

พฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลแบบรัศมีผ่านบ่อน้ำบาดาล  
ภายใต้การสูบแบบพลวัต



นายเชิดสกุล ตอสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

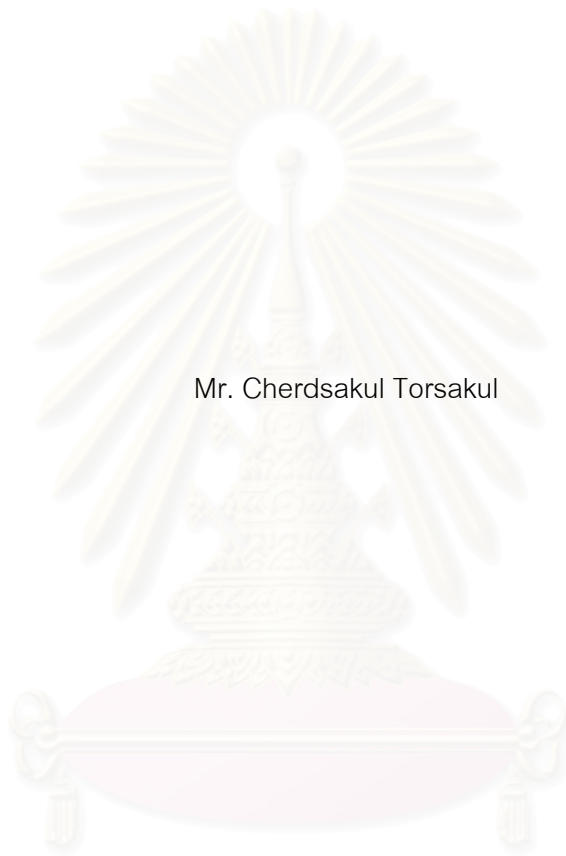
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1535-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE HYDRAULIC BEHAVIORS OF RADIAL FLOW THROUGH A WELL  
UNDER DYNAMIC PUMPING

Mr. Cherdsakul Torsakul



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 974-53-1535-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลแบบบรัชมีผ่านบ่อน้ำบาดาล  
ภายใต้การสูบแบบพลวัต

โดย

นายเชิดสกุล ตอสกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตร์ คุณธนกุลวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รัถวิชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตร์ คุณธนกุลวงศ์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ชัยยุทธ สุขศรี)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์)

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เชิดสกุล ตอสกุล : พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลแบบรัศมีผ่านบ่อน้ำบาดาลภายใต้การสูบแบบพลวัต (THE HYDRAULIC BEHAVIORS OF RADIAL FLOW THROUGH A WELL UNDER DYNAMIC PUMPING) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุจริต คุณธนกุลวงศ์, 235 หน้า. ISBN 974-53-1535-4

การพัฒนาบ่อน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ในพื้นที่ที่เป็นเมืองใหญ่ และมีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้มากกว่าสมดุลของธรรมชาติ โดยเฉพาะการสูบน้ำจากชั้นน้ำภายใต้แรงดัน ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่างๆ เช่น แผ่นดินทรุด การบรรเทาปัญหาวิธีการหนึ่งคือ การเติมน้ำลงไปชั้นน้ำ แต่ยังคงขาดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดินระหว่างการเติมน้ำ การศึกษานี้จึงทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำภายใต้แรงดันเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่สภาวะการไหลไม่คงตัว เมื่อขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเปลี่ยนไป

การศึกษานี้ได้ทดลองในแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ เพื่อทำการทดลองการไหลภายใต้แรงดันประกอบด้วยแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี เป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา ยาว 2 เมตร หนา 0.2 เมตร โดยสามารถควบคุมสภาพการไหลแบบพลวัตได้ นอกจากนี้ยังได้ทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมียมิตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว สูง 1 เมตร เพื่อหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลทางชลศาสตร์ ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์ วิกฤติ ค่าความนำชลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี สัมประสิทธิ์ของการไหลไม่คงตัว สัมประสิทธิ์ของการไหลนำพา ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล

ผลการทดลองพบว่า การไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในการทดลอง มีเสถียรสูญเสียการไหลประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลและเสถียรสูญเสียของการไหลในชั้นน้ำ ซึ่งเสถียรสูญเสียจากการไหลสามารถแบ่งออกเป็นเสถียรสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นและเสถียรสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น โดยระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนสภาพการไหล คือ รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ซึ่งคำนวณจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ในการเปรียบเทียบผลการทดลองการไหลใกล้บ่อน้ำบาดาลที่สภาวะคงตัวและที่สภาวะไม่คงตัวให้ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ค่าความนำชลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์ของการไหลนำพามีค่าแตกต่างกันเฉลี่ยร้อยละ 5.57 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลออกมีค่ามากกว่าของการไหลเข้า และมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์มีค่ามากในช่วงการไหลแบบไม่เชิงเส้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2547.....

## 4470285521 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: HYDRAULIC BEHAVIORS / DIVERGING / CONVERGING / DYNAMIC PUMPING

CHERDSAKUL TORSAKUL : THE HYDRAULIC BEHAVIORS OF RADIAL FLOW THROUGH A WELL UNDER DYNAMIC PUMPING . THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SUCHARIT KOONTANAKULVONG, Ph.D. 235 pp. ISBN 974-53-1535-4

In industrial cities, over consumption of groundwater for manufacturing purposes usually leads to some certain geological problem including land subsidence. One way to alleviate such a problem is artificial recharge. However hydraulic behaviors of groundwater flow under recharging operation are still unclear. In this study, recharging and pumping experiments were conducted to investigate the hydraulic behaviors of radial flow through a well under dynamic pumping with various sizes of aquifer media.

The experiment devices were developed to conduct experiments on groundwater flow in porous media under pressure to find parameters of the hydraulic behaviors of groundwater flow, i.e., critical Reynolds number, hydraulic conductivity, Darcy parameter, Non-Darcy parameter, coefficient of unsteady, coefficient of convective and well losses. The devices are comprised of (1) well aquifer model which is radial shape with 2 meters in radius, 0.2 meter in thickness, 30 degree at the center and the well is 0.2 meter in radius, (2) cylindrical permeameter of 8 inch in diameter and 1 meter height with dynamic condition control experiments.

The study found that converging and diverging well flow losses can be divided in to 3 main types, i.e., well losses, linear and non-linear flow losses in aquifer which can be determined by critical well radius calculated from critical Reynolds number. Compared from steady and unsteady well flow test, critical Reynolds number, hydraulic conductivity, Darcy parameter, Non-Darcy parameter and coefficient of convective are 5.57 percent different in average. Coefficient of unsteady of diverging flow is higher and increases with higher Reynolds number and non-linear flow.

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

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

Academic year 2004.....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักvijัย อาจารย์ ชัยยุทธ สุขศรี อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์ ที่ได้กรุณาแนะนำ สั่งสอน และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ปัญหาโดยตลอด ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและขอจดจำไว้ไม่ลืมเลือน

อนึ่ง ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ชั้นพื้นฐาน และสาธารณูปโภคและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกระหว่างทำการทดลอง รวมทั้งกองทุนรัชดาภิเษกสมโภชที่ให้การสนับสนุนทุนพัฒนาอุปกรณ์ เพื่อใช้ทดสอบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดิน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี โดยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์ ตลอดจนบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ชมรมวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งนายวิษณุ คุณจักร ที่กรุณาเสียสละเวลาและแรงกายเพื่อช่วยให้การทดลองสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นายนพดล เฉลิมชัยรัตนกุล ผู้ออกแบบและจัดทำแบบจำลองขึ้นมา

ขอขอบพระคุณผู้จัดการ และพี่ๆ ที่บริษัทโปรเกรสเทคโนโลยีคอนซัลแทนส์ ที่เข้าใจและให้ความสะดวกแก่ข้าพเจ้าในการศึกษาวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การส่งเสริมด้านการศึกษาของข้าพเจ้ามาโดยตลอด ขอขอบคุณนางสาวบัว ศรีคช ที่ช่วยเหลือในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ และดูแลข้าพเจ้าเป็นอย่างดีระหว่างจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หากพึงมี ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ท
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 บทนำและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบข่ายการศึกษา.....	2
1.4 แนวทางการศึกษา.....	4
1.5 การศึกษาที่ผ่านมา.....	6
<b>บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา.....</b>	<b>27</b>
2.1 นิยามของชั้นน้ำ.....	27
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำ.....	27
2.3 คุณสมบัติทางศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ.....	30
2.4 ชนิดของการไหลและพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน.....	31
2.5 สมการการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน.....	34
2.6 การสูญเสียของการไหลบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล.....	39
2.7 การวิเคราะห์ระดับความดันบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล.....	43
<b>บทที่ 3 การทดลองในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>59</b>
3.1 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองกายภาพ.....	59
3.2 ส่วนประกอบของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน.....	59
3.3 การทดสอบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน.....	65
3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	69
3.5 เงื่อนไขการทดลอง.....	71
3.6 ขั้นตอนการทดลอง.....	75
3.7 การจัดการข้อมูลจากการทดลอง.....	82

<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....</b>	<b>89</b>
4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ.....	89
4.2 ความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ.....	92
4.3 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน.....	93
4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว.....	101
4.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะไม่คงตัว.....	115
<b>บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการประยุกต์ใช้.....</b>	<b>139</b>
5.1 รัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล.....	143
5.2 เสถียรภาพจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	146
5.3 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา.....	151
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>158</b>
6.1 การปรับปรุงเครื่องมือ.....	158
6.2 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำ.....	159
6.3 พฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลใกล้บ่อน้ำบาดาล.....	159
6.4 ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง.....	161
6.5 ข้อเสนอแนะ.....	162
รายการอ้างอิง.....	164
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การปรับปรุงเครื่องมือและออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการทดลอง.....	168
ภาคผนวก ข ผลการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์.....	180
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	188
ภาคผนวก ง ภาพการทดลองและอุปกรณ์.....	200
ภาคผนวก จ คู่มือการใช้เครื่องมือ.....	205
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	235



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1	3
1-2	3
1-3	3
3-1	68
3-2	68
3-3	74
3-4	85
4-1	90
4-2	90
4-3	93
4-4	94
4-5	97
4-6	99
4-7	100
4-8	103
4-9	104
4-10	107
4-11	110
4-12	111
4-13	112
4-14	113
4-15	114
4-16	117
4-17	120
4-18	123
4-19	126

ตารางที่	หน้า
4-20	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CRI).....129
4-21	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DRI).....130
4-22	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DRI).....130
4-23	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CRD).....131
4-24	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CRD).....131
4-25	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DRD).....133
4-26	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DRD).....133
4-27	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CRS).....134
4-28	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DRS).....138
5-1	ขอบเขตการทดลองที่นำมาวิเคราะห์.....140
5-2	สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์จากการทดลอง.....141
5-3	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางศาสตร์ที่ได้จากการทดลองแบบต่างๆ.....142
5-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์สกับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ย.....143
5-5	เสถียรภาพจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมีในกรณีการไหลแบบผสม.....148
5-6	เสถียรภาพจากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมีในกรณีการไหลแบบผสม.....148

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1-1	ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษา.....	5
1-2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์ กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง..... จากการทดลองของ Shepherd (1989)	10
1-3	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียตทานกับค่าเรย์โนลด์์ จากการทดลอง..... ของ Mobasher และ Todd (1963)	16
1-4	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์์..... จากการทดลองของ Williams (1985)	23
2-1	ลักษณะของชั้นน้ำ.....	28
2-2	โค้งการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve).....	28
2-3	การแบ่งชนิดของการไหล.....	33
2-4	ระยาะน้ำดในบ่อสูบน้ำบาดาล.....	40
2-5	ลักษณะเฮดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลทดลอง.....	42
2-6	กรวยความดันเพิ่ม (Cone of Recharge) และกรวยความดันลด..... (Cone of Depression)	45
2-7	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล.....	45
2-8	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในแนวรัศมี.....	48
2-9	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี $r_{cr} \leq r_w$ .....	50
2-10	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี $r_{cr} > r_w$ .....	51
3-1	การเชื่อมโยงระบบต่างๆของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน.....	60
3-2	เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน.....	61
3-3	ลักษณะของแบบจำลองบ่อบาดาล-ชั้นน้ำ.....	63
3-4	ลักษณะของเพอร์เมียมิตีเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	70
3-5	ชุดตะแกรงมาตรฐาน.....	70
3-6	การเพิ่มอัตราการไหลของการทดลอง CRI1/S1-CRI7/S4 และ DRI1/S1-DRI7/S4....	73
3-7	การลดอัตราการไหลของการทดลอง CRD1/S1-CRD7/S4 และ DRD1/S1-DRD7/S4.....	73
3-8	อัตราการไหลแบบไซน์ของการทดลอง CRS1/S1-CRS7/S4 และ DRS1/S1-DRS7/S4.....	73
3-9	หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการทดลอง.....	86
3-10	ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดันและค่าปรับแก้.....	86
3-11	หน้าจอสำหรับใส่ข้อมูลการทดลอง.....	87
3-12	หน้าจอสำหรับใส่ค่ารูปแบบการไหล.....	87
3-13	หน้าจอขณะเตรียมพร้อมแบบจำลอง.....	88

รูปที่	หน้า
3-13	หน้าจอแสดงผลขณะทำการทดลอง.....88
4-1	การกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ.....91
4-2	กราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขนาดความถ่วงจำเพาะที่ใช้ในการทดลอง.....92
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์.....96 (การทดลอง ST1/S1-ST14/S1).
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....96 (การทดลอง ST1/S1-ST14/S1)
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....98 (การทดลอง ST1/S1-ST4/S1) กรณีการไหลแบบเชิงเส้น
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....98 (การทดลอง ST5/S1-ST14/S1) กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น
4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ .....100 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน
4-8	เส้นระดับความดันของการทดลอง CR11/S1.....103
4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (CR1/S1-CR15/S1).....105
4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (CR1/S1-CR15/S1).....105
4-11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....108 กรณีการไหลแบบเชิงเส้น
4-12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....108 กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น
4-13	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....111 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล
4-14	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....114 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล
4-15	อัตราการไหลต่อเวลาของการทดลอง CRI1/S1-CRI7/S1.....116
4-16	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลอง CRI7/S1.....116
4-17	เส้นระดับความดันของการทดลอง CRI7/S1 ที่เวลา 300 600 และ 750 วินาที.....118
4-18	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (CRI7/S1).....121
4-19	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (CRI7/S1).....121
4-20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....124 กรณีการไหลแบบเชิงเส้น

รูปที่		
4-21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....	124
	กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น	
4-22	ความลาดชันชลศาสตร์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลอง (CRI1/S1-CRI7/S1).....	126
4-23	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวกับค่าเรย์โนลด์.....	127
	กรณีการไหลแบบเชิงเส้น (CRI1/S1-CRI7/S1)	
4-24	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวกับค่าเรย์โนลด์.....	127
	กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น (CRI1/S1-CRI7/S1)	
4-25	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวกับค่าเรย์โนลด์ กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น.....	128
	(CRI1/S1-CRI7/S1)	
4-26	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวที่อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลต่างๆ.....	128
	กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น (CRI1/S1-CRI7/S1)	
4-27	อัตราการไหลต่อเวลาของการทดลอง CRD1/S1-CRD7/S1.....	132
4-28	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลอง CRD7/S1.....	132
4-29	อัตราการไหลต่อเวลาของการทดลอง CRS3/S1-CRS7/S1.....	134
4-30	รูปร่างของเส้นระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง การทดลอง CRS7/S2.....	135
5-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยจากการทดลองกรณีต่าง ๆ...	145
5-2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย.....	145
5-3	เส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี.....	153
	จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์และสมการ Thiem	
5-4	เส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี.....	153
	จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์และสมการ Thiem	
5-5	เส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง.....	156
	การไหลเข้าบ่อด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลดลงและอัตราการไหลคงที่	
5-6	เส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง.....	156
	การไหลเข้าบ่อด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลดลงและอัตราการไหลคงที่	
5-7	แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา.....	157

## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
$a'$	พารามิเตอร์ดาร์ซี
$a_1'$	พารามิเตอร์ดาร์ซีของการไหลในทิศทางเดียว
$a_2'$	พารามิเตอร์ดาร์ซีของการไหลในแนวรัศมี
$b'$	พารามิเตอร์นอนดาร์ซี
$b_1'$	พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลในทิศทางเดียว
$b_2'$	พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลในแนวรัศมี
$c_d$	สัมประสิทธิ์อัตราการไหล
$c_1'$	สัมประสิทธิ์อัตราการไหลไม่คงตัว (Unsteady Coefficient)
$c_2'$	สัมประสิทธิ์อัตราการไหลนำพา (Convective Coefficient)
$d$	ความยาวจำเพาะการไหล
$d_{10}$	ขนาดประสิทธิผลหรือขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 10 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
$d_{30}$	ขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 30 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
$d_{50}$	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยหรือขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 50 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
$d_{60}$	ขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 60 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
$ds_A$	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (ม.)
$ds$	เฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds''$	เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds'''$	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$ds_{AC}$	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำเข้าบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$ds_{/C}$	เฮดสูญเสียจากการไหลเข้าแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds''_{/C}$	เฮดสูญเสียจากการไหลเข้าแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds'''_{/C}$	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้า (ม.)
$ds_{AD}$	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$ds_{/D}$	เฮดสูญเสียจากการไหลออกแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds''_{/D}$	เฮดสูญเสียจากการไหลออกแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds'''_{/D}$	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลออก (ม.)
$e$	อัตราส่วนช่องว่าง
$f_s$	ปัจจัยเกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาคตัวกลาง (Grain Shape Factor)
$f_\alpha$	ปัจจัยเกี่ยวกับความพรุนของอนุภาคตัวกลาง (Porosity Factor)

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$f$	แฟคเตอร์เสียดทาน ที่คิดจากความเร็วการไหลจริง
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที <sup>2</sup> )
$h$	ระดับความดัน (ม.) ที่ระยะ $r$ จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$h_0$	ระดับความดันน้ำเดิม (ม.)
$h_{0L}$	ระดับความดันในชั้นน้ำที่ตำแหน่งไกลจากบ่อน้ำบาดาลที่สุด(ม.)
$h_1$	ระดับความดัน ที่ระยะ $r_1$ จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$h_2$	ระดับความดัน ที่ระยะ $r_2$ จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$h_{cr}$	ระดับความดันที่ตำแหน่งวิกฤติ (ม.)
$h_D$	ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดจุดล่างของเพอร์เมียมิเตอร์ (ม.)
$h_U$	ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดจุดบนของเพอร์เมียมิเตอร์ (ม.)
$h_w$	ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$h_{weir}$	ระดับน้ำเหนือสันฝาย (ม.)
$I$	ความลาดชันชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)
$k$	ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (ม. <sup>2</sup> )
$m$	ความหนาของชั้นน้ำ (ม.)
$n$	ค่ายกกำลังของการสูญเสียบ่อน้ำบาดาล
$r$	ระยะทางในแนวรัศมีจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$r_0$	ระยะในแนวรัศมีที่ได้รับอิทธิพลจากการสูบน้ำและเติมน้ำ (ม.)
$r_w$	รัศมีของบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$r_{cr}$	รัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$s_w$	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหล (ม.)
$s_{wC}$	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$s_{wD}$	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$v$	ความเร็วเฉลี่ยการไหลผ่านตัวกลาง (ม./วินาที)
$w$	ความกว้างของหน้าตัดการไหลในกรณีการไหลในทิศทางเดียว (ม.)
$A$	ค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
$B$	ค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
$B_{weir}$	ความกว้างของสันฝาย (ม.)
$C$	สัมประสิทธิ์ของความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล
$C_u$	Coefficient of Uniformity
$C_c$	Coefficient of Concavity

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$G_T$	ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิลดลง
$K$	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)
$K'$	ค่าความนำชลศาสตร์ ที่คิดจากความเร็วจริงในการไหล (ม./วินาที)
$K_1'$	ค่าความนำชลศาสตร์ ของการไหลในทิศทางเดียว (ม./วินาที)
$K_2'$	ค่าความนำชลศาสตร์ ของการไหลในแนวรัศมี (ม./วินาที)
$Q$	อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)
$Q_d$	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
$Q_r$	อัตราการเติมน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
$Q_{lab}$	ค่าอัตราการไหลจากผลการทดลองการไหลในชั้นน้ำรูปส่วนหนึ่งของวงกลม (ลบ.ม./วินาที)
$Q_{equi}$	ค่าอัตราการไหลเสมือนจริง (12 เท่าของ $Q_{lab}$ , ลบ.ม./วินาที)
$Re$	ค่าเรย์โนลด์
$Re'$	ค่าเรย์โนลด์ของการไหลจริง
$Re'_{cr}$	ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ
$Re'_{wf}$	ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อ
$S$	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน
$T$	ความสามารถในการส่งผ่าน (ม. <sup>2</sup> /วัน)
$V_v$	ปริมาตรช่องว่างในตัวอย่างดิน (ลบ.ม.)
$V_T$	ปริมาตรรวมของตัวอย่างดิน (ลบ.ม.)
$V_s$	ปริมาตรของเนื้อดิน (ลบ.ม.)
$W_1$	น้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำผสมกับทรายที่อุณหภูมิทดลอง (กรัม)
$W_2$	น้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะที่มีระดับน้ำที่คอขวด (กรัม)
$W_s$	น้ำหนักทรายอบแห้งหรือน้ำหนักของตัวอย่างดิน (กรัม)
$\phi$	ความพรุนของตัวอย่างดิน
$\rho$	ความหนาแน่นของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง (ก.ก./ลบ.ม.)
$\rho_s$	ความหนาแน่นของเม็ดดิน (ก.ก./ลบ.ม.)
$\mu$	ความหนืดพลวัตของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง (ปาสคาล-วินาที)
$\nu$	ความหนืดเปรียบเทียบของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง (ม. <sup>2</sup> /วินาที)



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำและความเป็นมา

น้ำใต้ดิน นับวันจะมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพราะน้ำผิวดินมีปริมาณไม่เพียงพอโดยเฉพาะในฤดูแล้ง สืบเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของปริมาณน้ำฝนที่ตก พื้นที่เก็บกักน้ำผิวดินมีจำนวนไม่เพียงพอ และความต้องการใช้น้ำเพื่อกิจกรรมต่างๆ ซึ่งได้แก่ อุปโภค บริโภค อุตสาหกรรม และเกษตรกรรมเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นเมืองใหญ่ และมีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก

จากการที่มีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้มากเกินไปจนกว่าสมดุลของธรรมชาติ โดยเฉพาะการสูบน้ำจากชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (Confined Aquifer) ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น การเกิดแผ่นดินทรุด การแทรกซึมของน้ำเค็มทำให้คุณภาพของน้ำใต้ดินแย่ลง เป็นต้น เพื่อที่จะบรรเทาปัญหาดังกล่าวจึงต้องลดปริมาณการสูบน้ำใต้ดิน หรือต้องเพิ่มปริมาณน้ำใต้ดินโดยเติมน้ำลงไปชั้นน้ำใต้ดิน (Artificial Recharge) ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วยเร่งกระบวนการตามธรรมชาติในการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำ (Aquifer) อย่างไรก็ตามการศึกษาพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดินทั้งในระหว่างการสูบน้ำใต้ดินและการเติมน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน ยังไม่มีการดำเนินการอย่างจริงจังในประเทศไทย และการศึกษาด้านการดำเนินการ (Operation) เกี่ยวกับการสูบน้ำใต้ดินและการเติมน้ำใต้ดินก็ยังไม่มีการศึกษาวิจัยทำให้ยังขาดความเข้าใจในพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดินในตัวกลางพูนโดยเฉพาะการไหลบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นถึงพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลใกล้บ่อน้ำภายใต้การสูบบแบบพลวัต (Dynamic Pumping) ของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน โดยทำการศึกษาและทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (Well-Aquifer Model) ที่จำลองบ่อน้ำบาดาลและสภาพชั้นน้ำภายใต้แรงดันที่พัฒนาขึ้นเอง

เนื่องจากพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น อัตราการสูบน้ำหรืออัตราการเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล ขนาดอนุภาคทรายในชั้นน้ำ ขนาดและความหนาของกรวดรอบบ่อน้ำบาดาล ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อสภาวะการไหลไม่คงตัว และศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลไม่คงตัวของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล อันจะทำให้การดำเนินการเกี่ยวกับการไหลใกล้บ่อน้ำบาดาลในสภาพการไหลเข้าและออกอันเนื่องมาจากการสูบและเติมน้ำทำได้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์สำหรับการศึกษานี้มีดังต่อไปนี้

- 1) พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือสำหรับการทดลองการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุนแบบพลวัต (Dynamic Flow)
- 2) ทดลองหาพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุนภายใต้การสูบแบบพลวัต (Dynamic Pumping)
- 3) หาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลผ่านตัวกลางพรุน

## 1.3 ขอบข่ายการศึกษา

การศึกษานี้ ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ทรายขนาดสม่ำเสมอ (Uniform Grade) จำนวน 4 ตัวอย่างแทนวัสดุชั้นน้ำ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) เท่ากับ 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร ความพรุนประมาณ 0.4 การทดลองจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1) ปรับปรุงเครื่องมือให้สามารถปรับอัตราการไหลได้ตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนแปลง (Dynamic Pumping) พร้อมทั้งมีการแสดงผล และเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในทุกช่วงเวลา (Real-time) โดยมีอัตราการไหลในช่วง 0-3.6 ลิตรต่อวินาที วัฏระดับความดัน (H) ในช่วง 0-17.5 เมตร

2) ทดลองการไหลแบบมาตรฐาน หรือการทดลองการไหลผ่านตัวกลางในเพอร์เมียมิเตอร์ (Permeameter) เพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานทางศาสตร์ของการไหลผ่านวัสดุชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษา ขอบเขตการทดลองการไหลแบบมาตรฐานแสดงในตารางที่ 1-1

3) ทดลองการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล (Converging Flow) และการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล (Diverging Flow) จากแบบจำลองกายภาพ (Physical Model) ที่เรียกว่า “แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (Well-Aquifer Model)” ซึ่งเป็นการไหลในแนวรัศมี (Radial Flow) ภายใต้ขอบเขตการทดลองด้วยอัตราการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่สภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว ซึ่งถูกกำหนดจากข้อจำกัดของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 1-2 และ 1-3

4) ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาทดลองประกอบด้วย อัตราการไหล ขนาดของทรายชั้นน้ำ และทิศทางการไหล

5) พฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลประกอบด้วย สภาพการไหล ความสูญเสียของพลังงาน ลักษณะของเขตที่สูญเสีย

ตารางที่ 1-1 ขอบเขตการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

$Q \times 10^{-4}$		$v \times 10^{-3}$		$Re'$		$h_D$		$h_U$	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0.2	15.3	0.7	52.2	3.2	283.2	0.63	10.12	0.70	2.93

ตารางที่ 1-2 ขอบเขตการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีที่สภาวะคงตัว

$Q \times 10^{-4}$		$v \times 10^{-3}$		$Re'$		การไหลเข้า (Converging Flow)				การไหลออก (Diverging Flow)			
						$h_W$		$h_{OL}$		$h_W$		$h_{OL}$	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0.1	27.9	0.1	95.1	0.2	353.9	0.67	1.72	0.80	9.99	0.87	16.25	0.53	9.25

ตารางที่ 1-3 ขอบเขตการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีที่สภาวะไม่คงตัว

$\frac{dQ}{dt} \times 10^{-5}$		Time (s)	
min	max	min	max
0.32	6.41	30	750

หมายเหตุ:  $Q$  คือ อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง (ลบ.ม./วินาที)

$v$  คือ ความเร็วเฉลี่ยการไหลผ่านตัวกลาง (ลบ.ม./วินาที)

$Re'$  คือ ค่าเรย์โนลด์ที่คิดจากความเร็วการไหลจริง

$h_D$  คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดด้านล่างของเพอร์เมียมิตอร์ (ม.)

$h_U$  คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดด้านบนของเพอร์เมียมิตอร์ (ม.)

$h_W$  คือ ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล (ม.)

$h_{OL}$  คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันในชั้นน้ำที่ไกลจากบ่อน้ำบาดาลที่สุด (ม.)

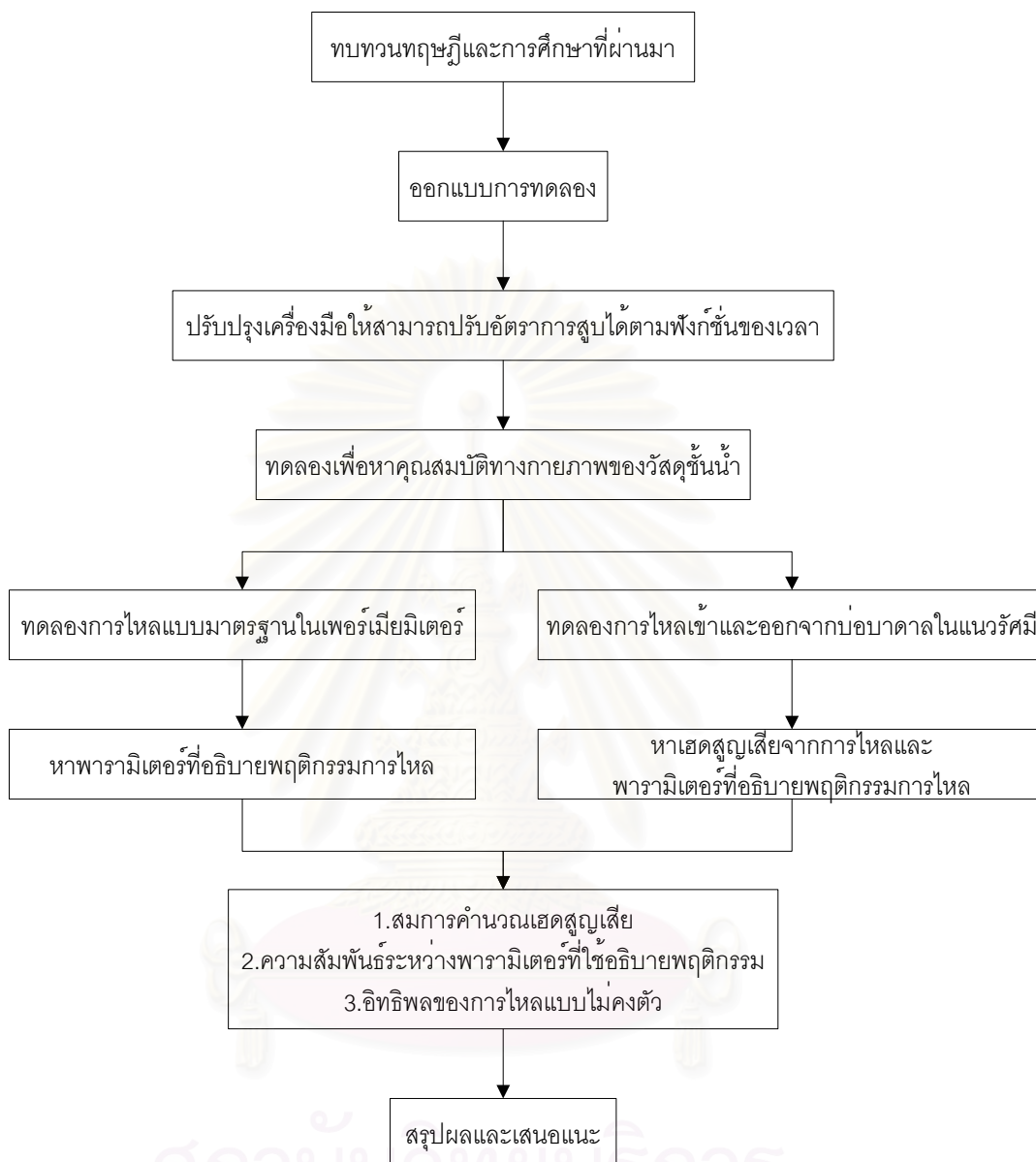
$\frac{dQ}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ( $m^3/s^2$ )

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 1.4 แนวทางการศึกษา

แนวทางการศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์และขอบข่ายการศึกษา มีขั้นตอนการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 1-1 ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ทบทวนการศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน (Flow through Porous Media) ภายใต้การสูบบแบบคงตัว/พลวัต และเป็นกรไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกใกล้บ่อน้ำบาดาลที่ไม่มีกรวดกรุ
- 2) กำหนดขอบเขตของการทดลองที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราการไหล ขนาดทรายที่ใช้ในการทดลอง และออกแบบการทดลอง
- 3) ออกแบบเครื่องมือทดลองให้สามารถปรับอัตราการสูบได้ตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนไป
- 4) จัดทำและติดตั้งระบบควบคุมอัตราการไหลของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการควบคุม วัด และเก็บข้อมูล
- 5) ทำการทดสอบเครื่องมือ ปรับแต่งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้มีความพร้อมในการทดลองที่กำหนด
- 6) ทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษาทดลอง โดยทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอก
- 7) ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำทั้งกรณีที่เป็นกรสูบบแบบคงตัว และการสูบบแบบพลวัตผ่านทรายชั้นน้ำที่มีขนาดและอัตราการไหลต่างๆ
- 8) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองต่อสภาพการไหล
- 9) สรุปผลและเสนอการศึกษาต่อไป



## 1.5 การศึกษาที่ผ่านมา

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน การไหลของน้ำได้ดินเข้าหรือออกจากบ่อสูบขณะที่ทำการสูบและเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดันซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาได้ดังนี้

### 1.5.1 การไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน (Flow through Porous Media)

#### 1) สมการการไหลแบบเชิงเส้น (Linear Flow Equation)

Darcy (1856) (Cox, 1977)

ดาร์ซีได้ทำการทดลองโดยการปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นทรายและสรุปว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านวัตถุพรุนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเฮดสูญเสีย (Head Loss) จากการไหลผ่านตัวกลาง และเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของชั้นทราย นั่นคือ  $Q \propto h_L$  และ  $Q \propto \frac{1}{L}$  หรือ

$$v = -KI \quad (1-1)$$

$$I = \frac{h_L}{L} \quad (1-2)$$

เมื่อ	$v$	คือ	ความเร็วการไหลผ่านตัวกลาง (ม./วิน)
	$K$	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) (ม./วิน)
	$I$	คือ	ความลาดชันชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)
	$h_L$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหล (ม.)
	$L$	คือ	ระยะทางการไหล (ม.)

สมการที่ 1-1 ภายหลังเรียกว่า "สมการของดาร์ซี"

Hazen (1893)

Hazen ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ และเสนอสมการเพื่อหาค่าความนำชลศาสตร์จากขนาดประสิทธิผล (Effective Grain Size) ของตัวกลาง ดังนี้

$$K = cd_{10}^2 \quad (1-3)$$

เมื่อ	$c$	คือ	ค่าคงที่ของ Hazen ( $c$ ของกรวดหรือทราย มีค่าประมาณ 100)
	$d_{10}$	คือ	ขนาดประสิทธิผลของตัวกลาง (Effective Size) หรือขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 10 เปอร์เซ็นต์จากการวิเคราะห์ขนาดและเปอร์เซ็นต์ของเม็ดดินต่างๆ (Grain Size Analysis) (ม.ม.)

Kozeny (1927) (Nazeer Ahmed, 1967)

Kozeny ได้เสนอสมการเพื่ออธิบายการไหลแบบราบเรียบ ของตัวกลางที่มีความพรุน โดยตั้งต้นจาก Navier-Stokes Equation โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ของความลาดชันความดัน (Pressure Gradient :  $\frac{\Delta p}{l_e}$ ) กับความเร็วการไหล ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{l_e} = \zeta \mu \frac{v}{\phi} \left( \frac{A_g}{V_g} \right)^2 \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \quad (1-4)$$

เมื่อ	$\Delta p$	คือ	ความดันที่ลดลงจากการไหลผ่านตัวกลางหนา l (ปาสคาล)
	$l_e$	คือ	Average Tortuous Length ของตัวกลางหนา l (ม.)
	$\phi$	คือ	ความพรุน
	$A_g$	คือ	พื้นที่ผิวของเม็ดดิน (ตร.ม.)
	$V_g$	คือ	ปริมาตรของเม็ดดิน (ลบ.ม.)
	$\zeta$	คือ	Shape Factor ของเม็ดดิน (ถ้าเป็นทรงกลมจะมีค่าเท่ากับ 2)
	$\mu$	คือ	ความหนืดพลวัตของของไหล (Dynamic Viscosity) (ปาสคาล-วินาที)

Fair & Hatch (1933) (Sperry & Pierce, 1995)

Fair และ Hatch ได้ทำการศึกษาในเรื่องดังกล่าวและพบว่า รูปร่างของอนุภาคตัวกลางมีผลต่อค่าความนำไหลศาสตร์ เนื่องจากรูปร่างของอนุภาคตัวกลางจะมีผลต่อขนาดและรูปร่างของช่องว่างระหว่างอนุภาคตัวกลาง สรุปเป็นความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$K = \frac{1}{j \left\{ \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \left( \frac{\theta}{100} \sum \frac{f}{d_m} \right)^2 \right\}} \quad (1-5)$$

เมื่อ	j	คือ	Packing Factor (โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 5)
	$\theta$	คือ	Particle Shape Factor โดยที่อนุภาคกลมมนจะมีค่า $\theta$ น้อยกว่าอนุภาคเหลี่ยม และ $6.0 < \theta < 7.7$
	f	คือ	เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทรายที่อยู่ระหว่างตะแกรงที่มีขนาดติดกัน (Adjacent Sieves)
	$d_m$	คือ	ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคทราย (ม.ม.) ของตะแกรงที่อยู่ติดกัน เช่น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตะแกรงเบอร์ a และ b คือ $d_m = (d_a d_b)^{1/2}$
	$d_a$ และ $d_b$	คือ	ขนาดช่องเปิดของ a และ b ตามลำดับ (ม.ม.)

Carman (1937) (Nazeer Ahmed, 1967)

Carman ได้ศึกษาต่อจาก Kozeny พบว่า Shape Factor ของทรายและกรวดธรรมชาติ จะมีค่าระหว่าง 2-3 และ  $\frac{l_e}{l} = \sqrt{2}$  จึงได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชัน ความดัน กับค่าความเร็วการไหล ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{l} = 5\mu v \left(\frac{A_g}{V_g}\right)^2 \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \quad (1-6)$$

สมการที่ 1-6 ภายหลังเรียกว่า "สมการของ Kozeny-Carman"

Todd (1959)

Todd ได้ศึกษาขอบเขตการใช้งานกฎการไหลของดาร์ซี จาก Porseuille's law ที่กล่าวว่า "ความเร็วของการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดชันชลศาสตร์" ดังนั้น สมการการไหลของดาร์ซีจะใช้ได้เฉพาะการไหลแบบราบเรียบเท่านั้น จึงใช้ค่าเรย์โนลด์ (Re) ในการบอกขอบเขตการไหลที่สามารถใช้สมการการไหลของดาร์ซีได้ โดยที่

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1-7)$$

เมื่อ	d	คือ	ความยาวจำเพาะของการไหล (Characteristic Length of Flow) (ม.)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลาง (ก.ก./ตร.ม.)
	$\mu$	คือ	ความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity)

และใช้ค่าเรย์โนลด์วิกฤตแสดงขอบเขตการไหลที่สามารถใช้กฎการไหลของดาร์ซีได้ โดยใช้ขนาดประสิทธิภาพของตัวกลาง ( $d_{10}$ ) เป็นความยาวจำเพาะของการไหล และทำการทดลองกับวัสดุที่มีขนาดประสิทธิภาพแตกต่างกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับความลาดชันชลศาสตร์จะเริ่มไม่เป็นเส้นตรง เมื่อค่าเรย์โนลด์อยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 10 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงขอบเขตการใช้งานกฎของดาร์ซี

Shepherd (1989)

Shepherd ได้ทำการศึกษาต่อจาก Hazen (1893) โดยเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์ กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง ( $d_{50}$ ) แทนที่จะใช้ขนาดประสิทธิภาพของตัวกลาง ( $d_{10}$ ) ดังนี้



$$K = cd_{50}^j \quad (1-$$

8)

เมื่อ	K	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ฟุต/วัน)
	c	คือ	shape factor ของตัวกลางแต่ละชนิด (ดูรูปที่ 1-2)
	j	คือ	ค่ายกกำลังของตัวกลางแต่ละชนิด (ดูรูปที่ 1-2)
	$d_{50}$	คือ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง (ม.ม.)

#### Alyamani & Sen (1993)

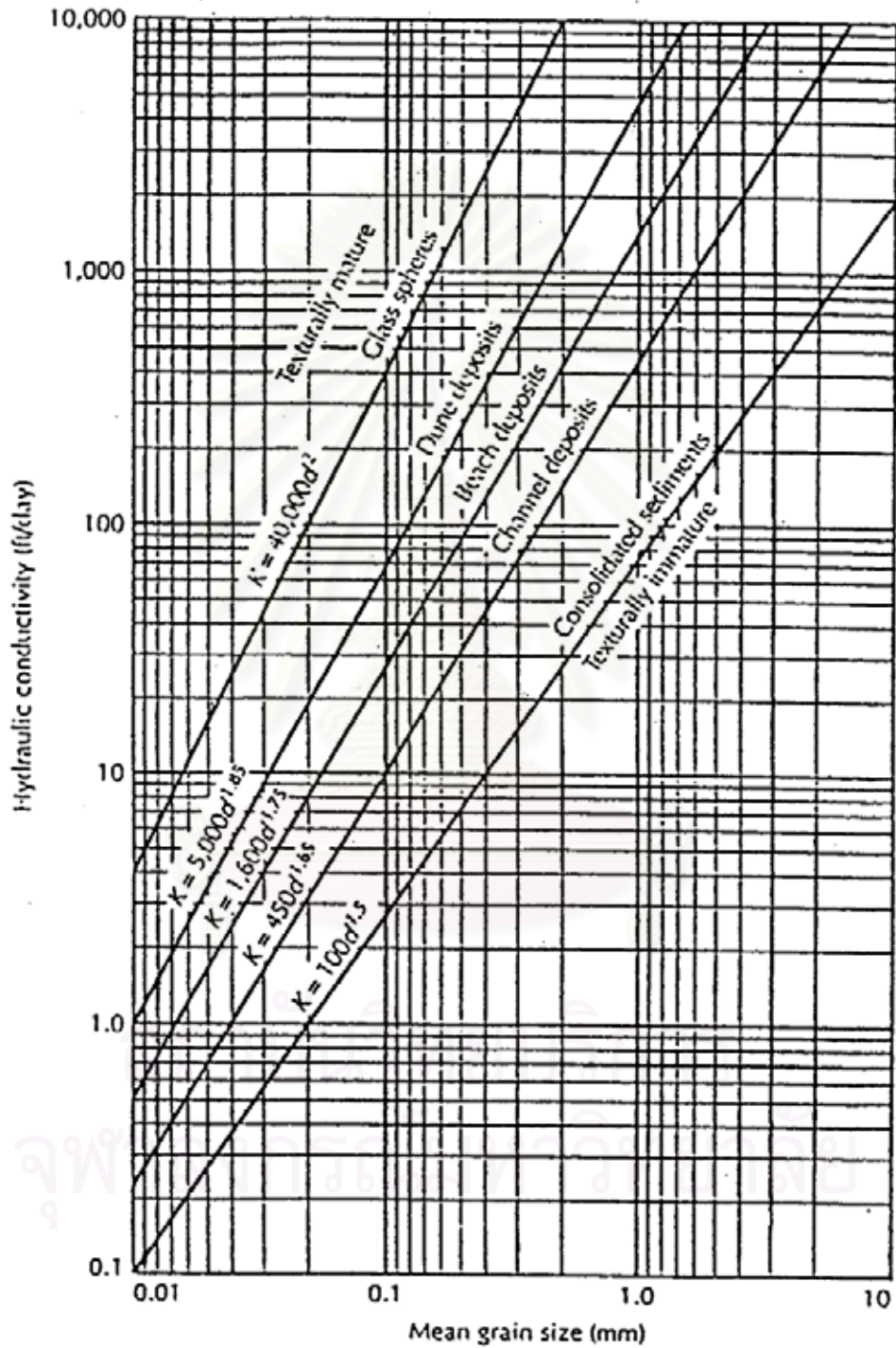
Alyamani และ Sen ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์กับการกระจายขนาดอนุภาคตัวกลางจำนวน 32 ตัวอย่าง จากซาอูดีอาระเบียและออสเตรเลีย สรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = 1300 [I_0 + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2 \quad (1-9)$$

เมื่อ	K	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วัน)
	$I_0$	คือ	จุดตัดแกน X ของเส้นที่เชื่อมระหว่างจุด $d_{50}$ กับ $d_{10}$ ของโค้งการกระจายขนาดอนุภาค
	$d_{50}$	คือ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง (ม.ม.)
	$d_{10}$	คือ	ขนาดประสิทธิภาพผลของตัวกลาง (ม.ม.)

#### Sperry & Pierce (1995)

Sperry & Pierce (1995) ได้ทำการทดลองหาค่าความนำชลศาสตร์ของลูกแก้วกลมทราย และเศษแก้วรูปร่างต่างๆ โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับสมการที่มีผู้ทำการศึกษามาก่อน ได้แก่ Hazen (1893) Kozeny-Carman (1937) และ Alyamani & Sen (1993) โดยพิจารณา ขนาด รูปร่าง และความพรุนของอนุภาค พบว่า ขนาดอนุภาคจะมีผลต่อค่าความนำชลศาสตร์มากที่สุด รองลงมาคือรูปร่างอนุภาค ซึ่งจะมีผลเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 0.295 มิลลิเมตร และพบว่าสมการของ Hazen จะใช้ได้กับอนุภาคที่มีรูปร่างปกติ



รูปที่ 1-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไหลศาสตร์ กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลางจากการทดลองของ Shepherd (1989)

## 2) สมการการไหลแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Flow Equation)

ในการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน เมื่อความเร็วการไหลสูงขึ้นจนเลยขอบเขตที่ใช้สมการของดาร์ซี หรือการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์มากกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤต ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับความชันลศาสตร์ไม่เป็นเส้นตรง จึงมีผู้ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับความชันลศาสตร์ ดังนี้

### Forchheimer (1901) (Cox, 1977)

Forchheimer ได้เสนอสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความชันลศาสตร์และความเร็วการไหลเมื่อเป็นการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ค่า  $n$  เท่ากับ 2 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน โดยเทอมแรกของสมการอธิบายการไหลแบบราบเรียบ และเทอมที่สองอธิบายการไหลแบบปั่นป่วน

$$I = \frac{dh}{dL} = av + bv^2 \quad (1-10)$$

เมื่อ	$I$	คือ	ความชันลศาสตร์
	$a$	คือ	ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี (Darcy parameter)
	$b$	คือ	ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี (Non-Darcy parameter)

### Missbach (1937) (Venkataraman & Rao, 1998)

Missbach ได้เสนอสมการเพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหล ผ่านตัวกลางที่มีความพรุนเมื่อค่าเรย์โนลด์มีค่าสูง ดังนี้

$$I = cv^m \quad (1-11)$$

เมื่อ	$c$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวและตัวกลาง ซึ่งจะหาได้จากการทดลอง
	$m$	คือ	ค่ายกกำลัง ซึ่งจะหาได้จากการทดลอง

### Irman (1958) (Nazeer Ahmed, 1967)

Irman ได้พิสูจน์สมการของดาร์ซีและสมการของ Forchheimer จากสมการของ Navier-Stokes สำหรับ Viscous Incompressible Flow ผ่านตัวกลางที่มีเนื้อเดียวและอิมิตัวด้วยน้ำ และได้เสนอ สมการของดาร์ซีในรูปแบบดังนี้

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\beta}{D^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \mu v \quad (1-12)$$

$$\text{หรือ} \quad l = \frac{\beta}{\rho g D^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \mu v \quad (1-13)$$

และเสนอสมการของ Forchheimer ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\beta}{D^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \mu v + \frac{\alpha(1-\phi)}{D\phi^3} \rho v^2 \quad (1-14)$$

$$\text{หรือ} \quad l = \frac{\beta}{\rho g D^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \mu v + \frac{\alpha(1-\phi)}{g D \phi^3} v^2 \quad (1-15)$$

เมื่อ  $\alpha$  และ  $\beta$  คือ Shape Factor ของตัวกลาง

Ward (1964)

Ward ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลาดชันความดันกับความเร็วกการไหล เมื่อเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ผลการทดลองพบว่า

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\mu}{k} v + \frac{c_w \rho}{\sqrt{k}} v^2 \quad (1-16)$$

$$\text{หรือ} \quad l = \frac{\mu}{\rho g k} v + \frac{c_w}{g \sqrt{k}} v^2 \quad (1-17)$$

เมื่อ  $k$  คือ ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ ( $m^2$ )  
 $c_w$  คือ ค่าคงที่ของตัวกลาง

Sunada (1965) (Nazeer Ahmed, 1967)

Sunada ใช้สมการของ Navier-Stokes เพื่ออธิบายการไหลแบบราบเรียบ และปั่นป่วนผ่านตัวกลางที่มีความพรุน พบว่า  $k=cd^2$  โดยที่  $c$  คือ ค่าคงที่ และ  $d$  คือ ความยาวจำเพาะของการไหล (ม.) ซึ่งหาได้จากการทดลองการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน (permeability test) และได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลาดชันความดันกับความเร็วกการไหล เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\mu}{k} v + \frac{\rho}{\sqrt{ck}} v^2 \quad (1-18)$$

$$\text{หรือ} \quad l = \frac{\mu}{\rho g k} v + \frac{1}{g \sqrt{ck}} v^2 \quad (1-19)$$

Dudgeon (1966) (Huyakorn & Dudgeon, 1976)

Dudgeon ได้ทำการทดสอบการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการที่เสนอโดย Missbach (1937) และ Forchheimer (1901) พบว่าสมการของ Forchheimer สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าการใช้สมการของ Missbach

Thirurengadam & Pradip Kumar (1997)

Thirurengadam และ Pradip Kumar ได้ทำการทดลองการไหลผ่านตัวกลางจำพวกหินบด (Crush Rock) และลูกแก้ว ในลักษณะการไหลแบบรัศมี โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “เพอร์เมียมิตเตอร์การไหลแบบรัศมี” (Radial Flow Permeameter) เพื่อทำการทดสอบว่าสมการของ Forchheimer สามารถใช้กับการไหลผ่านตัวกลางในแนวรัศมีได้หรือไม่ เนื่องจากการไหลในแนวรัศมีจะมีความเร็วการไหลไม่คงที่ จากผลการทดลองพบว่าสมการของ Forchheimer จะสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี แต่ค่า  $a$  และ  $b$  ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคตัวกลางเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความพรุนด้วย เพื่อกำจัดความยุ่งยากดังกล่าว จึงได้เสนอสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันลศาสตร์ กับความเร็วการไหลในแนวรัศมี ในกรณีที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้การวิเคราะห์หน่วย พบว่า

$$l = \phi_1 \left( \frac{v^2}{gr} \right) \quad (1-20)$$

$$\text{โดยที่ } r = \frac{e}{s_0} \quad (1-21)$$

เมื่อ	$\phi_1$	คือ	ค่าคงที่ จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง แต่ไม่ขึ้นกับขนาดของตัวกลางและความพรุน
	$v$	คือ	ความเร็ว ณ จุดที่ต้องการหาค่าความชันลศาสตร์ (ม./วินาที)
	$r$	คือ	รัศมีลศาสตร์ (Hydraulic Radius) (ม.)
	$e$	คือ	อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)
	$s_0$	คือ	พื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Surface) มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของเม็ดดิน ต่อปริมาตรของเม็ดดิน (ม. <sup>-1</sup> )

### 3) ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทาน (Friction Factor) กับค่าเรย์โนลด์จากการไหลในท่อดวงที่มีขนาดสม่ำเสมอ

เนื่องจากการนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วการไหล กับค่าความลาดชันชลศาสตร์ไปใช้ทำได้ไม่ค่อยสะดวก จึงได้มีผู้ทำการศึกษาเพื่อหาตัวแปรไร้หน่วย ที่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยใช้เทอมของแฟคเตอร์เสียดทาน ( $f$ ) และค่าเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ ในลักษณะเดียวกับ Moody Diagram ของการไหลในท่อ นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ จากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ได้ ซึ่งก็คือจุดที่กราฟเริ่มหักเหจากแนวเส้นตรง

#### Todd (1959)

Todd ได้ใช้ขนาดประสิทธิผลเป็นความยาวจำเพาะของการไหล ในการหาค่าเรย์โนลด์ของการไหลผ่านท่อดวง และได้นิยามเทอมของ แฟคเตอร์เสียดทาน ไว้ดังนี้

$$f = \frac{\Delta p}{L} \frac{d_{10}}{2\rho v^2} \quad (1-22)$$

เมื่อ  $\Delta p$  คือ ผลต่างของความดัน (ปาสคาล) เมื่อมีการไหลผ่านท่อดวงในช่วงความยาว  $L$  (ม.)  
 $v$  คือ ความเร็วการไหลผ่านท่อดวง (ม./วินาที)

และจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ เมื่อใช้ขนาดประสิทธิผลเป็นความยาวจำเพาะของการไหลแล้ว ความสัมพันธ์ที่ได้จะไม่ชัดเจนค่อนข้างกระจัดกระจาย

#### Mobasherri & Todd (1963)

Mobasherri และ Todd ได้ทำการทดลองการไหลผ่านท่อดวงที่มีความพรุนในเพอร์เมียมิตเตอร์ โดยใช้ทรายอิตตาวา (0.25-0.83 ม.ม.) ลูกแก้ว (3 ม.ม.) และกรวด (2.36-9.54 ม.ม.) เป็นท่อดวง และหาความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ โดยใช้ขนาดอนุภาคทรายเฉลี่ยเป็นความยาวจำเพาะของการไหล จึงนิยามแฟคเตอร์เสียดทาน และค่าเรย์โนลด์ ดังนี้

$$\text{แฟคเตอร์เสียดทาน} \quad f = \frac{\Delta p}{L} \frac{d_{50}}{2\rho v^2} \quad (1-23)$$

$$\text{ค่าเรย์โนลด์} \quad N_R = \frac{vd_{50}}{\nu} \quad (1-24)$$

ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $N_R$  แสดงดังรูปที่ 1-3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤตที่การไหลเปลี่ยนจากแบบเชิงเส้นเป็นกรไหลแบบไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 15

Nazeer Ahmed (1967)

Nazeer Ahmed ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทาน กับค่าเรย์โนลด์ โดยใช้สมการของ Navier-Stoke เป็นหลัก เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sunada (1965) จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชันลศาสตร์กับความเร็วกการไหลเมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน เช่นเดียวกับของ Sunada ดังต่อไปนี้

$$l = \left(\frac{\mu}{\rho g k}\right)v + \left(\frac{1}{g\sqrt{ck}}\right)v^2 \quad (1-25)$$

$$\text{หรือ} \quad l = \left(\frac{\mu}{\rho g c d^2}\right)v + \left(\frac{1}{g c d}\right)v^2 \quad (1-26)$$

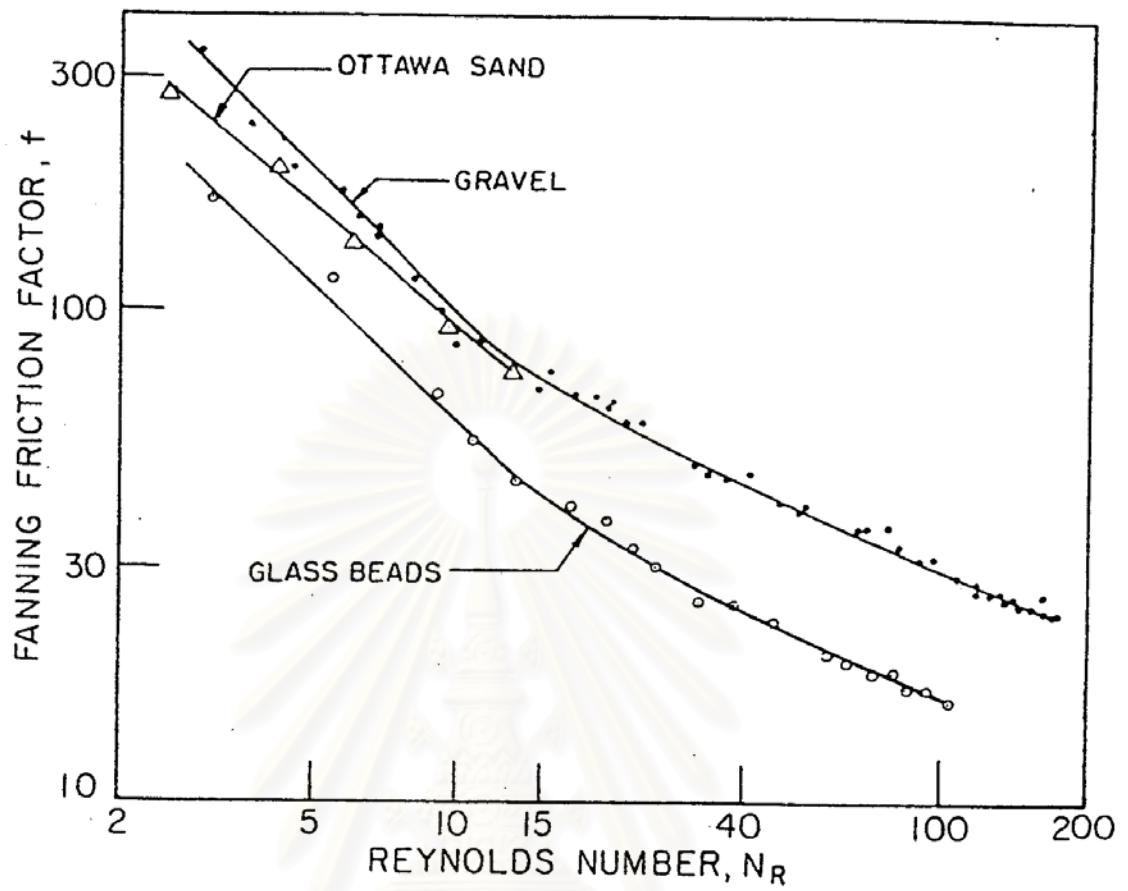
เมื่อจัดรูปสมการที่ 1-26 ใหม่ในรูปตัวแปรไร้มิติ จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$l g \frac{c d}{v^2} = \frac{\mu}{\rho v d} + 1 \quad (1-27)$$

$$\text{โดย แฟคเตอร์เสียดทาน} \quad f = \frac{l g c d}{v^2} \quad (1-28)$$

$$\text{และ ค่าเรย์โนลด์} \quad Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1-29)$$

เมื่อนำผลการทดลองการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน ทั้งจากการทดลองที่เคยทำมา และจากการทดลองที่ทำเพิ่มอีก 6 ตัวอย่าง พบว่าสมการ  $f = \frac{1}{Re} + 1$  จะสอดคล้องกับผลการทดลอง และในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$  คือ  $f = \frac{1}{Re}$  โดยที่ค่าเรย์โนลด์วิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.02 และเมื่อค่าเรย์โนลด์สูงมาก แฟคเตอร์เสียดทานจะเท่ากับ 1 นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $d$  กับ  $d_{50}$  ที่ใช้ได้กับตัวกลางจำพวกทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอในช่วง 0.054-0.258 เซนติเมตร คือ  $d = 10^{-3} + 10^{-2} d_{50}$  เมื่อ  $d$  กับ  $d_{50}$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 1-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์์จากการทดลองของ  
Mobasher และ Todd (1963)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## Dinoy (1971)

Dinoy ใช้ค่า  $\sqrt{k}$  เป็นความยาวจำเพาะของการไหลผ่านตัวกลาง จากการทดลองพบว่า เมื่อเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ของตัวกลางประเภทต่างๆ ไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้เพียงสมการเดียว เช่น กรณีศึกษาของ Ward (1964) และ Nazeer Ahmed (1967) เนื่องจากว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง จากผลการทดลองการไหลผ่านตัวกลางในเพอร์เมียมิตอร์ โดยใช้ทราย และกรวด Dinoy จึงได้เสนอ สมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ ของการไหลแบบไม่เชิงเส้น ดังต่อไปนี้

$$f_k = \frac{1}{R_k} + 100 \left( \frac{d_m}{\sqrt{k/\phi}} \right)^{-1.50} \quad (1-30)$$

โดยแฟคเตอร์เสียดทาน  $f_k = \frac{\lg \sqrt{k}}{v^2}$  (1-31)

และค่าเรย์โนลด์  $R_k = \frac{\rho v \sqrt{k}}{\mu}$  (1-32)

เมื่อ  $k$  คือ ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (ซ.ม.<sup>2</sup>)

$d_m$  คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคตัวกลาง (ซ.ม.)

$\phi$  คือ ความพรุนของตัวกลาง

โดยที่เทอม  $\left( \frac{d_m}{\sqrt{k/\phi}} \right)$  ดัดแปลงมาจากอัตราส่วนระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

ตัวกลาง กับรัศมีซิลศาสตร์ของช่องว่างในตัวกลาง ซึ่งเปรียบเสมือนอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผิวในท่อ กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ใช้ใน Moody Diagram

## Das Gupta (1973)

Das Gupta ใช้ค่า  $\sqrt{k}$  เป็นความยาวจำเพาะของการไหลผ่านตัวกลาง เช่นเดียวกับ Dinoy แต่จากการรวบรวมผลการทดลองการไหลผ่านตัวกลางที่ผ่านมา และการทดลองเพิ่มในกรวดและหิน พบว่าแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์กันตามชนิดของการไหล ดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ  $f_k = \frac{1}{R_k}$  (1-33)

การไหลแบบเปลี่ยนแปลง  $f_k = \frac{1}{R_k} + 325.56 \left( \frac{d_m}{\sqrt{k}} \right)^{-1.68}$  (1-34)

การไหลแบบปั่นป่วน  $f_k = 325.56 \left( \frac{d_m}{\sqrt{k}} \right)^{-1.68}$  (1-35)

เมื่อ  $\frac{d_m}{\sqrt{k}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของตัวกลาง

Venkataraman & Rao (1998)

Venkataraman และ Rao ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $c_w$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $a$  และ  $b$  โดยที่

$c_w$	คือ	ค่าคงที่ในสมการของ Ward
$c$	คือ	ค่าคงที่ในสมการของ Ahmed
$d$	คือ	ความยาวจำเพาะของการไหลผ่านตัวกลาง
$a$ และ $b$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการของ Forchheimer

โดยมีสมมติฐานว่าค่า  $a$  ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวและค่า  $k$  ในขณะที่ค่า  $b$  ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความพรุนของตัวกลาง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$d = \frac{b}{a} \quad (1-36)$$

$$c = \frac{a}{b^2 g v} \quad (1-37)$$

$$c_w = \frac{d}{\sqrt{k}} \quad (1-38)$$

$$c_w \sqrt{c} = 1 \quad (1-39)$$

และเมื่อนำสมการ  $c_w = \frac{d}{\sqrt{k}}$  ไปแทนในสมการ  $b = \frac{c_w}{g\sqrt{k}}$  นั่นคือ  $b = \frac{d}{gk}$  และเมื่อนำค่า  $a$  และ  $b$  จากสมการของ Ward ไปแทนในสมการของ Forchheimer และจัดให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{lg\sqrt{k}}{v^2} = \frac{\mu}{\rho v \sqrt{k}} + \frac{d}{\sqrt{k}} \quad (1-40)$$

$$\text{หรือ} \quad f_k = \frac{1}{R_k} + \frac{d}{\sqrt{k}} \quad (1-41)$$

เมื่อลองนำผลการทดลองในอดีตมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $f_k$  กับ  $R_k$  พบว่าสอดคล้องกับสมการที่ 1-41 และพบว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $R_{k_{cr}}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 2-5 และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{k_{cr}}$  กับ  $\frac{d}{\sqrt{k}}$  ได้ดังนี้

$$R_{k_{cr}} = \frac{0.17}{(d/\sqrt{k})^{1.1}} \quad (1-42)$$

### 1.5.2 การไหลของน้ำใต้ดินสู่บ่อน้ำบาดาล

Huyakorn & Dudgeon (1976)

Huyakorn และ Dudgeon ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดิน จากชั้นน้ำแบบเปิดและชั้นน้ำภายใต้แรงดันเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลที่ไม่มีกวดกร ในลักษณะที่เกิดการไหลแบบ Two-Regime Well Flow คือ บริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาลเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในขณะที่บริเวณที่ไกลออกมาเกิดการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อจำลองสภาพการไหลที่เกิดขึ้น โดยสมการที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนคือ สมการของ Forchheimer ในกรณีที่ชั้นน้ำภายใต้แรงดันและบ่อน้ำบาดาลมีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์  $a$  และ  $b$  ในสมการของ Forchheimer หาได้จาก Type Curve ที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะน้ำลดในบ่อสูบน้ำบาดาล และตัวแปรอื่นๆ ที่อยู่ในรูปไร้หน่วย ดังนี้

$$\frac{2\pi sT}{Q} = f\left(\frac{r}{r_0}, \lambda, \xi, \frac{r_{cr}}{r_0}\right) \quad (1-43)$$

$$\text{โดยที่ } \lambda = \frac{bQT}{2\pi m^2 r_0} \quad (1-44)$$

$$\xi = \frac{bv_{cr}}{a} \quad (1-45)$$

เมื่อ	s	คือ	ระยะน้ำลดในบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	T	คือ	ความสามารถในการส่งผ่านของชั้นน้ำ (Transmissivity) (ฟุต <sup>2</sup> /นาที่)
	Q	คือ	อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (ลบ.ฟุต/นาที่)
	r	คือ	ระยะทางในแนวรัศมีจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	$r_w$	คือ	รัศมีบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	$r_0$	คือ	รัศมีที่ได้รับอิทธิพล (Radius of Influence) (ฟุต)
	$r_{cr}$	คือ	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (Critical Well Radius) หรือ ระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล (ฟุต)
	m	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (ฟุต)
	$v_{cr}$	คือ	ความเร็วการไหล ที่เริ่มเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (ฟุต/นาที่)

ในช่วงที่การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ  $r_{cr} \leq r \leq r_0$  สมการที่ 1-43 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{2\pi sT}{Q} = \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (1-46)$$

ในช่วงที่การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน  $r_w \leq r \leq r_{cr}$  สมการที่ 1-43 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{2\pi sT}{Q} = \ln\left(\frac{r_0}{r_{cr}}\right) + \frac{1}{1+\xi} \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \lambda \left(\frac{r_0}{r} - \frac{r_0}{r_{cr}}\right) \quad (1-47)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของโค้งน้ำลด (Drawdown Curve) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลที่ได้จากการทดลองในแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าที่ได้ความสอดคล้องกัน แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมายังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ใช้ได้กับบ่อน้ำบาดาลประเภทที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ (Fully Penetrated Well) ที่ไม่มีกรวดกรุภายในบ่อเท่านั้น และใช้ได้กับสภาวะคงตัวเท่านั้น และยังพบว่าค่า  $a$  และ  $b$  ที่หาจาก Type Curve จะมีค่าต่ำกว่า ที่หาได้จากการทดลองการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน (Permeability Test) ขณะที่ค่า  $K$  ที่หาได้จาก Type Curve จะมีค่าสูงกว่า ที่หาได้จากการทดลองการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน

#### Cox (1977)

Cox ได้พัฒนาแบบจำลองในลักษณะเดียวกับ Huyakorn & Dudgeon (1976) แต่สามารถจำลองสภาพต่างๆ ได้มากขึ้น คือ ใช้ได้กับบ่อน้ำบาดาลทั้งประเภทที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ (Fully Penetrated Well) และประเภทที่มีท่อกรองบางส่วน (Partially Penetrated Well) ที่มีหรือไม่มีกรวดกรูบ่อน้ำบาดาล และใช้ได้ทั้งสภาวะคงตัว (Steady State) และสภาวะไม่คงตัว (Unsteady State) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการจำลองสภาพการไหลคือ การไหลที่เกิดขึ้นต้องเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนอย่างใดอย่างหนึ่ง (ไม่สามารถจำลองกรณี Two-Regime Well Flow) และได้วิเคราะห์ผลของการไหลแบบปั่นป่วน การกรูกรวดและลักษณะของบ่อที่มีผลต่อประสิทธิภาพของบ่อน้ำบาดาล

#### Williams (1985)

Williams ได้ทำการสร้าง Sand Tank Model สำหรับทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดิน จากชั้นน้ำภายใต้แรงดันเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล โดยใช้ทรายชั้นน้ำ กรวดกรูบ่อ และท่อกรองขนาดต่างๆ เพื่อหาว่าควรออกแบบบ่อน้ำบาดาลอย่างไร ให้เหมาะสมกับกรวดกรูและทรายชั้นน้ำ คือให้เกิดเสดสูญเสียน้อยที่สุด ในการศึกษาได้ทำการหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ เพื่อนำไปหารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (Critical Well Radius) ซึ่งค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะหาจากความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์ กับค่าเรย์โนลด์ดังนี้

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad l = \frac{dh}{dr} = \text{Re} \frac{v^2}{gkd_{50}} \quad (1-48)$$

$$\text{การไหลแบบปั่นป่วน} \quad l = \frac{dh}{dr} = a_2 \frac{v^2 \text{Re}^2}{gkd_{50}} \quad (1-49)$$

$$\text{และ ค่าเรย์โนลด์} \quad \text{Re} = \frac{vd_{50}}{v} \quad (1-50)$$

จากสมการที่ 1-48 และ 1-49 เมื่อนำ  $l$  และ  $\text{Re}$  ไปหาความสัมพันธ์ ในกระดาดาลคือ-  
 ล็อค จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นความสัมพันธ์  $l$ - $\text{Re}$  มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ  
 และจะเท่ากับ 2 เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเรย์โนลด์วิกฤติ คือจุดที่  
 ความชันของเส้นความสัมพันธ์  $l$ - $\text{Re}$  เปลี่ยนจาก 1 เป็น 2 นั่นเอง

จากผลการทดลองในกรวดกรู 4 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 1-4 พบว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติ มี  
 ค่าประมาณ 30 และได้เสนอสมการที่ใช้หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติบ่อน้ำบาดาล เมื่อค่าเรย์โนลด์วิกฤติมีค่า  
 เท่ากับ 30 และเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดลองเท่ากับ 15 องศา ความหนืดเปรียบเทียบมีค่า  
 เท่ากับ  $1.233 \times 10^{-5}$  ฟุต<sup>2</sup>/วินาที ดังนี้

$$r_c = 0.0377 \frac{(Q/b)d_{50}}{\phi} \quad (1-51)$$

เมื่อ	$r_c$	คือ	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	$Q$	คือ	อัตราการสูบน้ำ (แกลลอน/นาที)
	$b$	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (ฟุต)
	$\phi$	คือ	ความพรุนของทรายชั้นน้ำ

และได้เสนอว่าต้องออกแบบบ่อน้ำบาดาลที่ทำให้รัศมีบ่อมากกว่าค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำ  
 บาดาล เพื่อที่จะลดเสดสูญเสียน้ำที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนใกล้ๆ กับบ่อน้ำบาดาล

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

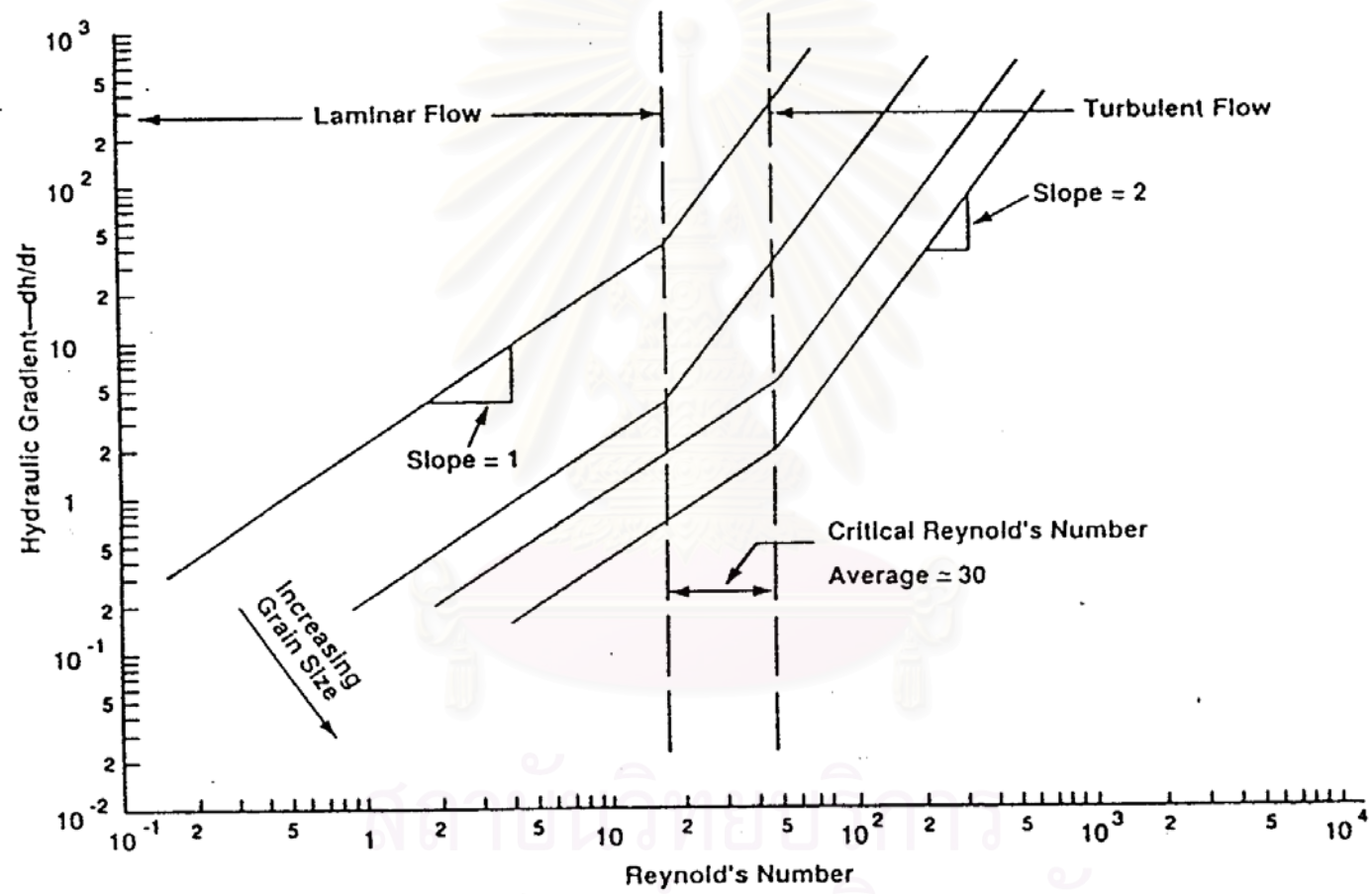
### 1.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูบน้ำและการเติมน้ำ

Mobasherri & Todd (1963)

Mobasherri และ Todd ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการสูบน้ำและเติมน้ำด้วยแรงดันผ่านบ่อน้ำบาดาลทดลอง ในแบบจำลองชั้นน้ำภายใต้แรงดันรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 45 องศา ยาว 3 ฟุต และหนา 3 นิ้ว ทั้งในกรณีที่มีกรวดรอบและไม่มีกรวดรอบ โดยใช้ทรายอัดตัว ลูกรั่ว และกรวด แทนวัสดุชั้นน้ำ ด้วยอัตราการไหลในช่วง 20-100 แกลลอน/นาที (0.001-0.006 ลูกบาศก์เมตร/วินาที) ทำให้เกิดผลต่างของระดับความดันในบ่อน้ำบาดาลและระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันสุดท้ายในชั้นน้ำ (24.5 นิ้ว จากผิวบ่อน้ำบาดาล) มากที่สุด 12 นิ้วของน้ำ การศึกษาพบว่าถ้าอัตราการสูบน้ำและเติมน้ำต่ำจนทำให้เกิดการไหลของน้ำใต้ดินเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เพียงอย่างเดียวแล้ว จะได้เสดสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการไหลในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) เท่ากันทั้งการสูบน้ำและการเติมน้ำด้วยอัตราเดียวกัน แต่เมื่ออัตราการสูบน้ำและการเติมน้ำสูงขึ้นจนเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) พบว่าเสดสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการเติมน้ำจะมีค่าสูงกว่าการสูบน้ำ แต่ค่าจะต่างกันไม่เกินร้อยละ 4 จึงสรุปว่าสมการการไหลของน้ำใต้ดินที่ใช้กับการสูบน้ำสามารถใช้กับการเติมน้ำได้ แต่การทดลองไม่คำนึงถึงความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลซึ่งเกิดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

**นพดล (2545)**

นพดล ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการสูบน้ำและเติมน้ำด้วยแรงดันผ่านบ่อน้ำบาดาลทดลอง ในแบบจำลองชั้นน้ำภายใต้แรงดันประกอบด้วย แบบจำลองการไหลในแนวรัศมีรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา ยาว 2 เมตร หนา 0.2 เมตร และแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว ความกว้าง 0.1 เมตร ยาว 3 เมตร หนา 0.2 เมตร โดยบ่อน้ำบาดาลเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 0.2 เมตร การศึกษาพบว่าการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในการทดลอง มีเสดสูญเสียน้ำจากการไหลประกอบด้วย ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลและจากการไหลในชั้นน้ำ ซึ่งเสดสูญเสียน้ำจากการไหลสามารถแบ่งออกเป็นเสดสูญเสียน้ำจากการไหลแบบเชิงเส้นและการไหลแบบไม่เชิงเส้น โดยระยะจากจุดศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหล คือรัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล ซึ่งคำนวณจากค่าเรย์โนลด์ตวิฤติ ในการเปรียบเทียบผลการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลให้ค่าเรย์โนลด์ตวิฤติใกล้เคียงกัน ค่าความนำไหลศาสตร์ของการไหลเข้าสูงกว่าการไหลออก พาวรีเตอร์ดาร์ซี พาวรามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลนำพาของการไหลออกสูงกว่าการไหลเข้า และเสดสูญเสียน้ำในทุกเรื่องลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น



รูปที่ 1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์ กับค่าเรย์โนลด์ จากการทดลองของ Williams (1985)

### 1.5.4 การไหลไม่คงตัวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

Theis (1935) (ฉลอง, 2538)

ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดินจากชั้นน้ำภายใต้แรงดันขนาดใหญ่ พบว่าเมื่อการสูบน้ำดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ระดับเขตจะลดลง ขณะเดียวกันพื้นที่กรวยความดันลด (Cone of Depression) ก็จะขยายกว้างออกไปเรื่อยๆ และอัตราการลดลงของเขตก็จะน้อยลงๆ เมื่อพื้นที่กรวยความดันลดกว้างออกไป ดังนั้นเมื่อมีการสูบน้ำต่อไปเหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้น ไม่มีที่สิ้นสุด นั่นแสดงว่าเกิดสภาพการไหลไม่คงตัวแบบรัศมี (Unsteady Radial Flow) ขึ้นแล้ว ดังรูปที่ 1-5 และมีสมการหาค่าระดับความดันลด ดังนี้

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi Km} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1-52)$$

และ 
$$u = \frac{r^2 S}{4Kmt} \quad (1-53)$$

จะได้ 
$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi Km} \left[ -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right] \quad (1-54)$$

สมการที่ 1-52 สามารถทำให้เป็นสมการง่ายๆ ซึ่งเรียกว่า Theis Equation ได้ดังนี้

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi Km} W(u) \quad (1-55)$$

และ 
$$\frac{r^2}{t} = \left( \frac{4Km}{S} \right) u \quad (1-56)$$

เมื่อ	W(u)	คือ	Well Function
	S	คือ	สัมประสิทธิ์การเก็บกัก (Storage Coefficient)
	$h_0$	คือ	ระดับความดันน้ำเดิม (ม.)
	h	คือ	ระดับความดันน้ำที่จุดสังเกตการณ์ (ม.)
	r	คือ	ระยะรัศมีระหว่างบ่อสูบน้ำบาดาลกับจุดสังเกตการณ์ (ม.)
	t	คือ	เวลาตั้งแต่เริ่มต้นการสูบน้ำ
	Q	คือ	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
	K	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)
	m	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (ม.)



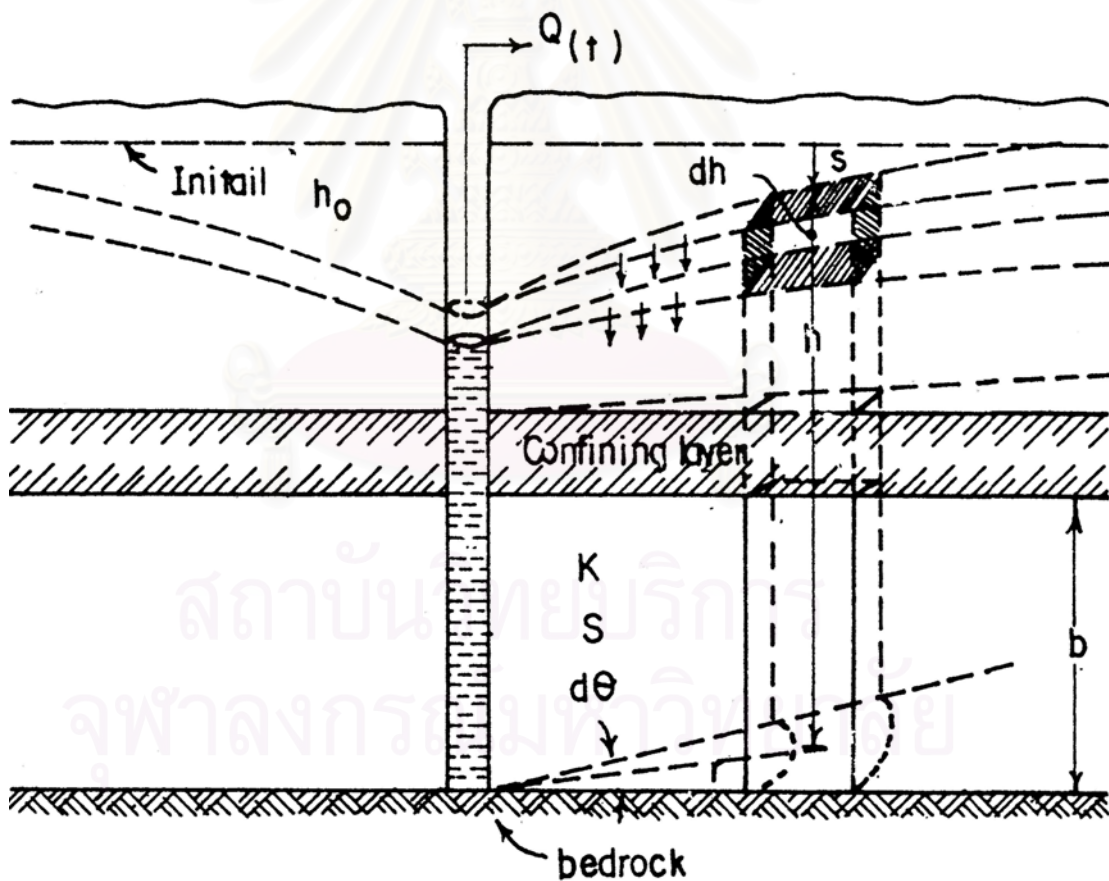
Cooper & Jacob (1946) (ฉลอง, 2538)

Cooper และ Jacob พบว่าเมื่อทำการสูบน้ำด้วยเวลามากๆ ค่าของ  $u$  ในสมการของ Theis จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ดังนั้นเทอมที่เป็นอนุกรมของ  $u$  ในสมการที่ 1-54 จะมีค่าน้อยตามไปด้วย จึงสามารถตัดเทอมอนุกรมนี้ทิ้งได้ สมการที่ได้จะเรียกว่า Cooper-Jacob Equation มีรูปแบบดังนี้

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi Km} \left[ -0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Kmt}\right) \right] \quad (1-57)$$

หรือ

$$h_0 - h = \frac{2.30Q}{4\pi Km} \log\left(\frac{2.25Kmt}{r^2 S}\right) \quad (1-58)$$



รูปที่ 1-5 การไหลไม่คงตัวเข้าบ่อน้ำบาดาลแบบรัศมีในชั้นน้ำปิด

ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน การไหลแบบวัฏศมีของน้ำใต้ดินเข้าหรือออกจากบ่อน้ำบาดาลขณะที่ทำการสูบและเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน เกือบทั้งหมดเป็นการศึกษาภายใต้สภาวะคงตัว ส่วนการศึกษาของ Theis และ Cooper & Jacob นั้นเป็นการศึกษาเส้นระดับความดันในชั้นน้ำภายใต้แรงดันที่มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถนำมาใช้คำนวณหาระดับความดันบริเวณใกล้บ่อสูบน้ำบาดาลได้ ในการศึกษาค้างนี้จึงได้การประยุกต์ใช้สมการ Forcheimer เพื่อศึกษาระดับความดันที่เปลี่ยนแปลงและเสดสูญเสีของการไหลแบบวัฏศมีบริเวณใกล้บ่อสูบน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดันที่สภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

#### 2.1 นิยามของชั้นน้ำ

ชั้นน้ำ (Aquifer) คือ ชั้นดินหรือหินที่มีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาค ซึ่งมีน้ำในปริมาณมากพอสำหรับพัฒนาขึ้นมาใช้ได้โดยการขุดบ่อหรือเจาะบ่อน้ำบาดาล โดยส่วนมากวัสดุชั้นน้ำประกอบด้วยทรายและกรวด แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

1) ชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (Confined Aquifer) หมายถึง ชั้นน้ำที่ถูกปิดทับด้วยชั้นที่บดน้ำทั้งด้านบนและด้านล่าง จึงเป็นชั้นน้ำที่อยู่ภายใต้แรงดัน เมื่อทำการเจาะบ่อน้ำบาดาลแรงดันดังกล่าวจะดันให้น้ำขึ้นสูงจนถึงระดับที่สมดุล เรียกว่า “ระดับความดัน” (Piezometric Head) ดังแสดงในรูปที่ 2-1

2) ชั้นน้ำแบบเปิด (Unconfined Aquifer) หมายถึง ชั้นน้ำที่มีชั้นที่บดน้ำรองรับอยู่ด้านล่างเพียงด้านเดียว โดยผิวน้ำด้านบนในชั้นน้ำแบบเปิดนี้ มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเรียกระดับน้ำนี้ว่า “ระดับน้ำใต้ดิน” (Water Table) ดังแสดงในรูปที่ 2-1

#### 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำ (Physical Properties of Aquifer Materials)

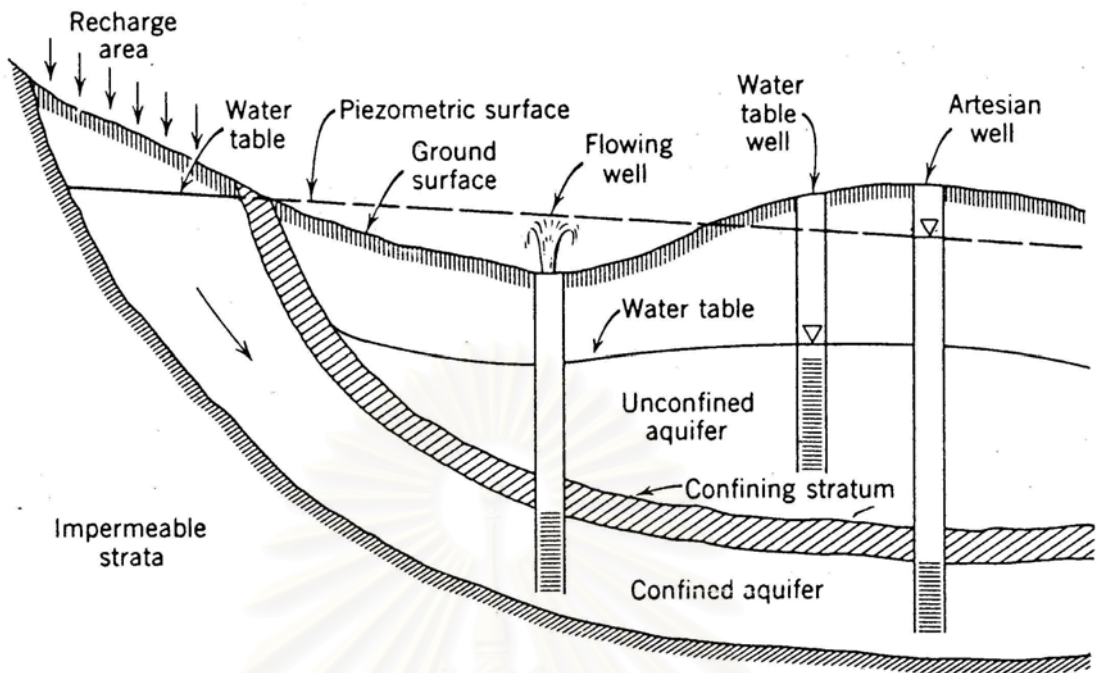
คุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้ ประกอบด้วยลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

##### 1) การกระจายขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution)

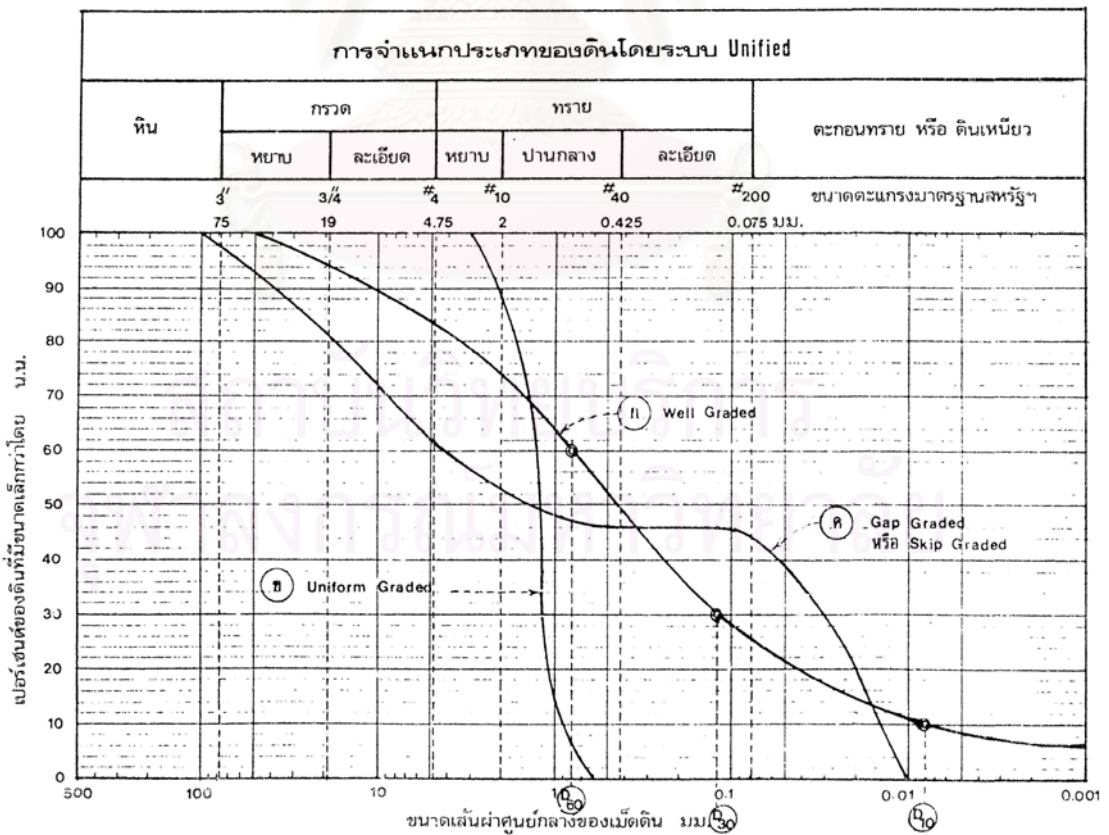
จากโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ขนาด และเปอร์เซ็นต์ของเม็ดดินต่างๆ (Grain Size Analysis) สามารถกำหนดชนิดของดินตามการกระจายตัว ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-2 หรือจากเทอม Coefficient of Uniformity ( $C_u$ ) และ Coefficient of Concavity ( $C_c$ ) ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-1 ลักษณะของชั้นน้ำ



รูปที่ 2-2 โค้งการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve)

เมื่อ	$d_{10}$	คือ	ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 10 เปอร์เซนต์ (ม.ม.)
	$d_{30}$	คือ	ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 30 เปอร์เซนต์ (ม.ม.)
	$d_{60}$	คือ	ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 60 เปอร์เซนต์ (ม.ม.)

โดยที่ดินที่มีขนาดคละกัันดี (Well Graded Soil) ซึ่งมีค่า  $C_u$  และ  $C_c$  ดังนี้

ขนาดของดิน	$C_u$	$C_c$
กรวด	>4	ตั้งแต่ 1-3
ทราย	>6	ตั้งแต่ 1-3

สำหรับดินที่มีขนาดคละกัันไม่ดี (Poorly Graded Soil) แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

- ดินที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniform Graded Soil) หมายถึง เม็ดดินที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่
- ดินที่ขนาดขาดช่วง (Gap Graded Soil) หมายถึง เม็ดดินที่มีขนาดเล็กและใหญ่ แต่ไม่มีขนาดกลาง

### 2) ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil)

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน หมายถึง อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของเม็ดดิน ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณปริมาตรช่องว่าง ความพรุน ความอิ่มตัว และความหนาแน่นของเม็ดดินได้

### 3) ความพรุน (Porosity)

ความพรุน หมายถึง เปอร์เซนต์ช่องว่างที่มีอยู่ในปริมาตรทั้งหมด ซึ่งถ้าหากเป็นชั้นดินที่อิ่มตัว ช่องว่างนี้จะเต็มไปด้วยน้ำ นั่นคือ

$$\phi = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} = \frac{V_T - (W_s/P_s)}{V_T} = \frac{V_T - \left(\frac{W_s}{S \times 1000}\right)}{V_T} \quad (2-3)$$

โดยที่	$\phi$	คือ	ความพรุนของตัวอย่างดิน
	$V_v$	คือ	ปริมาตรช่องว่างในตัวอย่างดิน (ลบ.ม.)
	$V_T$	คือ	ปริมาตรรวมของตัวอย่างดิน (ลบ.ม.)

$V_s$	คือ	ปริมาตรของเนื้อดิน (ลบ.ม.)
$W_s$	คือ	มวลของตัวอย่างดิน (ก.ก.)
$P_s$	คือ	ความหนาแน่นของเม็ดดิน (เท่ากับ $S \times 100$ ) (ก.ก./ลบ.ม.)
$S$	คือ	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

#### 4) อัตราส่วนของช่องว่าง (Void Ratio)

อัตราส่วนช่องว่าง หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ต่อปริมาตรเนื้อดิน นั่นคือ

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} \quad (2-4)$$

โดยที่  $e$  คือ อัตราส่วนช่องว่าง และความสัมพันธ์กับความพรุน ( $\phi$ ) ดังนี้

$$\phi = \frac{e}{1+e} \quad (2-5)$$

### 2.3 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ (Hydraulic Properties of Aquifer Materials)

ความสามารถของการให้น้ำซึมผ่านได้ของวัสดุชั้นน้ำ สามารถแสดงได้ด้วยค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 1) ค่าความนำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity)

ความนำชลศาสตร์เป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกลางและของเหลวที่ไหลผ่าน หาได้จากสมการของดาร์ซี ดังต่อไปนี้

$$K = -\frac{v}{dh/dL} \quad (2-6)$$

เมื่อ	$K$	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วัน)
	$v$	คือ	ความเร็วการไหลผ่านตัวกลางชั้นน้ำ (ม./วัน)
	$dh/dL$	คือ	ความชันชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)

#### 2) ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (Intrinsic Permeability)

ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกลางเพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของของเหลวที่ไหลผ่าน โดยมีสมการในรูปต่างๆ ไปดังต่อไปนี้

$$k = cd^2 \quad (2-7)$$

หรือ  $k = f_s f_a d^2 \quad (2-8)$

เมื่อ	k	คือ	ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (ม. <sup>2</sup> )
	c	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ไร้หน่วยของตัวกลาง
	f <sub>s</sub>	คือ	ปัจจัยเกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาคตัวกลาง (Grain Shape Factor)
	f <sub>a</sub>	คือ	ปัจจัยเกี่ยวกับความพรุนของอนุภาคตัวกลาง (Porosity Factor)
	d	คือ	ความยาวจำเพาะการไหล (ม.)

และค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับค่าความนำชลศาสตร์ ดังสมการต่อไปนี้

$$k = \frac{K\mu}{\rho g} \quad (2-9)$$

เมื่อ	$\mu$	คือ	ความหนืดพลวัตของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางชั้นน้ำ (ปาสคาล-วินาที)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลางชั้นน้ำ (ก.ก./ลบ.ม.)

### 3) ความสามารถในการส่งผ่าน (Transmissivity)

ความสามารถในการส่งผ่าน หมายถึง อัตราการไหลของน้ำในชั้นน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของชั้นน้ำ ภายใต้หนึ่งหน่วยความชันชลศาสตร์ ดังสมการต่อไปนี้

$$T = Km \quad (2-10)$$

เมื่อ	T	คือ	ความสามารถในการส่งผ่าน (ม. <sup>2</sup> /วัน)
	m	คือ	ความหนาของชั้นน้ำที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ม.)

## 2.4 ชนิดของการไหลและพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน

เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน เปรียบเสมือนกับการไหลเต็มท่อของของไหล ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชนิดของการไหลออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

- 1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) คือการไหลที่อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ นั่นคือมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการไหลโดยใช้สมการของดาร์ซี การไหลในช่วงนี้จะเรียกว่า “การไหลแบบเชิงเส้น” (Darcy Regime or Linear Flow Regime)
- 2) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) คือการไหลที่อนุภาคของน้ำมีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบมีความปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วในการไหลสูง
- 3) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition Flow) คือ การไหลที่มีสภาพอยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบ และความไหลและปั่นป่วน

การไหลชนิดที่ 2 และ 3 จะไม่สามารถอธิบายลักษณะการไหลโดยใช้สมการของดาร์ซีได้ จึงเรียกการไหลในช่วงนี้ว่า “การไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น” (Non-Linear Flow Regime) ดังแสดงในรูปที่ 2-3

ตัวแปรที่ใช้ในการแบ่งชนิดการไหล คือ ค่าเรย์โนลด์ (Re) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia Force:  $F_i$ ) ต่อแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล (Viscous Force:  $F_v$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho d^2 V^2}{\mu v d} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (2-11)$$

เมื่อ	d	คือ	ความยาวจำเพาะของการไหล (Characteristic Length of Flow)(ม.)
	v	คือ	ความเร็วการไหลผ่านตัวกลาง (ม./วินาที)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลาง (ก.ก./ลบ.ม.)
	$\mu$	คือ	ความหนืดพลวัตของของไหล (ปาสคาล-วินาที)
	$\nu$	คือ	ความหนืดเปรียบเทียบ (Kinematic Viscosity) ของของไหล (ม. <sup>2</sup> /วินาที)

ในกรณีการไหลผ่านตัวกลางที่เกิดขึ้นจริง จะต้องพิจารณาผลของความพรุนของตัวกลางด้วย ดังนั้นสมการที่ 2-11 จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

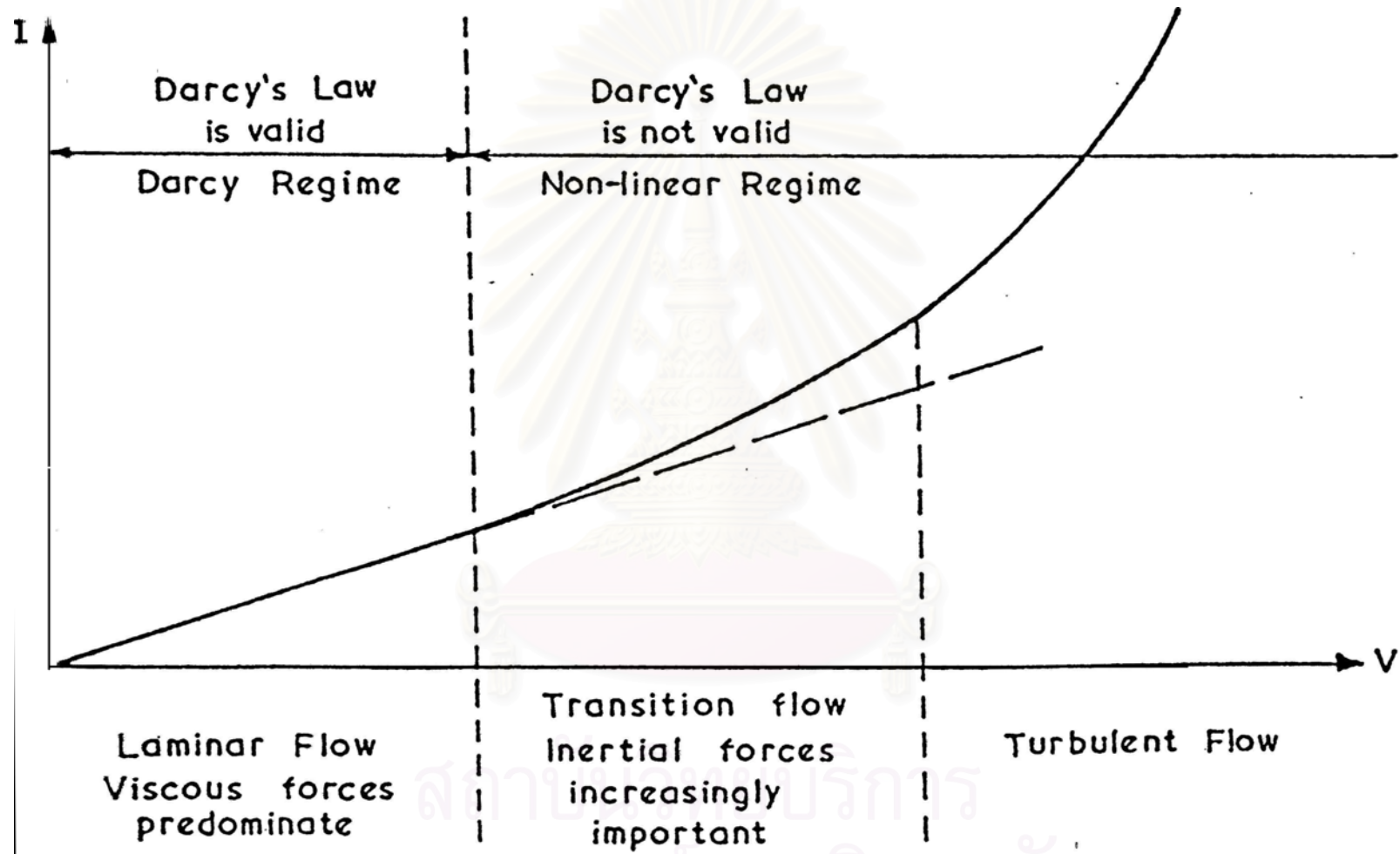
$$Re' = \left(\frac{V}{\phi}\right) \left(\frac{d}{\nu}\right) \quad (2-12)$$

เมื่อ	Re'	คือ	ค่าเรย์โนลด์ของการไหลจริง
	$\phi$	คือ	ความพรุนของตัวกลาง
	$\frac{V}{\phi}$	คือ	ความเร็วจริงในการไหลผ่านตัวกลาง (Seepage Velocity) (ม./วินาที)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) เป็นค่าความยาวจำเพาะของการไหล เนื่องจากความยาวจำเพาะการไหลหรือระยะทางที่น้ำไหลผ่านอนุภาค วัดได้ยากมาก ผู้ทำการศึกษาที่ผ่านมามีหลายคน เช่น Mobasher and Todd (1963) Williams (1985) จึงใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) เป็นตัวแทนของความยาวจำเพาะการไหล ดังนั้นสมการที่ 2-12 จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$Re' = \left(\frac{V}{\phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{\nu}\right) \quad (2-13)$$





ที่มา : Mobasheri and Todd (1963)

รูปที่ 2-3 การแบ่งชนิดของการไหล

พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดินที่นี้หมายถึง สภาพการไหลและเสถียรภาพที่เกิดขึ้นจากการไหล ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความเร็วการไหล ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านของวัสดุชั้นน้ำ เป็นต้น โดยปกติการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ค่อนข้างช้า การไหลที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบราบเรียบ จึงใช้สมการของการไหลของดาร์ซีเพื่ออธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลได้ แต่สำหรับบริเวณที่การไหลมีความเร็วสูง เช่น บริเวณบ่อน้ำบาดาลที่มีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นไปใช้ ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งไม่สามารถใช้สมการการไหลของดาร์ซีอธิบายได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลและความชันชลศาสตร์ไม่เป็นเส้นตรง อนึ่งการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของการไหลตามทิศทางการไหล ดังนี้

- 1) การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (Converging Well Flow) หรือกรณีสูบน้ำ (Pumping Condition) น้ำจะไหลออกจากชั้นน้ำสู่เข้าสู่บ่อน้ำบาดาล โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดการไหล จากการไหลแบบราบเรียบ เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง และการไหลแบบปั่นป่วน ตามลำดับ
- 2) การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล (Diverging Well Flow) หรือกรณีเติมน้ำ (Recharging Condition) น้ำจะไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลขยายเข้าสู่ชั้นน้ำ โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดการไหล จากการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง และการไหลราบเรียบตามลำดับ

## 2.5 สมการการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน

### 2.5.1 สมการการไหลแบบเชิงเส้น

เมื่อน้ำไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุนด้วยความเร็วการไหลต่ำ ทำให้เกิดการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล กับความลาดชันชลศาสตร์ได้ด้วยสมการของดาร์ซี ดังนี้

$$v = KI \quad (2-14)$$

เมื่อ	$v$	คือ	ความเร็วการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นความเร็วเฉลี่ยโดยคำนวณจากอัตราการไหลและพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่าน (ม./วินาที)
	$K$	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)
	$I$	คือ	ค่าความลาดชันชลศาสตร์

แต่ถ้าพิจารณาผลของความพรุนของตัวกลาง ได้สมการของดาร์ซีในรูปต่อไปนี้

$$\frac{v}{\phi} = K'I \quad (2-15)$$

เมื่อ	$\phi$	คือ	ความพรุนของตัวกลาง
	$K'$	คือ	ค่าความนำซลศาสตร์ที่คิดจากความเร็วจริงในการไหล (ม./วินาที)

เนื่องจากสมการที่ 2-14 และ 2-15 ได้มาจากการทดลองการไหลในลักษณะของการไหลแบบขนาน (Parallel Flow) หรือการไหลในทิศทางเดียว (Unidirectional Flow) ที่สภาวะคงตัว แต่ถ้าการไหลยังไม่อยู่ในสภาวะคงตัว คือ ยังมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหล ต้องพิจารณาผลของสภาวะที่ไม่คงตัว นอกจากนี้ในการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลเป็นการไหลในแนวรัศมีไม่ใช่การไหลแบบขนาน ซึ่งได้รับอิทธิพลของการไหลนำพา (Convective) ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของสภาวะการไหล และรูปแบบการไหล สมการที่ 2-15 จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ดังนี้

$$I = \left(\frac{1}{K'}\right)\left(\frac{v}{\phi}\right) + c_1' \frac{\partial(v/\phi)}{\partial t} + c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial x} \quad (2-16)$$

เมื่อ	$c_1'$	คือ	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว (Unsteady Coefficient)
	$c_2'$	คือ	สัมประสิทธิ์การไหลนำพา (Convective Coefficient)

เทอม  $c_1' \frac{\partial(v/\phi)}{\partial t}$  เป็นผลของสภาวะไม่คงตัว ในกรณีที่เป็นการไหลแบบคงตัวเทอมนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ และเทอม  $c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial x}$  เป็นผลของรูปแบบการไหล ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการทดลองการไหลที่สภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว สมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบเชิงเส้นภายใต้สภาวะไม่คงตัวกล่าวไว้แล้วโดยละเอียดในหัวข้อที่ 2.7.2 ส่วนสมการการไหลที่สภาวะคงตัวแบ่งออกเป็น การไหลในทิศทางเดียวของการทดลองการไหลแบบมาตรฐานและการไหลในแนวรัศมี สมการที่ใช้อธิบายการไหลมีในรูปแบบดังนี้

$$\text{การไหลในทิศทางเดียว} \quad I = \left(\frac{1}{K_1'}\right)\left(\frac{v}{\phi}\right) \quad (2-17)$$

$$\text{การไหลในแนวรัศมี} \quad I = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{v}{\phi}\right) + c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial x} \quad (2-18)$$

โดยที่  $I$  มีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลและเป็นลบเมื่อเป็นการไหลออก

และ	$K_1'$	คือ	ค่าความนำซลศาสตร์ของการไหลในทิศทางเดียว (ม./วินาที)
	$K_2'$	คือ	ค่าความนำซลศาสตร์ของการไหลในแนวรัศมี (ม./วินาที)

เมื่อพิจารณาเทอม  $c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial x}$  ในการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ  $m$  ด้วยอัตราการไหล  $Q$  สามารถจัดรูปเทอมดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial X} &= c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right) \frac{d(Q/2\pi r m \phi)}{dr} \\
&= c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \frac{d(1/r)}{dr} \\
&= c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \left(\frac{1}{r^2}\right) \\
&= -c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right) \left(\frac{1}{r}\right) \\
&= -c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2
\end{aligned}$$

นั่นคือ เทอม  $c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial X}$  มีค่าเท่ากับ  $-c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2$  เมื่อ  $r$  คือ ระยะทางในแนวรัศมีจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล ดังนั้นสมการที่ 2-17 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังนี้

$$I = \left(\frac{1}{K_2}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 \quad (2-19)$$

## 2.5.2 สมการการไหลแบบไม่เชิงเส้น

เมื่อน้ำไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุนด้วยความเร็วในการไหลสูง จนเลยขอบเขตการไหลแบบราบเรียบนั้นคือการไหลแบบไม่เชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลกับความชันชลศาสตร์จะอธิบายได้ด้วยสมการ Forchheimer (สมการที่ 1-10) และสมการของ Missbach (สมการที่ 1-11) หรือสมการอื่นๆ แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Dudgeon (1966) พบว่าสมการ Forchheimer ใช้ได้ดีที่สุด เนื่องจากสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมามากมาย การทดลอง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้สมการ Forchheimer มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลกับความลาดชันทางชลศาสตร์ เมื่อการไหลเป็นแบบไม่เชิงเส้น และเมื่อพิจารณาผลของความพรุน สภาวะการไหล และรูปแบบการไหล สมการ Forchheimer สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$I = a' \left(\frac{v}{\phi}\right) + b' \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 + c_1 \frac{\partial(v/\phi)}{\partial t} + c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right) \frac{\partial(v/\phi)}{\partial X} \quad (2-20)$$

เมื่อ	$a'$	คือ	พารามิเตอร์ดาร์ซี
	$b'$	คือ	พารามิเตอร์นอนดาร์ซี
	$c_1'$	คือ	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว (Unsteady Coefficient)
	$c_2'$	คือ	สัมประสิทธิ์การไหลนำพา (Convective Coefficient)

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองการไหลในแนวรัศมีที่สภาวะคงตัว และสภาวะไม่คงตัว สมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบไม่เชิงเส้นภายใต้สภาวะไม่คงตัวกล่าวไว้แล้วโดยละเอียดในหัวข้อที่ 2.7.2 ส่วนสมการการไหลที่สภาวะคงตัวทั้งกรณีการไหลในทิศทางเดียวของการทดลอง การไหลแบบมาตรฐานและการไหลในแนวรัศมี อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\text{การไหลในทิศทางเดียว} \quad I = a_1' \left(\frac{V}{\phi}\right) + b_1' \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 \quad (2-21)$$

$$\text{การไหลในแนวรัศมี} \quad I = a_2' \left(\frac{V}{\phi}\right) + b_2' \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 \quad (2-22)$$

โดยที่  $I$  มีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลและเป็นลบเมื่อเป็นการไหลออก

และ  $a_1'$ ,  $b_1'$  คือ พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลในทิศทางเดียว ตามลำดับ

$a_2'$ ,  $b_2'$  คือ พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลในแนวรัศมี ตามลำดับ

$c_2'$  คือ สัมประสิทธิ์การไหลนำพา (Convective Coefficient)

### 2.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทาน กับค่าเรย์โนลด์และการหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ

ในการแบ่งประเภทการไหลว่าเป็นการไหลแบบเชิงเส้น หรือการไหลแบบไม่เชิงเส้นให้พิจารณาจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนรูปแบบการไหล จากการศึกษาที่ผ่านมา มีวิธีการในการหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ 2 วิธี ได้แก่

1) หากจากรูปความสัมพันธ์ในกระดาดชล็อก-ล็อกระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานที่นิยามโดย Mobasher & Todd (สมการที่ 1-23) เนื่องจากใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลางเป็นความยาวจำเพาะการไหลเหมือนกัน และเมื่อคำนึงถึงความเร็วการไหลจริง แฟคเตอร์เสียดทานจึงมีรูปสมการดังนี้

$$f' = \frac{\Delta p}{L} \frac{d_{50}}{2p \left(\frac{V}{\phi}\right)^2}$$

เมื่อ  $f'$  คือ แฟคเตอร์เสียดทาน ที่คิดจากความเร็วกการไหลจริง

$\Delta p$  คือ ผลต่างของความดันเมื่อมีการไหลผ่านตัวกลางในช่วงความยาว  $L$

และ  $\Delta p = pg\Delta h$  เมื่อ  $\Delta h$  คือความต่างของเฮดหรือระดับความดัน เมื่อจัดอยู่ในรูป

ความลาดชันชลศาสตร์  $\left(\frac{\Delta p}{L} = pg \frac{\Delta h}{L} = pgl\right)$  ได้สมการดังต่อไปนี้

$$f' = \frac{\lg d_{50}}{2\left(\frac{V}{\phi}\right)^2} \quad (2-23)$$

จากค่าเรย์โนลด์ที่หาได้จากสมการ (สมการที่ 2-13) และจากการศึกษาที่ผ่านมาแบ่งความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์เป็น 3 ช่วงตามชนิดการไหล ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทาน กับค่าเรย์โนลด์ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีรูปแบบสมการตามชนิดการไหล ดังนี้

- การไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์เป็นเส้นตรง มีรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$f' = \frac{A}{Re'} \quad (2-24)$$

- การไหลแบบเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์เบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรง มีรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$f' = \frac{A}{Re'} + B \quad (2-25)$$

- การไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเกิดการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ ค่าเรย์โนลด์มีค่าสูงมาก เมื่อพิจารณาสมการที่ 2-23 เทอม  $\frac{A}{Re'}$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น

$$f' = B \quad (2-26)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ ที่หาได้จากการทดลอง

เนื่องจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ คือ ค่าเรย์โนลด์ ณ จุดที่การไหลเริ่มไม่เป็นไปตามสมการของดาร์ซี หรือจุดที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง นั่นคือจุดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์เริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง

2) หากจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ตามวิธีการที่เสนอโดย William (1985) ซึ่งค่าเรย์โนลด์ ณ จุดที่กราฟความสัมพันธ์เริ่มหักเหจากแนวเส้นตรงที่มีความลาดชันเท่ากับ 1 ก็คือค่าเรย์โนลด์วิกฤตินั้นเอง

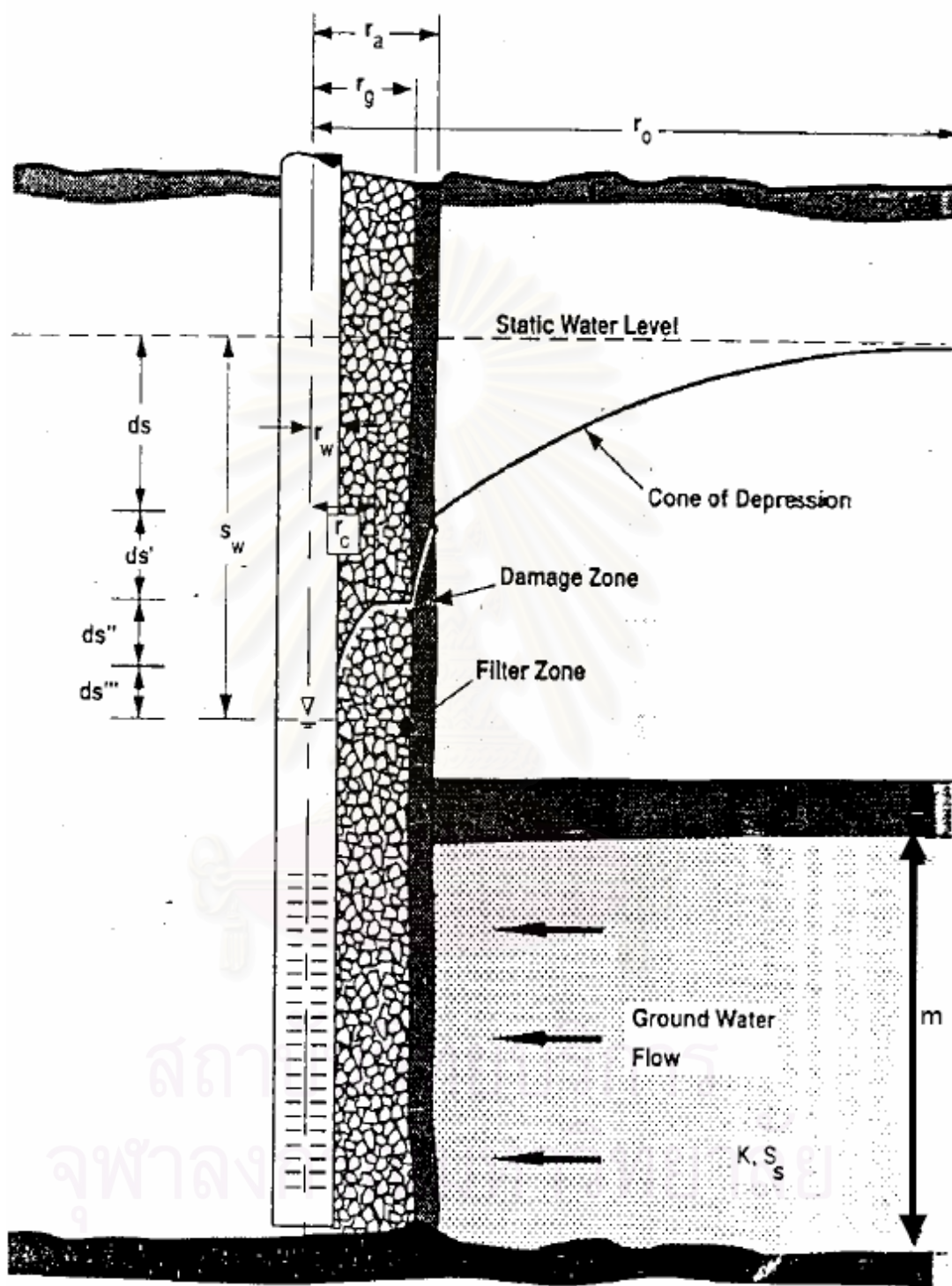
## 2.6 เฮดสูญเสียของการไหลบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล

ในสภาพบ่อน้ำบาดาลที่ใช้งานจริง เมื่อทำการสูบน้ำหรือขณะที่น้ำใต้ดินไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลจะลดลงจากระดับความดันเดิมดังรูปที่ 2-4 เนื่องจากเกิดเฮดสูญเสียในการไหลในส่วนต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$S_w = ds + ds' + ds'' + ds''' + ml \quad (2-27)$$

เมื่อ	$S_w$	คือ	ระดับน้ำลดทั้งหมดในบ่อน้ำบาดาล (เมตร)
	$ds$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลแบบราบเรียบในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) โดยที่ $ds = BQ$
	$ds'$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลแบบราบเรียบ ในบริเวณที่ชั้นน้ำมีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านลดลง เนื่องจากการอุดตันของน้ำโคลนเจาะที่ใช้ในขั้นตอนการสร้างบ่อน้ำบาดาล (Damage Zone Loss) โดยที่ $ds' = B'Q$
	$ds''$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลแบบปั่นป่วนในกรวดกรู (Turbulent Loss in The Filter Zone) โดยที่ $ds'' = B''Q^n$ และ $n$ มีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 2
	$ds'''$	คือ	เฮดสูญเสียในบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำผ่านท่อกรองและการไหลในท่อกรูสู่อุปกรณ์สูบน้ำ และ $ds''' = CQ^2$
	$ml$	คือ	Minor Loss เช่น เฮดสูญเสียจากการไหลแบบราบเรียบในกรวดกรู (Filter Zone Laminar Loss) ซึ่งจะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเฮดสูญเสียอื่นๆ ในการวิเคราะห์จึงไม่ให้ความสนใจ
	$Q$	คือ	อัตราการสูบน้ำ (ลิตร/วินาที)
	$B \ B' \ B'' \ B''' \ C$	คือ	สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ เช่น อัตราการสูบน้ำ คุณสมบัติของวัสดุชั้นน้ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่มา : Vadat B. (1998)

รูปที่ 2-4 ระยะน้ำดในปอสูบนน้ำบาดาล



เนื่องจากการทดลองครั้งนี้เป็นการจำลองสภาพชั้นน้ำภายใต้แรงดัน และบ่อน้ำบาดาลแบบไม่มีกรวดกรูบ่อ ดังนั้นเฮดสูญเสียจากการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นในชั้นน้ำ เพราะฉะนั้นเฮดสูญเสียทั้งหมด (Total Head Loss) ที่เกิดขึ้นในการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลทดลองประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) และเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) ซึ่งเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำแบ่งย่อยเป็น 2 ประเภทตามสภาพการไหล ได้แก่ เฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น (Linear Flow Loss) และ เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Flow Loss) สรุปแล้วเฮดสูญเสียจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลมีรายละเอียดดังนี้

1) กรณีการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล ลักษณะเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ก) ซึ่งเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

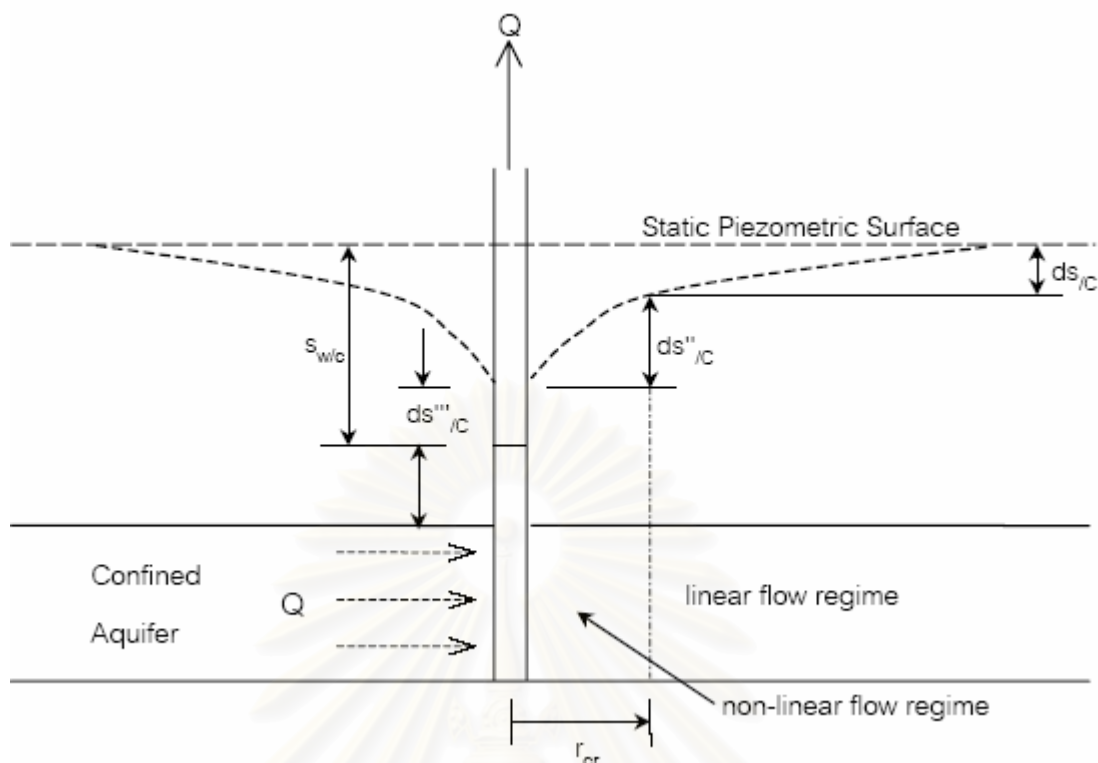
$$S_{W/C} = ds_{A/C} + ds'''_{/C} = ds_{/C} + ds''_{/C} + ds'''_{/C} \quad (2-28)$$

เมื่อ	$S_{W/C}$	คือ	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$ds_{A/C}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำเข้าบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$ds_{/C}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลเข้าแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
	$ds''_{/C}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลเข้าแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
	$ds'''_{/C}$	คือ	เฮดสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล จากการไหลเข้า (ม.)

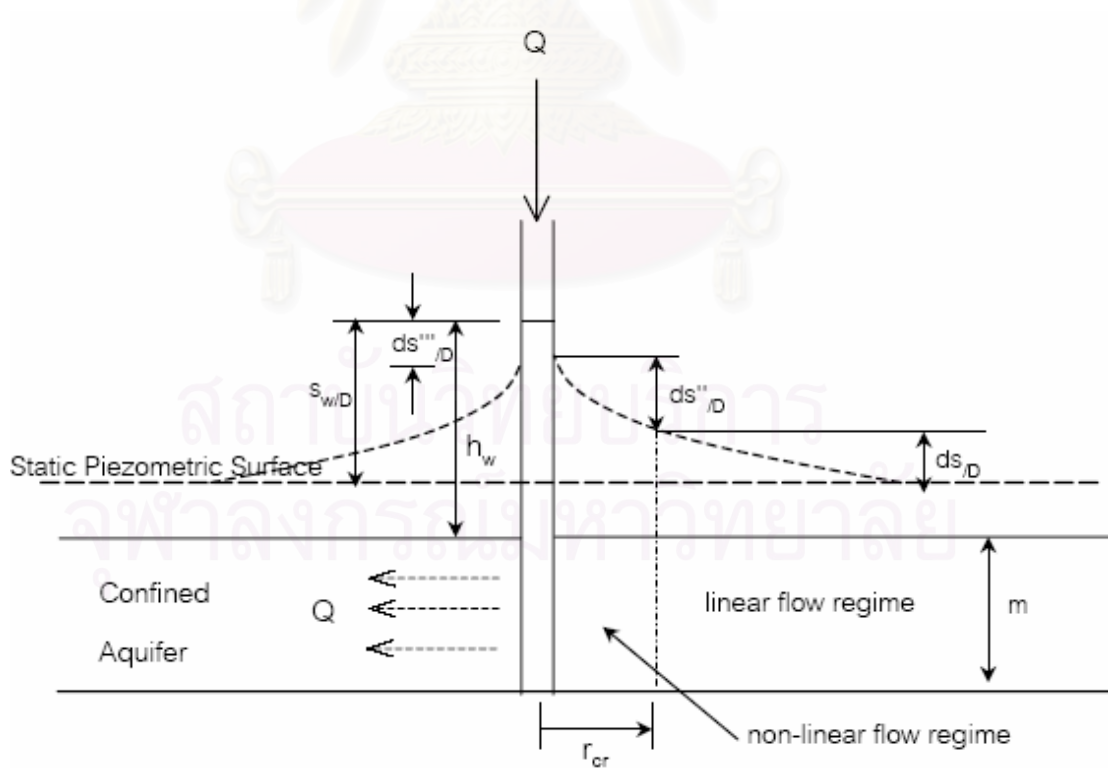
2) กรณีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ลักษณะเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ข) ซึ่งเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$S_{W/D} = ds_{A/D} + ds'''_{/D} = ds_{/D} + ds''_{/D} + ds'''_{/D} \quad (2-29)$$

เมื่อ	$S_{W/D}$	คือ	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$ds_{A/D}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$ds_{/D}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลออกแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
	$ds''_{/D}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลออกแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
	$ds'''_{/D}$	คือ	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล จากการไหลออก (ม.)



(ก) การไหลเข้า (Converging Flow)



(ข) การไหลออก (Diverging flow)

รูปที่ 2-5 ลักษณะเขตสูญเสียจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลทดลอง

## 2.7 การวิเคราะห์ระดับความดันบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีที่สภาวะการไหลเป็นแบบคงตัวและไม่คงตัว จึงทำการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เพื่อเปรียบเทียบว่าพฤติกรรมการไหลจากการไหล 2 รูปแบบเหมือนหรือต่างกันอย่างไร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.7.1 กรณีการไหลที่สภาวะคงตัว

การศึกษาครั้งนี้ได้ทบทวนทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณระดับความดันที่สภาวะคงตัวของ การไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน จากสมการของ Thiem ซึ่งพิจารณาว่าเกิดการไหลแบบราบเรียบในชั้นน้ำเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากการไหลในสภาพความเป็นจริงโดยเฉพาะบริเวณใกล้บ่อ มีการไหลทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ โดยการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันทำใน 2 ลักษณะ

ลักษณะแรก คือ การวิเคราะห์แบบละเอียดโดยใช้สมการของดาร์ซีและสมการของ Forchheimer ที่แบ่งพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลออกเป็น 4 ตัว ได้แก่ ความนำชลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซีและสัมประสิทธิ์การไหลนำพา ลักษณะที่สอง คือ การวิเคราะห์แบบรวม โดยประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ ที่รวมพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวข้างต้นเข้าด้วยกัน เป็นค่าคงที่ A และ B ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

#### 1) สมการ Thiem

เมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล โดยที่การไหลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับสมการการไหลของดาร์ซี จะเกิดกรวยความดันลด (Cone of Depression) และกรวยความดันเพิ่ม (Cone of Recharge) ที่มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อถึงสภาวะคงตัว ดังตัวอย่างในรูปที่ 2- 6 และใช้สมการของ Thiem อธิบายได้ดังนี้

$$\text{การสูบน้ำ} \quad Q_d = \frac{2\pi K m (h_0 - h_w)}{\ln(r_0 / r_w)} \quad (2-30)$$

$$\text{การเติมน้ำ} \quad Q_r = \frac{2\pi K m (h_w - h_0)}{\ln(r_0 / r_w)} \quad (2-31)$$

เมื่อ	$Q_d$	คือ	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
	$Q_r$	คือ	อัตราการเติมน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
	K	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)

$r_0$	คือ	ระยะในแนวรัศมีที่ได้รับอิทธิพลจากการสูบน้ำและเติมน้ำ (Radius of Influence) (ม.)
$r_w$	คือ	รัศมีของบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$h_0$	คือ	ระดับความดันน้ำเดิม (ม.)
$h_w$	คือ	ระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$m$	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (ม.)

## 2) สมการดาร์ซีและสมการ Forchheimer

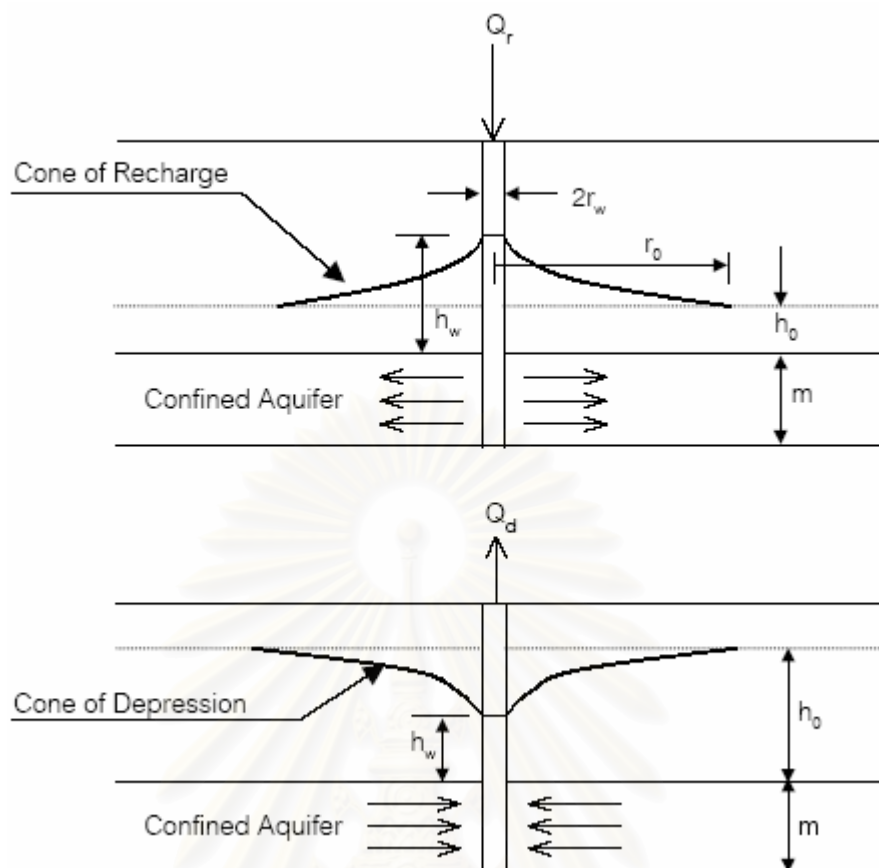
เนื่องจากสมการ Thiem ใช้พื้นฐานมาจากสมการดาร์ซี คือคิดเฉพาะเฮดสูญเสียที่เกิดจากการไหลแบบราบเรียบในชั้นน้ำ ดังนั้นในกรณีที่อัตราการสูบน้ำหรือเติมน้ำเพิ่มขึ้นจนเกิดการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณใกล้ๆ กับบ่อน้ำบาดาล สมการ Thiem ไม่สามารถอธิบายได้เพียงพอประกอบกับการไหลจริงเป็นการไหลในแนวรัศมีซึ่งได้รับอิทธิพลของการไหลนำพา ดังนั้นสมการที่ใช้อธิบายระดับความดันที่ถูกต้องควรคำนึงว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นหรือไม่ รวมทั้งอิทธิพลของการไหลนำพา ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการหาค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลก่อนเพื่อดูว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นหรือไม่

รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ ) คือ ระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลถึงจุดที่การไหลมีการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งช่วงของการไหลที่มีระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลมากกว่าระยะนี้ ( $r > r_{cr}$ ) จะเกิดการไหลแบบเชิงเส้นหรือการไหลแบบราบเรียบ แต่ช่วงของการไหลที่มีระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลน้อยกว่าระยะนี้ ( $r < r_{cr}$ ) จะเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นหรือการไหลแบบเปลี่ยนแปลงและปั่นป่วน ดังรูปที่ 2-7 ซึ่งแสดงค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลของการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

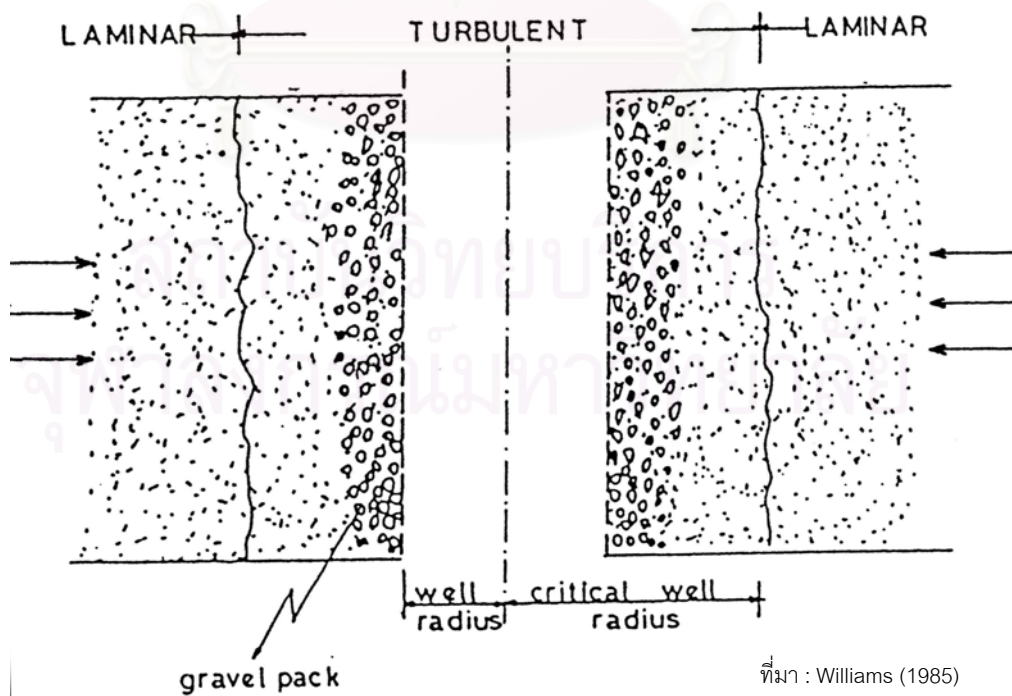
จากสมการเรย์โนลด์  $Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right) \frac{d_{50}}{v} = \left(\frac{Q}{2\pi m r \phi}\right) \frac{d_{50}}{v}$  โดยที่จุดเปลี่ยนชนิดการไหลมีค่า  $Re' = Re'_{cr}$  ดังนั้นในกรณีที่บ่อน้ำบาดาลไม่มีกรวดกรู และใช้ค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็นความยาวจำเพาะของการไหลค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{Re'_{cr}}\right) \quad (2-32)$$

เมื่อ	$Q$	คือ	อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน (ลบ.ม./วินาที)
	$m$	คือ	ความยาวของท่อกรองและในกรณีที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ ค่า $m$ หมายถึง ความหนาของชั้นน้ำบาดาล (ม.)
	$v$	คือ	ความหนืดเปรียบเทียบของน้ำ (Dynamic Viscosity) ( $m^2$ /วินาที)



รูปที่ 2-6 กรวยความดันเพิ่ม (Cone of Recharge) และกรวยความดันลด (Cone of Depression)



ที่มา : Williams (1985)

รูปที่ 2-7 รัศมีวิกฤติของน้ำบาดาล

$Re'_{cr}$  คือ ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ  
 $\phi$  คือ ความพรุนของทรายชั้นน้ำ

ในกรณีทีพิจารณาอิทธิพลของการไหลนำพา ใช้สมการดาร์ซี (สมการที่ 2-19) มาอธิบายการไหลในช่วงที่เป็นการไหลแบบเชิงเส้น และใช้สมการของ Forchheimer (สมการที่ 2-22) มาอธิบายการไหลในช่วงที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น สมการที่สามารถอธิบายระดับความดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของการไหลในแนวรัศมี มีดังต่อไปนี้

(ก) การไหลแบบเชิงเส้นที่สภาวะคงตัว จากสมการดาร์ซี

กรณีการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 2-8 (ก) และสมการที่ 2-19 เมื่อจัดรูปสมการใหม่ ได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$l = \frac{dh}{dr} = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{v}{\phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right)\left(\frac{v}{\phi}\right)^2$$

แต่ 
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2\pi rm}$$

เพราะฉะนั้น 
$$\frac{dh}{dr} = \left(\frac{1}{K_2'\phi}\right)\left(\frac{Q}{2\pi rm}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr\phi^2}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2$$

$$\frac{dh}{dr} = \left(\frac{1}{K_2'\phi}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)\left(\frac{1}{r}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g\phi^2}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^3}\right)$$

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \left(\frac{1}{K_2'\phi}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} - c_2' \left(\frac{1}{g\phi^2}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3}$$

$$[h]_{h_1}^{h_2} = \left(\frac{1}{K_2'\phi}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right) [\ln r]_{r_1}^{r_2} - c_2' \left(\frac{1}{g\phi^2}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[-\frac{1}{2r^2}\right]_{r_1}^{r_2}$$

$$h_2 - h_1 = \left(\frac{1}{K_2'\phi}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right) (\ln \frac{r_2}{r_1}) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-33)$$

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2-8 (ข) และวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$h_1 - h_2 = \left(\frac{1}{K_2'\phi}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right) (\ln \frac{r_2}{r_1}) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right)\left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-34)$$

เมื่อ  $h_1$  คือ ระดับความดันที่ระยะ  $r_1$  จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)

$h_2$  คือ ระดับความดันที่ระยะ  $r_2$  จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)

(ข) การไหลแบบไม่เชิงเส้นที่สภาวะคงตัว จากสมการ Forchheimer

กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้นของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 2-8 (ก) และสมการที่ 2-22 มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$I = \frac{dh}{dr} = a_2' \left(\frac{v}{\phi}\right) + b_2' \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2$$

แต่ 
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2\pi r m}$$

เพราะฉะนั้น 
$$\frac{dh}{dr} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 - c_2' \left(\frac{1}{gr\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2$$

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} - c_2' \left(\frac{1}{g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3}$$

$$[h]_{h_1}^{h_2} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) [\ln r]_{r_1}^{r_2} + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[-\frac{1}{r}\right]_{r_1}^{r_2} - c_2' \left(\frac{1}{g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[-\frac{1}{2r^2}\right]_{r_1}^{r_2}$$

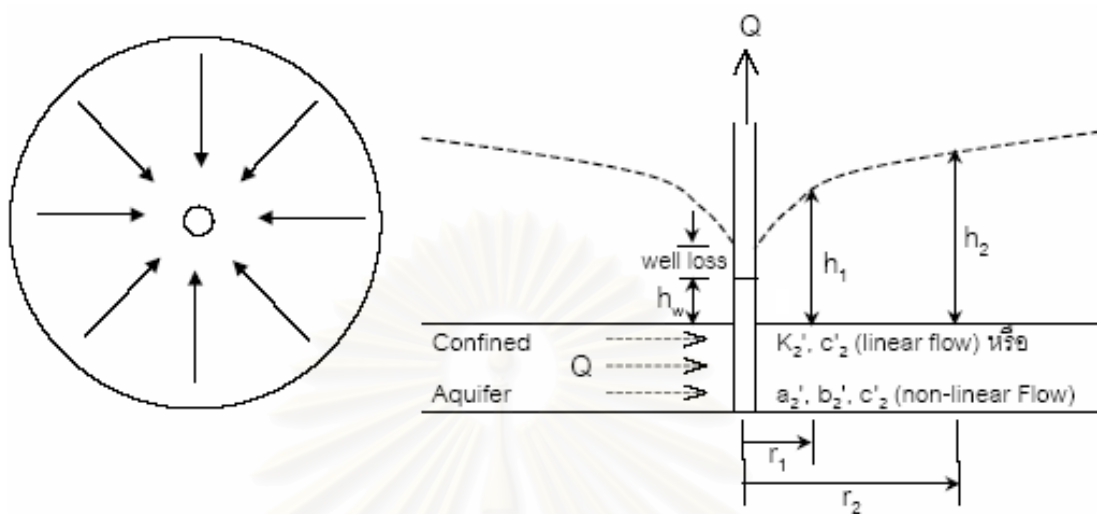
$$h_2 - h_1 = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-35)$$

สำหรับกรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้นของน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2-8 (ข) และวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า ได้รับความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

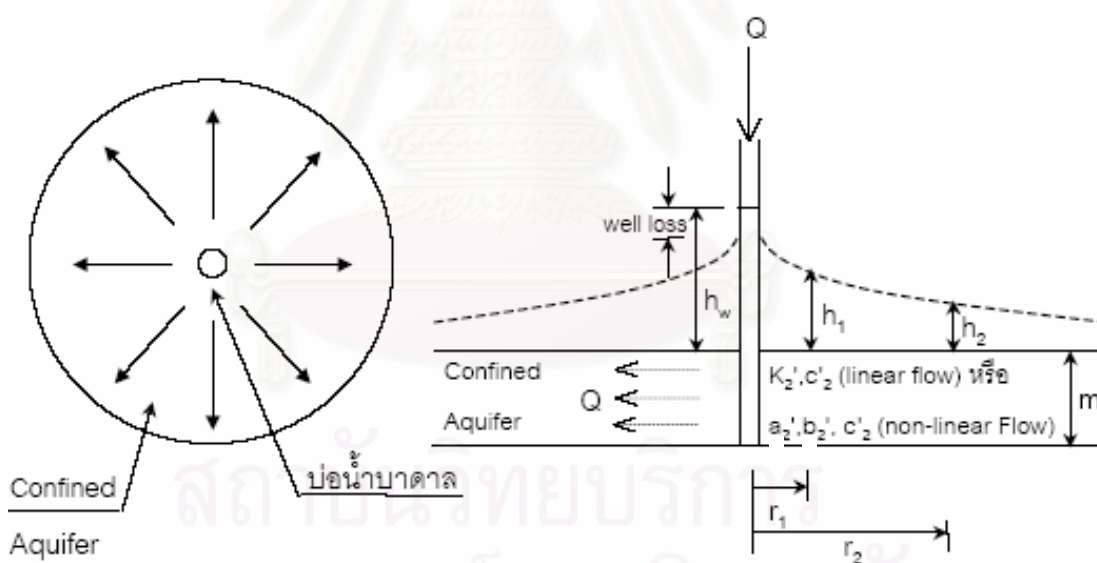
$$h_1 - h_2 = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-36)$$

ดังนั้นในการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี เมื่อทราบค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ ) ค่าระดับความดันที่ตำแหน่งวิกฤติ ( $h_{cr}$ ) และค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ( $CQ^n$ ) ที่เกิดขึ้นจากการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ก็สามารถหาสมการเพื่อคำนวณระดับความดันได้ตามกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) กรณี  $r_{cr} \leq r_w$  เกิดการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (การไหลแบบราบเรียบ) โดยรูปที่ 2-9 (ก) แสดงการไหลของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาล และรูปที่ 2-9 (ข) แสดงการไหลของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาล สำหรับสมการระดับความดันแบ่งตามการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล มีดังต่อไปนี้



(ก) การไหลเข้า (Converging Flow)



(ข) การไหลออก (Diverging Flow)

รูปที่ 2-8 การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในแนวรัศมี



การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h-h_w = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_w^2}\right) + CQ^n \quad (2-37)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h_w - h = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_w^2}\right) + CQ^n \quad (2-38)$$

เมื่อ	$h$	คือ	ระดับความดัน (ม.) ที่ระยะ $r$ จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$r_w$	คือ	รัศมีบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$h_w$	คือ	ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$CQ^n$	คือ	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) (ม.)

2) กรณี  $r_{cr} > r_w$  จะเกิดการไหล 2 แบบ ได้แก่ การไหลแบบเชิงเส้น (ช่วง  $r > r_{cr}$ ) และการไหลแบบไม่เชิงเส้น หรือการไหลแบบเปลี่ยนแปลงและแบบปั่นป่วน (ช่วง  $r < r_{cr}$ ) การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี  $r_{cr} > r_w$  ดังแสดงในรูปที่ 2-10 สำหรับสมการระดับความดันแบ่งตามการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล มีดังต่อไปนี้

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h - h_{cr} = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (2-39)$$

$r_w < r < r_{cr};$

$$h - h_w = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_w^2}\right) + CQ^n \quad (2-40)$$

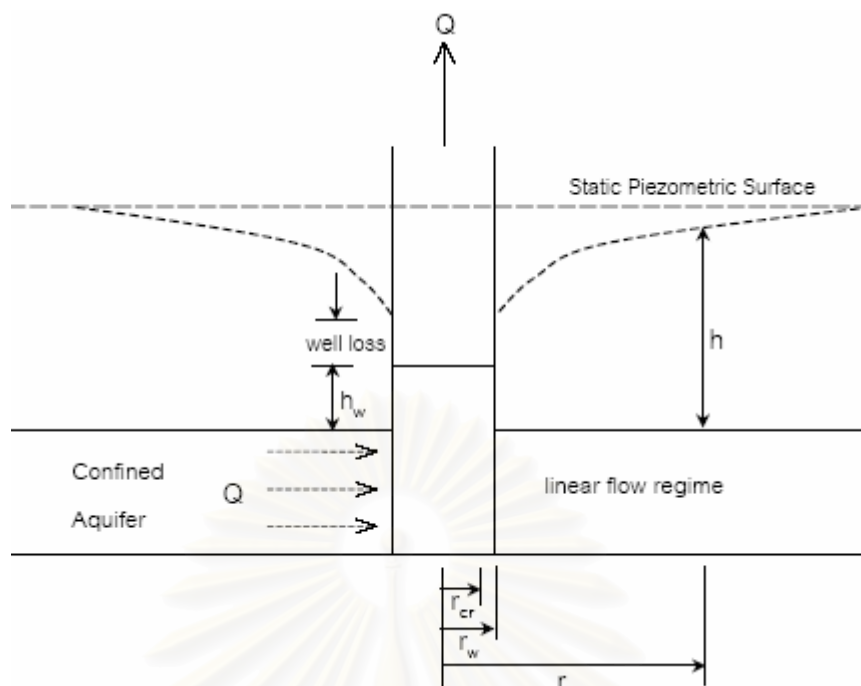
การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h_{cr} - h = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (2-41)$$

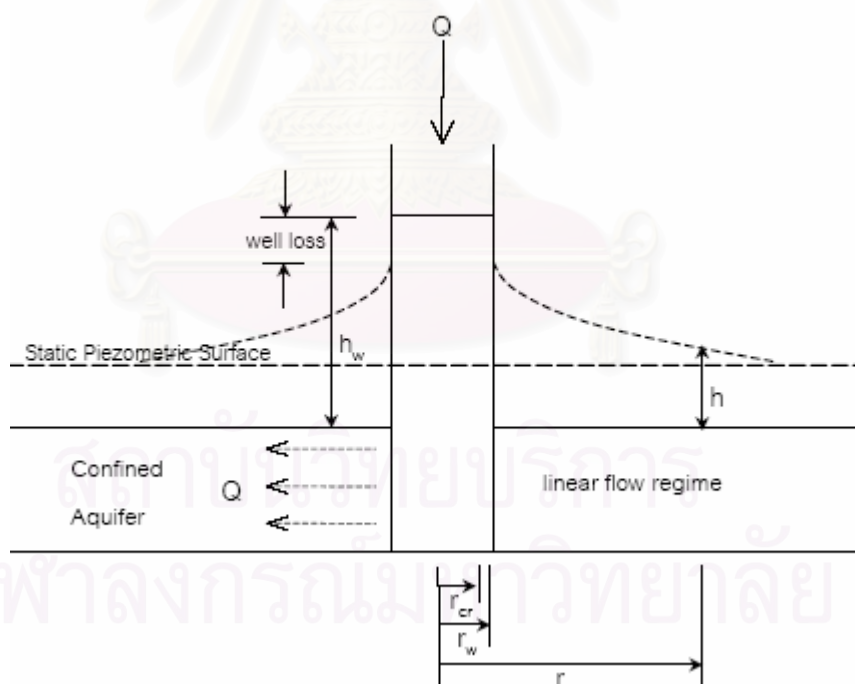
$r_w < r < r_{cr};$

$$h_w - h = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_w^2}\right) + CQ^n \quad (2-42)$$

เมื่อ	$r_{cr}$	คือ	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (ม.)
	$h_{cr}$	คือ	ระดับความดันที่ตำแหน่งวิกฤติ (ม.)

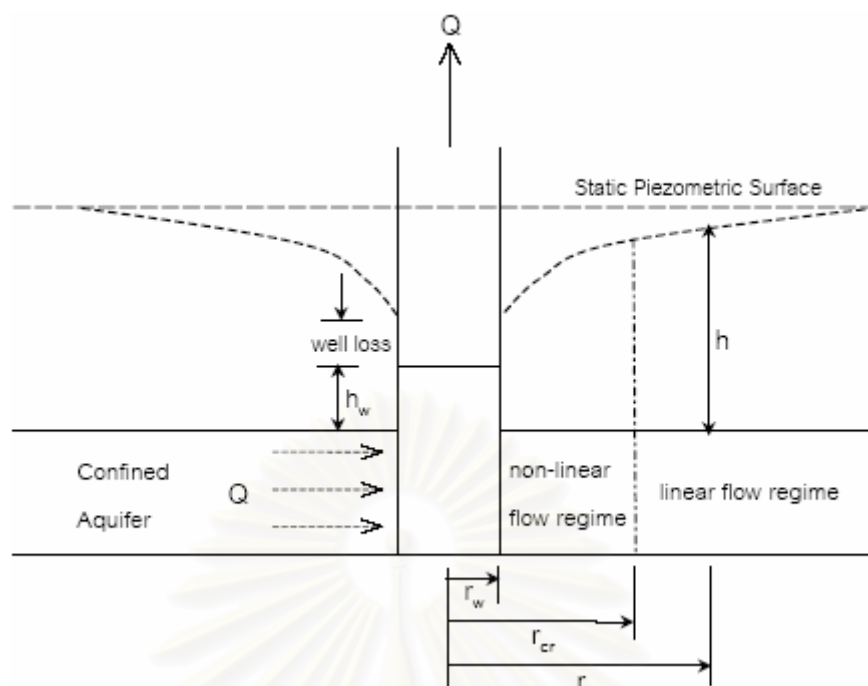


(ก) การไหลเข้า (Converging Flow)

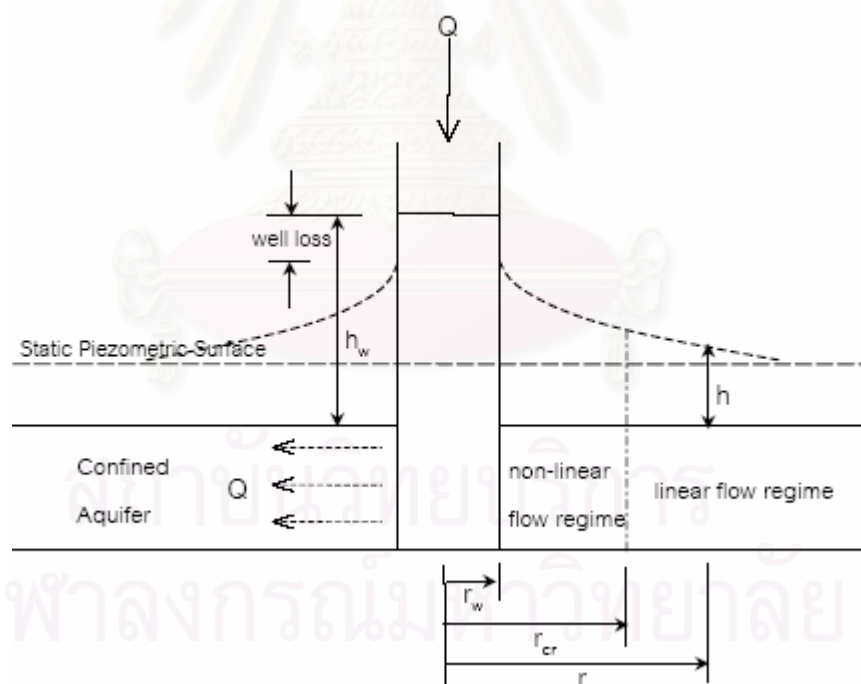


(ข) การไหลออก (Diverging Flow)

รูปที่ 2-9 การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี  $r_{cr} \leq r_w$



(ก) การไหลเข้า (Converging Flow)



(ข) การไหลออก (Diverging Flow)

รูปที่ 2-10 การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี  $r_{cr} > r_w$

สรุปแล้วการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในการวิเคราะห์อย่างละเอียด มีพารามิเตอร์ที่ต้องทราบก่อนทำการคำนวณระดับความดัน ได้แก่

(1) รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ซึ่งคำนวณจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ ) นั่นคือต้องทราบต้องทราบค่าเรย์โนลด์วิกฤติก่อน

(2) ค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_2'$ ) และสัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา ( $c_2'$ ) สำหรับคำนวณระดับความดันของการไหลแบบเชิงเส้น

(3) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) และสัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา ( $c_2'$ ) สำหรับคำนวณระดับความดันของการไหลแบบไม่เชิงเส้น

(4) ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ( $CQ^n$ )

ซึ่งพารามิเตอร์ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดหาได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

3) ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

การหาสมการคำนวณระดับความดันตามระยะทางจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ แบ่งตามชนิดการไหลได้ดังนี้

(ก) การไหลแบบราบเรียบ

กรณีการไหลแบบราบเรียบพิจารณาจากสมการที่ 2-22 ดังนี้

$$f' = \frac{A}{Re'} \quad \text{หรือ} \quad \frac{lgd_{50}}{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2} = \frac{A}{\left(\frac{v}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)}$$

$$l = \frac{A}{\left(\frac{v}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)} \frac{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2}{gd_{50}} = \frac{2Av\left(\frac{v}{\phi}\right)}{gd_{50}^2}$$

เนื่องจาก  $l = \frac{dh}{dr}$  และ  $v = \frac{Q}{2\pi rm}$

ดังนั้น  $\frac{dh}{dr} = \frac{2Av}{gd_{50}^2} \left(\frac{Q}{2\pi rm\phi}\right)$

$$\int dh = \frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2} \left( \int \frac{dr}{r} \right)$$

$$[h]_{h_1}^{h_2} = \frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2} [\ln r]_{r_1}^{r_2}$$

$$h_2 - h_1 = \frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2-43)$$

(ข) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง

กรณีการไหลแบบเปลี่ยนแปลงพิจารณาจากสมการที่ 2-23 ดังนี้

$$f' = \frac{A}{Re'} + B \quad \text{หรือ} \quad \frac{lgd_{50}}{2\left(\frac{V}{\phi}\right)^2} = \frac{A}{\left(\frac{V}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)} + B$$

$$l = \frac{2Av\left(\frac{V}{\phi}\right)}{gd_{50}^2} + \frac{2B\left(\frac{V}{\phi}\right)^2}{gd_{50}}$$

เนื่องจาก  $l = \frac{dh}{dr}$  และ  $v = \frac{Q}{2\pi rm}$

ดังนั้น  $\frac{dh}{dr} = \frac{2Av}{gd_{50}^2} \left( \frac{Q}{2\pi rm\phi} \right) + \frac{2B}{gd_{50}} \left( \frac{Q}{2\pi rm\phi} \right)^2$

$$\int dh = \frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2} \left( \int \frac{dr}{r} \right) + \left( \frac{BQ^2}{2gd_{50}\pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left( \int \frac{dr}{r^2} \right)$$

$$[h]_{h_1}^{h_2} = \frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2} [\ln r]_{r_1}^{r_2} + \left( \frac{BQ^2}{2gd_{50}\pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_1}^{r_2}$$

$$h_2 - h_1 = \frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left( \frac{BQ^2}{2gd_{50}\pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2-44)$$

(ค) การไหลแบบปั่นป่วน

กรณีการไหลแบบปั่นป่วนพิจารณาจากสมการที่ 2-24 ดังนี้

$$f' = B \quad \text{หรือ} \quad \frac{lgd_{50}}{2\left(\frac{V}{\phi}\right)^2} = B$$

$$l = \frac{2B\left(\frac{V}{\phi}\right)^2}{gd_{50}}$$

เนื่องจาก  $l = \frac{dh}{dr}$  และ  $v = \frac{Q}{2\pi rm}$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad \frac{dh}{dr} &= \frac{2B}{gd_{50}} \left( \frac{Q}{2\pi r m \phi} \right)^2 \\
 \int dh &= \left( \frac{BQ^2}{2gd_{50} \pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left( \int \frac{dr}{r} \right) \\
 [h]_{r_1}^{h_2} &= \left( \frac{BQ^2}{2gd_{50} \pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_1}^{r_2} \\
 h_2 - h_1 &= \left( \frac{BQ^2}{2gd_{50} \pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2-45)
 \end{aligned}$$

## 2.7.2 กรณีการไหลที่สภาวะไม่คงตัว

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมของการไหลที่สภาวะไม่คงตัว เพื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของการไหลในสภาวะคงตัว ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่สภาวะไม่คงตัว รวมทั้งเมื่อเกิดการไหลแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ

ในทำนองเดียวกับการไหลที่สภาวะคงตัว จะต้องทราบก่อนว่าจะเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นขึ้นในชั้นน้ำหรือไม่ แต่เนื่องจากความเร็วของการไหลมีค่าไม่คงที่เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าเรย์โนลด์ในช่วงเวลาต่างๆ ว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นขึ้นหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ เช่นเดียวกับการไหลที่สภาวะคงตัว ในกรณีที่พิจารณาอิทธิพลของการไหลแบบไม่คงตัวและการไหลนำพา ใช้สมการดาร์ซี (สมการที่ 2-19) มาอธิบายการไหลในช่วงที่เป็นการไหลแบบเชิงเส้น และใช้สมการของ Forchheimer (สมการที่ 2-22) มาอธิบายการไหลในช่วงที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น สมการที่สามารถอธิบายระดับความดันที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของการไหลในแนวนอนมีดังต่อไปนี้

### 1) การไหลแบบเชิงเส้นที่สภาวะไม่คงตัว จากสมการของดาร์ซี

กรณีการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากสมการที่ 2-16 เมื่อพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่แตกต่างกันน้อยมาก ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) ทำให้อัตราการไหลต่อเวลามีค่าน้อยมากด้วยเช่นกัน เมื่อจัดรูปสมการใหม่ได้ความสัมพันธ์ที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$I = \left( \frac{1}{K'} \right) \left( \frac{v}{\phi} \right) + c_1 \left( \frac{1}{\phi} \right) \frac{dv}{dt} + c_2 \left( \frac{1}{g} \right) \left( \frac{v}{\phi^2} \right) \frac{dv}{dx} \quad (2-46)$$

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้มีรูปแบบของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา 2 รูปแบบ ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์แบ่งออกได้ดังนี้

(ก) กรณีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเส้นตรง

เมื่อพิจารณาเทอม  $c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt}$  ของสมการที่ 2-46 ในการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ  $m$  ด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรงหรืออยู่ในรูปของสมการ  $Q=at+c$  เมื่อ  $a$  คือค่าความชันของสมการเส้นตรง และ  $c$  คือค่าคงที่ของสมการเส้นตรง สามารถจัดรูปเทอมดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt} &= c_1' \left(\frac{1}{2\pi r m \phi}\right) \frac{dQ}{dt} \\ &= c_1' \left(\frac{1}{2\pi r m \phi}\right) \frac{d(at+c)}{dt} \\ &= c_1' \left(\frac{a}{2\pi r m \phi}\right) \end{aligned}$$

และจากหัวข้อที่ 2.5.1 เทอม  $c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi^2}\right) \frac{dv}{dx}$  มีค่าเท่ากับ  $-c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2$  ดังนั้นสมการที่ 2-46 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$I = \left(\frac{1}{K_2'}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 \quad (2-47)$$

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล สมการที่ 2-47 เมื่อจัดรูปใหม่โดยแทนค่า  $v = \frac{Q}{2\pi r m}$  จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I &= \frac{dh}{dr} = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 \\ \frac{dh}{dr} &= \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \left(\frac{1}{r}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right) \left(\frac{1}{r}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^3}\right) \\ \int_{h_1}^{h_2} dh &= \left[ \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right) \right] \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3} \\ [h]_{h_1}^{h_2} &= \left[ \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right) \right] [\ln r]_{r_1}^{r_2} - c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[ -\frac{1}{2r^2} \right]_{r_1}^{r_2} \\ h_2 - h_1 &= \left[ \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right) \right] \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-48) \end{aligned}$$

สำหรับกรณีการไหลเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล วิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้าจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$h_1 - h_2 = \left[ \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right) \right] \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-49)$$

(ข) กรณีอัตราการไหลเป็นฟังก์ชันของไซน์

เมื่อพิจารณาเทอม  $c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt}$  ของสมการที่ 2-46 ในการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ  $m$  ด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรงหรืออยู่ในรูปของสมการ  $Q = b \sin(\omega t) + c$  เมื่อ  $b$  คือค่าแอมพลิจูด และ  $c$  คือค่าคงที่ สามารถจัดรูปเทอมดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt} &= c_1' \left(\frac{1}{2\pi r m \phi}\right) \frac{dQ}{dt} \\ &= c_1' \left(\frac{1}{2\pi r m \phi}\right) \frac{d(b \sin(\omega t) + c)}{dt} \\ &= c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi r m \phi}\right) \end{aligned}$$

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล สมการที่ 2-47 เมื่อจัดรูปใหม่โดยแทนค่า  $v = \frac{Q}{2\pi r m}$  จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I = \frac{dh}{dr} &= \left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right) + c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 \\ \frac{dh}{dr} &= \left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \left(\frac{1}{r}\right) + c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right) \left(\frac{1}{r}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^3}\right) \\ \int_{h_1}^{h_2} dh &= \left[\left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3} \\ [h]_{h_1}^{h_2} &= \left[\left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] [\ln r]_{r_1}^{r_2} - c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[-\frac{1}{2r^2}\right]_{r_1}^{r_2} \\ h_2 - h_1 &= \left[\left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-50) \end{aligned}$$

สำหรับกรณีการไหลเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล วิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้าจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$h_1 - h_2 = \left[\left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{b \omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-51)$$



## 2) การไหลแบบไม่เชิงเส้นที่สภาวะไม่คงตัว จากสมการของ Forchheimer

กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้นของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากสมการที่ 2-20 เมื่อพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่แตกต่างกันน้อยมาก ( $t > 0$ ) ทำให้อัตราการไหลต่อเวลามีค่าน้อยมากด้วยเช่นกัน เมื่อจัดรูปสมการใหม่ได้ความสัมพันธ์ที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$I = a' \left(\frac{v}{\phi}\right) + b' \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 + c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt} + c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi^2}\right) \frac{dv}{dx} \quad (2-53)$$

การศึกษาครั้งนี้มีรูปแบบของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหลายรูปแบบ ในการหาความสัมพันธ์จึงได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ

(ก) กรณีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเส้นตรง

เนื่องจากเทอม  $c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt}$  มีค่าเท่ากับ  $c_1' \left(\frac{a}{2\pi r m \phi}\right)$  และเทอม  $c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi^2}\right) \frac{dv}{dx}$  มีค่าเท่ากับ  $-c_2' \left(\frac{1}{g r}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2$  ดังนั้นสามารถจัดรูปเทอมดังกล่าวได้ดังนี้

$$I = a' \left(\frac{v}{\phi}\right) + b' \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g r}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 \quad (2-54)$$

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล สมการที่ 2-51 เมื่อจัดรูปใหม่โดยแทนค่า  $v = \frac{Q}{2\pi r m}$  จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I &= \frac{dh}{dr} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g r \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 \\ \int_{h_1}^{h_2} dh &= \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3} \\ [h]_{h_1}^{h_2} &= \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) [\ln r]_{r_1}^{r_2} + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \left[-\frac{1}{r}\right]_{r_1}^{r_2} - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[-\frac{1}{2r^2}\right]_{r_1}^{r_2} \\ h_2 - h_1 &= \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \end{aligned} \quad (2-55)$$

สำหรับกรณีการไหลไม่เชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล วิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$h_1 - h_2 = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-56)$$

(ข) กรณีอัตราการไหลเป็นฟังก์ชันของไซน์

เนื่องจากเทอม  $c_1' \left(\frac{1}{\phi}\right) \frac{dv}{dt}$  มีค่าเท่ากับ  $c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi r m \phi}\right)$  และเทอม  $c_2' \left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right) \frac{dv}{dx}$  มีค่าเท่ากับ  $-c_2' \left(\frac{1}{g r}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2$  ดังนั้นสามารถจัดรูปเทอมดังกล่าวได้ดังนี้

$$I = a' \left(\frac{v}{\phi}\right) + b' \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 + c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g r}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right)^2 \quad (2-57)$$

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่สูบน้ำบาดาล สมการที่ 2-47 เมื่อจัดรูปใหม่โดยแทนค่า  $v = \frac{Q}{2\pi r m}$  จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I &= \frac{dh}{dr} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi r m \phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{g r \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi r m}\right)^2 \\ \int_{h_1}^{h_2} dh &= \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3} \\ [h]_{h_1}^{h_2} &= \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) [\ln r]_{r_1}^{r_2} + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \left[-\frac{1}{r}\right]_{r_1}^{r_2} - c_2' \left(\frac{1}{g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left[-\frac{1}{2r^2}\right]_{r_1}^{r_2} \\ h_2 - h_1 &= \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \end{aligned} \quad (2-58)$$

สำหรับกรณีการไหลเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาลวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า ได้สมการดังต่อไปนี้

$$h_2 - h_1 = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{b\omega \cos(\omega t)}{2\pi m \phi}\right)\right] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g \phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) \quad (2-59)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาค้นคว้ามีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาพฤติกรรมมวลการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัวและไม่คงตัว ที่มีขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำขนาดต่างๆ ซึ่งต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยปรับปรุงเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อจำลองสภาพการไหล นอกจากนี้ยังต้องทำการทดลองในส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำ ตลอดจนการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ โดยการทดลองการไหลผ่านตัวกลางดังกล่าวโดยวิธีทดลองการไหลแบบมาตรฐาน การทดลองในห้องปฏิบัติการมีขั้นตอนตั้งแต่ การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง และการจัดการข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังที่จะกล่าวต่อไป

ในการศึกษาค้นคว้า การทดลองที่เป็นมาตรฐานใช้เครื่องมือที่มีอยู่แล้ว ได้แก่ การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย การทดลองหาการกระจายขนาดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุชั้นน้ำ ในขณะที่การทดลองการไหลของน้ำใต้ดินทั้งกรณีการทดลองการไหลแบบมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ (Permeability Test) และการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินในแนวรัศมี จำเป็นต้องปรับปรุงระบบการควบคุมและเก็บข้อมูลใหม่

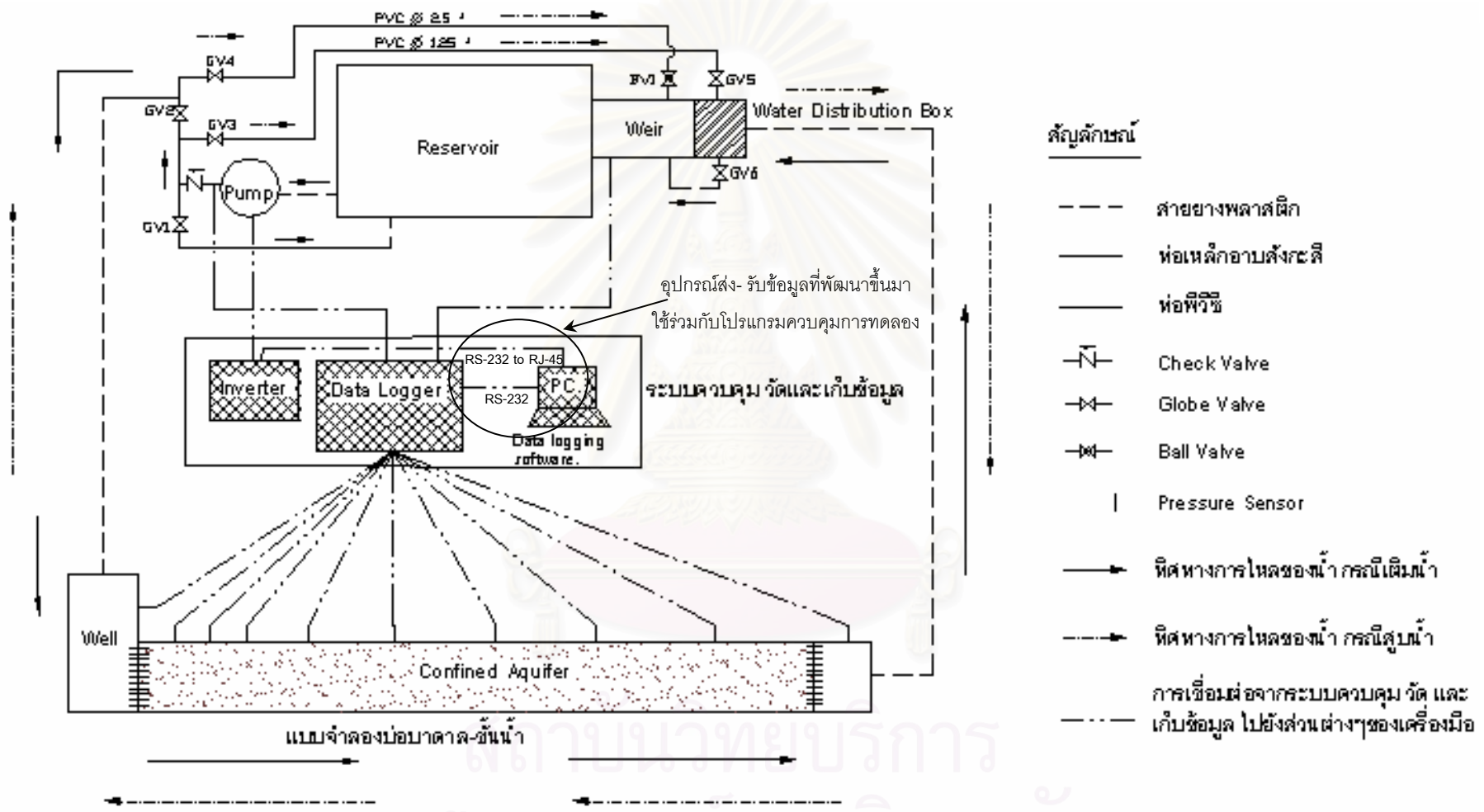
#### 3.1 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองกายภาพ

เนื่องจากเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดันที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไม่สามารถควบคุมการทดลอง และบันทึกผลการทดลองได้โดยสะดวก จึงได้นำคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นอุปกรณ์หลัก พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมควบคุมอัตราการไหลของแบบจำลองให้สามารถปรับอัตราการไหลได้ตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนไป รวมทั้งสามารถแสดงผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลในทุกช่วงเวลา (Real Time) ซึ่งจะทำให้แบบจำลองบ่อน้ำบาดาลชั้นน้ำมีระบบการทำงานดังในรูปที่ 3-1

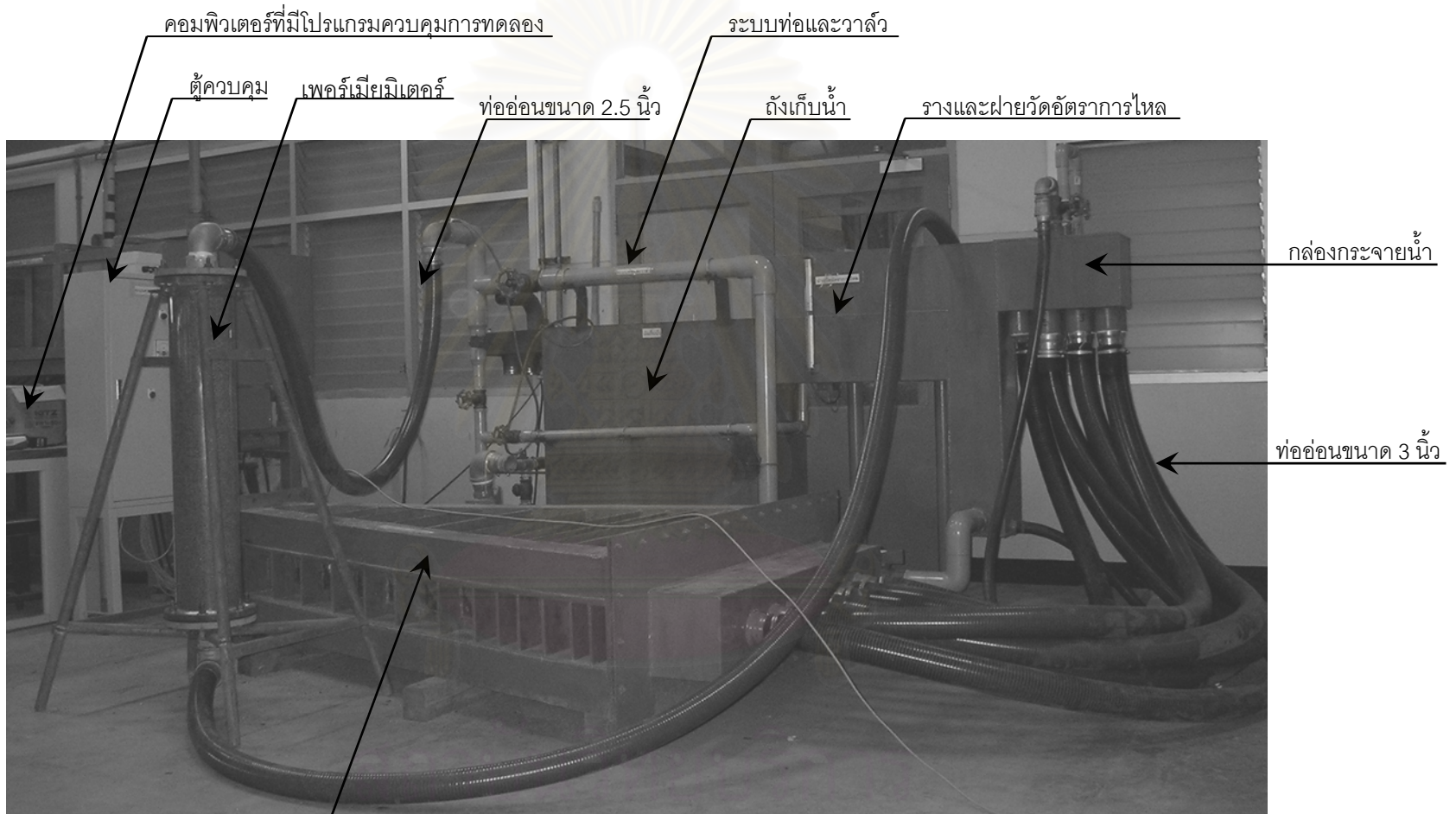
รายละเอียดการปรับปรุงเครื่องมือและออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการทดลอง แสดงไว้ในภาคผนวก ก ส่วนคู่มือการใช้เครื่องมือแสดงไว้ในภาคผนวก จ

#### 3.2 ส่วนประกอบของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน

เครื่องจำลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี นับเป็นชุดเครื่องมือหลักในการศึกษาค้นคว้านี้ โดยการทำงานจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก และมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3-2 โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-1 การเชื่อมโยงระบบต่างๆ ของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน



แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี

รูปที่ 3-2 เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเต็มน้ำภายใต้แรงดัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.1 แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (Well-Aquifer Model)

แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (Well-Aquifer Model) มีลักษณะการไหลในแนวรัศมี โดยมีชั้นน้ำเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมที่มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 2 เมตร และหนา 0.2 เมตร เป็นโครงเหล็ก ด้านหลังและด้านล่างของแบบจำลองเป็นแผ่นเหล็ก แต่ด้านหน้าและด้านบนของแบบจำลองทำด้วยพลาสติกใส เพื่อใช้สังเกตการไหลของน้ำ และเพื่อให้บ่อน้ำบาดาลทดลองมีความสอดคล้องกับชั้นน้ำจำลอง จึงทำบ่อน้ำบาดาลทดลองเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมที่มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 0.2 เมตร และสูง 0.4 เมตร โดยทำจากแผ่นเหล็ก มีการเจาะช่องและติดตะแกรงบริเวณที่ติดกับชั้นน้ำ ซึ่งเป็นการจำลองสภาพบ่อน้ำบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความลึกชั้นน้ำ (Fully Penetrating Well) โดยใช้ตะแกรงสแตนเลสเบอร์ 50 ซ้อนกับตะแกรงเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร ที่เจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างรู 9 มิลลิเมตร (ดูรูปที่ 3-3) ด้านบนของบ่อน้ำบาดาลทดลองติดตั้งข้อต่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สำหรับต่อท่ออ่อนจากระบบหมุนเวียนน้ำ

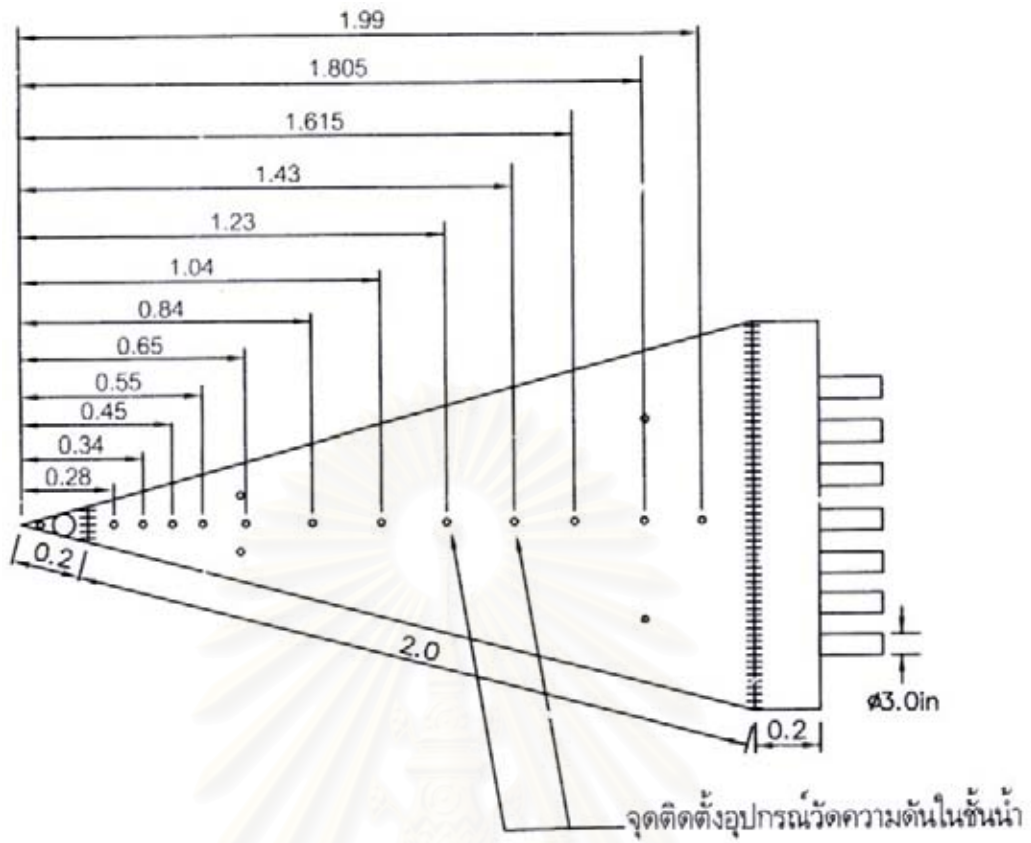
ขณะที่ด้านท้ายของแบบจำลองทำเป็นกล่องเหล็ก ด้านที่ติดกับชั้นน้ำจะมีตะแกรงกันไม่ให้ทรายชั้นน้ำไหลออกมา และอีกด้านติดตั้งข้อต่อท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวน 7 อัน สำหรับต่อท่ออ่อนระบบหมุนเวียนน้ำ กล่องด้านท้ายช่วยให้การไหลของน้ำเข้าและออกจากแบบจำลองทางซ้ายขวามีความสม่ำเสมอขึ้น และด้านบนของบ่อน้ำบาดาลทดลองและชั้นน้ำมีการเจาะรูทำเกลียวสำหรับติดเซนเซอร์วัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ลักษณะของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำดังแสดงในรูปที่ 3-3

### 3.2.2 ระบบหมุนเวียนน้ำ (Circulating Water System)

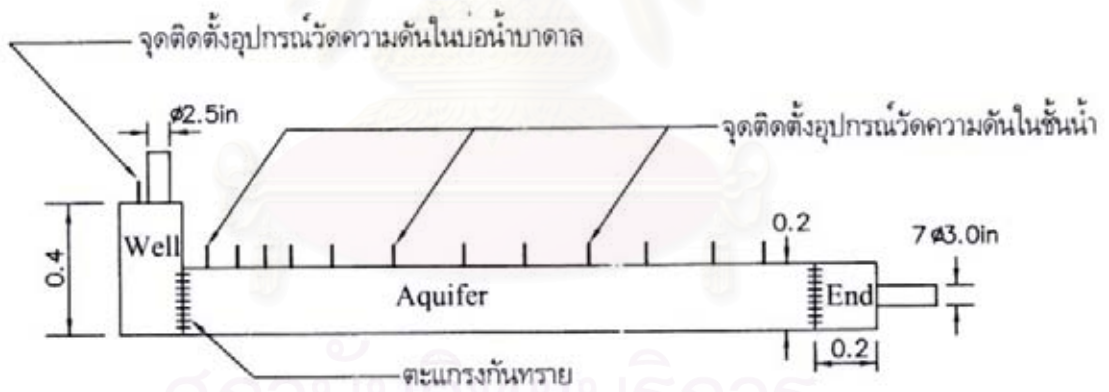
เนื่องจากเครื่องมือต้องออกแบบให้สามารถทดลองได้ทั้งการสูบน้ำและการอัดเติมน้ำใต้ดิน ดังนั้นระบบหมุนเวียนน้ำจึงต้องสามารถทำการทดลองได้ 2 ลักษณะดังกล่าว ระบบท่อจึงมีทั้งท่อแข็ง (ท่อเหล็กและท่อพีวีซี) ท่ออ่อน (สายยางพลาสติก) และวาล์ว เพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะการไหลได้ตามการทดลอง ดังที่แสดงในรูปที่ 3-2

ระบบหมุนเวียนน้ำประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆดังนี้

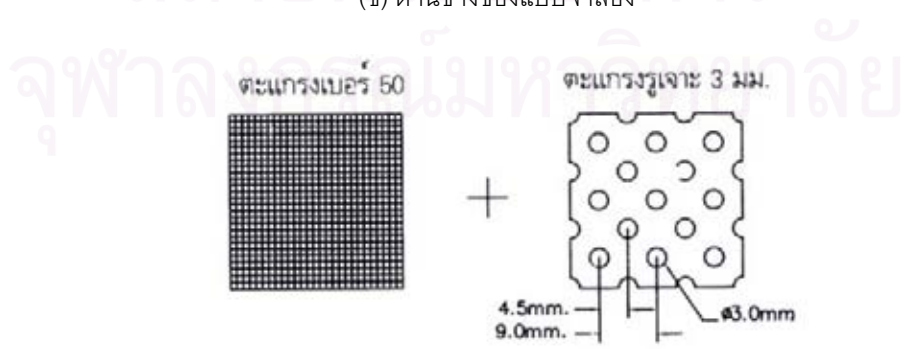
- ถังเก็บน้ำ ใช้ในการเก็บน้ำเพื่อหมุนเวียนในการทดลอง ทำจากแผ่นเหล็ก มีขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 1.0 เมตร และสูง 0.8 เมตร
- เครื่องสูบน้ำ ใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump) ที่สามารถให้เฮดด้านส่งเท่ากับ 50 เมตรของน้ำ และอัตราการไหล 150 ลิตร/นาที หรือ 9 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมงที่ความเร็วรอบ 2,850 รอบ/นาทีขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 กิโลวัตต์ (4 แรงม้า) ใช้ไฟ 380 โวลต์ 3 เฟส 50 Hz



(ก) ด้านบนของแบบจำลอง



(ข) ด้านข้างของแบบจำลอง



(ค) ตะแกรงกันทราย

รูปที่ 3-3 ลักษณะของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ

- ระบบท่อและวาล์ว การไหลเวียนของน้ำในการทดลองจะถูกส่งผ่านระบบท่อที่ประกอบด้วยท่อเหล็ก ท่อพีวีซี และสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว (ต่อเข้าทางบ่อน้ำบาดาล) และ 3 นิ้ว (ต่อเข้าทางด้านท้ายแบบจำลอง) ควบคุมทิศทางการไหลโดยวาล์ว และมีระบบท่อ By Pass ที่ท่อส่งของเครื่องสูบน้ำ เพื่อลดความดันที่มีมากในช่วงแรกของการเดินเครื่องสูบน้ำ เมื่อความดันลดลงถึงระดับที่ทดลองจึงทำการปรับวาล์วเพื่อให้น้ำเข้าสู่แบบจำลอง
- ก่อแบ่งน้ำ (Water Distribution Box) มีรูปแบบการใช้งาน 2 รูปแบบ ได้แก่ กรณีการไหลของน้ำใต้ดินเข้าบ่อน้ำบาดาลหรือการสูบน้ำ ก่อแบ่งน้ำจะรับน้ำที่ส่งมาจากเครื่องสูบน้ำ แล้วแบ่งน้ำเข้าท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ทั้ง 7 เส้น ที่เชื่อมต่อกับด้านท้ายของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ เพื่อให้น้ำไหลเข้าด้านท้ายของชั้นน้ำในแนวรัศมีอย่างแท้จริง ส่วนกรณีของน้ำไหลใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลหรือการเติมน้ำ ก่อแบ่งน้ำจะรับน้ำจากท่ออ่อนทั้ง 7 เส้นดังกล่าว แล้วส่งเข้ารางวัดอัตราการไหลเพื่อทำการวัดอัตราการไหลต่อไป
- ฝ่ายวัดอัตราการไหล (Weir) เป็นฝ่ายสี่เหลี่ยมสันคมทำจากแผ่นสแตนเลส มีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 20 เซนติเมตร ความกว้างสันฝาย 2.12 เซนติเมตร วัดอัตราการไหลได้สูงสุด 12.96 ลูกบาศก์เมตร/ซึ่งโมง ติดตั้งอยู่รางวัดอัตราการไหลขนาดกว้าง 23.5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ซึ่งติดอยู่กับถังเก็บน้ำทดลอง ภายในรางวัดอัตราการไหลมีตะแกรงบรรจุหิน เพื่อช่วยสลายพลังงานและทำให้ระดับน้ำในรางนิ่ง ส่วนค่าระดับน้ำเหนือสันฝายจะได้จากเซนเซอร์วัดความดัน และหลอดวัดระดับน้ำที่ติดอยู่ด้านข้างของรางวัดอัตราการไหล

### 3.2.3 ระบบควบคุม วัด จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูล

ในส่วนของระบบควบคุม วัด จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ระบบควบคุม เป็นระบบที่รับข้อมูลมาจากโปรแกรมควบคุมการทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลที่เวลาต่างๆ ได้ตามต้องการ ระบบควบคุมประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ คือ
  - ชุดแยกสัญญาณ (Isolate) ใช้เพื่อตัดสัญญาณรบกวน (Noise) ระหว่างระบบควบคุมกับระบบวัด เก็บ และแสดงผลข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยชุดแยกสัญญาณนี้มีสายต่อเชื่อมด้านหนึ่งกับพอร์ตอนุกรม (RS-232) ของเครื่องคอมพิวเตอร์และอีกด้านหนึ่งต่อกับสายส่งสัญญาณ
  - สายส่งสัญญาณ ใช้สำหรับส่งข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ต้องการ ณ เวลาต่างๆ พร้อมทั้งรับสัญญาณจากตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำกลับมายัง



คอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความเร็วรอบว่าสอดคล้องกับข้อมูลที่ส่งไปให้หรือไม่ โดยปลายสายส่งสัญญาณด้านที่เป็นพอร์ตอนุกรม (RS-232) ต่อเชื่อมกับชุดแยกสัญญาณ และปลายด้านที่เป็นพอร์ตระบบเครือข่าย (RJ-45) ต่อเชื่อมกับตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ

- ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter) ชนิด 3 เฟส ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ ใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าของเครื่องสูบน้ำให้เท่ากับค่าที่กำหนดจาก โปรแกรมควบคุมการทดลอง ผ่านทางสายส่งสัญญาณจากเครื่องคอมพิวเตอร์

2) ระบบวัด เก็บ และแสดงข้อมูล เป็นระบบเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าแรงดันน้ำในจุดที่สนใจ ได้แก่ ที่บ่อบาดาล จุดต่างๆ ในชั้นน้ำ และหน้าผายวัดอัตราการไหล จากนั้นส่งค่าที่วัดได้เข้าสู่โปรแกรมควบคุมการทดลอง ระบบนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ต่อไปนี้

- เครื่อง Data Logger ซึ่งวัดได้ 16 ช่องสัญญาณ มีความจุหน่วยความจำ 256 กิโลไบต์ ความแม่นยำในการวัด (Accuracy) 0.1%

- เซนเซอร์วัดความดันชนิด Piezoelectric หรือ Piezoresistive ที่วัดแรงดันน้ำได้ในช่วง 0 ถึง 25 psi (0-17.25 mH<sub>2</sub>O) และช่วง 0 ถึง 100 psi (0-69 mH<sub>2</sub>O) ใช้สำหรับวัดแรงดันน้ำที่จุดต่างๆ ในแบบจำลอง ได้แก่ ในชั้นน้ำ 12 ตัว และที่บ่อบาดาล 1 ตัว ส่วนเซนเซอร์ที่วัดแรงดันน้ำได้ในช่วง +/-50 mmHg (+/-0.67 mH<sub>2</sub>O) ใช้วัดระดับน้ำหน้าผายเพื่อคำนวณอัตราการไหล

- เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมควบคุมการทดลอง โดยที่โปรแกรมนี้ทำหน้าที่ในการถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่อง Data Logger ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูล ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลระหว่างทำการทดลองในทุกๆ ช่วงเวลา

### 3.3 การทดสอบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเต็มน้ำภายใต้แรงดัน

ก่อนทำการทดลองได้ทำการทดสอบเครื่องมือว่ามีความผิดพลาดในการประกอบหรือไม่ เช่น ตรวจสอบว่ามีความรั่วซึมของน้ำในเครื่องมือมีมากเกินไปหรือไม่ นอกจากนี้เครื่องมือวัดต่างๆ ที่นำมาใช้ ต้องมีการสอบเทียบ (Calibrate) ด้วยการทดสอบในส่วนต่างๆ มีดังนี้

1) แบบจำลองบ่อบาดาล-ชั้นน้ำ ได้ตรวจสอบรอยเชื่อมเหล็ก และการยึดติดแผ่นพลาสติก และตะแกรงกันทรายกับโครงเหล็ก ตลอดจนตรวจสอบการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันเข้ากับแบบจำลอง เพื่อดูความแข็งแรงมั่นคงและการรั่วซึม ในการทดสอบการรั่วซึมต้องทำการขังน้ำในแบบจำลอง เมื่อพบรอยรั่วก็ใช้ซิลิโคนหรือการอีพ็อกซีในการอุดรอยรั่ว ขณะที่การทดสอบความสามารถในการรับแรงดัน และความมั่นคงของส่วนประกอบต่างๆ ทำได้โดยการทดลองในสภาพใช้งานจริง โดยเพิ่มแรงดันน้ำจนถึงจุดที่ออกแบบ

2) ระบบหมุนเวียนน้ำ การทดสอบในส่วนระบบหมุนเวียนน้ำ และฝายวัดอัตราการไหล ต้องตรวจสอบในส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบถังเก็บน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าสามารถเก็บกักน้ำได้เพียงพอต่อการใช้งานในการทดลองหรือไม่ และตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำออกจากถังเก็บน้ำบริเวณรอยเชื่อมเหล็ก
- ตรวจสอบระบบท่อ ทั้งท่อแข็ง (ท่อเหล็ก) และท่ออ่อน (ท่อสายยาง) โดยตรวจสอบการรั่วซึมบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างท่อกับท่อ และระหว่างกับแบบจำลอง พร้อมทั้งตรวจสอบความสามารถในการรับแรงดัน
- ตรวจสอบวาล์วในระบบหมุนเวียนน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าติดตั้งถูกตำแหน่งหรือไม่ตลอดตรวจดูจนการรั่วซึมของน้ำบริเวณเชื่อมต่อกับท่อ
- ตรวจสอบการติดตั้งฝาย เพื่อตรวจสอบว่าเกิดการรั่วของน้ำบริเวณจุดที่ทำการติดตั้งหรือไม่

3) ระบบควบคุม วัด จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูล ในการทดสอบส่วนนี้จะเป็นการทดลองใช้งานและการสอบเทียบเครื่องมือวัด ได้แก่

### 3.1) เครื่อง Data Logger

เนื่องจากเครื่อง Data Logger จะทำหน้าที่รับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งมาจากเซนเซอร์วัดความดัน แล้วเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้ามาเป็นค่าความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ มิลลิเมตรของปรอท) ตามสมการที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ เนื่องจากในการศึกษาจะใช้ค่าระดับความดันหรือเฮด (เมตรของน้ำ) แทนค่าความดัน จึงต้องทำการสอบเทียบว่าเมื่อใส่แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานให้กับเครื่อง Data Logger แล้ว ค่าระดับความดันที่คำนวณได้จากเครื่อง Data Logger แตกต่างกับค่าจริงหรือไม่ ผลจากการสอบเทียบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 0.1% เท่านั้น โดยมีรายละเอียดข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Data Logger แสดงไว้ในภาคผนวก ข

### 3.2) เซนเซอร์วัดความดัน

เมื่อทดลองใช้งานเซนเซอร์วัดความดันที่เกิดขึ้นในการไหลจริงพบว่า เซนเซอร์มีความไวต่อการเปลี่ยนความดันมาก จึงต้องทำการทดสอบว่าในการนำค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ไปใช้งาน จะต้องทำการเก็บค่าระดับความดันด้วยอัตราในการเก็บเท่าไร และใช้ระยะเวลาเท่าไร เพื่อที่จะให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องมากที่สุด จากการเปรียบเทียบค่าระดับความดัน (เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่นำไปสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐานกับค่าระดับความดันที่วัดได้โดยสายยางวัดระดับน้ำซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ถูกต้อง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-1 และ 3-2

จากตารางที่ 3-1 จะเห็นได้ว่าอัตราการเก็บค่าความดันทุกๆ 1 วินาที จะให้ค่าความดันเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าความดันจริง (ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย) และจากตารางที่ 3-2 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการเก็บไม่ส่งผลต่อความถูกต้อง ดังนั้นในการศึกษาจะเก็บค่าความดันที่วัดได้โดยเซนเซอร์วัดความดันทุกๆ 1 วินาที ด้วยระยะเวลาในการเก็บประมาณ 5 นาที ซึ่งจะได้ค่าความดันทั้งสิ้น 300 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนค่าระดับความดันที่วัดได้

เซนเซอร์วัดความดันแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดแรกเป็นเซนเซอร์วัดความดันที่นำไปสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐาน เพื่อยืนยันว่าเซนเซอร์ที่นำมาใช้ได้มาตรฐาน และให้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าตามที่คุณผลิตแนะนำ เมื่อผ่านการสอบเทียบ (ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) พบว่าเซนเซอร์วัดความดันที่นำไปสอบเทียบนี้ สามารถวัดความดันได้ใกล้เคียงกับความดันจริงมาก ชุดที่สองเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้นำมาสอบเทียบกับเซนเซอร์ตัวที่นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อหาสมการปรับแก้ค่าระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์ที่ไม่ได้นำไปสอบเทียบ พบว่า เซนเซอร์บางตัวไม่สามารถวัดค่าความดันได้ หรือค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูง การทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้เซนเซอร์ที่วัดได้ใกล้เคียงกับตัวที่นำไปสอบเทียบเท่านั้น โดยสมการปรับแก้ระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวแสดงไว้ในภาคผนวก ข

### 3.3) ฝ่ายวัดอัตราการไหล

ทำการสอบเทียบฝ่ายวัดอัตราการไหลในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ขั้นพื้นฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล โดยใช้ถังวัดอัตราการไหลซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ เมื่อ  $Q = 0.0438h_{weir}^{1.539}$  เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/วินาที) และ  $h_{weir}$  คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (เมตร) รายละเอียดข้อมูลจากการสอบเทียบฝ่ายวัดอัตราการไหลแสดงไว้ในภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-1 ผลของอัตราการเก็บข้อมูลระดับความดันต่อความถูกต้องของค่าระดับความดัน จากการวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน

ระดับความดันจริง (ม.)	อัตราการเก็บข้อมูล (Sampling Time)											
	ทุก 1 วินาที			ทุก 2 วินาที			ทุก 5 วินาที			ทุก 10 วินาที		
	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.
0.218	0.211	3.073	0.106	0.206	5.321	0.106	0.206	5.657	0.107	0.184	15.749	0.118
0.692	0.676	2.327	0.115	0.666	3.719	0.125	0.655	5.323	0.146	0.628	9.200	0.167
1.182	1.159	1.935	0.124	1.151	2.634	0.133	1.141	3.511	0.119	1.152	2.538	0.129
1.700	1.674	1.549	0.113	1.662	2.251	0.119	1.683	1.020	0.101	1.670	1.745	0.083
2.210	2.182	1.285	0.119	2.173	1.668	0.119	2.174	1.614	0.116	2.176	1.523	0.110
2.578	2.555	0.895	0.124	2.565	0.499	0.112	2.573	0.181	0.104	2.589	0.427	0.096
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	1.844			2.682			2.884			5.197		

หมายเหตุ : ข้อมูลมาจากการเดินระบบและเก็บข้อมูลความดันเป็นเวลา 5 นาที (300 วินาที)

ตารางที่ 3-2 ผลของระยะเวลาการเก็บข้อมูลระดับความดันต่อความถูกต้องของค่าระดับความดัน จากการวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน

ระดับความดันจริง (ม.)	ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล											
	90 วินาที			120 วินาที			240 วินาที			300 วินาที		
	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.	เฉลี่ย (ม.)	% diff	S.D.
0.218	0.215	1.529	0.103	0.210	3.746	0.101	0.208	4.683	0.107	0.211	3.073	0.106
0.692	0.678	2.007	0.114	0.682	1.493	0.118	0.677	2.186	0.116	0.676	2.327	0.115
1.182	1.140	3.582	0.132	1.146	3.025	0.128	1.154	2.408	0.126	1.159	1.935	0.124
1.700	1.678	1.288	0.106	1.675	1.456	0.113	1.677	1.370	0.110	1.674	1.549	0.113
2.210	2.183	1.212	0.109	2.181	1.316	0.109	2.179	1.425	0.120	2.182	1.285	0.119
2.578	2.564	0.534	0.124	2.559	0.724	0.126	2.552	1.025	0.127	2.555	0.895	0.124
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	1.692			1.960			2.183			1.844		

### 3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

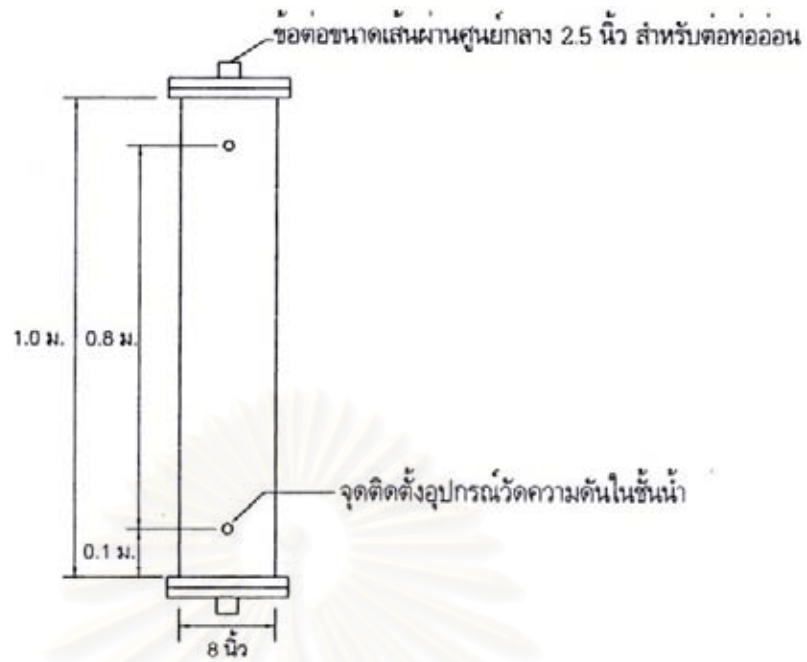
อุปกรณ์และเครื่องมืออื่นที่ใช้ในการทดลองที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2 เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองของการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะต้องทำการทดลองอื่นๆ ได้แก่ การไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอก เพื่อหาคุณสมบัติทางศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ การกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ และการหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ โดยมีรายละเอียดอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1) เพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอก ทำจากท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 8 นิ้ว หนา 0.5 เซนติเมตร และ สูง 1.0 เมตร ด้านบนและล่างเป็นหน้าแปลนเพื่อต่อกับหน้าแปลนพีวีซีพร้อมข้อต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เพื่อต่อท่ออ่อนเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเต็มน้ำใต้ดิน มีการเจาะรูทำเกลียวเพื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ระดับ 10 และ 90 เซนติเมตรจากหน้าแปลนด้านล่าง ลักษณะของเพอร์เมียมิตอร์ แสดงดังรูปที่ 3-4

2) อุปกรณ์ทดลองการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ ประกอบด้วยชุดตะแกรงมาตรฐานขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-5 เครื่องเขย่า (Mechanical Shaker) สำหรับเขย่าชุดตะแกรง และเครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับชั่งน้ำหนักทรายที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด เนื่องจากทรายนำมาใช้ในการทดลองมีขนาดในช่วงประมาณ 1-2 มิลลิเมตร จึงใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 8 10 16 20 30 50 100 และ 200 ที่มีขนาดช่องเปิด 4.76 2.36 1.65 1.19 0.83 0.59 0.3 0.149 และ 0.074 มิลลิเมตรตามลำดับ

3) อุปกรณ์ทดลองหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ ประกอบด้วยขวดหาความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer) แบบขวดตวงปากเล็ก (Volumetric Flask) ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใช้ในการหาความถ่วงจำเพาะของดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่ เตาอบสำหรับอบแห้งให้ทรายเพอร์เมียมิตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องชั่งน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-4 ลักษณะของเพอร์มิเอมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Sand and Gravel		
in	mm	U.S. Std. Sieve No.
0.132	3.35	6
0.093	2.36	8
0.066	1.68	12
0.047	1.19	16
0.033	0.84	20
0.023	0.58	30
0.017	0.43	40
0.012	0.30	50
Bottom pan		
Coarse Sand		
0.047	1.19	16
0.033	0.84	20
0.023	0.58	30
0.017	0.43	40
0.012	0.30	50
0.008	0.20	70
Bottom pan		
Fine Sand		
0.023	0.58	30
0.017	0.43	40
0.012	0.30	50
0.008	0.20	70
0.006	0.15	100
Bottom pan		

รูปที่ 3-5 ชุดตะแกรงมาตรฐาน

### 3.5 เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ ได้กำหนดเงื่อนไขการทดลองโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองหาคคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำ ได้แก่ การกระจายขนาดอนุภาค และความถ่วงจำเพาะ (ความถ่วงจำเพาะนำไปใช้ในการคำนวณความพรุนของทรายชั้นน้ำ) ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองการไหลของน้ำใต้ดิน หรือการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน ดังนี้

1) การทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมอเมเตอร์ (Permeability Test) เพื่อหาคคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำ หรือ พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลของน้ำผ่านตัวกลาง

2) การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล (Converging and Diverging Well Flow) ซึ่งทำการทดลองการไหลในแนวรัศมี เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ภายใต้สภาวะคงตัว และภายใต้สภาวะไม่คงตัว พร้อมทั้งเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลตลอดจนหาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลดังกล่าว

การศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างทรายชั้นน้ำ 4 ชนิด โดยกำหนดสัญลักษณ์และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

#### 3.5.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดลอง

S	คือ	ทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการทดลองจำนวน 4 ชนิด (S1-S4)
SA	คือ	การทดลองหาการกระจายอนุภาคทรายชั้นน้ำ ช่วงก่อนการทดลอง (SA1) และช่วงหลังการทดลอง (SA2)
SG	คือ	การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของอนุภาคทรายชั้นน้ำ
ST	คือ	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล 14 ค่า (ST1-ST14)
CR	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่ 15 ค่า (CR1-CR15)
DR	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่ 15 ค่า (DR1-DR15)
CRI	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่เพิ่มขึ้น ทั้งหมด 7 รูปแบบ (CRI1-CRI7) ดังรูปที่ 3-6
DRI	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่เพิ่มขึ้น ทั้งหมด 7 รูปแบบ (DRI1-DRI7) ดังรูปที่ 3-6
CRD	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่ลดลง ทั้งหมด 7 รูปแบบ (CRD1-CRD7) ดังรูปที่ 3-7

- DRD คือ การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วย อัตราการไหลต่อเวลาที่ลดลง ทั้งหมด 7 รูปแบบ (DRD1-DRD7) ดังรูปที่ 3-7
- CRS คือ การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ ทั้งหมด 7 รูปแบบ (CRS1-CRS7) ดังรูปที่ 3-8
- DRS คือ การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลต่อเวลาที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ ทั้งหมด 7 รูปแบบ (DRS1-DRS7) ดังรูปที่ 3-8

ตัวอย่างการแปลความหมายของสัญลักษณ์การทดลอง

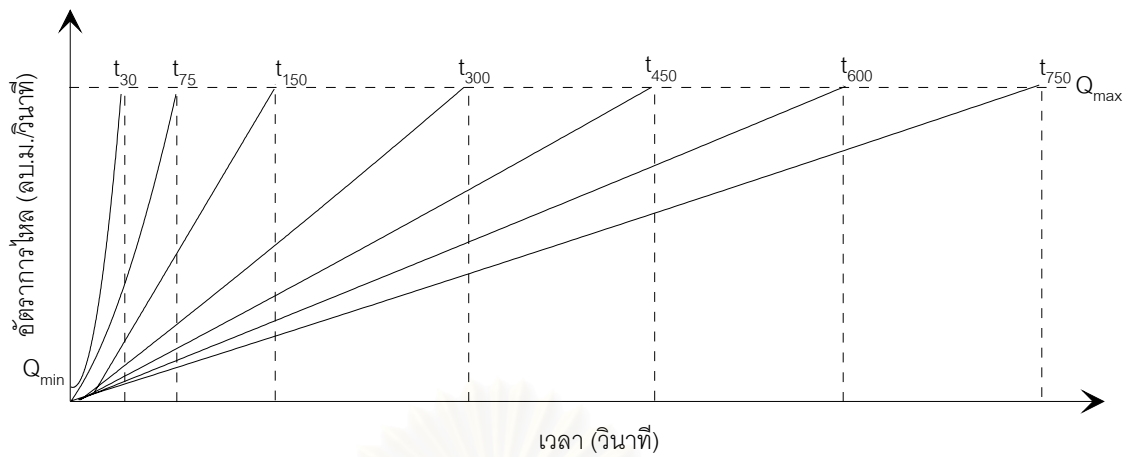
- SA1/S2 คือ การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ช่วงก่อนทำการทดลอง
- SG/G2 คือ การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2
- ST1/S1 คือ การทดลองการไหลแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ด้วยอัตราการไหล Q1
- CR2/S2 คือ การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่ ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ด้วยอัตราการไหล Q2
- DRS3/S4 คือ การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์รูปแบบที่ 3 ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4

### 3.5.2 รายละเอียดเงื่อนไขการทดลอง

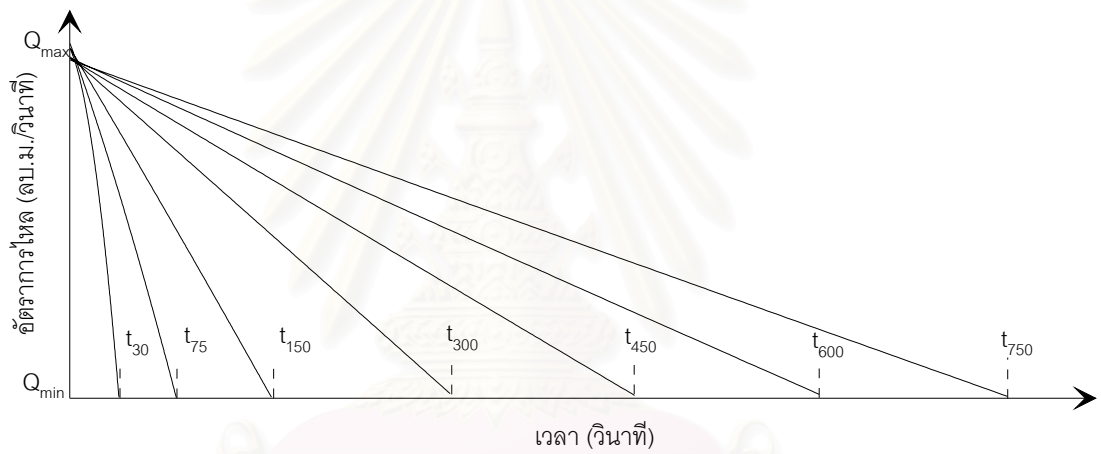
การศึกษาคั้งนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนหลักดังที่กล่าวข้างต้น โดยในส่วนการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำมี 2 ชุดการทดลอง และการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินมี 9 ชุดการทดลอง รวมเป็น 11 ชุดการทดลองหลัก รวมชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการทั้งหมด 356 ชุด โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3-3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

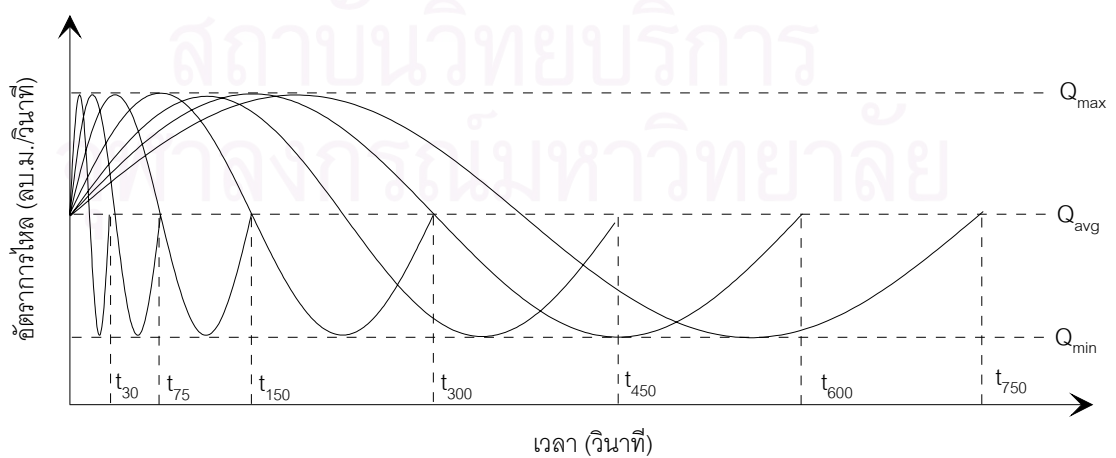




รูปที่ 3-6 รูปแบบการเพิ่มอัตราการไหลของการทดลอง CR1/S1-CR7/S4 และ DR1/S1-DR7/S4



รูปที่ 3-7 รูปแบบการลดอัตราการไหลของการทดลอง CRD1/S1-CRD7/S4 และ DRD1/S1-DRD7/S4



รูปที่ 3-8 รูปแบบอัตราการไหลแบบไซน์ของการทดลอง CRS1/S1-CRS7/S4 และ DRS1/S1-DRS7/S4

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดเงื่อนไขการทดลอง

ชุดการทดลองหลัก	ลักษณะการทดลอง	สัญลักษณ์	จำนวนชุดการทดลอง
1	การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ	SA1/S1-SA2/S4	8
2	ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคทรายชั้นน้ำ	SG/S1-SG/S4	4
3	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน	ST1/S1-ST14/S4	56
4	การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่	CR1/S1-CR15/S4	60
5	การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่	DR1/S1-DR15/S4	60
6	การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น	CRI1/S1-CRI7/S4	28
7	การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น	DRI1/S1-DRI7/S4	28
8	การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง	CRD1/S1-CRD7/S4	28
9	การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง	DRD1/S1-DRD7/S4	28
10	การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์	CRS1/S1-CRS7/S4	28
11	การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์	DRS1/S1-DRS7/S4	28

### 3.6 ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 11 ชุดการทดลองหลักดังที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งแต่ละชุดการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ (SA1/S1-SA2/S4)

การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคชั้นน้ำ ต้องทำทั้งก่อนและหลังการทดลองการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของการกระจายขนาดของอนุภาคช่วงก่อนและหลังการทดลอง และเพื่อตรวจสอบว่ามีทรายหลุดออกไปขณะทำการทดลองหรือไม่ โดยการทดลองจะทำตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

นำทรายตัวอย่างที่แห้งประมาณ 500 กรัม มาร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 8 10 16 20 30 50 100 และ 200 ที่มีขนาดช่องเปิด 4.76 2.36 1.65 1.19 0.83 0.59 0.30 0.149 และ 0.074 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเรียงลำดับให้ตะแกรงเบอร์ 4 อยู่ด้านบนสุด และด้านล่างสุดให้รองด้วยถาดรองรับ นำชุดตะแกรงที่ใส่ทรายตัวอย่างไปร่อนโดยใช้เครื่องเขย่าด้วยเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นก็นำตัวอย่างทรายที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาดมาชั่ง เพื่อหาน้ำหนักทรายที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด และนำไปวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำต่อไป

#### 3.6.2 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของอนุภาคทรายชั้นน้ำ (SG/S1-SG/S4)

การหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ ต้องทราบน้ำหนักของทรายที่อบแห้งและน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทรายใช้ทดลอง เพื่อนำไปคำนวณหาความถ่วงจำเพาะโดยน้ำหนักทรายอบแห้งนั้นสามารถหาได้โดยง่าย แต่น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทรายที่ใช้ในการทดลอง หาได้โดยการนำทรายที่ใช้ไปแทนที่น้ำในขวดหาความถ่วงจำเพาะ ซึ่งจะเกิดฟองอากาศเล็กๆ ปนอยู่ในน้ำผสมทราย และน้ำหนักของน้ำในขวดหาความถ่วงจำเพาะที่ระดับปากขวดจะเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ จึงต้องมีเทคนิคการแก้ปัญหาดังกล่าวต่อไปนี้

- 1) กำจัดฟองอากาศโดยใช้ปั๊มดูดอากาศ หรือต้มไล่ฟองอากาศ
- 2) ชั่งน้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำอยู่ที่ระดับขีดคอขวด ที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วเขียนเป็นกราฟสำหรับปรับแก้ เรียกขั้นตอนนี้ว่า "Calibration of Volumetric Flask"

การทดลองเพื่อหาความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D 854-58 มีขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) การหากราฟสำหรับหาน้ำหนักน้ำและขวดหาความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อนำขวดหาความถ่วงจำเพาะใหม่มาใช้ หรือเมื่อใช้ไปนานพอสมควร ต้องทำการหากราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็ม และอุณหภูมิโดยสามารถทำได้ดังนี้

- ล้างขวดหาความถ่วงจำเพาะให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดคอขวด (อ่านค่าที่ระดับที่องน้ำ)
- ต้มไถ่ฟองอากาศ หรือดูดโดยปั๊มอากาศ ประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด
- เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับคอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกันมาก ให้ตะแคงแล้วกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดี ทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับลำดับที่ 3 และ 4 โดยให้ความร้อน หรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิใช้งาน (20-40 องศา) ประมาณ 4-5 จุด
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มกับอุณหภูมิ

## 2) การหาน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทราย และน้ำหนักทรายอบแห้ง

- นำทรายตัวอย่างที่แห้งประมาณ 50 กรัม ผสมน้ำกลั่นแล้วกวนให้เข้ากัน โดยให้ส่วนผสมไม่เกิน 450 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- เทส่วนผสมน้ำและทรายลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะ ลงในขวดให้หมด ระวังอย่าให้ระดับน้ำเกินขีดวัดที่คอขวด
- ต้มไถ่ฟองอากาศ หรือดูดโดยปั๊มอากาศประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมดแล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดวัดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง
- ถ้าระดับน้ำลด ให้เติมน้ำเต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำดินในขวด
- เทแล้วล้างส่วนผสมในขวดหาความถ่วงจำเพาะ ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในภาชนะนำไปอบให้แห้งเพื่อชั่งหาน้ำหนักดินอบแห้ง

### 3.6.3 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน (ST1/S1-ST14/S4)

การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ทำการทดสอบโดยวิธีความดันคงที่ โดยวิธีการทดลองดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D 2434-68 โดยใช้เพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอก ระบบหมุนเวียนน้ำ และระบบควบคุม วัด และจัดเก็บข้อมูลของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

#### 1) ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง

- เตรียมทรายชั้นน้ำที่จะทำการทดสอบ โดยการผึ่งให้แห้ง
- ประกอบหน้าแปลนล่างเข้ากับตัวเพอร์เมียมิตอร์แล้วนำไปใส่ชาตัง
- ใส่ทรายชั้นน้ำที่จะทดสอบลงในเพอร์เมียมิตอร์ที่มีน้ำบรรจุอยู่บางส่วนเมื่อใส่ทรายจนเต็มและแน่นดีแล้วจึงทำการปิดหน้าแปลนด้านบน และบันทึกค่าน้ำหนักทรายที่ใส่ลงไป
- ต่อท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนของเพอร์เมียมิตอร์ เข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำที่ข้อต่อ A โดยเปิดวาล์ว GV1 และ GV2 ปิดวาล์ว GV3 และ GV4 (ดูรูปที่ 3-1) และต่อท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนล่างของเพอร์เมียมิตอร์ ฝั่งลงวางระบายน้ำ เริ่มเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ น้ำส่วนส่วนหนึ่งหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass จากนั้นค่อยๆห้วาล์ว GV1 จนปิดสนิท ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้ น้ำอัดจากด้านบนสู่ด้านล่างของเพอร์เมียมิตอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูงกว่าที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้เกิดแรงดันหรืออัตราการไหลที่มากกว่าที่ใช้ในการทดลองซึ่งจะทำให้ทรายแน่นขึ้นโดยจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที
- ถอดหน้าแปลนด้านบนออกเพื่อตรวจสอบว่า ทรายที่บรรจุอยู่เพอร์เมียมิตอร์มีการยุบตัวหรือไม่ ถ้ามีการยุบตัวต้องใส่ทรายเพิ่ม แล้วทำการขั้นตอนก่อนหน้านี้จนไม่มีการยุบตัวของทราย บันทึกค่าน้ำหนักทรายแห้งทั้งหมดที่ใส่ลงในเพอร์เมียมิตอร์เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความพรุน แล้วจึงเริ่มทำการทดลองโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับความดัน

#### 2) ขั้นตอนการทดลอง

- ต่อข้อต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนล่างของเพอร์เมียมิตอร์ เข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำที่ข้อต่อ A โดยเปิดวาล์ว GV1 และ GV2 ปิดวาล์ว GV3 และ GV4 (ดูรูปที่ 3-1) และต่อท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนบนของเพอร์เมียมิตอร์ ลงวางวัดอัตราการไหลเดินเครื่องสูบน้ำ น้ำจากถังเก็บน้ำจะไหลเข้าสู่เพอร์เมียมิตอร์จากด้านล่างขึ้นบน และน้ำส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass จากนั้นจึงค่อยๆห้วาล์ว GV1 จนปิดสนิท

ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้ได้อัตราการไหลที่ต้องการ โดยดูจากระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) และระดับความดันที่จุดวัดที่ระยะ 10 และ 90 เซนติเมตร จากหน้าแปลนด้านล่าง บันทึกเป็น  $h_D$  และ  $h_U$  ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3-4) ระหว่างการทดลองให้บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลองด้วยเพื่อนำไปหาค่าความหนืดเปรียบเทียบของน้ำ ( $\nu$ ) ที่ใช้ในการทดลอง

- ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดการไหลอีกค่าหนึ่ง รอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จึงบันทึกค่า  $h_{weir}$   $h_D$  และ  $h_U$  ทำตามขั้นตอนนี้จนครบทั้ง 14 ค่าอัตราการไหลเพื่อให้เกิดการไหลผ่านตัวกลางทั้งการไหลแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น โดยอัตราการไหลต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองมีระดับน้ำเหนือสันฝายประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลโดยให้ระดับน้ำเหนือสันฝาย เพิ่มขึ้นครึ่งละประมาณ 0.5 เซนติเมตรและอัตราการไหล 5 ค่าสุดท้าย ให้ระดับน้ำเหนือสันฝาย เพิ่มขึ้นครึ่งละประมาณ 0.5 เซนติเมตรและอัตราการไหล 5 ค่าสุดท้าย ให้ระดับน้ำเหนือสันฝายเพิ่มขึ้นครึ่งละประมาณ 1 เซนติเมตร
- จากผลการทดลองที่ได้นำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล กับความชันชลศาสตร์ต่อไป

### 3.6.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่ (CR1/S1-CR15/S4)

การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง
  - เตรียมทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยการผึ่งให้แห้ง
  - ถอดบ่อน้ำบาดาลทดลองออกจากแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ใช้เขรยักด้านหัวของแบบจำลองขึ้นเพื่อให้แบบจำลองเอียง จากนั้นจึงใส่น้ำลงไปบางส่วน แล้วใส่ทรายชั้นน้ำลงไปจนเต็ม เมื่อทรายเต็มและแน่นดีแล้วก็ทำการประกอบบ่อน้ำบาดาลเข้ากับแบบจำลอง บันทึกค่าน้ำหนักทรายที่ใส่ลงไปแบบจำลอง
  - ต่อท่ออ่อนเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำ โดยท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากบ่อน้ำบาดาลต่อเข้าทางข้อต่อ A และท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวน 7 เส้น จากด้านท้ายแบบจำลองต่อเข้าทางข้อต่อ B เปิดวาล์ว GV1 GV2 และ GV6 ปิดวาล์ว GV3 GV4 GV5 และ BV1 (ดูรูปที่ 3-1) เริ่มเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อให้น้ำไหลเข้าแบบจำลองทางบ่อน้ำบาดาล ขณะที่น้ำส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass จากนั้นค่อยๆ หรีวาล์ว GV1 จนปิดสนิท ปรับ

ความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดแรงดันหรืออัตราการไหลที่มากกว่าที่ใช้ในการทดลองซึ่งจะทำให้ทรายแน่นขึ้นโดยจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที

- ถอดบ่อน้ำบาดาลทดลองออกเพื่อตรวจสอบว่าทรายที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองมีการยุบตัวหรือไม่ ถ้ามีการยุบตัวจะต้องใส่ทรายเพิ่ม แล้วทำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้จนไม่มีการยุบตัวของทราย บันทึกค่าน้ำหนักทรายแห้งทั้งหมดที่ใส่ในแบบจำลองเพื่อนำไปจำลองหาค่าความพรุน แล้วจึงเริ่มทำการทดลองโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าระดับความดันตามตำแหน่งที่ต้องการ
- ตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างชุดแยกสัญญาณ (Isolated RS232 Interface) และสายส่งข้อมูล (RS232 to RJ45 Adapter) ไปยังตัวปรับความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำ (Inverter) และสายรับข้อมูล (RS232 Interface) จากเครื่อง Data Logger มายังเครื่องคอมพิวเตอร์

## 2) ขั้นตอนการทดลอง

- ในการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล น้ำจากระบบหมุนเวียนน้ำต้องไหลเข้าแบบจำลองทางด้านท้าย แล้วจึงไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลลงสู่รางวัดอัตราการไหลและถังเก็บน้ำ จึงต้องทำการเปิดวาล์ว GV1 GV3 GV4 GV5 และ BV1 และปิดวาล์ว GV2 และ GV6 (ดูรูปที่ 3-1)

- เปิดโปรแกรมควบคุมการทดลอง เลือกคำสั่งเพื่อเดินเครื่องสูบน้ำ น้ำส่วนหนึ่งจะไหลเข้าแบบจำลองทางด้านท้ายขณะที่น้ำอีกส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass จากนั้นจึงค่อยๆ ห้วาล์ว GV1 จนปิดสนิท รอจนระดับน้ำเหนือสันฝายที่หลอดวัดระดับน้ำไม่เปลี่ยนแปลง หรือสังเกตได้จากค่าที่วัดได้จากหน้าจอแสดงผลมีค่าคงที่ จึงทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) และชั้นน้ำ ( $h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$ ) ในช่วงที่ทำการทดลองให้บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลองด้วยเพื่อนำไปหาค่าความหนืดเปรียบเทียบของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

- ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดการไหลอีกค่าหนึ่ง รอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงบันทึกค่า  $h_{weir}, h_w, h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$  ทำตามขั้นตอนนี้จนครบทั้ง 15 ค่าอัตราการไหล
- นำผลการทดลองที่ได้ ไปวิเคราะห์พฤติกรรมทางศาสตร์ต่อไป

สาเหตุที่ต้องทำการทดลองด้วยอัตราการไหลทั้ง 15 ค่า เนื่องจากต้องการให้เกิดสภาพการไหลในชั้นน้ำ 3 รูปแบบ ได้แก่

- การไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ (Linear Flow) จะเกิดขึ้นเมื่อค่ารัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ ) มีค่าน้อยกว่ารัศมีของบ่อน้ำบาดาล ( $r_w$ )

- การไหลแบบไม่เชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ (Non-linear Flow) จะเกิดขึ้นเมื่อค่ารัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล มีค่ามากกว่า 1.99 เมตร ( $r_{cr} > 1.99$ ) โดยที่ระยะ 1.99 เมตร จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลเป็นตำแหน่งสุดท้ายของการติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับความดันในชั้นน้ำซึ่งอยู่ห่างจากบ่อน้ำบาดาลมากที่สุด

- การไหลแบบผสม (Mixed Flow) คือการไหลแบบเชิงเส้นบริเวณที่อยู่ไกลจากบ่อน้ำบาดาล และการไหลแบบไม่เชิงเส้นบริเวณที่อยู่ใกล้บ่อน้ำบาดาล จะเกิดขึ้นเมื่อค่า  $r_w < r_{cr} < 1.99$

เนื่องจากการใช้รัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาลในการแบ่งสภาพการไหลในการทดลองอาจเข้าใจได้ยาก ในที่นี้จึงใช้ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $Re'_{wf}$ ) เป็นตัวแบ่งสภาพการไหลจากสมการที่

$$2-13 \text{ ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อน้ำบาดาล } Re'_{wf} = \left(\frac{v_{wf}}{\phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{v}\right) = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{r_w}\right) \text{ หรือ}$$

$$\left(\frac{Q}{2\pi m v \phi}\right) = Re'_{wf} \left(\frac{r_w}{d_{50}}\right) \text{ และเมื่อพิจารณาสมการที่ 2-32 } r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{Re'_{cr}}\right) \text{ ดังนั้น}$$

$$r_{cr} = (Re'_{wf}) \left(\frac{r_w}{d_{50}}\right) \left(\frac{d_{50}}{Re'_{cr}}\right) = \left(\frac{Re'_{wf}}{Re'_{cr}}\right) (r_w) \text{ และสามารถแบ่งสภาพการไหลในการทดลองตาม } Re'_{wf} \text{ ดังนี้}$$

- การไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ  $r_{cr} < r_w$

$$\text{หรือ } \left(\frac{Re'_{wf}}{Re'_{cr}}\right) (r_w) < r_w$$

$$\text{นั่นคือ } Re'_{wf} < Re'_{cr} \quad (3-1)$$

- การไหลแบบไม่เชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ  $r_{cr} > 1.99$

$$\text{หรือ } \left(\frac{Re'_{wf}}{Re'_{cr}}\right) (r_w) > r_w$$

$$\text{เมื่อแทนค่า } r_w = 0.2 \text{ ม.}$$

$$\text{นั่นคือ } Re'_{wf} > 9.95 Re'_{cr} \quad (3-2)$$

- การไหลแบบผสม  $r_w \leq r_{cr} \leq 1.99$

$$\text{นั่นคือ } Re'_{cr} \leq Re'_{wf} \leq 9.95 Re'_{cr} \quad (3-3)$$



### 3.6.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่ (DR1/S1-DR15/S4)

การทดลองส่วนนี้จะทำต่อจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4 โดยมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกัน แตกต่างกันเฉพาะทิศทางการไหลของน้ำ การทดลองนี้น้ำจะไหลเข้าสู่แบบจำลองทางด้านบ่อน้ำบาดาล และไหลออกจากบ่อทางด้านท้าย ดังนั้นขั้นตอนที่ 1 ของการทดลองจะต้องทำการเปิดวาล์ว GV1 GV2 และ GV6 และปิดวาล์ว GV3 GV4 GV5 และ BV1 (รูปที่ 3-1) เพื่อให้ น้ำไหลในทิศทางที่ต้องการ ในการทดลองจะใช้ค่าอัตราการไหล 15 ค่า เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

### 3.6.6 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (CRI1/S1-CRI7/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่าดังรูปที่ 3-6 เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

### 3.6.7 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (DRI1/S1-DRI7/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.5 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่าดังรูปที่ 3-6 เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

### 3.6.8 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง (CRD1/S1-CRD7/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าลดลงตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่าดังรูปที่ 3-7 เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

### 3.6.9 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง (DRD1/S1-DRI7/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.5 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าลดลงตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่าดังรูปที่ 3-7 เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

### 3.6.10 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ (CRS1/S1-CRS7/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าเป็นฟังก์ชันของไซน์ตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่าดังรูปที่ 3-8 เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

### 3.6.11 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ (CRS1/S1-CRS7/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.5 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าเป็นฟังก์ชันของไซน์ตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่าดังรูปที่ 3-8 เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

## 3.7 การจัดการข้อมูลจากการทดลอง

ในการทดลองไม่ว่าจะเป็นการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน หรือการทดลองแบบไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล มีข้อมูลที่ต้องทำการคำนวณและปรับแก้ก่อนนำไปใช้ คือ ข้อมูลระดับความดันน้ำ และระดับน้ำเหนือสันฝาย เนื่องจากเซนเซอร์วัดระดับความดันมีความไวต่อการเปลี่ยนความดันมากดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 ขณะที่ข้อมูลระดับน้ำเหนือสันฝายวัดได้โดยใช้เซนเซอร์วัดความดันที่ติดตั้งอยู่ใต้รางวัดอัตราการไหลเทียบกับหลอดวัดระดับน้ำซึ่งติดตั้งไว้ด้านข้างรางวัดอัตราการไหล

ในการวัดระดับความดันโดยใช้หลอดวัดระดับน้ำ สามารถอ่านค่าระดับความดันและระดับน้ำเหนือสันฝายได้โดยตรง แต่ถ้าหากใช้เซนเซอร์วัดความดันต้องอาศัยเครื่อง Data Logger และ

โปรแกรมควบคุมการทดลอง ในการแปลค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาจากเซนเซอร์วัดความดันเป็นระดับความดันหรือระดับน้ำเหนือสันฝาย ซึ่งโปรแกรมควบคุมการทดลองที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้กับเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดินทำหน้าที่ในการถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่อง Data Logger ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูล ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลระหว่างทำการทดลองในทุกๆ ช่วงเวลา (Real Time) ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดของโปรแกรมควบคุมการทดลองจะกล่าวไว้ในภาคผนวก ก

เมื่อเริ่มใช้งานโปรแกรมควบคุมการทดลอง โปรแกรมจะมีหน้าจอหลักดังแสดงในรูปที่ 3-9 ก่อนเริ่มการทดลองต้องกำหนดค่าต่างๆ ของโปรแกรมควบคุมการทดลอง โดยเลือกที่เมนูหลัก “Edit -> Sensors” เพื่อกำหนดค่าของเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีหน้าจอตั้งรูปที่ 3-10 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดัน ค่าปรับแก้ระดับติดตั้ง (Offset) และปรับแก้ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง (Factor) ตามสมการที่ได้จากการสอบเทียบกับเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐานแล้ว จากนั้นกดปุ่ม “OK” เพื่อยืนยันค่าและกลับเข้าสู่หน้าจอหลัก

การปรับแก้ค่าระดับความดันเนื่องจากระดับในการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันต่างกัน เพราะเซนเซอร์วัดความดันที่ใช้เป็นเซนเซอร์แบบวัดความดันเกจ ซึ่งค่าระดับความดันที่ได้คือค่าระดับความดัน ณ จุดที่ทำการติดตั้ง ดังนั้นการปรับแก้ค่าความดันเนื่องจากระดับการติดตั้งจะต้องทำดังนี้

- การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน เนื่องจากเพอร์เมียมิตเตอร์วางในแนวตั้งและวัดความดันในระดับที่ต่างกัน คือ  $h_0$  และ  $h_U$  มีค่าระดับต่างกัน 80 เซนติเมตร จึงต้องบวกระดับที่ต่างกันเข้าไปกับ  $h_{U/LAB}$  ที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันนั้นคือ

$$h_U = h_{U/LAB} + 0.8 \text{ (เมตร)} \quad (3-4)$$

- การทดลองการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ต้องปรับแก้ระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาล เนื่องจากระดับติดตั้งอยู่สูงจากระดับติดตั้งของเซนเซอร์วัดความดันในชั้นน้ำ (ระดับอ้างอิง) เท่ากับ 18 เซนติเมตร จึงต้องทำการปรับแก้ความดันที่บ่อน้ำบาดาล โดยการบวกระดับความดันที่ต่างกันเข้าไปตามสมการ

$$h_w = h_{w/LAB} + 0.18 \text{ (เมตร)} \quad (3-5)$$

จากนั้นไปที่เมนูหลัก “Edit -> New Experiment” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลัก เพื่อกำหนดรายละเอียดการทดลอง ตั้งค่าการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง และรูปแบบการไหล มีหน้าจอตั้งแสดงในรูปที่ 3-11 ซึ่งข้อมูลที่ต้องใส่มีดังต่อไปนี้

- รายละเอียดการทดลองประกอบด้วย การทดลองที่ และผู้ทำการทดลอง

- ค่าการทดลองประกอบด้วย ความถี่ในการจัดเก็บ (Sampling Rate) หรือ เวลาที่กำหนดให้โปรแกรมควบคุมการทดลองทำการเก็บข้อมูล และอุณหภูมิน้ำขณะทำการทดลอง
- วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ ความพรุน ทั้งของวัสดุชั้นน้ำและกรวดกรู (หากมี)
- รูปแบบการไหลประกอบด้วย การไหลแบบคงที่ การไหลแบบเพิ่มขึ้น การไหลแบบลดลง และการไหลแบบฟังก์ชันไซน์ เมื่อทำการเลือกรูปแบบการไหลแล้วกดปุ่ม “แก้ไขค่า...” เพื่อกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ดังหน้าจอในรูปที่ 3-12 จากนั้นกดปุ่ม “OK” เพื่อยืนยันข้อมูลและกลับเข้าสู่หน้าจอหลัก

เมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้วไปที่เมนูหลักเลือก “Run -> New Record” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลัก เพื่อเปิดความหน่วยความจำสำรองของฐานข้อมูล และเข้าสู่หน้าจอแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 3-13 จากนั้นเข้าไปที่เมนูหลักกดปุ่ม “Run -> Warm UP” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลักเพื่อทำการเตรียมพร้อมแบบจำลองให้พร้อมสำหรับการทดลอง เมื่อแบบจำลองพร้อมเข้าไปที่เมนูหลักเลือก “Run -> Run” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลักเพื่อทำการทดลอง ขณะทำการทดลองผลของการทดลองแสดงดังในรูปที่ 3-14

เมื่อเก็บข้อมูลจนกระทั่งครบระยะเวลาในการทดลองแล้วให้เข้าไปที่เมนูหลัก “File -> Save” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอ เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลตาราง (ไฟล์สกุล \*.XLS) ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปประมวลผลเพิ่มเติมได้ดีกว่าโดยใช้โปรแกรม MS Excel มีรูปแบบข้อมูลผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-4

จากตารางที่ 3-4 ข้อมูลในแถวแรก “เวลา” คือ เวลาขณะที่ทำการบันทึกข้อมูลทดลอง ข้อมูลในแถวที่สอง “ $f(t)$ ” คือ ความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ แถวที่สามถึงสิบเจ็ด “P1 ... P15” คือ ข้อมูลระดับความดันน้ำ (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตัวเลข หมายถึงหมายเลขสายสัญญาณ เมื่อสังเกตบางจุดที่ข้อมูลเป็นศูนย์ คือไม่ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดัน และบางจุดมีค่า 62.16 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้สูงสุดของเซนเซอร์วัดความดัน แสดงว่าเซนเซอร์ตัวนั้นเสียหรือสายนำสัญญาณเสีย และข้อมูลในแถวสุดท้าย “P16” คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (มิลลิเมตร)

### ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างผลการทดลองที่เก็บในรูปแบบข้อมูลตาราง

ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา 17:31:00

วันเดือนปี 17/1/2005

การทดลองที่ DR14/S2

ผู้ทำการทดลอง นายเชิดสกุล ตอสกุล

ความถี่ที่ใช้ในการจัดเก็บ 1 วินาที

อุณหภูมิของน้ำ 27 องศาเซลเซียส

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ชั้นน้ำ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.58 มม.

ความถ่วงจำเพาะ 2.661

ความพรุน 0.423

กรวดกู่

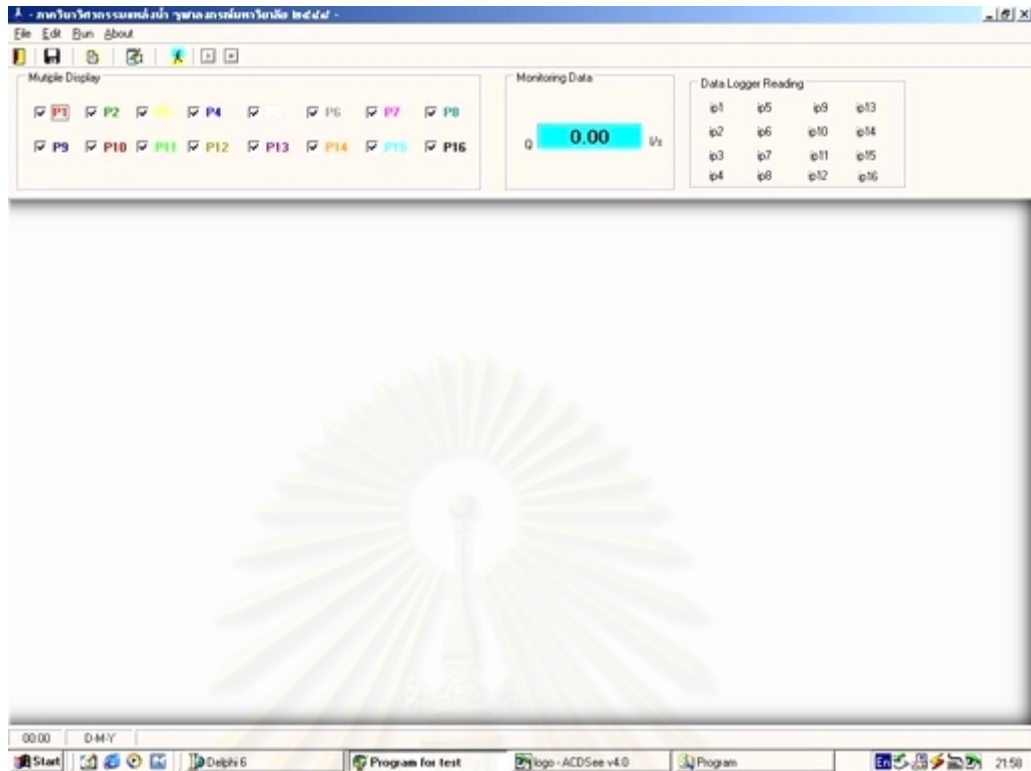
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย - มม.

ความถ่วงจำเพาะ -

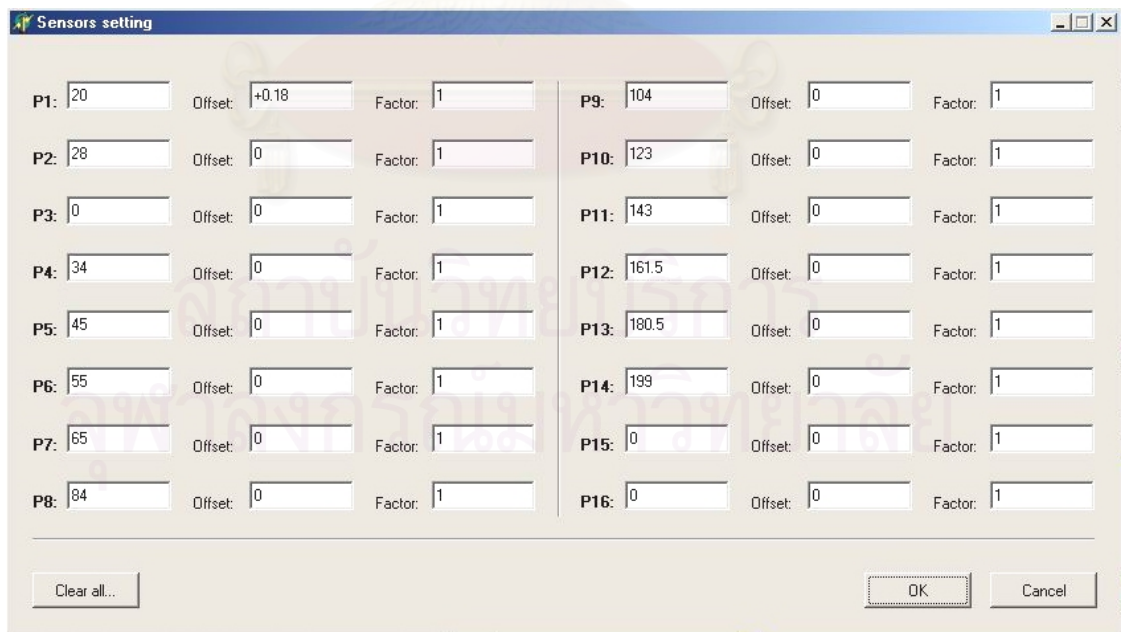
ความพรุน -

รูปแบบการไหล  $f(t) = C$

เวลา	f(t)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
17:31:11	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:12	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:13	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:14	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:15	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:16	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:17	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:18	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:19	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:20	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0
17:31:21	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:22	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:23	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:24	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:25	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:26	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:27	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:28	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:29	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:30	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0
17:31:31	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:32	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:33	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:34	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:35	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:36	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:37	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:38	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:39	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:40	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0



รูปที่ 3-9 หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการทดลอง



รูปที่ 3-10 ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดันและค่าปรับแก้

Experiment

### ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดการทดลอง

การทดลองที่:

ผู้ทำการทดลอง:

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

**ชั้นน้ำ**

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  มม.

ความล้นจำเพาะ

ความพรุน

---

**กรวดกฏ**

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  มม.

ความล้นจำเพาะ

ความพรุน

ตั้งค่าการทดลอง

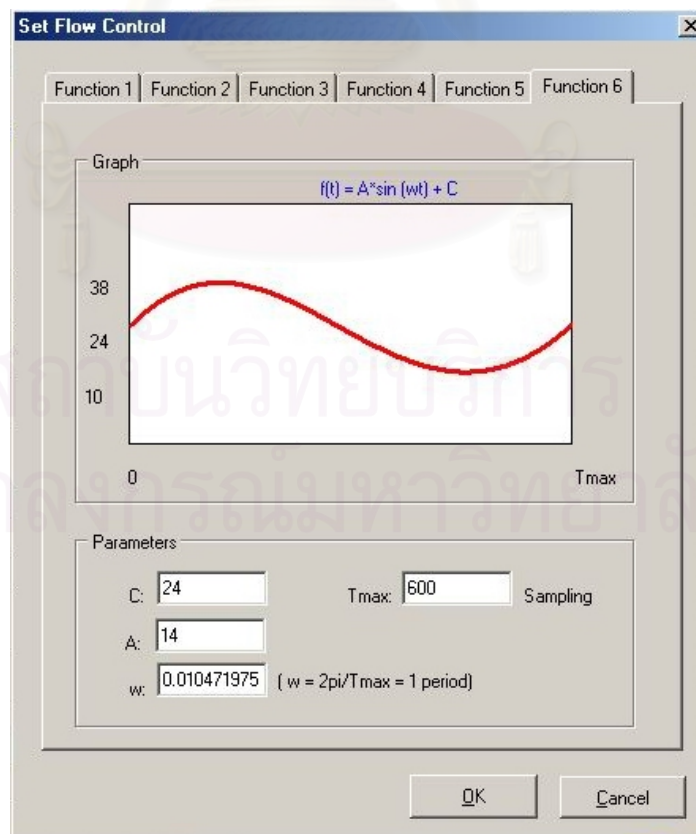
ความถี่ในการจัดเก็บ:  วินาที

ลุ่มทฤษฎีของน้ำ:  องศาเซลเซียส

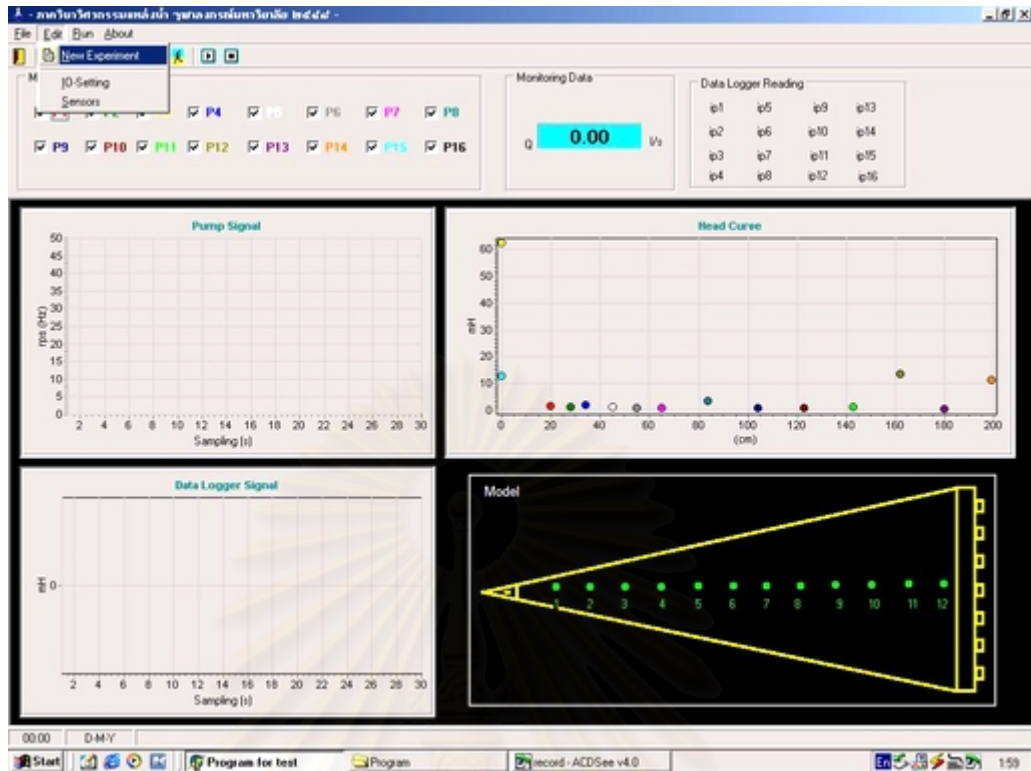
รูปแบบการไหล

รูปแบบ:

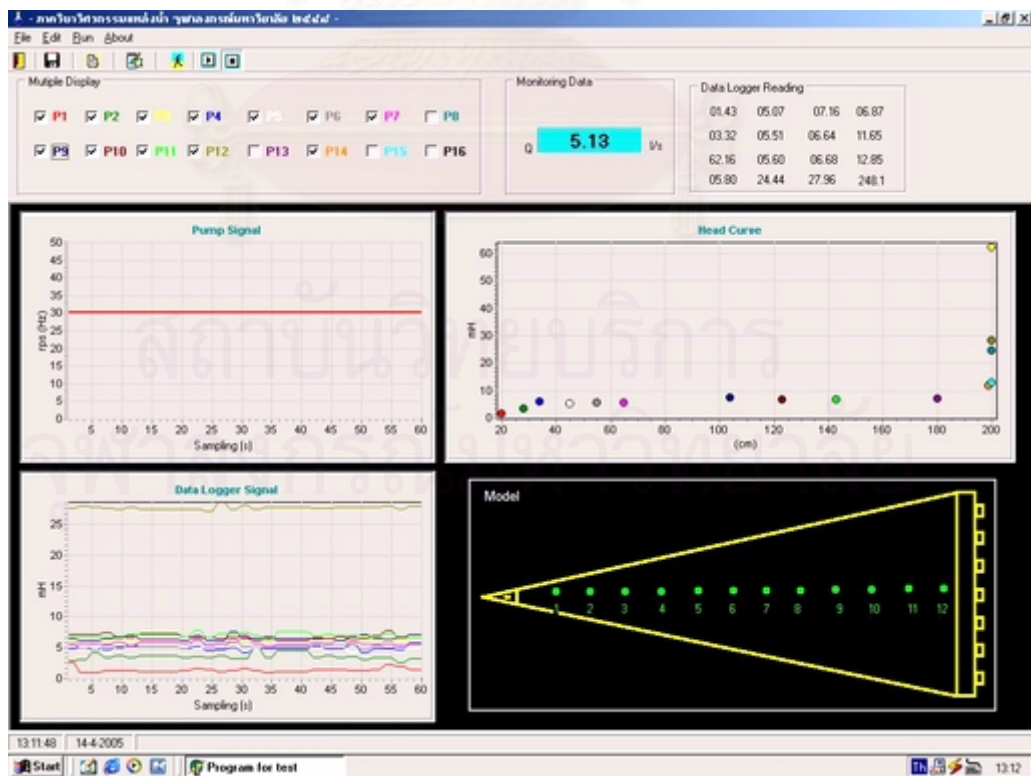
รูปที่ 3-11 หน้าจอสำหรับใส่ข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 3-12 หน้าจอสำหรับใส่ค่ารูปแบบการไหล



รูปที่ 3-13 หน้าจอขณะเตรียมพร้อมแบบจำลอง



รูปที่ 3-14 หน้าจอแสดงผลขณะทำการทดลอง



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้สรุปผลการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 โดยแยกตามประเภทการทดลอง ดังนี้

#### 4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ

การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ ต้องนำทรายที่ใช้ทำการทดลองมาร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน แล้วหาค่าน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาร้อยละสะสมของตัวอย่างทรายที่ค้างและผ่านตะแกรงแต่ละขนาด เมื่อนำตัวอย่างทรายจากช่วงก่อนและหลังจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินมาร่อนผ่านตะแกรงชุดดังกล่าวแล้ว จะได้ค่าร้อยละสะสมของทรายที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4-1

จากตารางที่ 4-1 เห็นได้ว่า ค่าร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงของทรายจากช่วงก่อนและหลังจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างเฉลี่ยมีค่า 0.39 เปอร์เซ็นต์ จึงนำค่าจากสองช่วงมาเฉลี่ยเป็นตัวแทน แล้วนำค่าร้อยละสะสมเฉลี่ยที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด กับขนาดตะแกรงไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษเซมิลอ็คเรียกว่า “กราฟการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ” ดังแสดงในรูปที่ 4-1 จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยหรือขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ค่าสัมประสิทธิ์  $C_u$  และ  $C_c$  ดังแสดงในตารางที่ 4-2 เมื่อพิจารณากราฟการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ หรือจากค่า  $C_u$  และ  $C_c$  ในตารางที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าทราย S1-S4 ที่นำมาใช้เป็นทรายชั้นน้ำในการทดลองเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ เนื่องจากมีค่า  $C_u < 6$  และ  $C_c \leq 1$  และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

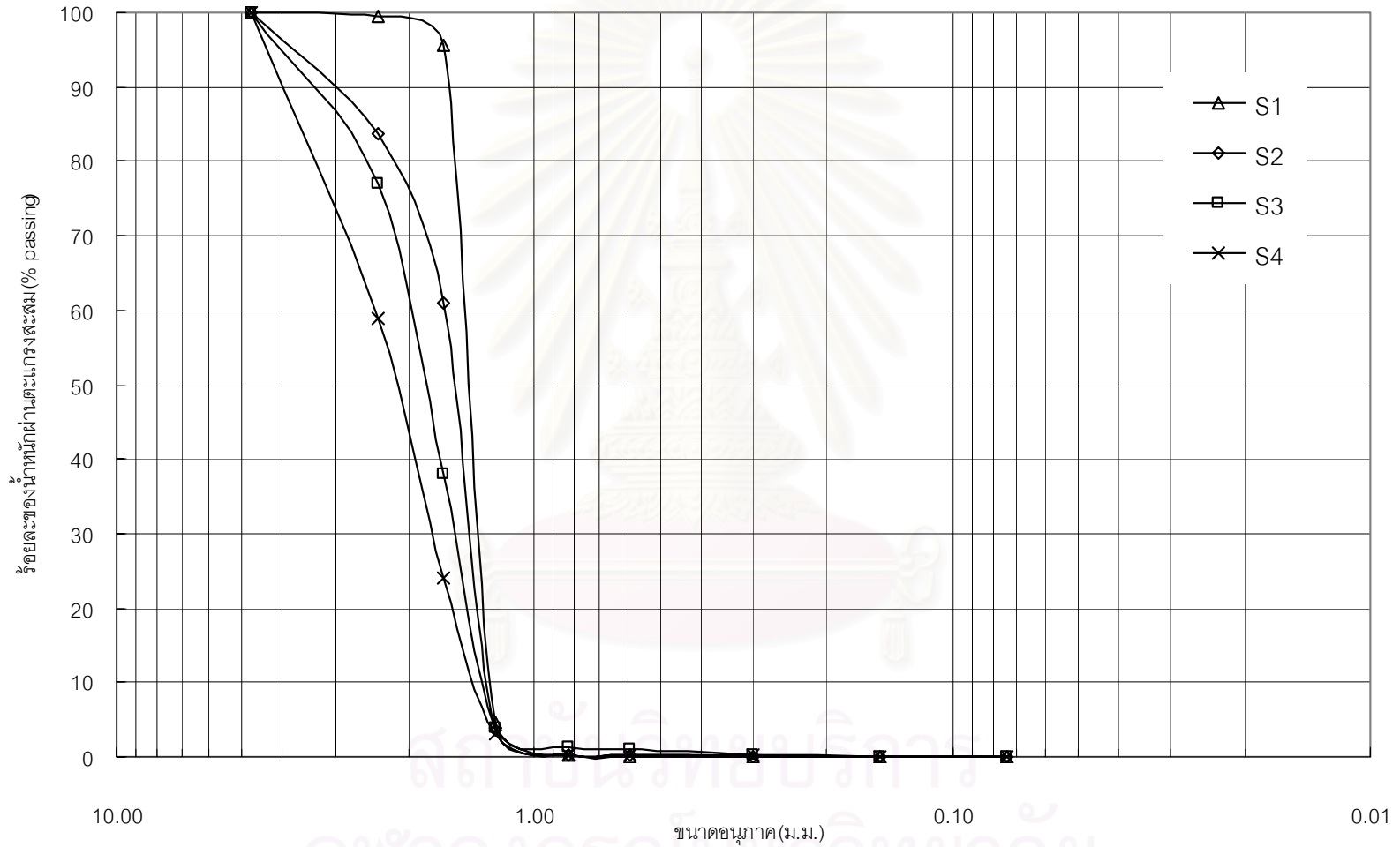
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ

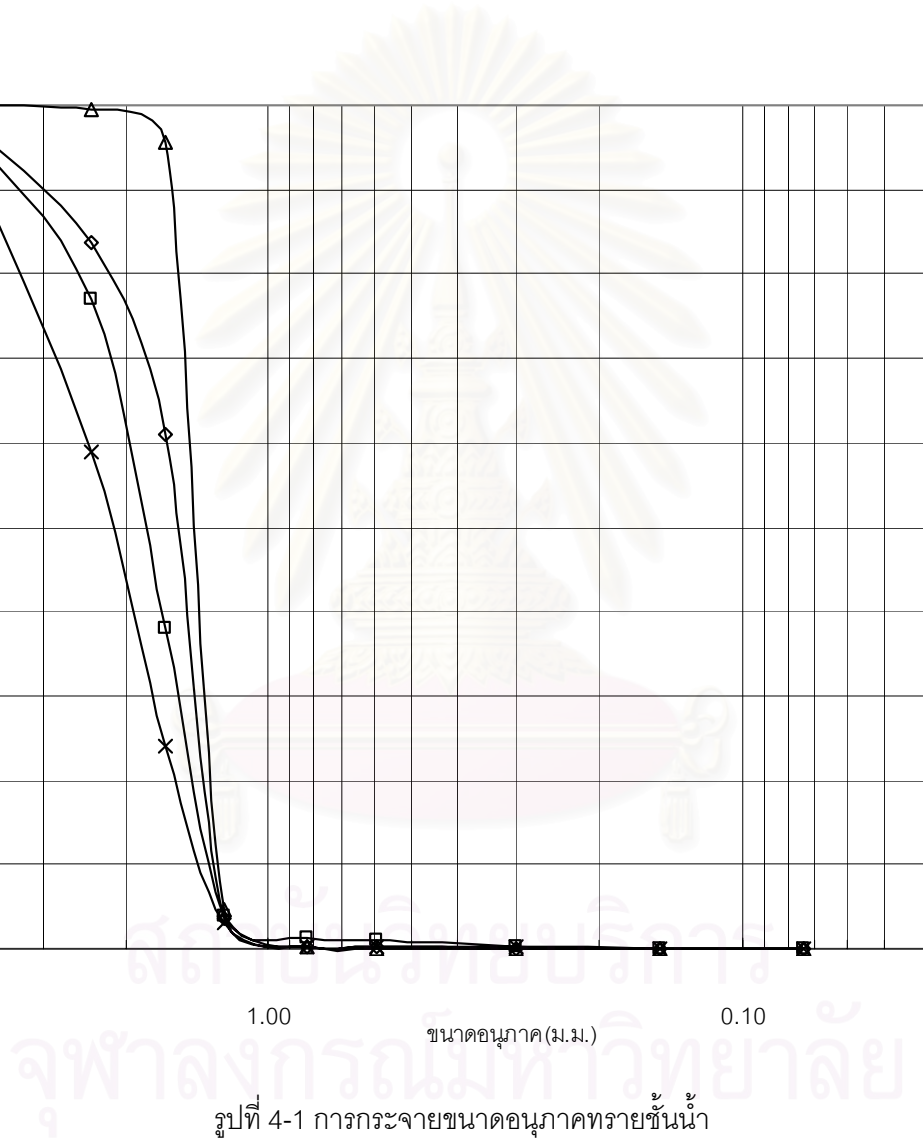
ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	ร้อยละของน้ำหนักผ่านตะแกรงสะสม											
		S1			S2			S3			S4		
		SA1/S1	SA2/S1	เฉลี่ย	SA1/S2	SA2/S2	เฉลี่ย	SA1/S3	SA2/S3	เฉลี่ย	SA1/S4	SA2/S4	เฉลี่ย
No.4	4.76	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
No.8	2.36	99.88	99.86	99.87	84.01	83.21	83.61	76.18	77.99	77.08	58.55	59.02	58.79
No.10	1.65	98.91	98.52	98.71	61.90	60.12	61.01	36.19	39.69	37.94	22.74	25.30	24.02
No.16	1.19	4.96	4.19	4.57	0.34	0.32	0.33	3.19	4.37	3.78	0.24	0.53	0.39
No.20	0.83	0.45	0.28	0.36	0.20	0.20	0.20	1.61	2.26	1.94	0.20	0.40	0.30
No.30	0.59	0.12	0.04	0.08	0.12	0.14	0.13	0.88	1.01	0.95	0.18	0.26	0.22
No.50	0.30	0.06	0.00	0.03	0.10	0.08	0.09	0.40	0.28	0.34	0.16	0.15	0.15
No.100	0.149	0.04	0.00	0.02	0.08	0.04	0.06	0.12	0.06	0.09	0.14	0.07	0.11
No.200	0.074	0.02	0.00	0.01	0.06	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.10	0.04	0.07
ถาด	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ

ตัวอย่างที่	d <sub>10</sub> (ม.ม.)	d <sub>30</sub> (ม.ม.)	d <sub>60</sub> (ม.ม.)	d <sub>50</sub> (ม.ม.)	C <sub>u</sub> (ม.ม.)	C <sub>c</sub> (ม.ม.)
S1	1.28	1.32	1.36	1.34	1.06	1.00
S2	1.40	1.48	1.65	1.58	1.18	0.95
S3	1.43	1.59	1.96	1.80	1.37	0.9
S4	1.48	1.73	2.40	2.10	1.62	0.84



รูปที่ 4-1 การกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ



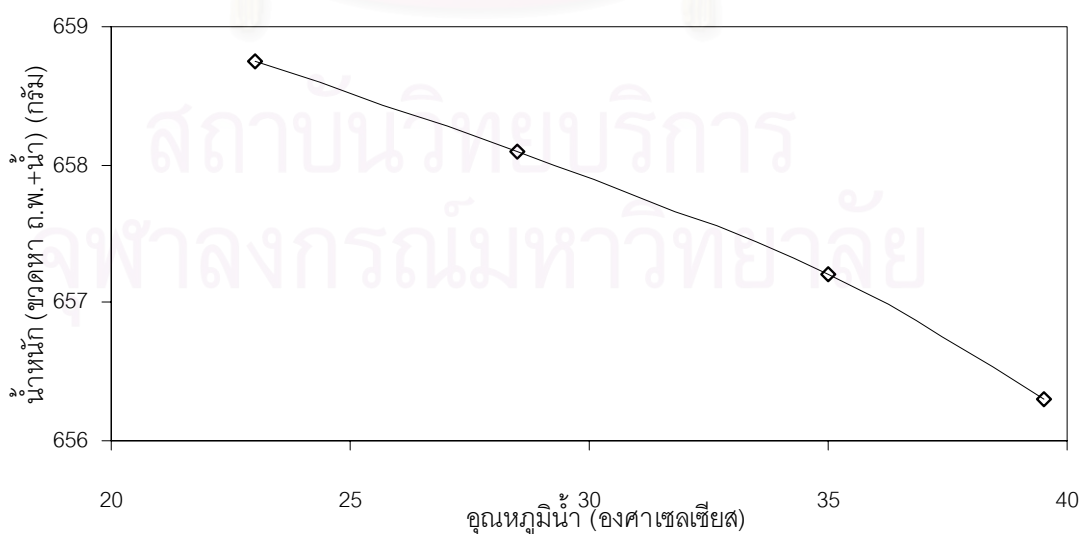
## 4.2 ความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ

การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.2 ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การหากราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขนาดความถ่วงจำเพาะ และการหาน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทรายและน้ำหนักทรายอบแห้ง ในส่วนแรกได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำรวมกับขนาดความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และเมื่อทราบน้ำหนักทรายอบแห้ง ( $W_s$ ) และน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทราย ( $W_w$ ) จากการทดลองในส่วนที่สอง ก็สามารถคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะ} &= \frac{W_s}{W_w (4^\circ \text{C})} \\ &= \frac{W_s}{[(W_s + W_2) - W_1] / G_T} \end{aligned}$$

เมื่อ	$W_s$	คือ	น้ำหนักทรายอบแห้ง
	$W_2$	คือ	น้ำหนักขนาดความถ่วงจำเพาะที่มีระดับน้ำที่คอขวด (กรัม) หาได้จากกราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขนาดความถ่วงจำเพาะ
	$W_1$	คือ	น้ำหนักขนาดความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำผสมกับทรายที่อุณหภูมิลดลง (กรัม)
	$G_T$	คือ	ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิลดลง

จากการคำนวณผลการทดลอง ทรายตัวอย่าง S1-S4 ที่นำมาใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.592 2.661 2.654 และ 2.658 ตามลำดับ รายละเอียดที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 4-3



รูปที่ 4-2 กราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขนาดความถ่วงจำเพาะที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4-3 การคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ

การทดลอง	SG/S1	SG/S2	SG/S3	SG/S4
ตัวอย่างที่	S1	S2	S3	S4
อุณหภูมิทดลอง (°C)	30.0	29.5	31.0	29.5
น้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะและน้ำ (กรัม): $W_2$	657.88	657.96	657.75	657.96
น้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะ น้ำและทราย (กรัม): $W_1$	681.90	689.00	689.50	687.60
น้ำหนักทรายเป็นแห้ง (กรัม): $W_s$	39.00	49.60	50.80	47.40
ความถ่วงจำเพาะของน้ำ : $G_T$	0.9957	0.9959	0.9954	0.9959
ความถ่วงจำเพาะของทราย	2.592	2.661	2.654	2.658

#### 4.3 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

คุณสมบัติทางชลศาสตร์หรือพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการทดลองนี้คือ ค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_1'$ ) ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลแบบเชิงเส้น พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_1'$ ) และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_1'$ ) ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลไม่แบบเชิงเส้นในลักษณะการไหลแบบทิศทางเดียว และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้แบ่งประเภทการไหลว่าเป็นการไหลแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้น โดยทำการทดลองแต่ละขนาดของทรายชั้นน้ำ ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 14 ค่าเพื่อให้เกิดการไหลทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น

จากการทดลองในแต่ละทรายชั้นน้ำ เมื่อทราบน้ำหนักทรายเป็นแห้ง ความถ่วงจำเพาะของทราย และปริมาตรของเพอร์เมียมิเตอร์ที่ใช้ สามารถหาความพรุนของทรายเป็นค่าได้ เช่น การทดลองของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ใช้ทรายแห้งทั้งหมด 46.142 กิโลกรัมในการทดลอง ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.592 และเพอร์เมียมิเตอร์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 19.32 เซนติเมตร สูง 1.0 เมตร คำนวณปริมาตรของเพอร์เมียมิเตอร์ ได้เท่ากับ 0.0293 ลูกบาศก์เมตร จากสมการที่ 2-3 จะได้ความพรุน

$$\phi = \frac{0.0293 - \left(\frac{46.142}{1000 \times 2.592}\right)}{0.0293} = 0.392$$

จากการทดลองในแต่ละอัตราการไหล จะได้ข้อมูลระดับความดันที่ตำแหน่ง 10 และ 90 เซนติเมตร จากหน้าแปลนด้านล่าง นั่นคือ  $h_D$  และ  $h_U$  ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3-4) และระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าตัวแปรต่อไปตามขั้นตอนดังนี้

$$1) \text{ จากค่า } h_D \text{ และ } h_U \text{ คำนวณค่าความชันชลศาสตร์จาก } I = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{h_D - h_U}{0.8}$$

2) จากค่า  $h_{weir}$  คำนวณค่าอัตราการไหลจาก  $Q = 0.043h_{weir}^{1.539}$  และคำนวณหาค่าความเร็วการไหลจาก  $v = \frac{Q}{A}$  โดยที่  $A = \frac{\pi}{4}(0.1932)^2 = 0.0293$  เมตร

3) คำนวณค่าเรย์โนลด์จากสมการที่ 2-13  $Re' = (\frac{v}{\phi})(\frac{d_{50}}{v})$  เมื่อทราบค่า  $v$   $\phi$   $d_{50}$  และ  $v$  แล้วในการหาค่าความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) ต้องทราบอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลองก่อน ซึ่งน้ำที่ใช้ในการทดลองมีอุณหภูมิเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเปรียบเทียบเท่ากับ  $0.8532 \times 10^{-6}$  เมตร<sup>2</sup>/วินาที และคำนวณแฟคเตอร์เสียดทานจาก  $f' = \frac{lgd_{50}}{2(\frac{v}{\phi})^2}$  เมื่อทราบค่า  $l$   $d_{50}$   $v$  และ  $\phi$

ตัวอย่างผลการทดลอง และค่า  $l$   $Re'$  และ  $f'$  ที่คำนวณได้จากการทดลองแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (การทดลองที่ ST1/S1-ST14/S1) แสดงในตารางที่ 4-4 จากนั้นนำข้อมูลในตารางที่ 4-4 ไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ ตามขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4-4 ผลการทดลองการไหลแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (ST1/S1-ST14/S1)

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 46.142 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความพรุน = 0.392

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	$h_D$	$h_U$	$\Delta h$	$h_{weir}$	$Q$	$v$	$v/\phi$	$Re'$	$l$	$f'$
	(ม.)	(ม.)	(ม.)	(ซ.ม.)	(ลบ.ม./วินาที)	(ม./วินาที)	(ม./วินาที)			
ST1/S1	0.705	0.632	0.073	0.85	0.000029	0.00097	0.0025	3.89	0.091	97.58
ST2/S1	0.806	0.651	0.155	1.40	0.000061	0.00210	0.0053	8.39	0.194	44.60
ST3/S1	0.963	0.670	0.293	2.10	0.000115	0.00391	0.0100	15.66	0.366	24.20
ST4/S1	1.113	0.706	0.407	2.60	0.000159	0.00544	0.0139	21.75	0.509	17.42
ST5/S1	1.355	0.743	0.612	3.30	0.000230	0.00785	0.0200	31.40	0.765	12.58
ST6/S1	1.546	0.776	0.770	3.70	0.000274	0.00936	0.0238	37.44	0.963	11.13
ST7/S1	1.750	0.816	0.934	4.10	0.000321	0.01096	0.0279	43.85	1.168	9.84
ST8/S1	1.998	0.856	1.142	4.50	0.000370	0.01264	0.0322	50.60	1.428	9.03
ST9/S1	2.358	0.938	1.420	5.15	0.000456	0.01556	0.0397	62.28	1.775	7.42
ST10/S1	3.399	1.376	2.023	6.00	0.000577	0.01969	0.0502	78.79	2.529	6.60
ST11/S1	4.358	1.577	2.781	7.10	0.000747	0.02551	0.0650	102.09	3.476	5.41
ST12/S1	6.135	1.980	4.155	8.60	0.001004	0.03426	0.0873	137.12	5.194	4.48
ST13/S1	8.602	2.548	6.054	10.20	0.001305	0.04455	0.1135	178.29	7.568	3.86
ST14/S1	10.116	2.93	7.190	11.10	0.001487	0.05074	0.1293	203.07	8.988	3.53

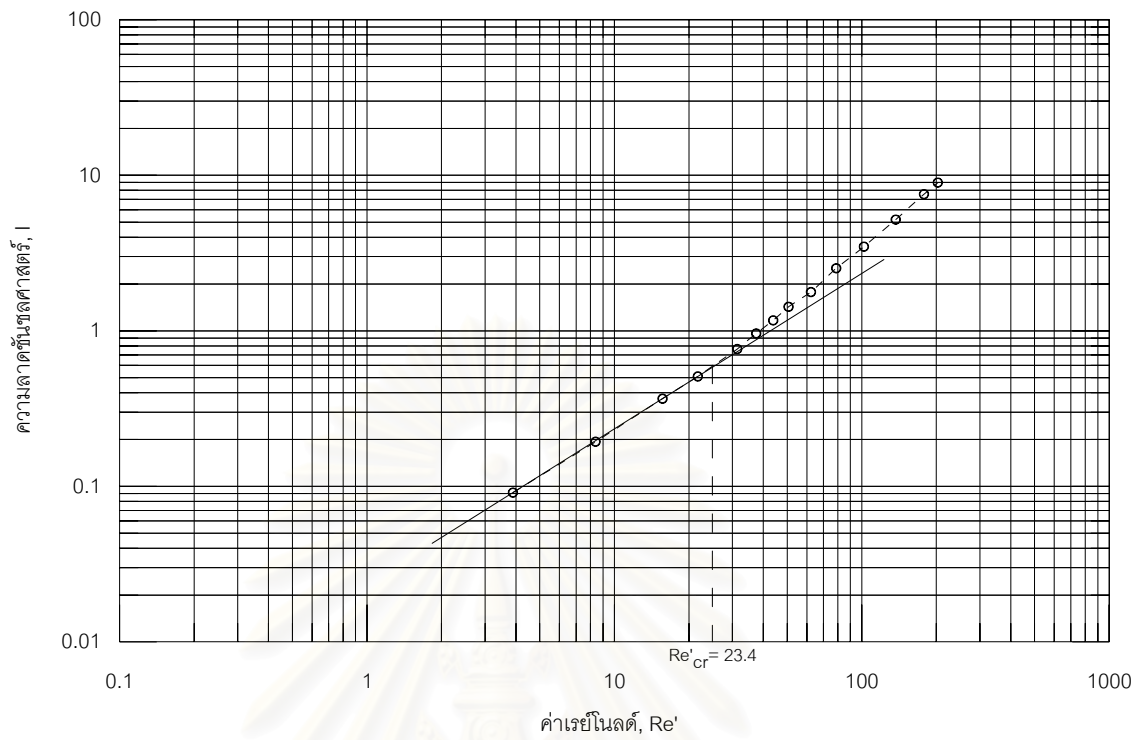
4) หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $Re'$  โดยนำค่า  $I$  กับ  $Re'$  ที่คำนวณได้จากการทดลอง ST1/S1-ST14/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-3 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $I$  กับ  $Re'$  ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันลึกคงที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความชันเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 1 จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า  $Re'$  ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $Re'_{cr}$  และจากรูปที่ 4-3 ค่า  $Re'_{cr}$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 23.4

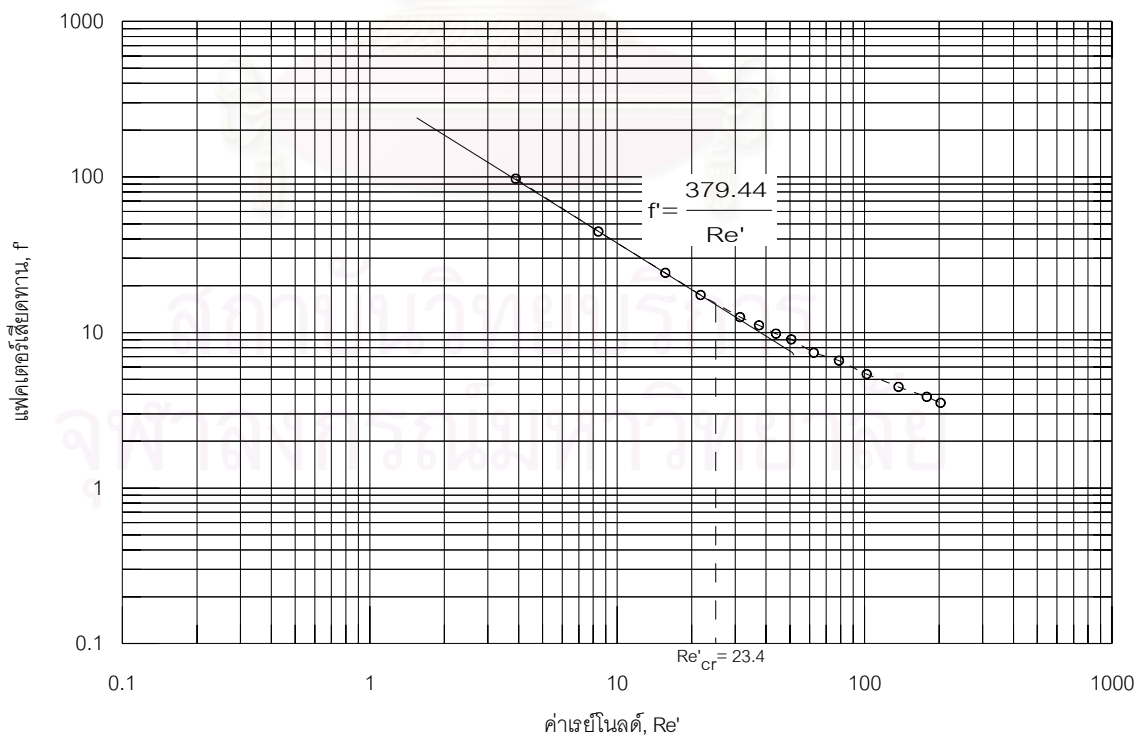
- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  โดยนำค่า  $f'$  กับ  $Re'$  ที่คำนวณได้จากการทดลอง ST1/S1-ST14/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-4 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f'$  กับ  $Re'$  ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงหรือมีความลาดชันคงที่ ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความลาดชันเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า  $Re'$  ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $Re'_{cr}$  และจากรูปที่ 4-4 ค่า  $Re'_{cr}$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  มีค่าเท่ากับ 23.4 เช่นกัน

และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากความสัมพันธ์ยังไม่ขนานกับแกน X หรือค่าแพคเตอร์เสียดทานยังไม่คงที่ โดยสภาพการไหลแบบราบเรียบจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้  $f' = \frac{379.44}{Re'}$  (นั่นคือค่าคงที่ A ในสมการที่ 2-24 และ 2-25 มีค่าเท่ากับ 379.44) และทำการหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 2-25 โดยนำค่าไปหักออกจากค่า  $f'$  ที่ได้จากการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยของ B ได้เท่ากับ 1.41 นั่นคือสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  ดังสมการ  $f' = \frac{379.44}{Re'} + 1.41$  โดยสมการนี้ใช้ได้ในช่วงของค่าเรย์โนลด์ในการทดลองเท่านั้น

5) เมื่อทราบค่า  $Re'_{cr}$  ก็สามารถแบ่งได้ว่า การทดลองใดบ้างที่เกิดการไหลแบบเชิงเส้น ( $Re' < Re'_{cr}$ ) และการทดลองใดบ้างเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้น ( $Re' > Re'_{cr}$ ) จากตารางที่ 4-4 แสดงว่าการทดลอง ST1/S1-ST4/S1 จะเกิดการไหลแบบเชิงเส้นและการทดลอง ST5/S1-ST14/S1 จะเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดาด้านขนาดศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (การทดลอง ST1/S1-ST14/S1)



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (การทดลอง ST1/S1-ST14/S1)



6) การวิเคราะห์ค่าความนำชลศาสตร์ จะใช้ค่า  $l$  และ  $\frac{V}{\phi}$  จากการทดลองการไหลแบบเชิงเส้นนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $l$  และ  $\frac{V}{\phi}$  ดังแสดงในรูปที่ 4-5 และจากสมการที่ 2-17 จะได้  $l = \left(\frac{1}{K_1'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)$  แสดงว่าค่า  $K_1'$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.027 เมตร/วินาที

7) การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ใช้ค่า  $l$  และ  $\frac{V}{\phi}$  จากการทดลองการไหลแบบไม่เชิงเส้นนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $l$  และ  $\frac{V}{\phi}$  ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และจากสมการที่ 2-21 แสดงว่าค่า  $a_1'$  และ  $b_1'$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 35.950 วินาที/เมตร และ 264.44 วินาที<sup>2</sup>/เมตร<sup>2</sup> ตามลำดับ

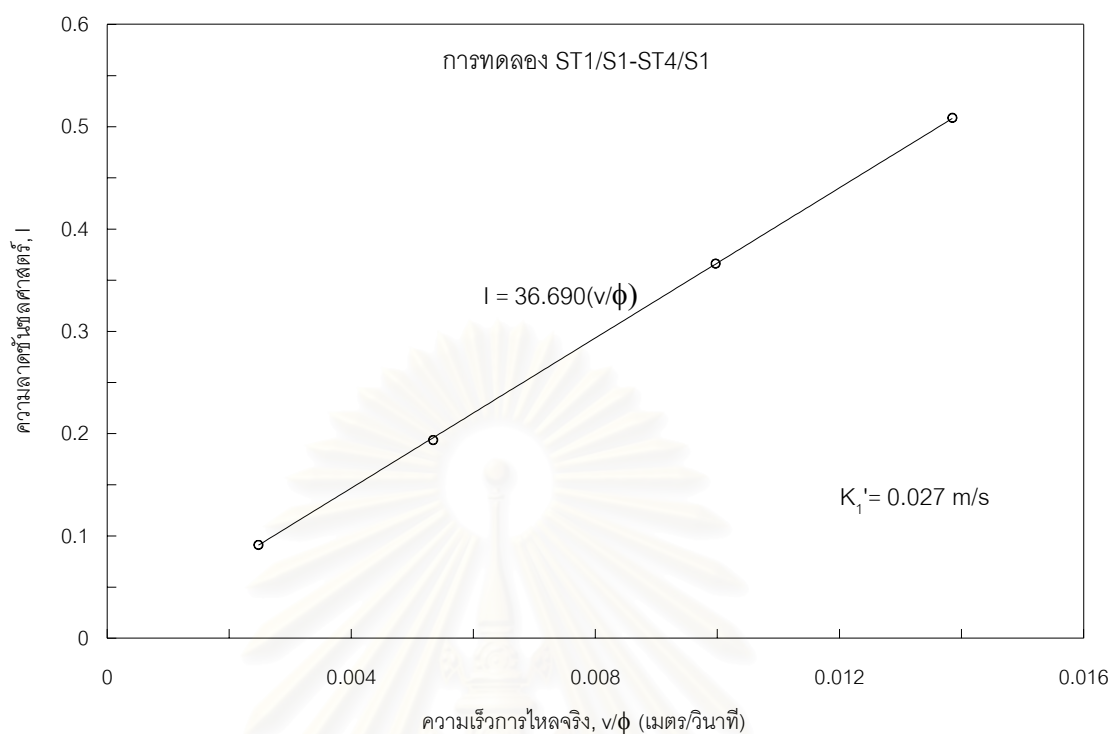
เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาดได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลจากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหล จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

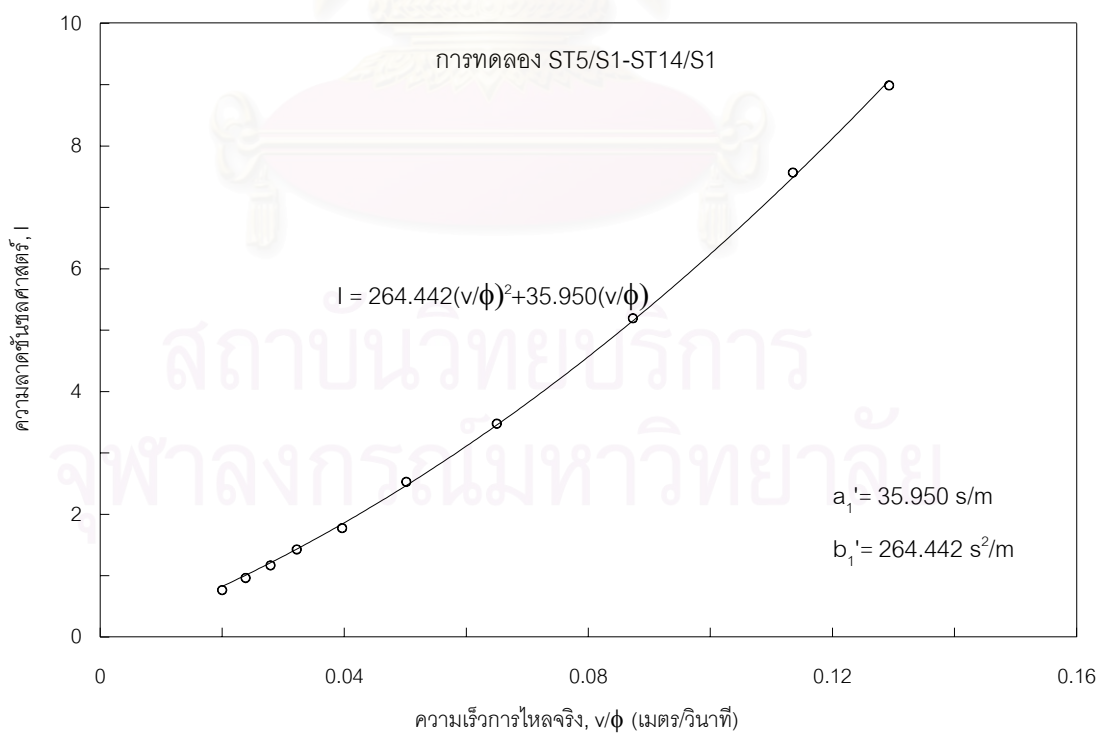
ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_1'$ (ม./วินาที)	$a_1'$ (วินาที/ม.)	$b_1'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )
S1	1.34	0.392	23.4	0.027	35.950	264.44
S2	1.58	0.409	24.4	0.041	25.750	251.89
S3	1.80	0.409	27.2	0.048	21.164	249.66
S4	2.10	0.411	34.5	0.058	11.126	209.70

จากผลในตารางที่ 4-5 พบว่าค่าความนำชลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก แสดงว่าทรายขนาดใหญ่ยอมให้น้ำไหลผ่านดีกว่าทรายขนาดเล็ก ในขณะที่พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซีมีค่าลดลงเมื่อทรายขนาดใหญ่ขึ้น แสดงว่าผลการไหลแบบไม่เชิงเส้นจะลดลงเมื่อทรายขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $l$   $\frac{V}{\phi}$   $a_1'$  และ  $b_1'$  ในสมการที่ 2-21 และจากค่า  $K_1'$  แสดงว่าทรายขนาดใหญ่ยอมให้น้ำไหลผ่านดีกว่าทรายขนาดเล็กในทุกสภาพการไหล

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Ahmed (1967) ซึ่งทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.35 เซนติเมตร โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยการไหลที่ใกล้เคียงกับการทดลองครั้งนี้ คือ 0.07 ถึง 5.58 เซนติเมตรต่อวินาที (ในการทดลองใช้ความเร็วเฉลี่ยการไหลในช่วง 0.07 ถึง 5.52 เซนติเมตรต่อวินาที) และในการทดลองใช้ทรายขนาดสม่ำเสมอที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.07 1.405 และ 1.992 มิลลิเมตร ปรากฏว่าได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลจากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน แสดงในตารางที่ 4-6



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันของกราฟ  
(การทดลอง ST1/S1-ST4/S1) กรณีการไหลแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันของกราฟ  
(การทดลอง ST5/S1-ST14/S1) กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น

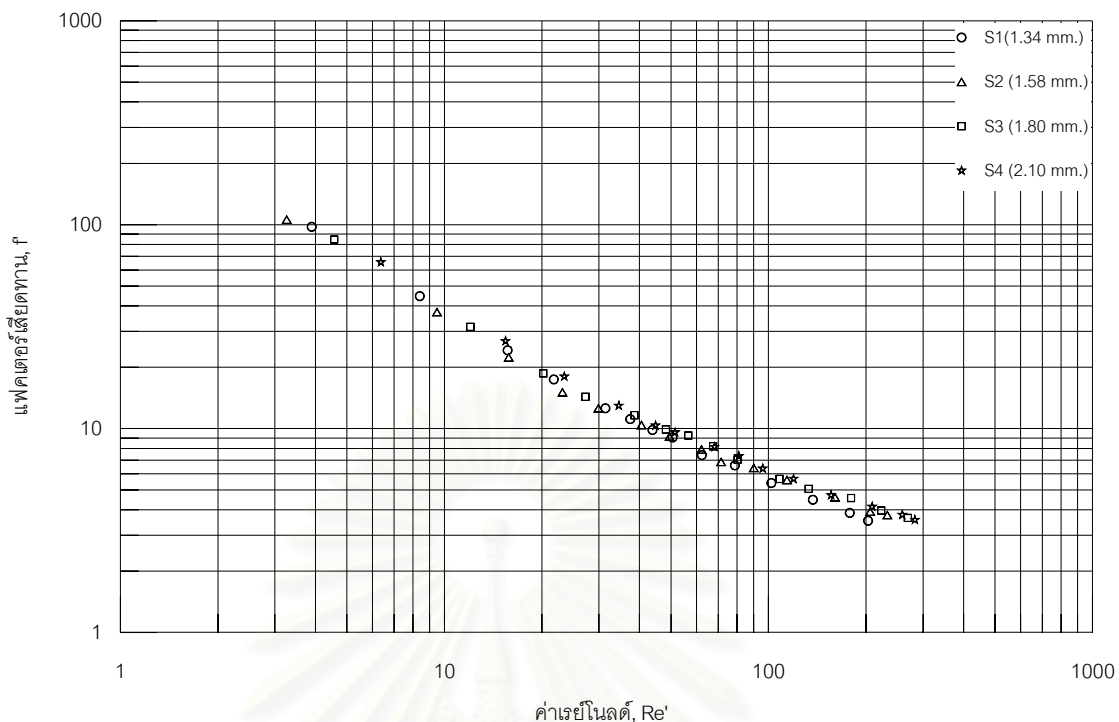
ตารางที่ 4-6 พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานในการศึกษาครั้งนี้

เทียบกับการทดลองของนพดล และAhmed

$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$K_1'$ (ม./วินาที)	$a_1'$ (วินาที/ม.)	$b_1'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	หมายเหตุ
1.34	0.392	0.027	35.950	264.44	การศึกษาครั้งนี้
1.58	0.409	0.041	25.750	251.89	
1.80	0.409	0.048	21.164	249.66	
2.10	0.411	0.058	11.126	209.70	
1.34	0.414	0.026	37.926	294.3	นพดล (2545)
1.58	0.396	0.042	24.908	263.8	
1.80	0.407	0.049	21.065	247.3	
2.10	0.410	0.059	16.096	208.9	
1.07	0.426	0.010	98.078	556.29	Ahmed (1967)
1.405	0.411	0.015	60.54	425.22	
1.992	0.404	0.025	38.037	291.22	

จากตารางที่ 4-6 ผลของการทดลองครั้งนี้พบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองของนพดล ส่วนความพรุนของตัวอย่างทรายจากการทดลองครั้งนี้เมื่อเทียบกับการทดลองของ Ahmed แล้วต่างกันไม่มากและที่ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน พบว่าค่าความนำไหลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ให้ค่าในแนวโน้มเดียวกันแต่มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของ Ahmed ประมาณ 2 เท่า ขณะที่พารามิเตอร์ดาร์ซีจากการทดลองของ Ahmed มีค่าสูงกว่าการทดลองครั้งนี้ ประมาณ 2 เท่าและพารามิเตอร์นอนดาร์ซีจากการทดลองของ Ahmed มีค่าสูงกว่าการทดลองครั้งนี้ ประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้เพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19.32 เซนติเมตร แตกต่างจากการทดลองของ Ahmed ซึ่งใช้เพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.35 เซนติเมตร

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  แสดงในรูปที่ 4-7 ซึ่งอธิบายได้ว่า การไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลองยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และจากค่าคงที่ A และ B ในสมการความสัมพันธ์ (สมการที่ 2-24 ถึง 2-26) สรุปในตารางที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

ตารางที่ 4-7 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	379.44	1.41
S2	350.37	2.09
S3	383.24	2.21
S4	417.73	2.34

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B ของทรายที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ขนาดพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับรูปที่ 4-7 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad f' = \frac{382.69}{Re'}$$

$$\text{การไหลแบบเปลี่ยนแปลง} \quad f' = \frac{382.69}{Re'} + 2.01$$

และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยเท่ากับ 27.4

#### 4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว

##### 4.4.1 การไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

จากสมการระดับความดันที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของการไหลในแนวรัศมีของน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (สมการที่ 2-37 2-39 และ 2-40) มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการไหล ประกอบด้วย ค่าความนำซลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา ( $c_2'$ ) ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ( $CQ^n$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ ) ซึ่งนำไปคำนวณหาค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ )

พารามิเตอร์ที่กล่าวถึงข้างต้น สามารถหาได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือ ค่าระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) ค่าระดับความดันในชั้นน้ำที่ตำแหน่ง 28-199 เซนติเมตร จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล ( $h_{28}, \dots, h_{199}$ ) และอัตราการไหลที่คำนวณจากระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4-8 เป็นผลการทดลองของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (การทดลองที่ CR1/S1-CR15/S4) จากผลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) หาค่าความพรุนของทรายชั้นน้ำที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักทรายแห้งที่ใส่ลงไปในแบบจำลอง ความถ่วงจำเพาะของทรายที่ใช้ และปริมาตรของแบบจำลอง เช่น การทดลองของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ใช้ทรายแห้งทั้งหมด 368.061 กิโลกรัม ในการทดลองค่าความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.592 และแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากับ 0.240 ลูกบาศก์เมตร จากสมการที่ 2-3 ได้ค่าความพรุน

$$\phi = \frac{0.240 - \left( \frac{368.061}{1000 \times 2.592} \right)}{0.240} = 0.408$$

2) จากข้อมูลระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล (เนื่องจากระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาลมีผลของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล) สามารถลากเส้นระดับความดันที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำตามระยะทางจนถึงผิวบ่อน้ำบาดาล โดยใช้สายตาประมาณความคลาดเคลื่อนของข้อมูลด้านบนและล่างของเส้นให้มีค่าใกล้เคียงกัน และยึดระดับความดันที่วัดได้จากตำแหน่งที่ไกลจากบ่อน้ำบาดาลมากที่สุดแทนระดับความดันของชั้นน้ำ นำระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $h_{20}$ ) ไปใช้คำนวณค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลต่อไป ตัวอย่างเส้นระดับความดัน (Piezometric Surface) ของการทดลองที่ CR11/S1 ดังแสดงในรูปที่ 4-8

3) คำนวณค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่เกิดขึ้น โดยหาจากผลต่างของระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลอง ( $h_w$ ) และระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $h_{20}$ ) แสดงในรูปที่ 4-8 ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง CR11/S1 เท่ากับ

1.378 เมตร ขณะที่เสดสูญเสียดจากการไหลในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) มีค่าเท่ากับ 3.620 เมตร เมื่อพิจารณาถึงระยะ 1.99 เมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (จุดวัดความดันตำแหน่งสุดท้าย) นั่นคือเสดสูญเสียดทั้งหมด (Total Loss) จากการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาลของการทดลอง CR11/S1 มีค่าเท่ากับ 4.998 เมตร

4) คำนวณค่าอัตราการไหลจากระดับน้ำเหนือสันฝายโดยใช้สมการ  $Q = 0.0438h_{weir}^{1.539}$

5) หาค่าความชันชลศาสตร์ (I) ค่าเรย์โนลด์ (Re') และแฟคเตอร์เสียดทาน (f) ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน โดยความชันชลศาสตร์หาได้จากความชันของเส้นระดับความดัน ขณะที่ Re' คำนวณจากสมการที่ 2-13  $Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)$  โดยที่ v คำนวณจากอัตราการไหล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล และแบบจำลองเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา หนา 0.2 เมตร ดังนั้น  $A = \left(\frac{\pi r}{6}\right) \times 0.2$  ตารางเมตร เมื่อทราบค่า v  $\phi$   $d_{50}$  และ v จะหาค่าเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ และคำนวณแฟคเตอร์เสียดทานจากสมการที่ 2-23  $f' = \frac{\lg d_{50}}{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2}$

เมื่อทราบค่า I  $d_{50}$  v และ  $\phi$  ตัวอย่างผลการคำนวณค่า I Re' และ f ของการทดลองที่ CR1/S1-CR4/S1 แสดงดังตารางที่ 4-9

6) หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ Re' โดยนำค่า I กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง CR1/S1-CR15/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-9 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I กับ Re' ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันลึกลงที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความชันเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 1 คือจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $Re'_{cr}$  และจากรูปที่ 4-9 ค่า  $Re'_{cr}$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 23.4

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re' โดยนำค่า f กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง CR1/S1-CR15/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-10 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re' ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงหรือมีความลาดชันคงที่ ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความลาดชันเปลี่ยนแปลงไป จะจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหล ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $Re'_{cr}$  และจากรูปที่ 4-10 ค่า  $Re'_{cr}$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re' มีค่าเท่ากับ 23.4 เช่นกัน

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.34$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.061 กิโลกรัม

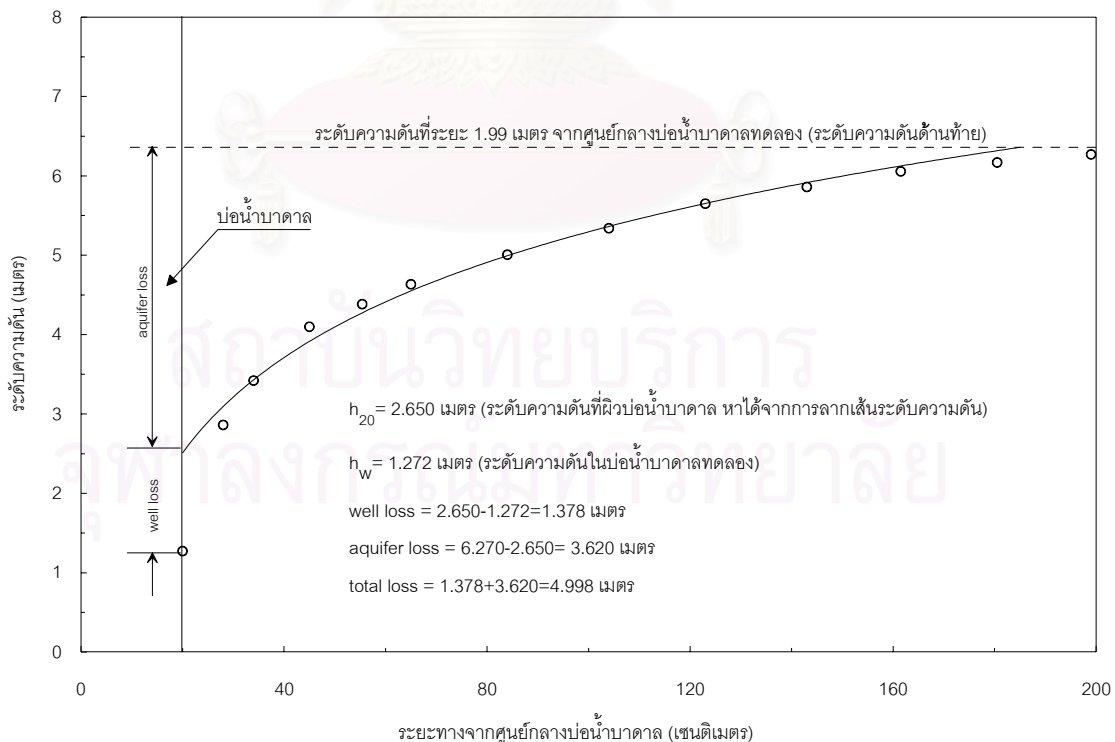
อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ความพรุน = 0.408

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
CR1/S1	0.666	0.737	0.742	0.747	0.751	0.761	0.766	0.775	0.780	0.784	0.796	0.800	0.803	0.0053
CR2/S1	0.700	0.879	0.926	0.955	0.974	0.978	0.983	0.988	1.000	1.016	1.035	1.044	1.054	0.0295
CR3/S1	0.758	1.013	1.089	1.148	1.167	1.181	1.191	1.210	1.233	1.262	1.290	1.319	1.342	0.0463
CR4/S1	0.811	1.141	1.267	1.371	1.390	1.408	1.456	1.517	1.588	1.640	1.682	1.716	1.730	0.0601
CR5/S1	0.856	1.299	1.491	1.673	1.708	1.730	1.787	1.867	1.971	2.042	2.131	2.188	2.226	0.0723
CR6/S1	0.909	1.511	1.732	2.000	2.100	2.160	2.240	2.369	2.468	2.567	2.627	2.673	2.731	0.0830
CR7/S1	0.976	1.738	2.005	2.371	2.480	2.540	2.666	2.825	2.991	3.123	3.229	3.310	3.335	0.0934
CR8/S1	1.036	1.970	2.312	2.762	2.900	3.000	3.189	3.400	3.614	3.750	3.897	3.970	4.013	0.1029
CR9/S1	1.096	2.260	2.658	3.172	3.327	3.471	3.770	3.990	4.247	4.400	4.575	4.666	4.690	0.1122
CR10/S1	1.183	2.550	3.036	3.625	3.851	4.040	4.356	4.640	4.913	5.140	5.311	5.360	5.455	0.1207
CR11/S1	1.272	2.862	3.421	4.099	4.384	4.634	5.007	5.340	5.650	5.860	6.056	6.169	6.270	0.1291
CR12/S1	1.339	3.217	3.849	4.632	4.979	5.271	5.721	6.050	6.432	6.650	6.889	6.946	7.120	0.1372
CR13/S1	1.441	3.593	4.308	5.184	5.624	5.979	6.460	6.830	7.278	7.493	7.743	7.779	8.034	0.1449
CR14/S1	1.542	3.973	4.777	5.772	6.286	6.698	7.250	7.620	8.123	8.410	8.669	8.787	8.989	0.1526
CR15/S1	1.648	4.395	5.306	6.397	6.991	7.454	8.067	8.520	9.035	9.367	9.644	9.770	9.990	0.1601

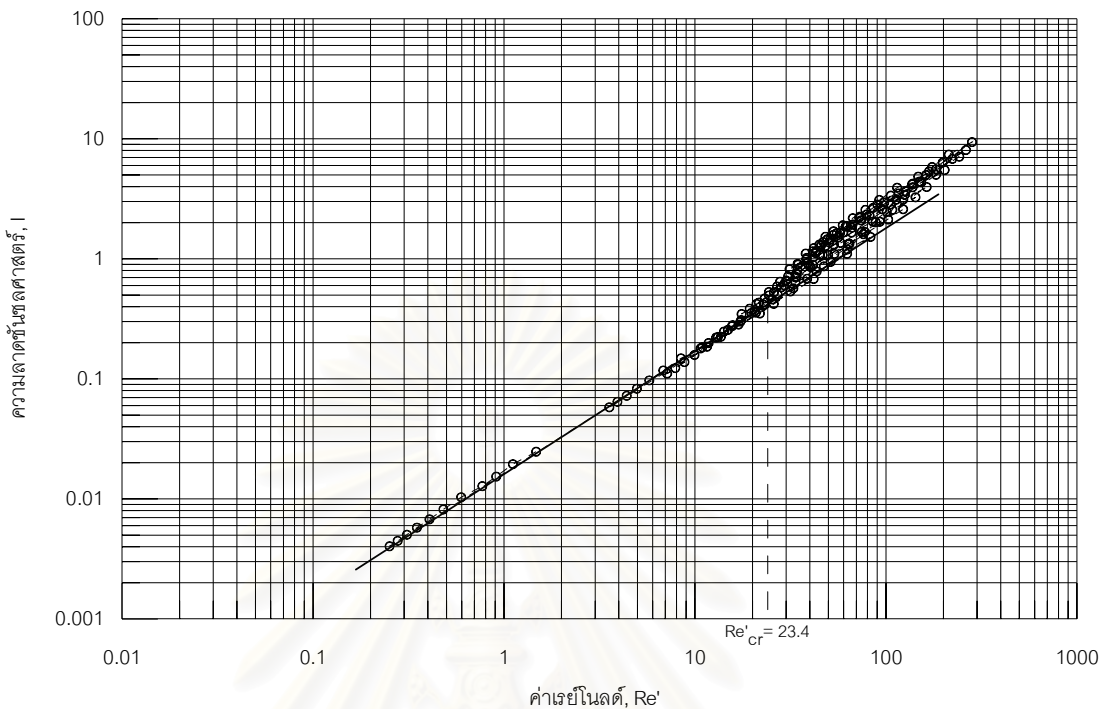


รูปที่ 4-8 เส้นระดับความดันของการทดลอง CR11/S1

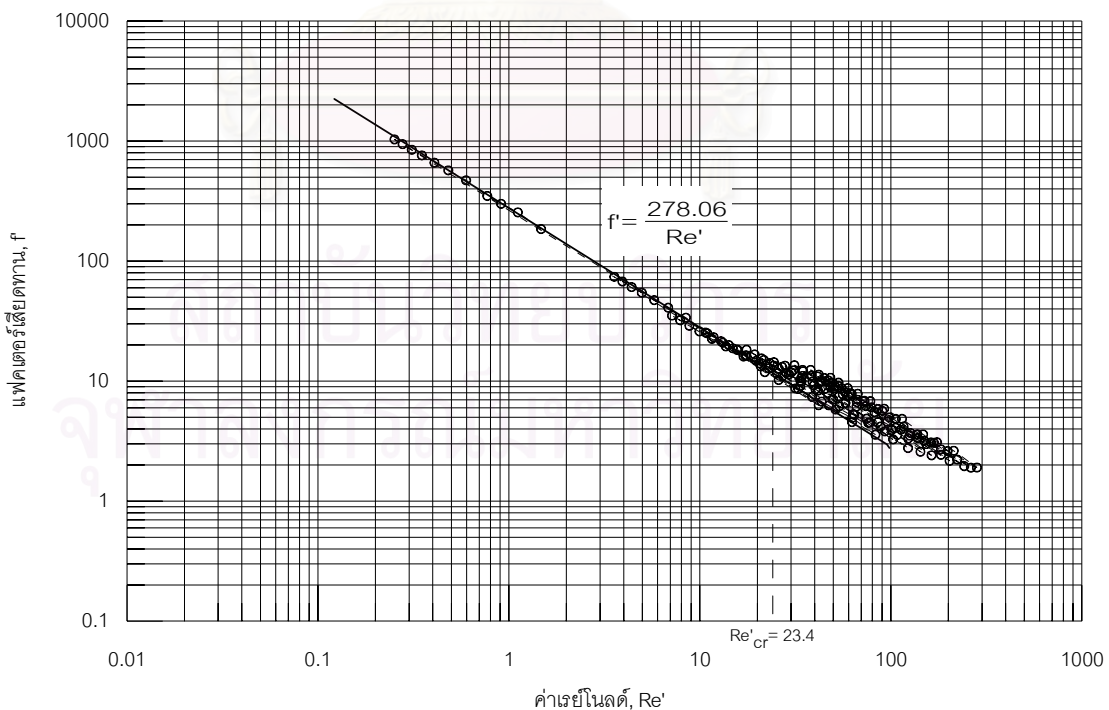
ตารางที่ 4-9 ผลการคำนวณ  $Re'$  และ  $f'$  ของการทดลอง CR1/S1-CR4/S1

การทดลอง	$h_{weir}$ (ซม.)	$Q_{lab} \times 10^5$ (ลบ.ม./วินาที)	$r$ (ม.)	$A$ (ตร.ม.)	$v$ (ม./วินาที)	$v/\phi$ (ม./วินาที)	$Re'$	$l$	$f'$
CR1/S1	0.53	1.36	0.340	0.036	0.00038	0.00094	1.47	0.025	184.70
			0.450	0.047	0.00029	0.00071	1.11	0.019	254.78
			0.550	0.058	0.00024	0.00058	0.91	0.015	299.72
			0.650	0.068	0.00020	0.00049	0.77	0.013	348.48
			0.840	0.088	0.00015	0.00038	0.60	0.010	470.19
			1.040	0.109	0.00013	0.00031	0.48	0.008	570.28
			1.230	0.129	0.00011	0.00026	0.41	0.007	659.68
			1.430	0.150	0.00009	0.00022	0.35	0.006	760.57
			1.615	0.169	0.00008	0.00020	0.31	0.005	846.88
1.805	0.189	0.00007	0.00018	0.28	0.004	941.68			
CR2/S1	2.95	19.31	0.340	0.036	0.00542	0.01328	20.86	0.356	13.25
			0.450	0.047	0.00410	0.01004	15.76	0.280	18.28
			0.550	0.058	0.00335	0.00821	12.90	0.221	21.51
			0.650	0.068	0.00284	0.00695	10.91	0.184	25.00
			0.840	0.088	0.00219	0.00538	8.44	0.148	33.74
			1.040	0.109	0.00177	0.00434	6.82	0.117	40.92
			1.230	0.129	0.00150	0.00367	5.77	0.097	47.33
			1.430	0.150	0.00129	0.00316	4.96	0.083	54.57
			1.615	0.169	0.00114	0.00280	4.39	0.072	60.77
1.805	0.189	0.00102	0.00250	3.93	0.064	67.57			
CR3/S1	4.63	38.69	0.340	0.036	0.01086	0.02663	41.82	0.680	6.30
			0.450	0.047	0.00821	0.02012	31.60	0.535	8.69
			0.550	0.058	0.00672	0.01646	25.85	0.421	10.22
			0.650	0.068	0.00568	0.01393	21.87	0.351	11.88
			0.840	0.088	0.00440	0.01078	16.93	0.283	16.03
			1.040	0.109	0.00355	0.00870	13.67	0.224	19.44
			1.230	0.129	0.00300	0.00736	11.56	0.185	22.49
			1.430	0.150	0.00258	0.00633	9.94	0.158	25.93
			1.615	0.169	0.00229	0.00561	8.80	0.138	28.88
1.805	0.189	0.00205	0.00502	7.88	0.123	32.11			
CR4/S1	6.01	57.90	0.340	0.036	0.01626	0.03984	62.57	1.100	4.55
			0.450	0.047	0.01228	0.03010	47.28	0.866	6.28
			0.550	0.058	0.01005	0.02463	38.68	0.682	7.39
			0.650	0.068	0.00850	0.02084	32.73	0.568	8.59
			0.840	0.088	0.00658	0.01613	25.33	0.459	11.59
			1.040	0.109	0.00531	0.01303	20.46	0.363	14.06
			1.230	0.129	0.00449	0.01101	17.30	0.300	16.26
			1.430	0.150	0.00386	0.00947	14.88	0.256	18.75
			1.615	0.169	0.00342	0.00839	13.17	0.224	20.88
1.805	0.189	0.00306	0.00750	11.79	0.199	23.22			





รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (CR1/S1-CR15/S1)



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (CR1/S1-CR15/S1)

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากความสัมพันธ์ยังไม่แน่นอนขนาดกันกับแกน  $X$  หรือค่าแฟคเตอร์เสียดทานยังไม่คงที่ โดยสภาพการไหลแบบราบเรียบจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้  $f' = \frac{197.85}{Re'}$  (นั่นคือค่าคงที่ A ในสมการที่ 2-24 และ 2-25 มีค่าเท่ากับ 272.31) และทำการหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 2-25 โดยนำค่า  $f'$  ที่ได้จากการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยของ B ได้เท่ากับ 2.20 นั่นคือสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  ดังสมการ  $f' = \frac{197.85}{Re'} + 2.37$  โดยสมการนี้ใช้ได้ในช่วงขอบเขตของค่าเรย์โนลด์ในการทดลองเท่านั้น

7) เนื่องจากการไหลในแนวรัศมีเป็นการไหลแบบนำพา จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลนำพา ( $c_2'$ ) พร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่นได้แก่ ค่าความนำไหลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) โดยมีขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- กรณีการไหลแบบเชิงเส้น คำนวณพารามิเตอร์  $K_2'$  และ  $c_2'$  ตามสมการที่ 2-19  $I = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)^2$  เมื่อสังเกตจากสมการพบว่าค่า  $K_2'$  และ  $c_2'$  นอกจากจะขึ้นกับ  $I$  และ  $\frac{V}{\phi}$  แล้วยังขึ้นกับค่า  $r$  ด้วย ( $r$  คือ ระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล) แต่จากการศึกษาของนพดลพบว่า ค่า  $K_2'$  และ  $c_2'$  ที่ระยะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการวิเคราะห์จึงนำค่า  $I$  และ  $\frac{V}{\phi}$  ของจุดที่มี  $Re' < Re'_{cr}$  (การไหลแบบเชิงเส้น) มาหาความสัมพันธ์ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-11

จากรูปที่ 4-11 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $\frac{V}{\phi}$  ที่ทุกระยะ  $r$  ในรูปสมการของ

$$I = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 \text{ คือ}$$

$$I = 27.316\left(\frac{V}{\phi}\right) - 10.212\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \frac{1}{K_2'} = 28.032, \frac{c_2'}{gr} = 10.212$$

จากค่า  $\frac{1}{K_2'}$  สามารถคำนวณค่า  $K_2'$  ได้ และพบว่าค่า  $K_2'$  มีค่าเท่ากับ 0.037 เมตร/วินาที ส่วนค่า  $c_2'$  นั้นหาได้โดยใช้ค่า  $r=1.00$  เมตร (ระยะกึ่งกลางของแบบจำลอง) ค่า  $c_2'$  ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 100.18

- กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น คำนวณพารามิเตอร์  $a_2'$ ,  $b_2'$  และ  $c_2'$  ตามสมการที่ 2-22  
 $I = a_2' \left(\frac{V}{\phi}\right) + b_2' \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$  จากสมการจะเห็นว่าค่า  $a_2'$ ,  $b_2'$  และ  $c_2'$  นอกจากจะขึ้นกับค่า  $I$  และ  $\left(\frac{V}{\phi}\right)$  ยังขึ้นกับค่า  $r$  ด้วย แต่จากการศึกษาของนพดลพบว่า ค่า  $a_2'$  ที่ระยะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $c_2'$  จากการไหลเชิงเส้นและการไหลไม่เชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ดังนั้นการวิเคราะห์หิจึงนำค่า  $I$  และ  $\frac{V}{\phi}$  ของจุดที่มี  $Re' > Re'_{cr}$  (การไหลแบบไม่เชิงเส้น) มาหาความสัมพันธ์ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-12

จากรูปที่ 4-12 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $\frac{V}{\phi}$  ที่ทุกระยะ  $r$  ในรูปสมการของ

$$I = a_2' \left(\frac{V}{\phi}\right) + \left(b_2' - \frac{c_2'}{gr}\right) \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 \text{ คือ}$$

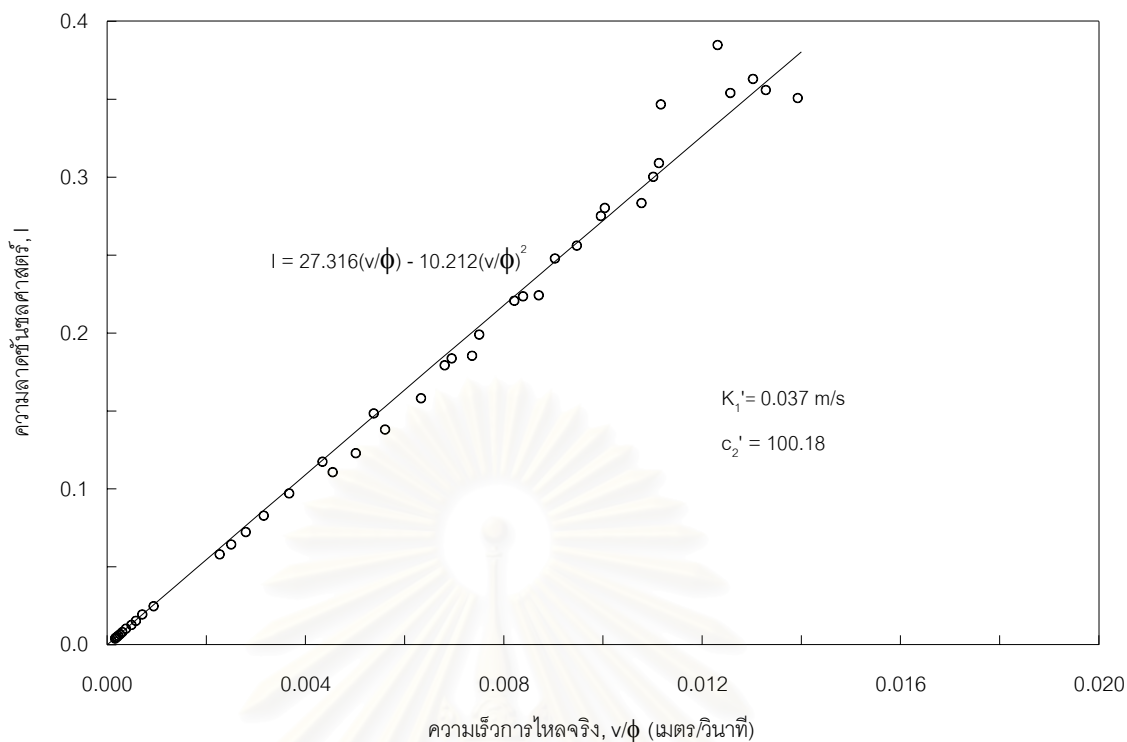
$$I = 37.49 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 77.322 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : a_2' = 37.49, b_2' - \frac{c_2'}{gr} = 77.322$$

พบว่าค่า  $a_2'$  มีค่าเท่ากับ 37.49 วินาที/เมตร ขณะที่ค่า  $b_2'$  หาได้จากการแก้สมการโดยใช้ค่า  $r=1.00$  เมตร (ระยะกึ่งกลางของแบบจำลอง) และค่า  $c_2'$  ที่ได้จากการไหลเชิงเส้นได้ค่า  $b_2'$  เท่ากับ 87.534 วินาที<sup>2</sup>/เมตร<sup>2</sup>

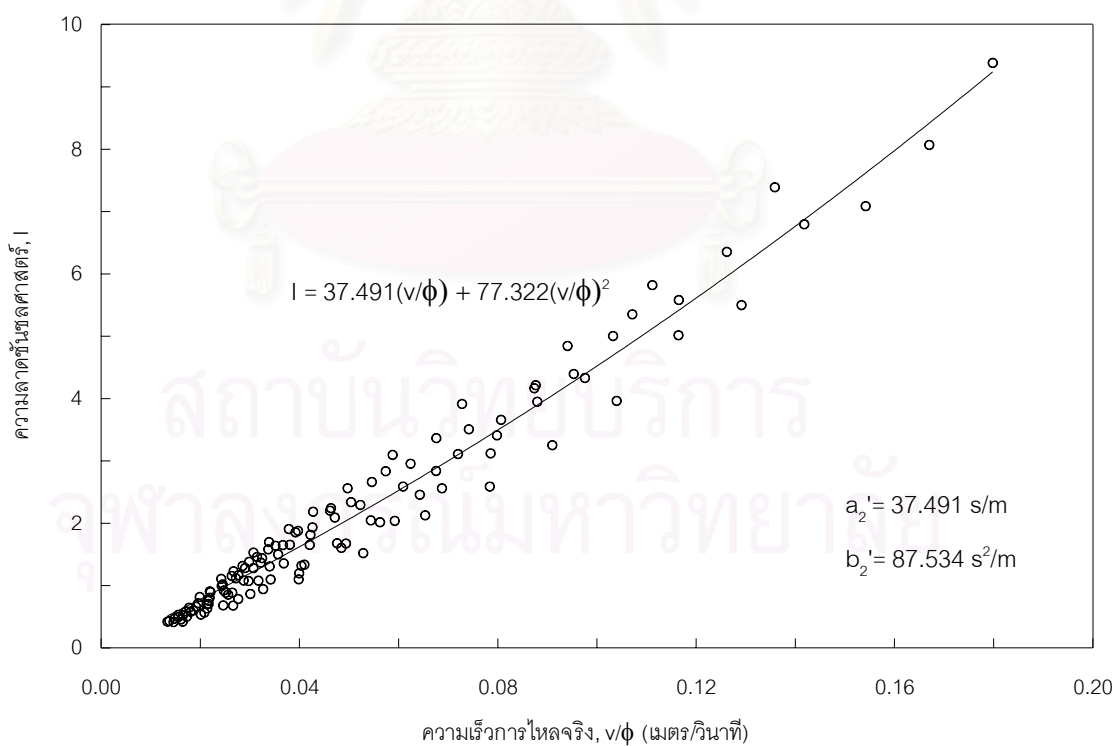
เมื่อทำการวิเคราะห์ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำ จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด (CR1/S1-CR15/S4) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-10 จากตารางที่ 4-10 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี กับขนาดทรายชั้นน้ำจะเหมือนกับการทดลองแบบมาตรฐาน นั่นคือค่าความนำคลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี และค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี มีค่าลดลงเมื่อทรายขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การไหลนำพาพบว่าเพิ่มขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

ตารางที่ 4-10 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	23.4	0.037	37.49	87.53	100.18
S2	1.58	0.423	24.5	0.049	29.56	85.86	136.65
S3	1.80	0.421	27.1	0.058	21.29	80.50	185.45
S4	2.10	0.422	34.2	0.062	16.89	78.94	189.24



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันซดศาสตร์ กรณีการไหลแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันซดศาสตร์ กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น

ค่าเรย์โนลด์์วิกฤติที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง นำไปคำนวณหาค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลในแต่ละการทดลองได้ตามสมการที่ 2-32 เมื่อทราบค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลก็สามารถแบ่งขอบเขตของสภาพการไหลได้ สามารถทราบได้ว่าช่วงที่เกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นมีระยะเท่าใดจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล และสามารถหาค่าเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำได้ จากการวิเคราะห์หาเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด สรุปค่าเฮดสูญเสียทั้งหมด ( $S_w$ ) ค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล ( $ds''$ ) เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ( $ds_A$ ) ซึ่งแบ่งย่อยเป็นเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น ( $ds$ ) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น ( $ds''$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4-11

ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 4-11 มีดังนี้

$Q_{lab}$	คือ	ค่าอัตราการไหลจากการทดลองการไหลในชั้นน้ำรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ 30 องศา แต่ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ( $CQ^2$ ) จะต้องใช้ค่าอัตราการไหลเสมือนจริงหรือเต็มวง 360 องศา ( $Q_{lab}$ ) ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12 เท่า ( $360/30$ ) ของอัตราการไหลจากการทดลอง
$S_w$	คือ	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล
$ds''$	คือ	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล
$ds_A$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ มีค่าเท่ากับผลรวมของเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ ( $ds$ ) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ( $ds''$ )

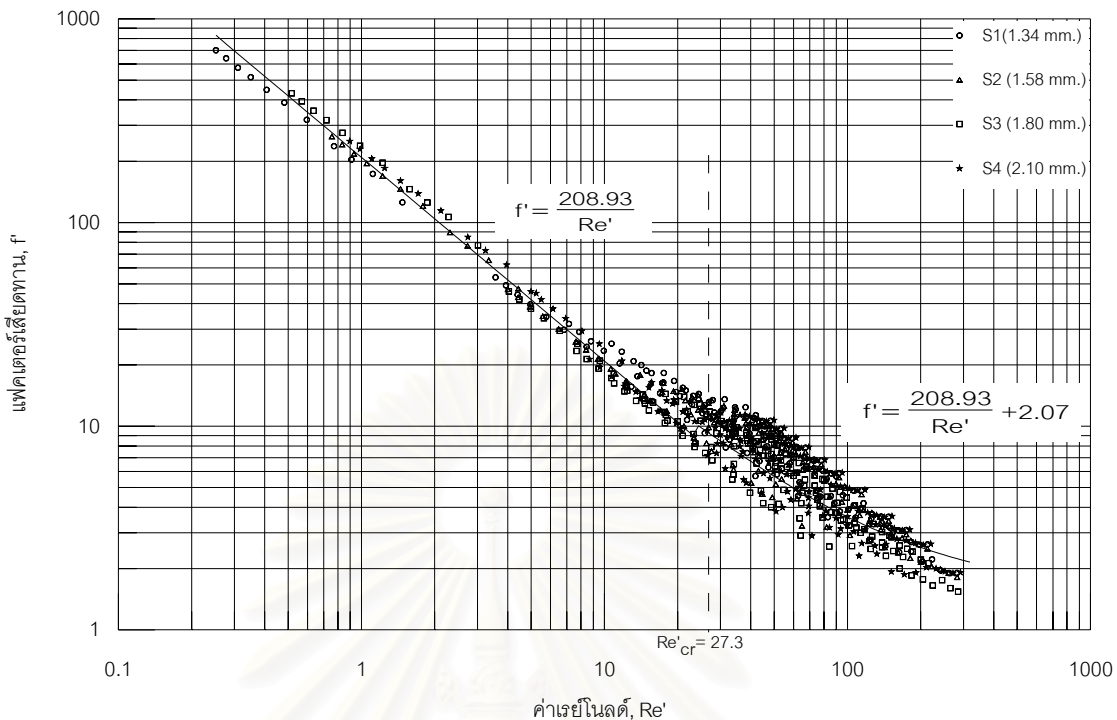
จากตารางที่ 4-11 พบว่า เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ที่พบว่าขนาดทรายใหญ่จะยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าทรายขนาดเล็ก ทำให้เกิดเฮดสูญเสียจากการไหลน้อยกว่า ทำนองเดียวความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลจะลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น แสดงว่าน้ำสามารถไหลผ่านทรายขนาดใหญ่เข้าสู่บ่อน้ำบาดาลได้ดีกว่าทรายขนาดเล็ก เมื่อผนวกทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลของทรายขนาดใหญ่จึงมีค่าน้อยกว่าทรายขนาดเล็ก

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  และ  $Re'$  จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  และ  $Re'$  แสดงในรูปที่ 4-13 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  และ  $Re'$  แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลองยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ยังไม่ขนานกับแกน  $x$  หรือแฟคเตอร์เสียดทานยังมีค่าไม่คงที่ และได้ค่าคงที่  $A$  และ  $B$  ในสมการความสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-11 เขตสูญเสียในส่วนต่างๆ จากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี

S1							S2						
Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss			Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss		
		S <sub>w</sub>	ds <sup>''</sup>	ds <sup>*</sup>	ds	ds <sub>A</sub>			S <sub>w</sub>	ds <sup>''</sup>	ds <sup>*</sup>	ds	ds <sub>A</sub>
0.00001	0.00016	0.137	0.097	0.000	0.040	0.040	0.00004	0.00051	0.0580	0.030	0.000	0.028	0.028
0.00019	0.00232	0.354	0.120	0.054	0.180	0.234	0.00023	0.00270	0.2031	0.108	0.016	0.080	0.095
0.00039	0.00464	0.584	0.128	0.248	0.208	0.456	0.00043	0.00514	0.4265	0.186	0.123	0.117	0.240
0.00058	0.00695	0.919	0.180	0.538	0.201	0.739	0.00062	0.00748	0.6650	0.233	0.286	0.146	0.432
0.00077	0.00922	1.370	0.296	0.878	0.196	1.074	0.00079	0.00945	0.9987	0.298	0.553	0.148	0.701
0.00095	0.01140	1.823	0.395	1.368	0.060	1.427	0.00098	0.01178	1.3965	0.377	0.918	0.101	1.019
0.00114	0.01367	2.359	0.587	1.772	0.000	1.772	0.00117	0.01403	1.8077	0.467	1.341	0.000	1.341
0.00132	0.01587	2.977	0.752	2.225	0.000	2.225	0.00136	0.01637	2.2915	0.573	1.719	0.000	1.719
0.00151	0.01813	3.594	0.916	2.678	0.000	2.678	0.00155	0.01863	2.8008	0.679	2.122	0.000	2.122
0.00169	0.02030	4.272	0.932	3.340	0.000	3.340	0.00174	0.02088	3.3334	0.808	2.525	0.000	2.525
0.00188	0.02252	4.998	1.268	3.730	0.000	3.730	0.00193	0.02310	3.9080	0.957	2.951	0.000	2.951
0.00206	0.02473	5.781	1.547	4.234	0.000	4.234	0.00213	0.02554	4.5388	1.106	3.433	0.000	3.433
0.00224	0.02689	6.592	1.774	4.819	0.000	4.819	0.00231	0.02772	5.2261	1.274	3.952	0.000	3.952
0.00243	0.02913	7.447	1.995	5.452	0.000	5.452	0.00250	0.03000	5.9093	1.504	4.405	0.000	4.405
S3							S4						
Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss			Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss		
		S <sub>w</sub>	ds <sup>''</sup>	ds <sup>*</sup>	ds	ds <sub>A</sub>			S <sub>w</sub>	ds <sup>''</sup>	ds <sup>*</sup>	ds	ds <sub>A</sub>
0.00003	0.00035	0.113	0.037	0.000	0.076	0.076	0.00005	0.00060	0.159	0.085	0.000	0.074	0.074
0.00023	0.00271	0.248	0.055	0.042	0.151	0.193	0.00028	0.00335	0.265	0.141	0.037	0.087	0.124
0.00043	0.00515	0.421	0.145	0.121	0.155	0.276	0.00049	0.00584	0.355	0.182	0.102	0.071	0.173
0.00061	0.00735	0.629	0.202	0.274	0.153	0.427	0.00068	0.00821	0.558	0.229	0.256	0.073	0.329
0.00080	0.00965	0.838	0.226	0.491	0.121	0.612	0.00088	0.01052	0.773	0.307	0.404	0.062	0.466
0.00100	0.01197	1.177	0.317	0.750	0.110	0.860	0.00107	0.01282	1.069	0.434	0.621	0.014	0.635
0.00119	0.01427	1.558	0.344	1.214	0.000	1.214	0.00126	0.01516	1.360	0.551	0.809	0.000	0.809
0.00137	0.01649	1.895	0.471	1.424	0.000	1.424	0.00145	0.01741	1.751	0.696	1.056	0.000	1.056
0.00157	0.01880	2.208	0.577	1.631	0.000	1.631	0.00164	0.01969	2.168	0.809	1.359	0.000	1.359
0.00175	0.02103	2.606	0.696	1.910	0.000	1.910	0.00183	0.02195	2.602	0.931	1.671	0.000	1.671
0.00195	0.02341	3.030	0.860	2.170	0.000	2.170	0.00202	0.02425	3.060	1.069	1.991	0.000	1.991
0.00214	0.02569	3.499	1.019	2.479	0.000	2.479	0.00221	0.02656	3.560	1.237	2.323	0.000	2.323
0.00234	0.02810	4.107	1.110	2.997	0.000	2.997	0.00241	0.02895	4.106	1.411	2.696	0.000	2.696
0.00253	0.03038	4.542	1.266	3.276	0.000	3.276	0.00260	0.03119	4.671	1.615	3.057	0.000	3.057

หมายเหตุ : หน่วย Q<sub>lab</sub>, Q<sub>equi</sub> (ลบ.ม./วินาที)S<sub>w</sub>, ds<sup>''</sup>, ds<sup>\*</sup>, ds, ds (ม.)



รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์  
 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตารางที่ 4-12 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	197.85	2.37
S2	198.44	2.29
S3	202.55	1.93
S4	236.97	1.67

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B ของทรายที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ขนาดพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับรูปที่ 4-13 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

- การไหลแบบราบเรียบ  $f' = \frac{208.93}{Re'}$
- การไหลแบบเปลี่ยนแปลง  $f' = \frac{208.93}{Re'} + 2.07$
- และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเท่ากับ 27.3

#### 4.4.2 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.1 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำคลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา ( $c_2'$ ) ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ( $CQ^n$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

จากการทดลองในลักษณะเดียวกันต่างกันเฉพาะทิศทางการไหล ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-13 จากตารางที่ 4-13 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา กับขนาดทรายชั้นน้ำ จะเหมือนกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาล นั่นคือค่าความนำคลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี มีค่าลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การไหลน้ำพาจะเพิ่มขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

จากการวิเคราะห์หาเสดสูญเสียที่เกิดขึ้น จากการทดลองการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด สรุปค่าเสดสูญเสียทั้งหมด ค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล เสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ซึ่งแบ่งย่อยเป็นเสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น และเสดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น ดังแสดงในตารางที่ 4-14 จากตารางที่ 4-14 พบว่าเสดสูญเสียในส่วนต่างๆ มีแนวโน้มความสัมพันธ์กับขนาดทราย เช่นเดียวกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาลกล่าวคือ เสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล และเสดสูญเสียทั้งหมด มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลองยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และได้ค่าคงที่ A และ B จากสมการความสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

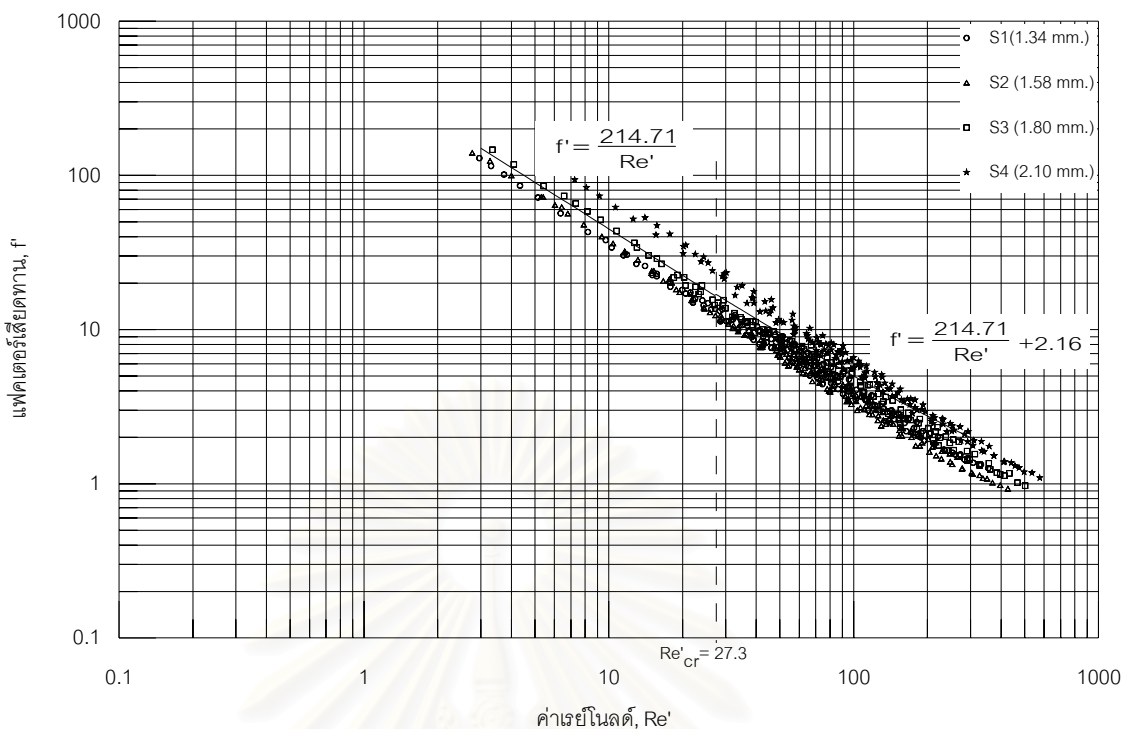
ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	23.5	0.036	36.15	89.58	135.16
S2	1.58	0.423	24.4	0.049	23.63	86.87	152.17
S3	1.80	0.421	27.1	0.057	22.55	82.30	173.21
S4	2.10	0.422	34.3	0.063	22.36	79.06	193.42



ตารางที่ 4-14 เสดสูญเสียน้ำในส่วนต่างๆ จากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี

S1							S2						
Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss			Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss		
		S <sub>w</sub>	ds'''	ds''	ds	ds <sub>A</sub>			S <sub>w</sub>	ds'''	ds''	ds	ds <sub>A</sub>
0.000001	0.00001	0.307	0.007	0.000	0.300	0.300	0.00004	0.00052	0.238	0.002	0.000	0.237	0.237
0.00015	0.00174	0.525	0.008	0.196	0.321	0.517	0.00023	0.00279	0.355	0.003	0.037	0.315	0.352
0.00050	0.00606	0.805	0.010	0.506	0.289	0.795	0.00045	0.00539	0.571	0.005	0.284	0.282	0.567
0.00069	0.00828	1.148	0.020	0.906	0.222	1.128	0.00065	0.00774	0.811	0.013	0.544	0.254	0.798
0.00088	0.01052	1.507	0.053	1.339	0.115	1.454	0.00084	0.01009	1.048	0.019	0.805	0.225	1.029
0.00106	0.01270	1.964	0.065	1.899	0.000	1.899	0.00105	0.01266	1.358	0.020	1.223	0.115	1.338
0.00125	0.01499	2.448	0.094	2.354	0.000	2.354	0.00125	0.01499	1.659	0.042	1.593	0.024	1.617
0.00143	0.01717	3.016	0.201	2.816	0.000	2.816	0.00146	0.01749	2.012	0.106	1.906	0.000	1.906
0.00161	0.01935	3.588	0.301	3.286	0.000	3.286	0.00166	0.01990	2.389	0.156	2.233	0.000	2.233
0.00180	0.02155	4.282	0.503	3.779	0.000	3.779	0.00186	0.02228	2.785	0.235	2.550	0.000	2.550
0.00198	0.02374	4.943	0.642	4.301	0.000	4.301	0.00206	0.02467	3.189	0.321	2.868	0.000	2.868
0.00216	0.02593	5.644	0.848	4.796	0.000	4.796	0.00226	0.02712	3.622	0.385	3.237	0.000	3.237
0.00234	0.02814	6.414	1.007	5.406	0.000	5.406	0.00247	0.02963	4.110	0.487	3.623	0.000	3.623
0.00252	0.03029	7.185	1.156	6.029	0.000	6.029	0.00266	0.03193	4.645	0.596	4.049	0.000	4.049
0.00271	0.03246	8.012	1.383	6.630	0.000	6.630	0.00286	0.03429	5.150	0.686	4.464	0.000	4.464
S3							S4						
Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss			Q <sub>lab</sub>	Q <sub>equi</sub>	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss		
		S <sub>w</sub>	ds'''	ds''	ds	ds <sub>A</sub>			S <sub>w</sub>	ds'''	ds''	ds	ds <sub>A</sub>
0.00004	0.00046	0.273	0.002	0.000	0.271	0.271	0.000005	0.00005	0.420	0.002	0.000	0.418	0.418
0.00028	0.00331	0.379	0.005	0.149	0.225	0.374	0.00024	0.00282	0.530	0.005	0.131	0.394	0.525
0.00049	0.00589	0.586	0.011	0.409	0.167	0.576	0.00046	0.00547	0.800	0.008	0.410	0.382	0.792
0.00070	0.00834	0.690	0.014	0.576	0.100	0.676	0.00065	0.00786	0.840	0.010	0.592	0.238	0.830
0.00090	0.01075	0.980	0.016	0.956	0.008	0.964	0.00086	0.01032	1.120	0.020	0.934	0.166	1.100
0.00110	0.01321	1.248	0.051	1.197	0.000	1.197	0.00106	0.01276	1.110	0.025	1.045	0.041	1.085
0.00130	0.01563	1.553	0.112	1.442	0.000	1.442	0.00127	0.01521	1.313	0.028	1.285	0.000	1.285
0.00150	0.01800	2.027	0.208	1.819	0.000	1.819	0.00147	0.01761	1.549	0.050	1.499	0.000	1.499
0.00171	0.02046	2.357	0.309	2.048	0.000	2.048	0.00168	0.02013	1.836	0.062	1.773	0.000	1.773
0.00192	0.02298	2.754	0.392	2.362	0.000	2.362	0.00188	0.02252	2.137	0.079	2.057	0.000	2.057
0.00212	0.02540	3.179	0.456	2.723	0.000	2.723	0.00208	0.02497	2.488	0.108	2.380	0.000	2.380
0.00232	0.02787	3.644	0.612	3.032	0.000	3.032	0.00229	0.02749	2.864	0.157	2.707	0.000	2.707
0.00253	0.03039	4.148	0.615	3.533	0.000	3.533	0.00250	0.03001	3.215	0.185	3.030	0.000	3.030
0.00274	0.03283	4.662	0.903	3.759	0.000	3.759	0.00269	0.03226	3.653	0.238	3.415	0.000	3.415
0.00294	0.03526	5.253	1.019	4.235	0.000	4.235	0.00290	0.03475	3.996	0.245	3.751	0.000	3.751

หมายเหตุ : หน่วย Q<sub>lab</sub>, Q<sub>equi</sub> (ลบ.ม./วินาที)S<sub>w</sub>, ds''', ds'', ds, ds (ม.)



รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตารางที่ 4-15 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	195.74	2.54
S2	205.15	2.26
S3	210.85	2.10
S4	247.11	1.75

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B ของทรายที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ขนาดพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับรูปที่ 4-14 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ  $f' = \frac{214.71}{Re'}$

การไหลแบบเปลี่ยนแปลง  $f' = \frac{214.71}{Re'} + 2.16$

และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเท่ากับ 27.3

## 4.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะไม่คงตัว

### 4.5.1 การไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

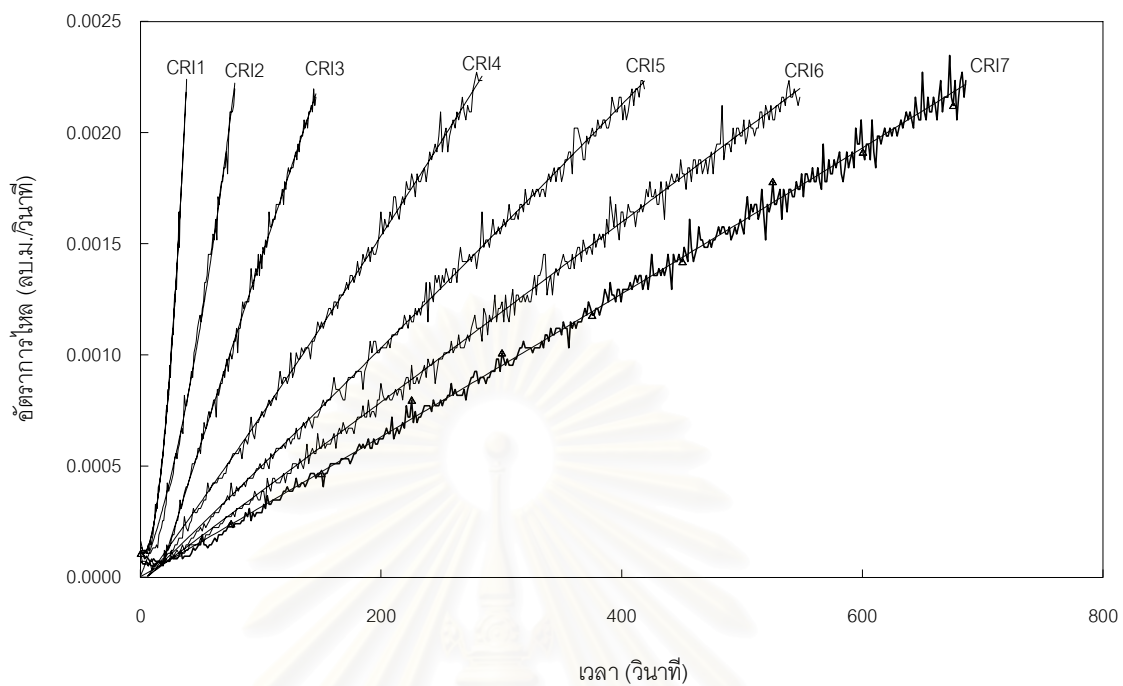
เนื่องจากการทดลองนี้เป็นกรทดลองการไหลในแนวรัศมีเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.1 แตกต่างกันเพียงค่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลส่วนที่เพิ่มขึ้นมา คือ สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.4.1 จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณผลการทดลองกรณีนี้ด้วยคือ ค่าความนำคลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือ ค่าระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) ค่าระดับความดันในชั้นน้ำในช่วงเวลาต่างๆ ที่ตำแหน่ง 28-199 เซนติเมตร จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล ( $h_{28}, \dots, h_{199}$ ) และอัตราการไหลที่คำนวณจากระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) ในการทดลองเปลี่ยนค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่า ที่เวลา 30 75 150 300 450 600 และ 750 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-15 โดยมีตัวอย่างผลการทดลอง CRI7/S1 แสดงในตารางที่ 4-16 ผลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

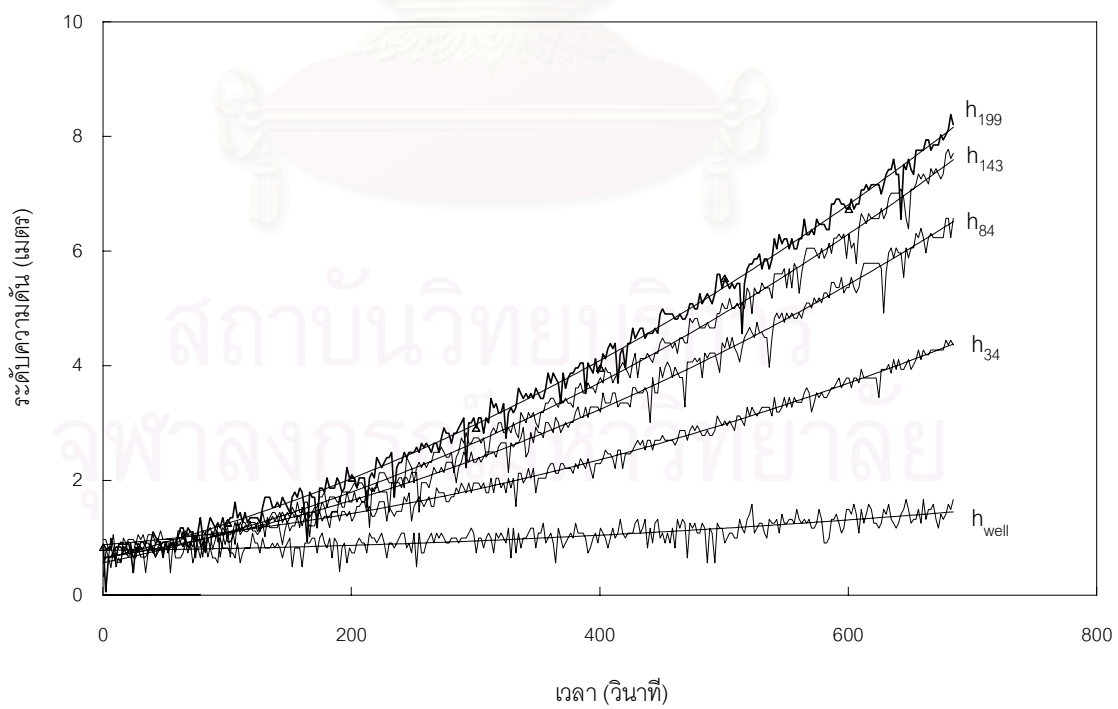
1) จากข้อมูลระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล (เนื่องจากระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาลมีผลของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล) สามารถลากเส้นระดับความดันที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำตามระยะทางจนถึงผิวบ่อน้ำบาดาล โดยใช้สายตาประมาณความคลาดเคลื่อนของข้อมูลด้านบนและล่างของเส้นให้มีค่าใกล้เคียงกัน และยึดระดับความดันที่วัดได้จากตำแหน่งที่ไกลจากบ่อน้ำบาดาลมากที่สุดแทนระดับความดันของชั้นน้ำ ซึ่งระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $h_{20}$ ) จะนำไปใช้คำนวณค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลต่อไป ตัวอย่างระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองที่ CRI7/S1 แสดงในรูปที่ 4-16 และเส้นระดับความดัน (Piezometric surface) ของการทดลองที่ CRI7/S1 แสดงในรูปที่ 4-17

2) คำนวณค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่เกิดขึ้น โดยหาจากผลต่างของระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลอง ( $h_w$ ) และระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $h_{20}$ ) แสดงในรูปที่ 4-17 ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง CRI7/S1 ที่เวลา 300 600 และ 750 วินาที มีค่าเท่ากับ 0.535 1.401 และ 1.993 เมตรตามลำดับ ขณะที่เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) ที่เวลา 300 600 และ 750 วินาที มีค่าเท่ากับ 1.493 4.088 และ 5.579 เมตร เมื่อพิจารณาถึงระยะ 1.99 เมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (จุดวัดความดันตำแหน่งสุดท้าย) นั่นคือเฮดสูญเสียทั้งหมด (Total Loss) จากการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของการทดลอง CRI7/S1 มีค่าเท่ากับ 2.082 5.489 และ 7.572 เมตร

3) คำนวณค่าอัตราการไหลจากระดับน้ำเหนือสันฝายโดยใช้สมการ  $Q = 0.0438h_{weir}^{1.539}$



รูปที่ 4-15 อัตราการไหลต่อเวลาของการทดลอง CRI1/S1-CRI7/S1



รูปที่ 4-16 ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลอง CRI7/S1

ตารางที่ 4- 16 ข้อมูลจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นของการทดลอง CR17/S1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.34$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.061 กิโลกรัม

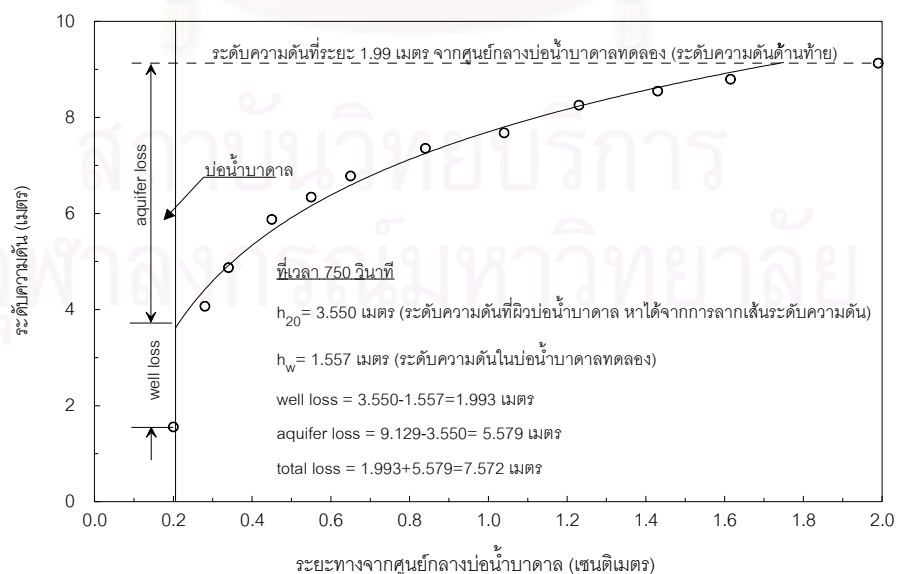
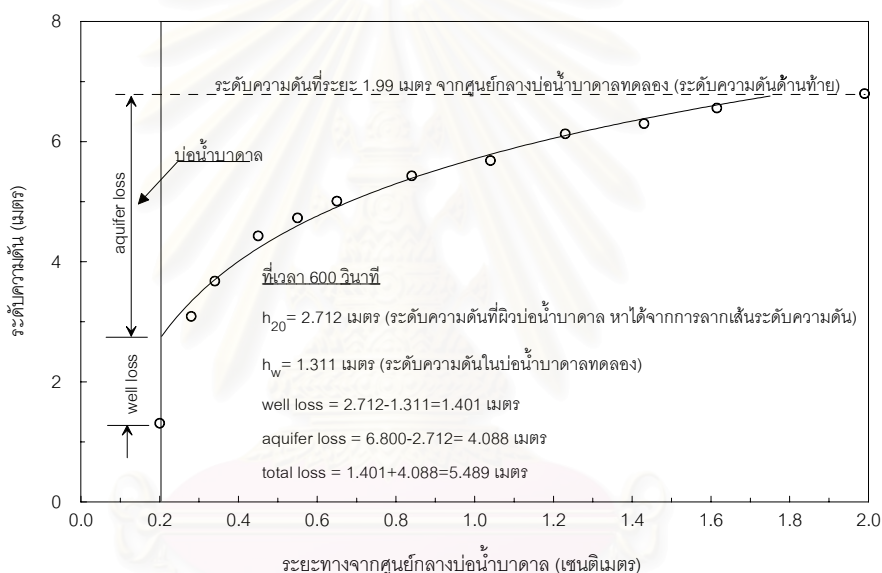
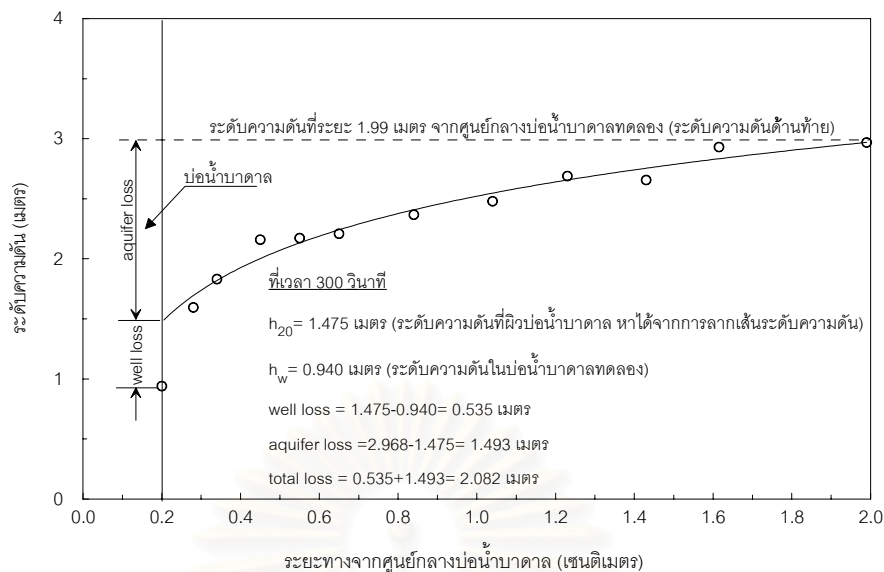
อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ความพรุน = 0.408

เวลา ทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)												
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
50	0.779	0.794	0.808	0.869	0.885	0.934	0.937	0.948	0.961	0.991	1.082	1.090	0.0246
100	0.798	1.011	1.022	1.028	1.034	1.048	1.070	1.093	1.154	1.178	1.328	1.336	0.0397
150	0.824	1.119	1.231	1.402	1.303	1.264	1.323	1.366	1.479	1.372	1.648	1.586	0.0522
200	0.857	1.255	1.403	1.621	1.556	1.538	1.627	1.693	1.835	1.751	2.026	1.997	0.0634
250	0.896	1.414	1.603	1.874	1.847	1.854	1.977	2.065	2.240	2.180	2.456	2.460	0.0735
300	0.940	1.595	1.831	2.159	2.172	2.209	2.367	2.479	2.689	2.656	2.930	2.968	0.0830
350	0.990	1.798	2.084	2.474	2.530	2.599	2.796	2.932	3.177	3.173	3.447	3.519	0.0920
400	1.045	2.020	2.360	2.816	2.916	3.021	3.260	3.419	3.703	3.730	4.002	4.108	0.1005
450	1.105	2.261	2.658	3.183	3.331	3.475	3.757	3.940	4.262	4.323	4.592	4.732	0.1087
500	1.169	2.520	2.978	3.576	3.773	3.959	4.285	4.492	4.855	4.950	5.217	5.390	0.1165
550	1.238	2.797	3.318	3.992	4.240	4.471	4.844	5.075	5.478	5.610	5.874	6.080	0.1241
600	1.311	3.091	3.679	4.431	4.731	5.010	5.432	5.685	6.131	6.301	6.561	6.800	0.1314
650	1.389	3.401	4.058	4.892	5.245	5.575	6.047	6.323	6.812	7.022	7.277	7.549	0.1385
700	1.471	3.727	4.456	5.374	5.782	6.165	6.689	6.988	7.520	7.771	8.022	8.326	0.1454
750	1.557	4.069	4.872	5.877	6.341	6.780	7.356	7.678	8.255	8.548	8.794	9.129	0.1522



รูปที่ 4-17 เส้นระดับความดันของการทดลอง CR17/S1 ที่เวลา 300 600 และ 750 วินาที

4) หาค่าความชันชลศาสตร์ ( $I$ ) ค่าเรย์โนลด์ ( $Re'$ ) และแฟคเตอร์เสียดทาน ( $f'$ ) ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน โดยความชันชลศาสตร์หาได้จากความชันของเส้นระดับความดัน ขณะที่  $Re'$  คำนวณจากสมการที่ 2-13  $Re' = \left(\frac{V}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)$  โดยที่  $v$  คำนวณจากอัตราการใช้ไหล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล และแบบจำลองเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา หนา 0.2 เมตร ดังนั้น  $A = \left(\frac{\pi r}{6}\right) \times 0.2$  ตารางเมตร เมื่อทราบค่า  $v$   $\phi$   $d_{50}$  และ  $v$  จะหาค่าเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ และคำนวณแฟคเตอร์เสียดทานจากสมการที่ 2-23  $f' = \frac{lgd_{50}}{2\left(\frac{V}{\phi}\right)^2}$  เมื่อทราบค่า  $I$   $d_{50}$   $v$  และ  $\phi$  ตัวอย่างผลการคำนวณค่า  $I$   $Re'$  และ  $f'$  ของการทดลองที่ CRI7/S1 แสดงดังตารางที่ 4-17

5) หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

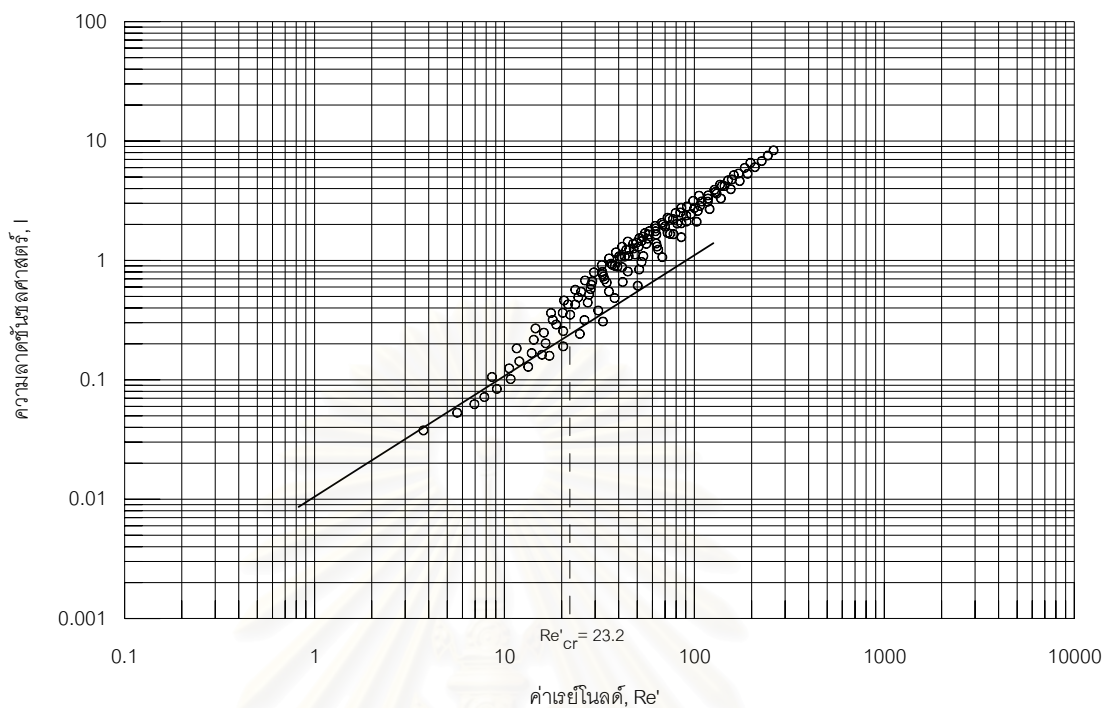
- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $Re'$  โดยนำค่า  $I$  กับ  $Re'$  ที่คำนวณได้จากการทดลอง CRI7/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-18 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $I$  กับ  $Re'$  ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันลึกคงที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความชันเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 1 คือจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า  $Re'$  ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $Re'_{cr}$  และจากรูปที่ 4-18 ค่า  $Re'_{cr}$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 23.2

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  โดยนำค่า  $f'$  กับ  $Re'$  ที่คำนวณได้จากการทดลอง CRI7/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-19 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f'$  กับ  $Re'$  ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงหรือมีความลาดชันคงที่ ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความลาดชันเปลี่ยนแปลงไป จะจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหล ซึ่งค่า  $Re'$  ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $Re'_{cr}$  และจากรูปที่ 4-19 ค่า  $Re'_{cr}$  ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  มีค่าเท่ากับ 23.2 เช่นกัน

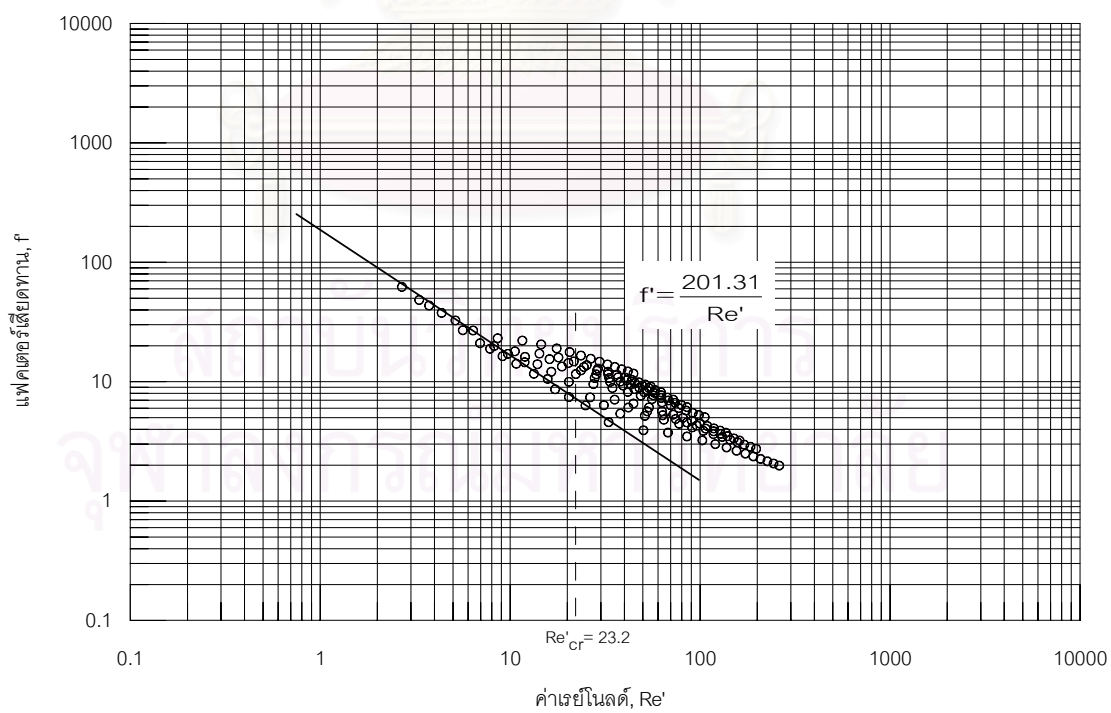
ตารางที่ 4-17 ผลการคำนวณ  $Re'$  และ  $f'$  ของการทดลอง CR17/S1 ที่เวลาต่างๆ

เวลา (วินาที)	$h_{weir}$ (ซม.)	$Q_{lab} \times 10^{-5}$ (ลบ.ม./วินาที)	$r$ (ม.)	$A$ (ตร.ม.)	$v$ (ม./วินาที)	$v/\phi$ (ม./วินาที)	$Re'$	$l$	$f'$
50	2.45	14.58	0.340	0.036	0.00409	0.01004	15.76	0.162	10.56
			0.450	0.047	0.00309	0.00758	11.91	0.127	14.56
			0.550	0.058	0.00253	0.00620	9.74	0.100	17.13
			0.650	0.068	0.00214	0.00525	8.24	0.084	19.92
			0.840	0.088	0.00166	0.00406	6.38	0.067	26.87
			1.040	0.109	0.00134	0.00328	5.15	0.053	32.59
			1.230	0.129	0.00113	0.00277	4.36	0.044	37.70
			1.430	0.150	0.00097	0.00239	3.75	0.038	43.47
			1.615	0.169	0.00086	0.00211	3.32	0.033	48.40
1.990	0.189	0.00070	0.00171	2.69	0.028	62.22			
300	8.30	95.12	0.340	0.036	0.02670	0.06545	102.80	2.105	3.23
			0.450	0.047	0.02018	0.04945	77.67	1.658	4.45
			0.550	0.058	0.01651	0.04046	63.55	1.305	5.24
			0.650	0.068	0.01397	0.03424	53.77	1.087	6.09
			0.840	0.088	0.01081	0.02649	41.61	0.878	8.22
			1.040	0.109	0.00873	0.02140	33.61	0.695	9.97
			1.230	0.129	0.00738	0.01809	28.42	0.575	11.53
			1.430	0.150	0.00635	0.01556	24.44	0.490	13.29
			1.615	0.169	0.00562	0.01378	21.64	0.428	14.80
1.990	0.189	0.00456	0.01118	17.56	0.362	19.03			
600	13.14	192.70	0.340	0.036	0.05410	0.13260	208.26	6.038	2.26
			0.450	0.047	0.04088	0.10019	157.35	4.755	3.11
			0.550	0.058	0.03344	0.08197	128.74	3.744	3.66
			0.650	0.068	0.02830	0.06936	108.93	3.117	4.26
			0.840	0.088	0.02190	0.05367	84.29	2.518	5.74
			1.040	0.109	0.01769	0.04335	68.08	1.992	6.97
			1.230	0.129	0.01495	0.03665	57.57	1.648	8.06
			1.430	0.150	0.01286	0.03153	49.52	1.406	9.29
			1.615	0.169	0.01139	0.02792	43.84	1.227	10.34
1.990	0.189	0.00924	0.02266	35.58	1.039	13.30			
750	15.22	241.59	0.340	0.036	0.06783	0.16624	261.09	8.345	1.98
			0.450	0.047	0.05125	0.12561	197.27	6.572	2.74
			0.550	0.058	0.04193	0.10277	161.40	5.175	3.22
			0.650	0.068	0.03548	0.08696	136.57	4.308	3.74
			0.840	0.088	0.02745	0.06729	105.68	3.481	5.05
			1.040	0.109	0.02217	0.05435	85.36	2.754	6.13
			1.230	0.129	0.01875	0.04595	72.17	2.278	7.09
			1.430	0.150	0.01613	0.03953	62.08	1.943	8.17
			1.615	0.169	0.01428	0.03500	54.97	1.696	9.10
1.990	0.189	0.01159	0.02840	44.61	1.436	11.69			





รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (CR17/S1)



รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (CR17/S1)

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากความสัมพันธ์ยังไม่นอนขนานกับแกน X หรือค่าแฟคเตอร์เสียดทานยังไม่คงที่ โดยสภาพการไหลแบบราบเรียบจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้  $f' = \frac{201.31}{Re'}$  (นั่นคือค่าคงที่ A ในสมการที่ 2-24 และ 2-25 มีค่าเท่ากับ 272.31) และทำการหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 2-25 โดยนำค่า  $\frac{201.31}{Re'}$  ไปหักออกจากค่า  $f'$  ที่ได้จากการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยของ B ได้เท่ากับ 1.95 นั่นคือสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $f'$  กับ  $Re'$  ดังสมการ  $f' = \frac{201.31}{Re'} + 1.95$  โดยสมการนี้จะใช้ได้ในช่วงขอบเขตของค่าเรย์โนลด์ในการทดลองเท่านั้น

7) เนื่องจากการไหลในแต่ละช่วงเวลาเสมือนการไหลแบบคงที่ จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลนำพา ( $c_2'$ ) พร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่นได้แก่ ค่าความนำพลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) โดยมีขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- กรณีการไหลแบบเชิงเส้น คำนวณพารามิเตอร์  $K_2'$  และ  $c_2'$  ตามสมการที่ 2-19  $I = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)^2$  เมื่อสังเกตจากสมการพบว่าค่า  $K_2'$  และ  $c_2'$  นอกจากจะขึ้นกับ  $I$  และ  $\frac{V}{\phi}$  แล้วยังขึ้นกับค่า  $r$  ด้วย ( $r$  คือ ระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล) แต่จากการศึกษาของนพดลพบว่า ค่า  $K_2'$  และ  $c_2'$  ที่ระยะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการวิเคราะห์จึงนำค่า  $I$  และ  $\frac{V}{\phi}$  ของจุดที่มี  $Re' < Re'_{cr}$  (การไหลแบบเชิงเส้น) มาหาความสัมพันธ์ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-20

จากรูปที่ 4-20 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $\frac{V}{\phi}$  ที่ทุกระยะ  $r$  ในรูปสมการของ

$$I = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right) - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 \text{ คือ}$$

$$I = 23.409\left(\frac{V}{\phi}\right) - 10.968\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \frac{1}{K_2'} = 28.032, \frac{c_2'}{gr} = 10.968$$

จากค่า  $\frac{1}{K_2'}$  สามารถคำนวณค่า  $K_2'$  ได้ และพบว่าค่า  $K_2'$  มีค่าเท่ากับ 0.043 เมตร/วินาที ส่วนค่า  $c_2'$  นั้นหาได้โดยใช้ค่า  $r=1.00$  เมตร (ระยะกึ่งกลางของแบบจำลอง) ค่า  $c_2'$  ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 107.6

- กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น คำนวณพารามิเตอร์  $a_2'$ ,  $b_2'$  และ  $c_2'$  ตามสมการที่ 2-22  
 $I = a_2' \left(\frac{V}{\phi}\right) + b_2' \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 - c_2' \left(\frac{1}{gr}\right) \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$  จากสมการจะเห็นว่าค่า  $a_2'$ ,  $b_2'$  และ  $c_2'$  นอกจากจะขึ้นกับค่า  $I$  และ  $\left(\frac{V}{\phi}\right)$  ยังขึ้นกับค่า  $r$  ด้วย แต่จากการศึกษาของนพดลพบว่า ค่า  $a_2'$  ที่ระยะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $c_2'$  จากการไหลเชิงเส้นและการไหลไม่เชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ดังนั้นการวิเคราะห์หึ่งนำค่า  $I$  และ  $\frac{V}{\phi}$  ของจุดที่มี  $Re' > Re'_{cr}$  (การไหลแบบไม่เชิงเส้น) มาหาความสัมพันธ์ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-21

จากรูปที่ 4-21 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $\frac{V}{\phi}$  ที่ทุกระยะ  $r$  ในรูปสมการของ

$$I = a_2' \left(\frac{V}{\phi}\right) + \left(b_2' - \frac{c_2'}{gr}\right) \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 \text{ คือ}$$

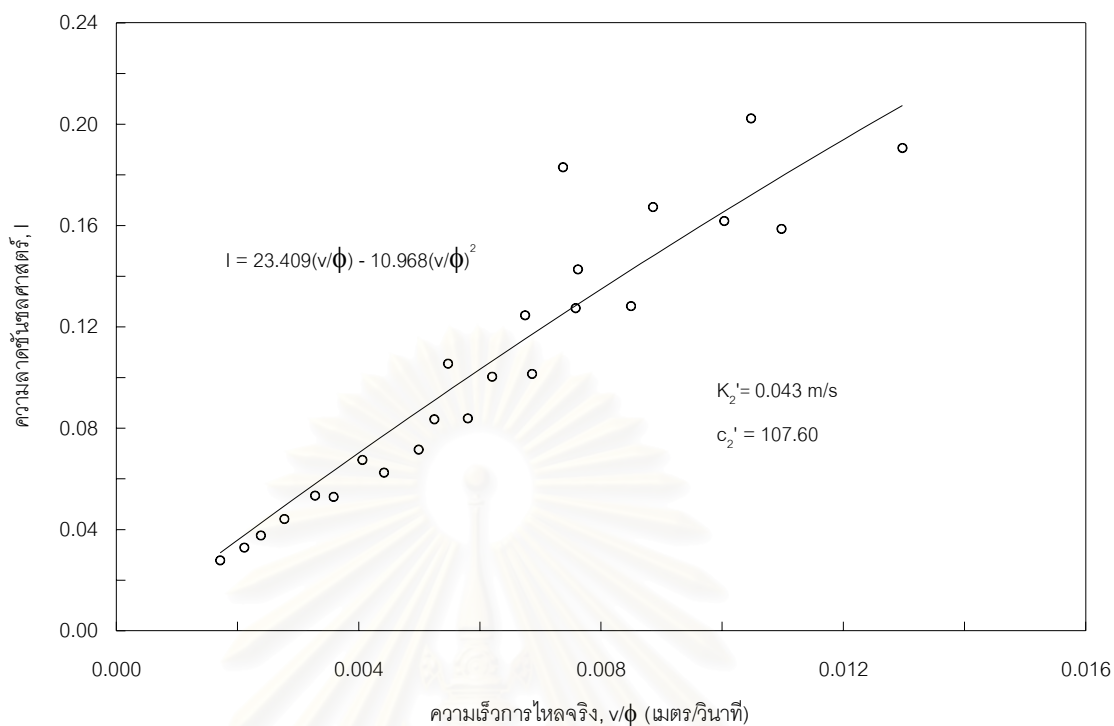
$$I = 36.684 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 85.523 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : a_2' = 36.684, b_2' - \frac{c_2'}{gr} = 85.523$$

พบว่าค่า  $a_2'$  มีค่าเท่ากับ 36.68 วินาที/เมตร ขณะที่ค่า  $b_2'$  หาได้จากการแก้สมการ โดยใช้ค่า  $r=1.00$  เมตร (ระยะกึ่งกลางของแบบจำลอง) และค่า  $c_2'$  ที่ได้จากการไหลเชิงเส้นได้ค่า  $b_2'$  เท่ากับ 96.49 วินาที<sup>2</sup>/เมตร<sup>2</sup>

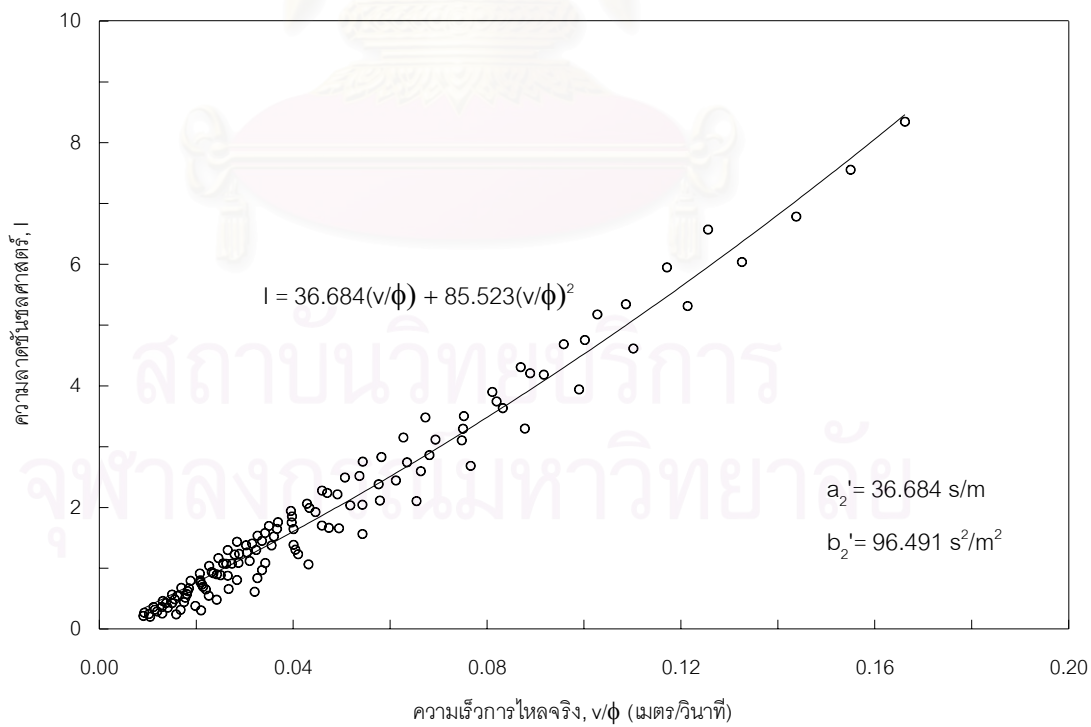
เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีของทราย ขึ้นน้ำทั้ง 4 ขนาด (CRI1/S1-CRI7/S4) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-18 จากตารางที่ 4-18 พบว่าค่าความนำไหลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัว ดังนั้นการคำนวณหาค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล เสถียรสูญเสียจากการไหลในเวลาที่ม้อัตราการไหลเท่ากับอัตราการไหลของการไหลแบบคงตัวย่อมมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4-18 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	23.2	0.043	36.68	96.49	107.60
S2	1.58	0.423	24.4	0.054	28.65	89.45	138.37
S3	1.80	0.421	27.3	0.061	20.91	82.24	187.49
S4	2.10	0.422	34.1	0.067	15.97	79.65	190.58



รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันหลอดศาสตร์ กรณีการไหลแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันหลอดศาสตร์ กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น

8) นำค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา ( $c_2'$ ) ที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- กรณีการไหลแบบเชิงเส้น คำนวณค่าพารามิเตอร์  $c_1'$  ที่ตำแหน่งกึ่งกลางบ่อน้ำบาดาล ( $r=1.00$  เมตร) จากสมการที่ 2-47 และใช้ค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลเป็นตัวแบ่งขอบเขตการไหลโดยพิจารณาจากอัตราการไหลที่ทำให้เกิดรัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลน้อยกว่า 1 เมตร ( $r_{cr}<1$ ) ผลของ  $c_1'$  แสดงในตารางที่ 4-19 จากนั้นนำค่า  $c_1'$  ที่คำนวณได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์ดังรูปที่ 4-23

จากรูปที่ 4-23 อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) และค่าเรย์โนลด์ ( $Re'$ ) ในรูปสมการได้ดังนี้

$$c_1' = 13.358Re'^{1.143} \quad (4-1)$$

- กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น คำนวณหาค่าพารามิเตอร์  $c_1'$  ตำแหน่งกึ่งกลางบ่อน้ำบาดาล ( $r=1.00$  เมตร) จากสมการที่ 2-54 และใช้ค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลเป็นตัวแบ่งขอบเขตการไหลโดยพิจารณาจากอัตราการไหลที่มีค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลมากกว่า 1 เมตร ( $r_{cr}>1$ ) ผลของค่า  $c_1'$  ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4-19 จากนั้นนำค่า  $c_1'$  ที่คำนวณได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-24

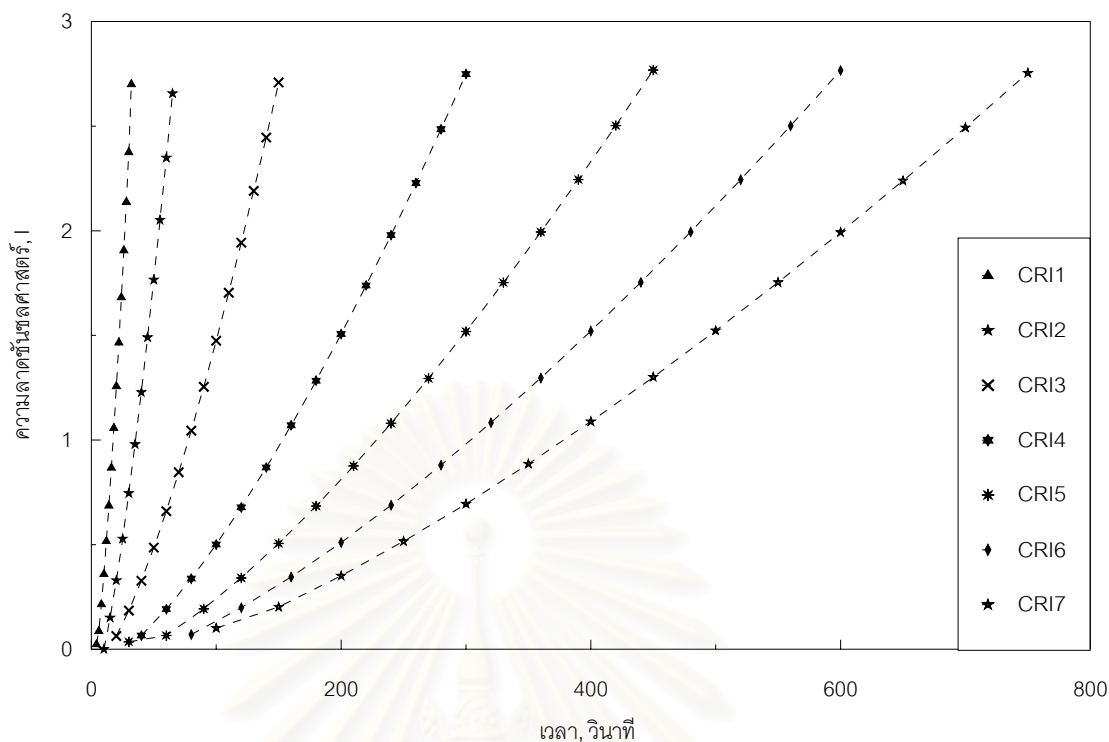
จากรูปที่ 4-24 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) และค่าเรย์โนลด์ ( $Re'$ ) ในรูปสมการดังนี้

$$c_1' = 0.039Re'^{2.546} \quad (4-2)$$

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะไม่คงตัวของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 กับค่าเรย์โนลด์และการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล (CRI1/S1-CRI7/S1) ได้ผลดังรูปที่ 4-25 และ 4-26 ซึ่งอธิบายได้ว่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวมีค่ามากขึ้น เมื่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อเวลามีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นตามค่าเรย์โนลด์ เมื่อพิจารณาทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ตัวอย่าง (CRI1/S1-CRI7/S4) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-20 และนำมาหาความสัมพันธ์เฉลี่ย ได้ดังนี้

$$\text{การไหลแบบเชิงเส้น} \quad c_1 = 18.120Re'^{1.195} \quad (4-3)$$

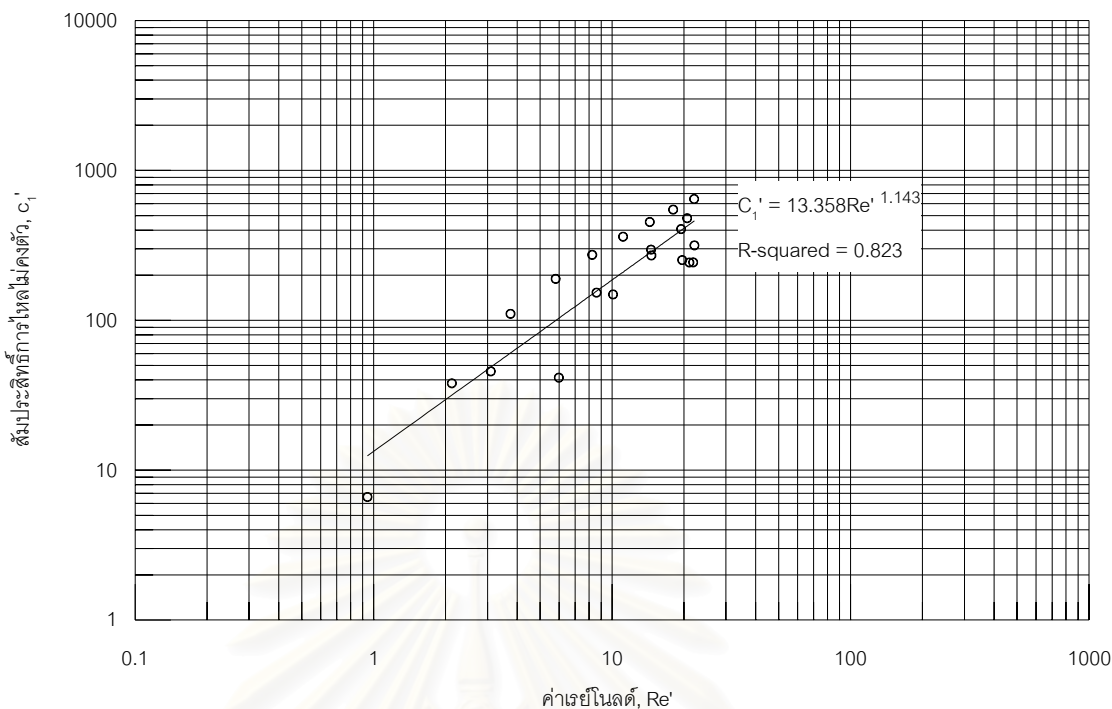
$$\text{การไหลแบบไม่เชิงเส้น} \quad c_1 = 0.041Re'^{2.408} \quad (4-4)$$



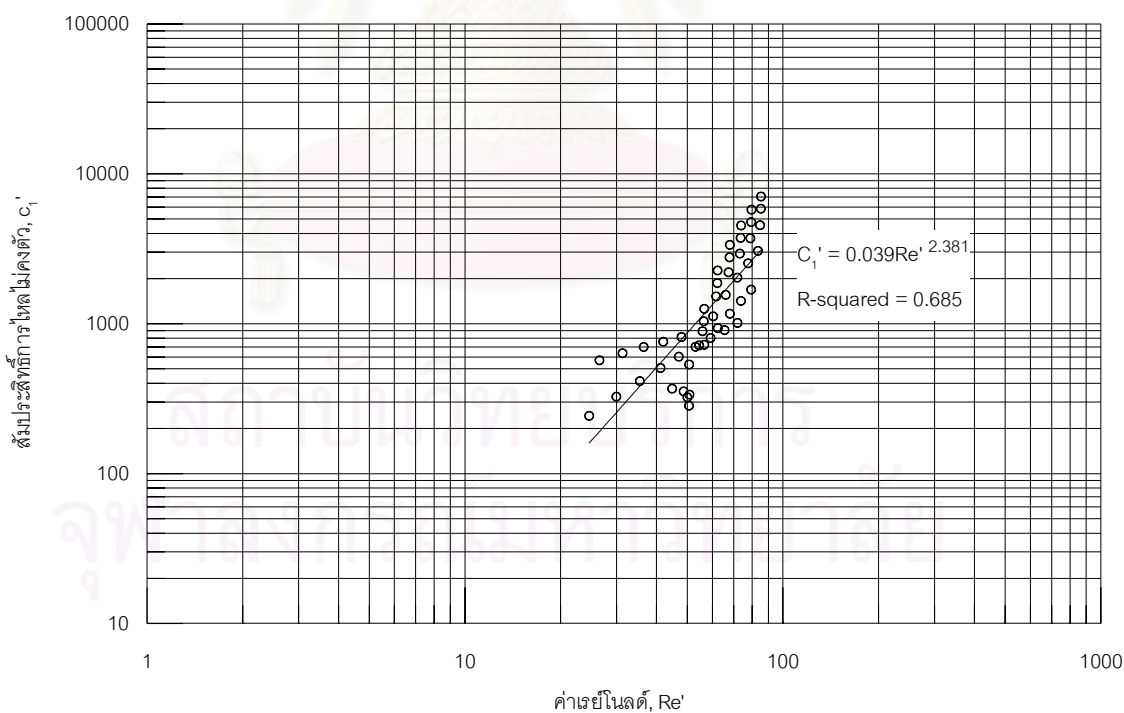
รูปที่ 4-22 ความลาดชันชลศาสตร์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลอง (CRI1/S1-CRI7/S1)

ตารางที่ 4-19 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (พิจารณาเมื่อ  $c_1' > 0$ )

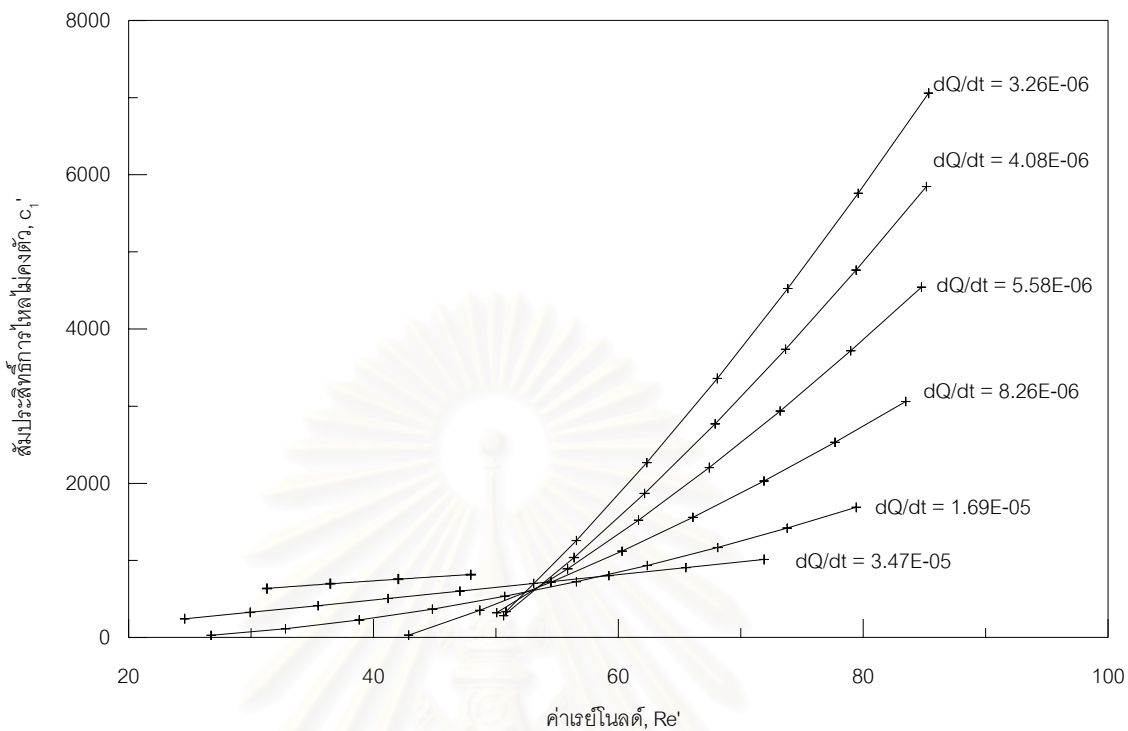
CRI1/S1		CRI2/S1		CRI3/S1		CRI4/S1		CRI5/S1		CRI6/S1		CRI7/S1	
$r_{cr}$	$c_1'$	$r_{cr}$	$c_1'$	$r_{cr}$	$c_1'$	$r_{cr}$	$c_1'$	$r_{cr}$	$c_1'$	$r_{cr}$	$c_1'$	$r_{cr}$	$c_1'$
0.010	0	0.00	0	0	0	0.133	0	0.179	0	0.214	0	0.229	0
0.042	6.63	0.11	0	0.138	45.63	0.370	0	0.426	0	0.464	0	0.479	0
0.095	38.00	0.27	41.43	0.382	152.93	0.621	0	0.680	0	0.717	0	0.731	0
0.167	110.42	0.45	148.91	0.647	296.20	0.875	252.33	0.937	243.23	0.972	243.67	0.985	316.46
0.258	189.22	0.65	270.91	0.917	480.04	1.132	0	1.194	0	1.227	0	1.239	0
0.367	273.15	0.87	406.36	1.188	27.95	1.389	0	1.452	0	1.483	0	1.494	0
0.494	361.30	1.09	242.75	1.458	113.87	1.647	0	1.710	0	1.739	0	1.749	0
0.639	452.97	1.33	326.10	1.726	228.07	1.906	31.61	1.968	0	1.994	0	2.004	0
0.801	547.63	1.58	414.30	1.992	368.82	2.164	353.89	2.225	322.56	2.250	283.39	2.259	336.09
0.981	644.83	1.83	506.69	2.255	534.46	2.422	718.12	2.483	891.93	2.506	1037.59	2.515	1257.65
1.177	570.13	2.09	602.66	2.515	723.51	2.680	1120.84	2.740	1520.50	2.762	1868.64	2.770	2267.97
1.391	635.76	2.36	701.64	2.772	934.63	2.938	1559.03	2.997	2203.59	3.018	2770.30	3.026	3359.39
1.621	698.83	2.63	803.13	3.027	1166.62	3.195	2030.07	3.254	2937.13	3.274	3737.16	3.282	4525.30
1.868	758.84	2.91	906.63	3.280	1418.37	3.453	2531.65	3.511	3717.55	3.530	4764.48	3.538	5759.90
2.131	815.28	3.20	1011.69	3.530	1688.92	3.710	3061.72	3.767	4541.67	3.785	5848.05	3.794	7058.08



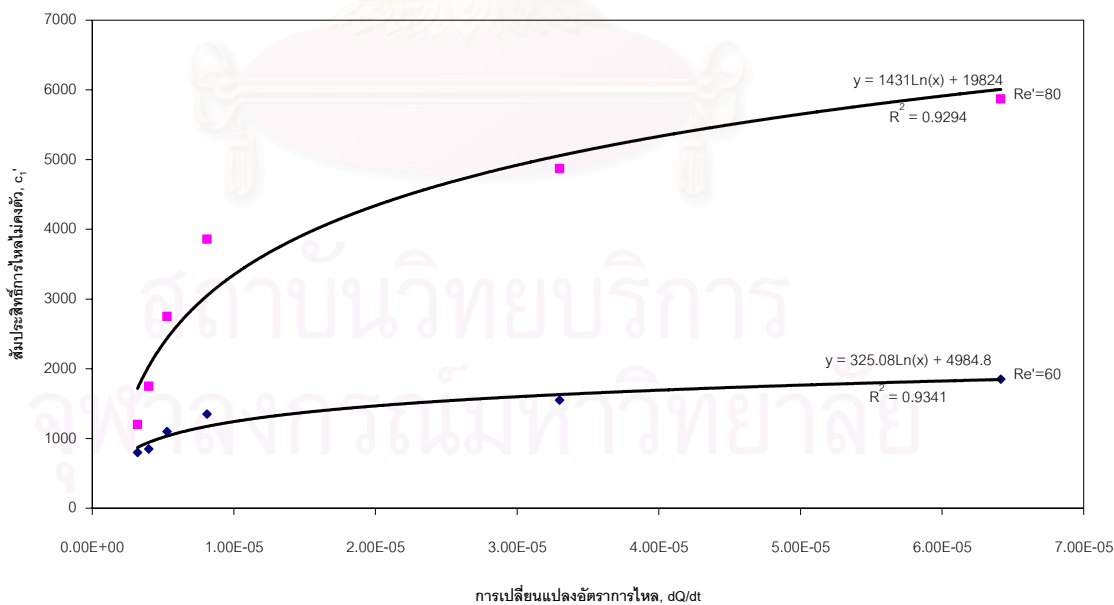
รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวกับค่าเรย์โนลด์กรณีการไหลแบบเชิงเส้น การทดลอง CRI1/S1-CRI7/S1



รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวกับค่าเรย์โนลด์กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น การทดลอง CRI1/S1-CRI7/S1



รูปที่ 4-25 สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวกับค่าเรย์โนลด์กรณีการไหลไม่เชิงเส้น (CRI1/S1-CRI7/S1)



รูปที่ 4-26 สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวที่อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลต่างๆ กรณีการไหลไม่เชิงเส้น (CRI1/S1-CRI7/S1)



ตารางที่ 4-20 สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ )	
				การไหลแบบเชิงเส้น	การไหลแบบไม่เชิงเส้น
S1	1.34	0.408	23.2	$13.358Re'^{1.14}$	$0.039Re'^{2.381}$
S2	1.58	0.423	24.4	$16.534Re'^{1.18}$	$0.040 Re'^{2.399}$
S3	1.80	0.421	27.3	$19.710 Re'^{1.21}$	$0.041 Re'^{2.417}$
S4	2.10	0.422	34.1	$22.886Re'^{1.25}$	$0.042Re'^{2.436}$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5.2 การไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.1 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำคลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

จากการทดลองในลักษณะเดียวกันต่างกันเฉพาะทิศทางการไหล ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-21 และ 4-22 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลนำพากับขนาดทรายชั้นน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัว ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวมีค่าสูงกว่าการไหลเข้า และมีค่าสูงขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

ตารางที่ 4-21 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	23.3	0.042	37.16	99.58	135.60
S2	1.58	0.423	24.5	0.053	29.19	91.18	153.02
S3	1.80	0.421	27.2	0.060	21.53	82.41	188.73
S4	2.10	0.422	34.2	0.066	14.63	79.92	192.26

ตารางที่ 4-22 สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ )	
				การไหลแบบเชิงเส้น	การไหลแบบไม่เชิงเส้น
S1	1.34	0.408	23.2	$13.364Re'^{1.14}$	$0.040Re'^{2.371}$
S2	1.58	0.423	24.4	$16.543Re'^{1.18}$	$0.041Re'^{2.389}$
S3	1.80	0.421	27.3	$19.721Re'^{1.21}$	$0.042Re'^{2.407}$
S4	2.10	0.422	34.1	$22.898Re'^{1.25}$	$0.043Re'^{2.426}$

#### 4.5.3 การไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองการไหลในแนวรัศมีเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.1 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำคลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

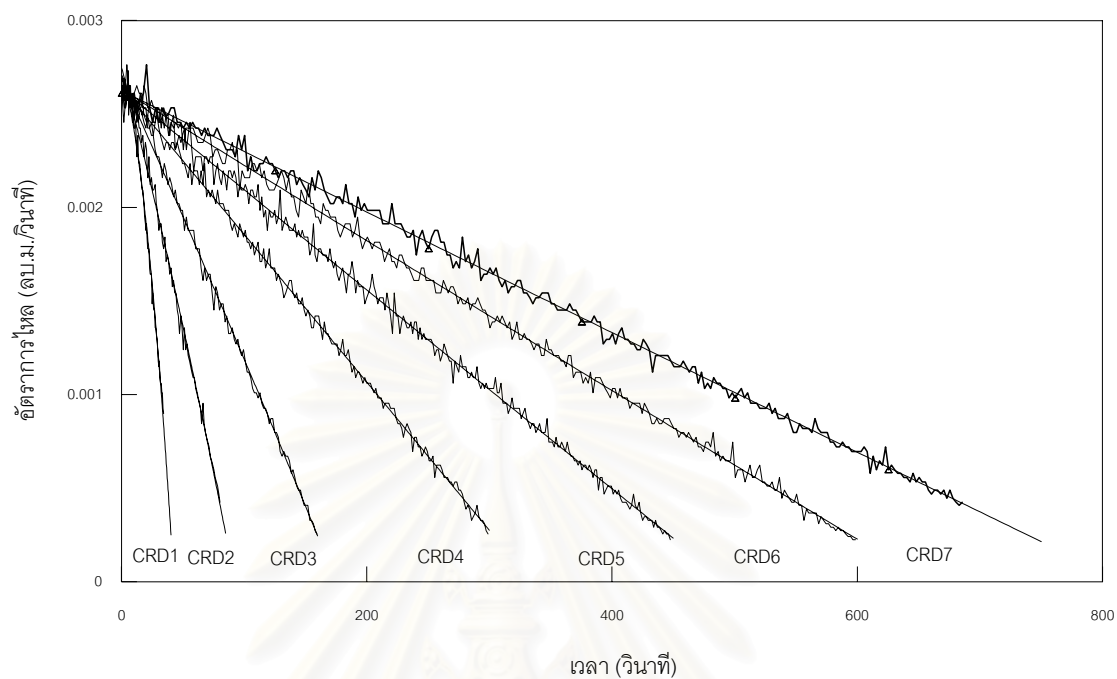
จากการทดลองในลักษณะเดียวกัน ต่างกันเฉพาะอัตราการไหลที่ลดลงตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4-27 โดยมีตัวอย่างระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลอง CRD1/S1 ดังแสดงในรูปที่ 4-28 ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-23 และ 4-24 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลนำพากับขนาดทรายชั้นน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัว ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวมีค่าสูงกว่าการไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

ตารางที่ 4-23 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

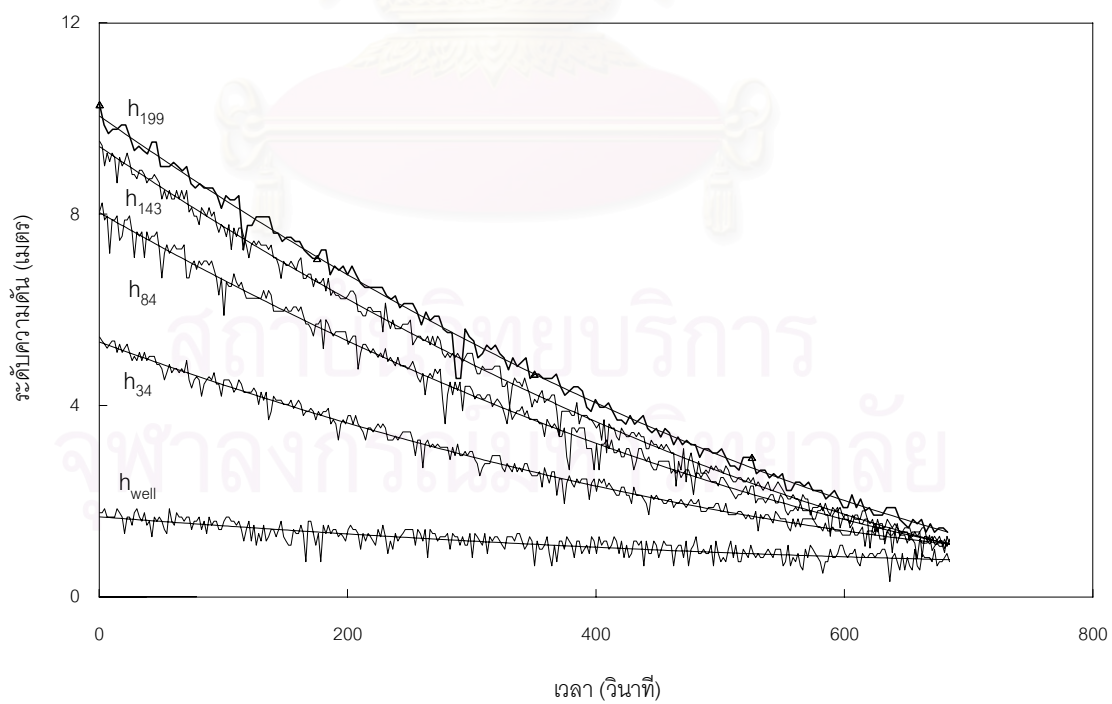
ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	22.6	0.045	33.87	90.50	106.13
S2	1.58	0.423	24.5	0.053	24.29	86.94	137.49
S3	1.80	0.421	27.4	0.064	21.05	81.26	176.53
S4	2.10	0.422	34.3	0.067	16.23	77.69	184.89

ตารางที่ 4-24 สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ )	
				การไหลแบบเชิงเส้น	การไหลแบบไม่เชิงเส้น
S1	1.34	0.408	23.2	$13.360Re'^{1.15}$	$0.040Re'^{2.382}$
S2	1.58	0.423	24.4	$16.537Re'^{1.19}$	$0.041Re'^{2.400}$
S3	1.80	0.421	27.3	$19.713Re'^{1.22}$	$0.042Re'^{2.418}$
S4	2.10	0.422	34.1	$22.889Re'^{1.26}$	$0.043Re'^{2.437}$



รูปที่ 4-27 อัตราการไหลต่อเวลาของการทดลอง CRD1/S1-CRD7/S1



รูปที่ 4-28 ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลอง CRD7/S1

#### 4.5.4 การไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.3 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำซศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

จากการทดลองในลักษณะเดียวกันต่างกันเฉพาะทิศทางการไหล ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-25 และ 4-26 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำซศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลนำพากับขนาดทรายชั้นน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัว ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวมีค่าสูงกว่าการไหลเข้า และมีค่าสูงขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

ตารางที่ 4-25 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	22.4	0.044	34.13	90.61	117.11
S2	1.58	0.423	24.3	0.052	26.18	87.49	142.64
S3	1.80	0.421	27.3	0.063	21.08	82.71	188.58
S4	2.10	0.422	34.5	0.065	18.56	78.43	191.23

ตารางที่ 4-26 สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของ การไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ )	
				การไหลแบบเชิงเส้น	การไหลแบบไม่เชิงเส้น
S1	1.34	0.408	23.2	$13.366Re'^{1.14}$	$0.041Re'^{2.372}$
S2	1.58	0.423	24.4	$16.545Re'^{1.18}$	$0.042Re'^{2.390}$
S3	1.80	0.421	27.3	$19.714Re'^{1.21}$	$0.043Re'^{2.408}$
S4	2.10	0.422	34.1	$22.900Re'^{1.25}$	$0.044Re'^{2.427}$

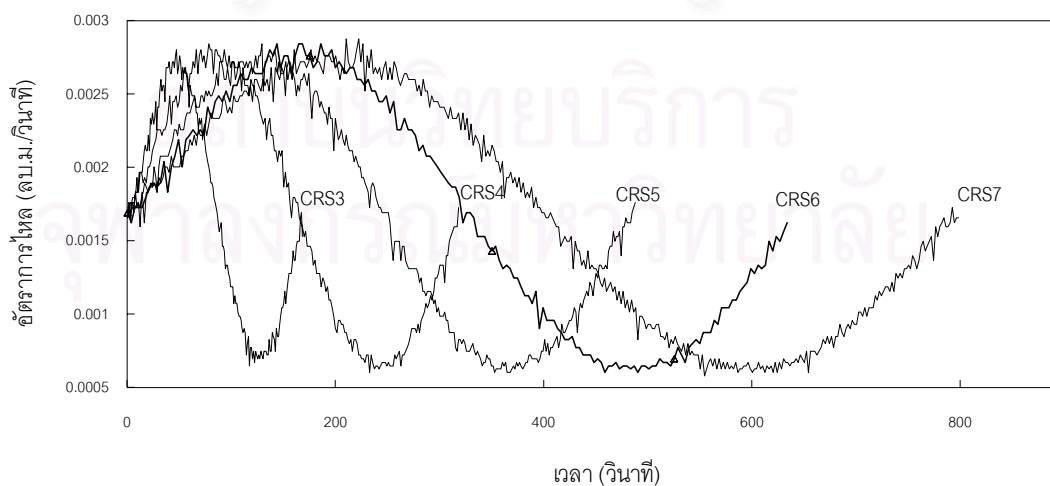
#### 4.5.5 การไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.1 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำคลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

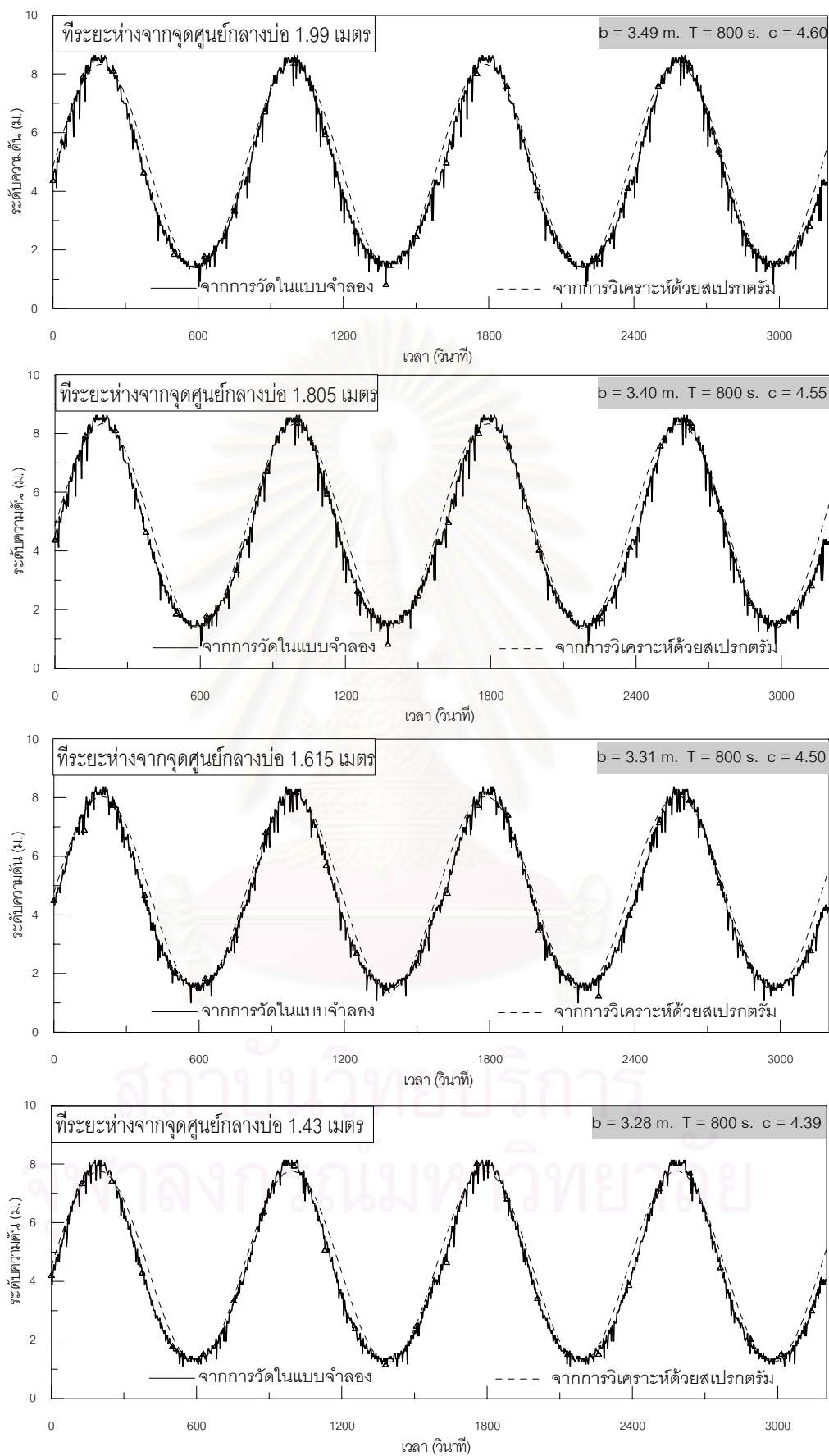
จากการทดลองในลักษณะเดียวกัน ต่างกันเฉพาะอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ ( $Q = b\sin(\omega t) + c$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4-29 โดยมีตัวอย่างระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลอง CRS7/S2 ดังแสดงในรูปที่ 4-30 ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-27 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลนำพากับขนาดทรายชั้นน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัว

ตารางที่ 4-27 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

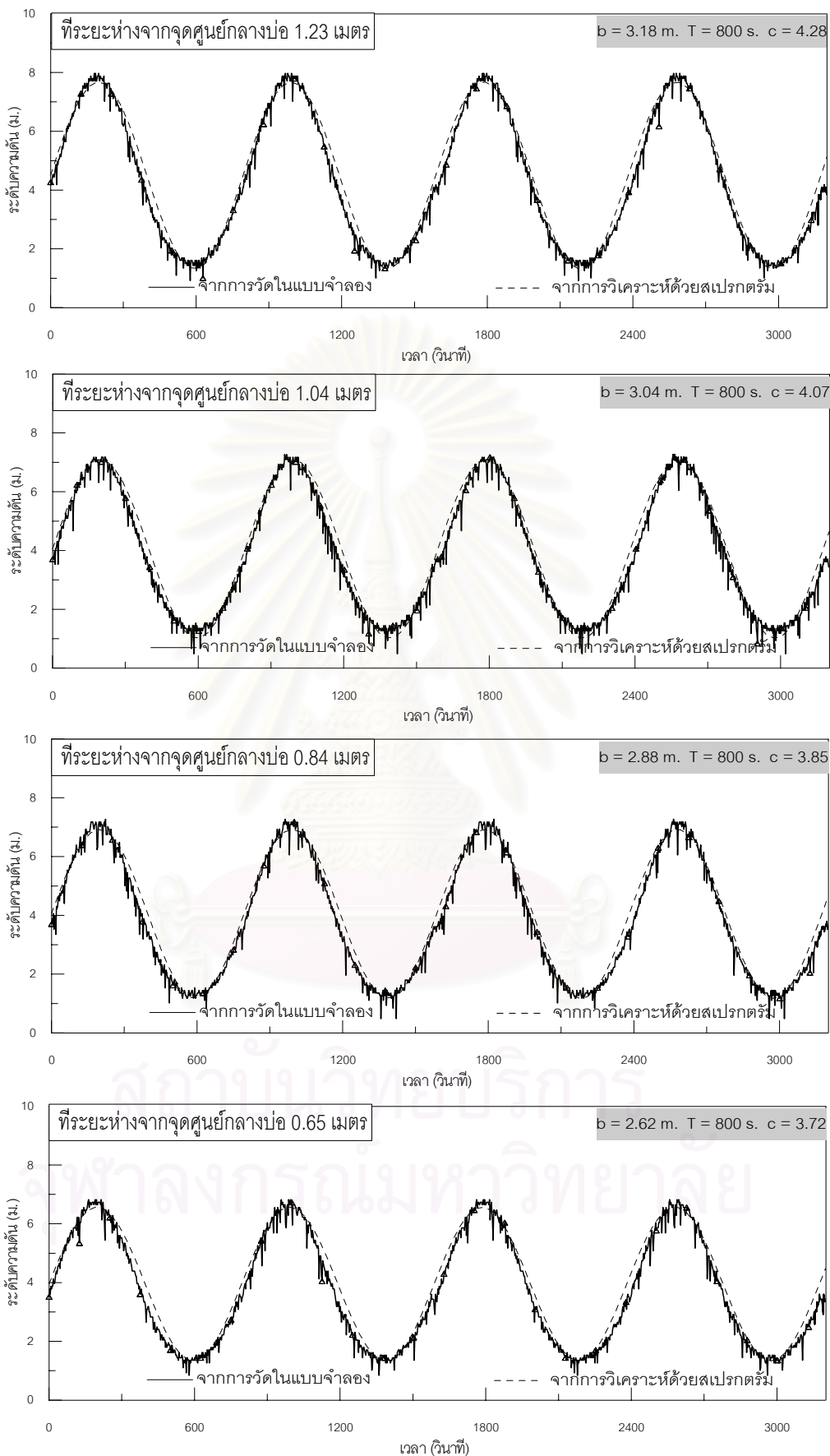
ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	22.8	0.045	35.13	90.61	107.11
S2	1.58	0.423	25.3	0.053	26.18	85.49	132.64
S3	1.80	0.421	28.2	0.064	21.08	80.71	178.58
S4	2.10	0.422	33.5	0.066	18.56	78.43	191.23



รูปที่ 4-29 อัตราการไหลต่อเวลาของการทดลอง CRS3/S1-CRS7/S1

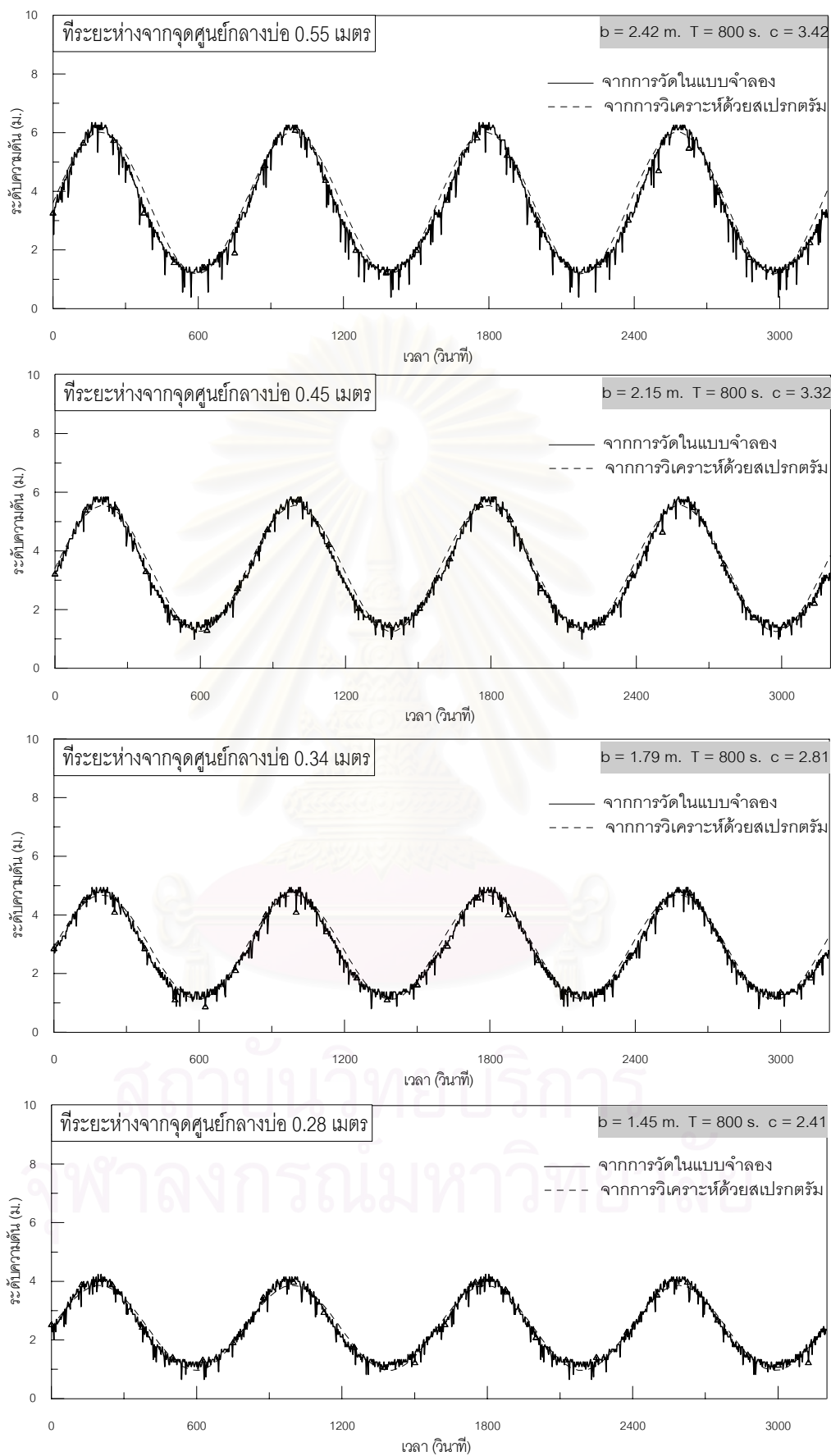


รูปที่ 4-30 รูปร่างของเส้นระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง การทดลอง CRS7/S2



รูปที่ 4-30 รูปร่างของเส้นระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง การทดลอง CRS7/S2 (ต่อ)





รูปที่ 4-30 รูปร่างของเส้นระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง การทดลอง CRS7/S2 (ต่อ)

#### 4.5.6 การไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.5 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำคลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ )

จากการทดลองในลักษณะเดียวกันต่างกันเฉพาะทิศทางการไหล ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-28 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลนำพา กับขนาดทรายชั้นน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลภายใต้สภาวะคงตัว

ตารางที่ 4-28 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	$d_{50}$ (ม.ม.)	ความพรุน	$Re'_{cr}$	$K_2'$ (ม./วินาที)	$a_2'$ (วินาที/ม.)	$b_2'$ (วินาที <sup>2</sup> /ม. <sup>2</sup> )	$c_2'$
S1	1.34	0.408	23.4	0.044	36.81	93.52	117.23
S2	1.58	0.423	24.3	0.052	28.37	88.30	142.64
S3	1.80	0.421	27.3	0.063	22.05	83.61	188.58
S4	2.10	0.422	34.5	0.067	18.78	79.54	197.19

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการประยุกต์ใช้

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง และเสนอแนะขั้นตอนการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน

เนื่องจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในการทดลองมีเสถียรสูญเสียจากการไหลเกิดขึ้นใน 2 ส่วนหลักดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.6 ประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) และเสถียรสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) ซึ่งแบ่งออกเป็นเสถียรสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำและเสถียรสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน 3 ลักษณะ ได้แก่ การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะไม่คงตัว ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงแยกการวิเคราะห์เป็น 4 ประเด็นหลักประกอบด้วย

- 1) การหาจุดเปลี่ยนสภาพการไหลจากการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น หรือหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ ) เพื่อนำไปคำนวณหารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ )
- 2) การหาเสถียรสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล (Total Head Loss)
- 3) การหาเสถียรสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำภายใต้สภาวะการไหลคงตัว และการหาค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การนำพา ( $c_2'$ )
- 4) การหาเสถียรสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำภายใต้สภาวะการไหลไม่คงตัว และการหาค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_2'$ ) ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1'$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การนำพา ( $c_2'$ )

ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมรวมการไหลกับค่าเรย์โนลด์วิกฤติหรือขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายชั้นน้ำซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการทดลอง จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีกับการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่าง

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จะต้องพิจารณาว่า ขอบเขตของการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ในแต่ละการทดลองมีขอบเขตใกล้เคียงกันหรือไม่ ซึ่งขอบเขตการทดลองที่นำมาวิเคราะห์สรุปในตารางที่ 5-1 เมื่อพิจารณาความเร็วการไหลในการทดลองพบว่า การทดลองการไหลแบบคงตัวมีค่าความเร็วการไหลใกล้เคียงกับค่าความเร็วการไหลในแบบไม่คงตัวมาก เนื่องจากมีช่วงอัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีจะสามารถทำได้โดยตรง พารามิเตอร์ดังกล่าวได้แก่ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซี และค่าความนำคลศาสตร์

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีหลายตัว จึงต้องมีการกำหนดสัญลักษณ์ของพารามิเตอร์เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 5-2

จากการวิเคราะห์ทดลองในบทที่ 4 ได้พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลในแต่ละการทดลอง ได้แก่  $Re'_{cr}$ ,  $K_1'$ ,  $a_1'$ ,  $b_1'$ ,  $K_2'$ ,  $a_2'$ ,  $b_2'$ ,  $c_1'$  และ  $c_2'$  ดังแสดงในตารางที่ 4-5 (การทดลองไหลแบบมาตรฐาน) ตารางที่ 4-10 และ 4-13 (การทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว) และตารางที่ 4-17 และ 4-19 (การทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะไม่คงตัว) เมื่อแยกพารามิเตอร์ตามประเภทการทดลองและรูปแบบการไหล สามารถสรุปดังตารางที่ 5-3

เนื่องจากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3 และ 4 เป็นการวิเคราะห์หาเสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำอย่างละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.7.1 และ 2.7.2 แต่การวิเคราะห์หาเสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำสามารถคำนวณได้จากค่าคงที่ A และ B ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ ตามวิธีการในหัวข้อที่ 2.7.1 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบรวม ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ด้วย

ตารางที่ 5-1 ขอบเขตการทดลองที่นำมาวิเคราะห์

ประเภทการทดลอง	อัตราการไหล ( $10^{-4}$ ลบ.ม./วินาที)	ความเร็วการไหล ( $10^{-3}$ ม./วินาที)	ค่าเรย์โนลด์
การไหลแบบมาตรฐาน	0.2-15.3	0.7-52.2	3.2-283.2
การไหลในแนวรัศมี	0.1-27.9	0.1-95.1	0.2-353.9

ตารางที่ 5-2 สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์จากการทดลอง

ตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์	ประเภทการทดลอง	ทิศทางกรไหล	สัญลักษณ์
1. ค่าเรย์โนลด์วิกฤต ( $Re'_{cr}$ )	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน	ไหลเข้า /ไหลออก	$Re'_{cr/ST}$
	การทดลองการไหลในแนวรัศมี	ไหลเข้า	$Re'_{cr/CR}$
ไหลออก		$Re'_{cr/DR}$	
2. ค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล	การทดลองการไหลในแนวรัศมี	ไหลเข้า	$C_{/CR}, n_{/CR}$
		ไหลออก	$C_{/DR}, n_{/DR}$
3. กรณีไม่คิดผลของการไหลนำพา 3.1 การไหลแบบเชิงเส้น - ค่าความนำไหลศาสตร์ ( $K_1'$ ) 3.2 การไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น - ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_1'$ ) - ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_1'$ )	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน	ไหลเข้า /ไหลออก	$K_{1'/ST}, a_{1'/ST}, b_{1'/ST}$
4. กรณีคิดผลของการไหลนำพา 4.1 การไหลแบบเชิงเส้น - ค่าความนำไหลศาสตร์ ( $K_2'$ ) - สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) 4.2 การไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น - ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) - ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) - สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ )	การทดลองการไหลในแนวรัศมี	ไหลเข้า	$K_{2'/CR}, a_{2'/CR}, b_{2'/CR}, c_{2'/CR}$
		ไหลออก	$K_{2'/DR}, a_{2'/DR}, b_{2'/DR}, c_{2'/DR}$
5. กรณีคิดผลของการไหลไม่คงตัวและผลของการไหลนำพา 5.1 การไหลแบบเชิงเส้น - ค่าความนำไหลศาสตร์ ( $K_2'$ ) - สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงที่ ( $c_1'$ ) - สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ ) 5.2 การไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น - ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) - ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) - สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงที่ ( $c_1'$ ) - สัมประสิทธิ์การไหลนำพา ( $c_2'$ )	การทดลองการไหลในแนวรัศมี	ไหลเข้า	$K_{2'/CR}, a_{2'/CR}, b_{2'/CR}, c_{1'/CR}, c_{2'/CR}$
		ไหลออก	$K_{2'/DR}, a_{2'/DR}, b_{2'/DR}, c_{1'/DR}, c_{2'/DR}$

ตารางที่ 5-3 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองแบบต่างๆ

การทดลอง	ตัวอย่างที่	d <sub>50</sub> (mm)	ความ พูน	การไหลเข้า (Converging flow)								การไหลออก (Diverging flow)							
				Re' <sub>cr</sub>	w/o Convective Term			with Convective Term				Re' <sub>cr</sub>	w/o Convective Term			with Convective Term			
					K <sub>1</sub> ' (m/s)	a <sub>1</sub> (s/m)	b <sub>1</sub> ' (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	K <sub>2</sub> ' (m/s)	a <sub>2</sub> (s/m)	b <sub>2</sub> ' (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	c <sub>2</sub> '		K <sub>1</sub> ' (m/s)	a <sub>1</sub> (s/m)	b <sub>1</sub> ' (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	K <sub>2</sub> ' (m/s)	a <sub>2</sub> (s/m)	b <sub>2</sub> ' (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	c <sub>2</sub> '
แบบ มาตรฐาน	S1	1.34	0.392	23.4	0.027	35.950	264.44					23.4	0.027	35.950	264.44				
	S2	1.58	0.409	24.4	0.041	25.750	281.89					24.4	0.041	25.750	281.89				
	S3	1.80	0.409	27.2	0.048	21.164	249.66					27.2	0.048	21.164	249.66				
	S4	2.10	0.411	34.5	0.058	11.126	209.70					34.5	0.058	11.126	209.70				
การไหลใน แนวรัศมี แบบคงตัว	S1	1.34	0.408	23.4				0.037	37.49	87.53	100.18	23.5				0.036	36.15	89.58	135.16
	S2	1.58	0.423	24.5				0.049	29.56	85.86	136.65	24.4				0.049	23.63	86.87	152.17
	S3	1.80	0.421	27.1				0.058	21.29	80.50	185.45	27.1				0.057	22.55	82.30	173.21
	S4	2.10	0.422	34.2				0.062	16.89	78.94	189.24	34.3				0.063	22.36	79.06	193.42
การไหลใน แนวรัศมี แบบเพิ่มขึ้น	S1	1.34	0.408	23.2				0.043	36.68	96.49	107.60	23.3				0.042	37.16	99.58	135.60
	S2	1.58	0.423	24.4				0.054	28.65	89.45	138.37	24.5				0.053	29.19	91.18	153.02
	S3	1.80	0.421	27.3				0.061	20.91	82.24	187.49	27.2				0.060	21.53	82.41	188.73
	S4	2.10	0.422	34.1				0.067	15.97	79.65	190.58	34.2				0.066	14.63	79.92	192.26
การไหลใน แนวรัศมี แบบลดลง	S1	1.34	0.408	22.6				0.045	33.87	90.50	106.13	22.4				0.044	34.13	99.58	135.60
	S2	1.58	0.423	24.5				0.053	24.29	86.94	137.49	24.3				0.052	26.18	91.18	153.02
	S3	1.80	0.421	27.4				0.064	21.05	81.26	176.53	27.3				0.063	21.08	82.71	188.58
	S4	2.10	0.422	34.3				0.067	16.23	77.69	184.89	34.5				0.065	18.56	78.43	191.23
การไหลใน แนวรัศมี แบบไซน์	S1	1.34	0.408	22.8				0.045	35.13	90.61	107.11	23.4				0.044	36.81	93.52	117.23
	S2	1.58	0.423	25.3				0.053	26.18	85.49	132.64	24.3				0.052	28.37	88.30	142.64
	S3	1.80	0.421	28.2				0.064	21.08	80.71	178.58	27.3				0.063	22.05	83.61	188.58
	S4	2.10	0.422	33.5				0.066	18.56	78.43	191.23	34.5				0.067	18.78	79.54	197.19

## 5.1 รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ หรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ สามารถหาจุดเปลี่ยนสภาพการไหลได้หรือจุดที่กราฟเริ่มหักเหออกจากแนวเส้นตรง ซึ่งค่าเรย์โนลด์ที่จุดดังกล่าวก็คือค่าเรย์โนลด์วิกฤติ เนื่องจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re'_{cr}$ ) เป็นตัวบ่งชี้ว่าสภาพการไหลในชั้นน้ำเป็นแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้น กล่าวคือ ถ้าการไหลที่ค่าเรย์โนลด์น้อยกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะเป็นแบบเชิงเส้น ค่าเรย์โนลด์มากกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งการทดลองการไหลในแนวรัศมีได้ใช้ค่าเรย์โนลด์วิกฤติจากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานมาออกแบบอัตราการไหลที่จะใช้ในการทดลอง เพื่อให้เกิดการไหลในชั้นน้ำในการทดลองการไหลในแนวรัศมี 3 ลักษณะ (ดังกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.6) โดยพิจารณาจากค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อ ( $Re'_{wf}$ ) ดังนี้

- การไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ (Linear Flow):  $Re'_{wf} < Re'_{cr}$
- การไหลแบบไม่เชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ (Non-Linear Flow):  $Re'_{wf} > 9.95 Re'_{cr}$
- การไหลแบบผสม (mixed flow) คือ การไหลที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาลและเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น:  $Re'_{cr} \leq Re'_{wf} \leq 9.95 Re'_{cr}$

แสดงว่าเรย์โนลด์วิกฤติมีความสำคัญมากในการพิจารณาสภาพการไหลที่เกิดขึ้นในการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

จากตารางที่ 5-3 เมื่อนำค่าเรย์โนลด์วิกฤติที่ได้จากการทดลองไปหาความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำดังแสดงในรูปที่ 5-1 พบว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติของทรายชั้นน้ำขนาดเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกการทดลอง ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเรย์โนลด์วิกฤติของการทดลองมาเป็นตัวแทนเพื่อหาความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ย

ตัวอย่างที่	ขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ย, $d_{50}$ (ม.ม.)	ค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ย, $Re'_{cr}$
S1	1.34	23.37
S2	1.58	24.45
S3	1.80	27.14
S4	2.10	34.26

เมื่อนำค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ยจากตารางที่ 5-4 ซึ่งเป็นตัวแทนของการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-2 พบว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดทรายที่ใหญ่ขึ้น และได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดทรายดังนี้

$$Re'_{cr} = 16.749d_{50}^{0.917} \quad (5-1)$$

สมการที่ 5-1 จะใช้ได้กับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยในช่วง 1.34-2.10 มิลลิเมตรเท่านั้น โดย  $d_{50}$  มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และจากสมการที่ 5-1 เมื่อนำค่าเรย์โนลด์วิกฤติไปแทนค่าในสมการที่ 2-32 จะสามารถหรัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล ได้ดังสมการต่อไปนี้

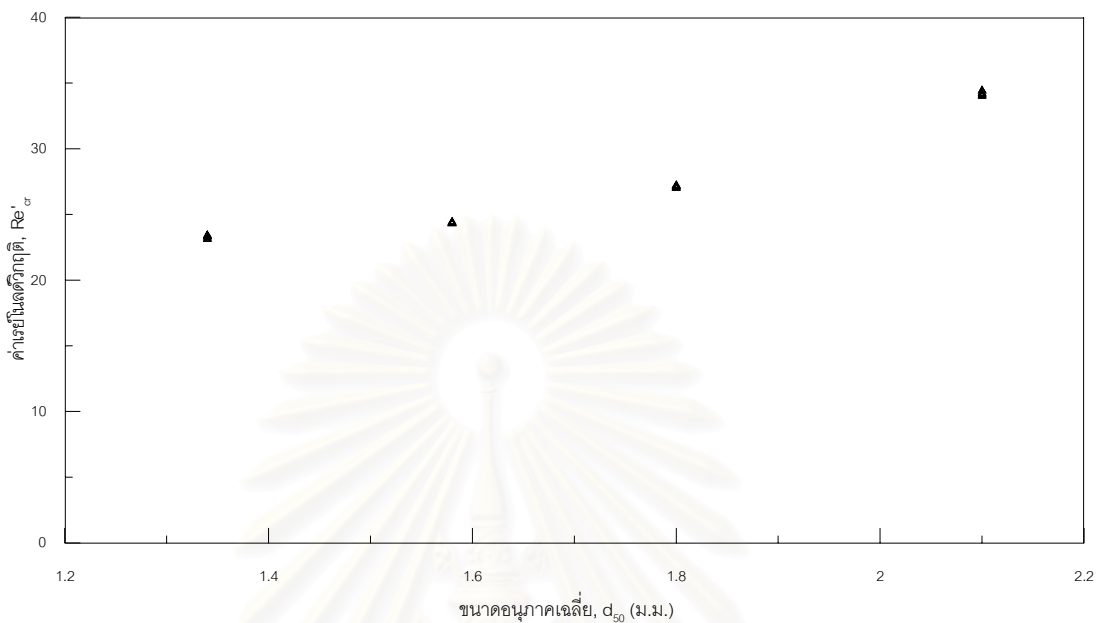
$$r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{16.749d_{50}^{0.917}}\right)$$

นั่นคือ

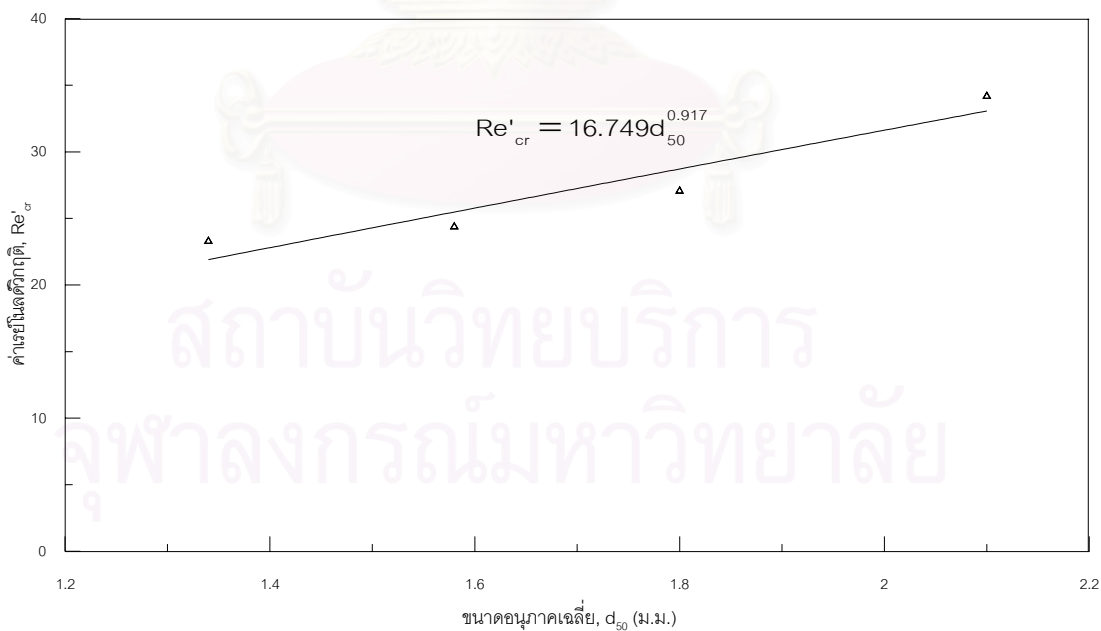
$$r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi}\right) (0.60d_{50}^{0.083}) \quad (5-2)$$

จากรัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาลที่หาได้ตามสมการที่ 5-2 สามารถบอกได้ว่าที่อัตราการไหล ( $Q$ , ลูกบาศก์เมตร/วินาที) ความหนาชั้นน้ำ ( $m$ , เมตร) ความหนืดเปรียบเทียบ ( $v$ , เมตร<sup>2</sup>/วินาที) ความพรุนของทรายชั้นน้ำ ( $\phi$ ) และขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ย ( $d_{50}$ , มิลลิเมตร) สภาพการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น ที่ระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลเท่ากับรัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล





รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย จากการทดลองกรณีต่างๆ



รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย

## 5.2 เสตสูญเสียจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

เสตสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล และเสตสูญเสียจากการไหลเข้าในชั้นน้ำ ซึ่งเสตสูญเสียจากการไหลเข้าในชั้นน้ำ สามารถแบ่งได้ 2 ส่วนตามสภาพการไหล ได้แก่เสตสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ และเสตสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ในกรณีการไหลแบบผสม (Mixed flow) คือการไหลที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นเฉพาะบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล ซึ่งเป็นสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เมื่อเป็นการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล สมการระดับความดันจะใช้สมการที่ 2-39 และ 2-40 ขณะที่การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลจะใช้สมการที่ 2-41 และ 2-42 เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการระดับความดัน ดังต่อไปนี้

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h_0 - h_w = [CQ^n] + \left[ \left( \frac{a_2'}{\phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) \left( \ln \frac{r_{cr}}{r_w} \right) + \left( \frac{b_2'}{\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}} \right) + c_2' \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) \right] \\ + \left[ \left( \frac{1}{K_2' \phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) \left( \ln \frac{r_0}{r_{cr}} \right) + c_2' \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \right] \quad (5-3)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h_w - h_0 = [CQ^n] + \left[ \left( \frac{a_2'}{\phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) \left( \ln \frac{r_{cr}}{r_w} \right) + \left( \frac{b_2'}{\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}} \right) + c_2' \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) \right] \\ + \left[ \left( \frac{1}{K_2' \phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) \left( \ln \frac{r_0}{r_{cr}} \right) + c_2' \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \right] \quad (5-4)$$

โดย  $h_0$  คือ ระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ (Static Piezometric Surface)

$h_w$  คือ ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล

$r_{cr}$  คือ รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล

$r_w$  คือ รัศมีบ่อน้ำบาดาล

$r_0$  คือ รัศมีที่ได้รับอิทธิพล

$h_0 - h_w$  คือ เสตสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ( $S_{w/c}$ )

$h_w - h_0$  คือ เสตสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ( $S_{w/D}$ )

$[CQ^n]$  คือ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ( $ds''$ )

$\left[ \left( \frac{a_2'}{\phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) \left( \ln \frac{r_{cr}}{r_w} \right) + \left( \frac{b_2'}{\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}} \right) + c_2' \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) \right]$  คือ เสตสูญเสีย

จากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ( $ds''$ )

$\left[ \left( \frac{1}{K_2' \phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) \left( \ln \frac{r_0}{r_{cr}} \right) + c_2' \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \right]$  คือ เสตสูญเสียจากการไหลแบบเชิง

เส้นในชั้นน้ำ

จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลได้หาค่าสูญเสียจากการไหลในส่วนต่างๆ ในกรณีการไหลแบบผสม (Mixed flow) ดังสรุปในตารางที่ 5-5 ถึง 5-6 ซึ่งแสดงค่าสูญเสียจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 5-5 ถึง 5-6 มีดังนี้

$Q_{lab}$	คือ	ค่าอัตราการไหลจากการทดลองการไหลในชั้นน้ำรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ 30 องศา แต่ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจะต้องใช้ค่าอัตราการไหลเสมือนจริงหรือเต็มวง 360 องศาในการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12 เท่า (360/30) ของอัตราการไหลจากการทดลอง
$s_{w/C}$	คือ	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล
$s_{w/D}$	คือ	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล
$ds'''_C$	คือ	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกรณีการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล
$ds'''_D$	คือ	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกรณีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล
$ds_{AC}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล มีค่าเท่ากับผลรวมของเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ( $ds_{iC}$ ) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ( $ds''_{iC}$ )
$ds_{AD}$	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล มีค่าเท่ากับผลรวมของเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ( $ds_{iD}$ ) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ( $ds''_{iD}$ )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-5 เสดสูญเสียดังกล่าวจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมีในกรณีการไหลแบบผสม (Mixed flow)

ทราย ชั้นน้ำ	$Q_{ap} \times 10^{-4}$ (ลบ.ม./วินาที)	$Q_{equi} \times 10^{-4}$ (ลบ.ม./วินาที)	การไหลเข้า (Converging flow)								
			Total loss	Well loss		Aquifer loss					
			$S_{w/C}$ (ม.)	$ds'''_{/C}$		$ds_{A/C}$		$ds''_{/C}$		$ds_{/C}$	
				(ม.)	(% $S_{w/C}$ )	(ม.)	(% $S_{w/C}$ )	(ม.)	(% $S_{w/C}$ )	(ม.)	(% $S_{w/C}$ )
$S_1$	1.93	23.17	0.354	0.015	4.24	0.339	95.76	0.123	34.77	0.216	60.99
	3.87	46.43	0.584	0.038	6.48	0.546	93.52	0.338	57.90	0.208	35.61
	5.79	69.48	0.919	0.068	7.40	0.851	92.60	0.684	74.45	0.167	18.15
	7.68	92.18	1.370	0.105	7.66	1.265	92.34	1.099	80.19	0.167	12.15
$S_2$	2.25	27.02	0.2031	0.012	5.95	0.191	94.05	0.062	30.60	0.129	63.45
	4.28	51.38	0.4265	0.032	7.55	0.394	92.45	0.218	51.19	0.176	41.26
	6.23	74.78	0.6650	0.060	9.00	0.605	91.00	0.439	65.95	0.167	25.05
	7.88	94.54	0.9987	0.095	9.51	0.904	90.49	0.753	75.37	0.151	15.12
$S_3$	2.26	27.12	0.248	0.015	5.98	0.233	94.02	0.064	25.79	0.169	68.23
	4.29	51.47	0.421	0.027	6.47	0.393	93.53	0.210	49.88	0.184	43.65
	6.13	73.55	0.629	0.060	9.60	0.568	90.40	0.414	65.84	0.154	24.56
	8.04	96.46	0.838	0.083	9.90	0.755	90.10	0.591	70.61	0.163	19.49
$S_4$	2.79	33.49	0.265	0.018	6.83	0.247	93.17	0.054	20.27	0.193	72.90
	4.86	58.36	0.355	0.035	9.77	0.320	90.23	0.162	45.76	0.158	44.47
	6.84	82.09	0.558	0.063	11.27	0.495	88.73	0.346	61.94	0.149	26.79
	8.77	105.20	0.773	0.098	12.71	0.675	87.29	0.564	73.00	0.111	14.30

ตารางที่ 5-6 เสดสูญเสียดังกล่าวจากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมีในกรณีการไหลแบบผสม (Mixed flow)

ทราย ชั้นน้ำ	$Q_{ap} \times 10^{-4}$ (ลบ.ม./วินาที)	$Q_{equi} \times 10^{-4}$ (ลบ.ม./วินาที)	การไหลออก (Diverging flow)								
			Total loss	Well loss		Aquifer loss					
			$S_{w/D}$ (ม.)	$ds'''_{/D}$		$ds_{A/D}$		$ds''_{/D}$		$ds_{/D}$	
				(ม.)	(% $S_{w/D}$ )	(ม.)	(% $S_{w/D}$ )	(ม.)	(% $S_{w/D}$ )	(ม.)	(% $S_{w/D}$ )
$S_1$	1.45	17.44	0.525	0.020	3.85	0.505	96.15	0.184	35.04	0.321	61.11
	5.05	60.55	0.805	0.035	4.29	0.771	95.71	0.482	59.83	0.289	35.89
	6.90	82.82	1.148	0.068	5.89	1.080	94.11	0.858	74.77	0.222	19.34
	8.77	105.18	1.507	0.091	6.04	1.416	93.96	1.301	86.33	0.115	7.63
$S_2$	2.33	27.95	0.355	0.015	4.24	0.340	95.76	0.108	30.37	0.232	65.39
	4.49	53.93	0.571	0.033	5.74	0.539	94.26	0.292	51.13	0.246	43.13
	6.45	77.41	0.811	0.051	6.33	0.760	93.67	0.553	68.23	0.206	25.45
	8.41	100.93	1.048	0.070	6.67	0.978	93.33	0.814	77.71	0.164	15.62
$S_3$	2.76	33.15	0.379	0.021	5.61	0.358	94.39	0.092	24.40	0.265	70.00
	4.91	58.93	0.586	0.035	6.02	0.551	93.98	0.289	49.29	0.262	44.68
	6.95	83.42	0.690	0.044	6.34	0.646	93.66	0.465	67.50	0.180	26.15
	8.96	107.50	0.980	0.074	7.59	0.906	92.41	0.862	87.95	0.044	14.67
$S_4$	2.35	28.23	0.530	0.030	5.66	0.500	94.34	0.106	20.00	0.394	74.34
	4.56	54.72	0.800	0.048	6.00	0.752	94.00	0.370	46.29	0.382	47.71
	6.55	78.55	0.840	0.064	7.63	0.776	92.37	0.538	64.04	0.238	28.33
	8.60	103.18	1.120	0.093	8.29	1.027	91.71	0.861	76.87	0.166	14.84

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5-5 และ 5-6 ในกรณีการไหลแบบผสม (Mixed flow) สามารถทำการวิเคราะห์และสรุปเสดสูญเสียดังกล่าวจากการทดลองการไหลในเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่ ได้ดังนี้

1) เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลออก ( $s_{WD}$ ) มีค่าสูงกว่าการไหลเข้า ( $s_{WC}$ ) เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลใกล้เคียงกัน และเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

2) ความสูญเสียดังกล่าวจากบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้า มีค่าในช่วง 4.24 -12.71 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลเข้า ( $s_{WC}$ ) ขณะที่ความสูญเสียดังกล่าวจากบ่อน้ำบาดาลจากการไหลออก ( $ds''/D$ ) มีค่าในช่วง 3.85-8.29 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลออก ( $s_{WD}$ ) แสดงว่าความสูญเสียดังกล่าวมีความสำคัญต่อความถูกต้องของการคำนวณระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลเพราะถ้าไม่คิดความสูญเสียดังกล่าวจะทำให้ออกแบบระบบการสูบน้ำและเติมน้ำผิดพลาดได้โดยความสูญเสียดังกล่าวจากบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.35 เท่าของการไหลออก และความสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

3) เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ( $ds_{AC}$ ) มีค่าในช่วง 87.29-95.76 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการเข้า ( $s_{WC}$ ) ขณะที่เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ( $ds_{AD}$ ) มีค่าในช่วง 91.71-96.15 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลออก ( $s_{WD}$ ) โดยเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.02 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

เนื่องจากเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำตามสภาพการไหลดังนี้

- เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ( $ds_C$ ) มีค่าในช่วง 14.30-72.90 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลเข้า ( $s_{WC}$ ) ขณะที่เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ( $ds_D$ ) มีค่าในช่วง 14.84-74.34 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลออก ( $s_{WD}$ ) โดยเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.01 เท่าของการไหลออก และเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่และต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

- เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ( $ds''_C$ ) มีค่าในช่วง 20.27-80.19 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลเข้า ( $s_{WC}$ ) ขณะที่เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ( $ds''_D$ ) มีค่าในช่วง 20.00-87.95 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลออก ( $s_{WD}$ ) โดยเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่

เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.03 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียดจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่และต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

กล่าวโดยสรุป คือ เสดสูญเสียดในทุกส่วนจากการไหลในชั้นน้ำขนาดใหญ่มีค่าต่ำกว่าทรายชั้นน้ำขนาดเล็ก เนื่องจากทรายขนาดใหญ่ยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าทรายขนาดเล็กเนื่องจากมีช่องว่างขนาดใหญ่กว่า และเมื่อพิจารณาเสดสูญเสียดในแต่ละส่วนอย่างละเอียดพบว่า การไหลเข้าจะมีความสูญเสียดบ่อน้ำบาดาลมากกว่าการไหลออก เนื่องจากความสูญเสียดบ่อน้ำบาดาลเป็นเสดสูญเสียดจากการไหลผ่านตะแกรงและการไหลในท่อกรอง ซึ่งการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลเสมือนกับการไหลจากด้านกว้างไปด้านแคบอย่างทันทีทันใด และย้งต้องไหลสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลกจึงมีแรงต้านมากกว่าการไหลออกซึ่งน้ำไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลจากด้านแคบไปด้านกว้างจึงไหลได้สะดวกกว่า ขณะที่เสดสูญเสียดจากการไหลในชั้นน้ำจากการไหลเข้าที่มีค่าต่ำกว่าการไหลออก เพราะการไหลในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลเส้นแนวการไหลจะถูกบีบให้ค่อยๆ แคบลง แต่การไหลออกเส้นแนวการไหลมีลักษณะเสมือนการไหลพุ่งออกมาทำให้เกิดความปั่นป่วน จึงมีเสดสูญเสียดมากกว่า



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

ในการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งานในการคำนวณเส้นระดับความดัน (Piezometric Surface) เมื่อมีการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ต้องแน่ใจก่อนว่าผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยทำการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันใน 2 ลักษณะ ได้แก่

1) การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลองที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการคำนวณโดยสมการของ Thiem ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไป เพื่อพิจารณาว่าการคำนวณแบบใดให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

2) การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัวกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลภายใต้สภาวะไม่คงตัว เพื่อพิจารณานิทธิพลของสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงที่

#### 5.3.1 รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง การคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลอง และการคำนวณโดยใช้สมการ Thiem

การคำนวณระดับความดันตามระยะทางจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลสิ่งแรกที่ต้องรู้คือ ระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ (Static Piezometric Surface) ซึ่งในการทดลองพิจารณาว่าค่าระดับความดันที่จุดติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันตัวสุดท้ายในชั้นน้ำ (ที่ระดับ 199 เซนติเมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล) เป็นระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ ( $h_0$ ) ดังนั้นการคำนวณจึงตั้งต้นจากระดับความดันที่ตำแหน่งดังกล่าว

ในหัวข้อนี้แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน โดยพิจารณาเฉพาะเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำ และไม่พิจารณาความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล เนื่องจากสมการของ Thiem ไม่พิจารณาความสูญเสียดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้

1) คำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลแบบไม่คงตัว ประการแรกต้องทราบว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำหรือไม่ โดยดูจากรัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ ) และรัศมีบ่อน้ำบาดาล ( $r_w$ ) หากค่า  $r_{cr} \leq r_w$  เกิดการไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ แต่ถ้า  $r_{cr} > r_w$  เกิดการไหลแบบผสม ซึ่งสามารถทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้สมการที่ดัดแปลงจากสมการที่ 2-37 ถึง 2-42 ดังนี้

- กรณี  $r_{cr} \leq r_w$

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h_0 - h = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}\right) \quad (5-5)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h - h_0 = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-6)$$

- กรณี  $r_{cr} > r_w$

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h_0 - h = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-7)$$

$$r_w < r < r_{cr}; \quad h_{cr} - h = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-8)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h - h_0 = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-9)$$

$$r_w < r < r_{cr}; \quad h - h_{cr} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-10)$$

2) การคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้สมการของ Theim ดัดแปลงจากสมการที่ 2-30 และ 2-31 ดังนี้

$$\text{การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล} \quad h_0 - h = \left(\frac{Q}{2\pi K m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (5-11)$$

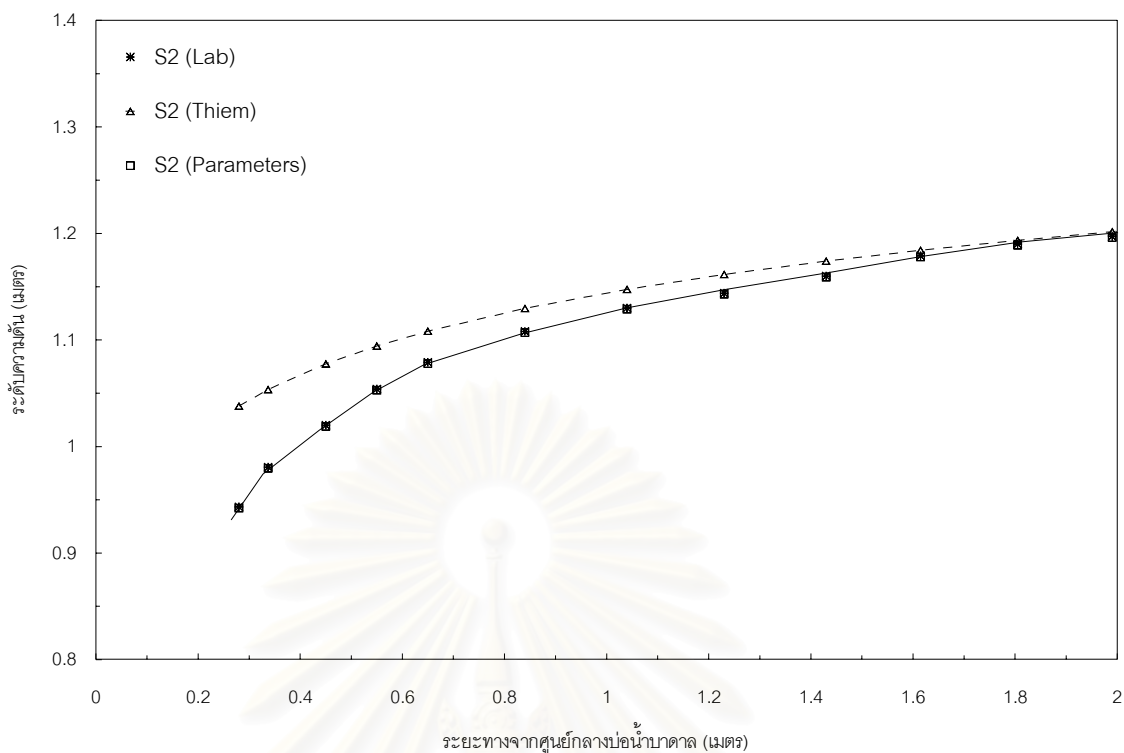
$$\text{การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล} \quad h - h_0 = \left(\frac{Q}{2\pi K m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (5-12)$$

เนื่องจากค่าความนำชลศาสตร์ (K) ที่ใช้ในสมการของ Theim เป็นความนำชลศาสตร์ที่ได้จากความเร็วการไหลเฉลี่ย (เมื่อไม่คิดผลของความพรุน) จึงต้องทำการปรับแก้ความนำชลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี ( $K_2'$ ) ก่อนนำไปใช้ เนื่องจาก  $\frac{v}{\phi} = K'$  และ  $v = K$  ดังนั้น

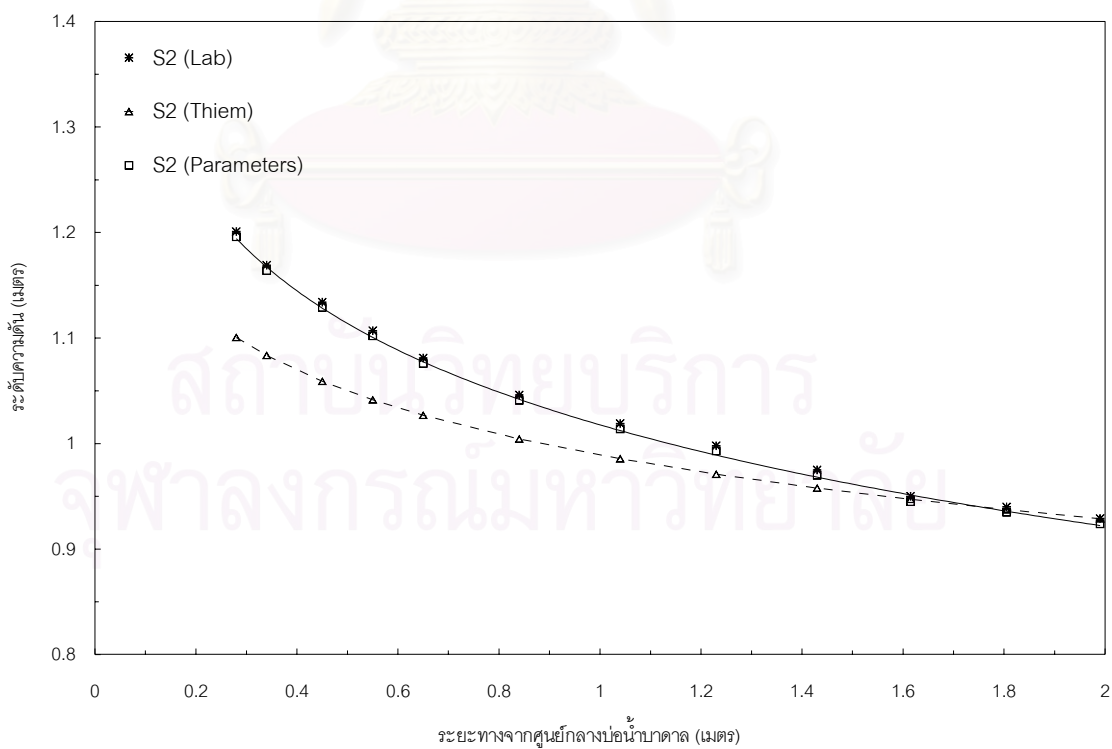
$$K = K' \phi \quad (5-13)$$

ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมีคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมีที่สภาวะคงตัว และการคำนวณโดยสมการของ Theim ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ด้วยตัวอย่างอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการไหลแบบผสมในชั้นน้ำคือ  $4.282 \times 10^{-4}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที แสดงดังรูปที่ 5-3 ขณะที่ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ด้วยอัตราการไหลตัวอย่างที่ทำให้เกิดการไหลแบบผสมในชั้นน้ำคือ  $4.494 \times 10^{-4}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที แสดงดังรูปที่ 5-4





รูปที่ 5-3 เส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ และสมการ Thiem



รูปที่ 5-4 เส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ และสมการ Thiem

กรณีการไหลเข้าสู่น้ำบาดาล จากรูปที่ 5-3 อธิบายได้ว่า เส้นระดับความดันที่คำนวณด้วย พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดในทุก อัตราการไหล และรูปร่างของเส้นระดับความดันที่คำนวณด้วยสมการ Thiem ให้ค่าระดับความดันที่ผิว บ่อน้ำบาดาลสูงกว่าความเป็นจริง

กรณีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 5-4 อธิบายได้ว่า เส้นระดับความดันที่คำนวณ ด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี ให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดในทุก อัตราการไหล และรูปร่างของเส้นระดับความดันที่คำนวณด้วยสมการ Thiem ให้ค่าระดับความดันที่ผิว บ่อน้ำบาดาลต่ำกว่าความเป็นจริง เพราะอิทธิพลของพารามิเตอร์นอนดาร์ซี

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างระดับความดันจากการคำนวณ การทดลองการไหลเข้าและออก บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาดและทุกอัตราการไหล ได้ผลที่สอดคล้องกับที่กล่าวข้างต้น สรุปได้ ว่าการคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดัน โดยใช้พารามิเตอร์จากไหลในแนวรัศมีให้ค่าใกล้เคียงกับ การทดลองมากที่สุดในทุกอัตราการไหล

### 5.3.2 รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง การคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการ ทดลองการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัวและไม่คงตัว

การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหล ภายใต้สภาวะคงตัวกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลภายใต้สภาวะไม่คงตัว เพื่อพิจารณา อิทธิพลของสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว แต่เนื่องจากไม่สามารถเปรียบเทียบพารามิเตอร์จากการทดลอง ได้โดยตรง เพราะขอบเขตการทดลองแตกต่างกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบเพื่อหาอิทธิพลของ สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว จึงเลือกใช้ผลการทดลองในช่วงเวลาที่มีอัตราการไหลเท่ากับอัตราการไหลที่ ทำให้เกิดการไหลแบบผสมภายใต้สภาวะคงตัวในการเปรียบเทียบ

- 1) การคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลแบบ คงตัว ใช้สมการที่ 5-5 ถึง 5-10
- 2) การคำนวณรูปร่างระดับความดันเมื่อเกิดการไหลแบบผสม ( $r_{cr} > r_w$ ) โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้ จากการทดลองการไหลภายใต้สภาวะไม่คงตัวด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลง สามารถดัดแปลงจาก สมการ 2-48 และ 2-49 ได้ดังนี้

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h_0 - h = \left[ \left( \frac{1}{K_2 \phi} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right) + c_1 \left( \frac{a}{2\pi m \phi} \right) \right] \ln \left( \frac{r_0}{r} \right) + c_2 \left( \frac{1}{2g\phi^2} \right) \left( \frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left( \frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (5-14)$$

$$r_w < r < r_{cr};$$

$$h_{cr} - h = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-15)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h_0 - h = \left[\left(\frac{1}{K_2 \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-16)$$

$r_w < r < r_{cr};$

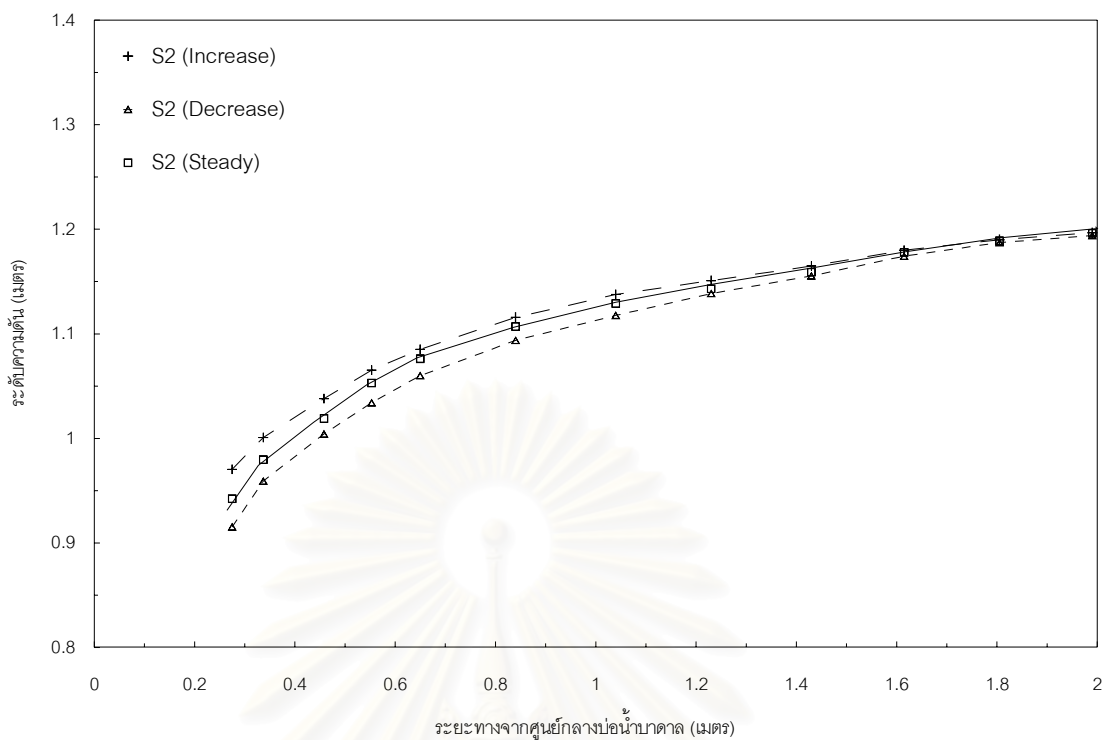
$$h - h_{cr} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left[\left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 + c_1' \left(\frac{a}{2\pi m \phi}\right)\right] \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-17)$$

ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้า คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว และภายใต้สภาวะไม่คงตัวด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นและลดลง ( $dQ/dt$ ) เท่ากับ  $5.58 \times 10^{-6}$  ตัวอย่างอัตราการไหลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ที่ทำให้เกิดการไหลแบบผสมในชั้นน้ำคือ  $4.282 \times 10^{-4}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที แสดงดังรูปที่ 5-5 ขณะที่ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออก คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว และภายใต้สภาวะไม่คงตัวด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นและลดลง ( $dQ/dt$ ) เท่ากับ  $5.58 \times 10^{-6}$  ตัวอย่างอัตราการไหลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ที่ทำให้เกิดการไหลแบบผสมในชั้นน้ำคือ  $4.494 \times 10^{-4}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที แสดงดังรูปที่ 5-6

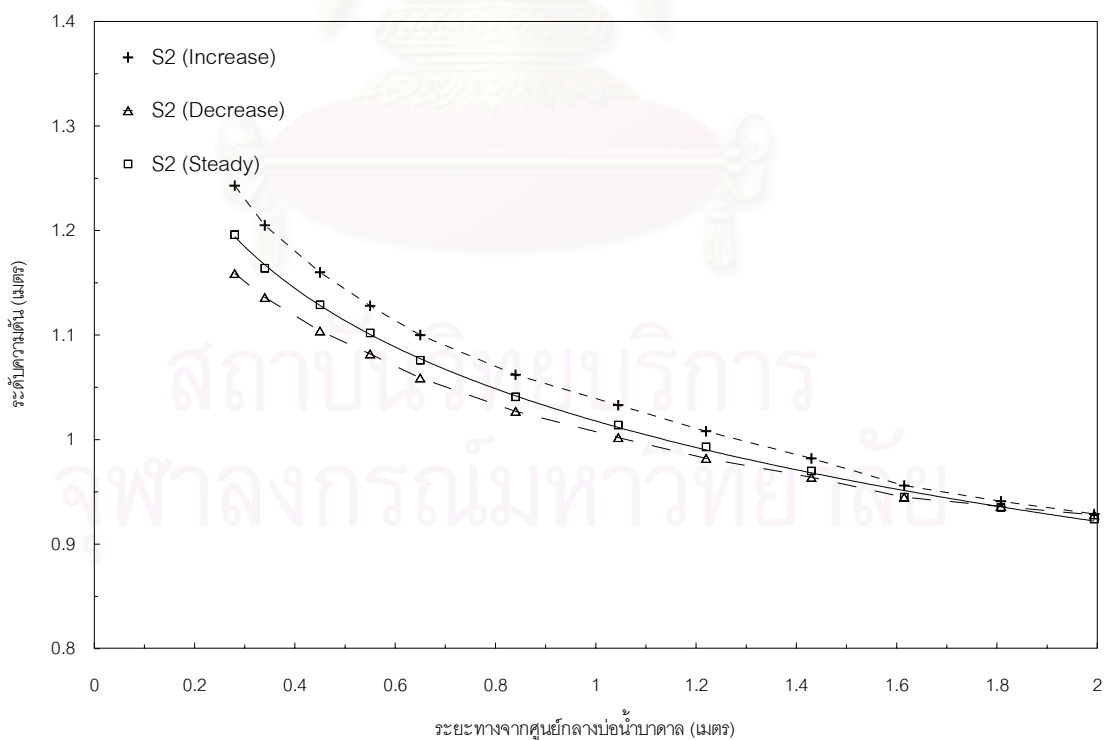
ในการเปรียบเทียบได้ทำการตั้งสมมติฐานว่า ระดับความดันที่แตกต่างของการไหลภายใต้สภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว เกิดจากอิทธิพลของสัมประสิทธิ์การไหลแบบไม่คงตัวเพียงอย่างเดียว

กรณีการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ในรูปที่ 5-5 อธิบายได้ว่าเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่าการไหลคงที่ และมีความแตกต่างมากที่สุดร้อยละ 2.96 บริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล ส่วนเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยอัตราการไหลลดลงมีค่ามากกว่าการไหลคงที่ และมีความแตกต่างมากที่สุดร้อยละ 2.87 บริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล

กรณีการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 5-6 อธิบายได้ว่าเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่าการไหลคงที่ และมีความแตกต่างมากที่สุดร้อยละ 3.50 บริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล ส่วนเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยอัตราการไหลลดลงมีค่ามากกว่าการไหลคงที่ และมีความแตกต่างมากที่สุดร้อยละ 3.41 บริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล



รูปที่ 5-5 เส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลเข้าบ่อ ด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลดลงและอัตราการไหลคงที่

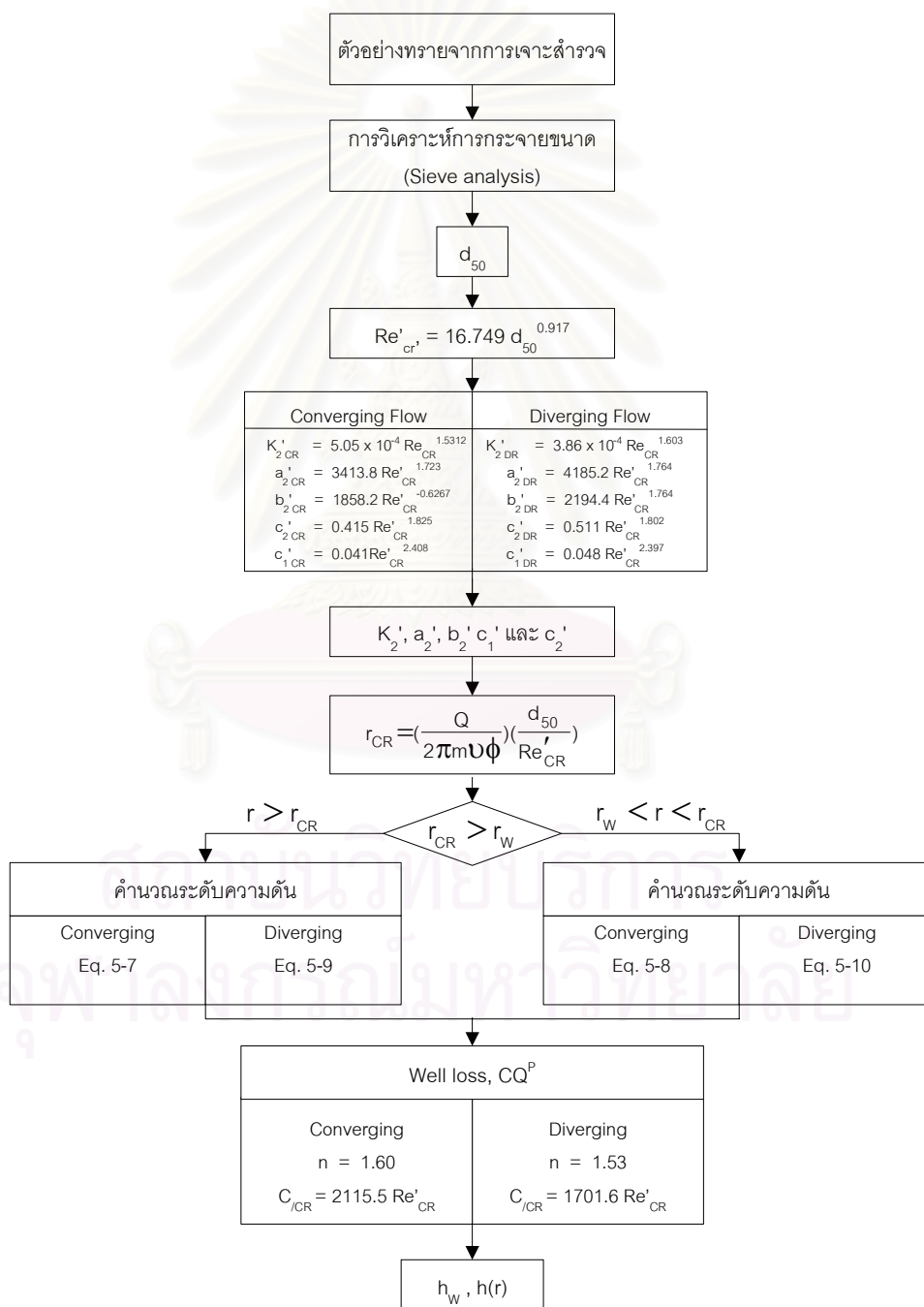


รูปที่ 5-6 เส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลออกบ่อ ด้วยอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ลดลงและอัตราการไหลคงที่

### 5.3.3 แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

ในการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาดังกล่าวต้องทราบขอบเขตการใช้งานก่อน ซึ่งจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี มีความเร็วการไหลไม่เกิน 0.095 เมตร/วินาที ในทราย ชั้นน้ำขนาด 1.34-2.10 มิลลิเมตร มีความพรุนประมาณ 0.4 โดยค่าเรย์โนลด์มีค่าไม่เกิน 353.9

แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5-7 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการไหล และขั้นตอนการคำนวณระดับความดัน โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้และจากการศึกษาของนพดลเป็นหลัก



รูปที่ 5-7 แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาทั้งหมดซึ่งกล่าวมาแล้วในบทที่ 1-5 โดยเริ่มตั้งแต่ อุปกรณ์และโปรแกรมควบคุมการทดลองที่พัฒนาเพื่อใช้ในการทดลอง ผลการศึกษาและทฤษฎีที่รวบรวมมา การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษา การทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดันในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว ซึ่งจากการทดลองจะได้ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล และในส่วนสุดท้ายจะเป็นข้อเสนอแนะผลการศึกษาในครั้งนี้ และข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาที่จะมีขึ้นในอนาคต

#### 6.1 การปรับปรุงเครื่องมือ

- 1) ทำการตัดสัญญาณรบกวน (Noise) ออกจากระบบควบคุมกับระบบวัด เก็บ และแสดงข้อมูล โดยการจัดทำชุดแยกสัญญาณ (Isolated RS232 Interface) แล้วนำมาต่อเชื่อมกับระบบ เพื่อช่วยให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
- 2) ทำการต่อเชื่อมระหว่างคอมพิวเตอร์และตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำด้วยสายส่งสัญญาณ (RS232 to RJ45 Adapter) ซึ่งใช้ในการส่งข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ต้องการ ณ เวลาต่างๆ พร้อมทั้งรับสัญญาณจากตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำกลับมายังคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความเร็วรอบว่าสอดคล้องกับข้อมูลที่ส่งไปให้หรือไม่
- 3) จัดทำโปรแกรมควบคุมการทดลองเพื่อทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำของแบบจำลองทำให้สามารถปรับอัตราการไหลได้ตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนไปได้ 6 รูปแบบ คือ อัตราการไหลคงที่ อัตราการไหลเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อัตราการไหลลดลงอย่างสม่ำเสมอ อัตราการไหลเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได อัตราการไหลลดลงแบบขั้นบันได และอัตราการไหลแบบไซน์ รวมทั้งสามารถแสดงผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลในทุกช่วงเวลา (Real Time)

## 6.2 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำ

ในการทดลองใช้ทราย 4 ขนาดเป็นวัสดุชั้นน้ำ จึงต้องทราบคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายชั้นน้ำ ( $d_{50}$ ) และความพรุน ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยหาได้จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ทรายที่นำมาใช้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Grade) และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) เท่ากับ 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร ขณะที่ความพรุนจะต้องคำนวณจากน้ำหนักทรายที่ใช้ ปริมาตรของแบบจำลองที่บรรจุทราย และความถ่วงจำเพาะของทราย จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษา จากผลการทดลองได้ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร เท่ากับ 2.592 2.661 2.654 และ 2.658 ตามลำดับ

## 6.3 พฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลใกล้บ่อน้ำบาดาล

ในการทดลองได้แบ่งเป็น 2 รูปแบบการไหล คือ การไหลใกล้บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว โดยพิจารณาว่าการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีเสมือนการไหลที่เกิดขึ้นจริงในสนามซึ่งถือว่าเป็นการทดลองหลัก ในแต่ละการทดลองทำการบันทึกค่าระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ และค่าระดับน้ำเหนือสันฝายเพื่อนำไปคำนวณอัตราการไหลและนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาตัวแปรที่ใช้อธิบายซึ่ง มีพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลประเภทต่างๆ โดยสรุปดังนี้

1) การไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในการทดลองจะมีเสดสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นใน 2 ส่วนหลัก ประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well loss) และเสดสูญเสียดังกล่าวในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) ซึ่งแบ่งออกเป็นเสดสูญเสียดังกล่าวแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (Linear Flow Loss) และ เสดสูญเสียดังกล่าวแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (Non-Linear Flow Loss) โดยระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนสภาพการไหล คือ รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (Critical Well Radius)

2) เสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลออกมีค่าสูงกว่าการไหลเข้า เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลใกล้เคียงกัน และเสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าเสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดเล็ก

3) ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้ามีค่าในช่วง 4.24-12.71 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลเข้า ขณะที่ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลออกมีค่าในช่วง 3.85-8.29 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลออก แสดงว่าความสูญเสียบ่อมีความสำคัญต่อความถูกต้องของการคำนวณระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล เพราะถ้าไม่คิดความสูญเสียบ่ออาจทำให้ออกแบบระบบการสูบน้ำและเติมน้ำผิดพลาดได้ โดยความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.35 เท่าของการไหลออก และความสูญเสียของบ่อจากการ

ไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าความสูญเสียของบ่อจากการไหลในทรายชั้นน้ำทรายที่มีขนาดเล็ก

4) เสดสูญเสียจากการไหลในทรายชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลมีค่าในช่วง 87.29-95.76 เปอร์เซนต์ของเสดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า ขณะที่เสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าในช่วง 91.71-96.15 เปอร์เซนต์ของเสดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก โดยเสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.02 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าเสดสูญเสียจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดเล็ก

5) เสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลมีค่าในช่วง 14.30-72.90 เปอร์เซนต์ของเสดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า ขณะที่เสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าในช่วง 14.84-74.34 เปอร์เซนต์ของเสดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก โดยเสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.01 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าเสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดเล็ก

6) เสดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลมีค่าในช่วง 20.27-80.19 เปอร์เซนต์ของเสดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า ขณะที่เสดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าในช่วง 20.00-87.95 เปอร์เซนต์ของเสดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก โดยเสดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.03 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าเสดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดเล็ก

7) สมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบเชิงเส้นหรือการไหลแบบราบเรียบ คือ สมการของดาร์ซี ขณะที่สมการที่ใช้การไหลอธิบายการไหลแบบไม่เชิงเส้น คือ สมการของ Forchheimer โดยค่าเรย์โนลด์ ณ จุดเปลี่ยนชนิดการไหล คือ ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ

8) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็นความยาวจำเพาะการไหล พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับขนาดทราย แต่การทดลองใช้ทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ยในช่วง 1.34 ถึง 2.10 มิลลิเมตร พบว่ากราฟความสัมพันธ์ค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน จึงหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละการทดลองได้ โดยค่าแฟคเตอร์เสียดทานจากการไหลออกมีค่าสูงกว่าการไหลเข้าที่ค่าเรย์โนลด์เดียวกัน

9) กรณีการไหลในทิศทางเดียวของแบบจำลองมาตรฐาน พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติ กรรมทางชลศาสตร์ ได้แก่ ค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_p$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_p$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_p$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re_{cr}$ )



10) กรณีการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะคงตัว มีพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ คือ ค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์ของการไหลนำพา ( $c_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re_{cr}'$ )

11) กรณีการไหลในแนวรัศมีภายใต้สภาวะไม่คงตัว มีพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ คือ เทอมการไหลไม่คงตัว ( $c_1$ ) การไหลนำพา ( $c_2$ ) ค่าความนำชลศาสตร์ ( $K_2'$ ) พารามิเตอร์ดาร์ซี ( $a_2'$ ) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ( $b_2'$ ) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re_{cr}'$ )

12) ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re_{cr}'$ ) ค่าความนำชลศาสตร์ ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1$ ) และสัมประสิทธิ์การไหลนำพาจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทรายขนาดใหญ่ขึ้น พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี มีค่าลดลงเมื่อทรายมีขนาดใหญ่ขึ้น

13) ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re_{cr}'$ ) ค่าความนำชลศาสตร์ ( $b_2'$ ) สัมประสิทธิ์การไหลนำพา พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลแบบคงตัว และการไหลแบบไม่คงตัวมีค่าแตกต่างกันเฉลี่ยร้อยละ 5.57 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัวของการไหลออกมีค่ามากกว่าของการไหลเข้า และมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์มีค่ามากในช่วงการไหลแบบไม่เชิงเส้น

#### 6.4 ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีที่สภาวะการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัวผ่านทรายชั้นน้ำ ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ได้ นำมาวิเคราะห์และสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1) ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ( $Re_{cr}'$ ) มีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ดังสมการ

$$Re_{cr}' = 16.749d_{50}^{0.917}$$

2) รัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล ( $r_{cr}$ ) มีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) อัตราการไหลของน้ำ ( $Q$ ) ความหนาชั้นน้ำ ( $m$ ) ความพรุน ( $\phi$ ) และความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) ดังสมการ

$$r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m \nu \phi}\right)(0.60d_{50}^{0.083})$$

3) เมื่อเป็นการไหลแบบเชิงเส้นผ่านตัวกลางขนาด 1.34-2.10 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1$ ) มีความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์ ( $Re'$ ) ดังสมการ

$$c_1 = 18.120Re'^{1.195}$$

4) เมื่อเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นผ่านตัวกลางขนาด 1.34-2.10 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว ( $c_1$ ) มีความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์ ( $Re'$ ) ดังสมการ

$$c_1 = 0.041Re'^{2.408}$$

การศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดัน เมื่อทำการสูบน้ำ (ไหลเข้า) หรือเติมน้ำ (ไหลออก) ผ่านบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดันภายใต้สภาวะการไหลที่ไม่คงตัว ในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ในช่วง 1.34 ถึง 2.10 มิลลิเมตร และความพรุนประมาณ 0.4 หากทราบอัตราการสูบน้ำหรือเติมน้ำ ระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ ( $h_0$ ) ระยะจากบ่อสังเกตการณ์ซึ่งต้องอยู่ห่างจากบ่อน้ำบาดาลที่จะออกแบบอย่างน้อย 1000 เมตร ( $r_0$ ) ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่ใช้ (Well loss) และขนาดอนุภาคอนุภาคทรายชั้นน้ำ ( $d_{50}$ )

## 6.5 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในครั้งนี้พบว่ายังมีประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณาเพื่อนำไปปรับปรุงการทดลองให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพเป็นจริงมากขึ้น จึงต้องมีข้อเสนอแนะเพื่อนำไปพิจารณาในขั้นต่อไป ดังนี้

### 6.5.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลองในประเด็นที่น่าสนใจเพิ่มเติมหรือเพิ่มความถูกต้องของผลการทดลองมีดังนี้

- 1) การศึกษาในครั้งนี้ใช้ทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอในการทดลอง ในการศึกษาต่อไปควรทำการทดลองเพิ่มกรณีทรายมีขนาดคละกัน หรือใช้วัสดุชั้นน้ำชนิดอื่นๆ เพื่อขยายขอบเขตการทดลอง
- 2) การศึกษาในครั้งนี้ได้จำลองสภาพบ่อน้ำบาดาลแบบมีช่องเปิดตลอดความหนาชั้นน้ำ (Fully Penetrating Well) ในการศึกษาต่อไปควรจะทำทดลองกรณีบ่อน้ำบาดาลเป็นชนิดมีช่องเปิดไม่ตลอดความหนาชั้นน้ำ (Partially Penetrating Well) และในการทดลองนี้ใช้ตะแกรงบ่อน้ำบาดาลเพียงขนาดเดียว ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรเปลี่ยนขนาดช่องเปิดตะแกรงหรือท่อกรองให้มีหลายขนาดขึ้น เพื่อวิเคราะห์ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่เกิดขึ้นในท่อกรองแบบต่างๆ
- 3) การศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้ทำการทดลองกรณีที่มีกรวดกรูบ่อน้ำบาดาล ในการศึกษาต่อไปควรทดลองกรณีที่มีกรวดกรูขนาดและความหนาต่างๆ เพื่อดูว่าการกรูกรวดจะทำให้พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด
- 4) การศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้น้ำสะอาดในการทดลอง ในการศึกษารั้งต่อไปควรปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถทดสอบการแพร่กระจายของความเค็ม หรือ สิ่งปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นได้จากการเติมน้ำลงในชั้นน้ำ

5) ในแง่ของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีจุดที่ต้องปรับปรุง คือ ยังคงมีสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการทำงานของตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ แม้ว่าในการทดลองครั้งนี้ได้เพิ่มชุดแยกสัญญาณ (Isolate) ระหว่างตัวปรับความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำกับ Data Logger แล้วก็ตาม ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของข้อมูลและลดเปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนในช่วงความดันต่ำ

### 6.5.2 การใช้ประโยชน์

ผลการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณระดับความดัน จากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล จากผลการศึกษาพบว่า เฮดสูญเสียจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลจะมากกว่าการไหลเข้าโดยเฉพาะช่วงใกล้ๆ บ่อน้ำบาดาลซึ่งมีเฮดสูญเสียมาก จึงควรออกแบบกรวดกรุบ่อสำหรับบ่อเติมน้ำจะต้องออกแบบให้มีความหนาแน่นมากกว่าบ่อสูบน้ำ เพื่อลดเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นมากบริเวณใกล้ๆ บ่อน้ำบาดาล

### 6.5.3 ข้อเสนอแนะทั่วไป

การศึกษานี้เป็นการศึกษาขั้นพื้นฐานของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบสูบน้ำและระบบเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ในอนาคต ดังนั้นจึงควรทำการทดลองในภาคสนามควบคู่กันไป เพื่อตรวจสอบกับผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้หรือไม่

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กฤษฎดา วิศวธรานนท์. INVERTER หลักการและเทคนิคการใช้งาน. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: เอฟ.เอ.เทค และ บุรพาการไฟฟ้า, 2541.
- กีรติ ลีวัจนกุล. ชลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2541.
- เจริญ เพียรเจริญ. น้ำบาดาล-ป่อบาดาล. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: กองควบคุมกิจการน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี, 2540.
- ฉลอง บัวผัน. น้ำบาดาล. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าส์, 2535.
- ธีรจิต จิตรากรณ์. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินโดยแรงโน้มถ่วงของโลกกับการกระจายตัวของขนาดทราย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- นพดล เฉลิมชัยรัตนกุล. พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อบาดาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- วชิ รามณรงค์. การระบายน้ำลงใต้ดินทางบ่อบาดาล. วิศวกรรมสาร. (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2516)
- วรการ ไม้เรียง, จิรพัฒน์ โชติกไกร และประทีป ดวงเดือน. ปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎีและปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2525.
- สมศักดิ์ กীরตวุฒิศเรษฐ์. หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. 3,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพมหานคร: สยามคอมสงเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.
- สุจริต คุณธนกุลวงศ์ และกฤษฎดา วิศวธรานนท์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดิน. โครงการสิ่งประดิษฐ์ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- สุรพงษ์ เชียงทอง. การออกแบบและก่อสร้างโครงการทดลองเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลที่เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร. รายงานการสัมมนาทางวิชาการเรื่องเทคนิคการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาล, หน้า 17-22. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2544

### ภาษาอังกฤษ

- Alyamani, M.S. and Sen, Z. Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. Ground Water 31, 4 (July-August 1993)
- Arbhabhirama, A. and Dinoy, A.A. Friction factor and Reynolds number in porous media flow. Journal of the Hydraulics Division, 99, HY6 (June 1973): 901-911.

- Cox, R.J. A study of near well groundwater flow and the implication in well design. Water research laboratory report no.148, University of New South Wales, 1977.
- Das Gupta, A. Experiment study of friction factor and Reynolds number in porous media. Master's Thesis, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology, 1973.
- Dinoy, A.A. Friction factor and Reynolds number relationship. Master's Thesis, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology, 1971.
- Driscoll, F.G. Groundwater and wells. 3<sup>rd</sup> ed. Minnesota: Johnson Filtration System, 1989.
- Ein, Shen-Tai. Experiment study on friction factor and Reynolds number relationship for turbulent flow in non-uniform porous media. Master's Thesis, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology, 1979
- Fetter, C.W. Applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 1991.
- Hazen, A. Some physical properties of sands and gravels. Massachusetts State Board of Health. vol.24 (1892): 539-556.
- Huyakorn, P. and Dudgeon, C.R. Investigation of two-regime well flow. Journal of the Hydraulics Division, 102, HY9, (September 1976): 1149-1165.
- Jacob, C.E. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Transaction American Society of Civil Engineers, no.2321 (1985): 1047-1070.
- Kirkham, C.E. Turbulent flow in porous media. Water research foundation bulletin no.11, laboratory report no.148, University of New South Wales, 1977.
- Lacombe, P.J. Artificial recharge of groundwater by well injection for storage and recovery. American Water Resources Association, 1997.
- Lehr, J., Hurlburt, S., Gallagher, B. and Voytex, J. Design and construction of water wells. 1<sup>st</sup> ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988.
- Mobasheri, F. and Todd, D.K. Investigation of the hydraulics of flow near recharge wells. Water Resources Center Contribution no.72, Hydraulic Laboratory University of California, 1963.
- Nazeer Ahmed. Physical properties of porous medium affecting laminar and turbulent flow of water. Doctoral dissertation, Colorado State University, 1967.
- Pham, H.G. Artificial recharge of the bangkok system for the mitigation of land subsidence. Doctoral dissertation, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology, 1977.
- Scheidegger, A.E. The physics of flow through porous media. 2<sup>nd</sup> ed. Toronto: University of Toronto, 1960.

- Sen, Z. Type curves for two-regime well flow. Journal of Hydraulic Engineering 114, 12 (December 1988): 1461-1484.
- Sperry, J.M. and Peirce, J.J.. A model for estimating the hydraulic conductivity of granular material based on grain shape, grain size and porosity. Ground Water 33, 6 (November-December 1995): 892-898
- Sphepherd, R.G. Correlations with permeability and grain size. Ground Water 27, 5 (September-October 1989)
- Tarik, Tavassoli and Sherman. Laboratory testing of filters and slot sizes for relief wells. Journal of Geotechnical Engineering 116, 9 (1990):1325-1346
- Thiruvadam, M. and Pradip Kumar, G.N. Validity of Forchheimer equation in radial flow through coarse granular media. Journal of Engineering Mechanics 123, 7 (July 1997): 696-705.
- Todd, D.K. Groundwater hydrology. 2<sup>nd</sup>ed. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- Todd, D.K. Handbook of groundwater development. 1<sup>st</sup>ed. New York: John Wiley and Sons, 1990.
- Vadat B. Aquifer hydraulics. 1<sup>st</sup>ed. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- Venkataraman, A. and Rama Mahar Rao, P. Darcian. Transitional and turbulent flow through porous media. Journal of Hydraulic Engineering 124, 8 (August 1997): 840-846.
- Ward, J.C. Turbulent flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division 90, HY5 (May 1964): 1-12.
- Williams, D.E. Modern techniques in well design. Journal of American Water Work Association vol.77 (September 1985): 68-74.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การปรับปรุงเครื่องมือและออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

#### ก.1 การปรับปรุงเครื่องมือ

การปรับปรุงเครื่องมือและอุปกรณ์ให้มีความพร้อมในการทดลอง นอกจากต้องพิจารณาถึงความสะอาด รวดเร็ว และปลอดภัยเป็นหลักแล้ว สิ่งสำคัญคือต้องไม่มีผลกระทบต่อข้อมูลที่เก็บบันทึกจากการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้อง และแม่นยำมากที่สุด จึงได้ปรับปรุงและพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

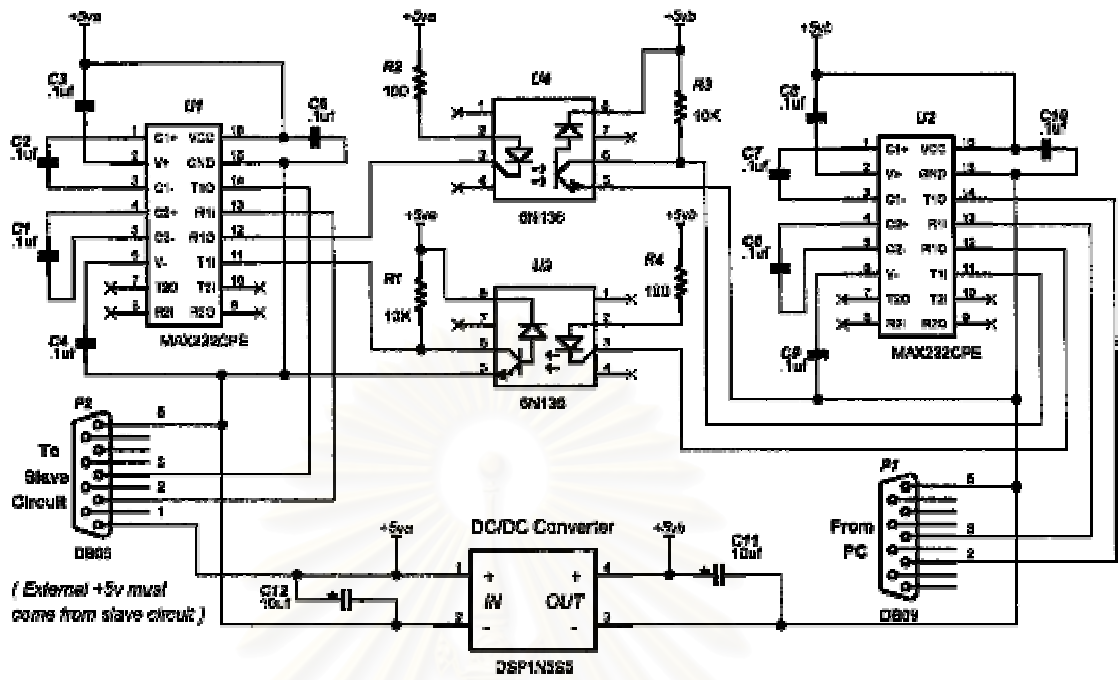
1. ตรวจสอบเช็คสภาพ และต่อเชื่อมสายดินของตู้ควบคุม คอมพิวเตอร์ และมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ เพื่อป้องกันกระแสไฟรั่ว ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ทำการทดลอง และช่วยลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง

2. จัดทำชุดแยกสัญญาณ (Isolated RS232 Interface) เพื่อตัดสัญญาณรบกวน (Noise) ระหว่างระบบควบคุมกับระบบวัด เก็บ และแสดงข้อมูล ซึ่งช่วยให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยชุดแยกสัญญาณนี้มีสายต่อเชื่อมด้านหนึ่งกับพอร์ตอนุกรม (RS-232) ของเครื่องคอมพิวเตอร์และอีกด้านหนึ่งต่อกับสายส่งสัญญาณ ชุดแยกสัญญาณมีวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ ก-1 และมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ ก-2

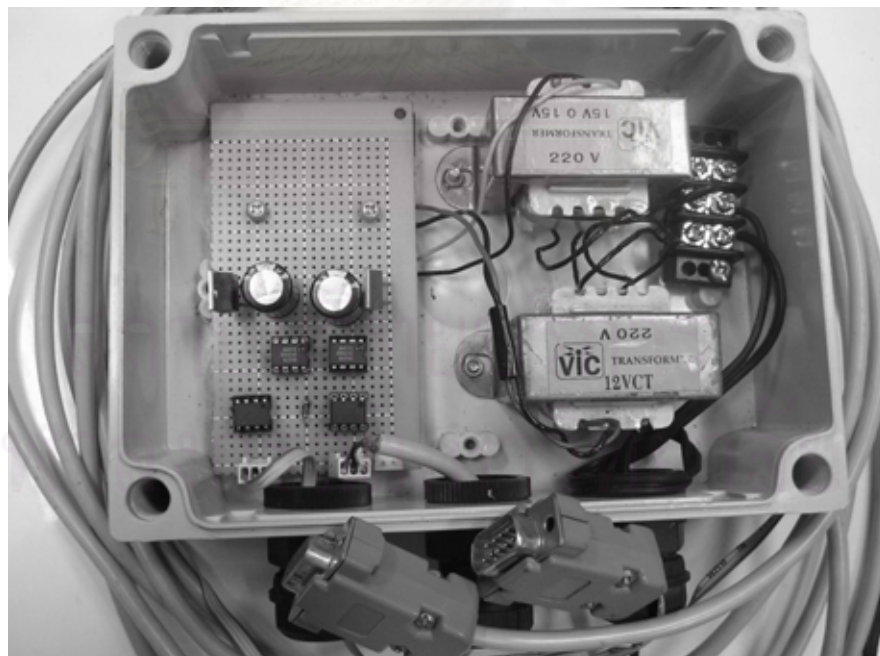
3. จัดทำสายส่งสัญญาณ (RS232 to RJ45 Adapter) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ต้องการ ณ เวลาต่างๆ พร้อมทั้งรับสัญญาณจากตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำกลับมายังคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความเร็วรอบว่าสอดคล้องกับข้อมูลที่ส่งไปให้หรือไม่ โดยปลายสายส่งสัญญาณด้านที่เป็นพอร์ตอนุกรม (RS-232) ต่อเชื่อมกับชุดแยกสัญญาณ และปลายด้านที่เป็นพอร์ตระบบเครือข่าย (RJ-45) ต่อเชื่อมกับตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ ลักษณะสายส่งสัญญาณแสดงในรูปที่ ก-3

4. จัดซื้อเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor) ชนิด Piezoelectric ยี่ห้อ "Honeywell" รุ่น ST025PG2SPCF วัดแรงดันน้ำในช่วง 0 ถึง 25 psi (0-17.25 mH<sub>2</sub>O) เพื่อนำมาใช้สำหรับวัดแรงดันน้ำที่จุดต่างๆ ของแบบจำลอง ได้แก่ ในชั้นน้ำ 12 ตัว และที่บ่อบาดาล 1 ตัว ลักษณะของเซนเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF แสดงในรูปที่ ก-4





รูปที่ ก-1 ผังวงจรของชุดแยกสัญญาณ



รูปที่ ก-2 ลักษณะของชุดแยกสัญญาณ



รูปที่ ก-3 สายส่งสัญญาณ



รูปที่ ก-4 เซ็นเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF

## ก.2 การออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ (สนับสนุนทุนจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ไม่สามารถควบคุมการทดลองและบันทึกผลการทดลองได้โดยสะดวก จึงได้นำคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมการทดลอง พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมควบคุมอัตราการไหลของแบบจำลองให้สามารถปรับอัตราการไหลได้ตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนไป รวมทั้งสามารถแสดงผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลในทุกช่วงเวลา (Real Time) โปรแกรมควบคุมการทดลองมีแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ ก-5 และแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) ส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น เป็นส่วนที่ใช้ในการกำหนดค่าต่างๆ ของโปรแกรมควบคุมการทดลอง ประกอบด้วยย่อยต่างๆ 3 ส่วน คือ

- ส่วนควบคุมการติดต่อสื่อสารระหว่างโปรแกรมควบคุมการทดลองในการส่งข้อมูลความเร็วรอบให้แก่ตัวควบคุมมอเตอร์เครื่องสูบน้ำผ่านทางพอร์ตอนุกรม (RS-232) พร้อมทั้งรับค่าความเร็วรอบกลับมาเพื่อตรวจสอบความเร็วรอบที่ตัวควบคุมส่งออกไปนั้นสัมพันธ์กับรูปแบบที่กำหนดหรือไม่
- ส่วนควบคุมการปรับแก้ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันที่ใช้ในการทดลอง โดยการนำข้อมูลที่ได้รับจาก Data Logger มาคูณกับค่าปรับแก้ที่ได้จากการสอบเทียบในภาคผนวก ข แล้วนำไปปรับแก้ค่าระดับของเซนเซอร์ก่อนนำไปแสดงผลการทดลองและเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง
- ส่วนกำหนดรายละเอียดข้อมูลการทดลอง เป็นการป้อนรายละเอียดข้อมูลการทดลองโดยผู้ทำการทดลอง ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปบันทึกในส่วนบนของแฟ้มข้อมูลแบบตาราง (\*.xls) เพื่อความสะดวกในการนำข้อมูลไปใช้คำนวณต่อไป

2) ส่วนแสดงผล ประมวลผล และเก็บบันทึกข้อมูล เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลข้อมูลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ในทุกช่วงเวลา (Real Time) โดยเริ่มแสดงผลหลังจากทำการเตรียมพร้อมเครื่องมือและเริ่มทำการทดลอง เพื่อให้ผู้ทำการทดลองทราบความสัมพันธ์ของระดับความดันและอัตราการไหลในเบื้องต้นว่ามีความสัมพันธ์กับรูปแบบที่ใช้ในการทดลองหรือไม่ เมื่อครบระยะเวลาทำการทดลองแล้วก็สามารถกดปุ่มบันทึกได้ทันที หน้าจอของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนสำคัญ คือ

- Pump Signal คือ กราฟแสดงผลรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปทุกวินาที
- Data Logger Signal คือ กราฟแสดงผลระดับความดันที่วัดได้จากตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงไปทุกวินาทีตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง ค่าที่นำมาแสดงในส่วนนี้เป็นค่าที่

รับมาจาก Data Logger แล้วทำการปรับแก้ค่าระดับและความถูกต้องก่อนแสดงผลขึ้นบนจอ

- Head Curve คือ กราฟแสดงผลระดับความดันที่ระยะต่างๆ ของแบบจำลองในแต่ละวินาทีที่ทำการทดลอง

- Multiple Display คือ การเลือกแสดงผลของค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันตำแหน่งต่างๆ

เมื่อเริ่มใช้งานโปรแกรมควบคุมการทดลอง โปรแกรมจะมีหน้าจอหลักดังแสดงในรูปที่ ก-7 ก่อนเริ่มการทดลองต้องกำหนดค่าต่างๆ ของโปรแกรมควบคุมการทดลอง โดยเลือกที่เมนูหลัก “Edit -> Sensors” เพื่อกำหนดค่าของเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีหน้าจอดังรูปที่ ก-9 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดัน ค่าปรับแก้ระดับติดตั้ง (Offset) และปรับแก้ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง (Factor) ตามสมการที่ได้จากการสอบเทียบกับเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐานแล้ว จากนั้นกดปุ่ม “OK” เพื่อยืนยันค่าและกลับเข้าสู่หน้าจอหลัก

จากนั้นไปที่เมนูหลัก “Edit -> New Experiment” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลัก เพื่อกำหนดรายละเอียดการทดลอง ตั้งค่าการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง และรูปแบบการไหล มีหน้าจอดังแสดงในรูปที่ ก-10 ซึ่งข้อมูลที่ต้องใส่มีดังต่อไปนี้

- รายละเอียดการทดลองประกอบด้วย การทดลองที่ และผู้ทำการทดลอง
- ค่าการทดลองประกอบด้วย ความถี่ในการจัดเก็บ (Sampling Rate) หรือ เวลาที่กำหนดให้โปรแกรมควบคุมการทดลองทำการเก็บข้อมูล และอุณหภูมิขณะทำการทดลอง
- วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ ความพรุน ทั้งของวัสดุชั้นน้ำและกรวดกรู (หากมี)
- รูปแบบการไหลประกอบด้วย การไหลแบบคงที่ การไหลแบบเพิ่มขึ้น การไหลแบบลดลง และการไหลแบบฟังก์ชันไซน์ เมื่อทำการเลือกรูปแบบการไหลแล้วกดปุ่ม “แก้ไขค่า...” เพื่อกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ดังหน้าจอในรูปที่ ก-11 จากนั้นกดปุ่ม “OK” เพื่อยืนยันข้อมูลและกลับเข้าสู่หน้าจอหลัก

เมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้วไปที่เมนูหลักเลือก “Run -> New Record” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลัก เพื่อเปิดความหน่วงความจำสำรองของฐานข้อมูล และเข้าสู่หน้าจอแสดงผลการทดลองดังรูปที่ ก-12 จากนั้นเข้าไปที่เมนูหลักกดปุ่ม “Run -> Warm UP” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลักเพื่อทำการเตรียมพร้อมแบบจำลองให้พร้อมสำหรับการทดลอง เมื่อแบบจำลองพร้อมเข้าไปที่เมนูหลักเลือก “Run -> Run” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลักเพื่อทำการทดลอง ขณะทำการทดลองหน้าจอแสดงผลเป็นดังรูปที่ ก-13

เมื่อเก็บข้อมูลจนกระทั่งครบระยะเวลาในการทดลองแล้วให้เข้าไปที่เมนูหลัก “File -> Save” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอ เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลตาราง (ไฟล์สกุล \*.XLS) ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปประมวลผลเพิ่มเติมได้ดีกว่าโดยใช้โปรแกรม MS Excel มีรูปแบบข้อมูลผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ ก-1

จากตารางที่ ก-1 ข้อมูลในแถวแรก “เวลา” คือ เวลาขณะที่ทำการบันทึกข้อมูลทดลอง ข้อมูลในแถวที่สอง “f(t)” คือ ความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ แถวที่สามถึงสิบเจ็ด “P1 ... P15” คือ ข้อมูลระดับความดันน้ำ (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตัวเลข หมายถึงหมายเลขสายสัญญาณ เมื่อสังเกตจะมีบางจุดที่ข้อมูลเป็นศูนย์ คือไม่ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดัน และบางจุดมีค่า 62.16 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้สูงสุดของเซนเซอร์วัดความดัน แสดงว่าเซนเซอร์ตัวนั้นเสียหรือสายนำสัญญาณเสีย และข้อมูลในแถวสุดท้าย “P16” คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (มิลลิเมตร)



## ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างผลการทดลองที่เก็บในรูปแบบข้อมูลตาราง

ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา 17:31:00

วันเดือนปี 17/1/2005

การทดลองที่ DR14/S2

ผู้ทำการทดลอง นายเชิดสกุล ตอสกุล

ความถี่ที่ใช้ในการจัดเก็บ 1 วินาที

อุณหภูมิของน้ำ 27 องศาเซลเซียส

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ชั้นน้ำ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.58 มม.

ความต้งจำเพาะ 2.661

ความพรุน 0.423

กรวดกรุ

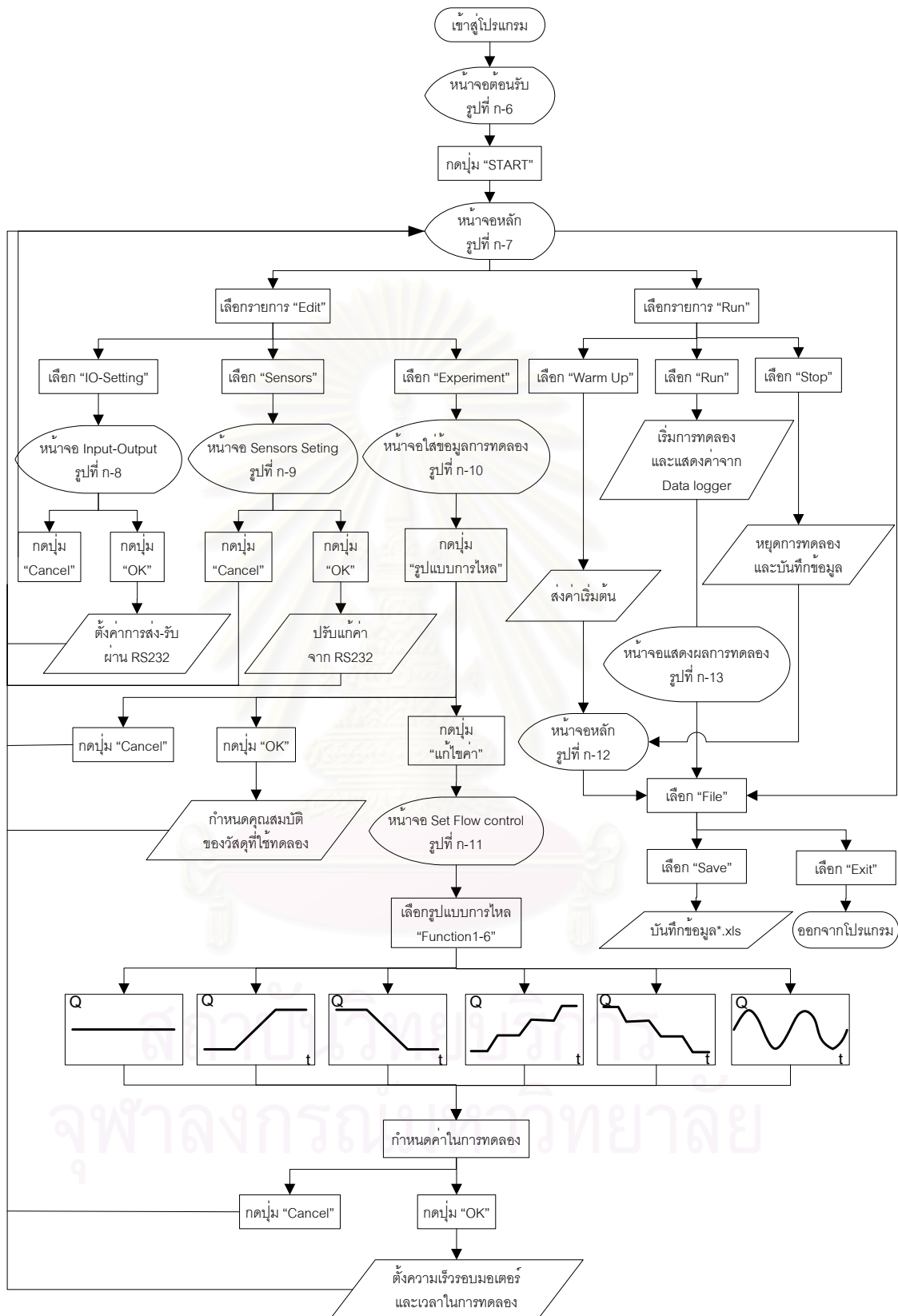
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย - มม.

ความต้งจำเพาะ -

ความพรุน -

รูปแบบการไหล  $f(t) = C$

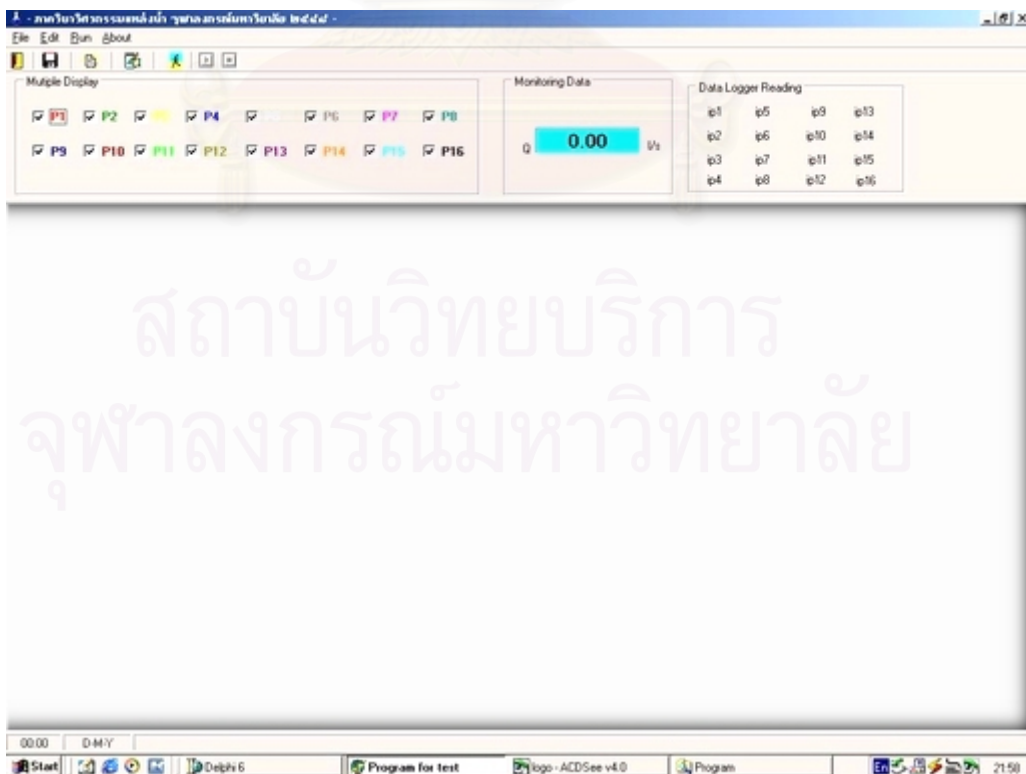
เวลา	f(t)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
17:31:11	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:12	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:13	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:14	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:15	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:16	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:17	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:18	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:19	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:20	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0
17:31:21	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:22	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:23	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:24	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:25	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:26	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:27	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:28	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:29	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:30	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0
17:31:31	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:32	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:33	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:34	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:35	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:36	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:37	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:38	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:39	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:40	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0



รูปที่ ก-5 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทดลอง

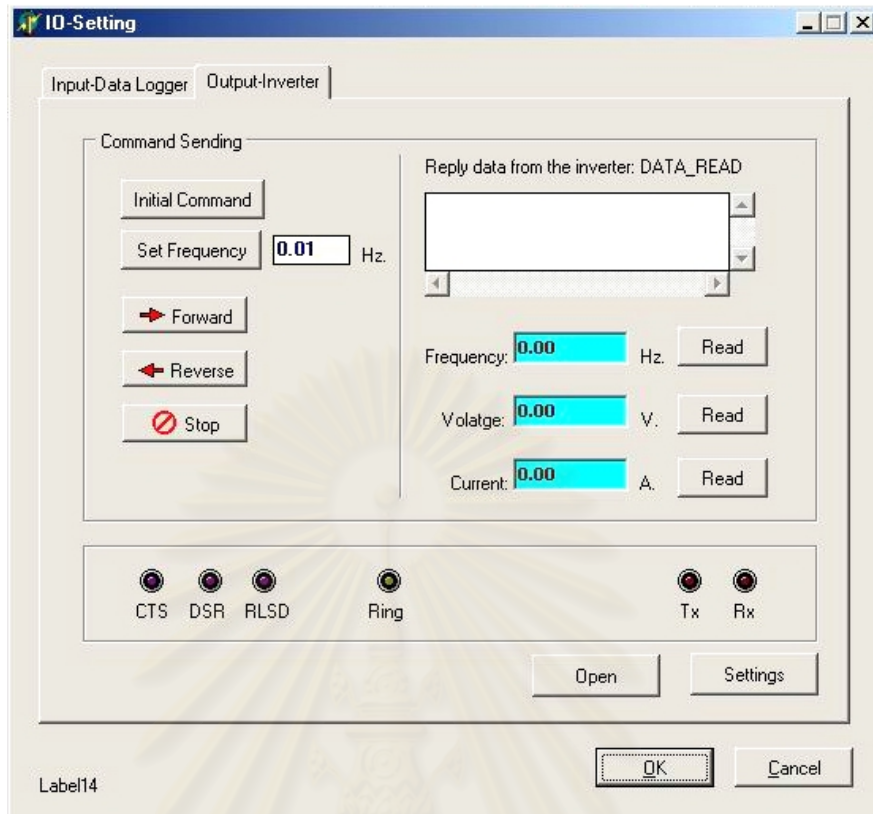


รูปที่ ก-6 หน้าจอต้อนรับโปรแกรมควบคุมการทดลอง

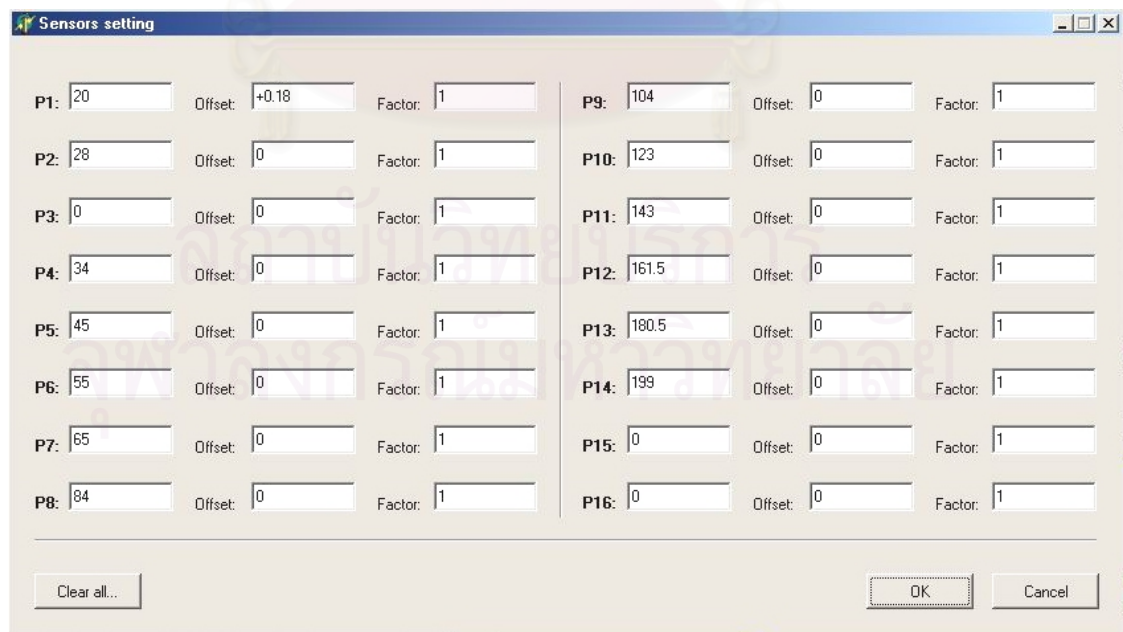


รูปที่ ก-7 หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการทดลอง





รูปที่ ก-8 หน้าจอกำหนดการรับ-ส่งข้อมูลและเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ ก-9 ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดันและค่าปรับแก้

Experiment

### ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**รายละเอียดการทดลอง**

การทดลองที่:

ผู้ทำการทดลอง:

---

**ตั้งค่าการทดลอง**

ความถี่ในการจัดเก็บ:  วินาที

อุณหภูมิของน้ำ:  องศาเซลเซียส

---

**รูปแบบการไหล**

รูปแบบ:

**วัสดุที่ใช้ในการทดลอง**

**ชั้นน้ำ**

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  มม.

ความถ่วงจำเพาะ

ความพรุน

---

**กรวดกร**

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  มม.

ความถ่วงจำเพาะ

ความพรุน

รูปที่ ก-10 หน้าจอสำหรับใส่ข้อมูลการทดลอง

Set Flow Control

Function 1 | Function 2 | Function 3 | Function 4 | Function 5 | Function 6

Graph

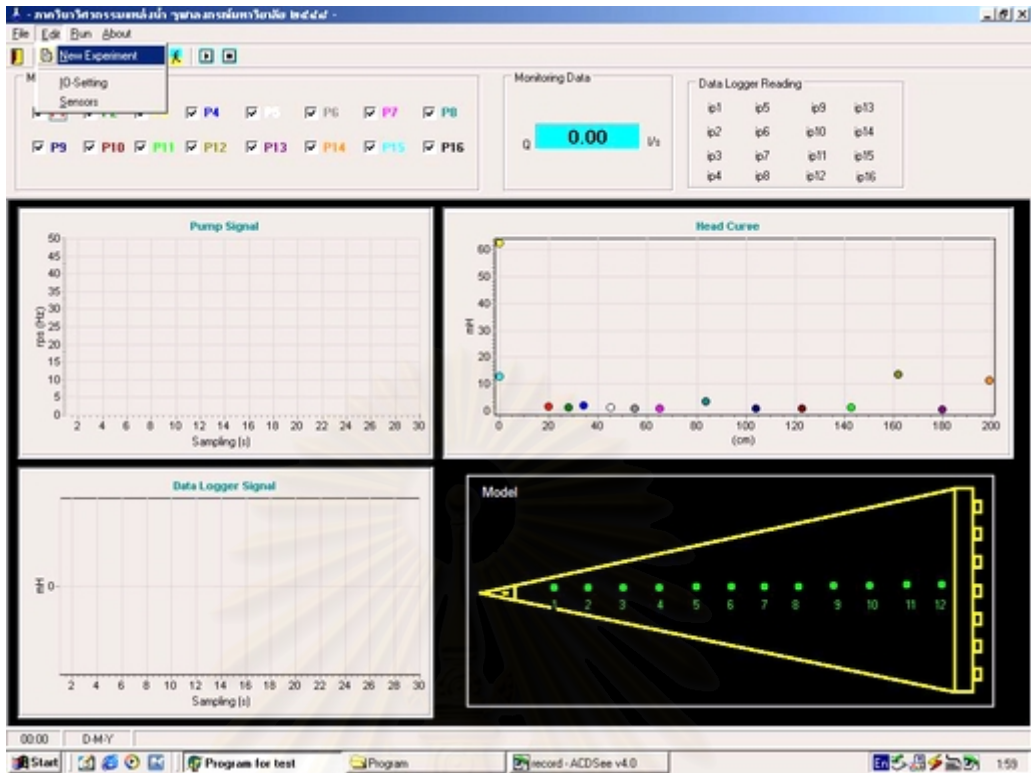
$f(t) = C$

Parameters

C:

Tmax:  Sampling

รูปที่ ก-11 หน้าจอสำหรับใส่ค่ารูปแบบการไหล



รูปที่ ก-12 หน้าจอขณะเตรียมพร้อมแบบจำลอง



รูปที่ ก-13 หน้าจอแสดงผลขณะทำการทดลอง

## ภาคผนวก ข

### ผลการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์

#### ข.1 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน

การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน จะทำการสอบเทียบใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันด้วยวิธีมาตรฐาน และการสอบเทียบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยเซนเซอร์ที่นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 1) การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันด้วยวิธีมาตรฐาน

ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันทั้ง 3 รุ่น ของ Honeywell คือ รุ่น 4040PC100G5D ช่วงวัด 0-100 ปอนด์/ตารางนิ้ว รุ่น ST025PG2SPCF ช่วงวัด 0-25 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งใช้ในการวัดระดับความดันในชั้นน้ำ และรุ่น 40PC001B มีช่วงการวัด 0-50 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งใช้ในการวัดระดับน้ำหน้าฝายวัดอัตราการไหล เพื่อไปคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำต่อไป

การสอบเทียบทำโดยศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) พบว่า รุ่น 4040PC100G5D และรุ่น ST025PG2SPCF มีค่า Linearity สูงสุด เท่ากับ 0.134% และ 0.195% ตามลำดับ ส่วนรุ่น 40PC001B มีค่า Linearity สูงสุด เท่ากับ 2.668% ซึ่งแสดงว่าอยู่ในขีดจำกัดของความถูกต้องที่แสดงไว้ในเกณฑ์มาตรฐานของโรงงาน ( $\pm 5\%$ ) นั่นคือสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันตามที่โรงงานกำหนดได้โดยมีรายละเอียดผลการทดสอบดังนี้

- เซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell: 4040PC100G5D” ดำเนินการสอบเทียบด้วย Dead-Weight Tester โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกลาง ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ ข-1
- เซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell: 40PC001B” ดำเนินการสอบเทียบด้วย Digital Manometer โดยใช้อากาศบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ ข-2
- เซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell: ST025PG2SPCF” ดำเนินการสอบเทียบด้วย Digital Multimeter และ Pressure Calibrator โดยใช้อากาศบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ ข-3

ตารางที่ ข-1 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน "Honeywell: 4040PC100G5D"

Range : 0-100 psi / 0.5-4.5 volt DC			
Applied Pressure (psi)	Output Required (volt DC)	Actual Output (volt DC)	Error (volt DC)
Increasing Pressure			
0.000	0.5000	0.50959	0.00959
24.831	1.49324	1.51582	0.02258
49.662	2.48650	2.52260	0.03610
74.493	3.47970	3.53010	0.05040
99.324	4.47300	4.53810	0.06510
Decreasing Pressure			
74.493	3.47970	3.53030	0.05060
49.662	2.48650	2.52280	0.03630
24.831	1.49324	1.51591	0.02267
0.000	0.50000	0.50962	0.00962
The Uncertainty of Measurement : +/- 1 mV			

ตารางที่ ข-2 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน "Honeywell: 40PC001B"

Range : 0-50 mmHg / 2.5-4.5 volt DC			
Applied Pressure (mmHg)	Output Required (volt DC)	Actual Output (volt DC)	Error (volt DC)
Increasing Pressure			
0.0	2.5000	2.5667	0.0667
12.5	3.0000	3.0523	0.0523
25.0	3.5000	3.5362	0.0362
37.5	4.0000	4.0176	0.0176
50.0	4.5000	4.4977	-0.0023
Decreasing Pressure			
50.0	4.5000	4.4977	-0.0023
37.5	4.0000	4.0176	0.0176
25.0	3.5000	3.5356	0.0356
12.5	3.0000	3.0522	0.0522
0.0	2.5000	2.5667	0.0667
The Uncertainty of Measurement : +/- 8.7 mV			

ตารางที่ ข-3 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell: ST025PG2SPCF”

Range : 0-25 psi / 0.5-4.5 volt DC			
Applied Pressure (psi)	Output Required (volt DC)	Actual Output (volt DC)	Error (volt DC)
Increasing Pressure			
0.0000	0.5000	0.5002	0.0002
2.4988	0.8998	0.8995	-0.0003
4.9978	1.2996	1.2985	-0.0012
7.4995	1.6999	1.6976	-0.0023
9.9987	2.0998	2.0973	-0.0025
12.4979	2.4997	2.4959	-0.0038
14.9971	2.8995	2.8949	-0.0047
17.4964	3.2994	3.2940	-0.0055
19.9957	3.6993	3.6930	-0.0063
22.4950	4.0992	4.0912	-0.0080
24.9943	4.4991	4.4908	-0.0083
Decreasing Pressure			
24.9943	4.4991	4.4909	-0.0082
22.4950	4.0992	4.0928	-0.0064
19.9957	3.6993	3.6941	-0.0052
17.4964	3.2994	3.2950	-0.0045
14.9971	2.8995	2.8962	-0.0033
12.4979	2.4997	2.4965	-0.0032
9.9987	2.0998	2.0975	-0.0023
7.4995	1.6999	1.6974	-0.0025
4.9978	1.2996	1.2983	-0.0013
2.4988	0.8998	0.8995	-0.0003
0.0000	0.5000	0.5004	0.0004
The Uncertainty of Measurement : +/- 1.5 mV			

2) การสอบเทียบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง ด้วยเซนเซอร์ที่นำไปทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน

เนื่องจากเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองรุ่น 4040PC100G5D (No.1 No.2 No.3 No.4 No.5 No.7 No.8 No.10 No.12 No.13 และ No.14) และรุ่น ST025PG2SPCF (No.1 No.2 No.6 No.10 No.11 No.12 และ No.16) ไม่ได้นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน จึงต้องทำการสอบเทียบกับเซนเซอร์วัดความดันที่นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน ในที่นี้จะเรียกว่า “เซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน” เพื่อหา

สมการที่ใช้ในการปรับแก้ความดันที่ได้โดยเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง  
ดำเนินงานดังนี้

โดยมีขั้นตอนในการ

ก) นำเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐานไปติดตั้งบริเวณท่อ By Pass ปิดวาล์ว GV2 GV3 และ GV 4 เปิดวาล์ว GV1 เพื่อให้ น้ำหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass (ดูรูปที่ 3-1) เดินเครื่องสูบน้ำด้วยความเร็วรอบค่าหนึ่ง จนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2 นาที เก็บข้อมูลความดันทุกๆ 1 วินาที จนครบ 5 นาที นำค่าระดับความดันที่เก็บได้มาเฉลี่ยเป็นระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์มาตรฐานที่ความเร็วรอบดังกล่าว

ข) ทำการทดลองเหมือนข้อ ก โดยเปลี่ยนเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง และเดินเครื่องสูบน้ำด้วยความเร็วรอบที่เท่ากับข้อ ก

ค) เมื่อทำครบทุกเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง ให้กลับไปทำขั้นตอน ก และ ข อีกโดยเปลี่ยนค่าความเร็วรอบ

จากการสอบเทียบได้ผลการทดลอง แสดงในตารางที่ ข-4 และ ข-5 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน กับระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ตัวอื่นๆ ได้ดังนี้

- เซนเซอร์รุ่น 4040PC100G5D

$$N0.1 : h = 0.9988h_1$$

$$N0.2 : h = 0.9919h_2$$

$$N0.3 : h = 0.9658h_3$$

$$N0.4 : h = 1.0126h_4$$

$$N0.5 : h = 1.0112h_5$$

$$N0.7 : h = 0.9781h_7$$

$$N0.8 : h = 1.0139h_8$$

$$N0.10 : h = 1.0040h_{10}$$

$$N0.12 : h = 1.0109h_{12}$$

$$N0.13 : h = 0.9965h_{13}$$

$$N0.14 : h = 0.9842h_{14}$$

- เซนเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF

$$N0.1 : h = 1.0171h_1$$

$$N0.2 : h = 1.0171h_2$$

$$N0.6 : h = 1.0110h_6$$

$$N0.10 : h = 1.0007h_{10}$$

$$N0.11 : h = 1.0006h_{11}$$

$$N0.12 : h = 0.9984h_{12}$$

$$N0.16 : h = 1.0002h_{16}$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน โดยที่ค่า  $h_n$  จะเป็นค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ตัวนั้นๆ

ตารางที่ ข-4 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์รุ่น 4040PC100G5D ด้วยเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน

การทดสอบ ครั้งที่	ตัวมาตรฐาน (ม.)	N0.1 (ม.)	N0.2 (ม.)	N0.3 (ม.)	N0.4 (ม.)	N0.5 (ม.)	N0.7 (ม.)	N0.8 (ม.)	N0.10 (ม.)	N0.12 (ม.)	N0.13 (ม.)	N0.14 (ม.)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.35	0.38	0.39	0.51	0.14	0.26	0.61	0.29	0.33	0.29	0.49	0.66
3	1.12	1.12	1.14	1.27	0.84	1.03	1.35	1.00	1.06	0.99	1.23	1.38
4	2.35	2.36	2.41	2.53	2.09	2.24	2.60	2.27	2.30	2.25	2.45	2.60
5	4.06	4.07	4.12	4.29	3.83	3.96	4.33	3.96	3.98	3.98	4.19	4.31
6	6.26	6.30	6.36	6.55	6.07	6.13	6.52	6.15	6.22	6.18	6.32	6.48
7	8.98	9.02	9.07	9.32	8.82	8.88	9.23	8.86	8.94	8.90	9.06	9.19
8	12.14	12.16	12.24	12.55	12.04	12.04	12.38	11.97	12.12	12.00	12.17	12.30
9	15.80	15.79	15.89	16.28	15.73	15.65	16.00	15.62	15.75	15.67	15.76	15.88

ตารางที่ ข-5 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF ด้วยเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน

การทดสอบ ครั้งที่	ตัวมาตรฐาน (ม.)	N0.1 (ม.)	N0.2 (ม.)	N0.6 (ม.)	N0.10 (ม.)	N0.11 (ม.)	N0.12 (ม.)	N0.16 (ม.)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.39	0.30	0.31	0.35	0.40	0.41	0.41	0.41
3	1.13	1.05	1.07	1.08	1.14	1.15	1.14	1.14
4	2.37	2.29	2.30	2.32	2.38	2.38	2.38	2.37
5	4.08	4.01	4.03	4.03	4.08	4.08	4.09	4.08
6	6.27	6.20	6.19	6.22	6.26	6.25	6.27	6.26



## ข.2 ผลการสอบเทียบเครื่อง Data Logger

จากการสอบเทียบเครื่อง Data Logger ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเปรียบเทียบความดันที่คำนวณได้จากเครื่อง Data Logger เมื่อใส่แรงดันมาตรฐานให้แก่เครื่อง Data Logger จะได้ผลการสอบเทียบดังแสดงในตารางที่ ข-6

ตาราง ข-6 ผลการสอบเทียบเครื่อง Data Logger

Applied Voltage (volt Dc)	Output Required		Actual Output (m H <sub>2</sub> O)	Error	
	(psi)	(m H <sub>2</sub> O)		(m H <sub>2</sub> O)	(%)
0.5	0	0	0	0	0
0.9966	12.40948	8.74	8.73	0.01	0.0162259
1.493	24.82465	17.484	17.46	0.024	0.0389421
1.99	37.24975	26.235	26.19	0.045	0.0730164
2.487	49.67485	34.986	34.93	0.056	0.0908648
2.983	62.0744	43.719	43.66	0.059	0.0957326
3.479	74.47537	52.453	52.39	0.063	0.1022229

จากผลที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความดันระหว่างค่าที่ได้กับค่าจริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน มากที่สุดเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

## ข.3 ผลการสอบเทียบฝายวัดอัตราการไหล

ฝายวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ฝายสันคม (Sharp-Crested Weir) ซึ่งเป็นฝายที่นิยมใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำ โดยที่ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Notch Weir) มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับระดับน้ำเหนือสันฝายดังนี้

$$Q = c_d \frac{2}{3} B_{weir} \sqrt{2g} (h_{weir})^{3/2}$$

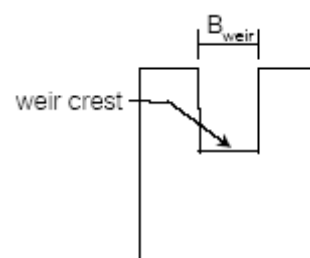
เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล (ลบ./วินาที)

$c_d$  คือ สัมประสิทธิ์อัตราไหล

$B_{weir}$  คือ ความกว้างของสันฝาย (ม.)

$h_{weir}$  คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (ม.)

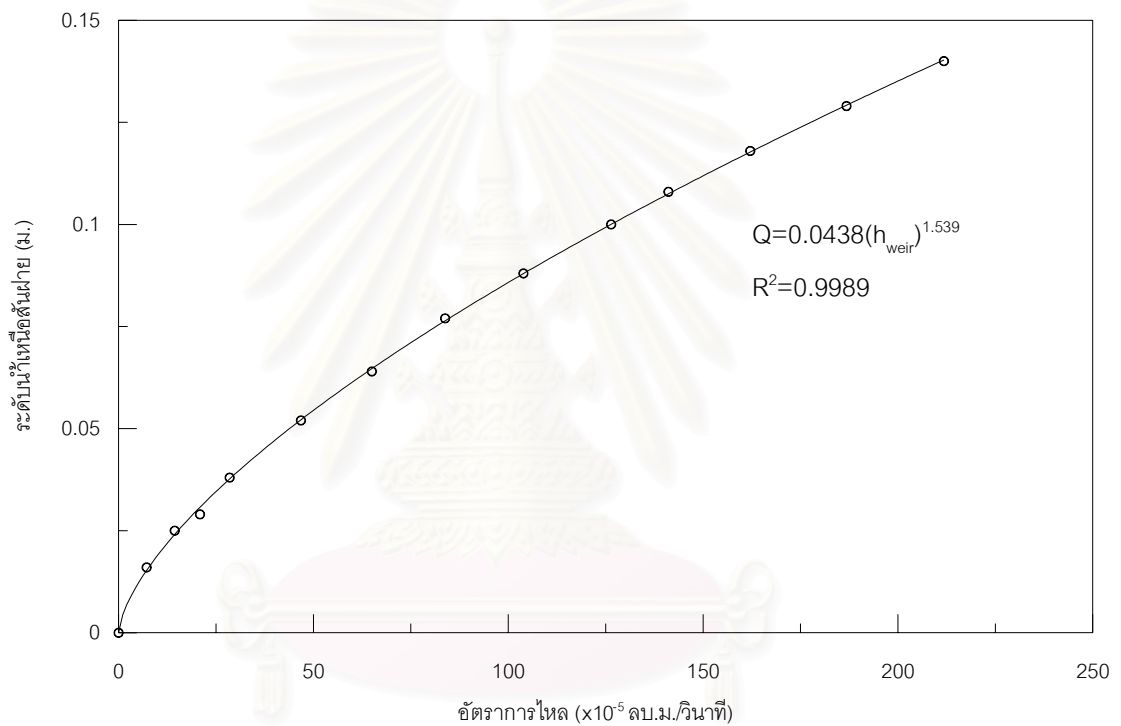
$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที<sup>2</sup>)



การสอบเทียบฝายวัดอัตราการไหลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ขั้นพื้นฐาน ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถังวัดอัตราการไหลในการวัดอัตราการไหล ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ข-7 เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล แสดงดังรูปที่ ข-1 จะได้สมการของฝายวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองดังนี้

$$Q = 0.0438h_{\text{weir}}^{1.539}$$

โดยค่า  $c_d$  เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.63



รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ผลการสอบเทียบฝายวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง

ความกว้างของสันฝาย( $B_{weir}$ ) = 2.12 เซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำในการสอบเทียบ = 27°C

การทดลอง	ระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ )		ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	เวลา (วินาที)	Q (ลิตร/วินาที)	Q <sub>avg</sub> (ลิตร/วินาที)	Q <sub>avg</sub> *10-5 (ลบ.ม./วินาที)	Cd
	หลอดวัดระดับน้ำ (มม.)	ค่าเฉลี่ยจากเซนเซอร์ (มม.)						
1	0	113.44	0	-	0	0	0	-
			0	-	0			
			0	-	0			
2	16	130.81	1	14.42	0.069	0.072	7.2	0.57
			1	13.49	0.074			
			1	13.87	0.072			
3	25	140.58	2	13.25	0.151	0.144	14.4	0.58
			2	14.33	0.14			
			2	14.22	0.141			
4	29	144.92	3	14.25	0.211	0.209	20.9	0.68
			3	14.22	0.211			
			3	14.53	0.206			
5	38	154.70	3	10.44	0.287	0.285	28.5	0.61
			3	10.6	0.283			
			3	10.5	0.286			
6	52	169.89	5	10.71	0.467	0.468	46.8	0.63
			5	10.59	0.472			
			5	10.75	0.465			
7	64	182.92	5	7.5	0.667	0.65	65	0.64
			5	7.82	0.639			
			5	7.78	0.643			
8	77	197.04	5	5.81	0.861	0.838	83.8	0.63
			5	6	0.833			
			5	6.09	0.821			
9	88	208.98	5	4.72	1.059	1.039	103.9	0.64
			5	4.75	1.053			
			5	4.97	1.006			
10	100	222.01	10	7.9	1.266	1.264	126.4	0.64
			10	7.97	1.255			
			10	7.87	1.271			
11	108	230.69	10	7.13	1.403	1.411	141.1	0.64
			10	6.94	1.441			
			10	7.19	1.391			
12	118	241.55	10	6	1.667	1.621	162.1	0.64
			10	6.34	1.577			
			10	6.18	1.618			
13	129	253.49	10	5.03	1.988	1.868	186.8	0.64
			10	5.81	1.721			
			10	5.28	1.894			
14	140	265.43	10	5.15	1.942	2.118	211.8	0.65
			10	4.73	2.114			
			10	4.35	2.299			

หมายเหตุ : ระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้องปรับแก้ด้วยสมการ  $h_{weir} = 0.921h - 104.49$  จึงจะเป็นระดับน้ำเหนือสันฝาย

## ภาคผนวก ค

## ผลการทดลอง

## ค.1 ผลการทดลองการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ (SA1/S1-SA2/S4)

การทดลองเพื่อหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ โดยนำทรายตัวอย่างมาร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน ได้น้ำหนักทรายที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด และนำไปวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำในแต่ละตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ ค-1 ถึง ค-8 โดยตารางที่ ค-1 ถึง ค-4 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ก่อนทำการทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน (SA1/S1-SA1/S4) ส่วนตารางที่ ค-5 ถึง ค-8 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาด หลังจากทำการทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน (SA2/S1-SA2/S4)

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ก่อนทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	0.6	0.12	0.12	99.88
No.10	1.650	5.0	0.97	1.09	98.91
No.16	1.190	483.1	93.95	95.04	4.96
No.20	0.830	23.2	4.51	99.55	0.45
No.30	0.590	1.7	0.33	99.88	0.12
No.50	0.300	0.3	0.06	99.94	0.06
No.100	0.149	0.1	0.02	99.96	0.04
No.200	0.074	0.1	0.02	99.98	0.02
ถาด	-	0.1	0.02	100.00	0.00

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ก่อนทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	80.3	15.99	15.99	84.01
No.10	1.650	111.1	22.12	38.10	61.90
No.16	1.190	309.2	61.56	99.66	0.34
No.20	0.830	0.7	0.14	99.80	0.20
No.30	0.590	0.4	0.08	99.88	0.12
No.50	0.300	0.1	0.02	99.90	0.10
No.100	0.149	0.1	0.02	99.92	0.08
No.200	0.074	0.1	0.02	99.94	0.06
ถาด	-	0.3	0.06	100.00	0.00

ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3 ก่อนทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	118.6	23.82	23.82	76.18
No.10	1.650	199.1	39.99	63.81	36.19
No.16	1.190	164.3	33.00	96.81	3.19
No.20	0.830	7.9	1.59	98.39	1.61
No.30	0.590	3.6	0.72	99.12	0.88
No.50	0.300	2.4	0.48	99.60	0.40
No.100	0.149	1.4	0.28	99.88	0.12
No.200	0.074	0.4	0.08	99.96	0.04
ถาด	-	0.2	0.04	100.00	0.00

ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4 ก่อนทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	206.9	41.45	41.45	58.55
No.10	1.650	178.8	35.82	77.26	22.74
No.16	1.190	112.3	22.50	99.76	0.24
No.20	0.830	0.2	0.04	99.80	0.20
No.30	0.590	0.1	0.02	99.82	0.18
No.50	0.300	0.1	0.02	99.84	0.16
No.100	0.149	0.1	0.02	99.86	0.14
No.200	0.074	0.2	0.04	99.90	0.10
ถาด	-	0.5	0.10	100.00	0.00

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 หลังทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	0.7	0.14	0.14	99.86
No.10	1.650	6.8	1.34	1.48	98.52
No.16	1.190	477.6	94.33	95.81	4.19
No.20	0.830	19.8	3.91	99.72	0.28
No.30	0.590	1.2	0.24	99.96	0.04
No.50	0.300	0.2	0.04	100.00	0.00
No.100	0.149	0.0	0.00	100.00	0.00
No.200	0.074	0.0	0.00	100.00	0.00
ถาด	-	0.0	0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 หลังทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	84.5	16.79	16.79	83.21
No.10	1.650	116.2	23.09	39.88	60.12
No.16	1.190	300.9	59.80	99.68	0.32
No.20	0.830	0.6	0.12	99.80	0.20
No.30	0.590	0.3	0.06	99.86	0.14
No.50	0.300	0.3	0.06	99.92	0.08
No.100	0.149	0.2	0.04	99.96	0.04
No.200	0.074	0.1	0.02	99.98	0.02
ถัด	-	0.1	0.02	100.00	0.00

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3 หลังทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	110.8	22.01	22.01	77.99
No.10	1.650	192.8	38.30	60.31	39.69
No.16	1.190	177.8	35.32	95.63	4.37
No.20	0.830	10.6	2.11	97.74	2.26
No.30	0.590	6.3	1.25	98.99	1.01
No.50	0.300	3.7	0.74	99.72	0.28
No.100	0.149	1.1	0.22	99.94	0.06
No.200	0.074	0.2	0.04	99.98	0.02
ถัด	-	0.1	0.02	100.00	0.00

ตารางที่ ค-8 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4 หลังทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง		น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงสะสม (%)	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงสะสม (%)
		(กรัม)	(%)		
No.4	4.760	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.360	224.0	40.98	40.98	59.02
No.10	1.650	184.3	33.72	74.70	25.30
No.16	1.190	135.4	24.77	99.47	0.53
No.20	0.830	0.7	0.13	99.60	0.40
No.30	0.590	0.8	0.15	99.74	0.26
No.50	0.300	0.6	0.11	99.85	0.15
No.100	0.149	0.4	0.07	99.93	0.07
No.200	0.074	0.2	0.04	99.96	0.04
ถัด	-	0.2	0.04	100.00	0.00

## ค.2 ผลการทดลองแบบมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำ

(ST1/S1 - ST14/S4)

การทดลองแบบมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ทำการทดสอบโดยวิธีความดันคงที่ (Constant Head) ในเพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงระบอก ได้ผลการทดลองและพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ ค-9 ถึง ค-12 โดยมีคำอธิบายและการคำนวณดังนี้

- 1)  $h_D$  คือ ระดับความดันที่จุดวัดที่ระยะ 10 เซนติเมตร จากหน้าแปลนด้านล่าง (ดูรูปที่ 3-4)
- 2)  $h_U$  คือ ระดับความดันที่จุดวัดที่ระยะ 90 เซนติเมตร จากหน้าแปลนด้านล่าง (ดูรูปที่ 3-4)
- 3)  $\Delta h$  คือ ผลต่างของ  $h_D$  และ  $h_U$
- 4)  $h_{weir}$  คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย
- 5)  $Q$  คือ อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/วินาที) คำนวณจาก  $Q = 0.0438 h_{weir}^{1.539}$  และ  $h_{weir}$  มีหน่วยเป็นเมตร
- 6)  $V$  คือ ความเร็วการไหลมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของอัตราการไหลกับพื้นที่หน้าตัดของเพอร์เมียมิเตอร์ (0.0293 ตารางเมตร)
- 7)  $v/\phi$  คือ ความเร็วการไหลจริง
- 8)  $Re'$  คือ ค่าเรย์โนลด์ คำนวณจากสมการที่ 2-13  $Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{\nu}\right)$
- 9)  $l$  คือ ความลาดชันชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ  $\Delta h$  กับระยะห่างระหว่างจุดวัดความดัน (0.8 เมตร)
- 10)  $f'$  คือ แฟคเตอร์เสียดทาน คำนวณจากสมการที่ 2-23  $f' = \frac{lgd_{50}}{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2}$

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 46.142 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความพรุน = 0.392

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	$h_D$	$h_U$	$\Delta h$	$h_{weir}$	$Q$	$v$	$v/\phi$	$Re'$	$l$	$f'$
	(ม.)	(ม.)	(ม.)	(ซ.ม.)	(ลบ.ม./วินาที)	(ม./วินาที)	(ม./วินาที)			
ST1/S1	0.705	0.632	0.073	0.85	0.000029	0.00097	0.0025	3.89	0.091	97.58
ST2/S1	0.806	0.651	0.155	1.40	0.000061	0.00210	0.0053	8.39	0.194	44.60
ST3/S1	0.963	0.670	0.293	2.10	0.000115	0.00391	0.0100	15.66	0.366	24.20
ST4/S1	1.113	0.706	0.407	2.60	0.000159	0.00544	0.0139	21.75	0.509	17.42
ST5/S1	1.355	0.743	0.612	3.30	0.000230	0.00785	0.0200	31.40	0.765	12.58
ST6/S1	1.546	0.776	0.770	3.70	0.000274	0.00936	0.0238	37.44	0.963	11.13
ST7/S1	1.750	0.816	0.934	4.10	0.000321	0.01096	0.0279	43.85	1.168	9.84
ST8/S1	1.998	0.856	1.142	4.50	0.000370	0.01264	0.0322	50.60	1.428	9.03
ST9/S1	2.358	0.938	1.420	5.15	0.000456	0.01556	0.0397	62.28	1.775	7.42
ST10/S1	3.399	1.376	2.023	6.00	0.000577	0.01969	0.0502	78.79	2.529	6.60
ST11/S1	4.358	1.577	2.781	7.10	0.000747	0.02551	0.0650	102.09	3.476	5.41
ST12/S1	6.135	1.980	4.155	8.60	0.001004	0.03426	0.0873	137.12	5.194	4.48
ST13/S1	8.602	2.548	6.054	10.20	0.001305	0.04455	0.1135	178.29	7.568	3.86
ST14/S1	10.116	2.93	7.190	11.10	0.001487	0.05074	0.1293	203.07	8.988	3.53

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) = 1.58 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 46.049 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.661

ความพรุน = 0.409

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	$h_D$	$h_U$	$\Delta h$	$h_{weir}$	$Q$	$v$	$v/\phi$	$Re'$	$l$	$f'$
	(ม.)	(ม.)	(ม.)	(ซ.ม.)	(ลบ.ม./วินาที)	(ม./วินาที)	(ม./วินาที)			
ST1/S2	0.658	0.624	0.034	0.70	0.000021	0.00072	0.0018	3.26	0.043	106.01
ST2/S2	0.746	0.645	0.101	1.40	0.000061	0.00210	0.0051	9.48	0.126	37.29
ST3/S2	0.832	0.66	0.168	1.95	0.000102	0.00349	0.0085	15.79	0.210	22.37
ST4/S2	0.935	0.692	0.243	2.50	0.000150	0.00512	0.0125	23.15	0.304	15.06
ST5/S2	1.058	0.72	0.338	2.95	0.000193	0.00660	0.0161	29.86	0.423	12.59
ST6/S2	1.296	0.78	0.516	3.60	0.000263	0.00897	0.0219	40.57	0.645	10.41
ST7/S2	1.512	0.835	0.677	4.10	0.000321	0.01096	0.0268	49.56	0.846	9.15
ST8/S2	1.844	0.924	0.920	4.75	0.000403	0.01374	0.0336	62.16	1.150	7.91
ST9/S2	2.036	0.98	1.056	5.20	0.000463	0.01580	0.0386	71.45	1.320	6.87
ST10/S2	2.756	1.184	1.572	6.05	0.000584	0.01994	0.0487	90.20	1.965	6.42
ST11/S2	3.603	1.407	2.196	7.05	0.000739	0.02523	0.0616	114.14	2.745	5.60
ST12/S2	5.543	1.965	3.578	8.80	0.001040	0.03549	0.0867	160.56	4.473	4.61
ST13/S2	7.397	2.38	5.017	10.35	0.001335	0.04556	0.1113	206.10	6.271	3.92
ST14/S2	8.941	2.79	6.149	11.20	0.001507	0.05145	0.1257	232.72	7.686	3.77



ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) = 1.80 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 45.964 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความพรุน = 0.409

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	$h_D$	$h_U$	$\Delta h$	$h_{weir}$	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	$v/\phi$ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
	(ม.)	(ม.)	(ม.)	(ซ.ม.)						
ST1/S3	0.662	0.626	0.036	0.80	0.000026	0.00089	0.0022	4.57	0.045	84.58
ST2/S3	0.733	0.64	0.093	1.50	0.000068	0.00233	0.0057	12.03	0.116	31.56
ST3/S3	0.809	0.65	0.155	2.10	0.000115	0.00391	0.0096	20.19	0.194	18.67
ST4/S3	0.89	0.674	0.216	2.55	0.000155	0.00528	0.0129	27.22	0.270	14.32
ST5/S3	1.055	0.70	0.353	3.20	0.000219	0.00748	0.0183	38.60	0.441	11.63
ST6/S3	1.2	0.73	0.470	3.70	0.000274	0.00936	0.0229	48.27	0.588	9.91
ST7/S3	1.376	0.774	0.602	4.10	0.000321	0.01096	0.0268	56.53	0.753	9.25
ST8/S3	1.572	0.812	0.760	4.60	0.000383	0.01308	0.0320	67.48	0.950	8.19
ST9/S3	1.789	0.864	0.925	5.15	0.000456	0.01556	0.0381	80.29	1.156	7.05
ST10/S3	2.604	1.255	1.349	6.25	0.000614	0.02096	0.0513	108.16	1.686	5.66
ST11/S3	3.202	1.377	1.825	7.15	0.000756	0.02579	0.0631	133.04	2.281	5.06
ST12/S3	4.735	1.723	3.012	8.70	0.001022	0.03488	0.0853	179.93	3.765	4.57
ST13/S3	6.175	2.164	4.011	10.00	0.001266	0.04321	0.1057	222.94	5.014	3.96
ST14/S3	8.008	2.63	5.380	11.30	0.001528	0.05215	0.1275	269.08	6.725	3.65

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) = 2.10 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 45.891 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความพรุน = 0.411

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	$h_D$	$h_U$	$\Delta h$	$h_{weir}$	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	$v/\phi$ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
	(ม.)	(ม.)	(ม.)	(ซ.ม.)						
ST1/S4	0.625	0.591	0.034	0.90	0.000031	0.00106	0.0026	6.36	0.043	65.44
ST2/S4	0.722	0.640	0.082	1.60	0.000075	0.00257	0.0063	15.43	0.103	26.86
ST3/S4	0.777	0.650	0.127	2.10	0.000115	0.00391	0.0095	23.45	0.159	18.01
ST4/S4	0.864	0.666	0.198	2.70	0.000169	0.00576	0.0140	34.52	0.248	12.96
ST5/S4	0.947	0.680	0.267	3.20	0.000219	0.00748	0.0182	44.84	0.334	10.36
ST6/S4	1.018	0.693	0.325	3.50	0.000252	0.00859	0.0209	51.47	0.406	9.57
ST7/S4	1.211	0.727	0.484	4.20	0.000333	0.01137	0.0277	68.14	0.605	8.13
ST8/S4	1.375	0.758	0.617	4.70	0.000396	0.01352	0.0329	81.01	0.771	7.33
ST9/S4	1.542	0.788	0.754	5.25	0.000470	0.01603	0.0390	96.06	0.943	6.37
ST10/S4	1.902	0.864	1.038	6.05	0.000584	0.01994	0.0485	119.49	1.298	5.67
ST11/S4	2.763	1.287	1.476	7.20	0.000764	0.02606	0.0635	156.19	1.845	4.72
ST12/S4	3.854	1.534	2.320	8.70	0.001022	0.03488	0.0849	208.99	2.900	4.14
ST13/S4	5.105	1.857	3.248	10.00	0.001266	0.04321	0.1052	258.94	4.060	3.78
ST14/S4	5.762	2.089	3.673	10.60	0.001385	0.04727	0.1151	283.24	4.591	3.57

### ค.3 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CR1/S1 – CR9/S4)

การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำ และอัดเต็มน้ำภายใต้แรงดัน โดยให้น้ำเข้าทางด้านท้ายแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ในแต่ละอัตรา การไหลเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) และระดับความดันที่ จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) และชั้นน้ำ ( $h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$ ) จากการทดลองได้ผลการไหลในแนวรัศมี เข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในตารางที่ ค-13 ถึง ค-16

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.34$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.061 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ความพรุน = 0.408

การ ทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
CR1/S1	0.666	0.737	0.742	0.747	0.751	0.761	0.766	0.775	0.780	0.784	0.796	0.800	0.803	0.0053
CR2/S1	0.700	0.879	0.926	0.955	0.974	0.978	0.983	0.988	1.000	1.016	1.035	1.044	1.054	0.0295
CR3/S1	0.758	1.013	1.089	1.148	1.167	1.181	1.191	1.210	1.233	1.262	1.290	1.319	1.342	0.0463
CR4/S1	0.811	1.141	1.267	1.371	1.390	1.408	1.456	1.517	1.588	1.640	1.682	1.716	1.730	0.0601
CR5/S1	0.856	1.299	1.491	1.673	1.708	1.730	1.787	1.867	1.971	2.042	2.131	2.188	2.226	0.0723
CR6/S1	0.909	1.511	1.732	2.000	2.100	2.160	2.240	2.369	2.468	2.567	2.627	2.673	2.731	0.0830
CR7/S1	0.976	1.738	2.005	2.371	2.480	2.540	2.666	2.825	2.991	3.123	3.229	3.310	3.335	0.0934
CR8/S1	1.036	1.970	2.312	2.762	2.900	3.000	3.189	3.400	3.614	3.750	3.897	3.970	4.013	0.1029
CR9/S1	1.096	2.260	2.658	3.172	3.327	3.471	3.770	3.990	4.247	4.400	4.575	4.666	4.690	0.1122
CR10/S1	1.183	2.550	3.036	3.625	3.851	4.040	4.356	4.640	4.913	5.140	5.311	5.360	5.455	0.1207
CR11/S1	1.272	2.862	3.421	4.099	4.384	4.634	5.007	5.340	5.650	5.860	6.056	6.169	6.270	0.1291
CR12/S1	1.339	3.217	3.849	4.632	4.979	5.271	5.721	6.050	6.432	6.650	6.889	6.946	7.120	0.1372
CR13/S1	1.441	3.593	4.308	5.184	5.624	5.979	6.460	6.830	7.278	7.493	7.743	7.779	8.034	0.1449
CR14/S1	1.542	3.973	4.777	5.772	6.286	6.698	7.250	7.620	8.123	8.410	8.669	8.787	8.989	0.1526
CR15/S1	1.648	4.395	5.306	6.397	6.991	7.454	8.067	8.520	9.035	9.367	9.644	9.770	9.990	0.1601

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-14 ผลการทดลองการไหลในแนวนอนในท่อที่มีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.58$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.198 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.661

ความพรุน = 0.423

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเบรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
CR1/S2	0.741	0.778	0.781	0.782	0.783	0.784	0.785	0.786	0.788	0.792	0.796	0.798	0.799	0.0110
CR2/S2	0.749	0.873	0.885	0.910	0.926	0.933	0.934	0.936	0.938	0.942	0.946	0.949	0.952	0.0326
CR3/S2	0.771	0.943	0.981	1.073	1.121	1.143	1.146	1.149	1.152	1.158	1.174	1.190	1.197	0.0494
CR4/S2	0.806	1.047	1.110	1.210	1.312	1.376	1.439	1.441	1.446	1.447	1.457	1.466	1.471	0.0631
CR5/S2	0.853	1.195	1.272	1.430	1.575	1.649	1.737	1.763	1.789	1.824	1.831	1.842	1.852	0.0735
CR6/S2	0.894	1.355	1.480	1.680	1.814	1.944	2.072	2.121	2.174	2.227	2.258	2.274	2.290	0.0847
CR7/S2	0.955	1.538	1.688	1.970	2.147	2.318	2.480	2.549	2.598	2.706	2.727	2.754	2.763	0.0949
CR8/S2	1.005	1.732	1.935	2.270	2.506	2.692	2.895	2.993	3.092	3.210	3.250	3.281	3.297	0.1050
CR9/S2	1.082	1.952	2.200	2.570	2.896	3.145	3.410	3.465	3.605	3.736	3.806	3.845	3.883	0.1142
CR10/S2	1.159	2.191	2.491	2.920	3.325	3.597	3.874	3.991	4.157	4.271	4.392	4.440	4.492	0.1229
CR11/S2	1.243	2.453	2.806	3.340	3.779	4.107	4.469	4.597	4.784	4.888	5.017	5.086	5.151	0.1313
CR12/S2	1.334	2.750	3.135	3.760	4.289	4.656	4.990	5.250	5.443	5.590	5.711	5.792	5.873	0.1402
CR13/S2	1.416	3.046	3.507	4.170	4.813	5.217	5.610	5.920	6.135	6.320	6.422	6.530	6.642	0.1478
CR14/S2	1.507	3.370	3.876	4.750	5.404	5.848	6.300	6.610	6.877	7.008	7.187	7.313	7.416	0.1556
CR15/S2	1.592	3.708	4.307	5.200	5.999	6.475	7.010	7.400	7.618	7.786	7.978	8.121	8.258	0.1640

ตารางที่ ค-15 ผลการทดลองการไหลในแนวนอนในท่อที่มีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.80$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.211 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความพรุน = 0.421

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเบรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
CR1/S3	0.783	0.822	0.839	0.851	0.852	0.857	0.860	0.861	0.866	0.872	0.883	0.890	0.896	0.0086
CR2/S3	0.795	0.879	0.900	0.907	0.913	0.919	0.930	0.936	0.953	0.970	1.004	1.026	1.043	0.0326
CR3/S3	0.804	0.988	1.026	1.032	1.038	1.043	1.060	1.078	1.100	1.134	1.168	1.197	1.225	0.0495
CR4/S3	0.845	1.086	1.157	1.208	1.231	1.236	1.265	1.287	1.327	1.372	1.412	1.452	1.474	0.0624
CR5/S3	0.922	1.206	1.306	1.400	1.429	1.446	1.480	1.531	1.594	1.650	1.710	1.750	1.760	0.0744
CR6/S3	0.963	1.364	1.501	1.616	1.648	1.690	1.747	1.815	1.894	1.970	2.042	2.102	2.140	0.0856
CR7/S3	1.042	1.542	1.682	1.870	1.905	1.945	2.040	2.117	2.297	2.388	2.467	2.560	2.600	0.0960
CR8/S3	1.095	1.733	1.901	2.166	2.219	2.262	2.415	2.486	2.671	2.762	2.868	2.987	2.990	0.1055
CR9/S3	1.182	1.938	2.155	2.473	2.532	2.602	2.795	2.895	3.136	3.190	3.318	3.386	3.390	0.1148
CR10/S3	1.264	2.167	2.426	2.779	2.868	2.999	3.233	3.335	3.597	3.690	3.823	3.838	3.870	0.1235
CR11/S3	1.340	2.422	2.702	3.145	3.260	3.392	3.660	3.798	4.086	4.174	4.290	4.332	4.370	0.1324
CR12/S3	1.431	2.667	3.011	3.499	3.685	3.858	4.162	4.301	4.611	4.710	4.806	4.821	4.929	0.1407
CR13/S3	1.530	2.933	3.331	3.903	4.101	4.310	4.667	4.831	5.174	5.294	5.497	5.582	5.637	0.1491
CR14/S3	1.661	3.251	3.686	4.307	4.569	4.798	5.218	5.396	5.792	5.933	6.085	6.151	6.203	0.1569
CR15/S3	1.761	3.564	4.017	4.715	5.049	5.332	5.779	5.985	6.395	6.589	6.717	6.791	6.896	0.1644

ตารางที่ ค-16 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 2.10$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.476 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความพรุน = 0.422

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
CR1/S4	0.670	0.723	0.732	0.741	0.741	0.749	0.758	0.758	0.767	0.785	0.793	0.800	0.829	0.0123
CR2/S4	0.705	0.838	0.882	0.890	0.900	0.908	0.917	0.917	0.926	0.926	0.940	0.952	0.970	0.0374
CR3/S4	0.785	0.970	1.040	1.058	1.067	1.067	1.084	1.084	1.093	1.100	1.111	1.128	1.140	0.0537
CR4/S4	0.842	1.076	1.164	1.217	1.234	1.261	1.287	1.314	1.349	1.366	1.380	1.384	1.400	0.0670
CR5/S4	0.911	1.190	1.331	1.446	1.472	1.500	1.525	1.560	1.578	1.605	1.640	1.654	1.684	0.0788
CR6/S4	0.940	1.380	1.520	1.670	1.710	1.750	1.800	1.850	1.898	1.930	1.970	1.968	2.009	0.0896
CR7/S4	1.023	1.589	1.759	1.960	2.020	2.050	2.120	2.200	2.276	2.300	2.340	2.351	2.383	0.0998
CR8/S4	1.070	1.787	2.012	2.250	2.340	2.380	2.445	2.540	2.650	2.670	2.750	2.790	2.822	0.1093
CR9/S4	1.151	2.014	2.280	2.550	2.660	2.730	2.860	3.000	3.126	3.150	3.200	3.243	3.319	0.1183
CR10/S4	1.237	2.265	2.570	2.900	3.000	3.140	3.300	3.500	3.592	3.670	3.740	3.780	3.839	0.1270
CR11/S4	1.321	2.518	2.893	3.240	3.400	3.500	3.741	3.970	4.110	4.180	4.270	4.330	4.381	0.1355
CR12/S4	1.410	2.812	3.226	3.630	3.840	3.980	4.239	4.490	4.666	4.760	4.870	4.920	4.970	0.1438
CR13/S4	1.506	3.117	3.581	4.050	4.250	4.449	4.780	5.000	5.240	5.314	5.490	5.530	5.613	0.1520
CR14/S4	1.611	3.436	3.973	4.500	4.780	4.951	5.338	5.650	5.860	5.962	6.110	6.180	6.283	0.1596
CR15/S4	1.715	3.785	4.359	5.017	5.300	5.550	5.974	6.260	6.528	6.656	6.800	6.880	6.977	0.1671

#### ค.4 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DR1/S1 – DR9/S4)

การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำ และอัดเต็มน้ำภายใต้แรงดัน โดยให้น้ำเข้าทางด้านบ่อน้ำบาดาล ในแต่ละอัตราการไหลเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) และชั้นน้ำ ( $h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$ ) จากการทดลองได้ผลการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในตารางที่ ค-17 ถึง ค-20

#### ตารางที่ ค-17 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.34$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.061 กิโลกรัม

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความพรุน = 0.408

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
DR1/S1	0.940	0.915	0.912	0.850	0.826	0.780	0.740	0.700	0.690	0.680	0.670	0.660	0.633	0.0009
DR2/S1	1.260	1.193	1.190	1.130	1.049	0.960	0.880	0.800	0.780	0.750	0.745	0.740	0.735	0.0245
DR3/S1	1.700	1.616	1.574	1.460	1.349	1.220	1.109	1.030	0.980	0.920	0.910	0.902	0.895	0.0550
DR4/S1	2.270	2.146	2.042	1.930	1.754	1.620	1.462	1.340	1.260	1.129	1.125	1.110	1.122	0.0674
DR5/S1	2.953	2.785	2.635	2.514	2.260	2.027	1.882	1.700	1.600	1.496	1.490	1.475	1.446	0.0787
DR6/S1	3.815	3.524	3.310	3.100	2.834	2.680	2.420	2.150	2.000	1.910	1.880	1.873	1.851	0.0890
DR7/S1	4.763	4.370	4.086	3.799	3.500	3.260	2.998	2.750	2.590	2.442	2.360	2.329	2.315	0.0991
DR8/S1	5.818	5.296	4.937	4.541	4.195	3.906	3.633	3.300	3.110	2.970	2.870	2.827	2.802	0.1083
DR9/S1	6.980	6.319	5.884	5.397	4.990	4.688	4.380	4.050	3.770	3.570	3.480	3.401	3.393	0.1170
DR10/S1	8.294	7.474	6.923	6.325	5.894	5.569	5.185	4.870	4.600	4.348	4.170	4.045	4.012	0.1255
DR11/S1	9.641	8.639	8.017	7.308	6.839	6.462	6.017	5.600	5.260	5.050	4.870	4.719	4.698	0.1336
DR12/S1	11.178	9.992	9.262	8.408	7.910	7.510	7.017	6.440	6.295	5.997	5.882	5.544	5.534	0.1415
DR13/S1	12.780	11.417	10.570	9.585	9.039	8.591	8.058	7.440	7.260	6.937	6.763	6.393	6.366	0.1492
DR14/S1	14.444	12.882	11.918	10.813	10.230	9.735	9.108	8.500	8.080	7.740	7.560	7.298	7.259	0.1566
DR15/S1	16.246	14.450	13.377	12.130	11.523	10.973	10.278	9.650	9.278	8.957	8.677	8.258	8.234	0.1638

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-18 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.58$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.198 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.661

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ความพรุน = 0.423

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
DR1/S2	0.87	0.863	0.850	0.830	0.820	0.790	0.770	0.750	0.730	0.690	0.660	0.640	0.631	0.0111
DR2/S2	1.09	1.065	1.050	1.030	0.990	0.940	0.890	0.840	0.810	0.790	0.760	0.750	0.735	0.0333
DR3/S2	1.49	1.420	1.400	1.360	1.300	1.210	1.120	1.060	1.030	0.990	0.950	0.940	0.923	0.0510
DR4/S2	2.00	1.860	1.840	1.780	1.692	1.600	1.480	1.390	1.320	1.290	1.270	1.230	1.192	0.0645
DR5/S2	2.58	2.399	2.380	2.310	2.184	2.090	1.910	1.820	1.780	1.690	1.640	1.590	1.531	0.0767
DR6/S2	3.31	3.037	3.010	2.910	2.740	2.555	2.382	2.290	2.249	2.009	2.148	2.010	1.957	0.0888
DR7/S2	4.11	3.758	3.700	3.645	3.391	3.178	2.985	2.890	2.797	2.549	2.639	2.540	2.455	0.0991
DR8/S2	5.04	4.578	4.500	4.396	4.134	3.892	3.653	3.530	3.423	3.177	3.237	3.130	3.027	0.1096
DR9/S2	6.07	5.501	5.380	5.248	4.963	4.709	4.420	4.270	4.142	3.872	3.914	3.690	3.679	0.1192
DR10/S2	7.16	6.489	6.300	6.155	5.867	5.577	5.235	5.050	4.897	4.627	4.624	4.500	4.374	0.1282
DR11/S2	8.36	7.549	7.350	7.153	6.835	6.522	6.146	5.900	5.734	5.475	5.422	5.300	5.170	0.1370
DR12/S2	9.68	8.738	8.530	8.263	7.913	7.582	7.134	6.900	6.671	6.393	6.303	6.150	6.057	0.1457
DR13/S2	11.06	9.972	9.700	9.398	9.036	8.661	8.185	7.910	7.646	7.369	7.237	7.010	6.954	0.1543
DR14/S2	12.61	11.345	11.050	10.681	10.270	9.885	9.348	9.000	8.736	8.454	8.264	8.050	7.963	0.1620
DR15/S2	14.20	12.789	12.420	12.054	11.625	11.197	10.600	10.200	9.905	9.631	9.380	9.200	9.048	0.1697

ตารางที่ ค-19 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.80$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.211 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ความพรุน = 0.421

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
DR1/S1	0.970	0.959	0.951	0.904	0.863	0.824	0.776	0.737	0.717	0.713	0.710	0.709	0.697	0.010
DR2/S1	1.180	1.145	1.111	1.065	0.998	0.954	0.891	0.848	0.822	0.810	0.805	0.803	0.801	0.037
DR3/S1	1.574	1.487	1.432	1.394	1.268	1.204	1.119	1.053	1.014	0.998	0.992	0.990	0.988	0.054
DR4/S1	1.961	1.920	1.847	1.782	1.651	1.564	1.453	1.363	1.319	1.299	1.289	1.281	1.271	0.068
DR5/S1	2.596	2.478	2.368	2.335	2.108	1.986	1.871	1.753	1.679	1.632	1.628	1.620	1.616	0.080
DR6/S1	3.281	3.135	2.948	2.893	2.647	2.519	2.383	2.226	2.131	2.059	2.051	2.042	2.033	0.091
DR7/S1	4.107	3.850	3.638	3.515	3.245	3.112	2.930	2.763	2.646	2.582	2.558	2.558	2.553	0.102
DR8/S1	5.102	4.723	4.441	4.234	4.002	3.836	3.595	3.371	3.271	3.180	3.129	3.097	3.075	0.112
DR9/S1	6.055	5.573	5.277	5.008	4.718	4.533	4.289	4.057	3.960	3.833	3.830	3.770	3.698	0.121
DR10/S1	7.172	6.595	6.206	5.887	5.581	5.391	5.110	4.820	4.660	4.599	4.500	4.429	4.418	0.131
DR11/S1	8.350	7.676	7.234	6.829	6.534	6.302	5.984	5.649	5.480	5.290	5.260	5.205	5.171	0.140
DR12/S1	9.697	8.855	8.349	7.878	7.549	7.313	6.963	6.563	6.430	6.180	6.110	6.071	6.054	0.148
DR13/S1	11.097	10.119	9.514	8.970	8.614	8.388	7.954	7.537	7.531	7.310	7.217	6.942	6.948	0.157
DR14/S1	12.563	11.423	10.771	10.113	9.757	9.492	9.026	8.550	8.360	8.240	8.080	7.903	7.900	0.165
DR15/S1	14.153	12.893	12.155	11.403	11.030	10.706	10.213	9.820	9.500	9.350	9.233	9.030	8.900	0.173

ตารางที่ ค-20 ผลการทดลองการไหลในแนวนอนที่มีออกจากรอบน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 2.10$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.476 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

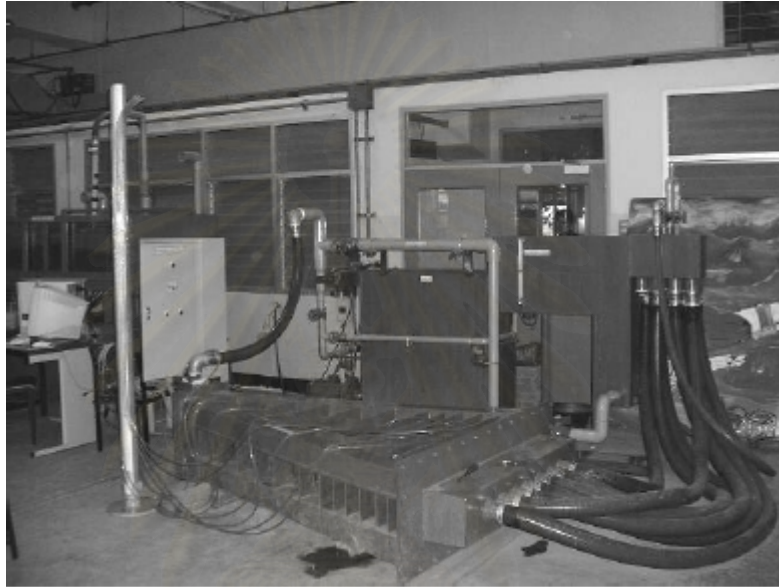
ความพรุน = 0.422

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
DR1/S1	0.950	0.920	0.904	0.860	0.799	0.750	0.680	0.670	0.630	0.610	0.590	0.550	0.530	0.0026
DR2/S1	1.180	1.090	1.080	1.070	0.983	0.868	0.817	0.800	0.720	0.700	0.680	0.670	0.650	0.0335
DR3/S1	1.550	1.438	1.451	1.380	1.274	1.147	1.066	1.060	0.950	0.885	0.810	0.760	0.750	0.0515
DR4/S1	1.960	1.875	1.867	1.818	1.647	1.529	1.412	1.390	1.380	1.170	1.140	1.130	1.120	0.0651
DR5/S1	2.590	2.429	2.396	2.289	2.125	1.960	1.839	1.810	1.770	1.588	1.550	1.510	1.470	0.0778
DR6/S1	3.130	3.065	2.990	2.854	2.657	2.514	2.395	2.330	2.268	2.052	2.214	2.040	2.020	0.0893
DR7/S1	3.828	3.784	3.691	3.470	3.247	3.126	2.940	2.800	2.690	2.599	2.550	2.520	2.515	0.1001
DR8/S1	4.650	4.591	4.461	4.195	3.990	3.811	3.595	3.420	3.320	3.260	3.180	3.110	3.101	0.1101
DR9/S1	5.612	5.511	5.352	4.990	4.767	4.570	4.341	4.230	4.116	3.907	3.889	3.763	3.777	0.1200
DR10/S1	6.659	6.529	6.334	5.912	5.644	5.447	5.175	4.970	4.800	4.700	4.650	4.506	4.523	0.1291
DR11/S1	7.778	7.598	7.372	6.839	6.596	6.362	6.066	5.880	5.743	5.554	5.440	5.282	5.290	0.1381
DR12/S1	9.057	8.854	8.534	7.936	7.643	7.442	7.090	6.870	6.696	6.481	6.350	6.179	6.193	0.1470
DR13/S1	10.385	10.071	9.739	9.034	8.750	8.521	8.135	7.850	7.694	7.504	7.420	7.127	7.170	0.1556
DR14/S1	11.838	11.488	11.062	10.257	9.960	9.692	9.252	8.960	8.759	8.510	8.340	8.149	8.185	0.1631
DR15/S1	13.245	12.827	12.412	11.507	11.184	10.931	10.437	10.070	9.879	9.707	9.510	9.210	9.249	0.1712

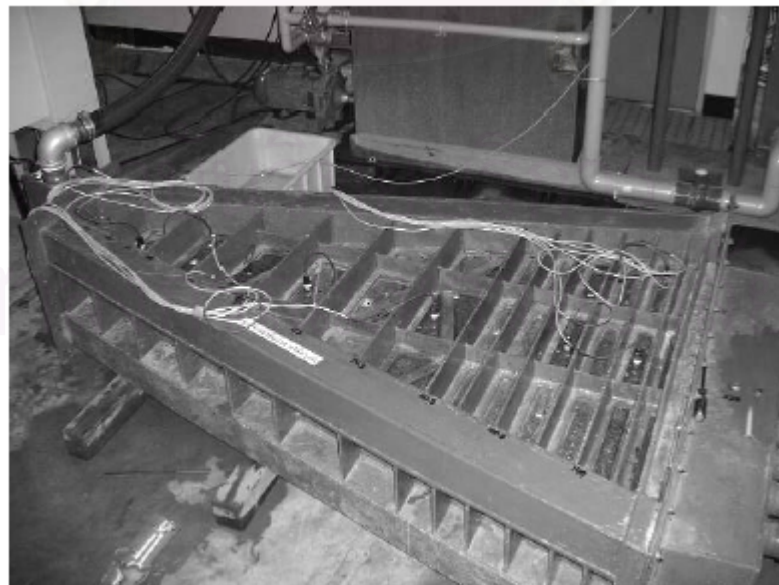
## ภาคผนวก ง

### ภาพการทดลองและอุปกรณ์

ภาคผนวก ง เป็นการรวบรวมภาพถ่ายของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงภาพถ่ายขณะดำเนินการทดลองในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ ง-1 ภาพรวมของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน



รูปที่ ง-2 แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี

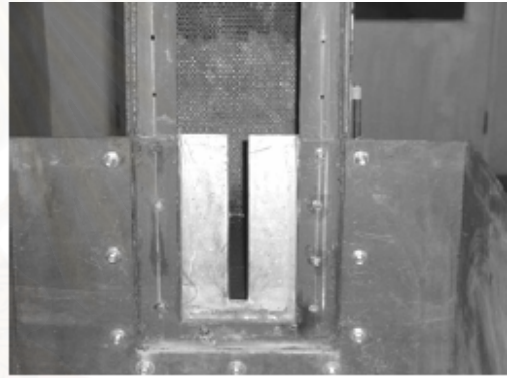




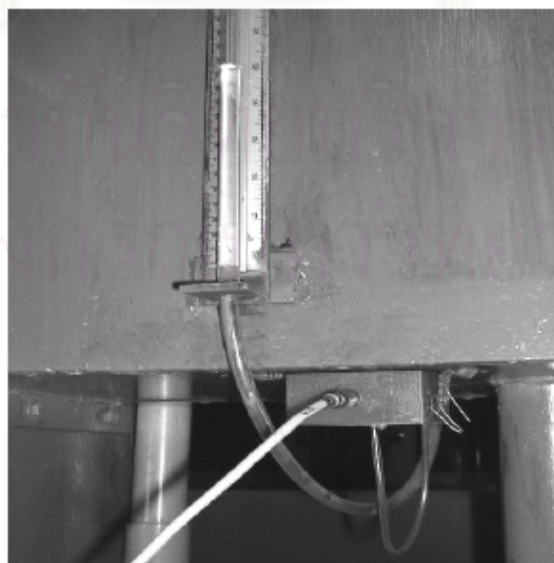
รูปที่ ง-3 ระบบหมุนเวียนน้ำ



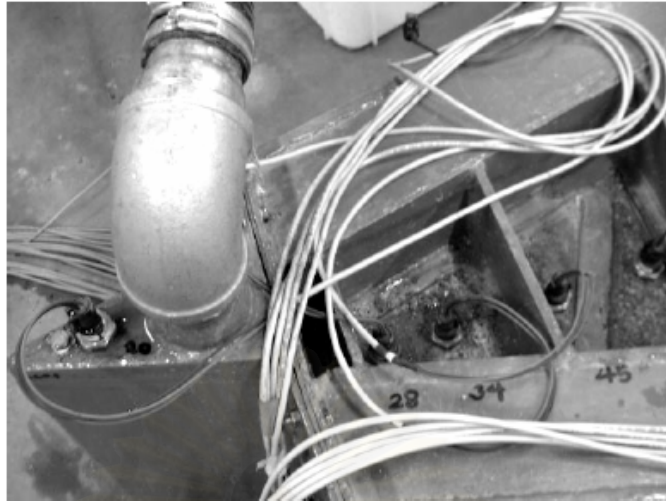
รูปที่ ง-4 บ่อน้ำบาดาลทดลอง



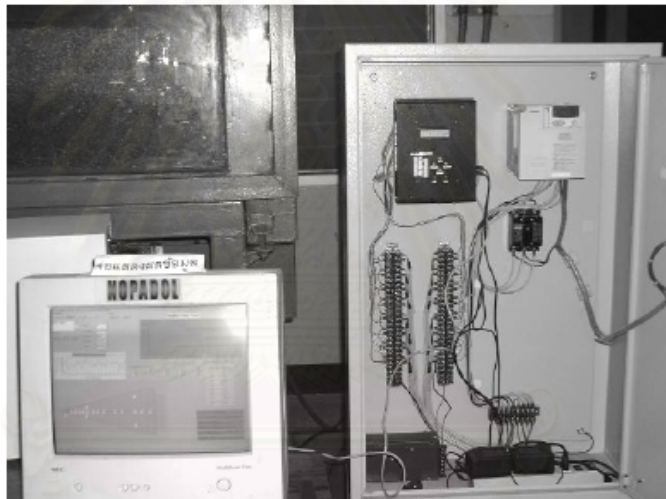
รูปที่ ง-5 ฝายวัดอัตราการไหล



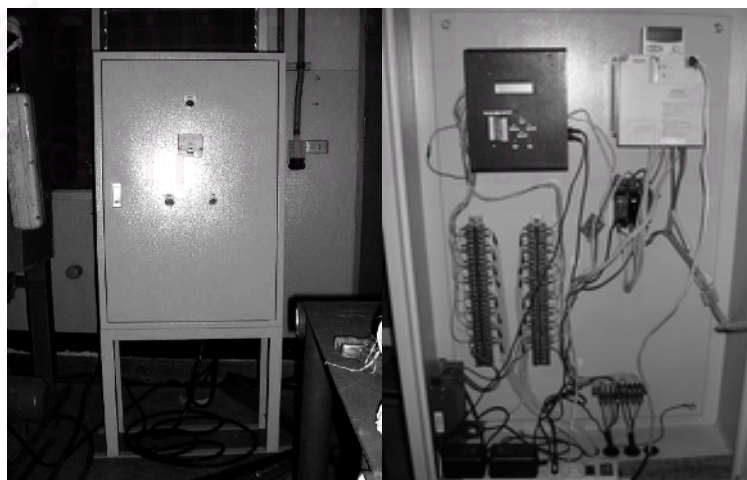
รูปที่ ง-6 หลอดวัดระดับน้ำและเซนเซอร์วัดความดันสำหรับวัดระดับน้ำเหนือสันฝาย



รูปที่ ง-7 การติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันที่บ่อน้ำบาดาลและชั้นน้ำ



รูปที่ ง-8 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับ Data logger



รูปที่ ง-9 ภายนอกและภายในตู้ควบคุม



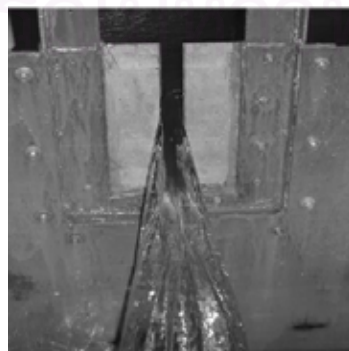
รูปที่ ง-10 ตัวปรับความเร็วมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ



รูปที่ ง-11 เครื่อง Data Logger



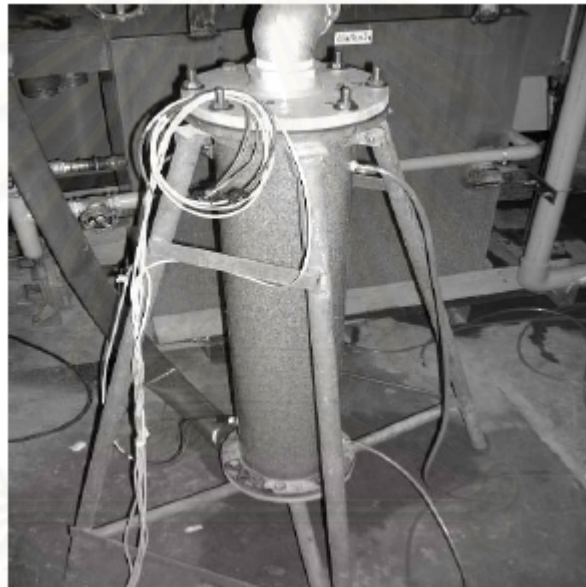
รูปที่ ง-12 ภาพถ่ายขณะทำการทดลองการไหลในแนวนอน



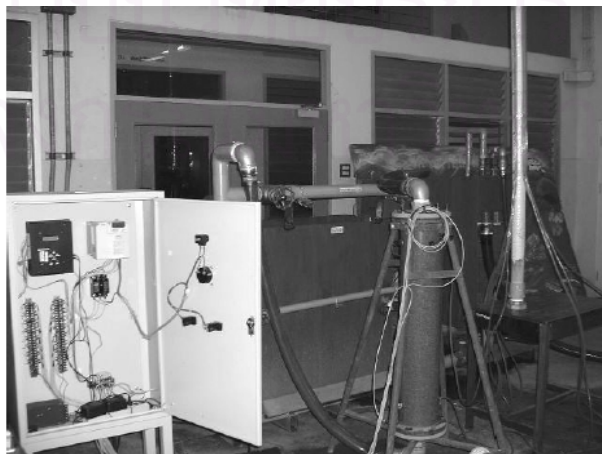
รูปที่ ง-13 การไหลของน้ำผ่านสันฝาย



รูปที่ ง-14 การยกแบบจำลองขึ้นเพื่อใส่ทราย



รูปที่ ง-15 เพอร์เมียมิตเตอร์ทรงกระบอก



รูปที่ ง-16 ภาพขณะทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

ภาคผนวก จ

คู่มือการใช้เครื่องมือ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คู่มือการใช้งาน  
เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน  
(สภาพการไหลแบบคงที่/ไม่คงที่)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์  
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤศจิกายน 2547

## สารบัญ

หน้า

1. บทนำ.....	.....
2. รายละเอียดของอุปกรณ์การใช้	
2.1 แบบจำลองบ่อบาดาล-ชั้นน้ำ.....	.....
2.2 เครื่องสูบน้ำ.....	.....
2.3 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ.....	.....
2.4 อุปกรณ์วัดความดันน้ำ.....	.....
2.5 Data Logger.....	.....
2.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	.....
2.7 ชุดแยกสัญญาณ.....	.....
2.8 สายส่งสัญญาณ.....	.....
3. ขอบเขตการใช้งานของชุดเครื่องมือ.....	.....
4. วิธีการทดลองการไหลในแนวรัศมี.....	.....
4.1 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่.....	.....
4.2 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่.....	.....
4.3 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น.....	.....
4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น.....	.....
4.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง.....	.....
4.6 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่ลดลง.....	.....
4.7 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์.....	.....
4.8 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหลที่เป็นฟังก์ชันของไซน์.....	.....
5. ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	
สมการของ Thiem.....	.....
6. การควบคุมการทดลอง แสดงผลการทดลอง การเก็บและเรียกใช้ข้อมูลจากการทดลอง	
6.1 การใช้งานเครื่อง Data Logger.....	.....
6.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการทดลอง.....	.....

7. การบันทึกผลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ

7.1 การบันทึกผลการทดลอง.....

7.2 ตัวอย่างการคำนวณ.....

8. ข้อควรระวังในการใช้ชุดเครื่องมือและการบำรุงรักษา

8.1 ข้อควรระวังในการใช้.....

8.2 การบำรุงรักษา.....



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 1

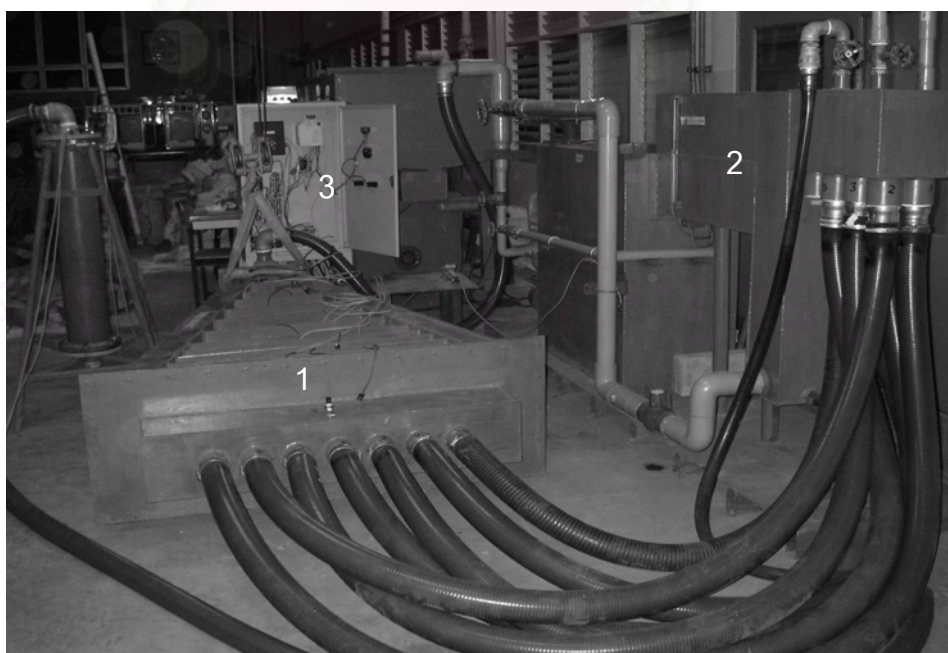
### บทนำ

เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน เป็นชุดเครื่องมือสำหรับทดลองการเติมน้ำและสูบน้ำใต้ดินผ่านทางบ่อบาดาล ในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (Confined Aquifer) ภาพรวมของชุดเครื่องมือแสดงในรูปที่ 1 เครื่องมือแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1) แบบจำลองชั้นน้ำ-บ่อบาดาล เป็นการจำลองลักษณะของบ่อบาดาลและชั้นน้ำโดยใช้ทรายขนาดต่างๆ แทนวัสดุชั้นน้ำ ซึ่งชั้นน้ำที่จำลองขึ้นเป็นชั้นน้ำภายใต้แรงดัน

2) ระบบหมุนเวียนน้ำและฝายวัดอัตราการไหล การหมุนเวียนน้ำในการทดลองอาศัยแรงขับจากเครื่องสูบน้ำ สามารถควบคุมปริมาณน้ำและทิศทางการไหลของน้ำได้ โดยที่อัตราการไหลในการทดลองจะวัดโดยฝายวัดอัตราการไหล (Weir)

3) ระบบควบคุม วัด จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นระบบควบคุม ซึ่งเป็นระบบที่รับข้อมูลมาจากโปรแกรมควบคุมการทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลที่เวลาต่างๆ ได้ตามต้องการ ส่วนที่สองคือ ระบบวัด เก็บ และแสดงผลข้อมูล เป็นระบบเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าแรงดันน้ำในจุดที่สนใจ ได้แก่ ที่บ่อบาดาล จุดต่างๆ ในชั้นน้ำ โดยใช้ Pressure Sensor วัดค่าความดันในชั้นน้ำและหน้าฝายวัดอัตราการไหล จากนั้นส่งค่าที่วัดได้เข้าสู่ Data Logger ซึ่งเชื่อมต่อกับโปรแกรมควบคุมการทดลอง เพื่อเก็บและแสดงผลข้อมูลอัตราการไหลและระดับความดัน ก่อนนำไปใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 1-1 ภาพรวมของชุดเครื่องมือ

## บทที่ 2

### รายละเอียดของอุปกรณ์

รายละเอียดของอุปกรณ์และส่วนประกอบของชุดเครื่องมือ มีดังนี้

#### 2.1 แบบจำลองบ่อนบาดาล-ชั้นน้ำ

เป็นการจำลองการไหลในแนวรัศมี มีลักษณะของชั้นน้ำเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม ที่มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 2 เมตร ความหนา 0.2 เมตร มีโครงเป็นเหล็กด้านหลังและด้านล่างของแบบจำลองเป็นแผ่นเหล็ก แต่ด้านหน้าและด้านบนของแบบจำลองทำด้วยพลาสติกใสเพื่อใช้สังเกตการไหลของน้ำใต้ดิน

เพื่อให้บ่อนบาดาลทดลองมีความสอดคล้องกับชั้นน้ำจำลอง จึงทำบ่อนบาดาลทดลองเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม ที่มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 0.2 เมตร ความสูง 0.4 เมตร โดยทำจากแผ่นเหล็กเจาะช่องและติดตะแกรงบริเวณที่ติดกับชั้นน้ำ ซึ่งเป็นการจำลองสภาพบ่อนบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความลึกชั้นน้ำ (Fully Penetrated Well) ลักษณะของแบบจำลองบ่อนบาดาลชั้นน้ำแสดงในรูปที่ 2-1

#### 2.2 เครื่องสูบน้ำ

เป็นเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump) ยี่ห้อ "Pentax" รุ่น CB400 ที่สามารถให้เฮดด้านส่งสูงสุดเท่ากับ 50 เมตรของน้ำ และอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 150 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วรอบ 2,850 รอบต่อวินาที ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 กิโลวัตต์ (4 แรงม้า) ใช้ไฟ 380 โวลต์ 3 เฟส 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 2-2

#### 2.3 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์

เป็นตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter) ยี่ห้อ "Mitsubishi" รุ่น FR-E540-3.7K ชนิด 3 เฟส ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 2-3

#### 2.4 อุปกรณ์วัดความดันน้ำ

เป็นเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor) ชนิด Piezoelectric ยี่ห้อ "Honeywell" รายละเอียดดังนี้

- 1) เซนเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF ใช้วัดแรงดันน้ำในช่วง 0 ถึง 25 psi (0-17.25 mH<sub>2</sub>O) สำหรับวัดแรงดันน้ำที่จุดต่างๆ ในแบบจำลอง ได้แก่ ในชั้นน้ำ 12 ตัว และที่บ่อนบาดาล 1 ตัว ลักษณะของเซนเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF แสดงในรูปที่ 2-4

2) เซนเซอร์รุ่น 4040PC100GD ใช้วัดแรงดันน้ำในช่วง 0 ถึง 100 psi (0-69 mH<sub>2</sub>O) สำหรับวัดแรงดันน้ำที่จุดต่างๆ ในแบบจำลอง ได้แก่ ในชั้นน้ำ 12 ตัว และที่บ่อบาดาล 1 ตัว ลักษณะของเซนเซอร์รุ่น 4040PC100GD แสดงในรูปที่ 2-5

3) เซนเซอร์รุ่น 40PC001B ใช้แรงดันน้ำในช่วง +/-50 mmHg (+/-0.67 mH<sub>2</sub>O) สำหรับวัดระดับน้ำหน้าฝายเพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการไหล ลักษณะของเซนเซอร์รุ่น 40PC001B แสดงในรูปที่ 2-6

## 2.5 Data Logger

วัดความดันได้ 16 ช่องสัญญาณ มีความจุหน่วยความจำ 6,721 ชุด (39 ไบต์/ชุด) ความแม่นยำในการวัด (Accuracy) 0.1% การส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์มีทั้งแบบ Real Time และแบบ All Memory Load ขึ้นอยู่กับการใช้งานโปรแกรมควบคุมการทดลอง ลักษณะของ Data Logger แสดงในรูปที่ 2-7

## 2.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

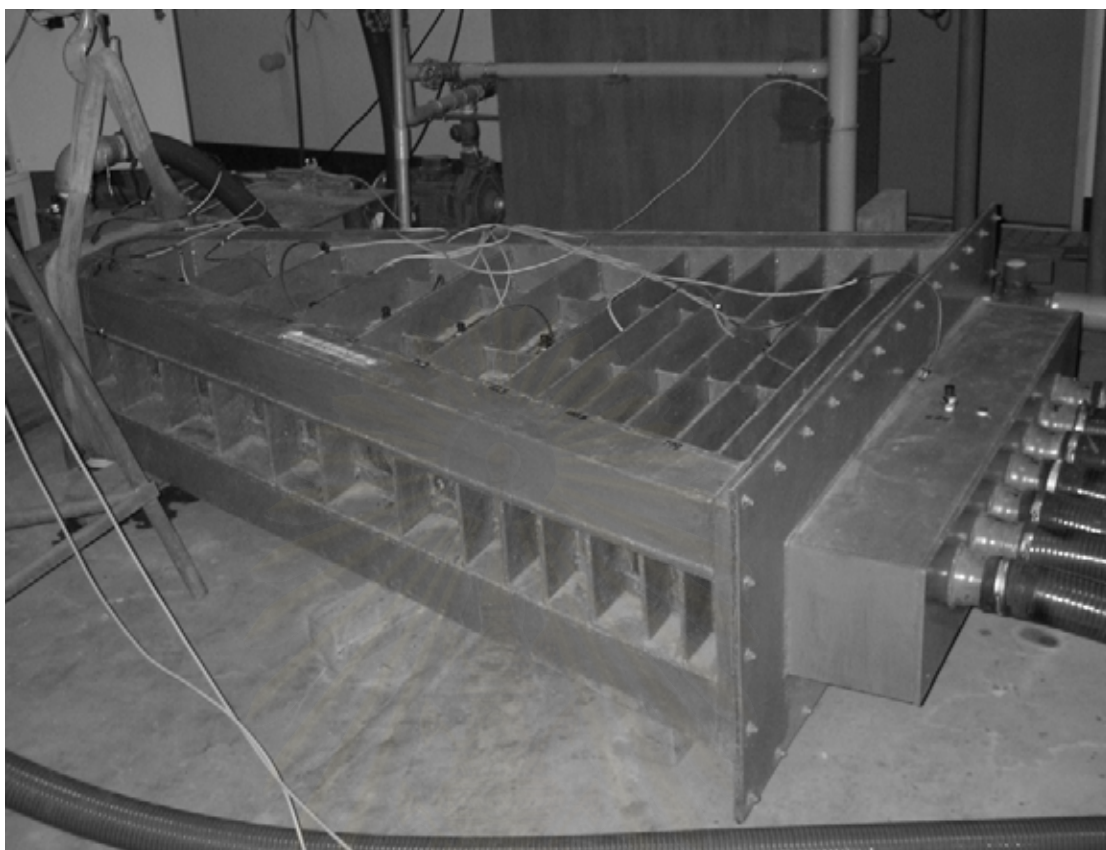
ใช้ฝายวัดอัตราการไหล ที่เป็นฝายสันคม ทำจากแผ่นสแตนเลส มีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สูง 20 เซนติเมตร ความกว้างสันฝาย 2.12 เซนติเมตร วัดอัตราการไหลได้สูงสุด 3.6 ลิตรต่อวินาที ฝายวัดอัตราการไหลติดตั้งในรางวัดอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2-8

## 2.7 ชุดแยกสัญญาณ

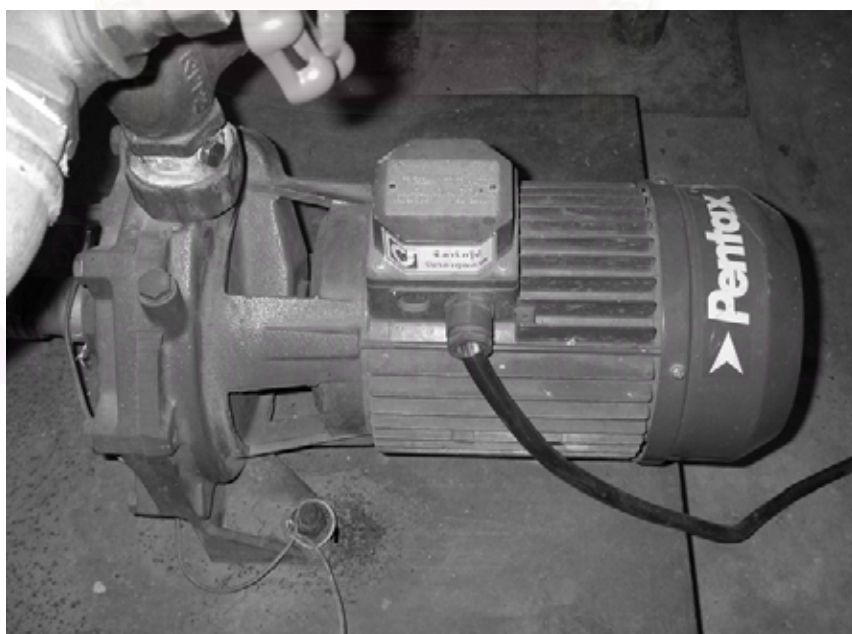
ชุดแยกสัญญาณ (Isolate) ใช้เพื่อตัดสัญญาณรบกวน (Noise) ระหว่างระบบควบคุมกับระบบวัด เก็บ และแสดงข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยชุดแยกสัญญาณนี้มีสายต่อเชื่อมด้านหนึ่งกับพอร์ตอนุกรม (RS-232) ของเครื่องคอมพิวเตอร์และอีกด้านหนึ่งต่อกับสายส่งสัญญาณ ลักษณะของชุดแยกสัญญาณแสดงในรูปที่ 2-9

## 2.8 สายส่งสัญญาณ

สายส่งสัญญาณ ใช้สำหรับส่งข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ต้องการ ณ เวลาต่างๆ พร้อมทั้งรับสัญญาณจากตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำกลับมายังคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความเร็วรอบว่าสอดคล้องกับข้อมูลที่ส่งไปให้หรือไม่ โดยปลายสายส่งสัญญาณด้านที่เป็นพอร์ตอนุกรม (RS-232) ต่อเชื่อมกับชุดแยกสัญญาณ และปลายด้านที่เป็นพอร์ตระบบเครือข่าย (RJ-45) ต่อเชื่อมกับตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ ลักษณะสายส่งสัญญาณแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-1 รูปถ่ายแบบจำลองบ่อบาดาล-ชั้นน้ำ



รูปที่ 2-2 เครื่องสูบน้ำและมอเตอร์



รูปที่ 2-3 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ



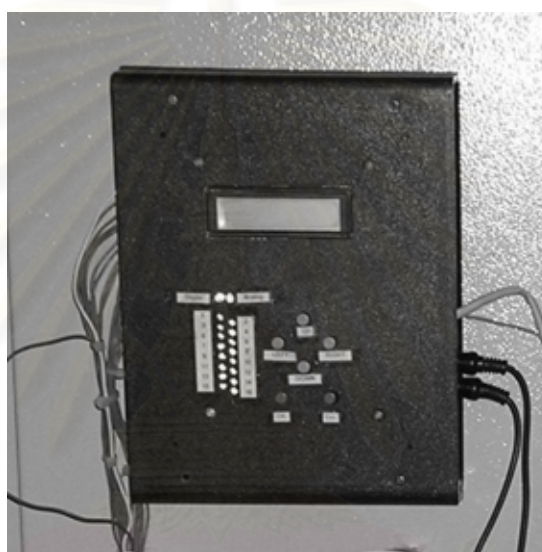
รูปที่ 2-4 เซ็นเซอร์รุ่น ST025PG2SPCF



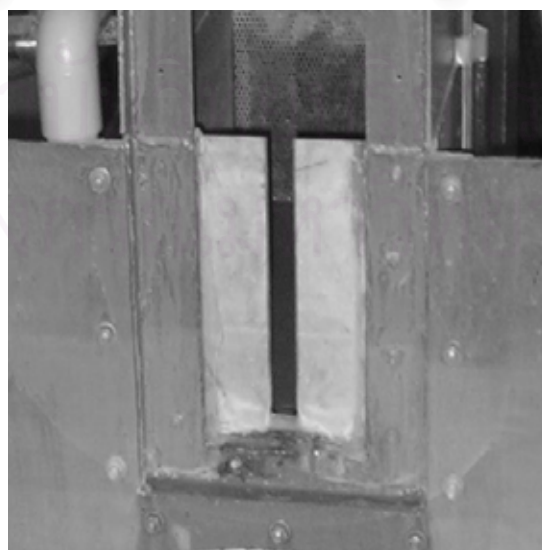
รูปที่ 2-5 เซ็นเซอร์รุ่น 4040PC100GD



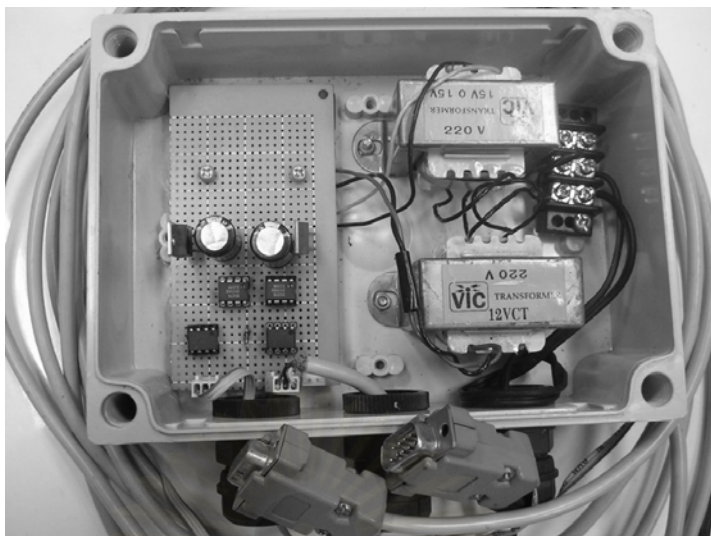
รูปที่ 2-6 เซ็นเซอร์รุ่น 40PC001B



รูปที่ 2-7 ภาพแสดง Data logger



รูปที่ 2-8 ฝ่ายวัดอัตราการไหล



รูปที่ 2-9 ชุดแยกสัญญาณ



รูปที่ 2-10 สายส่งสัญญาณ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### ขอบเขตการใช้งานของชุดเครื่องมือ

ในการศึกษาเรื่องการไหลของน้ำใต้ดินเมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน จะมีตัวแปรหลักที่ต้องพิจารณา 2 ตัวแปร ได้แก่

- 1) ระดับความดันหรือเฮด (Pressure Head) หมายถึง ระดับความดันของน้ำในชั้นน้ำ (Piezometric Head) และความดันของน้ำในบ่อบาดาล
- 2) อัตราการไหล (Discharge) หมายถึง อัตราที่น้ำใต้ดินเคลื่อนที่ในชั้นน้ำ ซึ่งจะเท่ากับอัตราการสูบน้ำหรือเติมน้ำผ่านบ่อบาดาล อัตราการไหลจะมีความสัมพันธ์กับค่า Reynolds Number ( $R_e$ )

โดยที่เครื่องจำลองการสูบน้ำและการเติมน้ำใต้ดิน สามารถทำการทดลองได้ในช่วงระดับความดัน (H) ตั้งแต่ 0 ถึง 20 เมตรของน้ำ (ที่ตำแหน่งบ่อบาดาล) อัตราการไหลตั้งแต่ 0 ถึง 3.6 ลิตรต่อวินาที และ Reynolds Number ( $R_e$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 170

ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นว่า การไหลของน้ำใต้ดินมีตัวแปรที่ต้องพิจารณา 2 ตัวแปร ได้แก่ระดับความดันหรือเฮดและอัตราการไหล ซึ่งชุดเครื่องมือสามารถวัดค่าตัวแปรทั้งสองได้จึงสามารถนำชุดเครื่องมือไปดัดแปลงเพื่อศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินในรูปแบบอื่น เช่น การศึกษาการกระจายความดันของน้ำเมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านฐานรากอาคาร ซึ่งช่วยในการออกแบบฐานรากให้มีความถูกต้องกับสภาพใช้งานจริงมากขึ้น แต่ในที่นี้จะเน้นไปที่การศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อบาดาล เมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำใต้ดินตามลำดับ



## บทที่ 4

### วิธีการทดลองการไหลในแนวรัศมี

การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน มีแผนผังการทำงาน (Schematic Diagram) ดังรูปที่ 4-1 โดยมีขั้นตอนการทดลองหลักดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่

##### 1) การเตรียมการก่อนการทดลอง

- เตรียมวัสดุชั้นน้ำที่จะใช้ในการทดลอง โดยทำการตากให้แห้ง
- ถอดบ่อน้ำบาดาลทดลองออกจากแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ใช้เครนยกด้านหัวของแบบจำลองขึ้นเพื่อให้แบบจำลองเอียง จากนั้นจึงใส่น้ำลงไปบางส่วน แล้วใส่ทรายชั้นน้ำลงไปจนเต็ม เมื่อทรายเต็มและแน่นดีแล้วก็ทำการประกอบบ่อน้ำบาดาลเข้ากับแบบจำลอง บันทึกค่าน้ำหนักทรายที่ใส่ลงไปแบบจำลอง
- ต่อท่ออ่อนเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำ โดยท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากบ่อน้ำบาดาลต่อเข้าทางข้อต่อ A และท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวน 7 เส้น จากด้านท้ายแบบจำลองต่อเข้าทางข้อต่อ B เบ็ดวาล์ว GV1 GV2 และ GV6 ปิดวาล์ว GV3 GV4 GV5 และ BV1 (ดูรูปที่ 4-1) เติมน้ำในถังเก็บน้ำให้เต็มก่อนเริ่มเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ น้ำไหลเข้าแบบจำลองทางบ่อน้ำบาดาล ขณะที่น้ำส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass จากนั้นค่อยๆ รัววาล์ว GV1 จนปิดสนิท ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดแรงดันหรืออัตราการไหลที่มากกว่าที่ใช้ในการทดลองซึ่งจะทำให้ทรายแน่นขึ้นโดยจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที จากนั้นถอดบ่อน้ำบาดาลทดลองออกเพื่อตรวจสอบว่าทรายที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองมีการยุบตัวหรือไม่ ถ้ามีการยุบตัวจะต้องใส่ทรายเพิ่ม แล้วทำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้จนไม่มีการยุบตัวของทราย บันทึกค่าน้ำหนักทรายแห้งทั้งหมดที่ใส่ในแบบจำลองเพื่อนำไปจำลองหาค่าความพรุน
- ติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันในจุดต่างๆ ที่จะทำการวัดความดัน และตรวจดูการเชื่อมต่อของสายสัญญาณจากเซนเซอร์วัดความดันมายังเครื่อง Data Logger
- และตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างชุดแยกสัญญาณ (Isolated RS232 Interface) และสายส่งข้อมูล (RS232 to RJ45 Adapter) ไปยังตัวปรับความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำ (Inverter) และสายรับข้อมูล (RS232 Interface) จากเครื่อง Data Logger มายังเครื่องคอมพิวเตอร์

## 2) ขั้นตอนการทดลอง

- ในการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล น้ำจากระบบหมุนเวียนน้ำต้องไหลเข้าแบบจำลองทางด้านท้าย แล้วจึงไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลลงสู่รางวัดอัตราการไหลและถังเก็บน้ำ จึงต้องทำการเปิดวาล์ว GV1 GV3 GV4 GV5 และ BV1 และปิดวาล์ว GV2 และ GV6 (ดูรูปที่ 4-1)
- เปิดโปรแกรมควบคุมการทดลอง เลือกคำสั่งเพื่อเดินเครื่องสูบน้ำ น้ำส่วนหนึ่งจะไหลเข้าแบบจำลองทางด้านท้ายขณะที่น้ำอีกส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ By Pass จากนั้นจึงค่อยๆ ห้วาล์ว GV1 จนปิดสนิท รอจนระดับน้ำเหนือสันฝายที่ไหลอดวัดระดับน้ำไม่เปลี่ยนแปลง หรือสังเกตได้จากค่าที่วัดได้จากหน้าจอแสดงผลมีค่าคงที่ จึงทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) และชั้นน้ำ ( $h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$ ) ในช่วงที่ทำการทดลองให้บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลองด้วยเพื่อนำไปหาค่าความหนืดเปรียบเทียบของน้ำที่ใช้ในการทดลอง
- ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดการไหลอีกค่าหนึ่ง รอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงบันทึกค่า  $h_{weir}, h_w, h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$  ทำตามขั้นตอนนี้จนครบอัตราการไหลที่ต้องการ

## 4.2 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลคงที่

การทดลองส่วนนี้จะทำต่อจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกัน แตกต่างกันเฉพาะทิศทางการไหลของน้ำ การทดลองนี้น้ำจะไหลเข้าสู่แบบจำลองทางด้านบ่อน้ำบาดาล และไหลออกจากบ่อทางด้านท้าย ดังนั้นขั้นตอนที่ 1 ของการทดลอง จะต้องทำการเปิดวาล์ว GV1 GV2 และ GV6 และปิดวาล์ว GV3 GV4 GV5 และ BV1 (รูปที่ 4-1) เพื่อให้ น้ำไหลในทิศทางที่ต้องการ ในการทดลองจะใช้ค่าอัตราการไหล 15 ค่า เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

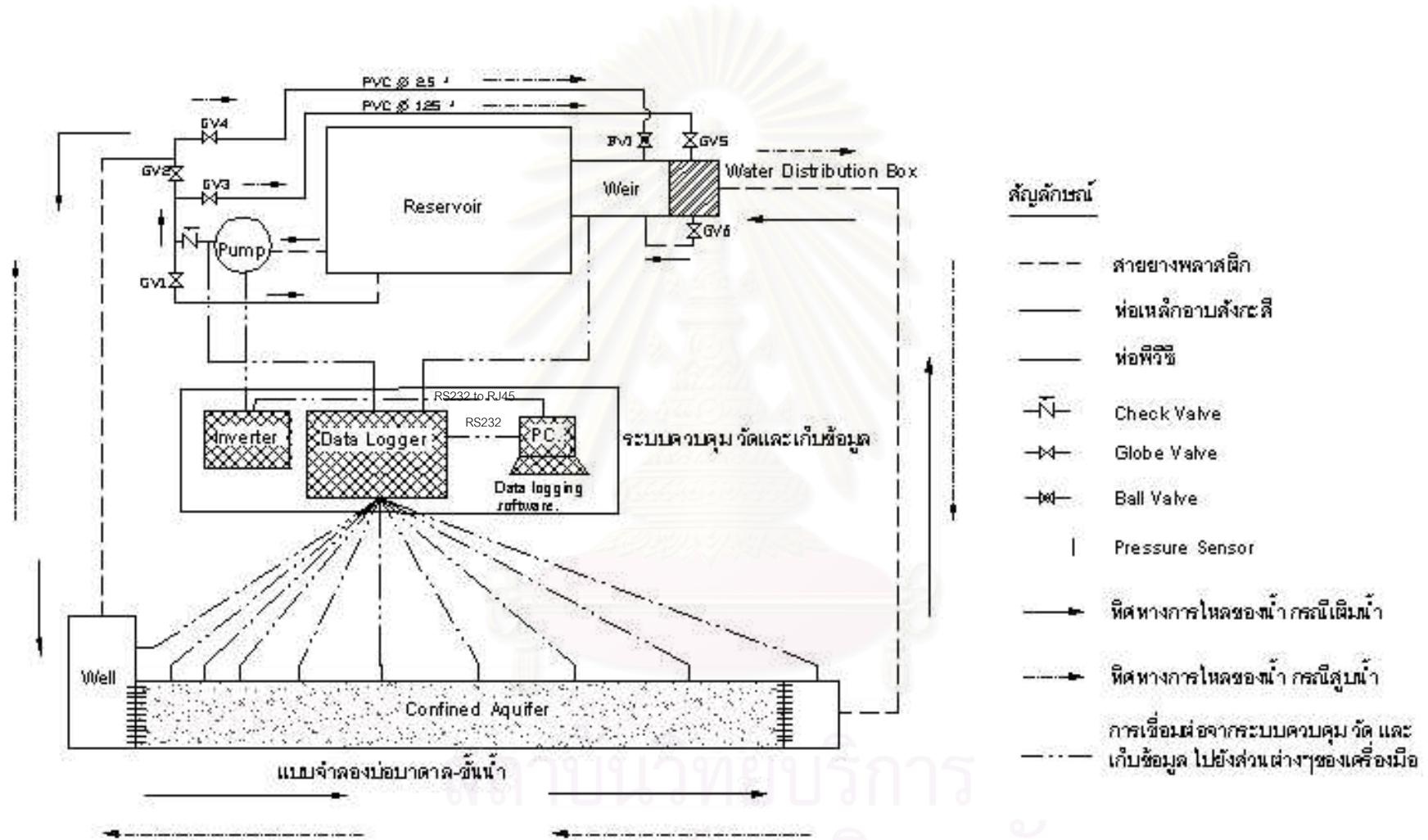
## 4.3 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 แตกต่างกันเฉพาะการกำหนดให้อัตราการไหลมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามโปรแกรมควบคุมการทดลอง ทำให้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของการไหลต่อเวลา ทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลต่อเวลาทั้งหมด 7 ค่า เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น

## 4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่





รูปที่ 4-1 แผนผังการทำงานของการทดลองการเติมและสูบน้ำใต้ดิน

## บทที่ 5

### ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

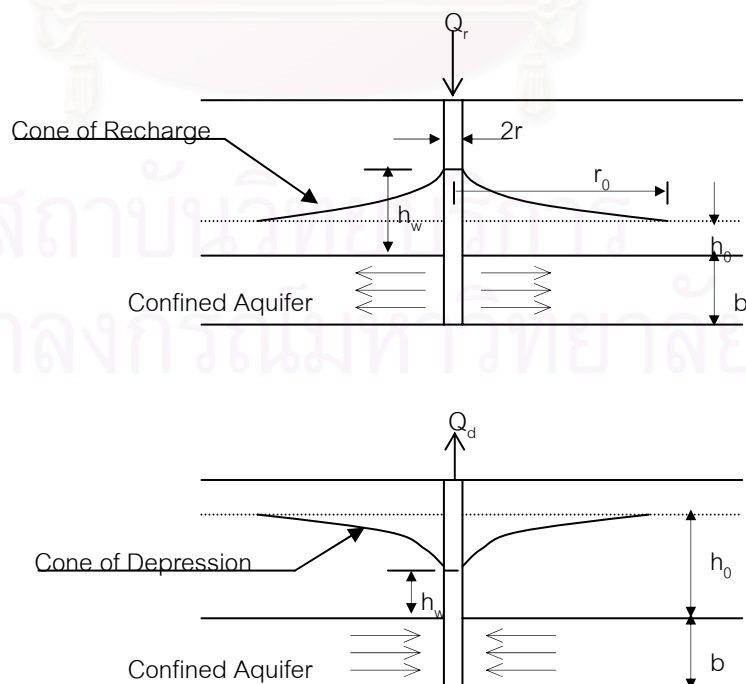
#### สมการของ Thiem

เมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล โดยที่การไหลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับกฎของดาร์ซี หรือสมการการไหลของดาร์ซี จะเกิดกรวยความดันลด (Cone of Depression) และกรวยความดันเพิ่ม (Cone of Recharge) ที่มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อถึงสภาวะคงตัว (Steady State) ดังแสดงในรูปที่ 5-1 และใช้ Thiem's Equation ในการอธิบายดังนี้

$$\text{การสูบน้ำ} \quad Q_d = \frac{2\pi K b (h_0 - h_w)}{\ln(r_0/r_w)}$$

$$\text{การเติมน้ำ} \quad Q_r = \frac{2\pi K b (h_w - h_0)}{\ln(r_0/r_w)}$$

เมื่อ	$Q_d$	คือ	อัตราการสูบน้ำ ( $m^3/s$ )
	$Q_r$	คือ	อัตราการเติมน้ำ ( $m^3/s$ )
	$K$	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ ( $m/s$ )
	$r_0$	คือ	รัศมีที่ได้รับอิทธิพล (m)
	$r_w$	คือ	รัศมีของบ่อน้ำบาดาล (m)
	$h_0$	คือ	ระดับความดันน้ำเดิม (m)
	$h_w$	คือ	ระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาล (m)
	$b$	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (m)



รูปที่ 5-1 กรวยความดันเพิ่ม (Cone of Recharge) และกรวยความดันลด (Cone of Depression)

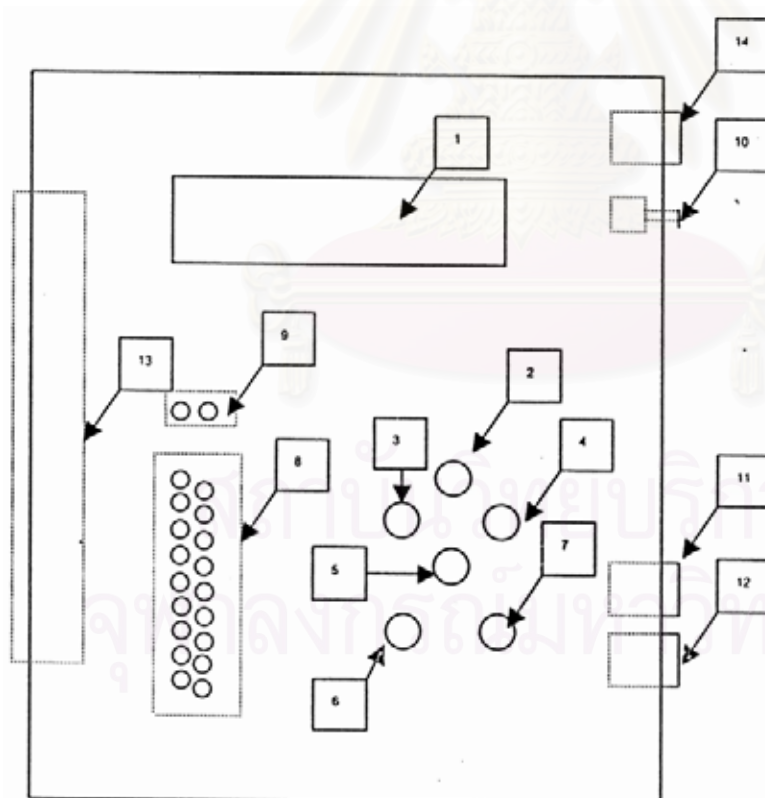
## บทที่ 6

### การควบคุม แสดงผล จัดเก็บ และเรียกใช้ข้อมูลจากการทดลอง

การควบคุม แสดงผล จัดเก็บและเรียกใช้ข้อมูลจากการทดลอง ได้แก่ อัตราการไหลและค่าความดันจากการทดลอง ต้องใช้การทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรมควบคุมการ เครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ และเครื่อง Data Logger แม้ว่าเครื่อง Data Logger ที่มีอยู่นั้นสามารถแสดงและเก็บผลการทดลองได้ แต่การนำผลการทดลองไปใช้ภายหลังต้องใช้โปรแกรมควบคุมการทดลองในการดึงข้อมูล ขณะที่โปรแกรมควบคุมการทดลองไม่สามารถดึงข้อมูลออกได้หากเครื่อง Data Logger ไม่เปิดอยู่ใน Mode 3 (การเก็บข้อมูล) การใช้งานเครื่อง Data Logger และโปรแกรมควบคุมการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

#### 6.1 การใช้งานเครื่อง Data Logger

##### 1. ลักษณะภายนอกของเครื่อง Data Logger แสดงในรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 ลักษณะภายนอกของเครื่อง Data Logger

NO.1	จอ LCD
NO.2	UP Switch
NO.3	LEFT Switch
NO.4	RIGHT Switch
NO.5	DOWN Switch
NO.6	OK. Switch
NO.7	Esc. Switch
NO.8	ไฟแสดงสถานะของ Pressure sensor โดย CH1 อยู่บนสุดด้านซ้าย CH2 อยู่ด้านล่างด้านขวา และเรียงในลักษณะสลับฟันปลาจนถึง CH16
NO.9	ไฟแสดงไฟเลี้ยงของวงจร โดยด้านขวาแสดงสถานะไฟเลี้ยงส่วน Analog และด้านซ้ายแสดงไฟเลี้ยงส่วน Digital
NO.10	RESET Switch
NO.11	Adaptor Jack ของส่วน Analog
NO.12	Adaptor Jack ของส่วน Digital ( ทั้ง NO.11 และ NO.12 ใช้ Adapter ชนิดไฟเลี้ยง 12 V ชั่วโนเป็นบวก)
NO.13	Socket สำหรับรับสัญญาณจาก Pressure sensor
NO.14	ขั้วต่อ ISOLATER

## 2. การใช้งานในรูปแบบต่างๆ

## 2.1 การดูค่าข้อมูลแบบปกติ (MODE 1)

- 1) หลังจากการจ่ายไฟ ถ้าเครื่องทำงานปกติจะปรากฏข้อความบนจอ LCD ดังรูป
 

Welcome to Data Logger	
---------------------------	--
- 2) หลังจากรอประมาณ 3 วินาที หน้าจอเปลี่ยนไปแสดงในหน้าเมนูหลัก (Main Menu) โดยในเมนูหลักจะแสดง วัน เดือน ปี และเวลาในปัจจุบัน ในบรรทัดล่างสุดจะให้เลือกรูปแบบการทำงาน (Mode) ซึ่งมี 3 รูปแบบและให้ผู้ใช้เลือกโดยกดปุ่มขึ้นหรือลงเพื่อเลือกและกดปุ่ม OK เพื่อยืนยัน
 

03 Sep 04	11:01:11
Mode (1-3)	1 ?
- 3) เมื่อผู้ใช้ต้องการดูข้อมูลแบบปกติ (Mode 1) ให้กดปุ่มขึ้นหรือลงจนได้ Mode 1 จากนั้นกด OK
 

03 Sep 04	11:02:15
Mode (1-3)	1 OK
- 4) หลังจากกด OK แล้ว ข้อความในจอ LCD จะเปลี่ยนเป็นข้อความแสดงการทำงานในรูปแบบการดูข้อมูลแบบปกติ (VIEW DATA)
 

Mode 1 View Data	
---------------------	--
- 5) หลังจากนั้นประมาณ 3 วินาที หน้าจอแสดงข้อมูลปกติที่ประกอบด้วยเวลาในปัจจุบัน ช่องสัญญาณที่แสดงค่าความดันและค่าความดันในหน่วยเมตรของน้ำ ดังเช่น ในรูปเป็นข้อมูลของวันที่ 3 Sep 2004 เวลา 11:03:23 น. ที่ช่องสัญญาณ 1 มีความดัน 12.13 เมตรของน้ำ
 

03 Sep 04	11:03:23
Ch1	P = 12.13 mH
- 6) ผู้ใช้สามารถกดปุ่ม UP เพื่อเปลี่ยนช่องสัญญาณลำดับที่เพิ่มขึ้นและกด DOWN เพื่อเปลี่ยนช่องสัญญาณในลำดับที่ต่ำลง
 

03 Sep 04	11:04:53
Ch2	P = 15.00 mH
- 7) เมื่อต้องการกลับเข้าสู่เมนูหลัก (Main Menu) ในข้อ 2 สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม Esc

## 2.2 การเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำ (MODE 2)

- 1) การเข้าสู่การทำงานในการเก็บข้อมูลสามารถทำได้โดยกดปุ่ม UP หรือ DOWN เพื่อให้เป็นการทำงานในรูปแบบการเก็บข้อมูล (MODE2)จากนั้นกด OK
 

03 Sep 04	11:22:15
Mode (1-3)	2 OK
- 2) นอกจากขั้นตอนในข้อที่ 1 แล้ว ผู้ใช้อาจเข้าถึงการทำงานในการเก็บข้อมูลได้ด้วยการกด OK แทนการกด ESC
- 3) หลังจากขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะมีข้อความแสดงการทำงานในรูปแบบการเก็บข้อมูล (SAVE DATA) บนหน้าจอ
 

Mode 2
Save Data
- 4) เป็นการเก็บค่าความเร็วของมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำในหน่วย Hz ผู้ใช้สามารถกดปุ่มขึ้นหรือลงเพื่อเพิ่มหรือลดตัวเลขและกดปุ่ม LEFT หรือ RIGHT ในการเลือกหลักที่จะทำการเปลี่ยนค่า โดยสามารถออกจาก Mode นี้โดยการกด Esc
 

Motor Speed
Speed = 20.00 HZ
- 5) เมื่อตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำเสร็จให้กด OK จะเข้าสู่การตั้งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล โดยแบ่งเป็นจำนวนช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล และหน่วยของเวลาได้ โดยกดปุ่ม UP หรือ DOWN และเลือกที่จะเปลี่ยนขนาดช่วงเวลาในการเก็บหรือหน่วยเวลาในการเก็บด้วยปุ่ม LEFT และ RIGHT
 

Sampling Rate
# 01 # sec
- 6) เมื่อได้ขนาดของช่วงเวลาและหน่วยของช่วงเวลาเรียบร้อยแล้วจึงกด OK เพื่อตั้งจุดเริ่มต้นในการเก็บข้อมูลหรืออาจกด Esc เพื่อไปยังข้อ 4 อีกครั้งหากเกิดการตั้งค่าความเร็วมอเตอร์ผิดพลาด
 

Start Address
# New # Continued
- 7) ผู้ใช้สามารถกดปุ่ม Esc หากไม่แน่ใจในการตั้งค่าเพื่อไปตั้งค่าต่างๆใหม่ แต่ถ้ามั่นใจแล้วให้กดปุ่ม OK ซึ่งเป็นการเริ่มต้นการเก็บข้อมูลโดยในตอนเริ่มแรก หน้าจอแสดงที่อยู่เริ่มต้นในการเก็บและอัตราการเก็บข้อมูล
 

Start at 00000H
Sampling = 01 S



8) ในขณะที่ทำการเก็บข้อมูล ข้อมูลที่แสดงอยู่บนหน้าจอ คือ อัตราในการเก็บข้อมูล (SR), ที่อยู่เก็บข้อมูล (AD), ช่องสัญญาณ (Ch) และค่าความดันที่อ่านได้ (P) โดยที่อยู่ในการเก็บข้อมูลจะเปลี่ยนไปตลอดเวลาในการเก็บ

SR=01S	AD=00381H
Ch1	P = 02.23 mH

9) ผู้ใช้สามารถเลือกค่าแต่ละช่องสัญญาณได้โดยการกดปุ่ม UP หรือ DOWN

SR=01S	AD=00729H
Ch3	P = 05.82 mH

10) เมื่อผู้ใช้ทำการเก็บข้อมูลครบตามที่ต้องการแล้วสามารถหยุดการเก็บข้อมูลโดยกดปุ่ม Esc หน้าจอแสดงค่าที่อยู่ชุดท้ายที่ทำการเก็บข้อมูล หลังจากนั้นกลับเข้าสู่เมนูหลัก

Stop at	AD=00229H
Ch3	P = 05.82 mH

### 2.3 การตั้งค่าเวลา (MODE 3)

1) การเข้าสู่การตั้งค่าเวลา ทำได้โดยเริ่มต้นจากเมนูหลัก และกดปุ่ม UP เพื่อให้เป็นการทำงานในรูปแบบการตั้งค่าเวลา (MODE 3) จากนั้นจึงกด OK.

03 Sep 04	12:12:15
Mode (1-3)	3 OK

2) หลังจากกด OK จะมีข้อความแสดงการทำงานในส่วนการตั้งค่าเวลา (MODE 3) และทำการตั้งค่าเวลา

Mode 3
Set Clock

3) ผู้ใช้จะเข้ามาสู่ส่วนการตั้งค่าเวลาโดยสามารถที่จะเลือกตั้งวัน เดือน ปี หรือ ชั่วโมง นาที วินาที ได้โดยการกดปุ่ม LEFT หรือ RIGHT โดยในบรรทัดที่ 2 จะมีตัวชี้อยู่

03 Sep 04	12:13:46
###	

4) ผู้ใช้สามารถเพิ่มจำนวนในหน่วยเวลาต่างๆ ได้โดยการกดปุ่ม UP หรือ DOWN

03 Oct 04	12:14:21
###	

5) เมื่อทำการตั้งค่าเวลาเสร็จแล้วให้กดปุ่ม OK หรือ Esc เพื่อทำการออกไปยังเมนูหลัก เห็นได้ว่าเวลาได้ถูกตั้งเรียบร้อยแล้ว

03 Oct 04	12:14:21
Mode (1-3)	1 OK

## 6.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการทดลอง

ในการวัดระดับความดันโดยใช้หลอดวัดระดับน้ำ สามารถอ่านค่าระดับความดันและระดับน้ำเหนือสันฝายได้โดยตรง แต่ถ้าหากใช้เซนเซอร์วัดความดันต้องอาศัยเครื่อง Data Logger และโปรแกรมควบคุมการทดลอง ในการแปลค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาจากเซนเซอร์วัดความดันเป็นระดับความดันหรือระดับน้ำเหนือสันฝาย ซึ่งโปรแกรมควบคุมการทดลองที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้กับเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดินทำหน้าที่ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ และถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่อง Data Logger ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูล ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลระหว่างทำการทดลองในทุกๆ ช่วงเวลา (Real Time)

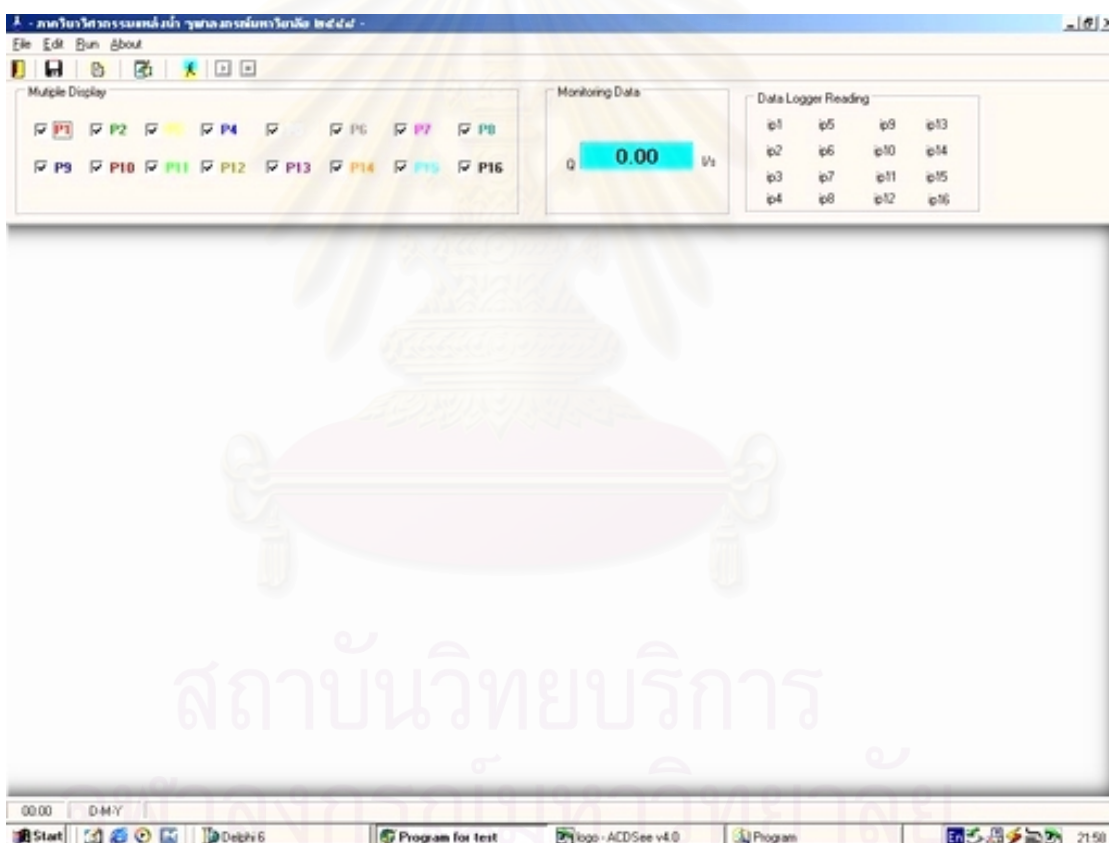
เมื่อเริ่มใช้งานโปรแกรมควบคุมการทดลอง โปรแกรมจะมีหน้าจอหลักดังแสดงในรูปที่ 6-2 ก่อนเริ่มการทดลองต้องกำหนดค่าต่างๆ ของโปรแกรมควบคุมการทดลอง โดยเลือกที่เมนูหลัก “Edit -> Sensors” เพื่อกำหนดค่าของเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีหน้าจอดังรูปที่ 6-3 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดัน ค่าปรับแก้ระดับติดตั้ง (Offset) และปรับแก้ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง (Factor) ตามสมการที่ได้จากการสอบเทียบกับเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐานแล้ว จากนั้นกดปุ่ม “OK” เพื่อยืนยันค่าและกลับเข้าสู่หน้าจอหลัก

จากนั้นไปที่เมนูหลัก “Edit -> New Experiment” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลัก เพื่อกำหนดรายละเอียดการทดลอง ตั้งค่าการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง และรูปแบบการไหล มีหน้าจอดังแสดงในรูปที่ 6-4 ซึ่งข้อมูลที่ต้องใส่มีดังต่อไปนี้

- รายละเอียดการทดลองประกอบด้วย การทดลองที่ และผู้ทำการทดลอง
- ค่าการทดลองประกอบด้วย ความถี่ในการจัดเก็บ (Sampling Rate) หรือ เวลาที่กำหนดให้โปรแกรมควบคุมการทดลองทำการเก็บข้อมูล และอุณหภูมิน้ำขณะทำการทดลอง
- วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ความกว้างจำเพาะ ความพรุน ทั้งของวัสดุชั้นน้ำและกรวดกรู (หากมี)
- รูปแบบการไหลประกอบด้วย การไหลแบบคงที่ การไหลแบบเพิ่มขึ้น การไหลแบบลดลง และการไหลแบบฟังก์ชันไซน์ เมื่อทำการเลือกรูปแบบการไหลแล้วกดปุ่ม “แก้ไขค่า...” เพื่อกำหนดความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ดังหน้าจอในรูปที่ 6-5 จากนั้นกดปุ่ม “OK” เพื่อยืนยันข้อมูลและกลับเข้าสู่หน้าจอหลัก

เมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้วไปที่เมนูหลักเลือก “Run -> New Record” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลัก เพื่อเปิดความหน่วยความจำสำรองของฐานข้อมูล และเข้าสู่หน้าจอแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 6-6 จากนั้นเข้าไปที่เมนูหลักกดปุ่ม “Run -> Warm UP” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลักเพื่อทำการเตรียมพร้อมแบบจำลองให้พร้อมสำหรับการทดลอง เมื่อแบบจำลองพร้อมเข้าไปที่เมนูหลักเลือก “Run -> Run” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอหลักเพื่อทำการทดลอง

เมื่อเก็บข้อมูลจนกระทั่งครบระยะเวลาในการในการทดลองแล้วให้เข้าไปที่เมนูหลัก “File -> Save” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอ เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปข้อมูลตาราง (ไฟล์สกุล \*.XLS) ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปประมวลผลเพิ่มเติมได้ดีกว่าโดยใช้โปรแกรม MS Excel



รูปที่ 6-2 หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการทดลอง

Sensor	Value	Offset	Factor
P1	20	+0.18	1
P2	28	0	1
P3	0	0	1
P4	34	0	1
P5	45	0	1
P6	55	0	1
P7	65	0	1
P8	84	0	1
P9	104	0	1
P10	123	0	1
P11	143	0	1
P12	161.5	0	1
P13	180.5	0	1
P14	199	0	1
P15	0	0	1
P16	0	0	1

รูปที่ 6-3 ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดันและค่าปรับแก้

**ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

รายละเอียดการทดลอง

การทดลองที่:

ผู้ทำการทดลอง:

ตั้งค่าการทดลอง

ความถี่ในการจัดเก็บ:  วินาที

อุณหภูมิของน้ำ:  องศาเซลเซียส

รูปแบบการไหล

รูปแบบ:

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

**ชั้นน้ำ**

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  มม.

ความถ่วงจำเพาะ

ความพรุน

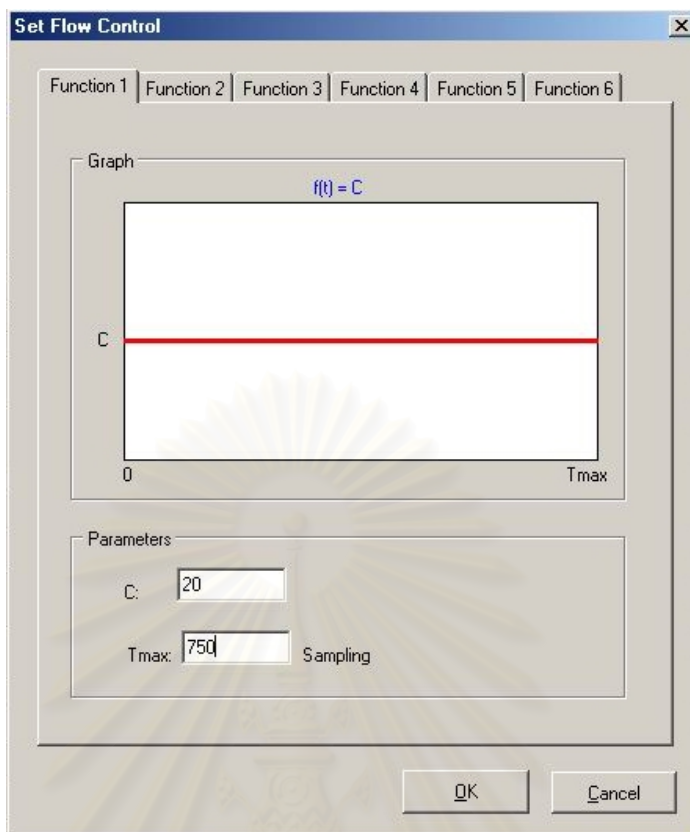
**กรวดกร**

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  มม.

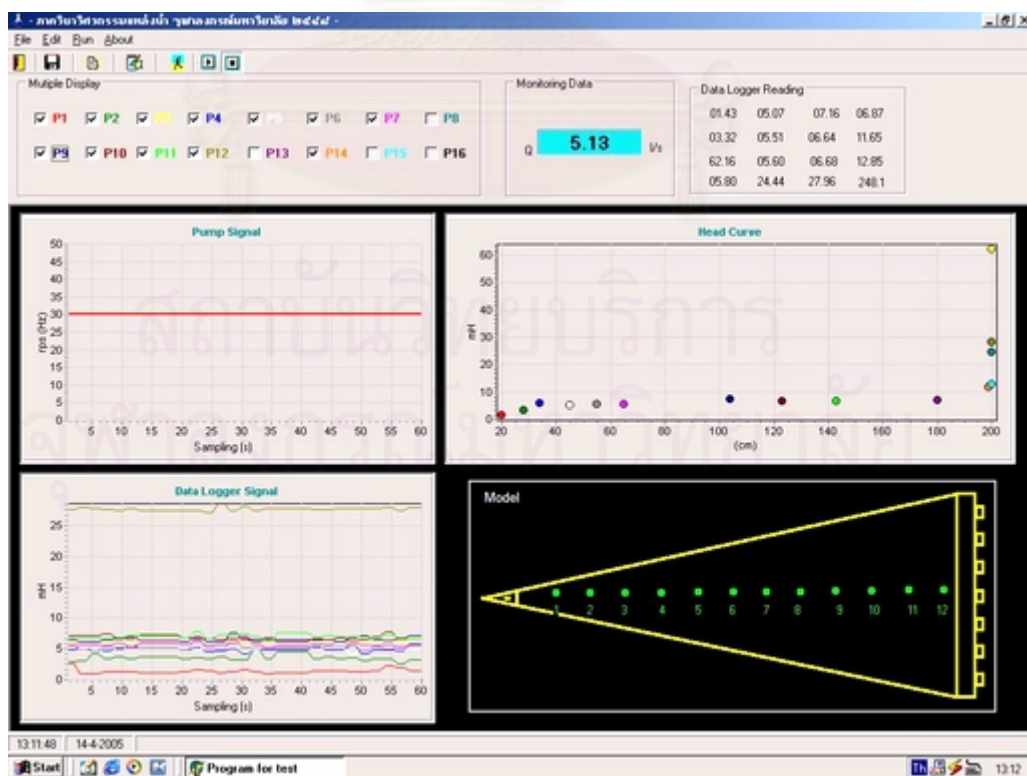
ความถ่วงจำเพาะ

ความพรุน

รูปที่ 6-4 หน้าจอสำหรับใส่ข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 6-5 หน้าจอสำหรับใส่ค่ารูปแบบการไหล



รูปที่ 6-6 หน้าจอแสดงผลการทดลอง

## บทที่ 7

### การบันทึกผลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ

#### 7.1 การบันทึกผลการทดลอง

เมื่อเก็บข้อมูลจนกระทั่งครบระยะเวลาในการทดลองแล้วให้เข้าไปที่เมนูหลักของโปรแกรมควบคุมการทดลอง “File -> Save” หรือกดปุ่มลัดบนหน้าจอ เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปข้อมูลตาราง (ไฟล์สกุล \*.XLS) ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปประมวลผลเพิ่มเติมได้ดีกว่าโดยใช้โปรแกรม MS Excel ตัวอย่างการทดลองกรณีเติมน้ำในทรายชั้นน้ำขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) 1.58 มิลลิเมตร ได้ผลดังตารางที่ 7-1

ตารางที่ 7-1 ตัวอย่างผลการทดลองที่เก็บในรูปแบบข้อมูลตาราง

ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
เวลา 17:31:00  
วันเดือนปี 17/1/2005  
การทดลองที่ DR14/S2  
ผู้ทำการทดลอง นายเชิดสกุล ตอสกุล  
ความถี่ที่ใช้ในการจัดเก็บ 1 วินาที  
อุณหภูมิของน้ำ 27 องศาเซลเซียส  
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง  
ชั้นน้ำ  
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.58 มม.  
ความต้งจำเพาะ 2.661  
ความพรุน 0.423  
กรวดกรู  
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย - มม.  
ความต้งจำเพาะ -  
ความพรุน -  
รูปแบบการไหล  $f(t) = C$

เวลา	f(t)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
17:31:11	35	13.57	12.69	62.16	12.05	11.72	11.63	10.55	10.48	9.90	9.70	9.43	9.37	9.31	9.08	0	170.4
17:31:12	35	14.13	12.63	62.16	11.88	11.64	11.54	11.25	10.58	9.93	9.88	9.52	9.21	8.91	8.47	0	173.6
17:31:13	35	14.29	12.63	62.16	11.96	11.87	11.54	11.07	10.05	9.93	9.95	9.70	9.39	9.08	8.99	0	169.1
17:31:14	35	14.16	12.69	62.16	11.96	11.79	11.63	10.98	10.40	9.84	9.70	9.43	9.30	9.17	8.99	0	170.4
17:31:15	35	14.13	12.55	62.16	12.13	11.79	11.71	11.25	9.80	9.95	9.79	9.52	9.39	9.26	9.17	0	172.0
17:31:16	35	14.12	12.69	62.16	12.05	11.72	11.71	11.25	10.67	9.95	9.79	9.52	9.30	9.08	8.97	0	167.5
17:31:17	35	13.96	12.69	62.16	11.88	11.48	11.54	11.25	10.67	9.95	9.70	9.61	9.30	9.00	8.90	0	169.1
17:31:18	35	14.45	12.86	62.16	12.22	12.01	11.71	11.16	10.58	10.03	9.94	9.79	9.48	9.17	9.07	0	170.4
17:31:19	35	14.21	12.86	62.16	12.22	11.95	11.89	11.50	10.83	10.12	9.95	9.70	9.48	9.26	9.12	0	172.0
17:31:20	35	14.13	12.94	62.16	12.05	11.95	11.63	11.25	10.58	9.47	9.44	9.79	9.65	9.52	8.99	0	172.0

จากตารางที่ 7-1 ข้อมูลในแถวแรก “เวลา” คือ เวลาขณะที่ทำการบันทึกข้อมูลทดลอง ข้อมูลในแถวที่สอง “f(t)” คือ ความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ แถวที่สามถึงสิบเจ็ด “P1 ... P15” คือ ข้อมูลระดับความดันน้ำ (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตัวเลข หมายถึงหมายเลขสายสัญญาณ เมื่อสังเกตจะมีบางจุดที่ข้อมูลเป็นศูนย์ คือไม่ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดัน และบางจุดมีค่า 62.16 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้สูงสุดของเซนเซอร์วัดความดัน แสดงว่าเซนเซอร์ตัวนั้นเสียหรือสายนำสัญญาณเสีย และข้อมูลในแถวสุดท้าย “P16” คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (มิลลิเมตร)

## 7.2 ตัวอย่างการคำนวณ

จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือ ค่าระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล ( $h_w$ ) ค่าระดับความดันในชั้นน้ำที่ตำแหน่ง 28-199 เซนติเมตร จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล ( $h_{28}, \dots, h_{199}$ ) และอัตราการไหลที่คำนวณจากระดับน้ำเหนือสันฝาย ( $h_{weir}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 7-2 เป็นผลการทดลองของทรายชั้นน้ำขนาดเฉลี่ย 1.34 มิลลิเมตร จากผลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) หาค่าความพรุนของทรายชั้นน้ำที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักทรายแห้งที่ใส่ลงไปในแบบจำลอง ความถ่วงจำเพาะของทรายที่ใช้ และปริมาตรของแบบจำลอง เช่น การทดลองของทรายชั้นน้ำขนาดเฉลี่ย 1.34 มิลลิเมตร ใช้ทรายแห้งทั้งหมด 368.061 กิโลกรัม ในการทดลองค่าความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.592 และแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากับ 0.240 ลูกบาศก์เมตร ได้ค่าความพรุน

$$\phi = \frac{0.240 - \left( \frac{368.061}{1000 \times 2.592} \right)}{0.240} = 0.408$$

2) จากข้อมูลระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล (เนื่องจากระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาลมีผลของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล) สามารถลากเส้นระดับความดันที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำตามระยะทางจนถึงผิวบ่อน้ำบาดาล ซึ่งระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $h_{20}$ ) จะนำไปใช้คำนวณค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลต่อไป ตัวอย่างเส้นระดับความดัน (Piezometric Surface) ของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7-1

3) คำนวณค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่เกิดขึ้น โดยหาจากผลต่างของระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลอง ( $h_w$ ) และระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล ( $h_{20}$ ) แสดงในรูปที่ 7-1 ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (Well Loss) ที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ CR11/S1 เท่ากับ 1.378 เมตร ขณะที่เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (Aquifer Loss) มีค่าเท่ากับ 3.620 เมตร เมื่อพิจารณาถึงระยะ 1.99

เมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (จุดวัดความดันตำแหน่งสุดท้าย) นั่นคือเฮดสูญเสียทั้งหมด (Total Loss) จากการไหลในแนวนอนที่มีเข้าบ่อน้ำบาดาลของการทดลองที่ CR11/S1 มีค่าเท่ากับ 4.998 เมตร

4) คำนวณค่าอัตราการไหลจากระดับน้ำเหนือสันฝายโดยใช้สมการ  $Q = 0.0438h_{weir}^{1.539}$

5) หาค่าความชันชลศาสตร์ (I) ค่าเรย์โนลด์ (Re') และแฟคเตอร์เสียดทาน (f') ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน โดยความชันชลศาสตร์หาได้จากความชันของเส้นระดับความดัน ขณะที่

Re' คำนวณจากสมการ  $Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)$  โดยที่ v คำนวณจากอัตราการไหล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล และแบบจำลองเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา หนา 0.2 เมตร ดังนั้น  $A = \left(\frac{\pi r}{6}\right) \times 0.2$  ตารางเมตร เมื่อทราบค่า  $v$   $\phi$   $d_{50}$  และ  $v$  จะหาค่าเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ และ

คำนวณแฟคเตอร์เสียดทานจากสมการ  $f' = \frac{lgd_{50}}{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2}$  เมื่อทราบค่า  $l$   $d_{50}$   $v$  และ  $\phi$  ตัวอย่างผลการคำนวณ

ค่า I Re' และ f' ของการทดลองแสดงดังตารางที่ 7-3

ตารางที่ 7-2 ข้อมูลจากการทดลองการไหลในแนวนอนที่มีเข้าสู่อบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50} = 1.34$  มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 368.061 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

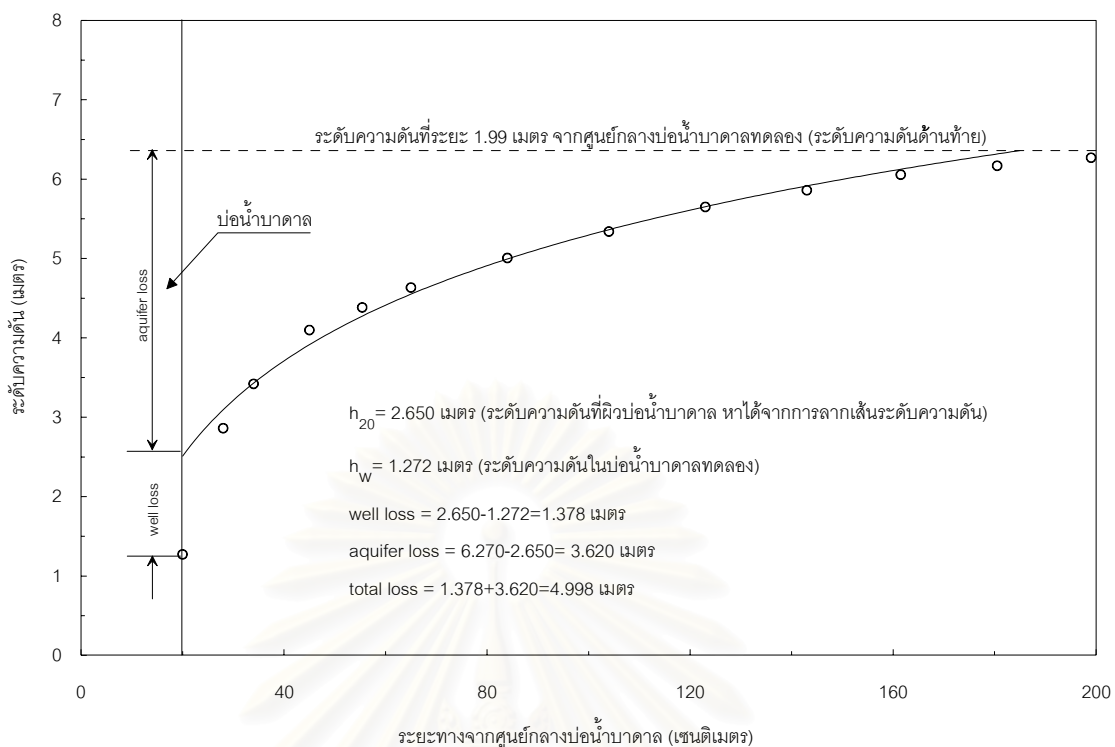
ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ ( $\nu$ ) =  $0.8532 \times 10^{-6}$  ม.<sup>2</sup>/วินาที

ความพรุน = 0.408

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													
	$h_w$	$h_{28}$	$h_{34}$	$h_{45}$	$h_{55}$	$h_{65}$	$h_{84}$	$h_{104}$	$h_{123}$	$h_{143}$	$h_{161.5}$	$h_{180.5}$	$h_{199}$	$h_{weir}$
1	0.666	0.737	0.742	0.747	0.751	0.761	0.766	0.775	0.780	0.784	0.796	0.800	0.803	0.0053
2	0.700	0.879	0.926	0.955	0.974	0.978	0.983	0.988	1.000	1.016	1.035	1.044	1.054	0.0295
3	0.758	1.013	1.089	1.148	1.167	1.181	1.191	1.210	1.233	1.262	1.290	1.319	1.342	0.0463
4	0.811	1.141	1.267	1.371	1.390	1.408	1.456	1.517	1.588	1.640	1.682	1.716	1.730	0.0601
5	0.856	1.299	1.491	1.673	1.708	1.730	1.787	1.867	1.971	2.042	2.131	2.188	2.226	0.0723
6	0.909	1.511	1.732	2.000	2.100	2.160	2.240	2.369	2.468	2.567	2.627	2.673	2.731	0.0830
7	0.976	1.738	2.005	2.371	2.480	2.540	2.666	2.825	2.991	3.123	3.229	3.310	3.335	0.0934
8	1.036	1.970	2.312	2.762	2.900	3.000	3.189	3.400	3.614	3.750	3.897	3.970	4.013	0.1029
9	1.096	2.260	2.658	3.172	3.327	3.471	3.770	3.990	4.247	4.400	4.575	4.666	4.690	0.1122
10	1.183	2.550	3.036	3.625	3.851	4.040	4.356	4.640	4.913	5.140	5.311	5.360	5.455	0.1207
11	1.272	2.862	3.421	4.099	4.384	4.634	5.007	5.340	5.650	5.860	6.056	6.169	6.270	0.1291
12	1.339	3.217	3.849	4.632	4.979	5.271	5.721	6.050	6.432	6.650	6.889	6.946	7.120	0.1372
13	1.441	3.593	4.308	5.184	5.624	5.979	6.460	6.830	7.278	7.493	7.743	7.779	8.034	0.1449
14	1.542	3.973	4.777	5.772	6.286	6.698	7.250	7.620	8.123	8.410	8.669	8.787	8.989	0.1526
15	1.648	4.395	5.306	6.397	6.991	7.454	8.067	8.520	9.035	9.367	9.644	9.770	9.990	0.1601





รูปที่ 7-1 เส้นระดับความดันของการทดลองที่ CR11/S1

ตารางที่ 7-3 ผลการคำนวณ  $Re'$  และ  $f'$  ของการทดลอง

การทดลอง	$h_{weir}$ (ซม.)	$Q_{lab} \times 10^{-5}$ (ลบ.ม./วินาที)	$r$ (ม.)	$A$ (ตร.ม.)	$v$ (ม./วินาที)	$v/\phi$ (ม./วินาที)	$Re'$	$l$	$f'$
1	0.53	1.36	0.340	0.036	0.00038	0.00094	1.47	0.025	184.70
			0.450	0.047	0.00029	0.00071	1.11	0.019	254.78
			0.550	0.058	0.00024	0.00058	0.91	0.015	299.72
			0.650	0.068	0.00020	0.00049	0.77	0.013	348.48
			0.840	0.088	0.00015	0.00038	0.60	0.010	470.19
			1.040	0.109	0.00013	0.00031	0.48	0.008	570.28
			1.230	0.129	0.00011	0.00026	0.41	0.007	659.68
			1.430	0.150	0.00009	0.00022	0.35	0.006	760.57
			1.615	0.169	0.00008	0.00020	0.31	0.005	846.88
1.805	0.189	0.00007	0.00018	0.28	0.004	941.68			
2	2.95	19.31	0.340	0.036	0.00542	0.01328	20.86	0.356	13.25
			0.450	0.047	0.00410	0.01004	15.76	0.280	18.28
			0.550	0.058	0.00335	0.00821	12.90	0.221	21.51
			0.650	0.068	0.00284	0.00695	10.91	0.184	25.00
			0.840	0.088	0.00219	0.00538	8.44	0.148	33.74
			1.040	0.109	0.00177	0.00434	6.82	0.117	40.92
			1.230	0.129	0.00150	0.00367	5.77	0.097	47.33
			1.430	0.150	0.00129	0.00316	4.96	0.083	54.57
			1.615	0.169	0.00114	0.00280	4.39	0.072	60.77
1.805	0.189	0.00102	0.00250	3.93	0.064	67.57			

## บทที่ 8

### ข้อควรระวังในการใช้ชุดเครื่องมือและการบำรุงรักษา

#### 8.1 ข้อควรระวังในการใช้

ในการใช้ชุดเครื่องมือต้องระมัดระวังในการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อป้องกันความเสียหายต่อชุดเครื่องมือและผู้ใช้งานดังนี้

- ห้ามทดลองเกินขอบเขตการใช้งานของชุดเครื่องมือโดยเด็ดขาด
- การเสียบปลั๊กเครื่องสูบน้ำและอุปกรณ์อื่น ๆ ต้องระวังกระแสไฟฟ้ารั่ว ระวังอย่าให้เท้าเปียกน้ำ
- เนื่องจากแบบจำลองมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก การยกหรือเคลื่อนย้ายต้องทำด้วยความระมัดระวัง
- ก่อนเดินเครื่องเครื่องสูบน้ำต้องตรวจสอบว่ามีน้ำเต็มภายในตัวแบบจำลองบ่อบาดาล - ชั้นน้ำและมีน้ำในถังเก็บน้ำเพียงพอ
- เมื่อเริ่มการทดลองต้องให้น้ำเข้าระบบ By Pass ก่อน เพื่อลดแรงดันที่อาจเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใดในแบบจำลอง อาจทำให้แบบจำลองมีความเสียหายได้
- การปรับค่าการใช้งานของเครื่องปรับความเร็วรอบ ต้องปฏิบัติตามคู่มืออย่างเคร่งครัด
- การดึงสายสัญญาณออกจากหัวเซนเซอร์วัดความดัน ต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะสายอาจขาดได้

#### 8.2 การบำรุงรักษา

ในการบำรุงรักษาเพื่อให้ชุดเครื่องมือมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ควรทำความสะอาดถังเก็บน้ำทุกเดือน เพราะน้ำจากการทดลองจะมีตะกอนปะปนอยู่ หากใช้ไปนานๆ อาจเกิดการอุดตันตามตะแกรงกันทราย หรือหัวเซนเซอร์วัดความดันได้ ในกรณีที่ไม่มีกรทดลองเป็นระยะเวลาอันยาวนานควรระบายน้ำออกจากถังให้หมด

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ : นายเชิดสกุล ตอสกุล

วันที่เกิด : 3 กันยายน พ.ศ. 2522

สถานที่เกิด : จังหวัดชัยภูมิ

ประวัติการศึกษา :

2540-2543      ศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2544-2547      ศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติการทำงาน :

2546-ปัจจุบัน    บริษัทโปรเกรสเทคโนโลยีคอนซัลแทนส์ จำกัด  
ตำแหน่งวิศวกรแหล่งน้ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย