม่อโดยใช้กาวยางเป็นตัวประสาน

แบบจำลองตอม่อสะพานแสดงไว้ดังรูป ก-11



รูป ก-11 แบบจำลองตอม่อสะพาน

#### ก.4 วัสดุท้องน้ำ (bed material)

ในการศึกษาครั้งนี้ทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด ได้แก่ ทรายหยาบ  $d_{50} = 2.20$  มม. ทรายปานกลาง  $d_{50} = 1.20$  มม. และทรายละเอียด  $d_{50} = 0.36$  มม. เป็นวัสดุท้องน้ำ หนา 25 ซม. จากพื้นรางน้ำ ซึ่งมีคุณลักษณะดังตาราง ก-1 และรูป ก-12 – ก-14

ตาราง ก-1 คุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลอง (ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล, 2541)

ชนิด	$d_{50}$ (mm)	$\gamma_s$ (N/m <sup>3</sup> )	$U_c$ (m/s)	$\phi$ (องศา)	n
ทรายละเอียด	0.36	$2.6 \times 10^4$	0.014	28	0.012
ทรายปานกลาง	1.20	$2.6 \times 10^4$	0.026	30	0.014
ทรายหยาบ	2.20	$2.6 \times 10^4$	0.037	35	0.016

- โดยที่
- $d_{50}$  = ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ
  - $\gamma_s$  = น้ำหนักจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ
  - $U_c$  = ความเร็วเฉือนวิกฤต
  - $\phi$  = angle of repose of sediment
  - n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (manning's coefficient)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ก-12 ทรายละเอียด  $d_{50} = 0.36$  มม



รูป ก-13 ทรายปานกลาง  $d_{50} = 1.20$  มม

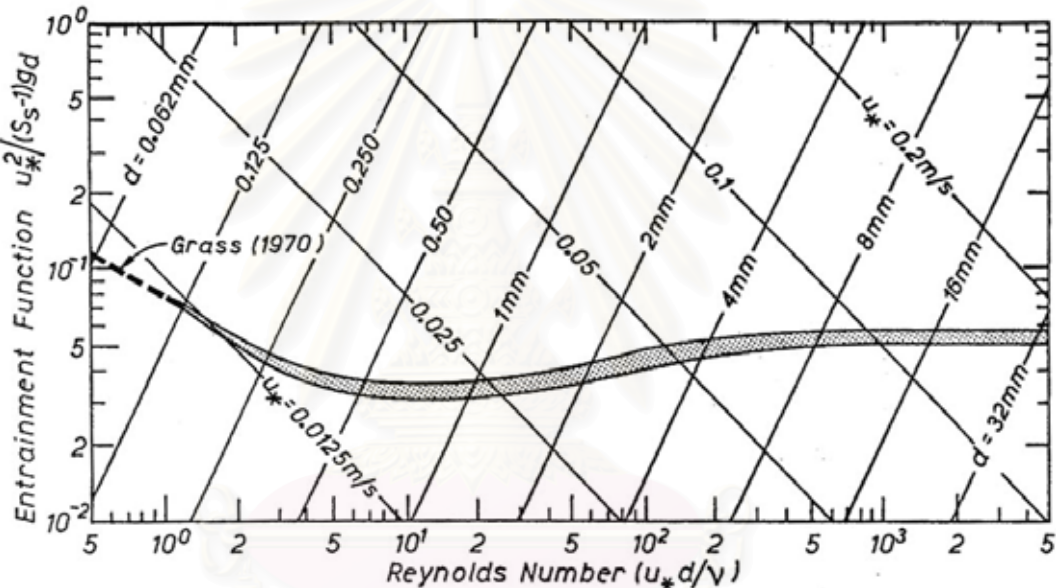


รูป ก-14 ทรายหยาบ  $d_{50} = 2.20$  มม

**ภาคผนวก ข**  
**การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง**

**ข.1 การหาค่าความเร็วเฉือนวิกฤตจาก Shield's diagram**

จากที่ Shields (1936) ได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วจน (U.) กับขนาดวัสดุท้องน้ำ ( $d_{50}$ ) ในรูปของ Entrainment Function กับค่า shear Reynolds Number ดังรูป ข-1 เพื่อกำหนดสภาพของตะกอนท้องน้ำ โดยที่ส่วนที่อยู่เหนือเส้นทึบเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ ส่วนที่อยู่ใต้เส้นทึบเป็นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ และบริเวณเส้นทึบคือส่วนที่วัสดุท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ (threshold of movement)



รูป ข-1 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ shear Reynolds Number ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษา (รูปจาก Raudkivi และ Sutherland, 1981)

โดยที่

$$\text{Entrainment Function} = \frac{U_*^2}{(S_s - 1)gd} \quad (ข.1)$$

$$\text{shear Reynolds Number} = \frac{U_* d}{\nu} \quad (ข.2)$$

เมื่อ  $S_s$  คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ (2.65),  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $d$  คือ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ,  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) ของของไหล ( $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ที่อุณหภูมิของน้ำเป็น  $30^\circ \text{C}$ ) และ  $U_*$  คือ ความเร็วเฉือนของการไหล

จะเห็นว่าทั้ง Entrainment Function และ shear Reynolds Number ต่างติดค่าตัวแปร ความเร็วเฉือน ( $U_c$ ) และขนาดวัสดุท้องน้ำ (d) ทำการ Trial and Error ค่าของความเร็วเฉือน เพื่อให้ความสัมพันธ์ของค่า Entrainment Function กับ shear Reynolds Number ตกบนส่วนของเส้นทึบ และความเร็วเฉือนที่ได้คือความเร็วเฉือนที่ทำให้วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ ซึ่งก็คือความเร็วเฉือนวิกฤตนั่นเอง

ตาราง ข-1 ค่าความเร็วเฉือนวิกฤตที่ได้จากการ Trial and Error ของวัสดุท้องน้ำทั้ง 3 ขนาด

วัสดุท้องน้ำ	d (mm)	$U_c$ (m/s)	$\frac{U_c D}{\nu}$	$\frac{U_c^2}{(S_s - 1)gd}$
ทรายละเอียด	0.36	0.014	6.30	0.034
ทรายปานกลาง	1.20	0.026	39.00	0.035
ทรายหยาบ	2.20	0.037	101.75	0.038

## ข.2 การหาค่าความลึกการไหลและความลาดชันท้องน้ำเบื้องต้นของการทดลอง

จากภาคผนวก ข.1 เมื่อทราบค่าความเร็วเฉือนวิกฤต ( $U_{*c}$ ) ของวัสดุท้องน้ำทั้ง 3 ขนาด นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา อัตราการไหล ( $Q$ ), ความลึกการไหล ( $y$ ) และความลาดชันท้องน้ำ ( $S$ ) ซึ่งจะใช้เป็นค่าเบื้องต้นของการทดลอง

ความเร็วเฉือนวิกฤตเป็นความสัมพันธ์ของความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ จากสมการของความเร็วเฉือน ดังนี้

$$U_{*c} = \sqrt{gSy} \quad (ข.3)$$

เมื่อ  $U_{*c}$  คือ ความเร็วเฉือนวิกฤต,  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $S$  คือ ความลาดชันท้องน้ำ,  $y$  คือ ความลึกการไหล

และความลึกการไหลกับความลาดชันท้องน้ำ มีความสัมพันธ์กันสำหรับอัตราการไหลค่าหนึ่ง ตามสมการของแมนนิง (Manning's Equation) ดังนี้

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (ข.4)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล,  $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิง,  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล,  $R$  คือ รัศมีชลศาสตร์ และ  $S$  คือ ความลาดชันท้องน้ำ

จากสมการทั้งสองจะเห็นว่า เมื่อกำหนดอัตราไหลค่าหนึ่ง จะสามารถหาความลึกการไหลและความลาดชันท้องน้ำที่สอดคล้องกับสมการทั้งสองได้ ทำการแทนค่าสมการ ข.3 ในสมการ ข.4 ได้สมการใหม่ดังสมการ ข.5

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \left( \frac{U_{*c}^2}{gy} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (ข.5)$$

หรือ

$$Q = \frac{1}{n} (by) \left( \frac{by}{b+2y} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{U_{*c}}{\sqrt{gy}} \quad (ข.6)$$

เมื่อ  $b$  คือ ความกว้างของรางน้ำ (60 เซนติเมตร)

โดยใช้วิธี Trial and Error หาค่าความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำให้สอดคล้องกับอัตราการไหลต่าง ๆ ที่ต้องการ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง ดังตาราง ข-2 ถึง ข-4

ตาราง ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ  
สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 0.36$  มิลลิเมตร,  $n = 0.012$

อัตราการไหล (Q, L/s)	ความลึกการไหล (y, cm)	ความลาดชันท้องน้ำ (m/m)
5	4.15	0.00048
10	7.98	0.00025
15	11.96	0.00017
20	16.16	0.00012
25	20.03	0.00010
30	25.39	0.00008
35	30.46	0.00007

ตาราง ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ  
สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 1.20$  มิลลิเมตร,  $n = 0.014$

อัตราการไหล (Q, L/s)	ความลึกการไหล (y, cm)	ความลาดชันท้องน้ำ (m/m)
5	2.72	0.00253
10	5.13	0.00134
15	7.53	0.00092
20	10.00	0.00069
25	12.54	0.00055
30	15.17	0.00045
35	17.90	0.00039
40	20.75	0.00033



ตาราง ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความลึกการไหล และความลาดชันท้องน้ำ  
สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำ  $d_{50} = 2.20$  มิลลิเมตร,  $n = 0.016$

อัตราการไหล (Q, L/s)	ความลึกการไหล (y, cm)	ความลาดชันท้องน้ำ (m/m)
5	2.23	0.00626
10	4.18	0.00334
15	6.11	0.00229
20	8.05	0.00173
25	10.03	0.00139
30	12.07	0.00116
35	14.16	0.00099
40	16.32	0.00086
45	18.54	0.00075
50	20.84	0.00067

### ข.3 การสอบเทียบเพื่อหาค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness, $k_s$ )

ทำการสอบเทียบเพื่อหาค่าความขรุขระ (equivalent sand roughness,  $k_s$ ) ของลักษณะผิวตอม่อแบบต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของการไหลของน้ำผ่านท่อพลาสติกวงกลม (PVC) และลักษณะผิวภายในท่อใช้กระดาษทรายเบอร์ 400, 280 และ 80 ซึ่งเป็นลักษณะผิวเดียวกับผิวตอม่อ เมื่อให้น้ำไหลผ่านท่อพลาสติก ทำการวัดค่าความแตกต่างของพลังงานการไหลของน้ำระหว่างจุด 2 จุด โดยใช้นาโนมิเตอร์ และวัดค่าอัตราการไหลของน้ำ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (resistance coefficient,  $f$ ) ในสมการ

$$H_f = f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (ข.6)$$

เมื่อ  $H_f$  คือ การสูญเสียพลังงานในการไหล,  $f$  คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล,  $L$  คือ ความยาวของท่อ,  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ,  $v$  คือ ความเร็วการไหล และ  $g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

นำค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลที่ได้ ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) และนำกราฟที่ได้เทียบกับกราฟความสัมพันธ์เดียวกันซึ่งเสนอโดย Nikuradse (1933) ดังรูป ข-2 ทำให้ทราบค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness,  $k_s/D$ ) ค่าความขรุขระสัมพัทธ์และค่าความขรุขระของลักษณะผิวต่าง ๆ ที่ได้แสดงไว้ดังตาราง ข-5 ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังตาราง ข-6 ถึง ข-9 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการทดลองนี้แสดงไว้ดังรูป ข-3

ตาราง ข-5 แสดงค่าความขรุขระสัมพัทธ์และค่าความขรุขระของลักษณะผิวต่าง ๆ

ลักษณะผิว	$k_s/D$	$k_s$
ผิวเรียบ	-	-
เบอร์ 400	0.003	0.0883
เบอร์ 280	0.004	0.1178
เบอร์ 80	0.015	0.4416

ตาราง ข-6 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวเรียบ

Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H <sub>f</sub> (mm)	v (m/s)	Re	f
0.96	485	407	78	1.42	$5.2 \times 10^4$	0.0159
1.24	524	398	126	1.82	$6.7 \times 10^4$	0.0156
2.20	560	385	175	2.20	$8.1 \times 10^4$	0.0149
2.55	620	370	250	2.55	$9.4 \times 10^4$	0.0158
2.80	660	355	305	2.80	$10.3 \times 10^4$	0.0160
3.20	730	330	400	3.20	$11.8 \times 10^4$	0.0160

ลักษณะผิวต่อม่อ ผิวเรียบ (PVC)  
 ความยาวช่วงที่วัดพลังงานการไหล (L) = 1.41 ม.  
 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.                      พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.  
 อุณหภูมิน้ำ = 30<sup>o</sup> C    ความหนืดของน้ำ (v) =  $8 \times 10^{-7}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ตาราง ข-7 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวกระดาษทรายเบอร์ 400

Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H <sub>f</sub> (mm)	v (m/s)	Re	f
1.00	595	503	92	1.47	$5.4 \times 10^4$	0.0164
1.45	677	482	195	2.13	$7.8 \times 10^4$	0.0164
1.79	775	444	331	2.63	$9.7 \times 10^4$	0.0183
1.89	823	424	399	2.77	$10.2 \times 10^4$	0.0197
2.03	880	396	484	2.99	$11.0 \times 10^4$	0.0207

ลักษณะผิวต่อม่อ ผิวกระดาษทรายเบอร์ 400  
 ความยาวช่วงที่วัดพลังงานการไหล (L) = 1.52 ม.  
 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.                      พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.  
 อุณหภูมิน้ำ = 30<sup>o</sup> C    ความหนืดของน้ำ (v) =  $8 \times 10^{-7}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ตาราง ข-8 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 280

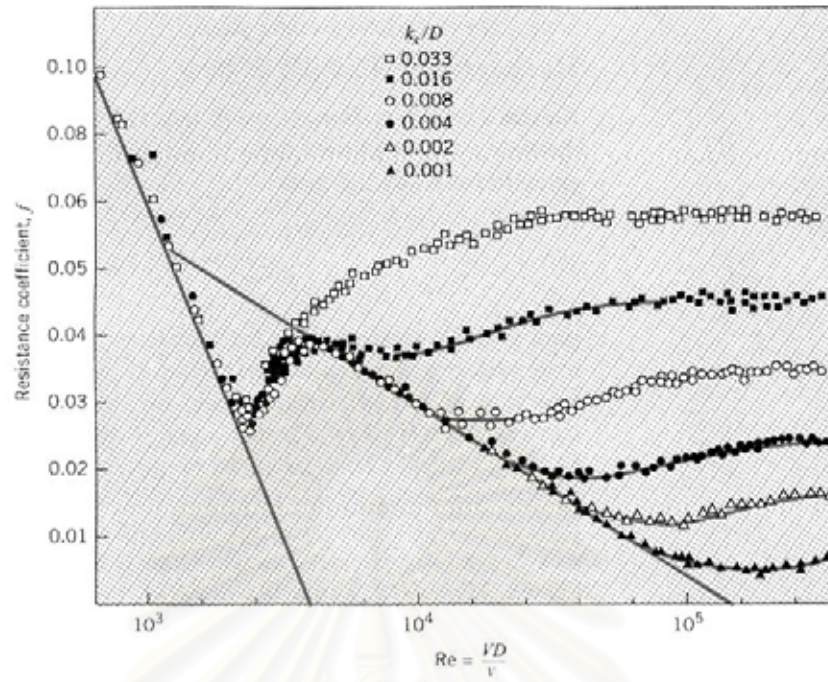
Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H <sub>f</sub> (mm)	v (m/s)	Re	f
0.81	433	359	74	1.19	$4.4 \times 10^4$	0.0225
1.11	478	357	121	1.63	$6.0 \times 10^4$	0.0201
1.28	537	329	208	1.88	$6.9 \times 10^4$	0.0249
1.63	615	308	307	2.40	$8.8 \times 10^4$	0.0230
1.89	703	272	431	2.77	$10.2 \times 10^4$	0.0239
2.22	825	231	594	3.26	$12.0 \times 10^4$	0.0238

ลักษณะผิวต่อม่อ ผิวกระดาดทรายเบอร์ 280  
 ความยาวช่วงที่วัดพลังงานการไหล (L) = 1.53 ม.  
 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.                      พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.  
 อุณหภูมิน้ำ = 30<sup>0</sup> C    ความหนืดของน้ำ (v) =  $8 \times 10^{-7}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

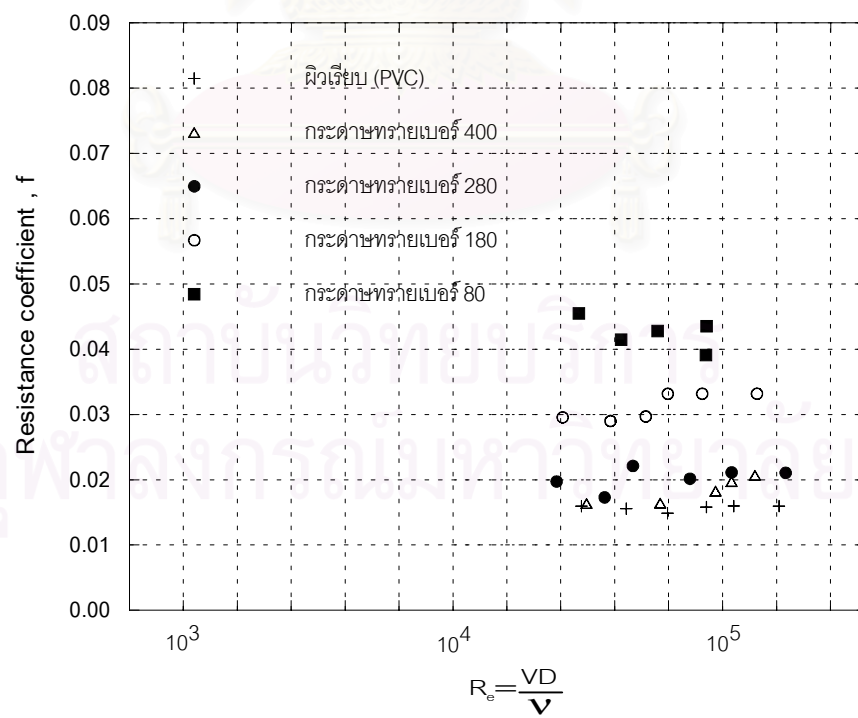
ตาราง ข-9 แสดงการหาค่า Re และ f ของลักษณะผิวกระดาดทรายเบอร์ 80

Q (L/s)	H1 (mm)	H2 (mm)	H <sub>f</sub> (mm)	v (m/s)	Re	f
0.95	654	418	236	1.40	$5.1 \times 10^4$	0.0455
1.21	728	379	349	1.78	$6.5 \times 10^4$	0.0415
1.43	828	323	505	2.10	$7.7 \times 10^4$	0.0428
1.73	938	263	675	2.54	$9.4 \times 10^4$	0.0391
1.74	995	241	754	2.55	$9.4 \times 10^4$	0.0435

ลักษณะผิวต่อม่อ ผิวกระดาดทรายเบอร์ 80  
 ความยาวช่วงที่วัดพลังงานการไหล (L) = 1.54 ม.  
 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 2.94 ซม.                      พื้นที่หน้าตัด = 6.81 ตร.ซม.  
 อุณหภูมิน้ำ = 30<sup>0</sup> C    ความหนืดของน้ำ (v) =  $8 \times 10^{-7}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที



รูป ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง resistance coefficient,  $f$  และค่า Reynolds Number  
ซึ่งเสนอโดย Nikuradse (1933)

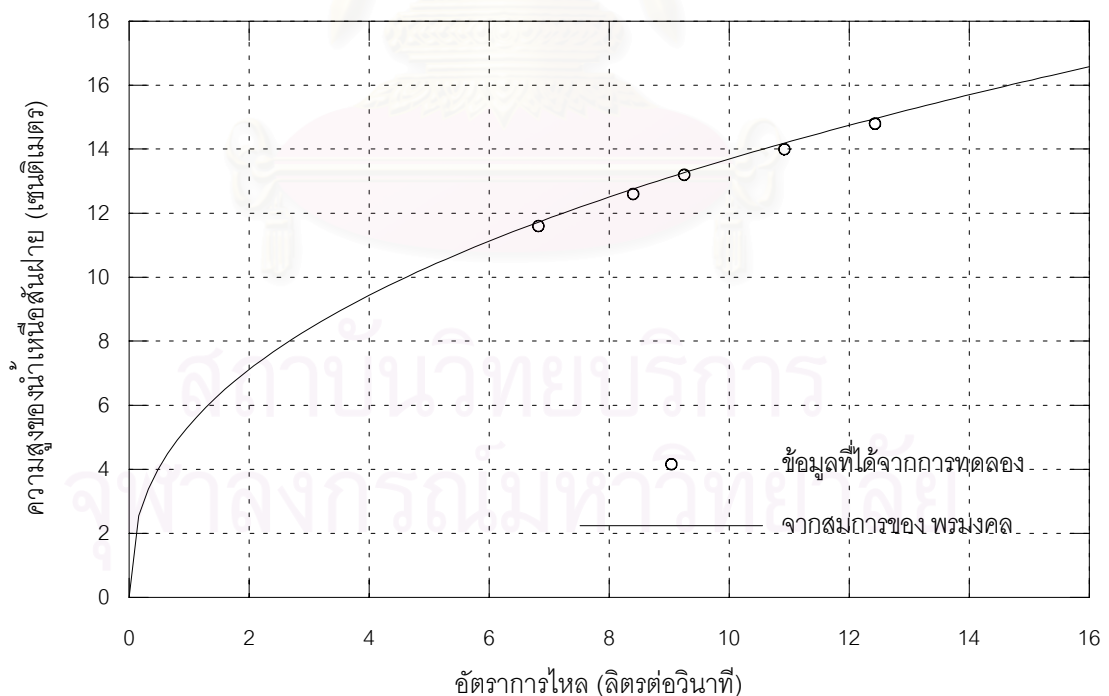


รูป ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง resistance coefficient,  $f$  และค่า Reynolds Number  
ของลักษณะผิวตอม่อต่าง ๆ ในศีกษานี้

#### ข.4 การสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคม

อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้ ทำการวัดโดยใช้ฝายสามเหลี่ยมสันคม ซึ่งแต่เดิมใช้สมการที่ได้จากการสอบเทียบของ พรมงค (2540) ในการคำนวณอัตราการไหล ดังสมการ  $Q=0.016H^{2.46}$  โดยที่ Q คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที H คือ ความสูงของน้ำเหนือฝายในหน่วยเซนติเมตร

ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง โดยการวัดปริมาตรกับเวลา กับอัตราการไหลที่ได้จากสมการของ พรมงค (2540) ตาราง ข-10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และรูป ข-4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้จากสมการกับที่ได้จากการทดลอง จากรูปจะเห็นว่า อัตราการไหลที่ได้จากการทดลองและอัตราการไหลที่ได้จากสมการของพรมงค (2540) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น การศึกษานี้จึงใช้สมการฝายสามเหลี่ยมสันคมนี้ ในการคำนวณอัตราการไหล



รูป ข-4 เปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง และอัตราการไหลที่ได้จากสมการของ พรมงค

ตาราง ข-10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับการสอบเทียบฝ่ายสามเหลี่ยม

ปริมาตร (ลิตร)	เวลา (วินาที)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)	อัตราการใช้ (ลิตร/วินาที)	ความสูงของน้ำเหนือฝาย (เซนติเมตร)	อัตราการใช้จากสมการ (ลิตร/วินาที)
100	14.35 14.83 14.78	14.65	6.82	11.6	6.65
100	12.14 11.63 11.97	11.90	8.40	12.6	8.15
100	10.25 11.35 10.83	10.81	9.25	13.2	9.14
150	13.55 13.73 13.93	13.74	10.92	14.0	10.56
150	8.12 7.98 8.05	8.05	12.43	14.8	12.10

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### การหาค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k)

หาค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระ (k) จากสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (regression-line) ของลักษณะผิวเรียบ และลักษณะผิวอื่นๆ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดต่อม่อ ( $d_s/D$ ) และความลึกการไหลต่อขนาดต่อม่อ ( $y/D$ ) ของลักษณะผิวเรียบดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = C_0 \left( \frac{y}{D} \right)^{C_1} \quad (\text{ค.1})$$

สำหรับลักษณะผิวขรุขระ จะได้สมการเป็น

$$\frac{d_s}{D} = C_0 K \left( \frac{y}{D} \right)^{C_1} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะผิวดอม่อ

จากสมการ  $D_e = kD$  เมื่อ  $D_e$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อม่อประสิทธิภาพ (effective diameter) เป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อม่อแบบผิวเรียบ ซึ่งให้ความลึกหลุมกัดเซาะเท่ากับผิวขรุขระนั้น ที่สภาวะการไหลเดียวกัน และ  $k$  คือ ตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดเนื่องจากความขรุขระ จะได้สมการ ค.1 ใหม่เพื่อใช้กับทุก ๆ ผิวดังนี้

$$\frac{d_s}{D_e} = C_0 \left( \frac{y}{D_e} \right)^{C_1} \quad (\text{ค.3})$$

สมการ ค.2 หรือสมการ ค.3 จะได้

$$\frac{D_e}{D} = K \left( \frac{D_e}{D} \right)^{C_1} \quad (\text{ค.4})$$

ดังนั้น

$$\frac{D_e}{D} = K \left( \frac{1}{1-C_1} \right) = k \quad (\text{ค.5})$$

จากค่า  $K$  และ  $C_1$  ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้งที่ได้ของวัสดุท้องน้ำที่เป็นทรายปานกลาง, ทรายหยาบ และรวมระหว่างทรายปานกลางกับทรายหยาบ จะสามารถหาค่า  $k$  ได้ และแสดงไว้ดังตาราง ค-1



ตาราง ค-1 แสดงการหาค่าตัวคูณเพื่อเพิ่มขนาดต่อม่อเนื่องจากความขรุขระด้วยวิธีที่ 1

ลักษณะผิว	ทรายปานกลาง ( $C_0=1.12, C_1=0.173$ )		ทรายหยาบ ( $C_0=1.16, C_1=0.161$ )		รวม ( $C_0=1.15, C_1=0.156$ )	
	K	k	K	k	K	k
ผิวเรียบ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
#400 ( $k_s = 0.0883$ มม.)	1.07	1.09	1.08	1.10	1.08	1.10
#280 ( $k_s = 0.1178$ มม.)	1.14	1.17	1.13	1.16	1.15	1.18
#80 ( $k_s = 0.4416$ มม.)	1.17	1.21	1.18	1.22	1.19	1.23

โดยที่  $\frac{d_s}{D} = C_0 K \left(\frac{y}{D}\right)^{C_1}$  และ  $\frac{D_e}{D} = k = K \left(\frac{1}{1-C_1}\right)$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ง**  
**แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ**

ตาราง ง-1 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ลักษณะผิวตอม่อแบบผิวเรียบ

Run No	D (cm)	$d_s/D$	$y/D$	Fr	$R_p$	K
A1-1	3.40	0.59	0.64	0.52	10114	0.61
A2-1	3.40	1.32	1.14	0.45	11871	1.17
A3-1	3.40	1.41	2.47	0.32	12201	1.12
A4-1	3.40	1.41	4.55	0.22	11759	1.07
A5-1	3.40	1.82	3.59	0.27	12495	1.37
F1-1	3.40	1.71	1.14	0.62	16355	1.23
F2-1	3.40	1.82	2.50	0.42	16359	1.21
F3-1	3.40	1.59	3.60	0.36	16944	0.99
F4-1	3.40	1.62	4.49	0.34	17885	0.95
F5-1	3.40	1.91	5.31	0.34	18998	1.06
A1-2	4.80	0.88	0.36	0.72	17849	0.94
A2-2	4.80	1.29	0.73	0.53	18594	1.25
A3-2	4.80	1.33	1.63	0.35	18473	1.19
A4-2	4.80	1.25	3.21	0.23	16690	1.10
A5-2	4.80	1.50	2.27	0.32	19743	1.23
F1-2	4.80	1.17	0.93	0.51	20074	1.05
F2-2	4.80	1.25	1.90	0.38	21530	0.99
F3-2	4.80	1.04	2.72	0.33	22454	0.77
F4-2	4.80	1.35	3.22	0.34	24977	0.92
F5-2	4.80	1.52	3.88	0.32	26005	0.99
A1-3	6.00	0.80	0.31	0.66	21094	0.97
A2-3	6.00	1.10	0.60	0.51	22702	1.18
A3-3	6.00	1.25	1.36	0.33	22147	1.25
A4-3	6.00	0.83	2.59	0.22	20706	0.81
A5-3	6.00	1.47	1.68	0.36	26678	1.27
F1-3	6.00	1.08	0.75	0.50	24814	1.08
F2-3	6.00	1.02	1.62	0.34	25205	0.92
F3-3	6.00	0.83	2.23	0.32	27403	0.69
F4-3	6.00	1.37	2.64	0.33	30433	1.04
F5-3	6.00	1.53	3.09	0.32	32593	1.10

ตาราง ง-2 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ต่อม่อขนาด 3.40 ซม.

Run No	$k_s$ (mm)	$k_s/D$	$d_s/D$	$y/D$	Fr	$R_p$	K
B1-1	0.0883	0.0026	1.03	0.65	0.61	12102	0.96
B2-1	0.0883	0.0026	1.32	1.61	0.36	11366	1.15
B3-1	0.0883	0.0026	1.53	2.74	0.33	13511	1.13
B4-1	0.0883	0.0026	1.71	3.76	0.29	13896	1.19
B5-1	0.0883	0.0026	1.62	5.13	0.26	14380	1.07
G1-1	0.0883	0.0026	1.47	0.90	0.84	19563	0.97
G2-1	0.0883	0.0026	1.68	2.47	0.48	18665	1.02
G3-1	0.0883	0.0026	1.79	3.57	0.41	19160	1.03
G4-1	0.0883	0.0026	1.94	4.43	0.36	18692	1.11
G5-1	0.0883	0.0026	1.94	5.20	0.34	19045	1.08
C1-1	0.1178	0.0035	1.35	0.82	0.64	14191	1.11
C2-1	0.1178	0.0035	1.53	1.30	0.50	14111	1.19
C3-1	0.1178	0.0035	1.65	3.49	0.28	12695	1.23
C4-1	0.1178	0.0035	1.85	3.52	0.34	15779	1.21
C5-1	0.1178	0.0035	1.65	4.58	0.27	14266	1.11
H1-1	0.1178	0.0035	1.47	1.11	0.66	17104	1.04
H2-1	0.1178	0.0035	1.79	2.33	0.53	19724	1.06
H3-1	0.1178	0.0035	1.97	3.50	0.43	19564	1.12
H4-1	0.1178	0.0035	1.91	4.31	0.35	17874	1.13
H5-1	0.1178	0.0035	1.91	4.69	0.36	19140	1.07
D1-1	0.4416	0.0130	1.18	0.73	0.53	11084	1.14
D2-1	0.4416	0.0130	1.41	1.23	0.44	11986	1.23
D3-1	0.4416	0.0130	1.68	3.14	0.31	13348	1.23
D4-1	0.4416	0.0130	1.91	3.94	0.29	14109	1.32
D5-1	0.4416	0.0130	1.88	5.41	0.27	15477	1.18
I1-1	0.4416	0.0130	1.47	1.04	0.79	19710	0.95
I2-1	0.4416	0.0130	1.76	2.30	0.47	17475	1.13
I3-1	0.4416	0.0130	1.74	3.49	0.44	20277	0.97
I4-1	0.4416	0.0130	1.91	4.21	0.36	18290	1.11
I5-1	0.4416	0.0130	1.76	5.20	0.32	18150	1.01

ตาราง ง-3 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ต่อม่อขนาด 4.80 ซม.

Run No	$k_s$ (mm)	$k_s/D$	$d_s/D$	$y/D$	Fr	$R_p$	K
B1-2	0.0883	0.0018	1.21	0.51	0.52	15342	1.37
B2-2	0.0883	0.0018	1.33	1.10	0.39	16706	1.32
B3-2	0.0883	0.0018	1.35	2.00	0.32	18544	1.17
B4-2	0.0883	0.0018	1.44	2.69	0.29	19390	1.17
B5-2	0.0883	0.0018	1.44	3.67	0.25	20109	1.11
G1-2	0.0883	0.0018	1.27	0.76	0.65	23310	1.06
G2-2	0.0883	0.0018	1.42	1.82	0.46	25295	1.02
G3-2	0.0883	0.0018	1.48	2.57	0.40	26611	0.99
G4-2	0.0883	0.0018	1.58	3.17	0.36	26157	1.05
G5-2	0.0883	0.0018	1.46	3.73	0.33	26512	0.94
C1-2	0.1178	0.0025	1.27	0.66	0.53	17609	1.29
C2-2	0.1178	0.0025	1.35	0.91	0.51	20073	1.22
C3-2	0.1178	0.0025	1.35	2.54	0.27	17409	1.19
C4-2	0.1178	0.0025	1.56	2.49	0.34	22307	1.18
C5-2	0.1178	0.0025	1.46	3.26	0.27	20054	1.14
H1-2	0.1178	0.0025	1.21	0.89	0.55	21495	1.05
H2-2	0.1178	0.0025	1.44	1.77	0.47	26010	1.02
H3-2	0.1178	0.0025	1.52	2.48	0.43	27580	1.00
H4-2	0.1178	0.0025	1.54	3.10	0.34	24866	1.06
H5-2	0.1178	0.0025	1.54	3.40	0.35	26387	1.01
D1-2	0.4416	0.0093	1.29	0.51	0.54	15755	1.44
D2-2	0.4416	0.0093	1.35	0.81	0.49	18151	1.31
D3-2	0.4416	0.0093	1.42	2.25	0.30	18612	1.21
D4-2	0.4416	0.0093	1.56	2.84	0.28	19529	1.26
D5-2	0.4416	0.0093	1.52	3.84	0.27	21811	1.11
I1-2	0.4416	0.0093	1.31	0.90	0.59	22864	1.09
I2-2	0.4416	0.0093	1.29	1.89	0.38	21355	1.03
I3-2	0.4416	0.0093	1.63	2.64	0.40	26816	1.08
I4-2	0.4416	0.0093	1.56	3.09	0.34	24950	1.07
I5-2	0.4416	0.0093	1.50	3.85	0.30	24492	1.02

ตาราง ง-4 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความขรุขระ (K) จากสมการ 5.15 ต่อม่อขนาด 6.00 ซม.

Run No	$k_s$ (mm)	$k_s/D$	$d_s/D$	$y/D$	Fr	$R_p$	K
B1-3	0.0883	0.0015	1.03	0.38	0.58	20577	1.24
B2-3	0.0883	0.0015	1.13	0.81	0.44	22755	1.18
B3-3	0.0883	0.0015	1.13	1.61	0.32	23059	1.08
B4-3	0.0883	0.0015	1.33	2.21	0.28	23689	1.21
B5-3	0.0883	0.0015	1.30	3.04	0.24	24308	1.12
G1-3	0.0883	0.0015	1.10	0.65	0.59	27262	1.05
G2-3	0.0883	0.0015	1.37	1.48	0.45	31143	1.09
G3-3	0.0883	0.0015	1.37	2.05	0.40	33354	1.01
G4-3	0.0883	0.0015	1.50	2.54	0.36	32590	1.10
G5-3	0.0883	0.0015	1.43	2.94	0.34	33641	1.01
C1-3	0.1178	0.0020	1.17	0.49	0.60	23898	1.24
C2-3	0.1178	0.0020	1.27	0.67	0.58	27382	1.20
C3-3	0.1178	0.0020	1.07	2.01	0.27	22032	1.02
C4-3	0.1178	0.0020	1.50	1.99	0.34	27845	1.24
C5-3	0.1178	0.0020	1.35	2.56	0.28	25586	1.15
H1-3	0.1178	0.0020	1.17	0.72	0.54	26352	1.12
H2-3	0.1178	0.0020	1.42	1.49	0.44	30969	1.14
H3-3	0.1178	0.0020	1.58	2.20	0.36	31080	1.21
H4-3	0.1178	0.0020	1.50	2.43	0.35	31759	1.12
H5-3	0.1178	0.0020	1.53	2.71	0.35	33086	1.10
D1-3	0.4416	0.0074	1.13	0.43	0.50	18922	1.42
D2-3	0.4416	0.0074	1.25	0.72	0.42	20499	1.41
D3-3	0.4416	0.0074	1.22	1.92	0.27	21820	1.18
D4-3	0.4416	0.0074	1.38	2.36	0.27	23521	1.25
D5-3	0.4416	0.0074	1.40	3.08	0.27	27214	1.12
I1-3	0.4416	0.0074	1.23	0.69	0.62	29733	1.10
I2-3	0.4416	0.0074	1.08	1.57	0.36	25699	0.97
I3-3	0.4416	0.0074	1.57	2.09	0.41	33832	1.14
I4-3	0.4416	0.0074	1.42	2.43	0.35	31722	1.06
I5-3	0.4416	0.0074	1.38	3.02	0.31	31205	1.02

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์ เกิดเมื่อวันที่ 3 กันยายน 2520 ที่ จ.ภูเก็ต สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม  
แหล่งน้ำ สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการ  
ศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย