

พฤติกรรมศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ : กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำหนองค้อ



นายขวัญชัย แพโคกสูง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

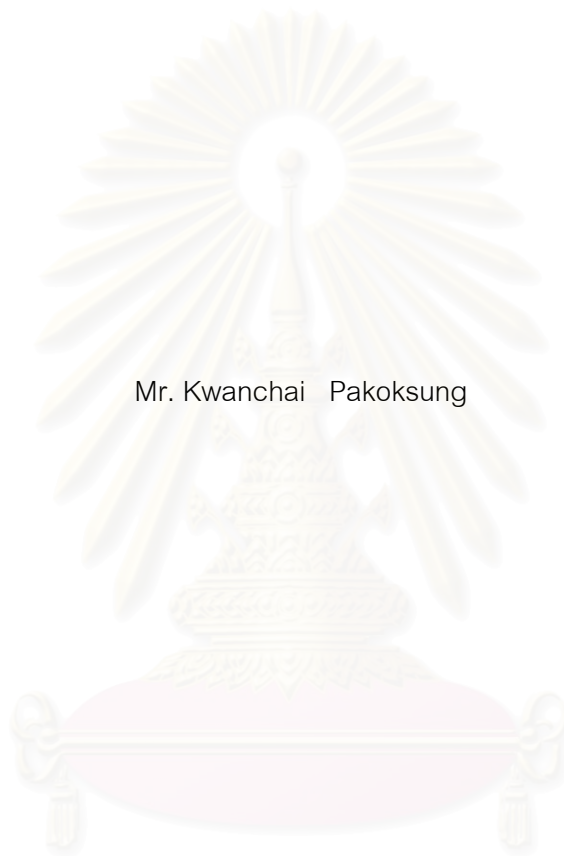
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1356-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRAULIC BEHAVIOR OF FLOW THROUGH AN OUTLET WORK
: CASE STUDY OF NONG KHO RESERVOIR



Mr. Kwanchai Pakoksung

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 2004

ISBN 974-53-1356-4

ขวัญชัย แพโคกสูง : พฤติกรรมชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ : กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำหนองค้อ. (HYDRAULICS BEHAVIOR OF FLOW THROUGH AN OUTLET WORK : CASE STUDY OF NONG KHO RESERVOIR) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ชัยพันธุ์ รัทวิชัย, 227 หน้า. ISBN 974-53-1356-4.

การศึกษานี้ มุ่งศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ซึ่งมีอาคารระบายน้ำ 3 ท่อ เป็นลักษณะของ multi-outlet work โดยศึกษาจากแบบจำลองชลศาสตร์ ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองชลศาสตร์ในการวิจัยประกอบด้วย แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ แบบจำลองอาคารรับน้ำ ระบบท่อ 3 ท่อจากอาคารรับน้ำเข้า วาล์วควบคุมอัตราการไหล และฝายวัดอัตราการไหลด้านท้ายน้ำ โดยจำลองลักษณะทางกายภาพของอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ และสภาพการใช้งานของอาคารระบายน้ำ โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในช่วง 6 – 68.5 เซนติเมตร ในแบบจำลอง และ 58.3 – 66.8 เมตร รทก. ของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ การใช้งานของอาคารระบายน้ำ ในกรณีการไหล 1 ท่อ, 2 ท่อ และ 3 ท่อ และอัตราการเปิดวาล์ว 100%, 75.6%, 50.2% และ 26.3%

ผลการวิเคราะห์จาก 252 กรณีการศึกษา สามารถสรุปสภาพชลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำในแบบจำลองประกอบด้วย การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานที่เป็นการสูญเสียหลัก การสูญเสียเนื่องจากทางเข้าในแต่ละท่อ และการสูญเสียเนื่องจากวาล์ว ความสัมพันธ์อัตราการไหลในรูปสมการ $Q = KH_T^{0.5}$ และ $Q = aA^n H_T^{0.5}$ รวมถึงสภาพการไหลแบบหมุนวน ที่มีความสัมพันธ์ของระดับความลึกที่เกิดการไหลแบบหมุนวนกับค่าเลขฟรูด สำหรับในส่วนของการประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำหนองค้อ มีมาตราส่วนในการปรับตัวแปรความยาว $L_r = 13.64$, เวลา $T_r = 3.69$ และอัตราการไหล $Q_r = 686.66$ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลในอาคารระบายน้ำ ในรูปสมการ $Q = aA^n (H - 57.05)^{0.5}$ สำหรับการไหลแบบหมุนวนวิเคราะห์จากอัตราส่วน $\frac{S}{D}$ เปลี่ยนเป็นระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ ที่เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวนทั้ง 3 แบบ คือ หมุนวนผิวน้ำ, หมุนวนกรวยยาว และหมุนวนมีอากาศไหลเข้าท่อ จากผลการศึกษาทำให้สามารถสรุปเป็น แนวทางในการวางแผนการปล่อยน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ และป้องกันการเกิดการไหลแบบหมุนวน สำหรับกรณีของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

ภาควิชา..... วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่อนิสิต..... ธีรวิชัย แพโคกสูง
สาขาวิชา..... วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ชัยพันธุ์ รัทวิชัย
ปีการศึกษา..... 2547.....

4470233921 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: HYDRAULICS / HYDRAULIC MODEL / OUTLET WORKS / NONG KHO RESERVOIR

KWANCHAI PAKOKSUNG: HYDRAULICS BEHAVIOR OF FLOW THROUGH AN
OUTLET WORK : CASE STUDY OF NONG KHO RESERVOIR. THESIS ADVISOR :
ASSOC.PROF. CHAIPANT RUKVICHAI, Ph.D. 227 pp. ISBN 974-53-1356-4.

This thesis aimed at studying hydraulic behavior of flow through the outlet works of Nong Kho Reservoir. This investigation was studied using a hydraulic model at the Hydraulic and Coastal Model Laboratory, Department of Water Resources Engineering, Chulalongkorn University.

The hydraulic model used in this study consisted of a reservoir model, an intake model, a 3-pipe line system, control valves and downstream weirs. The model was similitude from the physical characteristics and operating conditions of Nong Kho Reservoir. The range of reservoir water level was 6 – 68.5 cm in the model which was corresponding 58.3 to 66.8 m.MSL in the prototype, the operation of the outlet works in case of flow in 1 pipe, 2 pipes, 3 pipes and the valve opening at 100%, 75.6%, 50.2% and 26.3%.

Resulting from 252 cases of experiments, the hydraulics of flow through the outlet works were concluded as followed. The losses of energy head consisted of friction loss, which was major loss, entrance loss and valve loss. The discharge equations were proposed as $Q = KH_T^{0.5}$ and $Q = aA_r^n H_T^{0.5}$. Also the occurrence of vortex flow was related to submergence with the Froude Number. Applying the study results to the case of Nong Kho Reservoir the following model scales were used as $L_r = 13.64$ for length, $T_r = 3.69$ for time and $Q_r = 686.66$ for discharge. The discharge through the outlet works became $Q = aA_r^n (H - 57.05)^{0.5}$. The occurrence of vortex flow was analyzed from the $\frac{S}{d}$ ratio and then convert to the reservoir water level of Nong Kho Reservoir for all 3 types of vortex flow i.e. dimple, vortex strong, and air-entraining. Based on the study results, a guideline was proposed for the planning of the reservoir release and preventing the vortex flow situation for the case of Nong Kho Reservoir.

Department. Water Resources Engineering. Student's signature

Kwanchai Pakoksung

Field of study Water Resources Engineering. Advisor's signature

Chaipant Rukvichai

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านที่ได้ให้คำปรึกษา
เสนอแนะ ให้การช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ สั่งสอนทั้งในด้านวิชาการ การทำงาน และปรัชญา
การใช้ชีวิต อันเป็นประโยชน์แก่ตัวข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ชัยยุทธ สุขศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธ และ
อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาใช้เวลา
ของท่านในการให้คำแนะนำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง
คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิทยาการต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่ให้การสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านสถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสาธารณูปโภค
ต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ ชมรมวิศวกรรมแหล่งน้ำ ที่คอยช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการ
ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการเตรียมรูปเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า
ผู้ที่ให้ความรัก กำลังใจ โอกาส และยอมเหนื่อยยากเพื่อให้การสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้า
มาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบข่ายการศึกษา.....	2
1.4 การดำเนินงานศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการศึกษาที่ผ่านมา.....	5
2.1 สภาพการไหลในของเหลวที่มีความหนืด.....	5
2.2 สมการต่อเนื่องในการไหล 1 มิติ.....	8
2.3 สมการพลังงาน.....	9
2.4 การไหลในท่อ.....	13
2.5 ความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ของท่อความดัน.....	24
2.6 หลักทางพลศาสตร์ของการออกแบบอาคารระบายน้ำ.....	28
2.7 การศึกษาที่ผ่านมา.....	31
บทที่ 3 แบบจำลองพลศาสตร์และการทดลอง.....	35
3.1 รายละเอียดอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	35
3.2 แบบจำลองพลศาสตร์.....	37
3.3 การวัดข้อมูล.....	43
3.4 วิธีการทดลอง.....	44

3.5 ข้อมูลจากการทดลอง.....	48
บทที่ 4 ชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ.....	59
4.1 สภาพการไหลผ่านอาคารระบายน้ำในแบบจำลอง.....	59
4.2 การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน.....	60
4.3 การสูญเสียเนื่องจากทางเข้า.....	63
4.4 การสูญเสียเนื่องจากควาล์ว.....	73
4.5 ความสัมพันธ์อัตราการไหล.....	75
4.6 สภาพการไหลแบบหมุนวน.....	83
4.7 การประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	87
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 แบบจำลองชลศาสตร์.....	98
5.2 การดำเนินการในการทดลอง.....	99
5.3 ชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ.....	100
5.4 การประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	101
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	103
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รายละเอียดแบบจำลองและการเตรียมการทดลอง.....	109
ภาคผนวก ข ผลการทดลองกรณีการไหล 1 ท่อ.....	138
ภาคผนวก ค ผลการทดลองกรณีการไหล 2 ท่อ.....	160
ภาคผนวก ง ผลการทดลองกรณีการไหล 3 ท่อ.....	191
ภาคผนวก จ วิเคราะห์ข้อมูล.....	204
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	227

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1-1 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	4
ตาราง 2-1 สรุปอัตราส่วนของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับ กฎความคล้ายคลึง.....	26
ตาราง 3-1 รายละเอียดของกรณีทดลอง.....	48
ตาราง 3-2 ตัวอย่างข้อมูลการทดลองกรณีการไหล 3 ท่อ.....	51
ตาราง 3-3 สรุปผลการทดสอบของการเกิดการไหลแบบไหลแบบหมุนวน.....	57
ตาราง 4-1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า.....	67
ตาราง 4-2 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องวาล์ว.....	75
ตาราง 4-3 สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีการใช้งานอาคารระบายน้ำ.....	77
ตาราง 4-4 สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	78
ตาราง 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความสูงพลังงานรวมและอัตราส่วน การเปิดวาล์ว.....	82
ตาราง 4-6 สภาพการไหลในแต่ละท่อแต่ละกรณีในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	91
ตาราง 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อและ อัตราส่วนเปิดวาล์ว.....	95
ตาราง 4-8 สภาพการไหลแบบหมุนวนในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	97
ตาราง 5-1 การประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการศึกษา.....	99

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2-1 เครื่องมือการทดลองของ Osborne Reynolds.....	7
รูป 2-2 สภาพการไหลจากการทดลองของ Osborne Reynolds.....	7
รูป 2-3 การไหลของของไหลใน 1 มิติ.....	11
รูป 2-4 แรงที่กระทำต่ออนุภาคของของไหลในทิศทาง s.....	11
รูป 2-5 เส้นความลาดชันชลศาสตร์ (HGL.) และเส้นพลังงาน(EL.) ของของไหลไม่มี ความหนืด.....	11
รูป 2-6 พิจารณาข้อจำกัดของสมการเบอร์นูลลี.....	14
รูป 2-7 เส้นความลาดชันชลศาสตร์ (HGL.) และเส้นความลาดพลังงาน (EGL.).....	14
รูป 2-8 การสูญเสียพลังงานในท่อ.....	17
รูป 2-9 ผลการทดลองของ Nikuradse.....	17
รูป 2-10 แรงที่กระทำต่อของไหลในท่อ.....	17
รูป 2-11 ผลการทดลองของ Colebrook.....	20
รูป 2-12 แผนภาพ Moody.....	20
รูป 2-13 piezometer ท่อปลายเปิด.....	23
รูป 2-14 ลักษณะของรูระบายที่ทำให้ความดันเกิดความคลาดเคลื่อน.....	23
รูป 2-15 การสูญเสียพลังงาน ณ จุดต่าง ๆ ของอาคารระบายน้ำ.....	30
รูป 2-16 รูปแบบการไหลแบบหมุนวน.....	32
รูป 2-17 ตัวแปรในการวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวน.....	32
รูป 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำที่เกิดการไหลแบบหมุนวนกับความเร็วเฉลี่ยใน อาคารทางเข้า.....	34
รูป 3-1 แผนที่ตั้งโครงการอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	36
รูป 3-2 ที่ตั้งอาคารระบายน้ำและแนวท่อส่งน้ำ.....	38
รูป 3-3 ลักษณะตัวเขื่อนดินและอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	39
รูป 3-4 แบบจำลองชลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล.....	40
รูป 3-5 แผนผังส่วนประกอบของแบบจำลองชลศาสตร์.....	42
รูป 3-6 แผนผังการทำทดลอง.....	46
รูป 3-7 ตัวอย่างข้อมูลระดับน้ำกับอัตราการไหลกรณีการไหล 3 ท่อ.....	49
รูป 3-8 ตัวอย่างข้อมูลระดับน้ำกับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 3 ท่อ.....	52
รูป 3-9 ตัวอย่างข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 3 ท่อ.....	53

รูป 3-10	ตัวอย่างข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 3 ท่อ.....	54
รูป 3-11	ตัวอย่างข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 3 ท่อ.....	55
รูป 3-12	สภาพการไหลแบบหมุนวน.....	56
รูป 3-13	ตัวอย่างข้อมูลการไหลแบบหมุนวน กรณีการไหล 3 ท่อ.....	58
รูป 4-1	พลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ.....	59
รูป 4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในแต่ละท่อ.....	61
รูป 4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน.....	62
รูป 4-4	แผนภาพ Moody ของการไหลผ่านท่อระบายน้ำจากอาคารรับน้ำ.....	62
รูป 4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหลในแต่ละท่อ.....	65
รูป 4-6	การเปรียบเทียบการสูญเสียเนื่องจากอาคารทางเข้าของแบบจำลองในแต่ละท่อ.....	66
รูป 4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับเลขเรย์โนลด์.....	69
รูป 4-8	การสูญเสียเนื่องจากทางเข้าของแบบจำลอง.....	72
รูป 4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับการสูญเสียความดันเนื่องจากวาล์ว.....	74
รูป 4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์วกับอัตราการเปิดวาล์ว.....	74
รูป 4-11	ความสัมพันธ์ของค่า K กับอัตราการเปิดวาล์ว.....	80
รูป 4-12	ตัวแปรในการพิจารณาการเกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน.....	83
รูป 4-13	สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 กรณีการไหล 1 ท่อ.....	85
รูป 4-14	สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 2 กรณีการไหล 1 ท่อ.....	85
รูป 4-15	สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2, ท่อที่ 2 และท่อที่ 3).....	86
รูป 4-16	สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3).....	86
รูป 4-17	สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 3 ท่อ.....	88
รูป 4-18	แผนภาพ Moody ของแบบจำลอง(Model) และต้นแบบ(prototype).....	90
รูป 4-19	ความสัมพันธ์ของค่า K กับอัตราการเปิดวาล์วของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ.....	93

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

A	พื้นที่หน้าตัดการไหล, m^2
A_g	พื้นที่เปิดวาล์ว, m^2
A_p	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2
A_r	อัตราส่วนของพื้นที่เปิดวาล์ว
c	ความสูงของอาคารทางเข้า, m
d	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ, m
e	ความสูงของความขรุขระของผนังท่อ (Roughness height), m
F	แรงที่กระทำต่ออนุภาค (Force), Kg_f
f	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน (Friction factor) ในสมการของ Darcy-Weisbach
F	เลขฟรูด (Froude number)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, m/s^2
H	ระดับของเส้นความลาดชลศาสตร์, m
H_e	ความสูงของการสูญเสียความดันที่ทางเข้า, m
h_f	ความสูงของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน, m
H_g	ความสูงพลังงานที่วาล์ว, m
H_T	ความสูงพลังงานรวม (Total head), m
K	สัมประสิทธิ์ $Q=K.H_T^{0.5}$, $m^3/s^{1/2}$
K_e	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า
K_g	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางวาล์ว
L	ความยาวท่อ, m
P	ความดัน (Pressure), kg/m^2
Q	อัตราการไหล (Discharge), m^3/s
Re	เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)
S	ความลึกน้ำของการเกิดการไหลแบบหมุนวน (Submergence), m
T	เวลา, s
v	ความเร็วการไหล (Flow velocity), m/s
W	เลขเวเปเปอร์ (Weber number)

δ	ความหนาของชั้นการไหล (Boundary-layer thickness), m
γ	น้ำหนักจำเพาะ, N/m ³
Γ	ค่าการหมุนวน (Circulation), m ² /s
η	ความหนืดของการหมุนวน (Eddy viscosity), kg-sec/m ²
μ	ความหนืด, kg-sec/m ²
ρ	ความหนาแน่น (Density), kg/m ³
τ	ความเค้นเฉือน, kg/m ²



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันงานทางด้านแหล่งน้ำ เป็นงานที่มีความสำคัญในทางด้านสาธารณสุขโรคพื้นฐานเพราะน้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติพื้นฐานในการดำรงชีวิต ตลอดจนพัฒนาทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ถ้าปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อความเป็นอยู่ของประชาชน ตลอดจนการพัฒนาพื้นที่เกษตรกรรมและการทำอุตสาหกรรม ดังนั้นแหล่งทรัพยากรน้ำที่นำมาใช้ตามความต้องการจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการพัฒนาประเทศ แต่เนื่องจากในบางพื้นที่ ปริมาณน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติไม่เพียงพอต่อความต้องการอ่างเก็บน้ำ จึงเป็นแหล่งน้ำต้นทุนที่มีความสำคัญในการเก็บกักน้ำเพื่อที่จะนำน้ำมาใช้ประโยชน์ ทั้งในการพัฒนาพื้นที่ความเป็นอยู่ของประชาชน, พื้นที่เกษตรกรรม ตลอดจนในงานอุตสาหกรรม

สำหรับการนำน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ ได้ใช้อาคารระบายน้ำเป็นตัวปล่อยน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ โดยลักษณะของอ่างเก็บน้ำต้องมีขนาดที่พอเหมาะสำหรับความต้องการน้ำในการส่งน้ำ ซึ่งในการออกแบบเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการหาขนาดของอาคารระบายน้ำที่พอเหมาะ โดยทั่วไปใช้ทฤษฎีทางชลศาสตร์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นแล้วนำไปออกแบบและควบคุมอัตราการไหลของการส่งน้ำ ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ว่าการวิเคราะห์พฤติกรรมทางทฤษฎีชลศาสตร์เปรียบเทียบกับพฤติกรรมทางชลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจริง จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองชลศาสตร์ในการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมชลศาสตร์การไหลที่เกิดขึ้นจริงในสภาพการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ซึ่งพฤติกรรมทางชลศาสตร์ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ, การไหลแบบหมุนวน, การสูญเสียพลังงาน ตลอดจนความสัมพันธ์ของความขรุขระของท่อต่ออัตราการไหลที่เกิดขึ้น สำหรับในส่วนของการศึกษา ซึ่งได้นำเอาอ่างเก็บน้ำหนองคือเป็นกรณีศึกษา โดยที่อาคารระบายน้ำดังกล่าวมีความยาวของท่อที่มีความยาวจำกัด และมีการควบคุมด้านท้ายน้ำ นอกจากนี้ในส่วนของอาคารระบายน้ำยังมีลักษณะของ multi-outlet work

การศึกษามุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ (outlet works) โดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ ซึ่งนำอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองคือเป็นกรณีในการทำการศึกษาทั้งด้านพฤติกรรมทางชลศาสตร์และผลกระทบของอาคารระบายน้ำในลักษณะของ

multi-outlet works ทั้ง 3 อาคาร โดยทำการศึกษาที่พฤติกรรมเกิดขึ้นเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์โดยทฤษฎีทางชลศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

- 1) ศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ภายใต้สภาพการใช้งานต่าง ๆ ของอ่างเก็บน้ำ โดยแบบจำลอง
- 2) ศึกษาผลกระทบของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำทั้ง 1,2 และ 3 ตัว
- 3) ศึกษาทฤษฎีที่ใช้อธิบายพฤติกรรมชลศาสตร์กับการไหลที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง

1.3 ขอบข่ายการศึกษา

สำหรับการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองชลศาสตร์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล โดยมีขอบข่ายของการศึกษาดังนี้

- 1) การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ โดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ที่สร้างขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) แบบจำลองชลศาสตร์ ประกอบด้วยแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ที่มีขนาด $1.20 \times 4.00 \times 0.70$ เมตร และระบบระบายน้ำ ซึ่งประกอบด้วย อาคารรับน้ำที่ติดตั้งอยู่ภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ 3 ท่อ ซึ่งเป็นท่อใส มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร และวาล์วควบคุมอัตราการไหลด้านท้ายน้ำ
- 3) ตัวแปรกำหนดสภาพเงื่อนไขสภาพการไหล ได้แก่ ระดับน้ำในอ่างเก็บในช่วงความลึก 6 – 68.5 เซนติเมตร และการควบคุมอัตราการไหลด้านท้ายน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 การดำเนินการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีแนวทางการศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์และขอบข่าย
ดังนี้

- 1) ศึกษาหลักการ ทฤษฎี และการศึกษาที่ผ่านมาเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัย
- 2) ศึกษาการสร้างเครื่องมือ อุปกรณ์การทดลอง โดยเริ่มจากการศึกษาแนวทางการสร้างเครื่องมือ ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญและชำนาญในงานด้านเทคนิค ตลอดจนหาแหล่งเงินทุนที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง
- 3) ศึกษาทดสอบ เครื่องมือที่ทำการสร้างขึ้น
- 4) ศึกษาออกแบบการทดลองตามเงื่อนไข และตัวแปรที่กำหนด เพื่อให้ครอบคลุมตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้
- 5) วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองชลศาสตร์
- 6) จัดทำวิทยานิพนธ์

สำหรับขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษา แสดงในตาราง 1-1

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) การดำเนินงานศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองกายภาพ (Physical Model) หรือแบบจำลองชลศาสตร์ วิเคราะห์ปัญหาทางชลศาสตร์ และเพิ่มพูนประสบการณ์ให้กับห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์ และชายฝั่งทะเล
- 2) ก่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ
- 3) ผลการศึกษาอาจเป็นแนวทางพิจารณาในการวางแผนในการส่งน้ำของอาคารระบายน้ำและสำหรับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ ที่ต้องการทำการศึกษาพฤติกรรมทางชลศาสตร์

ตาราง 1-1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

การดำเนินการศึกษา		พ.ศ.2545						พ.ศ.2546												พ.ศ.2547						
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		
1)	ศึกษารวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง	██████████																								
2)	ศึกษาการสร้างเครื่องมือ						██████████																			
3)	สร้างแบบจำลองและออกแบบการทดลอง								██████████																	
4)	ปรับปรุงแบบจำลองและการทดลอง												██████████													
5)	ทำการทดลองในแบบจำลองกรณีต่างๆ														██████████											
6)	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง																		██████████							
7)	จัดทำวิทยานิพนธ์																							██████████		

บทที่ 2

ทฤษฎีและการศึกษาที่ผ่านมา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนทฤษฎีและการศึกษาที่ผ่านมา ที่เกี่ยวกับชลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำและระบบท่อ ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับสภาพการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) สมการต่อเนื่อง (continuity equation) สมการพลังงาน (energy equation) การไหลในท่อความดัน การสูญเสียของระบบท่อ ความคล้ายคลึงทางชลศาสตร์ หลักทางชลศาสตร์ในการออกแบบอาคารระบายน้ำ รวมถึงผลการศึกษาที่ผ่านมา อันเป็นแนวทางในการศึกษาครั้งนี้

2.1 สภาพการไหลในของไหลที่มีความหนืด

การไหลของของไหลที่มีความหนืด (real fluid) มีความยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งมีสภาพการไหล 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ในการไหลแบบราบเรียบ อนุภาคของของไหลมีการเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ เสมือนเป็นชั้นของของไหล โดยชั้นหนึ่งของของไหลทำการเลื่อนไปบนชั้นของไหลที่ติดกันอย่างเป็นระเบียบ ในการไหลแบบปั่นป่วน ของไหลไม่ได้เคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบเป็นชั้นเหมือนกับ การไหลแบบราบเรียบ แต่มีการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความผสมของการไหลตลอดการไหล โดยความเร็วชั่วขณะ ที่จุดใด ๆ ในการไหลแบบปั่นป่วนที่ขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่แน่นอน ซึ่งความเร็วชั่วขณะเหล่านั้นจะเฉลี่ยออกมาได้เป็นความเร็วที่จุดนั้น ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของอนุภาคของของไหลในทุกทิศทางของการไหลในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคใด ๆ จึงไม่สามารถอธิบายในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ แต่สามารถใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์คำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่เฉลี่ยของอนุภาคในการไหลได้

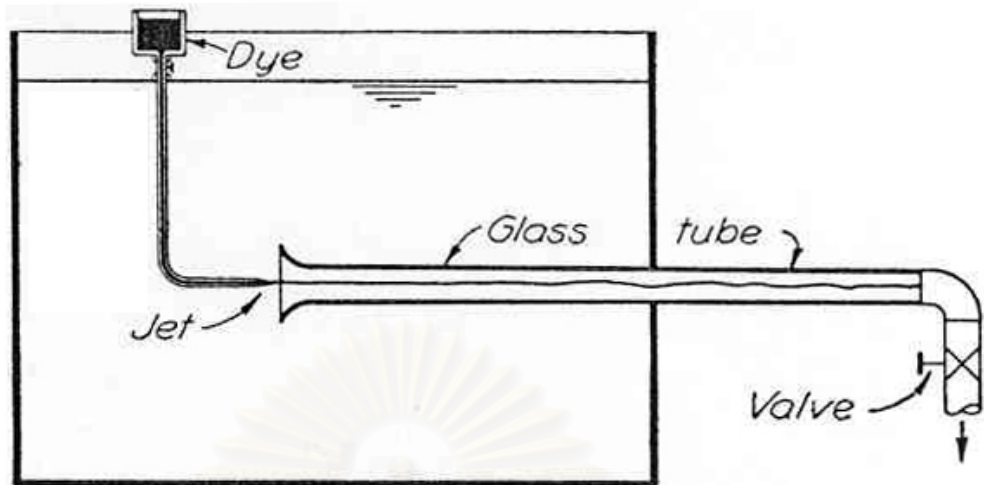
ความเค้นเฉือน (shear stress) ที่เกิดขึ้นในการไหลแบบปั่นป่วน พิจารณาการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด โดยให้ความเร็วที่จุดแรกมีค่า u และจุดที่สองมีค่า $u + \Delta u$ และให้ระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1 โดยที่ความลาดชันของความเร็วระหว่างสองจุดมีค่าเท่ากับ $\frac{du}{dt}$ ถ้า u และ $u + \Delta u$ เป็นความเร็วของชั้นของของไหลที่สมมุติขึ้น และความเร็ว v ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างชั้นของของไหล ซึ่งก่อนการเกิดการเคลื่อนย้ายของอนุภาคระหว่างชั้นของของไหล อนุภาคมีความเร็ว u แทน $u + \Delta u$ แต่หลังจากมีการสับเปลี่ยนชั้นของการไหล อนุภาคจะเปลี่ยนความเร็วเป็น $u + \Delta u$ แทน u ซึ่งหมายความว่าพลังงานโมเมนตัมของอนุภาคได้ถูกเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเคลื่อนย้าย ซึ่งทำให้ชั้นของเหลวที่เคลื่อนที่ช้าเคลื่อนที่เร็วขึ้น

ส่วนชั้นที่เคลื่อนที่เร็วเคลื่อนที่ช้าลง ทำให้มีความเค้นเฉือนระหว่างชั้นของของไหล สามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักของโมเมนตัม ซึ่งค่าความเค้นเฉือนแสดงได้ดังสมการ

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad 2-1$$

โดยที่ η คือ ความหนืดของการหมุนวน (eddy viscosity) ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลได้แต่อย่างใด แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาพของความปั่นป่วน และค่าความหนืดของการหมุนวนในการไหลทั่วไปมีค่าไม่คงที่ตลอดการไหลของของไหล

ความหนืดในของไหลก่อให้เกิดสภาพการไหล 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ลักษณะจำเพาะของสภาพการไหลทั้ง 2 แบบ Osborne Reynolds (1883) ได้จำแนกสภาพการไหลของของไหล โดยใช้สีช่วยมองสภาพการไหลในท่อแก้ว มีเครื่องมือ ดังรูป 2-1 โดยนำในถึงถูกดูดออกทางหลอดแก้ว โดยมีวาล์วทางด้านท้ายเป็นตัวควบคุมการไหลของน้ำผ่านหลอดแก้ว และมีขวดบรรจุน้ำสีซึ่งฉีดสีผ่านหลอดปลายแหลม ในการไหลที่มีอัตราการไหลต่ำซึ่งทำให้ความเร็วของการไหลมีค่าน้อย เส้นสีมีลักษณะ ดังรูป 2-2ก คือเป็นเส้นตรงตลอดท่อ ถ้าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เส้นสีมีลักษณะ ดังรูป 2-2ข คือเปลี่ยนแปลงเป็นลูกคลื่น และถ้าเพิ่มปริมาณอัตราการไหลขึ้นไปอีกเส้นสีมีลักษณะ ดังรูป 2-2ค ซึ่งแตกกระจายออกผสมรวมกับน้ำ โดยการที่เพิ่มอัตราการไหลหรือความเร็วของการไหลในท่อ เรย์โนลด์พบว่าค่าอัตราส่วนไร้หน่วย $\frac{\rho V D}{\mu}$ ซึ่งภายหลังเรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number), Re โดยที่ค่า Re ที่ 12,000 เกิดการเปลี่ยนสภาพการไหลจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ภายหลังมีผู้ทดลองพบว่าสามารถทำให้การไหลราบเรียบคงที่อยู่ได้ถึงค่า Re ที่ 40,000 ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ค่า Re ที่ 40,000 เป็นค่าวิกฤตตอนบนของค่า Re ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เกิดขึ้นได้ในสภาพธรรมชาติโดยทั่วไปมีความสำคัญน้อยมากในทางวิศวกรรม โดยการเริ่มทดลองจากสภาพการไหลแบบปั่นป่วน เรย์โนลด์พบว่าการไหลจะเปลี่ยนมาเป็นการไหลแบบราบเรียบเสมอที่ค่า Re เท่ากับ 2,000 ซึ่งเรียกว่า ค่าวิกฤตตอนล่างที่มีความสำคัญในงานวิศวกรรม เนื่องจากการไหลมีสภาพการไหลแบบราบเรียบเสมอ ถ้าค่า Re ต่ำกว่า 2,000 โดยทั่วไปการไหลในท่อที่เปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่า Re ระหว่าง 2,000 ถึง 4,000 ซึ่งเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (transition flow) จากการไหลแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลทั้งสองแบบยังปนกันอยู่



จาก Streeter 1971

รูป 2-1 เครื่องมือการทดลองของ Osborne Reynolds



ก) การไหลแบบ Laminar flow



ข) การไหลแบบ Transition flow



ค) การไหลแบบ Turbulent flow

จาก Hunter Rouse 1956

รูป 2-2 สภาพการไหลจากการทดลองของ Osborne Reynolds

2.2 สมการต่อเนื่องในการไหล 1 มิติ

สมการต่อเนื่องได้มาจากกฎทรงมวล (conservation of mass) ซึ่งมีขอบเขตจำกัดของจำนวนมวลสารไม่สูญหาย ดังสมการ

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad 2-2$$

พิจารณาการไหลคงตัวที่ไหลผ่านหน้าตัดการไหล ดังรูป 2-3 ที่หน้าตัดที่ 1 มีพื้นที่หน้าตัด δA_1 ความหนาแน่นและความเร็วของการไหลผ่านมีค่า ρ_1 และ v_1 ตามลำดับ ที่หน้าตัดที่ 2 มีพื้นที่หน้าตัด δA_2 ความหนาแน่นและความเร็วของการไหลผ่านมีค่า ρ_2 และ v_2 ดังนั้นอัตราการไหลของมวลสารผ่านหน้าตัด 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $\rho_1 v_1 \delta A_1$ และ $\rho_2 v_2 \delta A_2$ ตามลำดับ เนื่องจากมวลไม่เพิ่มขึ้นและไม่สูญหาย ดังนั้นอัตราการไหลหน้าตัดที่ 1 เท่ากับอัตราการไหลหน้าตัดที่ 2 ดังสมการ

$$\rho_1 v_1 \delta A_1 = \rho_2 v_2 \delta A_2 \quad 2-3$$

เนื่องจากของไหลเป็นของไหลที่ไม่มีการยุบตัว (Incompressible fluid) คือ ความหนาแน่นคงที่

$$; \rho_1 = \rho_2$$

$$v_1 \delta A_1 = v_2 \delta A_2 \quad 2-4$$

อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดที่ 1 และ 2

$$\int_{A_1} v_1 dA_1 = \int_{A_2} v_2 dA_2$$

ให้ v เป็นความเร็วเฉลี่ยทั้งหน้าตัด โดยที่ $v = \frac{1}{A} \int v dA$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad 2-5$$

ให้ Q เป็นอัตราการไหล เท่ากับ $v \cdot A$

$$Q_1 = Q_2 = \text{ค่าคงที่} \quad 2-6$$

2.3 สมการพลังงาน

Leonhard Euler (1750) ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเป็นครั้งแรก ดังรูป 2-4 อนุภาคของของไหลที่มีมวลเท่ากับ $\rho \delta A \delta s$ เคลื่อนที่ตามเส้นการไหลในทิศทาง $+s$ ในของไหลที่ไม่มีความหนืด (Ideal fluid) หรือไม่มี ความเค้นเฉือนเข้ามาเกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออนุภาคการไหลมีเพียงแรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงและแรงดันที่กระทำต่อพื้นที่ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน โดยแรงโน้มถ่วงหรือน้ำหนักของอนุภาคมีค่าเท่ากับ $-\rho g \delta A \delta s \cos \theta$ พิจารณาตามทิศทาง s ในส่วนแรงดันที่กระทำมีค่าเท่ากับ $p \delta A$ ในทิศ $+s$ และ $(p + \frac{\partial p}{\partial s} \delta s) \delta A$ ในทิศ $-s$ ทางด้านต้นและปลายของอนุภาคตามลำดับ ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ดังสมการ

$$\sum F_s = Ma_s$$

แทนค่าแรงและมวลลงในสมการการเคลื่อนที่ ดังสมการ

$$[p \delta A - (p + \frac{\partial p}{\partial s} \delta s) \delta A] - \rho g \delta A \delta s \cos \theta = \rho \delta A \delta s a_s$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \cos \theta + a_s = 0 \quad 2-7$$

δz คือเปลี่ยนแปลงระดับของอนุภาคจากระดับอ้างอิง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นระยะ δs ดังนั้น

$$\frac{\delta z}{\delta s} = \cos \theta = \frac{\partial z}{\partial s} \quad \text{และ} \quad a_s = \frac{\partial z}{\partial s}$$

ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลตามเส้นการไหล ดังสมการ 2-7 เขียนได้ ดังสมการ

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \quad 2-8$$

ค่า p , v และ z มีความสัมพันธ์ในรูปของ s ดังนั้นสมการอนุพันธ์เชิงส่วนเขียนในรูปของสมการอนุพันธ์ ดังสมการ

$$\frac{dp}{\rho} + v dv + g dz = 0 \quad 2-9$$

เป็นสมการของออยเลอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของของไหลตามเส้นการไหล

2.3.1 สมการเบอร์นูลลี

จากสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลของออยเลอร์ในรูปของสมการอนุพันธ์ ดังสมการ 2-9 เมื่อทำการอินทิเกรตได้สมการ

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{ค่าคงที่} \quad 2-10$$

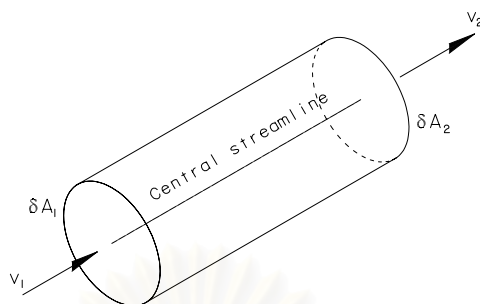
ค่าคงที่จากการอินทิเกรต คือค่าคงที่ของเบอร์นูลลีของเส้นการไหลเดียวกัน โดยจะมีค่าเท่ากันตลอดในเส้นการไหลนั้น ซึ่งในเทอมของตัวแปรด้านซ้ายของสมการมีหน่วยเป็น $\left(\frac{L}{T}\right)^2$ หรือ $\left(\frac{N \cdot m}{kg}\right)$ ซึ่งเป็นหน่วยของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล ในแต่ละเทอมของตัวแปรทางด้านซ้ายของสมการมีความหมายดังนี้ $\frac{p}{\rho}$ เป็นงาน (work done) เนื่องจากการไหล, $\frac{v^2}{2}$ พลังงานจลน์จากของไหลมีความเร็ว และ gz พลังงานศักย์จากความสูงของอนุภาคของของไหลจากระดับอ้างอิง

จากสมการ 2-10 หากตลอดด้วยค่า g ได้สมการ

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (\text{ค่าคงที่}) \quad 2-11$$

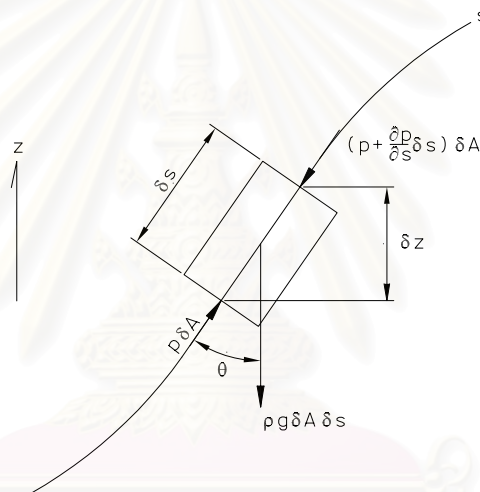
ในแต่ละเทอมทางด้านซ้ายของสมการเป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักคือ (m.N/N) เป็นค่าความสูงพลังงาน (equivalent head) โดยที่ $\frac{p}{\gamma}$ เป็นความสูงแรงดัน (pressure head), $\frac{v^2}{2g}$ เป็นความสูงความเร็ว (velocity head) และ z เป็นความสูงระดับ (potential head) จากการทดลองของ Pitot แสดงให้เห็นว่าผลรวมของความสูงความเร็ว $\frac{v^2}{2g}$ และความสูงแรงดัน $\frac{p}{\gamma}$ วัดโดย ท่อปลายเปิดขนาดเล็กที่เรียกว่า Pitot tube โดยให้ปลายสวนทางการไหล ดังรูป 2-5 แล้วใช้สมการเบอร์นูลลี (สมการ 2-11) พิจารณาการไหลโดยได้ผลรวมของทุกเทอมเท่ากับค่าคงที่ซึ่งเท่ากับระยะจากแนวอ้างอิงถึงเส้นความสูงพลังงาน (energy line, EL.) เส้นความสูงแรงดัน (piezometer head line) หรือเส้นความลาดชลศาสตร์ (hydraulic grade line, HGL.) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความดันของการไหล และระยะจากเส้นลาดชลศาสตร์ถึงเส้นพลังงานเป็นสัดส่วนกับความเร็วยกกำลังสอง

สมการเบอร์นูลลี เริ่มจากเส้นการไหลเส้นเดียวที่มีค่า p , v และ z คงที่ตลอดหน้าตัด ดังนั้นการนำสมการของเบอร์นูลลีไปใช้จึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของสมการ ถ้าพิจารณาจากหน้าตัดใด ๆ ของการไหล ที่เส้นการไหลทุกเส้นที่ตรงและขนานกัน ดังรูป 2-6 แรงที่ตั้งฉากกับเส้น การ



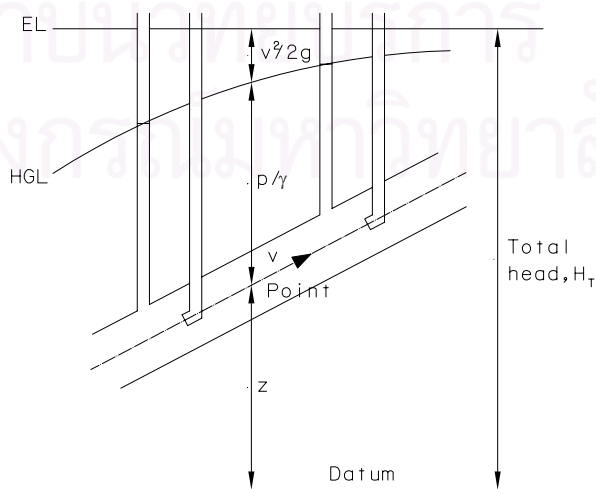
จาก Hunter Rouse 1956

รูป 2-3 การไหลของของไหลใน 1 มิติ



จาก Hunter Rouse 1956

รูป 2-4 แรงที่กระทำต่ออนุภาคของของไหลในทิศทางการไหล s



จาก Frank M.White 1994

รูป 2-5 เส้นความลาดชลศาสตร์ (HGL.) และเส้นพลังงาน (EL.) ของไหลไม่มีความหนืด

ไหลกระทำต่ออนุภาคของการไหล มีค่าเท่ากับ $(p_1 - p_2)\delta_s$ และแรงประกอบเนื่องจาก น้ำหนัก และทิศทางของเส้นการไหลมีค่าเท่ากับ $\rho\delta s \cos\alpha$ เมื่อ $\cos\alpha = (z_2 - z_1)/h$ เนื่องจากเส้นการไหล เป็นเส้นตรงและขนาดกันอัตราเร่งเข้าหาขอบเขตจึงเท่ากับศูนย์ ดังนั้นในการสมดุลย์แรงที่กระทำ $(p_1 - p_2)\delta_s = (z_2 - z_1)\delta_s$ ได้ตั้งสมการ

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad 2-12$$

โดยแสดงให้เห็นว่า $(\frac{p}{\gamma} + z)$ มีค่าคงที่ตลอดหน้าตัดการไหล เมื่อเส้นการไหลเป็นเส้นตรงและขนาดกัน แต่โดยแท้จริงการไหลที่เส้นการไหลทุกเส้นเป็นเส้นตรงและขนาดกันนั้น เป็นเพียงการประมาณสภาพแท้จริงของการไหลเท่านั้น ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของของไหลที่ใช้สมการเบอร์นูลลีได้คือ

- 1) ของไหลไม่มีความหนืด(Ideal Fluid)
- 2) ของไหลไม่มีการยุบตัวและเป็นเนื้อเดียวกันตลอดคือมีค่าความหนาแน่นคงที่
- 3) การไหลต้องต่อเนื่อง โดยที่ความเร็วการไหลไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และอยู่บนแนวการไหลเดียวกัน
- 4) ความเร็วของการไหลเท่ากันตลอดหน้าตัดการไหล
- 5) การไหลเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกและความดัน

ในการไหลของของไหลที่ไม่มีความหนืด (Ideal fluid) ค่าความเร็วตลอดหน้าตัดของการไหลเส้นการไหลเป็นเส้นตรงและขนาดกันมีค่าเท่ากัน แต่ในสภาพของของไหลที่มีความหนืด (real fluid) ค่าความเร็วตลอดหน้าตัดของการไหลไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเทอม $\frac{V^2}{2g}$ เมื่อนำไปใช้กับของไหลที่มีความหนืด ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 2.3.2 และ 2.4 ต้องปรับค่าเพื่อแสดงถึงผลของความหนืด

2.3.2 สมการพลังงานในของไหลที่มีความหนืด

การไหลของของไหลผ่านขอบเขตที่คงตัว ค่า $(\frac{p}{\gamma} + z)$ มีค่าคงที่ ณ หน้าตัดใด ๆ แต่เนื่องจากความหนืดและการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ค่า $(\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z)$ จึงไม่คงที่เมื่อพิจารณาที่หน้าตัดใด ๆ ดังรูป 2-7 เส้นพลังงานการไหลที่จุด A และจุด C ต่างกันเนื่องจากความเร็วที่จุด A และจุด C แตกต่างกัน ดังนั้นที่หน้าตัดใด ๆ ซึ่งเป็นกลุ่มของเส้นพลังงาน โดยแต่ละเส้นพลังงานเป็นของการไหลในแต่ละเส้น แต่ในกรณีของการไหลผ่านขอบเขตที่ขอบขนานเป็นแนวเดียวกันเช่น ท่อ

สามารถใช้เส้นเส้นเดียวซึ่งมีค่าเท่ากับ $\alpha \frac{V^2}{2g}$ พลังงานส่วนหนึ่งของการไหลได้สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด ดังนั้นการพิจารณาพลังงานระหว่างจุด 2 จุดของการไหลต้องนำ พลังงานที่สูญเสียนี้เข้ามารวมด้วย เพื่อให้เป็นไปตามกฎทรงพลังงาน โดยสามารถเขียนสมการเบอร์นูลลีดังสมการ

$$H_1 = H_2 + h_L \quad 2-13$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad 2-14$$

โดยที่ h_L คือ ความสูงของพลังงานที่สูญเสีย (head losses)

การสูญเสียพลังงานระหว่างจุด 2 จุดของการไหล จึงทำให้เส้นพลังงานมีความลาดชัน และแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานจึงเรียกเป็นเส้นความลาดชันของพลังงาน (energy grade line, EGL.)

2.4 การไหลในท่อ

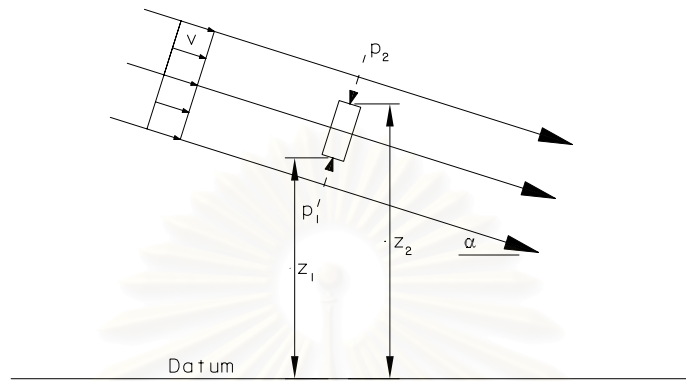
การใช้ท่อเพื่อการขนส่งของไหลโดยเฉพาะอย่างยิ่งของเหลวได้มีมาเป็นเวลาช้านานและยังมีความสำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบัน การไหลของของไหลที่มีความหนืดมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความหนืด การคำนวณการสูญเสียพลังงานต้องอาศัยสมการพลังงาน สมการต่อเนื่องและการคำนวณแรงต้านการไหล การสูญเสียพลังงานนอกจากการสูญเสียเนื่องจากความหนืดแล้วยังมีการสูญเสียเนื่องจากรอยต่อ ทางเข้า ความโค้ง ประตูควบคุมการไหลในท่อ และอื่น ๆ สมการพลังงานที่ใช้คำนวณการไหลในท่อดังสมการ

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad 2-15$$

ในสมการดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์ α มักจะถูกตัดออกจากทั้งสองข้างของสมการด้วยเหตุผลดังนี้

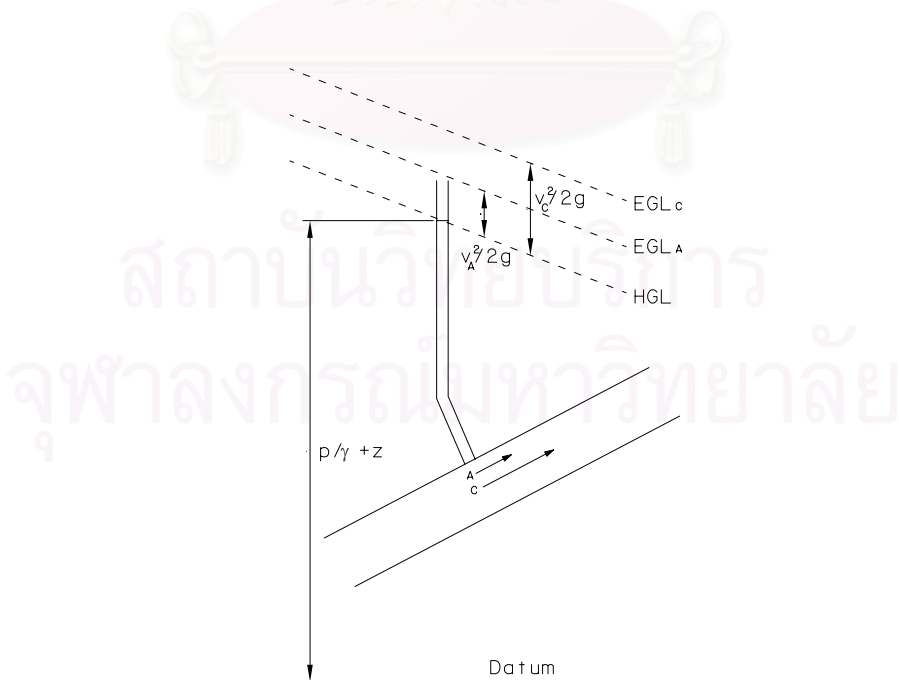
- 1) การไหลในท่อทั่วไปส่วนมากเป็นการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งค่า α มีค่าใกล้เคียง 1
- 2) การไหลแบบราบเรียบที่มีค่า α ค่อนข้างสูง ความสูงเนื่องจากความเร็วมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์อื่น ๆ ในสมการ

ซึ่งสิ่งที่ควรสนใจในการพิจารณาคือ การสูญเสียพลังงาน (h_L) ในการไหลในท่อ



จาก John A. Roberson 1997

รูป 2-6 พิจารณาข้อจำกัดของสมการเบอร์นูลลี



จาก John A. Roberson 1997

รูป 2-7 เส้นความลาดชลศาสตร์ (HGL.) และเส้นความลาดพลังงาน (EGL.)

2.4.1 การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานในท่อ

เป็นการสูญเสียหลักที่เกิดขึ้นของการไหลในท่อ เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำในท่อที่มีความดัน ดังรูป 2-8 ความสูงของการสูญเสียพลังงานแปรผันโดยตรงกับความสูงความเร็วและความยาวท่อ แต่แปรผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ โดยการใช้สัมประสิทธิ์ของสัดส่วน f ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction factor), f Darcy และ Weisbach (อ้างอิง Streeter 1971) หาสมการของการสูญเสีย ดังสมการ

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad 2-16$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นฟังก์ชันกับค่าความเร็ว v , เส้นผ่าศูนย์กลาง D , ความหนาแน่น ρ , ความหนืด μ และค่าลักษณะจำเพาะของความขรุขระของผนังท่อ e , e' และ m โดยที่ e คือขนาดความสูงของความขรุขระมีมิติเป็นความยาว, e' คือช่องว่างระหว่างความขรุขระมีมิติเป็นความยาว และ m เป็นรูปร่างของความขรุขระเป็นตัวแปรไร้หน่วย ค่า f เป็นตัวแปรไร้หน่วยที่มีฟังก์ชันของตัวแปรในข้างต้น ดังนี้

$$f = f'(v, D, \rho, \mu, e, e', m) \quad 2-17$$

สำหรับท่อเรียบ e , e' และ $m = 0$ ทำให้ตัวแปรที่เหลือจัดกลุ่มเป็น $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ ในท่อขรุขระ e , e' ทำให้เป็นตัวแปรไร้หน่วย

$$f = f'\left(\frac{\rho v D}{\mu}, \frac{e}{D}, \frac{e'}{D}, m\right) \quad 2-18$$

จากการทดลองของ Blasius (อ้างอิง Streeter 1971) พบว่าความสัมพันธ์ของ f และ Re อยู่ในรูปของสมการ

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad 2-19$$

ในท่อขรุขระ $\frac{e}{D}$ คือความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness) Nikuradse ทดสอบหาความสัมพันธ์โดยการใส่ท่อและทรายสามขนาด โดยที่ e คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทรายที่มีขนาดเท่ากันติดเข้ากับผนังของท่อ โดยให้ค่าความขรุขระสัมพัทธ์เป็นค่าคงที่สำหรับท่อทั้งสามขนาด ได้ผลการทดลอง ดังรูป 2-9 ค่าความขรุขระสัมพัทธ์ที่เท่ากันมีเส้นความสัมพันธ์ของค่า f

กับ Re เป็นเส้นเดียวกันไม่ว่าท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่าใด โดยแสดงให้เห็นว่า $f = f''(Re, \frac{e}{D})$ จากรูป 2-9 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) ในขอบเขตการไหลแบบราบเรียบค่าความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re เป็นเส้นตรงและความขรุขระของผนังท่อไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
- 2) ที่ค่า Re มากขึ้นจนถึงค่าค่าหนึ่ง ค่า f ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า Re แต่จะขึ้นอยู่กับค่า $\frac{e}{D}$ หมายความว่าความหยาบไม่มีอิทธิพลต่อสภาพการไหล
- 3) ที่ค่า Re มากกว่า 4,000 การไหลอยู่ในสภาพการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ค่า f เริ่มแยกออกจากค่า f ของท่อเรียบมากขึ้นตามความขรุขระของท่อ
- 4) ความสัมพันธ์ระหว่าง f , Re และ v อยู่ในรูปที่ซับซ้อน ซึ่งต้องใช้สมการ $h_f = Cv^n$ แทนค่าในบางช่วง

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถแบ่งตามสภาพการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

1) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการไหลแบบราบเรียบ

Hagen (1839) และ Poiseuille (1841) (อ้างอิง Streeter 1971) ได้เสนอผลการทดลองในรูปสูตรสำเร็จออกมา ต่อมา 20 ปี Hagenbach และ Neumann ซึ่งต่างก็เสนอผลการวิเคราะห์หาความเสียดทานในการไหลแบบราบเรียบออกมา

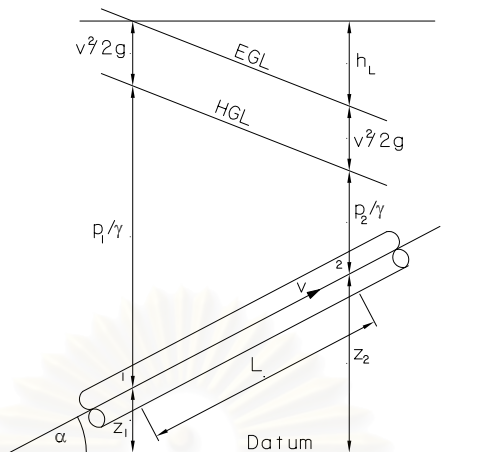
เมื่อพิจารณาจากรูป 2-10 ท่อวางอยู่ในแนวระดับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D โดยที่การไหลภายในท่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ ความดันลดลง Δp เนื่องจากการสูญเสียพลังงานในระยะทาง ΔL และความเสียดทาน ดังนั้นความเค้นเฉือนของชั้นของของไหลที่มีรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี r มีค่าเท่ากับ $\tau 2\pi r \Delta L$ โดยมีแรงดันที่กระทำมีค่าเท่ากับ $\Delta p \pi r^2$ สมดุลย์แรงในการเคลื่อนที่ ดังสมการ

$$\tau = \frac{\Delta p r}{\Delta L} \quad 2-20$$

กฎความหนืดของนิวตัน $\tau = \mu \frac{dv}{dr}$ แทนค่าในสมการ 2-20 ได้ $dv = -\frac{\Delta p r}{\Delta L} \frac{dr}{2\mu}$

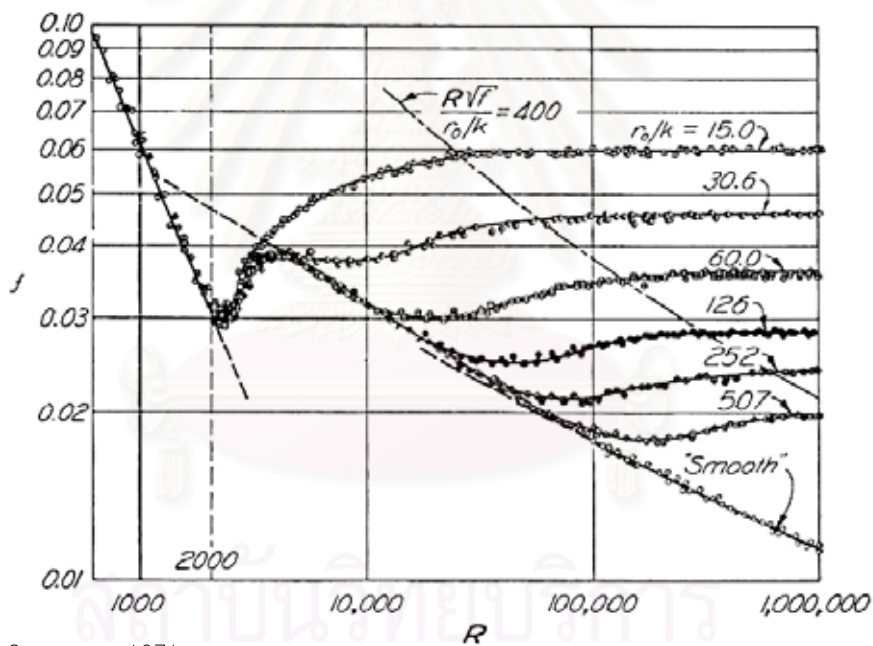
อินทิเกรตได้

$$v = -\frac{\Delta p r^2}{\Delta L} \frac{1}{4\mu} + \text{ค่าคงที่} \quad 2-21$$



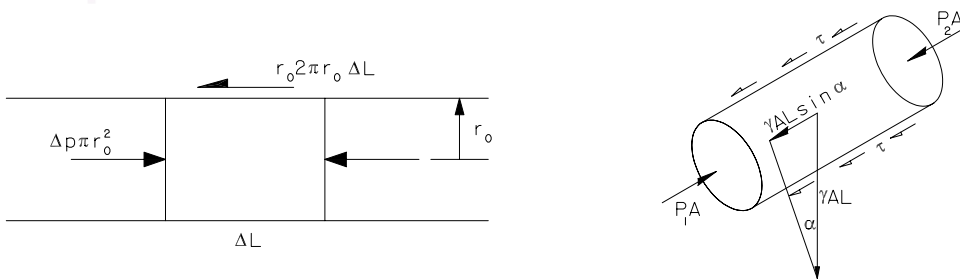
จาก John A. Roberson 1997

รูป 2-8 การสูญเสียพลังงานในการไหลในท่อ



จาก Streeter 1971

รูป 2-9 ผลการทดลองของ Nikuradse



จาก Streeter 1971

รูป 2-10 แรงที่กระทำต่อของไหลในท่อ

ในการไหลที่มีความหนืด ค่า $v = 0$ เมื่อ $r = \frac{D}{2}$ แทนค่าในสมการ 2-21

$$v = -\frac{\Delta p}{\Delta L} \frac{1}{4\mu} \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right) \quad 2-22$$

เป็นสมการพาราโบลา โดยที่ความเร็วสูงสุดเกิดที่แนวกึ่งกลางของท่อ คือ $r = 0$

$$v_{\max} = \frac{\Delta p D^2}{\Delta L 16}$$

$$v = \frac{v_{\max}}{2} = \frac{\Delta p D^2}{\Delta L 32\mu} \quad 2-23$$

แทนค่า $\frac{\Delta p}{\Delta L}$ ลงในสมการ 2-20

$$\tau = \frac{32\mu V r}{D^2}$$

เป็นสมการเส้นตรง โดยที่ $\tau = 0$ ที่แนวกึ่งกลางของท่อ จากสมการ 2-23 การสูญเสียความดัน $\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{32\mu V \Delta L}{\rho g D^2}$ เนื่องจากการสูญเสียพลังงานเป็นสัดส่วนกับความยาวท่อ ดังสมการ

$$h_f = \frac{32\mu V L}{\rho g D^2} \quad 2-24$$

ที่รู้จักในสมการของ Hagen-Poiseuille แทนค่า h_f จากสมการ 2-16 ในสมการ 2-24

$$f = \frac{64\mu}{VD\rho} = \frac{64}{Re}$$

2) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วน

พิจารณการไหลในท่อ ดังรูป 2-10 ได้ $\tau = \frac{\Delta p r}{\Delta L 2}$ การสูญเสียความดัน Δp ดังสมการ

$$\Delta p = \gamma h_f = f \frac{\Delta L}{2r} \rho \frac{V^2}{2} \quad 2-25$$

นำ Δp ออกจากสมการ

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{\frac{f}{8}} V$$

$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ คือความเร็วเนื่องจากความเค้นเฉือน ใช้ในการหาความสัมพันธ์โดย Prandtl ในรูปสมการ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A_s + B_s \ln(Re\sqrt{f}) \quad 2-26$$

สำหรับท่อเรียบ และ
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A_s + B_s \ln\left(\frac{e}{D}\right) \quad 2-26$$

ประกอบกับผลการทดลองของ Nikuradse ดังสมการ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.86 \ln(Re\sqrt{f}) - 0.8 \quad 2-27$$

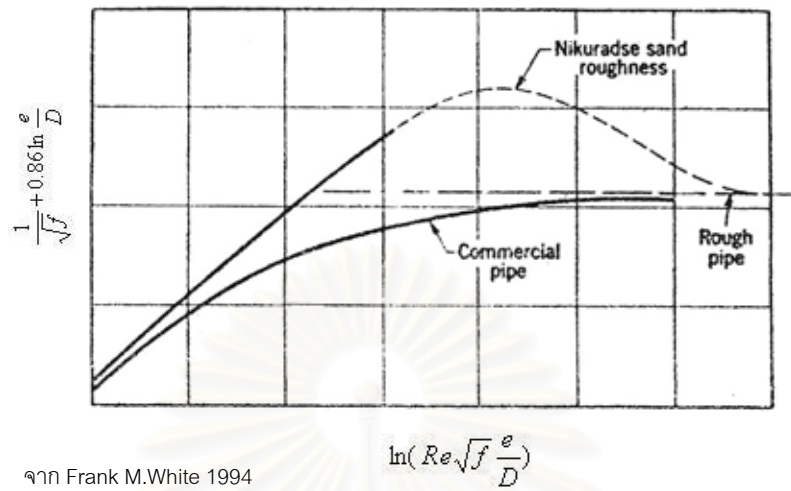
และ
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 + 0.86 \ln\left(\frac{e}{D}\right) \quad 2-28$$

ค่าความสูงของความขรุขระ, e จากการทดลองของท่อทรายอาจใช้เปรียบเทียบกับความขรุขระของท่อที่ใช้กันโดยทั่วไป ถ้ารู้ค่า f ในท่อที่ใช้กันโดยทั่วไปและเมื่อการไหลในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ค่า f หาได้จากสมการ 2-28 ใน transition zone คือโซนที่อยู่ระหว่างท่อเรียบ (smooth pipe) กับท่อหยาบ (rough pipe) ซึ่งค่า f ขึ้นอยู่กับค่า $\frac{e}{D}$ และ Re ผลที่ได้จากท่อทรายแตกต่างไปจากท่อที่มีใช้กันโดยทั่วไป ดังรูป 2-11 เส้นกราฟจากสมการ 2-27 และ 2-28 ต่างไปจากผลการทดลองของท่อที่มีใช้กันโดยทั่วไป ผลการทดลองของ Colebrook (Frank M. White 1994) เสนอสมการใหม่ดังนี้

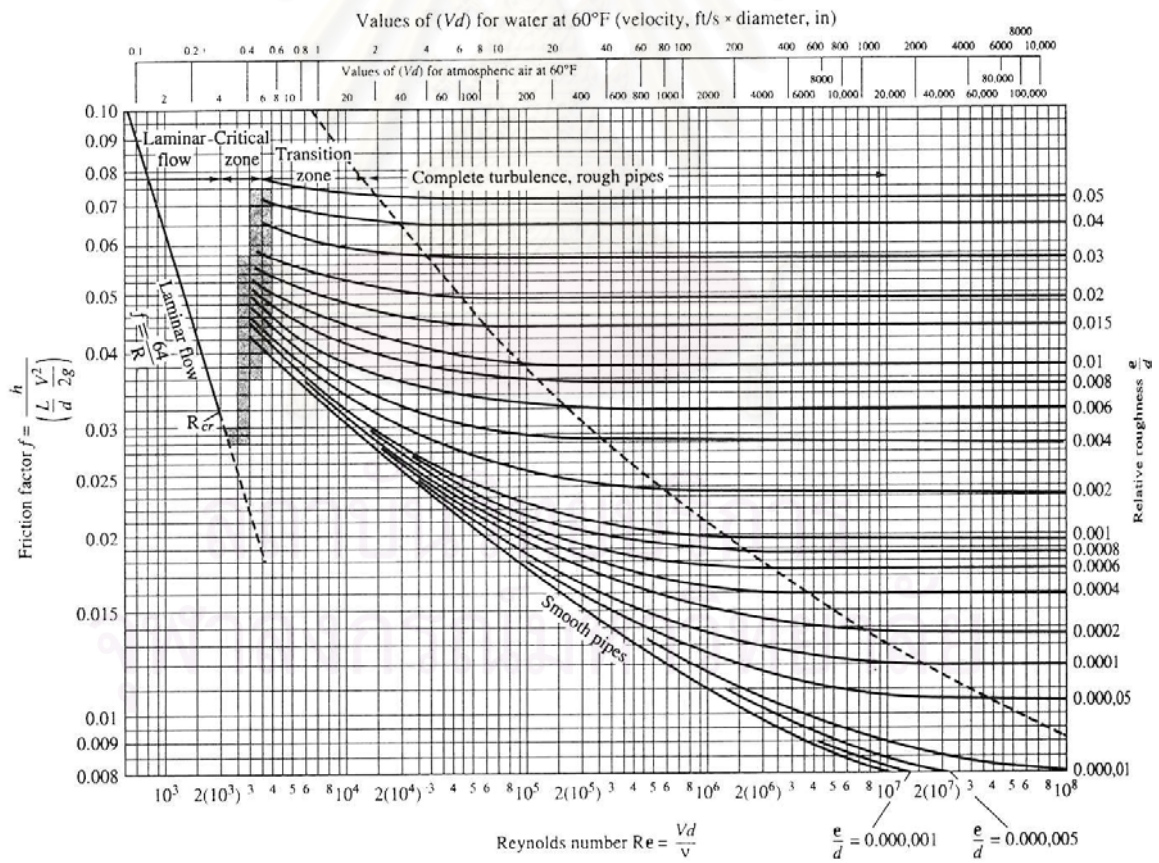
$$\frac{1}{\sqrt{f}} + 0.86 \ln \frac{e}{D} = 1.14$$

จากสมการ 2-27 บวก $0.86 \ln \frac{e}{D}$ เข้าทั้งสองข้าง $\frac{1}{\sqrt{f}} + 0.86 \ln\left(\frac{e}{D}\right) = 0.86 \ln(Re\sqrt{f} \frac{e}{D}) - 0.8$ ให้ $\frac{1}{\sqrt{f}} + 0.86 \ln\left(\frac{e}{D}\right)$ เป็นแกน Y และ $\ln(Re\sqrt{f} \frac{e}{D})$ เป็นแกน X ดังรูป 2-11 ผลการทดลองจากท่อเรียบเป็นเส้นตรงโดยมีความลาดชันเท่ากับ 0.86 และผลการทดลองจากท่อทรายของ Nikuradse เป็นเส้นประใน transition zone และผลการทดลองจากท่อที่ใช้กันโดยทั่วไปอยู่เส้นด้านล่าง

ความแตกต่างของผลการทดลองทั้งสองเกิดขึ้นเพราะชั้นการไหลแบบราบเรียบ ในการทดลองของ Nikuradse ส่วนสูงของความขรุขระเท่ากันตลอดความยาวท่อ ดังนั้นส่วนสูงที่พื่นชั้นการไหลแบบราบเรียบจึงเท่ากันตลอด แต่ท่อที่ใช้กันโดยทั่วไป ส่วนสูงของความขรุขระไม่เท่ากันตลอด ดังนั้นสมการของท่อที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งเป็นสมการของ Colebrook ดังสมการ



รูป 2-11 ผลการทดลองของ Colebrook



รูป 2-12 แผนภาพของ Moody

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \left(\frac{e/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad 2-29$$

เพื่อความสะดวกในการใช้งานในการหาค่าความสัมพันธ์ของสมการ 2-27, 2-28 และ 2-29 L.F Moody ปี 1944 (อ้างอิง Streeter 1971) ได้สร้างกราฟสำหรับหาค่า f ในท่อที่ใช้กันทั่วไป ดังรูป 2-12 ซึ่งเรียกว่า Moody Diagram เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง f กับความขรุขระสัมพัทธ์ $\frac{e}{D}$ และ Re โดยได้ค่า f และ Re จากการทดลองแล้วนำกลับไปแทนค่าในสมการ 2-27, 2-28 และ 2-29 ซึ่งได้ค่าความขรุขระจริงของท่อที่ได้จากการทดลอง

2.4.2 การสูญเสียรองในระบบท่อ

การสูญเสียรอง (minor losses) ในระบบท่อเป็นการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ การไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ประตูน้ำ และการเชื่อมต่อท่อ เป็นต้น (อ้างอิง Andrew 1993) ซึ่งทำให้แนวการไหลเปลี่ยนแปลง ถ้าในกรณีที่เป็นท่อยาวก็อาจจะไม่พิจารณาถึงผลของการสูญเสียรองเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลัก แต่ก็ต้องพิจารณาผลของจำนวนอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วยว่ามีผลมากน้อยเพียงใด ถ้ากรณีที่เป็นท่อสั้น การสูญเสียรองจะมีผลมากขึ้น และเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการวิเคราะห์ระบบท่อ ซึ่งการสูญเสียรองจะมีค่ามากเมื่อความเร็วของกระแสน้ำมากขึ้น เพราะทำให้เกิดการไหลววน (eddy) ที่ทำให้เกิดการแยกตัวของการไหลออกจากขอบเขตของท่อ ซึ่งการสูญเสียรองมีความสัมพันธ์กับความสูงความเร็ว (velocity head) โดยคำนวณออกมาเป็นจำนวนเท่าของความสูงเนื่องจากความเร็ว ดังสมการ

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad 2-30$$

หรือ

$$h_m = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad 2-31$$

หรือ

$$h_m = K \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad 2-32$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (minor losses coefficient) ขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่าง ลักษณะ วัสดุ และขนาดของอุปกรณ์ประกอบท่อ

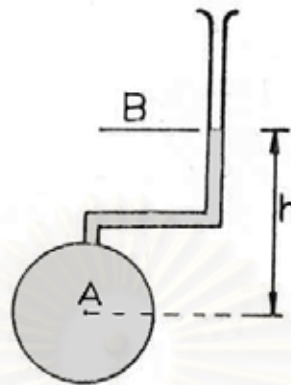
2.4.3 การวัดความดันในระบบท่อ

เนื่องจากความดันและความเร็วมีความสัมพันธ์กันตามสมการพลังงาน ดังนั้นถ้าสามารถหาความเร็วและอัตราการไหลได้ ความดันสถิตของของไหลที่เคลื่อนที่คือความดันที่วัดได้โดยการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหล เครื่องมือวัดความดันแบบที่ให้ความละเอียดสูงคือเครื่องมือวัดความดันแบบใช้หลอด (manometer) โดยอาศัยหลัก ของเหลวชนิดเดียวกันที่ติดต่อกัน ความดันที่ระดับเดียวกันเท่ากัน และความดันที่อยู่ต่างระดับกัน h มีความดันต่างกันเท่ากับ γh

หลอดวัดความดัน (Piezometer) คือเครื่องมือวัดความดัน ที่ใช้ความสูงของของไหลที่ใช้เป็นตัวบอกค่าความดัน ดังรูป 2-13 เครื่องมือประกอบด้วยท่อใส่ต่อออกมาจากจุด ที่ต้องการวัดความดัน ของเหลวจะดันตัวขึ้นไปในท่อใส่ปลายเปิด ค่าความดันที่จุด A ; $P_A = \gamma h + P_B$ ถ้า P_B เป็นความดันบรรยากาศ และ $P_A = \gamma h + P_{at}$ ซึ่งเป็นความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure) ถ้าความดันบรรยากาศเป็นศูนย์ $P_A = \gamma h$ เป็นความดันเกจ (gage pressure) ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะใช้กับงานดังนี้

- 1) ของไหลที่เป็นก๊าซ
- 2) ท่อที่มีความดันสูงมาก เพราะ h สูงมาก
- 3) ท่อที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ Vacuum หรือ Negative pressure

สิ่งที่ควรระวังในการวัดความดันในระบบท่อ หลอดที่ใช้วัดความดันที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กประมาณ 10 ถึง 15 มิลลิเมตร จะมีผลของแรงดึงผิวเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย (อ้างอิง P.Novak 1981) สำหรับหลอดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ระดับที่เพิ่มขึ้นจากความเป็นจริงเนื่องจากแรงดึงผิว (capillary elevation) ในหลอดประมาณ 3 มิลลิเมตร ในส่วนของรูระบายที่เจาะเพื่อวัดความดัน ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กประมาณ 1 ถึง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะไม่เป็นการรบกวนการไหลในระบบท่อ ความคลาดเคลื่อนของความดัน ดังรูป 2-14 เนื่องจากทิศทางของรูระบาย ความคลาดเคลื่อนที่ทำให้มีค่าความดันมีค่าสูงกว่าที่เป็นจริง ดังรูป 2-14ก ซึ่งมีทิศทางของรูระบายที่เอียงสวนทางกับทิศทางการไหล ส่วนความคลาดเคลื่อนที่ทำให้มีค่าความดันมีค่าต่ำกว่าที่เป็นจริง ดังรูป 2-14ข โดยที่ทิศทางของรูระบายที่เอียงไปในทางเดียวกันกับทิศทางการไหล สำหรับรูระบายที่ถูกต้อง ดังรูป 2-14ค ซึ่งมี 2 แบบ คือแบบที่เจาะตรงโดยมีรูระบายที่เจาะยาวมากกว่า 2 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูระบาย และแบบที่เจาะให้ทางเข้าค่อย ๆ แคบเข้าโดยมีรัศมีความโค้งเท่ากับ $1/4$ ของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูระบาย



จาก P.Novak 1981

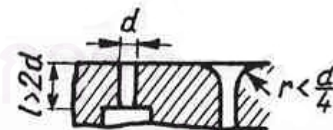
รูป 2-13 piezometer ท่อปลายเปิด



ก) ความดันสูงกว่าปกติ



ข) ความดันต่ำกว่าปกติ



ค) รูระบายที่ถูกต้อง

จาก P.Novak 1981

รูป 2-14 ลักษณะของรูระบายที่ทำให้ความดันเกิดความคลาดเคลื่อน

2.5 ความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ของท่อความดัน

สิ่งที่ต้องการในการทดสอบแบบจำลอง (model) คือการนำผลมาใช้กับต้นแบบ (prototype) กฎความคล้ายคลึง (Laws of Similitude) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการวิเคราะห์ และการทดสอบผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองและต้นแบบ ซึ่งทั้งสองมีความคล้ายคลึงสมบูรณ์ ต่อเมื่อมีความคล้ายคลึงใน 3 ลักษณะดังนี้

- ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (geometric similitude)
- ความคล้ายคลึงทางจลนศาสตร์ (kinematics similitude)
- ความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ (dynamic similitude)

กฎของฟรูด (Froude laws) (อ้างอิง P.Novak 1981) ใช้ในการจำลองสภาพที่แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) โดดเด่นและมีความสำคัญ ให้นำแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และแรงเฉื่อย (Inertia force) มาพิจารณา คือ อัตราส่วนของแรงเนื่องจากแรงเฉื่อย (F_i) ต่อแรงดึงดูดของโลก (F_g) ในแบบจำลองต้องเท่ากับในต้นแบบ ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{F_i}{F_g}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_g}\right)_p \quad 2-33$$

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

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

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

$$\frac{v_r^2}{g_r L_r} = 1 \quad \text{หรือ} \quad \frac{v_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad 2-34$$

สำหรับการไหลของของไหลเมื่อพิจารณาโดยกฎของฟรูด สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังตาราง 2-1 ระหว่างแบบจำลองและต้นแบบจริง

กฎของเรย์โนลด์ (Reynolds laws) (อ้างอิง P.Novak 1981) ใช้ในการจำลองสภาพที่มีแรงเนื่องจากความหนืดของของไหลเป็นแรงสำคัญ ซึ่งเป็นอัตราส่วนแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล ในแบบจำลองต้องเท่ากับในต้นแบบ ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$P = \mu \frac{dv}{dr} A \quad \text{เมื่อ } P \text{ คือ แรงเนื่องจากความหนืด}$$

อัตราส่วนของแรงในต้นแบบกับแบบจำลอง

$$P_r = \frac{P_p}{P_m} = \frac{\mu_p (dv_p / dr_p) A_p}{\mu_m (dv_m / dr_m) A_m} = \mu_r v_r L_r \quad 2-35$$

$$\mu_r v_r L_r = \rho_r L_r^2 v_r^2$$

$$\frac{\rho_r L_r v_r}{\mu_r} = R_r = 1$$

$$\text{โดยที่ } v = \frac{\mu}{\rho}; \quad \frac{v_p L_p}{\nu_p} = \frac{v_m L_m}{\nu_m} \quad 2-36$$

สำหรับการไหลของของไหลเมื่อพิจารณาโดยกฎของเรย์โนลด์์ สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังตาราง 2-1 ระหว่างแบบจำลองและต้นแบบจริง

2.5.1 การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในท่อเรียบ

ในส่วนของท่อที่เป็นท่อเรียบ (อ้างอิง P.Novak 1981) โดยที่ $\delta' > 4k$ สามารถตรวจสอบโดยการคำนวณจากสมการ

$$\frac{\delta'}{r} = \frac{11.6\nu}{rv\sqrt{f/8}} = \frac{65.6\nu}{vD\sqrt{f}} = \frac{65.6}{R\sqrt{f}} \quad 2-37$$

หรือตรวจสอบจากรูป 2-14 สำหรับค่า f ในต้นแบบจริงและในแบบจำลอง สมการ 2-27 สามารถนำมาใช้ได้ ในแบบจำลอง ค่าความขรุขระอาจไม่มีความจำเป็น เพราะค่า f เป็นฟังก์ชันกับค่า Re และมีความสัมพันธ์กับชั้นความหนืดของการไหลแบบราบเรียบ ดังสมการ 2-37 สำหรับแบบจำลองทำให้สอดคล้องไปตามความคล้ายคลึงตามกฎของเรย์โนลด์์ โดย $f_m = f_p$ และความลาดชันชลศาสตร์ (hydraulic gradient) $s = h_f / L$ โดยทั่วไปในแบบจำลองจะมีค่ามากกว่าใน ต้นแบบจริง ถ้าใช้ของเหลวชนิดเดียวกัน

$$h_{fr} = \frac{f_r L_r v_r^2}{D_r} \quad 2-38$$

$$v_r = \frac{v_r}{D_r}; \quad \frac{v_r D_r}{\nu_r} = 1$$

ตาราง 2-1 สรุปอัตราส่วนของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับ กฎความคล้ายคลึงของฟรูด และ
กฎความคล้ายคลึงของเรย์โนลด์

parameter	symbol	Dimension	scale for	
			Froude	Reynolds
Length	L	L	L_r	L_r
Area	A	L^2	L_r^2	L_r^2
Volume	V	L^3	L_r^3	L_r^3
Time	t	T	$L_r^{1/2}$	$L_r^2 v_r^{-1}$
Velocity	v	LT^{-1}	$L_r^{1/2}$	$L_r^{-1} v_r$
Acceleration	a	LT^{-2}	1	$L_r^{-3} v_r^2$
Angular velocity	ω	T^{-1}	$L_r^{-1/2}$	$L_r^{-2} v_r$
Discharge	Q	$L^3 T^{-1}$	$L_r^{5/2}$	$L_r v_r$
Specific discharge	q	$L^2 T^{-1}$	$L_r^{3/2}$	v_r
Mass	m	M	$L_r^3 \rho_r$	$L_r^3 \rho_r$
Force	P	MLT^{-2}	$L_r^3 \gamma_r$	$\mu_r \rho_r^{-1}$
Specific pressure	p	$ML^{-1} T^{-2}$	$L_r \gamma_r$	$L_r^{-2} \mu_r^2 \rho_r^{-1}$
Impulse and momentum	i	MLT^{-1}	$L_r^{7/2} \rho_r$	$L_r^2 \mu_r$
Energy and work	e	$ML^2 T^{-2}$	$L_r^4 \gamma_r$	$L_r \mu_r^2 \rho_r^{-1}$
Power	N	$ML^2 T^{-3}$	$L_r^{7/2} \gamma_r$	$L_r^{-1} \mu_r^3 \rho_r^{-2}$

For $g_p = g_m = g$, $\gamma_r = \rho_r$

จาก P.Novak 1981

For the same liquid in model and prototype $\gamma_r = \rho_r = \mu_r = v_r = 1$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{h_{fr}}{L_r} = \frac{f_r v_r^2}{D_r}$$

สำหรับ $v_r = 1$, $f_r = 1$ และ $L_r = D_r$

$$h_{fr} = \frac{1}{D_r^2} \quad 2-39$$

ถ้าในทางกลับกัน ต้องการให้ความลาดชันชลศาสตร์ (hydraulic gradient) ในแบบจำลองเท่ากับต้นแบบจริง สำหรับ $Re < 10^5$ จากสมการ 2-38 สำหรับ f_r จากสมการของ Blasius (สมการ 2-19) สำหรับ $Re_p \neq Re_m$ เมื่อ $v_r = 1$ และ $\frac{h_{fr}}{L_r} = 1$

$$v_r = D_r^{5/7} \quad 2-40$$

$$f_r = D_r^{-3/7} \quad 2-41$$

2.5.2 การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในท่อช่วง Transition zone

ในท่อต้นแบบจริงถ้ามีการไหลอยู่ในโซน Transition ($\frac{1}{6} < \delta' / k < 4$) ค่า f เป็นฟังก์ชันกับ Re และมีความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (อ้างอิง P.Novak 1981) ซึ่งในแบบจำลองมีการไหลอยู่ในโซน Transition และท่อเรียบ แต่ค่าของสัมประสิทธิ์ f มีผลน้อยมากเมื่อมีการปรับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (จากสมการ 2-29) และรักษาไว้ซึ่งความคล้ายคลึงตามกฎของฟรูด โดยที่ค่า Re ในแบบจำลองเป็นไปตามท่อเรียบหรือใกล้เคียง ซึ่งในต้นแบบก็เช่นกัน ในความเป็นไปได้ของความคล้ายคลึงของการกระจายความเร็วและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่ง $f_r = 1$, $v_r = D_r^{1/2}$ และจากสมการ 2-38; $h_{fr} = L_r$ โดยมีสัดส่วนของแบบจำลอง ดังสมการ

$$\frac{k_p}{r_p} + \frac{18.7}{Re_p \sqrt{f_p}} = \frac{k_m}{r_m} + \frac{18.7}{Re_m \sqrt{f_m}} \quad 2-42$$

2.5.3 การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในท่อขรุขระ

ในท่อต้นแบบจริงถ้ามีการไหลอยู่ในโซนท่อหยาบ ($k > 6\delta'$) ซึ่งค่า Re มีค่ามาก ค่าสัมประสิทธิ์ f ไม่ขึ้นอยู่กับค่า Re และมีความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (อ้างอิง P.Novak 1981) โดยกลไกความคล้ายคลึงของแบบจำลอง คือการกระจายความเร็วที่เหมือน

กับต้นแบบจริง $f_r = 1$ และการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน $h_{fr} = L_r$ ด้วยความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต จากการเท่ากันของค่าความขรุขระสัมพัทธ์ในแบบจำลองและต้นแบบจริง $k_r = L_r = D_r$ ซึ่งเทียบเป็นสัดส่วนในการจำลอง และรักษาไว้ซึ่งความคล้ายคลึงตามกฎของฟรูด โดยมีความสัมพันธ์ของสัดส่วนในการจำลอง (scale model) ดังสมการ

$$\frac{Re_p}{Re_m} = \frac{v_r D_r}{V_r} = D_r^{3/2} \geq \frac{Re_p}{Re_{sq}} \geq \frac{Re_p k_m \sqrt{f}}{400 r_m} \geq \frac{Re_p k_p \sqrt{f}}{200 D_p} \quad 2-43$$

2.6 หลักทางชลศาสตร์ของการออกแบบอาคารระบายน้ำ

สภาพการไหลทั่วไปของอาคารระบายน้ำ มีทั้งแบบที่เป็นการไหลแบบทางน้ำเปิดในท่อ และการไหลแบบท่อความดัน สำหรับการไหลแบบทางน้ำเปิดในท่ออาศัยหลักการไหลของของไหลแบบคงที่ไม่สม่ำเสมอ (steady nonuniform) และกฎทรงพลังงาน ส่วนการไหลแบบท่อความดัน ใช้หลักการไหลในท่อ ซึ่งเป็นการศึกษาในด้านการสูญเสียพลังงานและผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล

2.6.1 การไหลแบบทางน้ำเปิดในอาคารระบายน้ำ

การไหลแบบทางน้ำเปิดในอาคารระบายน้ำ พิจารณาค้นคว้ากับการไหลข้ามสันของทางระบายน้ำสั้น โดยที่น้ำไม่ท่วมทางเข้าของอาคารระบายน้ำ คำนวณการไหลดังสมการ

$$Q = CLH^{3/2} \quad 2-44$$

โดยที่ C คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลข้ามสันระบายน้ำสั้น

เมื่อระดับน้ำสูงขึ้น น้ำท่วมทางเข้าของอาคารระบายน้ำ รูปแบบการไหลในการพิจารณาการไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบการไหลผ่านรูระบาย (orifice flow) คำนวณการไหลดังสมการ

$$Q = CA\sqrt{2gH} \quad 2-45$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

H คือ ผลต่างความสูงระหว่างระดับด้านเหนือน้ำและทำynnน้ำ

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหล สำหรับการไหลผ่านรูระบาย

2.6.2 การไหลแบบท่อแรงดันของอาคารระบายน้ำ

การควบคุมทางด้านทำynnน้ำ โดยประตูน้ำหรือวาล์ว ทำให้การไหลในระบบท่อของอาคารระบายน้ำเป็นการไหลแบบท่อแรงดัน สำหรับการออกแบบใช้หลักการของสมการพลังงาน ในการพิจารณาผลรวมของความสูงพลังงานในระบบท่อของอาคารระบายน้ำ ดังสมการ

$$H_T = h_L + h_{V_2} \quad 2-46$$

โดยที่ H_T คือ ผลรวมของความสูงพลังงาน

h_L คือ ผลรวมของการสูญเสียพลังงานในระบบท่อ

h_{V_2} คือ ค่าของความสูงความเร็ว

จากสมการ 2-46 พิจารณาแยกการสูญเสียพลังงาน (USBR 1961, DESIGN OF SMALL DAMS)

ดังรูป 2-15 ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงาน ณ จุดต่าง ๆ ของระบบได้ดังนี้

$$H_T = h_t + h_e + h_{b5} + h_{f5} + h_{ex(5-4)} + h_{f4} + h_{c(4-3)} + h_{g3} + h_{ex(3-1)} + h_{f1} + h_{b1} + h_{c(1-2)} + h_{g2} + h_{V2}$$

$$H_T = K_t \left(\frac{V_6^2}{2g} \right) + K_e \left(\frac{V_5^2}{2g} \right) + K_{b5} \left(\frac{V_5^2}{2g} \right) + f \frac{L_5}{D_5} \left(\frac{V_5^2}{2g} \right) + K_{ex} \left(\frac{V_5^2}{2g} - \frac{V_4^2}{2g} \right) + f \frac{L_4}{D_4} \left(\frac{V_4^2}{2g} \right) + K_c \left(\frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_4^2}{2g} \right) + K_g \left(\frac{V_3^2}{2g} \right) + K_{ex} \left(\frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + f \frac{L_1}{D_1} \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) + K_{b1} \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) + K_c \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + K_g \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) + K_v \left(\frac{V_2^2}{2g} \right)$$

$$Q = a_1 v_1 = a_x v_x, a_1^2 v_1^2 = a_x^2 v_x^2 \text{ และ } \frac{a_1^2 v_1^2}{2g} = \frac{a_x^2 v_x^2}{2g} \text{ ดังนั้น } \frac{v_x^2}{2g} = \left(\frac{a_1}{a_x} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

$$H_T = \frac{v_1^2}{2g} \left[\left(\frac{a_1}{a_6} \right)^2 K_t + \left(\frac{a_1}{a_5} \right)^2 (K_e + K_{b5} + f \frac{L_5}{D_5} + K_{ex}) + \left(\frac{a_1}{a_4} \right)^2 (f \frac{L_4}{D_4} - K_{ex} - K_c) + \left(\frac{a_1}{a_3} \right)^2 (K_c + K_g + K_{ex}) + (f \frac{L_1}{D_1} - K_{ex} + K_{b1} - K_c) + \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 (K_c + K_g + K_v) \right]$$

โดยที่ h_t คือ การสูญเสียของ ตะแกรง(trashrack)

h_e คือ การสูญเสียของ ทางเข้า

h_b คือ การสูญเสียของ ช่องอ

h_f คือ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน

h_{ex} คือ การสูญเสียของ การขยายหน้าตัด

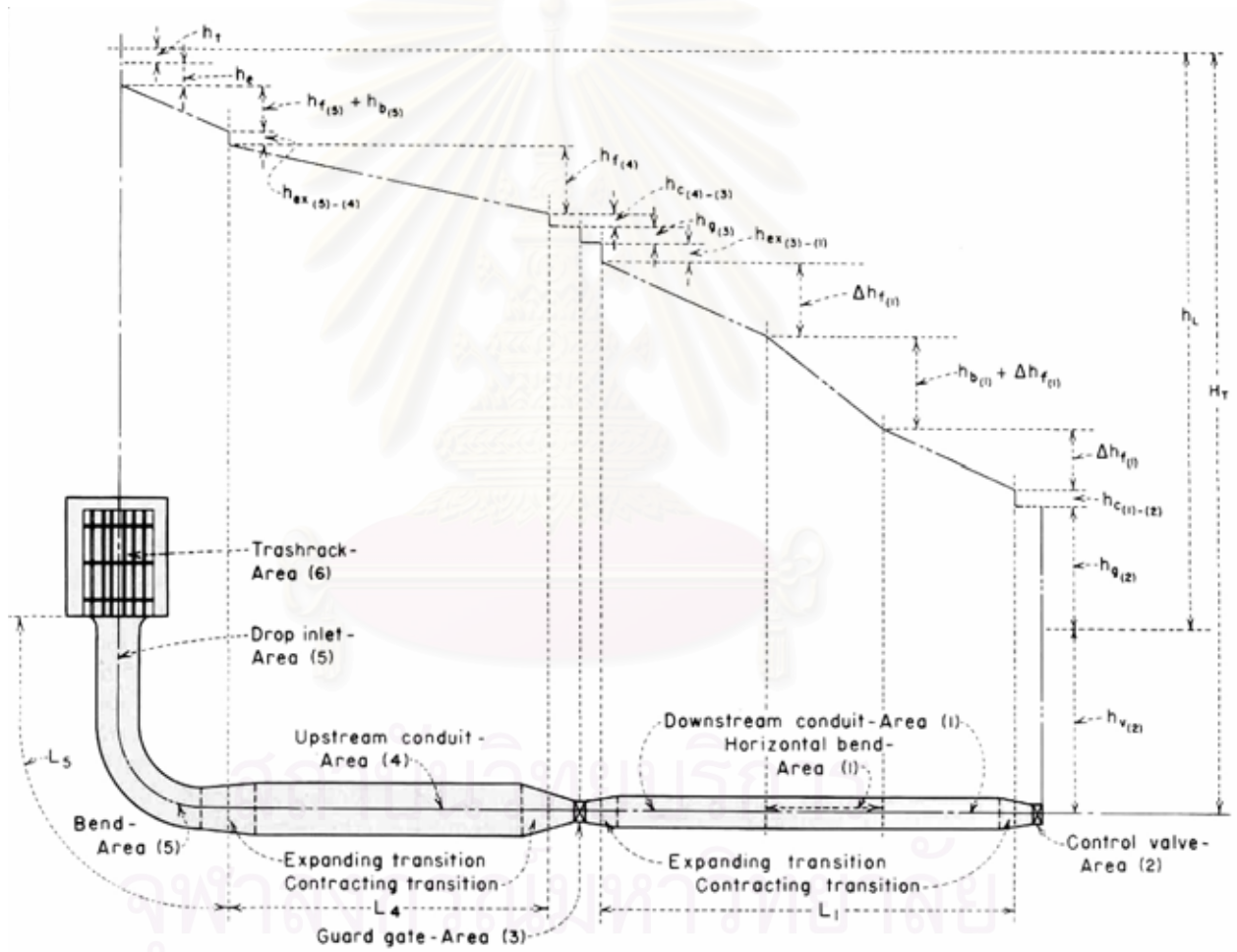
h_c คือ การสูญเสียของ การลดหน้าตัด

h_g คือ การสูญเสียของ ประตูน้ำหรือวาล์ว

h_v คือ การสูญเสียของ ทางออก

K_t คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ ตะแกรง(trashrack)

- K_e คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ ทางเข้า
- K_b คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ ช่องอ
- f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในสมการของ Darcy-Weisbach
- K_{ex} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ การขยายหน้าตัด
- K_c คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ การลดหน้าตัด
- K_g คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ ประตูน้ำหรือวาล์ว
- K_v คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ ทางออก



จาก USBR Design of Small Dams 1961

รูป 2-15 การสูญเสียความดัน ณ จุดต่างๆ ของอาคารระบายน้ำ

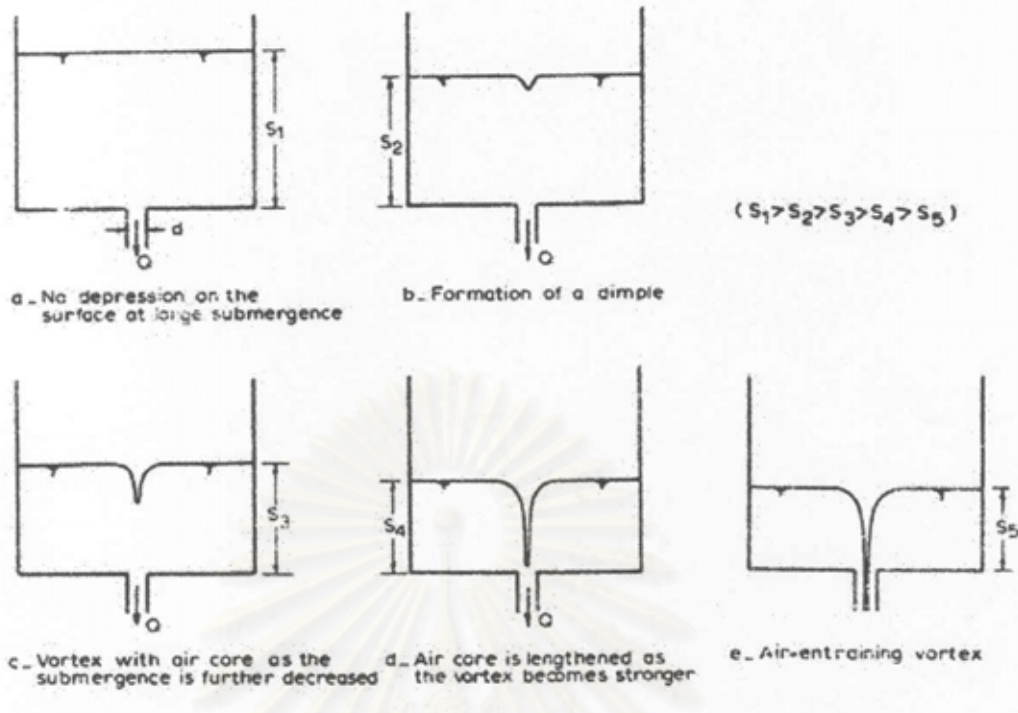
2.7 การศึกษาที่ผ่านมา

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1955) ทำการศึกษาการไหลในท่อในส่วนของการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของท่อโดยท่อมี่ขนาด 3, 5 และ 7 ฟุต ซึ่งผนังท่อเป็นแบบลูกฟูกมี 2 ลักษณะคือเป็นลูกฟูกร้อยละ 50 และเป็นลูกฟูกร้อยละ 75 โดยมีช่วงของท่อที่ทำการศึกษาทดลองเป็นท่อตรง ซึ่งใช้ Pitot tube ในการวัดความดันของแต่ละจุดในท่อ ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (Friction factor, f) ซึ่งได้ผลการศึกษาคือ ค่า f เปลี่ยนแปลงตาม D^5

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1963) ทำการศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ (outlet work) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ สำหรับ Cougar Dam โดยแบบจำลองมีมาตราส่วน 1:25 ซึ่งทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบการออกแบบโดยทฤษฎีทางชลศาสตร์ และศึกษาในส่วนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี ซึ่งการศึกษานั้นทำให้ทราบถึงการวัดความดันในท่อระบายน้ำของอาคารระบายน้ำ

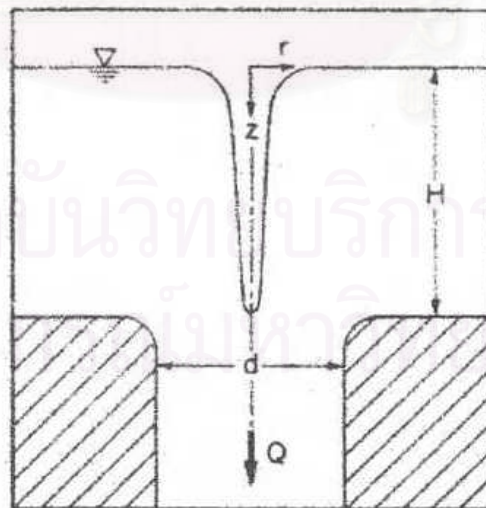
Gordon (1970) ทำการศึกษาระดับความลึกที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน โดยเป็นกรณีศึกษาของอาคารทางเข้าแบบทางเดียว โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งความลึกของการเกิดการไหลแบบหมุนวนดังกล่าวเป็นฟังก์ชันกับความเร็วการไหลและมิติของประตูน้ำ ดังความสัมพันธ์ดังนี้ $h = Cv^n a^m$ โดยที่ C คือค่าสัมประสิทธิ์, a คือความสูงของการเปิดประตูน้ำ จากการศึกษาวิเคราะห์ regression analysis ซึ่งได้ค่า $n = 1$ และ $m = 0.5$

Akalank K. Kain และคณะ (1978) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดการไหลแบบหมุนวน(vortex) โดยให้คำจำกัดความของระดับการเกิดการไหลแบบหมุนวน ซึ่งมี 5 ระดับ ดังรูป 2-16 ตั้งแต่ระดับน้ำนิ่งจนถึงการเกิดมีการดูดอากาศเข้าไปในท่อของอาคารทางเข้า (critical submergence) ซึ่งใช้แบบจำลองชลศาสตร์ในการศึกษา ใช้ของเหลว 2 ชนิดในการศึกษาคือน้ำและสารประกอบเซลล์ลูโลส การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการไหลแบบหมุนวน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $S_c = f(D, D_0, d, Re, Q, \Gamma, \rho, \mu, \sigma, g)$ จากผลการศึกษาได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ $K \frac{S_c}{d} = 5.6(N_\Gamma^{0.84} F)^{0.5}$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่า ระดับน้ำที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนมีตัวแปรคือ ค่าการหมุนวน (circulation number) และค่าเลขฟรูด (froude number) และ K เป็นฟังก์ชันของความหนืด ; $K = f(N_\nu)$ โดยที่ $N_\nu = \frac{g^{1/2} d^{3/2}}{\nu}$ ซึ่งแรงตึงผิวไม่มีผลต่อ critical submergence เมื่อ Weber number $\frac{\rho \nu^2 d}{\sigma} \geq 120$



จาก Akalank K. Kain

รูป 2-16 รูปแบบการเกิดการไหลแบบหมุนวน



จาก A.Jacob Odgaard

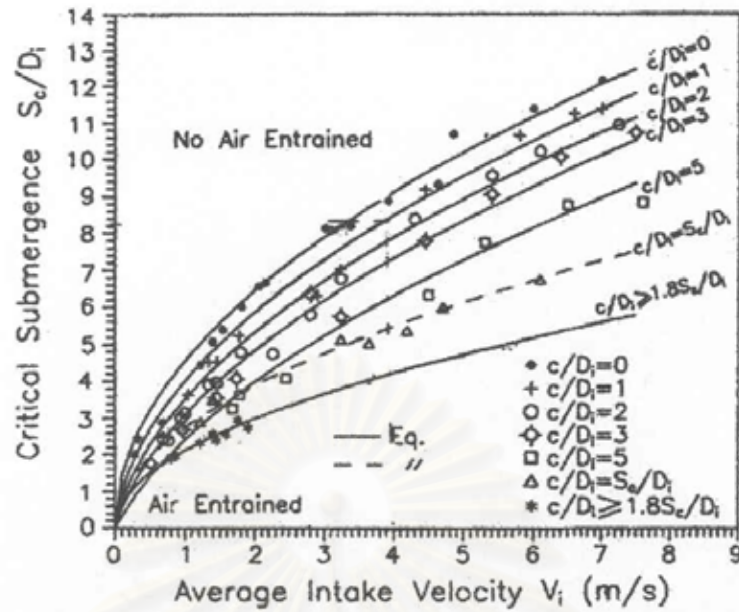
รูป 2-17 ตัวแปรในการวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวน

A.Jacob Odgaard (1985) ศึกษาการเกิดการไหลแบบหมุนวน (vortex) โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบหมุนวนของ Rankine มาเป็นพื้นฐานสำหรับการหาสมการของ critical submergence โดยสมการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับ ค่า Froude number, circulation number, Reynolds number และ Weber number ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตัวแปรหลักที่มีผลต่อ critical submergence คือ Froude number และ circulation number โดยมีตัวแปรในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ประกอบด้วย ความลึกของระดับน้ำที่เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน, ขนาดของทางเข้า และอัตราการไหล ดังรูป 2-17 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการวิเคราะห์การหมุนวน โดยการเคลื่อนที่ของของไหลที่ไม่ยุบตัวแบบราบเรียบ ได้รับความสัมพันธ์ของระดับที่เกิด critical submergence ดังสมการ

$$\left(\frac{H}{d}\right)^2 = -1.0 \frac{F^2 R^{1/2} \left(\frac{H}{D}\right)^{1/2}}{W(1 + \frac{v}{V})^{1/2}} + 0.00337 \frac{F^2 R N_{\Gamma}^2}{1 + \frac{v}{V}}$$

และสัมประสิทธิ์อัตราการไหล
$$C = 12.2 \frac{\left(\frac{H}{D}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{v}{V}\right)}{N_{\Gamma} R^{1/2}}$$

Navzat Yildirim and Fikret Kocabas (1998) ทำการศึกษาระดับน้ำที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (vortex) ซึ่งเน้นศึกษาค่าของระดับที่เริ่มมีอากาศไหลเข้าในอาคารทางเข้า โดยเรียกระดับความลึกดังกล่าวว่า critical submergence ในการศึกษามุ่งเน้นที่จะนำผลที่ได้มาใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของระดับน้ำที่เริ่มเกิดการไหลแบบหมุนวนที่เริ่มมีอากาศไหลเข้าไปในท่อ กับขนาดของอาคารทางเข้าและขนาดของทางเข้า ดังสมการ
$$\frac{S_c}{D_i} = \frac{-(c/D_i) + \sqrt{(c/D_i)^2 + (v_i/2V_s)}}{2}$$
 โดยที่ S_c คือ critical submergence, D_i คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอาคารทางเข้า, c คือ ระยะความสูงของอาคารทางเข้าจากพื้น, V_i คือ ความเร็วในท่อของอาคารทางเข้า และ v_s คือ ความเร็วของการหมุนวน ซึ่งเป็นสมการที่ประยุกต์มาจากทฤษฎีของ Rankine โดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ที่ใช้ทดสอบสมการดังกล่าว มีลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา ขนาดของท่อที่เป็นอาคารทางเข้ามีค่า $c/D_i = 0, 1, 2, 3, 5$ และ $c/D_i \geq S_c/D_i$ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างระดับ critical submergence กับความเร็วเฉลี่ยในท่อที่อาคารทางเข้าขนาดต่าง ๆ ดังรูป 2-18 เป็นการแบ่งโซนของการเกิดมีอากาศไหลเข้าไปในท่อของอาคารทางเข้า โดยการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทำการศึกษาผลที่ทำให้เกิด critical submergence จาก แรงตึงผิว, ความหนืด (Reynolds number), Froude number และ circulation



จาก Navzat Yimdilim

รูป 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกน้ำที่เกิดการไหลแบบหมุนวนที่มีอากาศไหลเข้าท่อกับความเร็วเฉลี่ยในอาคารทางเข้า

Ma Jiming และ คณะ (2000) ศึกษาระดับความลึกน้ำต่ำสุดที่เกิดการไหลแบบหมุนวนกรณีทางเข้ามี 2 ทางเข้า ซึ่งใช้แบบจำลองทางกายภาพ โดยเป็นส่วนแรกของการออกแบบในโครงการ Three Gorges จากการศึกษพบว่า ความลึกของระดับน้ำที่เกิดการไหลแบบหมุนวนที่มีอากาศไหลเข้า (air-entraining vortex) มีความสัมพันธ์กับค่าเลขฟรูด (Froude number) ; $\frac{h}{D} = f(F) = f\left(\frac{v}{\sqrt{gd}}\right)$ และเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารทางเข้าทางเดียวจากการศึกษาของ Gordon (1970) พบว่าที่ระดับเดียวกันมีการเกิดการไหลแบบหมุนวนรุนแรงน้อยกว่าอาคารทางเข้าทางเดียว

Xing Shuyan and Gao Enen (2001) ศึกษาหาความเหมาะสมของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลในท่อ โดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ พบว่าการสูญเสียพลังงานมีผลสืบเนื่องมาจากอัตราการไหล, ระดับความดันก่อนไหลผ่านหน้าตัดการเปลี่ยนแปลง และความยาวของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหล

Walter F. Silva-Araya (2001) ทำการศึกษาการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อที่ความหยาบ โดยใช้วาล์วที่มีการควบคุมอัตราการไหลโดยวาล์ว ที่ใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนการหมุนวาล์ว โดยเครื่องมือดังกล่าวประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชุดทดกำลังของมอเตอร์ซึ่งทำการหมุนวาล์วด้วยโซ่ และชุดแสดงการเปิดวาล์ว

บทที่ 3

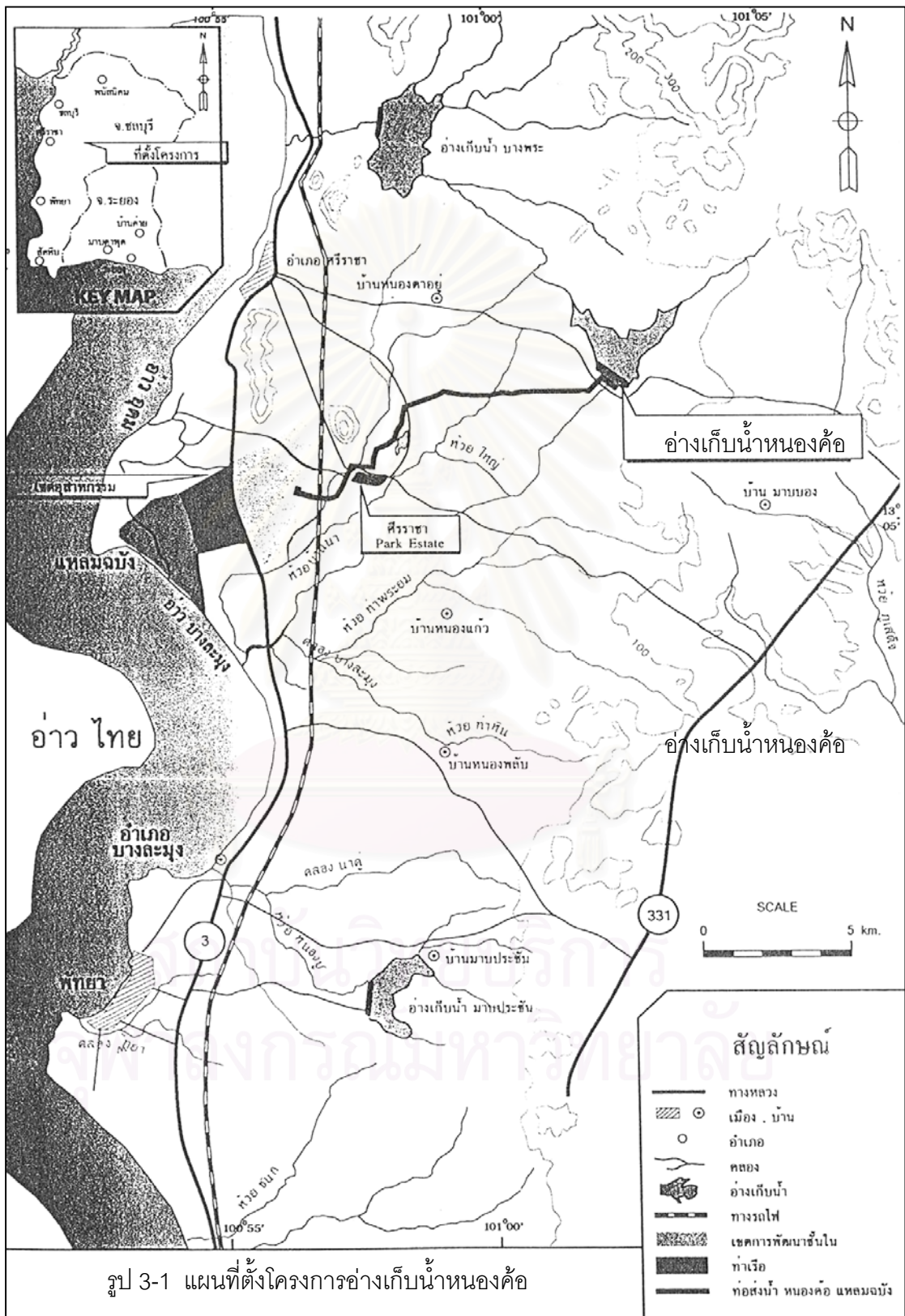
แบบจำลองชลศาสตร์และการทดลอง

ในการศึกษาทางด้านชลศาสตร์ จำเป็นต้องมีเทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการศึกษาเพื่อให้ทราบและเข้าใจถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ทางชลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีแนวทางในการศึกษา 3 แนวทางด้วยกัน คือ การสังเกตและการวัดในภาคสนาม การสังเกตและวัดในแบบจำลองกายภาพ (Physical model) และการคำนวณวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical model) แม้ว่าในปัจจุบันแบบจำลองคณิตศาสตร์จะเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากความรวดเร็วประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถประยุกต์ใช้ในงานศึกษาต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาทางชลศาสตร์อีกมากที่ไม่สามารถใช้สมการคณิตศาสตร์อธิบายได้ เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาและตัวแปรต่าง ๆ ดังนั้นวิธีการสังเกตและวัดในภาคสนามน่าจะเป็นวิธีศึกษาที่ถูกต้องมากที่สุด แต่มีค่าใช้จ่ายในการศึกษาสูงและมีตัวแปรธรรมชาติอยู่มากจึงยากในการแปลความหมายของข้อมูล ส่วนการศึกษาโดยใช้แบบจำลองกายภาพที่มีขนาดเหมาะสม ที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าและสามารถควบคุมและผันแปรตัวแปรได้อย่างเหมาะสม ทำให้การแปลความหมายข้อมูลง่ายกว่าการศึกษาในสนาม ดังนั้นในหลายกรณีศึกษาโดยใช้แบบจำลองกายภาพจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

การสร้างแบบจำลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของโครงสร้างทางชลศาสตร์จริงที่มีอยู่แล้ว ที่ต้องการนำไปใช้ปรับปรุงหรือแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากทำการก่อสร้างไปแล้ว ซึ่งในการสร้างแบบจำลองชลศาสตร์แล้วทำการทดลองเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจได้อย่างดียิ่ง การทดลองในแบบจำลองสามารถแปลงข้อมูลต่าง ๆ เป็นข้อมูลต้นแบบโดยใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึง (Law of Similitude) ในการศึกษาใช้แบบจำลองกายภาพในการศึกษาพฤติกรรมชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ในกรณีของอ่างเก็บน้ำหนองค้อเพื่อทราบถึงพฤติกรรมชลศาสตร์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

3.1 รายละเอียดอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

อ่างเก็บน้ำหนองค้อ ตั้งอยู่ที่ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ดังรูป 3-1 บนทางหลวงหมายเลข 3241 ก่อสร้างแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2526 มีวัตถุประสงค์เพื่อส่งน้ำดิบไปยังแหล่งอุตสาหกรรมแหลมฉบัง รวมถึงการส่งน้ำเพื่อการชลประทานและการระบายน้ำ โดยที่มีรายละเอียดของโครงสร้าง ประกอบด้วย



— อาคารห้วงาน

ชนิด เขื่อนดิน

ระดับสันเขื่อน	+68.00	รทก.
ความสูงเขื่อน	17.00	เมตร
ความยาวเขื่อน	2,060	เมตร

— อ่างเก็บน้ำ

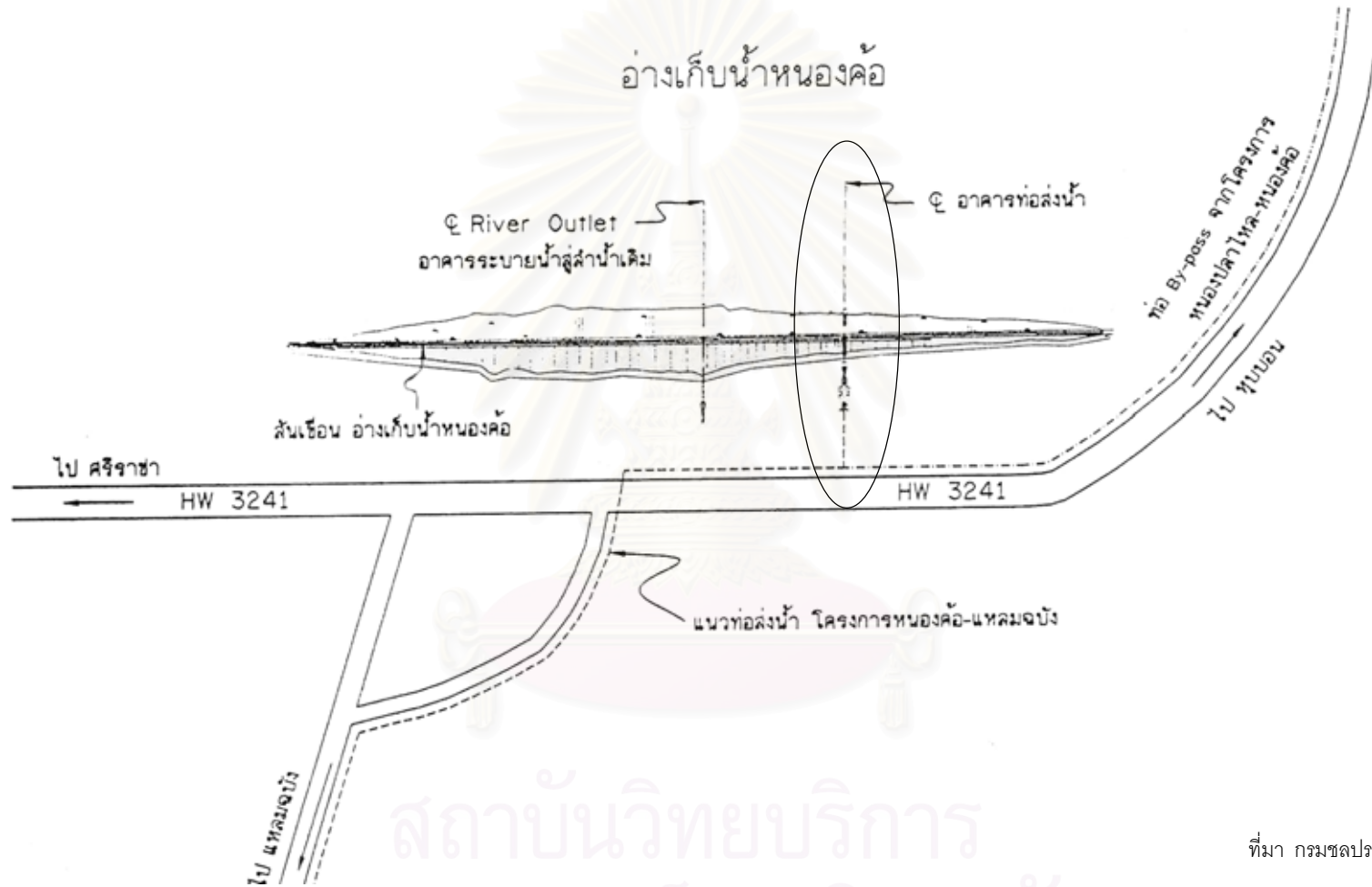
ความจุอ่างฯ ที่ระดับน้ำนองสูงสุด	26.0	ล้าน ลบ.ม.
ความจุอ่างฯ ที่ระดับเก็บกักปกติ	19.0	ล้าน ลบ.ม.
ความจุอ่างฯ ไม่ใช้การ	1.0	ล้าน ลบ.ม.
ความจุอ่างฯ ใช้การ	18.0	ล้าน ลบ.ม.
ระดับน้ำนองสูงสุด	+66.80	รทก.
ระดับน้ำเก็บกัก	+65.60	รทก.

— อาคารท่อส่งน้ำ Pressure Conduit Outlet

เป็นอาคารจ่ายน้ำเพื่อการชลประทาน การระบายน้ำ และการอุตสาหกรรม ประกอบด้วย อาคารรับน้ำ (Intake) คอนกรีตเสริมเหล็กและท่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร จำนวน 3 ท่อ ติดตั้งอยู่ตรงกลางของตัวเขื่อนดินดังรูป 3-2 พร้อมทั้ง Steel liner แสดงรายละเอียดดังรูป 3-3 โดยมีระดับปากท่อ (ด้านบน) +58.20 รทก. และระดับปากท่อ (ด้านล่าง) +57.50 รทก. ฝังลอดใต้ตัวเขื่อนดิน พร้อมทั้งอาคารควบคุม (Control House) ที่ด้านท้ายเขื่อน ท่อส่งน้ำจำนวน 1 ท่อ เป็นท่อที่ส่งน้ำแก่การชลประทานและการระบายน้ำ และอีก 2 ท่อ ใช้เพื่อการอุตสาหกรรมโดยจ่ายน้ำให้แก่ระบบส่งน้ำดิบหนองค้อ-แหลมฉบัง ในปัจจุบัน

3.2 แบบจำลองชลศาสตร์

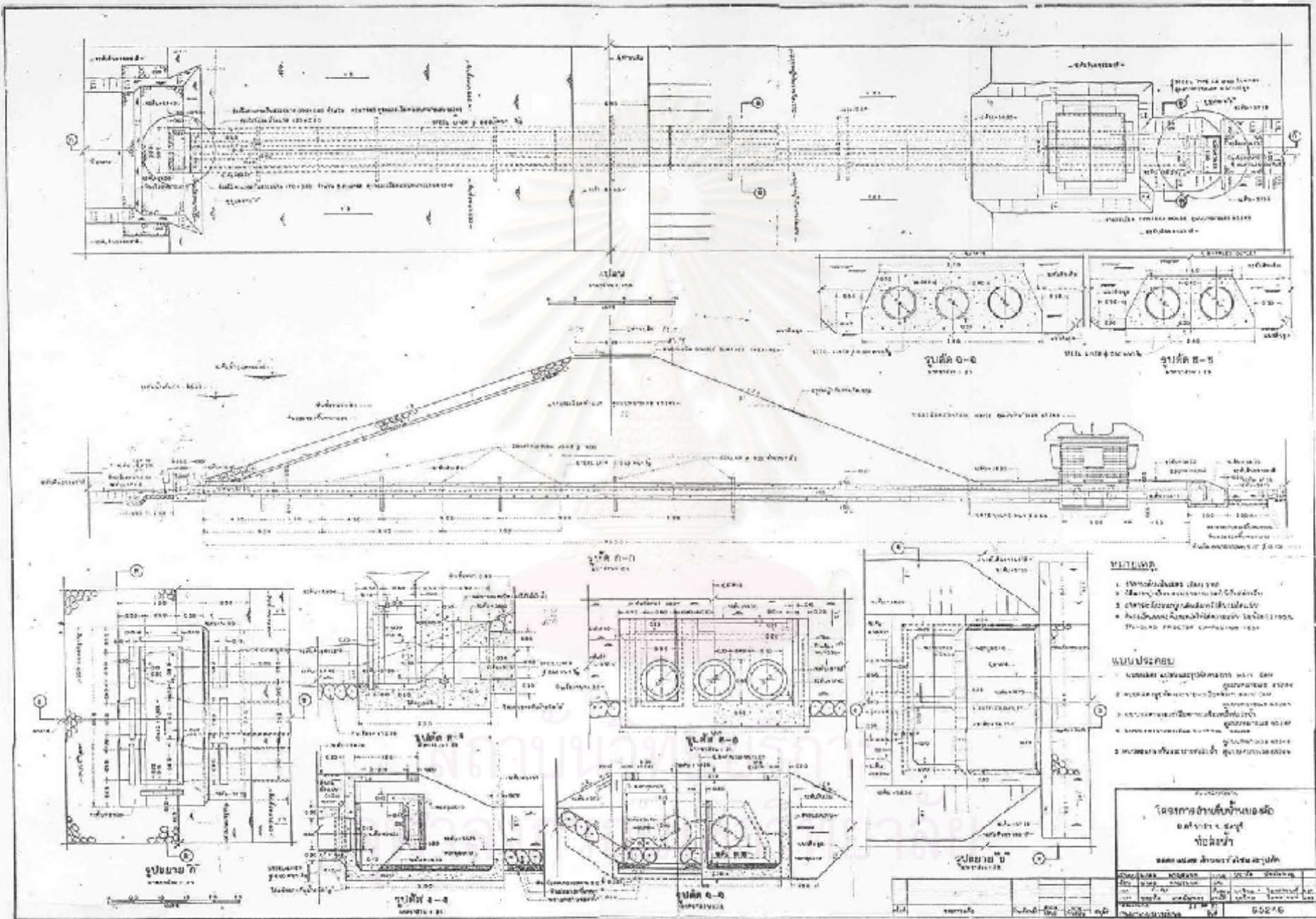
การศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และวิศวกรรมชายฝั่งทะเลของภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาใช้มาตราส่วนความยาวของแบบจำลอง 1 หน่วย ต่อ ความยาวจริง 13.64 หน่วย ซึ่งมีลักษณะดังรูป 3-4 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของแบบจำลองชลศาสตร์ประกอบด้วย



ที่มา กรมชลประทาน

หมายเหตุ อาคารท่อน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ คือ อาคารระบายน้ำในการศึกษาครั้งนี้

รูป 3-2 ที่ตั้งอาคารระบายน้ำและแนวท่อน้ำ



- หมายเหตุ**
1. เสาเข็มใช้แบบ ๕๕๕ มม.
 2. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ๕๒.๕% (ชนิด ๒๕)
 3. วัสดุที่ใช้ทำฐานรากใช้ชนิด ๒๕
 4. พื้นดินชั้นล่างใช้ชนิด ๒๕ (ชนิด ๒๕)
- Foundation and structural details are shown with various annotations and dimensions.

- แบบประกอบ**
1. ฐานรากแบบเสาเข็ม (ใช้ ๕๕๕ มม.)
 2. ฐานรากแบบเสาเข็ม (ใช้ ๕๕๕ มม.)
 3. ฐานรากแบบเสาเข็ม (ใช้ ๕๕๕ มม.)
 4. ฐานรากแบบเสาเข็ม (ใช้ ๕๕๕ มม.)
 5. ฐานรากแบบเสาเข็ม (ใช้ ๕๕๕ มม.)

โครงการงานปรับปรุง		ปีงบประมาณ ๒๕๖๓	
ชื่อโครงการ		ปรับปรุง	
ชื่อผู้จัดทำ		[Name]	
ชื่อหน่วยงาน		[Agency]	
วันที่	หน้า	รวม	๕๕๕/๕
วันที่	หน้า	รวม	๕๕๕/๕

ที่มา กรมชลประทาน

รูป ๓-๓ ลักษณะผังเขียนดินและอาคารระบอบน้ำของอ่างเก็บน้ำภักดี



รูป 3-4 แบบจำลองชลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล

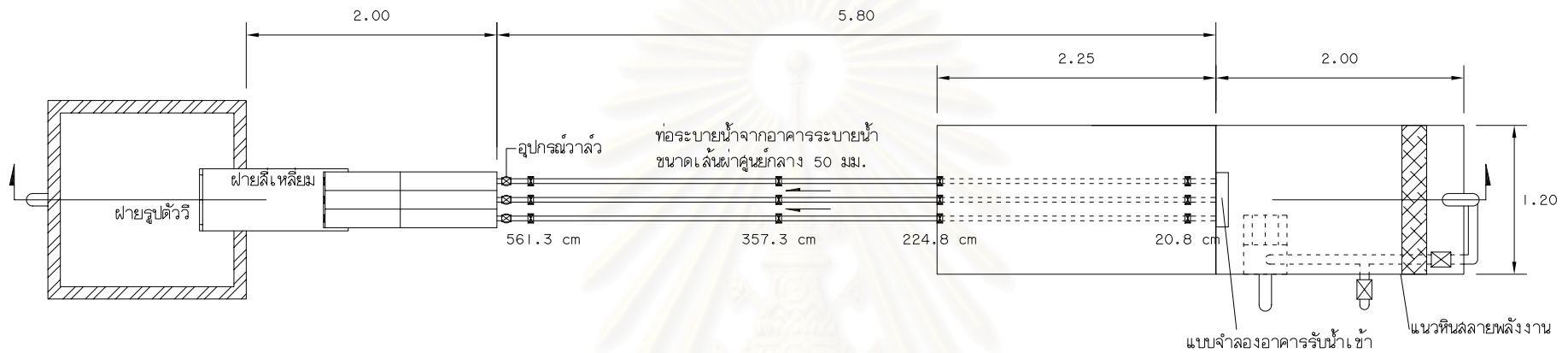
1) แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ติดตั้งอยู่ด้านเหนือน้ำดังรูป 3-4 โดยมีลักษณะเป็นอ่างเก็บน้ำที่ทำด้วยเหล็ก มีรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านปลายเป็นสามเหลี่ยม ภายนอกติดตั้งหลอดวัดความดัน (piezometer) และเจาะช่องมองพฤติกรรมการไหลบริเวณแบบจำลองอาคารระบายน้ำ ส่วนภายในยังประกอบด้วยแนวหินสลายพลังงานและแบบจำลองอาคารระบายน้ำดังรูป 3-5 ส่วนที่เป็นสามเหลี่ยมเปรียบเสมือนเป็นตัวแทนของบริเวณหน้าเขื่อนที่มีความลาด 1:3 มีขนาด $4.00 \times 1.20 \times 0.75$ เมตร ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ก1.1

2) แบบจำลองอาคารรับน้ำเข้า (Intake) ทำน้ำรับน้ำเข้าท่อเพื่อออกจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ประกอบด้วยพลาสติกใสเป็นโครงภายนอก และหล่อขึ้นรูปภายในด้วยเรซินใส ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ก1.2 ตัวแบบจำลองอาคารระบายน้ำมีท่อรับน้ำออกมา 3 ท่อ ติดตั้งอยู่ในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูป 3-5 ติดกับปลายด้านสามเหลี่ยมตรงกลางของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

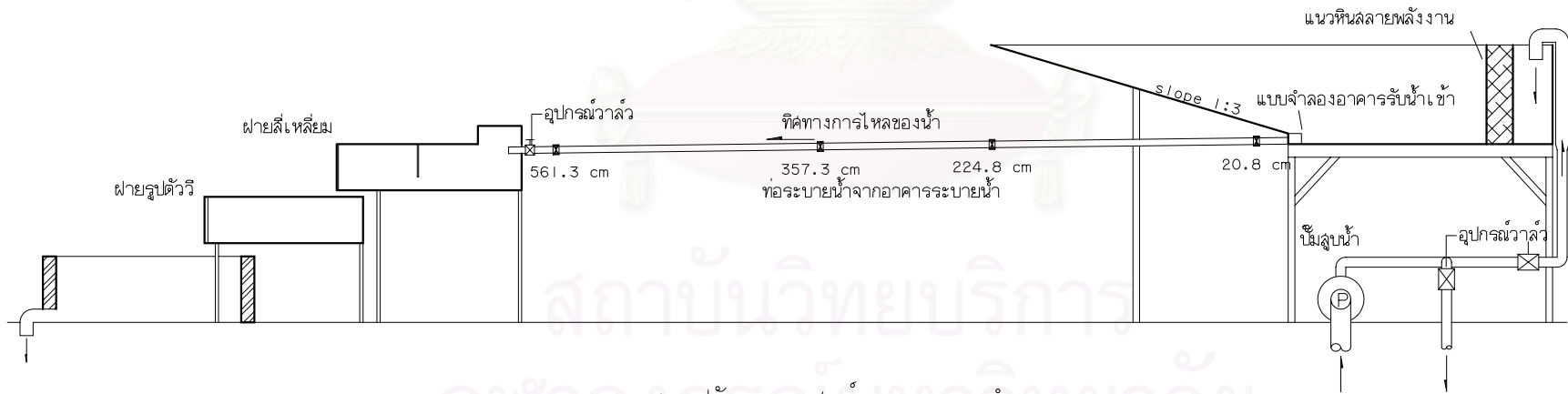
3) ระบบท่อจากอาคารรับน้ำเข้า เป็นท่อพลาสติกใสทั้ง 3 ท่อ มีความลาด 1:100 โดยกำหนดให้ท่อริมนอกขวามือ ในรูป 3-5ก เป็นท่อที่ 1 ท่อที่ 2 อยู่ตรงกลาง และท่อที่ 3 เป็นท่อที่อยู่ซ้ายมือ โดยที่ปลายของแต่ละท่อมีวาล์วควบคุมอัตราการไหลดังรูป 3-4 ส่วนของการวัดความดันในท่อมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน (piezometer) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป 3-5ข จำนวน 4 จุดตลอดความยาวของท่อ ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ก1.3

4) วาล์วควบคุมอัตราการไหล ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อระบายน้ำจากแบบจำลองอาคารระบายน้ำดังรูป 3-5 ซึ่งวาล์วทำงานโดย วงจรไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำการปิด-เปิดวาล์ว โดยมีรายละเอียดในภาคผนวก ก1.4 และในการบอกพื้นที่เปิดวาล์ว ทำโดยใช้การหมุนของวาล์วผ่านเกลียวแล้วตรวจรอบออกมาเป็นมาตราส่วนของพื้นที่เปิดวาล์ว โดยมีรายละเอียดของการปรับเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่เปิดวาล์วกับมาตราส่วนการยกวาล์ว ในภาคผนวก ก2.2

5) ฝายสี่เหลี่ยม มีลักษณะเป็นรางสี่เหลี่ยม 3 ราง ติดตั้งอยู่ทางด้านท้ายน้ำต่อเนื่องจากวาล์วควบคุมอัตราการไหลดังรูป 3-5 เพื่อให้น้ำในแต่ละท่อไหลแยกจากกันและตรงปลายมีฝายสี่เหลี่ยม 3 ช่อง ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลในแต่ละท่อ ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ในภาคผนวก ก1.5 และรายละเอียดของการปรับเทียบฝายในภาคผนวก ก2.1.2



ก) แปลนแบบจำลอง



ข) รูปตัดตามแนวศูนย์กลางของแบบจำลอง

รูป 3-5 แผนผังส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองชลศาสตร์

6) ฝ่ายตัววี เป็นฝ่ายอยู่ด้านท้ายน้ำ ดังรูป 3-5 เพื่อรับน้ำจากทั้ง 3 ท่อจากฝ่ายสี่เหลี่ยม ใช้ทำการเปรียบเทียบฝ่ายสี่เหลี่ยมแต่ละช่อง โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ในภาคผนวก ก1.6 และรายละเอียดของการเปรียบเทียบฝ่ายในภาคผนวก ก2.1.1

7) ระบบจ่ายน้ำในแบบจำลอง ติดตั้งอยู่ด้านล่างของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูป 3-4 ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำจำนวน 2 เครื่อง สูบน้ำจากถังเก็บน้ำด้านล่างของแบบจำลอง วาล์วควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด ทำงานโดยวงจรไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำการปิด-เปิดวาล์ว และท่อน้ำ ซึ่งในตัวระบบจ่ายน้ำในแบบจำลอง มีท่อหลักต่อตรงจากเครื่องสูบน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลแล้วตรงเข้าสู่แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ และก่อนถึงวาล์วควบคุมอัตราการไหล มีท่อแยกเพื่อระบายน้ำส่วนเกินออกและมีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำส่วนเกิน ลงสู่ถังเก็บน้ำด้านล่างของแบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ก1.7

3.3 การวัดข้อมูล

การวัดข้อมูลการทดลองแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ

1) ส่วนของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ทำการวัดระดับน้ำด้วยหลอดวัดความดัน (piezometer) ความละเอียด 1/10 เซนติเมตร ในการวัดต้องรอจนระดับน้ำอยู่ในสภาพคงที่สังเกตได้จากระดับที่วัดไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำการบันทึกข้อมูลระดับน้ำ

2) ส่วนของท่อระบายน้ำจากแบบจำลองอาคารระบายน้ำ ทำการวัดความดันด้วยหลอดวัดความดัน (piezometer) ความละเอียด 1/10 เซนติเมตร ในการวัดต้องรอจนระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำอยู่ในสภาพคงที่สังเกตได้จากระดับที่วัดไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำการบันทึกข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ตลอดความยาวท่อ

3) ส่วนของฝ่ายวัดอัตราการไหล ทำการวัดระดับน้ำเหนือสันฝายด้วยหลอดวัดความดัน (piezometer) ความละเอียด 1/10 เซนติเมตร ในการวัดต้องรอจนระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำอยู่ในสภาพคงที่ จึงทำการบันทึกข้อมูลระดับน้ำ

3.4 วิธีการทดลอง

สมมติฐานในการศึกษาครั้งนี้ มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมชลศาสตร์และผลกระทบของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำทั้ง 3 ท่อ คือ ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำและการควบคุมอัตราการไหลด้วยท้ายน้ำ ดังนั้นการทดลองจึงออกแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ ที่มีต่อพฤติกรรมชลศาสตร์ และผลกระทบของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำทั้ง 3 ท่อ รวม 252 กรณี โดยกำหนดตัวแปรของการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ระดับเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ ที่ทำการควบคุมให้มีระดับคงที่ 9 ระดับ ดังนี้

	<u>แบบจำลอง</u>	<u>อ่างเก็บน้ำหนองค้อ</u>
- ระดับ	68.5 เซนติเมตร	66.8 เมตร (ระดับน้ำสูงสุด)
- ระดับ	59.4 เซนติเมตร	65.6 เมตร (ระดับเก็บกักสูงสุด)
- ระดับ	50.0 เซนติเมตร	64.2 เมตร
- ระดับ	40.0 เซนติเมตร	63.0 เมตร
- ระดับ	30.9 เซนติเมตร	61.7 เมตร (ระดับเก็บกักต่ำสุด)
- ระดับ	20.0 เซนติเมตร	60.2 เมตร
- ระดับ	12.0 เซนติเมตร	59.1 เมตร
- ระดับ	8.0 เซนติเมตร	58.5 เมตร
- ระดับ	6.0 เซนติเมตร	58.3 เมตร

2. ลักษณะการใช้งานของอาคารระบายน้ำ แบ่งเป็นกรณีย่อย ๆ 7 กรณี ได้ดังนี้

- เปิดวาล์วที่ 1
- เปิดวาล์วที่ 2
- เปิดวาล์วที่ 3
- เปิดวาล์วที่ 1 และ 2
- เปิดวาล์วที่ 2 และ 3
- เปิดวาล์วที่ 1 และ 3
- เปิดวาล์วที่ 1 , 2 และ 3

3. การควบคุมอัตราการไหล แบ่งตามพื้นที่ในการเปิดวาล์ว 4 กรณี ดังนี้
- เปิดวาล์วเต็มที (100%)
 - เปิดวาล์ว 3 ใน 4 ของพื้นที่เปิดวาล์วเต็มที (75.6%)
 - เปิดวาล์ว 1 ใน 2 ของพื้นที่เปิดวาล์วเต็มที (50.2%)
 - เปิดวาล์ว 1 ใน 4 ของพื้นที่เปิดวาล์วเต็มที (26.3%)

โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้ (ขั้นตอนการทดลองในแต่ละกรณีแสดงดังรูป 3-6)

1. เปิดสวิตช์ควบคุมระบบไฟฟ้าในแบบจำลอง ปรับวาล์ว โดยทำการปิดวาล์วที่ควบคุมการไหลเข้าแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ และวาล์วควบคุมการไหลในท่อระบายน้ำจากแบบจำลองอาคารระบายน้ำที่อยู่ด้านท้ายน้ำ แต่ทำการเปิดวาล์วที่ควบคุมการไหลของน้ำส่วนเกินในระบบจ่ายน้ำในแบบจำลองให้มีพื้นที่เปิดเต็มที (100%)
2. เปิดเครื่องสูบน้ำ น้ำจะไหลเข้าสู่ระบบท่อและไหลออกตรงส่วนของปลายท่อที่ระบายน้ำส่วนเกิน
3. ทำการเปิดวาล์วที่ควบคุมการไหลเข้าแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ และขณะเดียวกันทำการปิดวาล์วที่ควบคุมการไหลของน้ำส่วนเกินในระบบจ่ายน้ำในแบบจำลอง จนมีระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำตามที่กำหนด
4. เปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลด้านท้ายน้ำของแบบจำลองอาคารระบายน้ำ ตามกรณีการไหลและพื้นที่เปิดวาล์วตามที่กำหนด
5. ปรับวาล์วควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ และวาล์วที่ควบคุมการไหลของน้ำส่วนเกินให้ได้ระดับตามที่กำหนด
6. รอจนระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำนิ่ง ถ้าระดับน้ำไม่ได้ตามที่กำหนดให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 5 จนกว่าจะได้ระดับน้ำตามที่กำหนด
7. เมื่อได้ระดับน้ำตามที่กำหนดแล้วทำการบันทึกค่าความดันในท่อแต่ละจุด และวัดอุณหภูมิของน้ำ
8. วัดอัตราการไหลของแต่ละท่อด้วยฝายสันคมสี่เหลี่ยม และวัดอัตราการไหลรวมด้วยฝายสันคมรูปตัววี ดังตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก2.3



รูป 3-6 แผนผังการทำงานทดลอง

9. ทำชั้นตอนที่ 5-8 ซ้ำ โดยเปลี่ยนระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ จนครบ 9 ระดับ
10. ทำชั้นตอนที่ 1-9 ซ้ำ โดยเปลี่ยนพื้นที่เปิดวาล์วจนครบ 4 ขนาด
11. ทำชั้นตอนที่ 1-10 ซ้ำ โดยเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานของอาคารระบายน้ำ จนครบ 7 แบบ

ในแต่ละการทดลอง นอกจากการเก็บข้อมูลอัตราการไหลและความดัน ในลักษณะของการใช้งานของอาคารระบายน้ำแล้วนั้น ยังต้องมีการเก็บข้อมูลจากการสังเกต คือ การเก็บข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำและอัตราการไหล ที่มีการเกิดการไหลแบบหมุนวน(vortex) ของการใช้งานของอาคารระบายน้ำในลักษณะต่าง ๆ เช่นเดียวกัน โดยการไหลแบบหมุนวนสามารถจำแนกได้ตามสภาพการไหลที่เกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

- 1) การไหลแบบหมุนวนผิวหน้า (Dimple) เป็นการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นในช่วงแรกสามารถสังเกตได้ โดยมีลักษณะการไหลหมุนวนเป็นกรวยสั้น ๆ ที่ผิวหน้า ซึ่งมีขนาดความยาวของกรวยน้อยกว่าขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวย
- 2) การไหลหมุนวนแบบกรวยยาว (Vortex strong with air-core) เป็นการไหลต่อเนื่องจากการไหลแบบผิวหน้า สามารถสังเกตได้โดยมีลักษณะเป็นกรวยยาวจากผิวหน้า ลงสู่แบบจำลองอาคารระบายน้ำ
- 3) การไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีอากาศไหลเข้าไปในท่อระบายน้ำ (Air-entraining vortex) เป็นการไหลต่อเนื่องจากการไหลแบบหมุนวนแบบกรวยยาวสามารถสังเกตได้ โดยมีลักษณะเป็นกรวยยาว จากผิวน้ำลงสู่แบบจำลองอาคารระบายน้ำ และมีฟองอากาศไหลเข้าไปในระบบท่อระบายน้ำจากแบบจำลองอาคารระบายน้ำ

ในการทดลองของการไหลแบบหมุนวน ทำการทดลองไปพร้อมกับการทดลองการใช้งานของอาคารระบายน้ำ โดยการสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการทดลองจากรูป 3-6 ในขั้นตอนการทดลองของการเปลี่ยนระดับน้ำ ต้องทำการลดระดับน้ำลงอย่างช้า ๆ เพื่อสังเกตการไหลแบบหมุนวน เมื่อภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำเกิดการไหลแบบหมุนวน จึงหยุดการลดระดับน้ำ แล้วรอสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลอง

การศึกษาค้นคว้านี้ได้ทำการทดลองแบบจำลองชลศาสตร์ โดยมีกรณีศึกษาที่ทำการทดลอง 252 กรณี เป็นกรณีที่เกิดอัตราการไหลและความดันในสภาพต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับระดับ

เก็บกักในอ่างเก็บน้ำ สภาพการใช้งานของอาคารระบายน้ำ และสภาพการควบคุมการไหล ดังตาราง 3-1 โดยมีกรณีการไหล 3 กรณี ซึ่งมีรูปแบบการเปิดวาล์ว 7 แบบ และพื้นที่เปิดวาล์วที่ต่างกัน 4 ขนาด

ตาราง 3-1 รายละเอียดของกรณีทดลอง

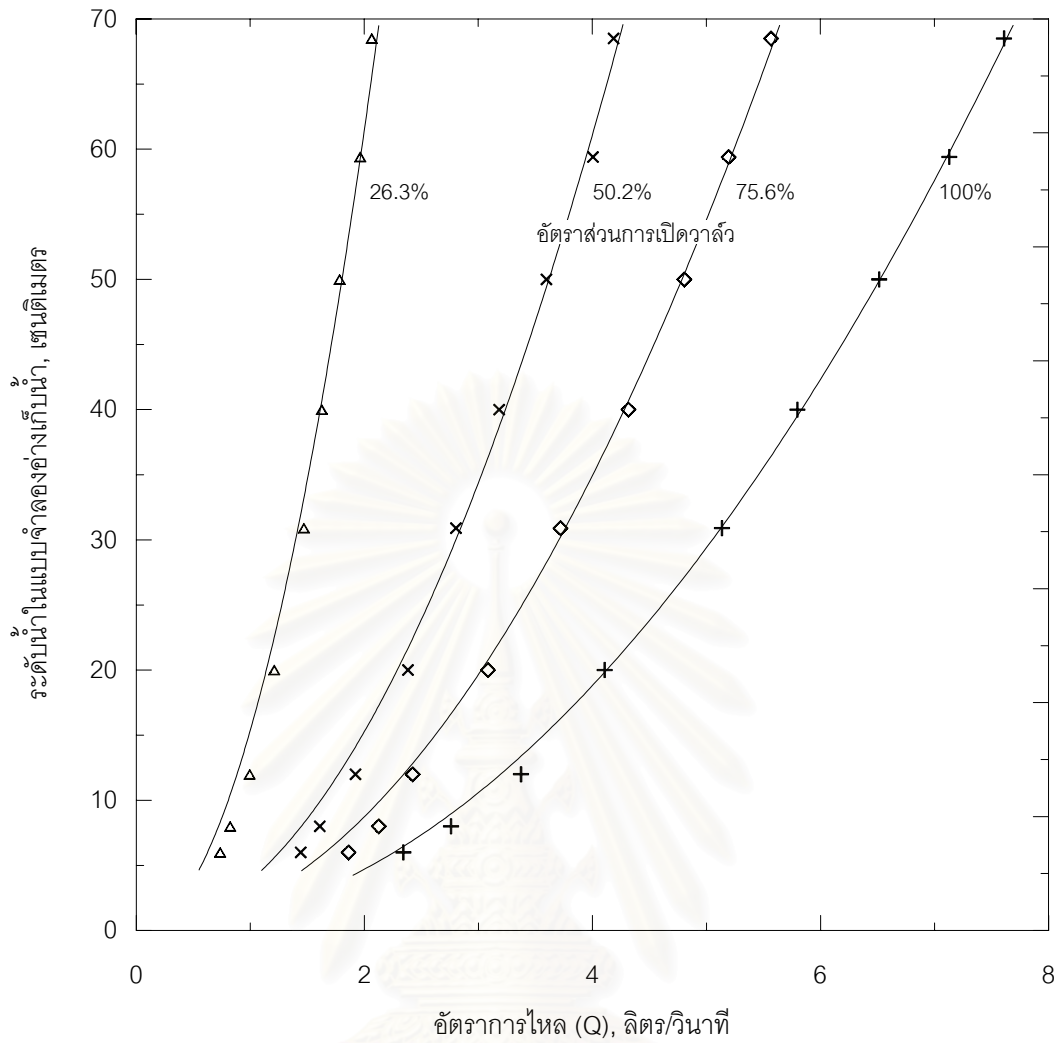
กรณีการไหล		พื้นที่เปิดวาล์ว			
		100%	75.6%	50.2%	26.3%
1 ท่อ	ท่อที่ 1	1P1V100	1P1V75	1P1V50	1P1V25
	ท่อที่ 2	1P2V100	1P2V75	1P2V50	1P2V25
	ท่อที่ 3	1P3V100	1P3V75	1P3V50	1P3V25
2 ท่อ	ท่อที่ 1 และ 2	2P12V100	2P12V75	2P12V50	2P12V25
	ท่อที่ 2 และ 3	2P23V100	2P23V75	2P23V50	2P23V25
	ท่อที่ 1 และ 3	1P13V100	1P13V75	1P13V50	1P13V25
3 ท่อ	ท่อที่ 1 , 2 และ 3	3P123V100	3P123V75	3P123V50	3P123V25

3.5 ข้อมูลจากการทดลอง

จากการศึกษาทดลองการใช้งานและการควบคุมอัตราการไหลด้านท้ายน้ำของอาคารระบายน้ำในแบบจำลองชลศาสตร์ ในลักษณะต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน ดังนี้

1) ข้อมูลจากการกำหนดระดับน้ำ ประกอบด้วยข้อมูล 2 ส่วน คือ

ก) ข้อมูลอัตราการไหล เป็นข้อมูลที่แสดงปริมาณการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการคำนวณความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำและท่อระบายน้ำจากอาคารระบายน้ำในแบบจำลอง รวมถึงการไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสูงความเร็ว (velocity head) ของระบบระบายน้ำของอาคารระบายน้ำ อีกทั้งสามารถนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำกับความสูงรวม (total head) ของการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ที่การควบคุมการไหลโดยการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ดังแสดงตัวอย่างของข้อมูล ในกรณีการไหล 3 ท่อ เป็นการแสดงข้อมูลอัตราการไหลรวมทั้ง 3 ท่อ กับระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำที่ระดับต่าง ๆ ดังรูป 3-7 ตาม



รูป 3-7 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล กรณีการไหล 3 ท่อ

การควบคุมการไหลในการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ตามที่กำหนด และแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในการไหลของแต่ละท่อ ดังรูป 3-8 นอกจากนี้ความเร็วเฉลี่ยยังสามารถนำไปคำนวณค่าเลขเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่แสดงสภาพการไหลที่เกิดขึ้นว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน

ข) ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ เป็นข้อมูลที่แสดงถึงการสูญเสียความดัน ณ จุดต่าง ๆ ดังแสดงตัวอย่างของข้อมูลความดันของกรณีการไหล 3 ท่อ ดังรูป 3-9, 3-10 และ 3-11 ซึ่งข้อมูลของความดัน ณ จุดต่าง ๆ ตามความยาว ของการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในระบบระบายน้ำของอาคารระบายน้ำ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาการสูญเสียพลังงาน (head losses) ณ จุดต่าง ๆ เพื่อที่นำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย โดยเป็นฟังก์ชันกับความสูงความเร็ว (velocity head) ซึ่งสามารถแบ่งการสูญเสียพลังงานเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน และการสูญเสียรองเนื่องจากอาคารทางเข้าและวาล์ว

ข้อมูลจากการกำหนดระดับน้ำ ได้แสดงตัวอย่างของข้อมูล ดังตาราง 3-2 เป็นกรณีการไหล 3 ท่อ ในแต่ละการควบคุมอัตราการไหลของขนาดพื้นที่เปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ

2) ข้อมูลจากการไหลแบบหมุนวน เป็นข้อมูลที่ได้จากการสังเกต โดยการไหลแบบวนที่เกิดขึ้นมีลักษณะการไหล 3 แบบ ดังรูป 3-12 คือ การไหลแบบหมุนวนผิวน้ำ (Dimple), การไหลหมุนวนแบบกรวยยาว (Vortex strong with air-core) และการไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีอากาศไหลเข้าไปในท่อระบายน้ำ (Air-entraining vortex) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการเกิดการไหลแบบหมุนวน คือ ระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำและอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ซึ่งพิจารณาในจุดที่เริ่มต้นของการเกิดการไหลแบบหมุนวน ในแต่ละกรณีของการทดลอง ได้สรุปผลการเกิดการไหลแบบหมุนวนแบบต่าง ๆ ดังตาราง 3-3 ในบางกรณีไม่มีการเกิดการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นและในบางกรณีก็มีเพียงการไหลแบบหมุนวนผิวน้ำที่เกิดขึ้นเท่านั้น สำหรับกรณีการไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 ไม่มีการไหลแบบกรวยยาวมีอากาศไหลเข้าไปในท่อระบายน้ำ รูป 3-13 แสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กับอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ในกรณีการไหล 3 ท่อ ซึ่งใช้จุดของการเริ่มต้นการเกิดการไหลแบบหมุนวนผิวน้ำ เป็นแนวการแบ่งเขตระหว่างการไหลแบบหมุนวน (vortex zone) และไม่เกิดการไหลแบบหมุนวน (nonvortex zone)

สรุปผลการทดลองดังกล่าวในข้างต้น นำเสนอในภาคผนวก ข, ค และ ง สำหรับกรณีการไหล 1 ท่อ, 2 ท่อ และ 3 ท่อ ตามลำดับ

ตาราง 3-2 ตัวอย่างข้อมูลการทดลองกรณีการไหล 3 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C	
						ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄		
1.00 (100%)	68.5	22.0	22.1	20.9	27.3	2.57	2.46	2.58	7.61	7.64	49.1	39.0	32.5	22.5	50.5	39.5	32.4	21.5	48.7	38.6	32.0	21.9	26	
	59.4	21.4	21.7	20.4	26.7	2.39	2.34	2.40	7.13	7.15	42.6	33.0	26.8	17.2	43.7	32.7	25.5	14.6	42.1	32.1	25.6	15.6	27	
	50.0	20.7	20.9	19.9	25.9	2.19	2.11	2.22	6.51	6.51	36.0	27.3	21.7	13.0	36.9	27.1	20.8	11.0	36.4	27.7	22.1	13.5	27	
	40.0	19.9	20.0	19.2	24.9	1.97	1.85	1.98	5.80	5.76	28.7	21.4	16.7	9.5	29.5	21.5	16.4	8.5	28.6	21.5	16.8	9.7	27	
	30.9	19.1	19.2	18.5	24.0	1.75	1.63	1.75	5.14	5.12	22.1	16.4	12.7	7.1	22.6	16.3	12.2	6.0	22.4	16.6	12.9	7.2	27	
	20.0	17.7	17.9	17.4	22.4	1.39	1.30	1.42	4.11	4.10	14.3	9.9	7.1	2.8	14.7	10.4	7.7	3.4	14.1	10.0	7.3	3.2	27	
	12.0	16.7	16.9	16.5	21.1	1.15	1.07	1.16	3.37	3.35	8.3	5.5	3.7	1.0	8.6	5.9	4.2	1.5	8.3	5.5	3.8	1.1	27	
	8.0	15.8	16.0	15.7	20.1	0.94	0.87	0.95	2.76	2.83	5.5	3.3	1.9	-0.1	5.7	3.8	2.7	0.8	5.4	3.3	2.0	-0.1	27	
	6.0	15.1	15.3	15.2	19.1	0.79	0.72	0.83	2.34	2.36	3.5	2.0	1.1	-0.3	3.8	2.4	1.5	0.1	3.5	2.0	1.1	-0.3	27	
0.756 (75.6%)	68.5	19.7	19.6	19.0	24.6	1.91	1.74	1.91	5.57	5.54	58.2	50.3	45.1	37.2	58.5	50.8	45.9	38.2	57.7	49.9	44.9	37.1	26	
	59.4	19.2	19.2	18.6	24.1	1.78	1.63	1.78	5.19	5.19	50.7	43.7	39.2	32.3	51.1	44.4	40.1	33.5	50.5	43.3	38.6	31.4	27	
	75%	50.0	18.7	18.7	18.2	23.5	1.64	1.50	1.66	4.80	4.79	42.5	36.6	32.8	26.9	42.6	36.9	33.2	27.5	42.2	36.2	32.3	26.4	27
	40.0	18.0	18.2	17.6	22.7	1.46	1.38	1.47	4.32	4.28	34.2	29.4	26.3	21.6	34.1	29.8	27.1	22.9	33.7	28.9	25.8	21.1	27	
	30.9	17.2	17.4	16.9	21.8	1.27	1.18	1.27	3.72	3.74	26.4	22.6	20.2	16.5	26.4	22.6	20.2	16.4	26.2	22.3	19.7	15.8	27	
	20.0	16.3	16.5	16.1	20.6	1.05	0.98	1.05	3.08	3.08	17.1	14.4	12.6	9.9	17.1	14.6	12.9	10.5	16.9	14.2	12.5	9.8	27	
	12.0	15.2	15.6	15.2	19.3	0.81	0.78	0.83	2.42	2.45	10.2	8.4	7.2	5.4	10.2	8.4	7.2	5.4	10.0	8.2	7.0	5.2	27	
	8.0	14.8	15.0	14.8	18.6	0.73	0.67	0.73	2.13	2.14	6.7	5.4	4.6	3.4	6.6	5.3	4.4	3.1	6.6	5.3	4.4	3.1	27	
	6.0	14.3	14.6	14.4	18.1	0.63	0.59	0.64	1.86	1.93	5.0	4.0	3.4	2.5	4.9	3.9	3.2	2.3	5.0	4.1	3.6	2.8	27	
0.502 (50.2%)	68.5	17.8	18.0	17.5	22.6	1.41	1.33	1.44	4.19	4.22	63.0	58.6	55.8	51.4	63.0	58.5	55.6	51.1	62.8	58.3	55.5	51.1	27	
	59.4	17.6	17.7	17.3	22.2	1.36	1.25	1.39	4.00	3.98	54.6	50.7	48.3	44.4	54.4	50.4	47.9	43.9	54.3	50.3	47.8	43.9	27	
	50%	50.0	17.0	17.2	16.8	21.5	1.22	1.14	1.24	3.60	3.57	46.0	42.6	40.4	37.0	46.0	42.3	40.0	36.4	46.0	42.5	40.3	36.9	27
	40.0	16.4	16.6	16.3	20.8	1.08	1.00	1.11	3.18	3.19	36.6	33.9	32.1	29.4	36.7	33.9	32.1	29.3	36.4	33.8	32.1	29.5	27	
	30.9	15.9	16.1	15.7	20.1	0.96	0.89	0.95	2.80	2.83	28.3	26.1	24.6	22.5	28.2	26.0	24.5	22.4	28.3	26.0	24.5	22.3	27	
	20.0	15.2	15.4	15.2	19.2	0.81	0.74	0.83	2.38	2.40	18.3	16.7	15.7	14.2	18.2	16.6	15.5	13.9	18.2	16.6	15.6	14.1	27	
	12.0	14.4	14.7	14.5	18.1	0.65	0.61	0.66	1.92	1.93	10.9	9.8	9.1	8.1	10.9	9.8	9.2	8.1	10.9	9.8	9.2	8.1	27	
	8.0	13.9	14.1	14.0	17.3	0.55	0.50	0.56	1.61	1.62	7.2	6.4	5.8	5.0	7.1	6.3	5.8	5.1	7.1	6.3	5.8	5.1	27	
	6.0	13.6	13.8	13.7	16.8	0.50	0.45	0.50	1.44	1.45	5.2	4.5	4.1	3.5	5.2	4.6	4.3	3.7	5.2	4.5	4.1	3.5	27	
0.263 (26.3%)	68.5	14.7	14.9	14.7	18.5	0.71	0.65	0.71	2.06	2.10	67.0	65.7	65.0	63.8	67.0	65.7	64.8	63.5	67.0	65.7	65.0	63.8	27	
	59.4	14.5	14.7	14.6	18.2	0.67	0.61	0.69	1.96	1.97	58.0	56.9	56.2	55.1	58.2	57.0	56.3	55.2	58.0	56.9	56.3	55.2	27	
	25%	50.0	14.2	14.4	14.3	17.8	0.61	0.55	0.62	1.78	1.81	48.7	47.7	47.1	46.2	48.7	47.7	47.0	46.0	48.7	47.7	47.1	46.2	27
	40.0	13.9	14.2	14.0	17.4	0.55	0.52	0.56	1.63	1.66	39.0	38.2	37.8	37.1	39.0	38.2	37.6	36.8	38.9	38.0	37.5	36.7	27	
	30.9	13.6	13.9	13.8	16.9	0.50	0.46	0.52	1.47	1.48	30.3	29.7	29.3	28.7	30.3	29.6	29.1	28.4	30.3	29.6	29.1	28.4	27	
	20.0	13.1	13.4	13.3	16.2	0.41	0.38	0.42	1.21	1.25	19.6	19.1	18.8	18.4	19.6	19.1	18.8	18.4	19.6	19.1	18.8	18.4	27	
	12.0	12.7	12.9	12.9	15.4	0.34	0.31	0.35	0.99	1.01	11.6	11.2	11.0	10.7	11.6	11.2	11.0	10.7	11.6	11.2	11.0	10.7	27	
	8.0	12.3	12.5	12.6	14.9	0.28	0.25	0.30	0.82	0.87	7.7	7.4	7.3	7.1	7.7	7.4	7.3	7.1	7.7	7.4	7.3	7.1	27	
	6.0	12.1	12.3	12.4	14.4	0.25	0.22	0.26	0.74	0.74	5.7	5.5	5.4	5.2	5.7	5.5	5.4	5.2	5.7	5.5	5.4	5.2	27	

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ

W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี

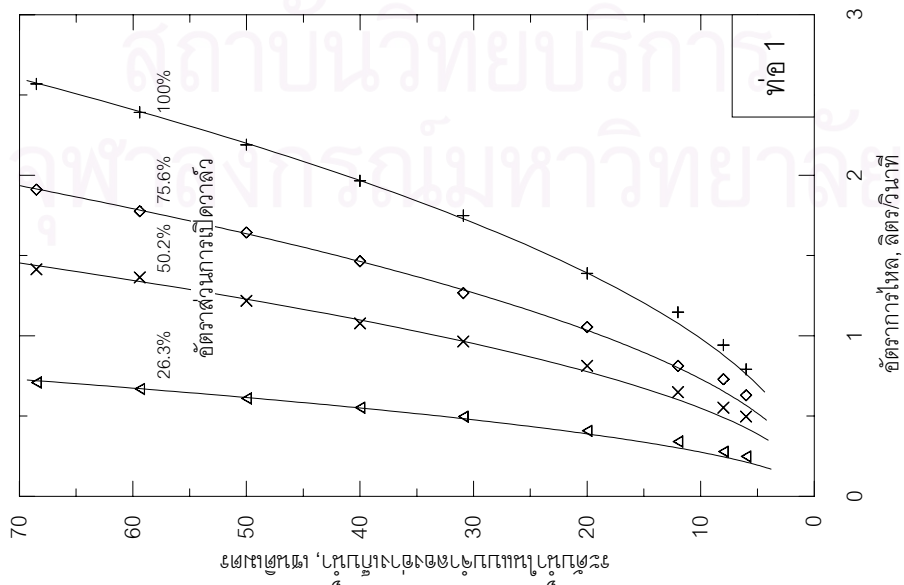
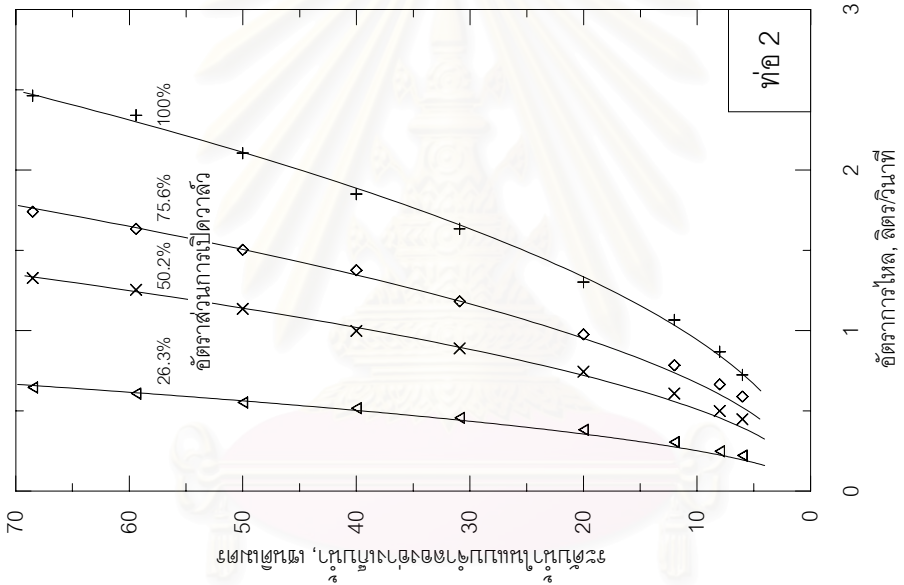
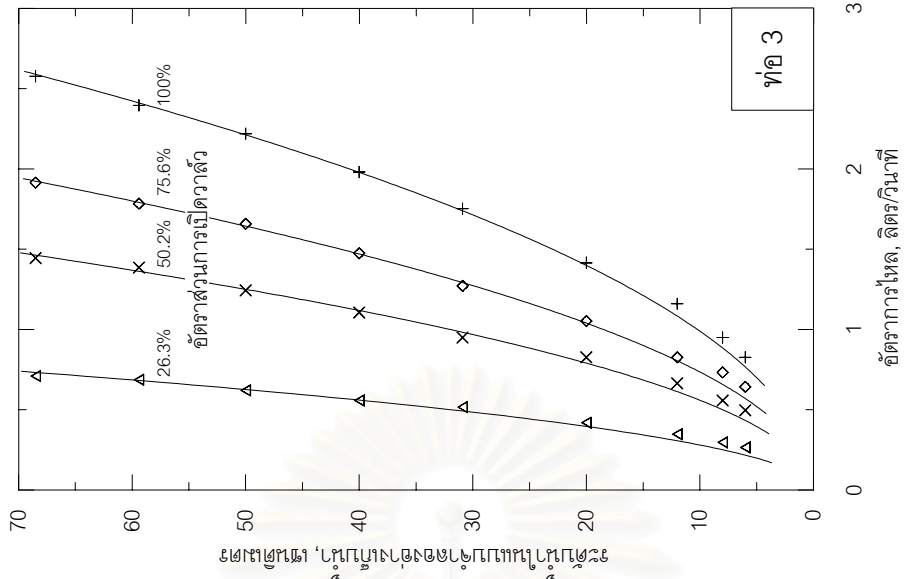
ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหล

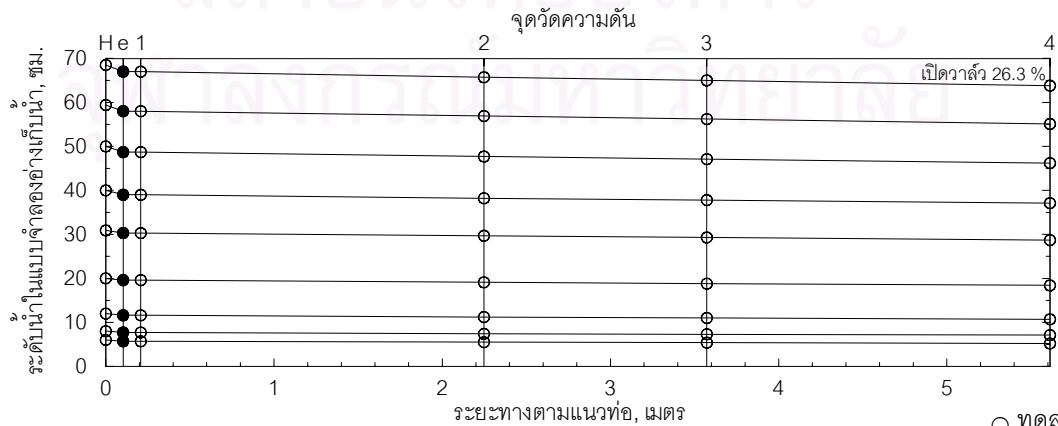
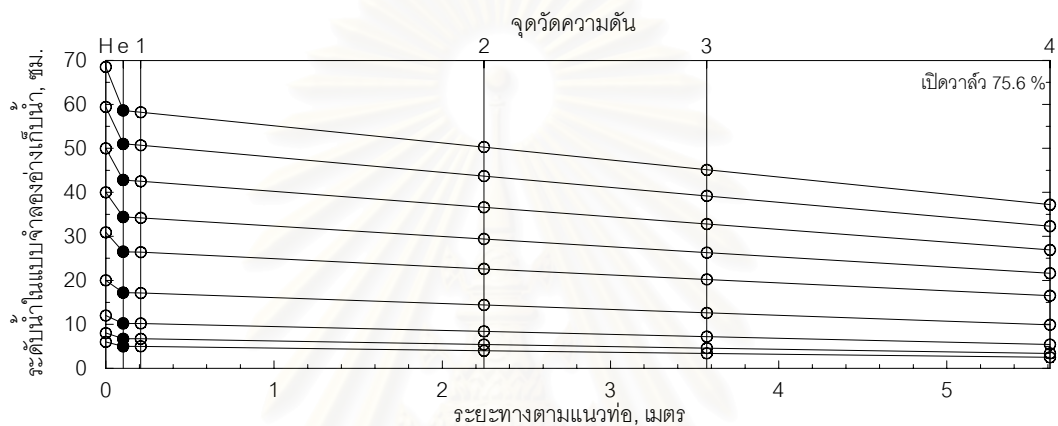
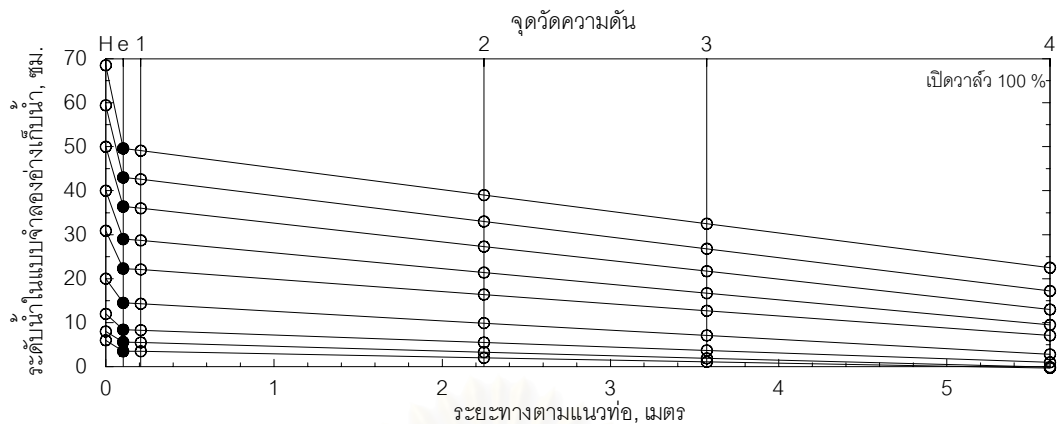
T : อุณหภูมิของน้ำในขณะทำการทดลอง

ท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี



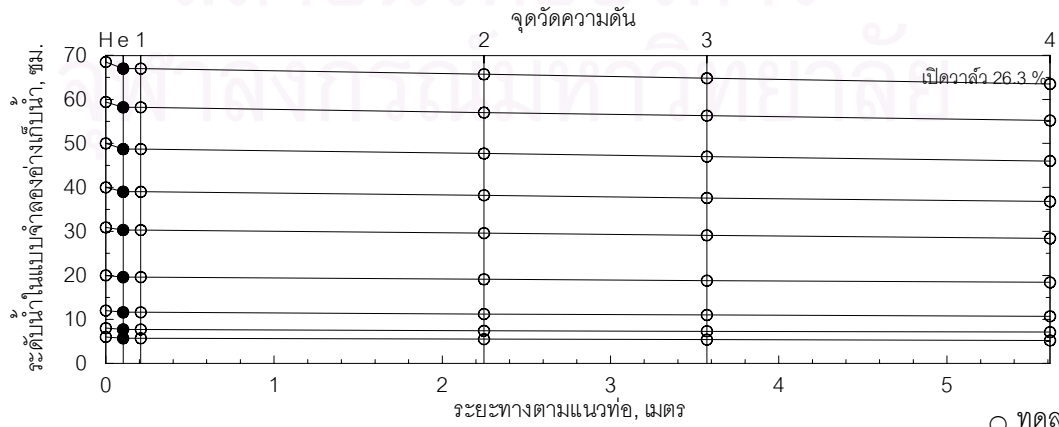
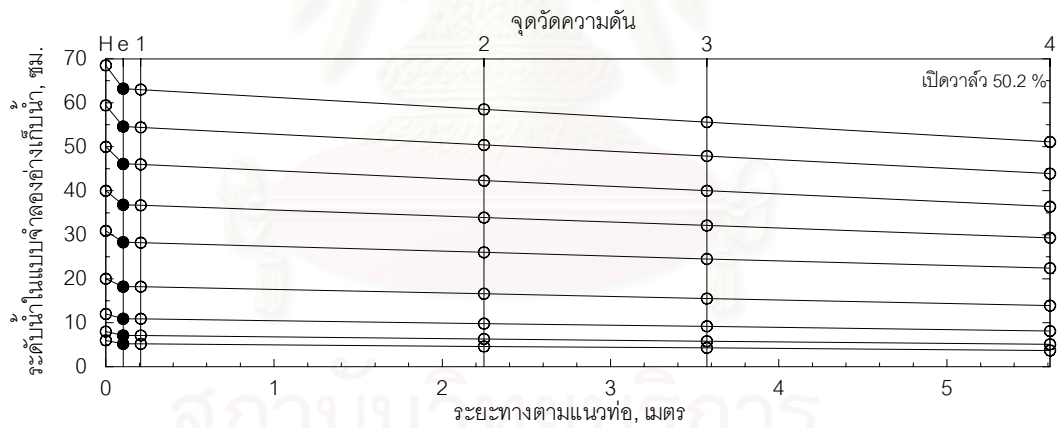
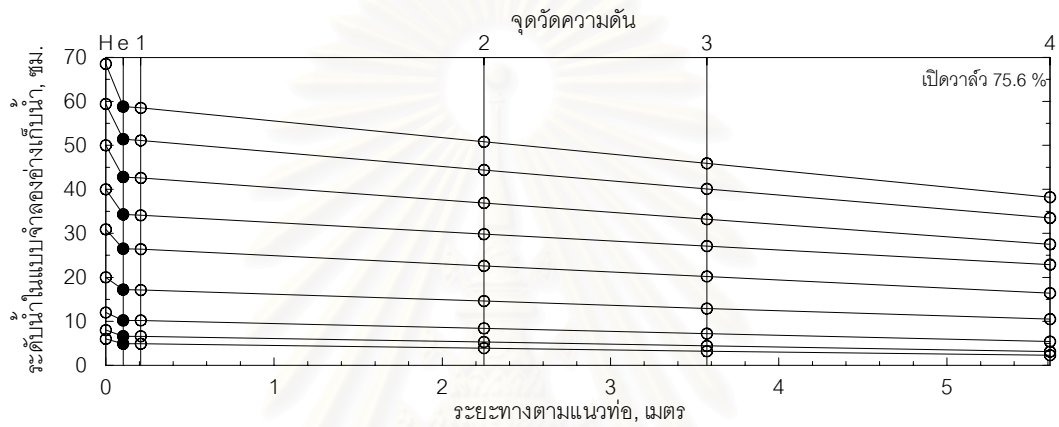
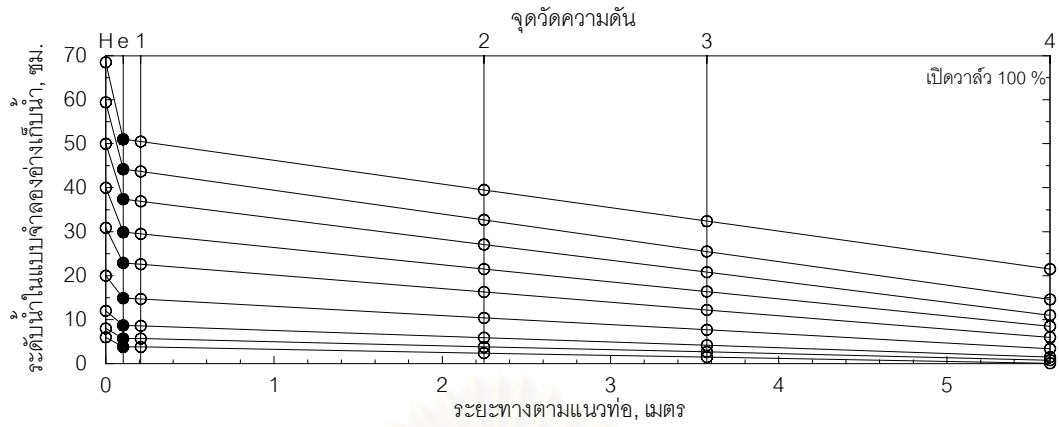
รูป 3-8 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 3 ท่อ



○ ทดลอง

● คำนวณ

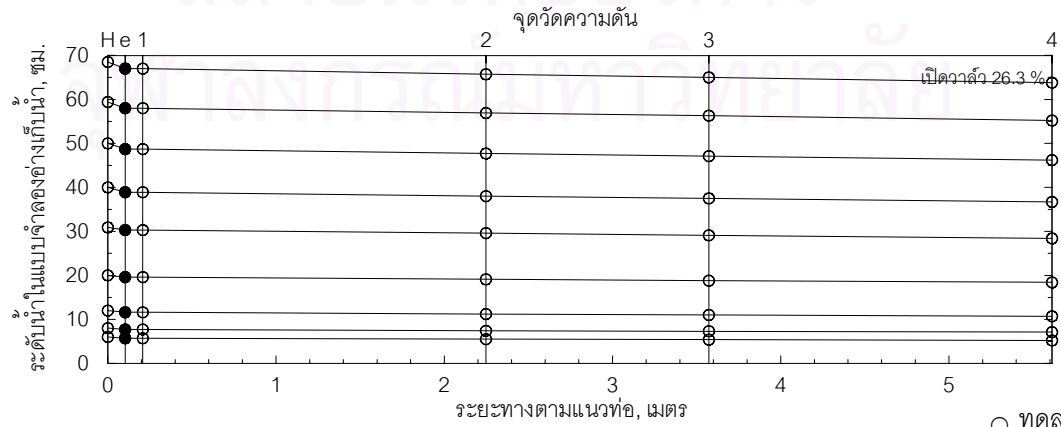
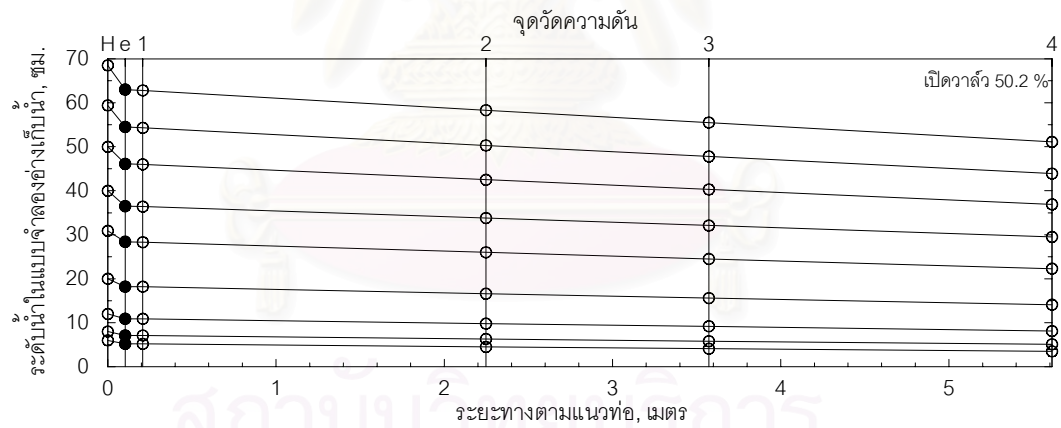
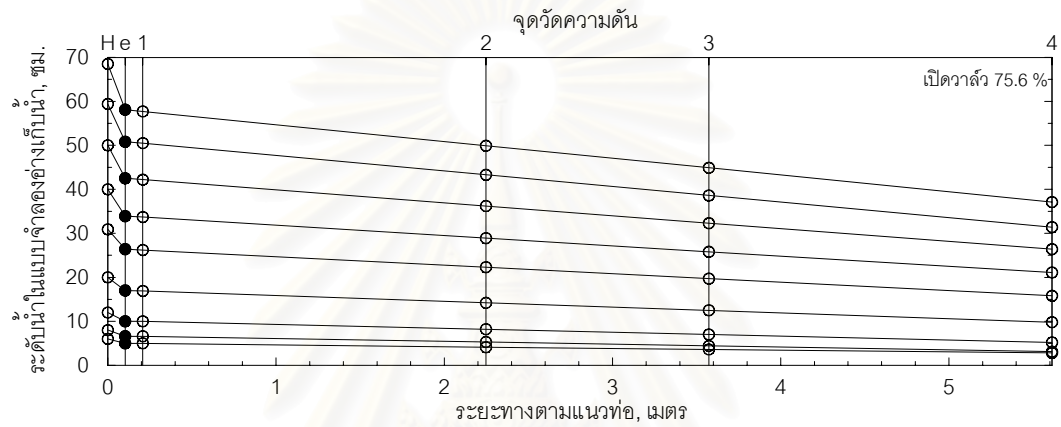
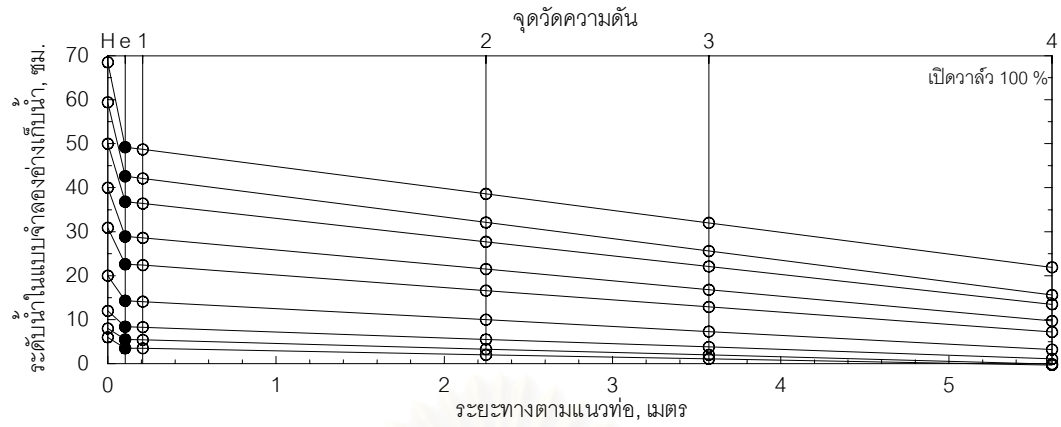
รูป 3-9 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 3 ท่อ



○ ทดลอง

● คำนวณ

รูป 3-10 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 3 ท่อ



○ ทดลอง

● คำนวณ

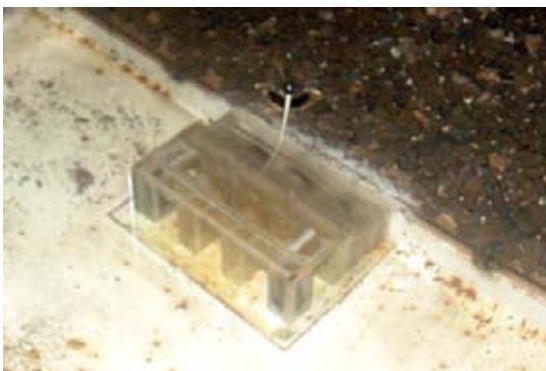
รูป 3-11 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 3 ท่อ



ก) การไหลแบบหมუნวนผิวน้ำ(Dimple)



ข) การไหลหมუნวนแบบกรวยยาว(Vortex strong with air-core)

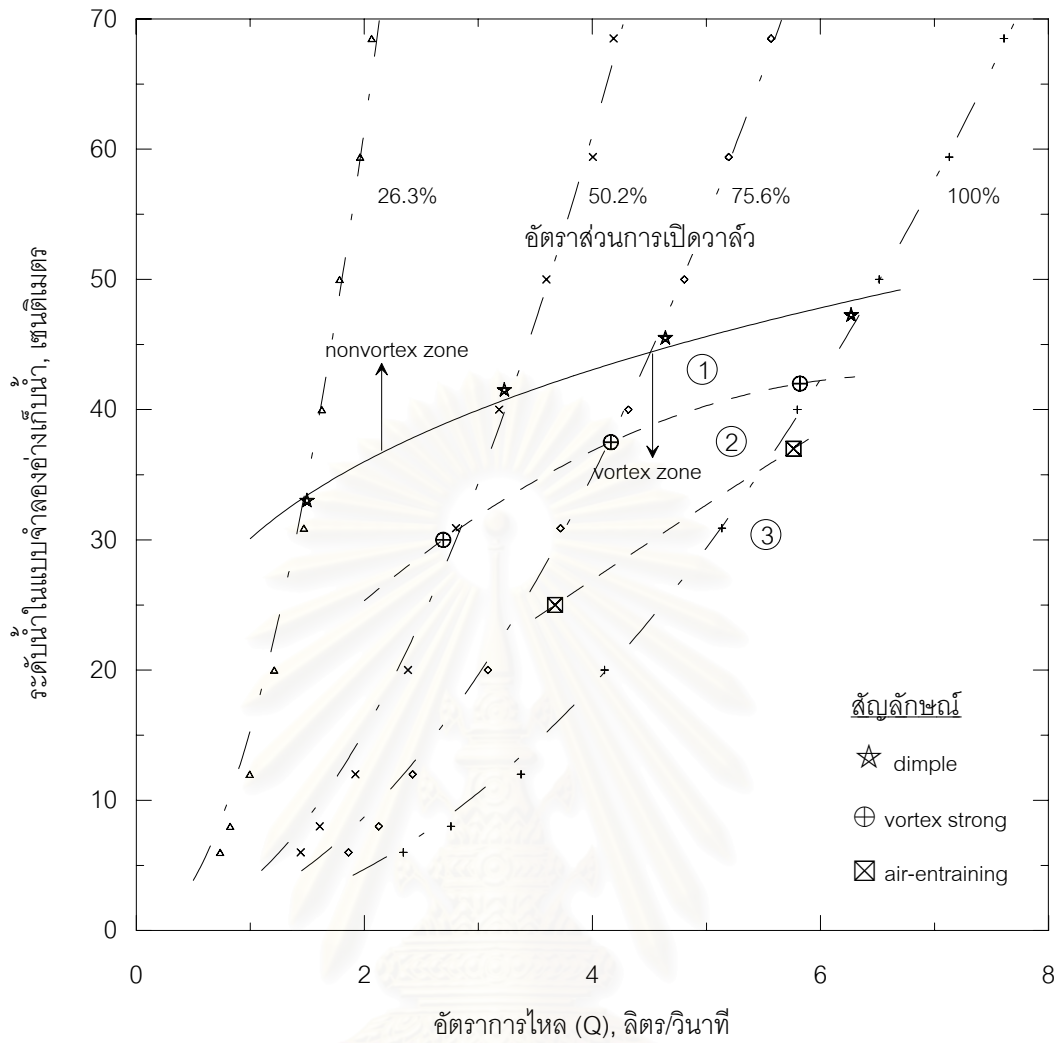


ค) การไหลหมუნวนแบบกรวยยาวมีอากาศไหลเข้าไปในท่อระบายน้ำ(Air-entraining vortex)

รูป 3-12 การเกิดการไหลแบบหมუნวน

ตาราง 3-3 สรุปผลการทดลองของการเกิดการไหลแบบหมุนวนแบบต่าง ๆ

กรณีการไหล		ร้อยละพื้นที่เปิดวาล์ว	Hอ่างฯ cm	dimple S, cm	อัตราการไหล(Q), lite/s				Hอ่างฯ cm	strong S, cm	อัตราการไหล(Q), lite/s				Hอ่างฯ cm	air S, cm	อัตราการไหล(Q), lite/s			
					ท่อที่ 1	ท่อที่ 2	ท่อที่ 3	รวม			ท่อที่ 1	ท่อที่ 2	ท่อที่ 3	รวม			ท่อที่ 1	ท่อที่ 2	ท่อที่ 3	รวม
1 ท่อ	ท่อที่ 1	100	37.3	32.4	1.88	0.00	0.00	1.88	27.5	22.6	1.64	0.00	0.00	1.64	-	-	-	-	-	-
		75.6	21.4	16.5	1.15	0.00	0.00	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50.2	19.0	14.1	0.83	0.00	0.00	0.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ท่อที่ 2	100	36.0	31.1	0.00	1.77	0.00	1.77	19.0	14.1	0.00	1.30	0.00	1.30	16.0	11.1	0.00	1.18	0.00	1.18
		75.6	30.0	25.1	0.00	1.21	0.00	1.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50.2	21.0	16.1	0.00	0.85	0.00	0.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ท่อที่ 3	100	37.3	32.4	0.00	0.00	1.88	1.88	27.5	22.6	0.00	0.00	1.66	1.66	-	-	-	-	-	-
		75.6	21.4	16.5	0.00	0.00	1.13	1.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50.2	19.0	14.1	0.00	0.00	0.83	0.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 ท่อ	ท่อที่ 1 และ 2	100	47.5	42.6	2.13	1.99	0.00	4.12	42.5	37.6	2.02	1.88	0.00	3.90	26.0	21.1	1.62	1.50	0.00	3.12
		75.6	47.0	42.1	1.67	1.50	0.00	3.17	42.0	37.1	1.59	1.43	0.00	3.02	25.0	20.1	1.34	1.21	0.00	2.55
		50.2	46.0	41.1	1.22	1.11	0.00	2.33	37.5	32.6	1.15	1.02	0.00	2.17	-	-	-	-	-	-
		26.3	44.0	39.1	0.69	0.61	0.00	1.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ท่อที่ 2 และ 3	100	47.7	42.8	0.00	1.99	2.15	4.14	42.3	37.4	0.00	1.88	2.05	3.93	26.4	21.5	0.00	1.50	1.63	3.13
		75.6	46.9	42.0	0.00	1.50	1.69	3.19	42.1	37.2	0.00	1.43	1.56	2.99	24.9	20.0	0.00	1.21	1.33	2.53
		50.2	46.4	41.5	0.00	1.11	1.21	2.33	37.9	33.0	0.00	1.02	1.16	2.18	-	-	-	-	-	-
		26.3	43.9	39.0	0.00	0.61	0.69	1.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ท่อที่ 1 และ 3	100	47.5	42.6	2.22	0.00	2.22	4.44	40.0	35.1	2.05	0.00	2.01	4.06	-	-	-	-	-	-
		75.6	44.7	39.8	1.59	0.00	1.60	3.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		50.2	42.5	37.6	1.22	0.00	1.21	2.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 ท่อ	ท่อที่ 1, 2 และ 3	100	47.3	42.4	2.13	2.02	2.12	6.27	42.0	37.1	1.97	1.91	1.95	5.82	37.0	32.1	1.97	1.85	1.95	5.76
		75.6	45.5	40.6	1.59	1.45	1.60	4.64	37.5	32.6	1.44	1.28	1.44	4.16	25.0	20.1	1.27	1.14	1.27	3.67
		50.2	41.5	36.6	1.10	1.02	1.11	3.23	30.0	25.1	0.92	0.85	0.92	2.69	-	-	-	-	-	-
		26.3	33.0	28.1	0.52	0.46	0.52	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



รูป 3-13 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 3 ท่อ

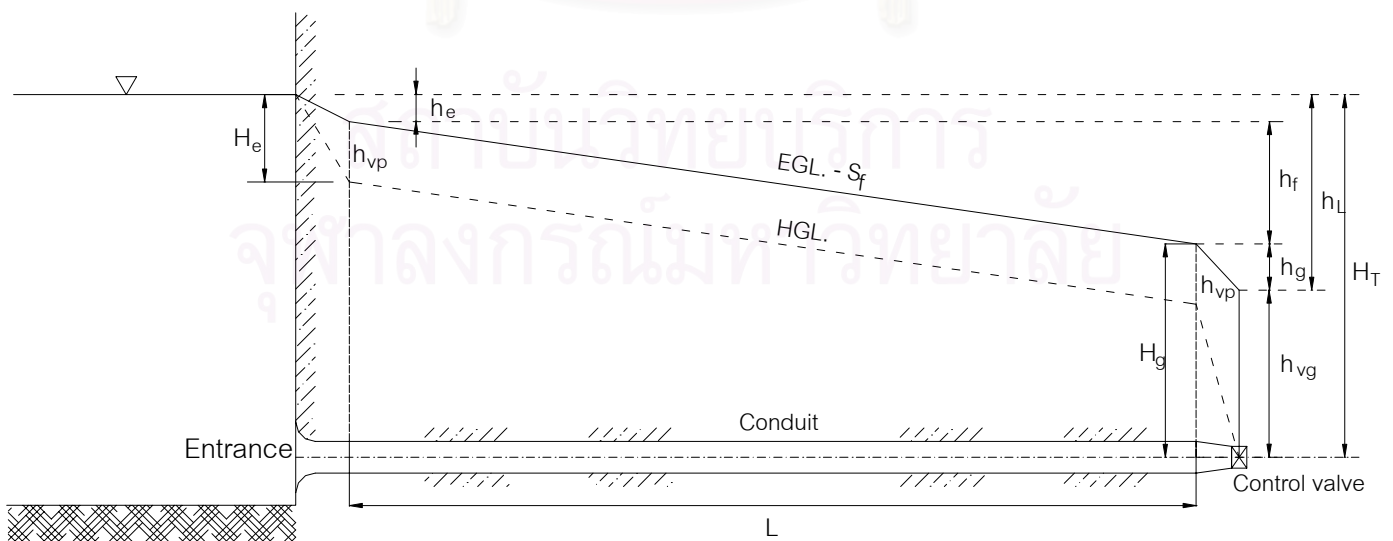
บทที่ 4

ชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ

เนื้อหาในบทนี้ เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ในสภาพการใช้งานที่การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ จากนั้นเป็นการวิเคราะห์การสูญเสียในในแต่ละส่วนของระบบระบายน้ำ และความสัมพันธ์ของสภาพการไหลในแบบจำลอง (model) กับต้นแบบ (prototype) แล้ววิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับผลรวมของความสูงพลังงาน (total head) เพื่อประโยชน์สำหรับการใช้งานของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

4.1 สภาพการไหลผ่านอาคารระบายน้ำในแบบจำลอง

ชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ดังรูป 4-1 ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งเป็นการสูญเสียหลัก โดยมีสมการของ Darcy-Weisbach เป็นหลัก ในการวิเคราะห์หาการสูญเสียที่เกิดขึ้น ดังสมการ $h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า การสูญเสียเนื่องจากวาล์วและการสูญเสียของทางออก โดยมีความสัมพันธ์กับความสูงความเร็ว ดังสมการ $h_m = K_m \frac{v^2}{2g}$ ซึ่งเป็นการสูญเสียรอง โดยที่อัตราการไหลในระบบมีความสัมพันธ์กับความสูงพลังงานรวมและการสูญเสียที่จุดต่าง ๆ ดังสมการ



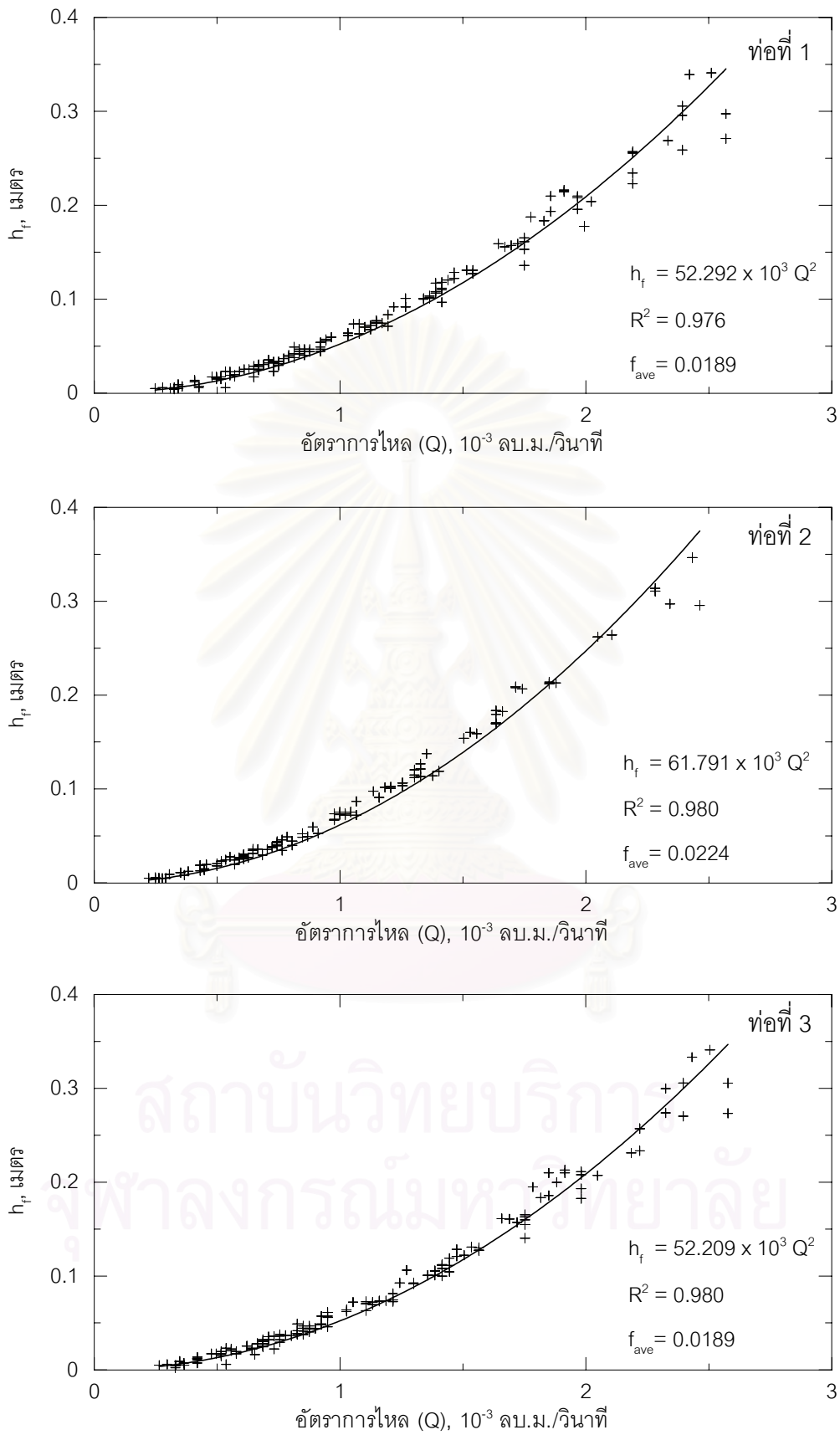
รูป 4-1 ชลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ

4.2 การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

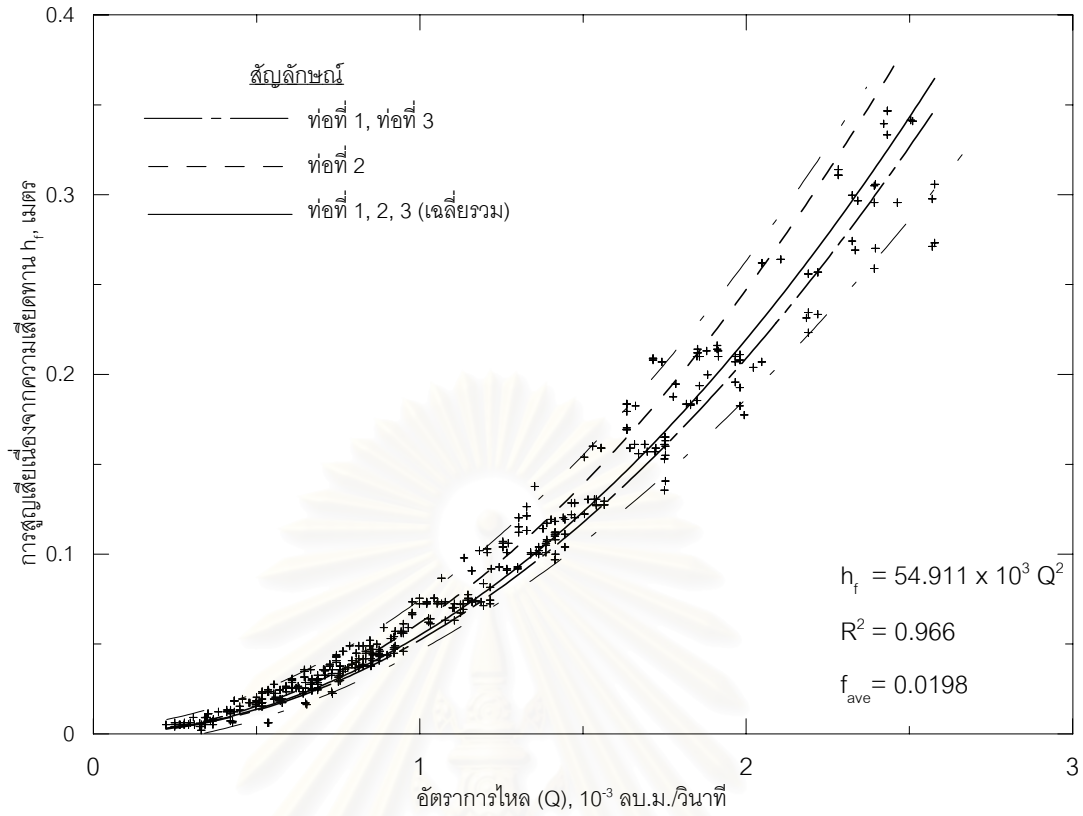
การศึกษาในส่วนนี้ เป็นส่วนของการสูญเสียพลังงานของการไหลในท่อ โดยการสูญเสียที่เป็นความสูงเมื่อเทียบกับพลังงานที่หลักออกจากการสูญเสียของทางเข้ากับพลังงานทางด้านท้ายของท่อจนถึงวาล์ว เป็นความสูงของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พิจารณาการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในแต่ละท่อ ดังรูป 4-2 พบว่าในแต่ละท่อทุกกรณีการใช้งาน มีการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานเท่ากัน และพิจารณา ดังรูป 4-3 ซึ่งข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลเท่ากัน พบว่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานอยู่ในช่วงที่มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าการสูญเสียในท่อเนื่องจากความเสียดทานมีค่าเท่ากัน ทุกท่อและทุกกรณีการไหล เมื่อพิจารณาความสูงของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน ตามสมการของ Darcy-Weisbach : $h_f = f \frac{L v^2}{D 2g}$ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล(Q)กับความสูงของการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน จากรูป 4-3 มีความสัมพันธ์ดังสมการ $h_f = 54.911 \times 10^3 Q^2$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction factor) เป็นตัวแปรไร้หน่วยที่แสดงถึงความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหลในท่อ และเป็นฟังก์ชันกับเลขเรย์โนลด์ (Raynolds Number) เมื่อพิจารณาสภาพการไหลของของไหลแบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบราบเรียบ (laminar flow) และปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งจากผลการศึกษาการไหลในท่อระบายน้ำของแบบจำลองอาคารระบายน้ำ เมื่อวิเคราะห์ค่าเลขเรย์โนลด์ อยู่ในสภาพการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วน โดยมีช่วงอยู่ระหว่าง 6,500 ถึง 75,000 ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ของสภาพการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากเป็นฟังก์ชันกับค่าเลขเรย์โนลด์ แล้วยังเป็นฟังก์ชันกับความสูงของความขรุขระของผนังท่อ (e) และเมื่อพิจารณาความขรุขระของผนังท่อ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นท่อเรียบและส่วนที่เป็นท่อหยาบ โดยมีรายละเอียดดังรูป 2-12 แผนภาพของ Moody ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (e/D)

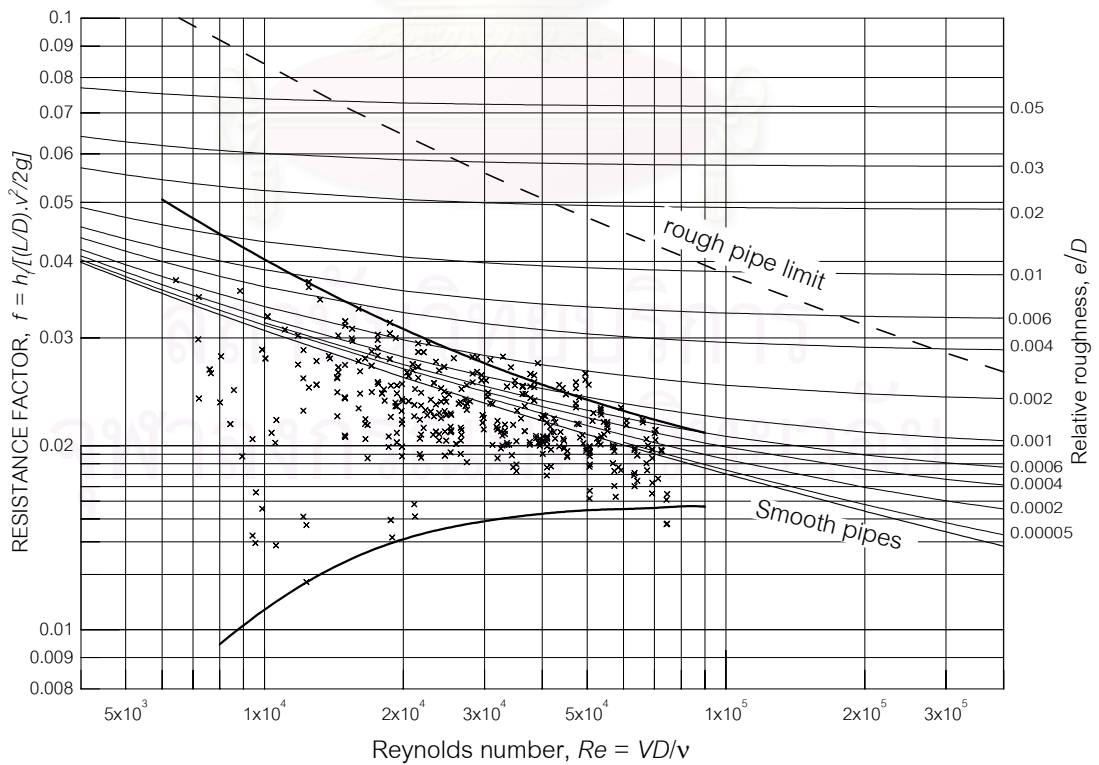
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่ได้ นำมาพิจารณาในแผนภาพของ Moody ดังรูป 4-4 ซึ่งมีแนวโน้มกระจายอยู่ในช่วงขอบเขตที่เป็นท่อเรียบ โดยมีการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากในช่วงที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ และลู่เข้าโดยมีช่วงของการกระจายน้อยลงจนมีแนวโน้มที่ลู่เข้าที่มีการกระจายอยู่ในช่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในช่วง 0.016 ถึง 0.021 จากความสัมพันธ์จากความสัมพันธ์ $h_f = 54.911 \times 10^3 Q^2$ ที่กล่าวมาแล้ว ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยของ 3 ท่อ เท่ากับ 0.0198 ซึ่งเมื่อพิจารณารวมกับค่า



รูป 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในแต่ละท่อ



รูป 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานกับอัตราการไหล



รูป 4-4 กราฟ Moody ของการไหลผ่านท่อระบายน้ำจากอาคารระบายน้ำ

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้ในแผนภาพของ Moody ที่มีแนวโน้มที่ลู่เข้าหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่าหนึ่ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังกล่าวอยู่ในช่วงที่มีแนวโน้มที่ลู่เข้า ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าคงที่ตลอดไม่ขึ้นอยู่กับค่าเลขเรย์โนลด์ แต่จะเปลี่ยนแปลงถ้าค่าความขรุขระสัมพัทธ์เปลี่ยนไป

สรุปในส่วนของการศึกษาการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแผนภาพของ Moody โดยมีแนวโน้มที่ลู่เข้าหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มีค่าค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อนำผลจากการศึกษาในกรณีทั้งหมดมาวิเคราะห์หาค่าสัมพัทธ์สัมพัทธ์ระหว่าง Q กับ h , ตามสมการของ Darcy-Weisbach โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0198 ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับแผนภาพของ Moody นำจะเป็นค่าคงที่ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เป็นกรไหลแบบสมบูรณ์เมื่อมีค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูงๆ โดยพิจารณาแนวโน้มในแผนภาพของ Moody จากขอบเขตของข้อมูลในรูป 4-3 จากการทำการศึกษามีข้อจำกัดของของระดับที่ทำให้เกิดการไหลผ่านท่อระบายน้ำของอาคารระบายน้ำ ซึ่งมีแนวทางในการศึกษาต่อไป ในการเพิ่มค่าเลขเรย์โนลด์ให้มีค่าสูงขึ้น ในส่วนของกรจำลองสภาพการไหลในต้นแบบเป็นสภาพการไหลในแบบจำลอง ซึ่งใช้อัตราส่วนของค่าเลขเรย์โนลด์ดังรายละเอียดของทฤษฎีในหัวข้อ 2.5 ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.7 ในการแปลงสภาพการไหลในแบบจำลองให้เป็นการไหลในต้นแบบ

4.3 การสูญเสียเนื่องจากทางเข้า

การศึกษาในส่วนนี้ เป็นการศึกษาของการสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านอาคารรับน้ำ (intake) หรือ Entrance loss โดยพิจารณาการสูญเสียที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความสูงของระหว่างระดับน้ำที่อ่างเก็บน้ำกับความดันที่ด้านท้ายของทางเข้าที่ต้นท่อระบายน้ำของอาคารระบายน้ำ ซึ่งความสูงของการสูญเสียพลังงานเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล โดยมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความเร็วของการไหลมากขึ้น ดังสมการ $h_e = K_e \frac{v^2}{2g}$ เมื่อพิจารณาสมการเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับความสูงของการสูญเสียความดันเนื่องจากทางเข้า (H_e) ในรูป 4-1 พิจารณาเป็นสมการการไหลผ่านรูระบาย (orifice flow) $Q = C_e A \sqrt{2gH_e}$ จากนั้นเปลี่ยนเป็นความเร็วของการไหล $v = C_e \sqrt{2gH_e}$ ได้ $H_e = \frac{1}{C^2} + \frac{v^2}{2g}$ ซึ่งเป็นผลรวมของความสูง

ของการสูญเสียความดันกับการสูญเสียพลังงาน ดังนั้น $\frac{v^2}{2g} + h_e = \frac{1}{C^2} + \frac{v^2}{2g}$ เพราะฉะนั้น

$$h_e = \left(\frac{1}{C^2} + 1\right) \frac{v^2}{2g} \text{ ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า, } K_e = \left(\frac{1}{C^2} + 1\right)$$

จากความสัมพันธ์สัมพันธ์ระหว่าง Q กับ H_e โดยแยกเป็นการสูญเสียของทางเข้าของแต่ละท่อ โดยไม่พิจารณาการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ดังรูป 4-5 โดยการสูญเสียของทางเข้าของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียเนื่องจากทางเข้าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าในท่อ 1 และท่อที่ 3 มีค่าการสูญเสียเท่ากัน และค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียเนื่องจากทางเข้าของท่อที่ 2 มีค่ามากกว่าประมาณ 2 เท่าของทางเข้าท่อที่ 1 และท่อที่ 3 และแสดงดังรูป 4-6 เปรียบเทียบการสูญเสียของทางเข้า ในแต่ละท่อ

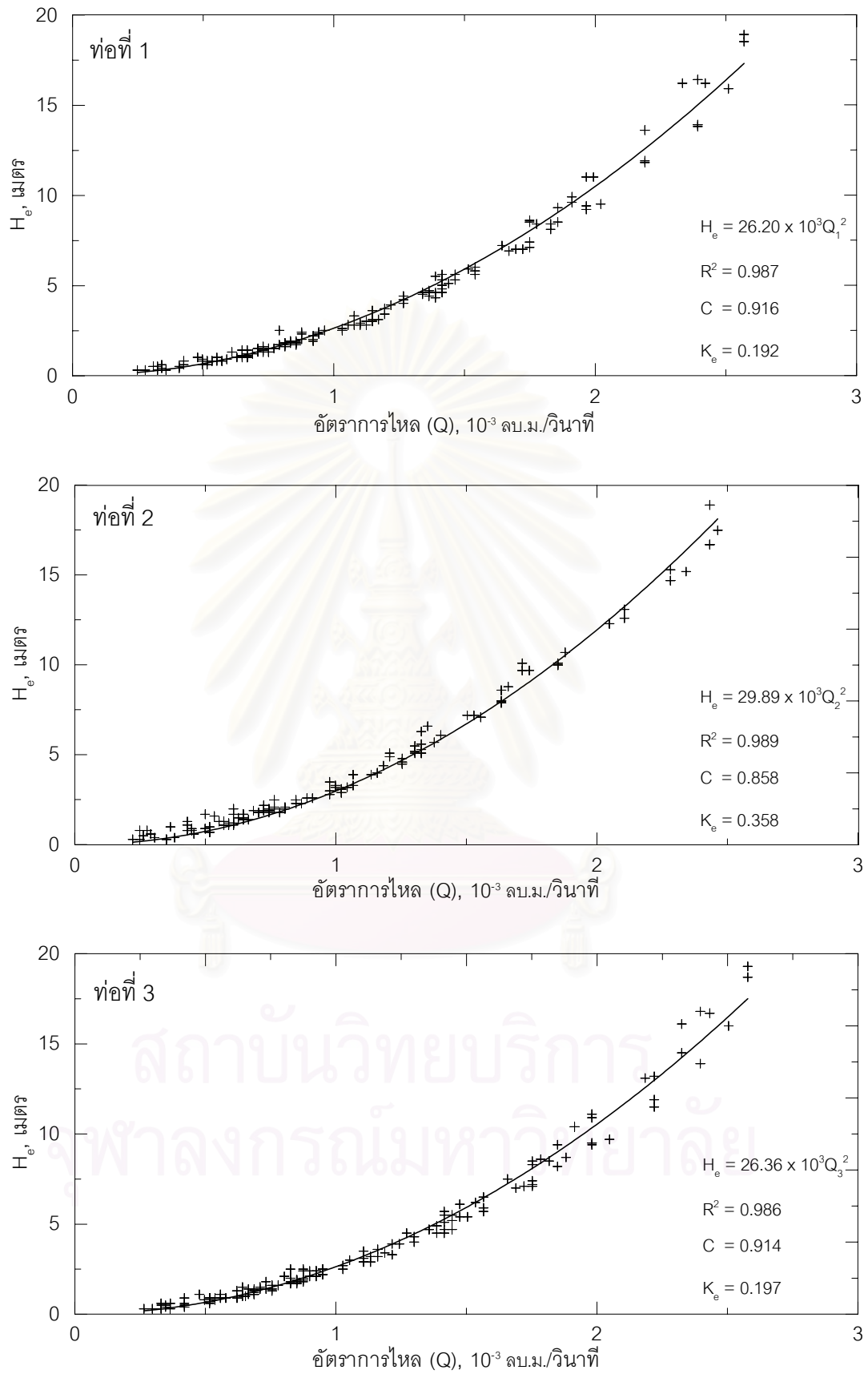
ในส่วนการพิจารณาการใช้งานของอาคารระบายน้ำ โดยแบ่งการใช้งานออกเป็น 5 กรณี ซึ่งมีรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ H_e ของแต่ละกรณีการใช้งาน ดังรูป ๑1-1 ถึง ๑1-5 และสรุปความสัมพันธ์ของแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ดังตาราง 4-1 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว ประกอบด้วยค่า K ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ แล้วจากนั้นนำมาคำนวณหาค่า C_e ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลเมื่อพิจารณาเทียบกับสมการของการไหลผ่านรูระบาย (orifice flow) แล้วจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า (K_e)

ในกรณีที่พิจารณาผลจากการใช้งานอาคารระบายน้ำ จากการรวมทกรณีการใช้งานการสูญเสียพลังงานในท่อที่ 1 เท่ากับ ท่อที่ 3 และทั้งสองมีค่าน้อยกว่าท่อที่ 2 ซึ่งการสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้าเมื่อพิจารณาในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละกรณี โดยท่อที่ 2 มากกว่าท่อที่ 1 และท่อที่ 3 ดังนี้

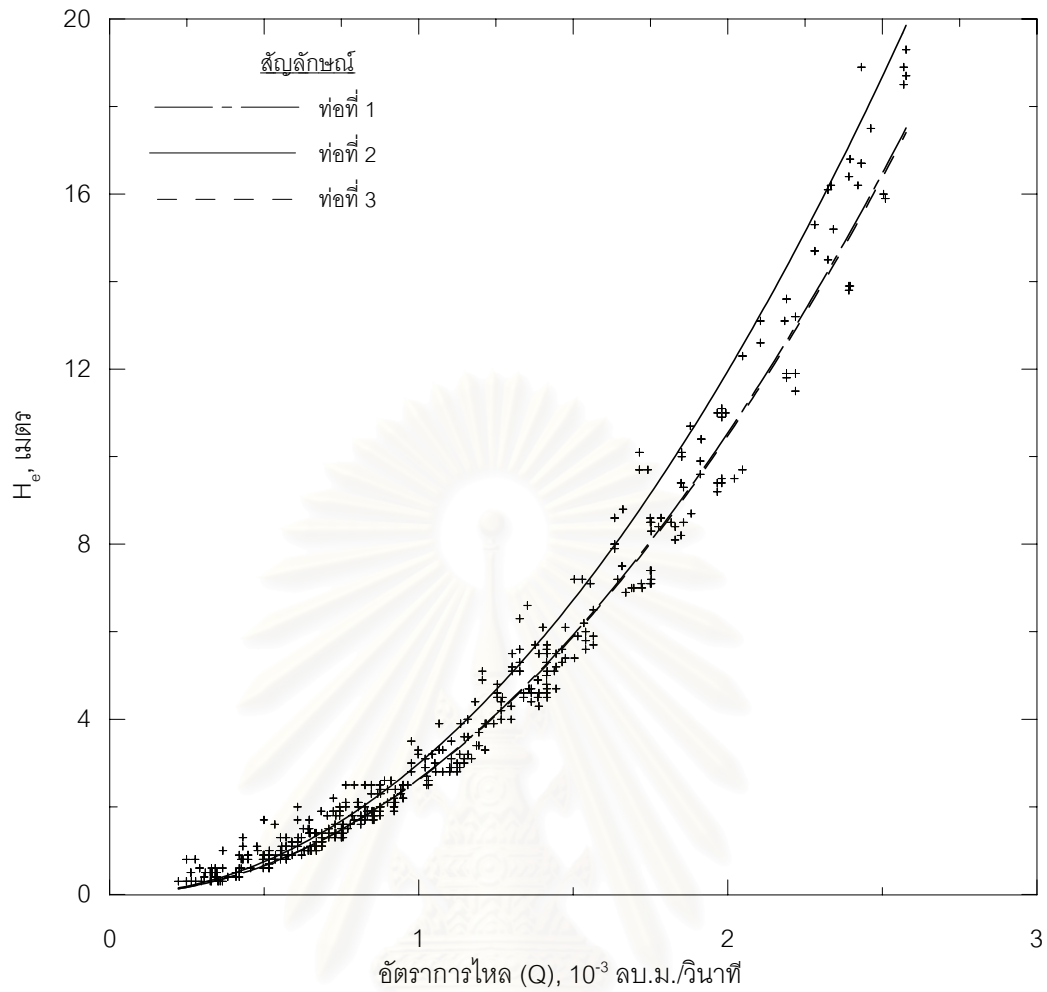
กรณีการไหล ท่อที่ 2 มากกว่าท่อที่ 1 และ 3

1 ท่อ	3.4 เท่า
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	2.4 เท่า
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	2.1 เท่า
3 ท่อ	1.2 เท่า

สำหรับในกรณีการไหล 2 ท่อ เมื่อพิจารณาผลรวมของการสูญเสียที่เกิดขึ้น จากท่อทั้งสองได้ผลรวมมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากทางเข้า ในกรณีการใช้งานที่มีการไหล 2 ท่อ มีค่าการสูญเสียรวมเท่ากัน



รูป 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับความอัตราการไหล ในแต่ละท่อ



รูป 4-6 การเปรียบเทียบการสูญเสียเนื่องจากอาคารทางเข้าของแบบจำลอง ในแต่ละท่อ

ตาราง 4-1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า

กรณีการไหล	สัมประสิทธิ์	ท่อที่ 1	ท่อที่ 2	ท่อที่ 3
1 ท่อ	$H_e = K \cdot Q^2 ; K \times 10^3$	24.64	30.85	24.67
	$Q = C_e A (2gH_e)^{0.5} ; C_e$	0.945	0.846	0.945
	การสูญเสียของทางเข้า ; K_e	0.118	0.397	0.118
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	$H_e = K \cdot Q^2 ; K \times 10^3$	25.11	29.38	-
	$Q = C_e A (2gH_e)^{0.5} ; C_e$	0.936	0.866	-
	การสูญเสียของทางเข้า ; K_e	0.141	0.333	-
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	$H_e = K \cdot Q^2 ; K \times 10^3$	-	29.38	25.54
	$Q = C_e A (2gH_e)^{0.5} ; C_e$	-	0.866	0.928
	การสูญเสียของทางเข้า ; K_e	-	0.333	0.161
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	$H_e = K \cdot Q^2 ; K \times 10^3$	27.11	-	27.07
	$Q = C_e A (2gH_e)^{0.5} ; C_e$	0.901	-	0.902
	การสูญเสียของทางเข้า ; K_e	0.229	-	0.228
3 ท่อ	$H_e = K \cdot Q^2 ; K \times 10^3$	28.00	29.30	28.14
	$Q = C_e A (2gH_e)^{0.5} ; C_e$	0.886	0.867	0.885
	การสูญเสียของทางเข้า ; K_e	0.273	0.330	0.276

หมายเหตุ H_e : ความสูงของการสูญเสียความดันของทางเข้า, $H_e = h_v + h_e$

ในการพิจารณาการสูญเสียเนื่องจากทางเข้า ในแต่ละท่อของแต่ละกรณีการใช้ ในกรณีการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 ซึ่งในกรณีการไหล 3 ท่อ มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมากที่สุด และในกรณีการไหล 1 ท่อ มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถพิจารณาการสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้าในแต่ละท่อของแต่ละกรณี โดยใช้การเปรียบเทียบกับกรณีการไหล 1 ท่อ ดังนี้

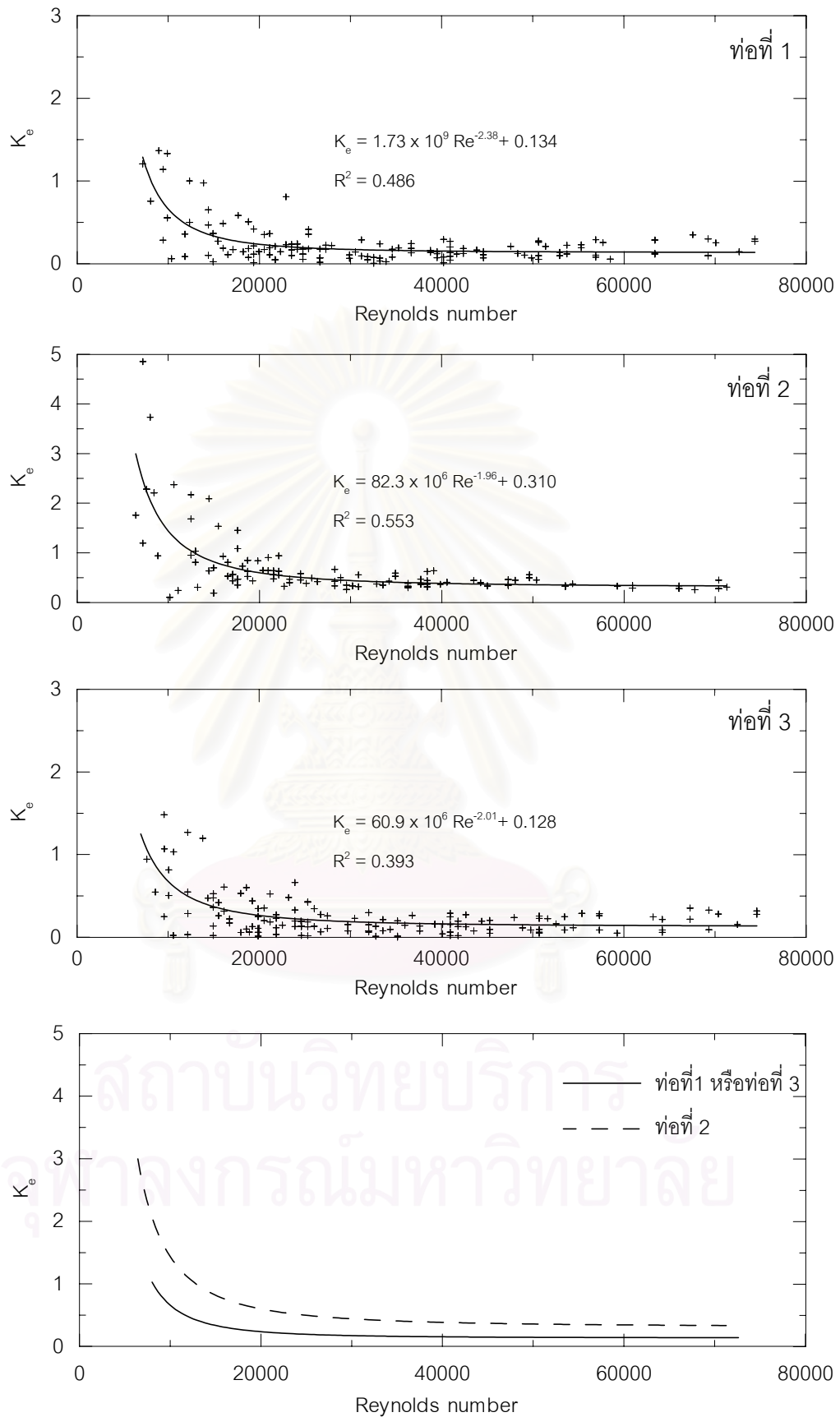
<u>ท่อที่ 1 และท่อที่ 3</u>	<u>จำนวนเท่า</u>
กรณีการไหล 1 ท่อ	1.0 เท่า
กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	1.2 เท่า
กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	1.4 เท่า
กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	1.9 เท่า
กรณีการไหล 3 ท่อ	2.3 เท่า

ในส่วนต่อไปของการวิเคราะห์ ในส่วนของการสูญเสียเนื่องจากทางเข้า โดยที่สัมพันธ์กับค่าเลขเรย์โนลด์ ซึ่งทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในแต่ละท่อทุกๆ กรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ดังรูป 4-7 มีแนวโน้มที่เหมือนกัน ดังนี้

<u>เลขเรย์โนลด์</u>	<u>ความสัมพันธ์</u>
7,500 ถึง 30,000	K_o ลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่มากขึ้น
30,000 ถึง 75,000	K_o ลดลงน้อยจนเกือบคงที่เมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่มากขึ้น

ในส่วนของแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ในกรณีที่มีการไหล 1 ท่อ ซึ่งมีรายละเอียด ดังรูป ๖1-7 โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละค่าเลขเรย์โนลด์และความแตกต่างของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 กับ ท่อที่ 2 ดังนี้

<u>เลขเรย์โนลด์</u>	<u>ความสัมพันธ์</u>
7,500 ถึง 25,000	K_o มีแนวโน้มลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่มากขึ้นและความแตกต่างของท่อที่ 1 และ 3 กับท่อที่ 2 มีความแตกต่างมากในค่าเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำแล้วลดลงเรื่อยๆ
30,000 ถึง 75,000	K_o มีแนวโน้มลดลงน้อยจนเกือบคงที่เมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่มากขึ้น และความแตกต่างของท่อที่ 1 และ 3 กับท่อที่ 2 มีความแตกต่างน้อยลงเรื่อยๆจนมีแนวโน้มที่จะ



รูป 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number

เท่ากันในค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น ซึ่งไม่อยู่ในช่วงของการศึกษา

ในส่วนของแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ในกรณีที่มีการไหล 2 ท่อ ซึ่งได้พิจารณาในทั้งสองกรณี คือกรณีการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 2 กับกรณีการไหลในท่อที่ 2 และ 3 ดังรายละเอียด ในรูป จ1-8 และ จ1-9 โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละค่าเลขเรย์โนลด์และความแตกต่างของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 กับ ท่อที่ 2 ดังนี้

<u>เลขเรย์โนลด์</u>	<u>ความสัมพันธ์</u>
7,500 ถึง 20,000	K_o มีแนวโน้มลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้นและความแตกต่างของท่อที่ 1 และ 3 กับท่อที่ 2 มีค่าเท่ากันในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ และมีความแตกต่างเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มากขึ้น
20,000 ถึง 75,000	K_o มีแนวโน้มลดลงจนเกือบคงที่เมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่มากขึ้น และความแตกต่างของท่อที่ 1 และ 3 กับท่อที่ 2 มีความแตกต่างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีแนวโน้มที่ขนานกันที่ค่าเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 50,000 และมีแนวโน้มที่จะขนานกันไปเรื่อยๆ เมื่อมีค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น

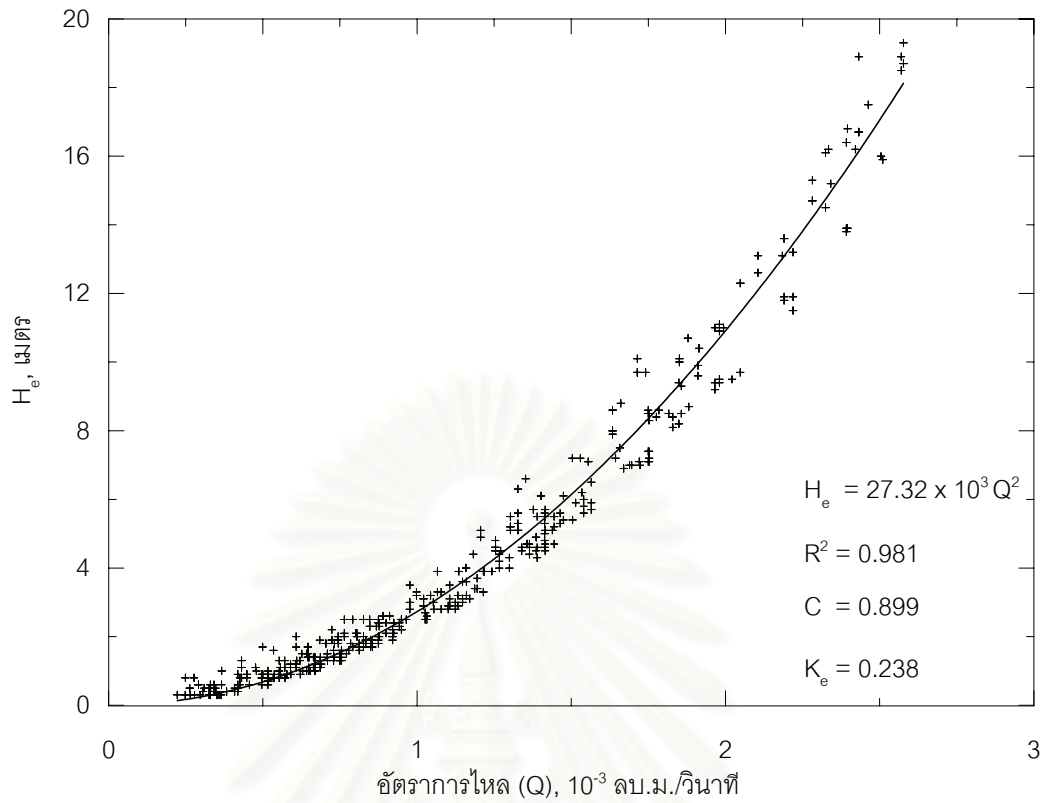
ในส่วนของแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ในกรณีที่มีการไหล 2 ท่อ พิจารณากรณีการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 รายละเอียด ดังรูป จ1-10 โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละค่าเลขเรย์โนลด์และความแตกต่างของท่อที่ 1 กับท่อที่ 3 ดังนี้

<u>เลขเรย์โนลด์</u>	<u>ความสัมพันธ์</u>
7,500 ถึง 75,000	K_o มีแนวโน้มลดน้อยจนเกือบคงที่ เมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้นและความแตกต่างของท่อที่ 1 กับท่อที่ 3 มีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งถือได้ว่ามีค่าเท่ากับ ถ้าเปรียบเทียบกับกรณีอื่น

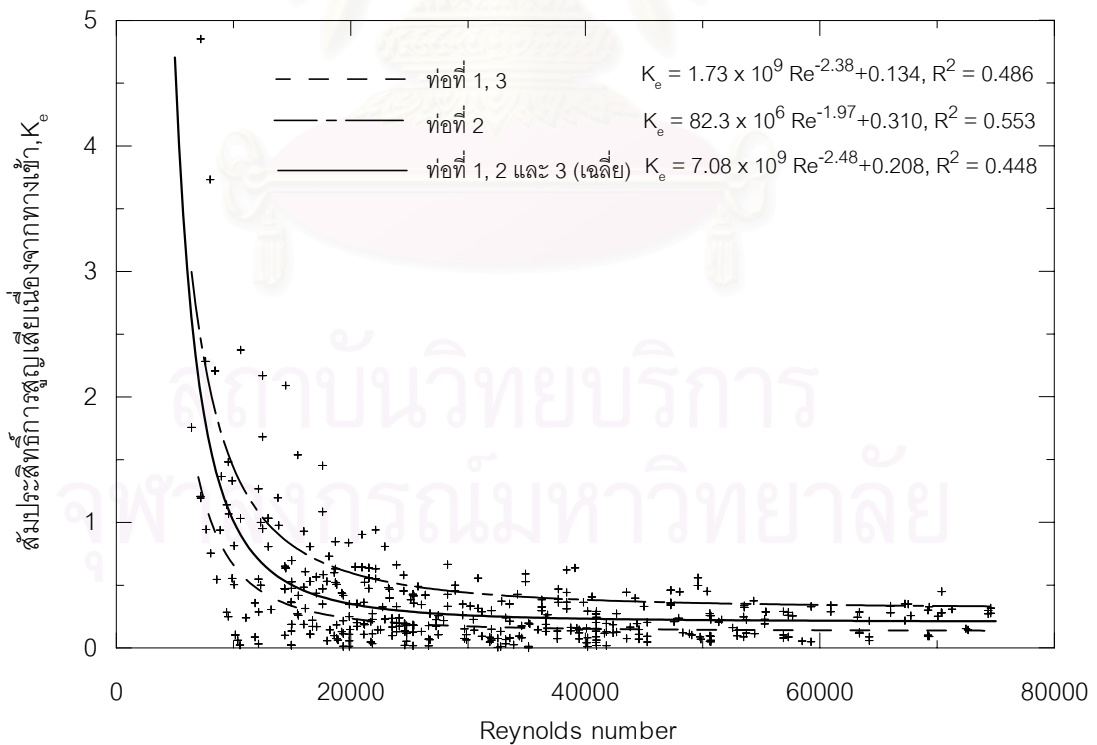
ในส่วนของแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ในกรณีที่มีการไหล 3 ท่อ ซึ่งมีรายละเอียด ดังรูป จ1-11 โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละค่าเลขเรย์โนลด์และความแตกต่างของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 กับ ท่อที่ 2 ดังนี้

<u>เลขเรย์โนลด์</u>	<u>ความสัมพันธ์</u>
7,500 ถึง 20,000	K_o มีแนวโน้มลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้นและความแตกต่างของท่อที่ 1 และ 3 กับท่อที่ 2 มีค่าเท่ากันในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ และมีความแตกต่างเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มากขึ้น
20,000 ถึง 75,000	K_o มีแนวโน้มลดลงจนเกือบคงที่เมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ที่มากขึ้น และความแตกต่างของท่อที่ 1 และ 3 กับท่อที่ 2 มีความแตกต่างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีแนวโน้มที่ขนานกันที่ค่าเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 30,000 และมีแนวโน้มที่จะขนานกันไปเรื่อยๆ เมื่อมีค่าเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น

สรุปในส่วนของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า ทางเข้าในส่วนของอาคารระบายน้ำ ซึ่งมีท่อระบายอยู่ 3 ท่อ ซึ่งอาคารทางเข้าดังกล่าวเป็นแบบ multi-outlet work โดยกรณีการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 มีการสูญเสียเนื่องทางเข้าที่เหมือนกัน และในกรณีการไหลในท่อที่ 2 มีค่ามากกว่า ซึ่งค่าเฉลี่ยของทางเข้าโดยรวมของทุกกรณีที่มีการใช้งาน ดังรูป 4-8ก โดยความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ H_o คือ $H_o = 27.32 \times 10^3 Q^2$ ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล C_o เท่ากับ 0.899 และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า (K_o) เท่ากับ 0.238 ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้ากับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ดังรูป 4-8ข โดยมีความสัมพันธ์เหมือนกับการวิเคราะห์ในการไหลของในแต่ละกรณีที่ผ่านมา



ก) ความสัมพันธ์ความสูงพลังงานที่ทางเข้ากับอัตราการไหล



ข) ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์การสูญเสียของทางเข้ากับ Reynolds number

รูป 4-8 การสูญเสียเนื่องจากอาคารทางเข้าของแบบจำลอง

4.4 การสูญเสียเนื่องจากวาล์ว

การศึกษาในส่วนนี้ เป็นการศึกษาของการสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านวาล์วควบคุม อัตราการไหล โดยพิจารณาการสูญเสียที่เกิดขึ้น จากความดันในท่อนก่อนถึงวาล์วและความสูง ความเร็วที่วาล์ว (ทางออก) เมื่อนำความดัน ณ จุดดังกล่าวหักออกจากค่าความสูงความเร็วที่ วาล์ว ซึ่งเป็นความสูงของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว โดยความสูงของการสูญเสียพลัง งานเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล โดยมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความเร็วของการไหลมากขึ้น

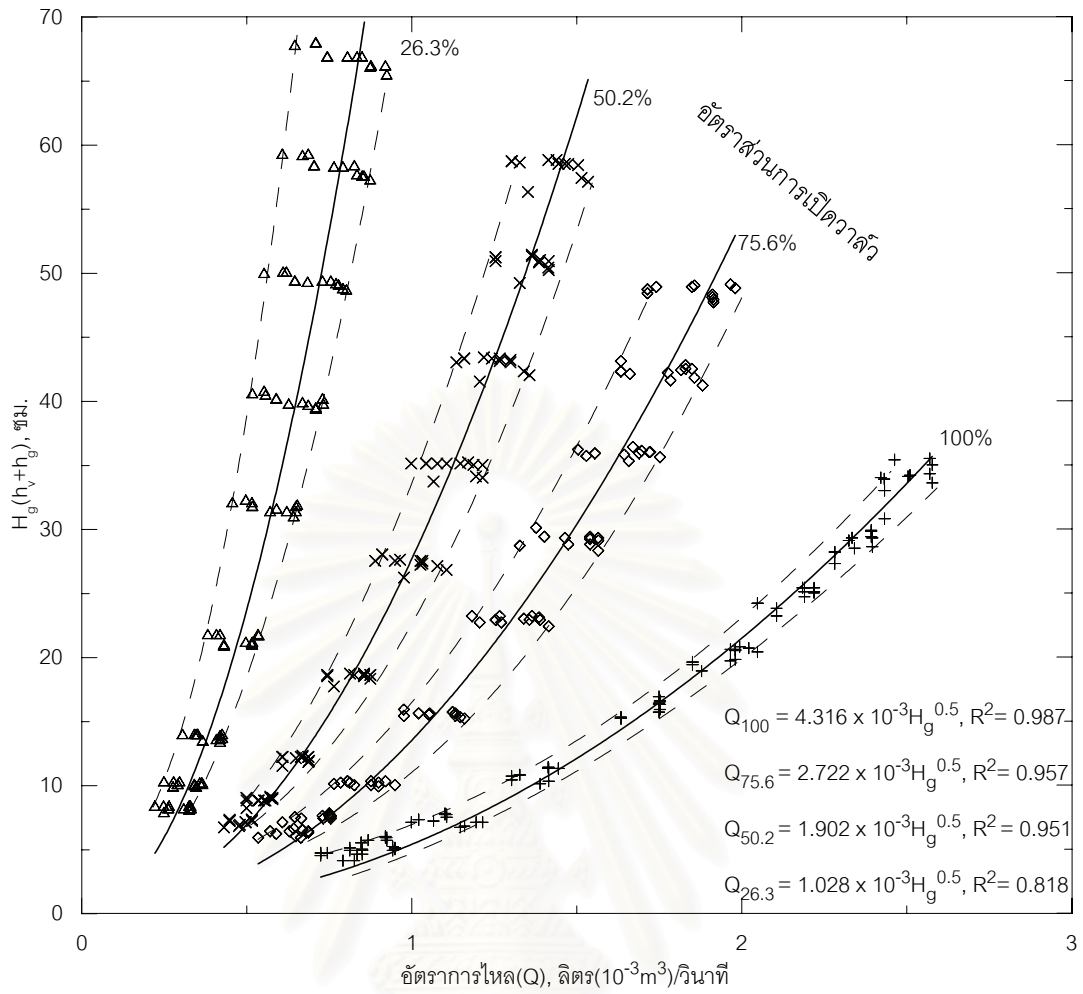
ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์กับความสูงความเร็ว (velocity head) ดังสมการ $h_g = K_g \frac{V^2}{2g}$ เมื่อ พิจารณา สมการเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับผลรวมของความสูงความเร็วที่ วาล์วและความสูงการสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว ($h_{vg} + h_g = H_g$) ในรูป 4-1 ดังนั้น

$$Q = A_g \sqrt{\frac{2gH_g}{K_g + 1}}$$

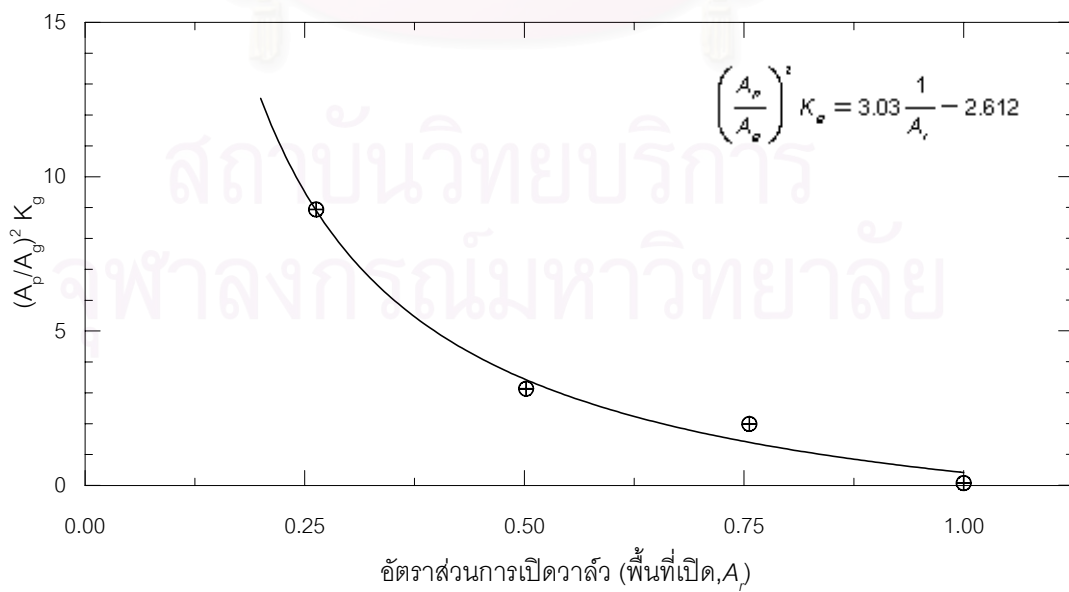
เมื่อนำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ H_g โดยแยกการ สูญเสียที่เกิดเนื่องจากวาล์ว ซึ่งพิจารณาอัตราส่วนการเปิดวาล์วในทุกกรณีที่มีการใช้งานของ อาคารระบายน้ำ พบความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ H_g ของแต่ละอัตราส่วนการเปิดวาล์ว ดังรูป 4-9 ซึ่งแสดงผลในตาราง 4-4 ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ที่มี ค่าเท่ากับ 4.316×10^{-3} ถึง 1.028×10^{-3} ซึ่งมีค่าแปรผันตามอัตราส่วนในการเปิดวาล์ว จาก 1.00 ถึง 0.263 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์วมีค่าเท่ากับ 0.032, 0.482, 0.333 และ 0.263 ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์ว 1.00, 0.756, 0.502 และ 0.263 ตามลำดับ รวมทั้งผลคูณของพื้นที่หน้าตัดท่อที่หน้าตัดท่อที่เปิดวาล์วทั้งหมดยกกำลังสองและค่าสัมประสิทธิ์การ สูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว โดยมีค่าแปรผันกับอัตราส่วนในการเปิดวาล์ว ซึ่งค่าที่ได้ดัง กล่าว ได้นำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่อไป

ในส่วนของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พื้นที่หน้าตัดท่อ (A_p) พื้นที่เปิดวาล์วทั้ง (A_r) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์วในพจน์ $(A_p / A_g)^2 K_g$ กับอัตราส่วนการเปิด วาล์ว (A_r) จากตาราง 4-2 ได้ความสัมพันธ์ ดังรูป 4-10 ดังสมการ

$$\left(\frac{A_p}{A_g}\right)^2 K_g = 3.03 \frac{1}{A_r} - 2.612 \quad 4-2$$



รูป 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับการสูญเสียความดันเนื่องจากวาล์ว



รูป 4-10 ความสัมพันธ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์วกับอัตราส่วนการเปิดวาล์ว

- โดยที่ A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อระบายน้ำระบบระบายน้ำ
 A_g คือ พื้นที่ที่ทำการเปิดวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหล
 A_r คือ อัตราส่วนของพื้นที่ที่ทำการเปิดวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลกับพื้นที่เปิดวาล์วเต็มที่

ตาราง 4-2 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว ในแต่ละอัตราส่วนการเปิดวาล์ว

อัตราส่วนการเปิดวาล์ว				$Q = K H_g^{0.5}$	K_g	$(A_p/A_g)^2 K_g$
ระยะยก	%	พื้นที่	%	$K \times 10^{-3}$		
cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว			
3.00	100	9.898	100	4.316	0.032	0.076
2.00	66.7	7.482	75.6	2.722	0.482	1.991
1.35	45.0	4.957	50.2	1.902	0.333	3.133
0.80	26.7	2.608	26.3	1.028	0.263	8.940

สรุปในส่วนของการศึกษาการสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว จากการศึกษาข้อมูลของวาล์วในการควบคุมอัตราการไหลผ่านอาคารและท่อระบายน้ำ สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนในการเปิดวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหล กับค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์วได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว วิเคราะห์มาจากข้อมูลการศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และความสูงการสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว (H_g) ผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากวาล์วที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ได้

4.5 ความสัมพันธ์อัตราการไหล

สภาพการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ เมื่อพิจารณาอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจากระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ ในความสัมพันธ์ของอัตราการไหล (Q) กับความสูงพลังงานรวม (total head), H_T

มีความสัมพันธ์ $Q = A \sqrt{\frac{2gH_T}{K_e + K_f + K_g + K_v}}$ และการสูญเสียพลังงานต่าง ๆ $H_L \propto v_j^2$ หรือ

$v_j = \sqrt{H_L}$ จะได้ว่า $Q \propto H_T^{0.5}$ หรือ $Q = KH_T^{0.5}$ โดยที่ K คือ $A \sqrt{\frac{2g}{K_e + K_f + K_g + K_v}}$ จากนั้นนำ

ข้อมูลการทดลอง มาวิเคราะห์หาค่า K จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้ทราบค่าที่เป็นตัวแปรในการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล ในแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ

ในความสัมพันธ์ของ Q กับ H_T โดยทำการวิเคราะห์ในกรณีการไหล 1 ท่อ, 2 ท่อ และ 3 ท่อ ดังรูป ๑2-1 ถึง ๑2-5 ที่อัตราการเปิดวาล์ว 100%, 75.6%, 50.2% และ 26.3% ซึ่งเป็นอัตราการเปิดวาล์วจริงในการทดลอง และสามารถเปรียบเทียบสภาพการไหลผ่านอาคารระบายน้ำจากค่า K ดังตาราง 4-3 ของแต่ละท่อและการไหลในกรณีต่าง ๆ พิจารณากรณีการไหลในกรณีการไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 มีค่า K ใกล้เคียงกัน ในท่อที่ 2 มีค่า K น้อยกว่าท่อทั้งสอง ซึ่งหมายความว่าอัตราการไหลน้อยกว่าท่อที่ 1 และท่อที่ 3 ก็เช่นเดียวกับกรณีการไหล 2 ท่อ และ 3 ท่อ พิจารณาในท่อที่ 1, ท่อที่ 2 และท่อที่ 3 ในทุกกรณีการไหล พบว่ากรณีการไหล 3 ท่อ มีอัตราการไหลน้อยกว่าการไหลในกรณีอื่น ๆ และกรณีการไหลการไหล 1 ท่อ และ 2 ท่อ มีอัตราการไหลท่อใกล้เคียงกัน จากสภาพดังกล่าวที่เกิดขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากอาคารทางเข้า

สำหรับค่า K จากความสัมพันธ์ $Q = KH_T^{0.5}$ ในแต่ละกรณีการไหล ดังตาราง 4-4 เมื่อพิจารณากับค่าอัตราการเปิดวาล์ว (A_r) พบว่ามีความผันแปรตาม A_r ซึ่งได้หาสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับ A_r ในแต่ละกรณีการไหล ดังรูป 4-11 ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของสมการกำลัง $K = aA_r^n$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว เมื่อนำไปรวมกับความสัมพันธ์ $Q = KH_T^{0.5}$ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันกับระดับน้ำและอัตราการเปิดวาล์ว คือ $Q = aA_r^n H_T^{0.5}$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว ของทุกกรณีการไหล ดังตาราง 4-5 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ใช้ได้กับการไหลในแบบจำลอง โดยได้หาอัตราการไหลในกรณีที่มีอัตราส่วนการเปิดวาล์วที่ 100%, 75%, 50%, 37.5%, 25% และ 12.5% ในทุกกรณีการไหลในแต่ละท่อ ดังรูป ๑2-6 ถึง ๑2-10 เป็นอัตราที่คำนวณจากความสัมพันธ์ ที่วิเคราะห์จากข้อมูลในแบบจำลอง โดยที่ค่า K เป็นค่าของผลรวมทางกายภาพของอัตราการไหลที่เกิดขึ้นทั้งหมด

สรุปในส่วนของการศึกษาความสัมพันธ์อัตราการไหล ที่มีความสัมพันธ์กับระดับน้ำ คือ $Q = KH_T^{0.5}$ และใช้เปรียบเทียบอัตราการไหลในแต่ละกรณีการไหล ซึ่งได้สภาพอัตราการไหลในท่อที่ 1 ใกล้เคียงกับอัตราการไหลในท่อที่ 3 และมีค่ามากกว่าอัตราการไหลในท่อที่ 2 เป็นผลอันเนื่องมาจากอาคารทางเข้า เมื่อพิจารณาค่า K กับ A_r ทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่สามารถหาอัตราการไหลได้ทุกกรณีการเปิดวาล์วที่ใช้ได้ในแบบจำลอง

ตาราง 4-3 สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีการใช้งานอาคารระบายน้ำ

กรณี การไหล	อัตราการเปิดวาล์ว				$K \times 10^{-3}$ จาก $Q = K H_T^{0.5}$		
	ระยะยก	% ยก	พื้นที่	% พื้นที่	ท่อที่ 1	ท่อที่ 2	ท่อที่ 3
1 ท่อ	3.00	100	9.898	100.0	2.99	2.94	3.00
	2.00	66.7	7.482	75.6	2.29	2.13	2.30
	1.35	45.0	4.957	50.2	1.75	1.70	1.79
	0.80	26.7	2.608	26.3	1.06	1.00	1.07
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	3.00	100	9.898	100.0	2.97	2.85	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	2.33	2.08	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	1.73	1.57	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	1.00	0.89	-
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	3.00	100	9.898	100.0	-	2.84	2.97
	2.00	66.7	7.482	75.6	-	2.07	2.35
	1.35	45.0	4.957	50.2	-	1.58	1.76
	0.80	26.7	2.608	26.3	-	0.90	1.04
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	3.00	100	9.898	100.0	3.00	-	3.00
	2.00	66.7	7.482	75.6	2.32	-	2.34
	1.35	45.0	4.957	50.2	1.81	-	1.82
	0.80	26.7	2.608	26.3	1.09	-	1.10
3 ท่อ	3.00	100	9.898	100.0	3.00	2.89	3.03
	2.00	66.7	7.482	75.6	2.24	2.06	2.25
	1.35	45.0	4.957	50.2	1.68	1.56	1.71
	0.80	26.7	2.608	26.3	0.84	0.77	0.85

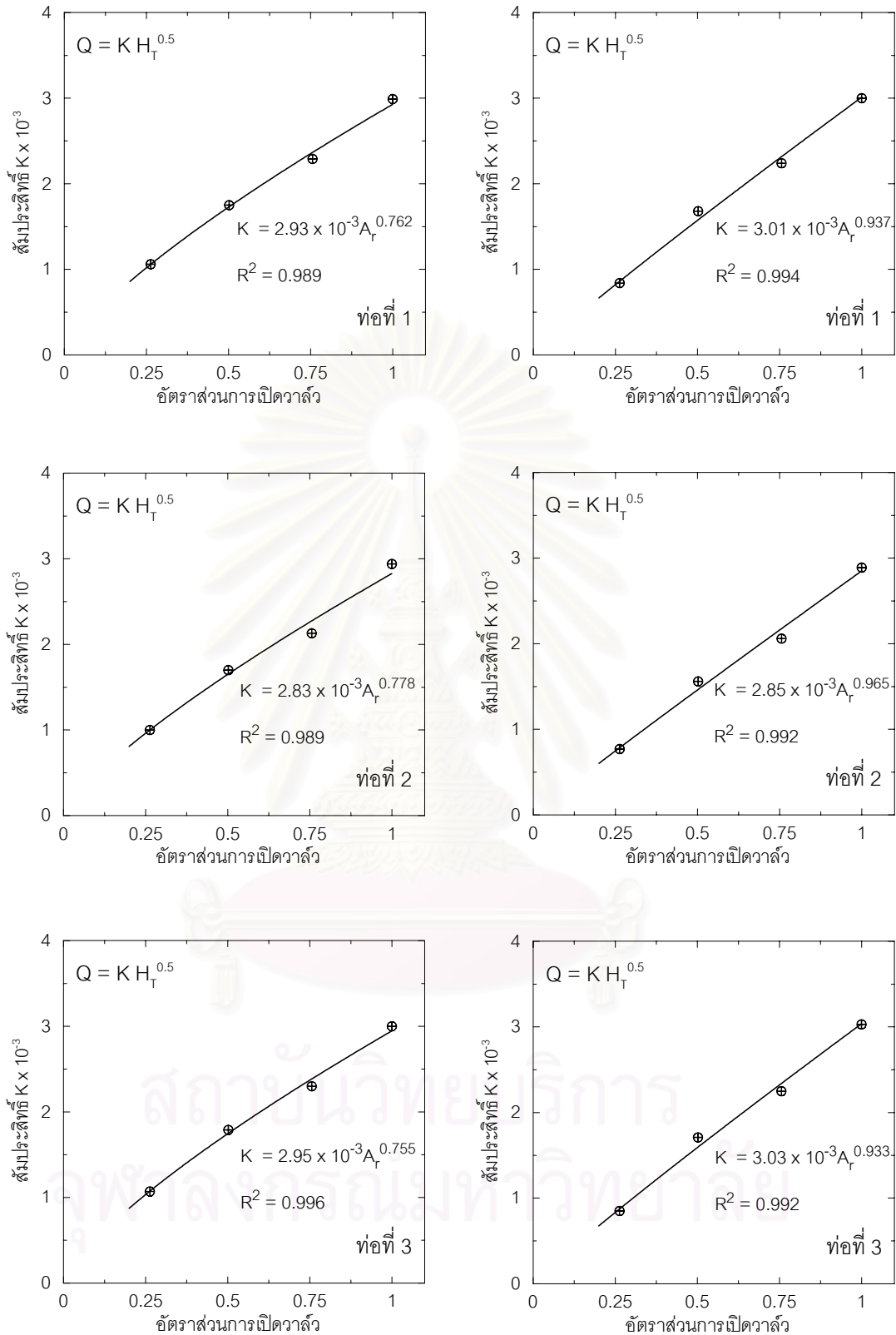
ตาราง 4-4 สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

กรณีการไหล		อัตราการเปิดวาล์ว				ความสัมพันธ์ในแบบจำลอง	R ²
จำนวนท่อ	หมายเลขท่อ	ระยะยก	% ยก	พื้นที่	% พื้นที่	$Q_m = K_m H_T^{0.5}$	
1 ท่อ	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.99 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.29 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.988
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.75 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.06 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.993
1 ท่อ	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.94 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.995
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.13 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.994
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.70 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.992
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.995
1 ท่อ	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.30 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.983
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.79 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.07 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.994
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.97 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.988
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.33 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.993
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.73 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.85 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.994
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.08 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.991
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.57 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.89 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.999
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.84 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.994
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.07 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.991
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.58 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.90 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.999
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.97 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.987
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.35 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.989
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.76 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.04 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.992

ตาราง 4-4(ต่อ) สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

กรณีการไหล		อัตราการเปิดวาล์ว				ความสัมพันธ์ในแบบจำลอง $Q_m = K_m H_T^{0.5}$	R^2
จำนวนท่อ	หมายเลขท่อ	ระยะยก	% ยก	พื้นที่	% พื้นที่		
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.32 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.81 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.995
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.09 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.01 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.996
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.34 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.82 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.993
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.10 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
3 ท่อ	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.24 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.68 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.996
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.84 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.999
3 ท่อ	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.89 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.991
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.06 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.56 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.77 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
3 ท่อ	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.03 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.998
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.25 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.997
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.71 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.995
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.85 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	0.995

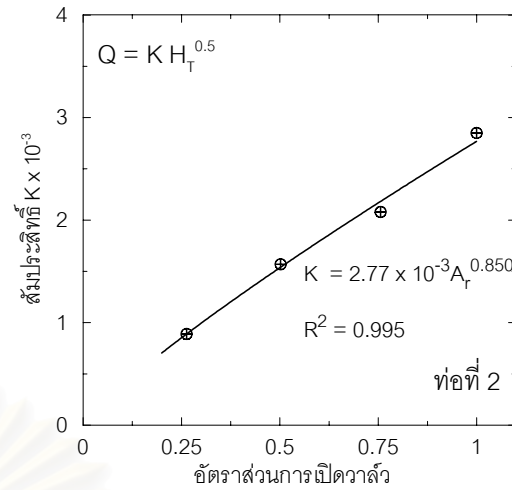
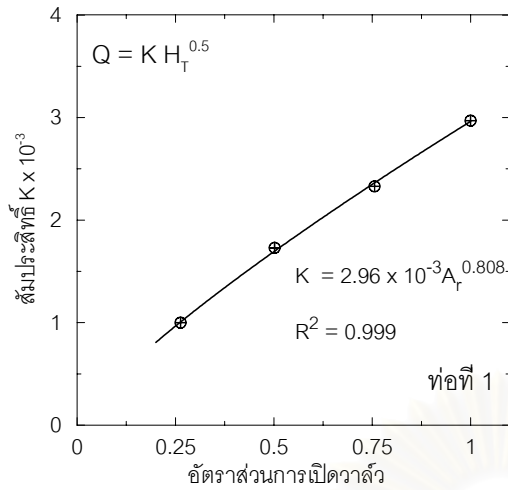
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



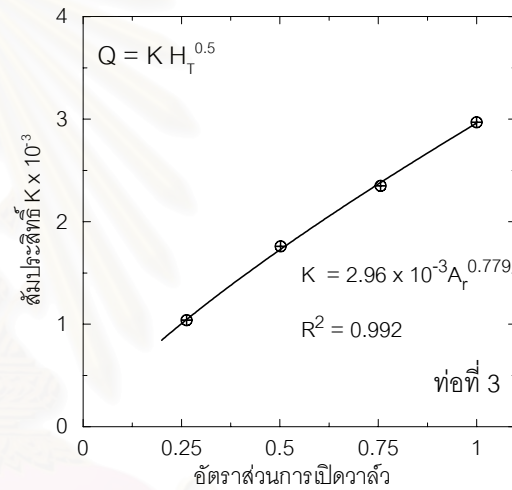
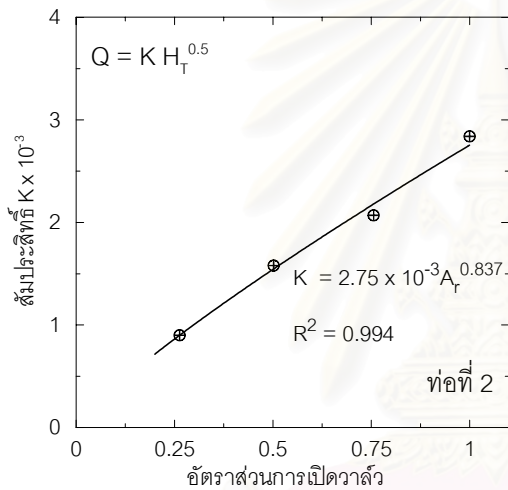
ก) กรณีการไหล 1 ท่อ

ข) กรณีการไหล 3 ท่อ

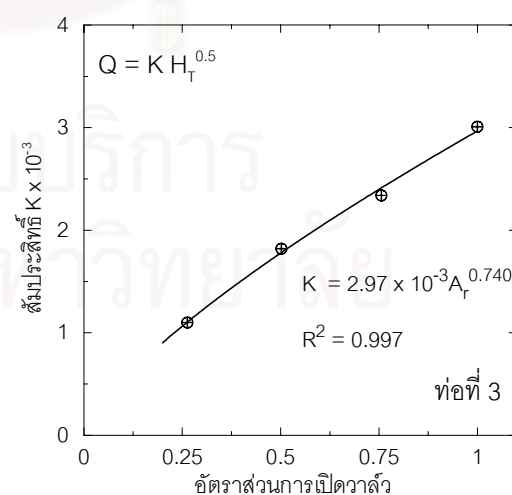
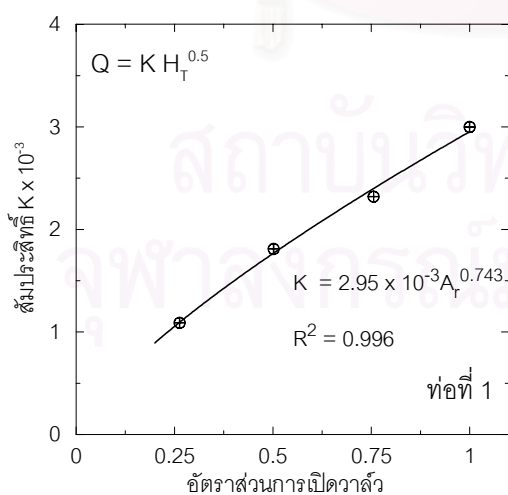
รูป 4-11 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ K กับอัตราการเปิดวาล์ว ในแบบจำลอง



ก) กรณีการไหลท่อที่ 1 และท่อที่ 2



ข) กรณีการไหลท่อที่ 2 และท่อที่ 3



ค) กรณีการไหลท่อที่ 1 และท่อที่ 3

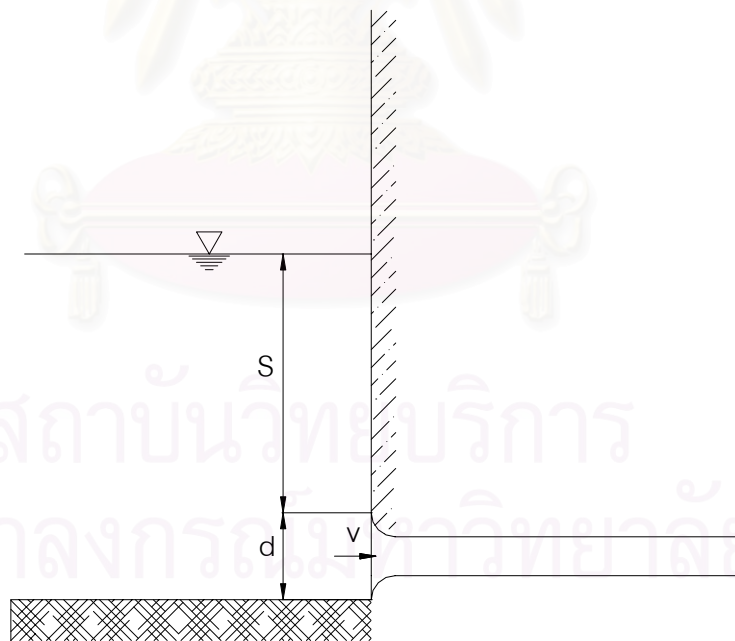
รูป 4-11(ต่อ) ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ K กับอัตราการเปิดวาล์ว ในแบบจำลอง

ตาราง 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความสูงพลังงานรวมและอัตราส่วน
เปิดวาล์ว

กรณีการไหล		ความสัมพันธ์
จำนวนท่อ	หมายเลขท่อ	$Q_m = a A^n H_T^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 1	$Q = 2.93 \times 10^{-3} A^{0.762} H_T^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 2	$Q = 2.83 \times 10^{-3} A^{0.778} H_T^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 3	$Q = 2.95 \times 10^{-3} A^{0.755} H_T^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 1	$Q = 2.96 \times 10^{-3} A^{0.808} H_T^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 2	$Q = 2.75 \times 10^{-3} A^{0.850} H_T^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 2	$Q = 2.75 \times 10^{-3} A^{0.837} H_T^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 3	$Q = 2.96 \times 10^{-3} A^{0.779} H_T^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 1	$Q = 2.95 \times 10^{-3} A^{0.734} H_T^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 3	$Q = 2.97 \times 10^{-3} A^{0.740} H_T^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 1	$Q = 3.01 \times 10^{-3} A^{0.937} H_T^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 2	$Q = 2.85 \times 10^{-3} A^{0.965} H_T^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 3	$Q = 3.03 \times 10^{-3} A^{0.933} H_T^{0.5}$

4.6 สภาพการไหลแบบหมุนวน

ส่วนนี้เป็นส่วนของการวิเคราะห์สภาพการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้น ในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำที่ผิวหน้าบริเวณด้านบนของอาคารทางเข้า ในการศึกษาได้แบ่งสภาพการไหลที่เกิดขึ้นออกเป็น 3 ลักษณะ (อ้างอิง Akalank 1978) คือ 1 การไหลแบบหมุนวนผิวหน้า (dimple) 2 การไหลหมุนวนแบบกรวยยาว (vortex strong with air core) และ 3 การไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีฟองอากาศไหลเข้าไปในท่อระบายน้ำ (air-entraining vortex) ซึ่งในการศึกษาได้พิจารณาเฉพาะความสูงของระดับน้ำที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการไหลแบบหมุนวนในแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำที่เกิดมีการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่าเลขฟรูดของการไหล $\frac{S}{d} = f(F)$ (อ้างอิง Akalank 1979 , Ogaard 1985 และ Ma Jimimg, 2000) เนื่องจากการไหลแบบหมุนวน เป็นการไหลที่ผิวอิสระเกิดขึ้นด้วยแรงดึงดูดของโลก(Gravity force) โดยที่ S คือความลึกจมน้ำ(Submergence) และ $F = \frac{v}{\sqrt{gd}}$ โดย v คือความเร็วการไหลผ่านทางเข้า (Intake), d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของทางเข้า รายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ดังรูป 4-12 โดยในการวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวน ได้ทำการพิจารณาในแต่ละกรณีของการใช้งานของอาคารระบายน้ำ



รูป 4-12 ตัวแปรในการพิจารณาการเกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน

ในส่วนของกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำที่มีการไหล 1 ท่อ ในกรณีการไหลในท่อที่ 1 และกรณีการไหลในท่อที่ 3 การเกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน แบบหมุนวนผิวหน้าและแบบ

กรวยยาว ดังรูป 4-13 โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกน้ำกับความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{S}{d} = 3.620F^{1.048} \quad 4-3$$

ในกรณีการไหลในท่อที่ 2 เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน แบบหมุนวนผิวน้ำ,แบบกรวยยาวและแบบกรวยยาวมีฟองอากาศ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจมน้ำ(Submergence)กับค่าเลขฟรูด ดังรูป 4-14 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{S}{d} = 4.430F^{0.889} \quad 4-4$$

ในส่วนของกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำที่มีการไหล 2 ท่อ สำหรับในกรณีการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 2 และกรณีการไหลในท่อที่ 2 และท่อที่ 3 ที่มีการไหล 2 ท่อ เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน แบบหมุนวนผิวน้ำ, แบบกรวยยาว แบบกรวยยาวมีฟองอากาศไหลเข้าท่อ การเกิดการไหลแบบหมุนวน แบบหมุนวนผิวน้ำ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจมน้ำ(Submergence)กับค่าเลขฟรูด ดังรูป 4-15 โดยมีความสัมพันธ์ของการไหลแบบหมุนวนผิวน้ำดังสมการ

$$\frac{S}{d} = 8.732F^{0.076} \quad 4-5$$

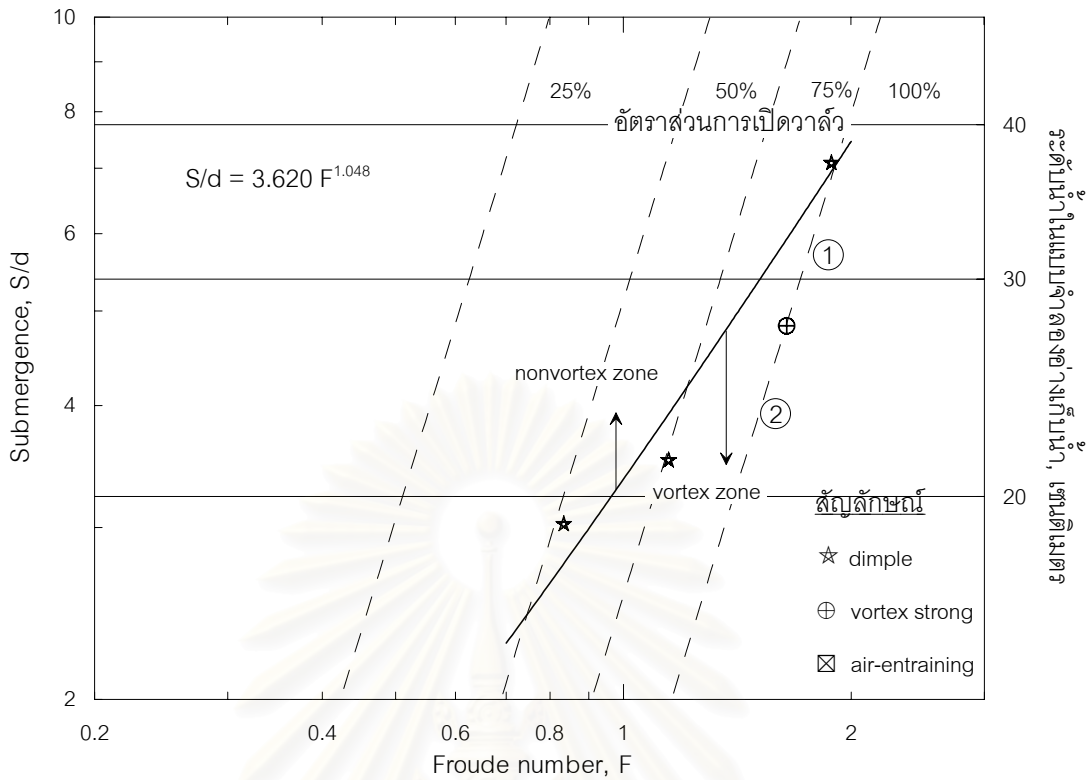
และการไหลหมุนวนแบบกรวยยาว ดังสมการ

$$\frac{S}{d} = 6.190F^{0.250} \quad 4-6$$

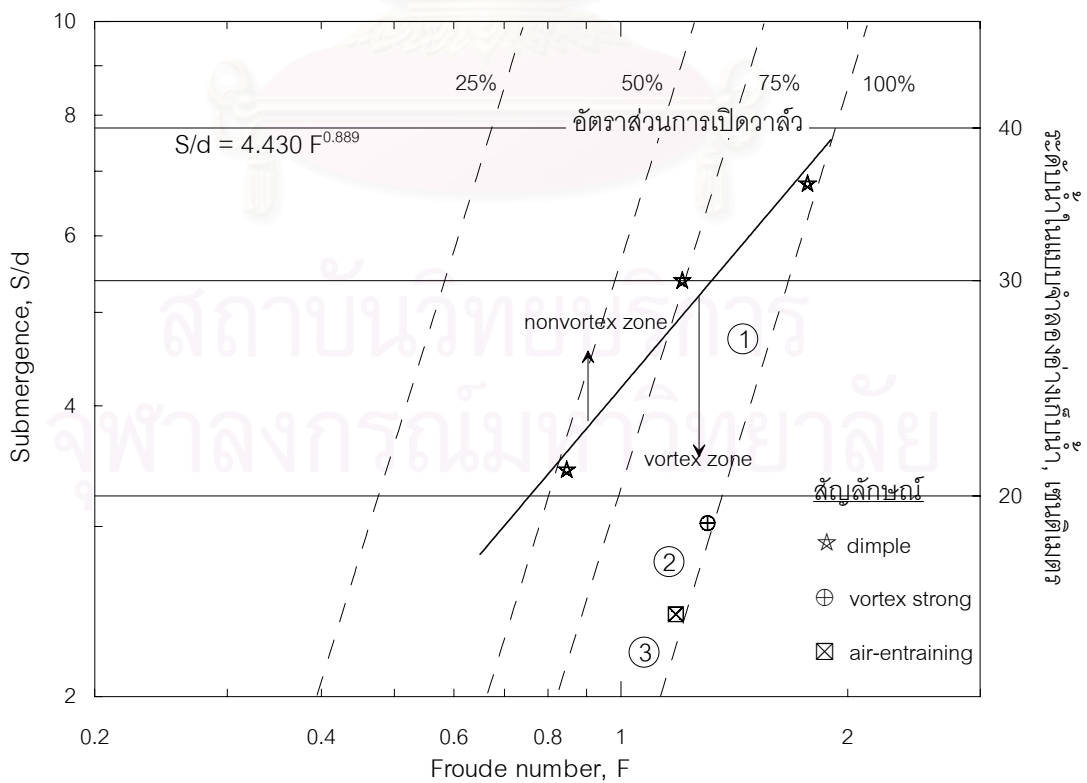
และการไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีฟองอากาศไหลเข้าท่อ

$$\frac{S}{d} = 3.655F^{0.238} \quad 4-7$$

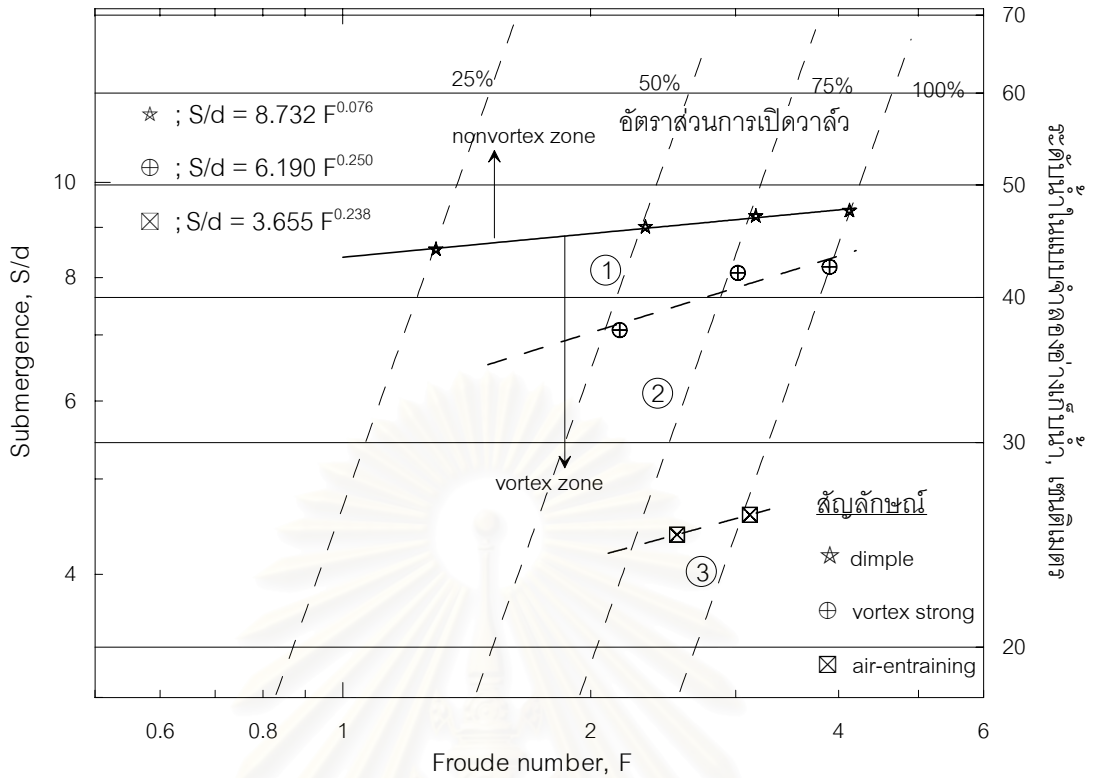
ในส่วนของกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำที่มีการไหล 2 ท่อ สำหรับในกรณีการไหลที่มีการใช้งานในการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน แบบหมุนวนผิวน้ำและแบบกรวยยาว ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจมน้ำ(Submergence)กับค่าเลขฟรูด ดังรูป 4-16 โดยมีความสัมพันธ์ของการไหลแบบหมุนวนผิวน้ำดังสมการ



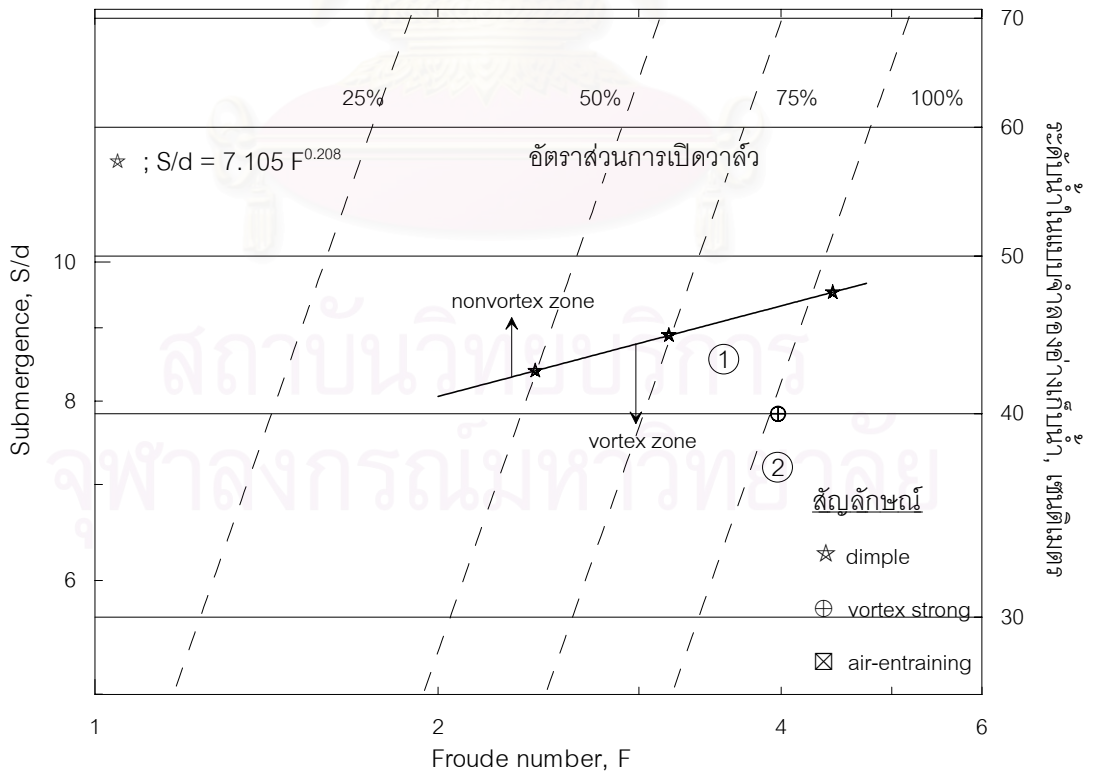
รูป 4-13 สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 กรณีการไหล 1 ท่อ



รูป 4-14 สภาพไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 2 กรณีการไหล 1 ท่อ



รูป 4-15 สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2 , ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



รูป 4-16 สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

$$\frac{S}{d} = 7.105F^{0.208} \quad 4-8$$

ในส่วนของกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำที่มีการไหล 3 ท่อ เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน 3 แบบ ดังรูป 4-17 โดยมีความสัมพันธ์ของการไหลแบบหมุนวนผิวน้ำดังสมการ

$$\frac{S}{d} = 5.751F^{0.076} \quad 4-9$$

และการไหลหมุนวนแบบกรวยยาว ดังสมการ

$$\frac{S}{d} = 3.477F^{0.250} \quad 4-10$$

และการไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีฟองอากาศไหลเข้าท่อ

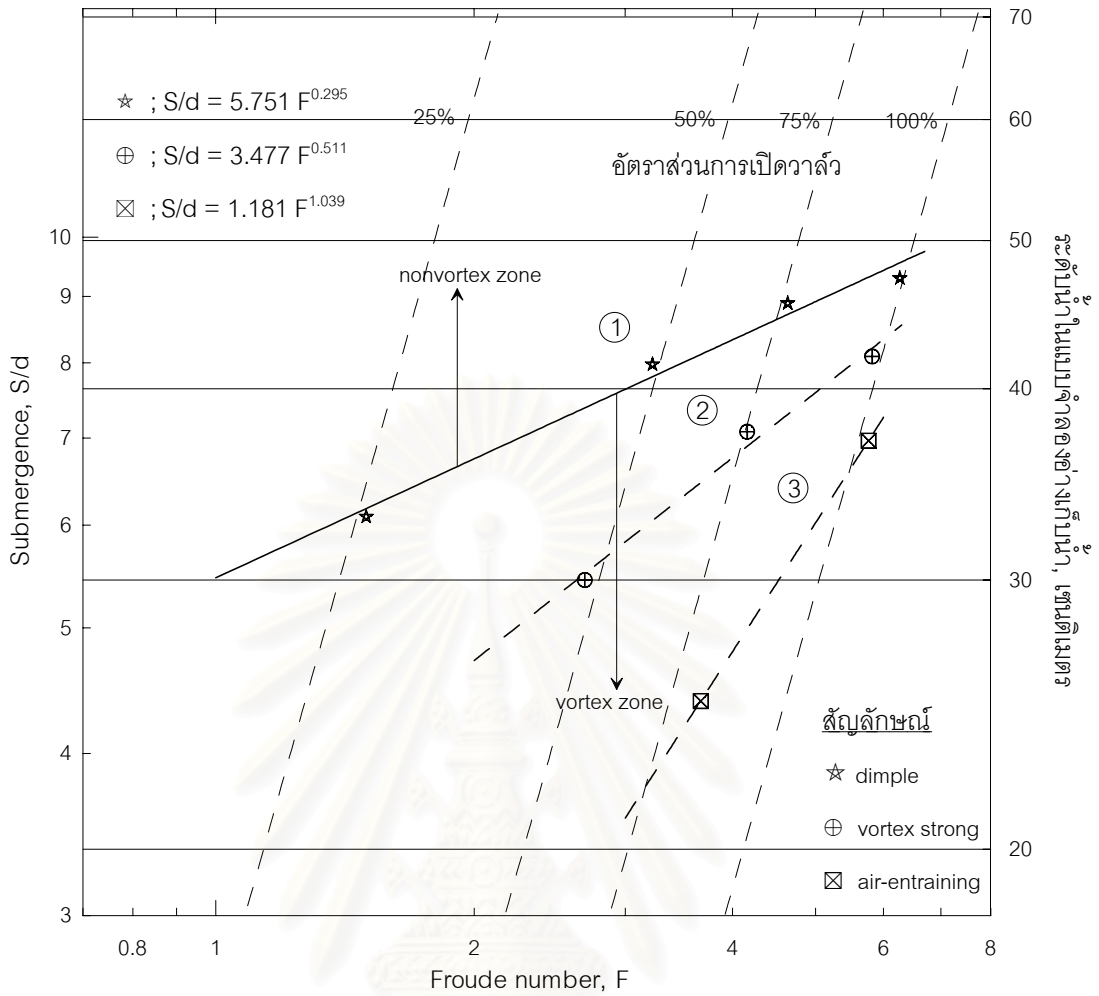
$$\frac{S}{d} = 1.181F^{0.238} \quad 4-11$$

การศึกษาในส่วนของสภาพการไหลแบบหมุนวน ในส่วนของกรณีที่มีการไหล 1 ท่อ และกรณีการไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และท่อที่ 3 มีความสัมพันธ์เพียงการไหลแบบหมุนวนผิวน้ำ ในส่วนการไหลแบบ 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และท่อที่ 2 กับกรณีในท่อที่ 2 และท่อที่ 3 และในส่วนของกรณีการไหล 3 ท่อ มีความสัมพันธ์ครบทั้ง 3 แบบ สามารถทราบถึงอัตราส่วน S/d ในแต่ละสภาพในการเกิดการไหลหมุนวนแบบต่าง ๆ ในสภาพที่มีระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำต่ำและมีการเปิดวาล์วที่มีพื้นที่เปิดมากๆ ทำให้เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวนได้ง่าย

4.7 การประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

ในสภาพการไหลผ่านอาคารระบายน้ำในแบบจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์สภาพการไหลที่เกิดขึ้นในอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ เพื่อประโยชน์ในใช้งานในการควบคุมการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ โดยใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึง ของการไหลในท่อ เทียบอัตราส่วนในการจำลองจากค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ที่มีอัตราส่วนของการจำลองทางกายภาพ ($L_r = 13.64$)

ทฤษฎีความคล้ายคลึงที่ใช้ของสภาพการไหลในแบบจำลองไปเป็นสภาพการไหลในต้นแบบของจริง(อ่างเก็บน้ำหนองค้อ) จากหัวข้อ 2.5.3 (อ้างอิง P.Novak 1981) การจำลองการไหลในที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยท่อต้นแบบ(prototype) มีลักษณะการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วน สมบูรณ์ (turbulent, rough pipe) และในแบบจำลองมีการไหลอยู่ในช่วงของท่อเรียบ (smooth



รูป 4-17 สภาพการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 3 ท่อ

pipe) โดยใช้มาตรฐานของค่าเลขเรย์โนลด์ในต้นแบบกับแบบจำลอง: $\frac{R_p}{R_m} = L_r^{1.5}$ ดังรูป 4-18

โดยมีอัตราส่วนในการจำลองเท่ากับ 50.355 ทำให้ทราบข้อมูลของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ดังนี้

	แบบจำลอง	อ่างเก็บน้ำหนองค้อ
ระดับน้ำ	6 – 68.5 ซม.	58.3 – 66.8 ม.รทก.
อัตราการไหล	0.2 – 2.5 ลิตร/วินาที	0.2 – 1.8 ลบ.ม./วินาที
ความเร็วการไหล	0.13 – 1.64 เมตร/วินาที	0.7 – 6.4 เมตร/วินาที
เลขเรย์โนลด์	$6.4 \times 10^3 - 74 \times 10^3$	$0.32 \times 10^6 - 3.7 \times 10^6$

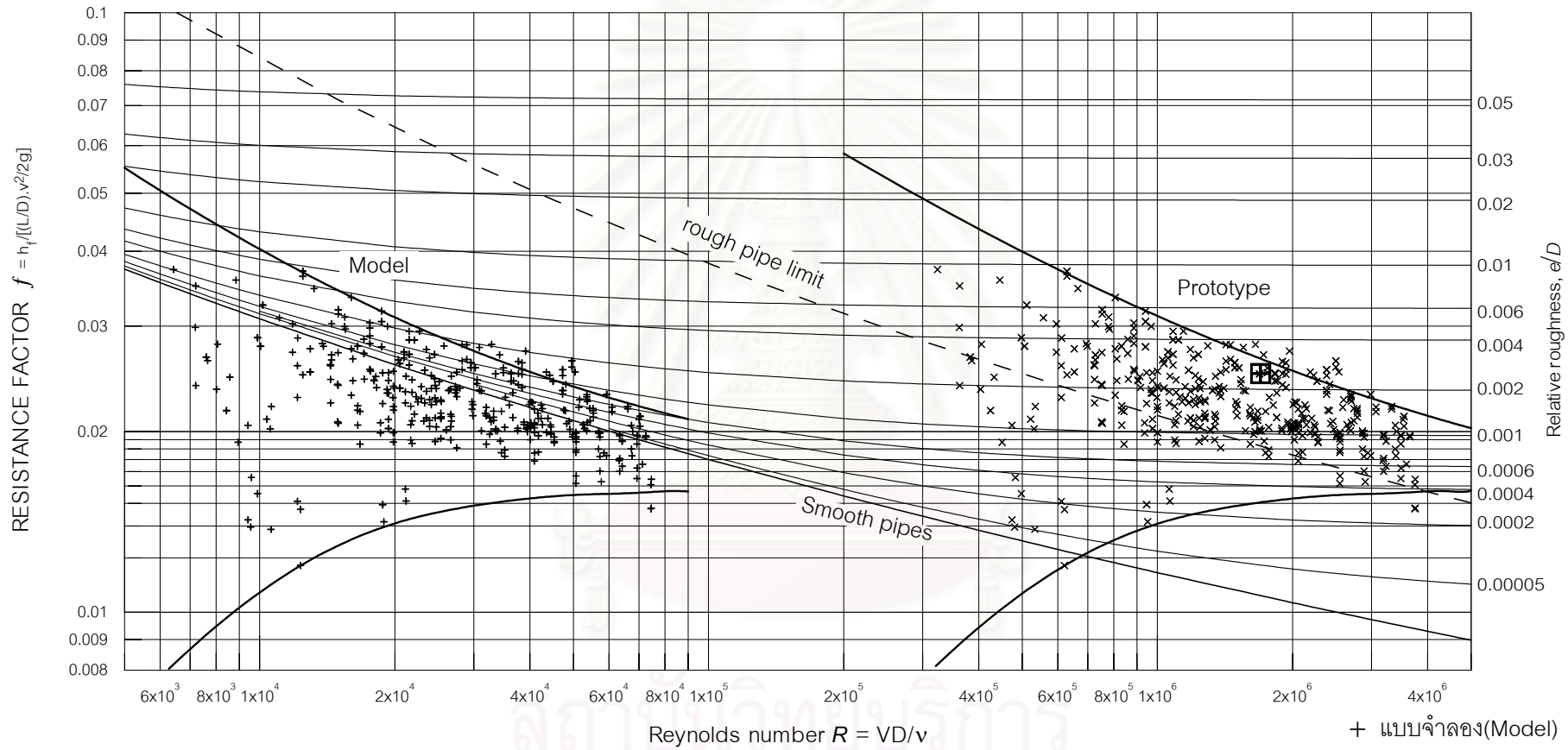
และมาตรฐานในการปรับค่าตัวแปร

ตัวแปร	สัญลักษณ์	มาตรฐาน
ความยาว	L_r	13.64
เวลา	T_r	3.69
อัตราการไหล	Q_r	686.66

การตรวจสอบข้อมูลของอ่างเก็บน้ำหนองค้อที่ได้ จากการใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึง ทำการเปรียบเทียบกับ ข้อมูลจริงในการไหลในท่อระบายน้ำของอาคารระบายน้ำ มีรายละเอียดดังนี้

อัตราการไหล	0.80 ลบ.ม./วินาที
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ	0.60 เมตร
ความยาวท่อ	78.91 เมตร
วัสดุผิวท่อ (e/D)	0.0025

ความสัมพันธ์อัตราการไหล จากความสัมพันธ์ $Q = KH_r^{0.5}$ ที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถหาค่า K ได้จากความสัมพันธ์ $K_r = \frac{Q_r}{H_r^{0.5}}$ หรือ $K_r = \frac{Q_r}{L_r^{0.5}}$ ดังตาราง 4-6 เป็นค่า K ของอาคารระบายน้ำ (outlet works) ของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ มีความสัมพันธ์กับพื้นที่เปิดวาล์ว มีรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับอัตราส่วนการเปิดวาล์ว (A_r) ดังรูป 4-19 โดยมีความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของสมการกำลัง $K = aA_r^n$ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับอัตราการไหล ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่มีฟังก์ชันของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำกับอัตราส่วนของการเปิดวาล์ว ดังสมการ $Q = aA_r^n (H - 57.05)^{0.5}$ โดยที่ H คือระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ และ 57.05 คือระดับของปลายท่อด้านท้ายน้ำ ดังตาราง 4-7 ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ในการวางแผนการส่งน้ำของอาคารระบายน้ำ



รูป 4-18 แผนภูมิ Moody ของแบบจำลอง(model)และต้นแบบจริง(prototype)

- + แบบจำลอง(Model)
- × ต้นแบบ(Prototype)
- ▣ ข้อมูลอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

ตาราง 4-6 สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

กรณีการไหล		อัตราการเปิดวาล์ว				ความสัมพัทธ์ในแบบจำลอง	ความสัมพัทธ์ใน prototype
จำนวนท่อ	หมายเลขท่อ	ระยะยก	% ยก	พื้นที่	% พื้นที่	$Q_m = K_m H_T^{0.5}$	$Q_p = K_p (H-57.05)^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.99 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.556 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.29 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.426 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.75 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.325 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.06 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.197 (H-57.05)^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.94 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.547 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.13 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.396 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.70 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.316 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.186 (H-57.05)^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.558 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.30 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.428 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.79 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.333 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.07 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.199 (H-57.05)^{0.5}$
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.97 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.552 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.33 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.433 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.73 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.322 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.186 (H-57.05)^{0.5}$
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.85 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.530 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.08 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.387 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.57 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.292 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.89 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.165 (H-57.05)^{0.5}$
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.84 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.528 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.07 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.385 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.58 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.294 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.90 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.167 (H-57.05)^{0.5}$
2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.97 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.552 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.35 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.437 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.76 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.327 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.04 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.193 (H-57.05)^{0.5}$

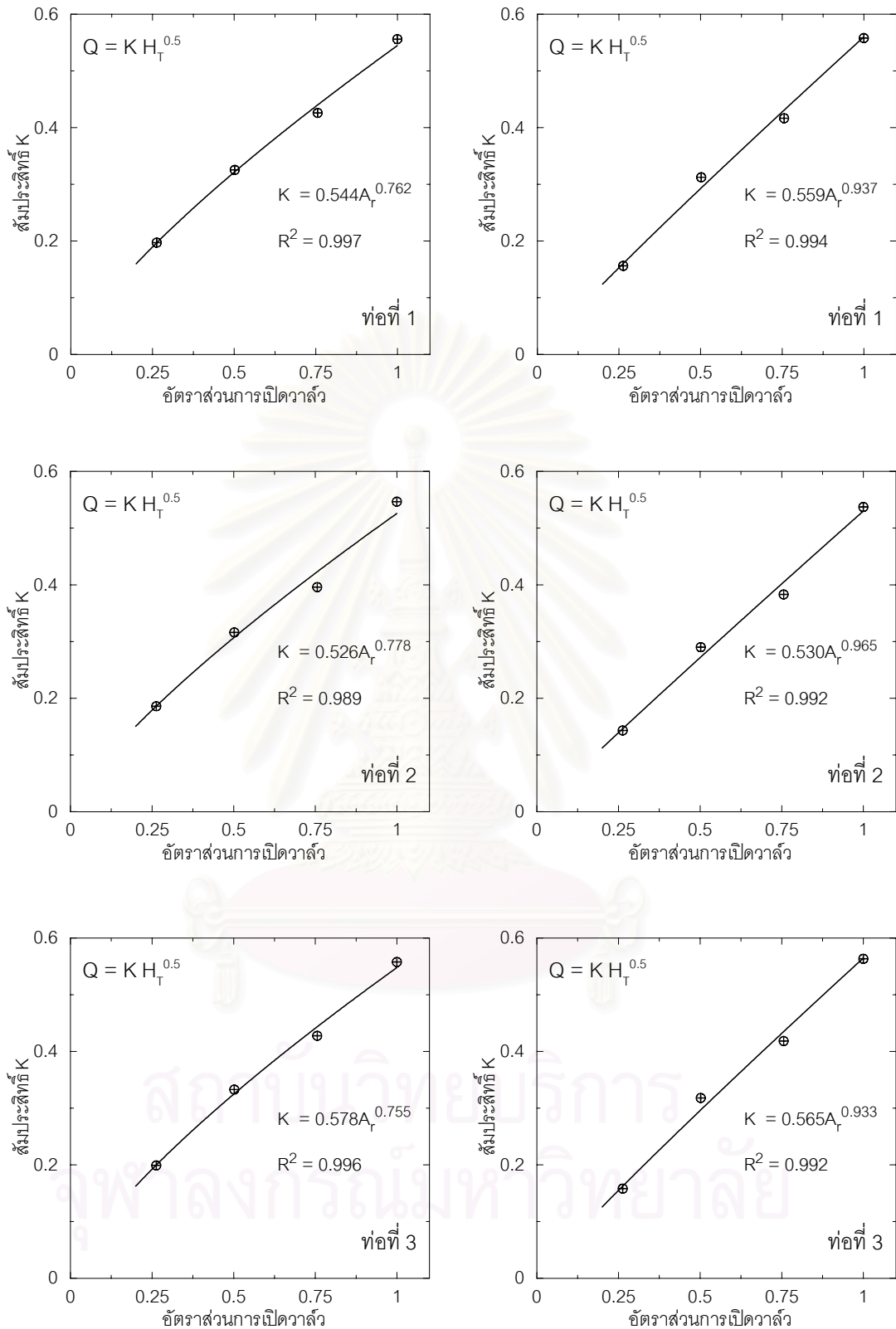
หมายเหตุ

H : ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ, เมตร จกท.

ตาราง 4-6(ต่อ) สภาพการไหลในแต่ละท่อในแต่ละกรณีของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

กรณีการไหล		อัตราการเปิดวาล์ว				ความสัมพัทธ์ในแบบจำลอง	ความสัมพัทธ์ใน prototype
จำนวนท่อ	หมายเลขท่อ	ระยะยก	% ยก	พื้นที่	% พื้นที่	$Q_m = K_m H_T^{0.5}$	$Q_p = K_p (H-57.05)^{0.5}$
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.558 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.32 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.431 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.81 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.337 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.09 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.203 (H-57.05)^{0.5}$
2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.01 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.560 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.34 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.435 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.82 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.338 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 1.10 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.205 (H-57.05)^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 1	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.00 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.558 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.24 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.416 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.68 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.312 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.84 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.156 (H-57.05)^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 2	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 2.89 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.537 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.06 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.383 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.56 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.290 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.77 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.143 (H-57.05)^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 3	3.00	100	9.898	100.0	$Q = 3.03 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.563 (H-57.05)^{0.5}$
		2.00	66.7	7.482	75.6	$Q = 2.25 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.418 (H-57.05)^{0.5}$
		1.35	45.0	4.957	50.2	$Q = 1.71 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.318 (H-57.05)^{0.5}$
		0.80	26.7	2.608	26.3	$Q = 0.85 \times 10^{-3} H_T^{0.5}$	$Q = 0.158 (H-57.05)^{0.5}$

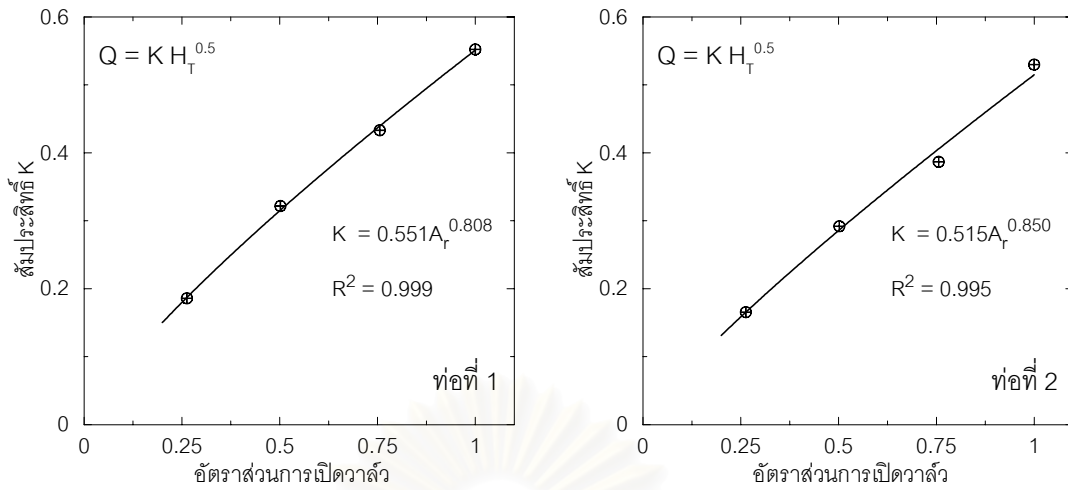
หมายเหตุ H : ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ, เมตร รทก.



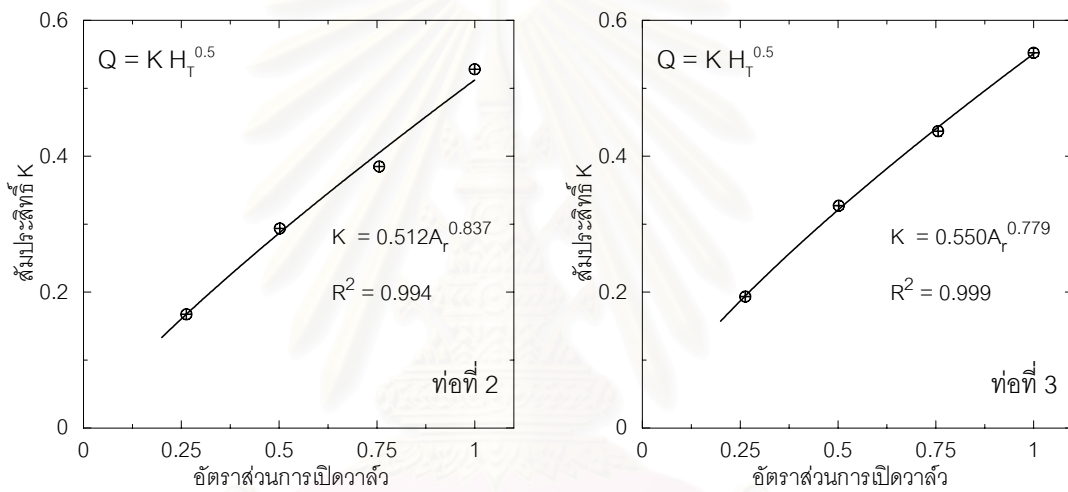
ก) กรณีการไหล 1 ท่อ

ข) กรณีการไหล 3 ท่อ

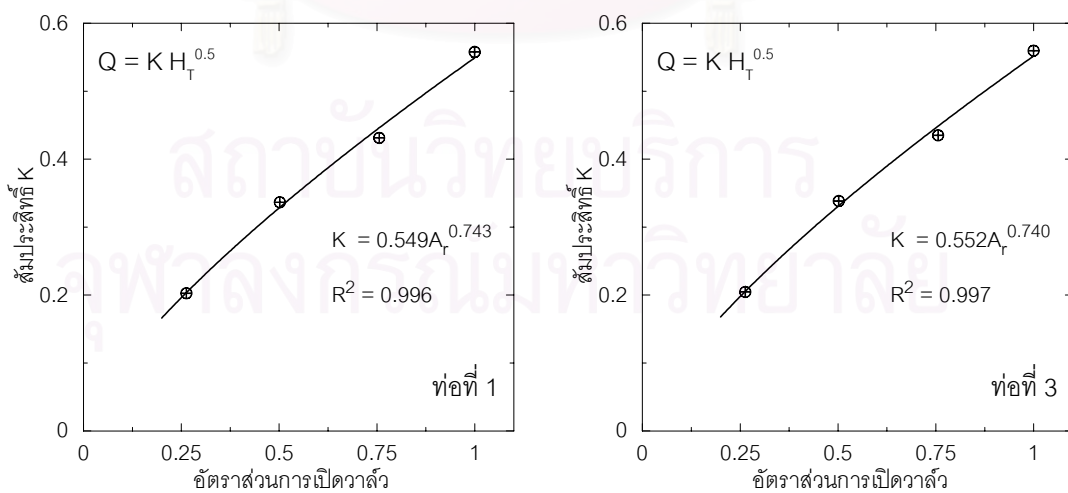
รูป 4-19 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ K กับอัตราการเปิดวาล์ว ของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ



ก) กรณีการไหลท่อที่ 1 และท่อที่ 2



ข) กรณีการไหลท่อที่ 2 และท่อที่ 3



ค) กรณีการไหลท่อที่ 1 และท่อที่ 3

รูป 4-19(ต่อ) ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ K กับอัตราการเปิดวาล์ว ของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

ตาราง 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อและ
อัตราส่วนเปิดวาล์วในแต่ละท่อ

กรณีการไหล		ความสัมพันธ์
จำนวนท่อ	หมายเลขท่อ	$Q_p = a A^n (H - 57.05)^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 1	$Q = 0.544 A^{0.762} (H - 57.05)^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 2	$Q = 0.526 A^{0.778} (H - 57.05)^{0.5}$
1 ท่อ	ท่อที่ 3	$Q = 0.578 A^{0.755} (H - 57.05)^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 1	$Q = 0.551 A^{0.808} (H - 57.05)^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 2)	ท่อที่ 2	$Q = 0.515 A^{0.850} (H - 57.05)^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 2	$Q = 0.512 A^{0.837} (H - 57.05)^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 2 และ 3)	ท่อที่ 3	$Q = 0.550 A^{0.779} (H - 57.05)^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 1	$Q = 0.549 A^{0.734} (H - 57.05)^{0.5}$
2 ท่อ(ท่อที่ 1 และ 3)	ท่อที่ 3	$Q = 0.552 A^{0.740} (H - 57.05)^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 1	$Q = 0.559 A^{0.937} (H - 57.05)^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 2	$Q = 0.530 A^{0.965} (H - 57.05)^{0.5}$
3 ท่อ	ท่อที่ 3	$Q = 0.565 A^{0.933} (H - 57.05)^{0.5}$

หมายเหตุ

H : ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ, เมตร รทก.

สภาพการไหลแบบหมุนวนในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ มีรูปแบบของการเกิดการไหลแบบหมุนวนที่สัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ ซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลอง โดยเทียบอัตราส่วนความลึกของปากบ้นของท่อระบายน้ำกับระดับผิวน้ำที่เป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อดังตาราง 4-8 แสดงระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำหนองค้อกับการเกิดการไหลหมุนวนแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 แบบ คือแบบหมุนวนผิวน้ำ, แบบหมุนวนกรวยยาว และแบบหมุนวนมีอากาศไหลเข้าท่ออยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับเก็บกักต่ำสุด ยกตัวอย่างเช่นกรณีการไหล 1 ท่อ ที่มีการไหลในท่อที่ 2 ในการเปิดวาล์วที่มีอัตราส่วนการเปิดวาล์ว 100% ต้องระวังการเกิดการไหลหมุนวนที่มีอากาศไหลเข้าสู่ท่อระบายน้ำ ที่ระดับน้ำในอ่างอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าระดับ 59.6 ม. รทก. เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอาคารระบายน้ำและระบบท่อส่งน้ำ

อาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ จากการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นกับอ่างเก็บน้ำ ในการทำการศึกษาของจริงนั้นมีความเป็นไปได้ยากที่จะทำการศึกษา ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองในการศึกษา ซึ่งจากการวิเคราะห์ในแบบจำลองแล้วโยงผลนำไปประยุกต์ใช้กับต้นแบบจริง ทำให้ทราบถึงช่วงของการไหลในแบบจำลองกับต้นแบบจริง และมาตรฐานของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณสภาพการไหล รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำในอ่างและอัตราส่วนของการเปิดวาล์ว เพื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการปล่อยน้ำออกจากอ่าง และความสัมพันธ์ $Q = aA_r^n (H - 57.05)^{0.5}$ ใช้ได้กับกรณีอ่างเก็บน้ำหนองค้อ และในส่วนของสภาพการไหลแบบหมุนวนในอ่างเก็บน้ำ เพื่อให้ทราบถึงระดับน้ำที่เกิดการไหลแบบหมุนวนแบบต่าง ๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอาคารระบายน้ำและระบบท่อส่งน้ำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับกรมชลประทานในการใช้งานอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4-8 สภาพการไหลแบบหมุนวนในอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

กรณีการไหล		ร้อยละพื้นที่ เปิดวางสวิ	หมุนวนผิวน้ำ		หมุนวนกรวยยาว		หมุนวนอากาศไหลเข้าท่อ	
			S/d	ระดับน้ำ, ม. รทก.	S/d	ระดับน้ำ, ม. รทก.	S/d	ระดับน้ำ, ม. รทก.
1 ท่อ	ท่อที่ 1	100	7.4	62.5	5.1	61.2	-	-
		75.6	3.8	60.4	-	-	-	-
		50.2	3.2	60.0	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-
1 ท่อ	ท่อที่ 2	100	7.1	62.3	3.2	60.0	2.5	59.6
		75.6	5.7	61.5	-	-	-	-
		50.2	3.7	60.3	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-
1 ท่อ	ท่อที่ 3	100	7.4	62.5	5.1	61.2	-	-
		75.6	3.8	60.4	-	-	-	-
		50.2	3.2	60.0	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-
2 ท่อ	ท่อที่ 1 และ 2	100	9.7	63.9	8.5	63.2	4.8	61.0
		75.6	9.6	63.8	8.4	63.2	4.6	60.8
		50.2	9.3	63.7	7.4	62.5	-	-
		26.3	8.9	63.4	-	-	-	-
2 ท่อ	ท่อที่ 2 และ 3	100	9.7	63.9	8.5	63.2	4.9	61.0
		75.6	9.5	63.8	8.5	63.2	4.5	60.8
		50.2	9.4	63.8	7.5	62.6	-	-
		26.3	8.9	63.4	-	-	-	-
2 ท่อ	ท่อที่ 1 และ 3	100	9.7	63.9	8.0	62.9	5.7	61.5
		75.6	9.0	63.5	-	-	-	-
		50.2	8.5	63.2	-	-	-	-
		26.3	-	-	-	-	-	-
3 ท่อ	ท่อที่ 1, 2 และ 3	100	9.6	63.9	8.4	63.2	7.3	62.5
		75.6	9.2	63.6	7.4	62.5	4.6	60.8
		50.2	8.3	63.1	5.7	61.5	-	-
		26.3	6.4	61.9	-	-	-	-

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากกระบวนการศึกษา ประสพการณ์จากการทำการทดลองในแบบจำลองชลศาสตร์ รวมถึงการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปเป็นประเด็นของการศึกษา รวมถึงข้อเสนอแนะ ที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาในอนาคต ดังที่ได้กล่าวต่อไปนี้

5.1 แบบจำลองชลศาสตร์

การศึกษาชลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ (outlet works) ซึ่งนำเอาอ่างเก็บน้ำหนองค้อเป็นกรณีในการศึกษา โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ที่มีมาตราส่วนความยาวแบบจำลอง 1 หน่วย ต่อ ความยาวจริง 13.64 หน่วย ได้ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลอง ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วย

- 1) แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ เป็นอ่างเหล็กที่มีขนาดกว้าง 1.20 เมตร ยาว 4.00 เมตร และสูง 0.70 เมตร ซึ่งเป็นการจำลองของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ภายในติดตั้งแบบจำลองอาคารรับน้ำ และแนวหินสลายพลังงานน้ำที่เข้าสู่แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
- 2) แบบจำลองอาคารรับน้ำ เป็นการจำลองอาคารรับน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ โดยใช้แผ่นพลาสติกใสและเรซินเป็นวัสดุในการสร้างแบบจำลองดังกล่าวและเป็นอาคารรับน้ำที่มีทางระบายน้ำออก 3 ท่อ
- 3) ระบบท่อระบายน้ำ ที่รับน้ำที่ระบายออกมาจากอาคารรับน้ำ เป็นท่อใส ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร และมีความยาว 5.70 เมตร ในการต่อท่อใช้การต่อแบบ compression coupling และมีจุดวัดความดัน 4 จุด
- 4) อุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล เป็นวาล์วแบบประตูน้ำ (Gate valve) ซึ่งมีขายทั่วไปในท้องตลาด ขนาด 1.5 นิ้ว นำมาประกอบเข้ากับชุดขับเคลื่อนเพื่อหมุนวาล์ว และชุดแสดงการเปิดวาล์ว โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วดังกล่าว เพื่อความสะดวกในการทำการทดลอง
- 5) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ซึ่งประกอบด้วยฝายสี่เหลี่ยม วัดอัตราการไหลในแต่ละท่อ และฝายรูปตัววี วัดอัตราการไหลรวมจากท่อระบายน้ำทั้ง 3 ท่อ

5.2 การดำเนินการทดลอง

การศึกษาค้นคว้าได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำ โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองให้อ่างเก็บน้ำมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตั้งแต่ 6 – 68.5 เซนติเมตร และการใช้งานของอาคารระบายน้ำที่มีกรณีการใช้งานที่มีการไหล 1 ท่อ, 2 ท่อ และ 3 ท่อ ในการควบคุมการไหลโดยกำหนดอัตราส่วนการเปิดวาล์วที่ 100%, 75.6%, 50.2% และ 26.3% รวมศึกษาทั้งสิ้น 252 กรณี ในกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ และ 28 กรณี สำหรับการไหลแบบหมุนวน

ในการศึกษาค้นคว้านี้ สำหรับระยะเวลาในการสร้างแบบจำลอง และการทำการทดลองใช้เวลาดำเนินการทั้งสิ้น 8 เดือน ซึ่งในการศึกษาโดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ เป็นวิธีการที่ต้องใช้เงินลงทุนสูงมาก เนื่องจากต้องใช้สร้างและปรับปรุงแบบจำลอง รวมทั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในขณะทำการทดลอง ที่สามารถทำให้ผู้ที่ทำการทดลองจัดการกับแบบจำลองในขณะที่ทำการทดลองได้ทุกอุปกรณ์ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการสร้างแบบจำลองบางส่วน ได้รับการสนับสนุนประมาณ 30,000 บาท จากงานบริการวิชาการให้แก่บริษัท ชันยู คอนซัลแตนท์ส (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท จัดการและพัฒนาทรัพยากรน้ำภาคตะวันออก จำกัด (มหาชน) และการอุดหนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย เป็นเงิน 12,000 บาท ส่วนที่เหลือผู้ศึกษาเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายเอง โดยประมาณค่าใช้จ่าย ดังรายการแสดงในตาราง 5-1 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการศึกษาค้นคว้านี้ประมาณ 135,000 บาท

ตาราง 5-1 การประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	เป็นเงิน(บาท)
1. ค่าหนังสือและเอกสาร	5,000
2. ค่าใช้จ่ายในการสร้างและปรับปรุงแบบจำลอง	70,000
3. ค่าอุปกรณ์เครื่องเขียนและกระดาษ	5,000
4. ค่าใช้จ่ายในการทำงานเดินเครื่องของแบบจำลอง	40,000
5. ค่าจัดทำวิทยานิพนธ์	10,000
6. เบ็ดเตล็ด	5,000
รวมทั้งสิ้น	135,000

5.3 ชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งการสูญเสียมีค่าที่เท่ากันที่อัตราการไหลที่มีค่าเท่ากับของแต่ละท่อ มีความสัมพันธ์ของการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ดังสมการ $h_f = 54.911 \times 10^{-3} Q^2$ การไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ในขอบเขตของท่อเรียบ ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) อยู่ในช่วง 6,500 ถึง 75,000 และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction factor), f เฉลี่ยเท่ากับ 0.0198

การสูญเสียเนื่องจากทางเข้า เป็นการสูญเสียรองในระบบท่อ โดยที่ทางเข้าของท่อที่ 1 และท่อที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเท่ากัน มีค่าเท่ากับ 0.19 และมีค่าน้อยกว่าท่อที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.358 และเฉลี่ยทั้ง 3 ทางเข้าเท่ากับ 0.238 ในช่วงที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ลดลงมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของค่าเลขเรย์โนลด์ และในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงน้อยจนเกือบคงที่ การเปรียบเทียบการสูญเสียในแต่ละกรณีกับกรณีการไหล 1 ท่อ มีรายละเอียดดังนี้

<u>ท่อที่ 1 และท่อที่ 3</u>	<u>จำนวนเท่า</u>
กรณีการไหล 1 ท่อ	1.0 เท่า
กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 2)	1.2 เท่า
กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และ 3)	1.4 เท่า
กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)	1.9 เท่า
กรณีการไหล 3 ท่อ	2.3 เท่า

การสูญเสียเนื่องจากวาล์ว ในการวิเคราะห์การสูญเสียเนื่องจากวาล์ว โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับผลรวมความสูงความเร็วที่วาล์วและความสูงของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากวาล์ว (H_g) ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากวาล์วในแต่ละอัตราส่วนของการเปิดวาล์ว โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของการสูญเสียดังกล่าวได้ดังนี้

$$\left(\frac{A_p}{A_g}\right)^2 K_g = 3.03 \frac{1}{A_r} - 2.612 \quad 4-2$$

โดยที่ A_r คือ อัตราส่วนการเปิดวาล์ว

ความสัมพันธ์ของอัตราการไหล พิจารณาจากความสัมพันธ์ $Q = KH_r^{0.5}$ โดยที่ค่า K มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการเปิดวาล์ว (A_r) ในรูปของสมการกำลัง $K = aA_r^n$ และอัตราการไหล (Q) มีความสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันกับความสูงของพลังงานรวมและอัตราส่วนการเปิดวาล์ว (A_r)

ในรูปของสมการ $Q = aA_r^n H_T^{0.5}$ โดยมีรายละเอียดในแต่ละกรณีการใช้งานของอาคารระบายน้ำ ดังนี้

กรณี	ความสัมพันธ์
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 1	$Q = 2.93 \times 10^{-3} A_r^{0.762} H_T^{0.5}$
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 2	$Q = 2.83 \times 10^{-3} A_r^{0.778} H_T^{0.5}$
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 3	$Q = 2.95 \times 10^{-3} A_r^{0.755} H_T^{0.5}$
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และ 2	$Q = (2.96 \times 10^{-3} A_r^{0.808} + 2.75 \times 10^{-3} A_r^{0.850}) H_T^{0.5}$
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 2 และ 3	$Q = (2.75 \times 10^{-3} A_r^{0.837} + 2.96 \times 10^{-3} A_r^{0.779}) H_T^{0.5}$
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และ 3	$Q = (2.95 \times 10^{-3} A_r^{0.734} + 2.97 \times 10^{-3} A_r^{0.740}) H_T^{0.5}$
การไหล 3 ท่อ	$Q = (3.01 \times 10^{-3} A_r^{0.937} + 2.85 \times 10^{-3} A_r^{0.965} + 3.03 \times 10^{-3} A_r^{0.933}) H_T^{0.5}$

สภาพการไหลแบบหมุนวน ในการไหลแบบหมุนวนซึ่งพิจารณาการเกิดสภาพต่าง ๆ จากการสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของผิวน้ำที่มีลักษณะที่หมุนวน มี 3 แบบ คือ 1 การไหลแบบหมุนวนผิวน้ำ (dimple) 2 การไหลหมุนวนแบบกรวยยาว (vortex strong with air core) และ 3 การไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีฟองอากาศไหลเข้าไปในท่อระบายน้ำ (air-entraining vortex) ได้ความสัมพันธ์ของ $\frac{S}{d}$ ในการเกิดสภาพการไหลแบบหมุนวนทั้ง 3 แบบที่เกิดขึ้น และในแต่ละสภาพการเกิดมีความสัมพันธ์ในรูปของสมการกำลัง ดังสมการ $\frac{S}{d} = aF^n$ โดยสภาพที่มีระดับน้ำต่ำในการเปิดวาล์วที่มีอัตราส่วนการเปิดวาล์วมากทำให้เกิดสภาพการไหลแบบหมุนวน

5.4 การประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำหนองค้อ

ในการนำผลจากแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับอาคารระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำ โดยมีอัตราส่วนความยาวในการจำลอง $L_r = 13.64$ ซึ่งการนำผลการทดลองในแบบจำลองโยงไปหาต้นแบบของจริง ใช้ความสัมพันธ์ของการไหลในท่อในการจำลองการไหลที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน จากความสัมพันธ์ $\frac{R_p}{R_m} = L_r^{3/2}$ และได้อัตราส่วนในการปรับค่าตัวแปร ดังนี้

ตัวแปร	สัญลักษณ์	มาตรฐาน
ความยาว	$L_r = L_p / L_m$	13.64
เวลา	$T_r = T_p / T_m$	3.69
อัตราการไหล	$Q_r = Q_p / Q_m$	686.66

และความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่สามารถนำไปใช้กับการปล่อยน้ำออกจากอ่างของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ดังความสัมพันธ์ ในแต่ละกรณี ดังนี้

<u>กรณี</u>	<u>ความสัมพันธ์</u>
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 1	$Q = 0.544A_r^{0.762} (H - 57.05)^{0.5}$
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 2	$Q = 0.526A_r^{0.778} (H - 57.05)^{0.5}$
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 3	$Q = 0.578A_r^{0.755} (H - 57.05)^{0.5}$
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และ 2	$Q = (0.551A_r^{0.808} + 0.515A_r^{0.850})(H - 57.05)^{0.5}$
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 2 และ 3	$Q = (0.512A_r^{0.837} + 0.550A_r^{0.779})(H - 57.05)^{0.5}$
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และ 3	$Q = (0.549A_r^{0.734} + 0.552A_r^{0.740})(H - 57.05)^{0.5}$
การไหล 3 ท่อ	$Q = (0.559A_r^{0.937} + 0.530A_r^{0.965} + 0.565A_r^{0.933})(H - 57.05)^{0.5}$

ในส่วนของการไหลแบบหมุนวน พิจารณาในการไหลหมุนวนแบบกรวยยาวมีฟองอากาศไหลเข้าท่อ ซึ่งเป็นสภาพการไหลที่อาจเกิดความเสียหายกับตัวอาคารระบายน้ำและระบบท่อส่งน้ำ โดยระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เกิดการไหลแบบหมุนวนในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

<u>กรณี</u>	<u>อากาศไหลเข้าท่อที่ระดับน้ำ</u>	
การไหล 1 ท่อ ในท่อที่ 2	59.6	ม.รทก.
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และ 2	61.0 – 60.8	ม.รทก.
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 2 และ 3	61.0 – 60.8	ม.รทก.
การไหล 2 ท่อ ในท่อที่ 1 และ 3	61.5	ม.รทก.
การไหล 3 ท่อ	62.5 – 60.8	ม.รทก.

ค่าระดับน้ำดังกล่าวเป็นค่าระดับน้ำที่ได้จากการสังเกตพฤติกรรม ในแบบจำลองแล้วทำการโยงเข้ากับอ่างเก็บน้ำหนองค้อ โดยการเทียบอัตราส่วน $\frac{S}{d}$ จึงทำให้ทราบระดับน้ำที่เกิดการไหลแบบหมุนวนแบบต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการรักษาระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5 ข้อเสนอแนะ

- 1) ขั้นตอนในส่วนของการศึกษาการสร้างแบบจำลอง และการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแบบจำลอง ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่นานพอสมควรในการเรียนรู้ ดังนั้นควรเผื่อระยะเวลาสำหรับศึกษาและทดลองการทำงานของเครื่องมือด้วย
- 2) การใช้แบบจำลองชลศาสตร์ในการศึกษา พฤติกรรมชลศาสตร์ที่เกิดขึ้น มีค่าใช้จ่ายในการสร้างและปรับปรุงแบบจำลองที่ค่อนข้างสูง เพื่อลดข้อจำกัดในการศึกษาวิจัย จึงควรรหาแหล่งเงินทุนที่เพียงพอ
- 3) การสร้างแบบจำลองชลศาสตร์จำเป็นต้องใช้ความรู้ ความชำนาญจากผู้เชี่ยวชาญหลายด้าน ดังนั้นหากผู้วิจัยมีความรู้เป็นพื้นอยู่บ้างจะทำให้การวิจัยดำเนินการไปได้รวดเร็วขึ้น
- 4) อุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล เป็นอุปกรณ์ที่นำเอาวาล์วแบบประตูน้ำ (Gate valve) ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป มาทำการดัดแปลงให้มีการหมุนโดยการพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล แล้วมีการแสดงการเปิดของวาล์วโดยอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่มีระยะเวลาในการสร้างนานพอสมควร เพราะต้องใช้ทั้งความรู้ทางด้านเครื่องมือกลและไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาเพื่อการควบคุมการไหลในท่อโดยไม่ต้องใช้ คนในการทำการเปิด-ปิดวาล์ว หรือทำการเปิด-ปิดวาล์วในระบบท่อที่มีวาล์วหลาย ๆ ตัวพร้อมกัน
- 5) เรซินเป็นวัสดุที่มีความใสคล้ายแก้ว และสามารถหล่อเป็นรูปต่าง ๆ ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในการหล่อเป็นแบบของแบบจำลองต่าง ๆ ที่มีความโค้งมน ซึ่งในช่วงการทำการหล่อหลังจากถอดแบบออกแล้วเรซินมีความเหนียวคล้ายยางสามารถตัดแต่งรูปทรงได้
- 6) ในการวัดความดันในท่อ จากการทดลองใช้เกจวัดความดันแบบท่อปลายเปิด ซึ่งมีความละเอียด 1/10 เซนติเมตร ในกรณีที่ระดับน้ำในอ่างต่ำมาก ๆ ในการอ่านค่าความดัน ซึ่งอ่านความแตกต่างได้ยากมาก ดังนั้นถ้ามีเซนเซอร์ในการวัดความดันเข้ามาอ่านค่าความดันแทนการอ่านด้วยตา ซึ่งจะทำให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่เซนเซอร์วัดความดัน (pressure sensor) ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมากในการวัดความดันที่มีค่าต่ำๆ

7) การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ ซึ่งเน้นศึกษาการไหลในท่อ โดยมีตัวแปรระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เป็นตัวกำหนดอัตราการไหลในท่อ ซึ่งในแนวทางของการศึกษาต่อไปจะต้องมีการศึกษาสภาพการไหลเข้าอาคารรับน้ำ โดยจะต้องเปลี่ยนการไหลเข้าแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะต้องให้น้ำไหลเข้าอาคารรับน้ำได้รอบทั้ง 4 ด้าน และการศึกษาในส่วนของการไหลแบบทางน้ำเปิดในท่อ รวมถึงปรากฏการณ์ค้อนน้ำ (water hammer) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปิดวาล์ว

8) การศึกษาพฤติกรรมศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ กรมชลประทานและบริษัท จัดการและพัฒนาทรัพยากรน้ำภาคตะวันออก จำกัด (มหาชน) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการปล่อยน้ำของอ่างเก็บน้ำหนองค้อ โดยประมาณค่าอัตราการไหลได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำในอ่างที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ รวมทั้งตรวจสอบโอกาสที่จะเกิดการไหลแบบหมุนวนกรวยยาวที่ดูดอากาศเข้าท่อ ที่อาจเกิดความเสียหายให้กับอาคารระบายน้ำและระบบท่อส่งน้ำในระยะทางไกล

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กีรติ ลีวัจนกุล. ชลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2521.

กีรติ ลีวัจนกุล. วิศวกรรมชลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2521.

จักรี จัตุฑะศรี. ชลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ไลบรารีไนน์, 2538.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ. รายงานการศึกษารายงานแบบจำลองชลศาสตร์. โครงการปรับปรุงอาคารรับน้ำอ่างเก็บน้ำหนองค้อ อ.ศรีราชา จ. ชลบุรี. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

ชัชชัย หอมสุต. ชลศาสตร์การไหลในทางน้ำเปิดที่มีเขื่อนกั้นภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ชันญู คอนซัลแตนท์ส, บริษัท. ข้อเสนอด้านเทคนิค. โครงการปรับปรุงอาคารรับน้ำอ่างเก็บน้ำหนองค้อ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ชันญู คอนซัลแตนท์ส, 2545.

ปิยะฉัตร เลิศอมรพงษ์. การจำลองการทับถมตะกอนหลังเขื่อนกั้นคลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ศุภกร ศิริพจนกุล. ชลศาสตร์ของการชะล้างในคลองโดยน้ำขึ้นน้ำลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

สมาน เจริญกิจพูลผล และมนตรี พิรุณเกษตร. กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541.

ภาษาอังกฤษ

Abdel-Fattah, S. Intake Design Under Aspects of Vortex Formation[Online]. (n.d.). Available from:http://www.iahr.org/e-library/Theme_D/Intake%20design.html [2004,January 15]

Akalank, K. J.; Ranga-Raju, K. G.; and Ramachandra, J. G. Vortex Formation at Pipe Intakes. Journal of Hydraulic Division 104 (October 1978): 1429-1444

- Chadwick, A., and Morfett, J. Hydraulics in Civil and Environmental Engineering. 2 nd ed. London: E & FN Spon, 1994.
- Davis, C. V., ed. Handbook of Applied Hydraulics. 2 nd ed. New York: McGraw Hill, 1952.
- Eskinazi, S. Principles of Fluid Mechanics. Boston: Allyn and Bacon Inc, 1962.
- Frank, M. W. Fluid Mechanics. 3 rd ed. Singapore: McGraw Hill, 1994.
- Gulliver, J. S., and Rindels, A.J. Weak Vortices at Vertical Intakes. Journal of Hydraulic Engineering 113 (September 1987): 1101-1116.
- Haszpra, O.; Kalina, E.; and Papp, G. A 70 m High Morning Glory Spillway and its Broken-Axis Stilling Basin System. In Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, pp. 61-73. Coventry: The University of Warwick, 1982.
- Jiming, M.; Yuanbo, L.; and Jitang, H. Minimum Submergence Before Double-Entrance Pressure Intakes. Journal of Hydraulic Engineering 126 (August 2000): 628-631
- Kavianpour, M. R., and Khorrojerdi, A. Physical Model Studies of New Bottom Outlets in Iran[Online]. (n.d.). Available from: http://www.iahr.org/e-library/beijing_proceedings/Theme_D/physical%20Model.html[2004, January 15]
- Linsley, R. K., et. Al. Water Resources Engineering. 4 ed. Singapore: McGraw-Hill, 1992.
- Novak, P., and Cabelka, J. Model in Hydraulic Engineering Physical Principles and Design Application. London: Pitman Publishing, 1981.
- Odgaard, A. J. Free-Surface Air Core Vortex. Journal of Hydraulic Engineering 112 (October 1986): 610-620.
- Rajendran, V. P., and Patel, V. C. Measurement of Vortices in Model Pump-Intake Bay by PIV. Journal of Hydraulic Engineering 126 (May 2000): 322-334.
- Roberson, J., and Crowe, C. Engineering Fluid Mechanics. New York: John Wiley and Son Inc, 1997.
- Rouse, H., and Howe, J.W. Basic Mechanics of Fluid. 2 nd ed. London: Chapman & Hall, 1956.
- Silva-Araya, W. F., and Chaudhry, M. H. Unsteady Friction in Rough Pipes. Journal of Hydraulic Engineering 127 (February 2001): 607-618
- Streeter, V. L. Fluid Mechanics. International Student ed. Tokyo: McGraw Hill, 1971.
- Tuve, G. L. Mechanical Engineering Experimentation. New York: McGraw Hill, 1961.

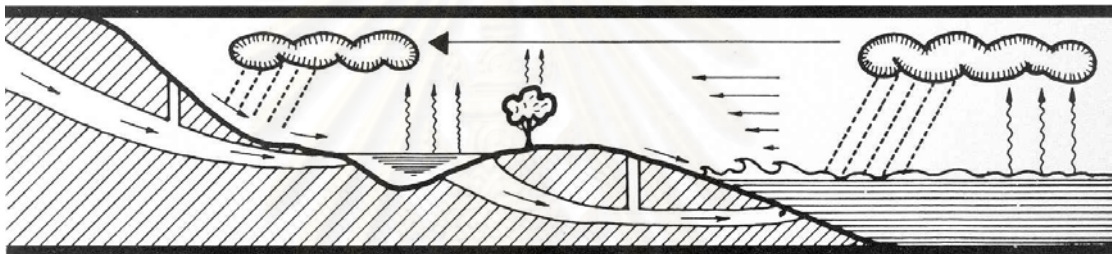
- US. Army Corps of Engineers. Downpull Forces on Emergency Closure Gates. Technical Report No.106-1. Oregon: Department of the US. Army Corps of Engineers, 1963.
- US. Army Corps of Engineers. Friction Losses in Corrugates Metal Pipe. Report No.40-1. Oregon: Department of the US. Army Corps of Engineers, 1955.
- U.S. Army Corps of Engineers. Hydraulic Design of Reservoir Outlet Structures. EM 1110-2-1602. Washington, D.C.: Department of the Army Office of the Chief of Engineers, 1963.
- US. Army Corps of Engineers. Outlet Works and Stilling Basin for Cougar Reservoir. Technical Report No.87-1. Oregon: Department of the US. Army Corps of Engineers, 1964.
- US. Development of the Interior, Department. Design of Small Dams. 2nd ed. Washington: United States Government Printing Office.1961.
- Yildirim, N., and Kocabas, F. Critical Submergence for Intake in Open Channel Flow. Journal of Hydraulic Engineering 121 (December 1995): 900-905.
- Yildirim, N., and Kocabas, F. Critical Submergence for Intake in Still-Water Reservoir. Journal of Hydraulic Engineering 124 (January 1998): 103-105.
- Yildirim, N., and Kocabas, F. Prediction of Critical Submergence for an Intake Pipe. Journal of Hydraulic Research 40 (December 2002): 507-518.
- Zhong-Qing, Z. A Study on the Vortex Flow Near PowerHouse Intake Structure of Longtan Hydroelectric Project[Online]. (n.d.). Available from: http://www.iahr.org/e-library/beijing_proceedings/Theme_D/A%20study.html [2004,January 15]



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
รายละเอียดแบบจำลองและการเตรียมการทดลอง



ก1 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลอง

ก2 การเตรียมการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก1

รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลอง

การจำลองสภาพชลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ได้ทำการศึกษาโดยแบบจำลองทางกายภาพ ที่มีมาตรฐานความยาวแบบจำลอง 1 หน่วย ต่อความยาวจริง 13.63 หน่วย ที่ได้สร้างขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูป ก1-1 และแผนผังแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงตำแหน่งของจุดวัดความดันในท่อที่ระยะต่าง ๆ ดังรูป ก1-2 ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ ของแบบจำลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก1.1 แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

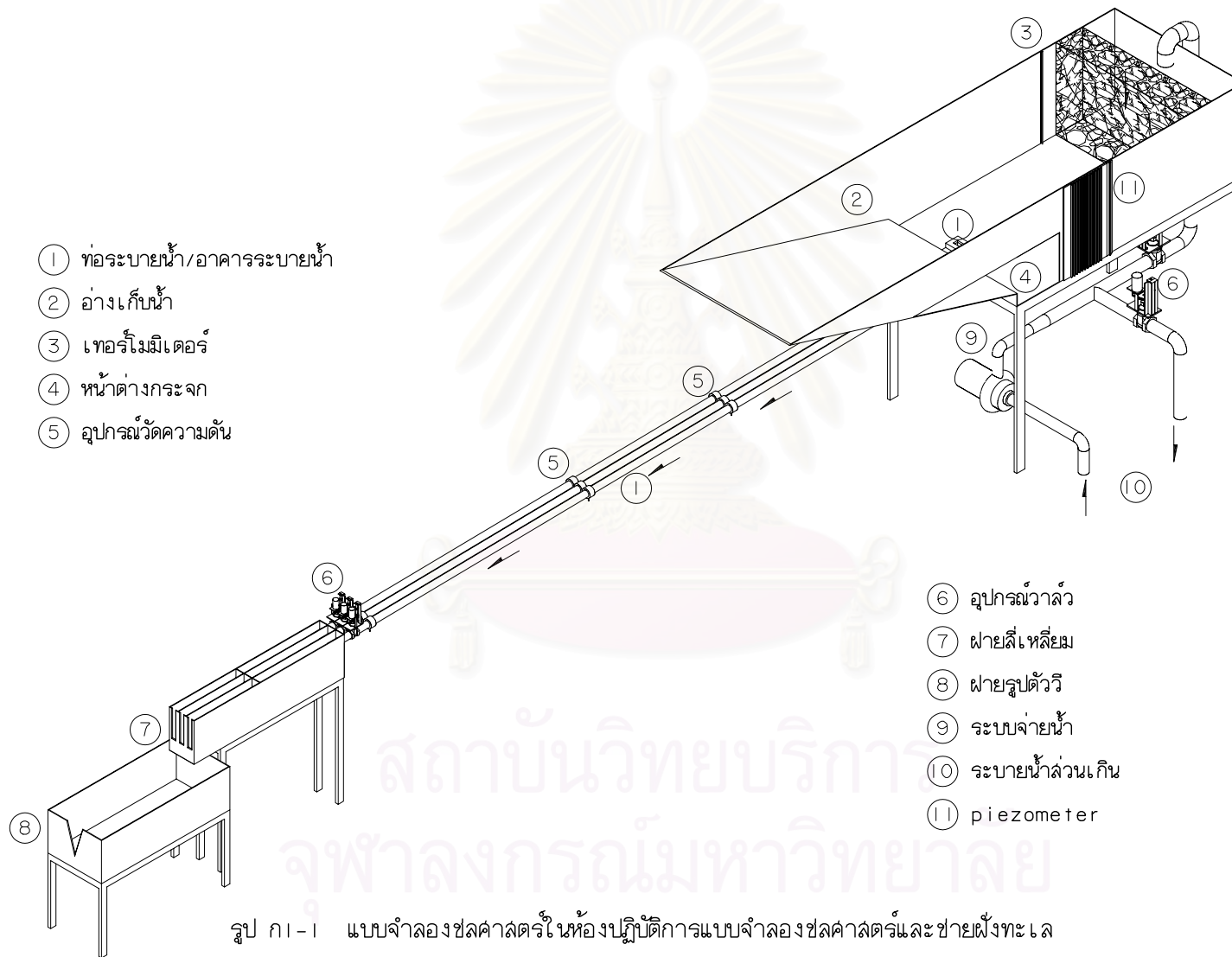
การจำลองสภาพของอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำหนองค้อ โดยมีลักษณะและรูปร่าง ดังรูป ก1-3 เป็นกล่องเหล็กสี่เหลี่ยม ขนาด 4.00x1.20x0.75 เมตร ส่วนปลายเป็นสามเหลี่ยมมีความลาด 1:3 (ความสูง ต่อ ความราบ) ซึ่งเป็นความลาดของตัวเขื่อนและตรงกลางเจาะรู 3 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร เพื่อติดตั้งท่อระบายน้ำของแบบจำลองอาคารระบายน้ำ ส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับแบบจำลองอาคารระบายน้ำ ดังรูป ก1-4 ประกอบด้วย

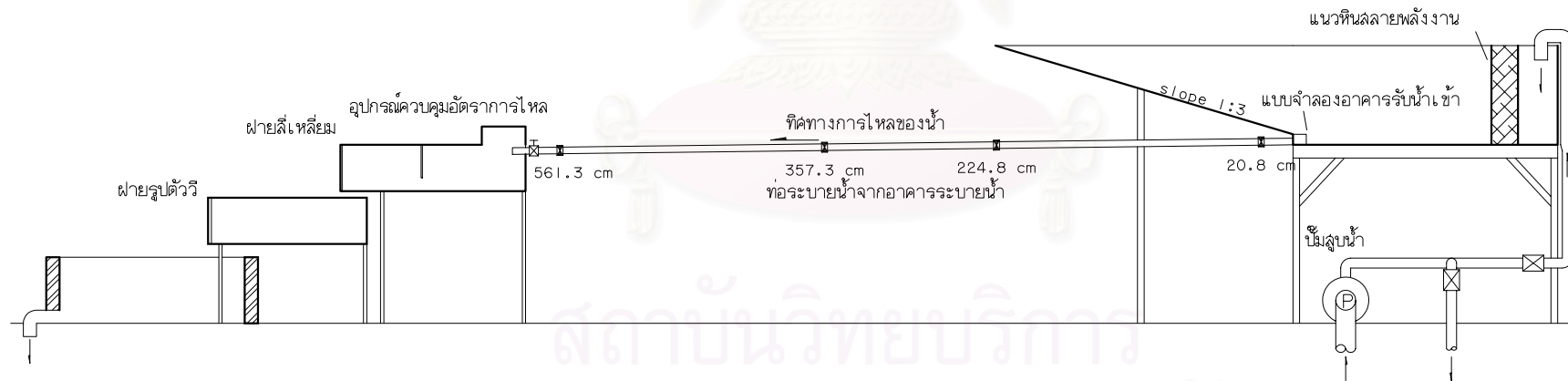
- แนวหินสลายพลังงาน ทำหน้าที่สลายความปั่นป่วนของจากปลายท่อของระบบจ่ายน้ำ (ภาคผนวก ก1.7) เพื่อให้ระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำนิ่งและง่ายต่อการอ่านระดับน้ำ ติดตั้งอยู่ทางด้านท้ายของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูป ก1-5 ห่างจากผนังด้านท้ายของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ 30 เซนติเมตร เพื่อเป็นที่รับน้ำจากระบบจ่ายน้ำ

- แบบจำลองอาคารรับน้ำ (Intake) ติดตั้งอยู่บริเวณช่วงกลางของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูป ก1-5 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ก1.2

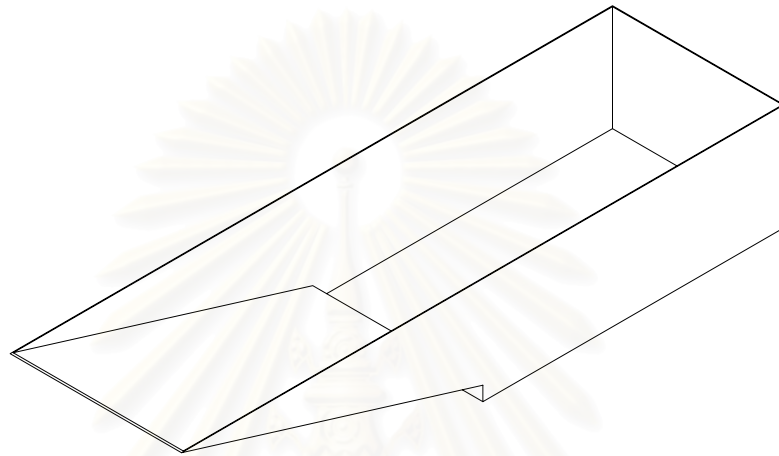
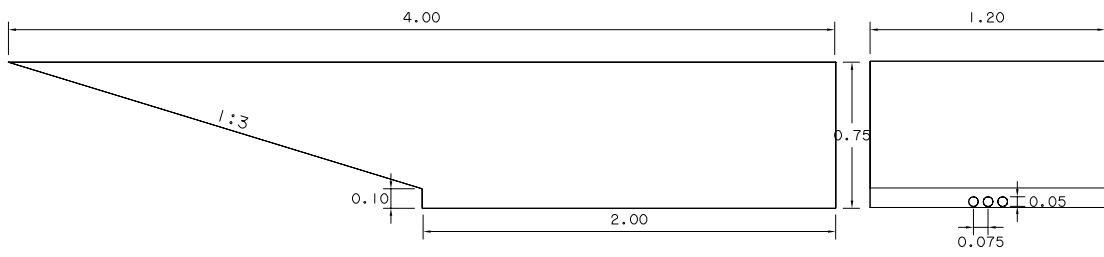
- เทอร์โมมิเตอร์ ติดตั้งอยู่ด้านท้ายติดกับแนวหินสลายพลังงาน ดังรูป ก1-2 และ รูป ก1-5 เพื่อใช้วัดอุณหภูมิของน้ำในแบบจำลอง

- piezometer วัดระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ติดตั้งอยู่ขอบด้านนอกของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูป ก1-4 และ รูป ก1-6 ซึ่งอยู่ตรงกลางของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

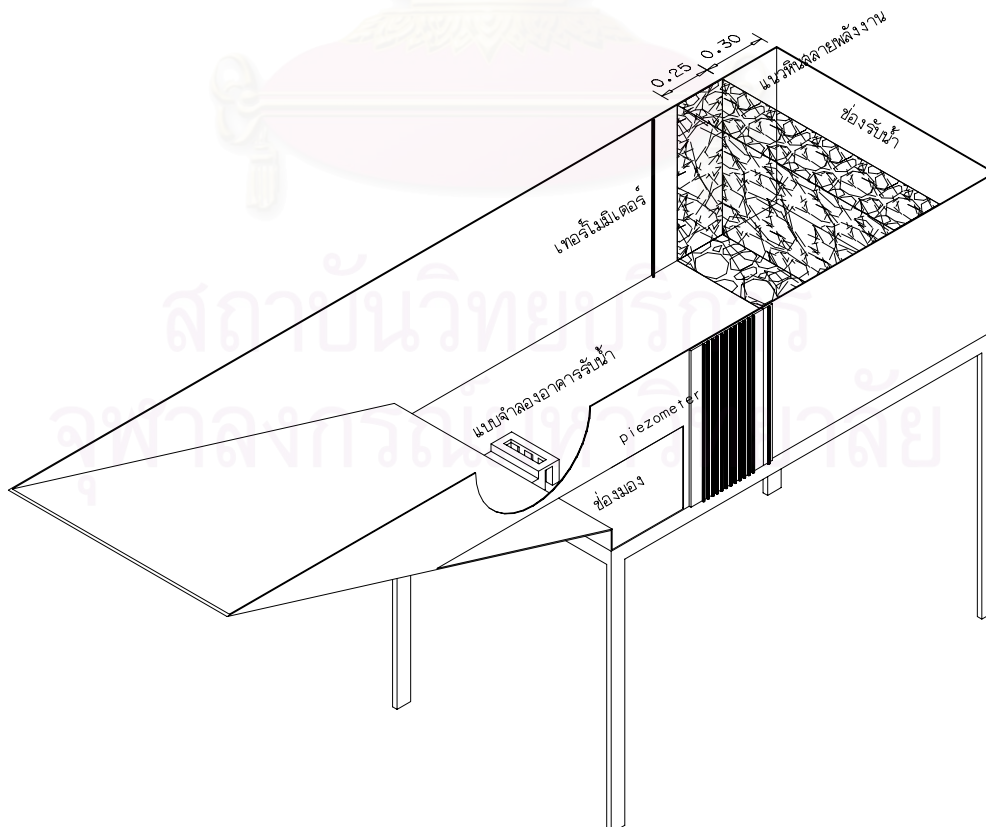




รูป ก1-2 แผนผังส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองชลศาสตร์



รูป ก1-3 รูปร่างและลักษณะของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ



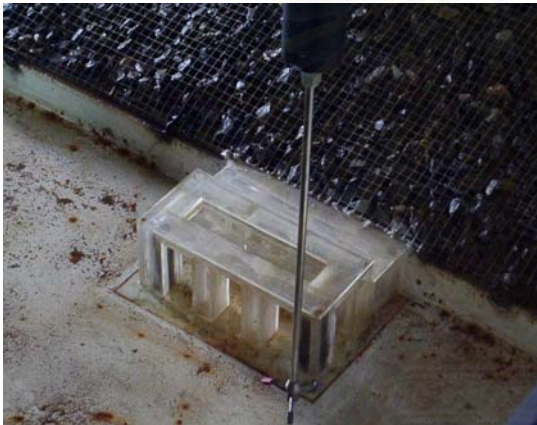
รูป ก1-4 ส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ



ก) แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ



ข) แนวหินสลายพลังงานและช่องรับน้ำ



ค) ตำแหน่งแบบจำลองอาคารระบายน้ำ

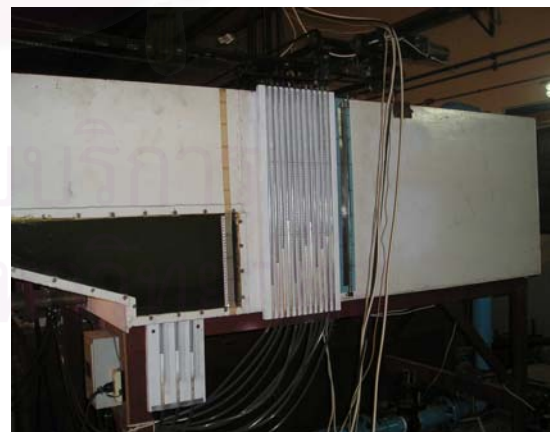


ง) เทอร์โมมิเตอร์

รูป ก1-5 ส่วนประกอบแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ



ก) การวัดความดัน



ข) ตำแหน่งติดตั้ง

รูป ก1-6 เกจวัดความดัน

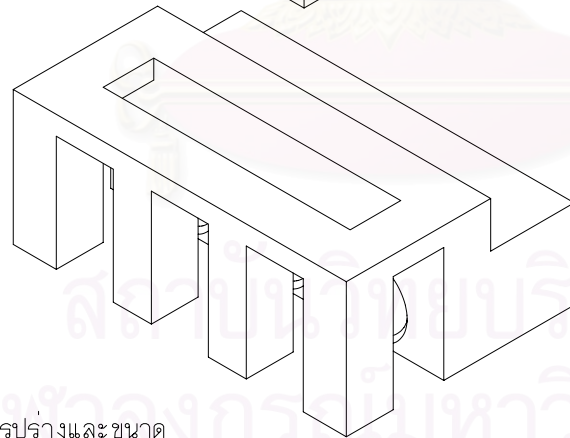
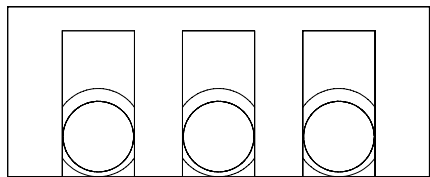
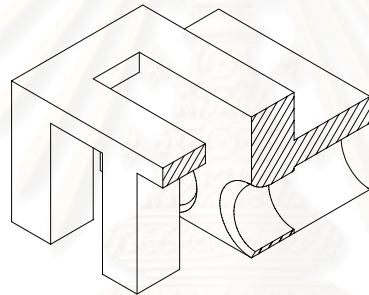
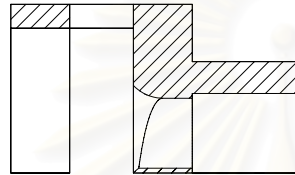
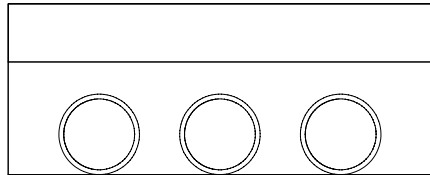
- ช่องมองพฤติกรรมกรไหลบริเวณอาคารรับน้ำ ติดตั้งอยู่ขอบด้านขวาของแบบจำลองอาคารระบายน้ำ จะเป็นช่องมีขนาด 80x40 เซนติเมตร ดังรูป ก1-5 โดยใช้แผ่นพลาสติกใสติดเข้าไปแทนแผ่นเหล็ก

ก1.2 แบบจำลองอาคารรับน้ำ

การจำลองสัดส่วนและรูปร่างทางกายภาพของอาคารรับน้ำ(Intake) กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำหนองค้อ มีรูปร่างและลักษณะของแบบจำลอง ดังรูป ก1-7 มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 263x180x106 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกส่วนของทางน้ำเข้าอยู่ด้านหน้าของตัวแบบจำลองอาคารรับน้ำ มีลักษณะเป็นช่องว่างอยู่ตรงกลาง ขนาด 40x189x91 มิลลิเมตร และมีทางให้น้ำเข้า 4 ทาง คือ ด้านบนเป็นช่องขนาด 189x40 มิลลิเมตร ด้านข้างทั้ง 2 ข้างเป็นช่องว่างขนาด 40x91 มิลลิเมตร และด้านหน้าเป็นช่องขนาด 45x91 มิลลิเมตร จำนวน 3 ช่อง ส่วนที่สองเป็นส่วนของปลายท่อที่มีลักษณะคล้ายปากแตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร แล้วลดลงไปเรื่อยๆเป็นแนวโค้งจนมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 44 มิลลิเมตร เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อใส ในส่วนของปากแตรมีความหนาเท่ากับ 37 มิลลิเมตร

วัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลองอาคารรับน้ำ ภายนอกเป็นแผ่นพลาสติกใส ตัดให้มีรูปร่าง ดังรูป ก1-7ก แล้วทำการเชื่อมประสานด้วยน้ำยาประสานพลาสติก ไดครอโรมีเทน (CH_2Cl_2) ภายในใช้เรซินหล่ออัดเข้าไป ในส่วนของปากแตรใช้เหล็กแท่งกลึงให้มีลักษณะดังรูป ก1-7ข ซึ่งกรรมวิธีในการหล่อเรซิน ทำโดยเตรียมแบบหล่อให้พร้อม เชื่อมประสานรอยต่อให้แน่น ไม่มีรอยรั่ว จากนั้นนำเรซินใส่เทลงภาชนะที่สะอาด เทน้ำยาที่ทำให้เรซินแข็งตัวในอัตราส่วน ในอัตราส่วน 1 หยด ต่อเรซิน 50 กรัม จากนั้นทำการคนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ แล้วเทเรซินลงในแบบในการหล่อเรซินต่อทำการหล่อให้แล้วเสร็จภายใน 20 นาที มิฉะนั้นเรซินจะแข็งตัว หลังจากเทลงแบบเรียบร้อยแล้ว ปล่อยให้ทิ้งไว้ให้แห้ง 30 นาที เรซินจะมีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นคล้ายยาง จึงนำเอาแบบเหล็กออก แล้วตกแต่งให้เรียบร้อย จากนั้นปล่อยให้แห้ง 24 ชั่วโมง จะมีลักษณะแข็งและใสคล้ายแก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) รูปร่างและขนาด

รูป ก1-7 แบบจำลองอาคารระบายนํ้า



ข) วัสดุและอุปกรณ์หล่อเสฉิน

ก1.3 ระบบท่อระบายน้ำ

ระบบท่อระบายน้ำ เป็นท่อที่รับน้ำที่ระบายออกมาจากแบบจำลองอาคารรับน้ำ ดังรูป ก1-2 มีจำนวน 3 ท่อ โดยกำหนดให้ท่อที่ 1 อยู่ทางด้านขวา ท่อที่ 2 อยู่ตรงกลาง และท่อที่ 3 อยู่ทางด้านซ้าย โดยเริ่มต้นจากปลายท่อด้านเหนือซ้ายทำปากแตร จนไปถึงอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล เป็นระยะทาง 5.60 เมตร ท่อที่ใช้ในแบบจำลองเป็นท่อโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 44 มิลลิเมตร

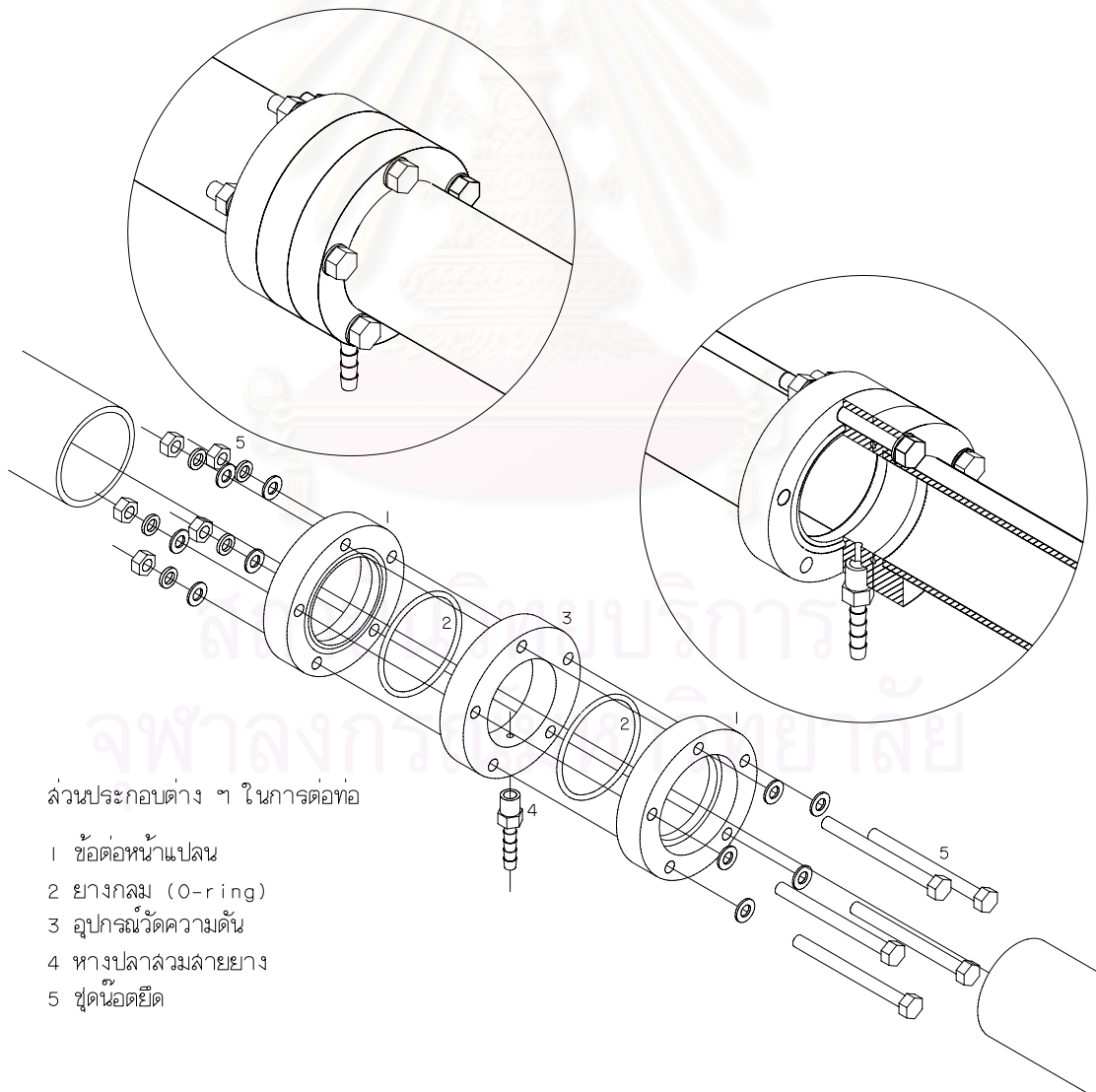
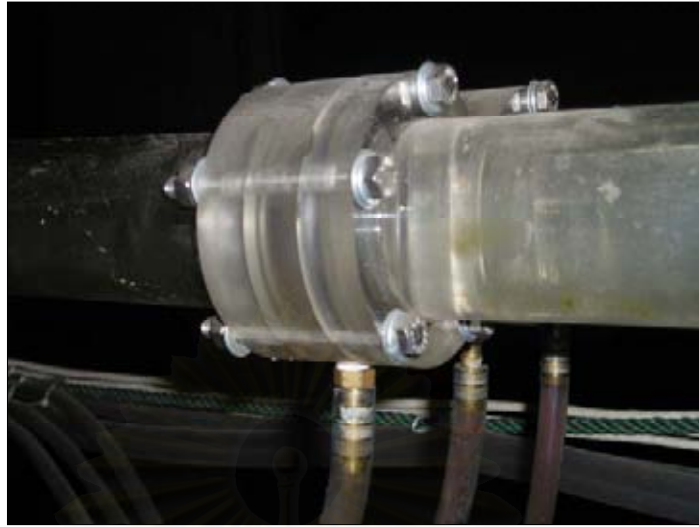
การวัดความดันภายในท่อ ใช้เกจวัดความดันแบบ piezometer ซึ่งในหนึ่งเส้นท่อมีจุดวัดความดัน 4 จุด ตลอดความยาวของท่อ ดังรูป ก1-2ข โดยมีตำแหน่งที่ 1 อยู่ที่ระยะ 20.8 เซนติเมตร จากด้านท้ายของปากแตร ตำแหน่งที่ 2 อยู่ที่ระยะ 224.8 เซนติเมตร ตำแหน่งที่ 3 อยู่ที่ระยะ 357.3 เซนติเมตร และตำแหน่งที่ 4 อยู่ที่ระยะ 561.3 เซนติเมตร ในการแสดงค่าความดัน ณ จุดต่าง ๆ ตลอดความยาวท่อของ piezometer ดังรูป ก1-6 โดยเรียงจากขวาไปซ้าย คือท่อที่ 1 ท่อที่ 2 และท่อที่ 3 ตามลำดับ ค่าความดันอ้างอิงกับระดับในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

การต่อท่อโลหะ ใช้การต่อแบบ compression coupling อุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบด้วย ข้อต่อหน้าแปลน ยางกลม (O ring) เกจวัดความดัน และชุดน็อตยึด ดังรูป ก1-8 ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

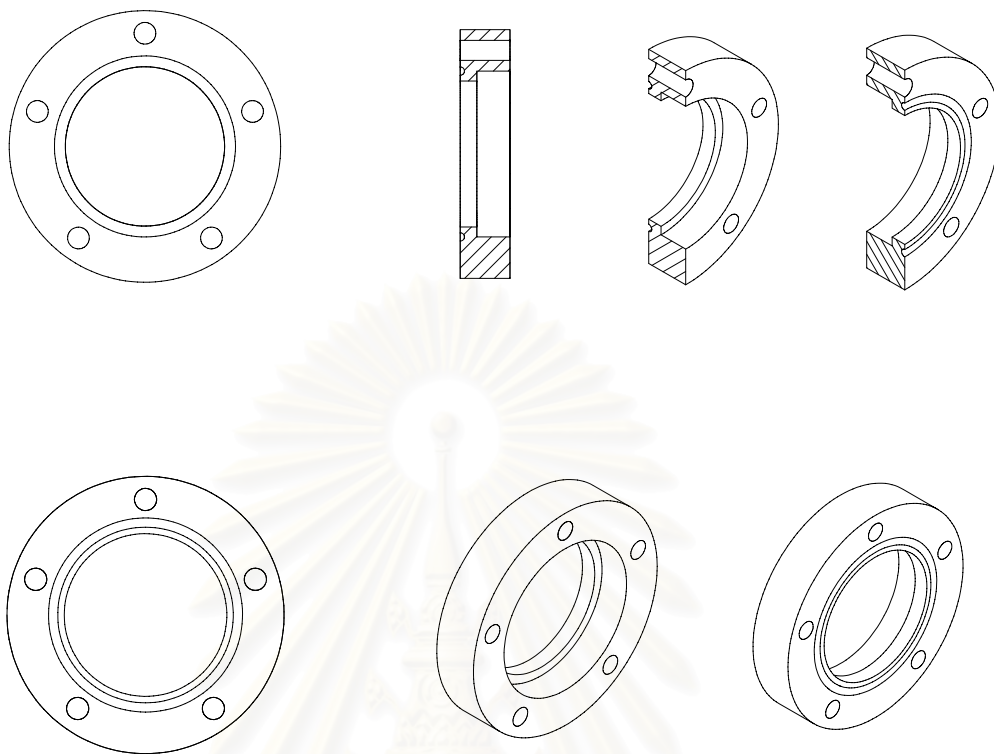
- ข้อต่อหน้าแปลน เป็นอุปกรณ์ที่ยึดติดอยู่ที่ปลายท่อ เพื่อเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ดังรูป ก1-8 โดยมีลักษณะและรูปร่าง ดังรูป ก1-9 เป็นแผ่นพลาสติกโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร หนา 15 มิลลิเมตร ตรงกลางคว้านเป็นรูโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อโลหะ 44 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร และส่วนที่เหลือ 10 มิลลิเมตร คว้านเป็นรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อโลหะ 50 มิลลิเมตร เพื่อนำท่อโลหะมาสวมยึดกับข้อต่อหน้าแปลน โดยใช้การสวมแบบสวมแน่น แล้วเชื่อมประสานด้วยกาวซิลิโคน เพื่อความยืดหยุ่นของข้อต่อ

- ยางกลม (O ring) เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของน้ำระหว่างข้อต่อหน้าแปลน ดังรูป ก1-8 มีลักษณะและรูปร่าง เป็นยางกลมสีดำ ยางมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ขดเป็นวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ยึดติดอยู่กับข้อต่อหน้าแปลน โดยการบากข้อต่อหน้าแปลนเป็นร่อง ดังรูป ก1-9 มีลักษณะเป็นร่องครึ่งวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของยางกลม โดยบากเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของการขดยางกลม

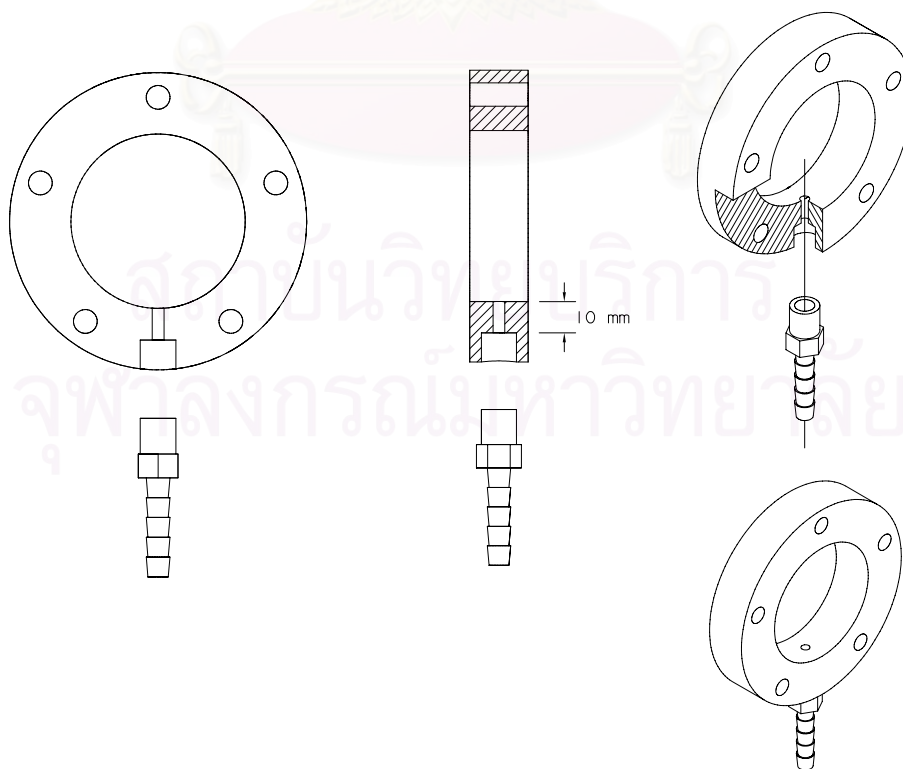
- เกจวัดความดัน เป็นอุปกรณ์วัดความดันแบบ piezometer ใช้ความสูงของน้ำเป็นตัวบอกค่าความดัน โดยน้ำจะดันตัวขึ้นไปตามท่อสายยางปลายเปิด ในส่วนของตัวอุปกรณ์มีรูปร่าง



รูป ก1-8 ส่วนประกอบของอุปกรณ์การต่อท่อและการวัดความดัน



รูป ก1-9 ลักษณะของหน้าแปลนที่ใช้เป็นอุปกรณ์ต่อท่อ



รูป ก1-10 ลักษณะของหน้าแปลนที่ใช้เป็นอุปกรณ์วัดความดัน

และลักษณะ ดังรูป ก1-10 เป็นแผ่นพลาสติกใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรหนา 15 มิลลิเมตร ตรงกลางคว้านเป็นรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อใส และมีรูเจาะขวางเพื่อวัดความดันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร ภายนอกติดตั้งห่างปลายขนาด 8 มิลลิเมตร ดังรูป ก1-6 เพื่อสวมสายยางใสต่อเชื่อมไปยังส่วนที่แสดงค่าระดับความดัน

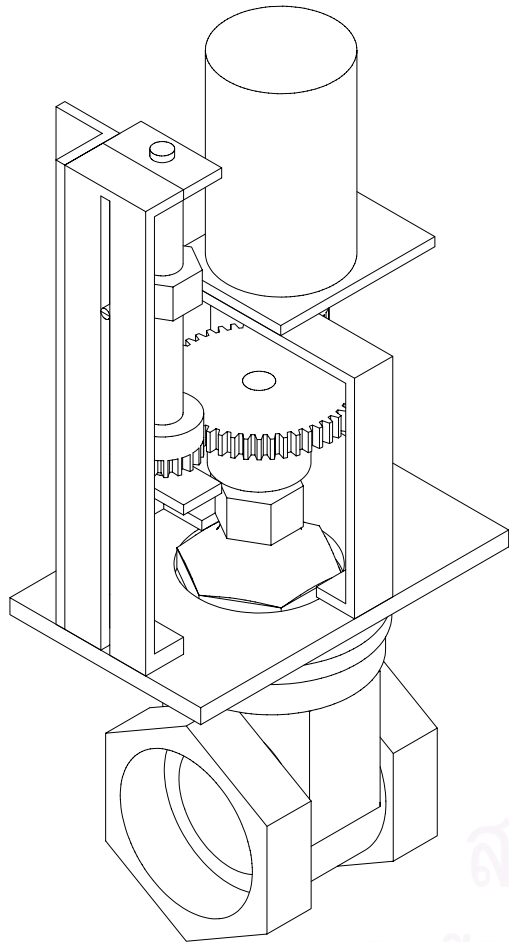
- ชุดน็อตยึด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ยึดต่อปลายท่อเข้าด้วยกัน โดยการร้อยน็อตผ่านรูของข้อต่อหน้าแปลนและเจาะวัดความดัน ซึ่งรูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู ที่มีระยะห่างเท่ากัน ในชุดน็อตประกอบด้วย สลักเกลียว(bolt) ขนาด 6 มิลลิเมตร ร้อยอุปกรณ์ต่างๆให้อยู่ในแนวเดียวกัน แหวนรองทั้งสองด้านเพื่อกระจายแรงในการยึดข้อต่อหน้าแปลน แหวนสปริงป้องกันการคลายเกลียวของน็อต

ก1.4 อุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล

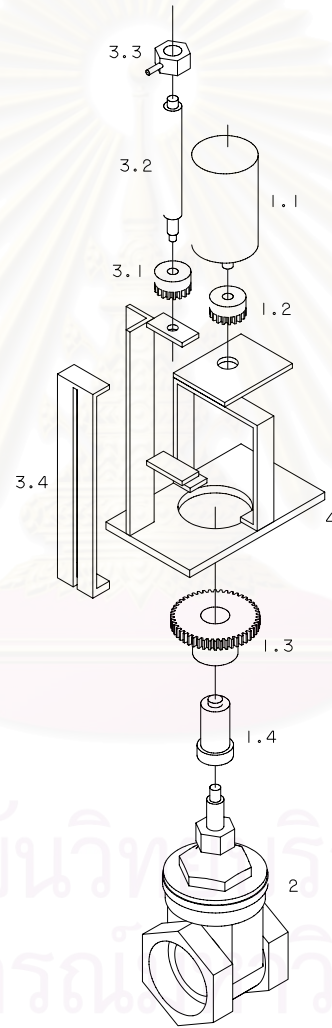
อุปกรณ์วาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อด้านท้ายน้ำ ดังรูป ก1-1 ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำ โดยการเปิดวาล์วตามพื้นที่เปิดที่กำหนด ซึ่งมีรูปร่างและลักษณะของอุปกรณ์ ดังรูป ก1-11ก ทำการเปิด-ปิดวาล์วโดยใช้วงจรไฟฟ้า ดังรูป ก1-12 และมีกล่องวงจรปิดขนาดเล็กแสดงพื้นที่การเปิดวาล์ว ในชุดอุปกรณ์วาล์วควบคุมการเปิดวาล์วมีส่วนประกอบดังรูป ก1-11ข ประกอบด้วย ชุดวงจรไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อน วาล์ว(Gate Valve) ชุดแสดงพื้นที่เปิด และโครงยึดอุปกรณ์ ส่วนประกอบดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

- ชุดวงจรไฟฟ้า เป็นชุดที่ทำการส่งงานการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูป ก1-12ก ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 แอมแปร์ และแผงควบคุมการทำงานประกอบด้วยสวิตช์กดติปล้อยดับทำการควบคุมการเปิดวาล์ว และสวิตช์กดติปล้อยติดทำการหยุดการทำงานเมื่อทำการเปิดได้พื้นที่เปิดวาล์วตามที่ต้องการ โดยมีผังการทำงานของสวิตช์ที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ดังรูป ก1-12ข ในการควบคุมมอเตอร์หนึ่งชุดประกอบด้วยสวิตช์ 2 ชุด ซึ่งจะใช้รีเลย์เป็นตัวสลับวงจรแทนการปิด-เปิดสวิตช์ โดยมีการต่อวงจร ดังรูป ก1-12ค

- ชุดขับเคลื่อน เป็นอุปกรณ์ชุดที่ทำการหมุนวาล์วตามคำสั่งของแผงควบคุมการทำงาน ส่วนประกอบดังรูป ก1-11ข ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และเฟืองขับที่ติดตั้งอยู่ที่แกนหมุนของมอเตอร์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร เป็นตัวขับเคลื่อน และชุดเฟืองหมุนวาล์วติดตั้งอยู่ที่แกนหมุนของวาล์ว ประกอบด้วยเฟืองขับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร และปลอกเหล็กสวมล็อกกับแกนหมุน



ก) ลักษณะ ของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

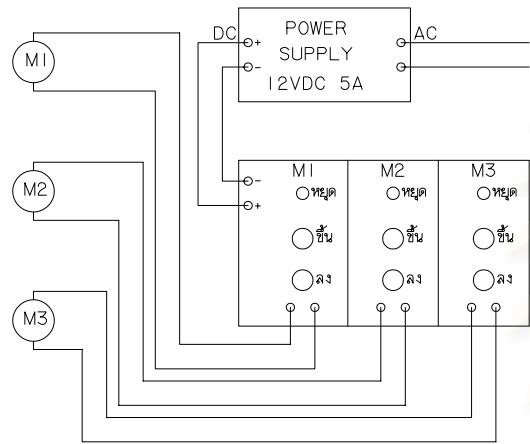


ข) ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

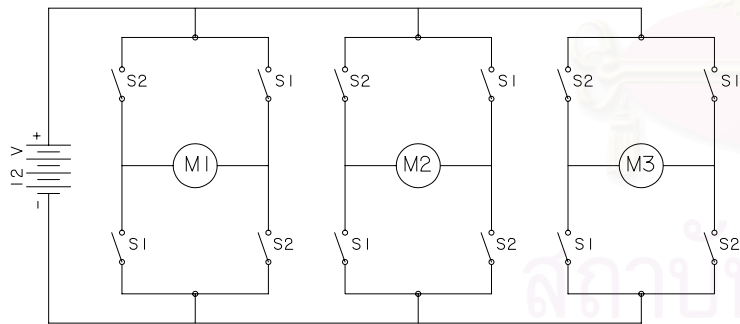
ส่วนประกอบของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

1. ชุดขับเคลื่อน
 - 1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์
 - 1.2 เพืองขับ
 - 1.3 เพืองหมุนวาล์ว
 - 1.4 ปลอกเหล็กครอบแกนวาล์ว
2. วาล์ว (Gate valve)
3. ชุดแปลงพื้นที่เปิดวาล์ว
 - 3.1 เพือง
 - 3.2 เกลียว
 - 3.3 น๊อต
 - 3.4 มาตรฐานแปลงพื้นที่เปิดวาล์ว
4. โครงยึดวาล์วกับอุปกรณ์

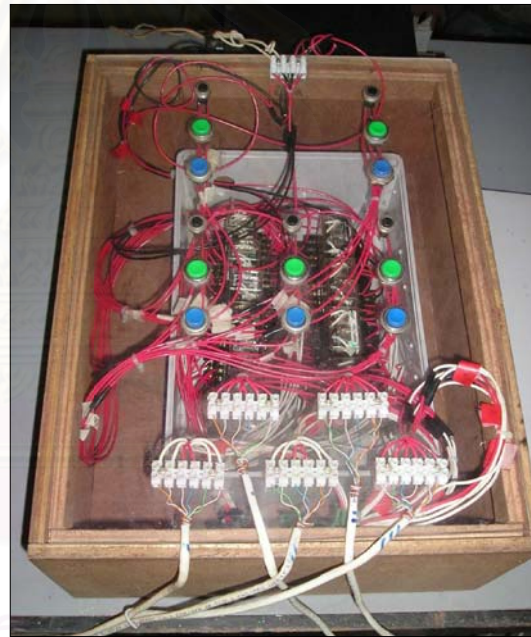
รูป ก1-11 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล



(ก) แผงควบคุมการทำงาน



(ข) แผงระบบควบคุม



(ค) ภาพถ่ายแผงควบคุมและการต่อวงจรไฟฟ้า

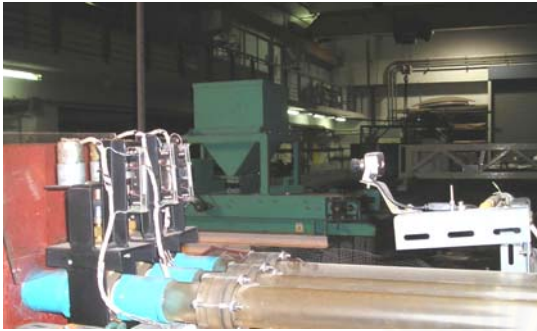
รูป ก1-12 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ของวาล์ว การหมุนวาล์วของการเฟืองที่ทำการขบกันระหว่างเฟืองทั้ง 2 ตัวของชุดขับเคลื่อนมีอัตราทดเท่ากับ 1:2.67 ทั้งแรงบิดและความเร็วการหมุน

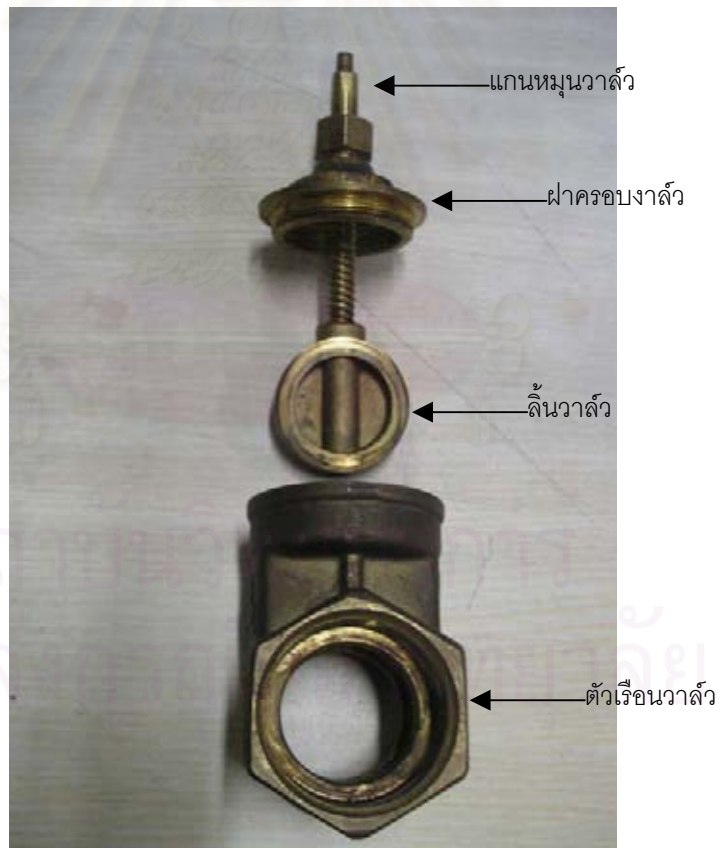
- วาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ติดกับท่อ ควบคุมการไหลตามคำสั่งของชุดขับเคลื่อนวาล์วที่ใช้เป็นวาล์วของเครื่องยี่ห้อ SUNWA ขนาด 1.5 นิ้ว ส่วนประกอบดังรูป ก1-14 ประกอบด้วย แกนหมุนวาล์ว ฝาครอบ ลึนวาล์ว และตัวเรือนวาล์ว ทำการปิด-เปิดโดยหมุนที่แกนวาล์ว จำนวนรอบของการหมุนวาล์วจากปิดสนิทน้ำไม่สามารถไหลผ่านได้จนกระทั่งมีพื้นที่เปิดเต็มที่ (100%) มีจำนวนรอบการหมุนวาล์ว 7.5 รอบ

- ชุดแสดงพื้นที่เปิดวาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่แสดงร้อยละของพื้นที่ที่ทำการเปิดวาล์ว ประกอบด้วยเฟืองขบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ยึดแน่นกับเกลียวแท่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีระหว่างระหว่างฟันของเกลียวเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และน็อตเป็นตัวเลื่อนเพื่อแสดงพื้นที่เปิดวาล์ว ซึ่งถูกบังคับให้เลื่อนขึ้น-ลงตามร่องเกลียวที่ติดตั้งมาตรงส่วนแสดงพื้นที่เปิดวาล์ว โดยมีระยะจากวาล์วปิดสนิทน้ำไม่สามารถไหลผ่านได้จนกระทั่งมีพื้นที่เปิดเต็มที่(100%) มีระยะเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

การทำงานของอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล ชุดแผงควบคุมการทำงาน โดยสวิตช์บนแผงควบคุมเป็นตัวควบคุมการทำงานของรีเลย์ เมื่อสวิตช์ทำงานรีเลย์จะทำการปิดวงจร ไฟฟ้าจะไหลผ่านชุดสะพานไฟในรีเลย์ เข้าสู่มอเตอร์ มอเตอร์ก็ทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลคือการหมุนของมอเตอร์ โดยเฟืองขบที่ติดตั้งอยู่กับแกนหมุนของมอเตอร์ก็หมุนไปพร้อมกับมอเตอร์ โดยมีความเร็วและแรงบิดเท่ากัน จากนั้นเฟืองขบที่ติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ก็จะขบกับเฟืองที่ติดอยู่กับแกนหมุนของวาล์ว ด้วยอัตราทด 1:2.67 จากนั้นลึนวาล์วก็จะเปิดขึ้นตามการหมุนของวาล์ว และในขณะเดียวกัน เฟืองขบที่ติดอยู่กับแกนของวาล์วก็จะขบกับเฟืองขบของชุดแสดงพื้นที่เปิดวาล์ว ด้วยอัตราทด 1:2.67 จากนั้นเกลียวก็จะทำการหมุนโดยมีจำนวนรอบที่หมุนจากวาล์วที่ปิดสนิทน้ำไม่สามารถไหลผ่านได้ จนกระทั่งมีพื้นที่เปิดเต็มที่(100%)เป็นจำนวน 20 รอบ และทำให้น็อตเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามการสั่งการของผู้ทดลองเป็นระยะ 30 มิลลิเมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และมีมาตรฐานแสดง ซึ่งมีรายละเอียดของการเปรียบเทียบในภาคผนวก 2.2 ระหว่างร้อยละของพื้นที่เปิดของวาล์ว กับระยะที่เคลื่อนที่ของน็อต (30 มิลลิเมตร) และร้อยละของระยะยกของลึนวาล์ว



รูป ก1-13 กล้องวงจรปิดดูพื้นที่เปิดวาล์ว



รูป ก1-14 ส่วนประกอบของวาล์ว

ก1.5 ฝายสี่เหลี่ยม

ฝายสี่เหลี่ยม เป็นอุปกรณ์ที่วัดอัตราการไหลในแต่ละท่อระบายน้ำจากแบบจำลองอาคารรับน้ำ ติดตั้งอยู่ด้านท้ายน้ำของอุปกรณ์วัดควบคุมอัตราการไหล ดังรูป ก1-1 และ รูป ก1-2 มีลักษณะเป็นรางสี่เหลี่ยม 3 ราง ดังรูป ก1-15 มีขนาด 230x1400x345 มิลลิเมตร ดังรูป ก1-16 กำหนดให้ช่องที่ 1 อยู่ทางขวาวัดอัตราการไหลท่อที่ 1 ผ่านฝาย 1 ช่องที่ 2 อยู่ตรงกลางวัดอัตราการไหลท่อที่ 2 ผ่านฝาย 2 และช่องที่ 3 วัดอัตราการไหลท่อที่ 3 ผ่านฝาย 3 โดยฝายที่ใช้วัดอัตราการไหลเป็นฝายสันคม กว้าง 30 มิลลิเมตร มีหลอดแก้วแสดงระดับน้ำเหนือสันฝายอยู่ทางซ้ายของรางสี่เหลี่ยม การเปรียบเทียบฝายมีรายละเอียดในภาคผนวก ก2.1.2

ก1.6 ฝายรูปตัววี

ฝายรูปตัววี เป็นอุปกรณ์ที่วัดอัตราการไหลรวมจากท่อระบายน้ำทั้ง 3 ท่อ ติดตั้งอยู่ด้านท้ายของฝายสี่เหลี่ยม เพื่อรวมน้ำจากฝายสี่เหลี่ยม และเปรียบเทียบฝายสี่เหลี่ยม มีลักษณะเป็นรางสี่เหลี่ยม ดังรูป ก1-17 มีขนาดกว้าง 500 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร และสูง 350 มิลลิเมตร ดังรูป ก1-18 ฝายวัดอัตราการไหลอยู่ทางด้านท้ายของรางสี่เหลี่ยม เป็นฝายสันคมรูปตัววี ปากตัววีมีความกว้าง 140 มิลลิเมตร และมีมุม 33.34 องศา อยู่สูงจากพื้นราง 72 มิลลิเมตร มีหลอดแก้วแสดงระดับน้ำเหนือสันฝายอยู่ทางด้านซ้ายของตัวรางสี่เหลี่ยม การเปรียบเทียบฝายมีรายละเอียดในภาคผนวก ก2.1.1

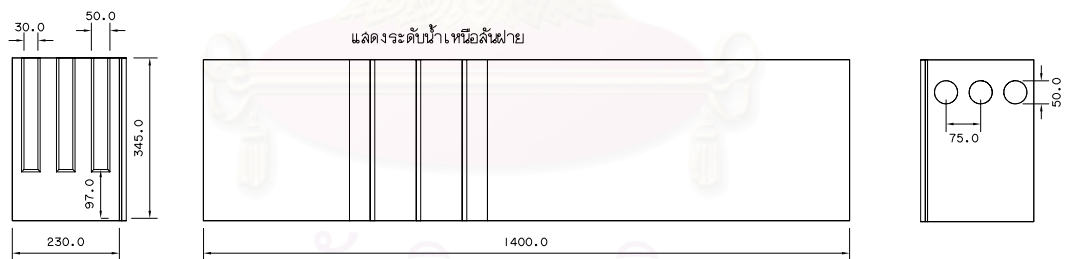
ก1.7 ระบบจ่ายน้ำในแบบจำลองชลศาสตร์

ระบบจ่ายน้ำ เป็นระบบที่นำน้ำและควบคุมปริมาณน้ำเข้าสู่แบบจำลองชลศาสตร์ ติดตั้งอยู่ด้านล่างของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูป ก1-1 และ รูป ก1-19 มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูป ก1-20 ประกอบด้วย เครื่องสูบน้ำ ท่อ PVC ขนาด 2 1/2 นิ้ว 3 นิ้ว และ 4 นิ้ว และอุปกรณ์วัดควบคุมอัตราการไหล มีรายละเอียดดังนี้

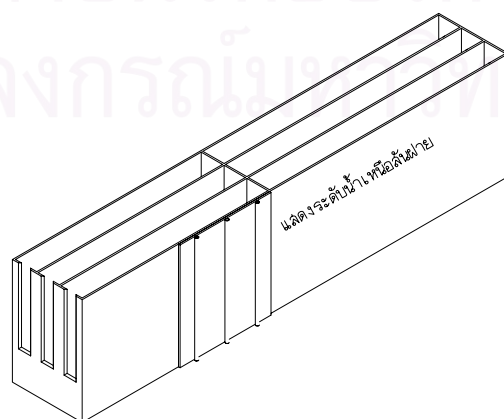
- เครื่องสูบน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่นำน้ำจากอ่างเก็บน้ำด้านล่างแบบจำลองเข้าสู่ระบบ ควบคุมการทำงานโดยสวิตช์ ดังรูป ก1-21 เป็นเบรกเกอร์สวิตช์ ขนาด 15 แอมแปร์ ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำทั้ง 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 เป็นเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวรัศมี ลักษณะดังรูป ก1-22ก เป็นเครื่องสูบน้ำแบบใบพัดกึ่งปิด ทำงานด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบสตาร์ 380 โวลต์ ความเร็วรอบ 2900 รอบต่อนาที อัตราการสูบน้ำสูงสุด 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เครื่องที่ 2 เป็นเครื่องสูบน้ำจุ่ม (Submersible sump pump) มีลักษณะดังรูป ก1-22ข เป็นเครื่องสูบน้ำที่แช่อยู่ในน้ำในขณะทำการสูบน้ำ มีขนาดท่อส่ง 3 นิ้ว ติดตั้งอยู่ในอ่างเก็บน้ำด้านล่างของแบบจำลองชลศาสตร์ มีอัตราการสูบน้ำสูงสุด 600 ลิตรต่อนาที ด้วยความเร็วรอบ 2850 รอบต่อนาที



รูป ก1-15 ฝายสี่เหลี่ยม



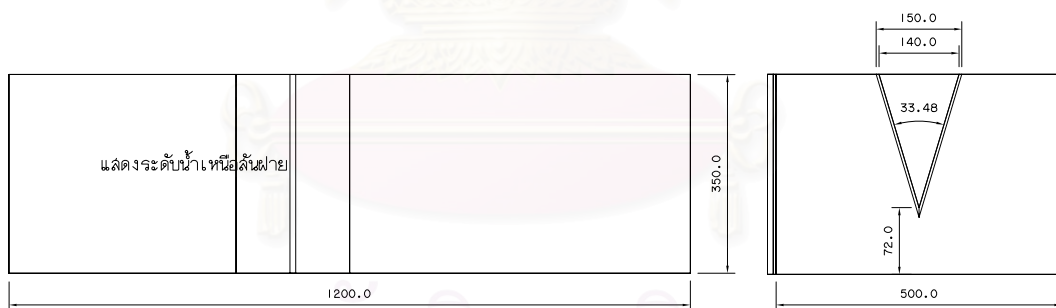
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



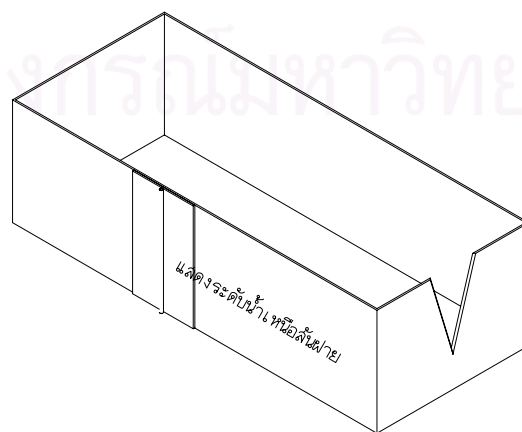
รูป ก1-16 ขนาดและรูปร่างของฝายสี่เหลี่ยม



รูป ก1-17 ฝายรูปตัววี



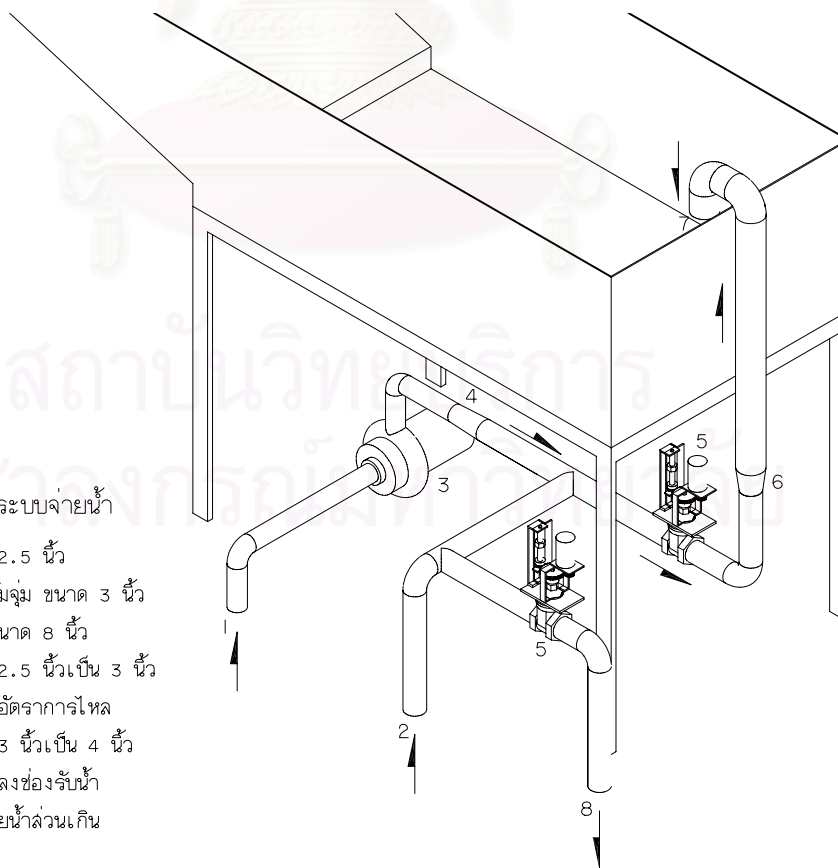
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ก1-18 ขนาดและรูปร่างของฝายรูปตัววี



รูป ก1-19 ระบบจ่ายน้ำในแบบจำลองชลศาสตร์



ส่วนประกอบของระบบจ่ายน้ำ

- 1 ท่อดูด ขนาด 2.5 นิ้ว
- 2 ท่อส่งน้ำจากปั๊มจุ่ม ขนาด 3 นิ้ว
- 3 ปั๊มทอยโข่ง ขนาด 8 นิ้ว
- 4 ท่อเพิ่มขนาด 2.5 นิ้วเป็น 3 นิ้ว
- 5 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล
- 6 ท่อเพื่อขนาด 3 นิ้วเป็น 4 นิ้ว
- 7 ปลายท่อส่งน้ำลงช่องรับน้ำ
- 8 ปลายท่อระบายน้ำส่วนเกิน

รูป ก1-20 ส่วนประกอบของระบบจ่ายน้ำในแบบจำลองชลศาสตร์



ก) การติดตั้งสวิตช์ควบคุม



ข) การตรวจสอบภายใน

รูป ก1-21 สวิตช์ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำ



ก) เครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน



ข) Submersible sump pump

รูป ก1-22 เครื่องสูบน้ำในระบบจ่ายน้ำ

- อุปกรณ์วาล์วควบคุมการไหลในระบบจ่ายน้ำ ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล รายละเอียดในภาคผนวก ก1.4 จำนวน 2 ชุดอุปกรณ์ มีส่วนประกอบและการทำงานที่เหมือนกัน ต่างกันที่ขนาดของวาล์ว โดยชุดอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหลของระบบจ่ายน้ำในแบบจำลองใช้วาล์วทองเหลืองขนาด 3 นิ้ว ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ชุดอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหลทั้ง 2 ชุด มีหน้าที่การทำงานดังนี้ ชุดอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหลชุดที่ 1 ควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลอง และชุดอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหลชุดที่ 2 ควบคุมปริมาณน้ำส่วนเกินให้ไหลออกกลับลงสู่อ่างเก็บน้ำด้านล่างของแบบจำลองชลศาสตร์

การทำงานของระบบจ่ายน้ำในแบบจำลองชลศาสตร์ มีรายละเอียดดังนี้ น้ำจะถูกสูบขึ้นมาจากอ่างเก็บน้ำด้านล่างของแบบจำลอง เข้าสู่ระบบท่อส่งน้ำผ่านวาล์วของอุปกรณ์วาล์วควบคุมอัตราการไหล แล้วไหลลงสู่แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ในขณะเดียวกันน้ำส่วนเกินก็จะไหลกลับสู่อ่างเก็บน้ำด้านล่างของแบบจำลอง สำหรับการควบคุมระบบการทำงานมีขั้นตอนการทำงานในการทดลองในหัวข้อ 3.4 วิธีการทดลอง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก2

การเตรียมการทดลอง

การจำลองสภาพพลศาสตร์ของการไหลผ่านอาคารระบายน้ำ กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำหนองค้อ ได้ทำการศึกษาโดยแบบจำลองทางกายภาพ ในการเตรียมการทดลองประกอบด้วย การเปรียบเทียบฝายวัดอัตราการไหล การเปรียบเทียบอุปกรณ์ควบคุมการไหล และรูปแบบการบันทึกผลการทดลอง เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลต่อไป

ก2.1 การเปรียบเทียบฝายวัดอัตราการไหล

แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยฝายวัดอัตราการไหล 2 ฝาย คือ ฝายรูปตัววี และฝายสี่เหลี่ยม ซึ่งแต่ละฝายมีวิธีการและผลการเปรียบเทียบดังนี้

ก2.1.1 ฝายรูปตัววี (V-notch weir)

วิธีการเปรียบเทียบ ฝายรูปตัววี ได้ทำการเปรียบเทียบกับรางน้ำเปิด ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ลึก 50 เซนติเมตร ที่ตั้งอยู่ภายใน ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์พื้นฐาน ชั้น 2 อาคารวิศวกรรม 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล ดังรูป ก2-1 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$Q = 0.012H^{2.17} \quad (\text{ก2-1})$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล มีหน่วยเป็น ลิตรต่อวินาที ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

H คือ ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

ก2.1.2 ฝายสี่เหลี่ยม (Rectangular Weir)

ฝายสี่เหลี่ยมมีช่องทางการไหลที่อิสระต่อกัน 3 ช่อง การเปรียบเทียบจึงทำที่ละหมายเลขของท่อ คือ ฝายตัวที่ 1 ฝายตัวที่ 2 และฝายตัวที่ 3 ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของท่อที่ 1 ท่อที่ 2 และท่อที่ 3 ตามลำดับ

วิธีการเปรียบเทียบ ฝายสี่เหลี่ยมใช้วิธีการเปรียบเทียบในที่ โดยกรณีที่มีปริมาณการไหลต่ำ ใช้วิธีการเปรียบเทียบโดยการวัดปริมาณน้ำจากฝายพร้อมกับการจับเวลา และกรณีที่มีปริมาณการไหลสูง ใช้วิธีการเปรียบเทียบกับการไหลข้ามฝายรูปตัววี

ผลการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล ดังรูป ก2-2 ทำให้
ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\text{ฝายตัวที่ 1} \quad Q_1 = 0.071(H - 9.7)^{1.43} \quad (\text{ก2-2})$$

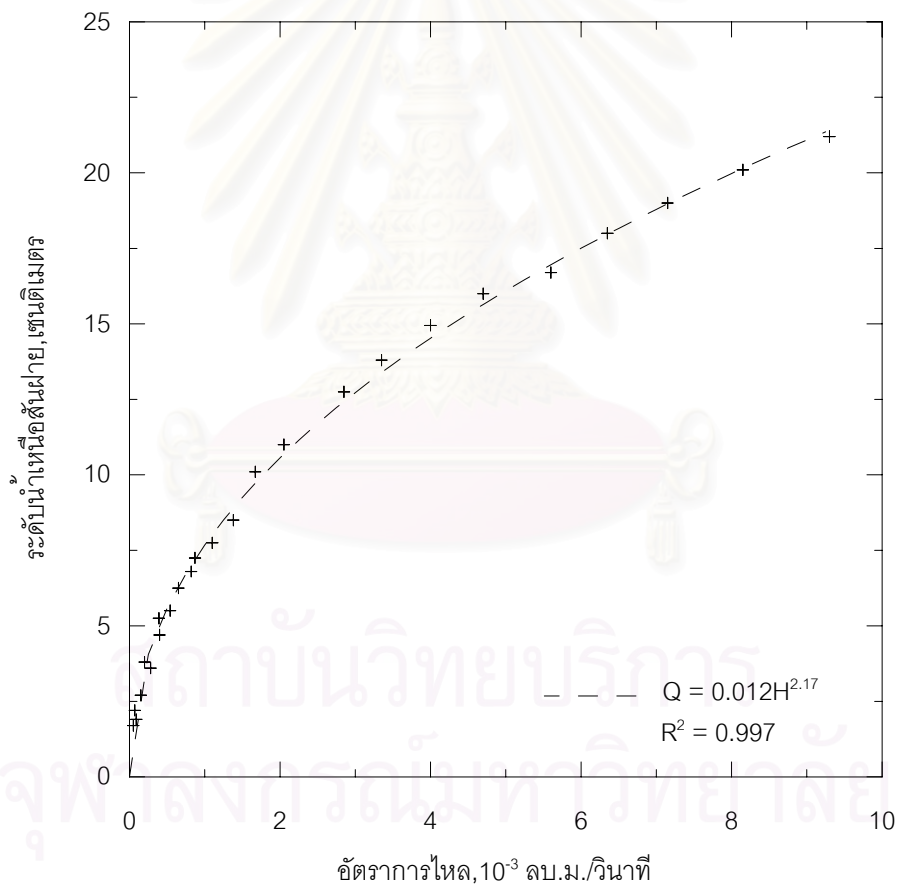
$$\text{ฝายตัวที่ 2} \quad Q_2 = 0.051(H - 9.7)^{1.54} \quad (\text{ก2-3})$$

$$\text{ฝายตัวที่ 3} \quad Q_3 = 0.054(H - 9.7)^{1.60} \quad (\text{ก2-4})$$

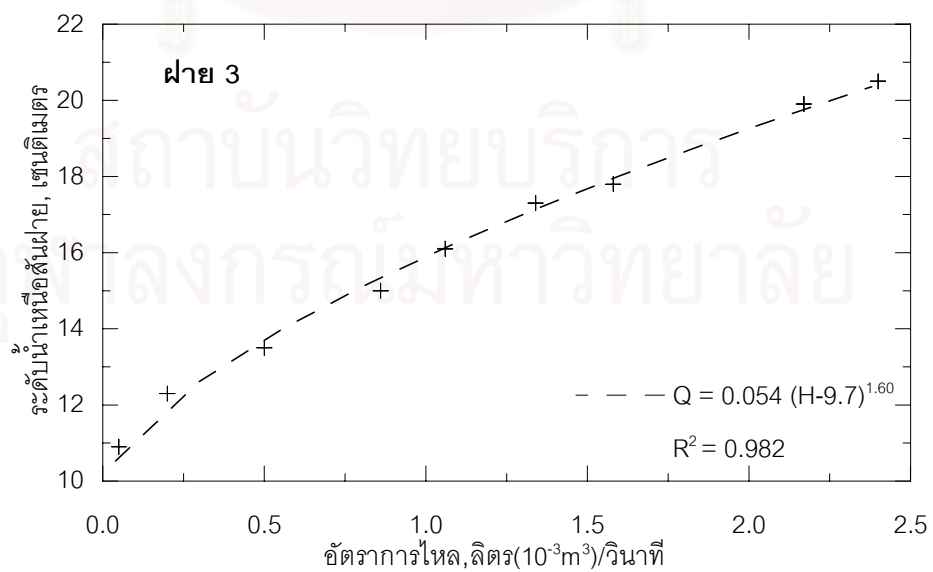
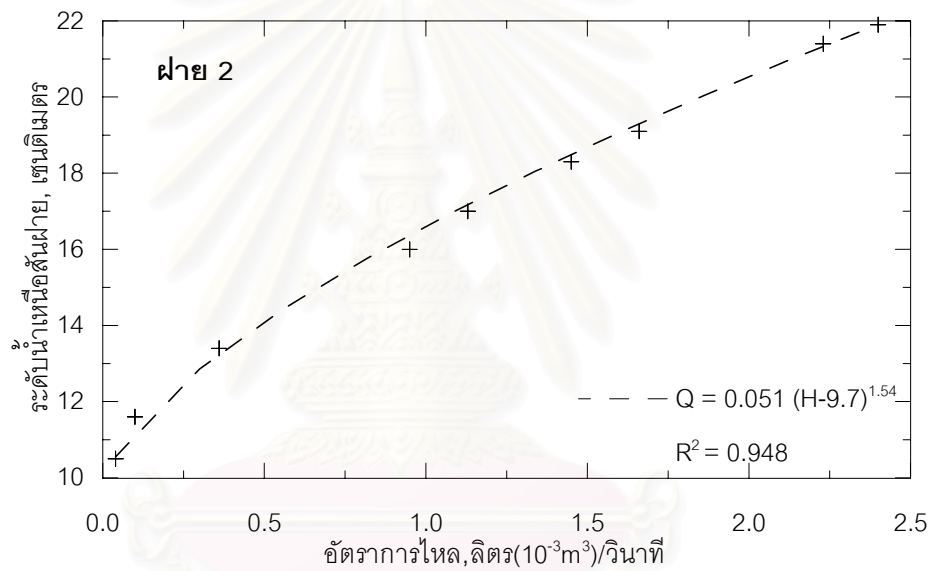
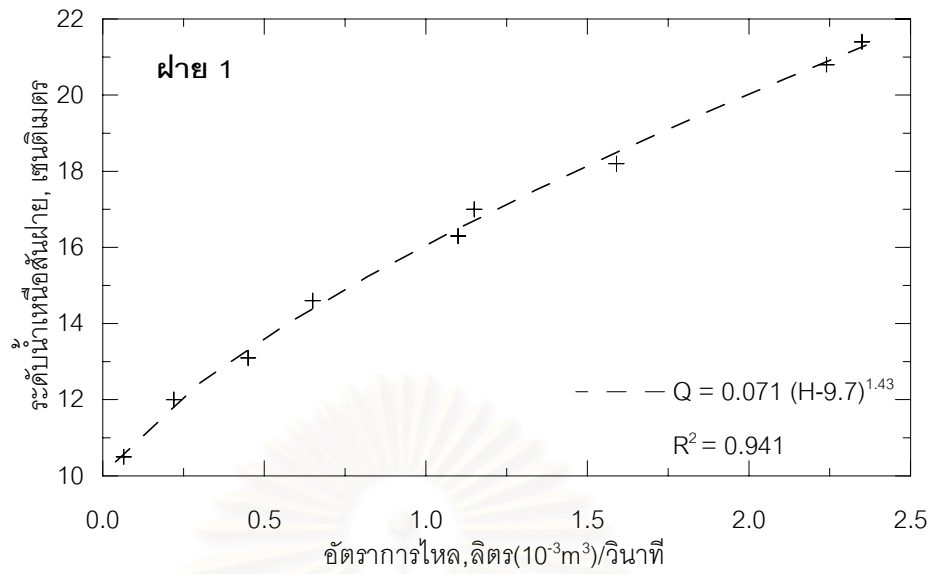
เมื่อ Q คือ อัตราการไหล มีหน่วยเป็น ลิตรต่อวินาที ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

H คือ ความสูงของระดับน้ำมีหน่วยเป็น เซนติเมตร

9.7 คือ ความสูงของฐานสันฝาย มีหน่วยเป็น เซนติเมตร



รูป ก2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปรียบเทียบฝายรูปตัววี



รูป ก2-2 กราฟความสัมพันธ์การปรับเทียบฝายสี่เหลี่ยม

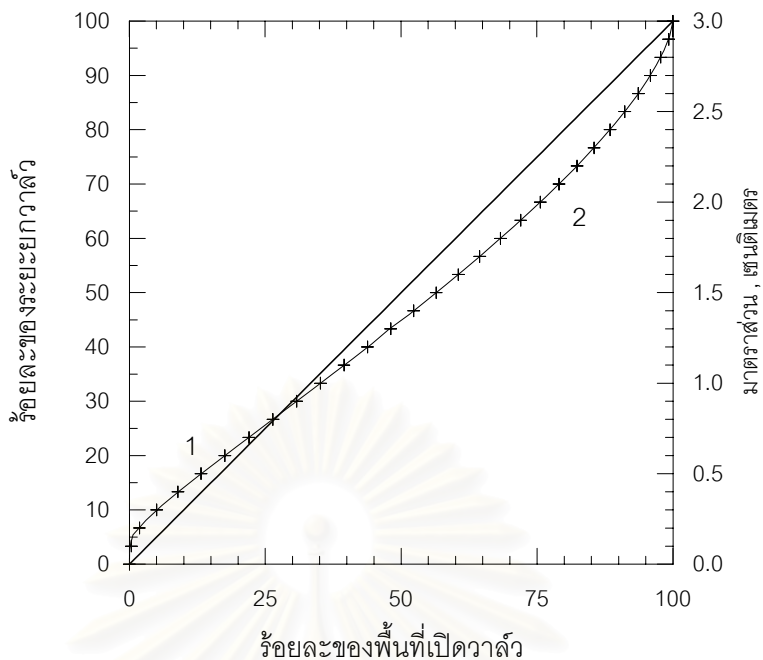
ก2.2 การเปรียบเทียบวาล์วควบคุมอัตราการไหล

วาล์วควบคุมอัตราการไหลในท่อของระบบระบายน้ำจากแบบจำลองอาคารระบายน้ำ ติดตั้งอยู่ด้านท้ายน้ำของท่อ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก1 เป็นเกทวาล์ว (Gate valve) ที่มีในท้องตลาด ขนาด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว ในการเปรียบเทียบทำการหาระยะยกของลิ้นวาล์ว ตามมาตราส่วนของชุดแสดงพื้นที่เปิดของวาล์ว (ภาคผนวก ก1.4) ซึ่งมีระยะเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร โดยการเปรียบเทียบเริ่มที่ขอบล่างของลิ้นวาล์วอยู่ตำแหน่งตรงกับขอบล่างภายในของตัวเรือนวาล์ว (ดูรายละเอียดของส่วนประกอบของวาล์วในรูป ก1-14) เป็นตำแหน่งเริ่มต้นที่มีระยะยก และพื้นที่เปิดของวาล์วเท่ากับ 0 จากนั้นทำการปรับให้มาตราส่วนของชุดแสดงพื้นที่เปิดของวาล์วเลื่อนขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงตำแหน่งที่ขอบล่างของลิ้นวาล์วตรงกับขอบบนของภายในของตัวเรือนวาล์ว เป็นตำแหน่งที่มีพื้นที่เปิดวาล์วเต็มที่ โดยมีระยะที่มาตราส่วนของชุดแสดงพื้นที่เปิดของวาล์วเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร และระยะยกของลิ้นวาล์วเท่ากับ 3.7 เซนติเมตร ดังรายละเอียดในตาราง ก2-2 ซึ่งมาตราส่วนของชุดแสดงพื้นที่เปิดของวาล์ว ทำการปรับให้เลื่อนครั้งละ 0.1 เซนติเมตร แล้ววัดระยะยกของลิ้นวาล์ว ด้วย เวอร์เนียคาลิเปอร์ ความละเอียด 1/10 มิลลิเมตร แล้วทำการคำนวณพื้นที่เปิดของวาล์ว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างการยกของลิ้นวาล์วและพื้นที่เปิดของวาล์วกับระยะที่มาตราส่วนของชุดแสดงพื้นที่เปิดของวาล์ว แสดงดังรูป ก2-3 ซึ่งความสัมพันธ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกของการเปิดวาล์วค่าการยกของวาล์วมีค่ามากกว่าพื้นที่เปิดวาล์วเมื่อเทียบเป็นร้อยละ แล้วลดลงเรื่อย ๆ จนเท่ากันที่ร้อยละ 27.6 และที่มาตราส่วนของชุดแสดงการเปิดวาล์วเท่ากับ 0.83 เซนติเมตร จากนั้นในส่วนที่สองพื้นที่การเปิดวาล์วมีค่ามากกว่าระยะยกวาล์วเมื่อเทียบเป็นร้อยละ และมีค่ามากที่สุดที่พื้นที่เปิดวาล์วเท่ากับร้อยละ 79 กับระยะยกของวาล์วเท่ากับร้อยละ 70 จากนั้นก็ลดลงจนเท่ากันที่การเปิดเต็มที่ของวาล์ว(100%)

ในส่วนของการทดลอง พื้นที่เปิดวาล์วที่ต้องการคือ 100% ,75.6% ,50.2% ,26.3% ในการเปิดของวาล์วมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 1/10$ เซนติเมตร ของระยะยกของมาตราส่วนของชุดแสดงพื้นที่เปิดวาล์ว ดังตาราง ก2-1 ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดของเครื่องมือ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือต่อไป

ตาราง ก2-1 การเปิดวาล์วที่ใช้ในการทดลอง

กรณีเปิดวาล์ว	มาตราส่วน	ระยะยก	%ยกวาล์ว	พื้นที่	% พื้นที่
100%	3.00	3.70	100.0	9.897	100.0
75%	2.00	2.47	66.7	7.480	75.6
50%	1.35	1.66	45.0	4.967	50.2
25%	0.80	0.99	26.7	2.612	26.3



รูป ก2-3 คุณลักษณะของเกทวาล์ว(Gate Valve)ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหล

ตาราง ก2-2 คุณลักษณะของเกทวาล์ว(Gate Valve)ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหล

มาตราส่วน	ระยะยก	% ยกวาล์ว	พื้นที่	% พื้นที่	มาตราส่วน	ระยะยก	% ยกวาล์ว	พื้นที่	% พื้นที่
3.00	3.70	100.0	9.897	100.0	1.40	1.73	46.7	5.176	52.3
2.90	3.58	96.7	9.819	99.2	1.30	1.60	43.3	4.758	48.1
2.80	3.45	93.3	9.673	97.7	1.20	1.48	40.0	4.334	43.8
2.70	3.33	90.0	9.485	95.8	1.10	1.36	36.7	3.907	39.5
2.60	3.21	86.7	9.266	93.6	1.00	1.23	33.3	3.477	35.1
2.50	3.08	83.3	9.020	91.1	0.90	1.11	30.0	3.046	30.8
2.40	2.96	80.0	8.751	88.4	0.80	0.99	26.7	2.612	26.3
2.30	2.84	76.7	8.460	85.5	0.70	0.86	23.3	2.176	22.0
2.20	2.71	73.3	8.149	82.3	0.60	0.74	20.0	1.738	17.6
2.10	2.59	70.0	7.822	79.0	0.50	0.62	16.7	1.303	13.2
2.00	2.47	66.7	7.480	75.6	0.40	0.49	13.3	0.882	8.9
1.90	2.34	63.3	7.125	72.0	0.30	0.37	10.0	0.496	5.0
1.80	2.22	60.0	6.757	68.3	0.20	0.25	6.7	0.182	1.8
1.70	2.10	56.7	6.378	64.4	0.10	0.12	3.3	0.035	0.4
1.60	1.97	53.3	5.987	60.5	0.00	0.00	0.0	0.000	0.0
1.50	1.85	50.0	5.586	56.4					

หมายเหตุ กรณีศึกษาวาล์ว 1.5 นิ้ว

ก2.3 การบันทึกข้อมูลการทดลอง

ในการบันทึกข้อมูลการทดลอง ในแต่ละกรณีและที่ระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำที่ระดับต่าง ๆ ต้องทำการบันทึกหลังจากที่ระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำนิ่ง และมีระดับตามที่กำหนดดังมีรายละเอียดของระดับต่าง ๆ ในหัวข้อที่ 3.4 จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าจากเครื่องวัดลงในใบบันทึกผลการทดลอง ดังรูป ก2-4 ซึ่งมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของการบันทึกกรณีการศึกษา ประกอบด้วย การบันทึกกรณีที่ทำทดลอง โดยมีรายละเอียดของกรณีต่าง ๆ ดังตาราง 3-1 ในหัวข้อ 3.4 ซึ่งมี 28 กรณี, ระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ เป็นส่วนที่บันทึกระดับน้ำที่ต้องการที่จะทำการทดลอง ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีระดับน้ำที่ทำทดลอง 9 ระดับ และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลอง ส่วนที่สอง ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองจากเครื่องมือวัด แบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกตารางบันทึกข้อมูลระดับน้ำเหนือสันฝาย เพื่อวัดอัตราการไหล ประกอบด้วย W1, W2, W3 และ W วัดอัตราการไหลโดยฝายสี่เหลี่ยมในท่อที่ 1, ท่อที่ 2, ท่อที่ 3 และวัดอัตราการไหลรวมโดยฝายรูปตัววี ตามลำดับ และในส่วนที่สอง ตารางบันทึกข้อมูลค่าความดันในแต่ละท่อ ประกอบด้วย P1, P2, P3 คือค่าความดันในท่อที่ 1, ท่อที่ 2 และท่อที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละท่อมีจุดวัดความดัน 4 จุด ดังมีรายละเอียดของจุดวัดและระยะติดตั้งในภาคผนวก ก1 ส่วนที่สาม ส่วนของการบันทึกพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จากการสังเกตพฤติกรรมการไหลในแบบจำลองชลศาสตร์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดการไหลแบบหมุนวน(Vortex), การมีฟองอากาศไหลเข้าท่อ เป็นต้น

กรณี 3P123V100

เปิดวาล์ว 100 % จำนวน 3 ท่อ ท่อที่ 1, 2, 3 อุณหภูมิ 26 °C

ระดับน้ำ 68.5 cm (ในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ)

อัตราการไหล

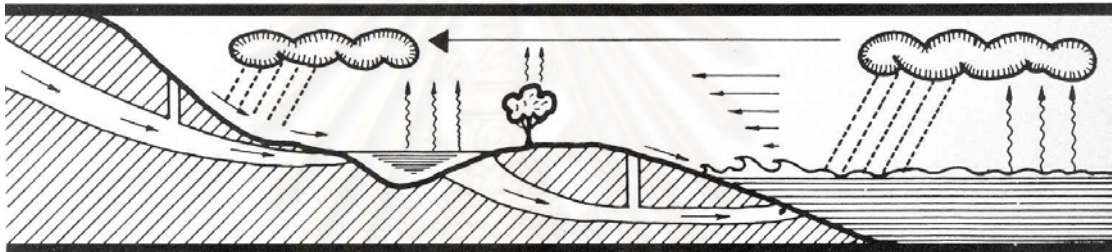
W1	W2	W3	W
22.0	22.1	20.9	27.3

ความดันในท่อ

P1				P2				P3			
4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
22.5	32.5	39.0	49.1	21.5	32.4	39.5	50.5	21.9	32.0	38.6	48.7

บันทึก

ภาคผนวก ข
กรณีการทดลองการไหล 1 ท่อ



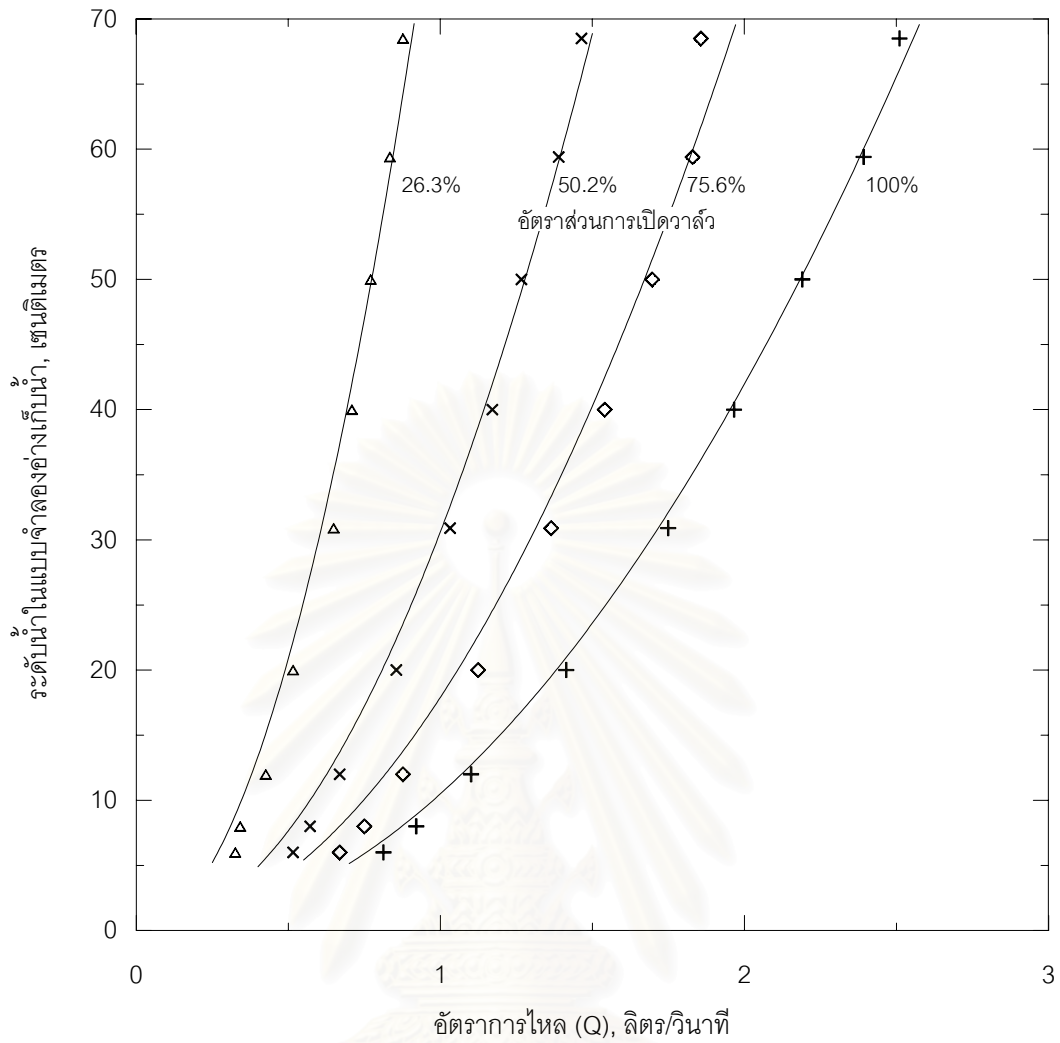
- ข1 การทดลองการไหลในท่อที่ 1
- ข2 การทดลองการไหลในท่อที่ 2
- ข3 การทดลองการไหลในท่อที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

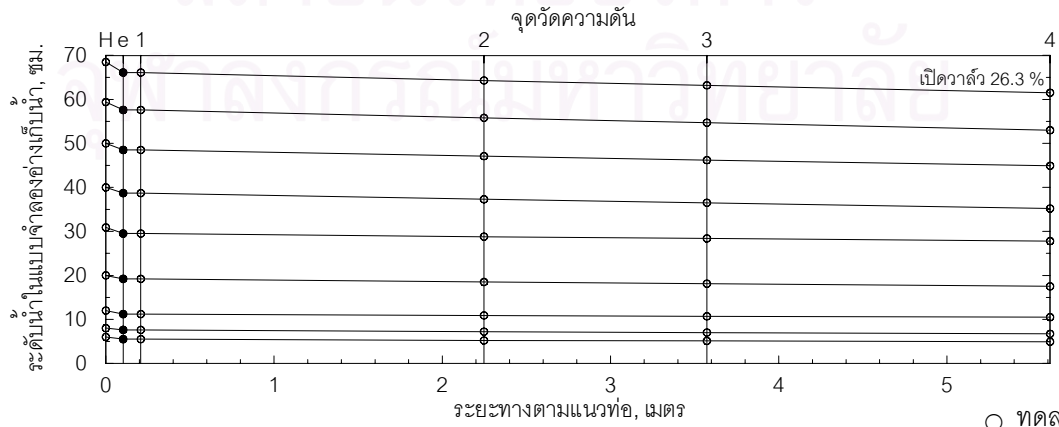
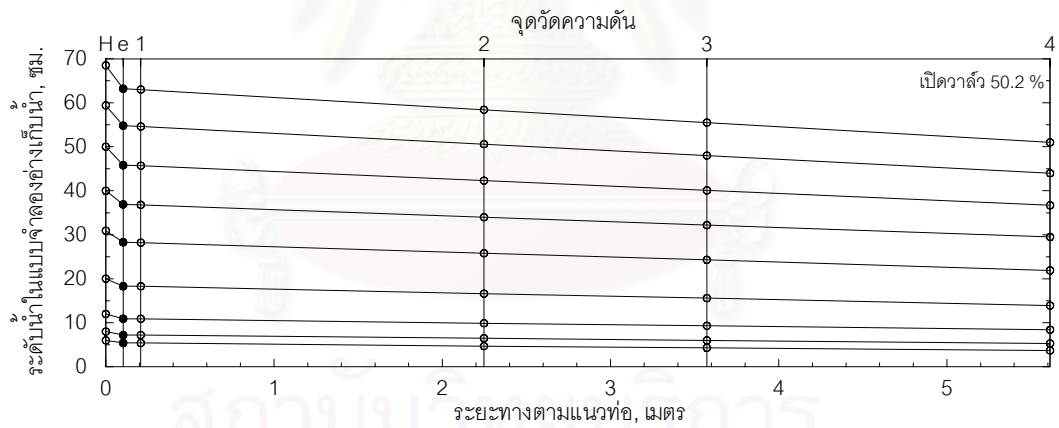
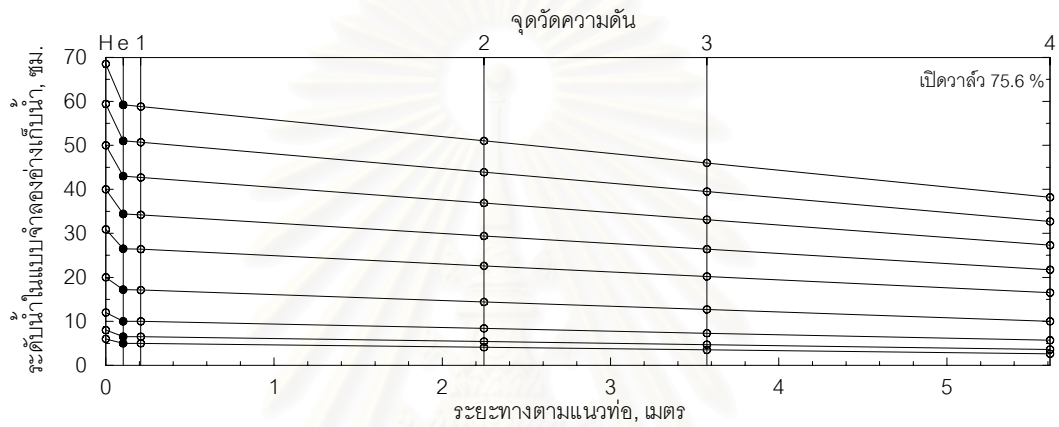
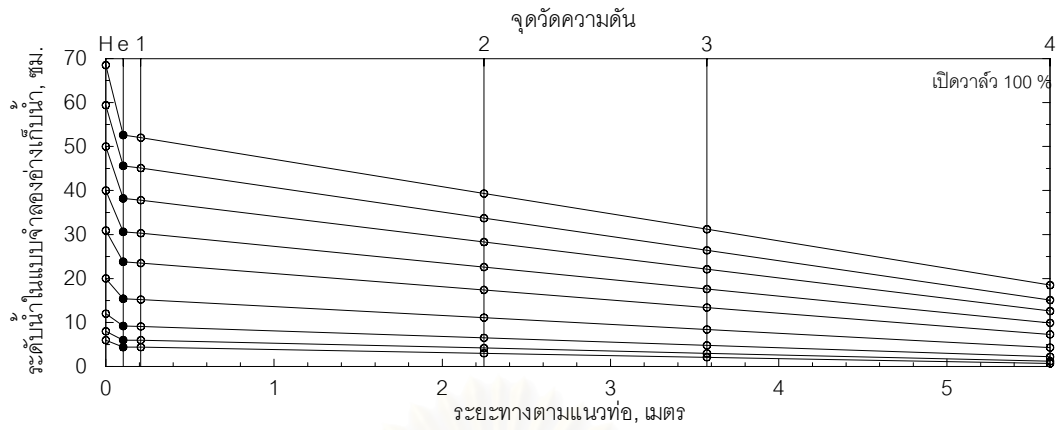
ตาราง ข1-1 ข้อมูลการทดลองของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 1 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
1.00 (100%)	68.5	2.51	0.00	0.00	2.51	2.50	52.0	39.3	31.2	18.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	2.39	0.00	0.00	2.39	2.40	45.1	33.7	26.4	15.1	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	27	
	50.0	2.19	0.00	0.00	2.19	2.18	37.8	28.3	22.1	12.6	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	27	
	40.0	1.97	0.00	0.00	1.97	1.97	30.3	22.6	17.6	9.9	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	27	
	30.9	1.75	0.00	0.00	1.75	1.77	23.5	17.4	13.4	7.3	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	27	
	20.0	1.41	0.00	0.00	1.41	1.41	15.2	11.1	8.4	4.3	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	27	
	12.0	1.10	0.00	0.00	1.10	1.12	9.1	6.5	4.8	2.2	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	27	
	8.0	0.92	0.00	0.00	0.92	0.95	6.0	4.2	3.0	1.2	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	26	
	6.0	0.81	0.00	0.00	0.81	0.84	4.4	3.0	2.1	0.7	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	27	
0.756 (75.6%)	68.5	1.86	0.00	0.00	1.86	1.85	58.8	51.0	46.0	38.2	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	26	
	59.4	1.83	0.00	0.00	1.83	1.81	50.7	43.9	39.5	32.7	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	27	
	50.0	1.70	0.00	0.00	1.70	1.70	42.7	36.9	33.1	27.3	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	27	
	40.0	1.54	0.00	0.00	1.54	1.55	34.2	29.4	26.4	21.7	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	27	
	30.9	1.36	0.00	0.00	1.36	1.38	26.4	22.6	20.2	16.5	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	27	
	20.0	1.12	0.00	0.00	1.12	1.12	17.1	14.4	12.7	10.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	27	
	12.0	0.88	0.00	0.00	0.88	0.90	10.0	8.4	7.3	5.7	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	27	
	8.0	0.75	0.00	0.00	0.75	0.74	6.5	5.4	4.7	3.6	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	27	
	6.0	0.67	0.00	0.00	0.67	0.67	5.0	4.1	3.5	2.6	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	27	
0.502 (50.2%)	68.5	1.46	0.00	0.00	1.46	1.48	63.0	58.4	55.5	51.0	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	27	
	59.4	1.39	0.00	0.00	1.39	1.41	54.6	50.6	48.0	44.0	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	27	
	50.0	1.27	0.00	0.00	1.27	1.28	45.7	42.3	40.1	36.7	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	27	
	40.0	1.17	0.00	0.00	1.17	1.22	36.8	34.0	32.2	29.5	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	27	
	30.9	1.03	0.00	0.00	1.03	1.06	28.2	25.8	24.3	21.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	27	
	20.0	0.86	0.00	0.00	0.86	0.90	18.3	16.6	15.6	13.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	27	
	12.0	0.67	0.00	0.00	0.67	0.67	10.9	9.9	9.3	8.4	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	27	
	8.0	0.57	0.00	0.00	0.57	0.56	7.2	6.5	6.0	5.3	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	27	
	6.0	0.52	0.00	0.00	0.52	0.52	5.4	4.7	4.3	3.7	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	27	
0.263 (26.3%)	68.5	0.88	0.00	0.00	0.88	0.92	66.1	64.3	63.2	61.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	27	
	59.4	0.83	0.00	0.00	0.83	0.87	57.6	55.8	54.7	53.0	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	27	
	50.0	0.77	0.00	0.00	0.77	0.77	48.5	47.1	46.2	44.9	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	27	
	40.0	0.71	0.00	0.00	0.71	0.72	38.7	37.3	36.5	35.2	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	27	
	30.9	0.65	0.00	0.00	0.65	0.65	29.5	28.8	28.4	27.8	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	27	
	20.0	0.52	0.00	0.00	0.52	0.52	19.2	18.5	18.1	17.5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	26	
	12.0	0.43	0.00	0.00	0.43	0.41	11.2	10.9	10.7	10.5	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	27	
	8.0	0.34	0.00	0.00	0.34	0.34	7.6	7.2	7.0	6.7	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	27	
	6.0	0.33	0.00	0.00	0.33	0.31	5.5	5.2	5.1	4.9	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	27	

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง
 ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ



รูป ข1-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหลของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 1 ท่อ



○ ทดลอง

● คำนวณ

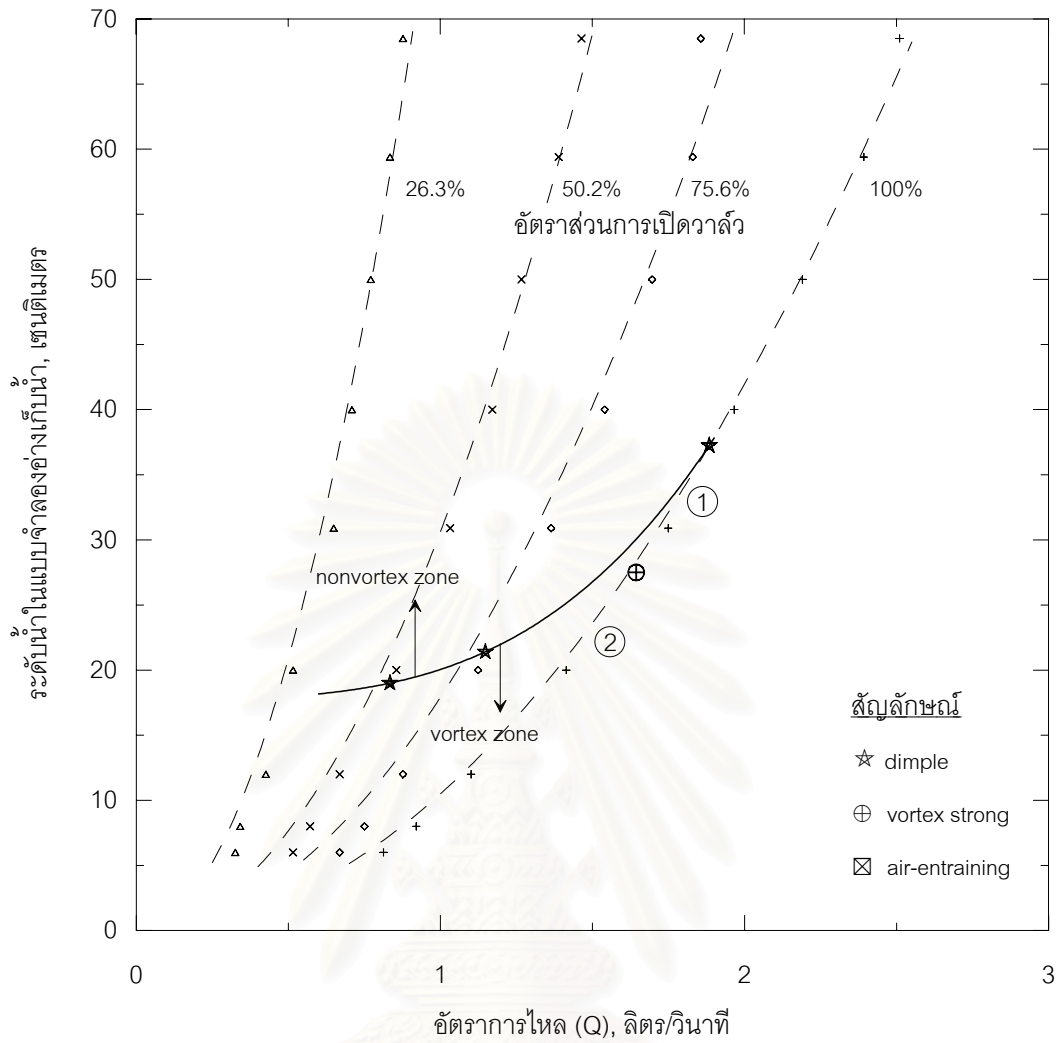
รูป ข1-2 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 1 ท่อ

ตาราง ข1-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนของท่อที่ 1 กรณีการไหล 1 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	37.3	19.6	9.7	9.7	18.0	32.4	1.88	0.00	0.00	1.88	1.89
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	21.4	16.7	9.7	9.7	15.9	16.5	1.15	0.00	0.00	1.15	1.15
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	19.0	15.3	9.7	9.7	14.8	14.1	0.83	0.00	0.00	0.83	0.84
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	27.5	18.7	9.7	9.7	17.4	22.6	1.64	0.00	0.00	1.64	1.66
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
- W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี
- W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
- ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ
- Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี
- Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม
- S : ความลึกจมน้ำ(submergence)



รูป ข1-3 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 1 กรณีการไหล 1 ท่อ

ตาราง ข1-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 1 กรณีการไหล 1 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.51	71.5	2.97	55.6	55.0	42.3	34.2	21.5	61.6	13.9	32.8	15.9	2.0	0.145	34.1	0.0196	7.26	2.6	2.36	0.080
	2.39	62.4	3.03	48.6	48.1	36.7	29.4	18.1	56.3	12.6	29.8	13.8	1.2	0.094	30.5	0.0197	6.92	0.9	2.36	0.032
	2.19	53.0	3.01	41.2	40.8	31.3	25.1	15.6	47.5	10.6	25.0	11.8	1.2	0.116	25.6	0.0198	6.34	1.2	2.36	0.049
	1.97	43.0	3.00	33.6	33.3	25.6	20.6	12.9	38.4	8.5	20.1	9.4	0.9	0.103	20.7	0.0199	5.69	1.3	2.36	0.065
	1.75	33.9	3.00	26.8	26.5	20.4	16.4	10.3	30.6	6.7	15.9	7.1	0.4	0.053	16.5	0.0200	5.06	1.1	2.36	0.071
	1.41	23.0	2.95	18.4	18.2	14.1	11.4	7.3	20.6	4.4	10.4	4.6	0.2	0.044	11.1	0.0206	4.09	1.3	2.36	0.126
	1.10	15.0	2.84	12.2	12.1	9.5	7.8	5.2	13.0	2.7	6.3	2.8	0.1	0.048	7.0	0.0215	3.19	1.6	2.36	0.248
	0.92	11.0	2.78	9.0	9.0	7.2	6.0	4.2	9.1	1.9	4.4	2.0	0.1	0.071	4.8	0.0214	2.66	1.7	2.36	0.377
0.81	9.0	2.71	7.4	7.4	6.0	5.1	3.7	6.9	1.5	3.4	1.6	0.1	0.099	3.7	0.0211	2.35	1.7	2.36	0.500	
0.756 (75.6%)	1.86	71.5	2.20	62.2	61.8	54.0	49.0	41.2	38.7	7.6	31.4	9.3	1.7	0.224	21.0	0.0225	5.37	17.4	4.13	0.555
	1.83	62.4	2.32	54.0	53.7	46.9	42.5	35.7	33.9	7.4	30.5	8.4	1.0	0.138	18.3	0.0202	5.29	12.6	4.13	0.414
	1.70	53.0	2.33	46.0	45.7	39.9	36.1	30.3	29.1	6.3	26.2	7.0	0.7	0.104	15.7	0.0202	4.91	10.4	4.13	0.399
	1.54	43.0	2.35	37.4	37.2	32.4	29.4	24.7	23.2	5.2	21.6	5.6	0.4	0.071	12.7	0.0198	4.46	8.3	4.13	0.386
	1.36	33.9	2.34	29.5	29.4	25.6	23.2	19.5	18.4	4.1	16.9	4.4	0.3	0.073	10.0	0.0200	3.95	6.7	4.13	0.393
	1.12	23.0	2.34	20.2	20.1	17.4	15.7	13.0	13.2	2.8	11.5	2.8	0.0	0.005	7.2	0.0211	3.25	4.3	4.13	0.372
	0.88	15.0	2.26	13.0	13.0	11.4	10.3	8.7	8.2	1.7	7.0	2.0	0.3	0.180	4.3	0.0212	2.54	3.4	4.13	0.485
	0.75	11.0	2.26	9.5	9.5	8.4	7.7	6.6	5.4	1.2	5.1	1.5	0.3	0.209	2.9	0.0194	2.17	2.7	4.13	0.530
0.67	9.0	2.23	8.0	8.0	7.1	6.5	5.6	4.5	1.0	4.1	1.0	0.0	0.013	2.4	0.0202	1.94	2.5	4.13	0.616	
0.502 (50.2%)	1.46	71.5	1.73	66.2	66.0	61.4	58.5	54.0	22.4	4.7	44.5	5.3	0.6	0.122	12.2	0.0210	4.24	14.3	9.41	0.321
	1.39	62.4	1.76	57.8	57.6	53.6	51.0	47.0	20.0	4.3	40.0	4.6	0.3	0.082	10.8	0.0207	4.02	11.2	9.41	0.281
	1.27	53.0	1.74	48.8	48.7	45.3	43.1	39.7	16.9	3.5	33.3	4.2	0.7	0.188	9.1	0.0211	3.66	10.0	9.41	0.300
	1.17	43.0	1.79	39.9	39.8	37.0	35.2	32.5	13.6	3.0	28.4	3.1	0.1	0.025	7.4	0.0201	3.39	7.1	9.41	0.249
	1.03	33.9	1.77	31.3	31.2	28.8	27.3	24.9	11.7	2.3	22.1	2.6	0.3	0.107	6.4	0.0222	2.99	5.2	9.41	0.233
	0.86	23.0	1.78	21.3	21.3	19.6	18.6	16.9	8.0	1.6	15.2	1.7	0.1	0.054	4.4	0.0224	2.48	3.3	9.41	0.220
	0.67	15.0	1.73	13.9	13.9	12.9	12.3	11.4	4.5	1.0	9.3	1.1	0.1	0.115	2.5	0.0210	1.94	3.1	9.41	0.334
	0.57	11.0	1.72	10.2	10.2	9.5	9.0	8.3	3.6	0.7	6.8	0.8	0.1	0.111	1.9	0.0221	1.65	2.2	9.41	0.331
0.52	9.0	1.72	8.4	8.4	7.7	7.3	6.7	3.0	0.6	5.5	0.6	0.0	0.024	1.7	0.0240	1.49	1.8	9.41	0.322	
0.263 (26.3%)	0.88	71.5	1.04	69.1	69.1	67.3	66.2	64.5	8.4	1.7	57.6	2.4	0.7	0.416	4.6	0.0225	2.54	8.6	33.99	0.149
	0.83	62.4	1.06	60.6	60.6	58.8	57.7	56.0	8.4	1.5	52.1	1.8	0.3	0.174	4.6	0.0248	2.41	5.4	33.99	0.104
	0.77	53.0	1.06	51.5	51.5	50.1	49.2	47.9	6.7	1.3	44.5	1.5	0.2	0.145	3.6	0.0229	2.23	4.7	33.99	0.105
	0.71	43.0	1.08	41.7	41.7	40.3	39.5	38.2	6.3	1.1	37.7	1.3	0.2	0.172	3.5	0.0260	2.05	1.6	33.99	0.043
	0.65	33.9	1.11	32.5	32.5	31.8	31.4	30.8	3.0	0.9	31.6	1.4	0.5	0.507	1.7	0.0151	1.88	0.1	33.99	0.005
	0.52	23.0	1.07	22.2	22.2	21.5	21.1	20.5	3.0	0.6	19.9	0.8	0.2	0.366	1.7	0.0240	1.49	1.2	33.99	0.059
	0.43	15.0	1.10	14.2	14.2	13.9	13.7	13.5	1.2	0.4	13.6	0.8	0.4	1.001	0.7	0.0148	1.23	0.3	33.99	0.023
	0.34	11.0	1.03	10.6	10.6	10.2	10.0	9.7	1.5	0.3	8.7	0.4	0.1	0.555	0.9	0.0287	0.99	1.2	33.99	0.139
0.33	9.0	1.08	8.5	8.5	8.2	8.1	7.9	0.8	0.2	7.9	0.5	0.3	1.141	0.6	0.0205	0.94	0.2	33.99	0.025	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ; $Q=KH_T^{0.5}$

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

R : เลขเรย์โนลด์; $R = vD/V$

ตาราง ข1-4 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนของท่อที่ 1 กรณีการไหล 1 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃
	ระยะยก	%	พื้นที่	% (100%)													
	cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว													
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	37.3	1.88	0.00	0.00	1.24	0.00	0.00	32.4	7.35	1.89	0.00	0.00
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	21.4	1.15	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	16.5	3.75	1.15	0.00	0.00
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	19.0	0.83	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	14.1	3.20	0.83	0.00	0.00
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	27.5	1.64	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	22.6	5.14	1.65	0.00	0.00
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

d : เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ

Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

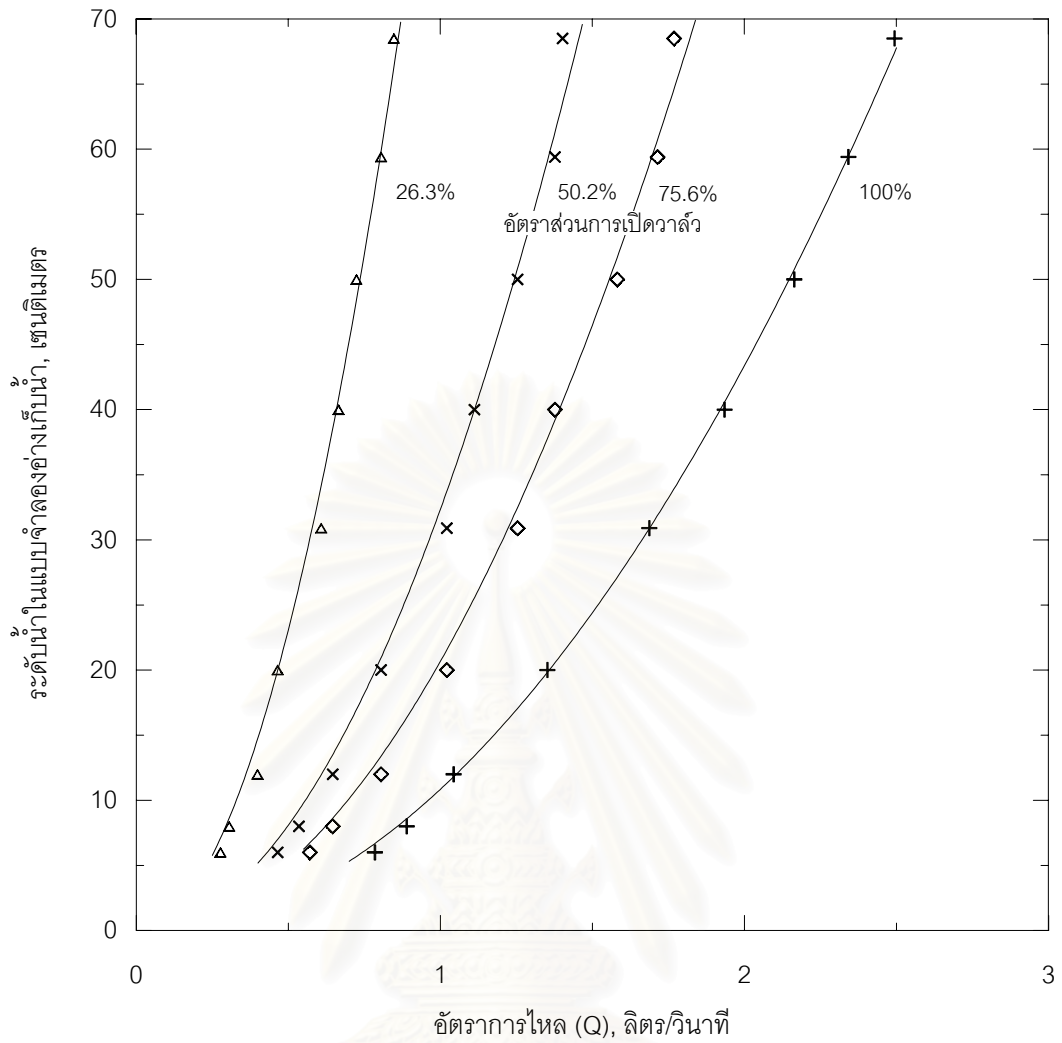
S : ความลึกจมน้ำ(submergence)

F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ตาราง ข2-1 ข้อมูลการทดลองของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 1 ท่อ

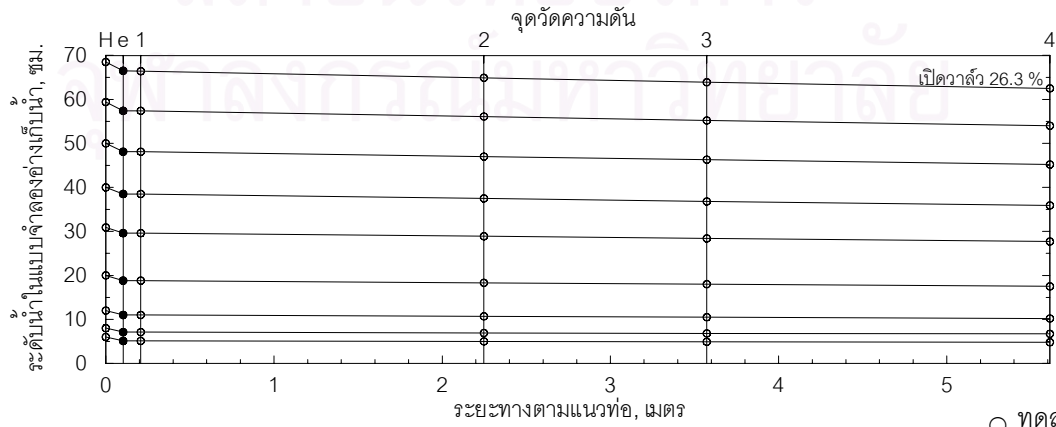
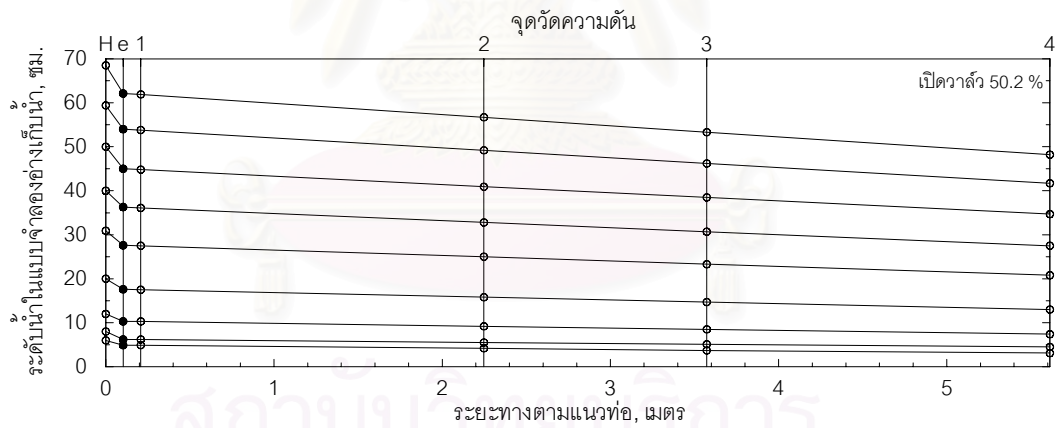
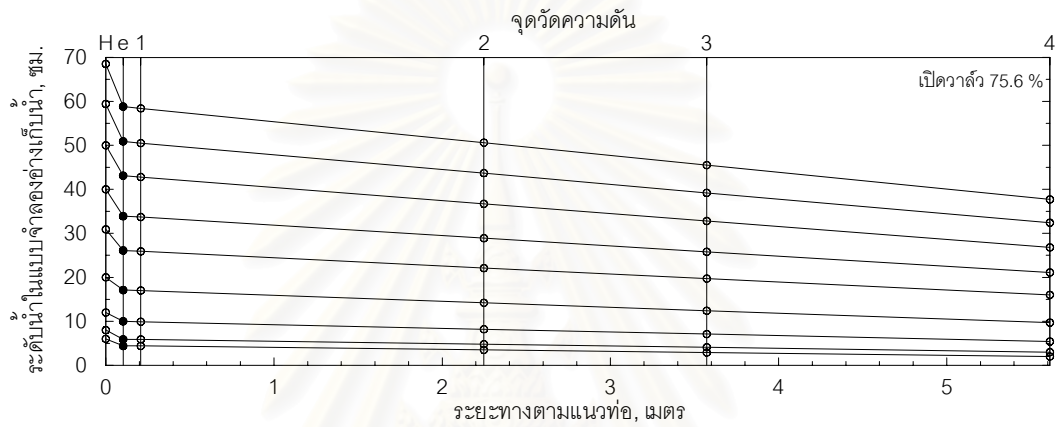
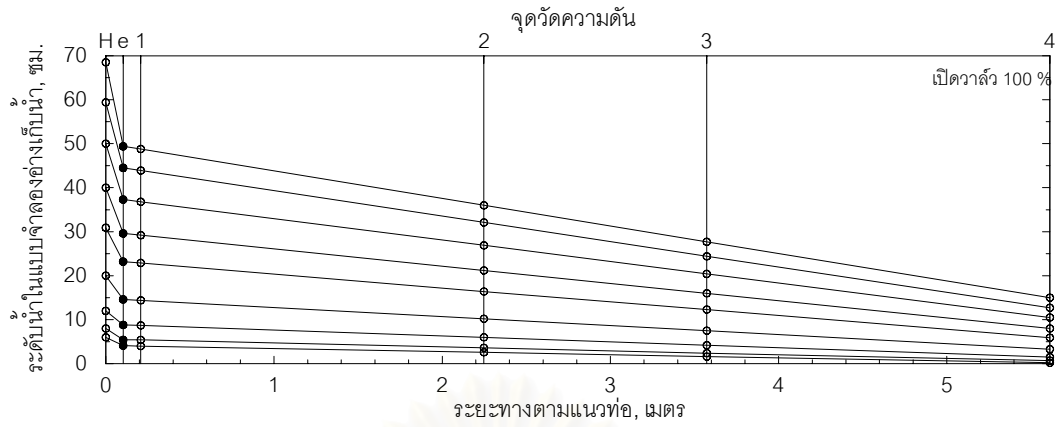
อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
1.00 (100%)	68.5	0.00	2.49	0.00	2.49	2.50	68.5	68.5	68.5	68.5	50.8	37.9	29.6	16.7	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	0.00	2.34	0.00	2.34	2.36	59.4	59.4	59.4	59.4	44.4	32.7	25.2	13.5	59.4	59.4	59.4	59.4	27
	50.0	0.00	2.16	0.00	2.16	2.18	50.0	50.0	50.0	50.0	37.4	27.6	21.2	11.4	50.0	50.0	50.0	50.0	27
	40.0	0.00	1.93	0.00	1.93	1.93	40.0	40.0	40.0	40.0	29.7	21.7	16.6	8.7	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	0.00	1.69	0.00	1.69	1.70	30.9	30.9	30.9	30.9	23.0	16.6	12.5	6.2	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	0.00	1.35	0.00	1.35	1.38	20.0	20.0	20.0	20.0	14.7	10.5	7.8	3.6	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	0.00	1.04	0.00	1.04	1.06	12.0	12.0	12.0	12.0	8.7	6.0	4.2	1.5	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.00	0.89	0.00	0.89	0.90	8.0	8.0	8.0	8.0	5.7	3.8	2.7	0.8	8.0	8.0	8.0	8.0	26
	6.0	0.00	0.78	0.00	0.78	0.79	6.0	6.0	6.0	6.0	4.2	2.6	1.7	0.2	6.0	6.0	6.0	6.0	27
0.756 (75.6%) 75%	68.5	0.00	1.77	0.00	1.77	1.77	68.5	68.5	68.5	68.5	58.2	50.4	45.4	37.7	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	0.00	1.71	0.00	1.71	1.74	59.4	59.4	59.4	59.4	50.7	43.9	39.5	32.7	59.4	59.4	59.4	59.4	27
	50.0	0.00	1.58	0.00	1.58	1.59	50.0	50.0	50.0	50.0	42.6	36.6	32.7	26.8	50.0	50.0	50.0	50.0	27
	40.0	0.00	1.38	0.00	1.38	1.38	40.0	40.0	40.0	40.0	33.9	29.2	26.1	21.4	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	0.00	1.25	0.00	1.25	1.28	30.9	30.9	30.9	30.9	26.2	22.4	20.0	16.2	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	0.00	1.02	0.00	1.02	1.04	20.0	20.0	20.0	20.0	16.9	14.1	12.3	9.6	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	0.00	0.81	0.00	0.81	0.82	12.0	12.0	12.0	12.0	10.1	8.3	7.2	5.5	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.00	0.65	0.00	0.65	0.65	8.0	8.0	8.0	8.0	6.2	5.0	4.3	3.1	8.0	8.0	8.0	8.0	26
	6.0	0.00	0.57	0.00	0.57	0.59	6.0	6.0	6.0	6.0	4.7	3.7	3.1	2.2	6.0	6.0	6.0	6.0	27
0.502 (50.2%) 50%	68.5	0.00	1.40	0.00	1.40	1.41	68.5	68.5	68.5	68.5	61.9	56.7	53.4	48.3	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	0.00	1.38	0.00	1.38	1.38	59.4	59.4	59.4	59.4	53.7	49.1	46.2	41.7	59.4	59.4	59.4	59.4	27
	50.0	0.00	1.25	0.00	1.25	1.28	50.0	50.0	50.0	50.0	44.9	41.0	38.6	34.7	50.0	50.0	50.0	50.0	27
	40.0	0.00	1.11	0.00	1.11	1.12	40.0	40.0	40.0	40.0	36.0	32.7	30.6	27.4	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	0.00	1.02	0.00	1.02	1.04	30.9	30.9	30.9	30.9	27.7	25.2	23.5	21.1	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	0.00	0.81	0.00	0.81	0.79	20.0	20.0	20.0	20.0	17.7	15.9	14.8	13.1	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	0.00	0.65	0.00	0.65	0.65	12.0	12.0	12.0	12.0	10.5	9.3	8.6	7.5	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.00	0.53	0.00	0.53	0.54	8.0	8.0	8.0	8.0	6.7	5.9	5.5	4.8	8.0	8.0	8.0	8.0	26
	6.0	0.00	0.46	0.00	0.46	0.49	6.0	6.0	6.0	6.0	5.1	4.4	3.9	3.2	6.0	6.0	6.0	6.0	27
0.263 (26.3%) 25%	68.5	0.00	0.85	0.00	0.85	0.84	68.5	68.5	68.5	68.5	66.5	65.0	64.0	62.5	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	0.00	0.81	0.00	0.81	0.82	59.4	59.4	59.4	59.4	57.5	56.1	55.3	54.0	59.4	59.4	59.4	59.4	27
	50.0	0.00	0.72	0.00	0.72	0.74	50.0	50.0	50.0	50.0	48.2	47.0	46.3	45.2	50.0	50.0	50.0	50.0	27
	40.0	0.00	0.67	0.00	0.67	0.67	40.0	40.0	40.0	40.0	38.5	37.5	36.8	35.8	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	0.00	0.61	0.00	0.61	0.61	30.9	30.9	30.9	30.9	29.8	29.2	28.9	28.3	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	0.00	0.46	0.00	0.46	0.49	20.0	20.0	20.0	20.0	19.0	18.5	18.1	17.7	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	0.00	0.40	0.00	0.40	0.41	12.0	12.0	12.0	12.0	11.2	11.0	10.9	10.8	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.00	0.31	0.00	0.31	0.33	8.0	8.0	8.0	8.0	7.4	7.1	7.0	6.8	8.0	8.0	8.0	8.0	26
	6.0	0.00	0.28	0.00	0.28	0.26	6.0	6.0	6.0	6.0	5.3	5.1	5.0	4.8	6.0	6.0	6.0	6.0	27

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง
 ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ



รูป ข2-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหลของท่อที่ 2
ในกรณีการไหล 1 ท่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



○ ทดลอง

● คำนวณ

รูป ข2-2 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 1 ท่อ

ตาราง ข2-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนของท่อที่ 2 กรณีการไหล 1 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	36.0	9.7	19.7	9.7	17.7	31.1	0.00	1.77	0.00	1.77	1.77
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	30.0	9.7	17.5	9.7	16.1	25.1	0.00	1.21	0.00	1.21	1.22
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	21.0	9.7	15.9	9.7	14.8	16.1	0.00	0.85	0.00	0.85	0.84
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	19.0	9.7	17.9	9.7	16.4	14.1	0.00	1.30	0.00	1.30	1.31
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	16.0	9.7	17.4	9.7	16.0	11.1	0.00	1.18	0.00	1.18	1.18
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี

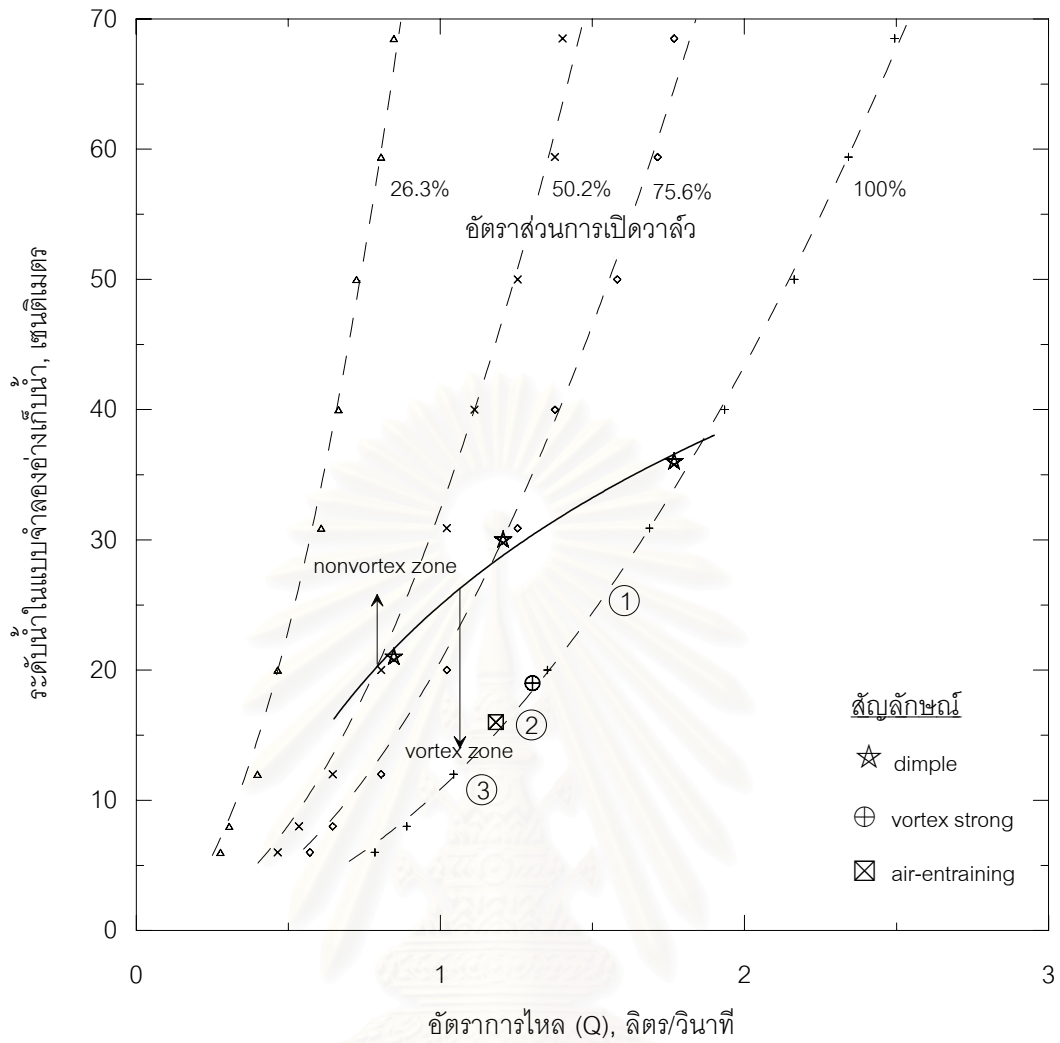
W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ

Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี

Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม

S : ความลึกจมน้ำ(submergence)



รูป ข2-3 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 2 กรณีการไหล 1 ท่อ

ตาราง ข2-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 2 กรณีการไหล 1 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า	จุด 1	จุด 2	จุด 3	จุด 4												
1.00 (100%)	2.49	71.5	2.95	54.4	53.8	40.9	32.6	19.7	62.9	13.7	32.3	17.1	3.4	0.248	34.8	0.0202	7.22	1.1	2.36	0.033
	2.34	62.4	2.96	48.0	47.4	35.7	28.2	16.5	58.0	12.1	28.5	14.4	2.3	0.191	31.5	0.0208	6.78	0.1	2.36	0.002
	2.16	53.0	2.97	40.9	40.4	30.6	24.2	14.4	49.1	10.3	24.4	12.1	1.8	0.172	26.5	0.0205	6.26	0.4	2.36	0.015
	1.93	43.0	2.95	33.1	32.7	24.7	19.6	11.7	39.3	8.2	19.5	9.9	1.7	0.200	21.4	0.0207	5.60	0.5	2.36	0.025
	1.69	33.9	2.90	26.3	26.0	19.6	15.5	9.2	31.5	6.3	14.8	7.6	1.3	0.211	17.1	0.0218	4.88	0.7	2.36	0.045
	1.35	23.0	2.82	17.9	17.7	13.5	10.8	6.6	20.8	4.0	9.5	5.1	1.1	0.266	11.3	0.0224	3.91	1.1	2.36	0.118
	1.04	15.0	2.69	11.8	11.7	9.0	7.2	4.5	13.6	2.4	5.7	3.2	0.8	0.333	7.3	0.0245	3.02	1.2	2.36	0.218
	0.89	11.0	2.68	8.7	8.7	6.8	5.7	3.8	8.9	1.7	4.1	2.3	0.6	0.319	5.0	0.0226	2.57	1.4	2.36	0.347
	0.78	9.0	2.62	7.2	7.2	5.6	4.7	3.2	7.2	1.4	3.2	1.8	0.4	0.326	4.1	0.0237	2.27	1.4	2.36	0.423
0.756 (75.6%)	1.77	71.5	2.09	61.5	61.2	53.4	48.4	40.7	38.4	6.9	28.5	10.0	3.1	0.451	20.9	0.0242	5.12	19.1	4.13	0.672
	1.71	62.4	2.17	54.0	53.7	46.9	42.5	35.7	33.9	6.5	26.8	8.4	1.9	0.297	18.4	0.0226	4.96	15.4	4.13	0.577
	1.58	53.0	2.17	45.9	45.6	39.6	35.7	29.8	29.7	5.5	22.8	7.1	1.6	0.288	16.1	0.0234	4.58	12.5	4.13	0.551
	1.38	43.0	2.10	37.1	36.9	32.2	29.1	24.4	23.6	4.2	17.3	5.9	1.7	0.412	12.7	0.0244	3.98	11.3	4.13	0.656
	1.25	33.9	2.15	29.3	29.2	25.4	23.0	19.2	18.7	3.5	14.3	4.6	1.1	0.327	10.2	0.0234	3.63	8.3	4.13	0.583
	1.02	23.0	2.13	20.0	19.9	17.1	15.3	12.6	13.6	2.3	9.5	3.0	0.7	0.305	7.4	0.0259	2.95	5.4	4.13	0.570
	0.81	15.0	2.08	13.1	13.1	11.3	10.2	8.5	8.4	1.4	5.9	1.9	0.5	0.329	4.7	0.0261	2.33	4.0	4.13	0.682
	0.65	11.0	1.95	9.2	9.2	8.0	7.3	6.1	5.6	0.9	3.8	1.8	0.9	0.957	3.2	0.0272	1.87	3.2	4.13	0.848
	0.57	9.0	1.90	7.7	7.7	6.7	6.1	5.2	4.5	0.7	3.0	1.3	0.6	0.808	2.5	0.0282	1.65	2.9	4.13	0.993
0.502 (50.2%)	1.40	71.5	1.66	65.1	64.9	59.7	56.4	51.3	25.4	4.3	40.8	6.4	2.1	0.477	13.9	0.0255	4.06	14.9	9.41	0.365
	1.38	62.4	1.74	56.9	56.7	52.1	49.2	44.7	22.4	4.2	39.3	5.5	1.3	0.316	12.2	0.0233	3.98	9.6	9.41	0.243
	1.25	53.0	1.72	48.0	47.9	44.0	41.6	37.7	18.9	3.5	32.6	5.0	1.5	0.442	10.4	0.0238	3.63	8.5	9.41	0.262
	1.11	43.0	1.70	39.1	39.0	35.7	33.6	30.4	16.0	2.7	25.7	3.9	1.2	0.430	8.8	0.0257	3.22	7.5	9.41	0.291
	1.02	33.9	1.75	30.8	30.7	28.2	26.5	24.1	12.5	2.3	21.6	3.1	0.8	0.349	6.7	0.0235	2.95	4.8	9.41	0.221
	0.81	23.0	1.68	20.7	20.7	18.9	17.8	16.1	8.4	1.4	13.4	2.3	0.9	0.609	4.7	0.0261	2.33	4.1	9.41	0.303
	0.65	15.0	1.67	13.5	13.5	12.3	11.6	10.5	5.4	0.9	8.7	1.5	0.6	0.631	3.1	0.0264	1.87	2.8	9.41	0.319
	0.53	11.0	1.61	9.7	9.7	8.9	8.5	7.8	3.2	0.6	5.9	1.3	0.7	1.062	1.9	0.0241	1.55	2.5	9.41	0.421
	0.46	9.0	1.55	8.1	8.1	7.4	6.9	6.2	3.6	0.5	4.5	0.9	0.4	0.889	1.9	0.0328	1.35	2.2	9.41	0.489
0.263 (26.3%)	0.85	71.5	1.00	69.5	69.5	68.0	67.0	65.5	7.5	1.6	53.8	2.0	0.4	0.265	4.1	0.0206	2.45	13.3	33.99	0.248
	0.81	62.4	1.02	60.5	60.5	59.1	58.3	57.0	6.3	1.4	48.6	1.9	0.5	0.329	3.6	0.0198	2.33	9.8	33.99	0.203
	0.72	53.0	0.99	51.2	51.2	50.0	49.3	48.2	5.4	1.2	39.3	1.8	0.6	0.557	3.1	0.0210	2.10	10.1	33.99	0.256
	0.67	43.0	1.01	41.5	41.5	40.5	39.8	38.8	5.1	1.0	33.2	1.5	0.5	0.538	2.8	0.0227	1.92	6.6	33.99	0.200
	0.61	33.9	1.04	32.8	32.8	32.2	31.9	31.3	2.6	0.8	27.7	1.1	0.3	0.349	1.5	0.0146	1.76	4.4	33.99	0.159
	0.46	23.0	0.97	22.0	22.0	21.5	21.1	20.7	2.5	0.5	16.2	1.0	0.5	1.099	1.3	0.0229	1.35	5.0	33.99	0.307
	0.40	15.0	1.03	14.2	14.2	14.0	13.9	13.8	0.6	0.4	11.9	0.8	0.4	1.285	0.4	0.0093	1.15	2.2	33.99	0.189
	0.31	11.0	0.92	10.4	10.4	10.1	10.0	9.8	0.8	0.2	7.0	0.6	0.4	1.910	0.6	0.0227	0.89	3.0	33.99	0.428
	0.28	9.0	0.92	8.3	8.3	8.1	8.0	7.8	0.8	0.2	5.7	0.7	0.5	3.141	0.5	0.0235	0.80	2.2	33.99	0.387

หมายเหตุ

 K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อR : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/\nu$

ตาราง ข2-4 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนของท่อที่ 2 กรณีการไหล 1 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃	
	ระยะยก	%	พื้นที่	% (100%)														
	cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว														
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	36.0	0.00	1.77	0.00	0.00	1.16	0.00	31.1	7.07	0.00	1.77	0.00	
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	30.0	0.00	1.21	0.00	0.00	0.79	0.00	25.1	5.70	0.00	1.21	0.00	
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	21.0	0.00	0.85	0.00	0.00	0.56	0.00	16.1	3.66	0.00	0.85	0.00	
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	19.0	0.00	1.30	0.00	0.00	0.86	0.00	14.1	3.20	0.00	1.30	0.00	
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	16.0	0.00	1.18	0.00	0.00	0.78	0.00	11.1	2.52	0.00	1.18	0.00	
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

d : เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

Q_{1,2,3} : อัตราการไหลที่ท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

S : ความลึกจมน้ำ(submergence)

F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ตาราง ข3-1 ข้อมูลการทดลองของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 1 ท่อ

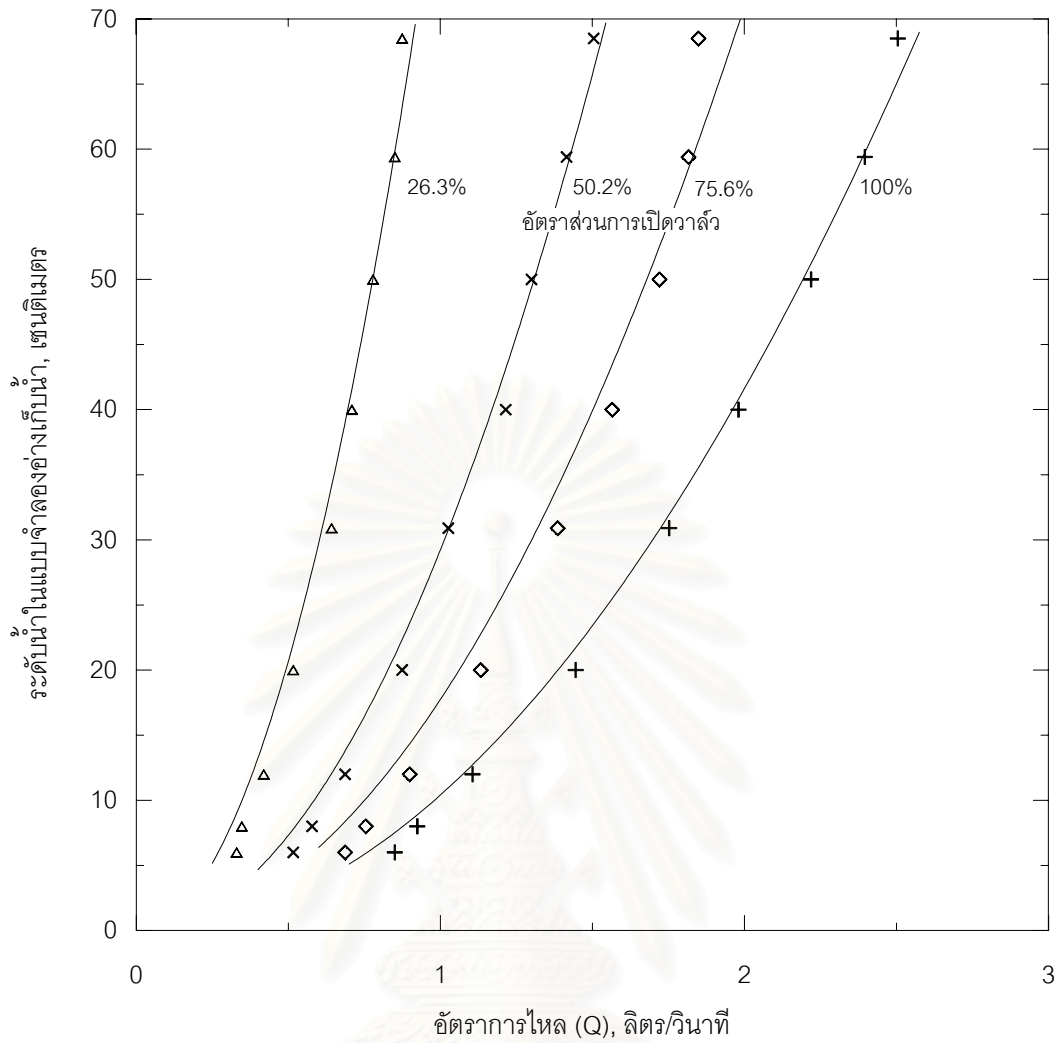
อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
1.00 (100%)	68.5	0.00	0.00	2.50	2.50	2.50	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	51.9	39.2	31.1	18.4	26
	59.4	0.00	0.00	2.40	2.40	2.36	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	45.0	33.6	26.3	15.0	26	
	50.0	0.00	0.00	2.22	2.22	2.18	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	37.7	28.2	22.0	12.5	26	
	40.0	0.00	0.00	1.98	1.98	1.97	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	30.2	22.5	17.5	9.8	26	
	30.9	0.00	0.00	1.75	1.75	1.74	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	23.4	17.3	13.3	7.2	27	
	20.0	0.00	0.00	1.44	1.44	1.41	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	15.1	11.0	8.3	4.2	27	
	12.0	0.00	0.00	1.11	1.11	1.09	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	9.0	6.4	4.7	2.1	27	
	8.0	0.00	0.00	0.92	0.92	0.92	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	5.9	4.1	2.9	1.1	27	
	6.0	0.00	0.00	0.85	0.85	0.84	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	4.3	2.9	2.0	0.6	27	
0.756 (75.6%)	68.5	0.00	0.00	1.85	1.85	1.85	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	58.7	50.9	45.9	38.1	27	
	59.4	0.00	0.00	1.82	1.82	1.81	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	50.6	43.8	39.4	32.6	27	
	50.0	0.00	0.00	1.72	1.72	1.70	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	42.6	36.8	33.0	27.2	27	
	40.0	0.00	0.00	1.56	1.56	1.55	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	34.1	29.3	26.3	21.6	27	
	30.9	0.00	0.00	1.39	1.39	1.38	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	26.3	22.5	20.1	16.4	27	
	20.0	0.00	0.00	1.13	1.13	1.12	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	17.0	14.3	12.6	9.9	27	
	12.0	0.00	0.00	0.90	0.90	0.90	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	9.9	8.3	7.2	5.6	27	
	8.0	0.00	0.00	0.76	0.76	0.74	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	6.4	5.3	4.6	3.5	27	
	6.0	0.00	0.00	0.69	0.69	0.67	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	4.9	4.0	3.4	2.5	27	
0.502 (50.2%)	68.5	0.00	0.00	1.50	1.50	1.48	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	62.9	58.3	55.4	50.9	27	
	59.4	0.00	0.00	1.42	1.42	1.41	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	54.5	50.5	47.9	43.9	27	
	50.0	0.00	0.00	1.30	1.30	1.28	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	45.6	42.2	40.0	36.6	27	
	40.0	0.00	0.00	1.21	1.21	1.22	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	36.6	33.8	32.0	29.3	27	
	30.9	0.00	0.00	1.03	1.03	1.04	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	28.1	25.7	24.2	21.8	27	
	20.0	0.00	0.00	0.87	0.87	0.87	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	18.3	16.6	15.6	13.9	27	
	12.0	0.00	0.00	0.69	0.69	0.67	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	10.8	9.8	9.2	8.3	27	
	8.0	0.00	0.00	0.58	0.58	0.59	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	7.1	6.4	5.9	5.2	27	
	6.0	0.00	0.00	0.52	0.52	0.49	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.3	4.6	4.2	3.6	27	
0.263 (26.3%)	68.5	0.00	0.00	0.87	0.87	0.90	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	66.0	64.2	63.1	61.4	26	
	59.4	0.00	0.00	0.85	0.85	0.87	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	57.5	55.7	54.6	52.9	26	
	50.0	0.00	0.00	0.78	0.78	0.79	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	48.4	47.0	46.1	44.8	27	
	40.0	0.00	0.00	0.71	0.71	0.72	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	38.6	37.2	36.4	35.1	27	
	30.9	0.00	0.00	0.64	0.64	0.67	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	29.4	28.5	28.0	27.1	27	
	20.0	0.00	0.00	0.52	0.52	0.54	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.1	18.4	18.0	17.4	27	
	12.0	0.00	0.00	0.42	0.42	0.43	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.1	10.6	10.4	10.0	27	
	8.0	0.00	0.00	0.35	0.35	0.38	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	7.5	7.1	6.9	6.6	27	
	6.0	0.00	0.00	0.33	0.33	0.34	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.4	5.3	5.2	5.2	27	

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ

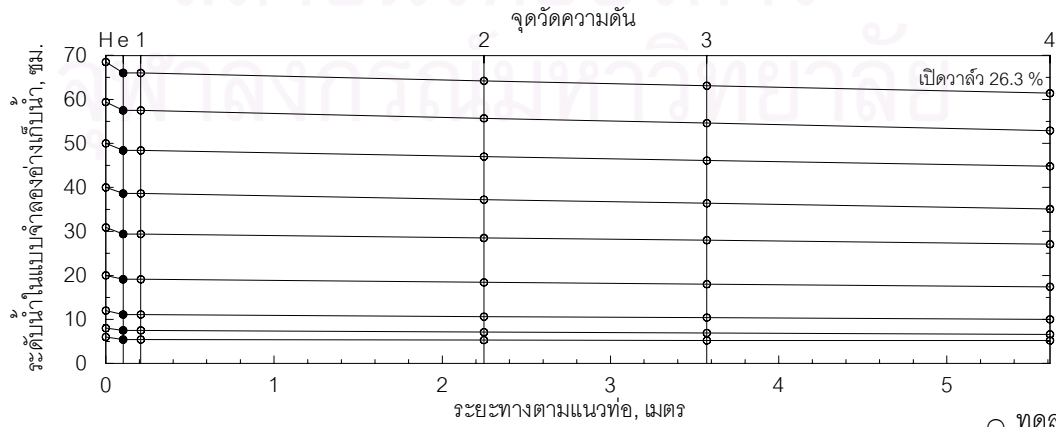
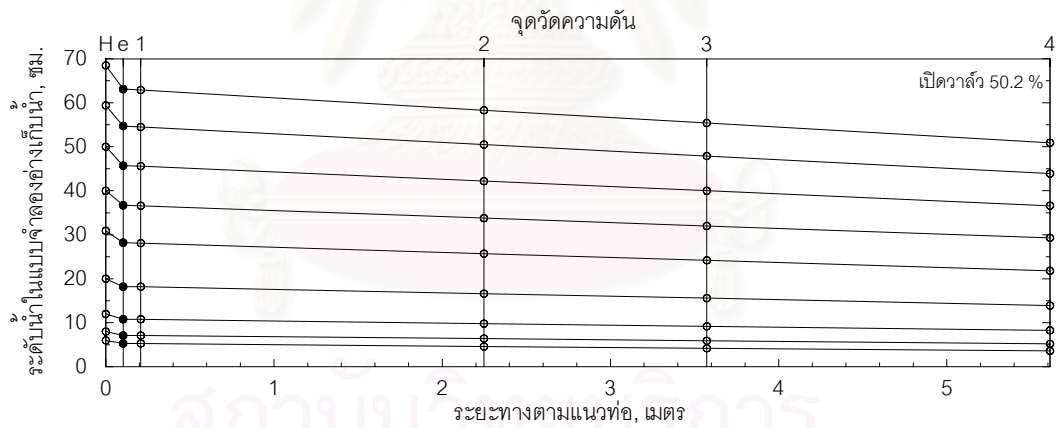
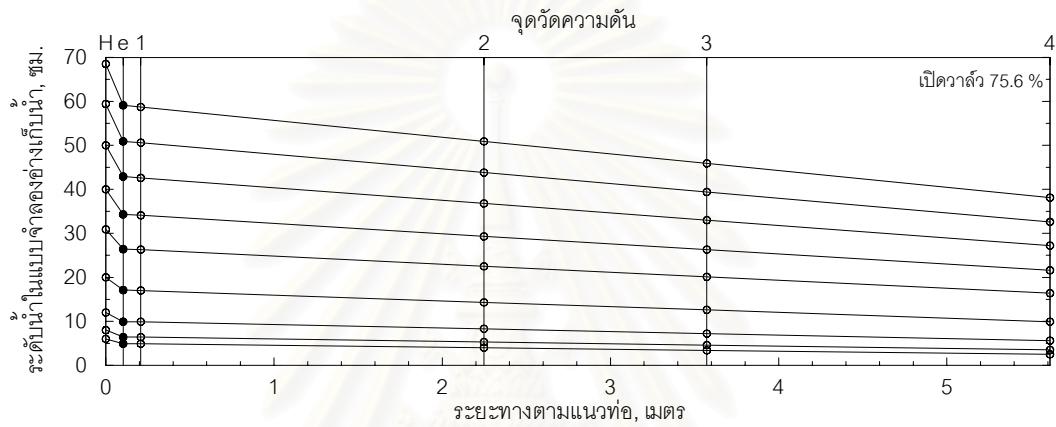
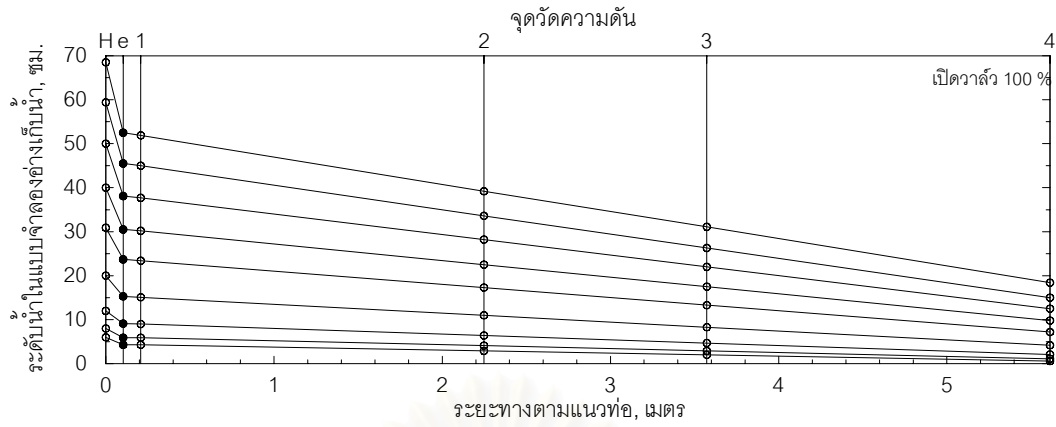
Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง

ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ



รูป ข3-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหลของท่อที่ 3
ในกรณีการไหล 1 ท่อ



○ ทดลอง

● คำนวณ

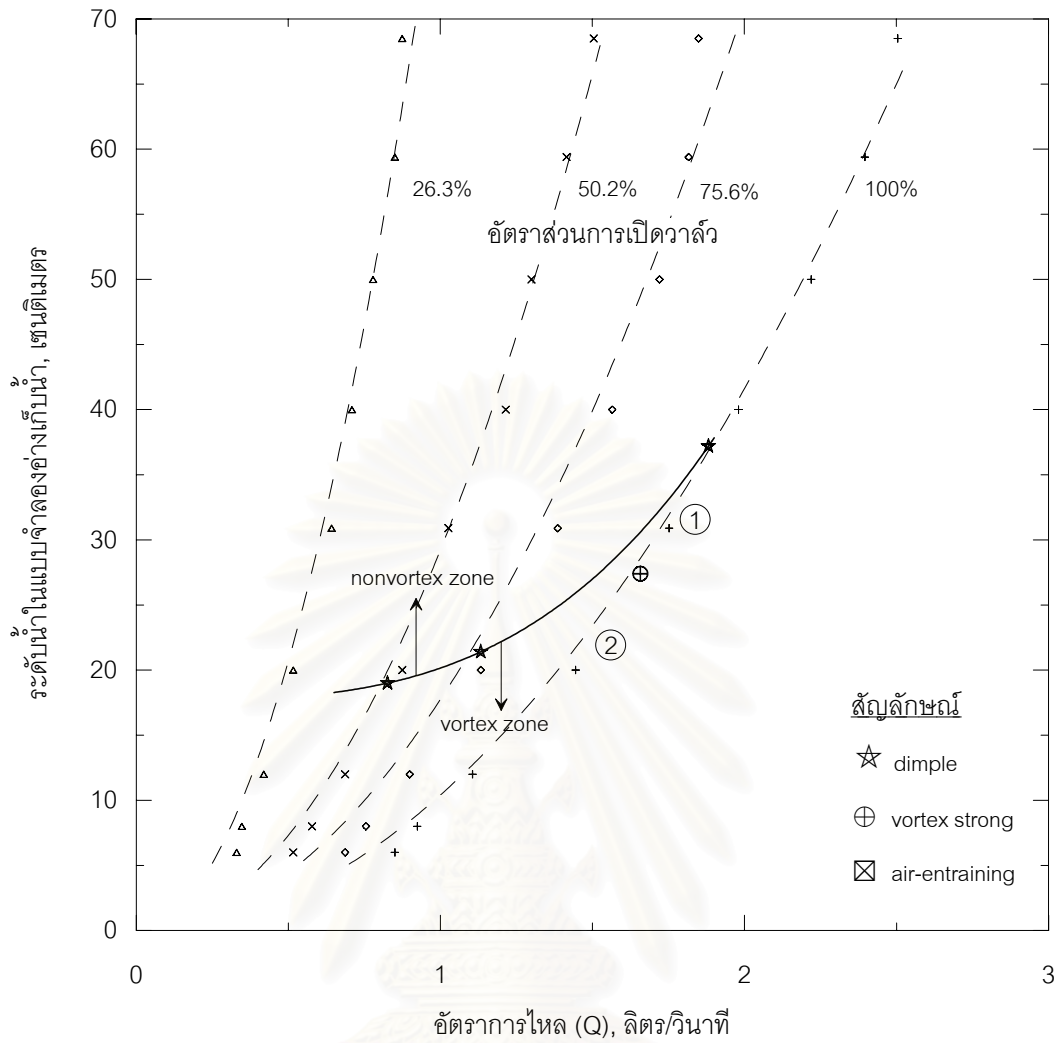
รูป ข3-2 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 1 ท่อ

ตาราง ข3-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนของท่อที่ 3 กรณีการไหล 1 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	37.2	9.7	9.7	18.9	18.0	32.3	0.00	0.00	1.88	1.88	1.89
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	21.4	9.7	9.7	16.4	15.8	16.5	0.00	0.00	1.13	1.13	1.12
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	19.0	9.7	9.7	15.2	14.8	14.1	0.00	0.00	0.83	0.83	0.84
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	27.4	9.7	9.7	18.2	17.4	22.5	0.00	0.00	1.66	1.66	1.66
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
- W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี
- W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
- ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ
- Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี
- Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม
- S : ความลึกจมน้ำ(submergence)



รูป ข3-3 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำของท่อที่ 3 กรณีการไหล 1 ท่อ

ตาราง ข3-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 3 กรณีการไหล 1 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า	จุด 1	จุด 2	จุด 3	จุด 4												
1.00 (100%)	2.50	71.5	2.96	55.5	54.9	42.2	34.1	21.4	61.9	13.8	32.6	16.0	2.1	0.154	34.2	0.0197	7.25	2.6	2.36	0.080
	2.40	62.4	3.03	48.5	48.0	36.6	29.3	18.0	56.6	12.7	29.9	13.9	1.2	0.092	30.6	0.0197	6.93	0.8	2.36	0.027
	2.22	53.0	3.05	41.1	40.7	31.2	25.0	15.5	47.6	10.9	25.6	11.9	1.0	0.088	25.7	0.0193	6.42	0.7	2.36	0.029
	1.98	43.0	3.02	33.5	33.2	25.5	20.5	12.8	38.5	8.6	20.4	9.5	0.8	0.088	20.8	0.0196	5.73	1.0	2.36	0.051
	1.75	33.9	3.01	26.7	26.4	20.3	16.3	10.2	30.6	6.8	16.0	7.2	0.4	0.062	16.5	0.0199	5.07	1.0	2.36	0.062
	1.44	23.0	3.01	18.3	18.1	14.0	11.3	7.2	20.6	4.6	10.9	4.7	0.1	0.019	11.1	0.0197	4.18	0.9	2.36	0.087
	1.11	15.0	2.86	12.1	12.0	9.4	7.7	5.1	13.0	2.7	6.4	2.9	0.2	0.063	7.0	0.0213	3.20	1.4	2.36	0.225
	0.92	11.0	2.79	8.9	8.9	7.1	5.9	4.1	9.1	1.9	4.4	2.1	0.1	0.066	4.9	0.0212	2.67	1.5	2.36	0.346
0.85	9.0	2.83	7.3	7.3	5.9	5.0	3.6	7.0	1.6	3.8	1.7	0.0	0.022	3.8	0.0193	2.46	1.4	2.36	0.381	
0.756 (75.6%)	1.85	71.5	2.19	62.1	61.7	53.9	48.9	41.1	38.8	7.5	31.1	9.4	1.9	0.247	21.0	0.0227	5.35	17.5	4.13	0.563
	1.82	62.4	2.30	53.9	53.6	46.8	42.4	35.6	33.9	7.3	30.0	8.5	1.2	0.162	18.4	0.0205	5.26	12.8	4.13	0.427
	1.72	53.0	2.36	45.9	45.6	39.8	36.0	30.2	29.1	6.5	26.9	7.1	0.6	0.088	15.7	0.0196	4.98	9.8	4.13	0.363
	1.56	43.0	2.39	37.3	37.1	32.3	29.3	24.6	23.5	5.4	22.3	5.7	0.3	0.048	12.7	0.0192	4.53	7.7	4.13	0.345
	1.39	33.9	2.38	29.4	29.3	25.5	23.1	19.4	18.7	4.2	17.5	4.5	0.2	0.041	10.1	0.0194	4.01	6.1	4.13	0.352
	1.13	23.0	2.36	20.1	20.0	17.3	15.6	12.9	13.4	2.8	11.7	2.9	0.0	0.012	7.2	0.0208	3.28	4.0	4.13	0.346
	0.90	15.0	2.32	12.9	12.9	11.3	10.2	8.6	8.2	1.8	7.4	2.1	0.2	0.131	4.4	0.0201	2.60	3.0	4.13	0.410
	0.76	11.0	2.28	9.4	9.4	8.3	7.6	6.5	5.5	1.3	5.2	1.6	0.3	0.228	3.0	0.0191	2.19	2.6	4.13	0.494
0.69	9.0	2.29	7.9	7.9	7.0	6.4	5.5	4.5	1.0	4.3	1.1	0.0	0.013	2.4	0.0192	1.99	2.2	4.13	0.524	
0.502 (50.2%)	1.50	71.5	1.78	66.1	65.9	61.3	58.4	53.9	22.6	5.0	46.9	5.4	0.4	0.076	12.2	0.0199	4.35	11.9	9.41	0.255
	1.42	62.4	1.79	57.7	57.5	53.5	50.9	46.9	20.0	4.4	41.5	4.7	0.3	0.063	10.8	0.0199	4.09	9.8	9.41	0.235
	1.30	53.0	1.78	48.7	48.6	45.2	43.0	39.6	17.0	3.7	35.0	4.3	0.5	0.135	9.2	0.0201	3.76	8.3	9.41	0.237
	1.21	43.0	1.85	39.7	39.6	36.8	35.0	32.3	13.8	3.3	30.6	3.3	0.0	0.001	7.4	0.0186	3.52	4.9	9.41	0.161
	1.03	33.9	1.76	31.2	31.1	28.7	27.2	24.8	11.8	2.3	21.9	2.7	0.4	0.153	6.4	0.0224	2.97	5.3	9.41	0.241
	0.87	23.0	1.82	21.2	21.2	19.6	18.6	16.9	8.1	1.7	15.9	1.8	0.0	0.018	4.4	0.0210	2.53	2.7	9.41	0.171
	0.69	15.0	1.77	13.8	13.8	12.8	12.2	11.3	4.7	1.0	9.8	1.2	0.1	0.108	2.5	0.0199	1.99	2.6	9.41	0.262
	0.58	11.0	1.74	10.1	10.1	9.4	8.9	8.2	3.6	0.7	6.9	0.9	0.1	0.172	1.9	0.0216	1.67	2.0	9.41	0.290
0.52	9.0	1.72	8.3	8.3	7.6	7.2	6.6	3.2	0.6	5.5	0.7	0.1	0.135	1.7	0.0239	1.49	1.7	9.41	0.300	
0.263 (26.3%)	0.87	71.5	1.03	69.0	69.0	67.2	66.1	64.4	8.7	1.7	57.3	2.5	0.7	0.430	4.7	0.0226	2.53	8.8	33.99	0.153
	0.85	62.4	1.08	60.5	60.5	58.7	57.6	55.9	8.7	1.6	54.2	1.9	0.2	0.136	4.7	0.0239	2.46	3.3	33.99	0.062
	0.78	53.0	1.07	51.4	51.4	50.0	49.1	47.8	6.8	1.3	45.4	1.6	0.2	0.145	3.7	0.0224	2.25	3.7	33.99	0.082
	0.71	43.0	1.08	41.6	41.6	40.2	39.4	38.1	6.6	1.1	37.7	1.4	0.2	0.201	3.6	0.0260	2.05	1.5	33.99	0.040
	0.64	33.9	1.10	32.4	32.4	31.5	31.0	30.1	4.3	0.9	30.9	1.5	0.5	0.600	2.3	0.0207	1.86	0.1	33.99	0.003
	0.52	23.0	1.08	22.1	22.1	21.4	21.0	20.4	3.2	0.6	20.0	0.9	0.3	0.476	1.7	0.0239	1.49	1.0	33.99	0.051
	0.42	15.0	1.08	14.1	14.1	13.6	13.4	13.0	2.0	0.4	13.2	0.9	0.5	1.267	1.1	0.0228	1.21	0.2	33.99	0.016
	0.35	11.0	1.05	10.5	10.5	10.1	9.9	9.6	1.7	0.3	9.0	0.5	0.2	0.815	0.9	0.0278	1.00	0.8	33.99	0.092
0.33	9.0	1.10	8.4	8.4	8.3	8.2	8.2	0.4	0.2	8.2	0.6	0.4	1.482	0.2	0.0078	0.96	0.3	33.99	0.034	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ; $Q=KH_T^{0.5}$ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน
 s : ความลาดชันของเส้นความดัน f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ R : เลขเรย์โนลด์; $R = vD/V$

ตาราง ข3-4 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนของท่อที่ 3 กรณีการไหล 1 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃
	ระยะยก	%	พื้นที่	% (100%)													
	cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว													
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	37.2	0.00	0.00	1.88	0.00	0.00	1.24	32.3	7.34	0.00	0.00	1.88
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	21.4	0.00	0.00	1.13	0.00	0.00	0.74	16.5	3.75	0.00	0.00	1.13
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	19.0	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.54	14.1	3.20	0.00	0.00	0.83
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	27.4	0.00	0.00	1.66	0.00	0.00	1.09	22.5	5.11	0.00	0.00	1.66
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

d : เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

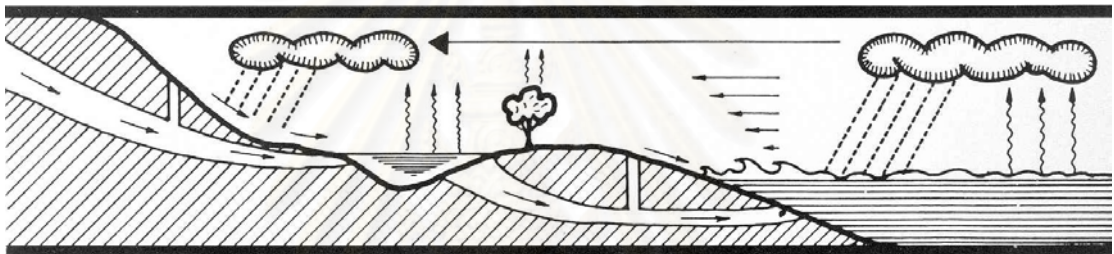
Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

S : ความลึกจมน้ำ(submergence)

F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ภาคผนวก ค
กรณีการทดลองการไหล 2 ท่อ



- ค1 การทดลองการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 2
- ค2 การทดลองการไหลในท่อที่ 2 และท่อที่ 3
- ค3 การทดลองการไหลในท่อที่ 1 และท่อที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค1-1 ข้อมูลการทดลองกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

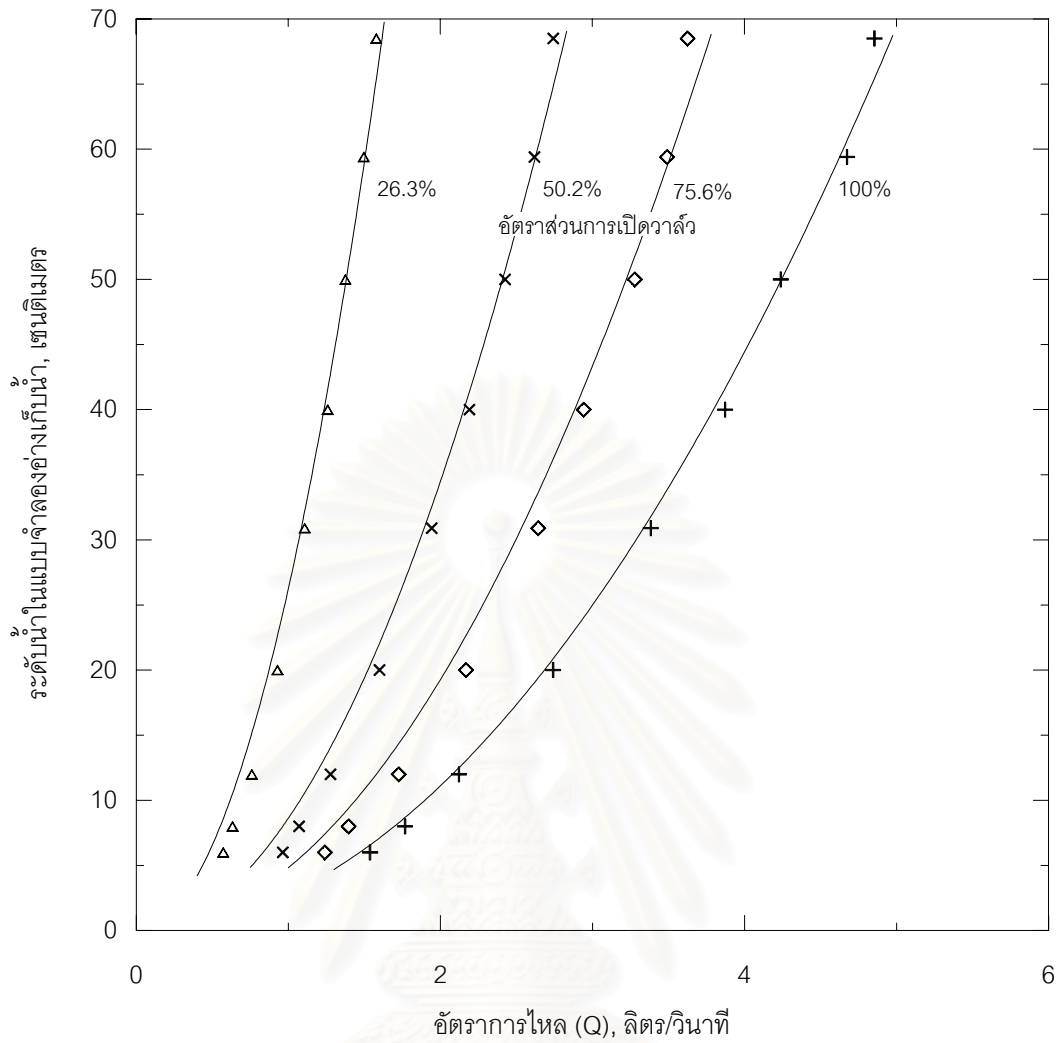
อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
1.00 (100%)	68.5	2.42	2.43	0.00	4.85	4.86	51.7	39.1	31.0	18.4	51.2	38.3	30.0	17.2	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	2.39	2.28	0.00	4.67	4.66	45.0	34.0	26.9	16.0	44.2	32.6	25.2	13.7	59.4	59.4	59.4	59.4	26
	50.0	2.19	2.05	0.00	4.24	4.22	37.7	28.2	22.1	12.6	37.2	27.5	21.2	11.5	50.0	50.0	50.0	50.0	26
	40.0	2.02	1.85	0.00	3.87	3.86	30.2	22.6	17.7	10.2	29.6	21.7	16.6	8.8	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	1.75	1.63	0.00	3.38	3.35	23.2	17.2	13.3	7.4	22.7	16.4	12.3	6.1	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	1.41	1.33	0.00	2.74	2.73	15.0	10.9	8.3	4.2	14.7	10.5	7.8	3.6	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	1.10	1.02	0.00	2.12	2.14	9.0	6.4	4.7	2.1	8.8	6.1	4.3	1.6	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.92	0.85	0.00	1.77	1.77	5.8	4.0	2.9	1.2	5.7	3.8	2.5	0.6	8.0	8.0	8.0	8.0	27
	6.0	0.81	0.72	0.00	1.54	1.55	4.2	2.8	1.9	0.5	4.1	2.6	1.7	0.3	6.0	6.0	6.0	6.0	27
0.756 (75.6%)	68.5	1.91	1.71	0.00	3.63	3.63	58.5	50.5	45.3	37.3	58.5	50.7	45.7	38.0	68.5	68.5	68.5	68.5	27
	59.4	1.86	1.63	0.00	3.49	3.51	50.6	43.4	38.8	31.6	50.5	43.7	39.3	32.5	59.4	59.4	59.4	59.4	27
	50.0	1.72	1.56	0.00	3.28	3.24	42.7	36.8	33.0	27.1	42.6	36.7	32.9	27.0	50.0	50.0	50.0	50.0	27
	40.0	1.54	1.40	0.00	2.94	2.93	33.8	29.0	25.8	21.0	33.7	29.2	26.4	22.0	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	1.39	1.25	0.00	2.64	2.64	26.4	22.4	19.9	15.9	26.2	22.3	19.9	16.0	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	1.15	1.02	0.00	2.17	2.18	16.9	14.1	12.3	9.5	17.0	14.3	12.6	9.9	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	0.92	0.81	0.00	1.73	1.77	10.0	8.3	7.3	5.6	10.0	8.3	7.3	5.6	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.75	0.65	0.00	1.40	1.45	6.7	5.4	4.6	3.4	6.6	5.3	4.5	3.2	8.0	8.0	8.0	8.0	27
	6.0	0.67	0.57	0.00	1.24	1.28	5.0	4.1	3.5	2.6	4.9	4.0	3.4	2.5	6.0	6.0	6.0	6.0	27
0.502 (50.2%)	68.5	1.44	1.30	0.00	2.74	2.73	63.2	58.7	55.8	51.4	63.1	58.6	55.7	51.3	68.5	68.5	68.5	68.5	27
	59.4	1.36	1.25	0.00	2.62	2.59	54.7	50.9	48.4	44.7	54.7	50.8	48.2	44.3	59.4	59.4	59.4	59.4	27
	50.0	1.27	1.16	0.00	2.43	2.40	45.9	42.5	40.3	36.9	45.9	42.5	40.3	37.0	50.0	50.0	50.0	50.0	27
	40.0	1.15	1.04	0.00	2.19	2.18	36.8	33.9	32.1	29.2	36.7	33.9	32.1	29.3	40.0	40.0	40.0	40.0	27
	30.9	1.03	0.91	0.00	1.94	1.97	28.3	26.0	24.5	22.3	28.2	26.2	25.0	23.0	30.9	30.9	30.9	30.9	27
	20.0	0.86	0.74	0.00	1.60	1.62	18.2	16.6	15.7	14.2	18.1	16.5	15.6	14.1	20.0	20.0	20.0	20.0	27
	12.0	0.67	0.61	0.00	1.28	1.31	10.9	9.8	9.2	8.1	10.8	9.8	9.2	8.3	12.0	12.0	12.0	12.0	27
	8.0	0.57	0.50	0.00	1.07	1.09	7.2	6.5	6.1	5.4	7.1	6.4	6.0	5.3	8.0	8.0	8.0	8.0	27
	6.0	0.52	0.45	0.00	0.96	1.01	5.2	4.6	4.3	3.7	5.1	4.6	4.2	3.8	6.0	6.0	6.0	6.0	27
0.263 (26.3%)	68.5	0.83	0.74	0.00	1.58	1.59	66.6	64.9	63.9	62.2	66.5	64.9	63.9	62.3	68.5	68.5	68.5	68.5	26
	59.4	0.79	0.70	0.00	1.50	1.55	57.7	56.2	55.3	53.9	57.6	56.2	55.4	54.1	59.4	59.4	59.4	59.4	26
	50.0	0.73	0.65	0.00	1.38	1.41	48.4	47.1	46.4	45.2	48.3	47.1	46.4	45.2	50.0	50.0	50.0	50.0	26
	40.0	0.67	0.59	0.00	1.26	1.31	38.8	37.6	36.9	35.8	38.8	37.8	37.2	36.3	40.0	40.0	40.0	40.0	26
	30.9	0.59	0.52	0.00	1.11	1.15	30.0	29.1	28.6	27.7	30.2	29.3	28.8	27.9	30.9	30.9	30.9	30.9	26
	20.0	0.50	0.43	0.00	0.93	0.95	19.1	18.5	18.2	17.6	19.2	18.5	18.0	17.4	20.0	20.0	20.0	20.0	26
	12.0	0.41	0.35	0.00	0.76	0.79	11.5	11.0	10.6	10.2	11.7	11.2	11.0	10.6	12.0	12.0	12.0	12.0	26
	8.0	0.34	0.29	0.00	0.63	0.65	7.4	7.2	7.1	6.9	7.4	7.2	7.1	6.9	8.0	8.0	8.0	8.0	27
	6.0	0.31	0.26	0.00	0.57	0.59	5.5	5.3	5.2	5.0	5.5	5.3	5.2	5.0	6.0	6.0	6.0	6.0	27

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ

Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

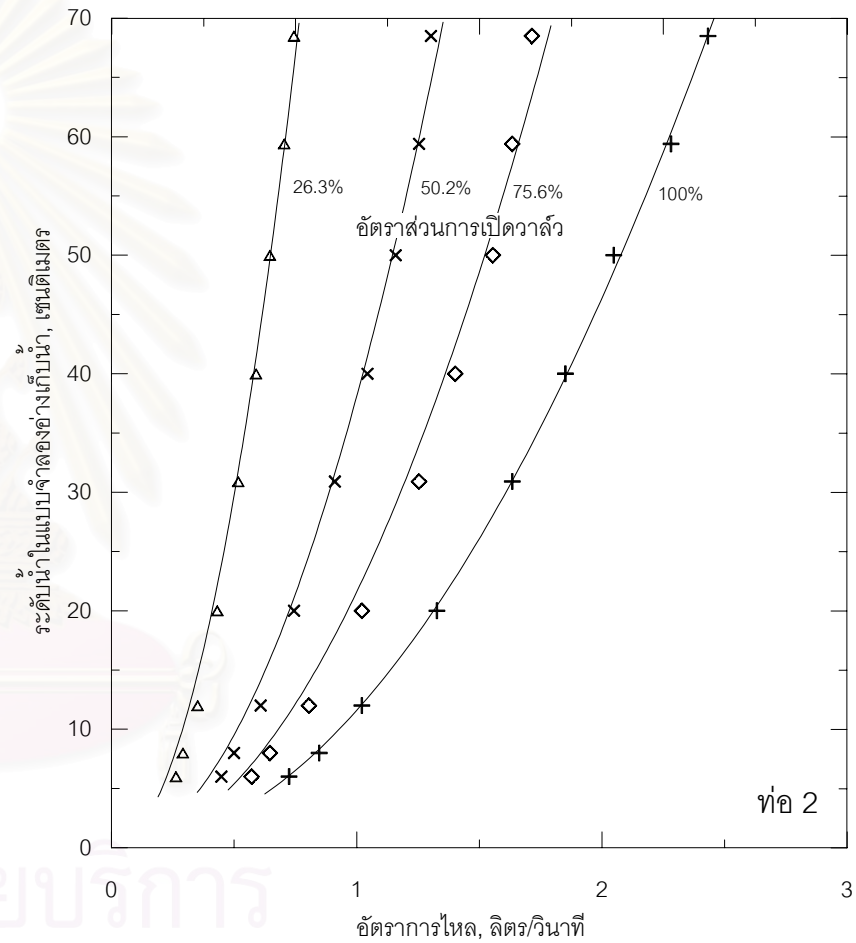
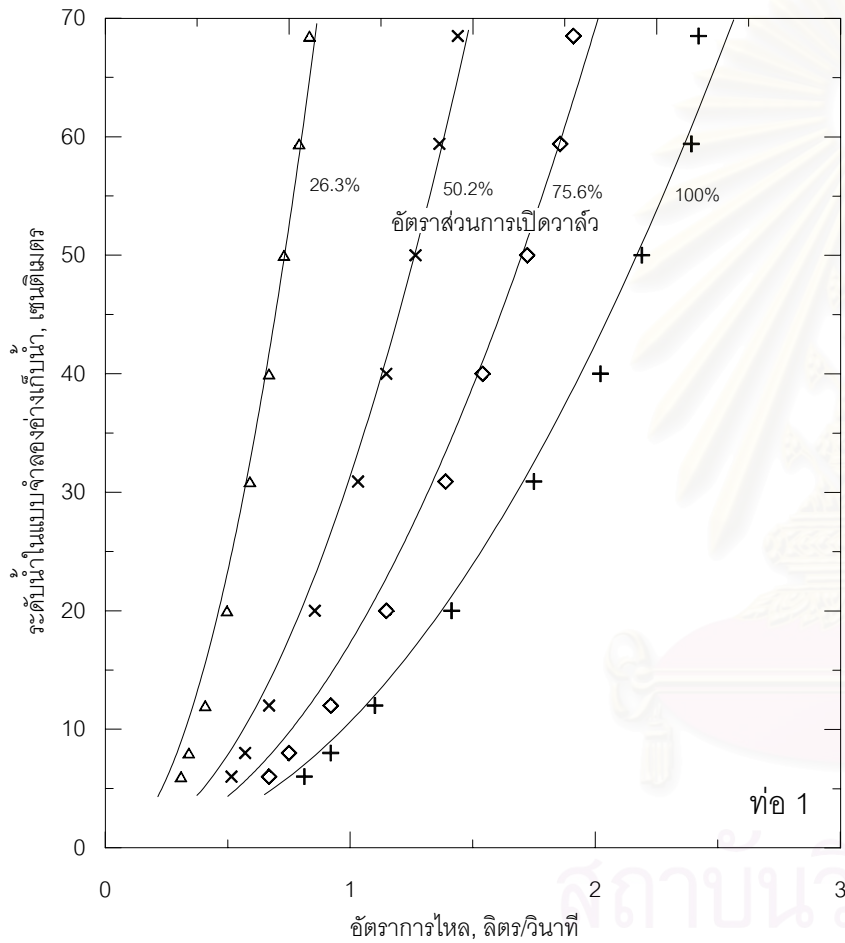
Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง

ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ

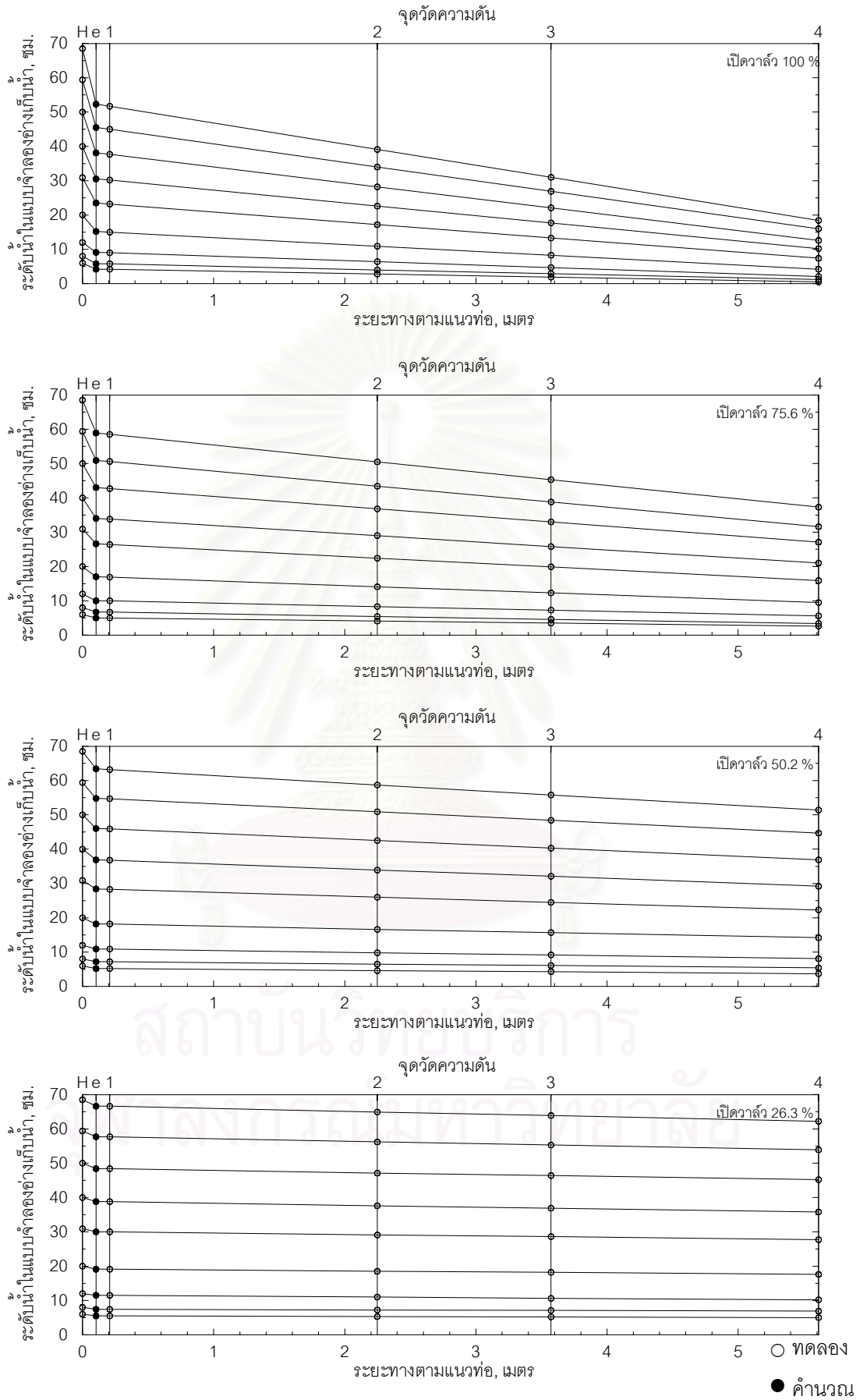


รูป ค1-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

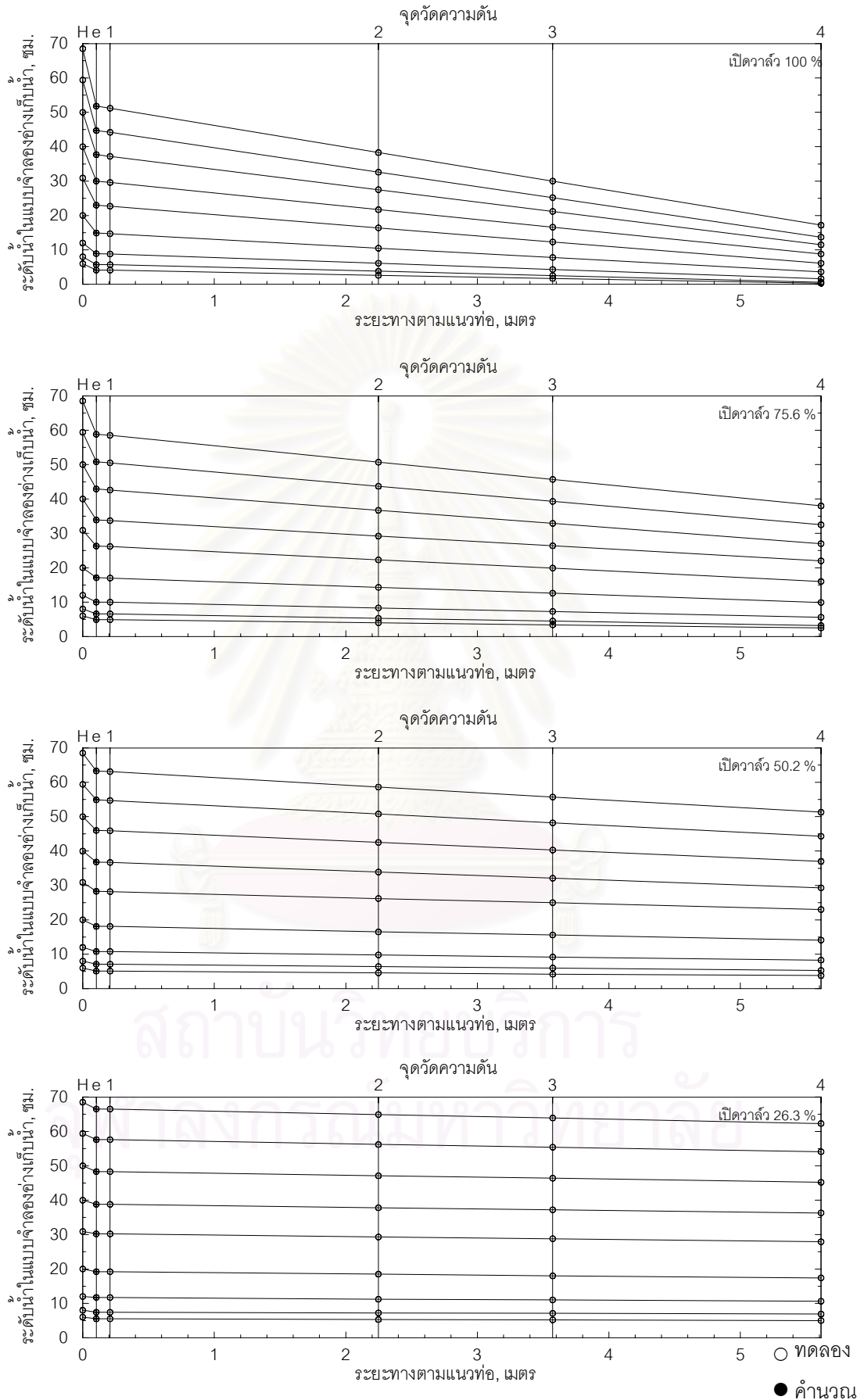
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ค1-2 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)



รูป ค1-3 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)



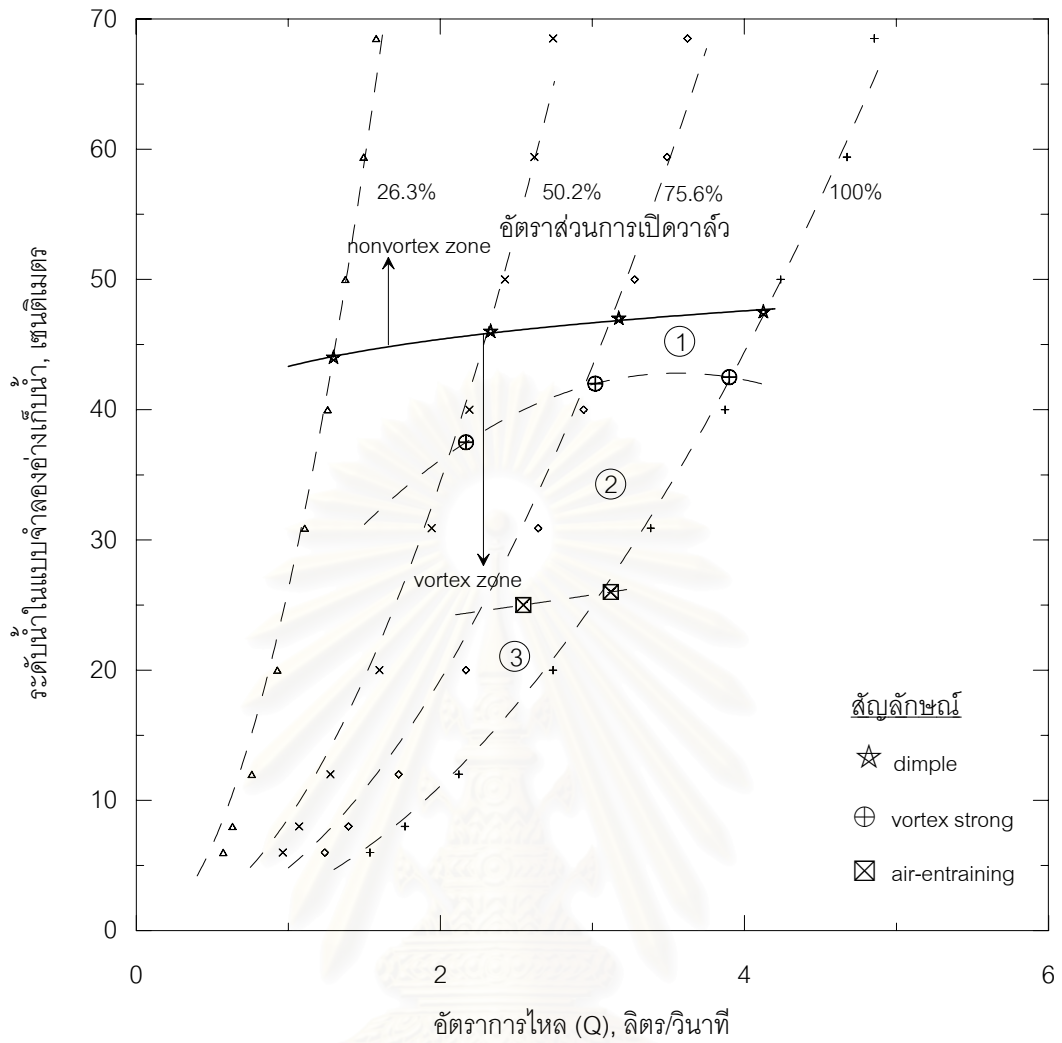
รูป ค1-4 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

ตาราง ค1-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.5	20.5	20.5	9.7	22.4	42.6	2.13	1.99	0.0	4.12	4.10
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	47.0	18.8	18.7	9.7	20.8	42.1	1.67	1.50	0.0	3.17	3.19
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	46.0	17.0	17.1	9.7	19.0	41.1	1.22	1.11	0.0	2.33	2.31
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	44.0	14.6	14.7	9.7	16.4	39.1	0.69	0.61	0.0	1.30	1.31
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	42.5	20.1	20.1	9.7	22.1	37.6	2.02	1.88	0.0	3.90	3.92
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	42.0	18.5	18.4	9.7	20.5	37.1	1.59	1.43	0.0	3.02	3.03
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	37.5	16.7	16.7	9.7	18.7	32.6	1.15	1.02	0.0	2.17	2.18
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	26.0	18.6	18.7	9.7	20.7	21.1	1.62	1.50	0.0	3.12	3.14
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	25.0	17.5	17.5	9.7	19.5	20.1	1.34	1.21	0.0	2.55	2.54
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี
 W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ
 Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)



รูป ค1-5 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

ตาราง ค1-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 1 กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.42	71.5	2.86	55.3	54.7	42.1	34.0	21.4	61.4	12.9	30.5	16.2	3.3	0.253	33.9	0.0210	7.01	3.8	2.36	0.125
	2.39	62.4	3.03	48.5	48.0	37.0	29.9	19.0	54.5	12.6	29.8	13.9	1.3	0.102	29.6	0.0191	6.92	1.8	2.36	0.062
	2.19	53.0	3.01	41.1	40.7	31.2	25.1	15.6	47.2	10.6	25.0	11.9	1.3	0.125	25.6	0.0197	6.34	1.2	2.36	0.049
	2.02	43.0	3.08	33.5	33.2	25.6	20.7	13.2	37.5	9.0	21.3	9.5	0.5	0.055	20.4	0.0184	5.85	1.0	2.36	0.045
	1.75	33.9	3.00	26.5	26.2	20.2	16.3	10.4	29.7	6.7	15.9	7.4	0.7	0.097	16.1	0.0195	5.06	1.2	2.36	0.077
	1.41	23.0	2.95	18.2	18.0	13.9	11.3	7.2	20.2	4.4	10.4	4.8	0.4	0.089	11.0	0.0203	4.09	1.2	2.36	0.116
	1.10	15.0	2.84	12.1	12.0	9.4	7.7	5.1	13.0	2.7	6.3	2.9	0.2	0.085	7.0	0.0215	3.19	1.5	2.36	0.233
	0.92	11.0	2.78	8.8	8.8	7.0	5.9	4.2	8.4	1.9	4.4	2.2	0.3	0.178	4.7	0.0204	2.66	1.7	2.36	0.377
0.81	9.0	2.71	7.2	7.2	5.8	4.9	3.5	6.9	1.5	3.4	1.8	0.3	0.236	3.8	0.0211	2.35	1.5	2.36	0.442	
0.756 (75.6%)	1.91	71.5	2.26	61.9	61.5	53.5	48.3	40.3	40.0	8.1	33.2	9.6	1.5	0.192	21.6	0.0219	5.53	15.1	4.13	0.454
	1.86	62.4	2.35	53.9	53.6	46.4	41.8	34.6	35.6	7.6	31.4	8.5	0.9	0.119	19.4	0.0207	5.37	10.8	4.13	0.345
	1.72	53.0	2.37	46.0	45.7	39.8	36.0	30.1	29.3	6.5	27.0	7.0	0.5	0.070	15.9	0.0198	4.98	9.6	4.13	0.356
	1.54	43.0	2.35	37.0	36.8	32.0	28.8	24.0	24.3	5.2	21.6	6.0	0.8	0.147	13.0	0.0204	4.46	7.6	4.13	0.353
	1.39	33.9	2.39	29.6	29.4	25.4	22.9	18.9	19.6	4.3	17.6	4.3	0.0	0.011	10.7	0.0204	4.02	5.6	4.13	0.318
	1.15	23.0	2.39	20.0	19.9	17.1	15.3	12.5	13.9	2.9	12.0	3.0	0.1	0.034	7.5	0.0211	3.32	3.4	4.13	0.285
	0.92	15.0	2.38	13.0	13.0	11.3	10.3	8.6	8.0	1.9	7.7	2.0	0.1	0.071	4.5	0.0194	2.66	2.8	4.13	0.357
	0.75	11.0	2.26	9.7	9.7	8.4	7.6	6.4	6.0	1.2	5.1	1.3	0.1	0.048	3.4	0.0221	2.17	2.5	4.13	0.491
0.67	9.0	2.23	8.0	8.0	7.1	6.5	5.6	4.5	1.0	4.1	1.0	0.0	0.013	2.4	0.0202	1.94	2.5	4.13	0.616	
0.502 (50.2%)	1.44	71.5	1.70	66.4	66.2	61.7	58.8	54.4	22.1	4.6	42.9	5.1	0.5	0.117	12.0	0.0215	4.16	16.0	9.41	0.373
	1.36	62.4	1.73	57.8	57.7	53.9	51.4	47.7	18.8	4.1	38.6	4.6	0.5	0.121	10.2	0.0203	3.95	13.2	9.41	0.342
	1.27	53.0	1.74	49.0	48.9	45.5	43.3	39.9	16.9	3.5	33.3	4.0	0.5	0.131	9.2	0.0211	3.66	10.2	9.41	0.306
	1.15	43.0	1.75	39.9	39.8	36.9	35.1	32.2	14.1	2.9	27.3	3.1	0.2	0.068	7.7	0.0216	3.32	7.8	9.41	0.285
	1.03	33.9	1.77	31.4	31.3	29.0	27.5	25.3	11.2	2.3	22.1	2.5	0.2	0.065	6.1	0.0213	2.99	5.6	9.41	0.251
	0.86	23.0	1.78	21.2	21.2	19.6	18.7	17.2	7.2	1.6	15.2	1.8	0.2	0.116	4.1	0.0204	2.48	3.6	9.41	0.240
	0.67	15.0	1.73	13.9	13.9	12.8	12.2	11.1	5.0	1.0	9.3	1.1	0.1	0.115	2.9	0.0232	1.94	2.8	9.41	0.302
	0.57	11.0	1.72	10.2	10.2	9.5	9.1	8.4	3.2	0.7	6.8	0.8	0.1	0.111	1.8	0.0205	1.65	2.3	9.41	0.346
0.52	9.0	1.72	8.2	8.2	7.6	7.3	6.7	2.6	0.6	5.5	0.8	0.2	0.366	1.5	0.0208	1.49	1.8	9.41	0.322	
0.263 (26.3%)	0.83	71.5	0.99	69.6	69.6	67.9	66.9	65.2	8.0	1.5	52.1	1.9	0.4	0.239	4.5	0.0236	2.41	14.6	33.99	0.280
	0.79	62.4	1.00	60.7	60.7	59.2	58.3	56.9	6.9	1.4	47.0	1.7	0.3	0.230	3.9	0.0227	2.29	11.3	33.99	0.241
	0.73	53.0	1.00	51.4	51.4	50.1	49.4	48.2	5.6	1.2	39.9	1.6	0.4	0.363	3.3	0.0223	2.11	9.5	33.99	0.238
	0.67	43.0	1.02	41.8	41.8	40.6	39.9	38.8	5.4	1.0	33.5	1.2	0.2	0.216	3.1	0.0251	1.94	6.2	33.99	0.186
	0.59	33.9	1.01	33.0	33.0	32.1	31.6	30.7	4.1	0.8	26.2	0.9	0.1	0.170	2.3	0.0245	1.71	5.3	33.99	0.203
	0.50	23.0	1.04	22.1	22.1	21.5	21.2	20.6	2.6	0.5	18.5	0.9	0.4	0.652	1.5	0.0223	1.44	2.6	33.99	0.142
	0.41	15.0	1.05	14.5	14.5	14.0	13.6	13.2	2.5	0.4	12.5	0.5	0.1	0.359	1.3	0.0303	1.18	1.1	33.99	0.085
	0.34	11.0	1.03	10.4	10.4	10.2	10.1	9.9	0.8	0.3	8.7	0.6	0.3	1.332	0.5	0.0158	0.99	1.4	33.99	0.161
0.31	9.0	1.03	8.5	8.5	8.3	8.2	8.0	0.8	0.2	7.2	0.5	0.3	1.367	0.5	0.0192	0.90	1.0	33.99	0.144	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ; $Q=KH_T^{0.5}$

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

R : เลขเรย์โนลด์; $R = vD/V$

ตาราง ค1-4 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 2 กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า	จุด 1	จุด 2	จุด 3	จุด 4												
1.00 (100%)	2.43	71.5	2.88	54.8	54.2	41.3	33.0	20.2	62.6	13.0	30.8	16.7	3.7	0.280	34.7	0.0212	7.04	2.5	2.36	0.080
	2.28	62.4	2.89	47.7	47.2	35.6	28.2	16.7	57.2	11.5	27.1	14.7	3.2	0.281	31.1	0.0220	6.60	1.1	2.36	0.040
	2.05	53.0	2.81	40.7	40.2	30.5	24.2	14.5	48.4	9.2	21.8	12.3	3.1	0.330	26.2	0.0231	5.93	1.9	2.36	0.088
	1.85	43.0	2.82	33.0	32.6	24.7	19.6	11.8	39.1	7.6	17.8	10.0	2.4	0.324	21.2	0.0229	5.36	1.5	2.36	0.086
	1.63	33.9	2.81	26.0	25.7	19.4	15.3	9.1	31.2	5.9	13.9	7.9	2.0	0.342	16.9	0.0234	4.73	1.1	2.36	0.079
	1.33	23.0	2.77	17.9	17.7	13.5	10.8	6.6	20.8	3.9	9.2	5.1	1.2	0.313	11.3	0.0237	3.84	1.3	2.36	0.144
	1.02	15.0	2.64	11.9	11.8	9.1	7.3	4.6	13.6	2.3	5.4	3.1	0.8	0.349	7.3	0.0261	2.95	1.5	2.36	0.272
	0.85	11.0	2.55	8.7	8.7	6.8	5.5	3.6	9.7	1.6	3.7	2.3	0.7	0.454	5.2	0.0269	2.45	1.4	2.36	0.388
0.72	9.0	2.41	7.1	7.1	5.6	4.7	3.3	6.9	1.2	2.7	1.9	0.7	0.644	3.9	0.0272	2.10	1.7	2.36	0.634	
0.756 (75.6%)	1.71	71.5	2.03	61.8	61.5	53.7	48.7	41.0	38.4	6.5	26.8	9.7	3.2	0.497	20.9	0.0263	4.96	20.7	4.13	0.775
	1.63	62.4	2.07	53.8	53.5	46.7	42.3	35.5	33.9	5.9	24.3	8.6	2.7	0.461	18.4	0.0254	4.73	17.1	4.13	0.702
	1.56	53.0	2.14	45.9	45.6	39.7	35.9	30.0	29.3	5.3	22.0	7.1	1.8	0.331	15.9	0.0243	4.50	13.3	4.13	0.604
	1.40	43.0	2.14	36.9	36.7	32.2	29.4	25.0	21.7	4.3	17.9	6.1	1.8	0.408	11.9	0.0224	4.06	11.4	4.13	0.639
	1.25	33.9	2.15	29.3	29.2	25.3	22.9	19.0	18.9	3.5	14.3	4.6	1.1	0.327	10.4	0.0243	3.63	8.1	4.13	0.569
	1.02	23.0	2.13	20.1	20.0	17.3	15.6	12.9	13.2	2.3	9.5	2.9	0.6	0.262	7.2	0.0256	2.95	5.7	4.13	0.601
	0.81	15.0	2.08	13.0	13.0	11.3	10.3	8.6	8.0	1.4	5.9	2.0	0.6	0.399	4.5	0.0253	2.33	4.1	4.13	0.699
	0.65	11.0	1.95	9.6	9.6	8.3	7.5	6.2	6.3	0.9	3.8	1.4	0.5	0.522	3.5	0.0305	1.87	3.3	4.13	0.874
0.57	9.0	1.90	7.9	7.9	7.0	6.4	5.5	4.5	0.7	3.0	1.1	0.4	0.530	2.4	0.0278	1.65	3.2	4.13	1.095	
0.502 (50.2%)	1.30	71.5	1.54	66.3	66.1	61.6	58.7	54.3	22.1	3.7	35.2	5.2	1.5	0.390	12.0	0.0262	3.77	22.8	9.41	0.649
	1.25	62.4	1.59	57.9	57.7	53.8	51.2	47.3	19.7	3.5	32.6	4.5	1.0	0.298	10.6	0.0250	3.63	18.1	9.41	0.556
	1.16	53.0	1.59	49.0	48.9	45.5	43.3	40.0	16.7	3.0	27.9	4.0	1.0	0.351	9.1	0.0250	3.35	15.1	9.41	0.542
	1.04	43.0	1.59	39.8	39.7	36.9	35.1	32.3	13.9	2.4	22.6	3.2	0.8	0.333	7.5	0.0256	3.02	12.1	9.41	0.536
	0.91	33.9	1.56	31.3	31.2	29.2	28.0	26.0	9.6	1.8	17.2	2.6	0.8	0.422	5.3	0.0234	2.64	10.6	9.41	0.617
	0.74	23.0	1.55	21.1	21.1	19.5	18.6	17.1	7.2	1.2	11.5	1.9	0.7	0.557	4.1	0.0269	2.15	6.8	9.41	0.595
	0.61	15.0	1.57	13.8	13.8	12.8	12.2	11.3	4.5	0.8	7.7	1.2	0.4	0.472	2.5	0.0254	1.76	4.4	9.41	0.579
	0.50	11.0	1.51	10.1	10.1	9.4	9.0	8.3	3.2	0.5	5.2	0.9	0.4	0.637	1.8	0.0269	1.45	3.7	9.41	0.710
0.45	9.0	1.49	8.1	8.1	7.6	7.2	6.8	2.5	0.4	4.2	0.9	0.5	1.034	1.3	0.0252	1.30	3.1	9.41	0.740	
0.263 (26.3%)	0.74	71.5	0.88	69.5	69.5	67.9	66.9	65.3	7.8	1.2	41.5	2.0	0.8	0.639	4.3	0.0285	2.15	25.0	33.99	0.603
	0.70	62.4	0.89	60.6	60.6	59.2	58.4	57.1	6.3	1.1	37.2	1.8	0.7	0.646	3.6	0.0264	2.04	21.0	33.99	0.566
	0.65	53.0	0.89	51.3	51.3	50.1	49.4	48.2	5.6	0.9	31.3	1.7	0.8	0.848	3.2	0.0277	1.87	17.9	33.99	0.571
	0.59	43.0	0.90	41.8	41.8	40.8	40.2	39.3	4.5	0.8	26.0	1.2	0.4	0.566	2.5	0.0270	1.71	14.0	33.99	0.539
	0.52	33.9	0.89	33.2	33.2	32.3	31.8	30.9	4.1	0.6	20.0	0.7	0.1	0.188	2.3	0.0319	1.50	11.5	33.99	0.572
	0.43	23.0	0.90	22.2	22.2	21.5	21.0	20.4	3.4	0.4	13.9	0.8	0.4	0.951	1.8	0.0370	1.25	6.9	33.99	0.493
	0.35	15.0	0.91	14.7	14.7	14.2	14.0	13.6	1.7	0.3	9.2	0.3	0.0	0.104	1.1	0.0325	1.02	4.6	33.99	0.502
	0.29	11.0	0.88	10.4	10.4	10.2	10.1	9.9	0.8	0.2	6.4	0.6	0.4	2.209	0.5	0.0217	0.84	3.7	33.99	0.587
0.26	9.0	0.88	8.5	8.5	8.3	8.2	8.0	0.8	0.2	5.2	0.5	0.3	2.283	0.5	0.0266	0.76	3.0	33.99	0.575	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ; $Q=KH_T^{0.5}$

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

R : เลขเรย์โนลด์; $R = vD/V$

ตาราง ค1-5 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃	ΣF
	ระยะยก	%	พื้นที่	% (100%)														
	cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว														
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.5	2.13	1.99	0.00	1.40	1.31	0.00	42.6	9.68	2.14	1.99	0.00	4.13
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	47.0	1.67	1.50	0.00	1.10	0.99	0.00	42.1	9.57	1.67	1.51	0.00	3.18
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	46.0	1.22	1.11	0.00	0.80	0.73	0.00	41.1	9.34	1.22	1.11	0.00	2.33
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	44.0	0.69	0.61	0.00	0.45	0.40	0.00	39.1	8.89	0.69	0.61	0.00	1.30
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	42.5	2.02	1.88	0.00	1.33	1.24	0.00	37.6	8.55	2.02	1.88	0.00	3.90
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	42.0	1.59	1.43	0.00	1.05	0.94	0.00	37.1	8.43	1.59	1.43	0.00	3.02
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	37.5	1.15	1.02	0.00	0.75	0.67	0.00	32.6	7.41	1.15	1.02	0.00	2.17
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	26.0	1.62	1.50	0.00	1.06	0.99	0.00	21.1	4.80	1.62	1.51	0.00	3.12
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	25.0	1.34	1.21	0.00	0.88	0.79	0.00	20.1	4.57	1.34	1.21	0.00	2.55
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)
 d : เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ
 v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ตาราง ค2-1 ข้อมูลการทดลองกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

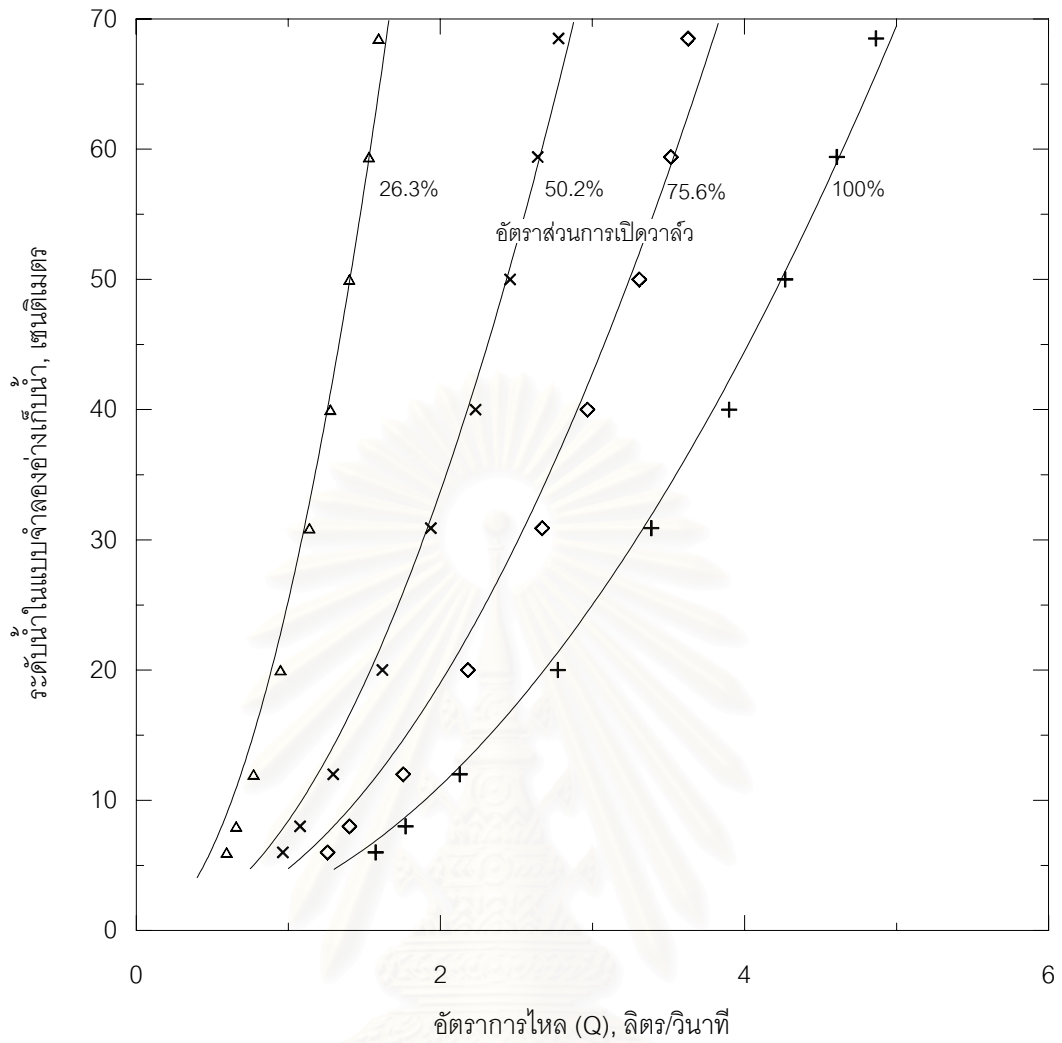
อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
1.00 (100%)	68.5	0.00	2.43	2.43	4.86	4.86	68.5	68.5	68.5	68.5	51.2	38.3	30.0	17.2	51.2	38.9	30.9	18.5	26
	59.4	0.00	2.28	2.32	4.61	4.59	59.4	59.4	59.4	59.4	44.2	32.6	25.2	13.7	44.4	33.3	26.1	15.0	26
	50.0	0.00	2.05	2.22	4.27	4.28	50.0	50.0	50.0	50.0	37.2	27.5	21.2	11.5	38.1	28.6	22.4	12.9	26
	40.0	0.00	1.85	2.05	3.90	3.92	40.0	40.0	40.0	40.0	29.6	21.7	16.6	8.8	30.0	22.4	17.4	9.7	27
	30.9	0.00	1.63	1.75	3.39	3.40	30.9	30.9	30.9	30.9	22.7	16.4	12.3	6.1	23.5	17.4	13.5	7.5	27
	20.0	0.00	1.33	1.44	2.77	2.78	20.0	20.0	20.0	20.0	14.7	10.5	7.8	3.6	14.7	10.9	8.3	4.5	27
	12.0	0.00	1.02	1.11	2.13	2.14	12.0	12.0	12.0	12.0	8.8	6.1	4.3	1.6	9.0	6.3	4.5	1.9	27
	8.0	0.00	0.85	0.92	1.77	1.77	8.0	8.0	8.0	8.0	5.7	3.8	2.5	0.6	5.6	3.9	2.7	0.9	27
	6.0	0.00	0.72	0.85	1.57	1.57	6.0	6.0	6.0	6.0	4.1	2.6	1.7	0.3	4.2	2.8	1.9	0.5	27
0.756 (75.6%)	68.5	0.00	1.71	1.91	3.63	3.63	68.5	68.5	68.5	68.5	58.5	50.7	45.7	38.0	57.7	49.8	44.7	36.8	27
	59.4	0.00	1.63	1.88	3.52	3.51	59.4	59.4	59.4	59.4	50.5	43.7	39.3	32.5	50.4	43.0	38.2	30.8	27
	50.0	0.00	1.56	1.75	3.31	3.30	50.0	50.0	50.0	50.0	42.6	36.7	32.9	27.0	42.3	36.4	32.6	26.6	27
	40.0	0.00	1.40	1.56	2.97	2.98	40.0	40.0	40.0	40.0	33.7	29.2	26.4	22.0	33.3	28.5	25.3	20.6	27
	30.9	0.00	1.25	1.42	2.67	2.68	30.9	30.9	30.9	30.9	26.2	22.3	19.9	16.0	26.2	22.0	19.4	15.2	27
	20.0	0.00	1.02	1.16	2.18	2.18	20.0	20.0	20.0	20.0	17.0	14.3	12.6	9.9	16.7	14.0	12.2	9.5	27
	12.0	0.00	0.81	0.95	1.75	1.77	12.0	12.0	12.0	12.0	10.0	8.3	7.3	5.6	9.8	8.1	7.0	5.3	27
	8.0	0.00	0.65	0.76	1.40	1.45	8.0	8.0	8.0	8.0	6.6	5.3	4.5	3.2	6.6	5.3	4.4	3.1	27
	6.0	0.00	0.57	0.69	1.26	1.28	6.0	6.0	6.0	6.0	4.9	4.0	3.4	2.5	4.9	3.9	3.3	2.4	27
0.502 (50.2%)	68.5	0.00	1.30	1.47	2.78	2.78	68.5	68.5	68.5	68.5	63.1	58.6	55.7	51.3	62.9	58.5	55.5	51.1	27
	59.4	0.00	1.25	1.39	2.64	2.64	59.4	59.4	59.4	59.4	54.7	50.8	48.2	44.3	54.3	50.5	47.9	44.0	27
	50.0	0.00	1.16	1.30	2.46	2.45	50.0	50.0	50.0	50.0	45.9	42.5	40.3	37.0	45.9	42.4	40.2	36.8	27
	40.0	0.00	1.04	1.19	2.23	2.23	40.0	40.0	40.0	40.0	36.7	33.9	32.1	29.3	36.5	33.8	32.0	29.3	27
	30.9	0.00	0.91	1.03	1.94	2.01	30.9	30.9	30.9	30.9	28.2	26.2	25.0	23.0	28.3	26.0	24.5	22.2	27
	20.0	0.00	0.74	0.87	1.62	1.62	20.0	20.0	20.0	20.0	18.1	16.5	15.6	14.1	18.1	16.5	15.6	14.1	27
	12.0	0.00	0.61	0.69	1.29	1.31	12.0	12.0	12.0	12.0	10.8	9.8	9.2	8.3	10.9	9.9	9.2	8.2	27
	8.0	0.00	0.50	0.58	1.08	1.09	8.0	8.0	8.0	8.0	7.1	6.4	6.0	5.3	7.1	6.4	6.0	5.4	27
	6.0	0.00	0.45	0.52	0.96	1.01	6.0	6.0	6.0	6.0	5.1	4.6	4.2	3.8	5.2	4.6	4.3	3.7	27
0.263 (26.3%)	68.5	0.00	0.74	0.85	1.59	1.59	68.5	68.5	68.5	68.5	66.5	64.9	63.9	62.3	66.6	64.9	63.9	62.2	26
	59.4	0.00	0.70	0.83	1.53	1.55	59.4	59.4	59.4	59.4	57.6	56.2	55.4	54.1	57.7	56.3	55.4	54.0	26
	50.0	0.00	0.65	0.76	1.40	1.41	50.0	50.0	50.0	50.0	48.3	47.1	46.4	45.2	48.4	47.1	46.4	45.2	26
	40.0	0.00	0.59	0.69	1.28	1.31	40.0	40.0	40.0	40.0	38.8	37.8	37.2	36.3	38.7	37.4	36.7	35.5	26
	30.9	0.00	0.52	0.62	1.14	1.15	30.9	30.9	30.9	30.9	30.2	29.3	28.8	27.9	30.0	29.0	28.4	27.5	26
	20.0	0.00	0.43	0.52	0.95	0.95	20.0	20.0	20.0	20.0	19.2	18.5	18.0	17.4	19.1	18.5	18.2	17.6	26
	12.0	0.00	0.35	0.42	0.77	0.79	12.0	12.0	12.0	12.0	11.7	11.2	11.0	10.6	11.5	11.0	10.6	10.2	26
	8.0	0.00	0.29	0.37	0.66	0.65	8.0	8.0	8.0	8.0	7.4	7.2	7.1	6.9	7.4	7.2	7.1	6.9	27
	6.0	0.00	0.26	0.33	0.59	0.59	6.0	6.0	6.0	6.0	5.5	5.3	5.2	5.0	5.5	5.3	5.2	5.0	27

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ

Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

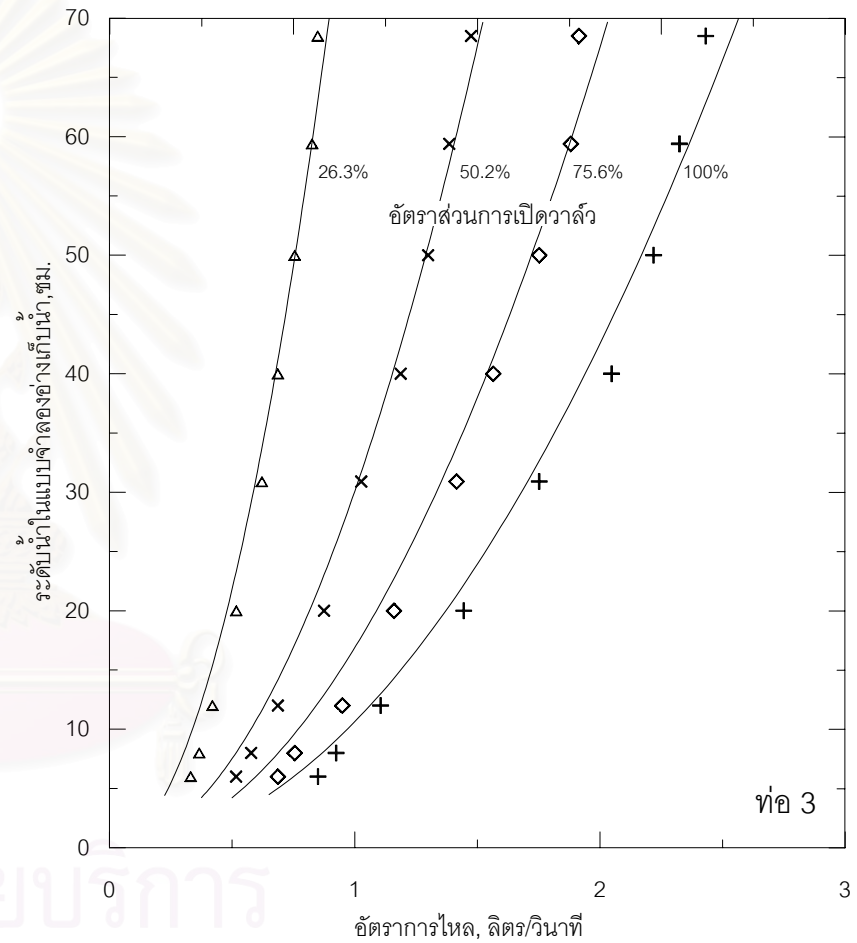
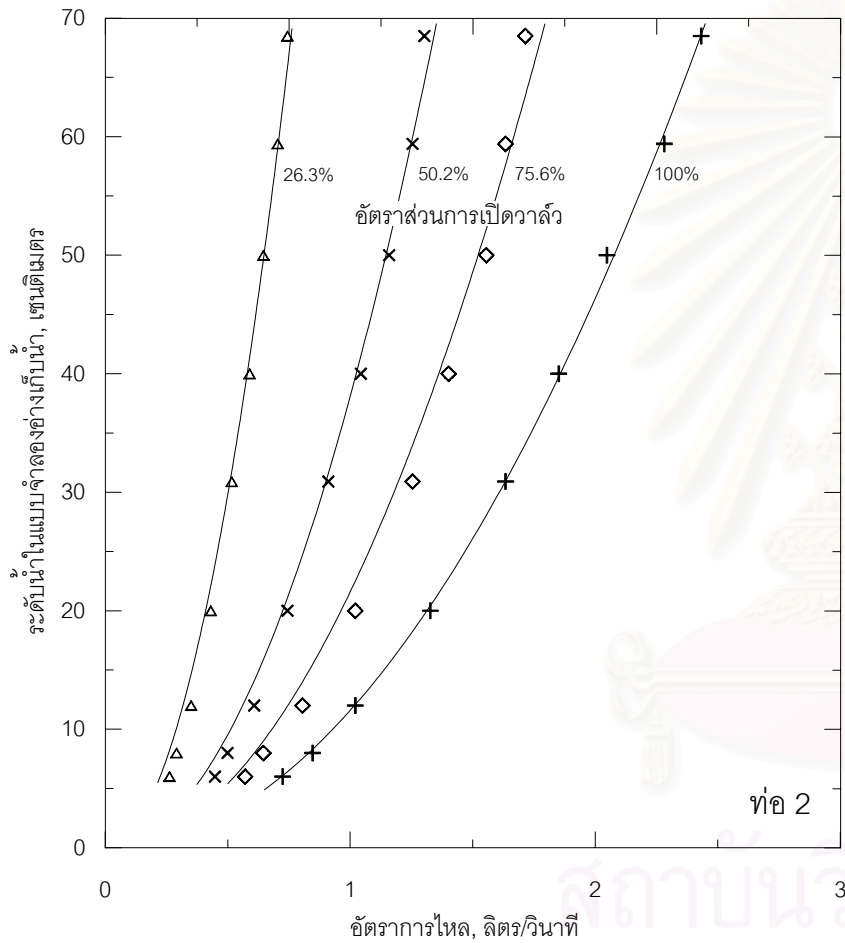
Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง

ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ

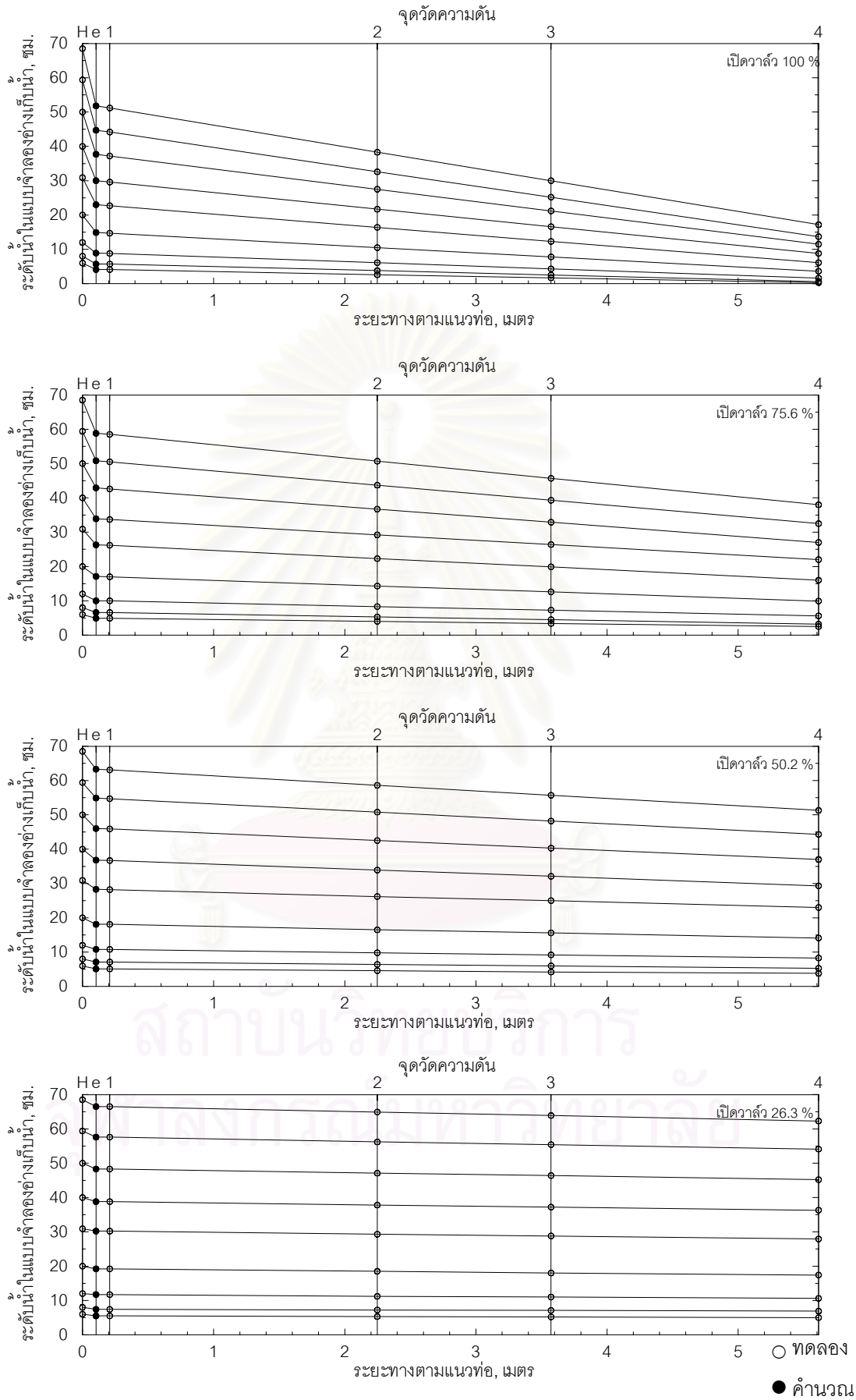


รูป ค2-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

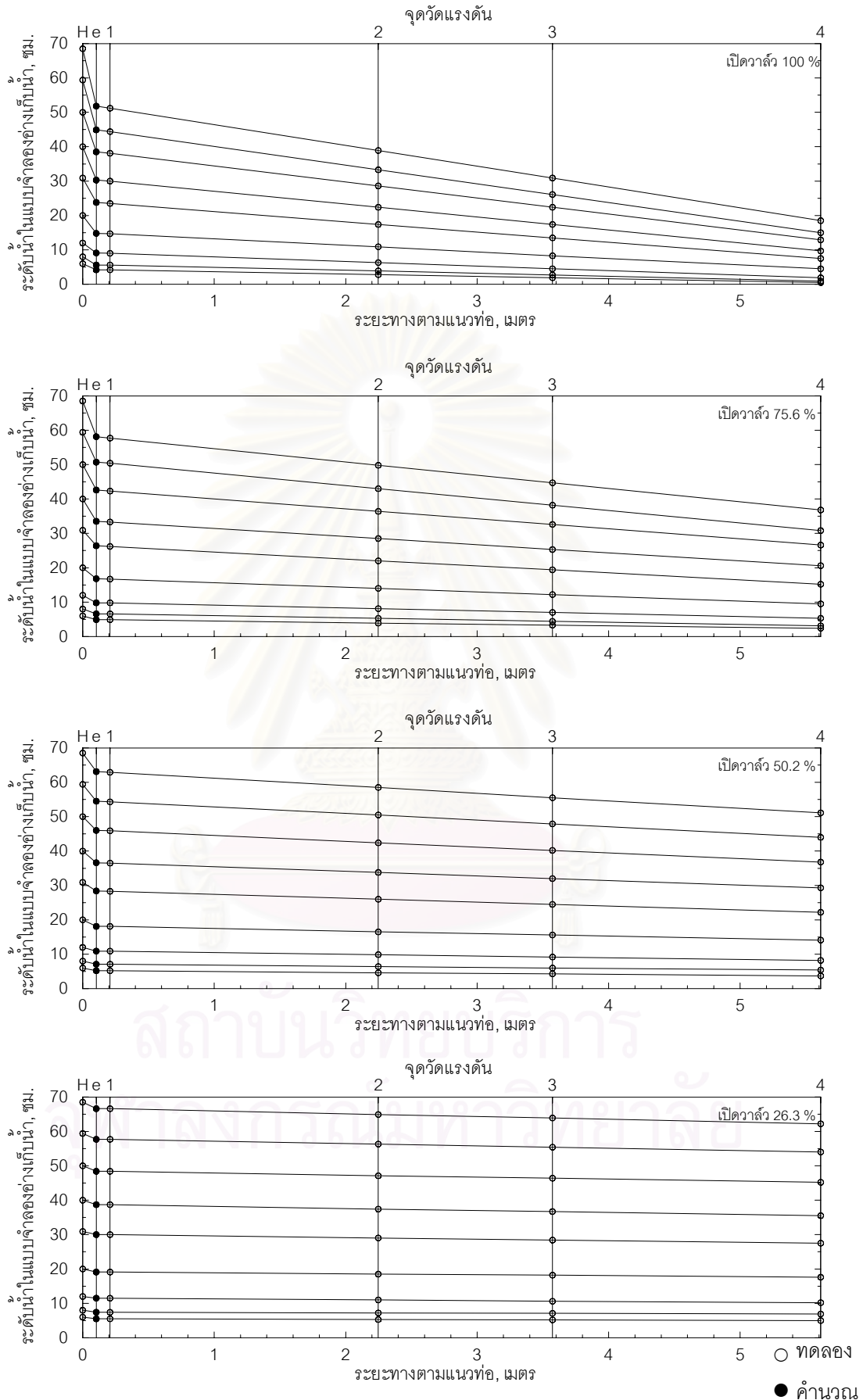
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ค2-2 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



รูป ค2-3 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



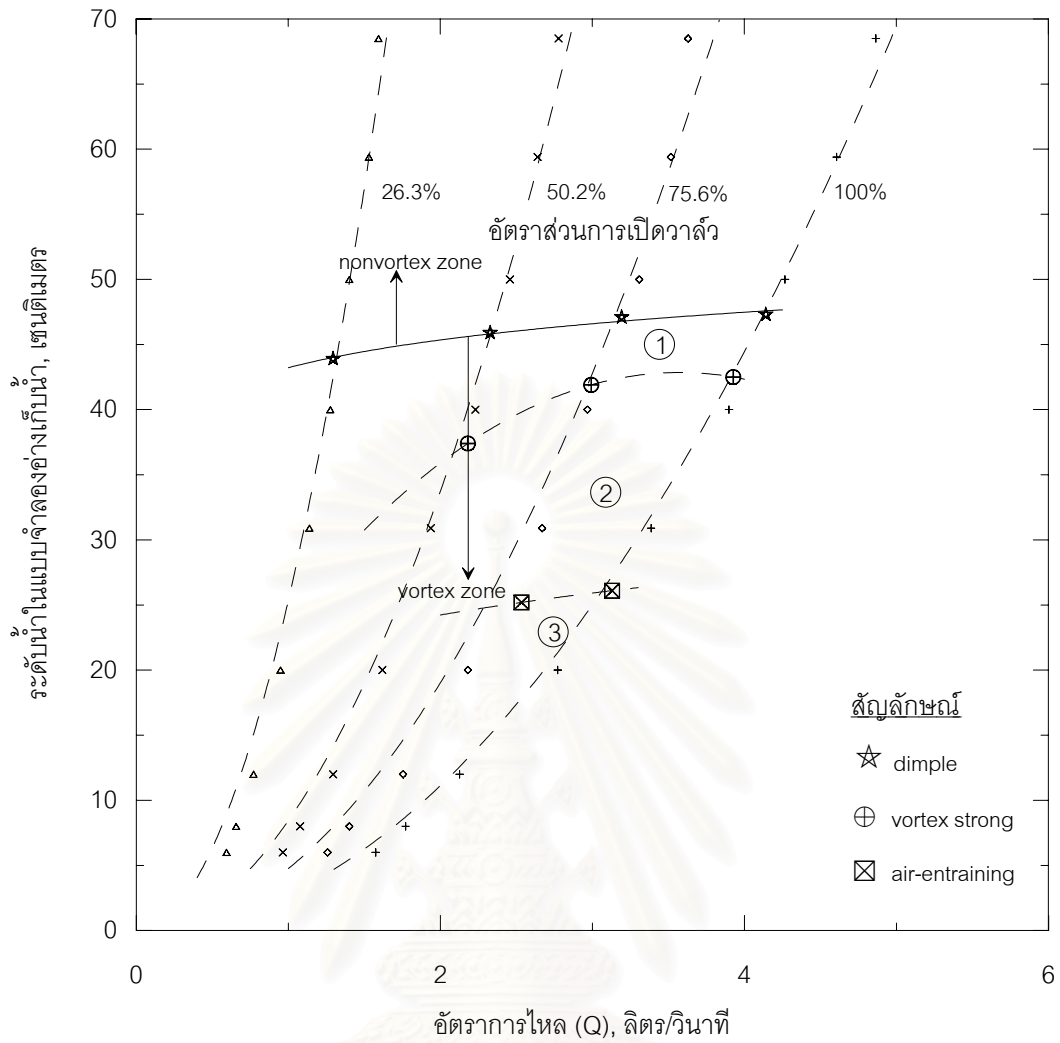
รูป ค2-4 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่างๆ ของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

ตาราง ค2-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.3	9.7	20.5	19.7	22.5	42.4	0.00	1.99	2.15	4.14	4.16
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	47.1	9.7	18.7	18.3	20.8	42.2	0.00	1.50	1.69	3.19	3.19
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	45.9	9.7	17.1	16.7	19.0	41.0	0.00	1.11	1.21	2.33	2.31
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	43.9	9.7	14.7	14.6	16.4	39.0	0.00	0.61	0.69	1.29	1.31
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	42.5	9.7	20.1	19.4	22.1	37.6	0.00	1.88	2.05	3.93	3.92
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	41.9	9.7	18.4	17.9	20.5	37.0	0.00	1.43	1.56	2.99	3.03
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	37.4	9.7	16.7	16.5	18.7	32.5	0.00	1.02	1.16	2.18	2.18
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	26.1	9.7	18.7	18.1	20.7	21.2	0.00	1.50	1.63	3.13	3.14
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	25.2	9.7	17.5	17.1	19.5	20.3	0.00	1.21	1.33	2.53	2.54
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี
 W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ
 Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)



รูป ค2-5 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

ตาราง ค2-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 2 กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.43	71.5	2.88	54.8	54.2	41.3	33.0	20.2	62.6	13.0	30.8	16.7	3.7	0.280	34.7	0.0212	7.04	2.5	2.36	0.080
	2.28	62.4	2.89	47.7	47.2	35.6	28.2	16.7	57.2	11.5	27.1	14.7	3.2	0.281	31.1	0.0220	6.60	1.1	2.36	0.040
	2.05	53.0	2.81	40.7	40.2	30.5	24.2	14.5	48.4	9.2	21.8	12.3	3.1	0.330	26.2	0.0231	5.93	1.9	2.36	0.088
	1.85	43.0	2.82	33.0	32.6	24.7	19.6	11.8	39.1	7.6	17.8	10.0	2.4	0.324	21.2	0.0229	5.36	1.5	2.36	0.086
	1.63	33.9	2.81	26.0	25.7	19.4	15.3	9.1	31.2	5.9	13.9	7.9	2.0	0.342	16.9	0.0234	4.73	1.1	2.36	0.079
	1.33	23.0	2.77	17.9	17.7	13.5	10.8	6.6	20.8	3.9	9.2	5.1	1.2	0.313	11.3	0.0237	3.84	1.3	2.36	0.144
	1.02	15.0	2.64	11.9	11.8	9.1	7.3	4.6	13.6	2.3	5.4	3.1	0.8	0.349	7.3	0.0261	2.95	1.5	2.36	0.272
	0.85	11.0	2.55	8.7	8.7	6.8	5.5	3.6	9.7	1.6	3.7	2.3	0.7	0.454	5.2	0.0269	2.45	1.4	2.36	0.388
0.72	9.0	2.41	7.1	7.1	5.6	4.7	3.3	6.9	1.2	2.7	1.9	0.7	0.644	3.9	0.0272	2.10	1.7	2.36	0.634	
0.756 (75.6%)	1.71	71.5	2.03	61.8	61.5	53.7	48.7	41.0	38.4	6.5	26.8	9.7	3.2	0.497	20.9	0.0263	4.96	20.7	4.13	0.775
	1.63	62.4	2.07	53.8	53.5	46.7	42.3	35.5	33.9	5.9	24.3	8.6	2.7	0.461	18.4	0.0254	4.73	17.1	4.13	0.702
	1.56	53.0	2.14	45.9	45.6	39.7	35.9	30.0	29.3	5.3	22.0	7.1	1.8	0.331	15.9	0.0243	4.50	13.3	4.13	0.604
	1.40	43.0	2.14	36.9	36.7	32.2	29.4	25.0	21.7	4.3	17.9	6.1	1.8	0.408	11.9	0.0224	4.06	11.4	4.13	0.639
	1.25	33.9	2.15	29.3	29.2	25.3	22.9	19.0	18.9	3.5	14.3	4.6	1.1	0.327	10.4	0.0243	3.63	8.1	4.13	0.569
	1.02	23.0	2.13	20.1	20.0	17.3	15.6	12.9	13.2	2.3	9.5	2.9	0.6	0.262	7.2	0.0256	2.95	5.7	4.13	0.601
	0.81	15.0	2.08	13.0	13.0	11.3	10.3	8.6	8.0	1.4	5.9	2.0	0.6	0.399	4.5	0.0253	2.33	4.1	4.13	0.699
	0.65	11.0	1.95	9.6	9.6	8.3	7.5	6.2	6.3	0.9	3.8	1.4	0.5	0.522	3.5	0.0305	1.87	3.3	4.13	0.874
0.57	9.0	1.90	7.9	7.9	7.0	6.4	5.5	4.5	0.7	3.0	1.1	0.4	0.530	2.4	0.0278	1.65	3.2	4.13	1.095	
0.502 (50.2%)	1.30	71.5	1.54	66.3	66.1	61.6	58.7	54.3	22.1	3.7	35.2	5.2	1.5	0.390	12.0	0.0262	3.77	22.8	9.41	0.649
	1.25	62.4	1.59	57.9	57.7	53.8	51.2	47.3	19.7	3.5	32.6	4.5	1.0	0.298	10.6	0.0250	3.63	18.1	9.41	0.556
	1.16	53.0	1.59	49.0	48.9	45.5	43.3	40.0	16.7	3.0	27.9	4.0	1.0	0.351	9.1	0.0250	3.35	15.1	9.41	0.542
	1.04	43.0	1.59	39.8	39.7	36.9	35.1	32.3	13.9	2.4	22.6	3.2	0.8	0.333	7.5	0.0256	3.02	12.1	9.41	0.536
	0.91	33.9	1.56	31.3	31.2	29.2	28.0	26.0	9.6	1.8	17.2	2.6	0.8	0.422	5.3	0.0234	2.64	10.6	9.41	0.617
	0.74	23.0	1.55	21.1	21.1	19.5	18.6	17.1	7.2	1.2	11.5	1.9	0.7	0.557	4.1	0.0269	2.15	6.8	9.41	0.595
	0.61	15.0	1.57	13.8	13.8	12.8	12.2	11.3	4.5	0.8	7.7	1.2	0.4	0.472	2.5	0.0254	1.76	4.4	9.41	0.579
	0.50	11.0	1.51	10.1	10.1	9.4	9.0	8.3	3.2	0.5	5.2	0.9	0.4	0.637	1.8	0.0269	1.45	3.7	9.41	0.710
0.45	9.0	1.49	8.1	8.1	7.6	7.2	6.8	2.5	0.4	4.2	0.9	0.5	1.034	1.3	0.0252	1.30	3.1	9.41	0.740	
0.263 (26.3%)	0.74	71.5	0.88	69.5	69.5	67.9	66.9	65.3	7.8	1.2	41.5	2.0	0.8	0.639	4.3	0.0285	2.15	25.0	33.99	0.603
	0.70	62.4	0.89	60.6	60.6	59.2	58.4	57.1	6.3	1.1	37.2	1.8	0.7	0.646	3.6	0.0264	2.04	21.0	33.99	0.566
	0.65	53.0	0.89	51.3	51.3	50.1	49.4	48.2	5.6	0.9	31.3	1.7	0.8	0.848	3.2	0.0277	1.87	17.9	33.99	0.571
	0.59	43.0	0.90	41.8	41.8	40.8	40.2	39.3	4.5	0.8	26.0	1.2	0.4	0.566	2.5	0.0270	1.71	14.0	33.99	0.539
	0.52	33.9	0.89	33.2	33.2	32.3	31.8	30.9	4.1	0.6	20.0	0.7	0.1	0.188	2.3	0.0319	1.50	11.5	33.99	0.572
	0.43	23.0	0.90	22.2	22.2	21.5	21.0	20.4	3.4	0.4	13.9	0.8	0.4	0.951	1.8	0.0370	1.25	6.9	33.99	0.493
	0.35	15.0	0.91	14.7	14.7	14.2	14.0	13.6	1.7	0.3	9.2	0.3	0.0	0.104	1.1	0.0325	1.02	4.6	33.99	0.502
	0.29	11.0	0.88	10.4	10.4	10.2	10.1	9.9	0.8	0.2	6.4	0.6	0.4	2.209	0.5	0.0217	0.84	3.7	33.99	0.587
0.26	9.0	0.88	8.5	8.5	8.3	8.2	8.0	0.8	0.2	5.2	0.5	0.3	2.283	0.5	0.0266	0.76	3.0	33.99	0.575	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ; $Q=KH_T^{0.5}$

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

R : เลขเรย์โนลด์; $R = vD/V$

ตาราง ค2-4 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 3 กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.43	71.5	2.88	54.8	54.2	41.9	33.9	21.5	60.5	13.0	30.8	16.7	3.7	0.281	33.3	0.0204	7.04	3.8	2.36	0.123
	2.32	62.4	2.94	47.9	47.4	36.3	29.1	18.0	55.4	11.9	28.1	14.5	2.6	0.217	30.0	0.0205	6.73	1.8	2.36	0.064
	2.22	53.0	3.05	41.5	41.1	31.6	25.4	15.9	47.5	10.9	25.6	11.5	0.6	0.059	25.7	0.0193	6.42	1.1	2.36	0.044
	2.05	43.0	3.12	33.3	33.0	25.4	20.4	12.7	38.4	9.2	21.8	9.7	0.5	0.050	20.7	0.0182	5.92	0.1	2.36	0.006
	1.75	33.9	3.01	26.8	26.5	20.4	16.5	10.5	30.0	6.8	16.0	7.1	0.3	0.049	16.3	0.0196	5.07	1.3	2.36	0.081
	1.44	23.0	3.01	17.8	17.7	13.9	11.3	7.5	19.5	4.6	10.9	5.2	0.6	0.130	10.4	0.0185	4.18	1.2	2.36	0.115
	1.11	15.0	2.86	12.1	12.0	9.3	7.5	4.9	13.4	2.7	6.4	2.9	0.2	0.076	7.2	0.0220	3.20	1.2	2.36	0.194
	0.92	11.0	2.79	8.6	8.6	6.9	5.7	3.9	9.1	1.9	4.4	2.4	0.5	0.275	4.8	0.0208	2.67	1.3	2.36	0.301
0.85	9.0	2.83	7.2	7.2	5.8	4.9	3.5	6.9	1.6	3.8	1.8	0.2	0.130	3.8	0.0193	2.46	1.3	2.36	0.355	
0.756 (75.6%)	1.91	71.5	2.26	61.1	60.7	52.8	47.7	39.8	39.3	8.1	33.4	10.4	2.3	0.288	21.3	0.0215	5.54	14.5	4.13	0.435
	1.88	62.4	2.38	53.7	53.4	46.0	41.2	33.8	36.9	7.8	32.2	8.7	0.9	0.115	20.0	0.0209	5.44	9.4	4.13	0.291
	1.75	53.0	2.41	45.6	45.3	39.4	35.6	29.6	29.6	6.8	28.0	7.4	0.6	0.093	16.0	0.0192	5.07	8.4	4.13	0.301
	1.56	43.0	2.39	36.5	36.3	31.5	28.3	23.6	24.0	5.4	22.3	6.5	1.1	0.204	12.9	0.0196	4.53	6.7	4.13	0.301
	1.42	33.9	2.43	29.4	29.2	25.0	22.4	18.2	20.5	4.4	18.2	4.5	0.1	0.019	11.2	0.0206	4.09	4.4	4.13	0.240
	1.16	23.0	2.42	19.8	19.7	17.0	15.2	12.5	13.6	3.0	12.2	3.2	0.2	0.079	7.3	0.0202	3.36	3.2	4.13	0.263
	0.95	15.0	2.45	12.8	12.8	11.1	10.0	8.3	8.4	2.0	8.2	2.2	0.2	0.107	4.6	0.0188	2.75	2.1	4.13	0.254
	0.76	11.0	2.28	9.6	9.6	8.3	7.4	6.1	6.7	1.3	5.2	1.4	0.1	0.114	3.6	0.0233	2.19	2.2	4.13	0.417
0.69	9.0	2.29	7.9	7.9	6.9	6.3	5.4	4.5	1.0	4.3	1.1	0.1	0.058	2.5	0.0199	1.99	2.1	4.13	0.500	
0.502 (50.2%)	1.47	71.5	1.74	66.1	65.9	61.5	58.5	54.1	22.5	4.8	45.1	5.4	0.6	0.127	12.0	0.0205	4.27	13.8	9.41	0.306
	1.39	62.4	1.75	57.5	57.3	53.5	50.9	47.0	19.7	4.2	39.8	4.9	0.7	0.157	10.5	0.0203	4.01	11.4	9.41	0.286
	1.30	53.0	1.78	49.0	48.9	45.4	43.2	39.8	16.9	3.7	35.0	4.0	0.3	0.075	9.3	0.0203	3.76	8.5	9.41	0.243
	1.19	43.0	1.81	39.6	39.5	36.8	35.0	32.3	13.6	3.1	29.2	3.4	0.3	0.094	7.3	0.0193	3.44	6.2	9.41	0.211
	1.03	33.9	1.76	31.4	31.3	29.0	27.5	25.2	11.5	2.3	21.9	2.5	0.2	0.076	6.2	0.0218	2.97	5.7	9.41	0.259
	0.87	23.0	1.82	21.1	21.1	19.5	18.6	17.1	7.2	1.7	15.9	1.9	0.2	0.127	4.1	0.0195	2.53	2.9	9.41	0.184
	0.69	15.0	1.77	13.9	13.9	12.9	12.2	11.2	5.1	1.0	9.8	1.1	0.1	0.058	2.8	0.0217	1.99	2.5	9.41	0.252
	0.58	11.0	1.74	10.1	10.1	9.4	9.0	8.4	3.0	0.7	6.9	0.9	0.2	0.222	1.7	0.0191	1.67	2.2	9.41	0.318
0.52	9.0	1.72	8.2	8.2	7.6	7.3	6.7	2.6	0.6	5.5	0.8	0.2	0.362	1.5	0.0207	1.49	1.8	9.41	0.318	
0.263 (26.3%)	0.85	71.5	1.00	69.6	69.6	67.9	66.9	65.2	8.0	1.6	54.0	1.9	0.3	0.195	4.5	0.0228	2.46	12.8	33.99	0.236
	0.83	62.4	1.05	60.7	60.7	59.3	58.4	57.0	6.9	1.5	51.1	1.7	0.2	0.130	3.8	0.0204	2.39	7.4	33.99	0.144
	0.76	53.0	1.04	51.4	51.4	50.1	49.4	48.2	5.6	1.3	42.7	1.6	0.3	0.273	3.3	0.0209	2.19	6.7	33.99	0.158
	0.69	43.0	1.05	41.7	41.7	40.4	39.7	38.5	5.6	1.0	35.3	1.3	0.3	0.251	3.3	0.0252	1.99	4.2	33.99	0.119
	0.62	33.9	1.07	33.0	33.0	32.0	31.4	30.5	4.5	0.9	28.9	0.9	0.0	0.057	2.5	0.0243	1.80	2.4	33.99	0.084
	0.52	23.0	1.08	22.1	22.1	21.5	21.2	20.6	2.6	0.6	20.0	0.9	0.3	0.527	1.5	0.0207	1.50	1.2	33.99	0.058
	0.42	15.0	1.08	14.5	14.5	14.0	13.6	13.2	2.5	0.4	13.2	0.5	0.1	0.287	1.3	0.0287	1.21	0.4	33.99	0.029
	0.37	11.0	1.10	10.4	10.4	10.2	10.1	9.9	0.8	0.3	10.0	0.6	0.3	1.033	0.5	0.0137	1.06	0.2	33.99	0.016
0.33	9.0	1.10	8.5	8.5	8.3	8.2	8.0	0.8	0.2	8.2	0.5	0.3	1.068	0.5	0.0168	0.96	0.0	33.99	0.003	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน
 s : ความลาดชันของเส้นความดัน f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ R : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/V$

ตาราง ค2-5 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃	ΣF
	ระยะยก cm	%	พื้นที่	%														
			ยกวาล์ว cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว														
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.3	0.00	1.99	2.15	0.00	1.31	1.41	42.4	9.64	0.00	1.99	2.15	4.14
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	47.1	0.00	1.50	1.69	0.00	0.99	1.11	42.2	9.59	0.00	1.51	1.69	3.20
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	45.9	0.00	1.11	1.21	0.00	0.73	0.80	41.0	9.32	0.00	1.11	1.22	2.33
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	43.9	0.00	0.61	0.69	0.00	0.40	0.45	39.0	8.86	0.00	0.61	0.69	1.30
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	42.5	0.00	1.88	2.05	0.00	1.24	1.35	37.6	8.55	0.00	1.88	2.05	3.93
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	41.9	0.00	1.43	1.56	0.00	0.94	1.03	37.0	8.41	0.00	1.43	1.57	3.00
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	37.4	0.00	1.02	1.16	0.00	0.67	0.76	32.5	7.39	0.00	1.02	1.16	2.18
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	26.1	0.00	1.50	1.63	0.00	0.99	1.07	21.2	4.82	0.00	1.51	1.63	3.13
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	25.2	0.00	1.21	1.33	0.00	0.79	0.87	20.3	4.61	0.00	1.21	1.33	2.54
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)
 d : เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ
 v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ตาราง ค3-1 ข้อมูลการทดลองกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

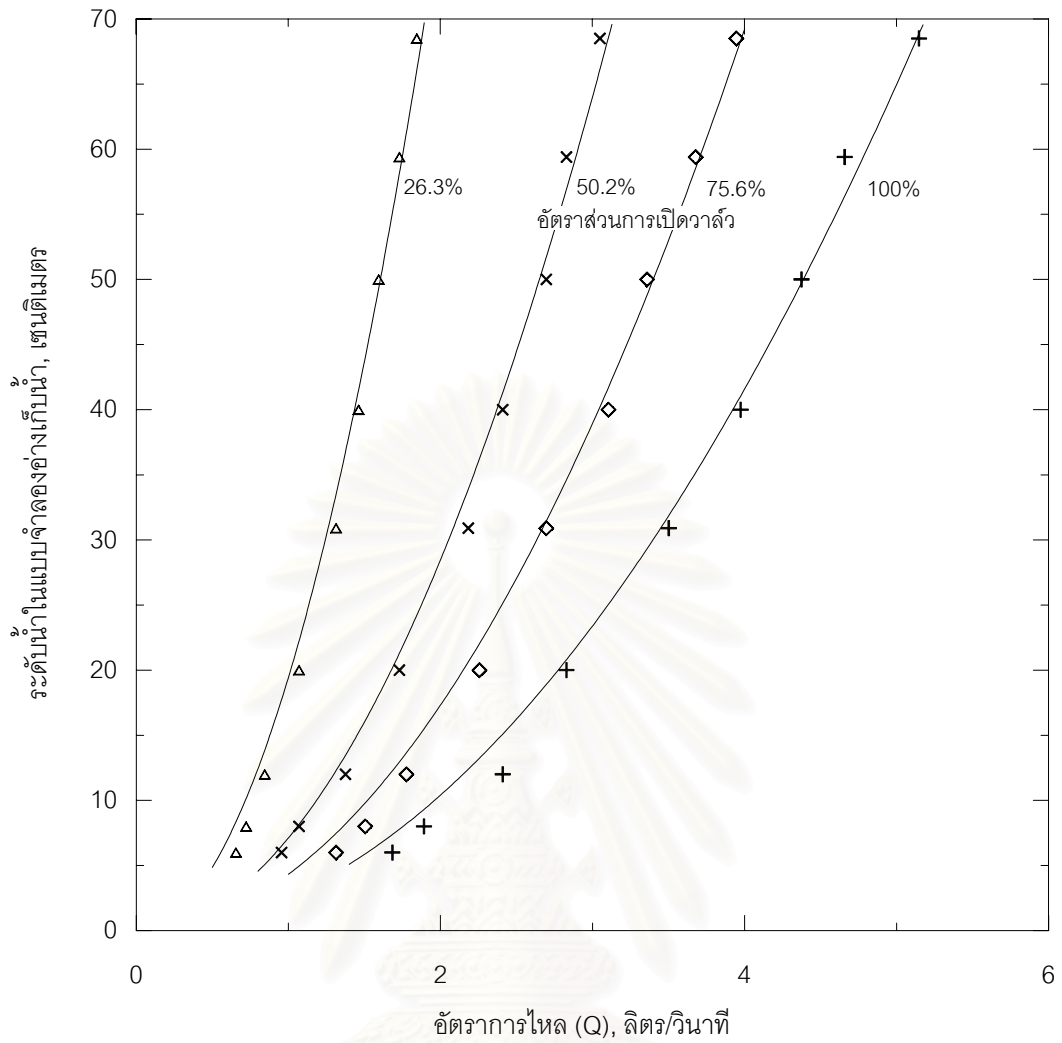
อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
1.00 (100%)	68.5	2.57	0.00	2.58	5.15	5.12	49.5	38.4	31.3	20.3	68.5	68.5	68.5	68.5	49.3	37.9	30.6	19.3	26
	59.4	2.33	0.00	2.32	4.66	4.66	42.7	32.7	26.3	16.3	59.4	59.4	59.4	59.4	42.8	32.6	26.1	15.9	27
	50.0	2.19	0.00	2.18	4.37	4.40	36.0	27.7	22.4	14.1	50.0	50.0	50.0	50.0	36.5	27.9	22.4	13.8	27
	40.0	1.99	0.00	1.98	3.97	3.98	28.7	22.1	17.8	11.3	40.0	40.0	40.0	40.0	28.8	22.0	17.6	10.9	27
	30.9	1.75	0.00	1.75	3.50	3.51	22.2	17.2	13.9	8.9	30.9	30.9	30.9	30.9	22.2	16.9	13.6	8.4	27
	20.0	1.41	0.00	1.42	2.83	2.88	14.3	10.7	8.4	4.8	20.0	20.0	20.0	20.0	14.4	10.7	8.3	4.6	27
	12.0	1.19	0.00	1.21	2.41	2.40	8.5	5.8	4.1	1.5	12.0	12.0	12.0	12.0	8.6	5.9	4.1	1.5	27
	8.0	0.94	0.00	0.95	1.89	1.97	5.6	3.5	2.2	0.1	8.0	8.0	8.0	8.0	5.7	3.5	2.1	0.1	26
	6.0	0.83	0.00	0.85	1.68	1.77	4.1	2.6	1.6	0.0	6.0	6.0	6.0	6.0	4.1	2.5	1.6	0.0	27
0.756 (75.6%)	68.5	1.97	0.00	1.98	3.95	3.92	58.9	51.1	46.1	38.3	68.5	68.5	68.5	68.5	58.7	50.9	45.8	38.0	26
	59.4	1.83	0.00	1.85	3.68	3.63	51.0	44.2	39.8	33.0	59.4	59.4	59.4	59.4	50.9	44.0	39.5	32.7	27
	50.0	1.67	0.00	1.69	3.36	3.35	42.9	37.1	33.4	27.6	50.0	50.0	50.0	50.0	42.7	36.7	32.9	26.9	27
	40.0	1.54	0.00	1.56	3.11	3.08	34.0	29.3	26.2	21.5	40.0	40.0	40.0	40.0	33.9	29.2	26.1	21.4	27
	30.9	1.34	0.00	1.36	2.70	2.64	26.2	22.4	20.0	16.3	30.9	30.9	30.9	30.9	26.1	22.3	19.9	16.2	27
	20.0	1.12	0.00	1.13	2.26	2.18	16.9	14.4	12.7	10.3	20.0	20.0	20.0	20.0	16.7	14.1	12.4	9.9	27
	12.0	0.88	0.00	0.90	1.78	1.70	9.7	8.1	7.0	5.4	12.0	12.0	12.0	12.0	9.6	8.0	6.9	5.3	27
	8.0	0.75	0.00	0.76	1.51	1.48	6.7	5.5	4.8	3.6	8.0	8.0	8.0	8.0	6.7	5.3	4.4	3.0	27
	6.0	0.65	0.00	0.66	1.31	1.28	4.6	3.6	3.0	2.1	6.0	6.0	6.0	6.0	4.6	3.6	2.9	1.9	27
0.502 (50.2%)	68.5	1.51	0.00	1.53	3.05	3.03	62.4	57.6	54.4	49.6	68.5	68.5	68.5	68.5	62.1	57.3	54.1	49.3	27
	59.4	1.41	0.00	1.42	2.83	2.78	54.2	50.0	47.4	43.2	59.4	59.4	59.4	59.4	54.1	49.9	47.2	43.1	27
	50.0	1.34	0.00	1.36	2.70	2.68	45.4	41.7	39.3	35.6	50.0	50.0	50.0	50.0	45.2	41.4	39.0	35.3	27
	40.0	1.19	0.00	1.21	2.41	2.36	36.2	33.1	31.1	28.0	40.0	40.0	40.0	40.0	36.0	32.9	31.0	28.0	27
	30.9	1.08	0.00	1.11	2.18	2.18	28.0	25.6	24.1	21.8	30.9	30.9	30.9	30.9	27.7	25.3	23.8	21.5	27
	20.0	0.86	0.00	0.87	1.73	1.74	18.2	16.5	15.5	13.8	20.0	20.0	20.0	20.0	18.0	16.3	15.3	13.6	27
	12.0	0.69	0.00	0.69	1.38	1.38	10.8	9.6	8.9	7.8	12.0	12.0	12.0	12.0	10.7	9.5	8.8	7.7	27
	8.0	0.53	0.00	0.54	1.07	1.06	7.2	6.3	5.8	4.9	8.0	8.0	8.0	8.0	7.2	6.3	5.8	4.9	27
	6.0	0.48	0.00	0.48	0.96	1.04	5.0	4.3	3.9	3.3	6.0	6.0	6.0	6.0	4.9	4.2	3.8	3.2	27
0.263 (26.3%)	68.5	0.92	0.00	0.92	1.84	1.89	66.5	64.5	63.2	61.2	68.5	68.5	68.5	68.5	66.0	63.9	62.5	60.4	27
	59.4	0.86	0.00	0.87	1.73	1.77	57.5	55.7	54.6	52.9	59.4	59.4	59.4	59.4	57.0	55.3	54.3	52.7	27
	50.0	0.79	0.00	0.80	1.59	1.62	48.3	46.7	45.8	44.3	50.0	50.0	50.0	50.0	47.9	46.5	45.7	44.3	27
	40.0	0.73	0.00	0.73	1.46	1.48	38.6	37.7	37.2	36.3	40.0	40.0	40.0	40.0	38.2	37.3	36.8	36.0	27
	30.9	0.65	0.00	0.65	1.30	1.41	29.9	29.2	28.8	28.2	30.9	30.9	30.9	30.9	29.9	29.3	28.9	28.3	27
	20.0	0.53	0.00	0.54	1.07	1.12	19.2	18.9	18.8	18.6	20.0	20.0	20.0	20.0	19.1	18.8	18.7	18.5	26
	12.0	0.43	0.00	0.42	0.85	0.95	11.4	11.1	11.0	10.8	12.0	12.0	12.0	12.0	11.4	11.1	10.9	10.7	27
	8.0	0.36	0.00	0.36	0.72	0.77	7.7	7.4	7.2	7.0	8.0	8.0	8.0	8.0	7.7	7.4	7.2	7.0	27
	6.0	0.33	0.00	0.33	0.66	0.70	5.7	5.5	5.4	5.3	6.0	6.0	6.0	6.0	5.7	5.5	5.4	5.3	27

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ

Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

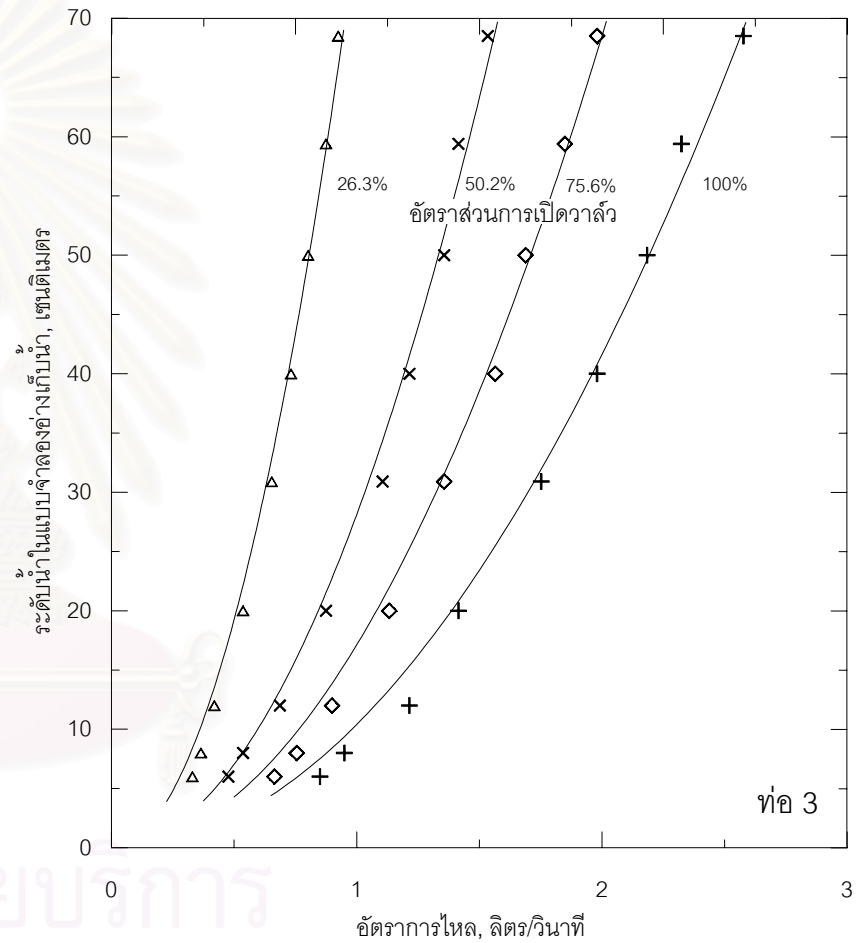
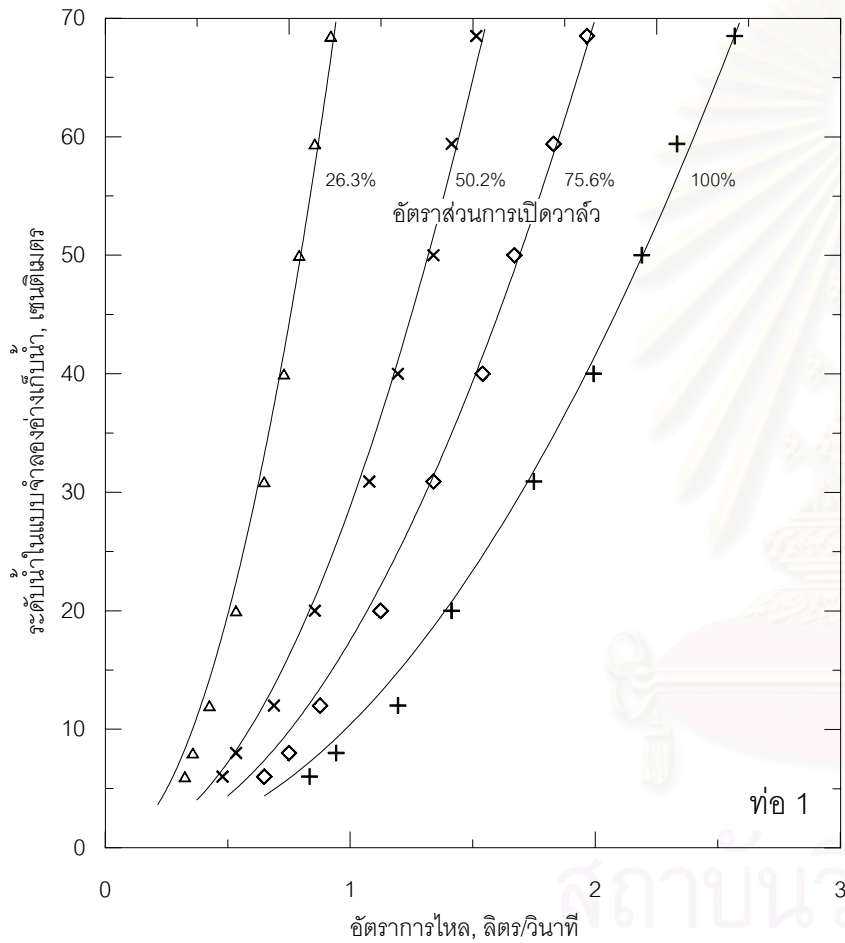
Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง

ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ

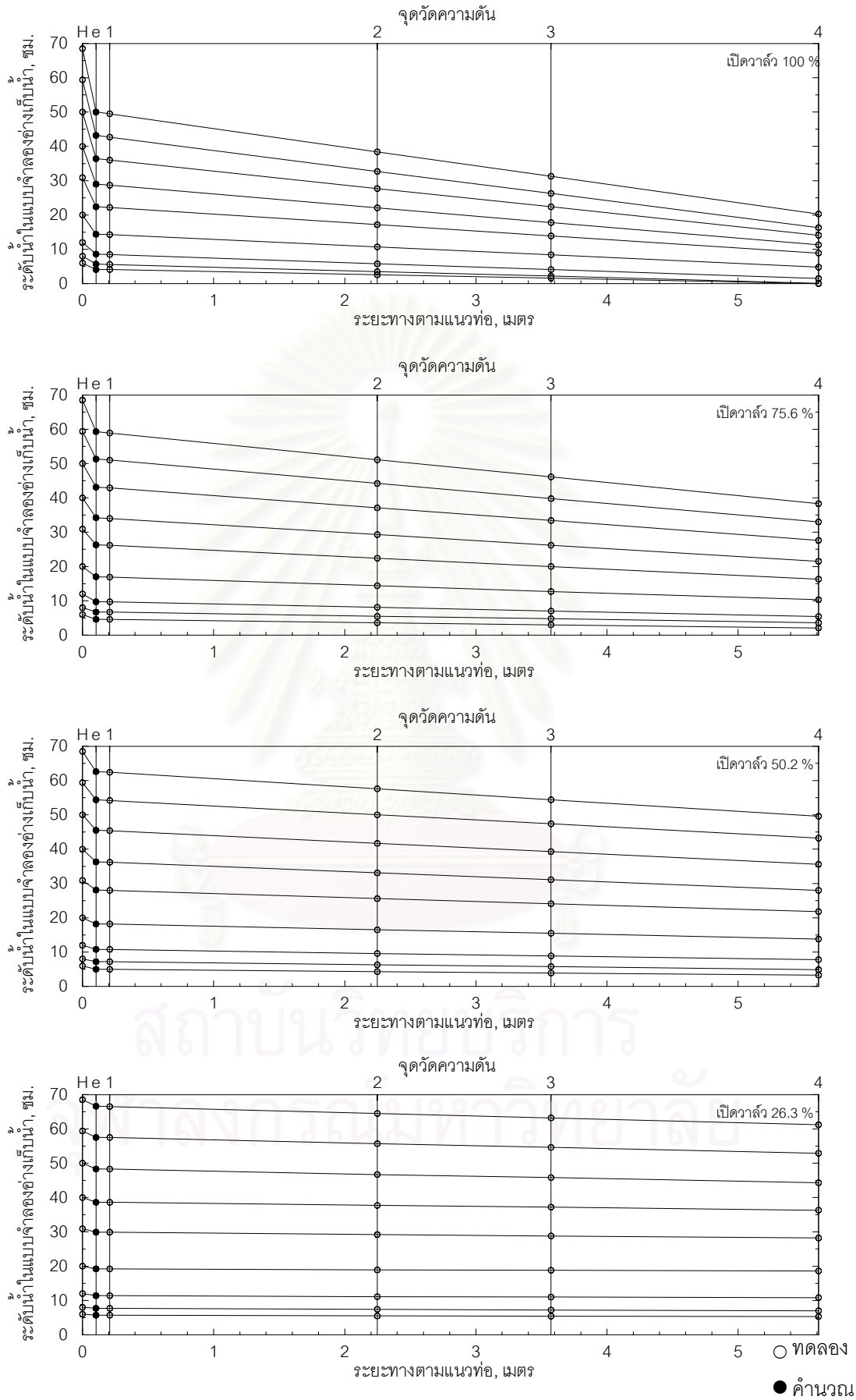


รูป ค3-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

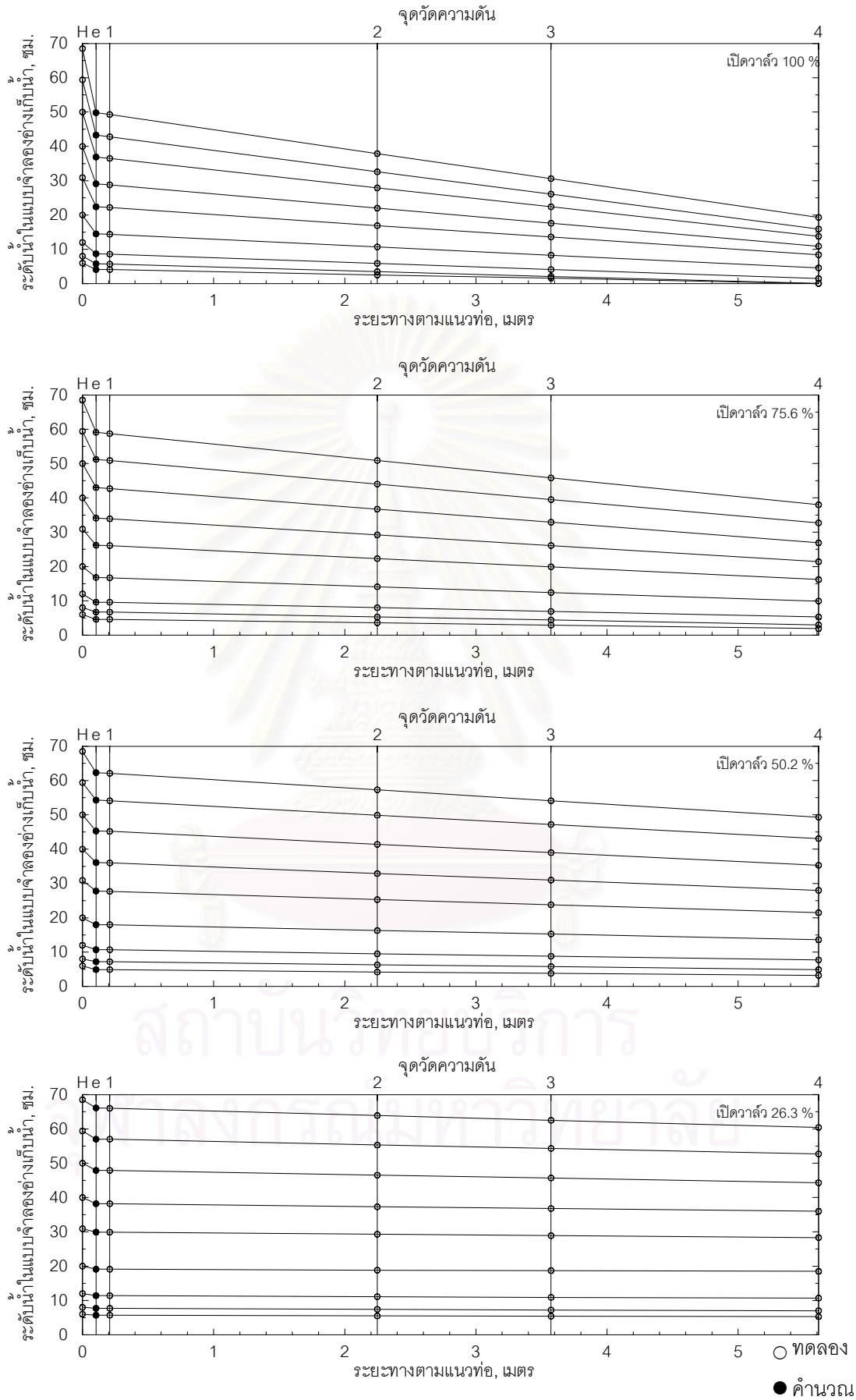
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ค3-2 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)



รูป ค3-3 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่างๆ ของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)



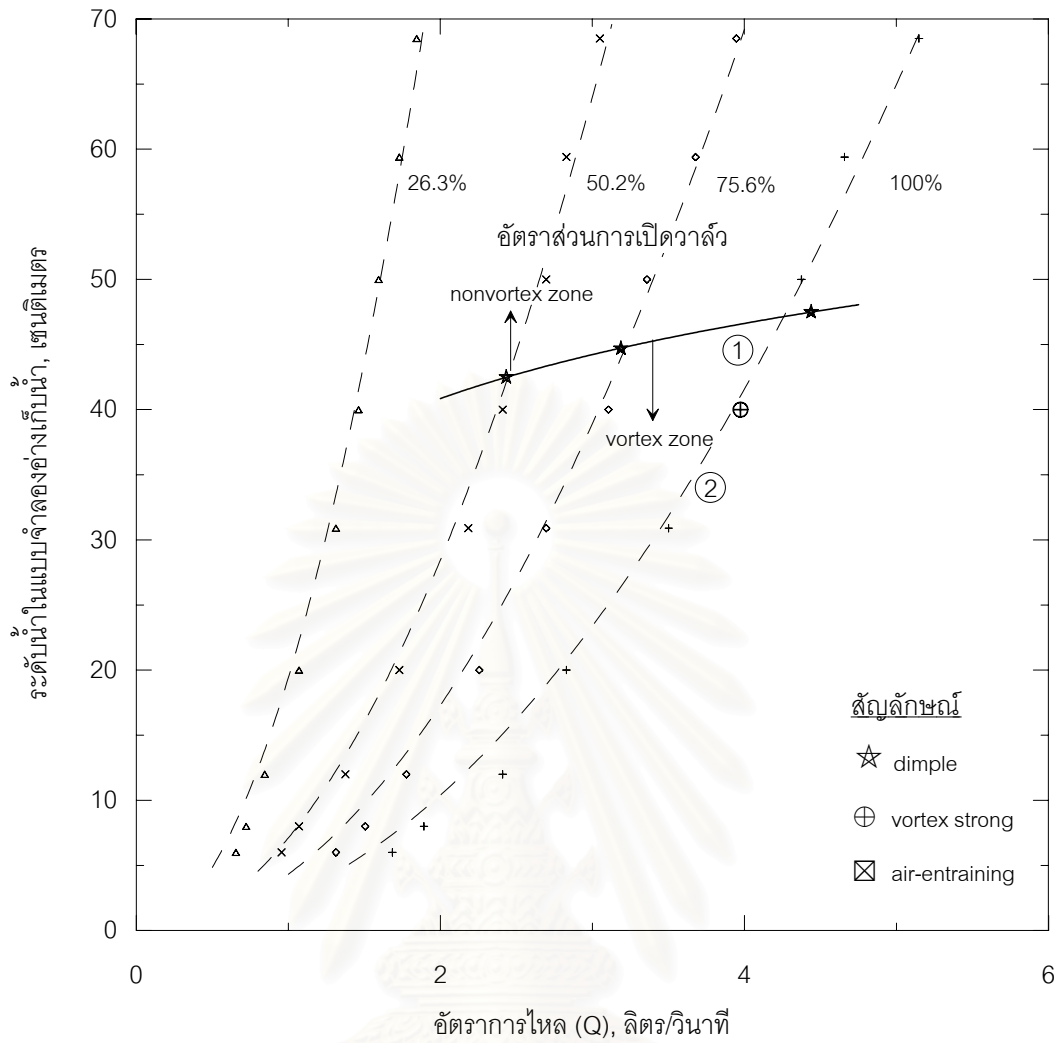
รูป ค3-4 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

ตาราง ค3-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และ 3)

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.5	20.8	9.7	19.9	23.0	42.6	2.22	0.00	2.22	4.44	4.47
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	44.7	18.5	9.7	18.0	20.8	39.8	1.59	0.00	1.60	3.19	3.19
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	42.5	17.0	9.7	16.7	19.2	37.6	1.22	0.00	1.21	2.43	2.40
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	40.0	20.0	9.7	19.2	22.2	35.1	1.99	0.00	1.98	3.97	3.98
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี
 W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ
 Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)



รูป ค3-5 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

ตาราง ค3-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 1 กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.57	71.5	3.04	53.0	52.5	41.4	34.3	23.3	53.7	14.6	34.3	18.5	3.9	0.271	29.8	0.0163	7.43	3.5	2.36	0.102
	2.33	62.4	2.95	46.2	45.7	35.7	29.3	19.3	49.6	12.0	28.3	16.2	4.2	0.349	26.9	0.0182	6.75	3.0	2.36	0.105
	2.19	53.0	3.01	39.4	39.0	30.7	25.4	17.1	41.1	10.6	25.0	13.6	3.0	0.286	22.3	0.0172	6.34	2.7	2.36	0.109
	1.99	43.0	3.04	32.0	31.7	25.1	20.8	14.3	32.7	8.8	20.7	11.0	2.2	0.256	17.7	0.0165	5.77	2.4	2.36	0.115
	1.75	33.9	3.00	25.4	25.2	20.2	16.9	11.9	25.1	6.7	15.9	8.5	1.8	0.260	13.6	0.0164	5.06	2.7	2.36	0.171
	1.41	23.0	2.95	17.4	17.3	13.7	11.4	7.8	17.8	4.4	10.4	5.6	1.2	0.271	9.7	0.0179	4.09	1.8	2.36	0.174
	1.19	15.0	3.08	11.6	11.5	8.8	7.1	4.5	13.0	3.1	7.4	3.4	0.3	0.081	7.1	0.0184	3.46	0.2	2.36	0.030
	0.94	11.0	2.84	8.7	8.6	6.5	5.2	3.1	10.2	2.0	4.6	2.3	0.3	0.175	5.6	0.0232	2.73	0.4	2.36	0.095
0.83	9.0	2.78	7.1	7.1	5.6	4.6	3.0	7.8	1.5	3.6	1.9	0.4	0.239	4.2	0.0222	2.41	0.9	2.36	0.253	
0.756 (75.6%)	1.97	71.5	2.32	62.3	61.9	54.1	49.1	41.3	38.7	8.5	35.2	9.2	0.7	0.080	21.0	0.0200	5.69	14.6	4.13	0.416
	1.83	62.4	2.32	54.3	54.0	47.2	42.8	36.0	33.9	7.4	30.5	8.1	0.7	0.098	18.4	0.0202	5.29	12.9	4.13	0.423
	1.67	53.0	2.29	46.1	45.9	40.1	36.4	30.6	28.7	6.1	25.4	6.9	0.8	0.122	15.6	0.0206	4.83	11.4	4.13	0.447
	1.54	43.0	2.35	37.2	37.0	32.3	29.2	24.5	23.6	5.2	21.6	5.8	0.6	0.109	12.7	0.0199	4.46	8.1	4.13	0.376
	1.34	33.9	2.30	29.3	29.2	25.4	23.0	19.3	18.4	4.0	16.3	4.6	0.6	0.163	10.1	0.0207	3.88	6.9	4.13	0.423
	1.12	23.0	2.34	20.0	19.9	17.4	15.7	13.3	12.5	2.8	11.5	3.0	0.2	0.077	6.7	0.0198	3.25	4.6	4.13	0.398
	0.88	15.0	2.26	12.7	12.7	11.1	10.0	8.4	8.2	1.7	7.0	2.3	0.6	0.357	4.4	0.0212	2.54	3.1	4.13	0.442
	0.75	11.0	2.26	9.7	9.7	8.5	7.8	6.6	5.6	1.2	5.1	1.3	0.1	0.048	3.2	0.0205	2.17	2.7	4.13	0.530
0.65	9.0	2.16	7.6	7.6	6.6	6.0	5.1	4.5	0.9	3.8	1.4	0.5	0.507	2.5	0.0223	1.88	2.2	4.13	0.571	
0.502 (50.2%)	1.51	71.5	1.79	65.6	65.4	60.6	57.4	52.6	24.3	5.1	47.6	5.9	0.8	0.167	13.0	0.0211	4.38	10.1	9.41	0.212
	1.41	62.4	1.79	57.4	57.2	53.0	50.4	46.2	20.5	4.4	41.5	5.0	0.6	0.135	11.2	0.0206	4.09	9.1	9.41	0.221
	1.34	53.0	1.84	48.5	48.4	44.7	42.3	38.6	18.4	4.0	37.2	4.5	0.5	0.138	10.0	0.0206	3.88	5.3	9.41	0.143
	1.19	43.0	1.82	39.3	39.2	36.1	34.1	31.0	15.4	3.1	29.6	3.7	0.6	0.176	8.4	0.0216	3.46	4.5	9.41	0.153
	1.08	33.9	1.85	31.1	31.0	28.6	27.1	24.8	11.5	2.6	24.1	2.8	0.2	0.093	6.3	0.0201	3.12	3.3	9.41	0.135
	0.86	23.0	1.78	21.2	21.2	19.5	18.5	16.8	8.0	1.6	15.2	1.8	0.2	0.116	4.5	0.0224	2.48	3.2	9.41	0.213
	0.69	15.0	1.78	13.8	13.8	12.6	11.9	10.8	5.4	1.0	9.8	1.2	0.2	0.147	3.1	0.0237	1.99	2.0	9.41	0.203
	0.53	11.0	1.61	10.2	10.2	9.3	8.8	7.9	4.1	0.6	5.9	0.8	0.2	0.273	2.3	0.0299	1.55	2.6	9.41	0.442
0.48	9.0	1.60	8.0	8.0	7.3	6.9	6.3	3.0	0.5	4.8	1.0	0.5	0.977	1.7	0.0278	1.39	2.0	9.41	0.430	
0.263 (26.3%)	0.92	71.5	1.09	69.6	69.5	67.5	66.2	64.2	10.0	1.9	63.5	1.9	0.0	0.017	5.4	0.0236	2.66	2.6	33.99	0.041
	0.86	62.4	1.08	60.5	60.5	58.7	57.6	55.9	8.4	1.6	54.8	1.9	0.3	0.178	4.7	0.0236	2.48	2.7	33.99	0.049
	0.79	53.0	1.09	51.3	51.3	49.7	48.8	47.3	7.2	1.4	47.0	1.7	0.3	0.230	4.1	0.0238	2.29	1.7	33.99	0.036
	0.73	43.0	1.11	41.6	41.6	40.7	40.2	39.3	4.1	1.2	39.9	1.4	0.2	0.193	2.3	0.0160	2.11	0.6	33.99	0.015
	0.65	33.9	1.11	32.9	32.9	32.2	31.8	31.2	3.0	0.9	31.6	1.0	0.1	0.076	1.7	0.0151	1.88	0.5	33.99	0.017
	0.53	23.0	1.11	22.2	22.2	21.9	21.8	21.6	0.8	0.6	21.4	0.8	0.2	0.273	0.6	0.0076	1.55	0.9	33.99	0.040
	0.43	15.0	1.10	14.4	14.4	14.1	14.0	13.8	0.8	0.4	13.6	0.6	0.2	0.501	0.6	0.0120	1.23	0.6	33.99	0.045
	0.36	11.0	1.08	10.7	10.7	10.4	10.2	10.0	1.2	0.3	9.6	0.3	0.0	0.062	0.7	0.0210	1.04	0.7	33.99	0.071
0.33	9.0	1.08	8.7	8.7	8.5	8.4	8.3	0.6	0.2	7.9	0.3	0.1	0.285	0.4	0.0143	0.94	0.6	33.99	0.075	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน
 s : ความลาดชันของเส้นความดัน f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ R : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/V$

ตาราง ค3-4 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 3 กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.58	71.5	3.05	52.8	52.3	40.9	33.6	22.3	55.2	14.6	34.6	18.7	4.1	0.277	30.6	0.0167	7.46	2.4	2.36	0.069
	2.32	62.4	2.94	46.3	45.8	35.6	29.1	18.9	50.5	11.9	28.1	16.1	4.2	0.352	27.4	0.0187	6.73	2.7	2.36	0.096
	2.18	53.0	3.00	39.9	39.5	30.9	25.4	16.8	42.6	10.5	24.8	13.1	2.6	0.246	23.1	0.0179	6.32	2.5	2.36	0.101
	1.98	43.0	3.02	32.1	31.8	25.0	20.6	13.9	33.6	8.6	20.4	10.9	2.3	0.261	18.2	0.0172	5.73	2.1	2.36	0.105
	1.75	33.9	3.01	25.4	25.2	19.9	16.6	11.4	25.6	6.8	16.0	8.5	1.7	0.256	14.1	0.0169	5.07	2.2	2.36	0.138
	1.42	23.0	2.95	17.5	17.4	13.7	11.3	7.6	18.4	4.4	10.4	5.5	1.1	0.246	10.0	0.0184	4.09	1.6	2.36	0.153
	1.21	15.0	3.14	11.7	11.6	8.9	7.1	4.5	13.4	3.3	7.7	3.3	0.0	0.014	7.2	0.0182	3.52	0.1	2.36	0.010
	0.95	11.0	2.86	8.8	8.7	6.5	5.1	3.1	10.3	2.0	4.7	2.2	0.2	0.107	5.7	0.0235	2.75	0.4	2.36	0.085
0.85	9.0	2.83	7.1	7.1	5.5	4.6	3.0	7.4	1.6	3.8	1.9	0.3	0.192	4.2	0.0211	2.46	0.8	2.36	0.222	
0.756 (75.6%)	1.98	71.5	2.34	62.1	61.7	53.9	48.8	41.0	39.1	8.6	35.7	9.4	0.8	0.087	21.1	0.0199	5.73	13.9	4.13	0.390
	1.85	62.4	2.34	54.2	53.9	47.0	42.5	35.7	34.3	7.5	31.1	8.2	0.7	0.088	18.6	0.0201	5.35	12.1	4.13	0.389
	1.69	53.0	2.32	46.0	45.7	39.7	35.9	29.9	29.6	6.3	26.0	7.0	0.7	0.113	16.1	0.0208	4.89	10.2	4.13	0.394
	1.56	43.0	2.39	37.1	36.9	32.2	29.1	24.4	23.6	5.4	22.3	5.9	0.5	0.093	12.7	0.0192	4.53	7.5	4.13	0.336
	1.36	33.9	2.33	29.2	29.1	25.3	22.9	19.2	18.4	4.1	16.8	4.7	0.6	0.158	10.1	0.0202	3.93	6.5	4.13	0.388
	1.13	23.0	2.36	19.8	19.7	17.1	15.4	12.9	12.7	2.8	11.7	3.2	0.4	0.131	6.9	0.0200	3.28	4.0	4.13	0.346
	0.90	15.0	2.32	12.6	12.6	11.0	9.9	8.3	8.2	1.8	7.4	2.4	0.6	0.346	4.4	0.0201	2.60	2.7	4.13	0.369
	0.76	11.0	2.28	9.7	9.7	8.3	7.4	6.0	6.9	1.3	5.2	1.3	0.0	0.034	3.8	0.0244	2.19	2.1	4.13	0.398
0.66	9.0	2.21	7.6	7.6	6.6	5.9	4.9	5.1	1.0	4.0	1.4	0.4	0.439	2.8	0.0232	1.92	1.9	4.13	0.462	
0.502 (50.2%)	1.53	71.5	1.81	65.3	65.1	60.3	57.1	52.3	24.3	5.2	48.8	6.2	1.0	0.194	13.0	0.0205	4.44	8.6	9.41	0.177
	1.42	62.4	1.79	57.3	57.1	52.9	50.2	46.1	20.6	4.4	41.5	5.1	0.7	0.155	11.2	0.0207	4.09	9.0	9.41	0.216
	1.36	53.0	1.86	48.3	48.2	44.4	42.0	38.3	18.4	4.1	38.2	4.7	0.6	0.158	10.1	0.0202	3.93	4.2	9.41	0.109
	1.21	43.0	1.85	39.1	39.0	35.9	34.0	31.0	14.8	3.3	30.6	3.9	0.6	0.199	8.2	0.0203	3.52	3.6	9.41	0.119
	1.11	33.9	1.90	30.8	30.7	28.3	26.8	24.5	11.5	2.7	25.4	3.1	0.4	0.150	6.3	0.0191	3.20	1.8	9.41	0.072
	0.87	23.0	1.82	21.0	21.0	19.3	18.3	16.6	8.0	1.7	15.9	2.0	0.3	0.186	4.5	0.0215	2.53	2.4	9.41	0.153
	0.69	15.0	1.77	13.7	13.7	12.5	11.8	10.7	5.4	1.0	9.8	1.3	0.3	0.251	3.1	0.0238	1.99	2.0	9.41	0.201
	0.54	11.0	1.62	10.2	10.2	9.3	8.8	7.9	4.1	0.6	6.0	0.8	0.2	0.261	2.3	0.0297	1.55	2.6	9.41	0.429
0.48	9.0	1.59	7.9	7.9	7.2	6.8	6.2	3.0	0.5	4.7	1.1	0.6	1.197	1.7	0.0280	1.38	2.0	9.41	0.423	
0.263 (26.3%)	0.92	71.5	1.09	69.1	69.0	66.9	65.5	63.4	10.6	1.9	64.0	2.4	0.5	0.275	5.7	0.0247	2.67	1.3	33.99	0.020
	0.87	62.4	1.11	60.0	60.0	58.3	57.3	55.7	7.8	1.7	57.3	2.4	0.7	0.423	4.4	0.0210	2.53	0.1	33.99	0.001
	0.80	53.0	1.10	50.9	50.9	49.5	48.7	47.3	6.5	1.4	48.2	2.1	0.7	0.481	3.7	0.0208	2.32	0.5	33.99	0.011
	0.73	43.0	1.12	41.2	41.2	40.3	39.8	39.0	3.9	1.2	40.2	1.8	0.6	0.524	2.2	0.0153	2.12	0.0	33.99	0.001
	0.65	33.9	1.12	32.9	32.9	32.3	31.9	31.3	3.0	0.9	32.0	1.0	0.1	0.063	1.6	0.0142	1.89	0.3	33.99	0.008
	0.54	23.0	1.12	22.1	22.1	21.8	21.7	21.5	0.8	0.6	21.6	0.9	0.3	0.418	0.6	0.0075	1.55	0.6	33.99	0.026
	0.42	15.0	1.08	14.4	14.4	14.1	13.9	13.7	1.2	0.4	13.2	0.6	0.2	0.548	0.7	0.0153	1.21	0.9	33.99	0.070
	0.36	11.0	1.10	10.7	10.7	10.4	10.2	10.0	1.2	0.3	10.0	0.3	0.0	0.023	0.7	0.0202	1.06	0.3	33.99	0.032
0.33	9.0	1.10	8.7	8.7	8.5	8.4	8.3	0.6	0.2	8.2	0.3	0.1	0.249	0.4	0.0139	0.96	0.4	33.99	0.046	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

R : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/V$

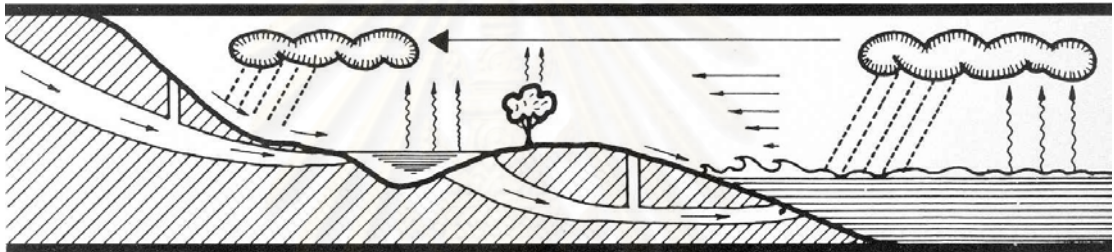
ตาราง ค3-5 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃	ΣF
	ระยะยก	%	พื้นที่	% (100%)														
	cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว														
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.5	2.22	0.00	2.22	1.46	0.00	1.46	42.6	9.68	2.22	0.00	2.22	4.44
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	44.7	1.59	0.00	1.60	1.05	0.00	1.05	39.8	9.05	1.59	0.00	1.60	3.19
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	42.5	1.22	0.00	1.21	0.80	0.00	0.80	37.6	8.55	1.22	0.00	1.22	2.44
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	40.0	1.99	0.00	1.98	1.31	0.00	1.30	35.1	7.98	2.00	0.00	1.98	3.98
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)
 d : เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ
 v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ภาคผนวก ง
กรณีการทดลองการไหล 3 ท่อ



ง1 การทดลองการไหลในท่อที่ 1, 2, และ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง1-1 ข้อมูลการทดลองกรณีการไหล 3 ท่อ

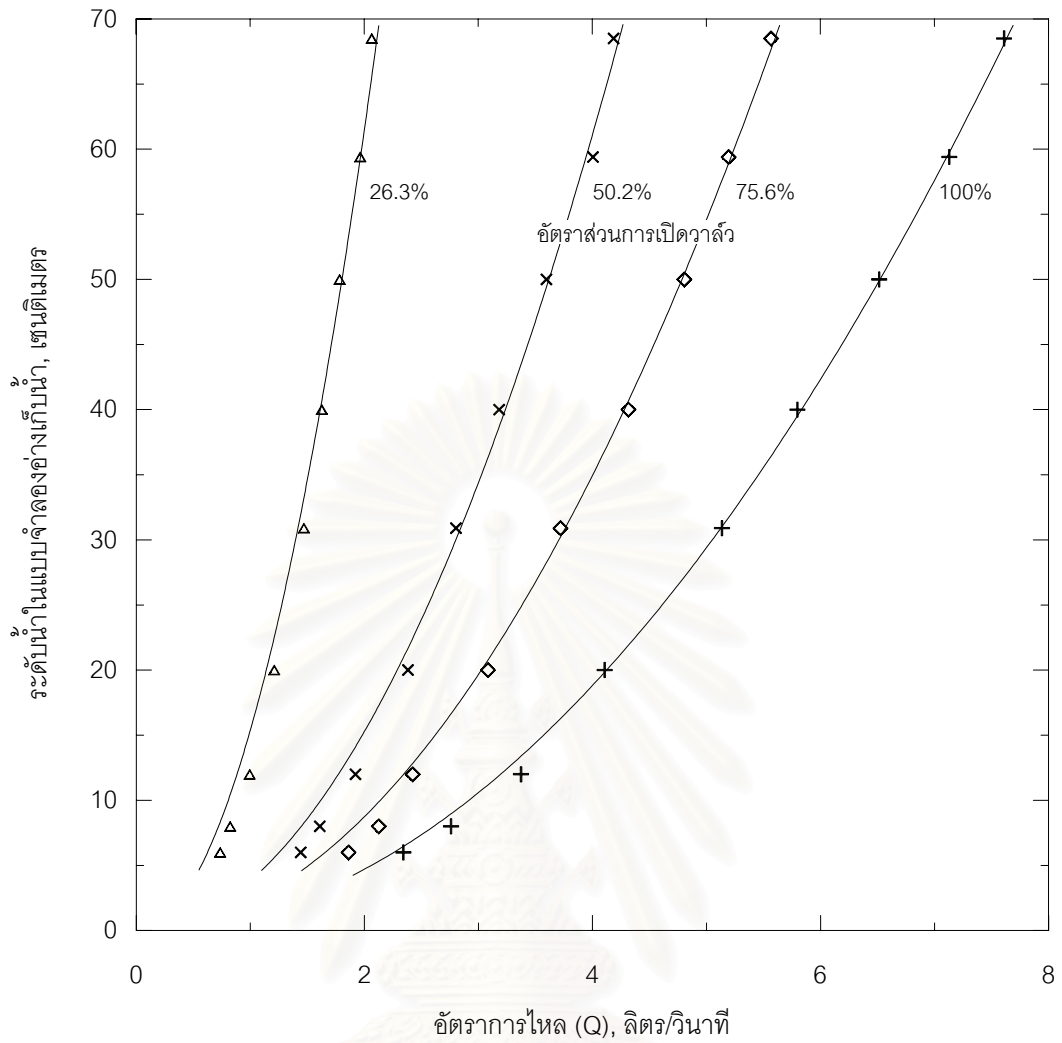
อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	H cm	Q ₁	Q ₂	Q ₃	ΣQ	Q	pipe 1				pipe 2				pipe 3				T °C
		ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	ลิตร/วินาที 10 ⁻³ m ³ /s	P ₁ cm	P ₂ cm	P ₃ cm	P ₄ cm	P ₁ cm	P ₂ cm	P ₃ cm	P ₄ cm	P ₁ cm	P ₂ cm	P ₃ cm	P ₄ cm	
1.00 (100%)	68.5	2.57	2.46	2.58	7.61	7.64	49.1	39.0	32.5	22.5	50.5	39.5	32.4	21.5	48.7	38.6	32.0	21.9	26
	59.4	2.39	2.34	2.40	7.13	7.15	42.6	33.0	26.8	17.2	43.7	32.7	25.5	14.6	42.1	32.1	25.6	15.6	27
	50.0	2.19	2.11	2.22	6.51	6.51	36.0	27.3	21.7	13.0	36.9	27.1	20.8	11.0	36.4	27.7	22.1	13.5	27
	40.0	1.97	1.85	1.98	5.80	5.76	28.7	21.4	16.7	9.5	29.5	21.5	16.4	8.5	28.6	21.5	16.8	9.7	27
	30.9	1.75	1.63	1.75	5.14	5.12	22.1	16.4	12.7	7.1	22.6	16.3	12.2	6.0	22.4	16.6	12.9	7.2	27
	20.0	1.39	1.30	1.42	4.11	4.10	14.3	9.9	7.1	2.8	14.7	10.4	7.7	3.4	14.1	10.0	7.3	3.2	27
	12.0	1.15	1.07	1.16	3.37	3.35	8.3	5.5	3.7	1.0	8.6	5.9	4.2	1.5	8.3	5.5	3.8	1.1	27
	8.0	0.94	0.87	0.95	2.76	2.83	5.5	3.3	1.9	-0.1	5.7	3.8	2.7	0.8	5.4	3.3	2.0	-0.1	27
	6.0	0.79	0.72	0.83	2.34	2.36	3.5	2.0	1.1	-0.3	3.8	2.4	1.5	0.1	3.5	2.0	1.1	-0.3	27
0.756 (75.6%)	68.5	1.91	1.74	1.91	5.57	5.54	58.2	50.3	45.1	37.2	58.5	50.8	45.9	38.2	57.7	49.9	44.9	37.1	26
	59.4	1.78	1.63	1.78	5.19	5.19	50.7	43.7	39.2	32.3	51.1	44.4	40.1	33.5	50.5	43.3	38.6	31.4	27
	50.0	1.64	1.50	1.66	4.80	4.79	42.5	36.6	32.8	26.9	42.6	36.9	33.2	27.5	42.2	36.2	32.3	26.4	27
	40.0	1.46	1.38	1.47	4.32	4.28	34.2	29.4	26.3	21.6	34.1	29.8	27.1	22.9	33.7	28.9	25.8	21.1	27
	30.9	1.27	1.18	1.27	3.72	3.74	26.4	22.6	20.2	16.5	26.4	22.6	20.2	16.4	26.2	22.3	19.7	15.8	27
	20.0	1.05	0.98	1.05	3.08	3.08	17.1	14.4	12.6	9.9	17.1	14.6	12.9	10.5	16.9	14.2	12.5	9.8	27
	12.0	0.81	0.78	0.83	2.42	2.45	10.2	8.4	7.2	5.4	10.2	8.4	7.2	5.4	10.0	8.2	7.0	5.2	27
	8.0	0.73	0.67	0.73	2.13	2.14	6.7	5.4	4.6	3.4	6.6	5.3	4.4	3.1	6.6	5.3	4.4	3.1	27
	6.0	0.63	0.59	0.64	1.86	1.93	5.0	4.0	3.4	2.5	4.9	3.9	3.2	2.3	5.0	4.1	3.6	2.8	27
0.502 (50.2%)	68.5	1.41	1.33	1.44	4.19	4.22	63.0	58.6	55.8	51.4	63.0	58.5	55.6	51.1	62.8	58.3	55.5	51.1	27
	59.4	1.36	1.25	1.39	4.00	3.98	54.6	50.7	48.3	44.4	54.4	50.4	47.9	43.9	54.3	50.3	47.8	43.9	27
	50.0	1.22	1.14	1.24	3.60	3.57	46.0	42.6	40.4	37.0	46.0	42.3	40.0	36.4	46.0	42.5	40.3	36.9	27
	40.0	1.08	1.00	1.11	3.18	3.19	36.6	33.9	32.1	29.4	36.7	33.9	32.1	29.3	36.4	33.8	32.1	29.5	27
	30.9	0.96	0.89	0.95	2.80	2.83	28.3	26.1	24.6	22.5	28.2	26.0	24.5	22.4	28.3	26.0	24.5	22.3	27
	20.0	0.81	0.74	0.83	2.38	2.40	18.3	16.7	15.7	14.2	18.2	16.6	15.5	13.9	18.2	16.6	15.6	14.1	27
	12.0	0.65	0.61	0.66	1.92	1.93	10.9	9.8	9.1	8.1	10.9	9.8	9.2	8.1	10.9	9.8	9.2	8.1	27
	8.0	0.55	0.50	0.56	1.61	1.62	7.2	6.4	5.8	5.0	7.1	6.3	5.8	5.1	7.1	6.3	5.8	5.1	27
	6.0	0.50	0.45	0.50	1.44	1.45	5.2	4.5	4.1	3.5	5.2	4.6	4.3	3.7	5.2	4.5	4.1	3.5	27
0.263 (26.3%)	68.5	0.71	0.65	0.71	2.06	2.10	67.0	65.7	65.0	63.8	67.0	65.7	64.8	63.5	67.0	65.7	65.0	63.8	27
	59.4	0.67	0.61	0.69	1.96	1.97	58.0	56.9	56.2	55.1	58.2	57.0	56.3	55.2	58.0	56.9	56.3	55.2	27
	50.0	0.61	0.55	0.62	1.78	1.81	48.7	47.7	47.1	46.2	48.7	47.7	47.0	46.0	48.7	47.7	47.1	46.2	27
	40.0	0.55	0.52	0.56	1.63	1.66	39.0	38.2	37.8	37.1	39.0	38.2	37.6	36.8	38.9	38.0	37.5	36.7	27
	30.9	0.50	0.46	0.52	1.47	1.48	30.3	29.7	29.3	28.7	30.3	29.6	29.1	28.4	30.3	29.6	29.1	28.4	27
	20.0	0.41	0.38	0.42	1.21	1.25	19.6	19.1	18.8	18.4	19.6	19.1	18.8	18.4	19.6	19.1	18.8	18.4	27
	12.0	0.34	0.31	0.35	0.99	1.01	11.6	11.2	11.0	10.7	11.6	11.2	11.0	10.7	11.6	11.2	11.0	10.7	27
	8.0	0.28	0.25	0.30	0.82	0.87	7.7	7.4	7.3	7.1	7.7	7.4	7.3	7.1	7.7	7.4	7.3	7.1	27
	6.0	0.25	0.22	0.26	0.74	0.74	5.7	5.5	5.4	5.2	5.7	5.5	5.4	5.2	5.7	5.5	5.4	5.2	27

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ P_{1,2,3,4} : แรงดันที่ระยะ 0.208, 2.248, 3.573 และ 5.613 ม. ตามลำดับ

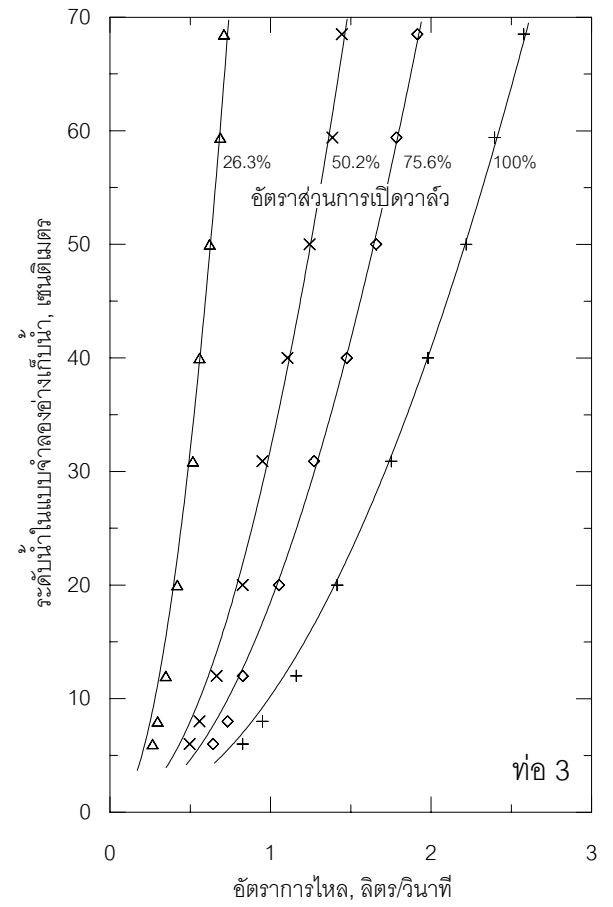
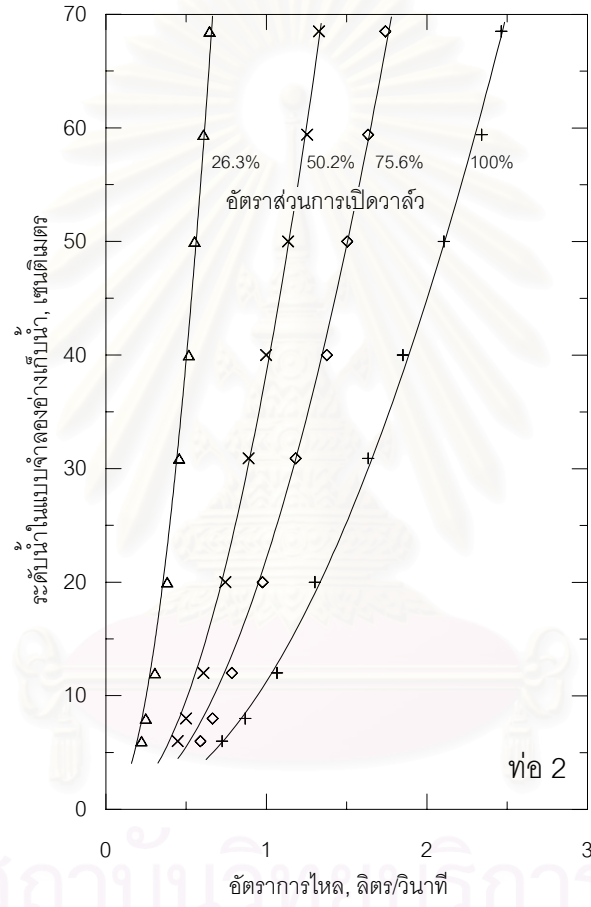
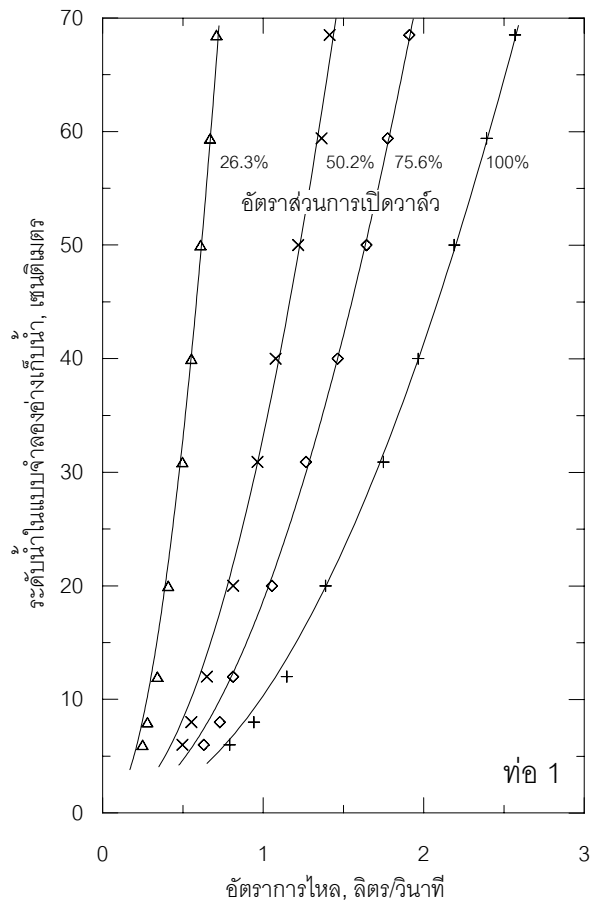
Q_{1,2,3} : อัตราการไหลที่ท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ระยะทางตามแนวท่อ อ้างอิงระดับจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี T : อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง

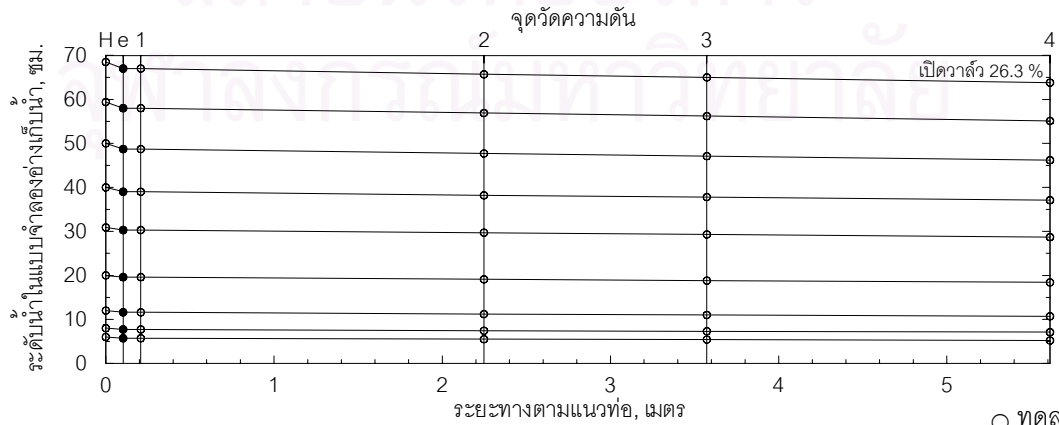
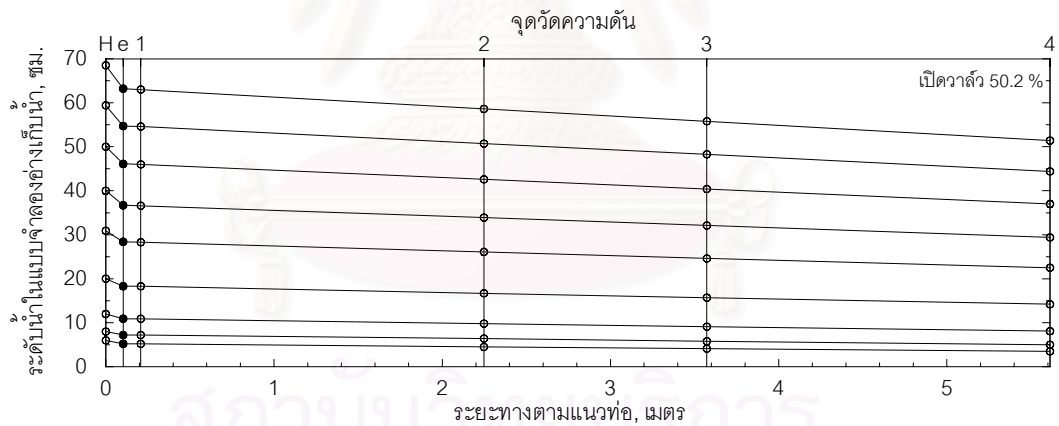
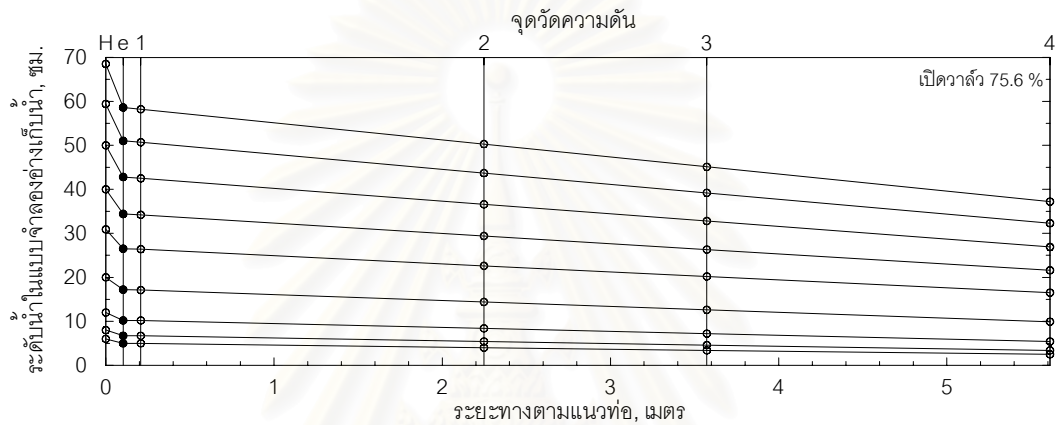
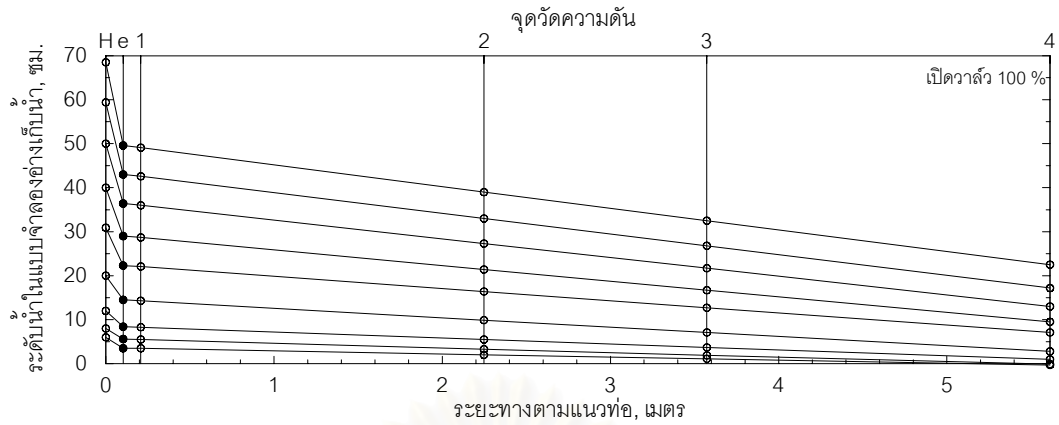
ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ



รูป ง1-1 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล กรณีการไหล 3 ท่อ

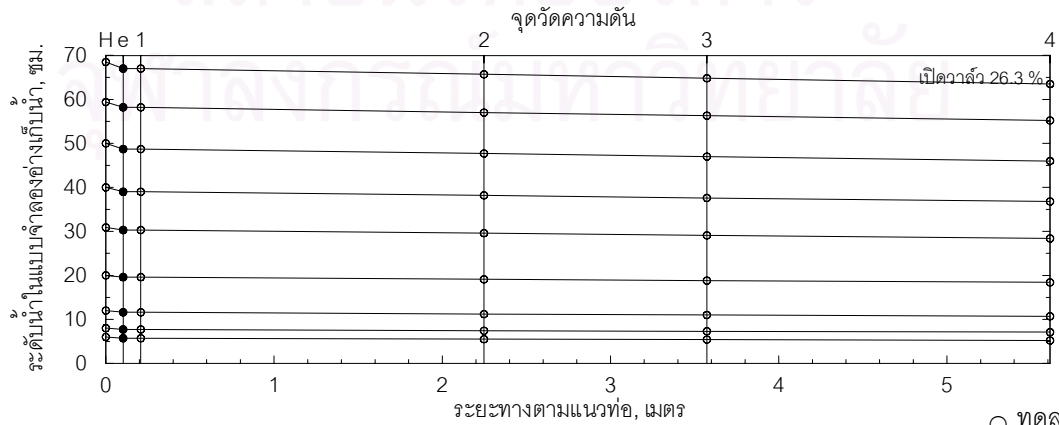
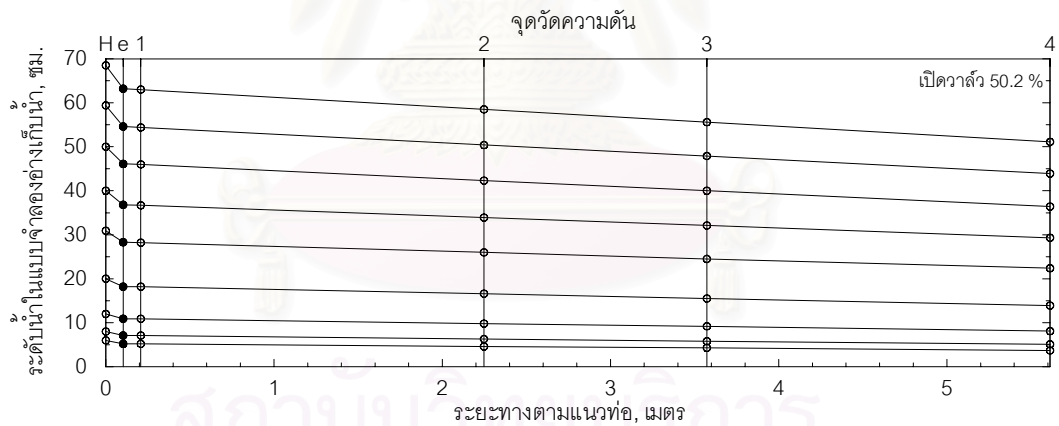
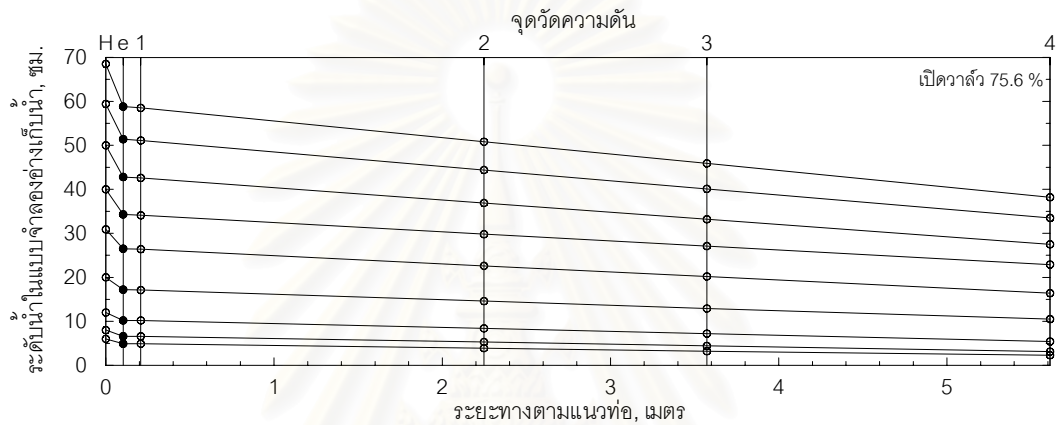
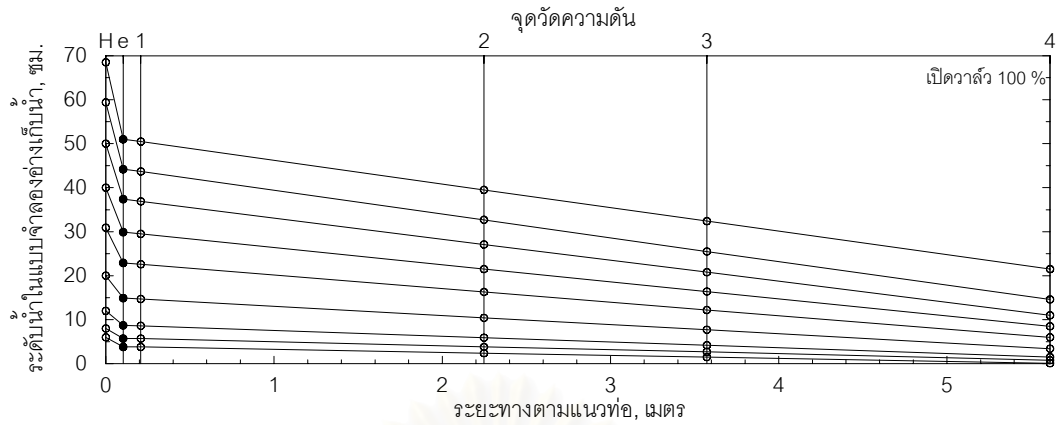


รูป ง1-2 ข้อมูลระดับน้ำในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำกับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 3 ท่อ



รูป ง1-3 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 1 ในกรณีการไหล 3 ท่อ

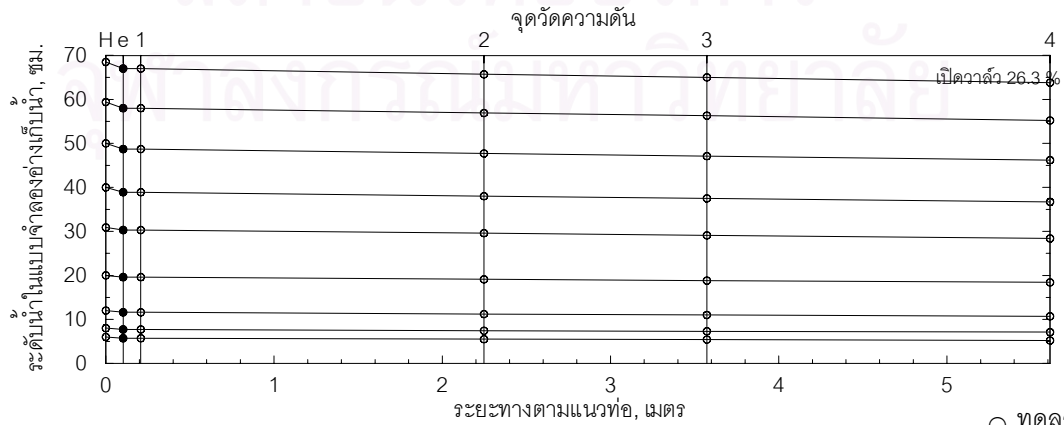
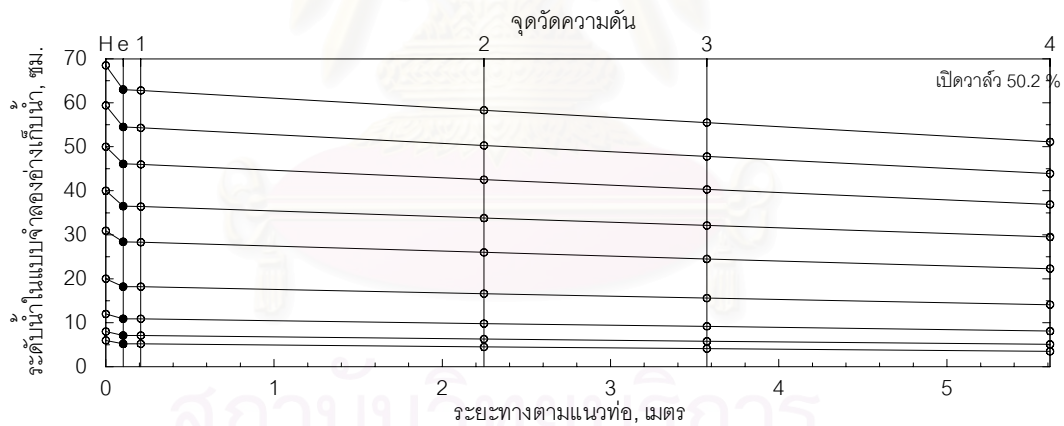
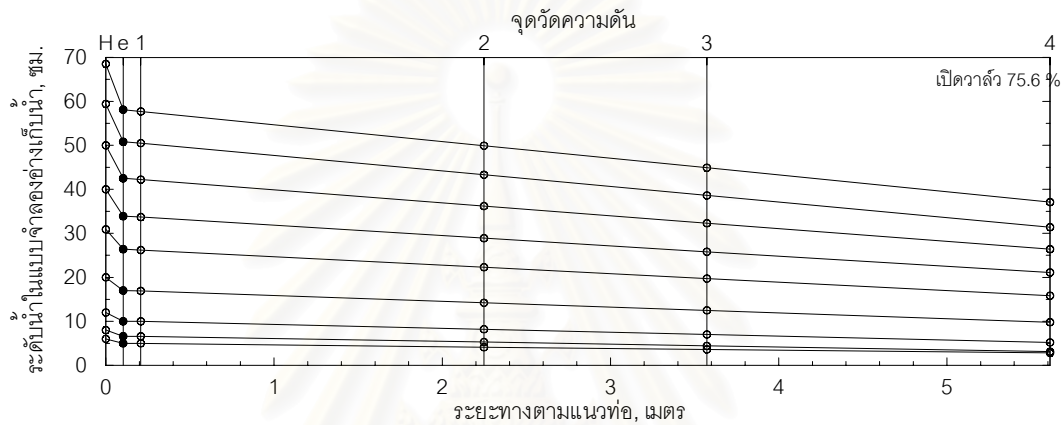
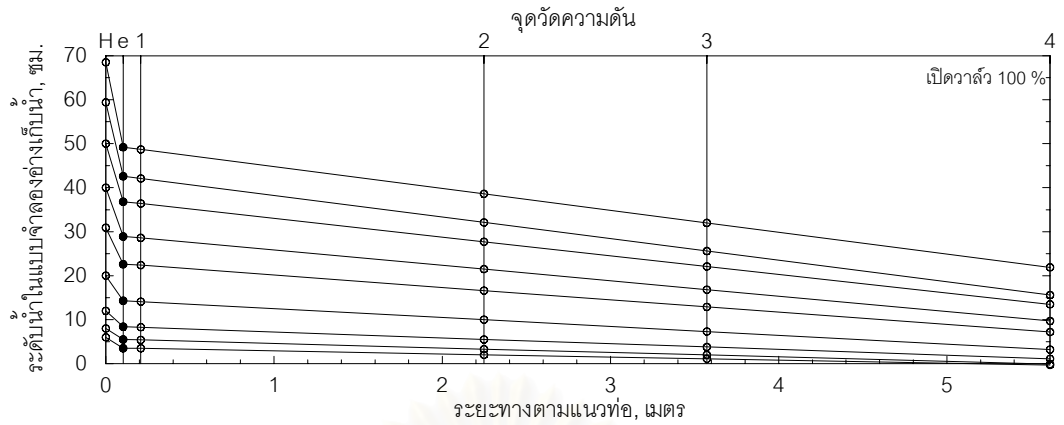
○ ทดลอง
● คำนวณ



รูป ง1-4 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 2 ในกรณีการไหล 3 ท่อ

○ ทดลอง

● คำนวณ



○ ทดลอง

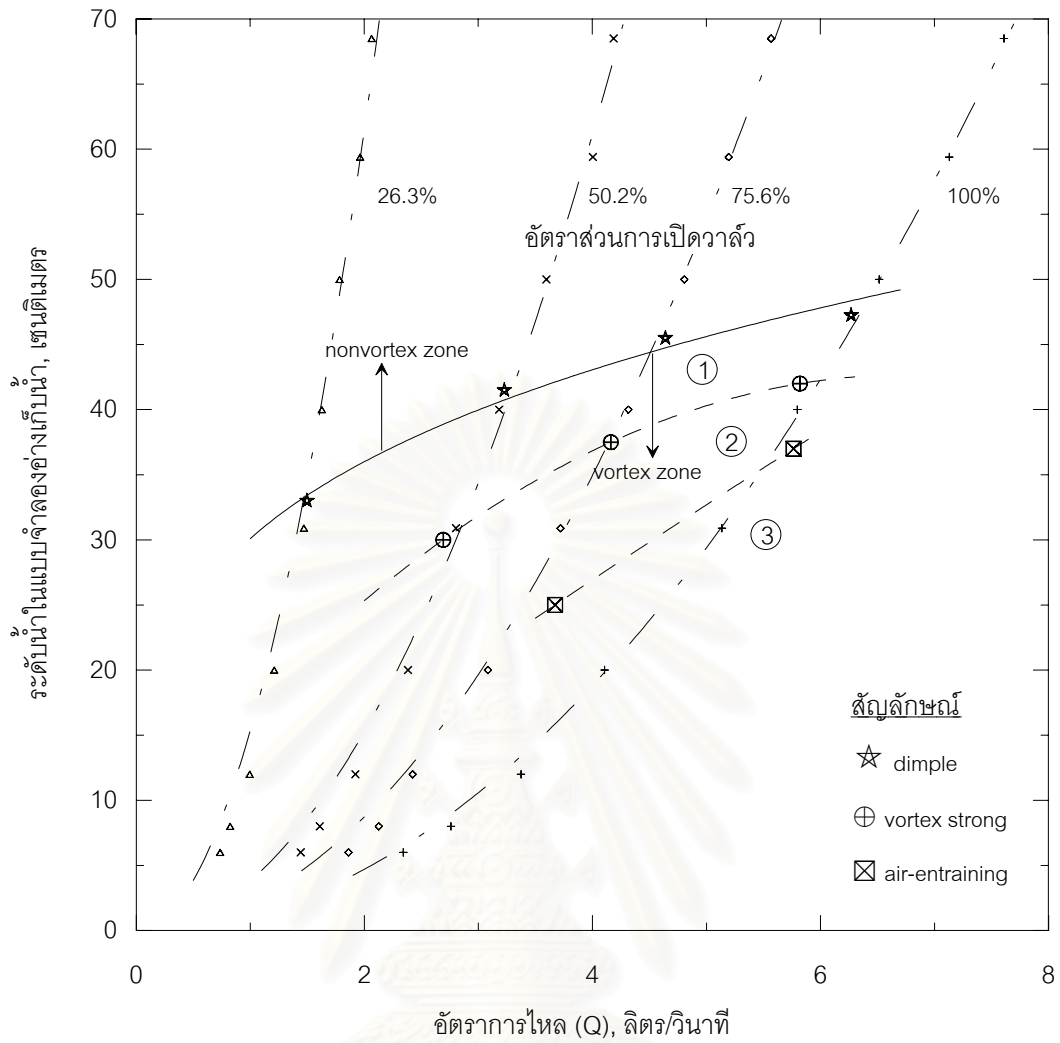
● คำนวณ

รูป ง1-5 ข้อมูลความดัน ณ จุดต่าง ๆ ของท่อที่ 3 ในกรณีการไหล 3 ท่อ

ตาราง ง1-2 ข้อมูลการทดลองการไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 3 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	ระดับเหนือสันฝาย				S cm	อัตราการไหล				
	ระยะยก cm	% ยกวาล์ว	พื้นที่ cm ²	%			W ₁ cm	W ₂ cm	W ₃ cm	W cm		Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	ΣQ ลิตร/วินาที	Q ลิตร/วินาที
				พื้นที่เปิดวาล์ว												
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.3	20.5	20.6	19.6	25.6	42.4	2.13	2.02	2.12	6.27	6.28
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	45.5	18.5	18.5	18.0	23.3	40.6	1.59	1.45	1.60	4.64	4.66
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	41.5	16.5	16.7	16.3	20.9	36.6	1.10	1.02	1.11	3.23	3.24
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	33.0	13.7	13.9	13.8	16.9	28.1	0.52	0.46	0.52	1.50	1.48
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	42.0	19.9	20.2	19.1	25.0	37.1	1.97	1.91	1.95	5.82	5.83
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	37.5	17.9	17.8	17.5	22.5	32.6	1.44	1.28	1.44	4.16	4.16
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	30.0	15.7	15.9	15.6	19.8	25.1	0.92	0.85	0.92	2.69	2.68
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	37.0	19.9	20.0	19.1	24.9	32.1	1.97	1.85	1.95	5.76	5.76
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	25.0	17.2	17.2	16.9	21.7	20.1	1.27	1.14	1.27	3.67	3.68
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ Q : อัตราการไหลผ่านฝายรูปตัววี
W : ระดับน้ำเหนือสันฝายรูปตัววี Q_{1,2,3} : อัตราการไหลผ่านฝายสี่เหลี่ยม
W_{1,2,3} : ระดับน้ำเหนือสันฝายสี่เหลี่ยมวัดอัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ S : ความลึกจมน้ำ(submergence)
ΣQ : ผลรวมของอัตราการไหลทั้ง 3 ท่อ



รูป ง1-6 ข้อมูลการไหลแบบหมุนวนในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ กรณีการไหล 3 ท่อ

ตาราง ง1-3 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 1 กรณีการไหล 3 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า	จุด 1	จุด 2	จุด 3	จุด 4												
1.00 (100%)	2.57	71.5	3.04	52.6	52.1	42.0	35.5	25.5	49.0	14.6	34.3	18.9	4.3	0.299	27.1	0.0149	7.43	5.7	2.36	0.166
	2.39	62.4	3.03	46.0	45.6	36.0	29.8	20.2	47.8	12.6	29.8	16.4	3.8	0.300	25.9	0.0167	6.92	3.0	2.36	0.102
	2.19	53.0	3.01	39.4	39.0	30.3	24.7	16.0	43.2	10.6	25.0	13.6	3.0	0.286	23.4	0.0180	6.34	1.6	2.36	0.065
	1.97	43.0	3.00	32.0	31.7	24.4	19.7	12.5	36.0	8.5	20.1	11.0	2.5	0.291	19.6	0.0187	5.69	0.9	2.36	0.045
	1.75	33.9	3.00	25.3	25.1	19.4	15.7	10.1	28.2	6.7	15.9	8.6	1.9	0.275	15.3	0.0185	5.06	0.9	2.36	0.058
	1.39	23.0	2.90	17.5	17.3	12.9	10.1	5.8	21.5	4.3	10.0	5.5	1.2	0.293	11.7	0.0224	4.02	0.0	2.36	0.002
	1.15	15.0	2.96	11.4	11.3	8.5	6.7	4.0	13.6	2.9	6.9	3.6	0.7	0.240	7.4	0.0209	3.32	0.1	2.36	0.008
	0.94	11.0	2.84	8.6	8.5	6.3	4.9	2.9	10.3	2.0	4.6	2.4	0.4	0.226	5.7	0.0238	2.73	0.2	2.36	0.051
	0.79	9.0	2.64	6.5	6.5	5.0	4.1	2.7	6.9	1.4	3.3	2.5	1.1	0.809	3.9	0.0227	2.29	0.8	2.36	0.252
0.756 (75.6%)	1.91	71.5	2.26	61.6	61.2	53.3	48.1	40.2	39.7	8.1	33.2	9.9	1.8	0.230	21.4	0.0217	5.53	15.0	4.13	0.451
	1.78	62.4	2.25	54.0	53.7	46.7	42.2	35.3	34.5	7.0	28.7	8.4	1.4	0.208	18.8	0.0220	5.14	13.5	4.13	0.472
	1.64	53.0	2.26	45.8	45.5	39.6	35.8	29.9	29.3	6.0	24.6	7.2	1.2	0.209	15.9	0.0217	4.76	11.3	4.13	0.458
	1.46	43.0	2.23	37.4	37.2	32.4	29.3	24.6	23.6	4.7	19.5	5.6	0.9	0.185	12.8	0.0221	4.24	9.8	4.13	0.503
	1.27	33.9	2.18	29.5	29.4	25.6	23.2	19.5	18.4	3.5	14.6	4.4	0.9	0.244	10.1	0.0232	3.66	8.4	4.13	0.577
	1.05	23.0	2.20	20.2	20.1	17.4	15.6	12.9	13.6	2.5	10.1	2.8	0.3	0.141	7.3	0.0244	3.05	5.2	4.13	0.515
	0.81	15.0	2.10	13.2	13.2	11.4	10.2	8.4	9.1	1.5	6.0	1.8	0.3	0.236	4.9	0.0274	2.35	3.8	4.13	0.639
	0.73	11.0	2.20	9.7	9.7	8.4	7.6	6.4	6.0	1.2	4.8	1.3	0.1	0.108	3.4	0.0233	2.11	2.7	4.13	0.563
	0.63	9.0	2.10	8.0	8.0	7.0	6.4	5.5	4.5	0.9	3.6	1.0	0.1	0.145	2.5	0.0237	1.82	2.8	4.13	0.767
0.502 (50.2%)	1.41	71.5	1.67	66.2	66.0	61.6	58.8	54.4	21.7	4.4	41.5	5.3	0.9	0.203	11.8	0.0218	4.09	17.3	9.41	0.418
	1.36	62.4	1.73	57.7	57.6	53.7	51.3	47.4	18.9	4.1	38.6	4.7	0.6	0.146	10.4	0.0205	3.95	12.9	9.41	0.334
	1.22	53.0	1.67	49.1	49.0	45.6	43.4	40.0	16.9	3.3	30.8	3.9	0.6	0.192	9.2	0.0228	3.53	12.5	9.41	0.405
	1.08	43.0	1.64	39.7	39.6	36.9	35.1	32.4	13.6	2.6	24.1	3.3	0.7	0.289	7.3	0.0234	3.12	10.9	9.41	0.451
	0.96	33.9	1.66	31.4	31.3	29.1	27.6	25.5	11.0	2.1	19.3	2.5	0.4	0.219	5.9	0.0236	2.79	8.2	9.41	0.427
	0.81	23.0	1.69	21.3	21.3	19.7	18.7	17.2	7.5	1.5	13.7	1.7	0.2	0.167	4.2	0.0234	2.35	5.0	9.41	0.361
	0.65	15.0	1.68	13.9	13.9	12.8	12.1	11.1	5.1	0.9	8.7	1.1	0.2	0.184	2.9	0.0251	1.88	3.3	9.41	0.376
	0.55	11.0	1.67	10.2	10.2	9.4	8.8	8.0	4.3	0.7	6.3	0.8	0.1	0.188	2.2	0.0275	1.60	2.3	9.41	0.369
	0.50	9.0	1.66	8.2	8.2	7.5	7.1	6.5	3.0	0.5	5.1	0.8	0.3	0.468	1.7	0.0258	1.44	1.9	9.41	0.374
0.263 (26.3%)	0.71	71.5	0.84	70.0	70.0	68.7	68.0	66.8	5.6	1.1	37.7	1.5	0.4	0.353	3.3	0.0236	2.05	30.2	33.99	0.802
	0.67	62.4	0.85	61.0	61.0	59.9	59.2	58.1	5.4	1.0	33.5	1.4	0.4	0.419	3.0	0.0244	1.94	25.5	33.99	0.762
	0.61	53.0	0.84	51.7	51.7	50.7	50.1	49.2	4.5	0.8	27.9	1.3	0.5	0.585	2.5	0.0252	1.77	22.1	33.99	0.794
	0.55	43.0	0.84	42.0	42.0	41.2	40.8	40.1	3.2	0.7	22.9	1.0	0.3	0.485	1.9	0.0230	1.60	17.9	33.99	0.781
	0.50	33.9	0.85	33.3	33.3	32.7	32.3	31.7	3.0	0.5	18.5	0.6	0.1	0.101	1.6	0.0244	1.44	13.7	33.99	0.741
	0.41	23.0	0.85	22.6	22.6	22.1	21.8	21.4	2.1	0.4	12.5	0.4	0.0	0.087	1.2	0.0271	1.18	9.3	33.99	0.740
	0.34	15.0	0.88	14.6	14.6	14.2	14.0	13.7	1.5	0.3	8.7	0.4	0.1	0.555	0.9	0.0287	0.99	5.2	33.99	0.596
	0.28	11.0	0.84	10.7	10.7	10.4	10.3	10.1	0.8	0.2	5.8	0.3	0.1	0.756	0.6	0.0280	0.81	4.5	33.99	0.768
	0.25	9.0	0.83	8.7	8.7	8.5	8.4	8.2	0.8	0.1	4.6	0.3	0.2	1.207	0.5	0.0298	0.72	3.7	33.99	0.804

หมายเหตุ

 K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อR : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/V$

ตาราง ง1-4 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 2 กรณีการไหล 3 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า m	จุด 1 m	จุด 2 m	จุด 3 m	จุด 4 m												
1.00 (100%)	2.46	71.5	2.91	54.0	53.5	42.5	35.4	24.5	53.5	13.4	31.6	17.5	4.1	0.309	29.6	0.0177	7.13	6.3	2.36	0.200
	2.34	62.4	2.96	47.2	46.7	35.7	28.5	17.6	54.9	12.1	28.5	15.2	3.1	0.258	29.7	0.0200	6.78	1.2	2.36	0.041
	2.11	53.0	2.89	40.4	39.9	30.1	23.8	14.0	48.7	9.8	23.1	12.6	2.8	0.289	26.4	0.0220	6.09	0.7	2.36	0.031
	1.85	43.0	2.82	32.9	32.5	24.5	19.4	11.5	39.3	7.6	17.8	10.1	2.5	0.338	21.4	0.0231	5.36	1.2	2.36	0.069
	1.63	33.9	2.81	25.9	25.6	19.3	15.2	9.0	31.2	5.9	13.9	8.0	2.1	0.359	16.9	0.0234	4.73	1.0	2.36	0.072
	1.30	23.0	2.72	17.9	17.7	13.4	10.7	6.4	21.1	3.7	8.8	5.1	1.4	0.363	11.5	0.0250	3.77	1.3	2.36	0.149
	1.07	15.0	2.75	11.7	11.6	8.9	7.2	4.5	13.2	2.5	5.9	3.3	0.8	0.317	7.2	0.0234	3.09	1.1	2.36	0.185
	0.87	11.0	2.62	8.7	8.7	6.8	5.7	3.8	8.9	1.7	3.9	2.3	0.6	0.385	5.0	0.0242	2.51	1.5	2.36	0.393
	0.72	9.0	2.41	6.8	6.8	5.4	4.5	3.1	6.9	1.2	2.7	2.2	1.0	0.903	3.8	0.0265	2.10	1.5	2.36	0.560
0.756 (75.6%)	1.74	71.5	2.06	61.8	61.5	53.8	48.9	41.2	38.0	6.7	27.6	9.7	3.0	0.451	20.7	0.0252	5.04	20.3	4.13	0.735
	1.63	62.4	2.07	54.4	54.1	47.4	43.1	36.5	33.0	5.9	24.3	8.0	2.1	0.359	17.9	0.0248	4.73	18.1	4.13	0.744
	1.50	53.0	2.07	45.8	45.6	39.9	36.2	30.5	28.4	5.0	20.6	7.2	2.2	0.445	15.4	0.0252	4.35	14.9	4.13	0.724
	1.38	43.0	2.10	37.3	37.1	32.8	30.1	25.9	20.8	4.2	17.3	5.7	1.5	0.364	11.4	0.0222	3.98	12.8	4.13	0.743
	1.18	33.9	2.03	29.5	29.4	25.6	23.2	19.4	18.7	3.1	12.7	4.4	1.3	0.428	10.2	0.0269	3.42	9.8	4.13	0.766
	0.98	23.0	2.04	20.2	20.1	17.6	15.9	13.5	12.5	2.1	8.7	2.8	0.7	0.332	6.7	0.0262	2.83	6.9	4.13	0.797
	0.78	15.0	2.03	13.2	13.2	11.4	10.2	8.4	9.1	1.4	5.6	1.8	0.4	0.326	4.9	0.0294	2.27	4.2	4.13	0.741
	0.67	11.0	2.01	9.6	9.6	8.3	7.4	6.1	6.7	1.0	4.0	1.4	0.4	0.435	3.6	0.0300	1.92	3.0	4.13	0.756
	0.59	9.0	1.96	7.9	7.9	6.9	6.2	5.3	4.9	0.8	3.2	1.1	0.3	0.436	2.7	0.0285	1.71	2.9	4.13	0.917
0.502 (50.2%)	1.33	71.5	1.57	66.2	66.0	61.5	58.6	54.1	22.4	3.9	36.5	5.3	1.4	0.365	12.1	0.0254	3.84	21.4	9.41	0.587
	1.25	62.4	1.59	57.6	57.4	53.4	50.9	46.9	19.6	3.5	32.6	4.8	1.3	0.384	10.7	0.0251	3.63	17.7	9.41	0.544
	1.14	53.0	1.56	49.1	49.0	45.3	43.0	39.4	17.8	2.8	26.7	3.9	1.1	0.372	9.8	0.0280	3.29	15.5	9.41	0.580
	1.00	43.0	1.52	39.8	39.7	36.9	35.1	32.3	13.9	2.2	20.7	3.2	1.0	0.456	7.5	0.0279	2.89	13.8	9.41	0.668
	0.89	33.9	1.53	31.3	31.2	29.0	27.5	25.4	11.0	1.7	16.4	2.6	0.9	0.491	5.9	0.0278	2.57	10.7	9.41	0.654
	0.74	23.0	1.55	21.2	21.2	19.6	18.5	16.9	8.2	1.2	11.5	1.8	0.6	0.475	4.4	0.0294	2.15	6.6	9.41	0.578
	0.61	15.0	1.57	13.9	13.9	12.8	12.2	11.1	5.0	0.8	7.7	1.1	0.3	0.349	2.9	0.0281	1.76	4.2	9.41	0.553
	0.50	11.0	1.51	10.1	10.1	9.3	8.8	8.1	3.6	0.5	5.2	0.9	0.4	0.637	2.0	0.0303	1.45	3.5	9.41	0.672
	0.45	9.0	1.49	8.2	8.2	7.6	7.3	6.7	2.6	0.4	4.2	0.8	0.4	0.808	1.5	0.0275	1.30	3.0	9.41	0.716
0.263 (26.3%)	0.65	71.5	0.76	70.0	70.0	68.7	67.8	66.5	6.7	0.9	31.3	1.5	0.6	0.631	3.6	0.0318	1.87	36.2	33.99	1.156
	0.61	62.4	0.77	61.2	61.2	60.0	59.3	58.2	5.4	0.8	27.7	1.2	0.4	0.472	3.1	0.0304	1.76	31.3	33.99	1.130
	0.55	53.0	0.76	51.7	51.7	50.7	50.0	49.0	5.1	0.7	22.9	1.3	0.6	0.929	2.8	0.0335	1.60	26.8	33.99	1.169
	0.52	43.0	0.79	42.0	42.0	41.2	40.6	39.8	4.3	0.6	20.0	1.0	0.4	0.697	2.2	0.0314	1.50	20.4	33.99	1.016
	0.46	33.9	0.78	33.3	33.3	32.6	32.1	31.4	3.6	0.5	15.6	0.6	0.1	0.307	1.9	0.0347	1.32	16.2	33.99	1.041
	0.38	23.0	0.80	22.6	22.6	22.1	21.8	21.4	2.1	0.3	11.0	0.4	0.1	0.240	1.2	0.0310	1.11	10.8	33.99	0.982
	0.31	15.0	0.79	14.6	14.6	14.2	14.0	13.7	1.5	0.2	7.0	0.4	0.2	0.940	0.9	0.0358	0.89	6.9	33.99	0.984
	0.25	11.0	0.75	10.7	10.7	10.4	10.3	10.1	0.8	0.1	4.6	0.3	0.2	1.195	0.6	0.0350	0.72	5.6	33.99	1.203
	0.22	9.0	0.74	8.7	8.7	8.5	8.4	8.2	0.8	0.1	3.7	0.3	0.2	1.758	0.5	0.0373	0.64	4.6	33.99	1.247

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

$v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อ

h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

R : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/V$

ตาราง ง1-5 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อที่ 3 กรณีการไหล 3 ท่อ

อัตราส่วน การเปิด วาล์ว	อัตรา การไหล l/s	ความสูง H_T m	K 10^{-3}	เส้นความลาดชลศาสตร์(HGL)					s m/m	$v_p^2/2g$ m	$v_g^2/2g$ m	He m	h_e m	K_e	h_f	f	R 10^4	h_g m	$(A_p/A_g)^2$	K_g
				ทางเข้า	จุด 1	จุด 2	จุด 3	จุด 4												
1.00 (100%)	2.58	71.5	3.05	52.2	51.7	41.6	35.0	24.9	49.6	14.6	34.6	19.3	4.7	0.318	27.3	0.0149	7.46	5.0	2.36	0.144
	2.40	62.4	3.03	45.6	45.1	35.1	28.6	18.6	50.0	12.7	29.9	16.8	4.1	0.328	27.0	0.0174	6.93	1.4	2.36	0.047
	2.22	53.0	3.05	39.8	39.4	30.7	25.1	16.5	43.0	10.9	25.6	13.2	2.3	0.216	23.3	0.0175	6.42	1.7	2.36	0.068
	1.98	43.0	3.02	31.9	31.6	24.5	19.8	12.7	35.8	8.6	20.4	11.1	2.5	0.284	19.3	0.0182	5.73	0.9	2.36	0.046
	1.75	33.9	3.01	25.6	25.4	19.6	15.9	10.2	28.4	6.8	16.0	8.3	1.5	0.226	15.5	0.0186	5.07	1.0	2.36	0.062
	1.42	23.0	2.95	17.3	17.1	13.0	10.3	6.2	20.6	4.4	10.4	5.7	1.3	0.291	11.1	0.0205	4.09	0.2	2.36	0.019
	1.16	15.0	2.99	11.4	11.3	8.5	6.8	4.1	13.2	3.0	7.0	3.6	0.6	0.214	7.3	0.0201	3.36	0.1	2.36	0.010
	0.95	11.0	2.86	8.5	8.4	6.3	5.0	2.9	10.2	2.0	4.7	2.5	0.5	0.258	5.6	0.0229	2.75	0.2	2.36	0.042
0.83	9.0	2.75	6.5	6.5	5.0	4.1	2.7	6.9	1.5	3.5	2.5	1.0	0.662	3.9	0.0209	2.39	0.7	2.36	0.184	
0.756 (75.6%)	1.91	71.5	2.26	61.1	60.7	52.9	47.9	40.1	38.7	8.1	33.4	10.4	2.3	0.288	21.0	0.0211	5.54	14.8	4.13	0.444
	1.78	62.4	2.26	53.8	53.5	46.3	41.6	34.4	36.0	7.0	29.0	8.6	1.6	0.226	19.5	0.0226	5.16	12.4	4.13	0.429
	1.66	53.0	2.28	45.5	45.2	39.2	35.3	29.4	29.7	6.1	25.0	7.5	1.4	0.238	16.1	0.0217	4.80	10.4	4.13	0.417
	1.47	43.0	2.25	36.9	36.7	31.9	28.8	24.1	23.6	4.8	19.8	6.1	1.3	0.273	12.8	0.0218	4.27	9.1	4.13	0.460
	1.27	33.9	2.18	29.4	29.2	25.3	22.7	18.8	19.7	3.6	14.7	4.5	0.9	0.264	10.6	0.0243	3.68	7.7	4.13	0.520
	1.05	23.0	2.19	20.0	19.9	17.2	15.5	12.8	13.2	2.4	10.1	3.0	0.6	0.228	7.2	0.0241	3.05	5.2	4.13	0.511
	0.83	15.0	2.13	13.0	13.0	11.2	10.0	8.2	9.1	1.5	6.2	2.0	0.5	0.330	4.9	0.0266	2.39	3.5	4.13	0.562
	0.73	11.0	2.21	9.6	9.6	8.3	7.4	6.1	6.7	1.2	4.9	1.4	0.2	0.185	3.6	0.0247	2.12	2.4	4.13	0.493
0.64	9.0	2.14	8.0	8.0	7.1	6.6	5.8	3.9	0.9	3.8	1.0	0.1	0.099	2.2	0.0199	1.86	3.0	4.13	0.786	
0.502 (50.2%)	1.44	71.5	1.71	66.0	65.8	61.3	58.5	54.1	21.7	4.6	43.3	5.5	0.9	0.196	11.9	0.0210	4.18	15.4	9.41	0.356
	1.39	62.4	1.75	57.5	57.3	53.3	50.8	46.9	19.3	4.2	39.8	4.9	0.7	0.157	10.6	0.0203	4.01	11.3	9.41	0.284
	1.24	53.0	1.71	49.1	49.0	45.5	43.3	39.9	16.9	3.4	32.0	3.9	0.5	0.145	9.3	0.0221	3.60	11.3	9.41	0.352
	1.11	43.0	1.69	39.5	39.4	36.8	35.1	32.5	13.0	2.7	25.4	3.5	0.8	0.298	7.0	0.0213	3.20	9.8	9.41	0.388
	0.95	33.9	1.63	31.4	31.3	29.0	27.5	25.3	11.2	2.0	18.7	2.5	0.5	0.258	6.1	0.0251	2.75	8.6	9.41	0.460
	0.83	23.0	1.72	21.2	21.2	19.6	18.6	17.1	7.5	1.5	14.2	1.8	0.3	0.197	4.2	0.0226	2.39	4.5	9.41	0.315
	0.66	15.0	1.72	13.9	13.9	12.8	12.2	11.1	5.0	1.0	9.2	1.1	0.1	0.131	2.9	0.0235	1.92	2.9	9.41	0.319
	0.56	11.0	1.68	10.1	10.1	9.3	8.8	8.1	3.6	0.7	6.4	0.9	0.2	0.315	2.0	0.0243	1.61	2.3	9.41	0.364
0.50	9.0	1.65	8.2	8.2	7.5	7.1	6.5	3.0	0.5	5.1	0.8	0.3	0.474	1.7	0.0259	1.44	1.9	9.41	0.379	
0.263 (26.3%)	0.71	71.5	0.84	70.0	70.0	68.7	68.0	66.8	5.6	1.1	37.7	1.5	0.4	0.353	3.3	0.0236	2.05	30.2	33.99	0.802
	0.69	62.4	0.87	61.0	61.0	59.9	59.3	58.2	5.0	1.0	35.3	1.4	0.4	0.347	2.9	0.0220	1.99	23.9	33.99	0.677
	0.62	53.0	0.85	51.7	51.7	50.7	50.1	49.2	4.5	0.8	28.9	1.3	0.5	0.531	2.5	0.0244	1.80	21.2	33.99	0.734
	0.56	43.0	0.85	41.9	41.9	41.0	40.5	39.7	3.9	0.7	23.3	1.1	0.4	0.608	2.2	0.0265	1.61	17.1	33.99	0.736
	0.52	33.9	0.89	33.3	33.3	32.6	32.1	31.4	3.6	0.6	20.0	0.6	0.0	0.021	1.9	0.0271	1.49	12.0	33.99	0.602
	0.42	23.0	0.87	22.6	22.6	22.1	21.8	21.4	2.1	0.4	13.2	0.4	0.0	0.032	1.2	0.0258	1.21	8.6	33.99	0.654
	0.35	15.0	0.90	14.6	14.6	14.2	14.0	13.7	1.5	0.3	9.0	0.4	0.1	0.505	0.9	0.0278	1.00	4.9	33.99	0.546
	0.30	11.0	0.89	10.7	10.7	10.4	10.3	10.1	0.8	0.2	6.6	0.3	0.1	0.546	0.6	0.0247	0.86	3.7	33.99	0.561
0.26	9.0	0.88	8.7	8.7	8.5	8.4	8.2	0.8	0.2	5.2	0.3	0.1	0.944	0.5	0.0263	0.77	3.1	33.99	0.592	

หมายเหตุ K : สัมประสิทธิ์ของสมการ ; $Q=KH_T^{0.5}$ h_f : การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

s : ความลาดชันของเส้นความดัน

f : สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

 $v_p^2/2g$: ความสูงความเร็วการไหลในท่อR : เลขเรย์โนลด์ ; $R = vD/V$

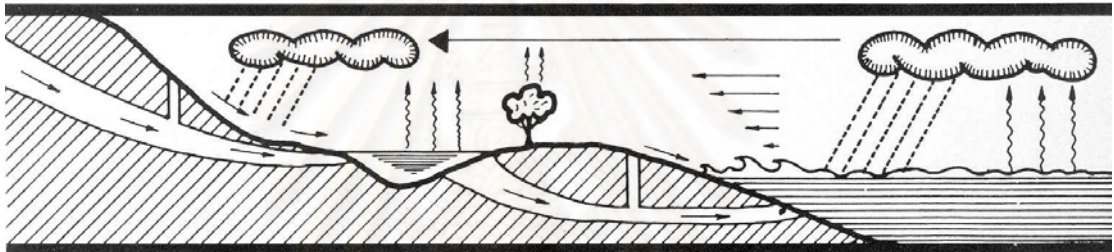
ตาราง ง1-6 วิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนกรณีการไหล 3 ท่อ

สภาพการไหล	อัตราการเปิดวาล์ว					H cm	Q ₁ ลิตร/วินาที	Q ₂ ลิตร/วินาที	Q ₃ ลิตร/วินาที	v ₁ m/s	v ₂ m/s	v ₃ m/s	S cm	S/d	F ₁	F ₂	F ₃	ΣF
	ระยะยก	%	พื้นที่	% (100%)														
	cm	ยกวาล์ว	cm ²	พื้นที่เปิดวาล์ว														
dimple	3.00	100	9.898	100	(100%)	47.3	2.13	2.02	2.12	1.40	1.33	1.39	42.4	9.63	2.14	2.02	2.12	6.27
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	45.5	1.59	1.45	1.60	1.05	0.96	1.05	40.6	9.23	1.59	1.45	1.60	4.64
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	41.5	1.10	1.02	1.11	0.72	0.67	0.73	36.6	8.32	1.10	1.02	1.11	3.23
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	33.0	0.52	0.46	0.52	0.34	0.31	0.34	28.1	6.39	0.52	0.47	0.52	1.50
vortex strong	3.00	100	9.898	100	(100%)	42.0	1.97	1.91	1.95	1.29	1.25	1.28	37.1	8.43	1.97	1.91	1.95	5.83
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	37.5	1.44	1.28	1.44	0.95	0.84	0.95	32.6	7.41	1.44	1.28	1.45	4.17
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	30.0	0.92	0.85	0.92	0.61	0.56	0.61	25.1	5.70	0.92	0.85	0.93	2.69
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
air-entraining	3.00	100	9.898	100	(100%)	37.0	1.97	1.85	1.95	1.29	1.22	1.28	32.1	7.30	1.97	1.85	1.95	5.77
	2.00	66.7	7.482	75.6	(75%)	25.0	1.27	1.14	1.27	0.83	0.75	0.84	20.1	4.57	1.27	1.14	1.27	3.68
	1.35	45.0	4.957	50.2	(50%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.80	26.7	2.608	26.3	(25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

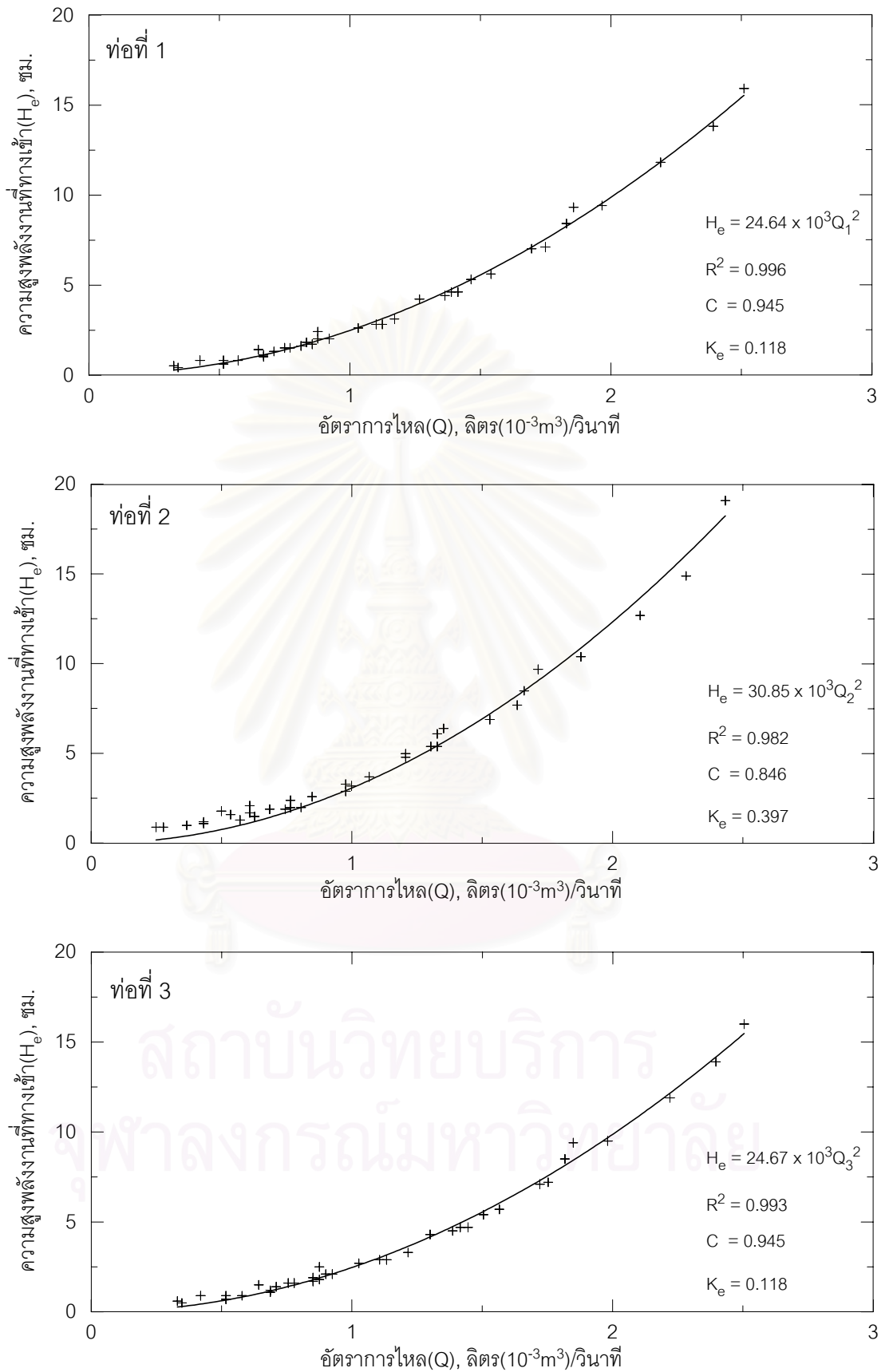
- H : ระดับน้ำภายในแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ
 Q_{1,2,3} : อัตราการไหลท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 S : ความลึกจมน้ำ(submergence)
 d : เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ
 v_{1,2,3} : ความเร็วการไหลในท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 F_{1,2,3} : ฟรูดนัมเบอร์(Froude number) ของท่อที่ 1, 2 และ 3

ภาคผนวก จ
การวิเคราะห์ชลศาสตร์การไหลผ่านอาคารระบายน้ำ

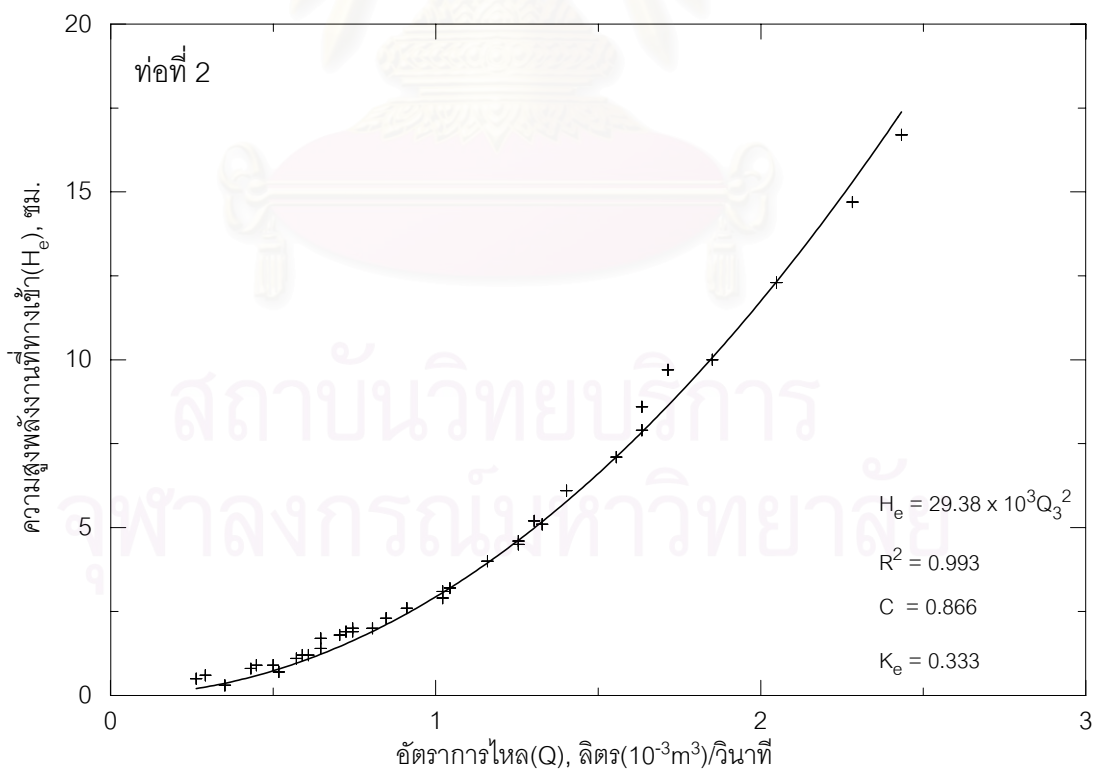
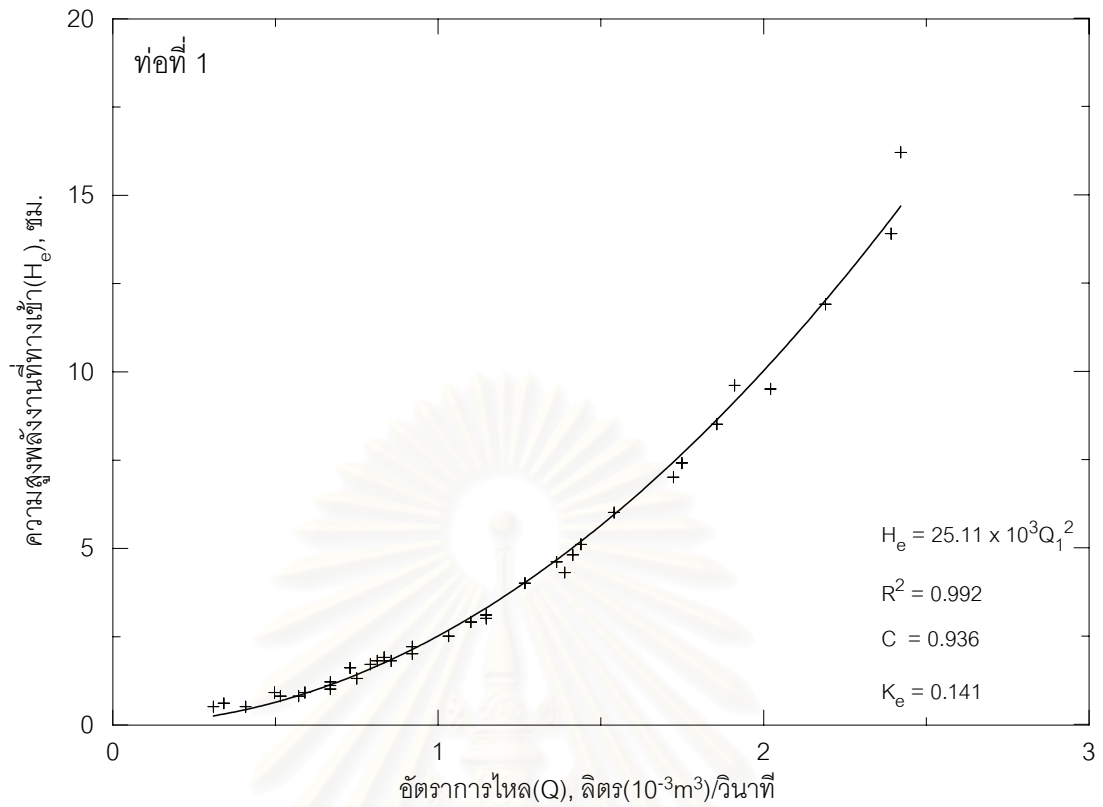


- จ1 การสูญเสียพลังงานเนื่องจากทางเข้า
- จ2 ความสัมพันธ์อัตราการไหล

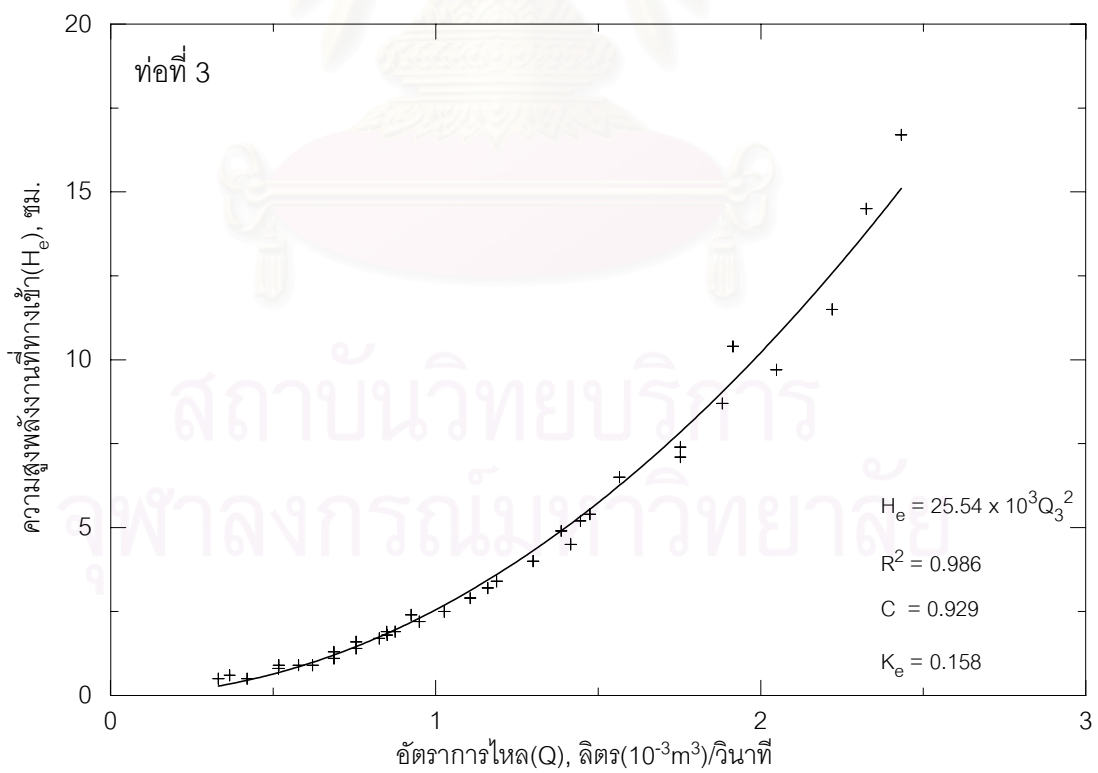
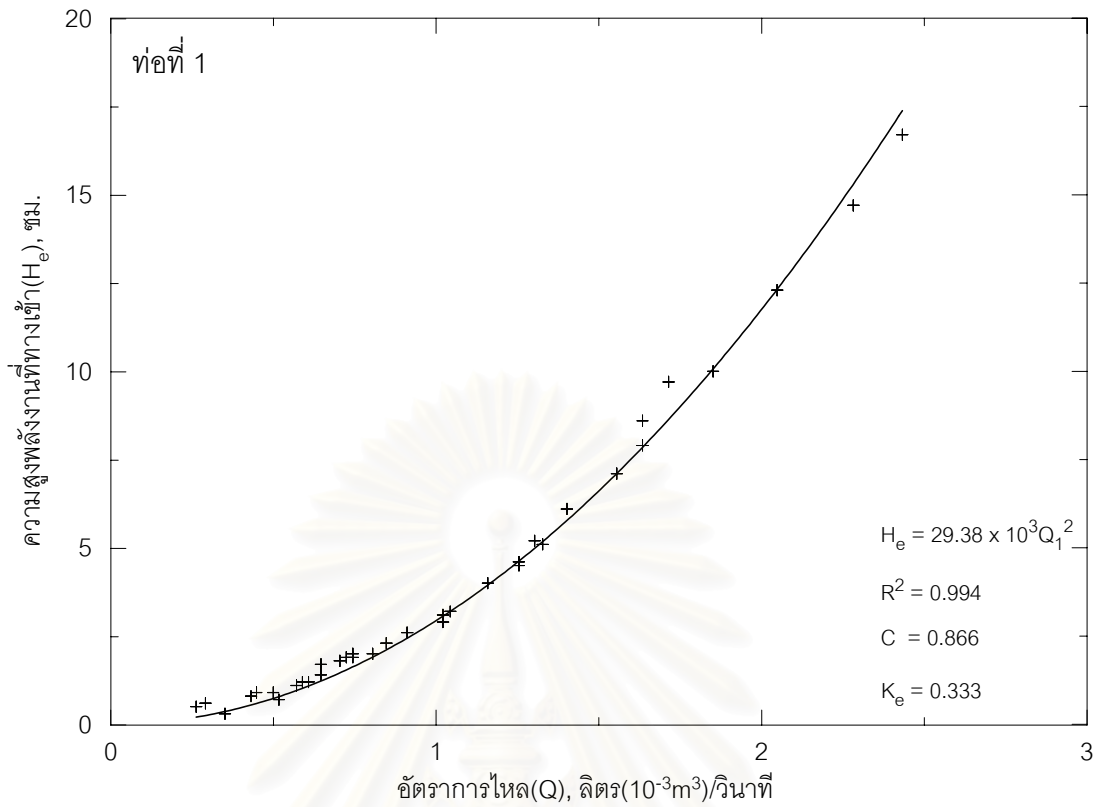
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



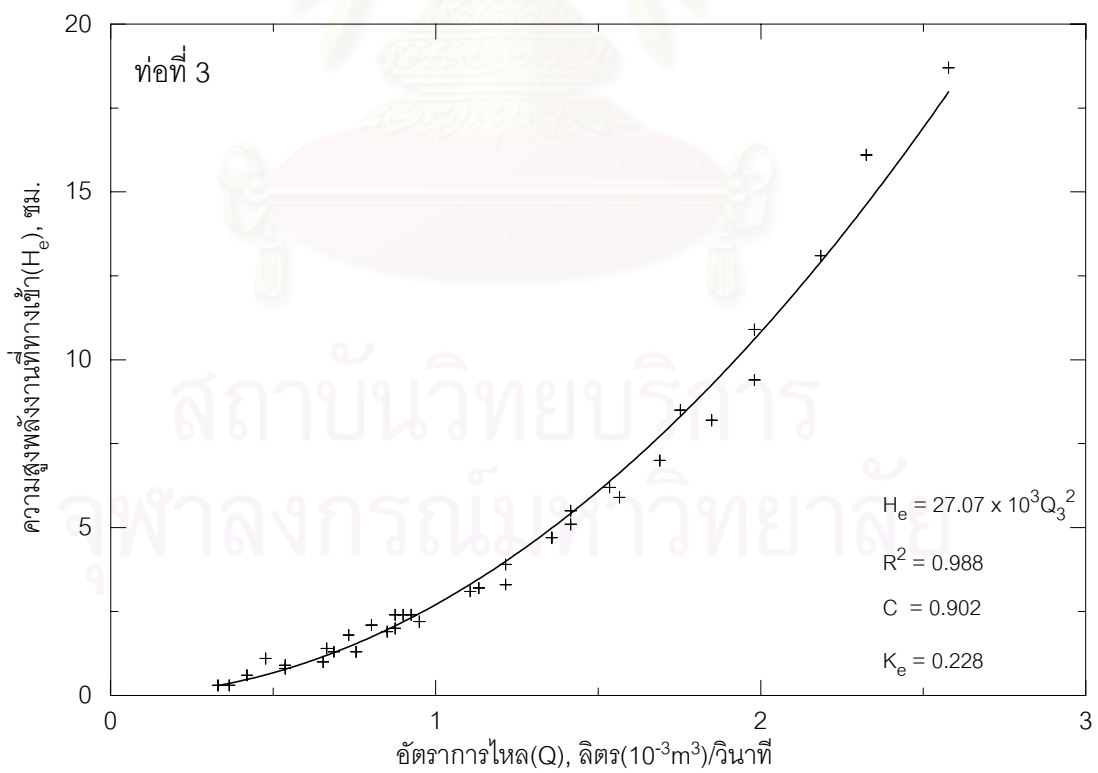
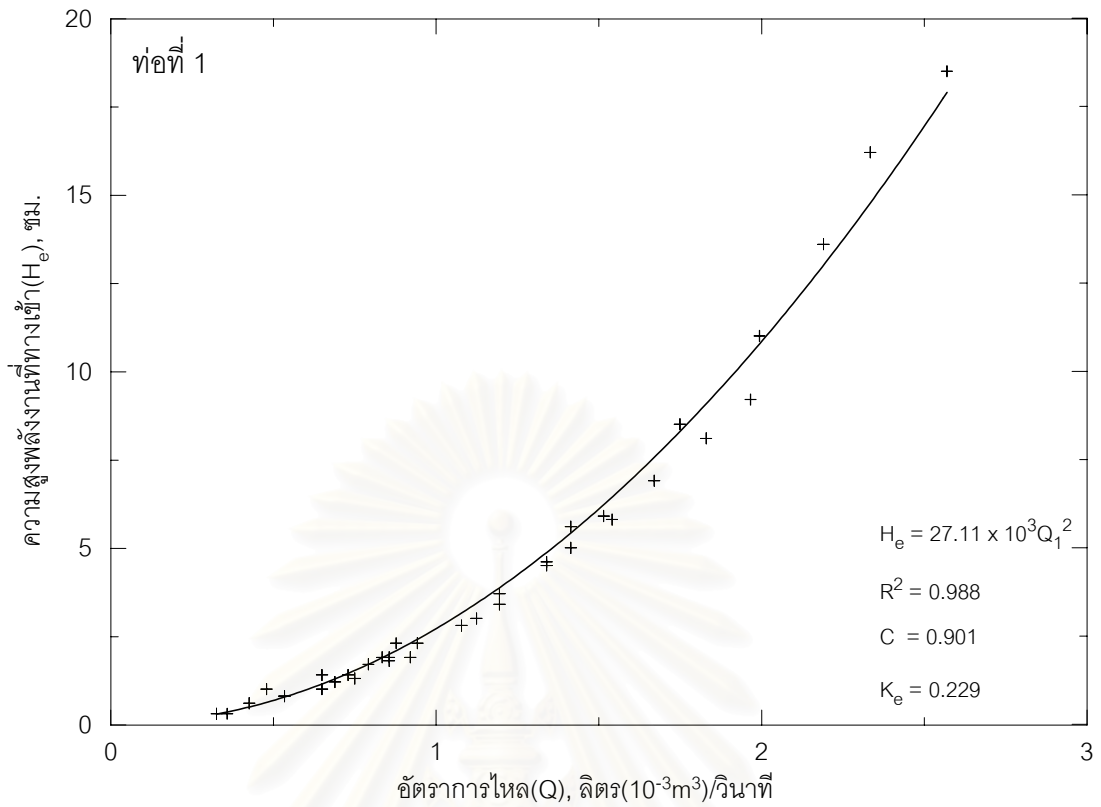
รูป จ1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหล กรณีการไหล 1 ท่อ



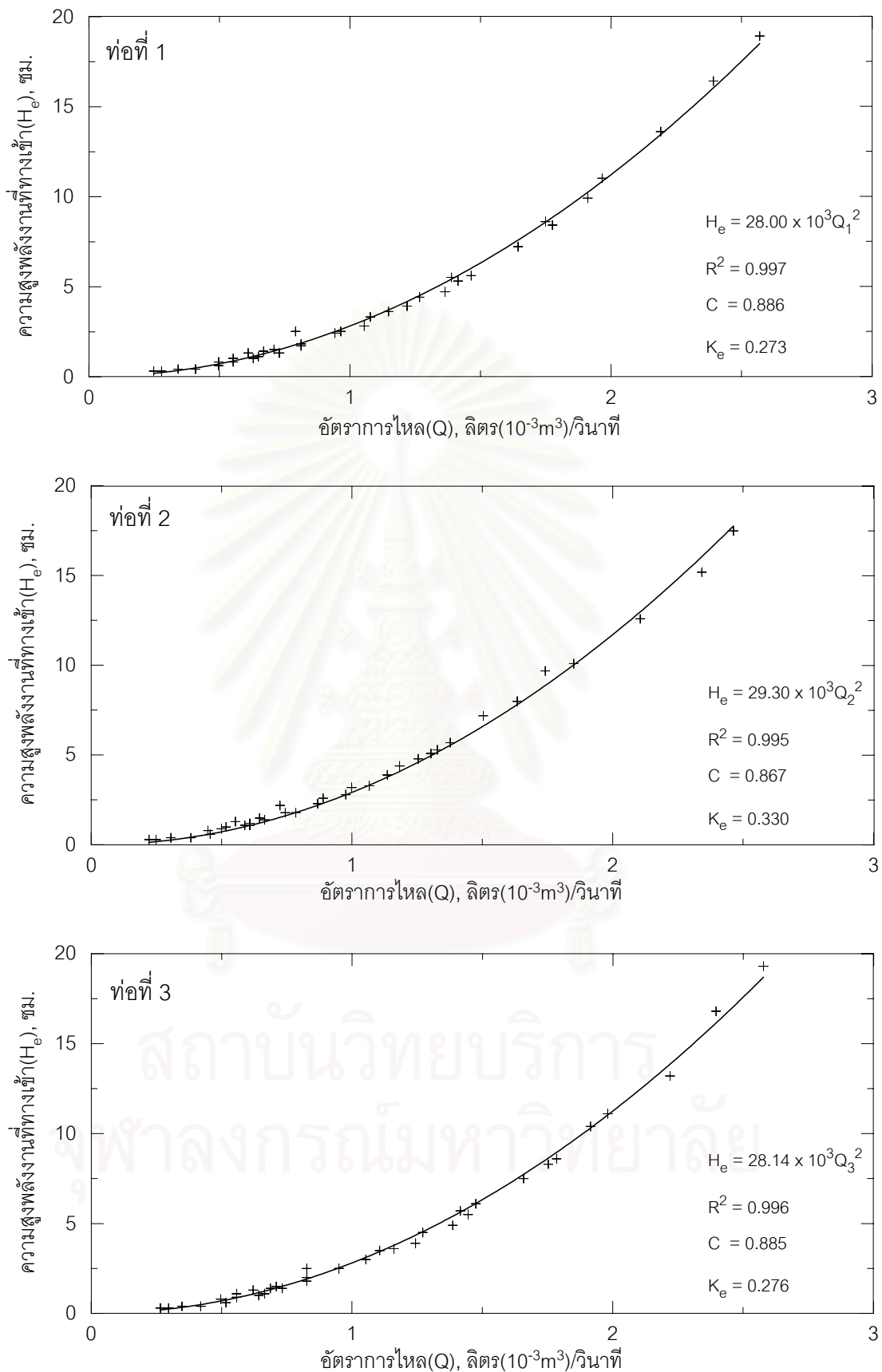
รูป ๑1-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหล กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)



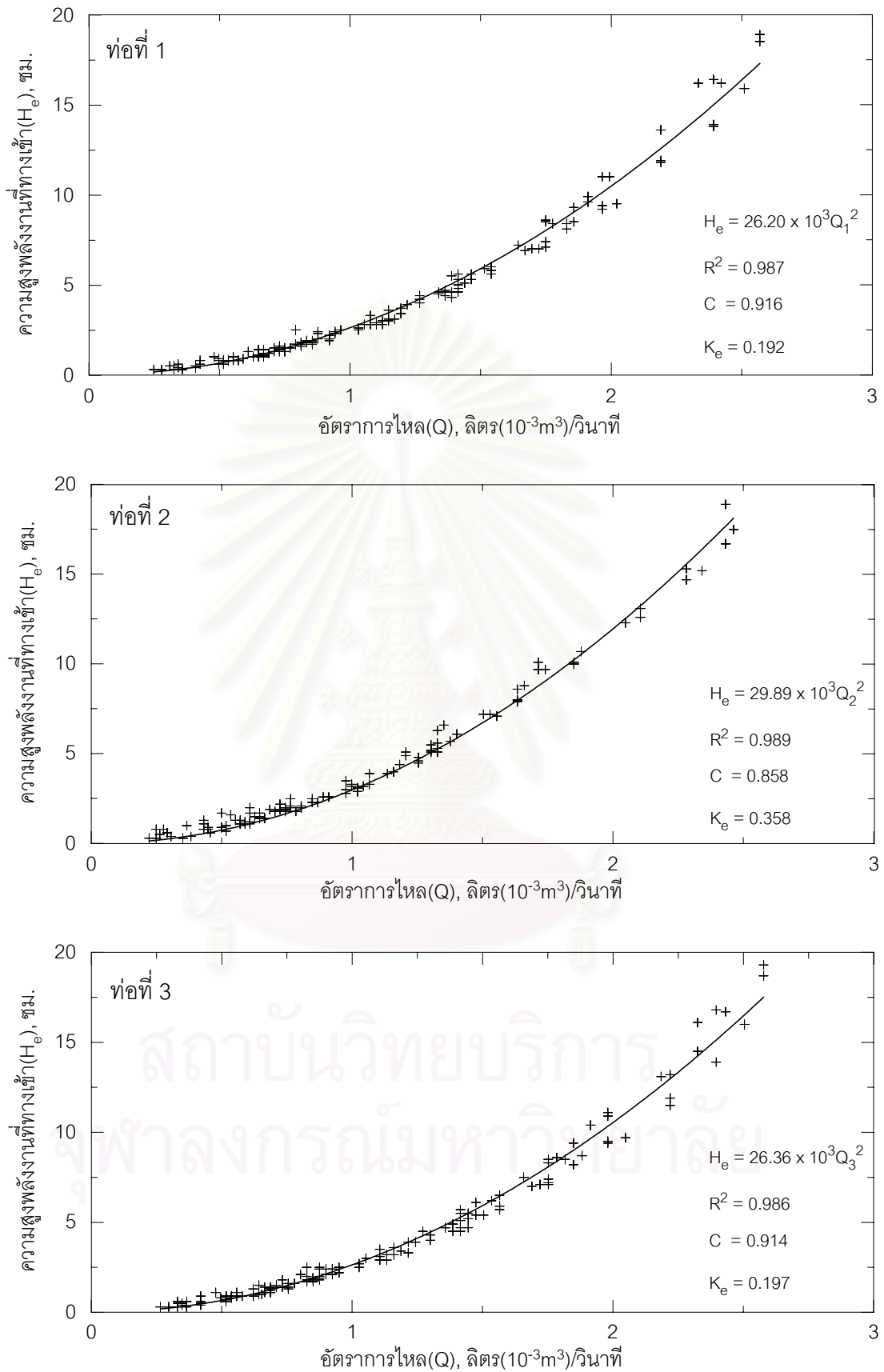
รูป ๑1-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหล กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



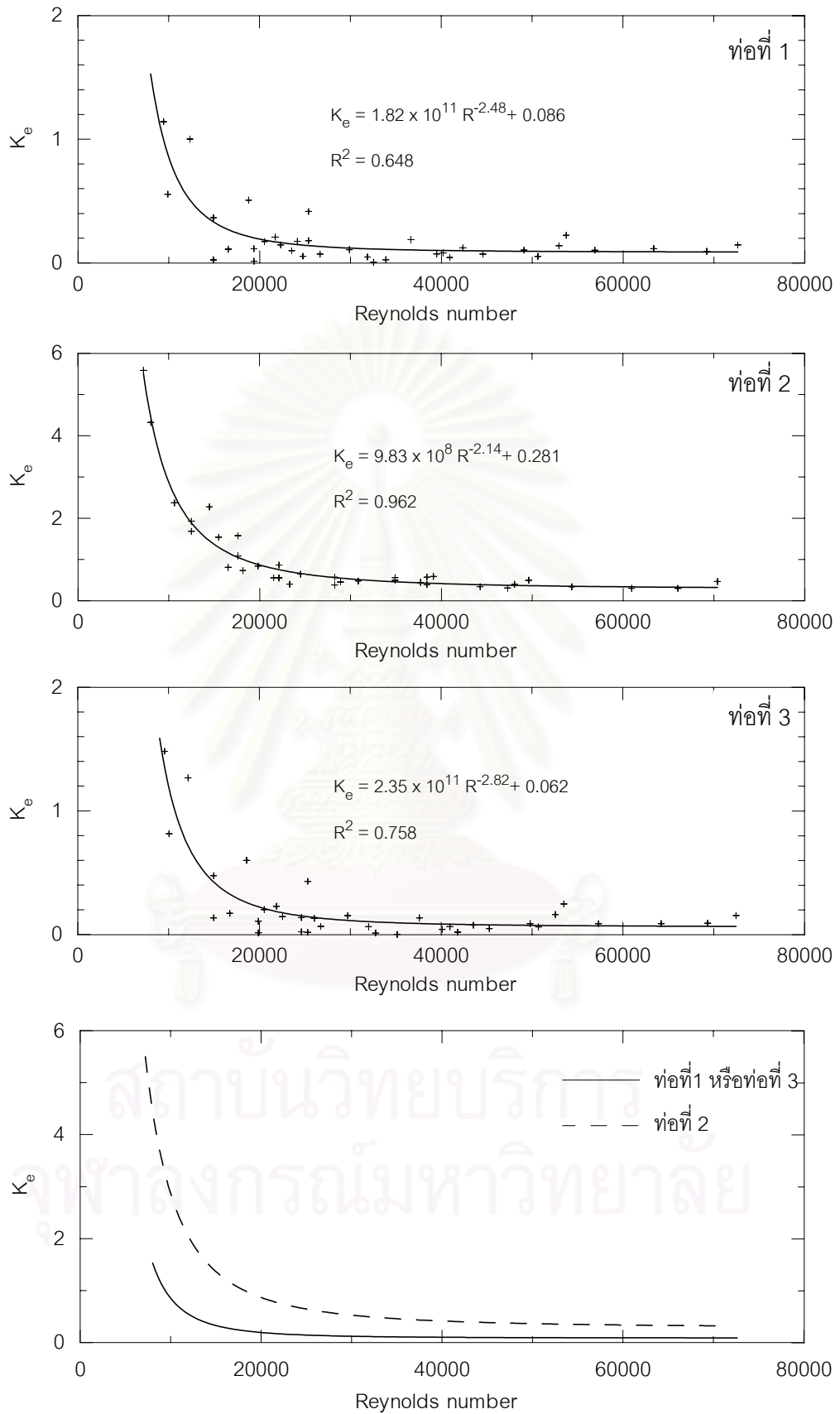
รูป ๑1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหล กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)



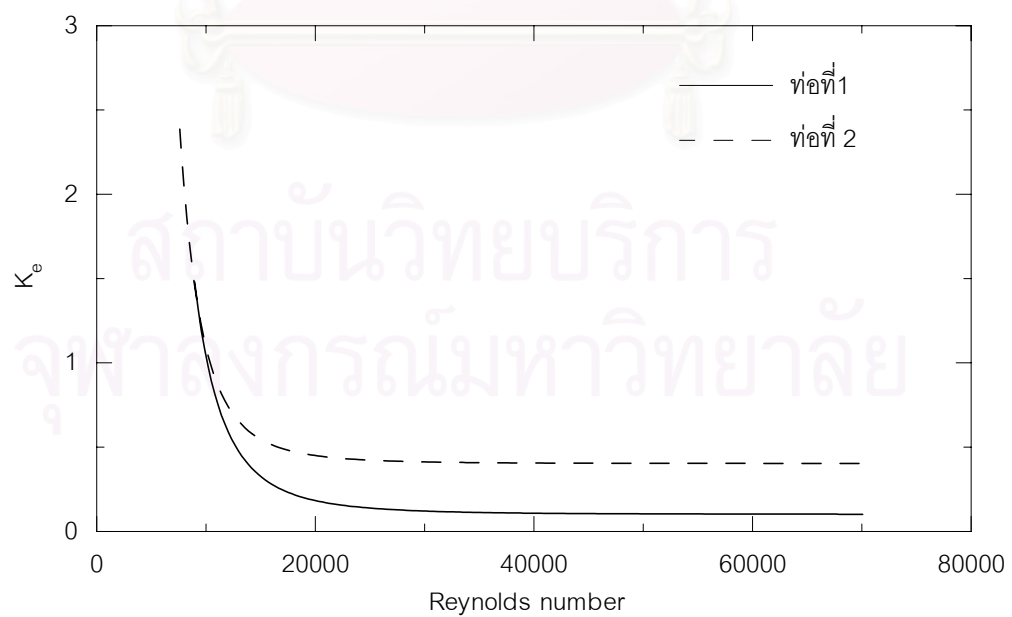
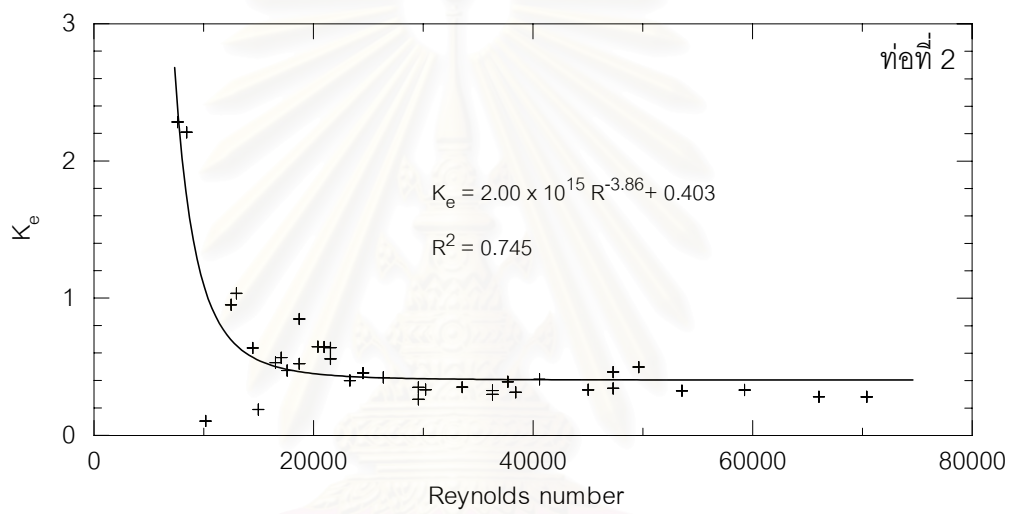
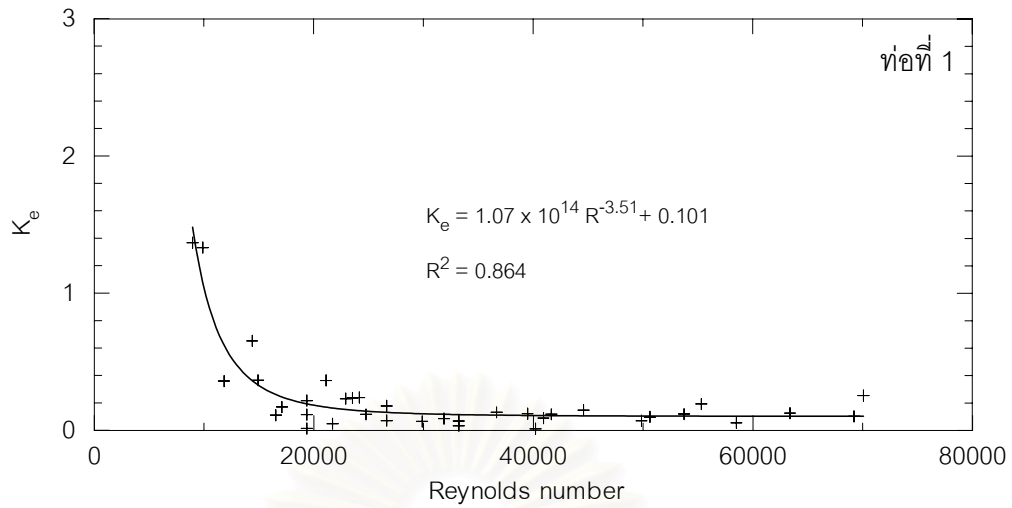
รูป ๑1-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหล กรณีการไหล 3 ท่อ



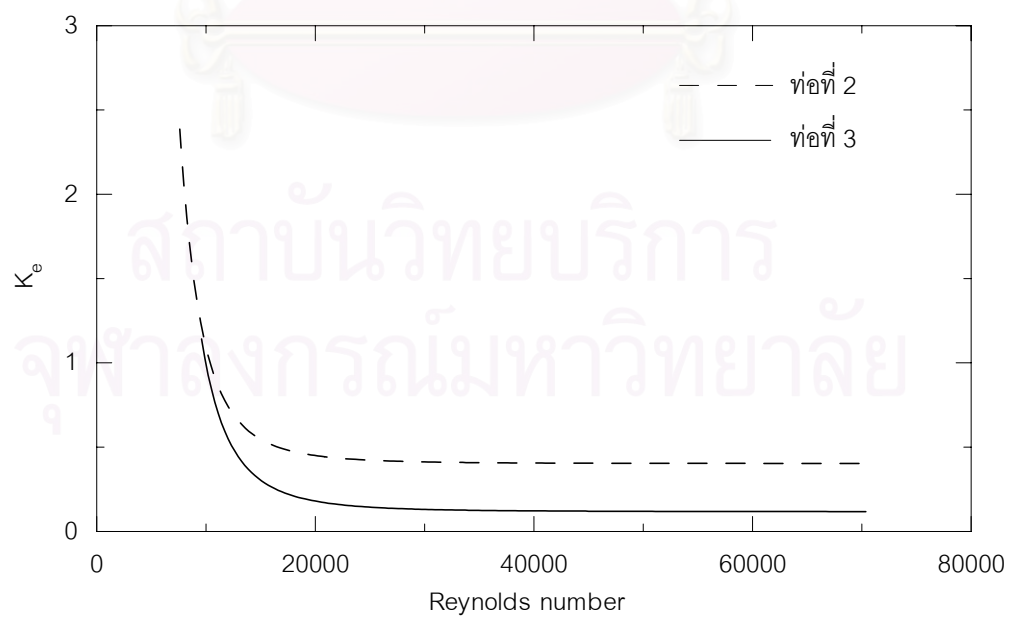
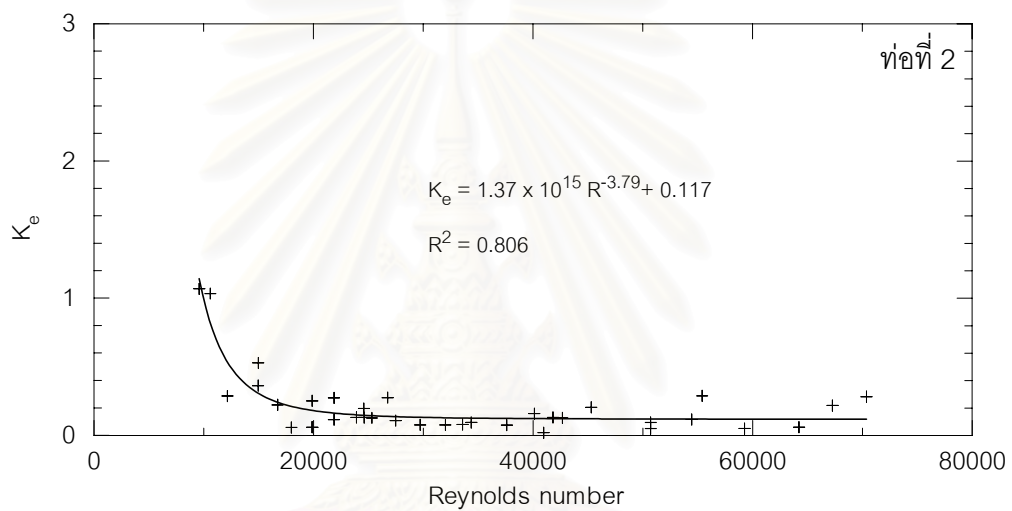
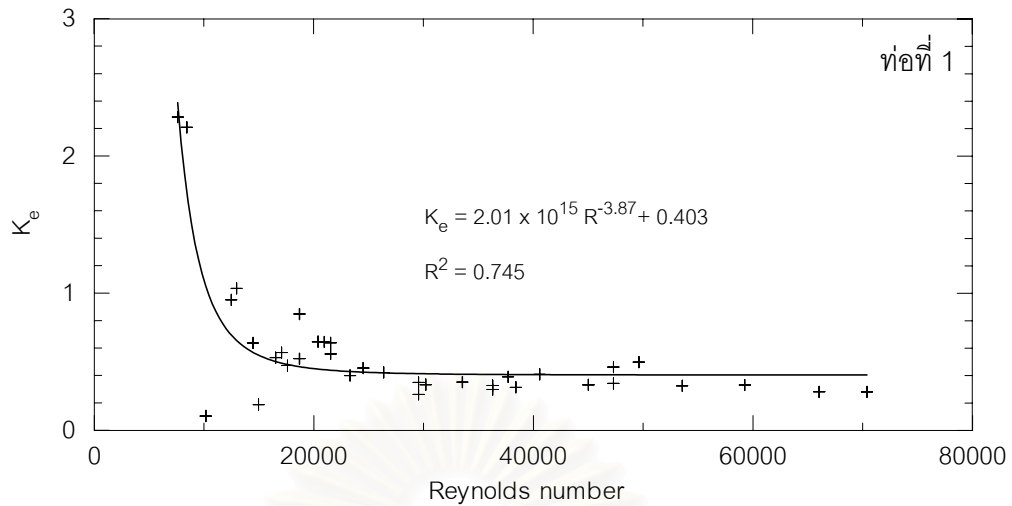
รูป ๑1-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพลังงานทางเข้ากับอัตราการไหล ในแต่ละท่อ



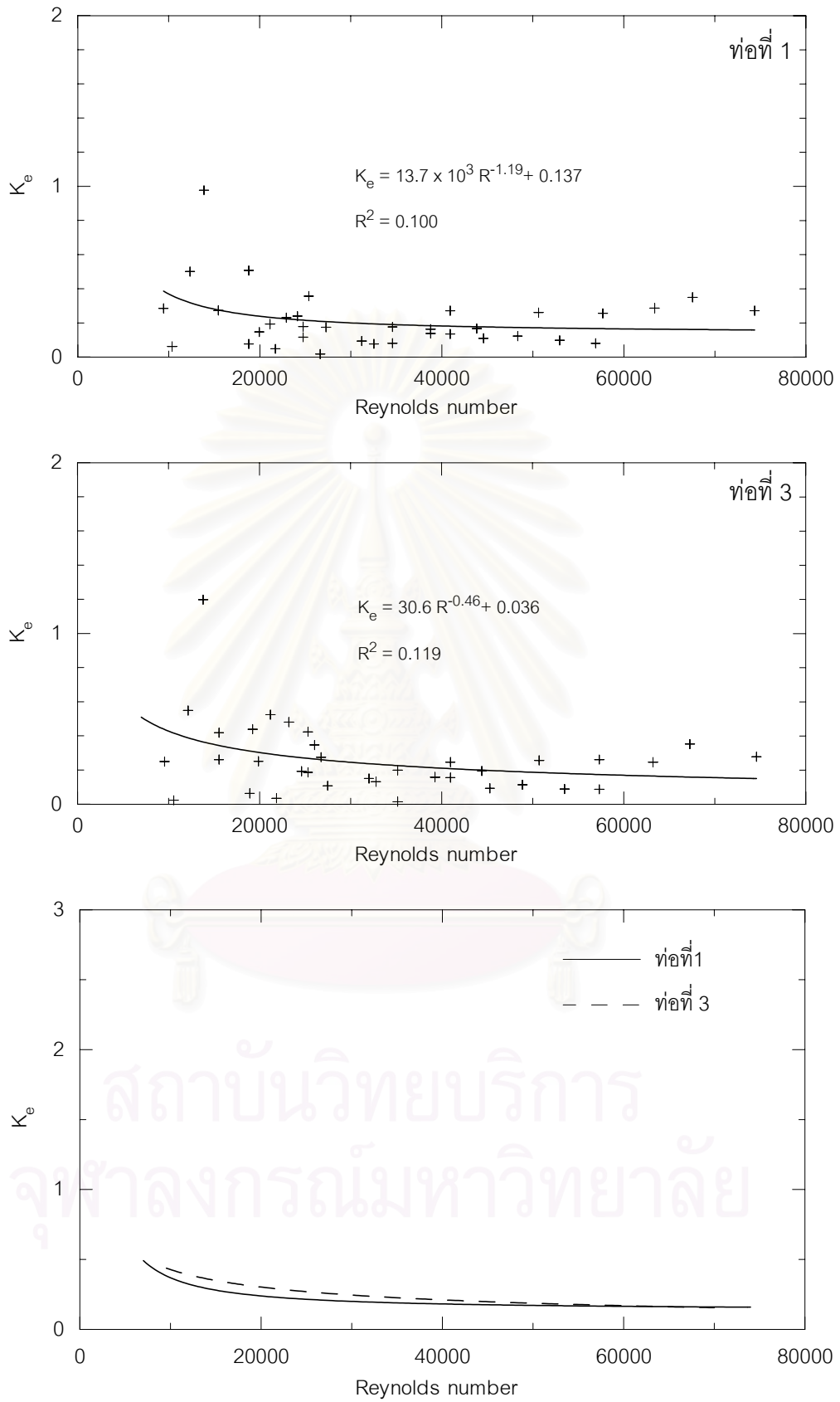
รูป ๑1-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number กรณีการไหล 1 ท่อ



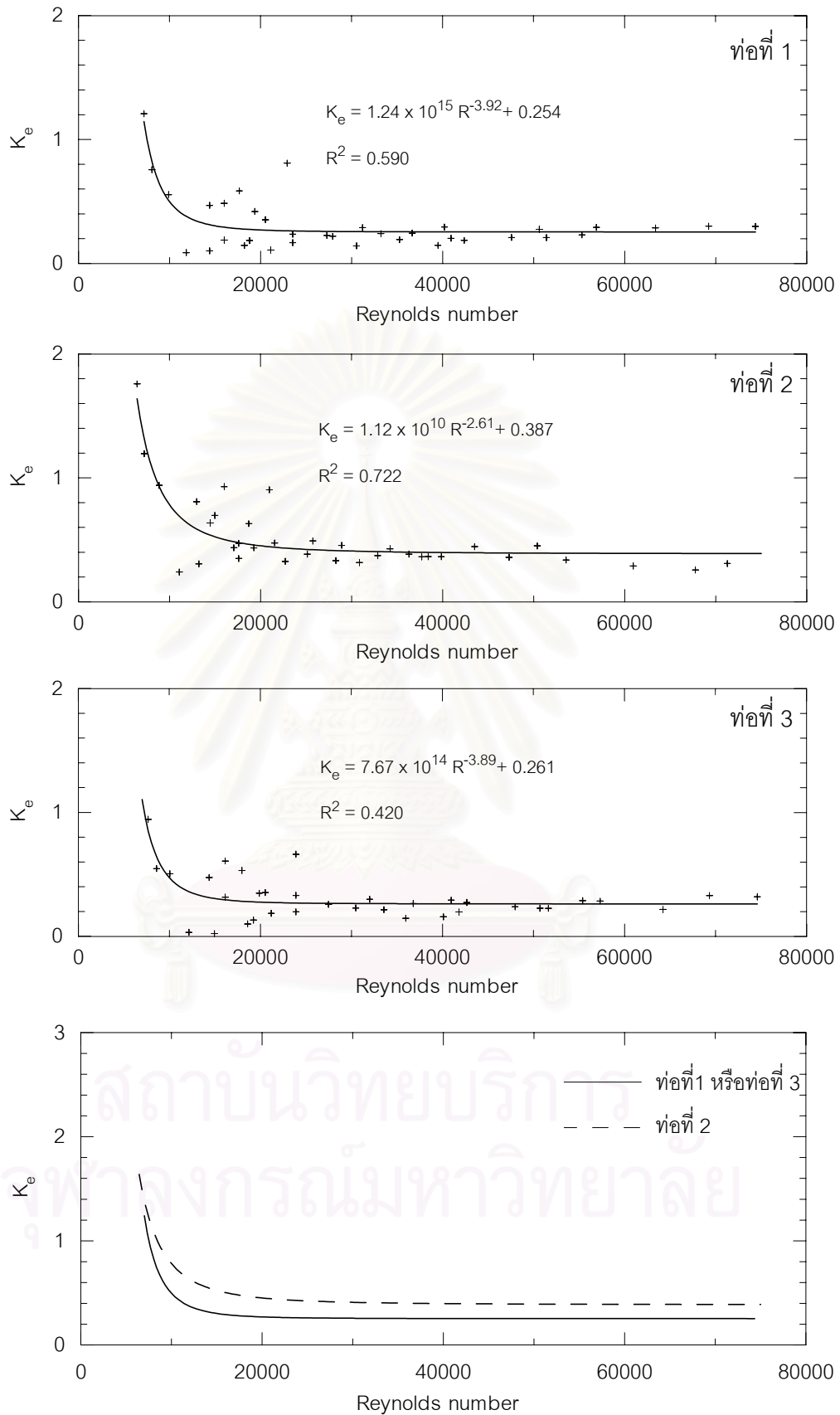
รูป ๑1-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)



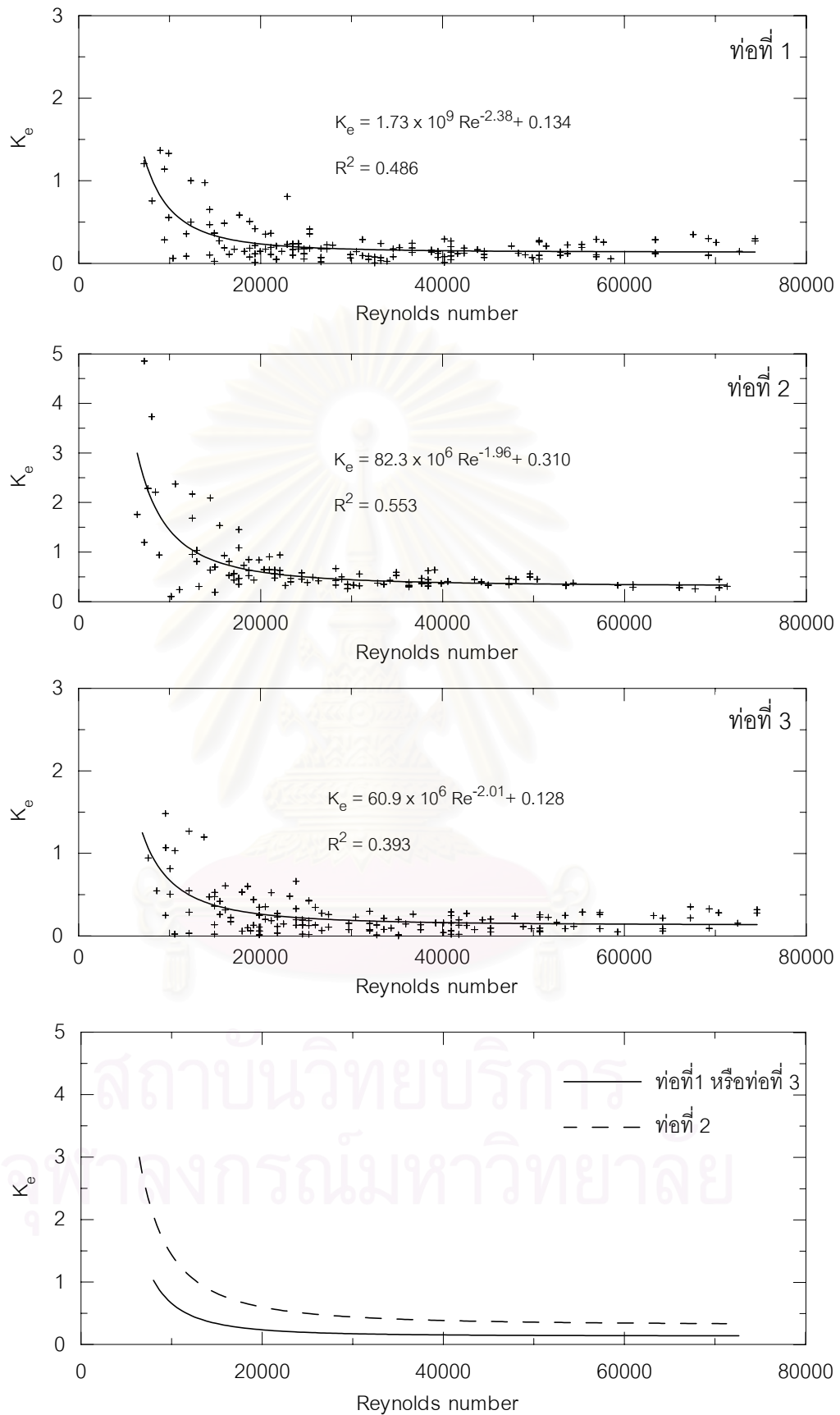
รูป ๑1-9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



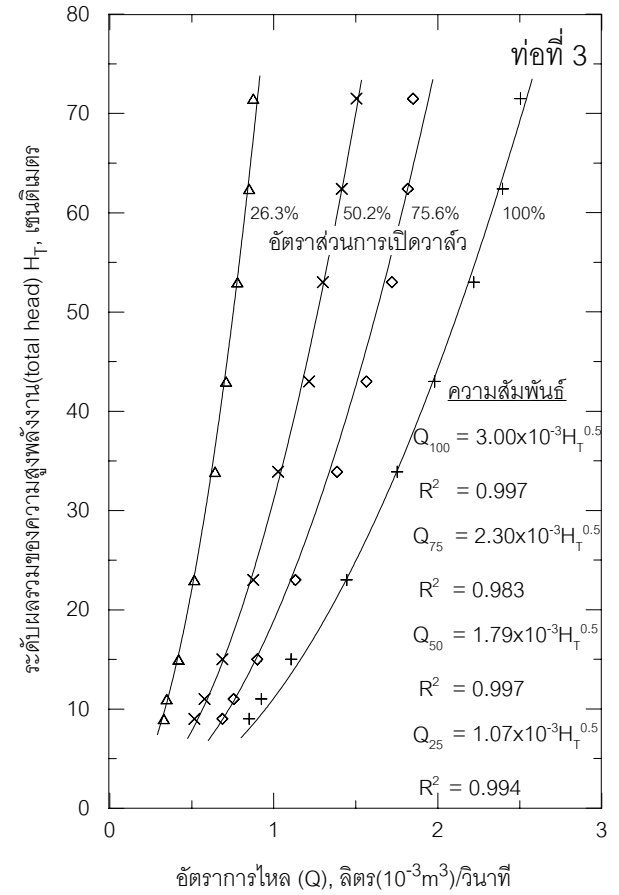
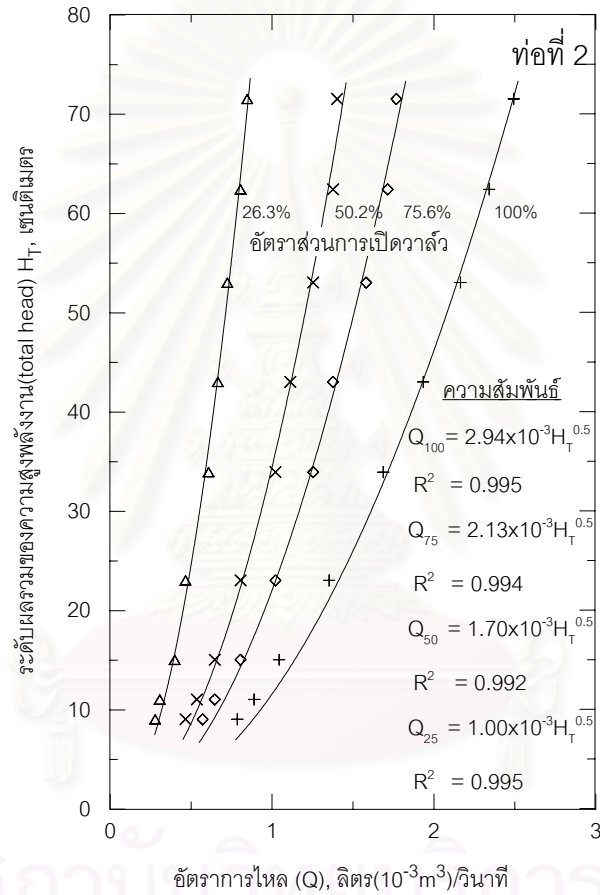
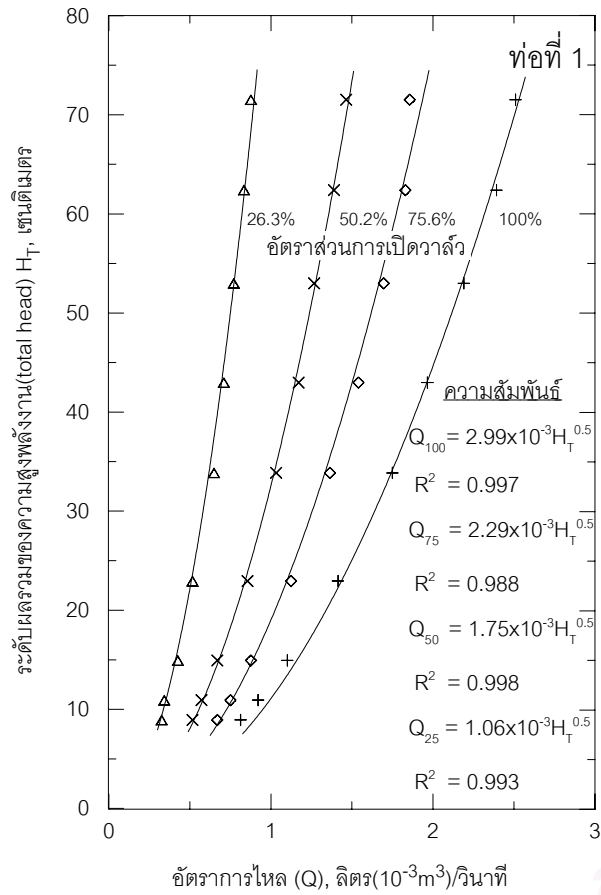
รูป ๑1-10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)



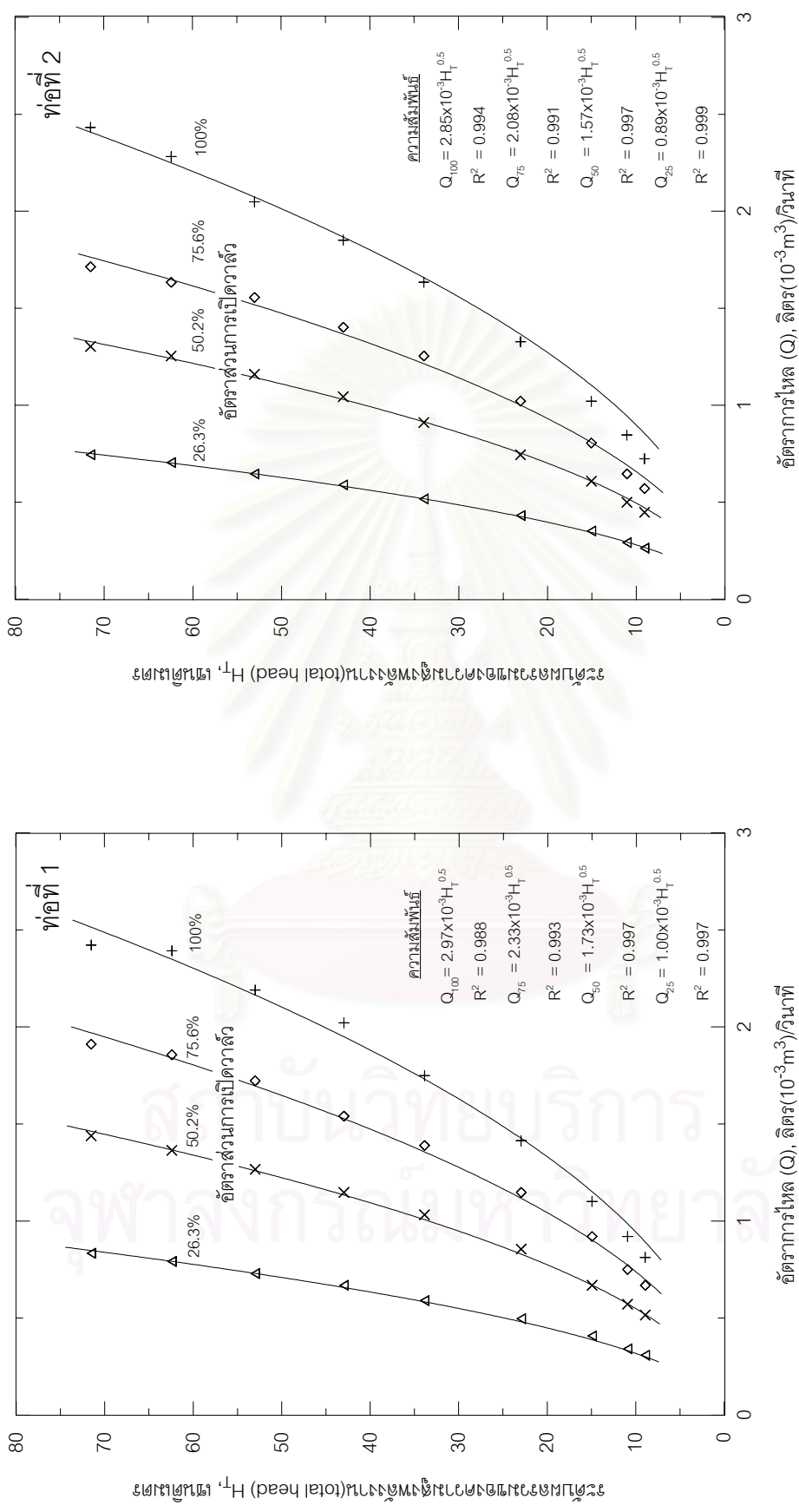
รูป ๑1-11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number กรณีการไหล 3 ท่อ



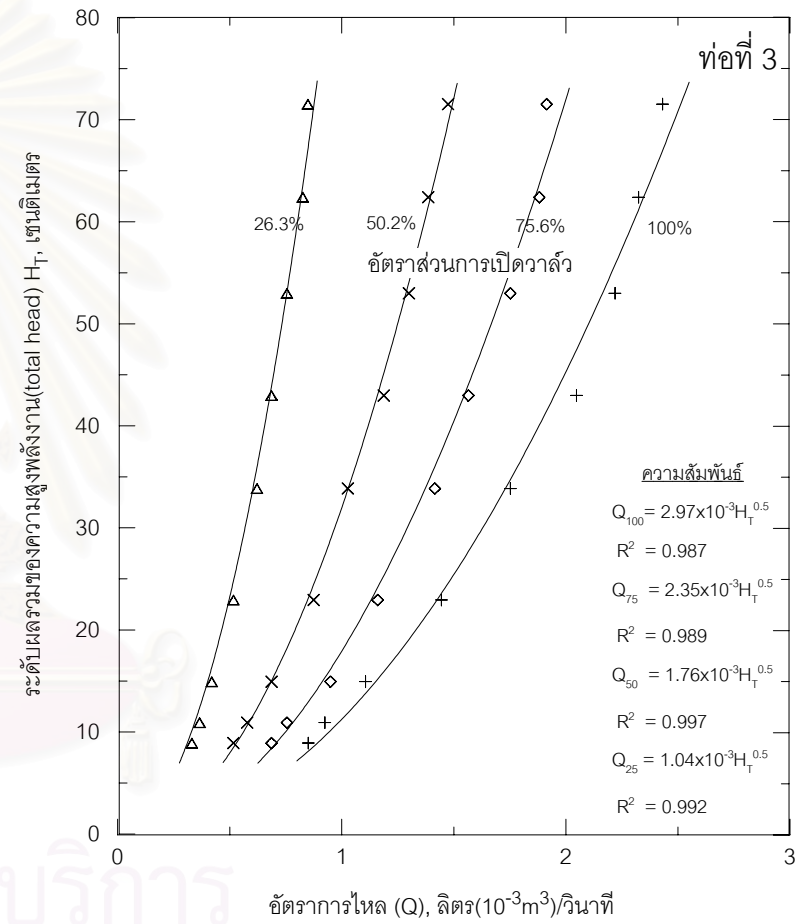
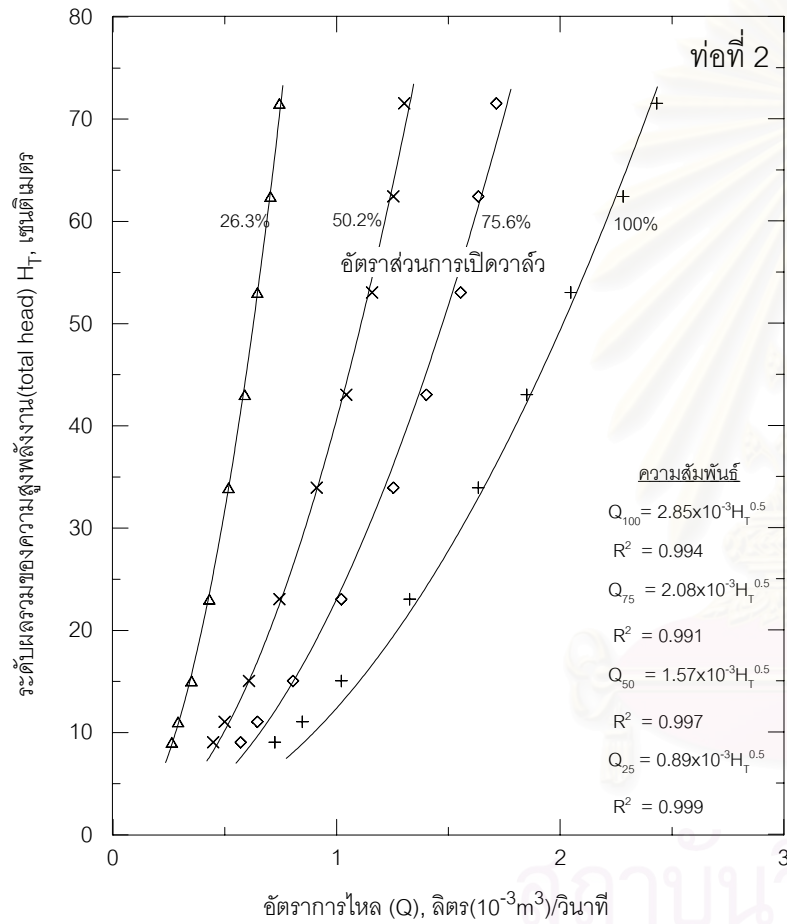
รูป ๑1-12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากทางเข้ากับ Reynold Number



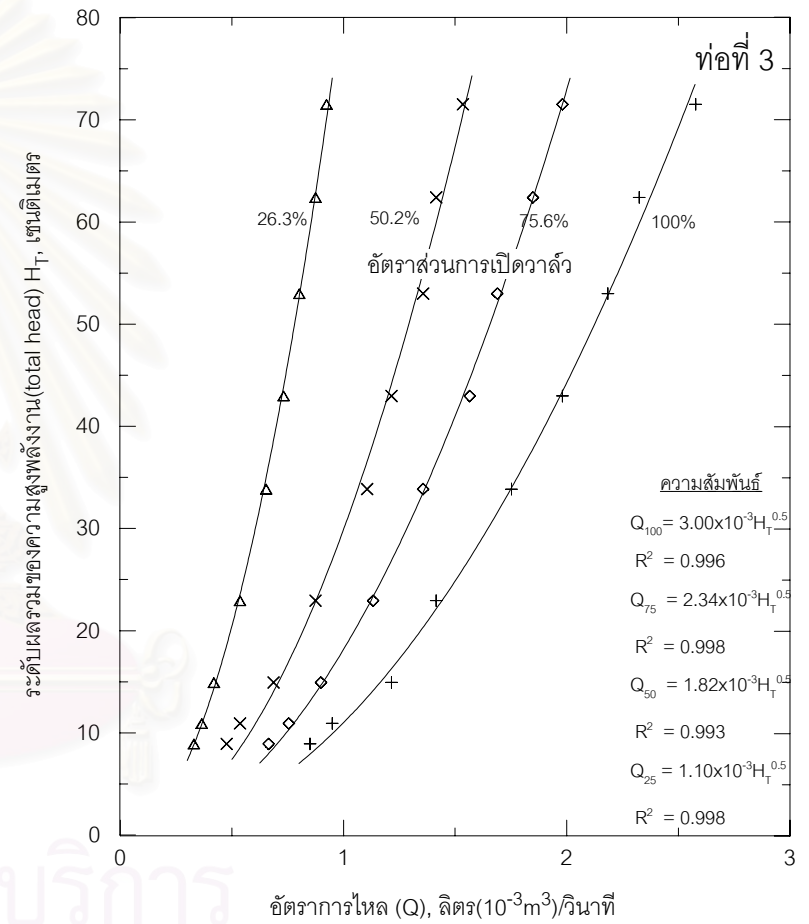
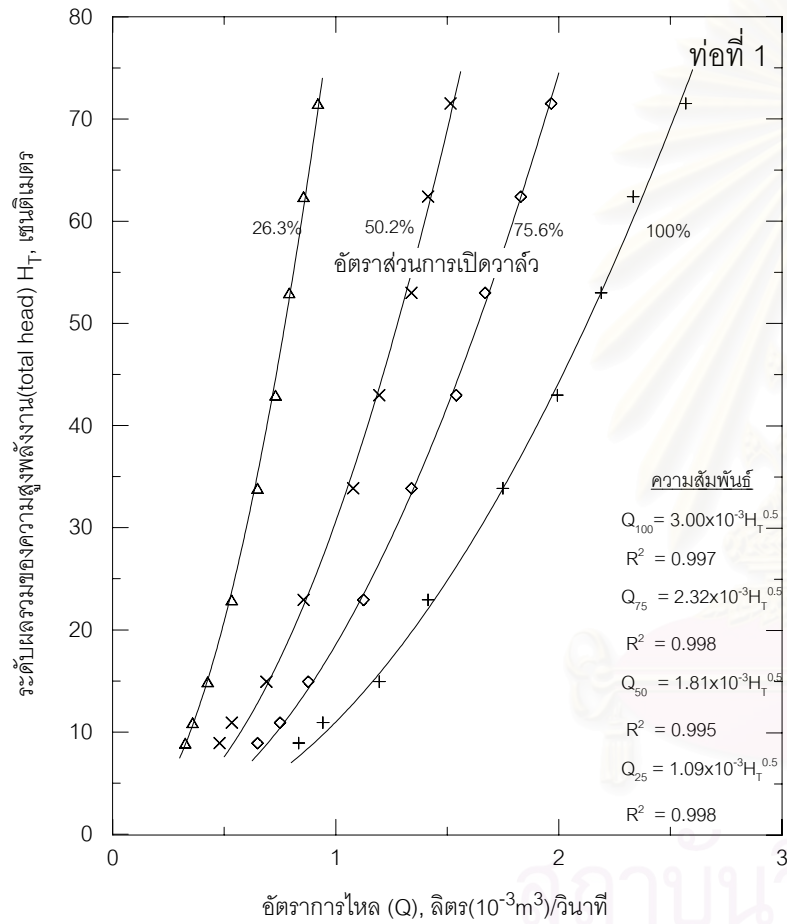
รูป ๑2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 1 ท่อ



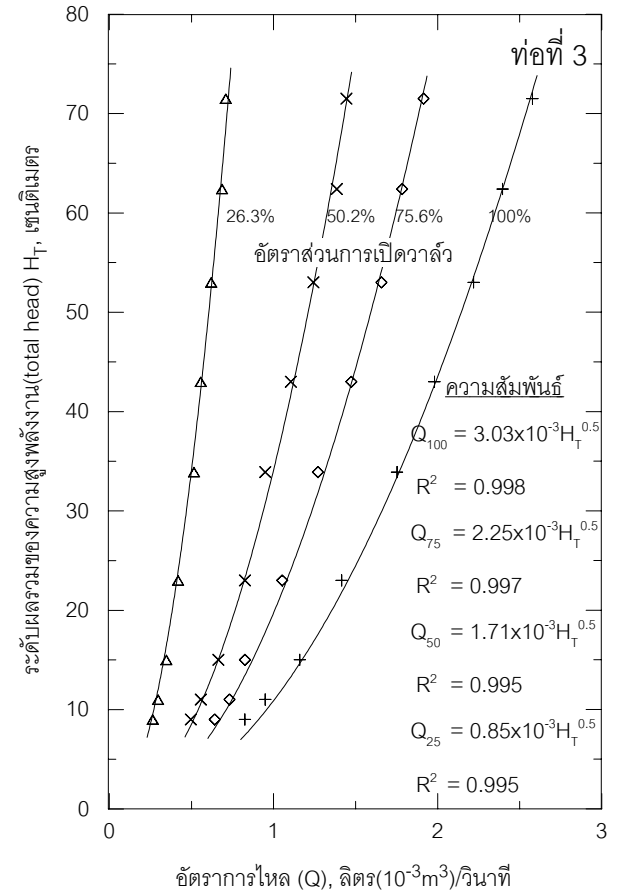
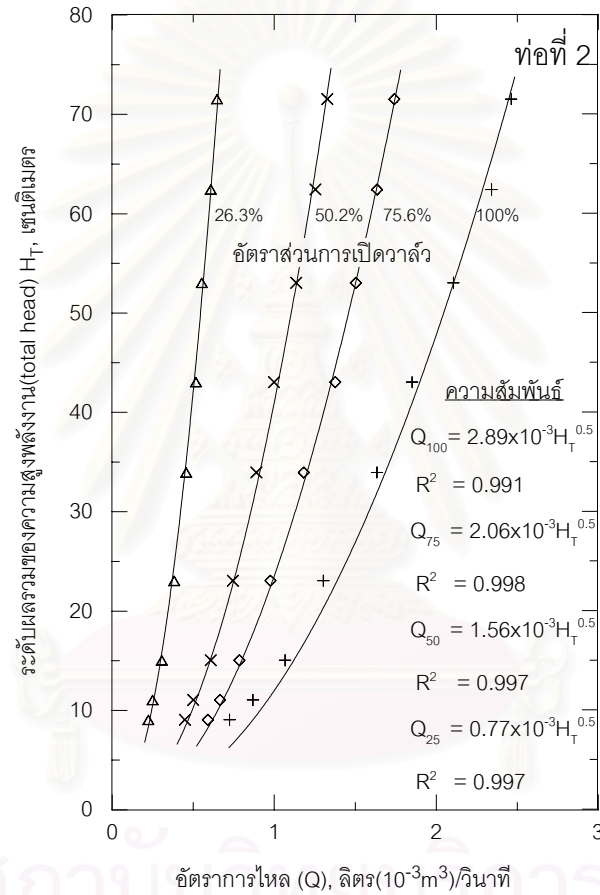
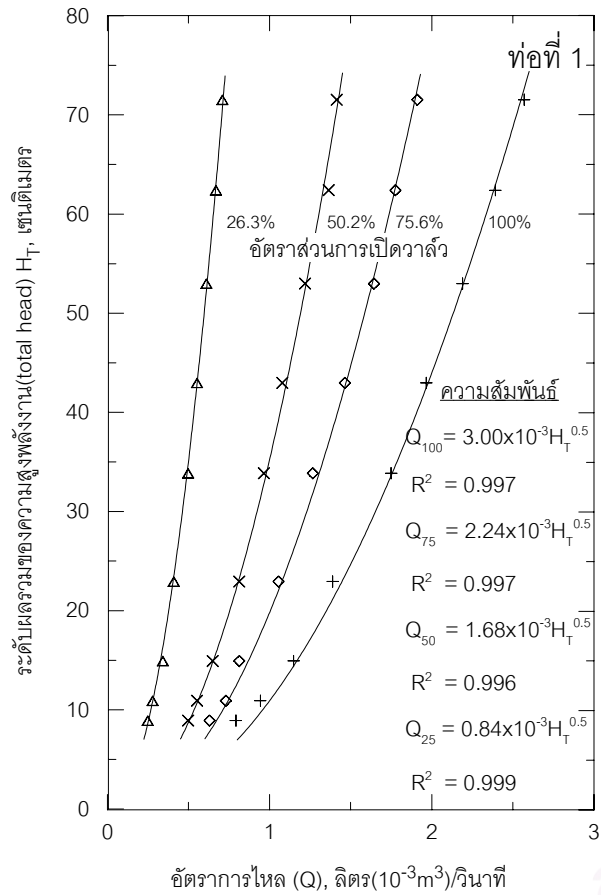
รูป ๑2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่างๆ การเปิดการไหล 1 ท่อ(ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)



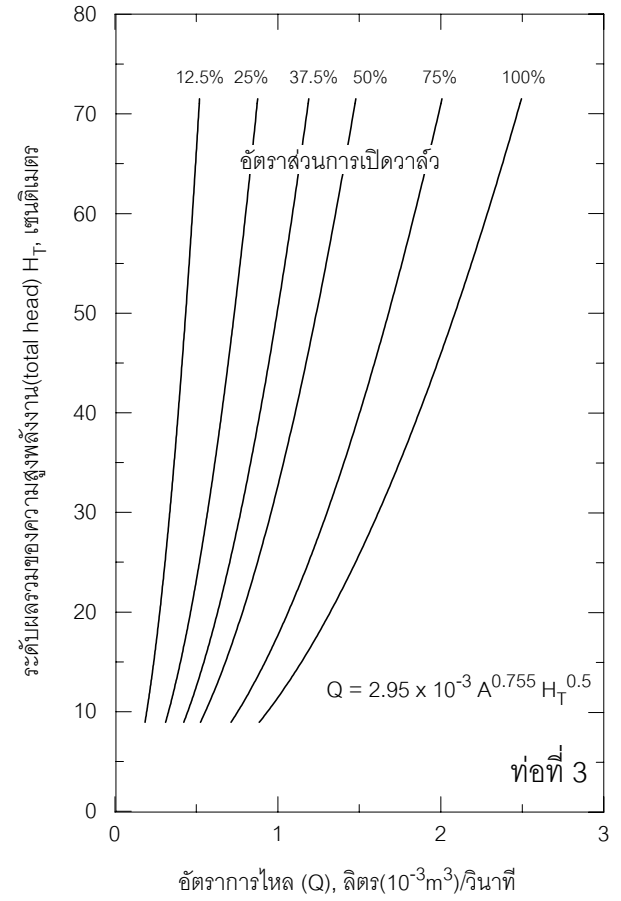
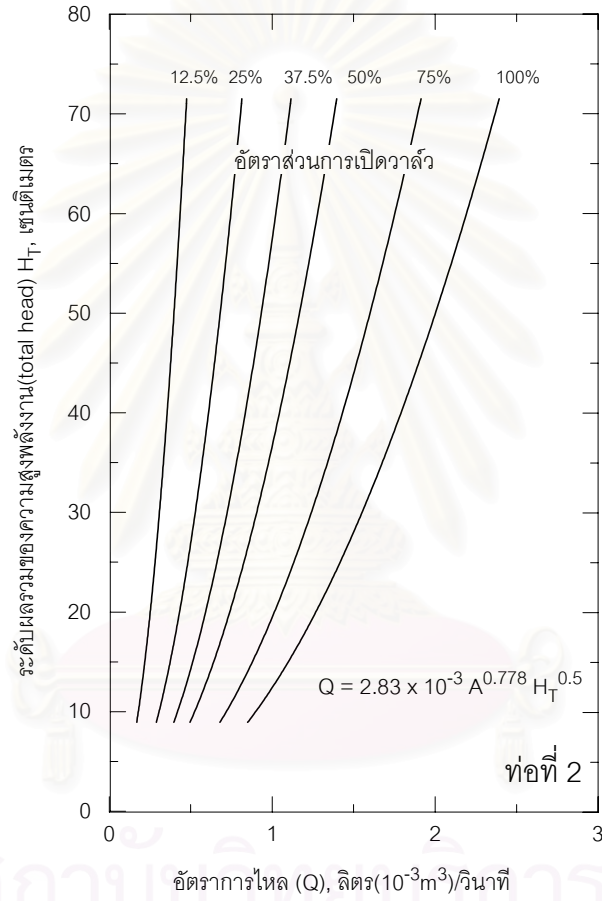
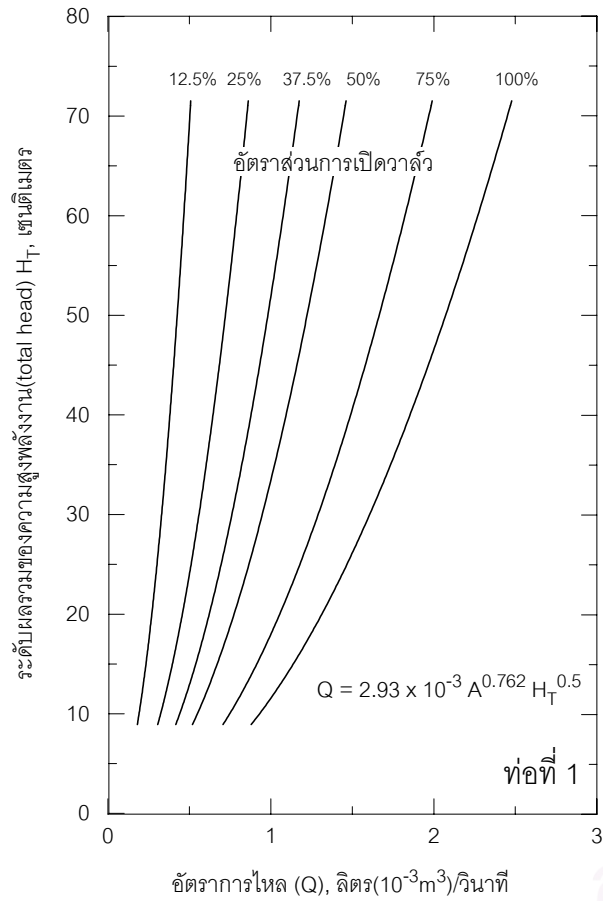
รูป จ2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
 ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ กรณีการไหล 2 ท่อ(ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



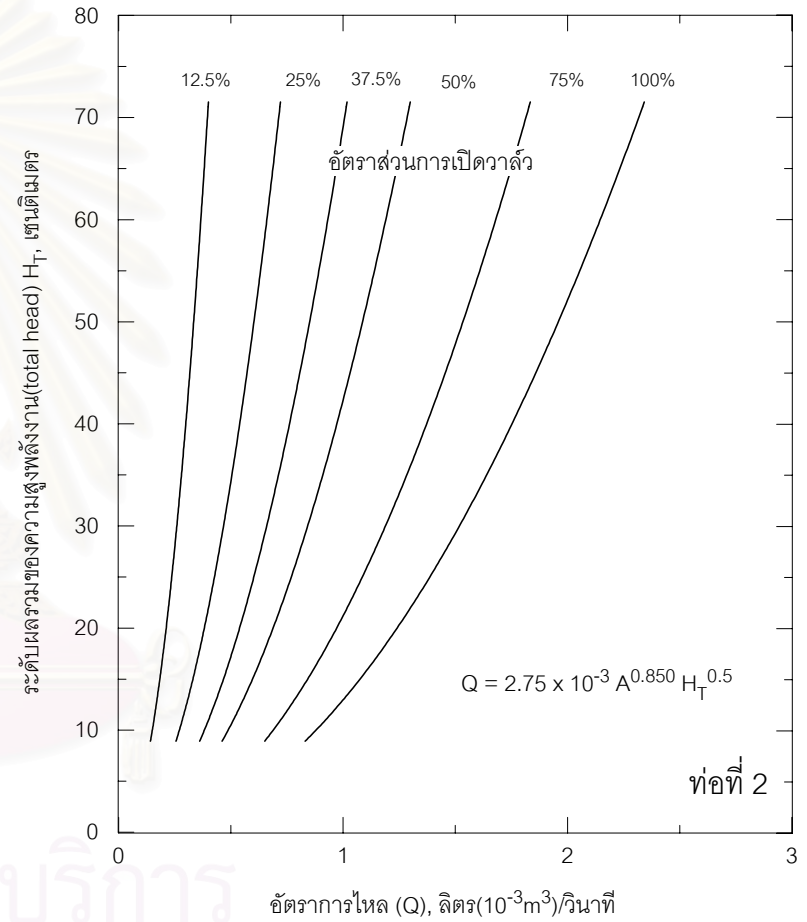
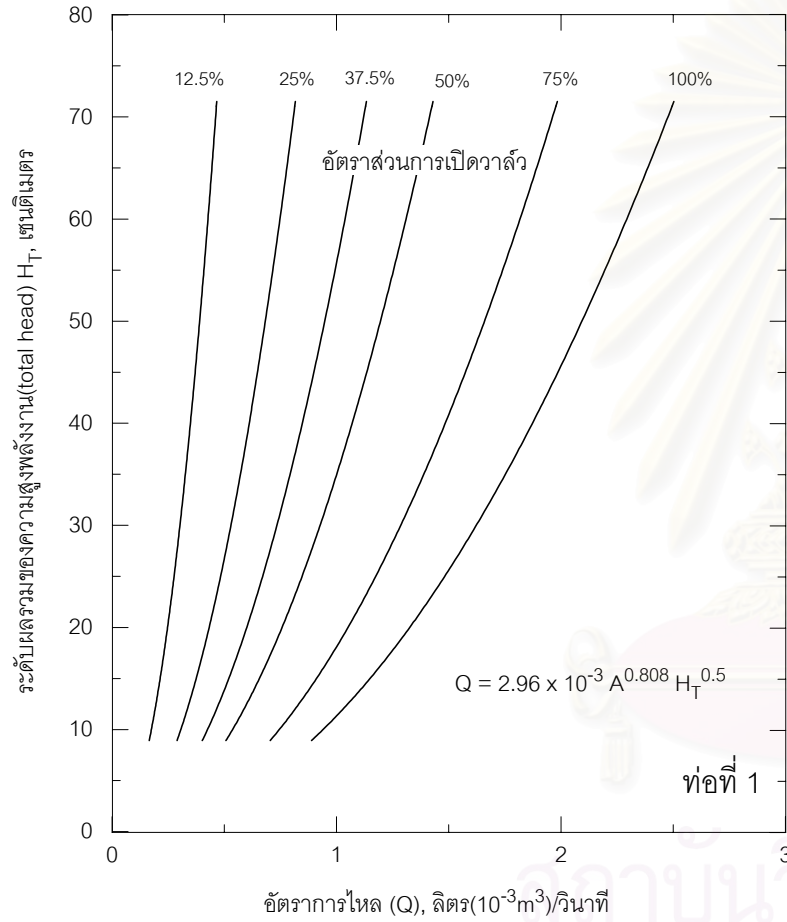
รูป จ2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ กรณีการไหล 2 ท่อ(ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)



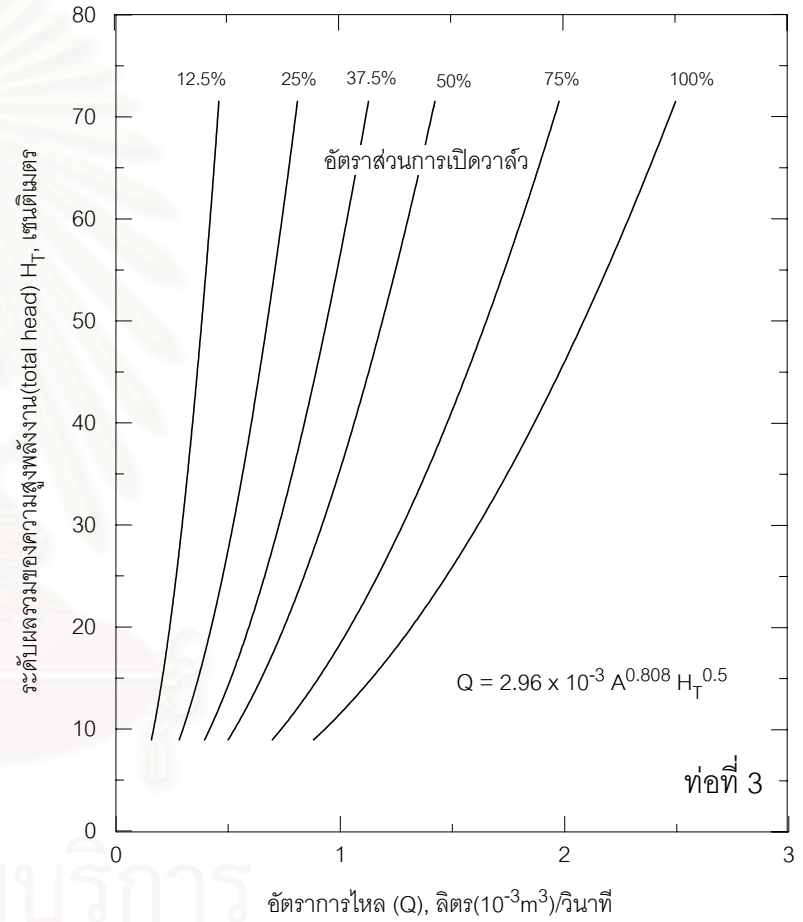
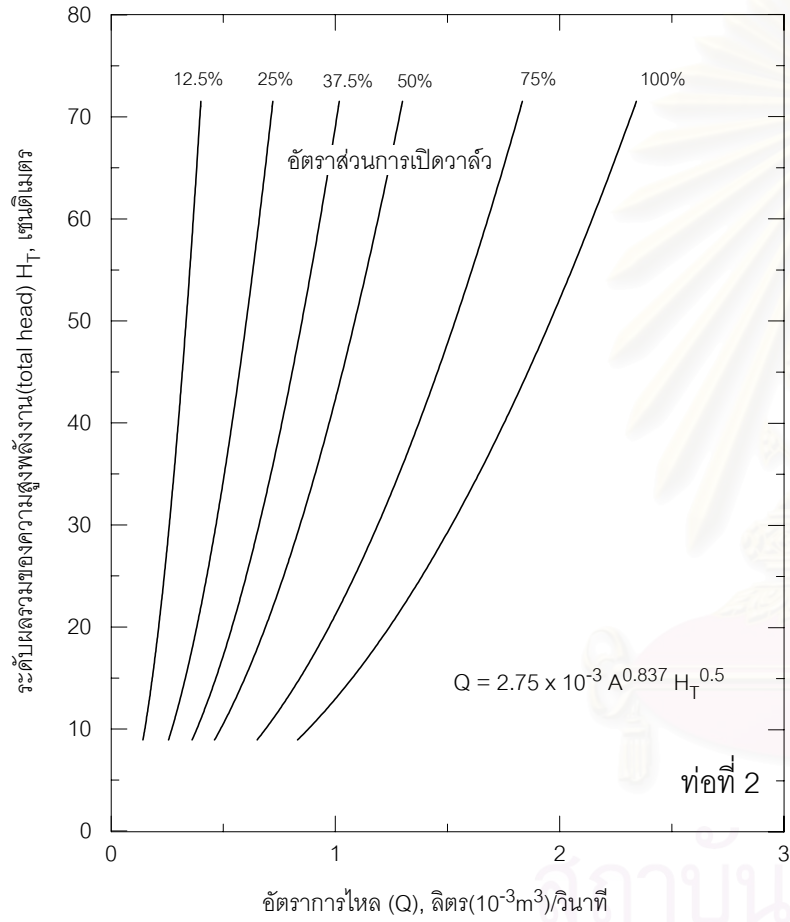
รูป ๑2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 3 ท่อ



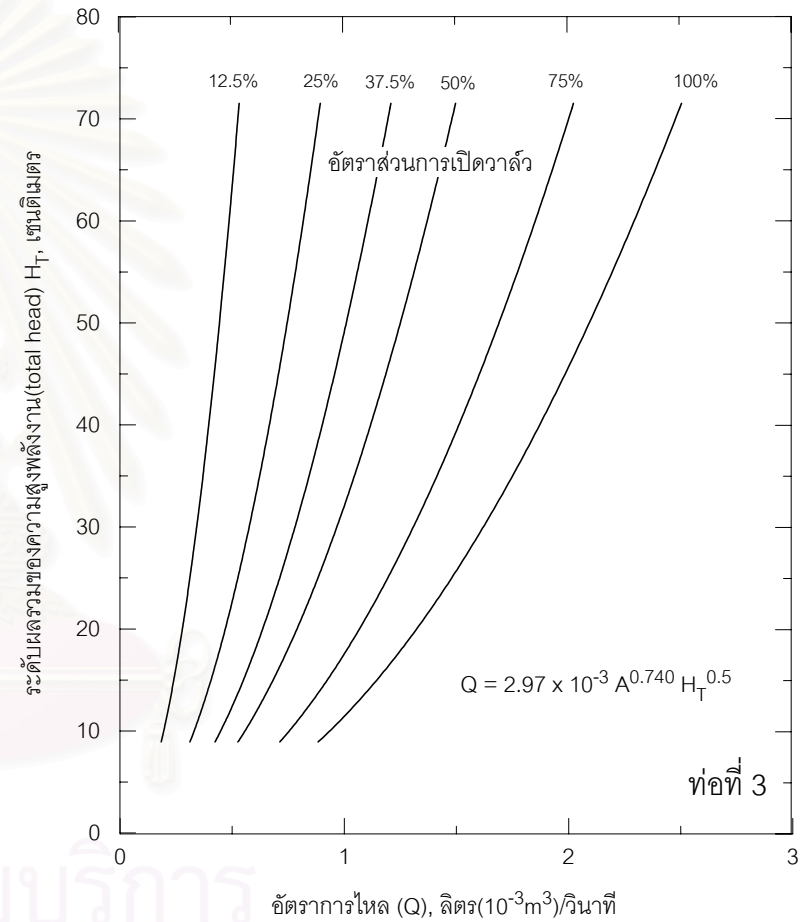
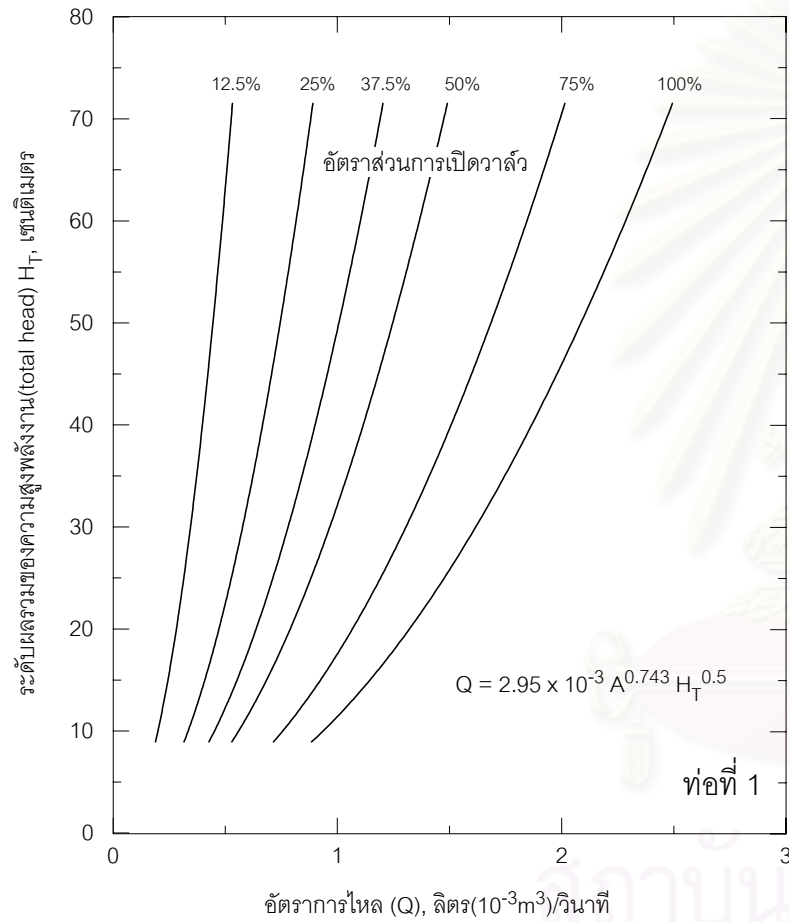
รูป ๑2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 1 ท่อ



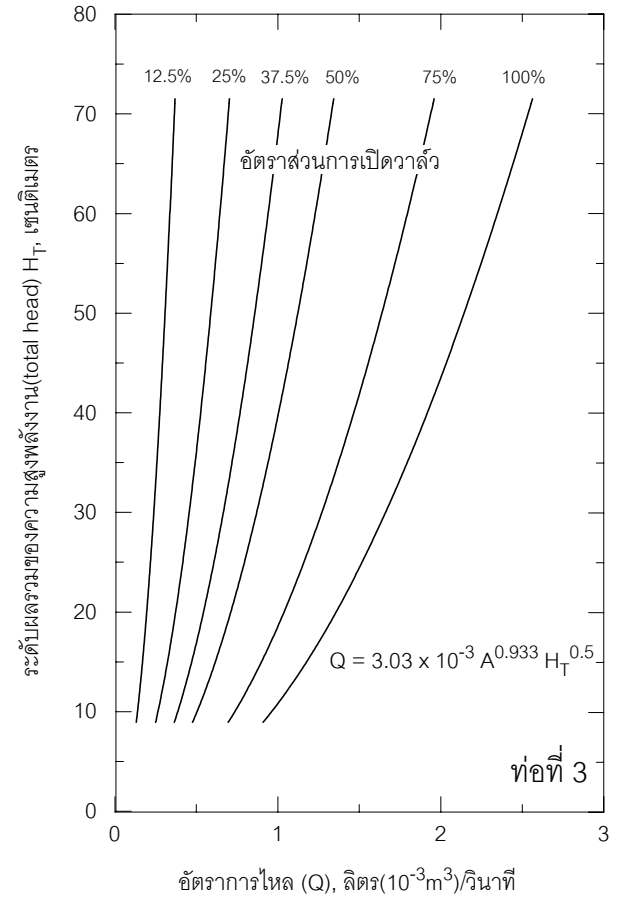
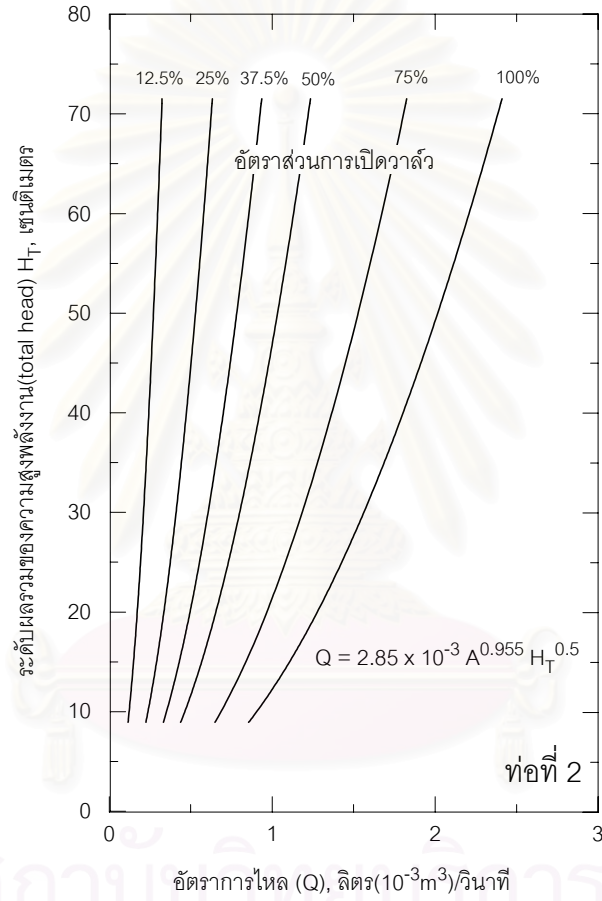
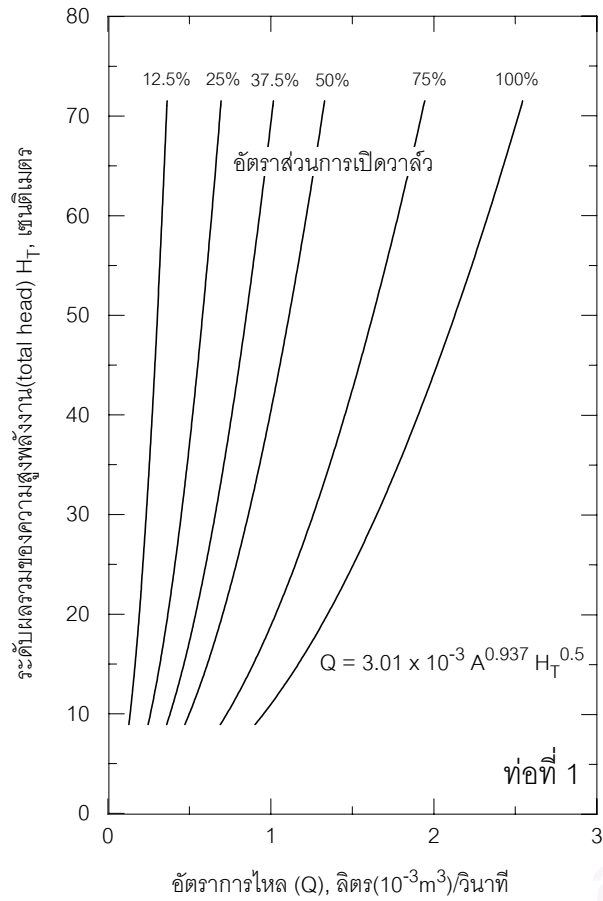
รูป จ2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ กรณีการไหล 2 ท่อ(ท่อที่ 1 และท่อที่ 2)



รูป ๑2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 2 และท่อที่ 3)



รูป ๑2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ กรณีการไหล 2 ท่อ (ท่อที่ 1 และท่อที่ 3)



รูป ๑2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับผลรวมของความสูงพลังงานกับอัตราการไหล
ที่อัตราส่วนการเปิดวาล์วขนาดต่าง ๆ ในแต่ละท่อ กรณีการไหล 3 ท่อ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ	นายขวัญชัย แพโคกสูง	
เกิด	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521 จ.ชัยภูมิ	
การศึกษา	พ.ศ. 2543	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 2) (วศ.บ.โยธา) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
	พ.ศ. 2544	เข้าศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ประสบการณ์	2545-2546	ได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	2546-2547	ได้รับทุนวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	2546-2547	นิสิตช่วยวิจัย โครงการจัดตั้งสถาบันเทคโนโลยีชั้นสูง จ.น่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย