

พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล



นายนพดล เฉลิมชัยรัตน์กุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

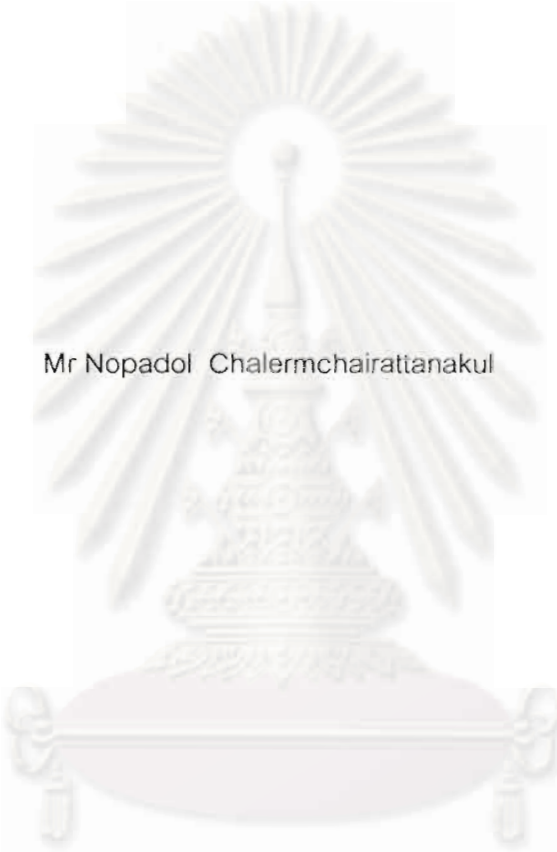
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9811-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE HYDRAULIC BEHAVIORS OF DIVERGING AND CONVERGING WELL FLOW



Mr Nopadol Chalermchairattanakul

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 2002

ISBN 974-17-9811-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

โดย

นายนพดล เฉลิมชัยรัตนกุล


สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

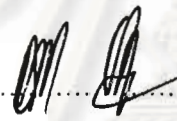
อาจารย์ที่ปรึกษา

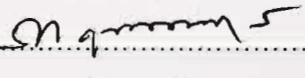
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธาท)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์)

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

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

นพดล เกลิมชัยรัตนกุล : พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล (THE HYDRAULIC BEHAVIORS OF DIVERGING AND CONVERGING WELL FLOW) อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตร์ คุณธนกุลวงศ์, 231 หน้า. ISBN 974-17-9811-3

การสูบน้ำได้ดินขึ้นมาใช้มากกว่าสมดุลของธรรมชาติทำให้เกิดผลกระทบต่างๆ เช่น แผ่นดินทรุด การบรรเทาปัญหาวิธีการหนึ่งคือการเติมน้ำลงไปชั้นน้ำ แต่ยังคงขาดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดินระหว่างการเติมน้ำ การศึกษานี้จึงทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลของน้ำภายใต้แรงดันเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลขณะทำการสูบน้ำและการไหลของน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลขณะทำการเติมน้ำ เมื่อขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเปลี่ยนไป

การศึกษาได้จัดทำแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำขึ้น 2 แบบ เพื่อทำการทดลองการไหลภายใต้แรงดันประกอบด้วยแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี เป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มุมที่จุดศูนย์กลาง 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 นอกจากนี้ยังได้ทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมียมิตอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว สูง 1 เมตร เพื่อหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ค่าความนำชลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี สัมประสิทธิ์ของการไหลนำพา และความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล

ผลการทดลองพบว่า การไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในการทดลอง มีเฮดสูญเสียจากการไหลประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลและเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ซึ่งเฮดสูญเสียจากการไหลสามารถแบ่งออกเป็นเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นและเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น โดยระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนสภาพการไหล คือ รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ซึ่งคำนวณจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ในการเปรียบเทียบผลการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ให้ค่าเรย์โนลด์วิกฤติใกล้เคียงกัน ค่าความนำชลศาสตร์ของการไหลเข้าสูงกว่าการไหลออก พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์ของการไหลนำพาของการไหลออกสูงกว่าการไหลเข้า ทำให้เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นและแบบเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.06 และ 1.02 เท่าของการไหลเข้า ตามลำดับ ขณะที่ความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.49 เท่าของการไหลออก และเฮดสูญเสียในทุกเรื่องลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....
ปีการศึกษา 2545.....

ลายมือชื่อนิสิต อนันต์ วัฒนกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr. Sukit

4270371621 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORD : HYDRAULIC BEHAVIORS / DIVERGING / CONVERGING / WELL FLOW

NOPADOL CHALERMCHAIRATTANAKUL : THE HYDRAULIC BEHAVIORS OF DIVERGING AND CONVERGING WELL FLOW. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUCHARIT KOONTANAKULVONG, Ph.D., 231 pp. ISBN 974-17-9811-3

The use of groundwater over natural balance caused various impacts such as land subsidence etc. Artificial recharge is one of the measures to alleviate the problems. However hydraulic behaviors of groundwater flow under recharging operation is still unclear. In this study, recharging and pumping experiments were conducted to investigate the hydraulic behaviors of diverging and converging well flow with various sand sizes of aquifer.

The experiment devices were designed and 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 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 of 0.2 meter in radius, (2) unidirectional flow model in rectangular shape with 3 meters in length, 0.1 meter in width and 0.2 meter in thickness, (3) cylindrical permeameter of 8 inch in diameter and 1 meter in height.

The study found that converging and diverging well flow losses consist of 3 main components, i.e., well loss and linear and non-linear flow losses in aquifer which can be divided by critical well radius, calculated from critical Reynolds number. Compared from diverging and converging well flow test, critical Reynolds number of both flows are identical but hydraulic conductivity of converging flow is higher. Darcy parameter, Non-Darcy parameter and coefficient of convective of diverging flow are higher. Thus linear and non linear flow losses of diverging flow is 1.02 and 1.06 times higher in average respectively. Well loss of converging flow is higher 1.43 times in average, and all losses decrease with the increase of sand grainsize.

Department WATER RESOURCES ENGINEERING, Student's signature Nopadol C.
Field of study WATER RESOURCES ENGINEERING, Advisor's signature Sucharit K.
Academic year 2002

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ และรองศาสตราจารย์ กฤษฏา วิสวธีรานนท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์ ที่ได้กรุณาแนะนำ สั่งสอน และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ปัญหาโดยตลอด ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและขอจดจำไว้ไม่ลืมเลือน

อนึ่ง ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณคณะกรรมการกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนโครงการสิ่งประดิษฐ์ เพื่อทำการจัดสร้างเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดิน ตลอดจนภาคีวิศวกรมหาน้ำ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในหอปฏิบัติการทางชลศาสตร์ชั้นพื้นฐาน เพื่อใช้สำหรับติดตั้งและทดสอบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดิน รวมทั้งสาธารณูปโภคและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกระหว่างการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี โดยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์ ตลอดจนบุคลากรภาคีวิศวกรมหาน้ำทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณวุฒิชัย ชื่นจิตต์ และคุณภานุสิทธิ์ ดวงศรี ที่กรุณาเสียสละเวลาและแรงกายเพื่อช่วยให้แบบจำลองทางกายภาพที่ออกแบบไว้สำเร็จลุล่วงเป็นรูปธรรมขึ้นมา รวมทั้งน้องๆ วิศวกรมหาน้ำที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณพี่ๆ และผู้บังคับบัญชาที่การประสานภูมิภาคทุกท่าน ที่เข้าใจและให้ความสะดวกแก่ข้าพเจ้าในการศึกษาวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

กราบขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การส่งเสริมด้านการศึกษาของข้าพเจ้ามาโดยตลอด ขอขอบคุณภรรยาที่คอยอยู่เคียงข้างเป็นทั้งแรงกายในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ และเป็นแรงใจให้ข้าพเจ้ายามที่ท้อแท้หมดกำลังใจ

ประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หากพึงมี ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ต

บทที่ 1 : บทนำ

1.1 บทนำและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบข่ายการศึกษา.....	2
1.4 การดำเนินงานศึกษา.....	5
1.5 การศึกษาที่ผ่านมา.....	7

บทที่ 2 : หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 นิยามของชั้นน้ำ.....	24
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำ.....	25
2.3 คุณสมบัติทางศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ.....	27
2.4 ชนิดของการไหลและพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดิน.....	28
2.5 สมการการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน.....	31
2.6 ระดับความดันที่เปลี่ยนแปลง จากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	36
2.7 สมการระดับความดันของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	40
ในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน	

บทที่ 3 : การทดลองในห้องปฏิบัติการ

3.1 การพัฒนาและทดสอบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน.....	56
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมืออื่นที่ใช้ในการทดลอง.....	69
3.3 เงื่อนไขการทดลอง.....	72
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	74
3.5 การจัดการข้อมูลจากการทดลอง.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 : การวิเคราะห์ผลทดลอง	
4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ.....	87
4.2 ความถี่จำเพาะของทรายชั้นน้ำ.....	90
4.3 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน.....	92
4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล.....	100
4.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	113
4.6 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล.....	116
4.7 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	125
บทที่ 5 : ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการประยุกต์ใช้	
5.1 รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล.....	133
5.2 เขตสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	136
5.3 ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล.....	149
5.4 เขตสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น.....	153
5.5 เขตสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น.....	158
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....	161
5.7 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา.....	163
บทที่ 6 : สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่พัฒนาเพื่อใช้ในการทดลอง.....	185
6.2 การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำ.....	186
6.3 การทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน.....	186
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	190
รายการอ้างอิง.....	193
ภาคผนวก	
ก การคำนวณออกแบบเครื่องมือ.....	196
ข ผลการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์.....	202
ค ผลการทดลอง.....	208

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ง ภาพการทดลองและอุปกรณ์.....	222
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	231



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ขอบเขตการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน.....	4
1-2	ขอบเขตการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี.....	4
1-3	ขอบเขตการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว.....	4
3-1	ผลของอัตราการเก็บข้อมูลระดับความดันต่อความถูกต้องของค่า..... ระดับความดัน จากการวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน	67
3-2	ผลของระยะเวลาการเก็บข้อมูลระดับความดันต่อความถูกต้องของค่า..... ระดับความดัน จากการวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน	67
3-3	รายละเอียดเงื่อนไขการทดลอง.....	73
3-4	ตัวอย่างผลการทดลองที่เก็บในรูปแบบข้อมูลตาราง.....	85
4-1	ผลการทดลองการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ.....	88
4-2	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ.....	88
4-3	การคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ.....	91
4-4	ผลการทดลองการไหลแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (ST1/S1 - ST14/S1)	94
4-5	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลอง..... การไหลแบบมาตรฐาน	96
4-6	พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานในการศึกษาครั้งนี้..... และจากการทดลองของ Ahmed	98
4-7	ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน.....	99
4-8	ข้อมูลจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล..... ของทรายตัวอย่างที่ 1	101
4-9	ผลการคำนวณ l 'Re' และ f ของการทดลอง CR1/S1 – CR4/S1.....	103
4-10	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลอง..... การไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล	110
4-11	เสถียรสูญเสียในส่วนต่างๆ จากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี.....	110
4-12	ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล.....	112
4-13	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลอง..... การไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล	114
4-14	เสถียรสูญเสียในส่วนต่างๆจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี.....	114
4-15	ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-16	ผลการทดลองและการคำนวณค่า l , Re' และ f' ของการทดลอง.....	119
	CU1/S1 - CU5/S1	
4-17	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลอง.....	124
	การไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล	
4-18	เสดสูญเสียนในส่วนต่างๆ จากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว.....	124
4-19	ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล.....	125
4-20	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลอง.....	127
	การไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล	
4-21	เสดสูญเสียนในส่วนต่างๆ จากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว.....	127
4-22	ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล.....	128
5-1	ขอบเขตการทดลองที่นำมาวิเคราะห์.....	131
5-2	สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์จากการทดลอง.....	131
5-3	พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองแบบต่างๆ.....	132
5-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาค.....	133
	ทรายชั้นน้ำเฉลี่ย	
5-5	เสดสูญเสียนจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1.....	138
5-6	เสดสูญเสียนจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2.....	138
5-7	เสดสูญเสียนจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3.....	139
5-8	เสดสูญเสียนจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4.....	139
5-9	ระดับความดันตามระยะทางจากเส้นระดับความดันของการทดลอง.....	144
	CR4/S1 และ DR4/S1	
5-10	ระดับความดันสะสมจากการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1.....	144
5-11	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกับอัตราการไหล.....	150
5-12	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์์ของแต่ละการทดลอง.....	161

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1	ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษา.....6
1-2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์ กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง.... 11 จากการทดลองของ Shepherd
1-3	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียตทานกับค่าเรย์โนลด์ จากการทดลองของ..... 16 Mobasher และ Todd
1-4	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ จากการทดลอง.....23 ของ Williams
2-1	ลักษณะของชั้นน้ำ..... 24
2-2	โค้งการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve).....26
2-3	การแบ่งชนิดของการไหล.....29
2-4	ระย่น้ำลคในบ่อสูบน้ำบาดาล.....37
2-5	ลักษณะเสดสูญเสยจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลทดลอง..... 39
2-6	กรวยความดันเพิ่ม (cone of recharge) และกรวยความดันลด.....41 (cone of depression)
2-7	รัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล..... 42
2-8	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในแนวรัศมี..... 45
2-9	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี $r_{cr} \leq r_w$ 48
2-10	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล กรณี $r_{cr} > r_w$ 49
2-11	การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในทิศทางเดียว.....55
3-1	การเชื่อมโยงระบบต่างๆของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน...60
3-2	เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน..... 61
3-3	ลักษณะของแบบจำลองบ่อบาดาล-ชั้นน้ำ..... 62
3-4	ลักษณะของเพอร์เมียมิตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... 70
3-5	ลักษณะของแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว..... 70
3-6	ชุดตะแกรงมาตรฐาน..... 71
3-7	หน้าจอสำหรับใส่ข้อมูลการทดลอง.....84
3-8	หน้าจอแสดงผลการทดลอง..... 84
4-1	กราฟการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ..... 89
4-2	กราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขวดหาความถ่วงจำเพาะที่ใช้ใน..... 91 การทดลอง

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์.....95 (การทดลอง ST1/S1 - ST14/S1)
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....95 (การทดลอง ST1/S1 - ST14/S1)
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์..... 97 (ST1/S1 – ST4/S1)
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับความเร็วการไหลจริง..... 97 (ST5/S1 – ST14/S1)
4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ การทดลอง..... 99 การไหลแบบมาตรฐาน
4-8	เส้นระดับความดันของการทดลอง CR3/S1.....101
4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์..... 104 (CR1/S1 - CR9/S1)
4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....104 (CR1/S1 - CR9/S1)
4-11	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับความเร็วการไหลจริง.....108 ที่ระยะทางต่างๆ กรณีการไหลแบบเชิงเส้น
4-12	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับความเร็วการไหลจริง..... 109 ที่ระยะทางต่างๆ กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น
4-13	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....112 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล
4-14	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....115 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล
4-15	เส้นระดับความดันตามระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาลของการทดลองที่ CU3/S1.. 118
4-16	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์..... 121 (CU1/S1 – CU5/S1)
4-17	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์..... 121 (CU1/S1 – CU5/S1)
4-18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์.....122 (CU1/S1-CU2/S1)

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-19	ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับความเร็วการไหลจริง..... 122 (CU3/S1-CU5/S1)
4-20	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....125 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล
4-21	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์.....128 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล
5-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย..... 135 จากการทดลองกรณีต่างๆ
5-2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย..... 135
5-3	เขตสูญเสียจากการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี.....142
5-4	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล.....145 จากการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1
5-5	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล..... 147 จากการทดลองด้วยอัตราการไหล Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1
5-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล... ..147 จากการทดลองด้วยอัตราการไหล Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2
5-7	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล..... 148 จากการทดลองด้วยอัตราการไหล Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3
5-8	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล... ..148 จากการทดลองด้วยอัตราการไหล Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4
5-9	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกับอัตราการไหล.....150 จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี
5-10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ C กับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ.....152
5-11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{CR} กับ C_{DR}152
5-12	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ดาร์ซีกับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ..... 155
5-13	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์นอนดาร์ซีกับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ..... 155
5-14	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลนำพากับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ..... 156
5-15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ.....160
5-16	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์162 จากการทดลองประเภทต่างๆ

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-17	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า.....166 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และสมการของThiem ด้วยอัตราการไหล Q3 (linear flow)
5-18	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า.....166 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และสมการของThiem ด้วยอัตราการไหล Q6 (mixed flow)
5-19	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า.....167 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และสมการของThiem ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)
5-20	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก....167 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี และสมการของThiem ด้วยอัตราการไหล Q3 (linear flow)
5-21	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก....168 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี และสมการของThiem ด้วยอัตราการไหล Q6 (mixed flow)
5-22	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก....168 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี และสมการของThiem ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)
5-23	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า.....171 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหล แบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)
5-24	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า.....171 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหล แบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)
5-25	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก....172 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหล แบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-26	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก.... 172 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหล แบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)
5-27	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า..... 175 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและ ค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)
5-28	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้า..... 175 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและ ค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)
5-29	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก.... 176 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและ ค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)
5-30	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออก.... 176 ในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและ ค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)
5-31	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้..... 179 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว เข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q1
5-32	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้..... 179 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว เข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q3
5-33	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้..... 180 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว เข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q5
5-34	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้..... 180 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว ออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q1
5-35	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้..... 181 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว ออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q3

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5-36	ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้.....	181
	พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว	
	นอกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q5	
5-37	แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา.....	184



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
a'	พารามิเตอร์ดาร์ซี
a_1'	พารามิเตอร์ดาร์ซีของการไหลในทิศทางเดียว
a_2'	พารามิเตอร์ดาร์ซีของการไหลในแนวรัศมี
b'	พารามิเตอร์นอนดาร์ซี
b_1'	พารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลในทิศทางเดียว
b_2'	พารามิเตอร์นอนดาร์ซีของการไหลในแนวรัศมี
c_d	สัมประสิทธิ์อัตราการไหล
c_1'	สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว (unsteady coefficient)
c_2'	สัมประสิทธิ์การไหลนำพา (convective coefficient)
d	ความยาวจำเพาะการไหล (ม.)
d_{10}	ขนาดประสิทธิผลหรือขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 10 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
d_{30}	ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 30 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
d_{50}	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยหรือขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 50 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)
d_{60}	ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 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.)
$ds'''_{/C}$	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล จากการไหลเข้า (ม.)
ds_{AD}	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$ds_{/D}$	เฮดสูญเสียจากการไหลออกแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds''_{/D}$	เฮดสูญเสียจากการไหลออกแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ม.)
$ds'''_{/D}$	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล จากการไหลออก (ม.)
e	อัตราส่วนช่องว่าง
f_s	ปัจจัยเกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาคตัวกลาง (grain shape factor)
f_α	ปัจจัยเกี่ยวกับความพรุนของอนุภาคตัวกลาง (porosity factor)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
f	แฟคเตอร์เสียดทาน ที่คิดจากความเร็วกวาร์ไหลจริง
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที ²)
h	ระดับความดัน (ม.) ที่ระยะ r จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
h_0	ระดับความดันน้ำเดิม (ม.)
$h_{0/L}$	ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันในชั้นน้ำที่ไกลจากบ่อน้ำบาดาลที่สุด (ม.)
h_1	ระดับความดัน ที่ระยะ r_1 จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
h_2	ระดับความดัน ที่ระยะ r_2 จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
h_{cr}	ระดับความดันที่ตำแหน่งวิกฤติ (ม.)
h_D	ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดจุดล่างของเพอร์เมียมิตเตอร์ (ม.)
h_U	ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดจุดบนของเพอร์เมียมิตเตอร์ (ม.)
h_w	ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล (ม.)
h_{weir}	ระดับน้ำเหนือสันฝาย (ม.)
l	ความชันชลศาสตร์ (hydraulic gradient)
k	ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (ม. ²)
m	ความหนาของชั้นน้ำ (ม.)
n	ค่ายกกำลังของความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล
r	ระยะทางในแนวรัศมีจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
r_0	ระยะในแนวรัศมีที่ได้รับอิทธิพลจากการสูบน้ำและเติมน้ำ (ม.)
r_w	รัศมีของบ่อน้ำบาดาล (ม.)
r_{cr}	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (ม.)
s_w	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหล (ม.)
$s_{w/C}$	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล (ม.)
$s_{w/D}$	เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล (ม.)
v	ความเร็วเฉลี่ยการไหลผ่านตัวกลาง (ม./วินาที)
w	ความกว้างของหน้าตัดการไหลในกรณีการไหลในทิศทางเดียว (ม.)
A	ค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
B	ค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
B_{weir}	ความกว้างของสันฝาย (ม.)
C	สัมประสิทธิ์ของความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
C_u	coefficient of uniformity
C_c	coefficient of concavity
G_T	ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิทดลอง
K	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)
K'	ค่าความนำชลศาสตร์ที่คิดจากความเร็วจริงในการไหล (ม./วินาที)
K_1'	ค่าความนำชลศาสตร์ของการไหลในทิศทางเดียว (ม./วินาที)
K_2'	ค่าความนำชลศาสตร์ของการไหลในแนวรัศมี (ม./วินาที)
Q	อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)
Q_d	อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
Q_r	อัตราการเติมน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
Q_{lab}	ค่าอัตราการไหลจากการทดลองการไหลในชั้นน้ำรูปส่วนหนึ่งของวงกลม
Q_{equi}	ค่าอัตราการไหลเสมือนจริง(12 เท่าของ Q_{lab})
Re	ค่าเรย์โนลด์
Re'	ค่าเรย์โนลด์ของการไหลจริง
Re'_{cr}	ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ
Re'_{wf}	ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อ
S	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน
T	ความสามารถในการส่งผ่าน (ม. ² /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)
ϕ	ความพรุนของตัวอย่างดิน
ρ	ความหนาแน่นของของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง (ก.ก./ลบ.ม.)
ρ_s	ความหนาแน่นของเม็ดดิน (ก.ก./ลบ.ม.)
μ	ความหนืดพลวัตของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง (ปาสคาล-วินาที)
u	ความหนืดเปรียบเทียบของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง (ม. ² /วินาที)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำและความเป็นมา

ประเทศไทยเริ่มมีการใช้น้ำบาดาลมาตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 ช่วงแรกการใช้น้ำบาดาลมีปริมาณไม่มากนัก แต่ต่อมาเมื่อประเทศไทยมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการใช้น้ำในด้านต่างๆ เช่น ด้านการอุปโภค บริโภค เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เพิ่มมากขึ้นในหลายพื้นที่ ได้แก่ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมทั้งตามหัวเมืองใหญ่ๆ ซึ่งน้ำบาดาลถูกสูบขึ้นมาจากชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer)

การสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์มากกว่าสมดุลของธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่างๆ มากมาย เช่น การเกิดแผ่นดินทรุด การแทรกซึมของน้ำเค็มเข้ามาในชั้นน้ำบาดาล (aquifer) ทำให้คุณภาพของน้ำบาดาลลดน้อยลง การบรรเทาปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ทำได้โดยการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาล หรือการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปในชั้นน้ำบาดาล ซึ่งอาจทำได้โดยการเติมน้ำลงไปชั้นน้ำบาดาล (artificial recharge) วิธีการนี้เป็นการเร่งกระบวนการตามธรรมชาติเพื่อเพิ่มน้ำในชั้นน้ำบาดาล อย่างไรก็ตาม การศึกษาพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดินในระหว่างการเติมน้ำใต้ดิน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและดำเนินงานระบบการเติมน้ำ ที่ยังมีการศึกษาไม่มากเท่าที่ควร

การศึกษาค้นคว้าวิจัยมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดินใน 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลเมื่อทำการสูบน้ำจากบ่อน้ำบาดาล (converging flow) และกรณีที่มีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลเมื่อทำการเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล (diverging flow) ซึ่งได้ทำการศึกษาและทดลองในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ขั้นพื้นฐาน โดยใช้แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (well-aquifer model) ที่พัฒนาขึ้น เพื่อจำลองบ่อน้ำบาดาลและสภาพชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer)

เนื่องจากพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น อัตราการสูบน้ำหรือเติมน้ำ ระดับความดันในชั้นน้ำ (piezometric head) ขนาดอนุภาคทราย ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคทรายในชั้นน้ำ และรูปแบบบ่อน้ำบาดาล สำหรับการศึกษาวិทยานิพนธ์ครั้งนี้ ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดิน เมื่อขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเปลี่ยนแปลงไป และศึกษาถึงความแตกต่างของพฤติกรรมทางชลศาสตร์ ของการไหลของน้ำใต้ดินขณะที่ไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ทั้งลักษณะการไหลในแนวรัศมี และลักษณะการไหลในทิศทางเดียวหรือการไหลแบบขนาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์สำหรับการศึกษาค้างนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) พัฒนาเครื่องมือเพื่อทดลองหาพฤติกรรมทางชลศาสตร์ ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล
- 2) หาพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลภายใต้แรงดัน
- 3) หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ ได้แก่ สภาพการไหล และเสถียรภาพที่เกิดขึ้นจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

1.3 ขอบข่ายการศึกษา

การศึกษาค้างนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ขั้นพื้นฐาน ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ (fully penetrating well) ในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) ที่สภาวะคงตัว (steady state) โดยตัวแปรที่นำมาพิจารณาในการศึกษา ได้แก่

- ทราบขนาดสม่ำเสมอ (uniform grade) จำนวน 4 ตัวอย่างแทนวัสดุชั้นน้ำ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d_{50}) 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร มีความพรุนประมาณ 0.4
- รูปแบบการไหล ได้แก่ การไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล (converging flow) และการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล (diverging flow)
- อัตราการไหล และระดับความดัน โดยในการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลเป็นหลัก เนื่องจากการทดลองต้องการให้เกิดสภาพการไหลทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองและระดับความดันที่เกิดขึ้นในการทดลองแสดงในตารางที่ 1-1 ถึง 1-3

เครื่องมือหลักที่พัฒนาขึ้นเพื่อการศึกษาค้างนี้ประกอบด้วย แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำระบบหมุนเวียนน้ำ และระบบควบคุม วัด และจัดเก็บข้อมูลระดับความดันแบบกึ่งอัตโนมัติ (การเริ่มต้นและการหยุดเก็บข้อมูลต้องดำเนินการเอง) โดยบ่อน้ำบาดาลที่จำลองขึ้นมีช่องเจาะและติดตะแกรงบริเวณที่ติดกับชั้นน้ำซึ่งเป็นลักษณะของบ่อน้ำบาดาลที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ (fully penetrating

well) และแบบจำลองชั้นน้ำเป็นการจำลองชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) แบ่งเป็น 2 แบบตามรูปแบบการไหล ได้แก่ แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี (radial flow) มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 2 เมตร และหนา 0.2 เมตร และแบบจำลองการไหลแบบทิศทางเดียว (unidirectional flow) กว้าง 0.104 เมตร ยาว 3 เมตร และหนา 0.2 เมตร ซึ่งการทดลองได้ดำเนินการในกรณีต่างๆ ดังนี้

1) การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน หรือ การทดลองการไหลผ่านตัวกลางในเพอร์เมียมิตอร์ (permeameter) เพื่อหาพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลผ่านวัสดุชั้นน้ำที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้เพอร์เมียมิตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.193 เมตร สูง 1 เมตร ขอบเขตการทดลองการไหลแบบมาตรฐานแสดงในตารางที่ 1-1

2) การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในสภาพเสมือนจริงคือการไหลในแนวรัศมี และหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลดังกล่าว โดยใช้แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ถือว่าเป็นการทดลองหลัก ขอบเขตการทดลองการไหลแบบมาตรฐานแสดงในตารางที่ 1-2

3) การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียวซึ่งไม่มีอิทธิพลของการไหลนำพา และหาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลดังกล่าว โดยใช้แบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว ขอบเขตการทดลองการไหลแบบมาตรฐานแสดงในตารางที่ 1-3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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	269.9	0.628	9.916	0.591	2.926

ตารางที่ 1-2 ขอบเขตการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี

$Q \times 10^{-4}$		$v \times 10^{-3}$		Re'		การไหลเข้า (Converging flow)				การไหลออก (Diverging flow)			
						h_w		$h_{0/L}$		h_w		$h_{0/L}$	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0.4	23.1	0.2	65.0	0.7	677.7	1.155	1.326	1.176	7.430	0.654	11.993	0.632	5.838

ตารางที่ 1-3 ขอบเขตการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว

$Q \times 10^{-4}$		$v \times 10^{-3}$		Re'		การไหลเข้า (Converging flow)				การไหลออก (Diverging flow)			
						h_w		$h_{0/L}$		h_w		$h_{0/L}$	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0.4	6.1	1.8	29.3	7.0	176.5	1.193	1.306	1.326	8.322	1.309	8.596	1.171	1.509

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

v คือ ความเร็วเฉลี่ยการไหลผ่านตัวกลาง (ม./วินาที)

Re' คือ ค่าเรย์โนลด์ที่คิดจากความเร็วการไหลจริง

h_D คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดจุดล่างของเพอร์เมียมิตอร์ (ม.)

h_U คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดจุดบนของเพอร์เมียมิตอร์ (ม.)

h_w คือ ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล (ม.)

$h_{0/L}$ คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันในชั้นน้ำที่ไกลจากบ่อน้ำบาดาลที่สุด (ม.)

1.4 การดำเนินงานศึกษา

ในการดำเนินงานศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์และขอบข่ายการศึกษา มีขั้นตอนการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 1-1 ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาบททวนหลักการทฤษฎีต่างๆ และการศึกษาที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อทำการเติมน้ำและสูบน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน และผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง
- 2) กำหนดขอบเขตของข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง เช่น ขนาดทรายที่ใช้ในการทดลอง แล้วจึงออกแบบการทดลอง
- 3) ออกแบบแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองตามขอบเขตข้อมูลที่กำหนดในข้อ 2 และวัสดุอุปกรณ์ที่มี
- 4) จัดสร้างแบบจำลอง และทำการทดสอบเครื่องมือ ตลอดจนปรับแต่งอุปกรณ์ต่างๆ ให้พร้อมสำหรับการทดลองครั้งนี้
- 5) ทดลองหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ การกระจายขนาดอนุภาค และความถ่วงจำเพาะ
- 6) ทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานทางศาสตร์ของทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอก
- 7) ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางศาสตร์ของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลทดลอง ในทรายชั้นน้ำขนาดต่างๆ โดยมีทิศทางการไหลทั้งในแนวรัศมีและในทิศทางเดียว
- 8) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลกับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง
- 9) สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ได้ พร้อมข้อเสนอแนะ

1.5 การศึกษาที่ผ่านมา

การศึกษาและทดลองเรื่องการไหลของน้ำใต้ดินตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีผู้สนใจทำการศึกษาเป็นจำนวนมาก สำหรับในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ สามารถเรียบเรียงและสรุปผลการศึกษาตามลำดับเรื่องราวและเวลา ได้ดังต่อไปนี้

1.5.1 การไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน (flow through porous media)

(1.5.1.1) สมการการไหลแบบเชิงเส้น (linear flow equation)

Darcy (1856, Cox 1977)

ดาร์ซีได้ทำการทดลองการไหลของน้ำผ่านชั้นทราย และสรุปว่าอัตราการไหลของน้ำจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเฮดสูญเสีย (head loss) จากการไหลผ่านตัวกลางและเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของชั้นทรายนั่นคือ $Q \propto h_L$ 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	ขนาดประสิทธิภาพของตัวกลาง (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	Δp	คือ	ความดันที่ลดลงจากการไหลผ่านตัวกลางหนา l (ปาสคาล)
	l_e	คือ	average tortuous length ของตัวกลางหนา l (ม.)
	ϕ	คือ	ความพรุน
	A_g	คือ	พื้นที่ผิวของเม็ดดิน (ตร.ม.)
	V_g	คือ	ปริมาตรของเม็ดดิน (ลบ.ม.)
	ζ	คือ	shape factor ของเม็ดดิน (ถ้าเป็นทรงกลมจะมีค่าเท่ากับ 2)
	μ	คือ	ความหนืดพลวัตของของไหล (dynamic viscosity) (ปาสคาล-วินาที)

Fair & Hatch (1933, Sperry & Pierce 1995)

Fair และ Hatch ได้ทำการศึกษาในเรื่องดังกล่าวและพบว่า รูปร่างของอนุภาคตัวกลาง มีผลต่อค่าความนำไหลศาสตร์ 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)
	θ	คือ	particle shape factor โดยที่อนุภาคกลมมนจะมีค่า θ น้อยกว่าอนุภาคเหลี่ยม และ $6.0 < \theta < 7.7$
	f	คือ	เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทรายที่อยู่ระหว่างตะแกรงที่มีขนาดติดกัน (adjacent sieves)
	d_m	คือ	ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคทราย (ม.ม.) ของตะแกรงที่อยู่ติดกัน เช่นขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตะแกรงเบอร์ a และ b คือ $d_m = (d_a d_b)^{1/2}$
	d_a และ d_b	คือ	ขนาดช่องเปิดของตะแกรง a และ b ตามลำดับ (ม.ม.)

Carman (1937, Nazeer Ahmed 1967)

Carman ได้ศึกษาต่อจาก Kozeny พบว่า shape factor ของทรายและกรวดธรรมชาติจะมีค่าระหว่าง 2-3 และ $\frac{l}{l_0} = \sqrt{2}$ จึงได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันความดัน 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 ได้ศึกษาถึงขอบเขตในการใช้งานของสมการการไหลของดาร์ซีจาก 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.)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลาง (ก.ก./ตร.ม.)

Todd ใช้ค่าเรย์โนลด์วิกฤติแสดงขอบเขตการไหลที่สามารถการไหลของดาร์ซีได้ โดยใช้ขนาดประสิทธิผลของตัวกลาง (d_{10}) เป็นความยาวจำเพาะของการไหล และทำการทดลองกับวัสดุที่มีขนาดประสิทธิผลแตกต่างกัน และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล กับความลาดชันชลศาสตร์ จะเริ่มไม่เป็นเส้นตรงเมื่อค่าเรย์โนลด์อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1-10 หมายความว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติ จะมีค่าตั้งแต่ 1-10 นั้นเอง

Shepherd (1989)

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

$$K = cd_{50}^j \quad (1-8)$$

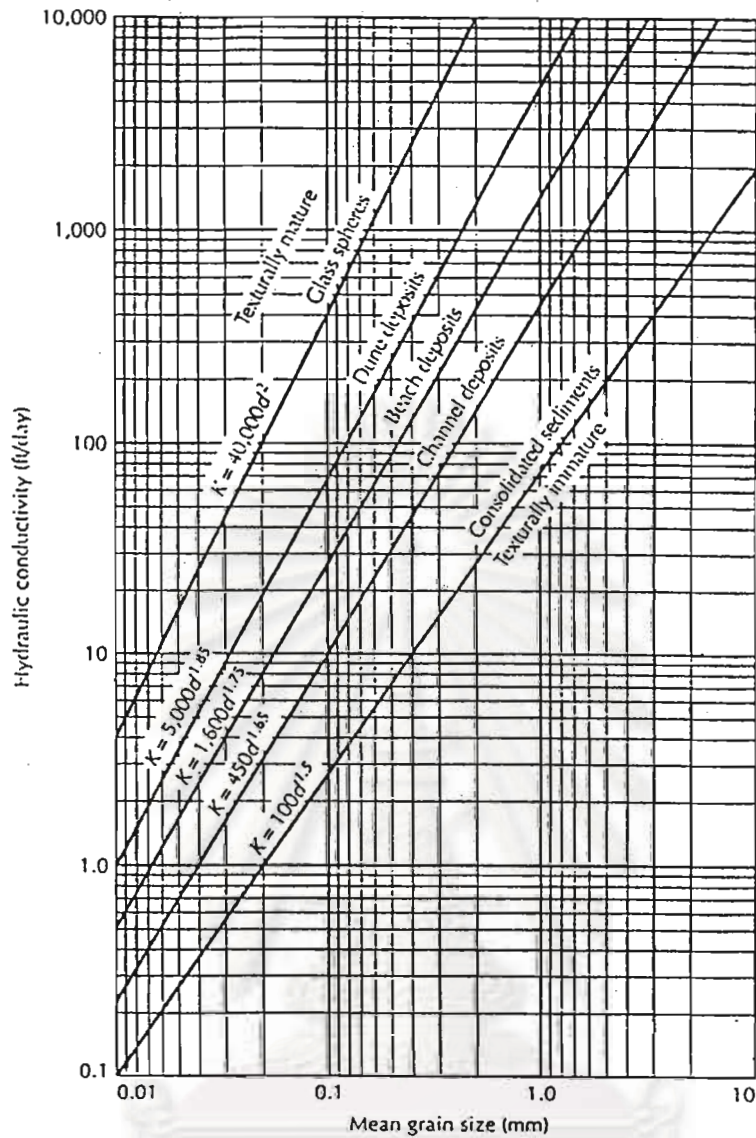
เมื่อ	K	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ฟุต/วิน)
	c	คือ	shape factor ของตัวกลางแต่ละชนิด (ดูรูปที่ 1-2)
	j	คือ	ค่ายกกำลังของตัวกลางแต่ละชนิด (ดูรูปที่ 1-2)
	d_{50}	คือ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง (ม.ม.)

Alyamani & Sen (1993)

Alyamani และ Sen ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์กับการกระจายขนาดอนุภาคตัวกลางจำนวน 32 ตัวอย่าง จากซาอุดีอาระเบียและออสเตรเลีย สรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

เมื่อ	K	คือ	ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วิน)
	I_0	คือ	จุดตัดแกน x ของเส้นที่เชื่อมระหว่างจุด d_{50} กับ d_{10} ของโค้งการกระจายขนาดอนุภาค
	d_{50}	คือ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง (ม.ม.)
	d_{10}	คือ	ขนาดประสิทธิผลของตัวกลาง (ม.ม.)



รูปที่ 1-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไหลศาสตร์ กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลาง
จากการทดลองของ Shepherd

Sperry & Pierce (1995)

Sperry และ Pierce ได้ทำการทดลองหาค่าความนำไหลศาสตร์ของลูกแก้วกลม ทราบ และเศษแก้วรูปร่างต่างๆ โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับสมการที่มีผู้ทำการศึกษามาก่อน ได้แก่ Hazen (1893) Kozeny-Carman (1937) และ Alyamani & Sen (1993) โดยพิจารณาขนาด รูปร่าง และความพรุนของอนุภาค พบว่า ขนาดอนุภาคจะมีผลต่อค่าความนำไหลศาสตร์มากที่สุด รองลงมาคือรูปร่างอนุภาค ซึ่งจะมีผลเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 0.295 มิลลิเมตร และพบว่าสมการของ Hazen จะใช้ได้กับอนุภาคที่มีรูปร่างปกติ

(1.5.1.2) สมการการไหลแบบไม่เชิงเส้น (non-linear flow equation)

ในการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน เมื่อความเร็วการไหลสูงขึ้นจนเลยขอบเขตที่ใช้สมการของดาร์ซี หรือการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์มากกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับความชันชลศาสตร์ไม่เป็นเส้นตรง จึงมีผู้ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับความชันชลศาสตร์ ดังนี้

Forchheimer (1901, Cox 1977)

Forchheimer ได้เสนอสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความชันชลศาสตร์และความเร็วการไหลเมื่อเป็นการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังต่อไปนี้

$$I = av + bv^2 \quad (1-10)$$

เมื่อ	I	คือ	ความชันชลศาสตร์
	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 ผ่านตัวกลางที่มีเนื้อเดียวและอิมพัคด้วยน้ำ 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 α และ β 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 (ม.^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 “เพอร์เมียมิตอร์การไหลแบบรัศมี” (radial flow permeameter) เพื่อทำการทดสอบว่าสมการของ Forchheimer สามารถใช้กับการไหลผ่านตัวกลางในแนวรัศมีได้หรือไม่ เนื่องจากการไหลในแนวรัศมีจะมีความเร็วการไหลไม่คงที่ จากผลการทดลองพบว่าสมการของ Forchheimer จะสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี แต่ค่า a และ b ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคตัวกลางเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความพรุนด้วย เพื่อกำจัดความยุ่งยากดังกล่าว จึงได้เสนอสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันชลศาสตร์ กับความเร็วการไหลในแนวรัศมี ในกรณีที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้การวิเคราะห์หน่วย พบว่า

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

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

เมื่อ	ϕ_1	คือ	ค่าคงที่ จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง แต่ไม่ขึ้นกับขนาดของตัวกลางและความพรุน
	v	คือ	ความเร็ว ณ จุดที่ต้องการหาค่าความชันชลศาสตร์ (ม./วินาที)
	r	คือ	รัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius) (ม.)
	e	คือ	อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)
	s_0	คือ	พื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดดิน (specific surface) มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของเม็ดดิน ต่อปริมาตรของเม็ดดิน (ม. ⁻¹)

(1.5.1.3) ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทาน (friction factor) กับค่าเรย์โนลด์ จากการไหลในท่อกลางที่มีขนาดสม่ำเสมอ

เนื่องจากการนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วการไหล กับค่าความลาดชันชลศาสตร์ไปใช้ทำได้ไม่ค่อยสะดวก จึงได้มีผู้ทำการศึกษาเพื่อหาตัวแปรไร้หน่วย ที่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยใช้เทอมของแฟคเตอร์เสียดทาน (f) และค่าเรย์โนลด์ (Re) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ ในลักษณะเดียวกับ Moody diagram ของการไหลในท่อ นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าเรย์โนลด์วิกฤต จากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ได้ ซึ่งก็คือจุดที่กราฟเริ่มหักเหจากแนวเส้นตรง

Todd (1959)

Todd ได้ใช้ขนาดประสิทธิผลเป็นความยาวจำเพาะของการไหล ในการหาค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ของการไหลผ่านท่อกลาง และได้นิยามเทอมของ แฟคเตอร์เสียดทาน ไว้ดังนี้

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

เมื่อ Δp คือ ผลต่างของความดัน (ปาสคาล) เมื่อมีการไหลผ่านท่อกลางในช่วงความยาว L (ม.)

v คือ ความเร็วการไหลผ่านท่อกลาง (ม./วินาที)

และจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ เมื่อใช้ขนาดประสิทธิผลเป็นความยาวจำเพาะของการไหลแล้ว ความสัมพันธ์ที่ได้จะไม่ชัดเจน ก่อนข้างกระดาษกระจาย

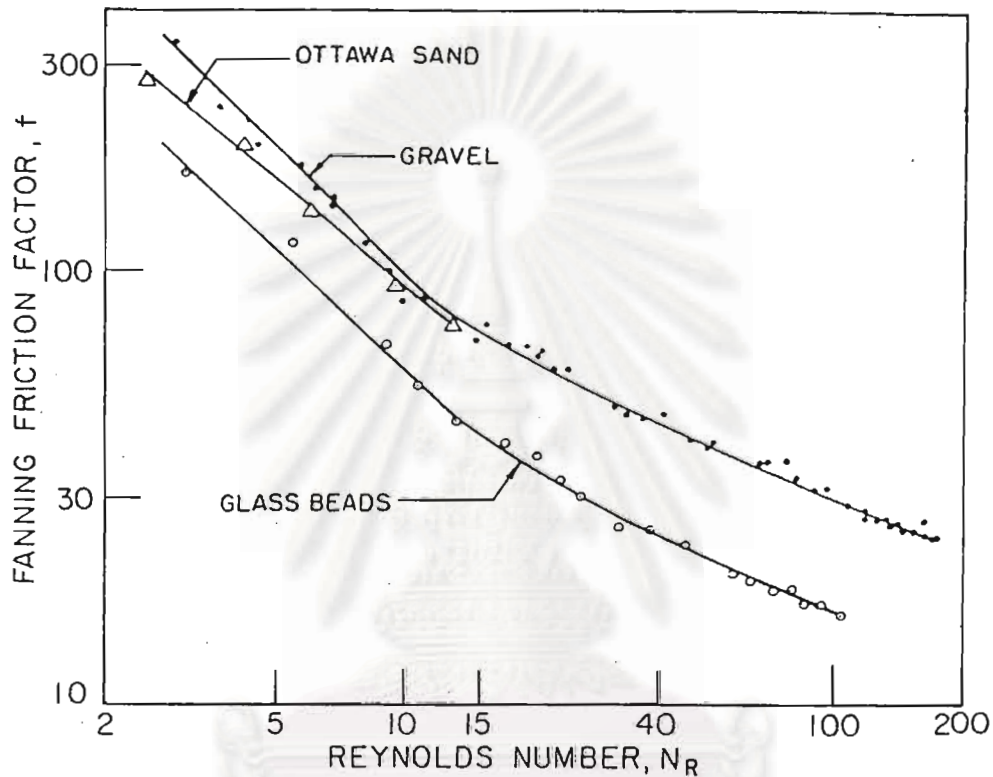
Mobasherri & Todd (1963)

Mobasherri และ Todd ได้ทำการทดลองการไหลผ่านท่อกลางที่มีความพรุนในเพอร์เมียมิตอร์ โดยใช้ทรายอัดตัว (0.25-0.83 มม.) ลูกแก้ว (3 มม.) และกรวด (2.36-9.54 มม.) เป็นท่อกลาง และหาความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ โดยใช้ขนาดอนุภาคทรายเฉลี่ยเป็นความยาวจำเพาะของการไหล จึงนิยามแฟคเตอร์เสียดทาน และค่าเรย์โนลด์ ดังนี้

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

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

ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ N_R แสดงดังรูปที่ 1-3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติที่การไหลเปลี่ยนจากแบบเชิงเส้นเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 15



รูปที่ 1-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

จากการทดลองของ Mobasher และ Todd

Nazeer Ahmed (1967)

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

$$I = \left(\frac{\mu}{\rho g k}\right)v + \left(\frac{1}{g\sqrt{ck}}\right)v^2 \quad (1-29)$$

$$\text{หรือ } I = \left(\frac{\mu}{\rho g d^2}\right)v + \left(\frac{1}{g d}\right)v^2 \quad (1-30)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 1-28 ใหม่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$I g \frac{c d}{v^2} = \frac{\mu}{\rho v d} + 1 \quad (1-31)$$

$$\text{โดย แฟคเตอร์เสียดทาน } f = \frac{I g c d}{v^2} \quad (1-32)$$

$$\text{และ ค่าเรย์โนลด์ } Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1-33)$$

เมื่อนำผลการทดลองการไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุน ทั้งจากการทดลองที่เคยทำมา และจากการทดลองที่ทำเพิ่มอีก 6 ตัวอย่าง พบว่าสมการ $f = \frac{1}{R_e} + 1$ จะสอดคล้องกับผลการทดลอง และในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง f กับ Re คือ $f = \frac{1}{R_e}$ โดยที่ค่าเรย์โนลด์วิกฤติมีค่าเท่ากับ 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

Dinoy (1971)

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

$$f_k = \frac{1}{R_k} + 100 \left(\frac{d_m}{\sqrt{k} / \phi} \right)^{-1.50} \quad (1-34)$$

$$\text{โดย แฟคเตอร์เสียดทาน } f_k = \frac{I g \sqrt{k}}{v^2} \quad (1-35)$$

$$\text{และ ค่าเรย์โนลด์ } R_k = \frac{\rho v \sqrt{k}}{\mu} \quad (1-36)$$

เมื่อ	k	คือ	ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (ซ.ม. ²)
	d_m	คือ	ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคตัวกลาง (ซ.ม.)
	ϕ	คือ	ความพรุนของตัวกลาง

โดยที่เทอม $(\frac{d_m}{\sqrt{k/\phi}})$ ดัดแปลงมาจากอัตราส่วนระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคตัวกลาง กับรัศมีไฮดรอลิกของช่องว่างในตัวกลาง ซึ่งเปรียบเสมือนอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผิวในท่อ กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่ใช้ใน Moody diagram

Das Gupta (1973)

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

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad f_k = \frac{1}{R_k} \quad (1-37)$$

$$\text{การไหลแบบเปลี่ยนแปลง} \quad f_k = \frac{1}{R_k} + 325.56 \left(\frac{d_m}{\sqrt{k}}\right)^{-1.68} \quad (1-38)$$

$$\text{การไหลแบบปั่นป่วน} \quad f_k = 325.56 \left(\frac{d_m}{\sqrt{k}}\right)^{-1.68} \quad (1-39)$$

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

โดยมีสมมุติฐานว่าค่า a ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวและค่า k ในขณะที่ค่า b ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความพรุนของตัวกลาง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$d = \frac{b}{a} v \quad (1-40)$$

$$c = \frac{a}{b^2 g v} \quad (1-41)$$

$$c_w = \frac{d}{\sqrt{k}} \quad (1-42)$$

$$c_w \sqrt{c} = 1 \quad (1-43)$$

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 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{lg\sqrt{k}}{v^2} = \frac{\mu}{\rho v \sqrt{k}} + \frac{d}{\sqrt{k}} \quad (1-44)$$

$$\text{หรือ} \quad f_k = \frac{1}{R_k} + \frac{d}{\sqrt{k}} \quad (1-45)$$

เมื่อลองนำผลการทดลองในอดีตมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_k กับ R_k พบว่าสอดคล้องกับสมการที่ 1-45 และพบว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Rk_{cr}) มีค่าอยู่ในช่วง 2-5 และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rk_{cr} กับ $\frac{d}{\sqrt{k}}$ ได้ดังนี้

$$Rk_{cr} = \frac{0.17}{(d/\sqrt{k})^{1.1}} \quad (1-46)$$

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5.2 การไหลของน้ำใต้ดินสู่บ่อน้ำบาดาล

Huyakorn & Dudgeon (1976)

Huyakorn และ Dudgeon ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดิน จากชั้นน้ำแบบเปิดและชั้นน้ำภายใต้แรงดันเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลที่ไม่มีกรวดกรู ในลักษณะที่เกิดการไหลแบบ two-regime well flow คือ บริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาลเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ในขณะที่บริเวณที่ไกลออกมาเกิดการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อจำลองสภาพการไหลที่เกิดขึ้น โดยสมการที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนคือ สมการของ Forchheimer ในกรณีที่ชั้นน้ำภายใต้แรงดัน และบ่อน้ำบาดาลมีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ในสมการของ Forchheimer หาได้จาก type curve ที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะน้ำลดในบ่อสูบน้ำบาดาล และตัวแปรอื่นๆ ที่อยู่ในรูปไร้หน่วย ดังนี้

$$\frac{2\pi sT}{Q} = f\left(\frac{r}{r_o}, \lambda, \xi, \frac{r_{cr}}{r_o}\right) \quad (1-47)$$

$$\text{โดยที่} \quad \lambda = \frac{bQT}{2\pi m^2 r_o} \quad (1-48)$$

$$\xi = \frac{bv_{cr}}{a} \quad (1-49)$$

เมื่อ	s	คือ	ระยะน้ำลดในบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	T	คือ	ความสามารถในการส่งผ่านของชั้นน้ำ (transmissivity) (ฟุต ² /นาที่)
	Q	คือ	อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (ลบ.ฟุต/นาที่)
	r	คือ	ระยะทางในแนวรัศมีจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	r_w	คือ	รัศมีบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	r_o	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 ($r_{cr} \leq r \leq r_o$) สมการที่ 1-47 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{2\pi sT}{Q} = \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) \quad (1-50)$$

ในช่วงที่การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ($r_w < r < r_{cr}$) สมการที่ 1-47 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{2\pi sT}{Q} = \ln\left(\frac{r_o}{r_{cr}}\right) + \frac{1}{1+\xi} \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \lambda\left(\frac{r_o}{r} - \frac{r_o}{r_{cr}}\right) \quad (1-51)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของโค้งน้ำลด (drawdown curve) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลที่ได้จากการทดลองในแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน 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 ได้แก่ ใช้ได้กับบ่อน้ำบาดาลทั้งประเภทที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ (fully penetrated well) และประเภทที่มีท่อกรองบางส่วน (partially penetrated well) ที่มีหรือไม่มีกรวดกรุบ่อน้ำบาดาล และใช้ได้ทั้งสภาวะคงตัว (steady state) และสภาวะไม่คงตัว (unsteady state) แต่ก็มีข้อจำกัดในการจำลองสภาพการไหลคือ การไหลที่เกิดขึ้นต้องเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนอย่างใดอย่างหนึ่ง (ไม่สามารถจำลองกรณี two-regime well flow) และได้วิเคราะห์ผลของการไหลแบบปั่นป่วน การกรวดกรวด และลักษณะของบ่อที่มีผลต่อประสิทธิภาพของบ่อน้ำบาดาล

Williams (1985)

Williams ได้ทำการสร้าง sand tank model สำหรับทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดิน จากชั้นน้ำภายใต้แรงดันเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล โดยใช้ทรายชั้นน้ำ กรวดกรวด และท่อกรองขนาดต่างๆ เพื่อหาว่าควรจะทำแบบบ่อน้ำบาดาลอย่างไร ให้เหมาะสมกับกรวดกรวดและทรายชั้นน้ำ คือให้เกิดเสถียรที่สุดจากการไหลน้อยที่สุด ในการศึกษาได้ทำการหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ เพื่อ

นำไปหารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (critical well radius) ซึ่งค่าเรย์โนลด์ตริกฤติจะหาจากความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์ กับค่าเรย์โนลด์ ดังนี้

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad l = \frac{dh}{dr} = \text{Re} \frac{v^2}{gkd_{50}} \quad (1-52)$$

$$\text{การไหลแบบปั่นป่วน} \quad l = \frac{dh}{dr} = a_2 \frac{v^2 \text{Re}^2}{gkd_{50}} \quad (1-53)$$

$$\text{และ ค่าเรย์โนลด์} \quad \text{Re} = \frac{vd_{50}}{v} \quad (1-54)$$

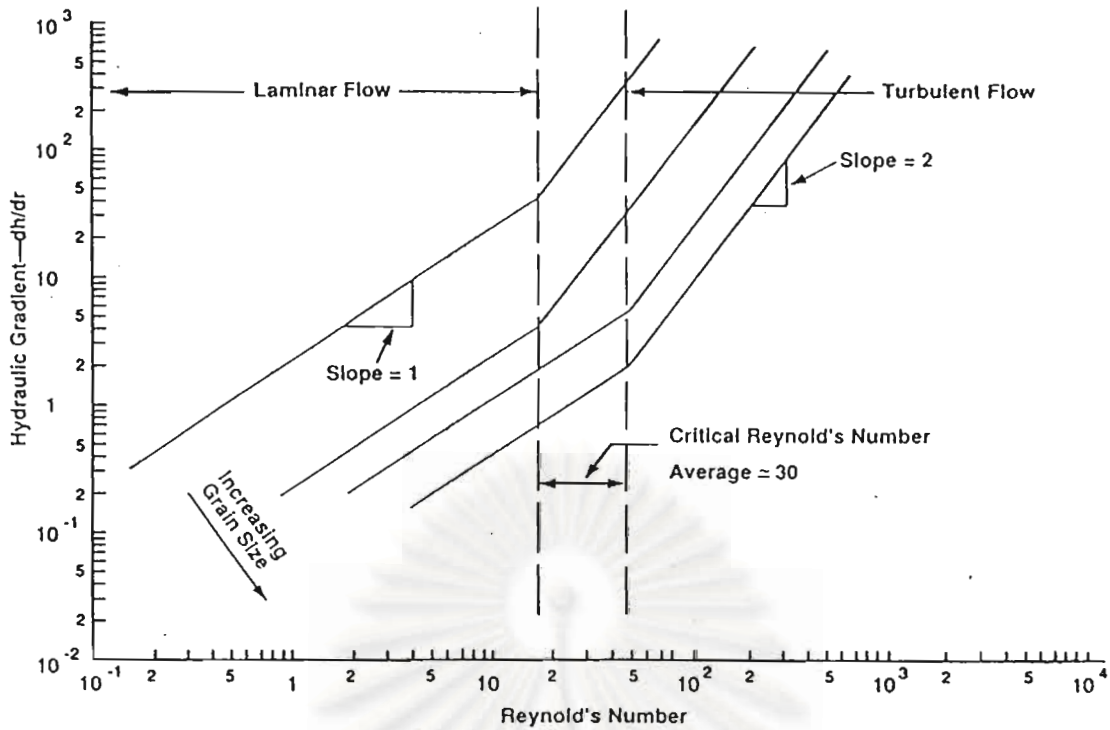
จากสมการที่ 1-52 และ 1-53 เมื่อนำ l และ Re ไปหาความสัมพันธ์ ในกระดาศล็ค-ล็ค จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นความสัมพันธ์ l - Re มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ และจะเท่ากับ 2 เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเรย์โนลด์ตริกฤติ คือจุดที่ความสัมพันธ์ของเส้นความสัมพันธ์ l - Re เปลี่ยนจาก 1 เป็น 2 นั่นเอง

จากผลการทดลองในกรวดกรู 4 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 1-4 พบว่าค่าเรย์โนลด์ตริกฤติ มีค่าประมาณ 30 และได้เสนอสมการที่ใช้หารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล เมื่อค่าเรย์โนลด์ตริกฤติมีค่าเท่ากับ 30 และเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดลองเท่ากับ 15 องศา ความหนืดเปรียบเทียบจะมีค่าเท่ากับ 1.233×10^{-5} ฟุต²/วินาที ดังนี้

$$r_c = 0.0377 \frac{(Q/b)d_{50}}{\phi} \quad (1-55)$$

เมื่อ	r_c	คือ	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (ฟุต)
	Q	คือ	อัตราการสูบน้ำ (แกลลอน/นาที)
	b	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (ฟุต)
	ϕ	คือ	ความพรุนของทรายชั้นน้ำ

และได้เสนอว่าต้องออกแบบบ่อน้ำบาดาลที่ทำให้รัศมีบ่อมากกว่าค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล เพื่อที่จะลดเสดสูญเสียน้ำที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนใกล้ๆ กับบ่อน้ำบาดาล



รูปที่ 1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์ กับค่าเรย์โนลด์ จากการทดลองของ Williams

1.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูบน้ำและการเติมน้ำ

Mobasher & Todd (1963)

Mobasher และ Todd ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการสูบน้ำและเติมน้ำด้วยแรงดันผ่านบ่อน้ำบาดาลทดลอง ในแบบจำลองชั้นน้ำภายใต้แรงดันรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 45 องศา ยาว 3 ฟุต และหนา 3 นิ้ว ทั้งในกรณีที่มีกรวดกรูบ่อและไม่มีกรวดกรูบ่อ โดยใช้ทรายอืดตาวา ลูกแก้ว และกรวด แทนวัสดุชั้นน้ำ ด้วยอัตราการไหลในช่วง 20-100 แกลลอน/นาทีก (0.001-0.006 ลูกบาศก์เมตร/วินาที) ทำให้เกิดผลต่างของระดับความดันในบ่อน้ำบาดาลและระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันสุดท้ายในชั้นน้ำ (24.5 นิ้วจากผิวบ่อน้ำบาดาล) มากที่สุด 12 นิ้วของน้ำ การศึกษาพบว่าถ้าอัตราการสูบน้ำและอัดเติมน้ำต่ำจนทำให้เกิดการไหลของน้ำใต้ดินเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) เพียงอย่างเดียวแล้ว จะได้เฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการไหลในชั้นน้ำ (aquifer loss) เท่ากันทั้งการสูบน้ำและการเติมน้ำด้วยอัตราเดียวกัน แต่เมื่ออัตราการสูบน้ำและการเติมน้ำสูงขึ้นจนเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) พบว่าเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการเติมน้ำจะมีค่าสูงกว่าการสูบน้ำ แต่ค่าจะต่างกันไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปว่าสมการการไหลของน้ำใต้ดินที่ใช้กับการสูบน้ำสามารถใช้กับการเติมน้ำได้ แต่การทดลองไม่คำนึงถึงความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลซึ่งเกิดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

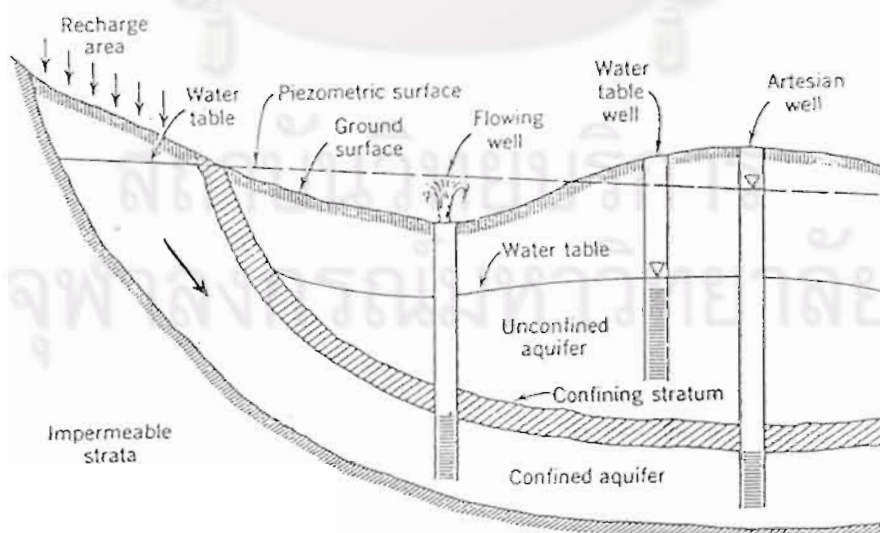
บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งใช้ในการศึกษาคำนี้ โดยมีรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไป

2.1 นิยามของชั้นน้ำ

1) ชั้นน้ำ (aquifer) หมายถึง ชั้นดินหรือหินที่มีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาค ซึ่งมีน้ำในปริมาณมากพอที่จะพัฒนาขึ้นมาใช้ได้โดยการขุดบ่อหรือเจาะบ่อน้ำบาดาล โดยส่วนมากวัสดุชั้นน้ำจะประกอบด้วยทรายและกรวด แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) และชั้นน้ำแบบเปิด (unconfined aquifer)

2) ชั้นน้ำภายใต้แรงดัน หมายถึง ชั้นน้ำที่ถูกปิดทับด้วยชั้นที่บดน้ำทั้งด้านบนและด้านล่าง จึงเป็นชั้นน้ำที่อยู่ภายใต้แรงดัน เมื่อทำการเจาะบ่อน้ำบาดาลแรงดันดังกล่าวจะดันให้น้ำขึ้นสูงจนถึงระดับที่สมดุล เรียกว่า "ระดับความดัน" (piezometric head) ดังแสดงในรูปที่ 2-1

3) ชั้นน้ำแบบเปิด หมายถึง ชั้นน้ำที่มีชั้นที่บดน้ำรองรับอยู่ด้านล่างเพียงด้านเดียว โดยมีผิวน้ำด้านบนในชั้นน้ำแบบเปิดนี้ มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเรียกระดับน้ำนี้ว่า "ระดับน้ำใต้ดิน" (water table) ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ลักษณะของชั้นน้ำ

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

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

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

เมื่อ d_{10} คือ ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 10 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)

d_{30} คือ ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 30 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)

d_{60} คือ ขนาดเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ 60 เปอร์เซ็นต์ (ม.ม.)

โดยที่ดินที่มีขนาดคละกัันดี (well graded soil) ซึ่งมีค่า C_u และ C_c ดังนี้

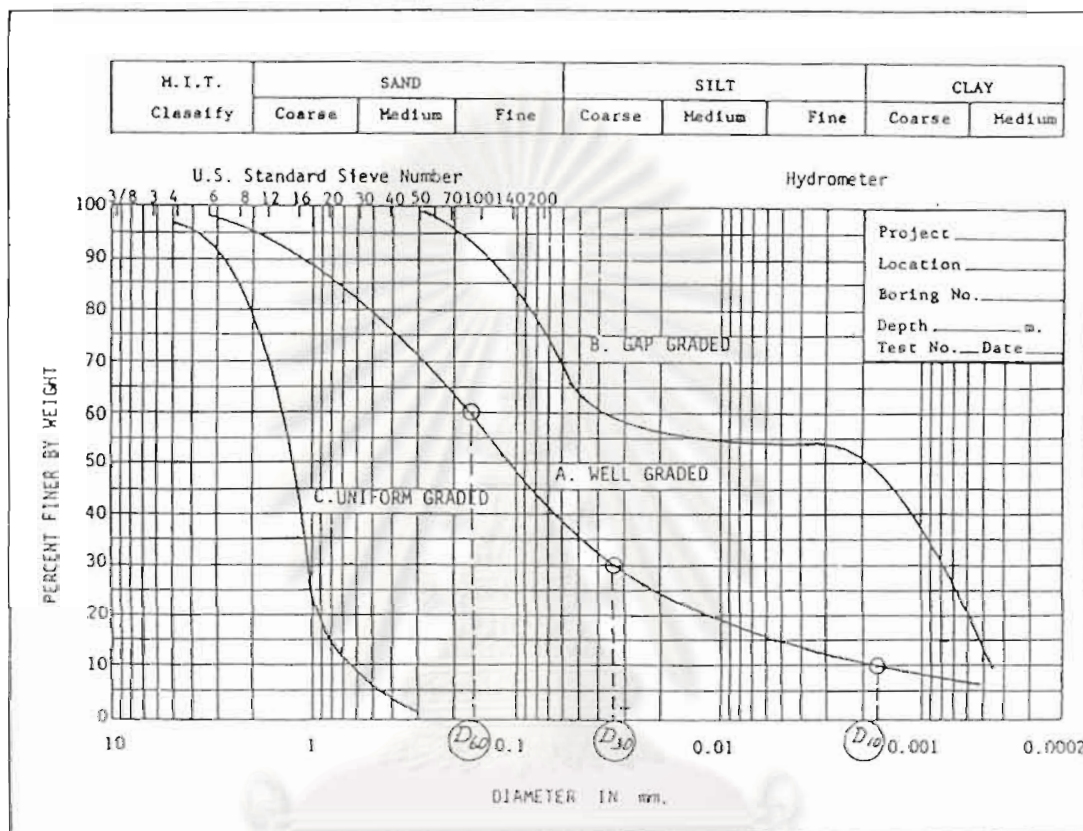
ชนิดของดิน	C_u	C_c
กรวด	> 4	ตั้งแต่ 1 - 3
ทราย	> 6	ตั้งแต่ 1 - 3

สำหรับดินที่มีขนาดคละกัันไม่ดี (poorly graded soil) แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ดินที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform graded soil) หมายถึง เม็ดดินที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่
- ดินที่มีขนาดขาดช่วง (gap graded soil) หมายถึง เม็ดดินที่มีขนาดเล็กและใหญ่ แต่ไม่มีขนาดกลาง

2) ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (specific gravity of soil)

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน หมายถึง อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของเม็ดดิน ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณปริมาณช่องว่าง ความพรุน ความอิ่มตัว และความหนาแน่นของเม็ดดินได้



รูปที่ 2-2 โค้งการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve)

3) ความพรุน (porosity)

ความพรุน หมายถึง เปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มีอยู่ในปริมาตรทั้งหมด ซึ่งถ้าหากเป็นชั้นดินที่อิ่มตัว ช่องว่างนี้จะเต็มไปด้วยน้ำ นั่นคือ

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

โดยที่ ϕ 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.)
ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของเม็ดดิน (เท่ากับ $S \times 1000$) (ก.ก./ลบ.ม.)
S	คือ	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

4) อัตราส่วนช่องว่าง (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 และมีความสัมพันธ์กับความพรุน (ϕ) ดังนี้

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

2.3 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ (hydraulic properties of aquifer materials)

ค่าความสามารถของการให้น้ำซึมผ่านได้ของวัสดุชั้นน้ำชั้นน้ำ 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 โดยมีสมการในรูปทั่วไป ดังต่อไปนี้

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

$$\text{หรือ} \quad k = f_s f_\alpha d^2 \quad (2-8)$$

เมื่อ	k	คือ	ความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติ (ม. ²)
	c	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ไร้หน่วยของตัวกลาง
	f _s	คือ	ปัจจัยเกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาคตัวกลาง (grain shape factor)
	f _α	คือ	ปัจจัยเกี่ยวกับความพรุนของอนุภาคตัวกลาง (porosity factor)
	d	คือ	ความยาวจำเพาะการไหล (ม.)

และค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ตามธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับค่าความนำชลศาสตร์ ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ	μ	คือ	ความหนืดพลวัตของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางชั้นน้ำ (ปาสคาล-วินาที)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลางชั้นน้ำ (ก.ก./ลบ.ม.)

3) ความสามารถในการส่งผ่าน (transmissivity)

ความสามารถในการส่งผ่าน หมายถึง อัตราการไหลของน้ำในชั้นน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของชั้นน้ำ ภายใต้หนึ่งหน่วยความชันชลศาสตร์ ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ	T	คือ	ความสามารถในการส่งผ่าน (ม. ² /วินาที)
	m	คือ	ความหนาของชั้นน้ำที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ม.)

2.4 ชนิดของการไหลและพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดิน

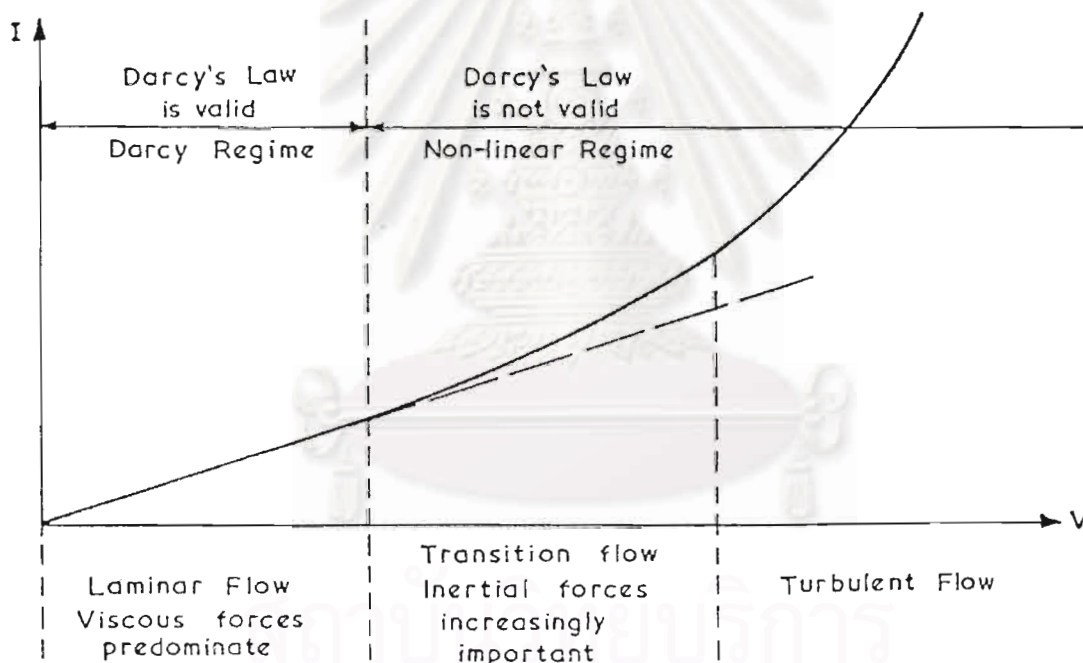
เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดิน ในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน เสมือนกับการไหลเต็มท่อของของไหล ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชนิดของการไหลออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) คือ การไหลที่อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ นั่นคือมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการไหลโดยใช้สมการของดาร์ซี การไหลในช่วงนี้จะเรียกว่า "การไหลแบบเชิงเส้น" (Darcy regime or linear flow regime)

2) การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) คือ การไหลที่อนุภาคของน้ำมีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีความปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วในการไหลสูง

3) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (transition flow) คือ การไหลที่มีสภาพอยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลชนิดที่ 2 และ 3 จะไม่สามารถอธิบายลักษณะการไหลโดยใช้สมการของดาร์ซีได้ จึงเรียกการไหลในช่วงนี้ว่า "การไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น" (non-linear flow regime) ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 การแบ่งชนิดของการไหล

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)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลาง (ก.ก./ลบ.ม.)
	μ	คือ	ความหนืดพลวัตของของไหล (ปาสคาล-วินาที)
	ν	คือ	ความหนืดเปรียบเทียบ (kinematic viscosity) ของของไหล (ม. ² /วินาที)

ในกรณีการไหลผ่านตัวกลางที่เกิดขึ้นจริง จะต้องพิจารณาผลของความพรุนของตัวกลางด้วย ดังนั้นสมการที่ 2-11 จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

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

เมื่อ	Re'	คือ	ค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหลจริง
	ϕ	คือ	ความพรุนของตัวกลาง
	$\frac{v}{\phi}$	คือ	ความเร็วจริงในการไหลผ่านตัวกลาง (seepage velocity) (ม./วินาที)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d_{50}) เป็นค่าความยาวจำเพาะของการไหล เนื่องจากความยาวจำเพาะการไหลหรือระยะทางที่น้ำไหลผ่านอนุภาค วัดได้ยากมาก ผู้ทำการศึกษาที่ผ่านมามากมาย เช่น Mobasher & Todd(1963) Williams(1985) จึงใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})เป็นตัวแทนของความยาวจำเพาะการไหล ดังนั้นสมการที่ 2-12 จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

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

พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลของน้ำใต้ดินในที่นี้จะหมายถึง สภาพการไหลและเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหล ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความเร็วการไหล ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านของวัสดุชั้นน้ำ เป็นต้น โดยปกติการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินจะเคลื่อนที่ค่อนข้างช้า การไหลที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบราบเรียบ จึงใช้สมการการไหลของดาร์ซีเพื่ออธิบายพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหลได้ แต่สำหรับบริเวณที่การไหลมีความเร็วสูง เช่น บริเวณบ่อน้ำบาดาลที่มีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นไปใช้ จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งไม่สามารถใช้สมการการไหลของดาร์ซีอธิบายได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลและความชันชลศาสตร์ไม่เป็นเส้นตรง อนึ่งการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล จะมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของการไหลตามทิศทางการไหล ดังต่อไปนี้

1) การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (converging well flow) หรือกรณีสูบน้ำ (pumping condition) น้ำจะไหลออกจากชั้นน้ำสู่เข้าสู่บ่อน้ำบาดาล โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดการไหล จากการไหลแบบราบเรียบ เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงและการไหลแบบปั่นป่วนตามลำดับ

2) การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล (diverging well flow) หรือกรณีเติมน้ำ (recharging condition) น้ำจะไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลขยายเข้าสู่ชั้นน้ำ โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดการไหล จากการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงและการไหลราบเรียบตามลำดับ

2.5 สมการการไหลของน้ำผ่านตัวกลางที่มีความพรุน

2.5.1 สมการการไหลแบบเชิงเส้น

เมื่อน้ำไหลผ่านตัวกลางที่มีความพรุนด้วยความเร็วการไหลต่ำจะเกิดการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับความลาดชันชลศาสตร์ได้ด้วยสมการของดาร์ซี ดังนี้

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

เมื่อ v คือ ความเร็วการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นความเร็วเฉลี่ย โดยคำนวณจากอัตราการไหลและพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่าน (ม./วินาที)

K คือ ค่าความนำชลศาสตร์ (ม./วินาที)

I คือ ค่าความลาดชันชลศาสตร์

แต่ถ้าพิจารณาผลของความพรุนของตัวกลาง จะได้สมการของดาร์ซีในรูปต่อไปนี้

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

เมื่อ ϕ คือ ความพรุนของตัวกลาง

K' คือ ค่าความนำชลศาสตร์ที่คิดจากความเร็วจริงในการไหล (ม./วินาที)

เนื่องจากสมการที่ 2-14 และ 2-15 ได้มาจากการทดลองการไหลในลักษณะของการไหลแบบขนาน (parallel flow) หรือการไหลในทิศทางเดียว (unidirectional flow) ที่สภาวะคงตัว แต่ถ้าการไหลยังไม่อยู่ในสภาวะคงตัว คือ ยังมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหล จะต้องพิจารณาผลของสภาวะที่ไม่คงตัว นอกจากนี้ในการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล จะเป็นการไหลในแนวรัศมีไม่ใช่การไหลแบบขนาน ซึ่งจะได้รับอิทธิพลของการไหลนำ

พา (convective) ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของสภาวะการไหล และรูปแบบการไหล สมการที่ 2-15 จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

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

เมื่อ c_1' คือ สัมประสิทธิ์การไหลไม่คงตัว (unsteady coefficient)

c_2' คือ สัมประสิทธิ์การไหลนำพา (convective coefficient)

เทอม $c_1' \frac{\partial(v/\phi)}{\partial t}$ เป็นผลของสภาวะไม่คงตัว ถ้าเป็นการไหลแบบคงตัวเทอมนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ และเทอม $c_2' \frac{1}{g} \frac{v}{\phi} \frac{\partial(v/\phi)}{\partial x}$ เป็นผลของรูปแบบการไหล ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลองการไหลที่สภาวะคงตัว และมีรูปแบบการไหลใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การไหลในทิศทางเดียวและการไหลในแนวรัศมี ดังนั้นสมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบเชิงเส้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงอยู่ในรูปแบบดังนี้

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

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

โดยที่ I จะมีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลและเป็นลบเมื่อเป็นการไหลออก

และ K_1' คือ ค่าความนำชลศาสตร์ของการไหลในทิศทางเดียว (ม./วินาที)

K_2' คือ ค่าความนำชลศาสตร์ของการไหลในแนวรัศมี (ม./วินาที)

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

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

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

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 2-18 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 จนเลยขอบเขตการไหลแบบราบเรียบนั่นคือการไหลแบบไม่เชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลกับความชันชลศาสตร์จะอธิบายได้ด้วยสมการของ Forchheimer (สมการที่ 1-10) และสมการของ Missbach (สมการที่ 1-11) หรือสมการอื่นๆ แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Dudgeon (1966) พบว่าสมการของ Forchheimer ใช้ได้ดีที่สุด เนื่องจากสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาหลายๆ การทดลอง ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงใช้สมการของ Forchheimer มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลกับความลาดชันชลศาสตร์ เมื่อการไหลเป็นแบบไม่เชิงเส้น และเมื่อพิจารณาผลของความพรุน สภาวะการไหล และรูปแบบการไหล สมการของ 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

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะทำการทดลองการไหลที่สภาวะคงตัว และมีรูปแบบการไหล 2 ลักษณะ ได้แก่ การไหลในทิศทางเดียว และการไหลในแนวรัศมี ซึ่งสมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

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

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

โดยที่ I จะมีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลและเป็นลบเมื่อเป็นการไหลออก

- และ a_1' b_1' คือ พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ของการไหลในทิศทางเดียว ตามลำดับ
- a_2' b_2' คือ พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซีของการไหลในแนวรัศมีตามลำดับ
- c_2' คือ สัมประสิทธิ์การไหลนำพา (convective coefficient)

2.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ และการหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ

ในการแบ่งประเภทการไหลว่าเป็นการไหลแบบเชิงเส้น หรือการไหลแบบไม่เชิงเส้น ให้พิจารณาจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนรูปแบบการไหล จากการศึกษาที่ผ่านมา มีวิธีการในการหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ 2 วิธี ได้แก่

1) หากจากกราฟความสัมพันธ์ในกระดาดาล็อก-ล็อกระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แฟคเตอร์เสียดทานที่นิยามโดย Mobasher & Todd (สมการที่ 1-23) เนื่องจากใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลางเป็นความยาวจำเพาะการไหลเหมือนกัน และเมื่อคำนึงถึงความเร็วการไหลจริง แฟคเตอร์เสียดทานจึงมีรูปสมการดังนี้

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

- เมื่อ f' คือ แฟคเตอร์เสียดทาน ที่คิดจากความเร็วกการไหลจริง
- Δp คือ ผลต่างของความดัน เมื่อมีการไหลผ่านตัวกลางในช่วงความยาว L

และ $\Delta p = \rho g \Delta h$ เมื่อ Δh คือความต่างของเฮดหรือระดับความดัน เมื่อจัดอยู่ในรูปความลาดชันชลศาสตร์ $\left(\frac{\Delta p}{L} = \rho g \frac{\Delta h}{L} = \rho g I\right)$ จะได้สมการต่อไปนี้

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

จากค่าเรย์โนลด์ที่หาได้จากสมการ $Re' = \left(\frac{V}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{\nu}\right)$ (สมการที่ 2-13) และจากการศึกษาที่ผ่านมาแบ่งความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์เป็น 3 ช่วงตาม

ชนิดการไหล ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีรูปสมการตามชนิดการไหล ดังนี้

- การไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ จะเป็นเส้นตรง มีรูปความสัมพันธ์ดังนี้

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

- การไหลแบบเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์จะเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรง มีรูปความสัมพันธ์ดังนี้

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

- การไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเกิดการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ ค่าเรย์โนลด์จะมีค่าสูงมาก เมื่อพิจารณาสมการที่ 2-25 เทอม $\frac{A}{Re'}$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น

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

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ ที่หาได้จากการทดลอง

เนื่องจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ คือ ค่าเรย์โนลด์ ณ จุดที่การไหลเริ่มไม่เป็นไปตามสมการของดาร์ซีหรือจุดที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง นั่นคือจุดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์เริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง

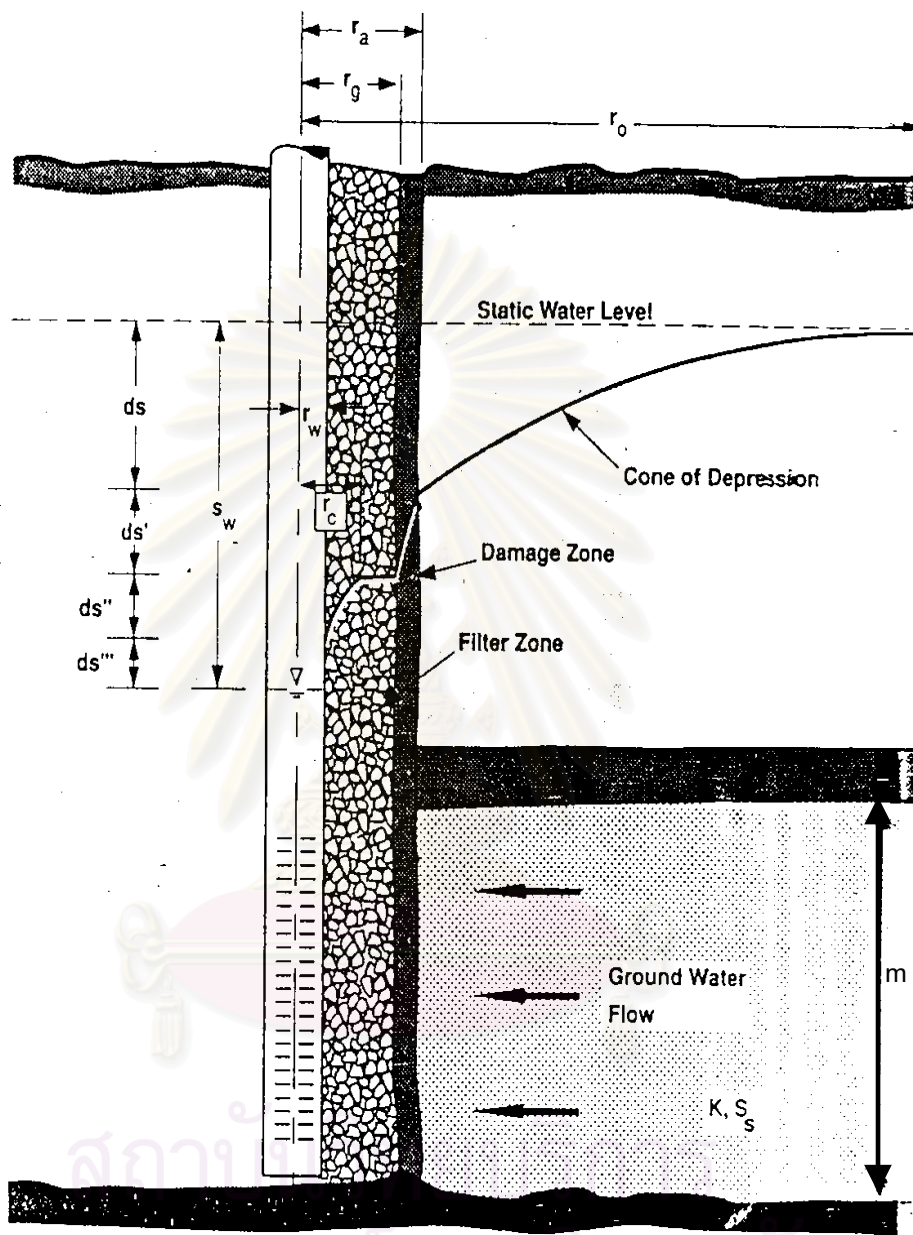
2)หาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ตามวิธีการที่เสนอโดย William (1985) ซึ่งค่าเรย์โนลด์ ณ จุดที่กราฟความสัมพันธ์เริ่มหักเหจากแนวเส้นตรงที่มีความลาดชันเท่ากับ 1 ก็คือค่าเรย์โนลด์วิกฤตินั่นเอง

2.6 ระดับความดันที่เปลี่ยนแปลง จากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

ในสภาพบ่อน้ำบาดาลที่ใช้งานจริง เมื่อทำการสูบน้ำหรือขณะที่น้ำใต้ดินไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลจะลดลงจากระดับความดันเดิมดังรูปที่ 2-4 เนื่องจากเกิดเสดสูญเสีในการไหลในส่วนต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ	s_w	คือ	ระยะน้ำลดทั้งหมดในบ่อน้ำบาดาล หรือเสดสูญเสีทั้งหมด (ฟุต หรือ ม.)
	ds	คือ	เสดสูญเสีจากการไหลแบบราบเรียบในชั้นน้ำ (aquifer loss) โดยที่ $ds=BQ$
	ds'	คือ	เสดสูญเสีจากการไหลแบบราบเรียบ ในบริเวณที่ชั้นน้ำมีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านลดลง เนื่องจากการอุดตันของน้ำโคลนเจาะที่ใช้ในขั้นตอนการสร้างบ่อน้ำบาดาล (damage zone loss) โดยที่ $ds'=B'Q$
	ds''	คือ	เสดสูญเสีจากการไหลแบบปั่นป่วนในกรวดกรู (filter zone turbulent loss) โดยที่ $ds''=B''Q^n$ และ n มีค่าอยู่ในช่วง 1-2
	ds'''	คือ	ความสูญเสีของบ่อน้ำบาดาล (well loss) คือ เสดสูญเสีที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำผ่านท่อกรองและการไหลในท่อกรูสู่เครื่องสูบน้ำ ในกรณีที่เกิดการไหลปั่นป่วนแบบสมบูรณ์ $ds'''=CQ^2$ แต่ถ้าอัตราการสูบน้ำน้อย $ds'''=CQ^n$ และ n มีค่าอยู่ในช่วง 1-2
	ml	คือ	minor loss เช่น เสดสูญเสีจากการไหลแบบราบเรียบในกรวดกรู (filter zone laminar loss) ซึ่งจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเสดสูญเสีอื่นๆ ในการวิเคราะห์จึงไม่ให้ความสนใจ
	Q	คือ	อัตราการสูบน้ำ (แกลลอน/นาที หรือ ลิตร/วินาที)
	$B \ B' \ B'' \ B''' \ C$	คือ	สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ เช่น อัตราการสูบน้ำ คุณสมบัติของวัสดุชั้นน้ำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2-4 ระยะน้ำดในบ่อสูบน้ำบาดาล

เนื่องจากการทดลองครั้งนี้เป็นการจำลองสภาพชั้นน้ำภายใต้แรงดัน และบ่อน้ำบาดาลแบบไม่มีกรวดกรูบ่อ ดังนั้นเฮดสูญเสียจากการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดในชั้นน้ำและไม่มีการใช้โคลนเจาะ เพราะฉะนั้นเฮดสูญเสียทั้งหมด (total head loss) ที่เกิดขึ้นในการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลทดลอง จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (well loss) และเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (aquifer loss) ซึ่งเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำจะแบ่งย่อยเป็น 2 ประเภทตามสภาพการไหล ได้แก่ เฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น (linear flow loss) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น (non-linear flow loss) สรุปแล้วเฮดสูญเสียจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลมีรายละเอียดดังนี้

1) กรณีการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล ลักษณะเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ก) ซึ่งเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

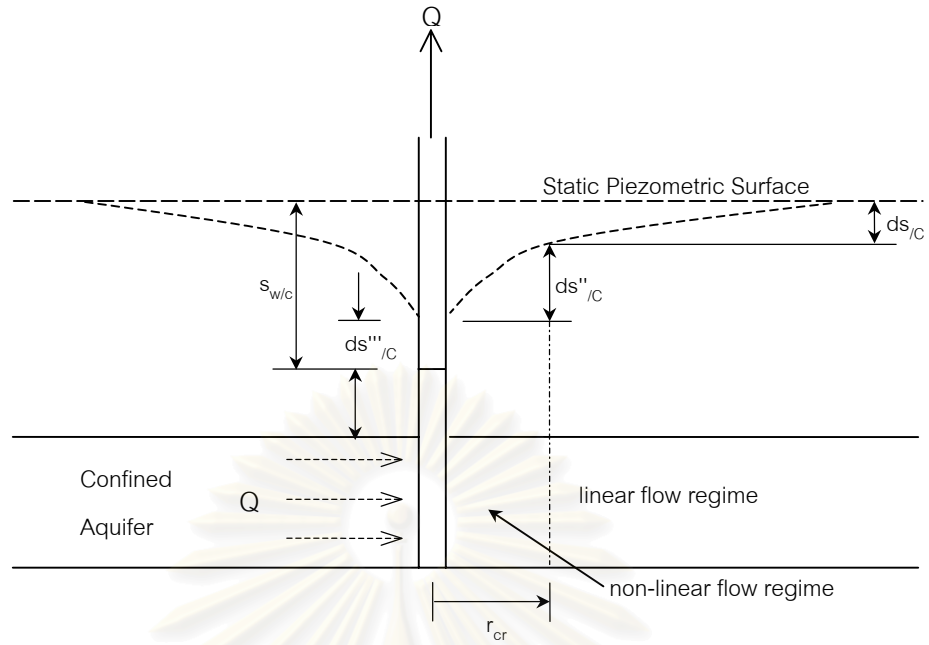
$$s_{w/C} = ds_{A/C} + ds'''_{/C} = ds_{/C} + ds''_{/C} + ds'''_{/C} \quad (2-28)$$

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	ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล จากการไหลเข้า (ม.)

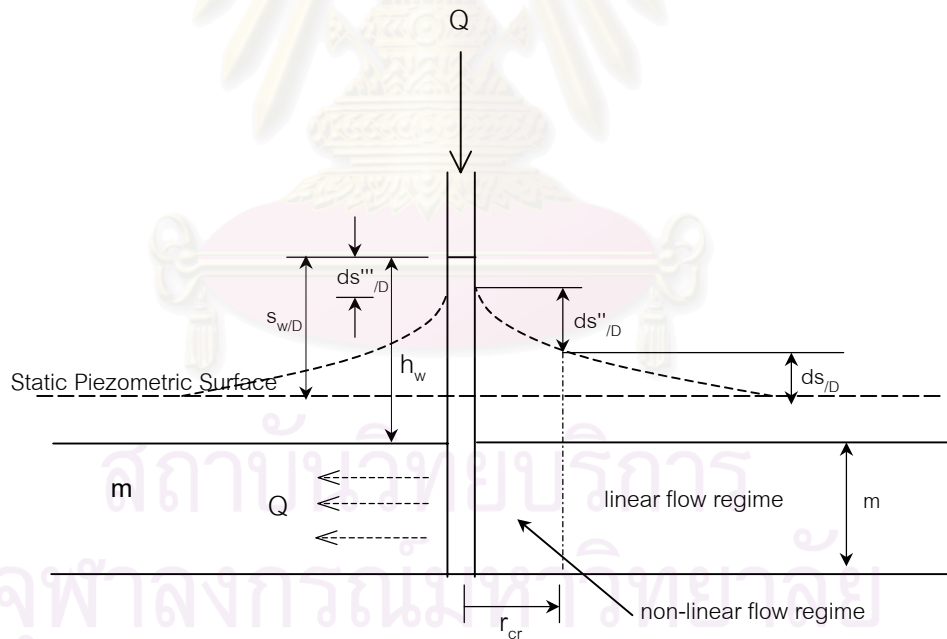
2) กรณีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ลักษณะเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ข) ซึ่งเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

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 สมการระดับความดันของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล โดยทำการทดลองทั้งกรณีการไหลในแนวรัศมีซึ่งเป็นการจำลองสภาพการไหลที่เกิดขึ้นจริงและการไหลในทิศทางเดียว ซึ่งไม่มีอิทธิพลของการไหลนำพา เพื่อพิสูจน์ว่าพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมีกับการไหลในทิศทางเดียวมีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของการไหลนำพา จึงทำการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล เพื่อเปรียบเทียบว่าพฤติกรรมการไหลจากการไหลทั้ง 2 รูปแบบเหมือนกันหรือต่างกันอย่างไร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 กรณีการไหลในแนวรัศมี

การศึกษานี้ได้ทบทวนทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณระดับความดัน ที่สภาวะคงตัวของ การไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน จากสมการของ Thiem ซึ่งพิจารณาว่าเกิดการไหลแบบราบเรียบในชั้นน้ำเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากการไหลในสภาพเป็นจริงจะเกิดการไหลทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี เมื่อเกิดการไหลแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ โดยการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันจะทำใน 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

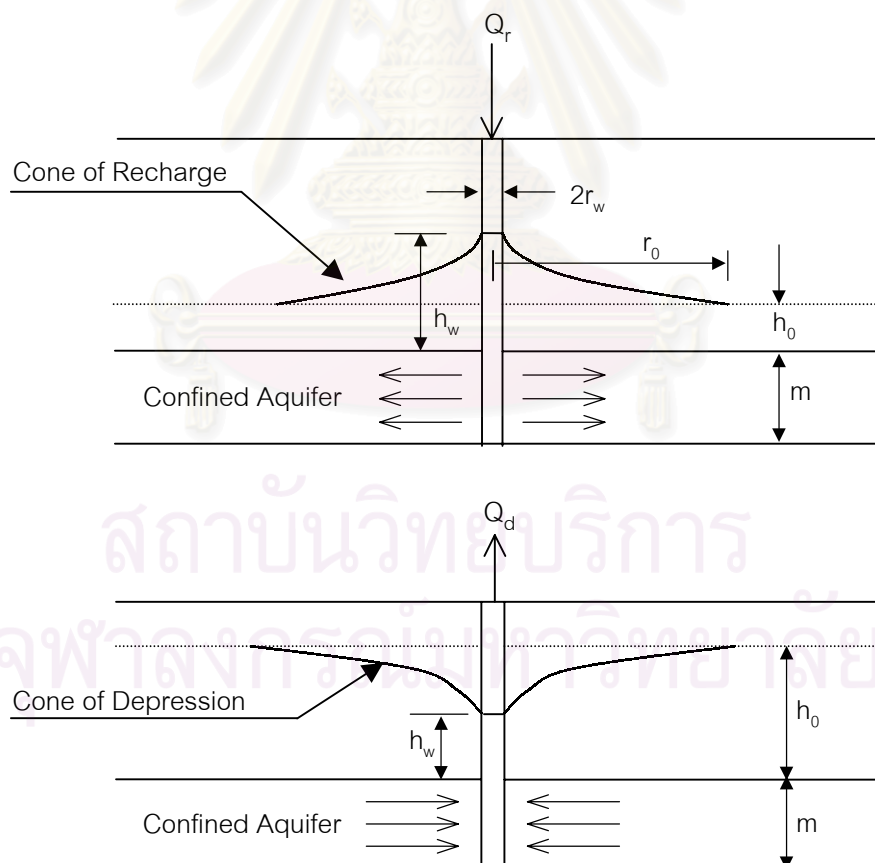
(2.7.1.1) สมการของ Thiem

เมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล โดยที่การไหลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับสมการการไหลของดาร์ซี จะเกิดกรวยความดันลด (cone of depression) และกรวยความดันเพิ่ม (cone of recharge) ที่มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อถึงสภาวะคงตัว ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และใช้สมการของ Thiem อธิบายได้ดังนี้

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

การเติมน้ำ $Q_r = \frac{2\pi Km(h_w - h_0)}{\ln(r_0 / r_w)}$ (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.)

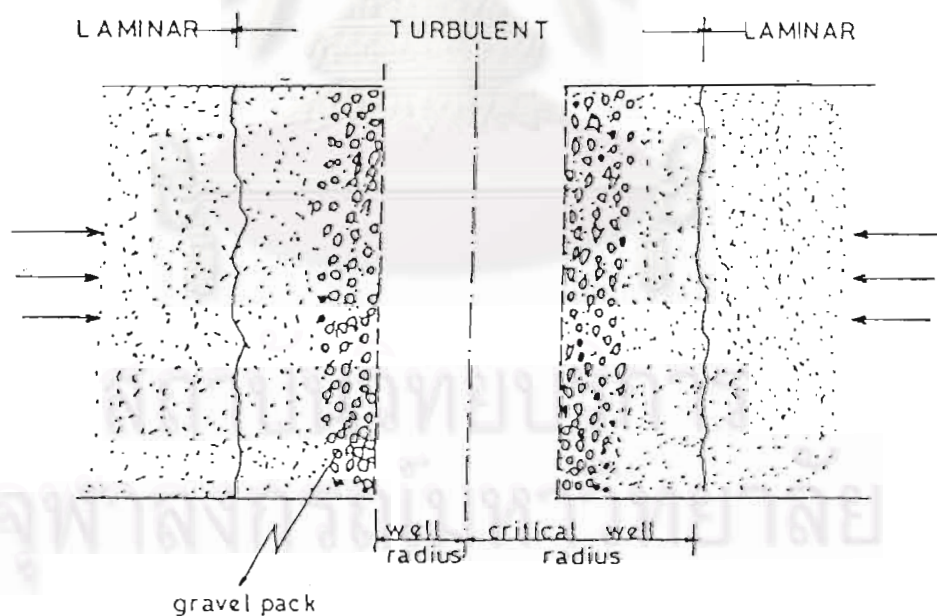


รูปที่ 2-6 กรวยความดันเพิ่ม (cone of recharge) และกรวยความดันลด (cone of depression)

(2.7.1.2) การวิเคราะห์จากสมการของดาร์ซีและสมการของ Forchheimer

เนื่องจากสมการของ Thiem ใช้พื้นฐานมาจากสมการของดาร์ซี คือคิดเฉพาะเฮดสูญเสียที่เกิดจากการไหลแบบราบเรียบในชั้นน้ำ ดังนั้นในกรณีที่เกิดการสูบน้ำหรือเติมน้ำเพิ่มขึ้นจนเกิดการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณใกล้ๆ กับบ่อน้ำบาดาล สมการของ Thiem จะไม่สามารถอธิบายได้เพียงพอประกอบกับการไหลจริงเป็นการไหลในแนวรัศมีซึ่งจะได้รับอิทธิพลของการไหลนำพา ดังนั้นสมการที่ใช้อธิบายระดับความดันที่ถูกต้องจะต้องคำนึงว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นหรือไม่รวมทั้งอิทธิพลของการไหลนำพา ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการหาค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลก่อน เพื่อที่จะดูว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นหรือไม่

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



รูปที่ 2-7 รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล

จากสมการหาค่าเรย์โนลด์ $Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right) \frac{d_{50}}{v} = \left(\frac{Q}{2\pi m \phi}\right) \frac{d_{50}}{v}$ โดยที่จุดเปลี่ยนชนิดการไหล
มีค่า $Re' = Re'_{cr}$ ดังนั้นในกรณีที่มีท่อบาดาลไม่มีกรวดกรูบ่อบาดาล และใช้ค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย
เป็นความยาวจำเพาะของการไหลคาร์ซีมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน (ลบ.ม./วินาที)
	m	คือ	ความยาวของท่อกรอง และในกรณีที่มีท่อกรองตลอดความหนาชั้นน้ำ ค่า m จะหมายถึง ความหนาของชั้นน้ำบาดาล (ม.)
	v	คือ	ความหนืดเปรียบเทียบของน้ำ (dynamic viscosity) (ม. ² /วินาที)
	Re'_{cr}	คือ	ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ
	φ	คือ	ความพรุนของทรายชั้นน้ำ

ในกรณีที่พิจารณาอิทธิพลของการไหลน้ำพา ใช้สมการของดาร์ซี (สมการที่ 2-19) มาอธิบายการไหลในช่วงที่เป็นการไหลแบบเชิงเส้น และใช้สมการของ Forchheimer (สมการที่ 2-22) มาอธิบายการไหลในช่วงที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น สมการที่สามารถอธิบายระดับความดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของการไหลในแนวรัศมี มีดังต่อไปนี้

(ก) การไหลแบบเชิงเส้นในแนวรัศมี จากสมการของดาร์ซี

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

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

แต่

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

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

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

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

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

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

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อพิจารณารูปที่ 2-8 (ข) และวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า จะได้สมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ h_1 คือ ระดับความดัน ที่ระยะ r_1 จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
 h_2 คือ ระดับความดัน ที่ระยะ r_2 จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)

(ข) การไหลแบบไม่เชิงเส้นในแนวรัศมี จากสมการของ 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 $v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2\pi rm}$

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

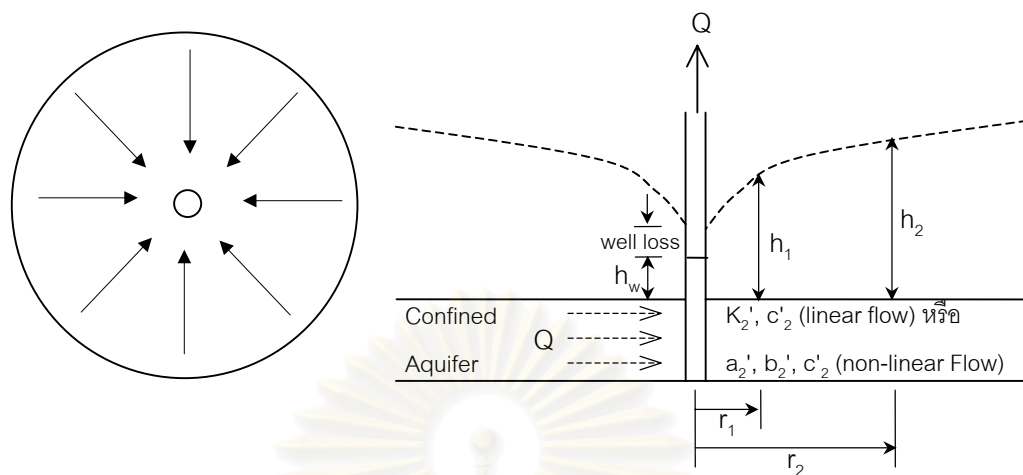
$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} - c_2' \left(\frac{1}{g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3}$$

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

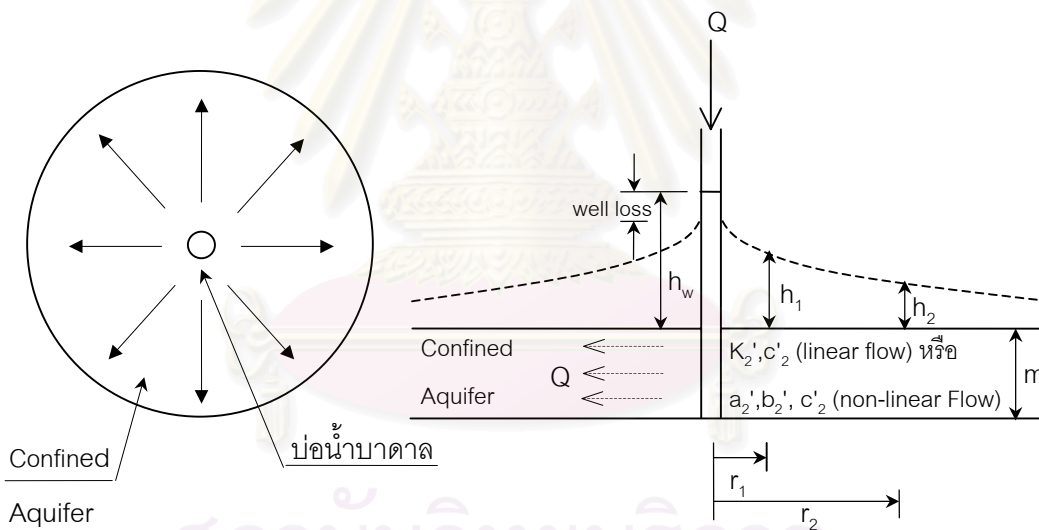
$$h_2 - h_1 = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2}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

สำหรับกรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้นของน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2-8 (ข) และวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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



(ก) การไหลเข้า (converging flow)



(ข) การไหลออก (diverging flow)

รูปที่ 2-8 การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในแนวรัศมี

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

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

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

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

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

$$h - h_w = \left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_w^2}\right) + CQ^n \quad (2-40)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

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

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

$$h_w - h = \left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_w^2}\right) + CQ^n \quad (2-42)$$

เมื่อ r_{cr} คือ รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (ม.)

h_{cr} คือ ระดับความดันที่ตำแหน่งวิกฤติ (ม.)

สรุปแล้วการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในการวิเคราะห์อย่างละเอียด มีพารามิเตอร์ที่ต้องทราบก่อนทำการคำนวณระดับความดัน ได้แก่

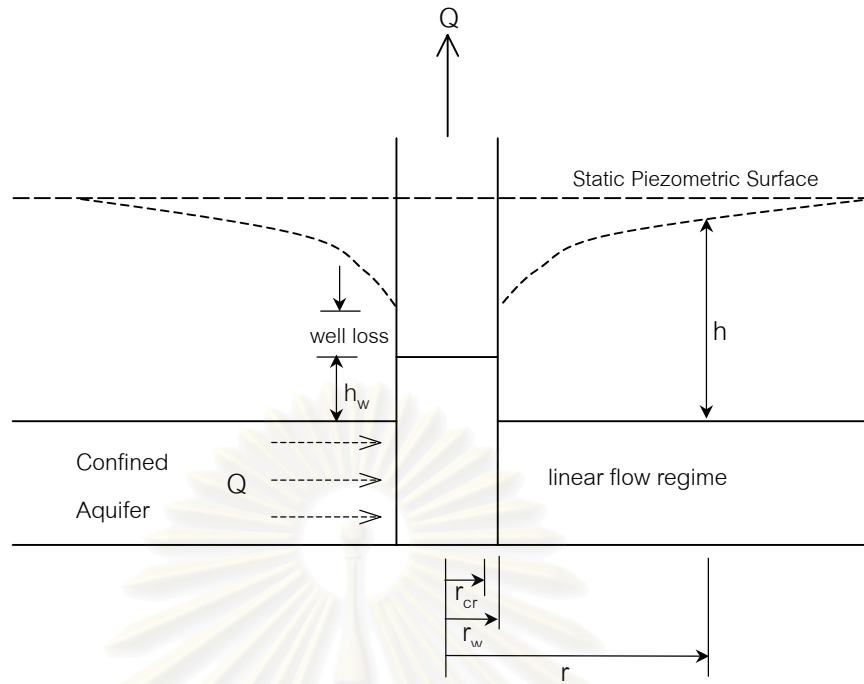
1) รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล ซึ่งคำนวณจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr}) นั่นคือต้องทราบค่าเรย์โนลด์วิกฤติก่อน

2) ค่าความนำซลศาสตร์ (K_2') และสัมประสิทธิ์การไหลนำพา (c_2') สำหรับคำนวณระดับความดันของการไหลแบบเชิงเส้น

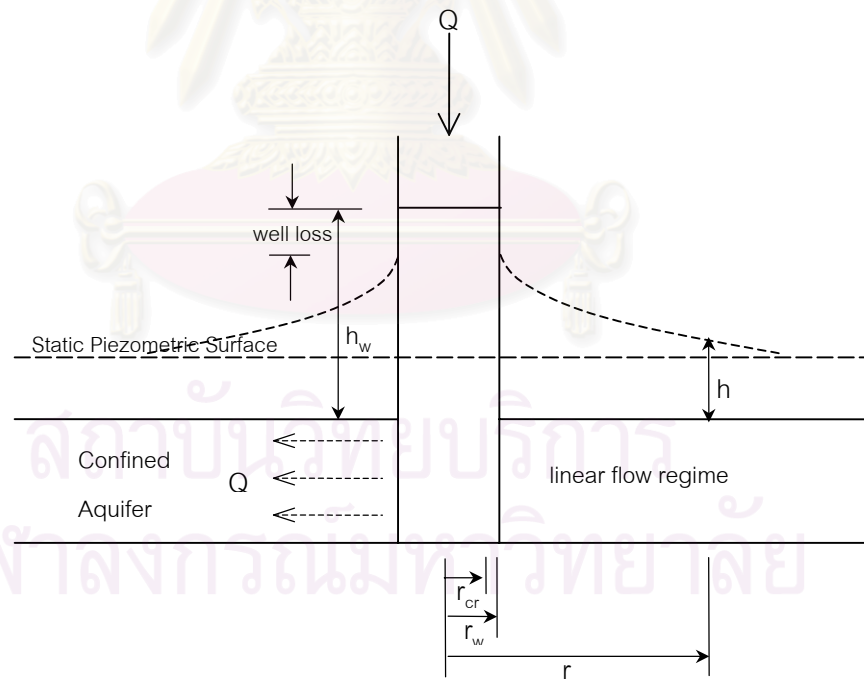
3) พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_2') พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_2') และสัมประสิทธิ์การไหลนำพา (c_2') สำหรับคำนวณระดับความดันของการไหลแบบไม่เชิงเส้น

4) ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^n)

ซึ่งพารามิเตอร์ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดหาได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

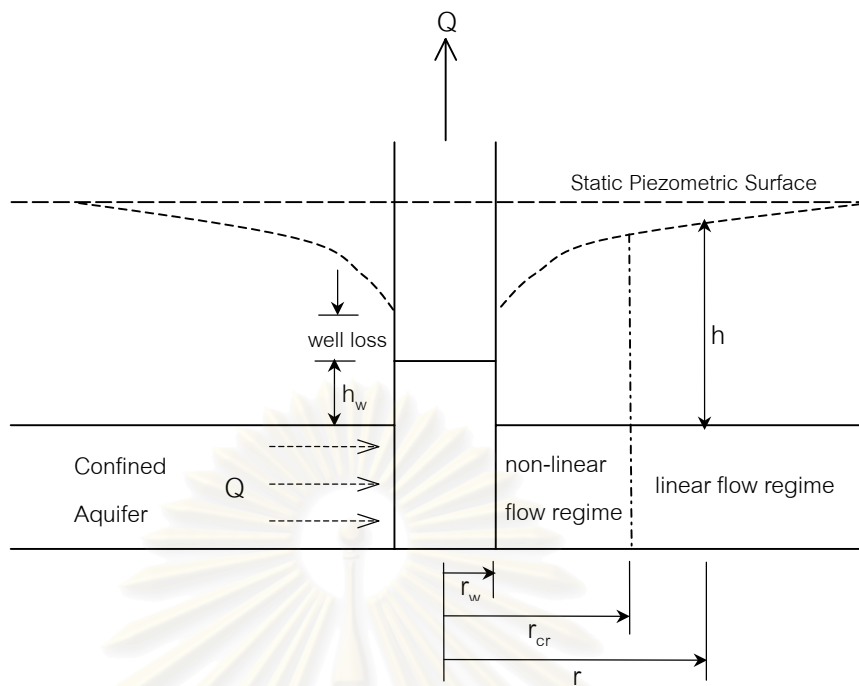


(ก) การไหลเข้า (converging flow)

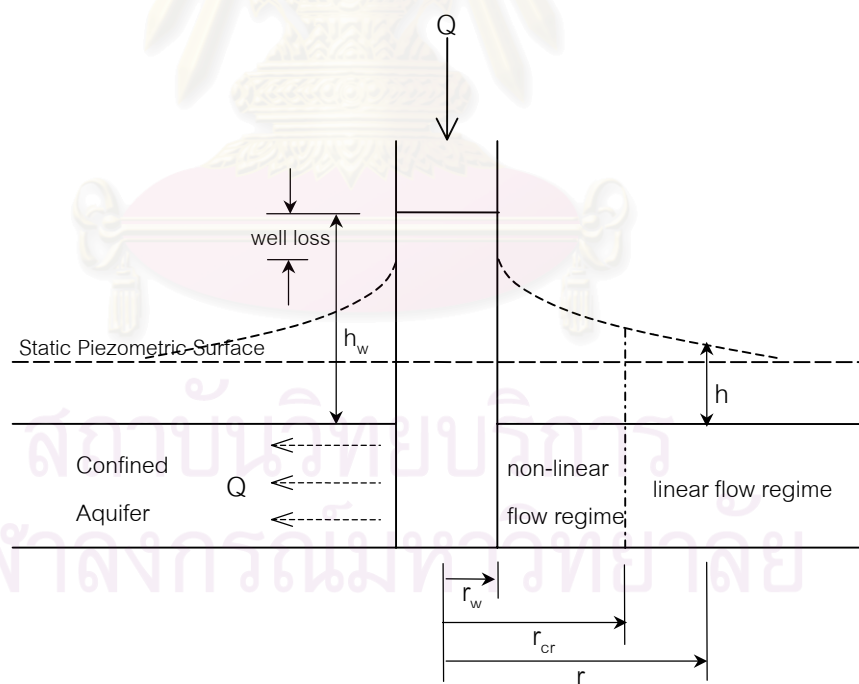


(ข) การไหลออก (diverging flow)

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



(ก) การไหลเข้า (converging flow)



(ข) การไหลออก (diverging flow)

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

(2.7.1.3) การวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

การหาสมการคำนวณระดับความดันตามระยะทางจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล จากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ แบ่งตามชนิดการไหล ได้ดังนี้

(ก) การไหลแบบราบเรียบ

กรณีการไหลแบบราบเรียบพิจารณาจากสมการที่ 2-24 ดังนี้

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

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

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

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

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

$$[h]_{r_1}^{r_2} = \left(\frac{AvQ}{g\phi\pi md_{50}^2}\right) [\ln r]_{r_1}^{r_2}$$

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

(ข) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง

กรณีการไหลแบบเปลี่ยนแปลงพิจารณาจากสมการที่ 2-25 ดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

(ค) การไหลแบบปั่นป่วน

กรณีการไหลแบบปั่นป่วนพิจารณาจากสมการที่ 2-26 ดังนี้

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

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

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

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

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

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

$$h_2 - h_1 = \left(\frac{BQ^2}{2gd_{50}\pi^2 m^2 \phi^2}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (2-45)$$

2.7.2 กรณีการไหลในทิศทางเดียว

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมการไหลในทิศทางเดียว เพื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมี ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสมการระดับความดันของการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว เมื่อเกิดการไหลแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ

ในการทำงานเกี่ยวกับการไหลในแนวรัศมี จะต้องทราบก่อนว่าจะเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นขึ้นในชั้นน้ำหรือไม่ แต่เนื่องจากความเร็วการไหลของการไหลในทิศทางเดียวจะมีค่าคงที่ตลอดการไหลเพราะพื้นที่หน้าตัดการไหลคงที่ ดังนั้นการไหลในทิศทางเดียวซึ่งมีค่าเรย์โนลด์คิงที่ จึงใช้ค่าเรย์โนลด์คิงที่ได้จากการไหล (สมการที่ 2-13) มาพิจารณาว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นขึ้นหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับค่าเรย์โนลด์คิงวิกฤติ เมื่อ $Re' \leq Re'_{cr}$ จะเกิดการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ แต่ถ้า $Re' > Re'_{cr}$ จะเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ถ้าพิจารณาส่วนหนึ่งของการไหลในแนวรัศมี ดังรูปที่ 2-8 จะเกิดการไหลในทิศทางเดียวในชั้นน้ำ และเมื่อวิเคราะห์อย่างละเอียดจากสมการของดาร์ซี (สมการที่ 2-17) และสมการของ Forchheimer (สมการที่ 2-21) จะได้สมการคำนวณระดับความดันที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของการไหลในทิศทางเดียวดังนี้

(ก) การไหลแบบเชิงเส้นในทิศทางเดียว จากสมการของดาร์ซี

จากรูปที่ 2-11 (ก) และสมการที่ 2-17 เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{dh}{dr} = \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{v}{\phi}\right) \\
 \text{แต่} \quad v &= \frac{Q}{A} = \frac{Q}{wm} \\
 \text{เพราะฉะนั้น} \quad \frac{dh}{dr} &= \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) \\
 \int_{h_1}^{h_2} dh &= \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) \int_{r_1}^{r_2} dr \\
 [h]_{h_1}^{h_2} &= \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) [r]_{r_1}^{r_2} \\
 \text{นั่นคือ} \quad h_2 - h_1 &= \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) (r_2 - r_1) \quad (2-46)
 \end{aligned}$$

สำหรับกรณีการไหลแบบเชิงเส้นของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อพิจารณา รูปที่ 2-11 (ข) และวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_1 - h_2 = \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) (r_2 - r_1) \quad (2-47)$$

เมื่อ h_1 คือ ระดับความดัน ที่ระยะ r_1 จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)
 h_2 คือ ระดับความดัน ที่ระยะ r_2 จากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (ม.)

(ข) การไหลแบบไม่เชิงเส้นในทิศทางเดียว จากสมการของ Forchheimer

กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้นของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 2-11 (ก) และสมการที่ 2-21 เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \frac{dh}{dr} = a_1' \left(\frac{v}{\phi}\right) + b_1' \left(\frac{v}{\phi}\right)^2$$

แต่ $v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{wm}$

เพราะฉะนั้น $\frac{dh}{dr} = \left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right)^2$

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \left[\left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right)^2 \right] \int_{r_1}^{r_2} dr$$

$$[h]_{h_1}^{h_2} = \left[\left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right)^2 \right] [r]_{r_1}^{r_2}$$

นั่นคือ $h_2 - h_1 = \left[\frac{a_1'}{\phi} \left(\frac{Q}{wm}\right) + \frac{b_1'}{\phi^2} \left(\frac{Q}{wm}\right)^2 \right] (r_2 - r_1) \quad (2-48)$

สำหรับกรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้นของน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อพิจารณา จากรูปที่ 2-11 (ข) และวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการไหลเข้า จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_1 - h_2 = \left[\frac{a_1'}{\phi} \left(\frac{Q}{wm}\right) + \frac{b_1'}{\phi^2} \left(\frac{Q}{wm}\right)^2 \right] (r_2 - r_1) \quad (2-49)$$

ดังนั้นในการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว เมื่อทราบ ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr}) และค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^N) ที่เกิดขึ้นจากการไหล เข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล สามารถหาสมการคำนวณระดับความดันได้ตามกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) กรณี $Re' \leq Re'_{cr}$ จะเกิดการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ สมการระดับความดัน แบ่งตามการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล มีดังต่อไปนี้

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h - h_w = \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) (r - r_w) + CQ^n \quad (2-50)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h_w - h = \left(\frac{1}{K_1' \phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) (r - r_w) + CQ^n \quad (2-51)$$

เมื่อ	K_1'	คือ	ความนำชลศาสตร์ของการไหลในทิศทางเดียว
	w	คือ	ความกว้างของหน้าตัดการไหล (ม.)
	m	คือ	ความหนาของชั้นน้ำ (ม.)

2) กรณี $Re' > Re'_{cr}$ จะเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ สมการระดับความดันแบ่งตามการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำ มีดังต่อไปนี้

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

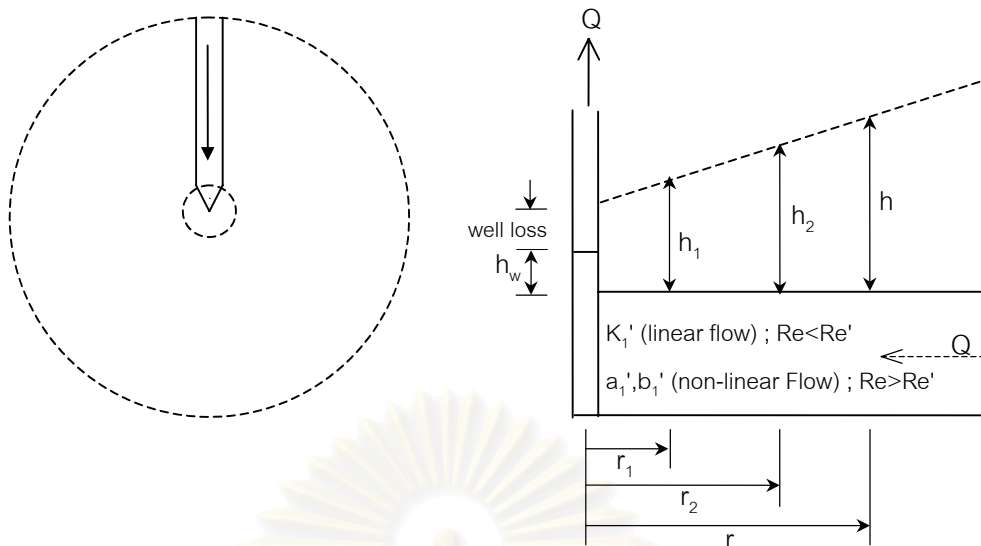
$$h - h_w = \left[\left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right)^2\right] (r - r_w) + CQ^n \quad (2-52)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

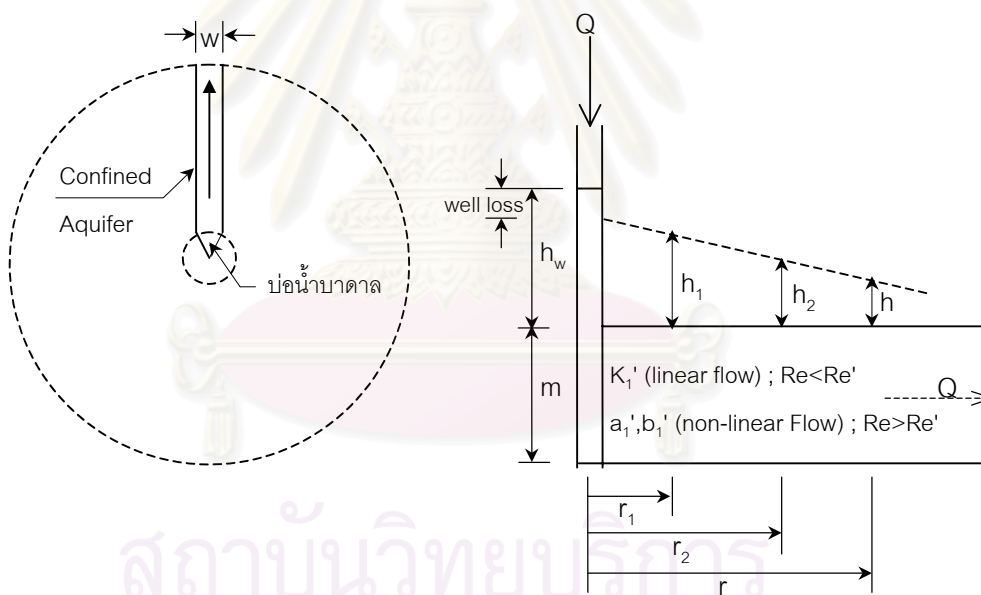
$$h_w - h = \left[\left(\frac{a_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right) + \left(\frac{b_1'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{wm}\right)^2\right] (r - r_w) + CQ^n \quad (2-53)$$

เมื่อ	a_1'	คือ	พารามิเตอร์ดาร์ซีของการไหลในทิศทางเดียว
	b_1'	คือ	พารามิเตอร์นอนดาร์ซีของการไหลในทิศทางเดียว

จากสมการที่ 2-50 ถึง 2-53 และรูปที่ 2-11พอจะบอกได้ว่าพฤติกรรมการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียวมีความแตกต่างจากการไหลในแนวรัศมี เนื่องจากรูปร่างของเส้นระดับความดันต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการไหลในทิศทางเดียวไม่ได้รับอิทธิพลจากการไหลนำพา ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าพฤติกรรมการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียวแตกต่างจากการไหลในแนวรัศมีและทำการวิเคราะห์หาอิทธิพลของการไหลนำพา



(ก) การไหลเข้า (converging flow)



(ข) การไหลออก (diverging flow)

รูปที่ 2-11 การไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ในทิศทางเดียว

บทที่ 3

การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน ที่มีขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำขนาดต่างๆ ซึ่งต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อจำลองสภาพการไหล นอกจากนี้ยังต้องทำการทดลองในส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำ ตลอดจนการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ โดยการทดลองการไหลผ่านตัวกลางดังกล่าวโดยวิธีทดลองการไหลแบบมาตรฐาน การทดลองในห้องปฏิบัติการเริ่มตั้งแต่การพัฒนาเครื่องมือเพื่อทำการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง และการจัดการข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การพัฒนาและทดสอบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน

เนื่องจากการศึกษาวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ซึ่งต้องใช้เครื่องมือทำการทดลองในส่วนต่างๆ ในส่วนการทดลองที่ทำกันเป็นมาตรฐานจะใช้เครื่องมือที่มีอยู่แล้ว ได้แก่ การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชั้นน้ำที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยการทดลองหาการกระจายขนาด และความถ่วงจำเพาะของวัสดุชั้นน้ำ ในขณะที่การทดลองการไหลของน้ำใต้ดิน หรือการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน ทั้งกรณีการทดลองการไหลแบบมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติทางศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ (permeability test) การทดลองการไหลของน้ำใต้ดินทั้งการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียว จำเป็นต้องสร้างเครื่องมือทดลองขึ้นมาใหม่ เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวยังไม่มีในห้องปฏิบัติการ

ในการดำเนินงานจัดสร้างชุดเครื่องมือ เพื่อทำการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี นับเป็นชุดเครื่องมือหลักในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบ จัดสร้าง และทดสอบเครื่องมือ ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

3.1.1 แนวคิดในการออกแบบ

แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน มีดังนี้

- 1) เครื่องมือที่ออกแบบต้องสามารถทำการทดสอบได้ทั้งการเติมน้ำและการสูบน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลจากชั้นน้ำภายใต้แรงดัน โดยพยายามจำลองสภาพการไหลและระดับความดันที่

จะเกิดขึ้นในการทดลองให้ใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงให้มากที่สุด จึงถือว่าเป็นเครื่องมือที่สามารถทดสอบการไหลภายใต้แรงดันที่สูงมาก

2) การควบคุมการทดลอง การวัด และการบันทึกผลการทดลอง ต้องทำได้โดยสะดวกหรือเป็นแบบอัตโนมัติ โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการเก็บข้อมูล และแสดงผลการทดลอง

3) เครื่องมือที่ออกแบบต้องสามารถดัดแปลง เพื่อใช้ทดสอบในเรื่องอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดันได้

3.1.2 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ

ในการศึกษาเรื่องการไหลของน้ำใต้ดิน เมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน จะมีตัวแปรหลักที่ต้องพิจารณา 2 ตัวแปร ได้แก่

1) ระดับความดัน หรือเฮด (pressure head) หมายถึง ระดับความดันของน้ำในชั้นน้ำ (piezometric head) ณ จุดต่างๆ และระดับความดันของน้ำในบ่อน้ำบาดาล

2) อัตราการไหล (discharge) หมายถึง อัตราที่น้ำใต้ดินเคลื่อนที่ในชั้นน้ำ ซึ่งเท่ากับอัตราการสูบน้ำหรือเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล อัตราการไหลจะมีความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์ ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบแบบจำลองสนาม เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดันเสมือนกับการไหลในท่อ และแบบจำลองต้องถูกออกแบบให้การไหลที่เกิดขึ้นในแบบจำลองมีลักษณะเดียวกับที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม นั่นคือ ต้องมีค่าเรย์โนลด์ที่เท่ากัน หรือมีความคล้ายคลึงเชิงพลศาสตร์ (dynamic similitude) นั้นเอง

3.1.3 ขอบเขตของการออกแบบและการใช้งาน

การออกแบบเครื่องมือครั้งนี้ ต้องออกแบบให้สามารถทำการทดลองได้ในขอบเขตของระดับความดัน และค่าเรย์โนลด์ที่ใกล้เคียงกับภาคสนามให้มากที่สุด ซึ่งมีค่าเรย์โนลด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวท่อกรองของบ่อบาดาลซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด มีค่าประมาณ 1100 (เมื่อคิดจากความเร็วการไหลจริง) แต่จากข้อจำกัดด้านวัสดุและสถานที่ในการประกอบเครื่องมือ จึงออกแบบให้สามารถทำการทดลองได้ในช่วงระดับความดันที่ตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล (h_w) ตั้งแต่ 0-50 เมตรของน้ำ และช่วงระดับความดันด้านท้ายน้ำ ($h_{0/LAB}$) ตั้งแต่ 0-30 เมตรของน้ำ โดยมีอัตราการไหลสูงสุด

เท่ากับ 150 ลิตร/นาที่ หรือ 9 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (รายละเอียดการออกแบบอยู่ในภาคผนวก ก)

3.1.4 ผลจากการออกแบบและส่วนประกอบของเครื่องมือ

หลังจากกำหนดขอบเขตในการออกแบบ และทำการออกแบบเครื่องมือในแต่ละส่วน เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดในการออกแบบ และวัตถุประสงค์ของการสร้างเครื่องมือ รายละเอียดผลจากการออกแบบ และส่วนประกอบของเครื่องมือ มีดังต่อไปนี้

(3.1.4.1) ผลจากการออกแบบ

การออกแบบเครื่องมือจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งทำงานประสานสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 3-1 จากรูปแสดงให้เห็นการทำงานที่เชื่อมโยงกันในแต่ละส่วนของเครื่องมือ ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

1) แบบจำลองชั้นน้ำ-บ่อบาดาล (well-aquifer model) เป็นการจำลองลักษณะของบ่อบาดาลและชั้นน้ำ โดยใช้ทฤษฎีขนาดต่างๆ แทนวัสดุชั้นน้ำ ซึ่งชั้นน้ำที่จำลองขึ้นเป็นชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) ในการออกแบบจะจำลองสภาพการไหลที่เกิดขึ้นในแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนามให้มากที่สุด ซึ่งการไหลที่เกิดขึ้นจริงในชั้นน้ำเมื่อทำการสูบน้ำและเติมน้ำจากบ่อบาดาลจะเป็นการไหลในแนวรัศมี (radial flow) แบบจำลองชั้นน้ำที่จะจำลองขึ้นจึงมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม (sector) เรียกว่า “แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี”

2) ระบบหมุนเวียนน้ำ และฝ่ายวัดอัตราการไหล (circulating water system) ระบบหมุนเวียนน้ำอาศัยแรงขับจากเครื่องสูบน้ำ โดยต้องควบคุมปริมาณน้ำ และทิศทางการไหลของน้ำได้ เพราะมีการทดลอง 2 ลักษณะ คือ การเติมน้ำ ซึ่งน้ำจะไหลออกจากบ่อบาดาล ขณะที่การสูบน้ำ น้ำจะไหลจากชั้นน้ำเข้าสู่บ่อบาดาล โดยที่อัตราการไหลในการทดลองวัดโดยใช้ฝ่ายวัดอัตราการไหล เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้ตามความเหมาะสม ทำให้สามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วงที่ต้องการ โดยมีความละเอียดและถูกต้องในระดับที่เชื่อถือได้

3) ระบบควบคุม วัด จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูล ตัวแปรที่ควบคุมได้ในการทดลองคือ อัตราการไหล และระดับความดัน โดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำ (inverter) และวาล์วควบคุม (control valve) ขณะที่การเก็บข้อมูล

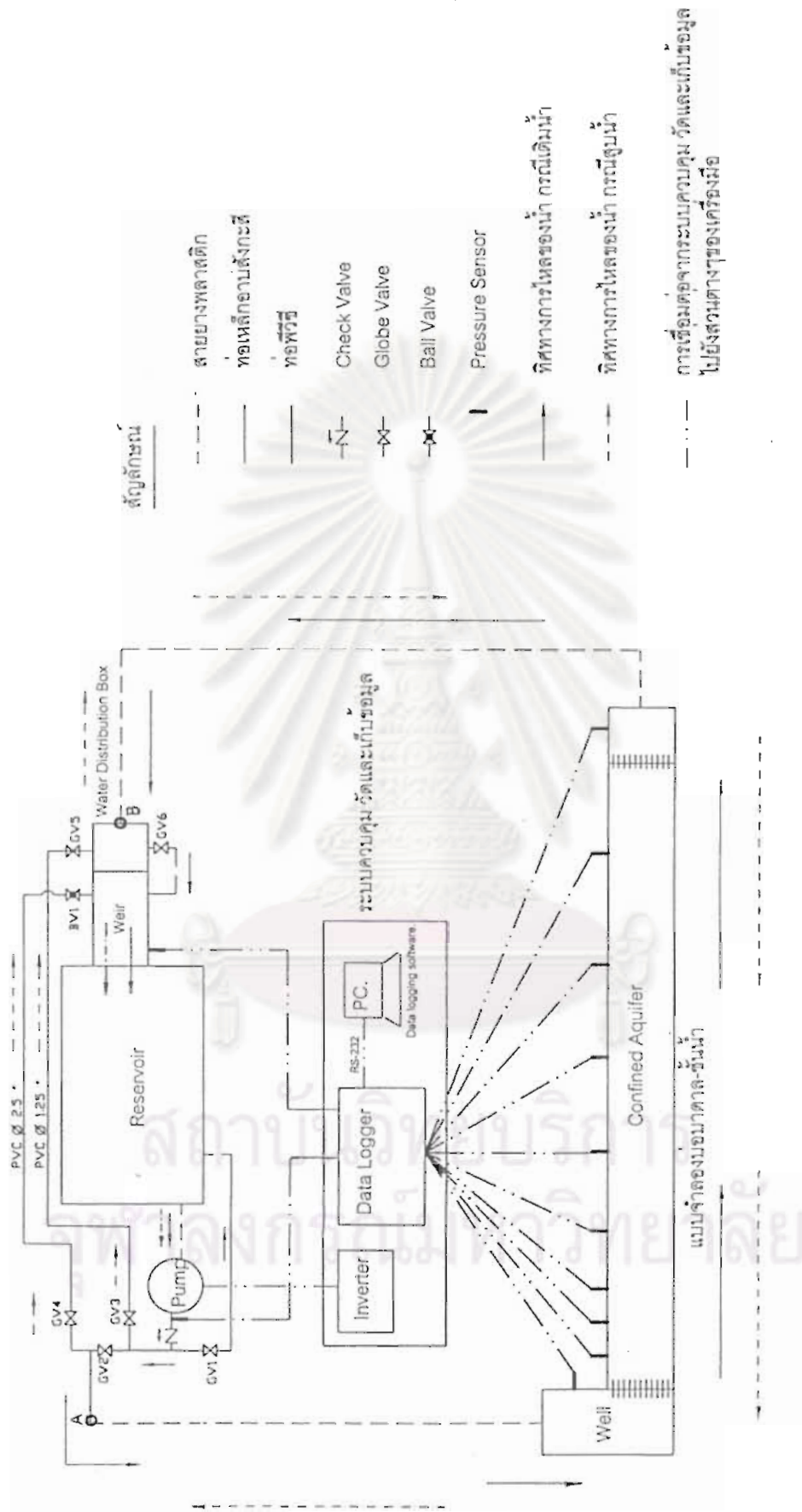
อัตราการไหลและระดับความดันทำเป็นระบบอัตโนมัติ เพื่อความสะดวกในการทดลองและนำผลการทดลองไปใช้ โดยใช้เครื่อง data logger ในการเก็บและแสดงผลข้อมูล ซึ่งจะทำงานร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม data logging และใช้เซนเซอร์วัดความดัน (pressure sensor) เป็นตัววัดค่าระดับความดันในชั้นน้ำ สำหรับค่าอัตราการไหลในการทดลอง ประยุกต์ใช้สายยางหรือเซนเซอร์วัดความดัน เพื่อวัดค่าระดับน้ำเหนือฝายแล้วแปลงค่าที่ได้เป็นค่าอัตราการไหลต่อไป

(3.1.4.2) ส่วนประกอบของเครื่องมือ

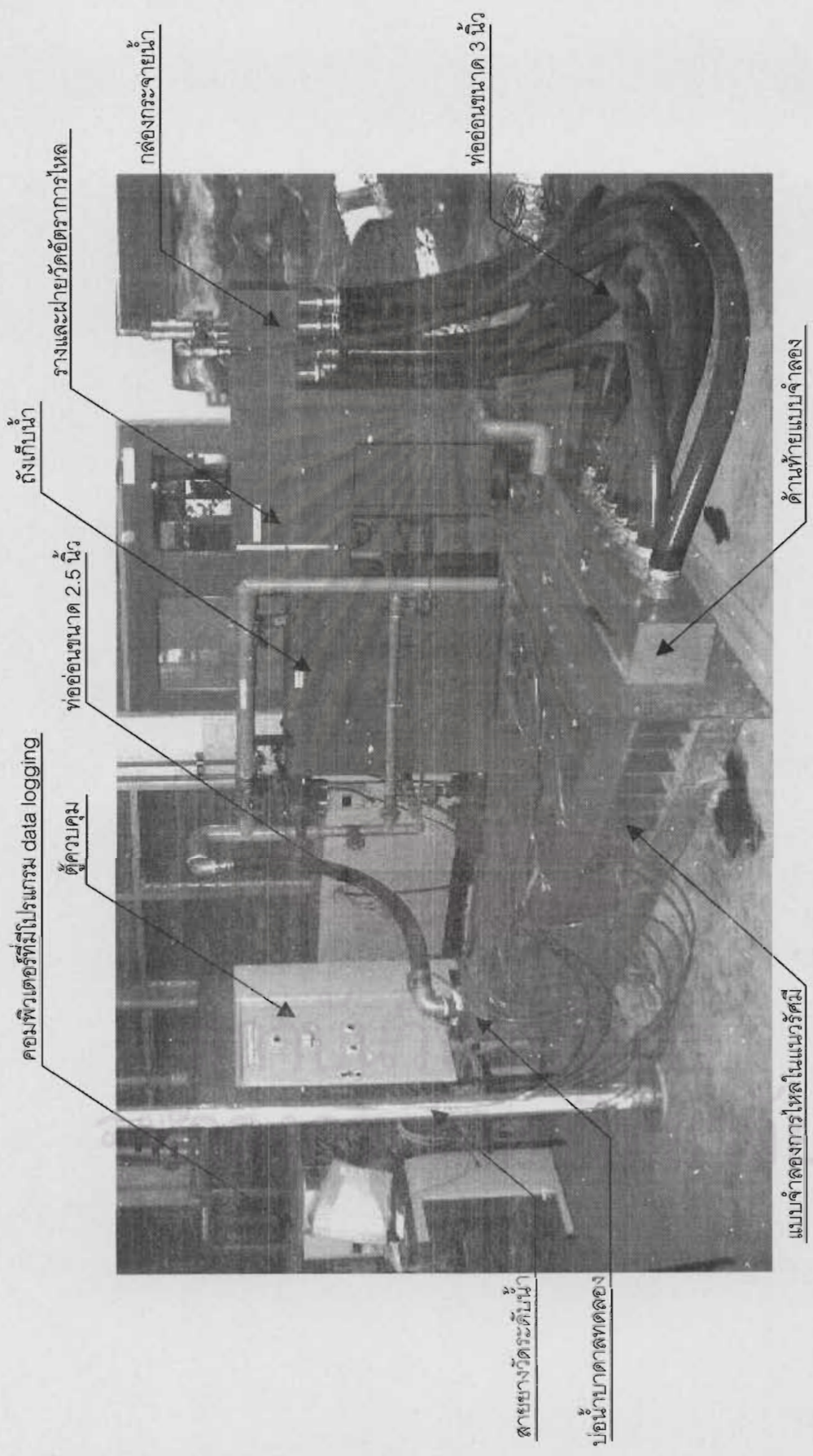
เมื่อดำเนินการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือเรียบร้อยแล้ว จะได้เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดันที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3-2 ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (well-aquifer model) มีลักษณะการไหลในแนวรัศมี ชั้นน้ำเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลมที่มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 30 องศา รัศมี 2 เมตร และหนา 0.2 เมตร มีโครงเป็นเหล็ก ด้านหลังและด้านล่างของแบบจำลองเป็นแผ่นเหล็ก แต่ด้านหน้าและด้านบนของแบบจำลองทำด้วยพลาสติกใส เพื่อใช้สังเกตการไหลของน้ำ และเพื่อให้บ่อน้ำบาดาลทดลองมีความสอดคล้องกับชั้นน้ำจำลอง จึงทำบ่อน้ำบาดาลทดลองเป็นรูปส่วนหนึ่งของวงกลมที่มีมุมที่จุดศูนย์กลาง 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) ด้านบนของบ่อน้ำบาดาลทดลองติดตั้งข้อต่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สำหรับต่อท่ออ่อนจากระบบหมุนเวียนน้ำ

ขณะที่ด้านท้ายของแบบจำลองทำเป็นกล่องเหล็ก ด้านที่ติดกับชั้นน้ำจะมีตะแกรงกันไม่ให้ทรายชั้นน้ำไหลออกมา และอีกด้านติดตั้งข้อต่อท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวน 7 อัน สำหรับต่อท่ออ่อนจากระบบหมุนเวียนน้ำ กล่องด้านท้ายช่วยให้การไหลของน้ำเข้าและออกจากแบบจำลองทางด้านท้ายมีความสม่ำเสมอขึ้น และด้านบนของบ่อน้ำบาดาลทดลองและชั้นน้ำมีการเจาะรูทำเกลียวสำหรับติดเซนเซอร์วัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ลักษณะของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำดังแสดงในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-1 การเชื่อมโยงระบบต่างๆของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน



รูปที่ 3-2 เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเต็มน้ำภายใต้แรงดัน

2) ระบบหมุนเวียนน้ำ (circulating water system) เนื่องจากเครื่องมือต้องออกแบบให้สามารถทดลองได้ทั้งการสูบน้ำและการอัดเติมน้ำใต้ดิน ดังนั้นระบบหมุนเวียนน้ำจึงต้องสามารถทำการทดลองได้ทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าว ระบบท่อจึงมีทั้งท่อแข็ง (ท่อเหล็กและท่อพีวีซี) ท่ออ่อน (สายยางพลาสติก) และวาล์ว เพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะการไหลได้ตามการทดลอง ดังที่แสดงในรูปที่ 3-2

ระบบหมุนเวียนน้ำประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

- ถังเก็บน้ำ ขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 1.0 เมตร และสูง 0.8 เมตร ทำจากแผ่นเหล็ก เพื่อใช้ในการเก็บน้ำเพื่อหมุนเวียนในการทดลอง
- เครื่องสูบน้ำ ใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (centrifugal pump) ที่สามารถให้เสาด้านสูงเท่ากับ 50 เมตรของน้ำ และอัตราการไหล 150 ลิตร/นาที่ หรือ 9 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 2,850 รอบ/นาที่ ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 กิโลวัตต์ (4 แรงม้า) ใช้ไฟ 380 โวลต์ 3 เฟส 50 Hz
- ระบบท่อและวาล์ว การไหลเวียนของน้ำในการทดลองจะถูกส่งผ่านระบบท่อที่ประกอบด้วยท่อเหล็ก ท่อพีวีซี และสายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว (ต่อเข้าทางบ่อน้ำบาดาล) และ 3 นิ้ว (ต่อเข้าทางด้านท้ายแบบจำลอง) ควบคุมทิศทางการไหลโดยวาล์ว และมีระบบท่อ by pass ที่ท่อส่งของเครื่องสูบน้ำ เพื่อลดความดันที่มีมากในช่วงแรกของการเดินเครื่องเครื่องสูบน้ำ เมื่อความดันลดลงถึงระดับที่ทดลองจึงทำการปรับวาล์วเพื่อให้น้ำเข้าสู่แบบจำลอง
- กล่องแบ่งน้ำ (water distribution box) มีรูปแบบการใช้งาน 2 รูปแบบ ได้แก่ กรณีการไหลของน้ำใต้ดินเข้าบ่อน้ำบาดาลหรือการสูบน้ำ กล่องแบ่งน้ำจะรับน้ำที่ส่งมาจากเครื่องสูบน้ำ แล้วแบ่งน้ำเข้าท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ทั้ง 7 เส้น ที่เชื่อมต่อกับด้านท้ายของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ เพื่อให้น้ำไหลเข้าด้านท้ายของชั้นน้ำในแนวรัศมีอย่างแท้จริง ส่วนในกรณีการไหลของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาลหรือการเติมน้ำ กล่องแบ่งน้ำจะรับน้ำจากท่ออ่อนทั้ง 7 เส้นดังกล่าว แล้วส่งเข้ารางวัดอัตราการไหลเพื่อทำการวัดอัตราการไหลต่อไป
- ฝ่ายวัดอัตราการไหล (weir) เป็นฝ่ายสี่เหลี่ยมสันคมทำจากแผ่นสแตนเลส มีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 20 เซนติเมตร ความกว้างสันฝ่าย 2.12 เซนติเมตร วัดอัตรา

การไหลได้สูงสุด 12.96 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ติดตั้งอยู่ในรางวัดอัตราการไหล ขนาดกว้าง 23.5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ซึ่งติดอยู่กับถังเก็บน้ำทดลอง ภายในรางวัดอัตราการไหลมีตะแกรงบรรจุหิน เพื่อช่วยสลายพลังงานและทำให้ระดับน้ำในรางนิ่ง ส่วนค่าระดับน้ำเหนือสันฝายจะได้จากเซนเซอร์วัดความดัน และหลอดวัดระดับน้ำที่ติดอยู่ด้านข้างของรางวัดอัตราการไหล

3) ระบบควบคุม วัด จับเก็บ และแสดงผลข้อมูล ในส่วนของระบบควบคุม วัด และจับเก็บข้อมูล จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ระบบควบคุม และระบบวัด เก็บและแสดงผลข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ระบบควบคุม ประกอบด้วย ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (inverter) ชนิด 3 เฟส ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ ใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าของเครื่องสูบน้ำ เพื่อควบคุมอัตราการไหลและระดับความดันในการทดลองให้ได้ตามต้องการ โดยทำงานร่วมกับ วาล์วควบคุม

- ระบบวัด เก็บ และแสดงผลข้อมูล คือระบบเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าแรงดันน้ำในจุดที่สนใจ ได้แก่ ที่ท่อส่งของเครื่องสูบน้ำ บ่อบาดาล จุดต่างๆในชั้นน้ำและหน้าฝายวัดอัตราการไหล และบันทึกค่าที่วัดได้เข้าสู่หน่วยความจำ เมื่อต้องการนำข้อมูลไปใช้ก็จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการดึงข้อมูลที่อยู่ในหน่วยความจำออกมา ระบบนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เครื่อง data logger ซึ่งวัดได้ 16 ช่องสัญญาณ มีความจุหน่วยความจำ 256 กิโลไบต์ ความแม่นยำในการวัด (accuracy) 0.1 %
- เซนเซอร์วัดความดันชนิด Piezoelectric หรือ Piezoresistive จำนวน 15 ตัว (No.1-No.15) ที่วัดแรงดันน้ำได้ในช่วง 0-100 psi (0-69 mH₂O) ใช้สำหรับวัดแรงดันน้ำที่จุดต่างๆ ในแบบจำลอง และอีก 1 ตัว (No.16) ที่สามารถวัดแรงดันน้ำได้ในช่วง 0-50 mmHg (0-0.67 mH₂O) ใช้สำหรับวัดระดับน้ำหน้าฝายเพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการไหล
- เครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีโปรแกรม data logging โดยที่โปรแกรมนี้จะทำหน้าที่ในการถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่อง data logger ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูล ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลระหว่างการทำทดลอง และแสดงผลทดลองที่เสร็จแล้ว

3.1.5 การทดสอบเครื่องมือ

หลังจากจัดสร้างเครื่องมือเสร็จแล้ว ได้ทำการทดสอบเครื่องมือว่ามีความผิดพลาดในการประกอบหรือไม่ เช่น ตรวจสอบว่ามีการรั่วซึมของน้ำในเครื่องมือมีมากเกินไปหรือไม่ นอกจากนี้เครื่องมือวัดต่างๆ ที่นำมาใช้ต้องมีการสอบเทียบ (calibrate) ด้วย การทดสอบในส่วนต่างๆ มีดังนี้

1) แบบจำลองบ่อบาดาล-ชั้นน้ำ ได้ตรวจสอบรอยเชื่อมเหล็ก และการยึดติดแผ่นพลาสติกและตะแกรงกันทรายกับโครงเหล็ก ตลอดจนตรวจสอบการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันเข้ากับแบบจำลองเพื่อดูความแข็งแรงมั่นคงและการรั่วซึม ในการทดสอบการรั่วซึมต้องทำการขังน้ำในแบบจำลอง เมื่อพบรอยรั่วก็ใช้ซิลิโคนหรือการอีพ็อกซีในการอุดรอยรั่ว ขณะที่การทดสอบความสามารถในการรับแรงดันและความมั่นคงของส่วนประกอบต่างๆ ทำได้โดยการทดลองในสภาพใช้งานจริง โดยเพิ่มแรงดันน้ำจนถึงจุดที่ออกแบบ

2) ระบบหมุนเวียนน้ำ การทดสอบในส่วนระบบหมุนเวียนน้ำ และฝายวัดอัตราการไหล ต้องตรวจสอบในส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบถังเก็บน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าสามารถเก็บกักน้ำได้เพียงพอต่อการใช้งานในการทดลองหรือไม่ และตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำออกจากถังเก็บน้ำบริเวณรอยเชื่อมเหล็ก
- ตรวจสอบระบบท่อ ทั้งท่อแข็ง (ท่อเหล็ก) และท่ออ่อน (ท่อนายยาง) โดยตรวจสอบการรั่วซึมบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างท่อกับท่อ และระหว่างท่อกับแบบจำลอง พร้อมทั้งตรวจสอบความสามารถในการรับแรงดัน
- ตรวจสอบวาล์วในระบบหมุนเวียนน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าติดตั้งถูกตำแหน่งหรือไม่ ตลอดจนตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำบริเวณเชื่อมต่อกับท่อ
- ตรวจสอบการติดตั้งฝาย เพื่อตรวจสอบว่าเกิดการรั่วของน้ำบริเวณจุดที่ทำการติดตั้งหรือไม่

3) ระบบควบคุม วัด จัดเก็บ และแสดงผลข้อมูล ในการทดสอบส่วนนี้จะเป็นการทดลองใช้งาน และการสอบเทียบเครื่องมือวัด 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 จะแตกต่างกับค่าที่ควรจะเป็นหรือไม่ ผลจากการสอบเทียบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 0.1% เท่านั้น

3.2) เซนเซอร์วัดความดัน

เมื่อทดลองใช้งานเซนเซอร์วัดความดันที่เกิดขึ้นในการไหลจริงพบว่า เซนเซอร์มีความไวต่อการเปลี่ยนความดันมาก จึงต้องทำการทดสอบว่าในการนำค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ไปใช้งาน จะต้องทำการเก็บค่าระดับความดันด้วยอัตราในการเก็บเท่าไร และใช้ระยะเวลาเท่าไร เพื่อที่จะให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องมากที่สุดจากการเปรียบเทียบค่าระดับความดัน (เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่นำไปสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐาน กับค่าระดับความดันที่วัดได้โดยสายยางวัดระดับน้ำซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ถูกต้อง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-1 และ 3-2

จากตารางที่ 3-1 จะเห็นได้ว่าอัตราการเก็บค่าความดันทุกๆ 1 วินาที จะให้ค่าความดันเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าความดันจริง และยังพบอีกว่าค่าระดับความดันที่วัดได้โดยเซนเซอร์ จะใกล้เคียงกับค่าระดับความดันจริงที่วัดได้จากสายยางวัดระดับน้ำ เมื่อค่าระดับความดันที่ใช้ทดลองสูงขึ้น ดังนั้นในช่วงที่ระดับความดันต่ำหรือไม่เกิน 2.5 เมตรของน้ำ จะใช้สายยางในการวัดค่าระดับความดันเทียบด้วย และจากตารางที่ 3-2 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการเก็บไม่มีผลต่อความถูกต้องมากนัก ดังนั้นในการศึกษาจะเก็บค่าความดันที่วัดได้โดยเซนเซอร์วัดความดันทุกๆ 1 วินาที ด้วยระยะเวลาในการเก็บประมาณ 2 นาที ซึ่งจะได้ค่าความดันทั้งสิ้น 120 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนค่าระดับความดันที่วัดได้

ตารางที่ 3-1 ผลของอัตราการเก็บข้อมูลระดับความถี่ต่อความถูกต้องของค่าระดับความถี่ จากการจัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความถี่

ระดับความถี่จริง (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	15.749	0.184	0.118
0.692	0.676	2.327	0.115	0.666	3.719	0.125	0.655	5.323	0.146	9.200	0.628	0.167
1.182	1.159	1.935	0.124	1.151	2.634	0.133	1.141	3.511	0.119	2.538	1.152	0.129
1.700	1.674	1.549	0.113	1.662	2.251	0.119	1.683	1.020	0.101	1.745	1.670	0.083
2.210	2.182	1.285	0.119	2.173	1.668	0.119	2.174	1.614	0.116	1.523	2.176	0.110
2.578	2.555	0.895	0.124	2.565	0.499	0.112	2.573	0.181	0.104	0.427	2.589	0.096
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	1.844			2.682			2.884			5.197		

หมายเหตุ : ข้อมูลมาจากการเดินระบบและเก็บข้อมูลความถี่เป็นเวลา 5 นาที (300 วินาที)

ตารางที่ 3-2 ผลของระยะเวลาการเก็บข้อมูลระดับความถี่ต่อความถูกต้องของค่าระดับความถี่ จากการจัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความถี่

ระดับความถี่จริง (ม.)	ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล (run time after steady state)											
	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	3.073	0.211	0.106
0.692	0.678	2.007	0.114	0.682	1.493	0.118	0.677	2.186	0.116	2.327	0.676	0.115
1.182	1.140	3.582	0.132	1.146	3.025	0.128	1.154	2.408	0.126	1.935	1.159	0.124
1.700	1.678	1.288	0.106	1.675	1.456	0.113	1.677	1.370	0.110	1.549	1.674	0.113
2.210	2.183	1.212	0.109	2.181	1.316	0.109	2.179	1.425	0.120	1.285	2.182	0.119
2.578	2.564	0.534	0.124	2.559	0.724	0.126	2.552	1.025	0.127	0.895	2.555	0.124
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	1.692			1.960			2.183			1.844		

ขณะที่การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันทำใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันโดยวิธีมาตรฐาน เพื่อยืนยันว่าเซนเซอร์วัดความดันที่นำมาใช้ได้มาตรฐาน และสามารถใช้ได้กับความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าตามที่คุณผลิตแนะนำให้ใช้ได้ จากการสอบเทียบ(โดยศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) พบว่าเซนเซอร์วัดความดันที่นำไปสอบเทียบ สามารถวัดความดันได้ใกล้เคียงกับความดันจริงมาก ลักษณะที่สอง คือ การสอบเทียบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง(No.1-No.15)กับเซนเซอร์ตัวที่นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อหา สมการปรับแก้ค่าระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์ที่ไม่ได้นำไปสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐานพบว่า เซนเซอร์บางตัวเสีย คือไม่สามารถวัดค่าความดันได้ หรือค่าระดับความดันที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูง การทดลองจึงใช้เซนเซอร์ที่วัดความดันได้ใกล้เคียงกับเซนเซอร์ตัวที่นำไปสอบเทียบจำนวน 11 ตัว ได้แก่ No.1 No.2 No.3 No.5 No.7 No.8 No.9 No.10 No.12 No.13 และ No.14 โดยสมการปรับแก้ระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวแสดงไว้ในภาคผนวก ข

3.3) ฝ่ายวัดอัตราการไหล

ทำการสอบเทียบฝ่ายวัดอัตราการไหลในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ขั้นพื้นฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล โดยใช้ถังวัดอัตราการไหล ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $Q = 0.0438 h_{weir}^{1.539}$ เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/วินาที) และ h_{weir} คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (เมตร)

รายละเอียดข้อมูลจากการสอบเทียบเครื่อง data logger เซนเซอร์วัดความดัน และฝ่ายวัดอัตราการไหลแสดงไว้ในภาคผนวก ข

จากการทำการทดลองในการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่อัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 0.0023 ลบ.ม./ชั่วโมง (92 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลสูงสุด) พบว่า การทดลองการไหลเข้าหรือการสูบน้ำ ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาลมีค่าสูงสุด 1.326 เมตรและระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันจุดสุดท้ายในชั้นน้ำมีค่าสูงสุด 7.430 เมตร ขณะที่การทดลองการไหลออกหรือการเติมน้ำ ระดับความดันในบ่อน้ำบาดาลมีค่าสูงสุด 11.993 เมตรและระดับความดันที่ตำแหน่งวัดความดันจุดสุดท้ายในชั้นน้ำมีค่าสูงสุด 5.838 เมตร ซึ่งแตกต่างจากค่าที่ออกแบบไว้มาก(ระดับความดันสูงสุดที่ออกแบบที่บ่อน้ำบาดาลเท่ากับ 50 เมตร และที่ด้านท้ายเท่ากับ 30 เมตร) ทั้งนี้เป็นเพราะในการทดลองใช้การควบคุมอัตราการไหลเพื่อให้เกิดการไหลในชั้นน้ำทั้งแบบเชิงเส้น แบบไม่เชิงเส้นและแบบผสม จึงต้องใช้อัตราการไหลตั้งแต่ค่าน้อยๆเพื่อให้เกิดการ

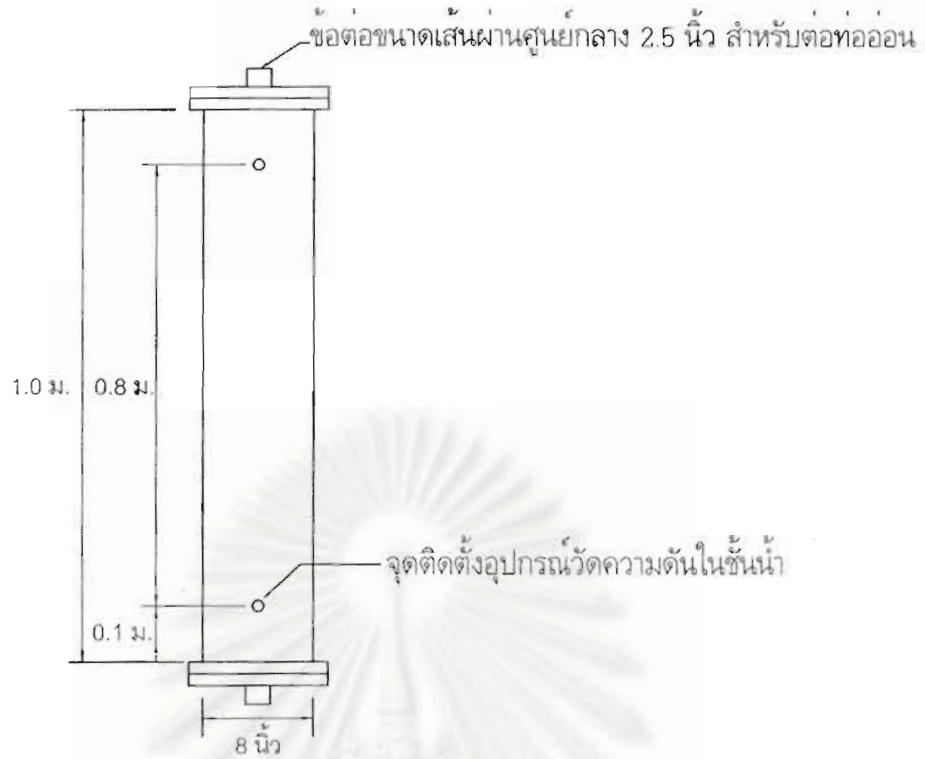
ไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ(ค่าเรย์โนลด์ต่ำ) จนถึงอัตราการไหลที่สูงขึ้นจนเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้น(ค่าเรย์โนลด์สูง) จึงต้องเปิดวาล์วทุกตัวจนสุด ระดับความดันที่ได้จึงต่ำกว่าที่ออกแบบมาก ซึ่งถ้ามีการหริวาล์วจะทำให้ระดับความดันสูงขึ้น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมืออื่นที่ใช้ในการทดลอง

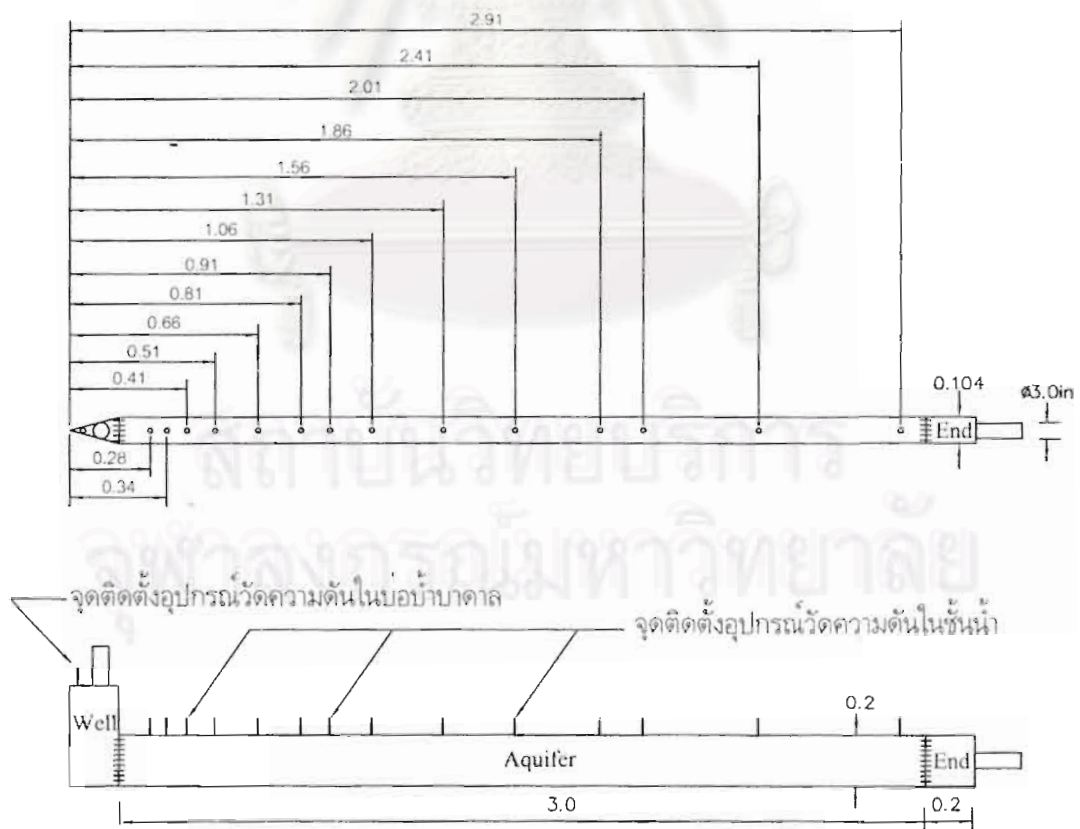
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.1 เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะต้องทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางศาสตร์ของวัสดุชั้นน้ำ ตลอดจนการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว จึงสร้างอุปกรณ์สำหรับทดลองขึ้นมาใหม่ ได้แก่ เพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอก และแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว โดยออกแบบให้สามารถใช้งานร่วมกับระบบหมุนเวียนน้ำ และระบบควบคุม วัด และจัดเก็บข้อมูล ของเครื่องจำลองการสูบน้ำ และอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอก ทำจากท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 8 นิ้ว หนา 0.5 เซนติเมตร และสูง 1.0 เมตร ด้านบนและล่างเป็นหน้าแปลนเพื่อต่อกับหน้าแปลนพีวีซี พร้อมข้อต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เพื่อต่อท่ออ่อนเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำ เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดินมีการเจาะรูทำเกลียวเพื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ระดับ 10 และ 90 เซนติเมตรจากหน้าแปลนล่าง ลักษณะของเพอร์เมียมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3-4

2) แบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว เป็นแบบจำลองที่เสมือนกับการตัดส่วนหนึ่งของแบบจำลองการไหลในแนวรัศมีออกมา เพื่อให้แบบจำลองการไหลในทิศทางเดียวสามารถใช้กับบ่อน้ำบาดาลทดลองได้ จึงมีลักษณะชั้นน้ำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 0.104 เมตร ยาว 3 เมตร และหนา 0.2 เมตร มีโครงเป็นเหล็ก ทุกด้านใช้พลาสติกใสในการประกอบ ขณะที่ด้านท้ายทำเป็นหน้าแปลนพร้อมข้อต่อที่มีตะแกรงกันทราย เมื่อประกอบกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 3-5 ทั้งนี้ด้านบนของบ่อน้ำบาดาลและชั้นน้ำ จะต้องมีการเจาะรูทำเกลียวสำหรับติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ไว้ด้วย



รูปที่ 3-4 ลักษณะของเพอร์เนี่ยมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3-5 ลักษณะของแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว

นอกจากการทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดันแล้ว การศึกษาจะต้องทำการทดลองหาคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ การกระจายขนาดของอนุภาคทราย และค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองดังนี้

3) อุปกรณ์ทดลองการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ ประกอบด้วยชุดตะแกรงมาตรฐานขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-6 เครื่องเขย่า (mechanical shaker) สำหรับเขย่าชุดตะแกรง และเครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับชั่งน้ำหนักทรายที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด เนื่องจากทรายที่นำมาใช้ในการทดลองมีขนาดในช่วงประมาณ 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 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4) อุปกรณ์ทดลองหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ ประกอบด้วยขวดหาความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer) แบบขวดตวงปากเล็ก (volumetric flask) ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใช้ในการหาความถ่วงจำเพาะของดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่ เตาอบสำหรับอบทรายให้แห้ง เทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องชั่งน้ำหนัก

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 3-6 ชุดตะแกรงมาตรฐาน

3.3 เงื่อนไขการทดลอง

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

1) การทดลองการไหลแบบมาตรฐานในเพอร์เมอเมิเตอร์(permeability test) เพื่อหาคคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำ หรือพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตัวกลาง

2) การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล (converging and diverging well flow) ซึ่งทำการทดลองใน 2 รูปแบบการไหล ได้แก่ การไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียว เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลภายใต้แรงดัน และเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลแบบมีการไหลนำพา (กรณีการไหลในแนวรัศมี) และแบบไม่มีการไหลนำพา (กรณีการไหลในทิศทางเดียว) ตลอดจนหาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลดังกล่าว

การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างทรายชั้นน้ำ 4 ขนาด โดยกำหนดสัญลักษณ์และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ดังที่จะกล่าวต่อไป

3.3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดลอง

S	คือ	ทรายชั้นน้ำที่ใช้ในการทดลองจำนวน 4 ชนิด (S1 - S4)
SA	คือ	การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ ช่วงก่อนการทดลอง (SA1) และช่วงหลังการทดลอง (SA2)
SG	คือ	การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของอนุภาคทรายชั้นน้ำ
ST	คือ	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล 14 ค่า (ST1 - ST14)
CR	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล 9 ค่า (CR1 - CR9)
DR	คือ	การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล 9 ค่า (DR1 - DR9)
CU	คือ	การทดลองการไหลในทิศทางเดียวของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล 5 ค่า (CU1 - CU5)

DU คือ การทดลองการไหลในทิศทางเดียวของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วย อัตราการไหล 5 ค่า (DU1 - DU5)

ตัวอย่างการแปลความหมายของสัญลักษณ์การทดลอง

SA1/S2 คือ การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ช่วงก่อน ทำการทดลอง

SG/S2 คือ การทดลองหาความถ่วงจำเพาะ ของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ST1/S1 คือ การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ด้วยอัตราการไหล Q1

CR2/S2 คือ การทดลองการไหลในแนวรัศมีของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2 ด้วยอัตราการไหล Q2

DU3/S4 คือ การทดลองการไหลในทิศทางเดียวของน้ำใต้ดินออกจากบ่อน้ำบาดาล ของ ทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4 ด้วยอัตราการไหล Q3

3.3.2 รายละเอียดเงื่อนไขการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนหลักดังที่กล่าวข้างต้น โดยในส่วนการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของทรายชั้นน้ำจะมี 2 ชุดการทดลอง และการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินจะมี 5 ชุดการทดลอง รวมเป็น 7 ชุดการทดลองหลัก รวมชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการทั้งหมด 180 ชุด โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3-3

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	การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล	CR1/S1 - CR9/S4	36
5	การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล	DR1/S1 - DR9/S4	36
6	การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล	CU1/S1 - CU5/S4	20
7	การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล	DU1/S/ - DU5/S4	20

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนการทดลองหลักดังที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งแต่ละขั้นตอนการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคชั้นน้ำ (SA1/S1 - SA2/S4)

การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ ต้องทำทั้งก่อนและหลังจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของการกระจายขนาดของอนุภาคช่วงก่อนและหลังจากการทดลอง และเพื่อตรวจสอบว่ามีทรายหลุดออกไปขณะทำการทดลองหรือไม่ โดยการทดลองจะทำตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

นำทรายตัวอย่างที่แห้งประมาณ 500 กรัม มาร้อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 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

3.4.2 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของอนุภาคทรายชั้นน้ำ (SG/S1 - SG/S4)

การหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ ต้องทราบน้ำหนักของทรายที่อบแห้งและน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทรายที่ใช้ทดลอง 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 ควรจะต้องทำการหากราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็ม และอุณหภูมิ โดยสามารถทำได้ดังนี้

- ล้างขวดหาความถ่วงจำเพาะให้สะอาด เติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดคอขวด (อ่านค่าที่ระดับท้องน้ำ)
- ต้มไล่ฟองอากาศ หรือดูดโดยปั๊มอากาศ ประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด
- เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอรระดับคอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกันมาก ให้ตะแคงขวดแล้วกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดี ทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับลำดับที่ 3 และ 4 โดยให้ความร้อน หรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิใช้งาน (20-40 องศา) ประมาณ 4-5 จุด
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็มกับอุณหภูมิ

2) การหาน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทราย และน้ำหนักทรายอบแห้ง

- นำทรายตัวอย่างที่แห้งประมาณ 50 กรัม ผสมน้ำกลั่นแล้วควนให้เข้ากัน โดยให้ส่วนผสมไม่เกิน 450 ลูกบาศก์เซนติเมตร

- เทส่วนผสมน้ำและทรายลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะ ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะ ลงในขวดให้หมด ระวังอย่าให้ระดับน้ำเกินขีดวัดที่คอขวด
- ต้มไล่ฟองอากาศ หรือดูดด้วยปั๊มอากาศ ประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดวัดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง
- ถ้าระดับน้ำลดลง ให้เติมน้ำเต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำดินในขวด
- เทแล้วล้างส่วนผสมในขวดหาความถ่วงจำเพาะ ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในภาชนะ นำไปอบให้แห้ง เพื่อชั่งหาน้ำหนักดินอบแห้ง

3.4.3 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน (ST1/S1 - ST14/S4)

การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ทำการทดสอบโดยวิธีความดันคงที่ (constant head) โดยวิธีการทดลองดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D 2434-68 เนื่องจากเพอร์เมียมิเตอร์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ การทดลองจึงดำเนินการโดยใช้ เพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอกที่จัดทำขึ้นใหม่ โดยใช้ระบบหมุนเวียนน้ำ และระบบควบคุม วัด และจัดเก็บข้อมูลของเครื่องจำลองการสูบน้ำ และอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง

- เตรียมทรายชั้นน้ำที่จะทำการทดสอบ โดยการผึ่งให้แห้ง
- ประกอบหน้าแปลนล่างเข้ากับตัวเพอร์เมียมิเตอร์ แล้วนำไปใส่ชาตั่ง
- ใส่ทรายชั้นน้ำที่จะทดสอบ ลงในเพอร์เมียมิเตอร์ที่มีน้ำบรรจุอยู่บางส่วน เมื่อใส่ทรายจนเต็มและแน่นดีแล้วจึงทำการปิดหน้าแปลนด้านบน และบันทึกค่าน้ำหนักทรายที่ใส่ลงไป
- ต่อก่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนบนของเพอร์เมียมิเตอร์ เข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำที่ข้อต่อ A โดยเปิดวาล์ว GV1 และ GV2

ปิดวาล์ว GV3 และ GV4 (ดูรูปที่ 3-1) และต่อท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนล่างของเพอร์เมียมิตเตอร์ ที่ตั้งลงวางระบายน้ำ เริ่มเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อให้บางส่วนหนึ่งหมุนวนอยู่ในระบบ by pass จากนั้นจึงค่อยๆ หรีวาล์ว GV1 จนปิดสนิท ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้น้ำอัดจากด้านบนสู่ด้านล่างของเพอร์เมียมิตเตอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูงกว่าที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้เกิดแรงดันหรืออัตราการไหลที่มากกว่าที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะทำให้ทรายแน่นขึ้นโดยจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที

- ถอดหน้าแปลนด้านบนออกเพื่อตรวจสอบว่า ทรายที่บรรจุอยู่ในเพอร์เมียมิตเตอร์มีการยุบตัวหรือไม่ ถ้ามีการยุบตัวต้องใส่ทรายเพิ่ม แล้วทำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้จนไม่มีการยุบตัวของทราย บันทึกค่าน้ำหนักทรายแห้งทั้งหมดที่ใส่ลงในเพอร์เมียมิตเตอร์เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความพรุน แล้วจึงเริ่มทำการทดลองโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับความดัน

2) ขั้นตอนการทดลอง

- ต่อท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนล่างของเพอร์เมียมิตเตอร์ เข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำที่ข้อต่อต่อ A โดยเปิดวาล์ว GV1 และ GV2 ปิดวาล์ว GV3 และ GV4 (ดูรูปที่ 3-1) และต่อท่ออ่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากหน้าแปลนบนของเพอร์เมียมิตเตอร์ ลงวางวัดอัตราการไหลเดินเครื่องสูบน้ำ น้ำจากถังเก็บน้ำจะไหลเข้าสู่เพอร์เมียมิตเตอร์จากด้านล่างขึ้นบน และน้ำส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ by pass จากนั้นจึงค่อยๆ หรีวาล์ว GV1 จนปิดสนิท ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้ได้อัตราการไหลที่ต้องการ โดยดูจากระดับน้ำเหนือสันฝายที่หลอดวัดระดับน้ำ เมื่อเห็นว่าระดับความดันไม่เปลี่ยนแปลงหรืออยู่ในสภาวะคงตัว จึงทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) และระดับความดันที่จุดวัดที่ระยะ 10 และ 90 เซนติเมตร จากหน้าแปลนด้านล่าง บันทึกเป็น h_D และ h_U ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3-4) ระหว่างการทดลองให้บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลองด้วย เพื่อนำไปหาความหนืดเปรียบเทียบของน้ำ (ν) ที่ใช้ในการทดลอง

- ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำให้เกิดการไหลอีกค่าหนึ่ง รอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จึงบันทึกค่า h_{weir} h_D และ h_U ทำตามขั้นตอนนี้

จนครบทั้ง 14 ค่าอัตราการไหล เพื่อให้เกิดการไหลผ่านตัวกลางทั้งการไหลแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น โดยอัตราการไหลต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองมีระดับน้ำเหนือสันฝายประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลโดยให้ระดับน้ำเหนือสันฝาย เพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 0.5 เซนติเมตรและอัตราการไหล 5 ค่าสุดท้าย ให้ระดับน้ำเหนือสันฝายเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 1 เซนติเมตร

- จากผลการทดลองที่ได้นำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล กับความชันชลศาสตร์ต่อไป

3.4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CR1/S1 - CR9/S4)

การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง

- เตรียมทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยการผึ่งให้แห้ง
- ถอดบ่อน้ำบาดาลทดลองออกจากแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ใช้ครนยกด้านหัวของแบบจำลองขึ้นเพื่อให้แบบจำลองเอียง จากนั้นจึงใส่น้ำลงไปบางส่วน แล้วใส่ทรายชั้นน้ำลงไปจนเต็ม เมื่อทรายเต็มและแน่นดีแล้วก็ทำการประกอบบ่อน้ำบาดาลเข้ากับแบบจำลอง บันทึกค่าน้ำหนักทรายที่ใส่ลงไปแบบจำลอง
- ต่อก่อนหน้าเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำ โดยต่อก่อนหน้าเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว จากบ่อน้ำบาดาลต่อเข้าทางข้อต่อ A และต่อก่อนหน้าเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวน 7 เส้น จากด้านท้ายแบบจำลองต่อเข้าทางข้อต่อ B เปิดวาล์ว GV1 GV2 และ GV6 ปิดวาล์ว GV3 GV4 GV5 และ BV1 (ดูรูปที่ 3-1) เริ่มเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ น้ำไหลเข้าแบบจำลองทางบ่อน้ำบาดาล ขณะที่น้ำส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ by pass จากนั้นจึงค่อยๆ หริ้ววาล์ว GV1 จนปิดสนิท ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดแรงดันหรืออัตรา

การไหลที่มากกว่าที่ใช้ในการทดลองซึ่งจะทำให้ทรายแน่นขึ้นโดยจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที

- ถอดบ่อน้ำบาดาลทดลองออกเพื่อตรวจสอบว่าทรายที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองมีการยุบตัวลงหรือไม่ ถ้ามีการยุบตัวจะต้องใส่ทรายเพิ่ม แล้วทำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้จนไม่มีการยุบตัวของทราย บันทึกค่าน้ำหนักทรายแห้งทั้งหมดที่ใส่ลงในแบบจำลองเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความพรุน แล้วจึงเริ่มทำการทดลองโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าระดับความดันตามตำแหน่งที่ต้องการ

2) ขั้นตอนการทดลอง

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

- เริ่มเดินเครื่องสูบน้ำ น้ำส่วนหนึ่งจะไหลเข้าแบบจำลองทางด้านท้าย ขณะที่น้ำอีกส่วนหนึ่งจะหมุนวนอยู่ในระบบ by pass จากนั้นจึงค่อยๆ รัว วาล์ว GV1 จนปิดสนิท แล้วปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อให้ได้ อัตราการไหลค่าหนึ่งโดยดูจากระดับน้ำเหนือสันฝายที่หลอดวัดระดับน้ำ เมื่อเห็นว่าระดับความดันไม่เปลี่ยนแปลงจึงทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล (h_w) และชั้นน้ำ ($h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$) ในช่วงที่ทำการทดลองให้บันทึกคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการทดลองด้วยเพื่อนำไปหาค่าความหนืดเปรียบเทียบของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

- ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำให้เกิดการไหลอีกค่าหนึ่ง รอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงบันทึกค่า h_{weir} h_w h_{28} h_{34} ... h_{199} ทำตามขั้นตอนนี้จนครบทั้ง 9 ค่าอัตราการไหล

- นำผลการทดลองที่ได้ ไปวิเคราะห์หาพฤติกรรมทางศาสตร์ต่อไป

สาเหตุที่ต้องทำการทดลองด้วยอัตราการไหลทั้ง 9 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) คือเกิดการไหลแบบเชิงเส้นบริเวณที่อยู่ไกลจากบ่อน้ำบาดาลและการไหลแบบไม่เชิงเส้นบริเวณที่อยู่ใกล้บ่อน้ำบาดาล จะเกิดขึ้นเมื่อค่า $r_w < r_{cr} < 1.99$

เนื่องจากการใช้รัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาลในการแบ่งสภาพการไหลในการทดลอง อาจเข้าใจได้ยาก ในที่นี้จึงใช้ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อน้ำบาดาล (Re'_{wf}) เป็นตัวแบ่งสภาพการไหล

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

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

$r_{cr} = (Re'_{wf})\left(\frac{r_w}{d_{50}}\right)\left(\frac{d_{50}}{Re'_{cr}}\right) = \left(\frac{Re'_{wf}}{Re'_{cr}}\right)(r_w)$ และสามารถแบ่งสภาพการไหลในการทดลองตาม Re'_{wf} 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 $r_{cr} > 1.99$

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

เมื่อแทนค่า $r_w = 0.2$ ม.

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

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

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

ดังนั้นในการทดลองจึงแบ่งอัตราการไหลเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วง Q1-Q3 คือ อัตราการไหลที่ทำให้ $Re'_{wf} < Re'_{cr}$ ช่วง Q4-Q6 คือ อัตราการไหลที่ทำให้ $Re'_{cr} \leq Re'_{wf} \leq 9.95 Re'_{cr}$ และช่วง Q7-Q9 คือ อัตราการไหลที่ทำให้ $Re'_{wf} > 9.95 Re'_{cr}$ โดยอัตราการไหลดังกล่าวประมาณได้จากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr}) ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำ

ซึ่งอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

$Q_1 = 0.4 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_2 = 0.8 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_3 = 1.1 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_4 = 4.4 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_5 = 6.1 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_6 = 7.3 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_7 = 20.0 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_8 = 21.3 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที
$Q_9 = 23.1 \times 10^{-4}$	ลบ.ม./วินาที

3.4.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DR1/S1 - DR9/S4)

การทดลองส่วนนี้จะทำต่อจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4 โดยมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกัน แตกต่างกันเฉพาะทิศทางการไหลของน้ำ การทดลองนี้ น้ำจะไหลเข้าสู่แบบจำลองทางด้านบ่อน้ำบาดาล และไหลออกจากบ่อทางด้านท้าย ดังนั้นขั้นตอนที่ 1 ของการทดลอง จะต้องทำการเปิดวาล์ว GV1 GV2 และ GV6 และปิดวาล์ว GV3 GV4 GV5 และ BV1 (รูปที่ 3-1) เพื่อให้ น้ำไหลในทิศทางที่ต้องการ ในการทดลองจะใช้ค่าอัตราการไหลทั้งหมด 9 ค่า ที่เท่ากับการทดลองกรณีการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทั้งนี้เพื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบพฤติกรรมกรไหลที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกรณี ว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

3.4.6 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CU1/S1 - CU5/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลอง ในหัวข้อที่ 3.4.4 แตกต่างกันเฉพาะรูปร่างของแบบจำลอง จากแบบจำลองในแนวรัศมี เป็นแบบจำลองในทิศทางเดียว และทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลทั้งหมด 5 ค่า จะเท่ากับบาง ส่วนของการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.4 (Q1-Q5) เพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกันได้ สาเหตุที่ทำการทดลองด้วยอัตราการไหลเพียง 5 ค่า เนื่องจากแบบจำลองการไหล ในทิศทางเดียวสามารถรับแรงดันได้น้อยกว่าแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี

3.4.7 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล (DU1/S1 - DU5/S4)

ขั้นตอนการเตรียมทรายสำหรับทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เหมือนกับการทดลอง ในหัวข้อที่ 3.4.5 แตกต่างกันเฉพาะรูปร่างของแบบจำลอง จากแบบจำลองในแนวรัศมี เป็นแบบจำลองในทิศทางเดียว และทำการทดลองโดยใช้ค่าอัตราการไหลทั้งหมด 5 ค่า เท่ากับบาง ส่วนของการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.5-3.4.6 (Q1-Q5) เพื่อให้สามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นจากการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล และ การไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

3.5 การจัดการข้อมูลจากการทดลอง

ในการทดลองมีข้อมูลที่ต้องทำการคำนวณและปรับแก้ก่อนนำไปใช้ คือ ข้อมูลระดับความดันน้ำ และระดับน้ำเหนือสันฝาย ของการทดลองการไหลของน้ำใต้ดิน ไม่ว่าจะเป็นการทดลองการไหลแบบ มาตรฐาน หรือการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ซึ่งการวัดระดับความดันน้ำใช้สายยาง วัดระดับน้ำเมื่อค่าระดับความดันน้ำไม่เกิน 2.5 เมตร และที่ระดับความดันน้ำเกินกว่านี้จะใช้เซนเซอร์วัด ความดัน เนื่องจากเซนเซอร์วัดความดันมีความไวต่อการเปลี่ยนความดันมากดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1.5 ขณะที่ข้อมูลระดับน้ำเหนือสันฝายวัดได้โดยใช้หลอดวัดระดับน้ำ ซึ่งติดตั้งไว้ด้านข้างรางวัดอัตรา การไหล หรือใช้เซนเซอร์วัดความดันที่ติดตั้งอยู่ใต้รางวัดอัตราการไหล

ในการวัดระดับความดันโดยใช้สายยางวัดระดับน้ำหรือหลอดวัดระดับน้ำ สามารถอ่านค่าระดับ ความดันและระดับน้ำเหนือสันฝายได้โดยตรง แต่ถ้าหากใช้เซนเซอร์วัดความดันต้องอาศัยเครื่อง data logger และโปรแกรม data logging ในการแปลค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาจากเซนเซอร์วัดความดัน ไป เป็นระดับความดันหรือระดับน้ำเหนือสันฝาย ซึ่งโปรแกรม data logging ที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้กับเครื่อง จำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดินสามารถใช้งานได้ 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ การดูผลการทดลองขณะ ดำเนินการทดลอง (real time) และเก็บบันทึกข้อมูล การดูผลการทดลองย้อนหลังในแต่ละการทดลอง และการถ่ายโอนข้อมูลทั้งหมดจากหน่วยความจำในเครื่อง data logger ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ การดู

ผลการทดลองขณะดำเนินการทดลองและเก็บบันทึกข้อมูล มีหน้าจอหลักดังแสดงในรูปที่ 3-7 ซึ่งข้อมูลที่ต้องใส่มีดังนี้

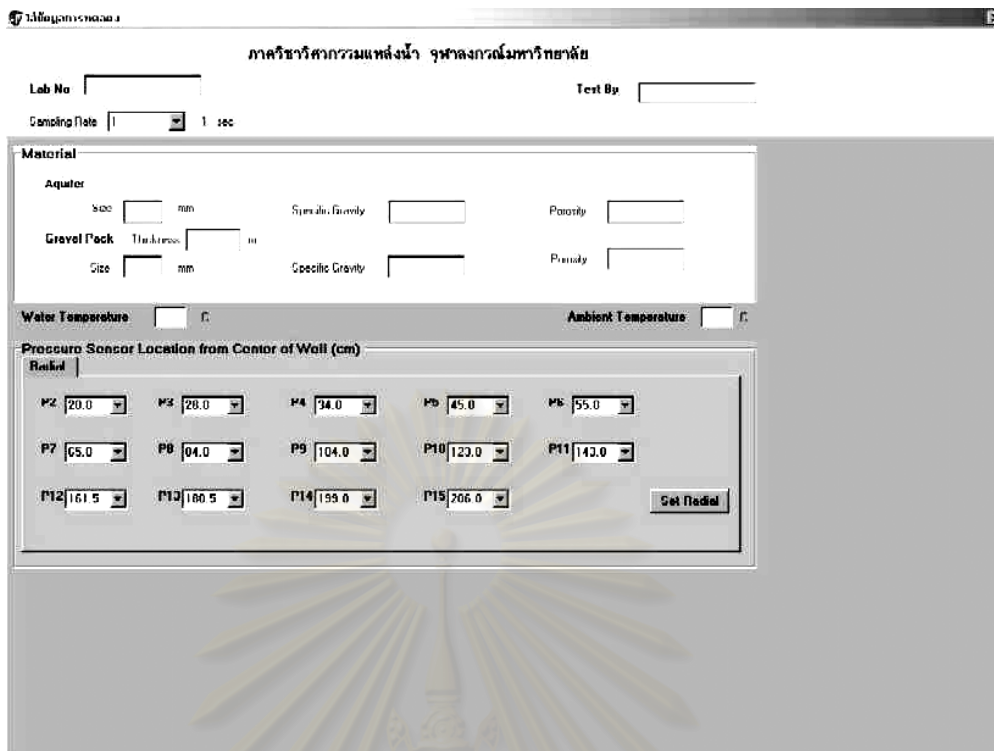
- sampling rate คือ เวลาที่กำหนดให้โปรแกรม data logging ทำการเก็บข้อมูล หรืออัตราการเก็บข้อมูล เช่น ถ้ากำหนด sampling rate เท่ากับ 1 วินาที โปรแกรม data logging ทำการเก็บข้อมูลระดับความดันทุกๆ 1 วินาที

- ความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ
- คุณสมบัติของทรายชั้นน้ำและอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการทดลอง
- ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดความดันที่เลือกใช้

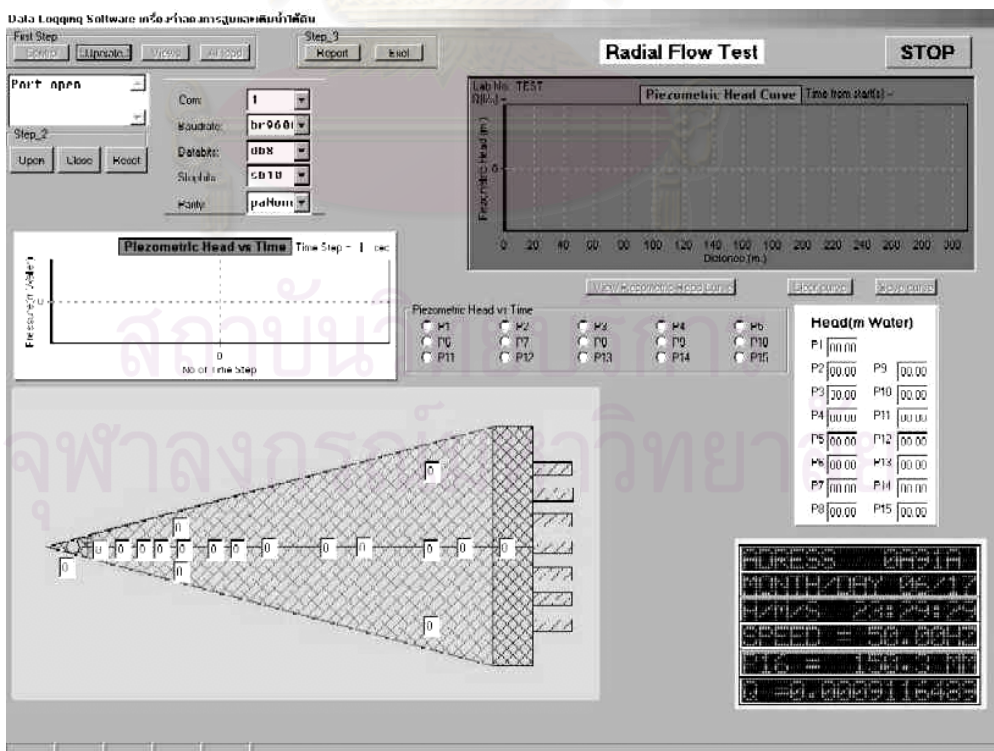
เมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้วก็กดปุ่ม "Set Radial" เพื่อเข้าสู่หน้าจอแสดงผลข้อมูล กดปุ่ม "Open" เพื่อเป็นการเปิด port สื่อสารให้เครื่อง data logger ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม data logging ลักษณะหน้าจอที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 3-8

เมื่อเก็บข้อมูลจนกระทั่งครบระยะเวลาในการเก็บแล้ว ให้กดปุ่ม "Report" เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปของรายงาน (ไฟล์สกุล *.QPR) ซึ่งต้องใช้โปรแกรม data logging ในการเปิดดูข้อมูลในภายหลัง หรือกดปุ่ม "Excel" เพื่อเก็บข้อมูลดิบจากการทดลองให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลตาราง (ไฟล์สกุล *.XLS) ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปประมวลผลเพิ่มเติมได้ดีกว่าการใช้โปรแกรม MS Excel ซึ่งมีรูปแบบข้อมูลผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-7 หน้าจอสำหรับใส่ข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 3-8 หน้าจอแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างผลการทดลองที่เก็บในรูปแบบข้อมูลตาราง

Address	Date	Times	Rpm	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10	Ch11	Ch12	Ch13	Ch14	Ch15	Ch16
00027	06/01	1	14.14	1.17	1.49	62.16	1.33	1.5	0	1.68	1.78	2.29	2.47	0	3.06	3.72	4.43	0	146.6
0004E	06/01	2	14.14	1.13	1.47	62.16	1.54	1.51	0	1.61	1.79	2.19	2.6	0	2.99	3.75	4.43	0	145.2
00075	06/01	3	14.14	1.07	1.5	62.16	1.5	1.51	0	1.45	1.76	2.07	2.57	0	3.04	3.69	4.12	0	146.9
0009C	06/01	4	14.14	1.14	1.5	62.16	1.53	1.46	0	1.72	1.45	2.17	2.57	0	3.04	3.75	4.28	0	141.5
000C3	06/01	5	14.14	1.13	1.38	62.16	1.53	1.51	0	1.43	1.74	2.28	2.44	0	3.04	3.79	4.46	0	144.9
000EA	06/01	6	14.14	.78	1.49	62.16	1.49	1.22	0	1.67	1.65	2.32	2.33	0	3.01	3.67	4.44	0	141.5
00111	06/01	7	14.14	1.14	1.47	62.16	1.21	1.47	0	1.67	1.75	1.96	2.47	0	3.12	3.68	4.19	0	144.9
00138	06/01	8	14.14	1.07	1.46	62.16	1.17	1.42	0	1.67	1.68	2.31	2.53	0	3.08	3.71	4.5	0	133.9
0015F	06/01	9	14.14	.93	1.57	62.16	1.53	1.51	0	1.72	1.76	2.29	2.61	0	2.94	3.85	4.25	0	140.1
00186	06/01	10	14.14	1.14	1.47	62.16	1.5	1.43	0	1.72	1.21	2.32	2.4	0	3.04	3.68	4.51	0	145.5
001AD	06/01	11	14.14	1.27	1.28	62.16	1.63	1.47	0	1.35	1.64	2.19	2.38	0	2.99	3.82	4.12	0	145.7
001D4	06/01	12	14.14	1.24	1.58	62.16	1.63	1.46	0	1.72	1.6	2.18	2.26	0	3.14	3.6	4.42	0	142.4
001FB	06/01	13	14.14	1.15	1.43	62.16	1.45	1.4	0	1.65	1.75	2.28	2.54	0	3.01	3.72	4.47	0	144.6
00222	06/01	14	14.14	1.14	1.49	62.16	1.53	1.31	0	1.75	1.63	2.24	2.61	0	2.89	3.64	4.53	0	145.7

จากตารางที่ 3-4 ข้อมูลในแถวแรก"Address"คือ ตำแหน่งของข้อมูลที่เกิดขึ้นในหน่วยความจำของ data logger ข้อมูลในแถวที่สอง"Date"คือ วันที่ทำการทดลอง ข้อมูลในแถวที่สาม"Times"คือ เวลา นับตั้งแต่เริ่มเก็บข้อมูล (วินาที) ข้อมูลในแถวที่สี่"Rpm"คือ ความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง ข้อมูลในแถวที่ห้าถึงสิบเก้า"Ch1...Ch15"คือ ข้อมูลระดับความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร) ตัวเลขหมายถึงหมายเลขสายสัญญาณ เมื่อสังเกตจะมีบางจุดที่ข้อมูลเป็นศูนย์ คือไม่ได้ทำการติดตั้ง เซนเซอร์วัดความดัน และบางจุดมีค่า 62.16 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้สูงสุดของเซนเซอร์วัดความดัน แสดงว่าเซนเซอร์ตัวนั้นเสียหรือสายนำสัญญาณเสีย และข้อมูลในแถวสุดท้าย"Ch16"คือ ระดับน้ำเหนือสันฝาย (มิลลิเมตร)

จากการทดสอบเครื่องมือในหัวข้อ 3.1.4 พบว่า ควรเก็บข้อมูลระดับความดันด้วยอัตราการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 วินาที และใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 2 นาที หลังจากเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จากนั้นนำข้อมูลระดับความดันที่เก็บได้มาหาค่าเฉลี่ย และทำการปรับแก้ระดับความดันดังนี้

1) ปรับแก้ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง ตามสมการที่ได้จากการสอบเทียบกับเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบโดยวิธีมาตรฐานแล้ว

2) ปรับแก้ค่าระดับความดันเนื่องจากระดับในการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันต่างกัน เพราะเซนเซอร์วัดความดันที่ใช้เป็นเซนเซอร์แบบวัดความดันเกจ ซึ่งค่าระดับความดันที่ได้คือค่าระดับความดัน ณ จุดที่ทำการติดตั้ง ดังนั้นการปรับแก้ค่าความดันเนื่องจากระดับการติดตั้งจะต้องทำดังนี้

- การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน เนื่องจากเพอร์เมียมิตอร์วางในแนวตั้งและวัดความดันในระดับที่ต่างกัน คือ h_D และ h_U มีค่าระดับต่างกัน 80 เซนติเมตร จึงต้องบวกระดับที่ต่างกันเข้าไปกับ $h_{U/LAB}$ ที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดัน นั่นคือ

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

- การทดลองการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ทั้งกรณีการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว จึงต้องปรับแก้ระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาล เนื่องจากระดับติดตั้งอยู่สูงจากระดับติดตั้งของเซนเซอร์วัดความดันในชั้นน้ำ (ระดับอ้างอิง) เท่ากับ 18 เซนติเมตร จึงต้องทำการปรับแก้ความดันที่บ่อน้ำบาดาล ($h_{w/LAB}$) โดยการบวกระดับความดันที่ต่างกันเข้าไปตามสมการ

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลทดลอง

บทนี้จะสรุปผลการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 โดยแยกตามประเภทการทดลอง ดังนี้

4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ

การทดลองหาการกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำ ต้องนำทรายที่ใช้ทำการทดลองมาร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน แล้วหาค่าน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาร้อยละสะสมของตัวอย่างทรายที่ค้างและผ่านตะแกรงแต่ละขนาด เมื่อนำตัวอย่างทรายจากช่วงก่อนและหลังจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินมาร่อนผ่านตะแกรงชุดดังกล่าวแล้ว จะได้ค่าร้อยละสะสมของทรายที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4-1

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า ค่าร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงของทรายจากช่วงก่อนและหลังจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างเฉลี่ยมีค่า 0.39 เปอร์เซ็นต์ จึงนำค่าจากสองช่วงมาเฉลี่ยเป็นตัวแทน แล้วนำค่าร้อยละเฉลี่ยที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด กับขนาดตะแกรงไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษเซมิล็อกเรียกว่า “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 จะเห็นได้ว่า ทราย S1-S4 ที่นำมาใช้เป็นทรายชั้นน้ำในการทดลองเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ เนื่องจากมีค่า $C_u < 6$ และ $C_c \leq 1$ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

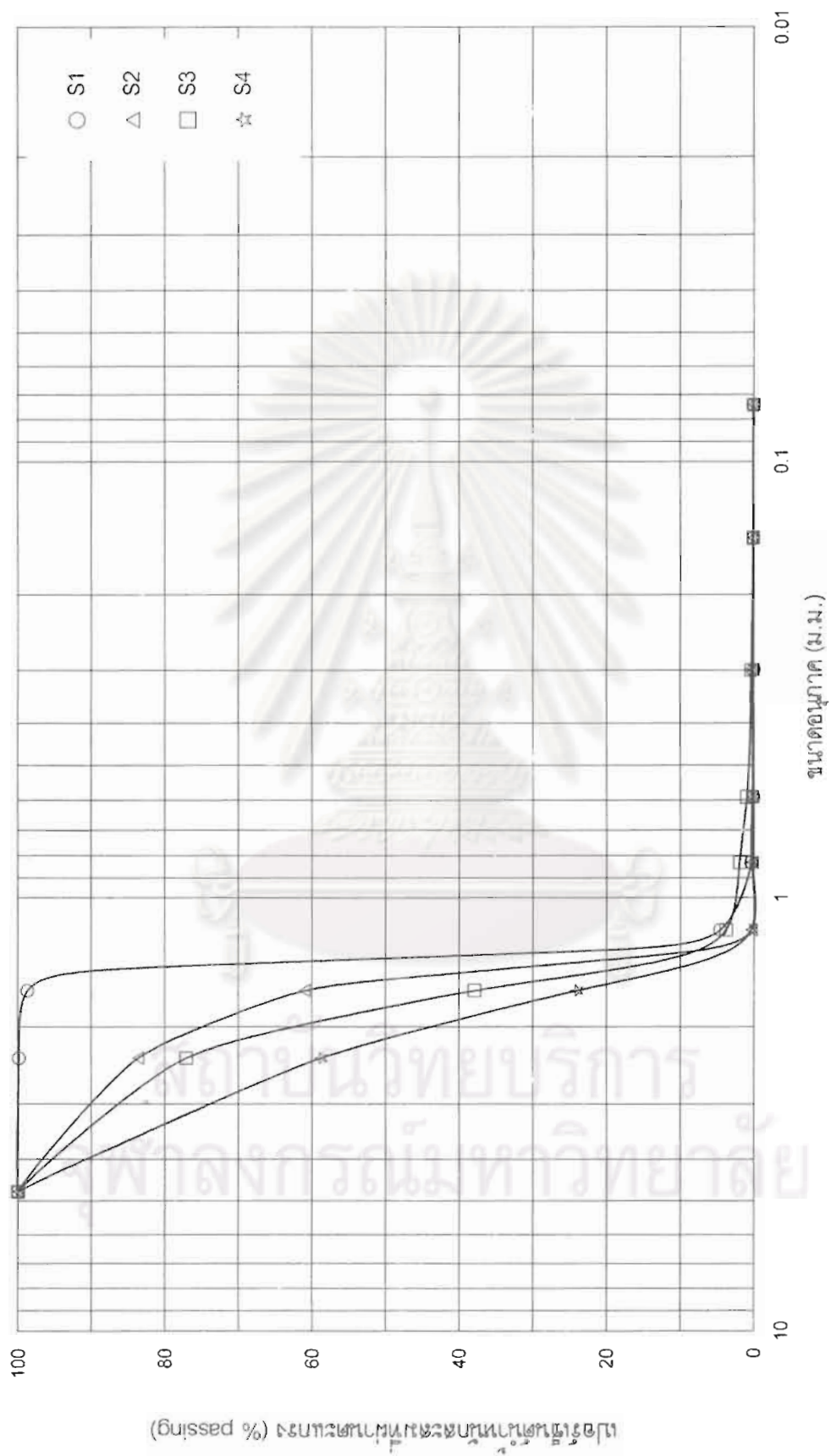
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (ม.ม.)	S1			S2			S3			S4		
		% Passing			% Passing			% Passing			% Passing		
		SA1/S1	SA2/S1	เฉลี่ย	SA1/S2	SA2/S2	เฉลี่ย	SA1/S3	SA2/S3	เฉลี่ย	SA1/S4	SA2/S4	
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	
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
... ถัด	-	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 ₁₀ (ม.ม.)	d ₃₀ (ม.ม.)	d ₆₀ (ม.ม.)	d ₅₀ (ม.ม.)	C _u (ม.ม.)	C _c (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	0.90
S4	1.48	1.73	2.40	2.10	1.62	0.84



รูปที่ 4-1 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ

เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรง (% passing)

4.2 ความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ

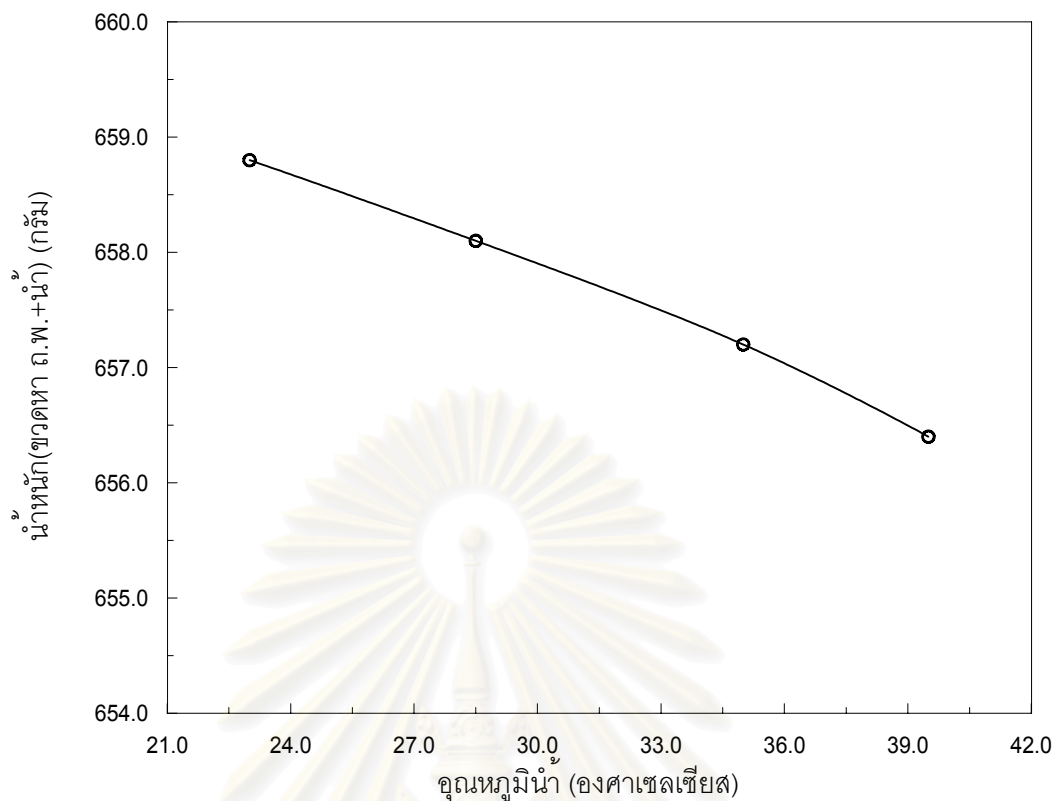
การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของทรายชั้นน้ำ ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.2 ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การหากราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขวดหาความถ่วงจำเพาะ และการหาน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทรายและน้ำหนักทรายอบแห้ง ในส่วนแรกได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำรวมกับขวดหาความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และเมื่อทราบน้ำหนักทรายอบแห้ง (W_s) และน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับทราย (W_w) จากการทดลองในส่วนที่สอง ก็สามารถคำนวณหาความถ่วงจำเพาะได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ	W_s	คือ	น้ำหนักทรายอบแห้ง (กรัม)
	W_2	คือ	น้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะที่มีระดับน้ำที่คอขวด (กรัม) หาได้จากกราฟสำหรับปรับแก้ น้ำหนักของน้ำและขวดหาความถ่วงจำเพาะ
	W_1	คือ	น้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะที่มีน้ำผสมกับทรายที่อุณหภูมิทดลอง (กรัม)
	G_T	คือ	ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิทดลอง

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-2 กราฟสำหรับปรับแก้น้ำหนักของน้ำและขวดหาคความถ่วงจำเพาะที่ใช้ในการทดลอง

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
น้ำหนักขวดหาคความถ่วงจำเพาะและน้ำ (กรัม) : W_2	657.88	657.96	657.75	657.96
น้ำหนักขวดหาคความถ่วงจำเพาะ น้ำและทราย (กรัม) : W_1	681.9	689.0	689.5	687.6
น้ำหนักทรายอบแห้ง (กรัม) : W_s	39.0	49.6	50.8	47.4
ความถ่วงจำเพาะของน้ำ : G_f	0.9957	0.9959	0.9954	0.9959
ความถ่วงจำเพาะของทราย	2.592	2.661	2.654	2.658

4.3 การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

คุณสมบัติทางชลศาสตร์หรือพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของการทดลองนี้คือ ค่าความนำชลศาสตร์ (K_1') ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลแบบเชิงเส้น พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_1') และ พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_1') ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลแบบไม่เชิงเส้นในลักษณะการไหลแบบทิศทางเดียว และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr}) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้แบ่งประเภทการไหลว่าเป็นการไหลแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้น โดยทำการทดลองแต่ละขนาดของทรายชั้นน้ำ ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 14 ค่า เพื่อให้เกิดการไหลทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น

จากการทดลองในแต่ละทรายชั้นน้ำ เมื่อทราบน้ำหนักทรายแห้ง ความถ่วงจำเพาะของทราย และปริมาตรของเพอร์เมียมิเตอร์ที่ใช้ สามารถหาความพรุนของทรายเป็นค่าได้ เช่น การทดลองของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ใช้ทรายแห้งทั้งหมด 44.491 กิโลกรัมในการทดลอง ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.592 และเพอร์เมียมิเตอร์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19.32 เซนติเมตร สูง 1.0 เมตร คำนวณปริมาตรของเพอร์เมียมิเตอร์ ได้เท่ากับ 0.0293 ลูกบาศก์เมตร จากสมการที่ 2-3 จะได้ความพรุน

$$\phi = \frac{0.0293 - \left(\frac{44.491}{1000 \times 2.592}\right)}{0.0293} = 0.414$$

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

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

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

$$3) \text{ คำนวณค่าเรย์โนลด์จากสมการที่ 2-13 } Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right) \text{ เมื่อทราบค่า } v, \phi, d_{50} \text{ และ } v \text{ แล้ว ในการหาค่าความหนืดเปรียบเทียบ (v) ต้องทราบอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลองก่อน ซึ่งน้ำที่ใช้ในการทดลองมีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเปรียบเทียบเท่ากับ } 0.897 \times 10^{-6} \text{ เมตร}^2/\text{วินาที} \text{ และคำนวณแฟคเตอร์เสียดทานจาก } f' = \frac{Igd_{50}}{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2} \text{ เมื่อทราบค่า } I, d_{50}, v \text{ และ } \phi$$

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

4) หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ Re' โดยนำค่า I กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง ST1/S1 - ST14/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-3 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I กับ Re' ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความชันเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 1 จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ Re'_{cr} และจากรูปที่ 4-3 ค่า Re'_{cr} ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21.7

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' นำค่า f' กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง ST1/S1 - ST14/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-4 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า f' กับ Re' ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงหรือมีความลาดชันคงที่ ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความลาดชันเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ Re'_{cr} และจากรูปที่ 4-4 Re'_{cr} ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' มีค่าเท่ากับ 21.7 เช่นกัน

และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ยังไม่ขนานกับแกน x หรือค่าแฟคเตอร์เสียดทานยังไม่คงที่ โดยในสภาพการไหลแบบราบเรียบจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $f' = \frac{382.49}{Re'}$ (นั่นคือค่าคงที่ A ในสมการที่ 2-24 และ 2-25 มีค่าเท่ากับ 382.49) และทำการหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 2-25 โดยนำค่า $\frac{382.49}{Re'}$ ไปหักออกจากค่า f' ที่ได้จากการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยของ B ได้เท่ากับ 1.90 นั่นคือในสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ดังสมการ $f' = \frac{382.49}{Re'} + 1.90$ โดยสมการนี้จะใช้ได้ในช่วงของค่าเรย์โนลด์ในการทดลองเท่านั้น

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

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 44.491 กิโลกรัม

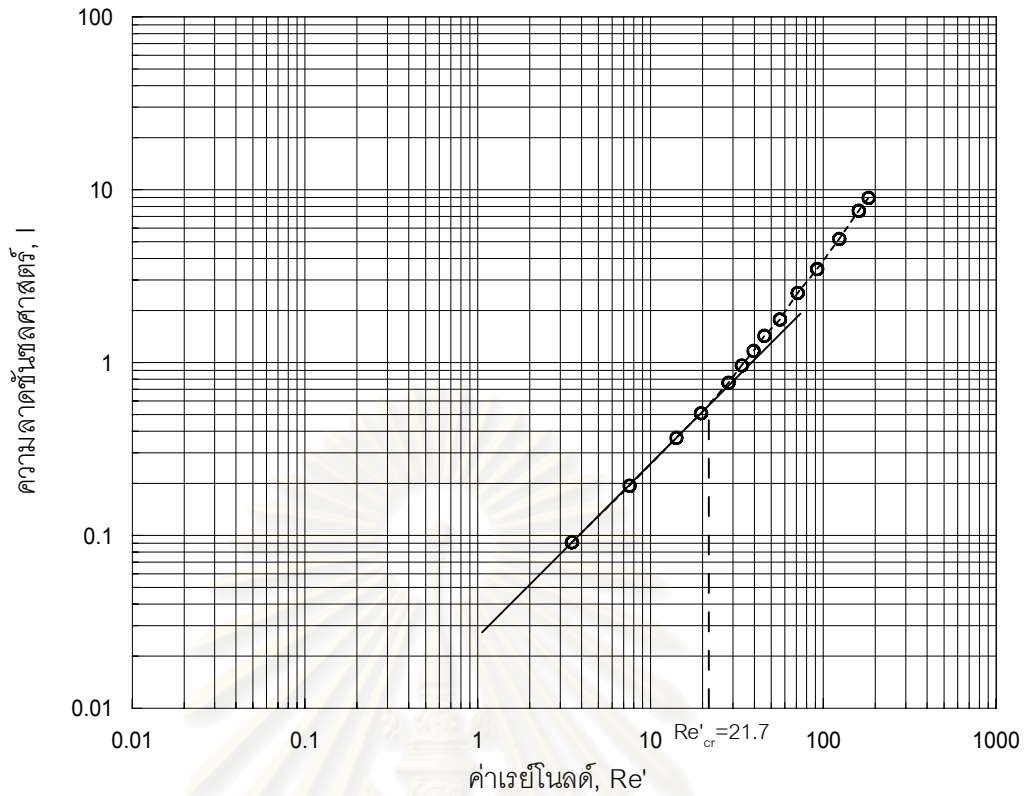
ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความพรุน = 0.414

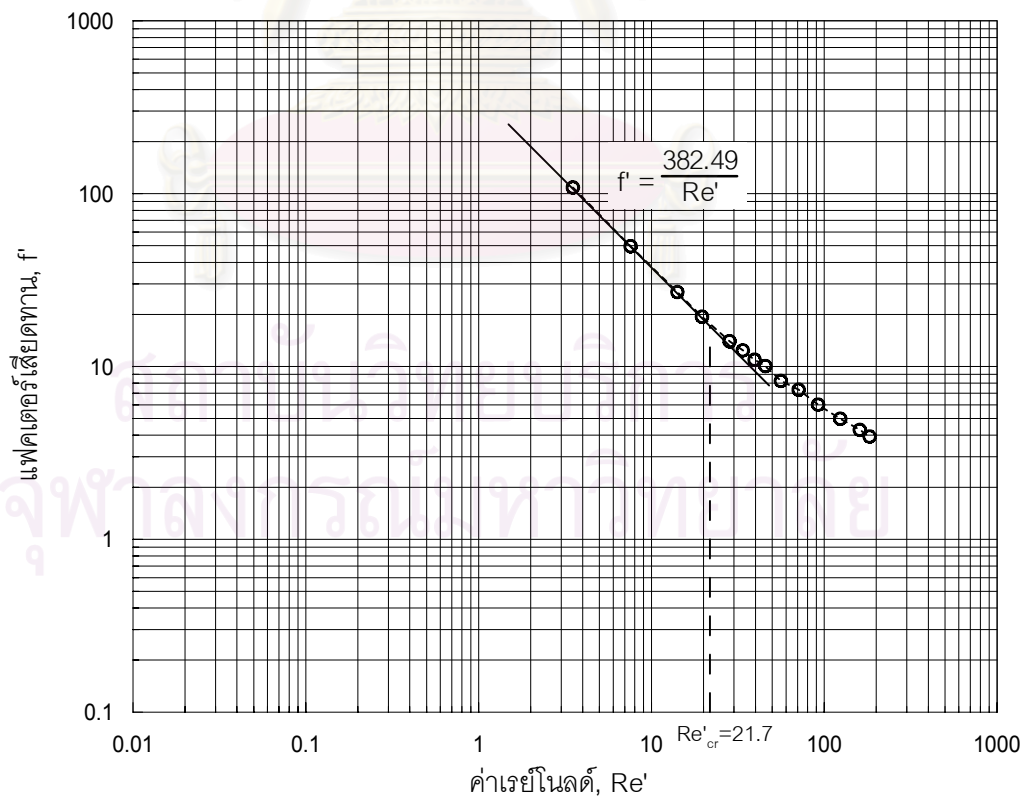
อุณหภูมิน้ำ = 25°C

ความหนืดเปรียบเทียบ (ν) = $0.897 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

การทดลอง	h_D (ม.)	h_U (ม.)	Δh (ม.)	h_{weir} (ซ.ม.)	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	v/φ (ม./วินาที)	Re'	l	f
ST1/S1	0.705	0.632	0.073	0.85	0.000029	0.00097	0.0023	3.51	0.091	108.65
ST2/S1	0.806	0.651	0.155	1.40	0.000061	0.00210	0.0051	7.57	0.194	49.66
ST3/S1	0.963	0.670	0.293	2.10	0.000115	0.00391	0.0095	14.12	0.366	26.95
ST4/S1	1.113	0.706	0.407	2.60	0.000159	0.00544	0.0131	19.61	0.509	19.40
ST5/S1	1.355	0.743	0.612	3.30	0.000230	0.00785	0.0189	28.31	0.765	14.00
ST6/S1	1.546	0.776	0.770	3.70	0.000274	0.00936	0.0226	33.76	0.963	12.39
ST7/S1	1.750	0.816	0.934	4.10	0.000321	0.01096	0.0265	39.54	1.168	10.96
ST8/S1	1.998	0.856	1.142	4.50	0.000370	0.01264	0.0305	45.63	1.428	10.06
ST9/S1	2.358	0.938	1.420	5.15	0.000456	0.01556	0.0376	56.16	1.775	8.26
ST10/S1	3.399	1.376	2.023	6.00	0.000577	0.01969	0.0476	71.04	2.529	7.35
ST11/S1	4.358	1.577	2.781	7.10	0.000747	0.02551	0.0616	92.05	3.476	6.02
ST12/S1	6.135	1.980	4.155	8.60	0.001004	0.03426	0.0828	123.63	5.194	4.98
ST13/S1	8.602	2.548	6.054	10.20	0.001305	0.04455	0.1076	160.75	7.568	4.30
ST14/S1	10.116	2.926	7.190	11.10	0.001487	0.05074	0.1226	183.09	8.988	3.93



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



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

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

6) การวิเคราะห์ค่าความนำพลศาสตร์ จะใช้ค่า I และ $\frac{V}{\phi}$ จากการทดลองการไหลแบบเชิงเส้น นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง I และ $\frac{V}{\phi}$ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 และจากสมการที่ 2-17 จะได้ $I = \left(\frac{1}{K_1'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)$ แสดงว่าค่า K_1' ของทรายชั้นน้ำต้วอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.026 เมตร/วินาที

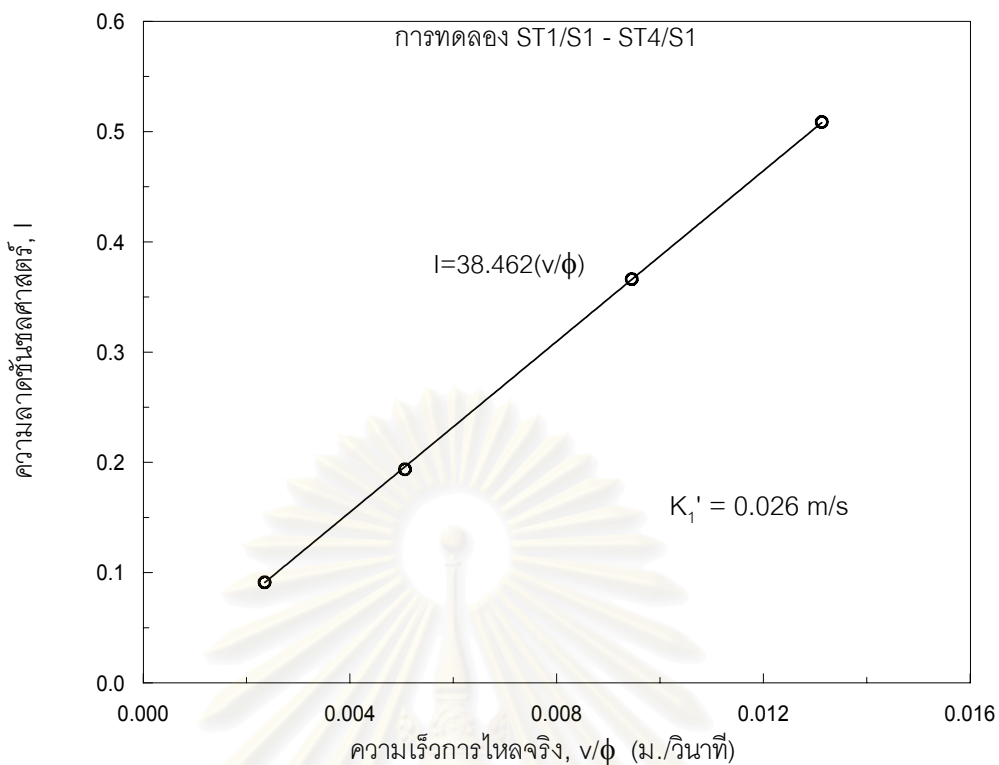
7) การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี จะใช้ค่า I และ $\frac{V}{\phi}$ จากการทดลองการไหลแบบไม่เชิงเส้น นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง I และ $\frac{V}{\phi}$ ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และจากสมการ 2-21 $I = a_1'\left(\frac{V}{\phi}\right) + b_1'\left(\frac{V}{\phi}\right)^2$ แสดงว่าค่า a_1' และ b_1' ของทรายชั้นน้ำต้วอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 37.926 วินาที/เมตร และ 294.3 วินาที²/เมตร² ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำต้วทั้ง 4 ขนาด ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหลจากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4-5

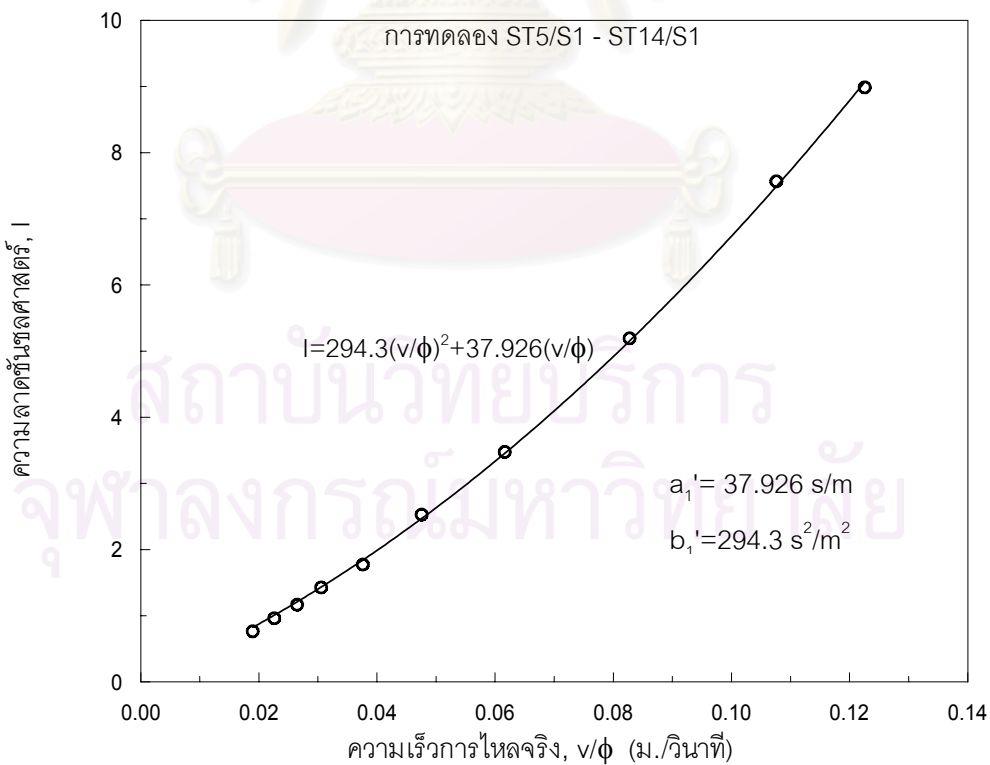
ตารางที่ 4-5 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรไหล จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

ตัวอย่างที่	d_{50} (ม.ม.)	ความพรุน	Re'_{cr}	K_1' (ม./วินาที)	a_1' (วินาที/ม.)	b_1' (วินาที ² /ม. ²)
S1	1.34	0.414	21.7	0.026	37.926	294.3
S2	1.58	0.396	25.5	0.042	24.908	263.8
S3	1.80	0.407	28.7	0.049	21.065	247.3
S4	2.10	0.410	33.8	0.059	16.096	208.9

จากผลในตารางที่ 4-5 พบว่าค่าความนำพลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก แสดงว่าทรายขนาดใหญ่ยอมให้น้ำไหลผ่านดีกว่าทรายขนาดเล็ก ในขณะที่พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซีมีค่าลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น แสดงว่าผลของการไหลแบบไม่เชิงเส้นจะลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง I $\frac{V}{\phi}$ a_1' และ b_1' ในสมการที่ 2-21 และจากค่า K_1' แสดงว่าทรายขนาดใหญ่ยอมให้น้ำไหลผ่านดีกว่าทรายขนาดเล็กในทุกสภาพการไหล



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชุดศาสตร์ (ST1/S1 - ST4/S1) กรณีการไหลแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชุดศาสตร์กับความเร็วการไหลจริง (ST5/S1 - ST14/S1) กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น

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 ปรากฏว่าได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลจากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน แสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานในการศึกษาครั้งนี้

และจากการทดลองของ Ahmed

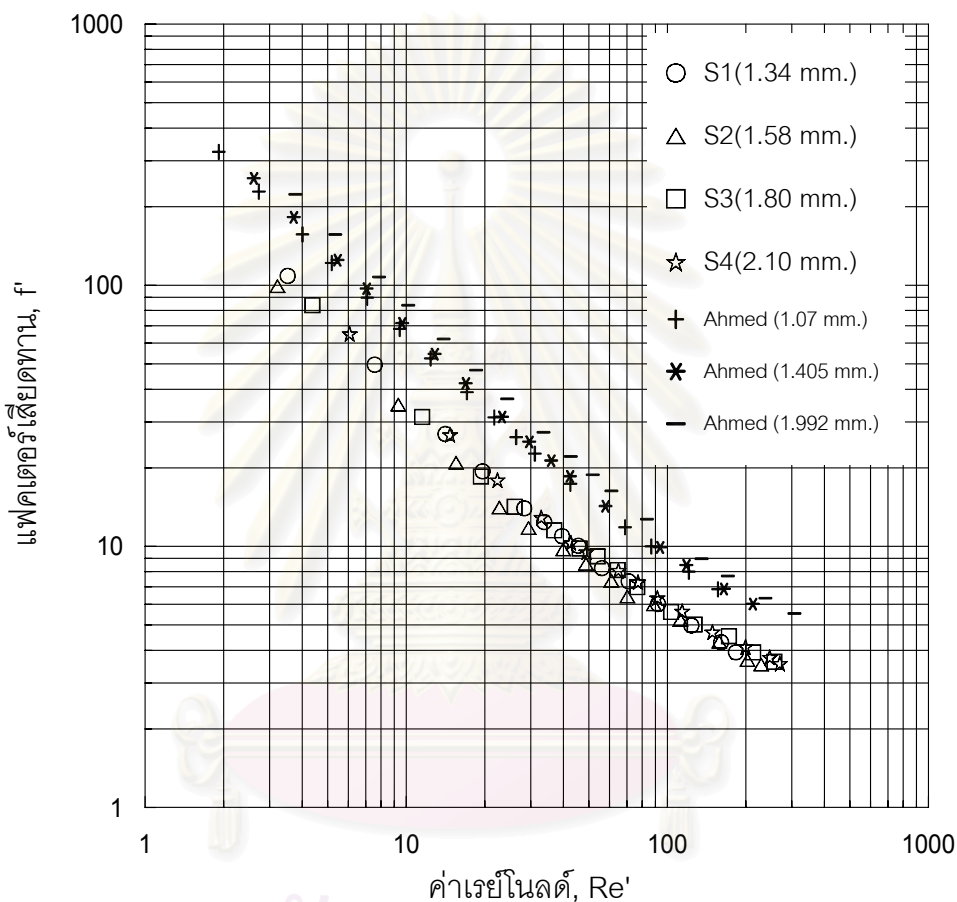
d_{50} (ม.ม.)	ความพรุน	K_1' (ม./วินาที)	a_1' (วินาที/ม.)	b_1' (วินาที ² /ม. ²)	หมายเหตุ
1.34	0.414	0.026	37.926	294.3	การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้
1.58	0.396	0.042	24.908	263.8	
1.80	0.407	0.049	21.065	247.3	
2.10	0.410	0.059	16.096	208.9	
1.07	0.426	0.010	98.078	556.29	Ahmed(1967)
1.405	0.411	0.015	60.54	425.22	
1.992	0.404	0.025	38.037	291.92	

จากตารางที่ 4-6 พบว่าความพรุนของตัวอย่างทรายจากการทดลองครั้งนี้และการทดลองของ Ahmed ต่างกันไม่มากและที่ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน พบว่าค่าความนำชลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของ Ahmed ประมาณ 2 เท่า ขณะที่พารามิเตอร์ต่างๆจากการทดลองของ Ahmed มีค่าสูงกว่าการทดลองครั้งนี้ ประมาณ 2 เท่า และพารามิเตอร์นอนดาร์ซีจากการทดลองของ Ahmed มีค่าสูงกว่าการทดลองครั้งนี้ ประมาณ 1.5 เท่า แสดงว่าขนาดของเพอร์เมียมิตอร์มีผลต่อการทดลอง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้เพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19.32 เซนติเมตร ขณะที่การทดลองของ Ahmed ใช้เพอร์เมียมิตอร์รูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.35 เซนติเมตร

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงในรูปที่ 4-7 เมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' จากการทดลองของ Ahmed พบว่า ที่ค่าเรย์โนลด์เท่ากัน การทดลองของ Ahmed ให้ค่าแฟคเตอร์เสียดทานที่สูงกว่าค่าจากการทดลองครั้งนี้ประมาณ 2 เท่า แม้ว่าขนาดทราย

และความพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าขนาดของเพอร์เมียมิตอร์มีอิทธิพลต่อการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากภาพความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลองยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และได้ค่าคงที่ 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	382.49	1.90
S2	321.65	2.18
S3	369.14	2.18
S4	401.79	2.07

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดทราย แสดงว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เป็นความยาวจำเพาะการไหล จะไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 4-7 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

$$\begin{aligned} \text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad f' &= \frac{368.77}{Re'} \\ \text{การไหลแบบเปลี่ยนแปลง} \quad f' &= \frac{368.77}{Re'} + 2.08 \\ &\text{และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยเท่ากับ 27.4} \end{aligned}$$

4.4 การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อบาดาล

จากสมการระดับความดันที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของการไหลในแนวรัศมีของน้ำเข้าสู่บ่อบาดาล (สมการที่ 2-37 2-39 และ 2-40) มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการไหล ประกอบด้วย ค่าความนำชลศาสตร์ (K_2') พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_2') พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_2') สัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา (c_2') ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^N) และ ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (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 - CR9/S1) จากผลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) หาค่าความพรุนของทรายชั้นน้ำที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักทรายแห้งที่ใส่ลงไปในแบบจำลอง ความถ่วงจำเพาะของทรายที่ใช้ และปริมาตรของแบบจำลอง เช่น การทดลองของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ใช้ทรายแห้งทั้งหมด 372.527 กิโลกรัมในการทดลอง ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.592 และแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากับ 0.240 ลูกบาศก์เมตร จากสมการที่ 2-3 ได้ค่าความพรุน

$$\phi = \frac{0.240 - \left(\frac{372.527}{1000 \times 2.592} \right)}{0.240} = 0.401$$

2) จากข้อมูลระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล (เนื่องจากระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาลมีผลของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล) สามารถลากเส้นระดับความดันที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำตามระยะทางจนถึงผิวบ่อน้ำบาดาล ซึ่งระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล (h_{20}) จะนำไปใช้คำนวณค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลต่อไป ตัวอย่างเส้นระดับความดัน (piezometric surface) ของการทดลองที่ CR3/S1 ดังแสดงในรูปที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 372.527 กิโลกรัม

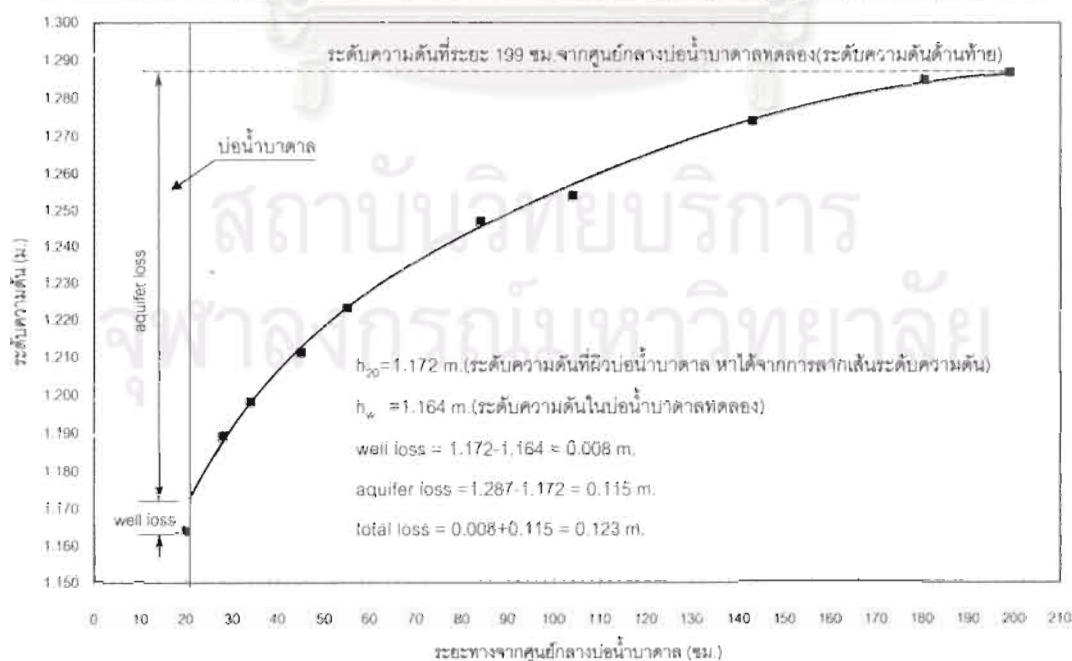
อุณหภูมิน้ำ = 28 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ (ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.401

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (ม.)										h_{weir} (ซ.ม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
CR1/S1	1.157	1.163	1.165	1.170	1.172	1.180	1.184	1.188	1.194	1.195	1.00
CR2/S1	1.160	1.175	1.182	1.191	1.199	1.214	1.222	1.236	1.245	1.247	1.70
CR3/S1	1.164	1.189	1.198	1.211	1.223	1.247	1.254	1.274	1.285	1.287	2.10
CR4/S1	1.182	1.315	1.364	1.432	1.486	1.574	1.631	1.684	1.730	1.752	5.00
CR5/S1	1.191	1.409	1.490	1.600	1.682	1.819	1.899	1.962	2.033	2.056	6.20
CR6/S1	1.197	1.485	1.593	1.738	1.830	2.010	2.091	2.200	2.282	2.303	7.00
CR7/S1	1.296	2.707	3.213	3.823	4.227	4.975	5.314	5.629	5.924	6.107	13.45
CR8/S1	1.308	2.921	3.486	4.229	4.719	5.424	5.903	6.217	6.590	6.643	14.00
CR9/S1	1.326	3.158	3.744	4.645	5.174	6.021	6.503	6.951	7.359	7.430	14.80



รูปที่ 4-8 เส้นระดับความดันของการทดลอง CR3/S1

3) คำนวณค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่เกิดขึ้น โดยหาจากผลต่างของระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลอง (h_w) และระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล (h_{20}) แสดงในรูปที่ 4-8 ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง CR3/S1 เท่ากับ 0.008 เมตร หรือ 8 มิลลิเมตร ขณะที่เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (aquifer loss) มีค่าเท่ากับ 0.115 เมตร เมื่อพิจารณาถึงระยะ 199 เซนติเมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล(จุดวัดความดันตำแหน่งสุดท้าย) นั่นคือเฮดสูญเสียทั้งหมด (total loss) จากการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาลของการทดลอง CR3/S1 มีค่าเท่ากับ 0.123 เมตร

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

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 และหนา 0.2 เมตร ดังนั้น $A = \left(\frac{\pi r^2}{6}\right) \times 0.2$ ตารางเมตร เมื่อทราบค่า v ϕ d_{50} และ v จะหาค่าเรย์โนลด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ และคำนวณแฟคเตอร์เสียดทาน จากสมการที่ 2-23 $f' = \frac{Igd_{50}}{2\left(\frac{V}{\phi}\right)^2}$ เมื่อทราบค่า I d_{50} v และ ϕ ตัวอย่างผล

การคำนวณค่า I Re' และ f' ของการทดลองที่ CR1/S1 – CR4/S1 แสดงดังตารางที่ 4-9

6) หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

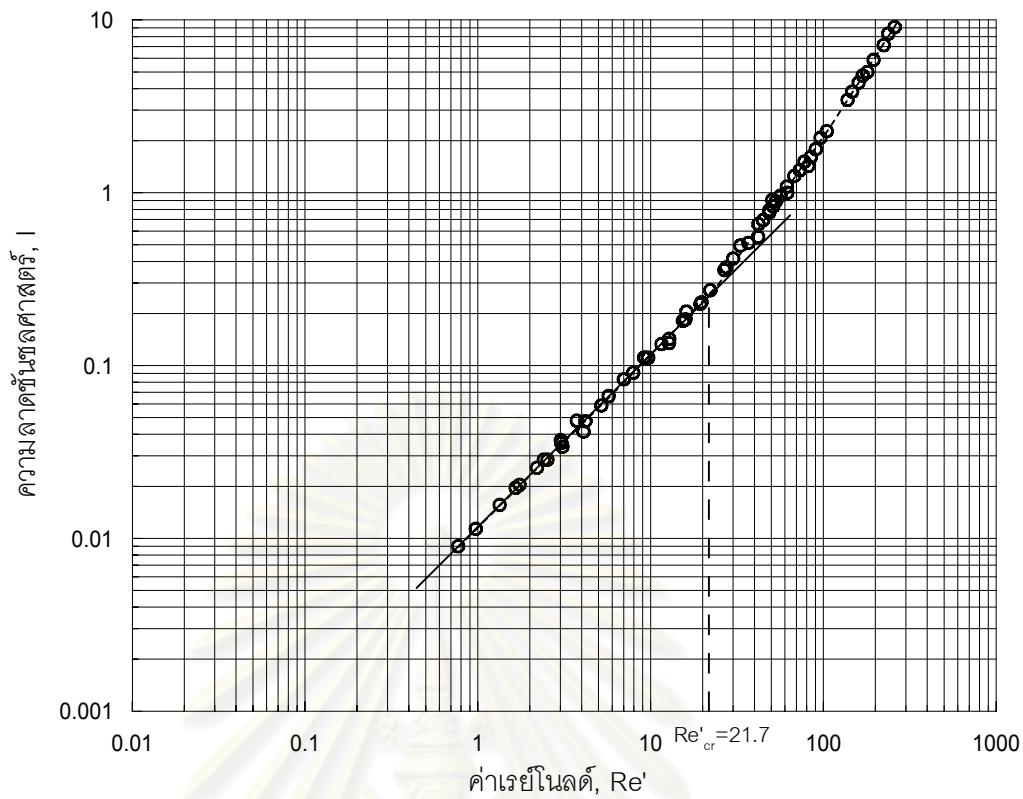
- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ Re' โดยนำค่า I กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ CR1/S1 - CR9/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-9 เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I กับ Re' จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่เท่ากับ 1 จุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกหรือจุดที่ความชันเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 1 คือจุดที่ความสัมพันธ์เริ่มเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบเชิงเส้นเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า Re' ที่ตำแหน่งนี้มีค่าเท่ากับค่า Re'_{cr} และจากรูปที่ 4-9 แสดงว่าค่า Re'_{cr} ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21.7

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' โดยนำค่า f' กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง CR1/S1 - CR9/S1 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-10 ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงที่มีความลาดชันคงที่หรือจุดที่ความลาด

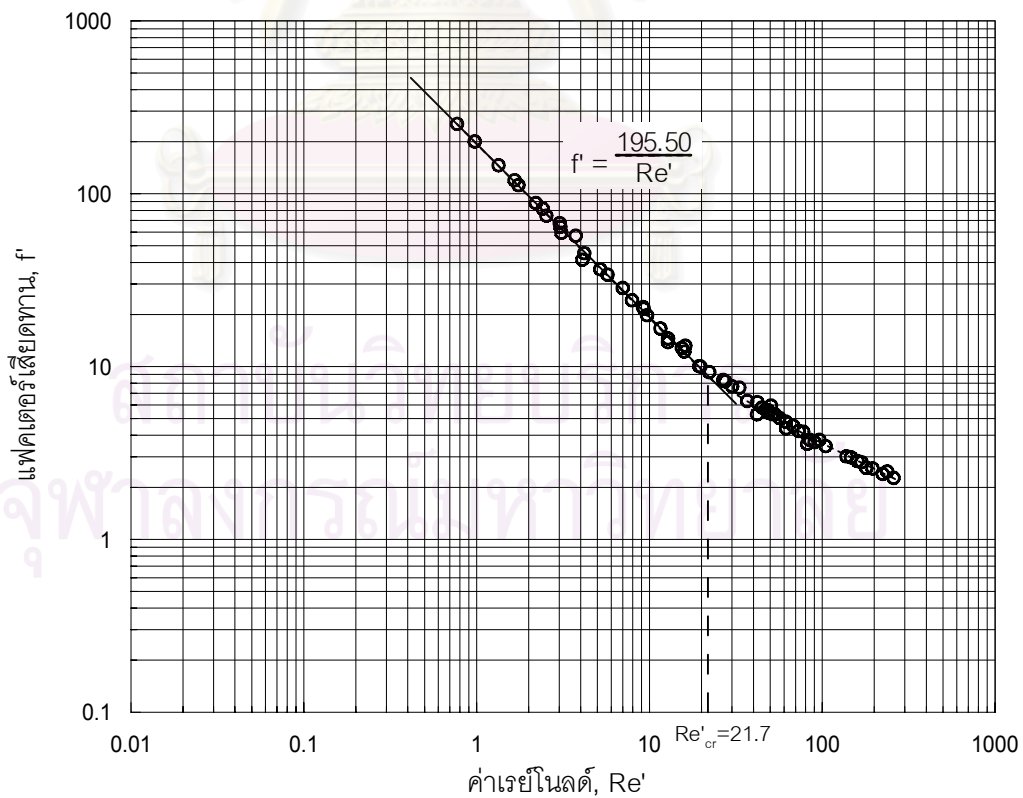
ชั้นเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหล ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ Re'_{cr} และจากรูปที่ 4-10 ค่า Re'_{cr} ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21.7 เช่นกัน

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/ϕ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
CR1/S1	1.00	3.66	0.34	0.036	0.00103	0.00256	4.09	0.042	41.59
			0.45	0.047	0.00078	0.00194	3.09	0.034	59.48
			0.55	0.058	0.00064	0.00159	2.53	0.029	74.83
			0.84	0.088	0.00042	0.00104	1.66	0.020	119.71
			1.04	0.109	0.00034	0.00084	1.34	0.016	146.23
			1.43	0.150	0.00024	0.00061	0.97	0.011	201.06
			1.805	0.189	0.00019	0.00048	0.77	0.009	253.97
CR2/S1	1.70	8.28	0.34	0.036	0.00233	0.00580	9.26	0.111	21.70
			0.45	0.047	0.00176	0.00439	7.00	0.083	28.51
			0.55	0.058	0.00144	0.00359	5.72	0.067	34.08
			0.84	0.088	0.00094	0.00235	3.75	0.048	57.27
			1.04	0.109	0.00076	0.00190	3.03	0.037	67.69
			1.43	0.150	0.00055	0.00138	2.20	0.026	88.60
			1.805	0.189	0.00044	0.00109	1.74	0.020	112.35
CR3/S1	2.10	11.46	0.34	0.036	0.00322	0.00803	12.82	0.143	14.56
			0.45	0.047	0.00243	0.00607	9.68	0.111	19.84
			0.55	0.058	0.00199	0.00497	7.92	0.091	24.25
			0.84	0.088	0.00130	0.00325	5.19	0.059	36.60
			1.04	0.109	0.00105	0.00263	4.19	0.048	45.42
			1.43	0.150	0.00077	0.00191	3.05	0.036	64.40
			1.805	0.189	0.00061	0.00151	2.41	0.029	82.08
CR4/S1	5.00	43.57	0.34	0.036	0.01224	0.03053	48.71	0.769	5.43
			0.45	0.047	0.00925	0.02307	36.80	0.513	6.34
			0.55	0.058	0.00757	0.01887	30.11	0.417	7.70
			0.84	0.088	0.00496	0.01236	19.71	0.233	10.02
			1.04	0.109	0.00400	0.00998	15.92	0.185	12.23
			1.43	0.150	0.00291	0.00726	11.58	0.133	16.65
			1.805	0.189	0.00231	0.00575	9.17	0.111	22.10



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันในชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (CR1/S1 - CR9/S1)



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (CR1/S1 - CR9/S1)

และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ยังไม่ขนานกับแกน x หรือค่าแฟคเตอร์เสียดทานยังไม่คงที่ โดยในสภาพการไหลแบบราบเรียบจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $f' = \frac{195.50}{Re'}$ (นั่นคือค่าคงที่ A ในสมการที่ 2-24 และ 2-25 มีค่าเท่ากับ 195.50) และทำการหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 2-25 โดยนำค่า $\frac{195.50}{Re'}$ ไปหักออกจากค่า f' ที่ได้จากการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยของ B ได้เท่ากับ 1.56 นั่นคือในสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสัมพันธ์ f' กับ Re' ดังสมการ $f' = \frac{195.50}{Re'} + 1.56$

7) เนื่องจากการไหลในแนวนอนเป็นกรณีการไหลแบบนำพา 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 $\frac{V}{\phi}$ แล้ว ยังขึ้นกับค่า r ด้วย (r คือ ระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล) ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า I และ $\frac{V}{\phi}$ ของจุดที่มี $Re' < Re'_c$ (การไหลแบบเชิงเส้น) มาหาความสัมพันธ์ที่ระยะต่างๆ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-11

ความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ $\frac{V}{\phi}$ แยกตามระยะทาง ซึ่งอยู่ในรูปสมการ $I = \left(\frac{1}{K_2'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right) - c_2'\left(\frac{1}{gr}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)^2$

$$\text{ที่ } r=0.34 \text{ ม. ; } I = 18.354\left(\frac{V}{\phi}\right) - 33.442\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 18.354, \left(\frac{c_2'}{g \times 0.34}\right) = 33.442$$

$$\text{ที่ } r=0.45 \text{ ม. ; } I = 18.614\left(\frac{V}{\phi}\right) - 25.516\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 18.614, \left(\frac{c_2'}{g \times 0.45}\right) = 25.516$$

$$\text{ที่ } r=0.55 \text{ ม. ; } I = 18.462\left(\frac{V}{\phi}\right) - 19.794\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 18.462, \left(\frac{c_2'}{g \times 0.55}\right) = 19.794$$

$$\text{ที่ } r=0.84 \text{ ม. ; } I = 18.982\left(\frac{V}{\phi}\right) - 13.673\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 18.982, \left(\frac{c_2'}{g \times 0.84}\right) = 13.673$$

$$\text{ที่ } r=1.04 \text{ ม. ; } I = 18.662\left(\frac{V}{\phi}\right) - 11.277\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 18.662, \left(\frac{c_2'}{g \times 1.04}\right) = 11.277$$

$$\text{ที่ } r=1.43 \text{ ม. ; } I = 19.233\left(\frac{V}{\phi}\right) - 7.587\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 19.233, \left(\frac{c_2'}{g \times 1.43}\right) = 7.587$$

$$\text{ที่ } r=1.805 \text{ ม. ; } I = 18.297\left(\frac{V}{\phi}\right) - 5.989\left(\frac{V}{\phi}\right)^2 : \left(\frac{1}{K_2'}\right) = 18.297, \left(\frac{c_2'}{g \times 1.805}\right) = 5.989$$

จากค่า $\frac{1}{K_2'}$ สามารถคำนวณค่า K_2' ได้ และพบว่าค่า K_2' มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 0.052-0.055 เมตร/วินาที จึงหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนค่า K_2' ซึ่งเท่ากับ 0.054 เมตร/วินาที ในทำนองเดียวกันพบว่าค่า c_2' ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 106.0-115.1 ดังนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนค่า c_2' ได้เท่ากับ 110.2 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4-11 พบว่าการไหลน้ำพาแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการไหลแบบเชิงเส้น เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ยังคงมีลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างชัดเจน สรุปได้ว่าการไหลเป็นการไหลแบบเชิงเส้นไม่จำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลของการไหลน้ำพา เพราะความเร็วการไหลมีค่าต่ำมาก

- 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 $\frac{V}{\phi}$ แล้ว ยังขึ้นกับค่า r ด้วย ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ $\frac{V}{\phi}$ แยกตามระยะทาง โดยใช้ค่า I และ $\frac{V}{\phi}$ ของตำแหน่งที่มี $Re' > Re'_{cr}$ (การไหลแบบไม่เชิงเส้น) จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4-12

ความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ $\frac{V}{\phi}$ แยกตามระยะทาง ซึ่งอยู่ในรูปสมการ $I = a_2' \left(\frac{V}{\phi}\right) + \left(b_2' - \frac{c_2'}{gr}\right) \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$

$$\text{ที่ } r=0.34 \text{ ม. ; } I = 17.566 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 243.991 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

$$a_2' = 17.566, \left(b_2' - \frac{c_2'}{g \times 0.34}\right) = 243.991$$

$$\text{ที่ } r=0.45 \text{ ม. ; } I = 17.147 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 251.633 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

$$a_2' = 17.147, \left(b_2' - \frac{c_2'}{g \times 0.45}\right) = 251.633$$

$$\text{ที่ } r=0.55 \text{ ม. ; } I = 17.855 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 256.100 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

$$a_2' = 17.855, \left(b_2' - \frac{c_2'}{g \times 0.55}\right) = 256.100$$

$$\text{ที่ } r=0.84 \text{ ม. ; } I = 17.619 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 262.580 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

$$a_2' = 17.619, \left(b_2' - \frac{c_2'}{g \times 0.84}\right) = 262.580$$

$$\text{ที่ } r=1.04 \text{ ม. ; } I = 17.215 \left(\frac{V}{\phi}\right) + 265.063 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

$$a_2' = 17.215, \left(b_2' - \frac{c_2'}{g \times 1.04}\right) = 265.063$$

$$\text{ที่ } r=1.43 \text{ ม. ; } I = 17.808\left(\frac{V}{\phi}\right) + 267.840\left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

$$a_1' = 17.808, \quad (b_2' - \frac{c_2'}{g \times 0 = 1.43}) = 267.840$$

$$\text{ที่ } r=1.805 \text{ ม. ; } I = 17.603\left(\frac{V}{\phi}\right) + 269.509\left(\frac{V}{\phi}\right)^2$$

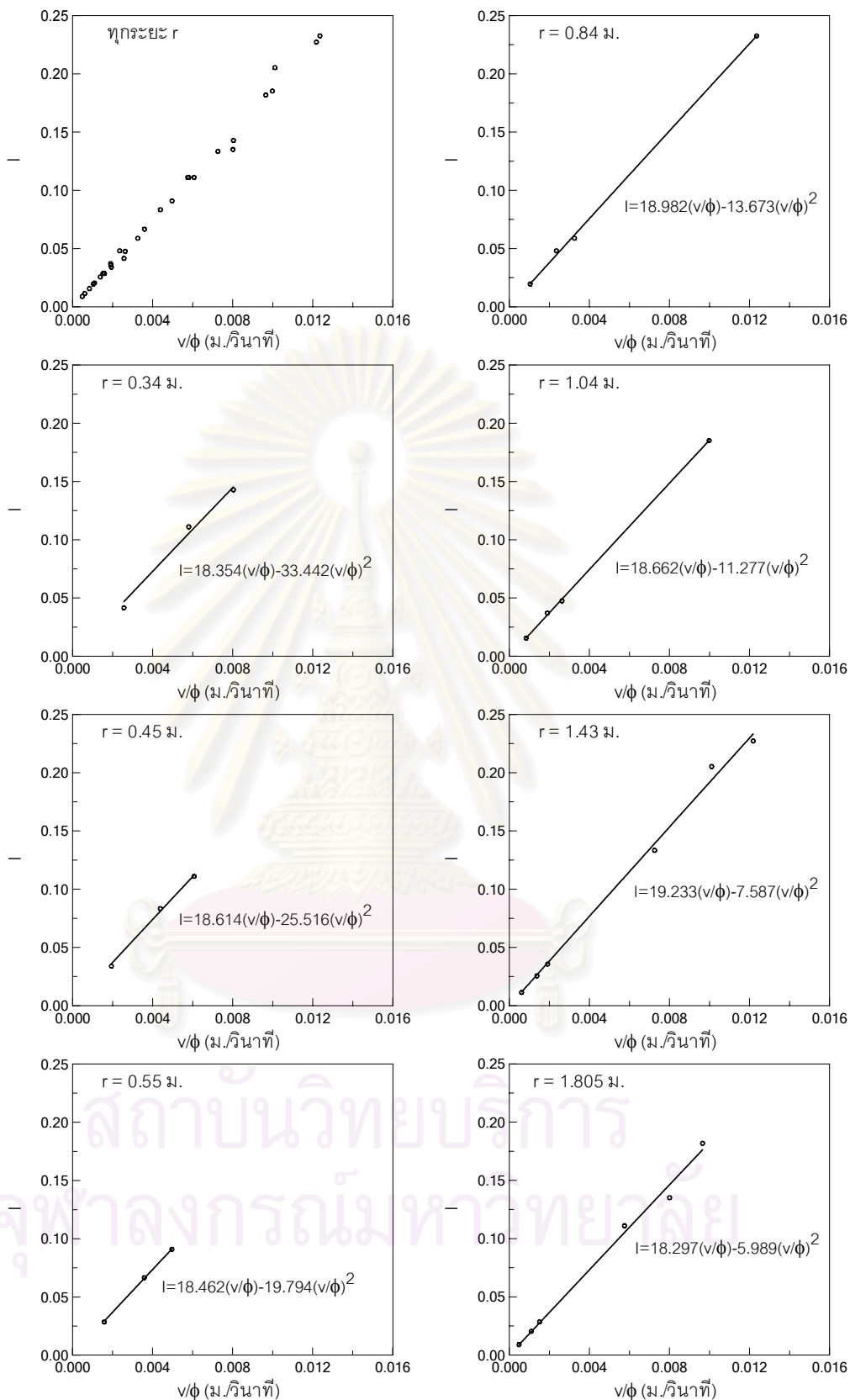
$$a_1' = 17.603, \quad (b_2' - \frac{c_2'}{g \times 0 = 1.805}) = 269.509$$

พบว่าค่า a_2' มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 17.147-17.855 เมตร/วินาที ดังนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนค่า a_2' ได้เท่ากับ 17.529 วินาที/เมตร ขณะที่ค่า b_2' และ c_2' ได้จากการจับคู่แก้สมการ เพื่อหาค่า b_2' และ c_2' แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่า b_2' เท่ากับ 275.5 วินาที²/เมตร² และค่า c_2' เท่ากับ 106.2

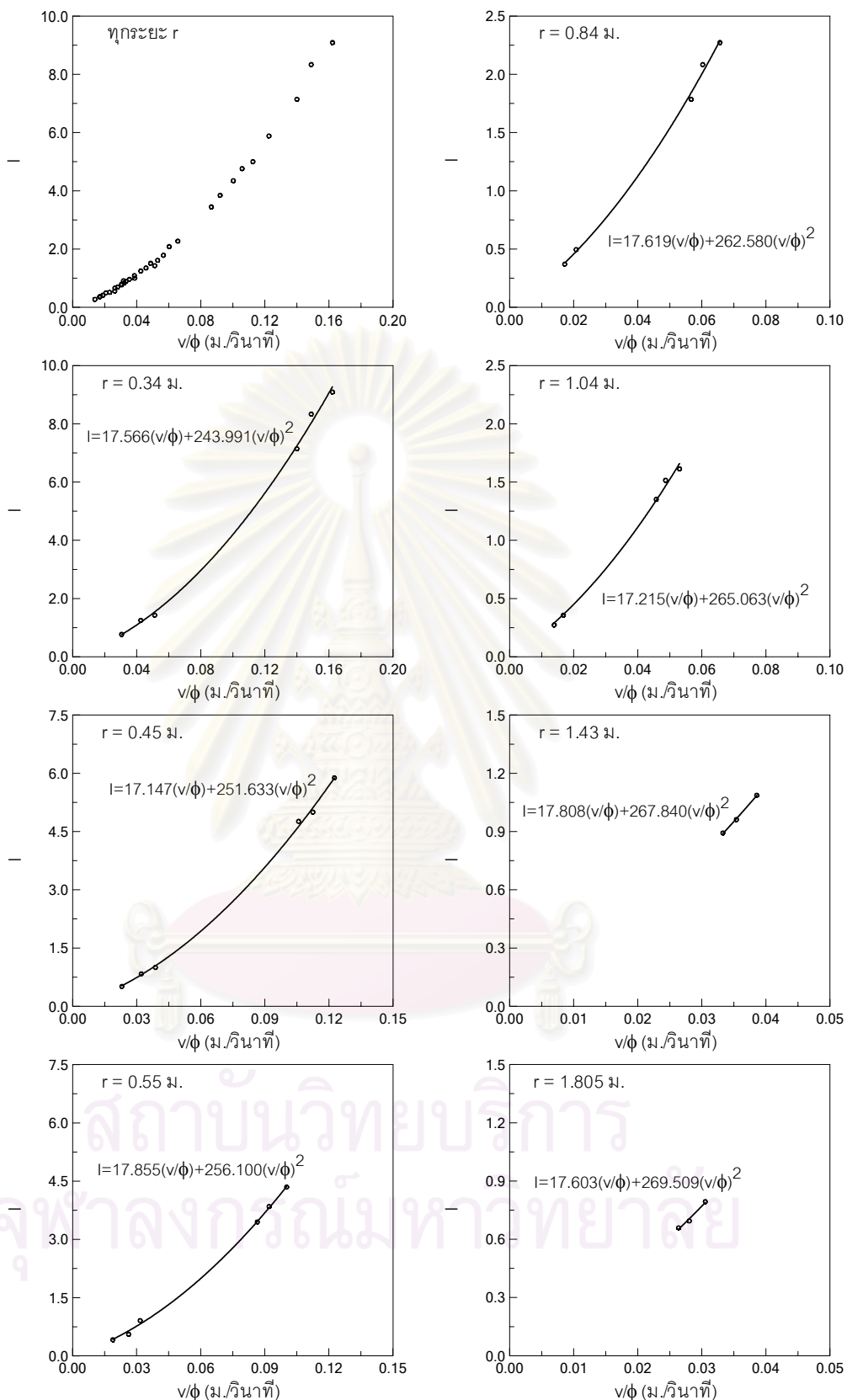
เมื่อพิจารณาค่า c_2' ที่ได้จากการถดถอยการไหลเชิงเส้นและการไหลไม่เชิงเส้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จึงใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทน ดังนั้นค่า c_2' จากการทดลองการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 108.2

เมื่อทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด (CR1/S1 - CR9/S4) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-10 จากตารางที่ 4-10 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี กับขนาดทรายชั้นน้ำจะเหมือนกับการทดลองแบบมาตรฐาน นั่นคือค่าความนำคลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี มีค่าลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การไหลนำพาพบว่าเพิ่มขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

และเมื่อทราบค่าเรย์โนลด์วิกฤติที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลองก็สามารถนำไปคำนวณหาค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลในแต่ละการทดลองได้ตามสมการที่ 2-32 เมื่อทราบค่ารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาลก็สามารถแบ่งขอบเขตของสภาพการไหลได้ สามารถทราบได้ว่าช่วงที่เกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นมีระยะเท่าใดจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล และสามารถหาค่าเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำได้ จากการวิเคราะห์หาเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด สรุปค่าเฮดสูญเสียทั้งหมด(s_w) ค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล(ds'') เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ(ds_A) ซึ่งแบ่งย่อยเป็นเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น(ds) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น(ds'') ดังแสดงในตารางที่ 4-11



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันลดศาสตร์กับความเร็วการไหลจริงที่ระยะทางต่างๆ
กรณีการไหลแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันของศาสตร์กับความเร็วการไหลจริงที่ระยะทางต่างๆ
กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 4-10 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่าง	d_{50}	ความพรุน	Re'_{cr}	K_2'	a_2'	b_2'	c_2'
S1	1.34	0.401	21.7	0.054	17.529	275.5	108.2
S2	1.58	0.418	25.1	0.074	12.434	240.7	154.7
S3	1.80	0.415	28.4	0.086	11.128	225.8	198.8
S4	2.10	0.408	33.6	0.107	8.010	208.3	239.9

หมายเหตุ : หน่วย K_2' ม./วินาที
 a_2' วินาที/ม.
 b_2' วินาที²/ม.²
 Q_{lab}, Q_{equi} ลบ.ม./วินาที
 d_{50} ม.ม.
 $s_w, ds''', ds'', ds, ds_A$ ม.

ตารางที่ 4-11 เขตสูญเสียในส่วนต่างๆ จากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี

Q_{lab}	Q_{equi}	S1			S2			S3			S4							
		Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss					
		s_w	ds'''	ds''	s_w	ds'''	ds''	s_w	ds'''	ds''	s_w	ds'''	ds''	s_w	ds'''	ds''	ds_A	
0.00004	0.00044	0.038	0.000	0.000	0.038	0.038	0.027	0.000	0.027	0.027	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.019	0.019	
0.00008	0.00099	0.087	0.003	0.000	0.084	0.084	0.061	0.002	0.059	0.059	0.002	0.000	0.051	0.002	0.000	0.043	0.041	0.041
0.00011	0.00138	0.123	0.008	0.000	0.115	0.115	0.086	0.008	0.078	0.078	0.007	0.000	0.067	0.007	0.000	0.063	0.056	0.056
0.00044	0.00523	0.570	0.038	0.340	0.192	0.532	0.393	0.029	0.134	0.364	0.347	0.205	0.118	0.323	0.269	0.428	0.383	0.245
0.00061	0.00728	0.865	0.064	0.635	0.166	0.801	0.610	0.055	0.430	0.125	0.542	0.388	0.104	0.492	0.428	0.428	0.383	0.245
0.00073	0.00878	1.106	0.083	0.880	0.143	1.023	0.787	0.074	0.605	0.108	0.702	0.541	0.092	0.633	0.560	0.560	0.496	0.496
0.00200	0.02398	4.811	0.404	4.407	0.000	4.407	3.448	0.335	3.113	0.000	3.117	2.792	0.000	2.792	2.556	2.556	2.241	2.241
0.00213	0.02550	5.335	0.452	4.883	0.000	4.883	3.849	0.374	3.475	0.000	3.379	3.024	0.000	3.024	2.846	2.846	2.501	2.501
0.00231	0.02778	6.104	0.534	5.570	0.000	5.570	4.435	0.436	3.999	0.000	3.999	3.528	0.000	3.528	3.277	3.277	2.890	2.890

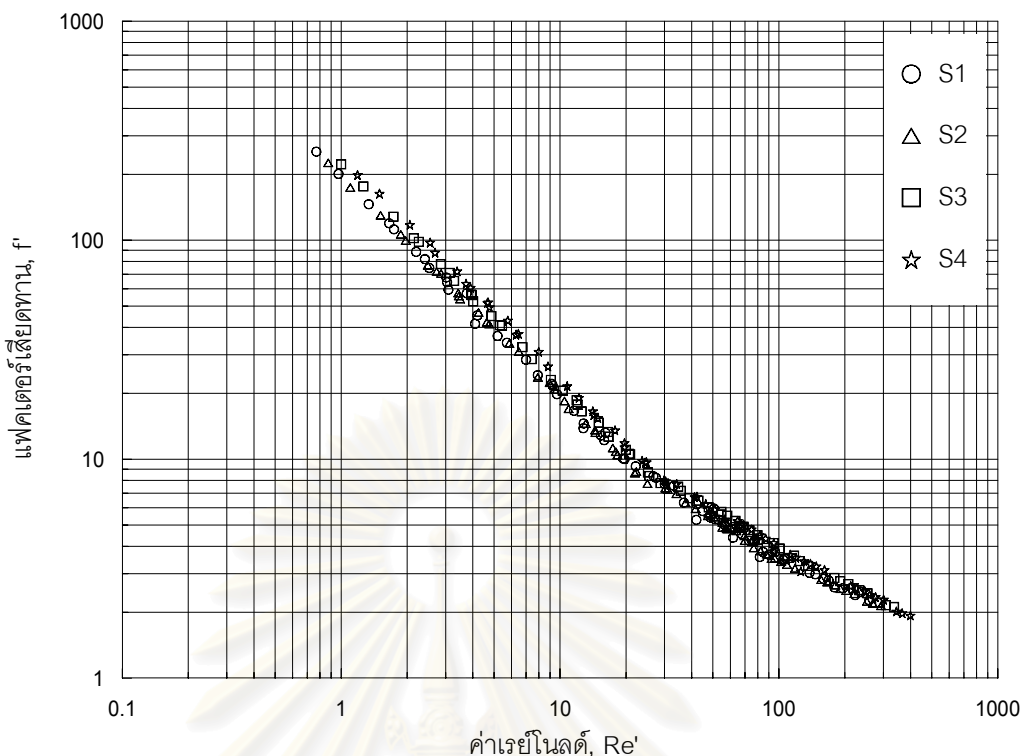
ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 4-11 มีดังนี้

Q_{lab}	คือ	ค่าอัตราการไหลจากการทดลองการไหลในชั้นน้ำรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ 30 องศา แต่ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^N) จะต้องใช้ค่าอัตราการไหลเสมือนจริงหรือเต็มวง 360 องศา (Q_{equi}) 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 ที่พบว่าทรายขนาดใหญ่จะยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าทรายขนาดเล็ก ทำให้เกิดเฮดสูญเสียจากการไหลน้อยกว่า ทำนองเดียวกับความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจะลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น แสดงว่าน้ำสามารถไหลผ่านทรายขนาดใหญ่เข้าสู่บ่อน้ำบาดาลได้ดีกว่าทรายขนาดเล็ก เมื่อผนวกทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลของทรายขนาดใหญ่จึงมีค่าน้อยกว่าทรายขนาดเล็ก

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตารางที่ 4-12 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	195.50	1.56
S2	195.77	1.50
S3	221.53	1.59
S4	240.53	1.40

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B พบว่า ค่าคงที่ B ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดทราย แสดงว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เป็นความยาวจำเพาะการไหล จะไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 4-13 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad f' = \frac{213.33}{Re'}$$

$$\text{การไหลแบบเปลี่ยนแปลง} \quad f' = \frac{213.33}{Re'} + 1.51$$

และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยเท่ากับ 27.2

4.5 การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองการไหลในแนวรัศมีเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำคลศาสตร์ (K_2') พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_2') พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_2') สัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา (c_2') ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^1) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr})

จากการทดลองในลักษณะเดียวกันต่างกันเฉพาะทิศทางการไหล ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4-13 จากตารางที่ 4-13 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี พารามิเตอร์นอนดาร์ซี และสัมประสิทธิ์การไหลน้ำพา กับขนาดทรายชั้นน้ำ จะเหมือนกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาล นั่นคือค่าความนำคลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี มีค่าลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การไหลน้ำพาจะเพิ่มขึ้นตามขนาดทรายชั้นน้ำ

จากการวิเคราะห์หาเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด สรุปค่าเฮดสูญเสียทั้งหมด ค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ซึ่งแบ่งย่อยเป็นเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้น และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น ดังแสดงในตารางที่ 4-14 จากตารางที่ 4-14 พบว่าเฮดสูญเสียในส่วนต่างๆ มีแนวโน้มความสัมพันธ์กับขนาดทราย เช่นเดียวกับ การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าบ่อน้ำบาดาลกล่าวคือ เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล และเฮดสูญเสียทั้งหมด มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ดังแสดงในรูปที่ 4-14 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลองยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และได้ค่าคงที่ A และ B จากสมการความสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4-15

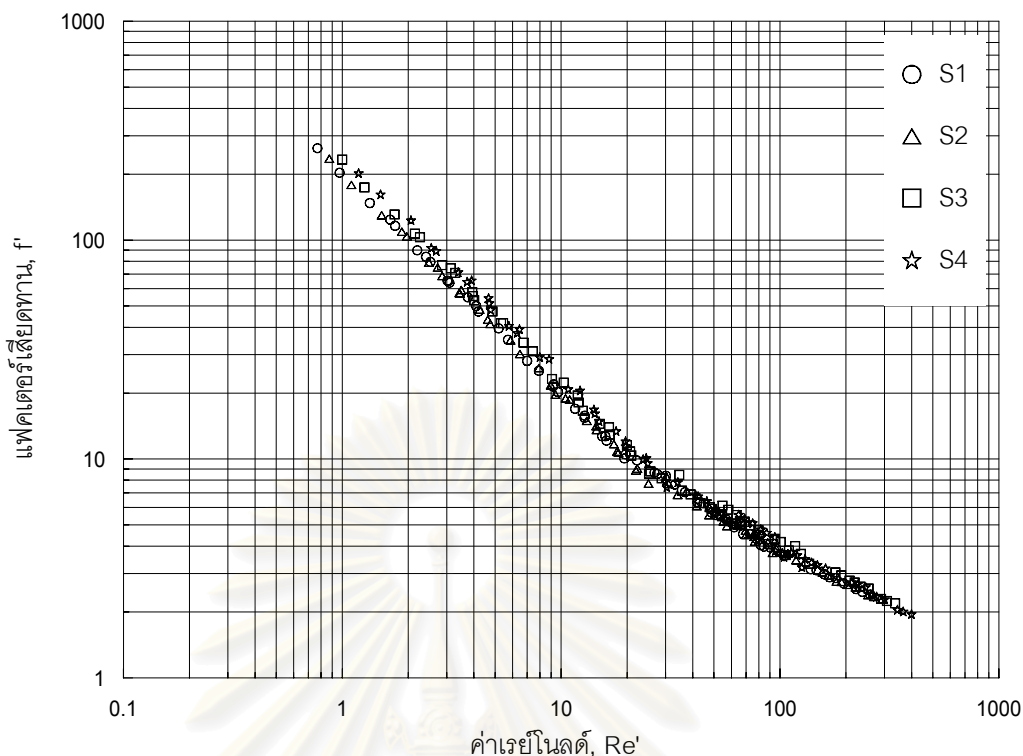
ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมมวลการไหลจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่าง	d_{50}	ความพรุน	Re'_{cr}	K_2'	a_2'	b_2'	c_2'
S1	1.34	0.401	21.8	0.052	18.601	289.7	129.4
S2	1.58	0.418	25.3	0.072	13.301	260.6	169.9
S3	1.80	0.415	28.6	0.084	11.678	242.4	232.4
S4	2.10	0.408	33.7	0.106	8.414	217	277

หมายเหตุ : หน่วย K_2' ม./วินาที
 a_2' วินาที/ม.
 b_2' วินาที²/ม.²
 Q_{lab}, Q_{equi} ลบ.ม./วินาที
 d_{50} ม.ม.
 $s_w, ds''', ds'', ds, ds_A$ ม.

ตารางที่ 4-14 เปรียบเทียบในส่วนของข้อมูลการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี

Q_{lab}	Q_{equi}	S1			S2			S3			S4					
		Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss			
		s_w	ds'''	ds''	ds''	ds'''	ds''	ds''	s_w	ds'''	ds''	s_w	ds'''	ds''	ds	ds_A
0.00004	0.00044	0.038	0.000	0.000	0.038	0.038	0.027	0.023	0.000	0.027	0.023	0.023	0.000	0.023	0.018	0.018
0.00008	0.00099	0.088	0.002	0.000	0.086	0.086	0.062	0.053	0.002	0.060	0.051	0.043	0.002	0.043	0.041	0.041
0.00011	0.00138	0.124	0.005	0.000	0.119	0.119	0.087	0.075	0.004	0.083	0.071	0.060	0.004	0.060	0.056	0.056
0.00044	0.00523	0.572	0.025	0.350	0.197	0.547	0.404	0.350	0.022	0.140	0.382	0.270	0.015	0.270	0.109	0.255
0.00061	0.00728	0.880	0.045	0.665	0.170	0.835	0.628	0.546	0.037	0.126	0.591	0.424	0.035	0.424	0.098	0.389
0.00073	0.00878	1.132	0.062	0.920	0.150	1.070	0.814	0.708	0.050	0.109	0.759	0.549	0.043	0.549	0.089	0.506
0.00200	0.02398	4.874	0.251	4.623	0.000	4.623	3.610	3.121	0.204	2.917	0.000	2.471	0.194	2.471	0.000	2.277
0.00213	0.02550	5.379	0.285	5.094	0.000	5.094	3.983	3.441	0.226	3.215	0.000	3.271	0.205	3.271	0.000	3.066
0.00231	0.02778	6.155	0.323	5.832	0.000	5.832	4.579	3.958	0.269	3.689	0.000	3.689	0.243	3.689	0.000	2.891



รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตารางที่ 4-15 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	200.90	1.69
S2	201.56	1.70
S3	228.03	1.71
S4	242.76	1.52

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B พบว่า ค่าคงที่ B ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดทราย แสดงว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เป็นความยาวจำเพาะการไหล จะไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 4-14 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ $f' = \frac{218.31}{Re'}$

การไหลแบบเปลี่ยนแปลง $f' = \frac{218.31}{Re'} + 1.66$

และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยเท่ากับ 27.4

4.6 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

เนื่องจากจุดประสงค์ในการดำเนินการทดลองนี้ คือต้องการเปรียบเทียบว่าการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียวแตกต่างจากการไหลของน้ำใต้ดินเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีหรือไม่อย่างไร โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมกรไหล ซึ่งจะประกอบด้วยค่าความนำชลศาสตร์ (K_f) พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_1) พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_1) ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^n) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr})

เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว ที่สามารถรับแรงดันได้สูงสุดประมาณ 10 เมตรของน้ำ ดังนั้นในการทดลองแต่ละทรายชั้นน้ำ ได้ทำการทดลองด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 5 ค่า โดยอัตราการไหลดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับที่ใช้ในการทดลองการไหลในแนวรัศมี (Q1-Q5) ผลการทดลองที่ได้คือ ค่าระดับความดันในบ่อน้ำบาดาล (h_w) ค่าระดับความดันในชั้นน้ำที่ระยะ 28-291 เซนติเมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล (h_{28}, \dots, h_{291}) และอัตราการไหลที่คำนวณจากระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) นำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ คล้ายกับการทดลองแบบมาตรฐานในหัวข้อที่ 4.3 เนื่องจากเป็นการไหลในทิศทางเดียวเหมือนกัน แตกต่างกันเฉพาะวิธีการหาความชันชลศาสตร์ และการทดลองนี้มีจุดวัดระดับความดันหลายจุด จึงต้องเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความดันกับระยะทางเพื่อหาค่าความชันของเส้นระดับความดัน ซึ่งเป็นค่าความชันชลศาสตร์ที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ขั้นตอนในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1) หาค่าความพรุนของทรายชั้นน้ำที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักทรายแห้งที่ใส่ลงในแบบจำลอง ความถ่วงจำเพาะของทรายที่ใช้ และปริมาตรของแบบจำลอง เช่น การทดลองของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ใช้ทรายแห้งทั้งหมด 91.458 กิโลกรัม ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.592 และแบบจำลองกว้างเท่ากับ 0.104 เมตร ความสูงหรือความหนาชั้นน้ำเท่ากับ 0.2 เมตร ความยาวสำหรับใส่ทรายเท่ากับ 2.8 เมตร คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 0.058 ลูกบาศก์เมตร จากสมการที่ 2-3 ได้ค่าความพรุน

$$\phi = \frac{0.058 - \left(\frac{91.458}{1000 \times 2.592} \right)}{0.058} = 0.392$$

2) จากข้อมูลระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล เนื่องจากระดับความดันที่วัดได้ที่บ่อน้ำบาดาล (h_w) มีผลของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลอยู่ด้วย เมื่อนำระดับความดันมาหาความสัมพันธ์กับระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล ($r-r_w$) ความชันของเส้นระดับความดันดังกล่าว

คือ ความชันของกราฟของการทดลอง (I) ขณะที่จุดตัดแกน y ($r = r_w$) คือ ค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล (h_{20}) ตัวอย่างค่าระดับความดันตามระยะจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลของการทดลอง CU3/S1 แสดงดังรูปที่ 4-15 ความชันของเส้นระดับความดันก็คือความชันของกราฟของการทดลอง และจากรูปที่ 4-15 หาค่าความชันของกราฟของการทดลองที่ CU3/S1 ได้เท่ากับ 0.2967

3) คำนวณค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่เกิดขึ้น จากผลต่างของระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลอง (h_w) และค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาล (h_{20}) ดังแสดงในรูปที่ 4-15 ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ CU3/S1 เท่ากับ 0.004 เมตร ขณะที่เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำมีค่าเท่ากับ 0.793 เมตร นั่นคือเฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลในแนวทิศทางเดียวเข้าบ่อน้ำบาดาลของการทดลอง CU3/S1 มีค่าเท่ากับ 0.123 เมตร

เพื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟของการไหลเข้าในแนวรัศมีที่อัตราการไหลเท่ากัน (CR3/S1) จะต้องทำการปรับแก้เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ เนื่องจากความยาวของแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียวมีค่ามากกว่าแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี การคำนวณระดับความดันที่ตำแหน่ง 1.99 เมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลของการไหลในทิศทางเดียว ใช้สมการความสัมพันธ์ในรูปที่ 4-15

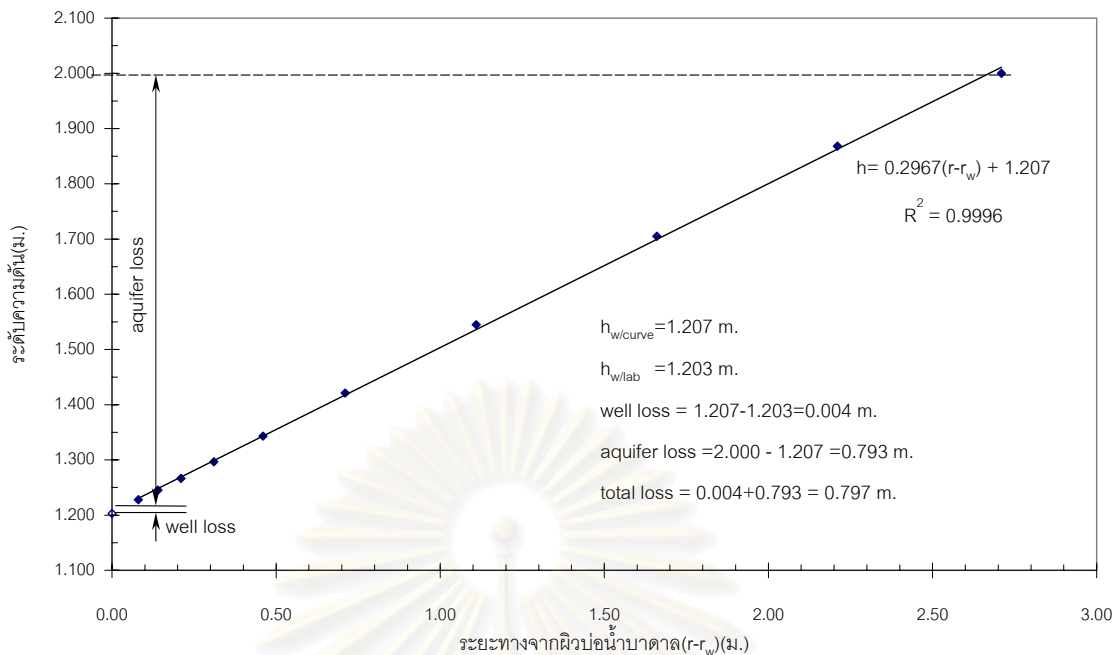
$$\text{ดังนั้น } h_{1.99} = 0.2967(1.99-0.2)+1.207 = 1.738 \text{ เมตร}$$

$$\text{เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ} = 1.738 - 1.207 = 0.531 \text{ เมตร}$$

$$\text{เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหล} = 0.531+0.004 = 0.535 \text{ เมตร}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับเฮดสูญเสียทั้งหมดจากการทดลอง CR3/S1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.123 เมตร นั่นคือ เฮดสูญเสียทั้งหมดจากไหลในทิศทางเดียวมีค่าสูงกว่าเฮดสูญเสียทั้งหมดจากไหลในแนวรัศมีถึง 3.5 เท่า แสดงว่าพฤติกรรมของการไหลในทิศทางเดียวแตกต่างกับการไหลในแนวรัศมีอย่างชัดเจน ความแตกต่างนั้นเกิดจากอิทธิพลของการไหลนำพา ดังนั้นในการวิเคราะห์ต่อไปจะทำการหาอิทธิพลของการไหลนำพา โดยการเปรียบเทียบระดับความดันตามระยะทางจากการคำนวณโดยพารามิเตอร์ที่คิดผลของการไหลนำพา (กรณีการไหลในแนวรัศมี) กับระดับความดันตามระยะทางจากการคำนวณโดยพารามิเตอร์ที่ไม่คิดผลของการไหลนำพา (กรณีการไหลในทิศทางเดียว) ที่อัตราการไหลเท่ากัน

4) คำนวณค่าอัตราการไหล จากระดับน้ำเหนือสันฝาย ตามสมการ $Q = 0.0438h_w^{1.539}$ และความเร็วการไหล $v = \frac{Q}{A}$ โดยที่ พื้นที่หน้าตัดการไหลมีขนาดกว้าง 0.1036 เมตร และหนา 0.2 เมตร ดังนั้น $A=(0.1036 \times 0.2)=0.02072$ ตารางเมตร



รูปที่ 4-15 เส้นระดับความดันตามระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาลของการทดลอง CU3/S1

5) คำนวณค่าเรย์โนลด์จากสมการที่ 2-13 $Re' = \left(\frac{v}{\phi}\right)\left(\frac{d_{50}}{v}\right)$ เมื่อทราบค่า v ϕ d_{50} และ v

และคำนวณแฟคเตอร์เสียดทานจากสมการที่ 2-23 $f' = \frac{Igd_{50}}{2\left(\frac{v}{\phi}\right)^2}$ เมื่อทราบค่า I d_{50} v และ ϕ ตัวอย่าง

ผลการทดลองและการคำนวณค่า I Re' และ f' ของการทดลองที่ CU1/S1 - CU5/S1 ดังแสดงในตารางที่ 4-16

6) หาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ Re' โดยนำค่า I กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง CU1/S1 - CU5/S1 ในตารางที่ 4-15 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-16 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I กับ Re' ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือจุดที่ความชันเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 1 จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ Re'_{cr} และจากรูปที่ 4-16 ค่า Re'_{cr} ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21.2

ตารางที่ 4-16 ผลการทดลองและการคำนวณค่า Re' และ f' ของการทดลองที่ CU1/S1 - CU5/S1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 91.458 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถี่จําเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ (ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.392

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)													h_{weir} (ซม.)	Q (ลบ.ม./วินาที)	v/φ (ม./วินาที)	Re'	I_{avg}	f'
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}								
CU1/S1	1.193	1.200	1.207	1.213	1.220	1.234	1.257	1.295	1.345	1.397	1.436	1.00	0.000037	0.0045	7.02	0.0907	29.36		
CU2/S1	1.197	1.216	1.228	1.243	1.263	1.294	1.349	1.435	1.545	1.661	1.767	1.70	0.000083	0.0102	15.89	0.2093	13.23		
CU3/S1	1.203	1.228	1.245	1.267	1.297	1.343	1.421	1.545	1.705	1.868	2.000	2.10	0.000115	0.0141	21.99	0.2967	9.79		
CU4/S1	1.279	1.466	1.587	1.634	1.816	1.978	2.470	3.020	3.964	4.905	5.714	5.00	0.000436	0.0536	83.58	1.6183	3.70		
CU5/S1	1.306	1.567	1.749	1.854	2.144	2.461	3.197	4.168	5.632	6.974	8.322	6.20	0.000607	0.0747	116.38	2.5656	3.02		

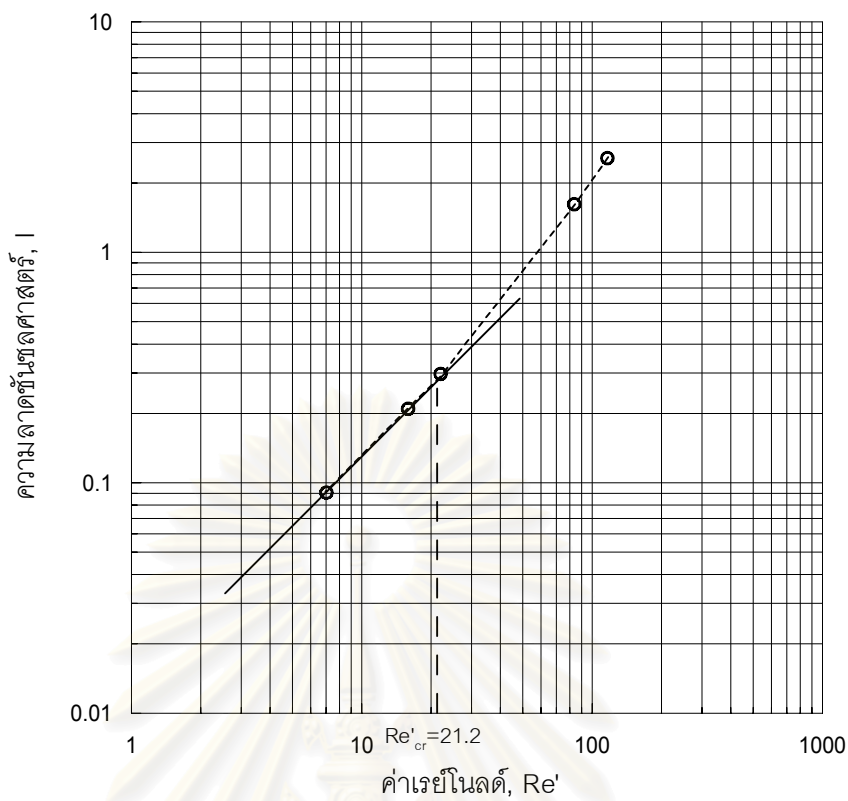
- หากจากความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' โดยนำค่า f' กับ Re' ที่คำนวณได้จากการทดลอง CU1/S1 - CU5/S1 ในตารางที่ 4-15 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในกระดาษล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 4-17 เมื่อการไหลเป็นแบบเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า f' กับ Re' ดังกล่าวจะเป็นเส้นตรงหรือมีความลาดชันคงที่ ดังนั้นจุดที่กราฟเริ่มเบี่ยงออกจากแนวเส้นตรงหรือค่าความลาดชันเปลี่ยนแปลงไปจะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งค่า Re' ที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ Re'_{cr} และจากรูปที่ 4-17 ค่า Re'_{cr} ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21.2 เช่นกัน

และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ยังไม่นอนขนานกับแกน x หรือค่าแฟคเตอร์เสียดทานยังไม่คงที่ โดยในสภาพการไหลแบบราบเรียบ จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการ $f' = \frac{208.43}{Re'}$ (นั่นคือ ค่าคงที่ A ในสมการที่ 2-24 และ 2-25 มีค่าเท่ากับ 382.49) และทำการหาค่าคงที่ B จากสมการที่ 2-25 โดยนำค่า $\frac{208.43}{Re'}$ ไปหักออกจากค่า f' ที่ได้จากการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยของ B ได้เท่ากับ 1.90 นั่นคือในสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ดังสมการ $f' = \frac{208.43}{Re'} + 1.22$

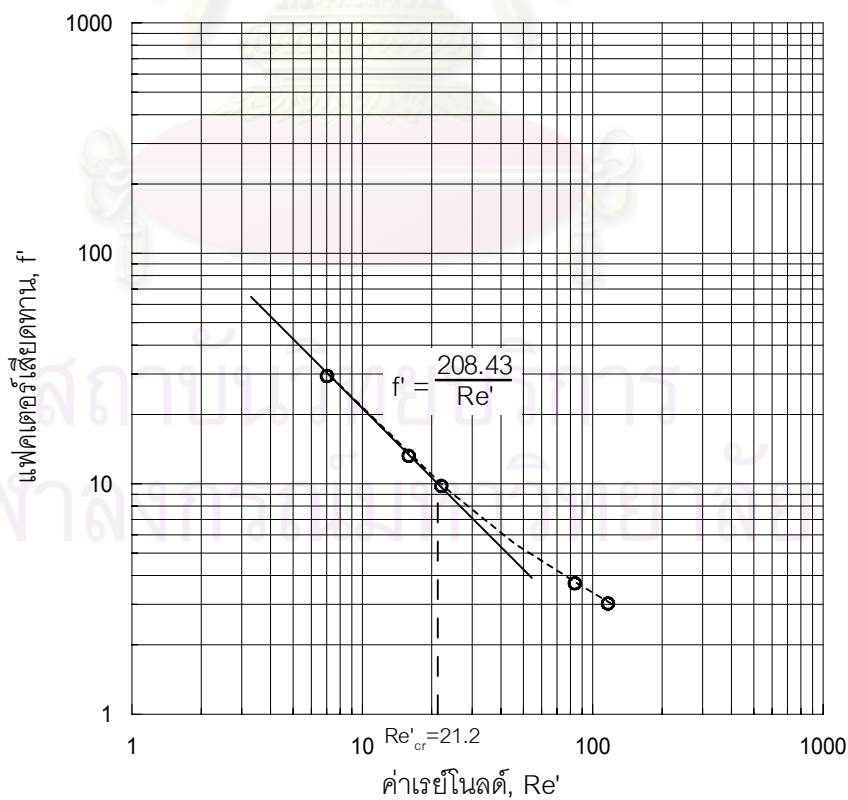
7) เมื่อทราบค่า Re'_{cr} ก็สามารถแบ่งได้ว่า การทดลองใดบ้างที่เป็นการไหลแบบเชิงเส้น ($Re' < Re'_{cr}$) และการไหลแบบไม่เชิงเส้น ($Re' > Re'_{cr}$) จากตารางที่ 4-15 แสดงว่าการทดลองที่ CU1/S1 - CU2/S1 เป็นการไหลแบบเชิงเส้น และการทดลองที่ CU3/S1 - CU5/S1 เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น

8) การวิเคราะห์ค่าความนำชลศาสตร์ จะใช้ค่า I และ $\frac{V}{\phi}$ จากการทดลองที่เป็นการไหลแบบเชิงเส้น นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ $\frac{V}{\phi}$ ดังแสดงในรูปที่ 4-18 และจากสมการ $I = \left(\frac{1}{K_1'}\right)\left(\frac{V}{\phi}\right)$ แสดงว่าค่า K_1' ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.049 เมตร/วินาที

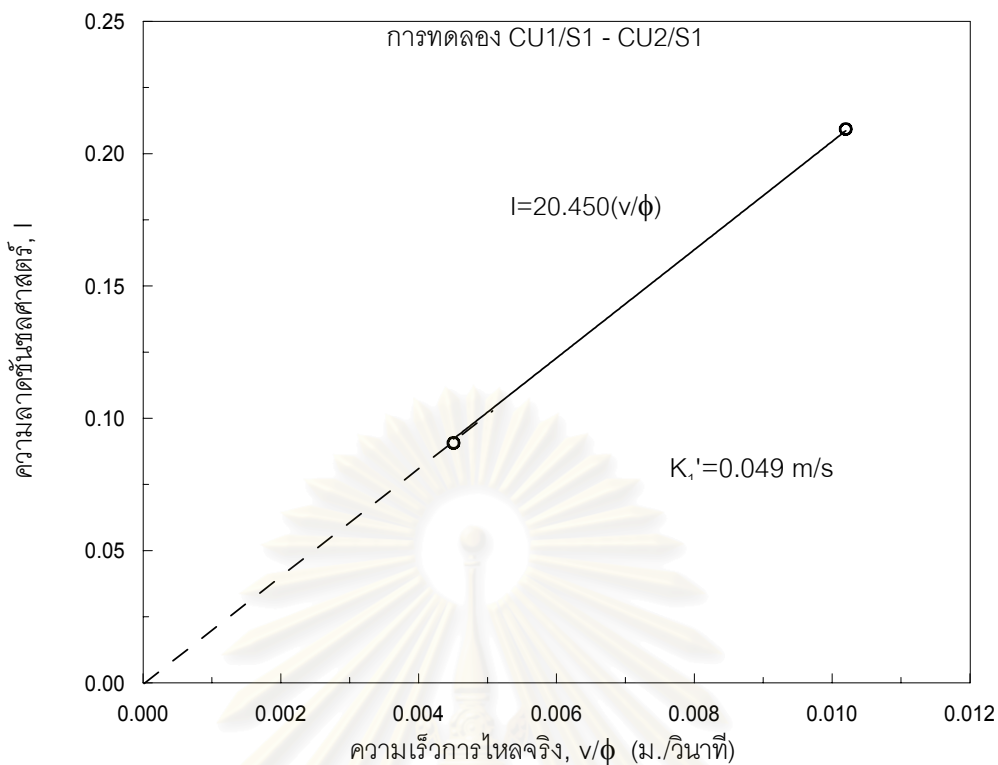
9) การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี จะใช้ค่า I และ $\frac{V}{\phi}$ จากการทดลองที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง I และ $\frac{V}{\phi}$ ดังแสดงในรูปที่ 4-19 และจากสมการ $I = a_1' \frac{V}{\phi} + b_1' \left(\frac{V}{\phi}\right)^2$ แสดงว่าค่า a_1' และ b_1' ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 18.845 วินาที/เมตร และ 208.2 วินาที²/เมตร² ตามลำดับ



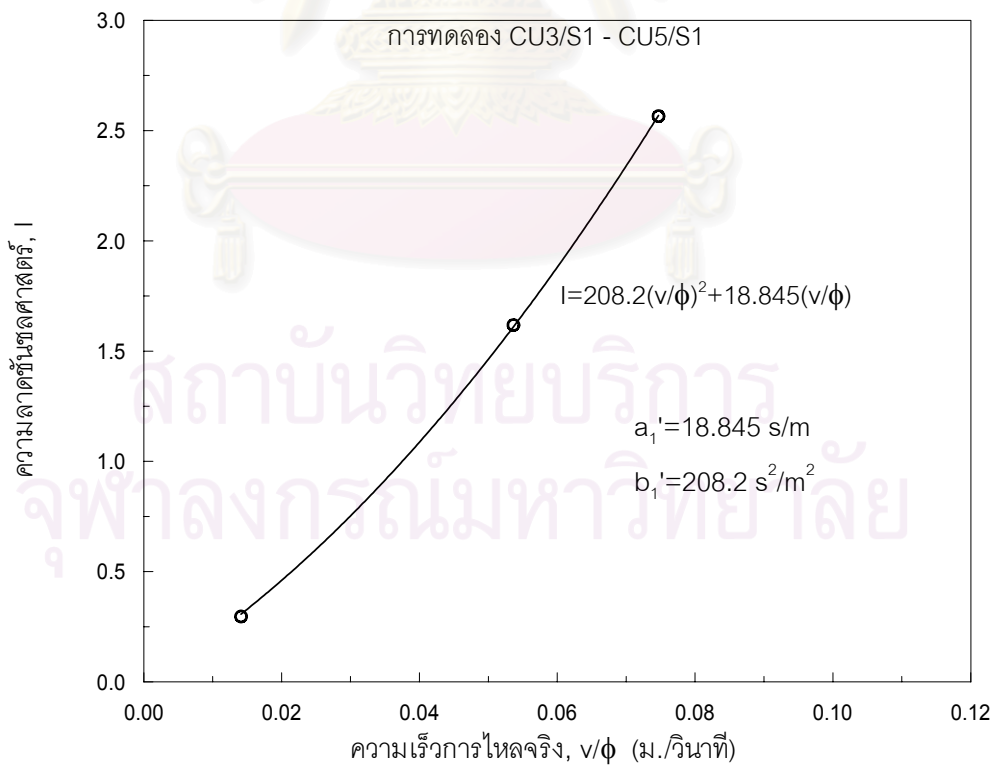
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันในท่อศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ (CU1/S1 - CU5/S1)



รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ (CU1/S1 - CU5/S1)



รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลจริงกับความลาดชันชลศาสตร์ (CU1/S1 - CU2/S1) กรณีการไหลแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับความเร็วการไหลจริง (CU3/S1 - CU5/S1) กรณีการไหลแบบไม่เชิงเส้น

เมื่อทำวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด (การทดลองที่ CU1/S1 - CU5/S4) ได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4-17 จากตารางพบว่า แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำคลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี กับขนาดทรายชั้นน้ำ จะเหมือนกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล นั่นคือค่าความนำคลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซีมีค่าลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

จากการวิเคราะห์หาเสดสูญเสียดังเกิดขึ้นจากการทดลองการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด สรุปค่าเสดสูญเสียดังทั้งหมด (s_w) ค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล (ds'') และเสดสูญเสียดังจากการไหลในชั้นน้ำ (ds_A) ดังแสดงในตารางที่ 4-18 จากตารางพบว่าเสดสูญเสียดังในส่วนต่างๆ มีแนวโน้มความสัมพันธ์กับขนาดทรายเช่นเดียวกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล กล่าวคือเสดสูญเสียดังจากการไหลในชั้นน้ำ ความสูญเสียดังของบ่อน้ำบาดาล และเสดสูญเสียดังทั้งหมด มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ดังแสดงในรูปที่ 4-20 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลองยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และได้ค่าคงที่ A และ B จากสมการความสัมพันธ์ แสดงในตารางที่ 4-19

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B พบว่า ค่าคงที่ B ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดทราย แสดงว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เป็นความยาวจำเพาะการไหล จะไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 4-20 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad f' = \frac{225.74}{Re'}$$

$$\text{การไหลแบบเปลี่ยนแปลง} \quad f' = \frac{225.74}{Re'} + 1.17$$

และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยเท่ากับ 27.1

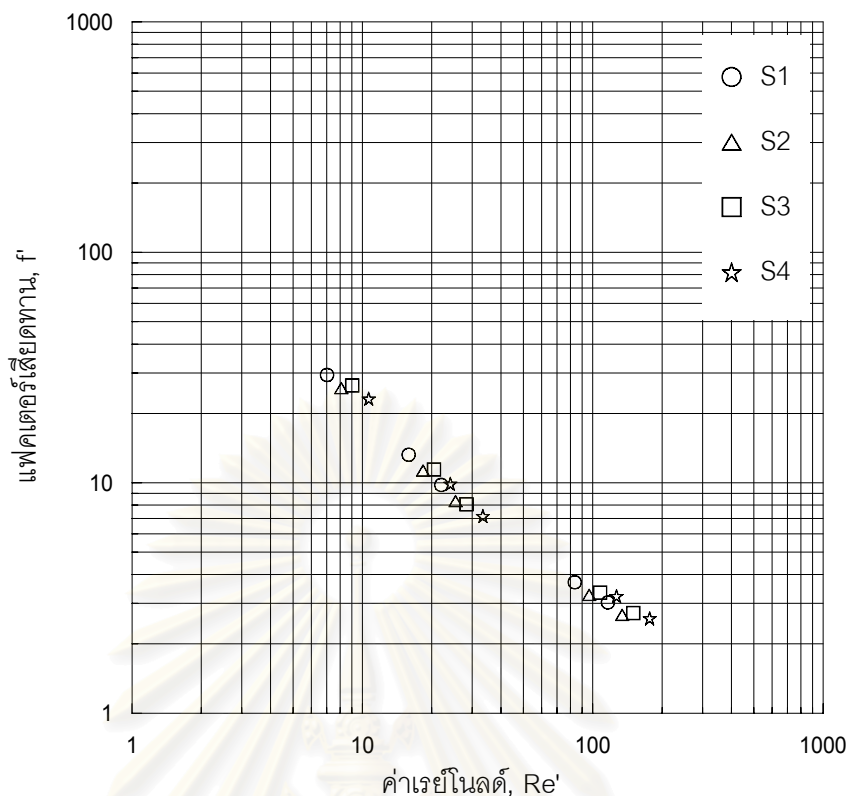
ตารางที่ 4-17 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลจากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่าง	d_{50}	ความพรุน	Re'_{cr}	K_1'	a_1'	b_1'
S1	1.34	0.392	21.2	0.049	18.845	208.2
S2	1.58	0.401	25.7	0.068	14.115	151.7
S3	1.80	0.409	28.4	0.080	12.640	131.6
S4	2.10	0.405	33.1	0.105	9.774	117.4

หน่วย	หมายเหตุ
ม./วินาที	K_1'
วินาที/ม.	a_1'
วินาที ² /ม. ²	b_1'
ลบ.ม./วินาที	Q_{lab}, Q_{equi}
ม.ม.	d_{50}
ม.	s_w, ds''', ds_A

ตารางที่ 4-18 ยอดสูญเสียในส่วนต่างๆ จากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว

Q_{lab}	Q_{equi}	S1			S2			S3			S4		
		Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss
		s_w	ds''	ds_A	s_w	ds''	ds_A	s_w	ds''	ds_A	s_w	ds''	ds_A
0.00004	0.00044	0.243	0.000	0.243	0.000	0.175	0.151	0.000	0.151	0.115	0.000	0.115	
0.00008	0.00099	0.570	0.002	0.568	0.002	0.395	0.337	0.002	0.335	0.255	0.002	0.253	
0.00011	0.00138	0.797	0.004	0.793	0.003	0.556	0.456	0.003	0.453	0.355	0.003	0.352	
0.00044	0.00523	4.435	0.023	4.412	0.021	3.159	2.724	0.020	2.704	2.304	0.019	2.285	
0.00061	0.00728	7.016	0.038	6.978	0.034	5.019	4.312	0.032	4.280	3.584	0.031	3.553	



รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์
การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตารางที่ 4-19 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	208.43	1.22
S2	209.48	1.10
S3	238.60	1.12
S4	246.45	1.23

4.7 การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.6 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรการไหลจะเหมือนกัน ได้แก่ ค่าความนำชลศาสตร์ (K_1') พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_1') พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_1') ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^N) และค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr})

จากการทดลองในลักษณะเดียวกัน แต่ต่างกันเฉพาะทิศทางการไหล ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-20 และพบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไหลศาสตร์ พารามิเตอร์ดาร์ซี และพารามิเตอร์นอนดาร์ซี กับขนาดทรายชั้นน้ำ จะเหมือนกับการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าบ่อน้ำบาดาล นั่นคือค่าความนำไหลศาสตร์ของทรายขนาดใหญ่จะสูงกว่าทรายขนาดเล็ก พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซีมีค่าลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

จากการวิเคราะห์หาเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ในทรายชั้นน้ำทั้ง 4 ขนาด สรุปค่าเฮดสูญเสียทั้งหมด (s_w) ค่าความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล (ds'') และเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ (ds_A) ดังแสดงในตารางที่ 4-21 จากตารางพบว่าเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลและเฮดสูญเสียทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาด ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ดังแสดงในรูปที่ 4-21 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' แสดงว่าการไหลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลอง ยังไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และได้ค่าคงที่ A และ B จากสมการความสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4-22

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ A และ B พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดทราย แสดงว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เป็นความยาวจำเพาะการไหล จะไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง f' กับ Re' ได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 4-21 พบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกัน และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ตามชนิดการไหลดังนี้

$$\text{การไหลแบบราบเรียบ} \quad f' = \frac{230.81}{Re'}$$

$$\text{การไหลแบบเปลี่ยนแปลง} \quad f' = \frac{230.81}{Re'} + 1.19$$

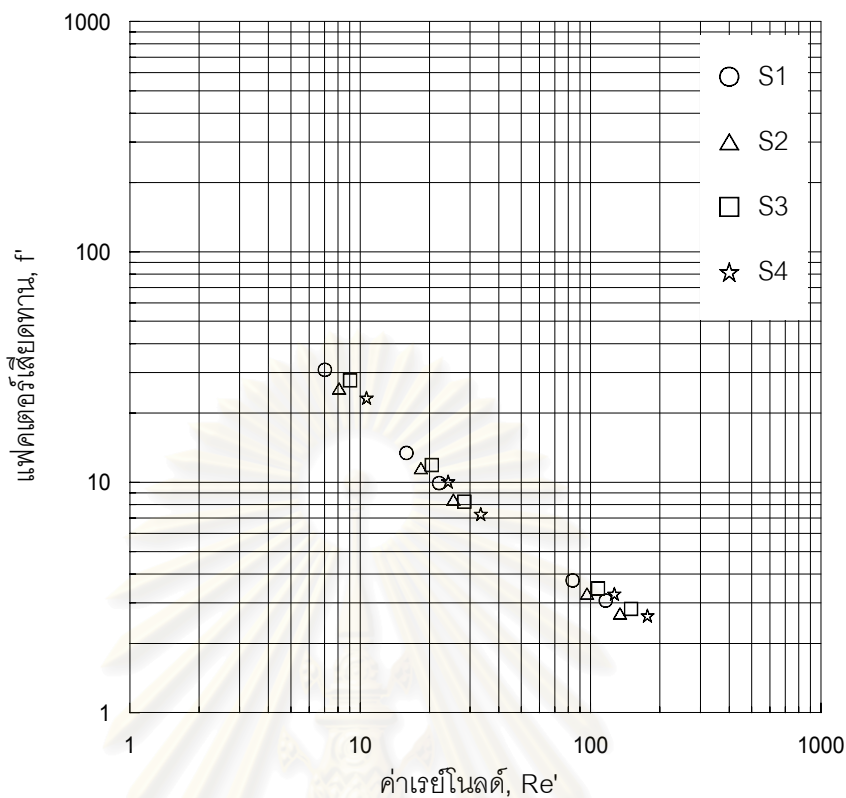
และมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยเท่ากับ 27.5

ตารางที่ 4-20 พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่าง	d_{50}	ความพรุน	Re'_{cr}	K_1'	a_1'	b_1'	หมายเหตุ : หน่วย	K_1'	ม./วินาที
S1	1.34	0.392	21.7	0.048	19.143	211.6		a_1'	วินาที/ม.
S2	1.58	0.401	25.9	0.067	14.304	152.2		b_1'	วินาที ² /ม. ²
S3	1.80	0.409	29.0	0.078	13.212	135.5		Q_{lab}, Q_{equi}	ลบ.ม./วินาที
S4	2.10	0.405	33.3	0.103	9.828	122.1		d_{50}	ม.ม.
								s_w, ds'', ds''', ds_A	ม.

ตารางที่ 4-21 เติดสูญเสียในส่วนต่างๆ จากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว

Q_{lab}	Q_{equi}	S1			S2			S3			S4		
		Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss	Total Loss	Well Loss	Aquifer Loss
		s_w	ds''	ds_A	s_w	ds''	ds_A	s_w	ds''	ds_A	s_w	ds''	ds_A
0.00004	0.00044	0.258	0.000	0.258	0.000	0.174	0.159	0.000	0.159	0.000	0.117	0.000	0.117
0.00008	0.00099	0.577	0.001	0.576	0.001	0.401	0.351	0.001	0.350	0.001	0.259	0.001	0.258
0.00011	0.00138	0.816	0.002	0.814	0.002	0.558	0.467	0.002	0.465	0.002	0.360	0.002	0.358
0.00044	0.00523	4.471	0.014	4.457	0.013	3.167	2.823	0.012	2.811	0.011	2.338	0.011	2.327
0.00061	0.00728	7.087	0.022	7.065	0.021	5.030	4.466	0.020	4.446	0.019	3.650	0.019	3.631



รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตารางที่ 4-22 ค่าคงที่ A และ B จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ B
S1	216.79	1.19
S2	209.04	1.14
S3	249.06	1.16
S4	248.34	1.28

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการประยุกต์ใช้

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง และการนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน โดยทำการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน (piezometric head curve) จากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ และเสนอแนะขั้นตอนการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบสูบน้ำและเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน

เนื่องจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในการทดลองมีเสดสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นใน 2 ส่วนหลักดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.6 ประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (well loss) และเสดสูญเสียดังกล่าวที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำ (aquifer loss) ซึ่งแบ่งออกเป็นเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ และเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองการไหลของน้ำภายใต้แรงดันใน 3 ลักษณะ ได้แก่ การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว และการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี โดยพิจารณาว่าการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีเสมือนการไหลที่เกิดขึ้นจริงจึงถือว่าการทดลองหลัก ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงแยกการวิเคราะห์เป็น 5 ประเด็นหลักประกอบด้วย

- 1) การหาจุดเปลี่ยนสภาพการไหลจากการไหลแบบเชิงเส้นไปเป็นการไหลจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น หรือหาค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr}) เพื่อนำไปคำนวณหารัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (r_{cr})
- 2) การหาเสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล (total head loss)
- 3) การหาความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล (CQ^{Γ}) และการหาค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล
- 4) การหาเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำและการหาค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี (a_2') ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_2') และค่าสัมประสิทธิ์การนำพา (c_2')
- 5) การหาเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ และการหาค่าความนำคลศาสตร์ (K_2') และค่าสัมประสิทธิ์การนำพา (c_2')

และทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลกับค่าเรย์โนลด์กฤติ หรือขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายชั้นน้ำซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการทดลอง จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบ พารามิเตอร์ที่หาได้จากการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี กับการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน และการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว เพื่อวิเคราะห์ ความแตกต่าง

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จะต้องพิจารณาว่า ขอบเขตของการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ในแต่ละ การทดลองมีขอบเขตใกล้เคียงกันหรือไม่ ซึ่งขอบเขตการทดลองที่นำมาวิเคราะห์สรุปในตารางที่ 5-1 เมื่อพิจารณาความเร็วการไหลในการทดลองพบว่า การทดลองการไหลในทิศทางเดียวมีความเร็วการไหล การไหลต่ำกว่าการทดลองการไหลในแนวรัศมีมาก เนื่องจากแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียวสามารถ ทนแรงดันได้น้อยกว่า(ไม่เกิน 15 เมตร) ซึ่งจากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวสามารถทดลองได้ด้วย อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ $Q_5 (6.07 \times 10^{-3} \text{ ลบ.ม./วินาที})$ เพราะเมื่ออัตราการไหลสูงกว่ำนี้ระดับความดัน จะเพิ่มสูงเกินกว่า 15 เมตร ดังนั้นการเปรียบเทียบพารามิเตอร์บางตัวที่ได้จากการทดลองการไหลในทิศ ททางเดียวกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีจะไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจาก อัตราการไหลที่แตกต่างกันมีผลต่อการคำนวณค่าพารามิเตอร์นั้น พารามิเตอร์ดังกล่าวได้แก่ ความสูญเสีย ของบ่อน้ำบาดาล พารามิเตอร์ดาร์ซีและพารามิเตอร์นอนดาร์ซี ขณะที่ค่าความนำไหลศาสตร์สามารถนำ มาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวครอบคลุมช่วงการไหลที่เป็นการไหล แบบเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตาม สามารถนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวไป ทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดันและเปรียบเทียบกับที่คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการ ทดลองการไหลในแนวรัศมี ที่อัตราการไหลเท่ากัน เพื่อหาอิทธิพลของการไหลนำพา ซึ่งจะกล่าวถึงในหัว ข้อการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีหลายตัว จึงต้องมีการกำหนดสัญลักษณ์ของพารา มิเตอร์เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 5-2

จากการวิเคราะห์ผลทดลองในบทที่ 4 ได้พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลในแต่ละการ ทดลอง ได้แก่ Re'_{cr} , K_1' , a_1' , b_1' , K_2' , a_2' , b_2' และ c_2' ดังแสดงในตารางที่ 4-5 (การทดลองการไหลแบบ มาตรฐาน) ตารางที่ 4-9 และ 4-11 (การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี)และ ตารางที่ 4-14 และ 4-16 (การทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียว) เมื่อแยก พารามิเตอร์ตามประเภทการทดลองและรูปแบบการไหล สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-3

เนื่องจากการวิเคราะห์ในข้อที่ 4 และ 5 เป็นการวิเคราะห์หาเสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ อย่างละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.7.1 แต่การวิเคราะห์หาเสดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำสามารถ

คำนวณได้จากค่าคงที่ A และ B ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ ตามวิธีการในหัวข้อที่ 2.7.1.3 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าคงที่แบบรวม 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 - 269.9
การไหลในแนวรัศมี	0.4 – 23.1	0.2 – 65.0	1.2 – 398.6
การไหลในทิศทางเดียว	0.4 – 6.1	1.8 – 29.3	7.0 – 176.5

ตารางที่ 5-2 สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์จากการทดลอง

ตัวแปรหรือพารามิเตอร์	ประเภทการทดลอง	ทิศทางการไหล	สัญลักษณ์
1. ค่าเรย์โนลด์วิกฤต (Re'_{cr})	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน	ไหลเข้า/ไหลออก	$Re'_{cr/ST}$
	การทดลองการไหลในแนวรัศมี	ไหลเข้า	$Re'_{cr/CR}$
		ไหลออก	$Re'_{cr/DR}$
	การทดลองการไหลในทิศทางเดียว	ไหลเข้า	$Re'_{cr/CU}$
ไหลออก		$Re'_{cr/CR}$	
2. ค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล	การทดลองการไหลในแนวรัศมี	ไหลเข้า	$C_{/CR}, n_{/CR}$
		ไหลออก	$C_{/DR}, n_{/DR}$
3. กรณีไม่คิดผลของการไหลนำพา 3.1 การไหลแบบเชิงเส้น - ค่าความนำชลศาสตร์ (K_1') 3.2 การไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น - ค่าพารามิเตอร์ดาร์ซี (a_1') - ค่าพารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_1')	การทดลองการไหลแบบมาตรฐาน	ไหลเข้า/ไหลออก	$K_1'_{/ST}, a_1'_{/ST}, b_1'_{/ST}$
		ไหลเข้า	$K_1'_{/CU}, a_1'_{/CU}, b_1'_{/CU}$
	การทดลองการไหลในทิศทางเดียว	ไหลออก	$K_1'_{/DU}, a_1'_{/DU}, b_1'_{/DU}$
4. กรณีคิดผลของการไหลนำพา 4.1 การไหลแบบเชิงเส้น - ค่าความนำชลศาสตร์ (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	$K_2'_{/DR}, a_2'_{/DR}, b_2'_{/DR}, c_2'_{/DR}$

5.1 รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์หรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลาดชันชลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์ สามารถหาจุดเปลี่ยนสภาพการไหลได้หรือจุดที่กราฟเริ่มหักเหออกจากแนวเส้นตรง ซึ่งค่าเรย์โนลด์ที่จุดดังกล่าวก็คือค่าเรย์โนลด์วิกฤติ เนื่องจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (Re'_{cr}) เป็นตัวบ่งชี้ว่าสภาพการไหลในชั้นน้ำเป็นแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้น กล่าวคือ ถ้าการไหลที่ค่าเรย์โนลด์น้อยกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะเป็นการไหลแบบเชิงเส้น แต่ถ้าค่าเรย์โนลด์มากกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งการทดลองการไหลในแนวรัศมีได้ใช้ค่าเรย์โนลด์วิกฤติจากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานมาออกแบบอัตราการไหลที่จะใช้ในการทดลอง เพื่อให้เกิดการไหลในชั้นน้ำในการทดลองการไหลในแนวรัศมี 3 ลักษณะ (ดังที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.4.4) 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 การไหลที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาล และเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น : $Re'_{cr} \leq Re'_{wf} \leq 9.95 Re'_{cr}$

แสดงว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติมีความสำคัญมากในการพิจารณาสภาพการไหลที่เกิดขึ้นในการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

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	21.6
S2	1.58	25.6
S3	1.80	28.7
S4	2.10	33.5

เมื่อนำค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ยจากตารางที่ 5-4 ซึ่งเป็นตัวแทนของการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-2 พบว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤติจะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดทรายที่ใหญ่ขึ้น และได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดทราย ดังนี้

$$Re'_{cr} = 16.314 d_{50}^{0.969} \quad (5-1)$$

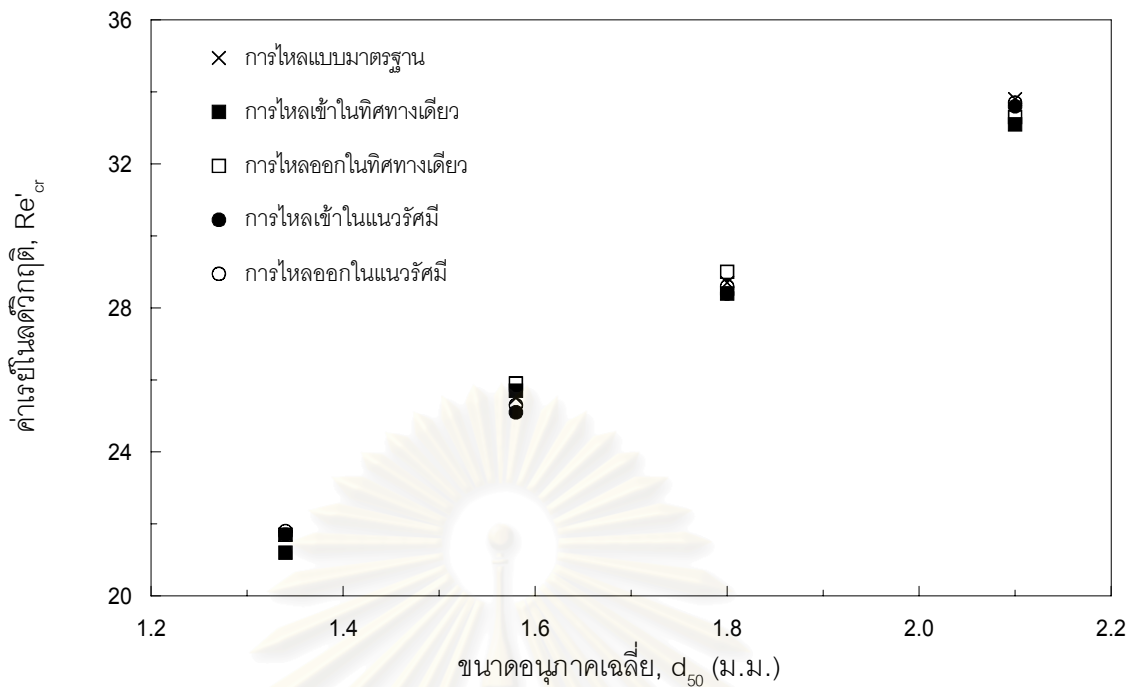
สมการที่ 5-1 จะใช้ได้กับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยในช่วง 1.34-2.10 มิลลิเมตรเท่านั้น โดย d_{50} มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และจากสมการที่ 5-1 เมื่อนำค่าเรย์โนลด์วิกฤติไปแทนค่าในสมการที่ 2-32 จะสามารถหาค่ารัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi} \right) \left(\frac{d_{50}}{16.314 d_{50}^{0.969}} \right)$$

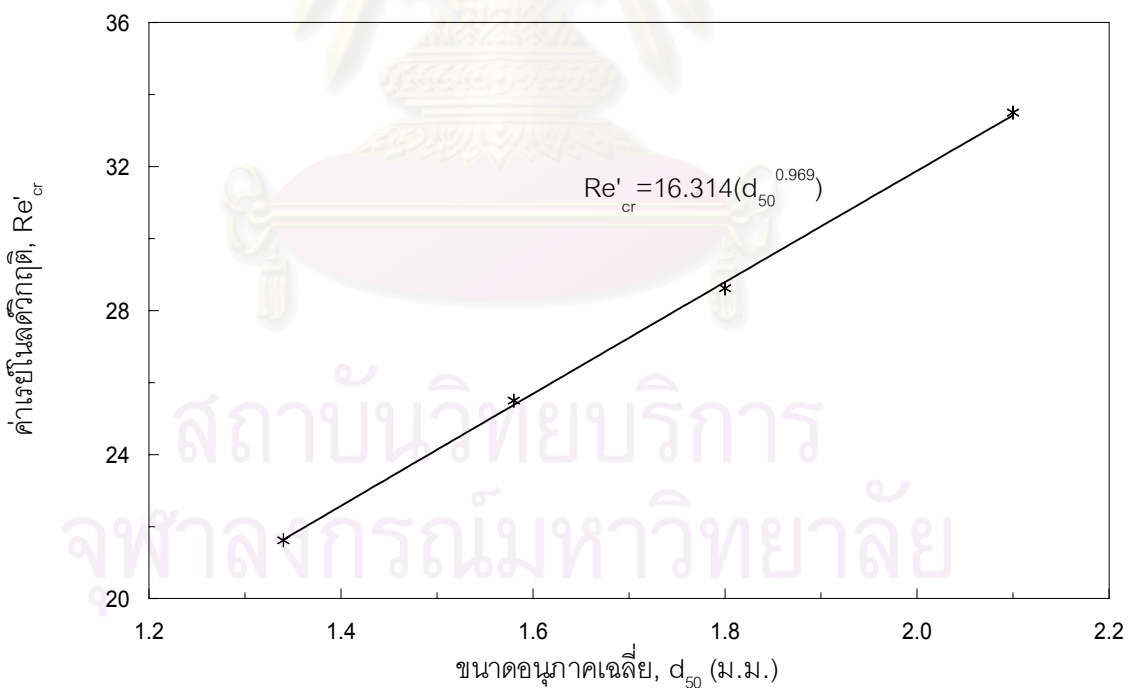
นั่นคือ

$$r_{cr} = \left(\frac{Q}{2\pi m v \phi} \right) (0.061 d_{50}^{0.031}) \quad (5-2)$$

จากรัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาลที่หาได้ตามสมการที่ 5-2 สามารถบอกได้ว่าที่อัตราการไหล (Q , ลูกบาศก์เมตร/วินาที) ความหนาชั้นน้ำ (m , เมตร) ความหนืดเปรียบเทียบ (v , เมตร²/วินาที) ความพรุนของทรายชั้นน้ำ (ϕ) และขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำเฉลี่ย (d_{50} , มิลลิเมตร) สภาพการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นเป็นการไหลแบบเชิงเส้น ที่ระยะทางจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาลเท่ากับรัศมีวิกฤติของบ่อน้ำบาดาล



รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย จากการทดลองกรณีต่างๆ



รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย

5.2 เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล ประกอบด้วยความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล และเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ ซึ่งเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำ สามารถแบ่งได้ 2 ส่วนตามสภาพการไหล ได้แก่ เฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ในกรณีการไหลแบบผสม (mixed flow) คือการไหลที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นบริเวณใกล้บ่อน้ำบาดาลและเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เมื่อเป็นการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล สมการระดับความดันจะใช้สมการที่ 2-39 และ 2-40 ขณะที่การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลจะใช้สมการที่ 2-41 และ 2-42 เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการระดับความดัน ดังต่อไปนี้

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h_0 - h_w = [CQ] + \left[\left(\frac{a_1'}{\phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right) \ln \left(\frac{r_w}{r_{cr}} \right) + \left(\frac{b_1'}{\phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}} \right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{1}{K_2' \phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right) \ln \left(\frac{r_0}{r_{cr}} \right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \right] \quad (5-3)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h_w - h_0 = [CQ] + \left[\left(\frac{a_1'}{\phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right) \ln \left(\frac{r_w}{r_{cr}} \right) + \left(\frac{b_1'}{\phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}} \right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{1}{K_2' \phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right) \ln \left(\frac{r_0}{r_{cr}} \right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) \right] \quad (5-4)$$

โดยที่ 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 เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ($s_{w/C}$)

$h_w - h_0$ คือ เฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ($s_{w/D}$)

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

$\left[\left(\frac{a_1'}{\phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right) \ln \left(\frac{r_w}{r_{cr}} \right) + \left(\frac{b_1'}{\phi} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}} \right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2} \right) \left(\frac{Q}{2\pi m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) \right]$ คือ เฮดสูญเสียจากการไหล

แบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ds'')

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

(ds)

จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลได้เฮดสูญเสียจากการไหลในส่วนต่างๆ ดังสรุปในตารางที่ 5-5 ถึง 5-8 ซึ่งแสดงเฮดสูญเสียจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 5-5 ถึง 5-8 มีดังนี้

Q_{lab}	คือ	ค่าอัตราการไหลจากการทดลองการไหลในชั้นน้ำรูปส่วนหนึ่งของวงกลม มีมุมที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ 30 องศา แต่ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^n) จะต้องใช้ค่าอัตราการไหลเสมือนจริงหรือเต็มวง 360 องศา (Q_{equi}) ในการวิเคราะห์ 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 ($ds_{/C}$) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ($ds''_{/C}$)
ds_{AD}	คือ	เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล มีค่าเท่ากับผลรวมของเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ($ds_{/D}$) และเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ($ds''_{/D}$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-5 เมตริกเดียวจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 1

ประเภทการไหล	Q _{inj} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	Q _{out} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	การไหลเข้า(Converging flow)						การไหลออก(Diverging flow)										
			Total loss		Well loss		Aquifer loss		Total loss		Well loss		Aquifer loss						
			s _{wD} (ม.)	(%s _{wD})	ds _{wC} (ม.)	(%s _{wC})	ds _{wI} (ม.)	(%s _{wI})	s _{wD} (ม.)	(%s _{wD})	ds _{wO} (ม.)	(%s _{wO})	ds _{wI} (ม.)	(%s _{wI})	ds _{wO} (ม.)	(%s _{wO})			
linear flow	0.4	4.8	0.038	0.000	0.00	0.038	100.00	0.00	0.038	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.038	100.00		
	0.8	9.6	0.087	0.003	3.45	0.084	96.55	0.000	0.084	96.55	0.000	0.002	2.27	0.086	97.73	0.000	0.086	97.73	
	1.1	13.2	0.123	0.008	6.50	0.115	93.50	0.000	0.115	93.50	0.000	0.005	4.03	0.119	95.97	0.000	0.119	95.97	
mixed flow	4.4	52.8	0.570	0.036	6.67	0.532	93.33	0.340	59.65	0.192	33.66	0.572	0.025	4.37	0.547	95.63	0.350	61.19	34.44
	6.1	73.2	0.865	0.064	7.40	0.801	92.60	0.635	73.41	0.166	19.19	0.880	0.045	5.11	0.835	94.89	0.665	75.57	19.32
	7.3	87.6	1.106	0.083	7.50	1.023	92.50	0.880	79.57	0.143	12.83	1.132	0.062	5.48	1.070	94.52	0.920	81.27	13.25
non-linear flow	20.0	240.0	4.811	0.404	8.39	4.407	91.61	4.407	91.61	0.000	0.00	4.874	0.261	5.15	4.623	94.85	4.623	94.85	0.00
	21.3	255.6	5.335	0.452	8.47	4.883	91.53	4.883	91.53	0.000	0.00	5.379	0.285	5.30	5.094	94.70	5.094	94.70	0.00
	23.1	277.2	6.104	0.534	8.74	5.570	91.26	5.570	91.26	0.000	0.00	6.155	0.323	5.25	5.832	94.75	5.832	94.75	0.00

ตารางที่ 5-6 เมตริกเดียวจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 2

ประเภทการไหล	Q _{inj} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	Q _{out} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	การไหลเข้า(Converging flow)						การไหลออก(Diverging flow)										
			Total loss		Well loss		Aquifer loss		Total loss		Well loss		Aquifer loss						
			s _{wC} (ม.)	(%s _{wC})	ds _{wC} (ม.)	(%s _{wC})	ds _{wI} (ม.)	(%s _{wI})	s _{wD} (ม.)	(%s _{wD})	ds _{wO} (ม.)	(%s _{wO})	ds _{wI} (ม.)	(%s _{wI})	ds _{wO} (ม.)	(%s _{wO})			
linear flow	0.4	4.8	0.027	0.000	0.00	0.027	100.00	0.000	0.00	0.027	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.8	9.6	0.061	0.002	3.28	0.059	96.72	0.000	0.00	0.059	96.72	0.062	0.002	3.23	0.060	96.77	0.000	0.00	0.00
	1.1	13.2	0.086	0.008	9.30	0.078	90.70	0.000	0.00	0.078	90.70	0.087	0.004	4.60	0.083	95.40	0.000	0.00	0.00
mixed flow	4.4	52.8	0.393	0.029	7.38	0.364	92.62	0.230	58.52	0.134	34.10	0.404	0.022	5.45	0.382	94.55	0.242	59.90	14.0
	6.1	73.2	0.610	0.055	9.02	0.555	90.98	0.430	70.49	0.125	20.49	0.628	0.037	5.89	0.591	94.11	0.465	74.04	20.06
	7.3	87.6	0.787	0.074	9.40	0.713	90.60	0.605	76.87	0.108	13.72	0.814	0.055	6.76	0.759	93.24	0.650	79.85	13.99
non-linear flow	20.0	240.0	3.448	0.335	9.71	3.113	90.29	3.113	90.29	0.000	0.00	3.610	0.213	5.90	3.397	94.10	3.397	94.10	0.00
	21.3	255.6	3.849	0.374	9.71	3.475	90.29	3.475	90.29	0.000	0.00	3.983	0.236	5.92	3.747	94.08	3.747	94.08	0.00
	23.1	277.2	4.435	0.436	9.83	3.999	90.17	3.999	90.17	0.000	0.00	4.579	0.277	6.05	4.302	93.95	4.302	93.95	0.00

ตารางที่ 5-7 เสดดูยูเสียจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นนำตัวอย่างที่ 3

ประเภทการไหล	Q _{obs} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	Q _{adv} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	การไหลเข้า(Converging flow)						การไหลออก(Diverging flow)											
			Total loss		Well loss		Aquifer loss		Total loss		Well loss		Aquifer loss							
			s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})				
																	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})
linear flow	0.4	4.8	0.023	0.00	0.023	100.00	0.00	0.023	100.00	0.023	100.00	0.00	0.00	0.023	100.00	0.00	0.00	0.023	100.00	
	0.8	9.6	0.053	0.002	0.051	96.23	0.00	0.051	96.23	0.053	0.002	3.77	0.002	3.77	0.051	96.23	0.00	0.00	0.051	96.23
	1.1	13.2	0.074	0.007	0.067	90.54	0.00	0.067	90.54	0.075	0.004	5.33	0.004	5.33	0.071	94.67	0.00	0.00	0.071	94.67
mixed flow	4.4	52.8	0.347	0.024	0.323	93.08	0.205	59.08	0.118	34.01	0.350	0.016	4.57	0.334	96.43	0.213	60.86	0.121	34.57	
	6.1	73.2	0.542	0.050	0.492	90.77	0.388	71.59	0.104	19.19	0.546	0.037	6.78	0.509	93.22	0.405	74.18	0.104	19.05	
	7.3	87.6	0.702	0.069	0.633	90.17	0.541	77.07	0.092	13.11	0.708	0.050	7.06	0.658	92.94	0.565	79.80	0.093	13.14	
non-linear flow	20.0	240.0	3.117	0.325	2.792	89.59	2.792	89.59	0.000	0.00	3.121	0.204	6.54	2.917	93.46	2.917	93.46	0.000	0.00	
	21.3	255.6	3.379	0.355	3.024	89.50	3.024	89.50	0.000	0.00	3.441	0.226	6.57	3.215	93.43	3.215	93.43	0.000	0.00	
	23.1	277.2	3.935	0.407	3.528	89.67	3.528	89.67	0.000	0.00	3.958	0.269	6.80	3.689	93.20	3.689	93.20	0.000	0.00	

ตารางที่ 5-8 เสดดูยูเสียจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีของทรายชั้นนำตัวอย่างที่ 4

ประเภทการไหล	Q _{obs} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	Q _{adv} x 10 ⁻⁴ (ลบ.ม.วินาที)	การไหลเข้า(Converging flow)						การไหลออก(Diverging flow)											
			Total loss		Well loss		Aquifer loss		Total loss		Well loss		Aquifer loss							
			s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	ds _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})				
																	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})	s _{wc} (ม.)	ds _{wc} (%s _{wc})
linear flow	0.4	4.8	0.018	0.000	0.018	100.00	0.00	0.018	100.00	0.018	0.000	0.00	0.00	0.018	100.00	0.00	0.00	0.018	100.00	
	0.8	9.6	0.043	0.002	0.041	95.35	0.00	0.041	95.35	0.043	0.002	4.65	0.002	4.65	0.041	95.35	0.00	0.00	0.041	95.35
	1.1	13.2	0.062	0.007	0.055	88.71	0.00	0.055	88.71	0.060	0.004	6.67	0.004	6.67	0.056	93.33	0.00	0.00	0.056	93.33
mixed flow	4.4	52.8	0.269	0.024	0.245	91.08	0.157	58.36	0.088	32.71	0.270	0.015	5.56	0.255	94.44	0.146	54.07	0.109	40.37	
	6.1	73.2	0.428	0.045	0.383	89.49	0.300	70.09	0.063	19.39	0.424	0.035	8.25	0.389	91.75	0.291	68.63	0.098	23.11	
	7.3	87.6	0.560	0.064	0.496	88.57	0.420	75.00	0.076	13.57	0.549	0.043	7.83	0.506	92.17	0.417	75.96	0.089	16.21	
non-linear flow	20.0	240.0	2.506	0.315	2.191	87.42	2.191	87.42	0.000	0.00	2.471	0.194	7.85	2.277	92.15	2.277	92.15	0.000	0.00	
	21.3	255.6	2.846	0.345	2.501	87.88	2.501	87.88	0.000	0.00	3.271	0.205	6.27	3.066	93.73	3.066	93.73	0.000	0.00	
	23.1	277.2	3.197	0.387	2.810	87.90	2.810	87.90	0.000	0.00	3.134	0.243	7.75	2.891	92.25	2.891	92.25	0.000	0.00	

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5-5 ถึง 5-8 ในกรณีการไหลแบบผสม (Q4-Q6) สามารถสรุปสภาพ เสตดูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลด้วยอัตราการไหลที่เท่ากัน ดังแสดงในรูป ที่ 5-3 และเมื่อทำการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก ($s_{w/D}$) มีค่าสูงกว่าการไหลเข้า ($s_{w/C}$) เล็กน้อย โดยเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลออกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.01 เท่าของการไหลเข้า และเสตดูญเสียทั้งหมด จากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

2) ความเสตดูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้า ($ds''_{/C}$) มีค่าในช่วง 6.67-11.43 เปอร์เซ็นต์ ของเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า ($s_{w/C}$) ขณะที่ความเสตดูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลออก ($ds''_{/D}$) มีค่าในช่วง 4.37-7.83 เปอร์เซ็นต์ของเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก ($s_{w/D}$) แสดงว่าความ เสตดูญเสียบ่อมีความสำคัญต่อความถูกต้องของการคำนวณระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อ น้ำบาดาล เพราะถ้าไม่คิดความเสตดูญเสียบ่ออาจทำให้ออกแบบระบบการสูบน้ำและเติมน้ำผิดพลาดได้ โดยความเสตดูญเสียบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.49 เท่าของการไหลออก และความ เสตดูญเสียบ่อจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

3) เสตดูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ($ds_{A/C}$) มีค่าในช่วง 88.57-93.33 เปอร์เซ็นต์ของเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า ($s_{w/C}$) ขณะที่เสตดูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อ น้ำบาดาล ($ds_{A/D}$) มีค่าในช่วง 92.17-95.63 เปอร์เซ็นต์ของเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก ($s_{w/D}$) โดยเสตดูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.04 เท่าของการไหลเข้า และเสตดูญเสียจากการไหลในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

เนื่องจากเสตดูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่เสตดูญเสียจากการไหลแบบ เชงเส้นและแบบไม่เชงเส้น ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์เสตดูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำตามสภาพการไหลดัง นี้

- เสตดูญเสียจากการไหลแบบเชงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ($ds_{/C}$) มีค่าในช่วง 12.93-34.10 เปอร์เซ็นต์ของเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า ($s_{w/C}$) ขณะที่เสตดูญเสียจากการไหลแบบเชงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล ($ds_{/D}$) มีค่าในช่วง 13.14-40.37 เปอร์เซ็นต์ของเสตดูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก ($s_{w/D}$) โดยเสตดูญเสียจากการไหลแบบเชงเส้นในชั้นน้ำออก

จากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.02 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบเชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

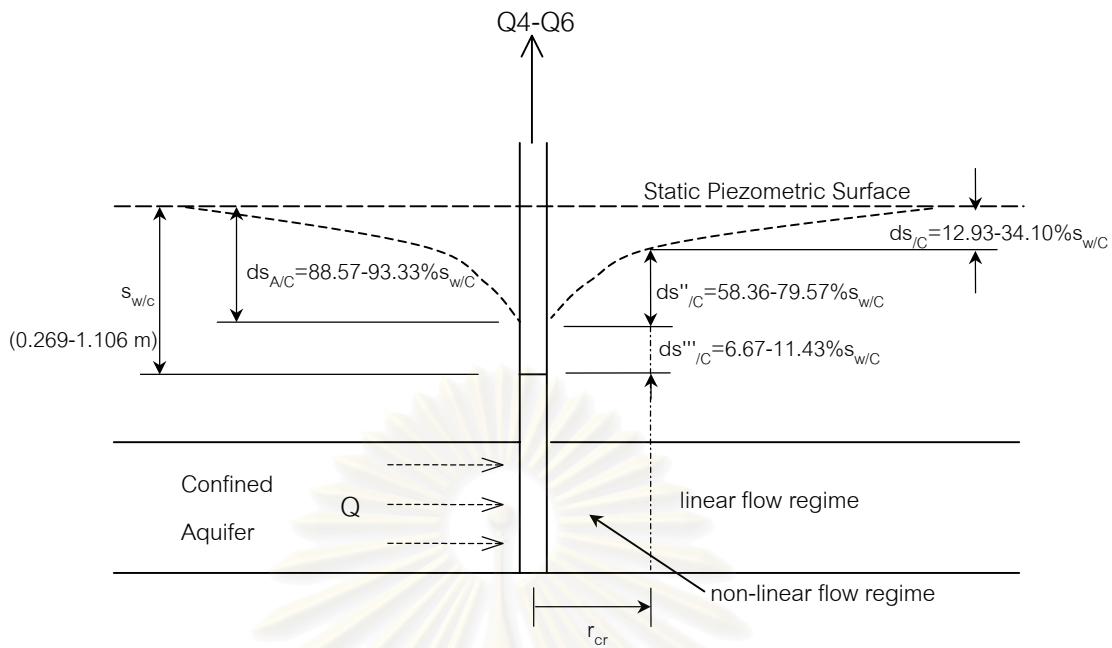
- เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (ds''_{IC}) มีค่าในช่วง 58.36-79.57 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลเข้า ($s_{w/C}$) ขณะที่เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (ds''_{ID}) มีค่าในช่วง 54.07-81.27 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลออก ($s_{w/D}$) โดยเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.06 เท่าของการไหลเข้า และเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายที่มีขนาดเล็ก

สรุปแล้วเสดสูญเสียดังกล่าวในทุกส่วนจากการไหลในทรายชั้นน้ำขนาดใหญ่จะต่ำกว่าทรายชั้นน้ำขนาดเล็ก เนื่องจากทรายขนาดใหญ่ยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าทรายขนาดเล็กเนื่องจากมีช่องว่างขนาดใหญ่กว่า

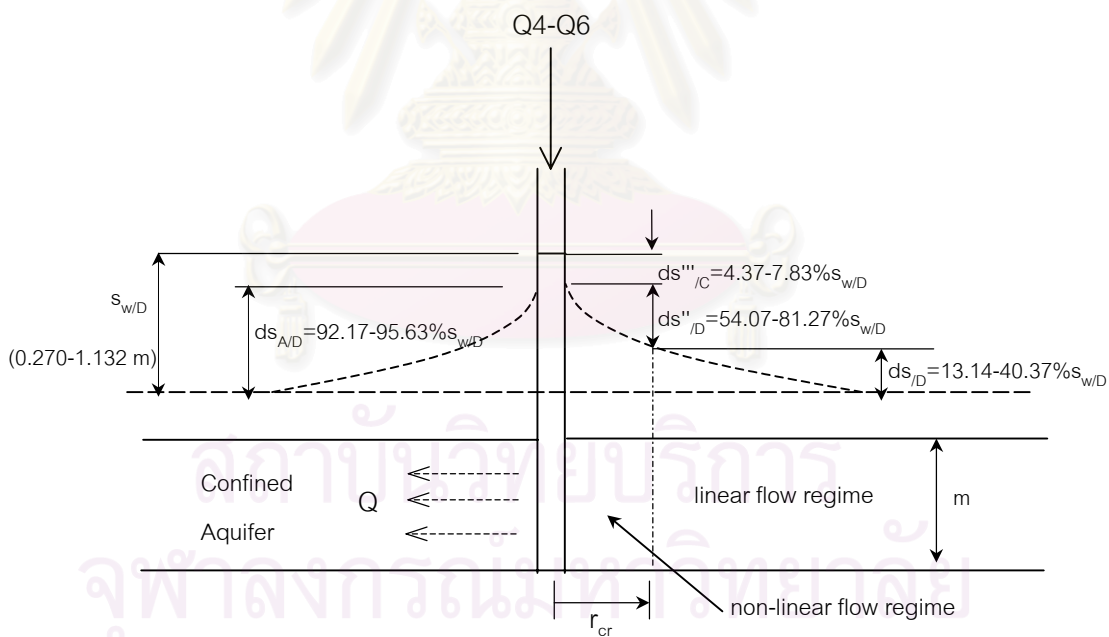
แต่เมื่อพิจารณาเสดสูญเสียดังกล่าวในแต่ละส่วนอย่างละเอียดพบว่า การไหลเข้าจะมีความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลมากกว่าการไหลออก เนื่องจากความสูญเสียบ่อน้ำบาดาลเป็นเสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลผ่านตะแกรงและการไหลในท่อกรอง ซึ่งการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลเสมือนกับการไหลจากด้านกว้างไปด้านแคบอย่างทันทีทันใด และยังคงไหลสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลก จึงมีแรงต้านมากกว่าการไหลออกที่น้ำไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลจากด้านแคบไปด้านกว้างจึงไหลได้สะดวกกว่า

ขณะที่เสดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำจากการไหลเข้ามีค่าต่ำกว่าการไหลออก เพราะการไหลในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลเส้นแนวการไหลจะถูกบีบให้ค่อยๆ แคบลง แต่การไหลออกเส้นแนวการไหลมีลักษณะเหมือนการไหลพุ่งออกมาทำให้เกิดความปั่นป่วน จึงมีเสดสูญเสียดังกล่าวมากกว่า

เมื่อพิจารณาเสดสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดจากการไหลเข้าและออกพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก เป็นเพราะข้อจำกัดของเครื่องมือทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลหรือเข้าสู่สภาวะคงตัว เสดสูญเสียดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากการไหลจึงใกล้เคียงกัน



(ก) การไหลเข้า (converging flow)



(ข) การไหลออก (diverging flow)

รูปที่ 5-3 เสดสูญเสียดจากการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี

ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ว่า รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลมีความแตกต่างกัน เนื่องจากเสดสูญเสียน้ำในแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ซึ่งขัดแย้งกับการศึกษาของ Thiem ที่กล่าวว่า เมื่อไม่พิจารณาความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลหรือพิจารณาเฉพาะการไหลในชั้นน้ำ รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการสูบน้ำ (ไหลเข้า) และจากการเติมน้ำ (ไหลออก) ผ่านบ่อน้ำบาดาลจะมีลักษณะเหมือนกัน คือเป็นเส้นเอียงของกันและกัน

เพื่อยืนยันว่ารูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลมีความแตกต่างกัน จึงทำการเปรียบเทียบว่ารูปร่างของเส้นระดับความดันในชั้นน้ำจากการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล เมื่อไม่พิจารณาความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล โดยเปรียบเทียบจากระดับความดันสะสม (accumulated head) กับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาลหรือท่อกรองหรือตะแกรง เนื่องจากระดับความดันที่เกิดขึ้นในการทดลองกรณีไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงกำหนดจุดที่ปลายสุด (ตำแหน่ง 199 เซนติเมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล) เป็นจุดที่มีระดับความดันสะสมเป็นศูนย์ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ถือว่าเป็นระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ (static piezometric head) แล้วหาระดับความดันสะสมตามระยะทางจนถึงผิวบ่อน้ำบาดาล แล้วนำระดับความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาลไปเขียนเส้นความสัมพันธ์ ทั้งกรณีการไหลเข้าและไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ถ้าเส้นความสัมพันธ์ดังกล่าวทับกัน แสดงว่ารูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลเข้าและออกเหมือนกันทุกประการ แต่ถ้าเส้นความสัมพันธ์ไม่ทับกัน แสดงว่ารูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลเข้าและออกไม่เหมือนกัน

ตัวอย่างค่าระดับความดันตามระยะทาง (จากการลากเส้นระดับความดันตามวิธีการในหัวข้อที่ 4.4) และการคำนวณหาความดันสะสมจากการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1 แสดงดังตารางที่ 5-9 และ 5-10 ตามลำดับ

เมื่อ	h_{20}	คือ	ระดับความดันในชั้นน้ำที่ผิวบ่อน้ำบาดาลจากเส้นระดับความดัน
	h_{28}, \dots, h_{199}	คือ	ระดับความดันในชั้นน้ำจากเส้นระดับความดัน
	r_{cr}	คือ	รัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล คำนวณจากสมการที่ 2-32

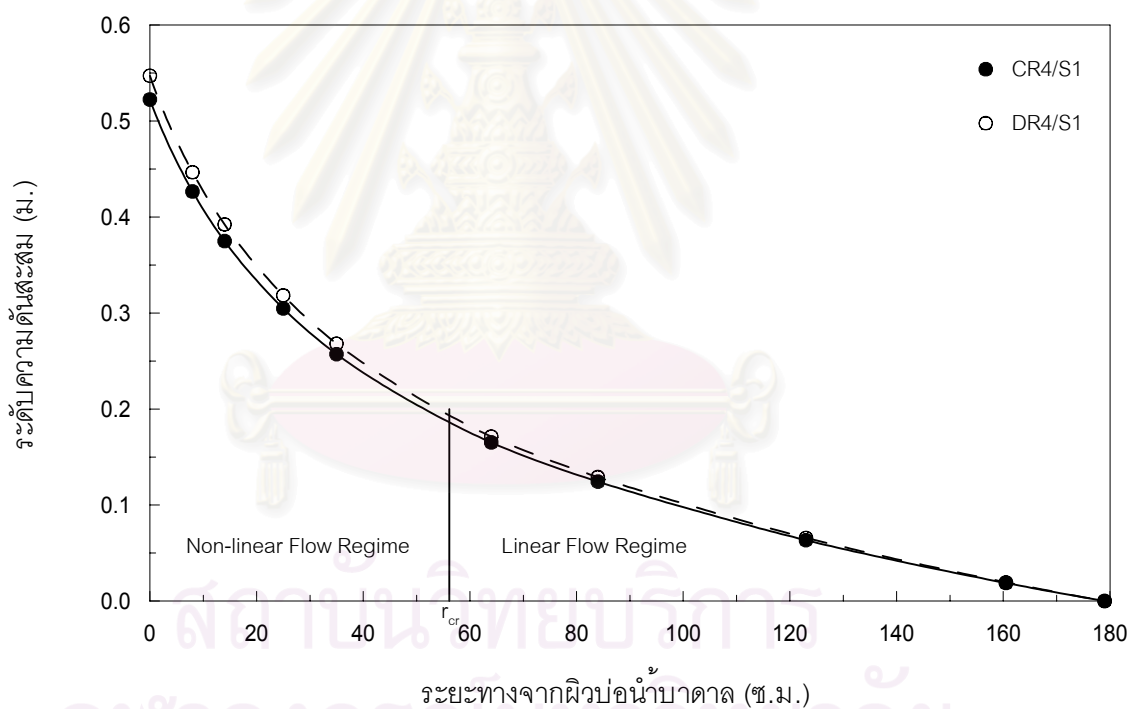
ตารางที่ 5-9 ระดับความดันตามระยะทางจากเส้นระดับความดันของการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1

การทดลอง	ระดับความดัน (ม.)											Q (ลบ.ม./วินาที)	Re' _{cr}	r _{cr} (ม.)
	h ₂₀	h ₂₈	h ₃₄	h ₄₅	h ₅₅	h ₈₄	h ₁₀₄	h ₁₄₃	h _{180.5}	h ₁₉₉				
CR4/S1	1.220	1.316	1.368	1.438	1.485	1.577	1.618	1.679	1.724	1.742		0.000436	21.7	0.763
DR4/S1	1.390	1.289	1.235	1.161	1.111	1.014	0.972	0.909	0.862	0.843		0.000436	21.8	0.760

ตารางที่ 5-10 ระดับความดันสะสมจากการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1

การทดลอง	ระดับความดันสะสม (ม.) ตามระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล (ซ.ม.)										
	0	8	14	25	35	64	84	123	160.5	179	
CR4/S1	0.522	0.427	0.375	0.305	0.257	0.165	0.124	0.063	0.019	0	
DR4/S1	0.547	0.447	0.392	0.318	0.268	0.171	0.129	0.066	0.019	0	

เมื่อนำข้อมูลความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาลในตารางที่ 5-10 ไปหาความสัมพันธ์จะได้เส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-4 จากรูปที่ 5-4 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1 ไม่เหมือนกัน เนื่องจากเส้นความสัมพันธ์ไม่ทับกัน และพบว่า เสตสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำกรณีย์ไหลเข้า ($ds_{A/C}$) จะมีค่าน้อยกว่ากรณีย์ไหลออก ($ds_{A/D}$) ซึ่งจากตารางที่ 5-10 ค่า $ds_{A/C}=0.522$ เมตร และค่า $ds_{A/D}=0.547$ เมตร (ต่างกัน 4.7เปอร์เซ็นต์) ซึ่งต้องวิเคราะห์ต่อว่าความแตกต่างนั้นเกิดขึ้นในส่วนของกรณีย์ไหลแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาจากเสตสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนกรณีย์ไหล ซึ่งเมื่อทราบรัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล (r_{cr}) ก็จะทราบว่ากรณีย์ไหลช่วงไหนเป็นการไหลแบบเชิงเส้น และการไหลช่วงไหนเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น จากรูปที่ 5-4 แสดงว่าเสตสูญเสียจากการไหลเข้าแบบเชิงเส้น (ds_{C}) มีค่าใกล้เคียงกับการไหลออกแบบเชิงเส้น (ds_{D}) ขณะที่เสตสูญเสียจากการไหลเข้าแบบไม่เชิงเส้น (ds''_{C}) มีค่าน้อยกว่าเสตสูญเสียจากการไหลออกแบบไม่เชิงเส้น (ds''_{D})



รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาลจากการทดลอง CR4/S1 และ DR4/S1

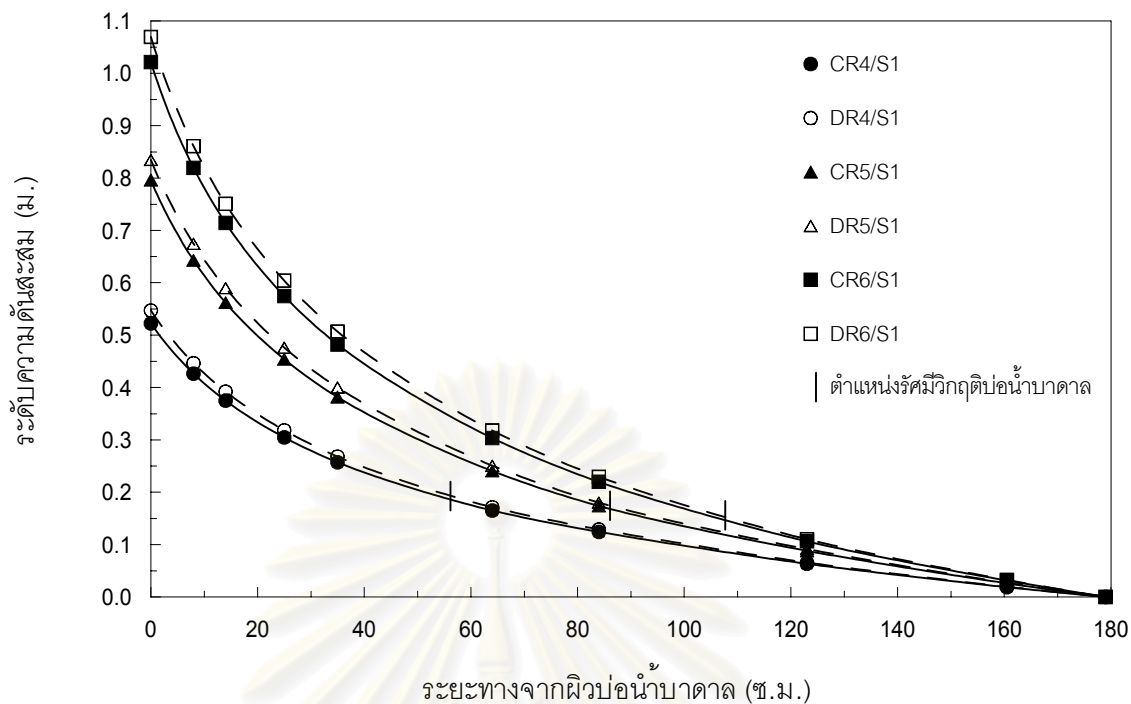
เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี เมื่อเป็นการไหลแบบผสม (CR4/S1 - CR6/S4 และ DR4/S1 - DR6/S4) ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ เมื่อคำนวณระดับความดันสะสมและทำการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับ

ความดัน จะได้เส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-5 ถึง 5-8 ซึ่งทดลองโดยใช้ทรายชั้นน้ำตัวอย่างที 1-4 ตามลำดับ

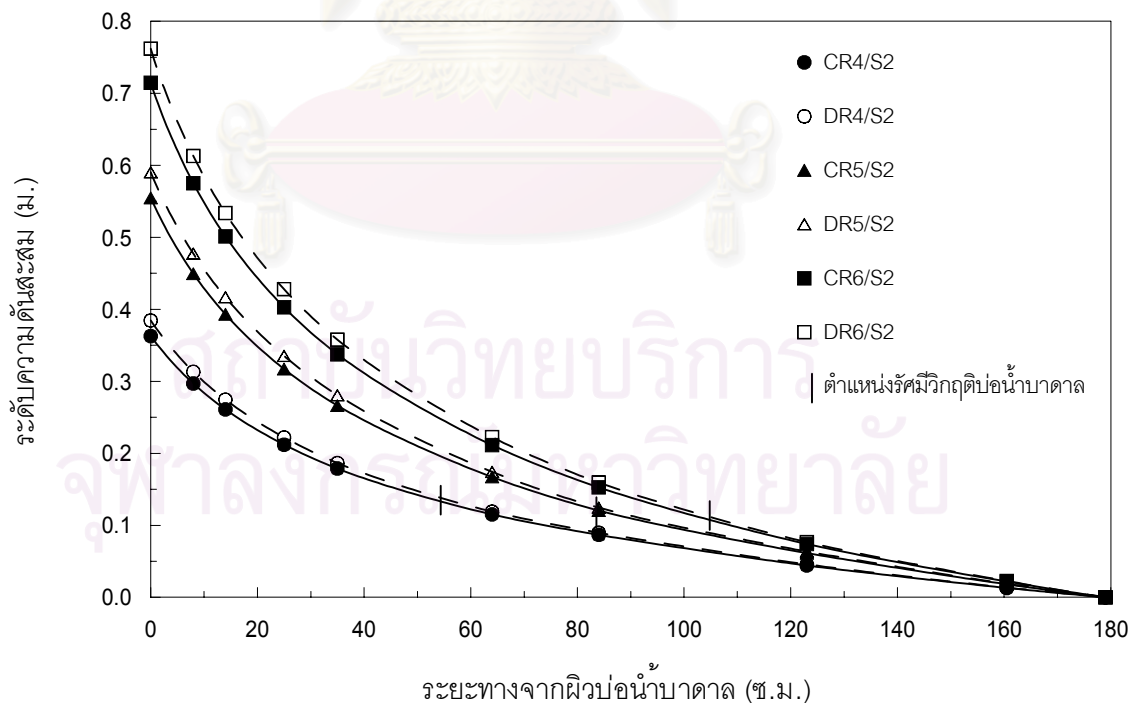
จากรูปที่ 5-5 ถึง 5-8 พบว่ารูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลในชั้นน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลไม่เหมือนกัน โดยที่เฮดสูญเสียในชั้นน้ำจากการไหลออกจะมีค่ามากกว่าการไหลเข้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่กล่าวข้างต้น และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mobasher & Todd (1963) โดยที่ทรายชั้นน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีเฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำน้อยกว่า อีกทั้งเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำกรณีไหลออก (ds_D) จะมีค่ามากกว่ากรณีไหลเข้า (ds_C) เล็กน้อย ขณะที่เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำกรณีไหลออก (ds''_D) จะมีค่ามากกว่ากรณีไหลเข้า (ds''_C) อย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่กล่าวข้างต้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อไม่พิจารณาความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล (เป็นคุณสมบัติเฉพาะของบ่อน้ำบาดาลแต่ละบ่อ) ถ้าการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลมีอัตราการไหลน้อยจนเกิดการไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลออกจะใกล้เคียงกับการไหลเข้า โดยที่เฮดสูญเสียจากการไหลออกจะมีค่ามากกว่าการไหลเข้าเล็กน้อย แต่ถ้าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

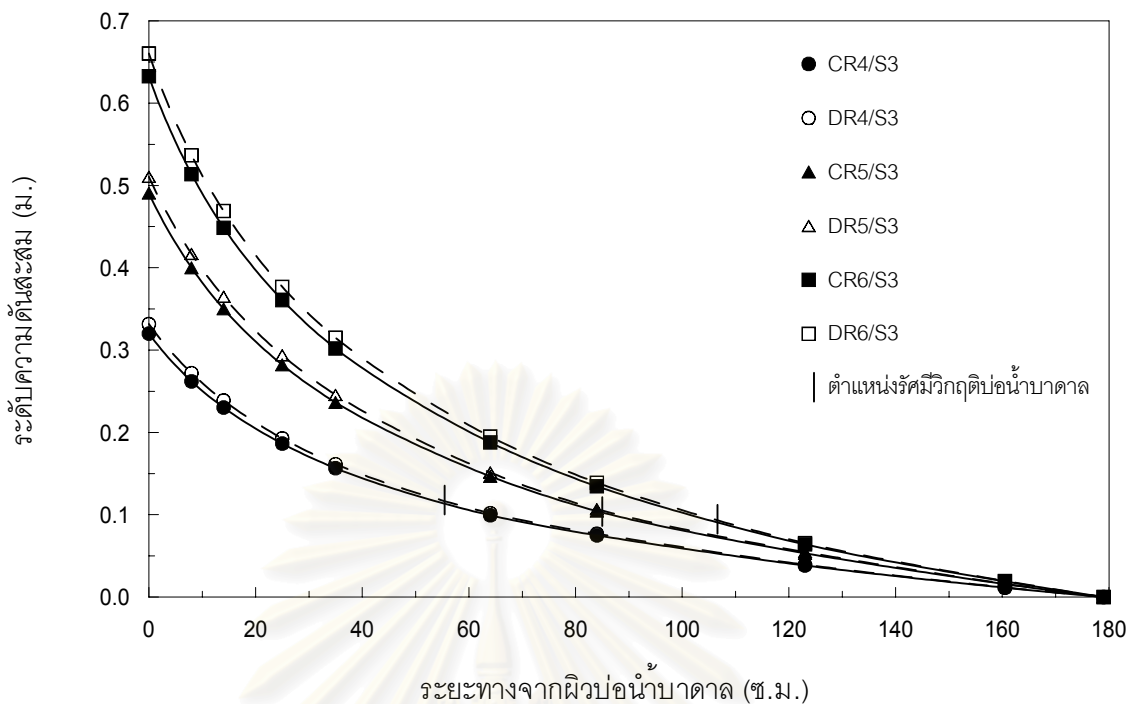
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



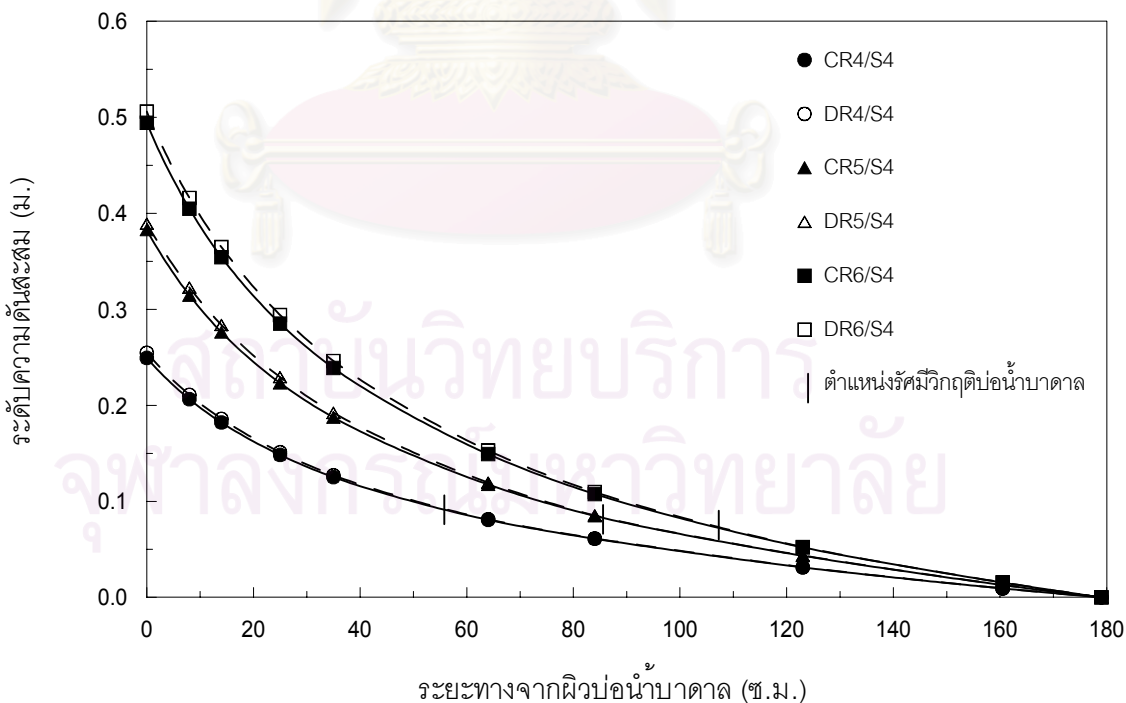
รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล จากการทดลองด้วยอัตราการไหล Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล จากการทดลองด้วยอัตราการไหล Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล จากการทดลองด้วยอัตราไหลด Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตวอย่างที่ 3



รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับระยะทางจากผิวบ่อน้ำบาดาล จากการทดลองด้วยอัตราไหลด Q4-Q6 ในทรายชั้นน้ำตวอย่างที่ 4

5.3 ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล

จากหัวข้อ 5.2 พบว่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้า ($ds''_{/C}$) มีค่าในช่วง 6.67-11.43 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสี่ยทั้งหมดจากการไหลเข้า ขณะที่ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลออก ($ds''_{/D}$) มีค่าในช่วง 4.37-7.83 เปอร์เซ็นต์ของเสดสูญเสี่ยทั้งหมดจากการไหลออก แสดงว่าความสูญเสียบ่อมีความสำคัญต่อความถูกต้องของการคำนวณระดับความดันจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

เนื่องจากความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล จะเกิดขึ้นเฉพาะการทดลองการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล แต่การวิเคราะห์จะไม่พิจารณาความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล เนื่องจากขอบเขตการทดลองที่ต่างกับการทดลองการไหลในแนวรัศมีมาก (ดูตารางที่ 3-1) ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์เฉพาะการไหลในแนวรัศมี ซึ่งเป็นกรทดลองหลัก โดยทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^1) กับอัตราการไหล (Q) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n แล้วจึงนำค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ไปวิเคราะห์ว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคทรายหรือค่าเรย์โนลด์วิกฤติของทรายหรือไม่ โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

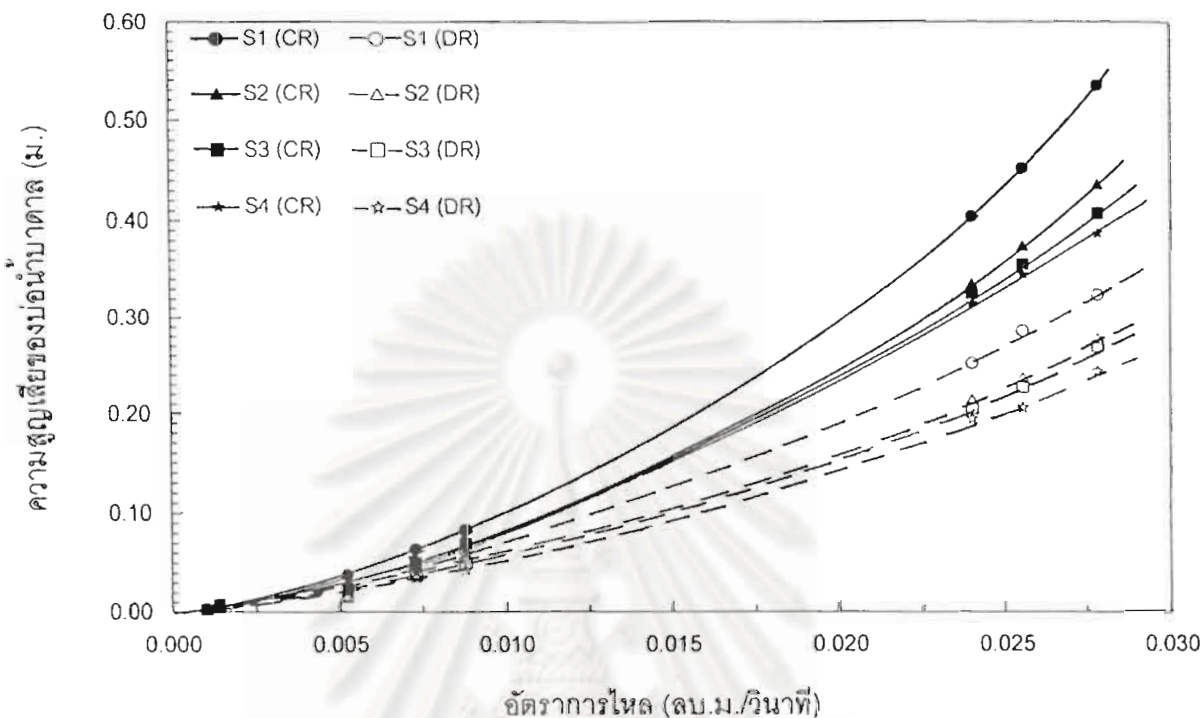
5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกับอัตราการไหล

จากตารางที่ 5-5 ถึง 5-8 เมื่อนำความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลไปหาความสัมพันธ์กับอัตราการไหลเสมือนจริง (Q_{equi}) จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5-9 พบว่าช่วงอัตราการไหลประมาณ 0.01 ถึง 0.02 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ไม่มีข้อมูล เนื่องจากในการทดลองต้องการให้เกิดการไหลในชั้นน้ำ 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบเชิงเส้น การไหลแบบไม่เชิงเส้นและการไหลแบบผสม ซึ่งการที่จะให้เกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ ต้องใช้อัตราการไหลที่สูงมาก ดังนั้นจึงเกิดลักษณะของช่องว่างข้อมูลดังกล่าว

จากรูปที่ 5-9 สรุปลักษณะสำคัญของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล ได้ดังต่อไปนี้

- 1) ในทรายชั้นน้ำขนาดเดียวกัน พบว่า ความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลเข้ามีค่ามากกว่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจากการไหลออก

2) เมื่อพิจารณาผลของขนาดทราย พบว่า ขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำมีผลต่อความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล โดยทรายขนาดเล็กจะทำให้เกิดความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่มากกว่า ทรายขนาดใหญ่



รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกับอัตราการไหล จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี

ตารางที่ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกับอัตราการไหล

การทดลอง	ตัวอย่างที่	Re_{cr}	Well loss (m) vs Q (m^3/s)	c	n	Q_{max} (m^3/s)	$(Q_{max})^c$	$n(avg)$
การไหลเข้า	Sand 1	21.7	$160.67 Q^{1.60}$	160.67	1.60	0.02778	0.003	1.60
	Sand 2	25.1	$139.19 Q^{1.61}$	139.19	1.61	0.02778	0.003	
	Sand 3	28.4	$121.68 Q^{1.59}$	121.68	1.59	0.02778	0.003	
	Sand 4	33.6	$111.87 Q^{1.58}$	111.87	1.58	0.02778	0.003	
การไหลออก	Sand 1	21.8	$79.73 Q^{1.54}$	79.73	1.54	0.02778	0.004	1.53
	Sand 2	25.3	$70.68 Q^{1.55}$	70.68	1.55	0.02778	0.004	
	Sand 3	28.6	$61.83 Q^{1.53}$	61.83	1.53	0.02778	0.004	
	Sand 4	33.7	$52.03 Q^{1.51}$	52.03	1.51	0.02778	0.004	

5.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล

เมื่อสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลกับอัตราการไหลจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ดังแสดงในตารางที่ 5-11 และเมื่อพิจารณาในแต่ละรูปแบบการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์ C จะมีความสำคัญต่อความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลมากกว่าค่ายกกำลัง n เนื่องจากค่ายกกำลัง n ในแต่ละการทดลองและแต่ละขนาดทรายจะมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ C จะมีค่าแตกต่างกัน เช่น การทดลองการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี ค่า C จะอยู่ในช่วง 111.87-160.67 ขณะที่ค่า n จะอยู่ในช่วง 1.58-1.61 และเมื่อคำนวณเทอม Q^n ด้วยอัตราการไหลเสมือนจริงสูงสุดในการทดลอง (0.02778 ลูกบาศก์เมตร/วินาที) พบว่าค่า $(Q_{max})^n$ เมื่อใช้ $n=1.60$ 1.61 1.59 และ 1.58 มีค่าเท่ากันคือ 0.003 ดังนั้นจึงใช้ค่า n เฉลี่ยเป็นตัวแทน ดังแสดงในตารางที่ 5-12 นั่นคือ $n_{CR}=1.60$ $n_{DR}=1.53$ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่ายกกำลัง n ไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำ แต่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ C มาหาความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์วิกฤติตามประเภทการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5-10 สรุปความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ C กับค่าเรย์โนลด์วิกฤติได้ดังนี้

- 1) การทดลองการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี (CR)

$$C_{/CR} = 2115.5 Re_{cr}^{-0.843} \quad (5-5)$$

- 2) การทดลองการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี (DR)

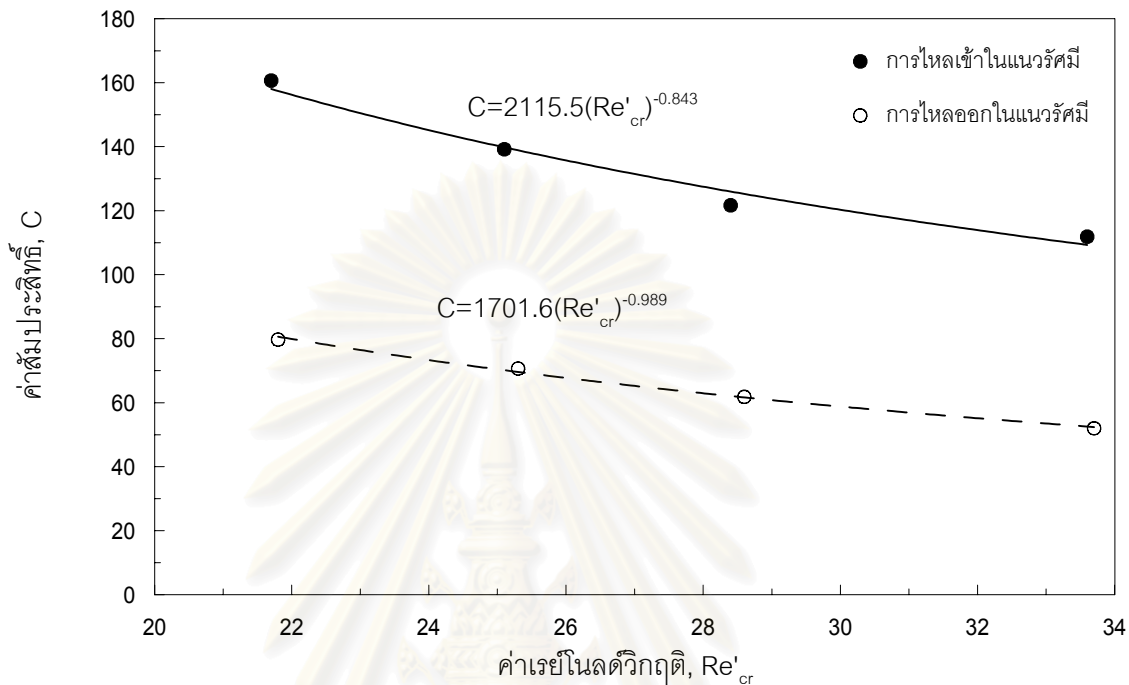
$$C_{/DR} = 1701.6 Re_{cr}^{-0.989} \quad (5-6)$$

สมการที่ 5-5 และ 5-6 จะนำไปใช้ได้ เมื่อค่าเรย์โนลด์วิกฤติมีค่าอยู่ในช่วง 21.2-33.8 และใช้ได้กับบ่อน้ำบาดาลที่มีสภาพเป็นตะแกรง (เบอร์ 50) เหมือนกับที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น และสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ C ของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลจะขึ้นกับขนาดอนุภาคทรายชั้นน้ำและรูปแบบการไหลตามสมการที่ 5-5 และ 5-6 แต่ค่ายกกำลัง n ไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค แต่จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ดังแสดงในตารางที่ 5-11

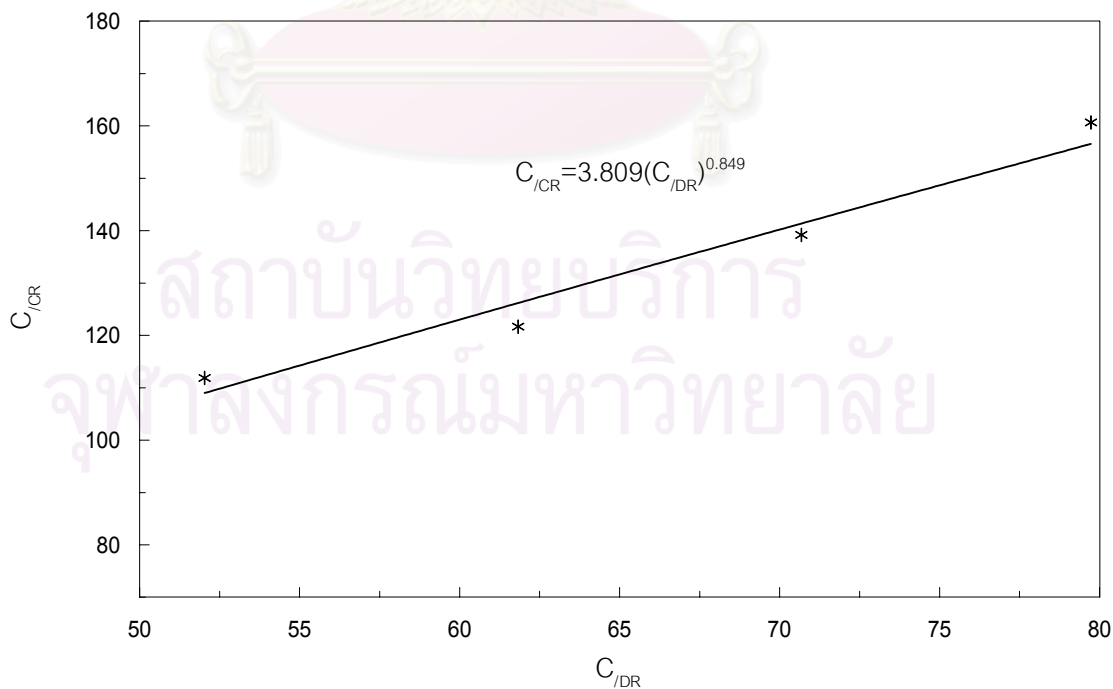
และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไหลเข้าและออก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{/CR}$ กับ $C_{/DR}$ ดังแสดงในรูปที่ 5-11 นั่นคือ

$$C_{/CR} = 3.809 C_{/DR}^{0.849} \quad (5-7)$$

จากการทดลองพบว่า ค่ายกกำลัง n มีค่าน้อยกว่า 2 แสดงว่าในการทดลองยังไม่เกิดการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ เพราะตามทฤษฎี(Todd 1980) ถ้าการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ค่ายกกำลัง n จะมีค่าเท่ากับ 2



รูปที่ 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ C กับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ



รูปที่ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_{CR} กับ C_{DR}

5.4 เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้น

จากหัวข้อ 5.2 พบว่าเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (ds''_{IC}) มีค่าในช่วง 58.36-79.57 เปอร์เซ็นต์ของเฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลเข้า (s_{wC}) ขณะที่เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (ds''_{ID}) มีค่าในช่วง 54.07-81.27 เปอร์เซ็นต์ของเฮดสูญเสียทั้งหมดจากการไหลออก (s_{wD}) และจากสมการที่ 5-3 และ 5-4 เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ (ds'') คือ

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

จากสมการที่ 5-8 แสดงว่าเฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ ประกอบด้วยเฮดสูญเสียในส่วนย่อย 3 ประเภท ได้แก่ เฮดสูญเสียในส่วนที่ยังคงเป็นการไหลแบบเชิงเส้น $\left[\left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln \frac{r_{cr}}{r_w}\right]$ เฮดสูญเสียจากการไหลส่วนที่เป็น การไหลแบบไม่เชิงเส้นอย่างแท้จริง $\left[\left(\frac{b_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{cr}}\right)\right]$ และเฮดสูญเสียจากการไหลนำพา $\left[c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}} - \frac{1}{r_w}\right)\right]$

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายเฮดสูญเสียที่เกิดขึ้น ได้แก่ พารามิเตอร์ดาร์ซี (a_2') พารามิเตอร์นอนดาร์ซี (b_2') และสัมประสิทธิ์การไหลนำพา (c_2') โดยในการวิเคราะห์จะแบ่งการวิเคราะห์ตามทิศทางการไหล ได้แก่ การไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล (converging flow) การไหลออกจากบ่อ (diverging flow) และการเปรียบเทียบระหว่างการไหลเข้าและออก โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.4.1 การไหลแบบไม่เชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

จากตารางที่ 5-3 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง $a_2'_{/CR}$ $b_2'_{/CR}$ และ $c_2'_{/CR}$ กับ Re'_{cr} ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-12 ถึง 5-14 ตามลำดับ

$$a_2'_{/CR} = 3413.8 Re'_{cr}{}^{-1.722} \quad (5-9)$$

$$b_2'_{/CR} = 1858.2 Re'_{cr}{}^{-0.6267} \quad (5-10)$$

$$c_2'_{/CR} = 0.415 Re'_{cr}{}^{1.825} \quad (5-11)$$

ขณะที่ $a_{2'/CR}$ กับ $b_{2'/CR}$ และ a_1 กับ b_1 ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$a_{2'/CR} = 0.698a_1^{0.893} \quad ; R^2=0.9855 \quad (5-12)$$

$$b_{2'/CR} = 2.885b_1^{0.797} \quad ; R^2=0.9360 \quad (5-13)$$

และจากตารางที่ 5-3 โดยเฉลี่ย $a_{2'/CR} \approx 0.50a_1'/ST$ และ $b_{2'/CR} \approx 0.94b_1'/ST$ แสดงว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน และการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลมีความแตกต่างกันมาก ขณะที่พารามิเตอร์นอนดาร์ซีค่อนข้างใกล้เคียงกัน

5.4.2 การไหลแบบไม่เชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล

ทำนองเดียวกับหัวข้อ 5.4.1 สามารถหาความสัมพันธ์ของ $a_{2'/DR}$ $b_{2'/DR}$ และ $c_{2'/DR}$ กับ Re'_{cr} ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-12 ถึง 5-14 โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$a_{2'/DR} = 4185.2 Re'_{cr}^{-1.764} \quad (5-14)$$

$$b_{2'/DR} = 2194.4 Re'_{cr}^{-0.658} \quad (5-15)$$

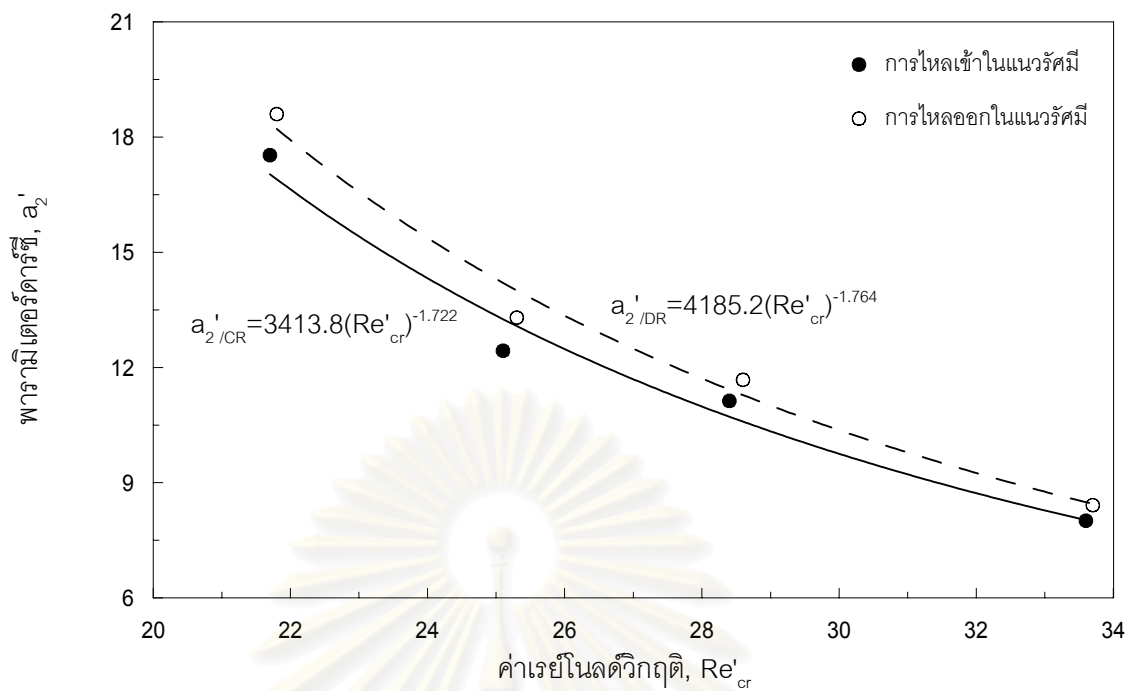
$$c_{2'/DR} = 0.511 Re'_{cr}^{1.802} \quad (5-16)$$

ขณะที่ $a_{2'/DR}$ และ $b_{2'/DR}$ กับ a_1 และ b_1 ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน มีความสัมพันธ์กันดังนี้

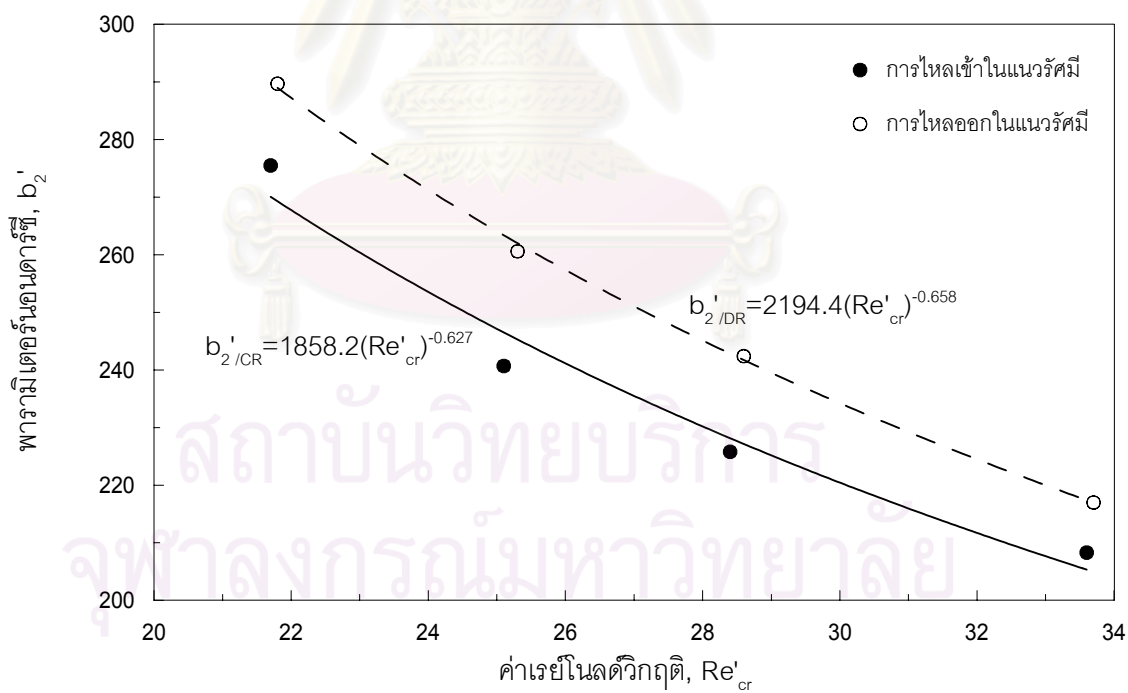
$$a_{2'/DR} = 0.704a_1^{0.907} \quad ; R^2=0.9858 \quad (5-17)$$

$$b_{2'/DR} = 2.395b_1^{0.842} \quad ; R^2=0.9849 \quad (5-18)$$

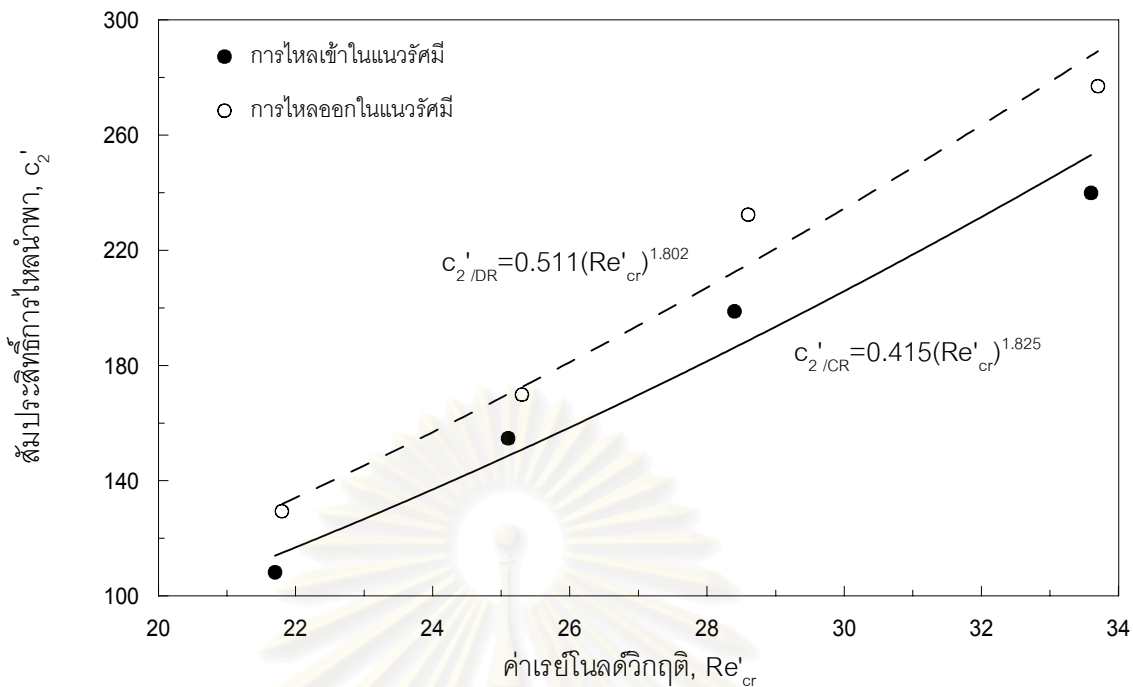
และจากตารางที่ 5-3 โดยเฉลี่ย $a_{2'/DR} \approx 0.53a_1'/ST$ และ $b_{2'/CR} \approx 1.00b_1'/ST$ แสดงว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน และการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลมีความแตกต่างกันมาก ขณะที่พารามิเตอร์นอนดาร์ซีค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ดาร์ซีกับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ



รูปที่ 5-13 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์นอนดาร์ซีกับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ



รูปที่ 5-14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การไหลนำพากับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ

5.4.3 การเปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบไม่เชิงเส้นเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

จากตารางที่ 5-3 เมื่อเปรียบเทียบค่า a'_2 , b'_2 และ c'_2 ของการไหลในแนวรัศมี กรณีการไหลเข้า ($a'_{2/CR}$, $b'_{2/CR}$, $c'_{2/CR}$) และกรณีการไหลออก ($a'_{2/DR}$, $b'_{2/DR}$, $c'_{2/DR}$) พบว่าค่า $a'_{2/CR}$ มีค่าน้อยกว่า $a'_{2/DR}$ (โดยเฉลี่ย $a'_{2/CR} \approx 0.95a'_{2/DR}$) $b'_{2/CR}$ มีค่าน้อยกว่า $b'_{2/DR}$ (โดยเฉลี่ย $b'_{2/CR} \approx 0.94b'_{2/DR}$) และ $c'_{2/CR}$ มีค่าน้อยกว่า $c'_{2/DR}$ (โดยเฉลี่ย $c'_{2/CR} \approx 0.87c'_{2/DR}$) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $a'_{2/CR}$ กับ $a'_{2/DR}$, $b'_{2/CR}$ กับ $b'_{2/DR}$ และ $c'_{2/CR}$ กับ $c'_{2/DR}$ แสดงดังต่อไปนี้

$$a'_{2/CR} = 0.985a'_{2/DR}{}^{0.984} \quad ; R^2=0.9995 \quad (5-19)$$

$$b'_{2/CR} = 1.168b'_{2/DR}{}^{0.961} \quad ; R^2=0.9788 \quad (5-20)$$

$$c'_{2/CR} = 0.798c'_{2/DR}{}^{1.016} \quad ; R^2=0.9893 \quad (5-21)$$

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5-12 ถึง 5-14 พบว่า a_2' และ b_2' จะลดลงเมื่อค่าเรย์โนลด์ วิกฤติเพิ่มขึ้นหรือขนาดทรายใหญ่ขึ้น เนื่องจากค่าเรย์โนลด์วิกฤติเพิ่มขึ้นตามขนาดทราย (หัวข้อ ที่ 5-1) และ c_2' จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดทรายใหญ่ขึ้น แสดงว่าเฮดสูญเสียในส่วนที่ยังคงเป็นการ ไหลแบบราบเรียบและในส่วนที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นอย่างแท้จริง จะลดลงเมื่อขนาดทราย ใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาสมการที่ 5-8 เทอม $c_2' \left(\frac{1}{2g\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2}\right)$ จะมีค่าติดลบ เนื่องจา กการไหลแบบผสม $r_{cr} > r_w$ ดังนั้นเมื่อ c_2' มีค่าสูงขึ้น เฮดสูญเสียจากการไหลในชั้นน้ำจึงลดลง เมื่อ รวมทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน การไหลแบบไม่เชิงเส้นในทรายชั้นน้ำขนาดใหญ่จึงมีเฮดสูญเสีย จากการไหลต่ำกว่าทรายขนาดเล็ก

- จากตารางที่ 5-5 ถึง 5-8 เมื่อพิจารณาการไหลเข้าและออกที่อัตราการไหลเดียว กัน พบว่า เฮดสูญเสียจากการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำ กรณีการไหลออกมีค่าสูงกว่าการไหล เข้า โดยที่ค่า a_2' , b_2' และ c_2' ของการไหลออกมากกว่าการไหลเข้า นั่นคือเฮดสูญเสียในส่วนที่ ยังคงเป็นการไหลแบบเชิงเส้น $\left[\left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r_w}\right)\right]$ และส่วนที่เป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นอย่างแท้ จริง $\left[\left(\frac{b_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w^2} - \frac{1}{r_{cr}^2}\right)\right]$ ของการไหลออกมากกว่าการไหลเข้า ขณะที่เมื่อพิจารณาเทอมเฮดสูญเสียจากการไหลนำพา $c_2' \left(\frac{1}{2g\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_w^2}\right)$ ซึ่งมีค่าติดลบ และเนื่องจาก c_2' ของการไหลออก มากกว่าการไหลเข้า แสดงว่า เฮดสูญเสียจากการไหลนำพากรณีไหลออกจะน้อยกว่าการไหล เข้า ทั้งนี้เป็นเพราะการชนกันของอนุภาคน้ำมีน้อยกว่านั่นเอง

- เมื่อเปรียบเทียบการไหลในแนวรัศมีกับการไหลแบบมาตรฐาน พบว่า พารามิเตอร์ นอนดาร์ซี (b') ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก แต่พารามิเตอร์ดาร์ซี (a') จากการไหลในแนวรัศมีมีค่า ต่ำกว่าการไหลแบบมาตรฐานมาก เฉลี่ยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าความแตกต่างของ พฤติกรรมการไหลแบบมาตรฐานกับการไหลในแนวรัศมี เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น เป็นผลจากการไหลนำพาและผลจากพารามิเตอร์ดาร์ซีที่ต่างกันค่อนข้างมากนั่นเอง

5.5 เสถียรภาพจากการไหลแบบเชิงเส้น

จากหัวข้อ 5.2 พบว่าเสถียรภาพจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (ds_C) มีค่าในช่วง 12.93-34.10 เปอร์เซ็นต์ของเสถียรภาพทั้งหมดจากการไหลเข้า (s_{wC}) ขณะที่เสถียรภาพจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล (ds_D) มีค่าในช่วง 13.14-40.37 เปอร์เซ็นต์ของเสถียรภาพทั้งหมดจากการไหลออก (s_{wD}) และจากสมการที่ 5-3 และ 5-4 เสถียรภาพจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ (ds) คือ

$$ds = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2}\right) \quad (5-22)$$

จากสมการที่ 5-22 แสดงว่าเสถียรภาพจากการไหลแบบเชิงเส้นในชั้นน้ำ ประกอบด้วยเสถียรภาพเสถียรภาพในสองส่วนย่อย 2 ประเภท ได้แก่ เสถียรภาพในส่วนที่เป็นการไหลแบบเชิงเส้น $\left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r_{cr}}\right)$ และเสถียรภาพจากการไหลนำพา $\left[c_2' \left(\frac{1}{2g\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r_0^2}\right)\right]$

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายเสถียรภาพที่เกิดขึ้น ได้แก่ ค่าความนำชลศาสตร์ (K_2') และค่าสัมประสิทธิ์การไหลนำพา (c_2') เนื่องจากค่า c_2' ได้ทำการวิเคราะห์ไปแล้วในหัวข้อที่ 5.4 ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์เฉพาะค่า K_2' เท่านั้น โดยในการวิเคราะห์จะแบ่งการวิเคราะห์ตามทิศทางการไหล ได้แก่ การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (converging flow) การไหลออกจากบ่อ (diverging flow) และการเปรียบเทียบระหว่างการไหลเข้าและออก โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 การไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

จากตารางที่ 5-3 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง $K_2'_{/CR}$ กับ Re'_{cr} ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-15 นั้นคือ

$$K_2'_{/CR} = 5.05 \times 10^{-4} Re'^{1.531}_{cr} \quad (5-23)$$

ขณะที่ $K_2'_{/CR}$ กับ K_1' ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ($K_1'_{/ST}$) และการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ($K_1'_{/CU}$) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_{2'/CR} = 1.011K_{1'/ST}^{0.810} \quad ; R^2=0.9777 \quad (5-24)$$

$$K_{2'/CR} = 0.825K_{1'/CU}^{0.9006} \quad ; R^2=0.9978 \quad (5-25)$$

และเมื่อพิจารณาค่าความนำคลศาสตร์จากตารางที่ 5-3 พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว $K_{2'/CR} \approx 1.85K_{1'/ST}$ และ $K_{2'/CR} \approx 1.07K_{1'/CU}$ แสดงว่าค่าความนำคลศาสตร์จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดแบบจำลองการไหลในแนวรัศมีและเพอร์เมียมิตอร์ต่างกันมาก ขณะที่ค่าความนำคลศาสตร์จากการทดลองการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียวและในแนวรัศมีมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการไหลนำพาจะไม่มีอิทธิพลในช่วงการไหลแบบเชิงเส้น

5.5.2 การไหลแบบเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาล

ทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 5.5.1 สามารถหาความสัมพันธ์ของ $K_{2'/DR}$ กับ Re'_{cr} ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-15 นั่นคือ

$$K_{2'/DR} = 3.86 \times 10^{-4} Re'_{cr}{}^{1.603} \quad (5-26)$$

ขณะที่ $K_{2'/DR}$ กับ K_1' ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ($K_{1'/ST}$) และการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ($K_{1'/DU}$) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_{2'/DR} = 1.090K_{1'/ST}^{0.841} \quad ; R^2=0.9756 \quad (5-27)$$

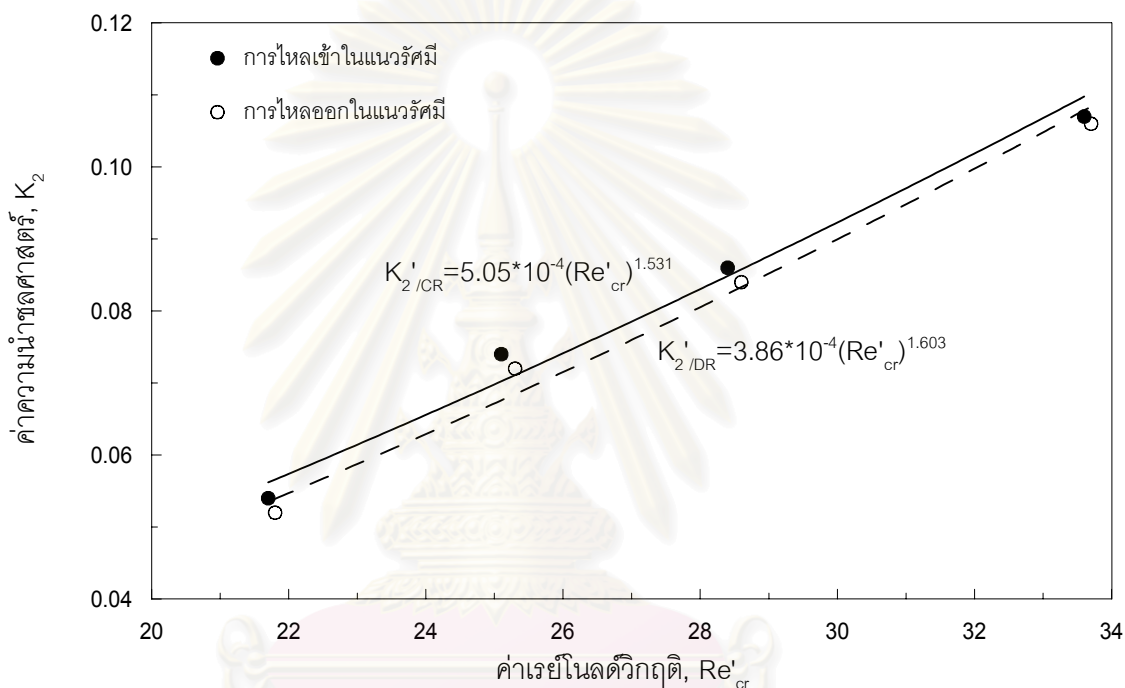
$$K_{2'/DR} = 0.9042K_{1'/DU}^{0.9377} \quad ; R^2=0.9982 \quad (5-28)$$

และเมื่อพิจารณาค่าความนำคลศาสตร์จากตารางที่ 5-3 พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว $K_{2'/DR} \approx 1.81K_{1'/ST}$ และ $K_{2'/DR} \approx 1.07K_{1'/DU}$ แสดงว่าค่าความนำคลศาสตร์จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมีอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดแบบจำลองการไหลในแนวรัศมีและเพอร์เมียมิตอร์ต่างกันมาก ขณะที่ค่าความนำคลศาสตร์จากการทดลองการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาลในทิศทางเดียวและในแนวรัศมีมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการไหลนำพาจะไม่มีอิทธิพลในช่วงการไหลแบบเชิงเส้น

5.5.3 การเปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบเชิงเส้นเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล

จากตารางที่ 5-3 เมื่อเปรียบเทียบค่า K_2' ของการไหลในแนวรัศมีกรณีการไหลเข้า ($K_{2'/CR}$) และกรณีการไหลออก ($K_{2'/DR}$) พบว่าค่า $K_{2'/CR}$ มีค่ามากกว่า $K_{2'/DR}$ (โดยเฉลี่ย $K_{2'/CR} \approx 1.02K_{2'/DR}$) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_{2'/CR}$ กับ $K_{2'/DR}$ มีดังนี้

$$K_{2'/CR} = 0.928K_{2'/DR}^{0.962} \tag{5-29}$$



รูปที่ 5-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไหลศาสตร์กับค่าเรย์โนลด์วิกฤติ

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อพิจารณาสมการที่ 5-22 แสดงว่าที่อัตราการไหลเดียวกันเฮดสูญเสียจากการไหลแบบเชิงเส้นออกจากบ่อน้ำบาดาลมีค่าสูงกว่าการไหลแบบเชิงเส้นเข้าสู่อบ่อน้ำบาดาล เนื่องจากการไหลออกมีค่า c_2' สูงกว่าและมีค่า K_2' ต่ำกว่า กว่าการไหลเข้า
- เมื่อเปรียบเทียบการไหลในแนวรัศมีกับการไหลแบบมาตรฐานพบว่า ค่าความนำไหลศาสตร์จากการไหลในแนวรัศมีมีค่าสูงกว่าการไหลแบบมาตรฐานมาก แสดงว่าความแตกต่างของพฤติกรรมของการไหลแบบมาตรฐานกับการไหลในแนวรัศมี เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบ

เชิงเส้น นอกจากจะเป็นผลของการไหลนำพาแล้วยังเกิดจากค่าความนำพลศาสตร์ที่ต่างกันค่อนข้างมากนั่นเอง

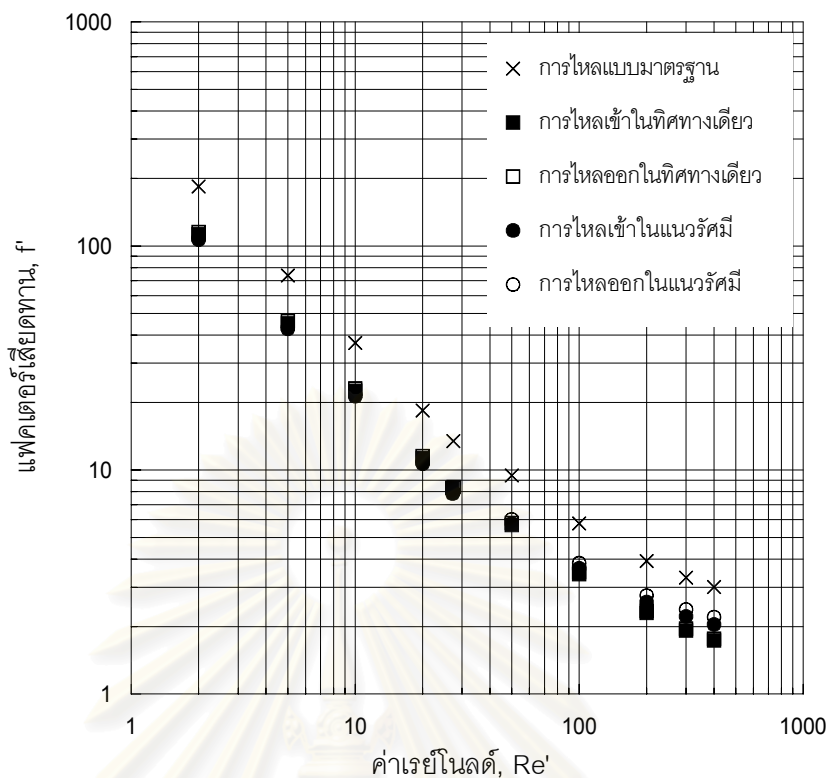
- เมื่อเปรียบเทียบการไหลในแนวนอนกับการไหลในทิศทางเดียวพบว่า ค่าความนำพลศาสตร์จากการไหลในแนวนอนมีค่าสูงกว่าการไหลในทิศทางเดียวเล็กน้อย แสดงว่าความแตกต่างของพฤติกรรมการไหลในทิศทางเดียวกับการไหลในแนวนอน เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบเชิงเส้น เป็นผลของการไหลนำพาแล้วยังเกิดจากค่าความนำพลศาสตร์ที่ต่างกันด้วย

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ของแต่ละการทดลองในบทที่ 4 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค และในแต่ละการทดลองสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ A และ B เพื่อเป็นตัวแทนของการทดลองได้ ดังสรุปในตารางที่ 5-12 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5-16

ตารางที่ 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ของแต่ละการทดลอง

ประเภทการทดลอง	ความสัมพันธ์	A	B	Re'_{cr} (avg)
การไหลแบบมาตรฐาน	$f' = \frac{368.77}{Re'} + 2.08$	368.77	2.08	27.4
การไหลเข้าในแนวนอน	$f' = \frac{213.33}{Re'} + 1.51$	213.33	1.51	27.2
การไหลออกในแนวนอน	$f' = \frac{218.31}{Re'} + 1.66$	218.31	1.66	27.4
การไหลเข้าในทิศทางเดียว	$f' = \frac{225.74}{Re'} + 1.17$	225.81	1.17	27.1
การไหลออกในทิศทางเดียว	$f' = \frac{230.81}{Re'} + 1.19$	230.81	1.19	27.5



รูปที่ 5-16 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ จากการทดลองประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 5-16 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ในกรณีต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ของการไหลเข้าและไหลออกจากการทดลองการไหลในแนวรัศมีพบว่า ค่าแฟคเตอร์เสียดทานจากการไหลออกมีค่าสูงกว่าการไหลเข้าที่ค่าเรย์โนลด์เดียวกัน นั่นคือ เสถียรสูญเสียจากการไหลในชั้นนี้การไหลออกจะมากกว่าการไหลเข้า โดยเมื่อการไหลแบบเชิงเส้นมีความแตกต่างของแฟคเตอร์เสียดทานประมาณ 2.31 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การไหลแบบไม่เชิงเส้นความแตกต่างจะสูงขึ้นเป็น 9.46 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การทดลองการไหลในทิศทางเดียวพบว่า ค่าแฟคเตอร์เสียดทานจากการไหลออกมีค่าสูงกว่าการไหลเข้าที่ค่าเรย์โนลด์เดียวกันเพียงเล็กน้อย โดยความแตกต่างอยู่ในช่วง 1.69-2.22 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า พฤติกรรมการไหลเข้าและออกจากรอบน้ำบาดาลในทิศทางเดียวแทบจะไม่แตกต่างกัน

2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียวพบว่า ในช่วงการไหลแบบเชิงเส้นค่าแฟคเตอร์เสียดทานมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้นค่าแฟคเตอร์เสียดทานจากการไหลในทิศทางเดียวจะต่ำกว่าการไหลในแนวรัศมี เนื่องจากอิทธิพลของการ

ไหลนำพา ดังแสดงในรูปที่ 5-16 แสดงว่าการไหลนำพาแทบจะไม่มีอิทธิพลในช่วงการไหลแบบเชิงเส้น แต่ในช่วงการไหลแบบไม่เชิงเส้นจะเห็นอิทธิพลของการไหลนำพาได้ค่อนข้างชัดเจน

3) การทดลองการไหลแบบมาตรฐานจะให้ค่าแฟคเตอร์เสียดทานสูงกว่าการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลที่ค่าเรย์โนลด์เดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะ ลักษณะและขนาดของเครื่องมือทดลองต่างกันและการไหลแบบมาตรฐานเป็นการไหลในแนวตั้งแต่การไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลเป็นการไหลในแนวราบ

5.7 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

ในการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งานในการคำนวณเส้นระดับความดัน (piezometric surface) เมื่อมีการไหลของน้ำเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล จะต้องแน่ใจก่อนว่าผลการศึกษาที่มีความน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยทำการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันใน 4 ลักษณะ ได้แก่

1) การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการคำนวณโดยสมการของ Thiem ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไป เพื่อพิจารณาว่าการคำนวณแบบใดจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

2) การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง และที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว เพื่อพิสูจน์ว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานหลังจากการปรับแก้ตามสมการที่เสนอในการศึกษา สามารถนำไปคำนวณระดับความดันได้หรือไม่

3) การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง และที่ได้จากการคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ เพื่อพิจารณาว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี ตามสมการที่ได้จากการศึกษา สามารถนำไปใช้คำนวณระดับความดันได้หรือไม่

4) การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียว เพื่อพิจารณาอิทธิพลของการไหลนำพา

เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในสภาพเป็นจริงเป็นการไหลในแนวรัศมี ดังนั้นจึงนำข้อมูลระดับความดันตามระยะทางในชั้นน้ำ จากการทดลองการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลองและการคำนวณ มีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

5.7.1 การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง การคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการคำนวณโดยสมการของ Thiem

การคำนวณระดับความดันตามระยะทางจากการไหลเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาล สิ่งที่ต้องรู้คือ ระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ (static piezometric surface) ซึ่งในการทดลองพิจารณาว่าค่าระดับความดันที่จุดติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับความดันตัวสุดท้ายในชั้นน้ำ (ที่ระดับ 199 เซนติเมตรจากศูนย์กลางบ่อน้ำบาดาล) เป็นระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ (h_0) ดังนั้นการคำนวณจึงตั้งต้นจากระดับความดันที่ตำแหน่งดังกล่าว

ในหัวข้อนี้แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน โดยพิจารณาเฉพาะเขตสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในชั้นน้ำ โดยไม่พิจารณาความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล เนื่องจากสมการของ Thiem ไม่พิจารณาความสูญเสียบ่อน้ำบาดาล มีรายละเอียดดังนี้

1) การคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี ประการแรกจะต้องทราบว่าเกิดการไหลแบบไม่เชิงเส้นในชั้นน้ำหรือไม่ โดยดูจากรัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล (r_{cr}) และรัศมีบ่อน้ำบาดาล (r_w) ซึ่งถ้าค่า $r_{cr} \leq r_w$ จะเกิดการไหลแบบเชิงเส้นตลอดระยะทางชั้นน้ำ แต่ถ้า $r_{cr} > r_w$ จะเกิดการไหลแบบผสม ซึ่งสามารถทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้สมการที่ดัดแปลงจากสมการที่ 2-37 ถึง 2-42 ดังนี้

- กรณี $r_{cr} \leq r_w$
การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h_0 - h = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-30)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h - h_0 = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-31)$$

- กรณี $r_{cr} > r_w$

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h_b - h = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-32)$$

$r_w < r < r_{cr}$;

$$h_{cr} - h = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-33)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h - h_b = \left(\frac{1}{K_2' \phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-34)$$

$r_w < r < r_{cr}$;

$$h - h_{cr} = \left(\frac{a_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left(\frac{b_2'}{\phi}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}}\right) + c_2' \left(\frac{1}{2g\phi^2}\right) \left(\frac{Q}{2\pi m}\right)^2 \left(\frac{1}{r_{cr}^2} - \frac{1}{r^2}\right) \quad (5-35)$$

2) การคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้สมการของ Thiem โดยใช้สมการที่ดัดแปลงจากสมการที่ 2-30 และ 2-31 ดังนี้

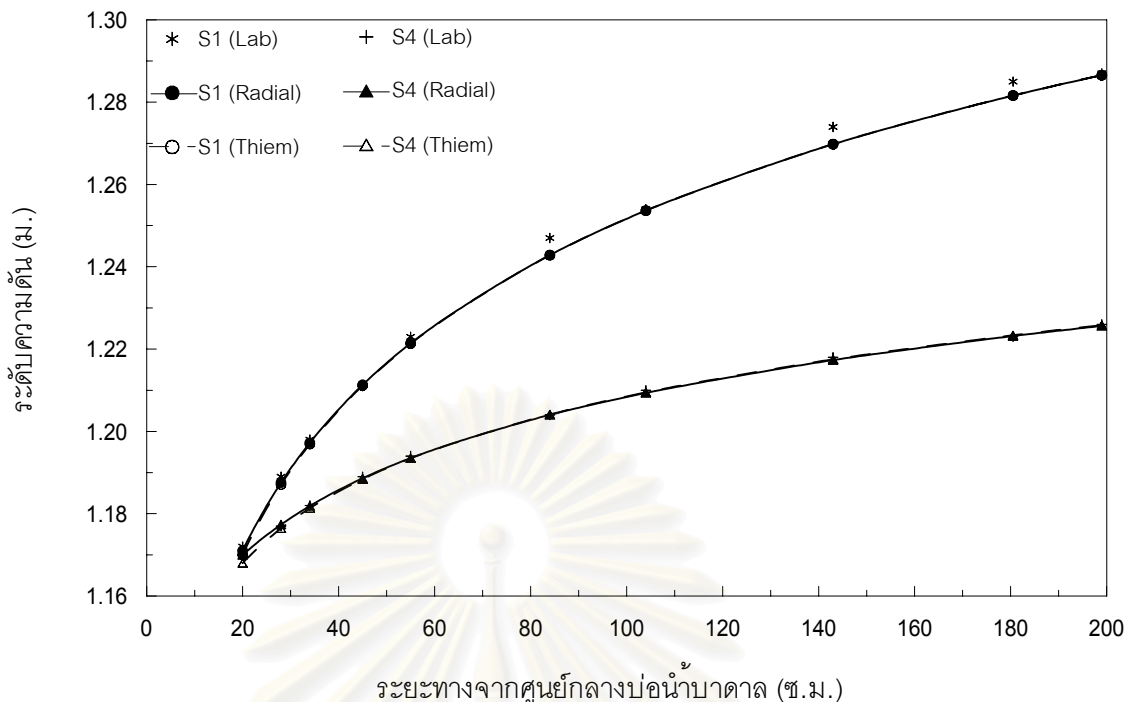
$$\text{การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล} \quad h_b - h = \left(\frac{Q}{2\pi Km}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (5-36)$$

$$\text{การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล} \quad h - h_b = \left(\frac{Q}{2\pi Km}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (5-37)$$

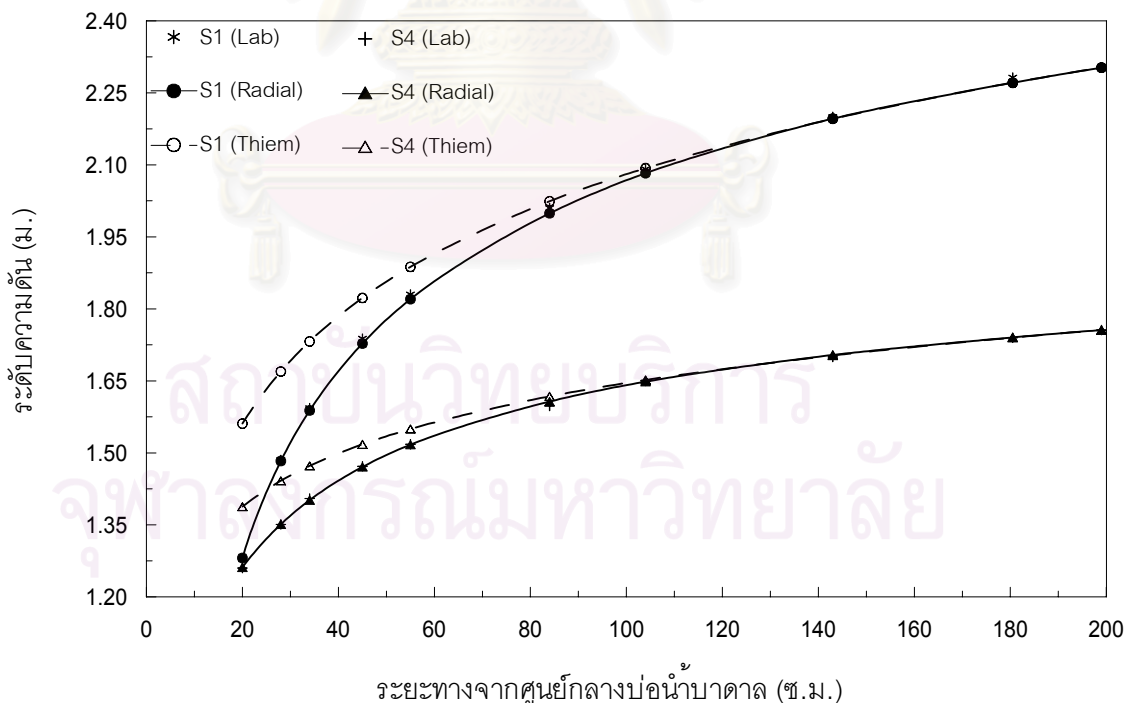
เนื่องจากค่าความนำชลศาสตร์ (K) ที่ใช้ในการของ Thiem เป็นความนำชลศาสตร์ที่ได้จากความเร็วการไหลเฉลี่ย (เมื่อไม่คิดผลของความพรุน) จึงต้องทำการปรับแก้ความนำชลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี (K_2') ก่อนนำไปใช้ เนื่องจาก $\frac{V}{\phi} = K'I$ และ $v = KI$ ดังนั้น

$$K = K' \phi \quad (5-38)$$

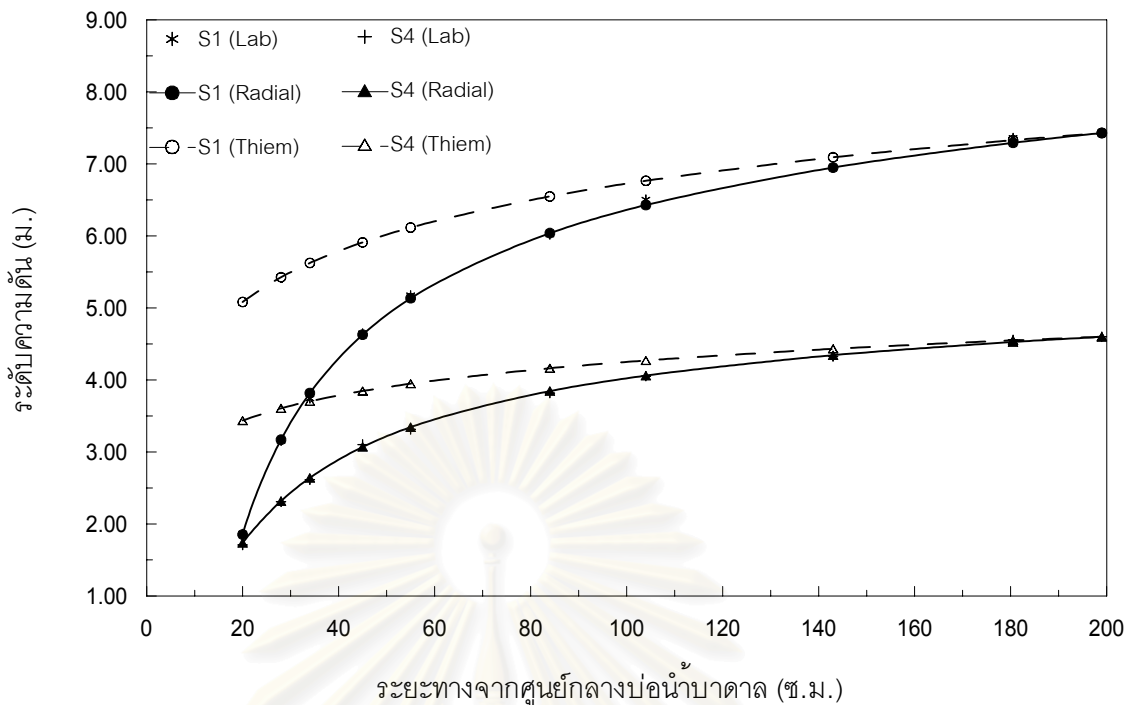
ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมีและการคำนวณโดยสมการของ Thiem ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ด้วยอัตราการไหล Q_3 , Q_6 และ Q_9 แสดงดังรูปที่ 5-17 5-18 และ 5-19 ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมีและการคำนวณโดยสมการของ Thiem ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ด้วยอัตราการไหล Q_3 , Q_6 และ Q_9 แสดงดังรูปที่ 5-20 5-21 และ 5-22 ตามลำดับ



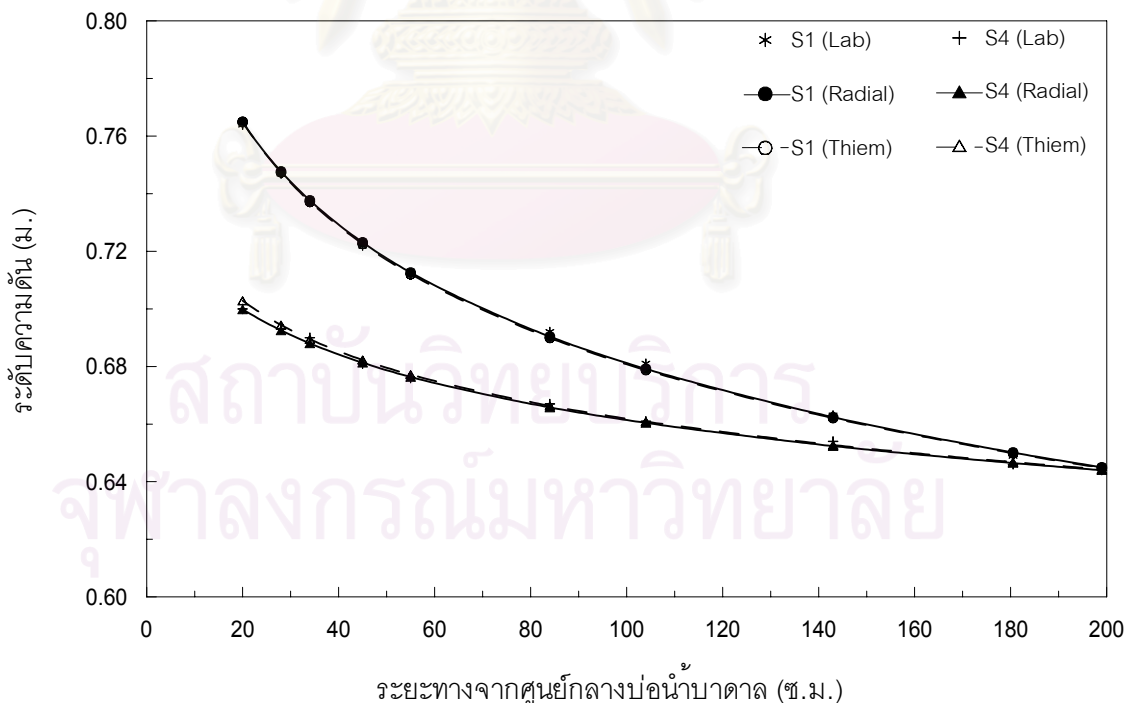
รูปที่ 5-17 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และสมการของ Thiem ด้วยอัตราการไหล Q3 (linear flow)



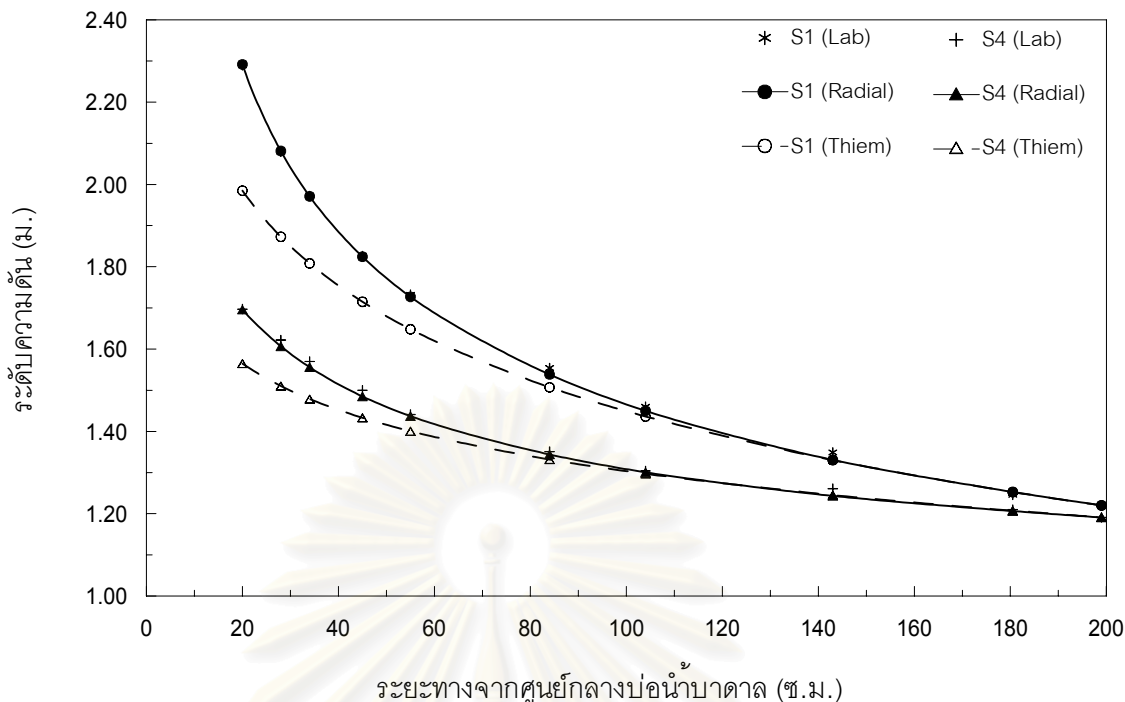
รูปที่ 5-18 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และสมการของ Thiem ด้วยอัตราการไหล Q6 (mixed flow)



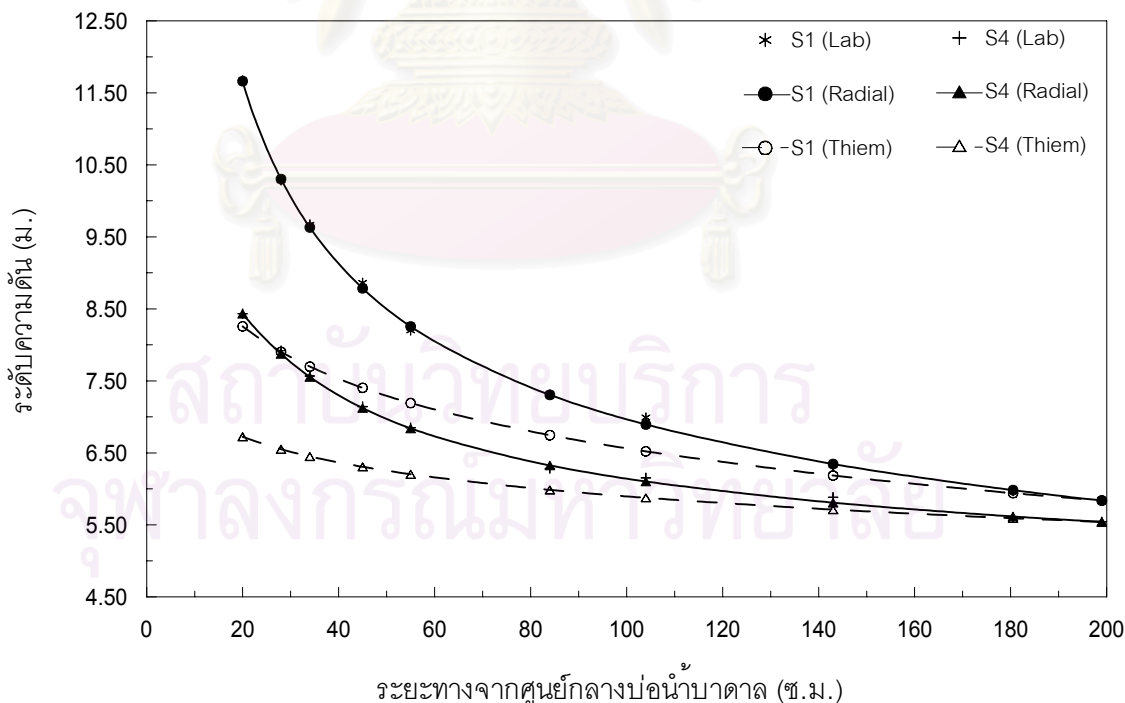
รูปที่ 5-19 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวนรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลเข้าในแนวนรัศมี และสมการของ Thiem ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)



รูปที่ 5-20 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวนรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวนรัศมี และสมการของ Thiem ด้วยอัตราการไหล Q3 (linear flow)



รูปที่ 5-21 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี และสมการของ Thiem ด้วยอัตราการไหล Q6 (mixed flow)



รูปที่ 5-22 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี และสมการของ Thiem ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)

จากการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) กรณีการไหลเข้าบ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 5-17 ถึง 5-18 พบว่า

- รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี จะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดในทุกอัตราการไหล

- รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยสมการของ Thiem จะใกล้เคียงกับผลการทดลองที่อัตราการไหล Q3 หรือการไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ แต่เมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเป็น Q6 (การไหลแบบผสม) การคำนวณด้วยสมการของ Thiem จะให้ค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาลสูงกว่าค่าจริง โดยความแตกต่างมีค่า 21.95 และ 10.16 เปอร์เซ็นต์ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ตามลำดับ และเมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเป็น Q9 (การไหลแบบไม่เชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ) การคำนวณด้วยสมการของ Thiem จะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากเกิดความแตกต่างของระดับความดันที่ผิวบ่อถึง 173.28 และ 100.94 เปอร์เซ็นต์ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ตามลำดับ

2) กรณีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 5-20 ถึง 5-22 พบว่า

- รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี จะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดในทุกอัตราการไหล

- รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยสมการของ Thiem จะใกล้เคียงกับผลการทดลองที่อัตราการไหล Q3 หรือการไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ แต่เมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเป็น Q6 (การไหลแบบผสม) การคำนวณด้วยสมการของ Thiem จะให้ค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาลต่ำกว่าค่าจริง โดยความแตกต่างมีค่า 13.32 และ 7.79 เปอร์เซ็นต์ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ตามลำดับ และเมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเป็น Q9 (การไหลแบบไม่เชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ) การคำนวณด้วยสมการของ Thiem จะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากเกิดความแตกต่างของระดับความดันที่ผิวบ่อถึง 29.24 และ 20.26 เปอร์เซ็นต์ในทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างระดับความดันจากการคำนวณและการทดลองการไหลเข้าและออกบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาดและทุกอัตราการไหล จะได้ผลที่สอดคล้องกับที่กล่าวไว้ข้างต้น สรุปว่าการคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันโดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี จะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดในทุกอัตราการไหล ขณะที่การคำนวณโดยใช้สมการของ Thiem จะใช้ได้เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบเชิงเส้นเท่านั้น

5.7.2 การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลอง และการคำนวณ โดยใช้พารามิเตอร์จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว

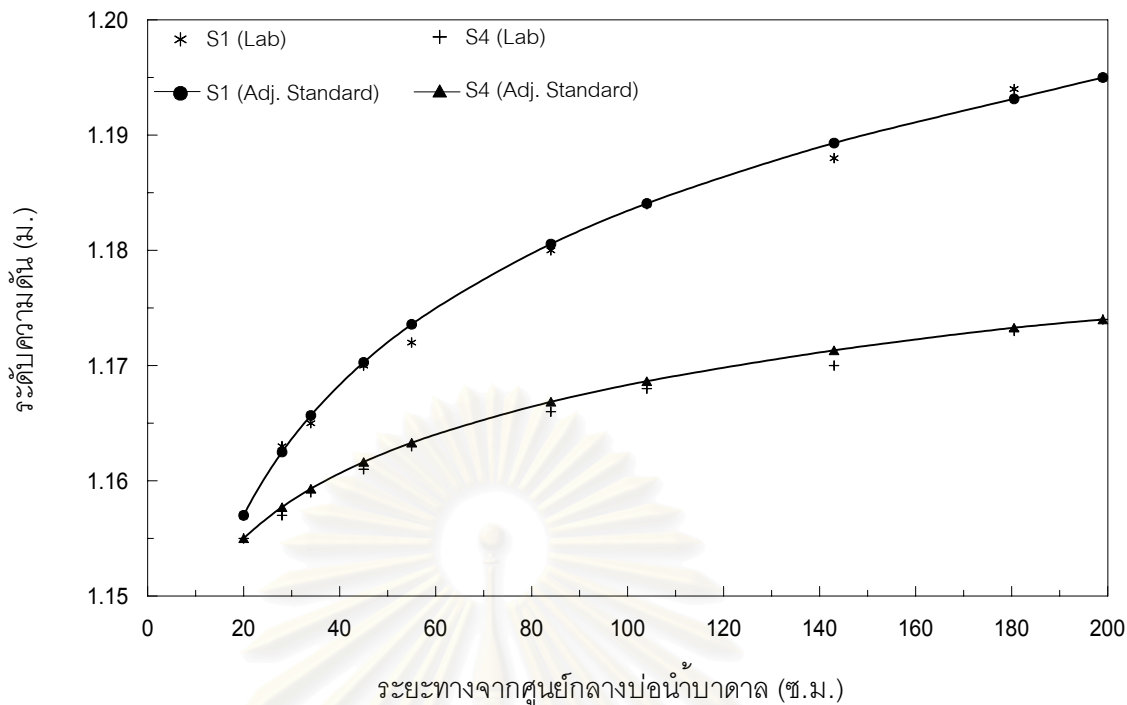
สาเหตุที่ทำการเปรียบเทียบในส่วนี้ เนื่องจากการทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐานสามารถทำได้ง่ายกว่าการทดลองการไหลในแนวรัศมี ดังนั้นถ้าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานที่ได้รับการปรับแก้ตามสมการที่เสนอในการศึกษา สามารถนำมาคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดันได้ ก็จะเป็นประโยชน์ในการทดลองกับทรายชั้นน้ำขนาดอื่นๆ ต่อไป

ในการคำนวณรูปร่างระดับความดันจะใช้สมการที่ 5-30 ถึง 5-35 โดยต้องทำการปรับแก้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานดังนี้

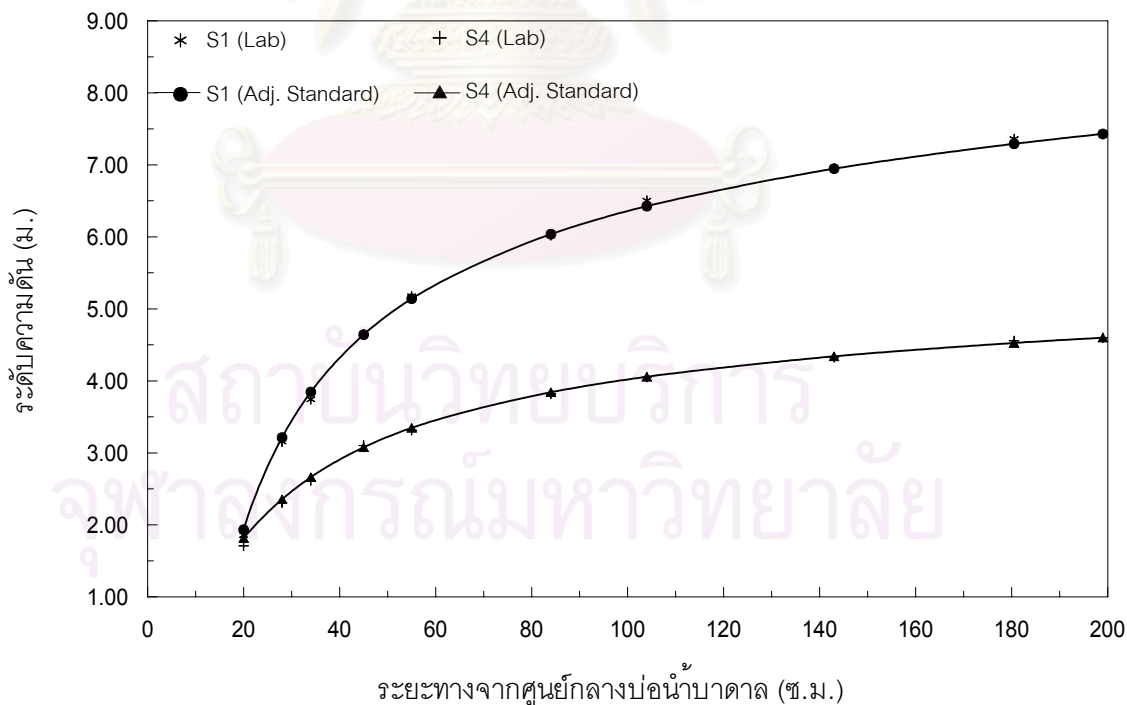
- การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ค่าความสัมประสิทธิ์การไหลนำพาด้วยสมการที่ 5-11 ปรับแก้พารามิเตอร์ดาร์ซีด้วยสมการที่ 5-12 ปรับแก้พารามิเตอร์นอนดาร์ซีด้วยสมการที่ 5-13 และปรับแก้ค่าความนำชลศาสตร์ด้วยสมการที่ 5-24

- การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล ค่าความสัมประสิทธิ์การไหลนำพาด้วยสมการที่ 5-16 ปรับแก้พารามิเตอร์ดาร์ซีด้วยสมการที่ 5-17 ปรับแก้พารามิเตอร์นอนดาร์ซีด้วยสมการที่ 5-18 และปรับแก้ค่าความนำชลศาสตร์ด้วยสมการที่ 5-27

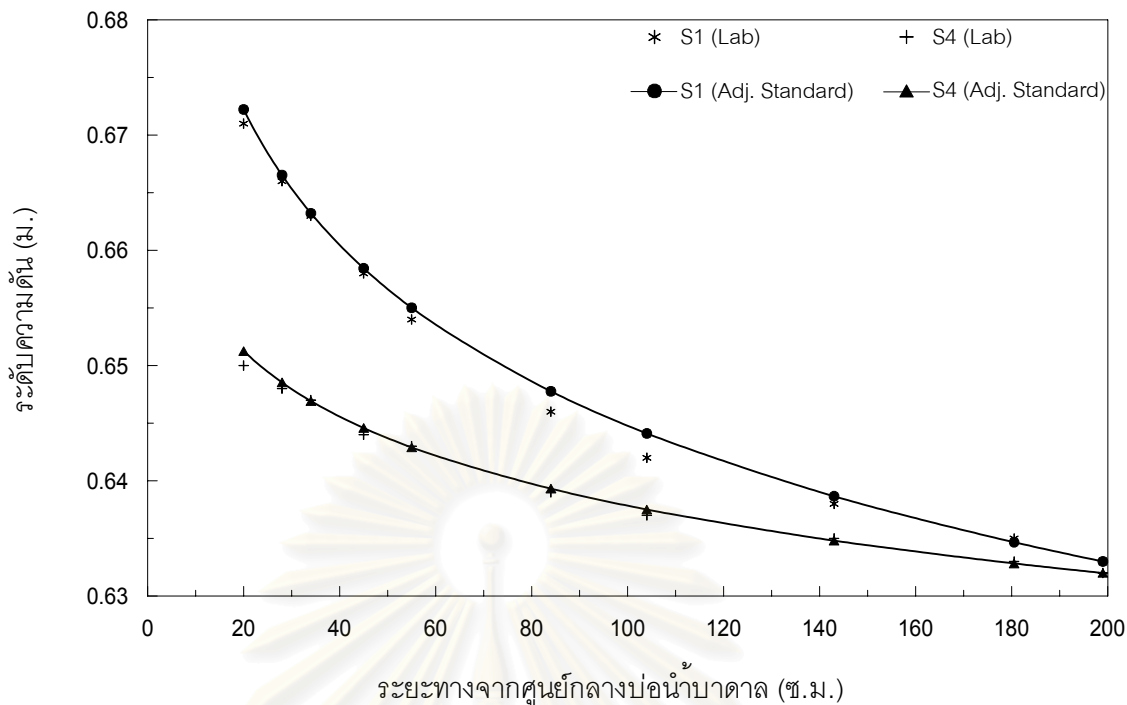
ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐานที่ได้รับการปรับแก้ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (ขนาดเล็กที่สุดในการทดลอง) และตัวอย่างที่ 4 (ขนาดใหญ่ที่สุดในการทดลอง) ด้วยอัตราการไหล Q_1 (อัตราการไหลต่ำสุดในการทดลอง) และ Q_9 (อัตราการไหลสูงสุดในการทดลอง) แสดงดังรูปที่ 5-23 และ 5-24 ขณะที่ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออก แสดงดังรูปที่ 5-25 และ 5-26



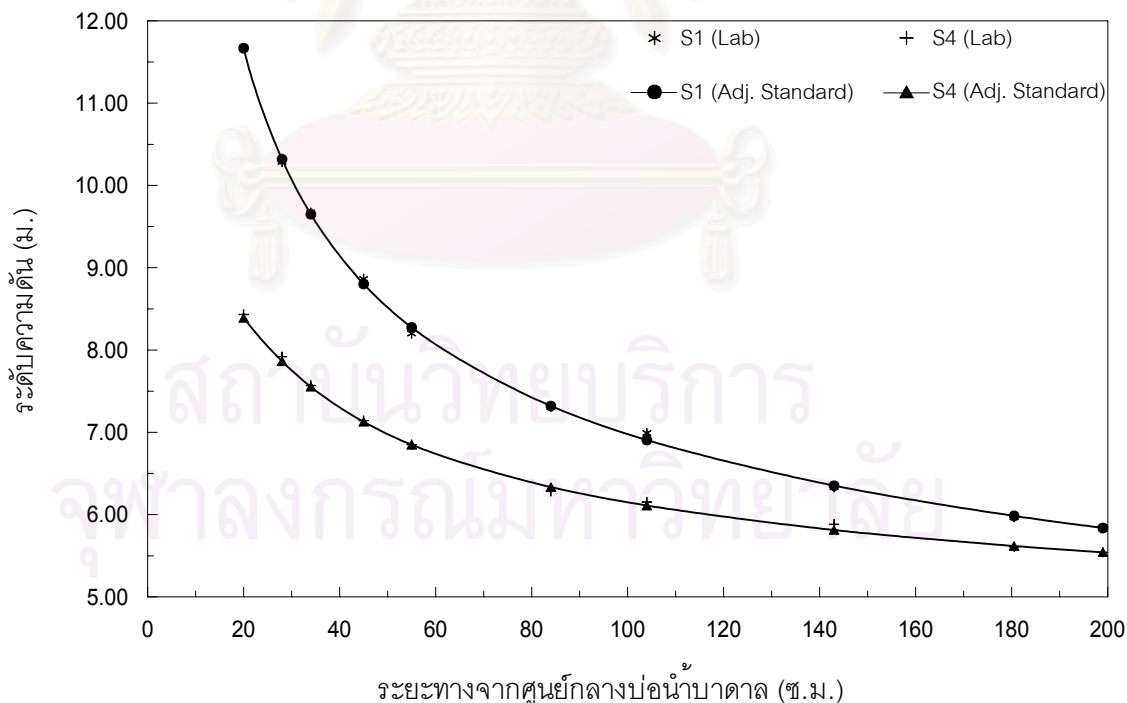
รูปที่ 5-23 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)



รูปที่ 5-24 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)



รูปที่ 5-25 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)



รูปที่ 5-26 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)

จากการเปรียบเทียบในรูปที่ 5-23 ถึง 5-26 พบว่า ทั้งกรณีการไหลเข้าและการไหลออก จากบ่อน้ำบาดาล รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการ ทดลองการไหลแบบมาตรฐานที่ได้รับการปรับแก้ จะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างระดับความดันจากการคำนวณและการทดลองการไหล เข้าและออกบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาดและทุกอัตราการไหล จะได้ผลที่สอดคล้อง กับที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยเมื่อการไหลเข้าและออกเป็นการไหลแบบเชิงเส้นตลอดชั้นน้ำ(linear flow)และการไหลแบบผสม(mixed flow) ค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาลที่คำนวณกับค่า จริงแตกต่างกันไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อการไหลเข้าและออกเป็นการไหลแบบไม่เชิงเส้น ตลอดชั้นน้ำ(non-linear flow) ค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาลที่คำนวณกับค่าจริงแตกต่าง กันสูงสุด 6.20 และ 7.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สรุปแล้วการคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดัน โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการ ทดลองการไหลแบบมาตรฐานที่ได้รับการปรับแก้ สามารถนำไปใช้ได้

5.7.3 การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการทดลองและจากการ คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์

สาเหตุที่ทำการเปรียบเทียบในส่วนนี้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทาน กับค่าเรย์โนลด์เป็นความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย และจากการทดลองพบว่าสามารถ หาความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ เพื่อเป็นตัวแทนของทรายที่ใช้ใน การทดลอง ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.34 1.58 1.80 และ 2.10 มิลลิเมตร ดังนั้นถ้าการ คำนวณระดับความดันจากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์มีความใกล้ เคียงกับค่าที่เป็นจริง ก็จะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับทรายชั้นน้ำที่มีขนาดอนุภาค เฉลี่ยในช่วง 1.34-2.10 มิลลิเมตรได้

เนื่องจากการทดลองการไหลในแนวรัศมียังไม่เกิดการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ ดังที่สรุป ในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 ดังนั้นในการคำนวณระดับความดันจึงใช้สมการที่ดัดแปลงจากสมการที่ 2-43 และ 2-44 โดยในขั้นแรกต้องคำนวณรัศมีวิกฤติบ่อน้ำบาดาล (r_w) ตามสมการที่ 2-32 โดยใช้ค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยในตารางที่ 5-12 ซึ่งในกรณีการไหลเข้าค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยมีค่า เท่ากับ 27.2 และการไหลออกค่าเรย์โนลด์วิกฤติเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 27.4 ถ้า $r_w \leq r_c$ จะเกิดการ ไหลแบบราบเรียบตลอดระยะทางชั้นน้ำ แต่ถ้า $r_w > 1.99$ เมตร (ระยะของจุดวัดความดันที่อยู่ ไกลจากบ่อน้ำบาดาลที่สุด) จะเกิดการไหลแบบเปลี่ยนแปลงตลอดระยะทางชั้นน้ำ และถ้า

$r_w < r_{cr} < 1.99$ เมตร จะเกิดการไหลแบบผสมคือ การไหลแบบเปลี่ยนแปลงใกล้บ่อน้ำบาดาล และการไหลแบบราบเรียบบริเวณที่ไกลออกไป โดยสมการคำนวณระดับความดันในกรณีการไหลต่างๆ มีดังนี้

- กรณี $r_{cr} \leq r_w$

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$h_o - h = \left(\frac{AuQ}{g\phi\pi m d_{50}^2} \right) \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) \quad (5-39)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

$$h - h_o = \left(\frac{AuQ}{g\phi\pi m d_{50}^2} \right) \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) \quad (5-40)$$

- กรณี $r_{cr} > r_w$

การไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล

$$r > r_{cr}; \quad h_o - h = \left(\frac{AuQ}{g\phi\pi m d_{50}^2} \right) \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) \quad (5-41)$$

$r_w < r < r_{cr};$

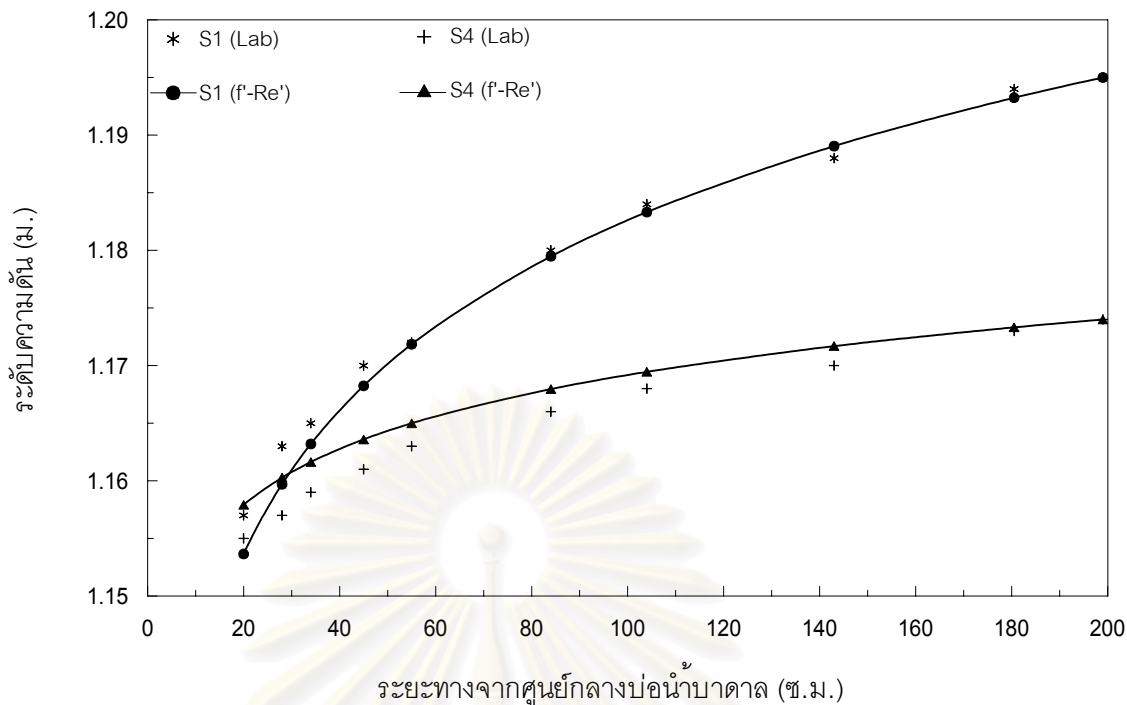
$$h_{cr} - h = \left(\frac{AuQ}{g\phi\pi m d_{50}^2} \right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left(\frac{BQ^2}{2gd_{50}\pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}} \right) \quad (5-42)$$

การไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล

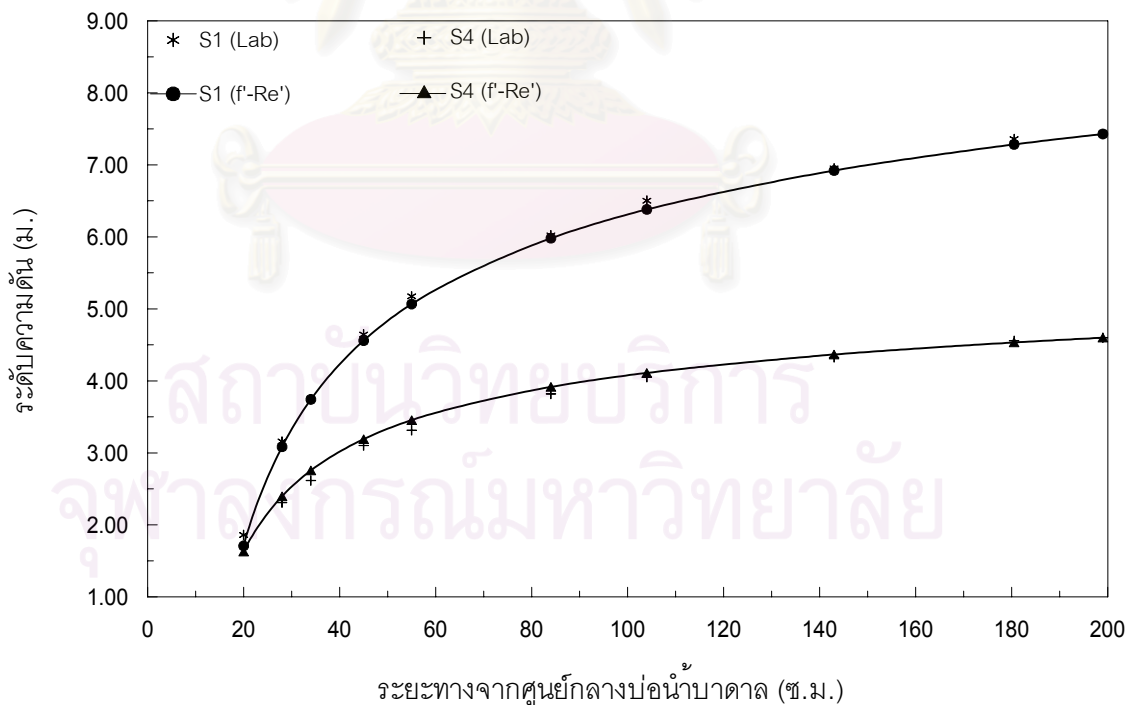
$$r > r_{cr}; \quad h - h_o = \left(\frac{AuQ}{g\phi\pi m d_{50}^2} \right) \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) \quad (5-43)$$

$$r_w < r < r_{cr}; \quad h - h_{cr} = \left(\frac{AuQ}{g\phi\pi m d_{50}^2} \right) \ln\left(\frac{r_{cr}}{r}\right) + \left(\frac{BQ^2}{2gd_{50}\pi^2 m^2 \phi^2} \right) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{cr}} \right) \quad (5-44)$$

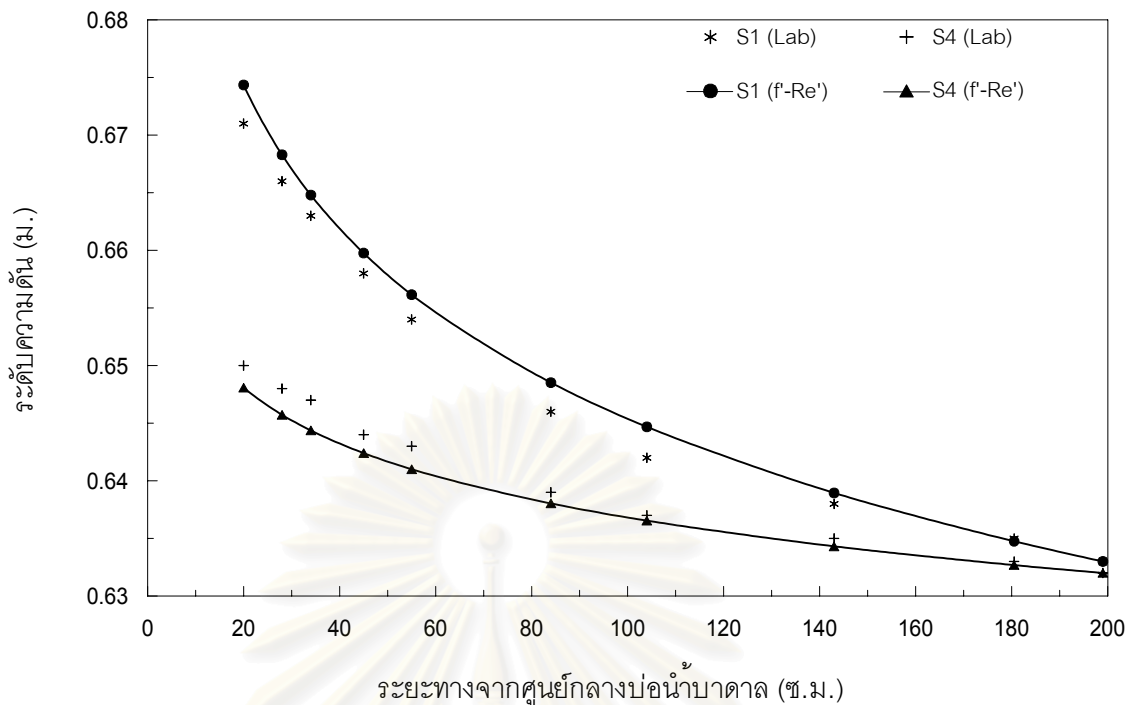
ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี และจากการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและค่าเรย์โนลด์ของทราย ขึ้นน้ำตัวอย่างที่ 1 (ขนาดเล็กที่สุดในการทดลอง) และตัวอย่างที่ 4 (ขนาดใหญ่สุดในการทดลอง) ด้วยอัตราการไหล Q_1 (อัตราการไหลต่ำสุดในการทดลอง) และ Q_9 (อัตราการไหลสูงสุดในการทดลอง) แสดงดังรูปที่ 5-27 และ 5-28 ขณะที่ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออก แสดงดังรูปที่ 5-29 และ 5-30



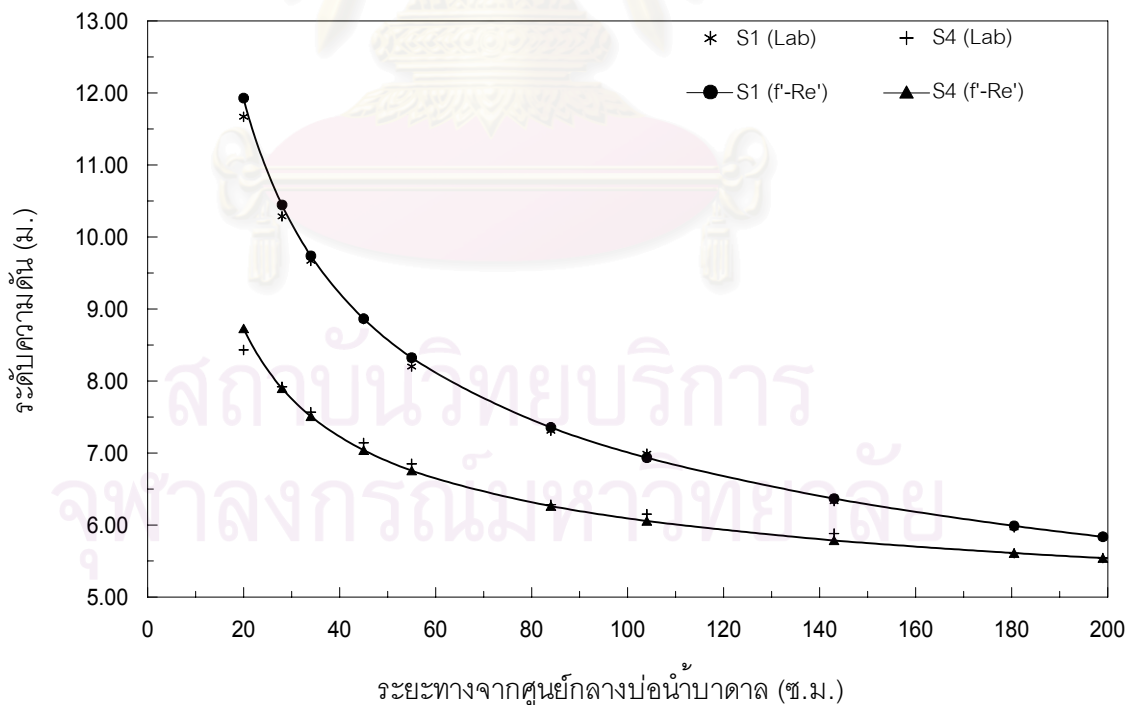
รูปที่ 5-27 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)



รูปที่ 5-28 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลเข้าในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)



รูปที่ 5-29 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียตทานและค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q1 (linear flow)



รูปที่ 5-30 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการทดลองการไหลออกในแนวรัศมี คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียตทานและค่าเรย์โนลด์ ด้วยอัตราการไหล Q9 (non-linear flow)

จากการเปรียบเทียบในรูปที่ 5-27 ถึง 5-30 พบว่า ทั้งกรณีการไหลเข้าและการไหลออก จากบ่อน้ำบาดาล รูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง แพลคเตอร์เสียดทานและค่าเรย์โนลด์ จะให้ค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลอง (เมื่อพิจารณา เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระดับความดันที่ผิวบ่อ)

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างระดับความดันจากการคำนวณและการทดลองการไหล เข้าและออกบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาดและทุกอัตราการไหล จะได้ผลที่สอดคล้อง กับที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยกรณีการไหลเข้าค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาลที่คำนวณกับค่า จริงแตกต่างกันไม่เกิน 9.56 เปอร์เซ็นต์ และกรณีการไหลออกค่าระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำ บาดาลที่คำนวณกับค่าจริงแตกต่างกันไม่เกิน 8.68 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อการไหลเป็นแบบผสม หรือแบบไม่เชิงเส้น พบว่า การคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแพลคเตอร์เสียดทานและค่า เรย์โนลด์จะให้ระดับความดันที่ผิวบ่อน้ำบาดาลในลักษณะที่ปลอดภัยต่อการออกแบบเครื่องสูบ น้ำ คือ ให้ค่าที่สูงกว่าค่าจริงในกรณีเต็มน้ำหรือไหลออก และให้ค่าต่ำกว่าค่าจริงในกรณีสูบ น้ำหรือไหลเข้า

สรุปแล้วการคำนวณรูปร่างของเส้นระดับความดัน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแพลค เตอร์เสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ สามารถนำไปประมาณระดับความดัน สำหรับออกแบบเครื่อง สูบน้ำได้

5.7.4 การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากการคำนวณโดยใช้พารา มิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี กับพารามิเตอร์ที่ได้จากการ ทดลองการไหลในทิศทางเดียว

การเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้ จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี กับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียว มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาอิทธิพลของการไหลนำพา เนื่องจากไม่สามารถเปรียบเทียบพารา มิเตอร์จากการทดลองได้โดยตรง เพราะขอบเขตการทดลองแตกต่างกันมาก (ดูตารางที่ 3-1) ดังนั้นในการเปรียบเทียบเพื่อหาอิทธิพลของการไหลนำพาจะต้องใช้ผลการทดลองที่อัตราการไหล เท่ากัน ดังนั้นจึงใช้ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีและในทิศทางเดียวที่อัตราการไหล Q1-Q5 ในการเปรียบเทียบ

ในการคำนวณรูปร่างระดับความดันจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในทิศทางเดียว จะใช้สมการที่ 5-30 ถึง 5-35 โดยที่ค่า K_1' , a_1' และ b_1' ใช้แทนค่า K_2' , a_2' และ b_2' ตามลำดับ และตัดเทอมการไหลนำพาทิ้งไป

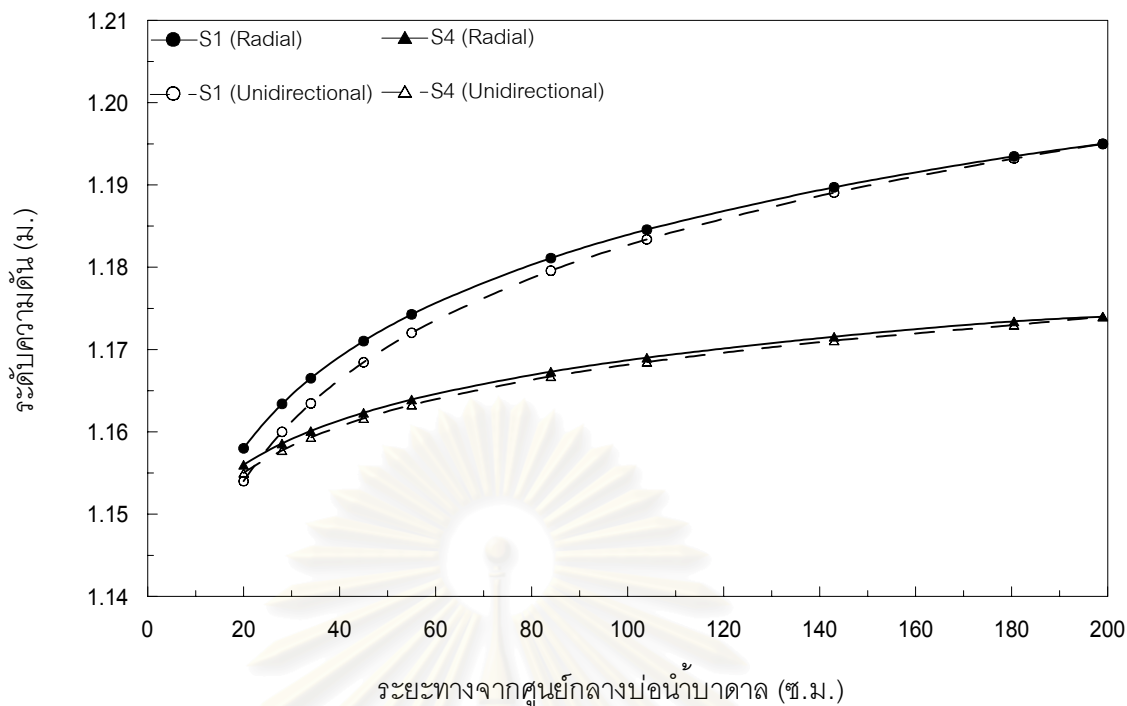
ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 และ 4 ด้วยอัตราการไหล Q_1 , Q_3 และ Q_5 แสดงดังรูปที่ 5-31 5-32 และ 5-33 ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบของเส้นระดับความดันจากการทดลองการไหลออก แสดงดังรูปที่ 5-34 5-35 และ 5-36 ตามลำดับ

ในการเปรียบเทียบได้ทำการตั้งสมมุติฐานว่าระดับความดันที่แตกต่างของการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว เกิดจากอิทธิพลของการไหลนำพาแต่เพียงอย่างเดียว จากการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ดังนี้

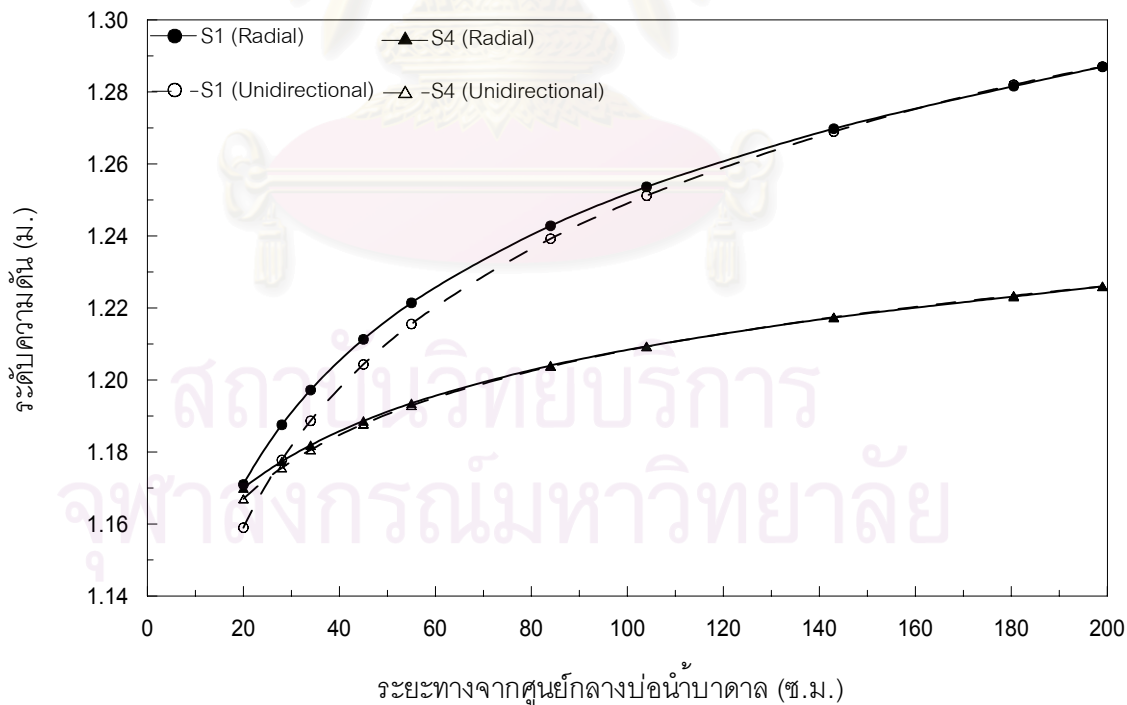
1) กรณีการไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 5-31 ถึง 5-33 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง) และในทรายตัวอย่างที่ 1 จะมีความแตกต่างมากกว่าทรายตัวอย่างที่ 4

2) กรณีการไหลออกจากบ่อน้ำบาดาล จากรูปที่ 5-34 ถึง 5-36 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของรูปร่างของเส้นระดับความดันจากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมีและการไหลในทิศทางเดียว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง) และในทรายตัวอย่างที่ 1 จะมีความแตกต่างมากกว่าทรายตัวอย่างที่ 4

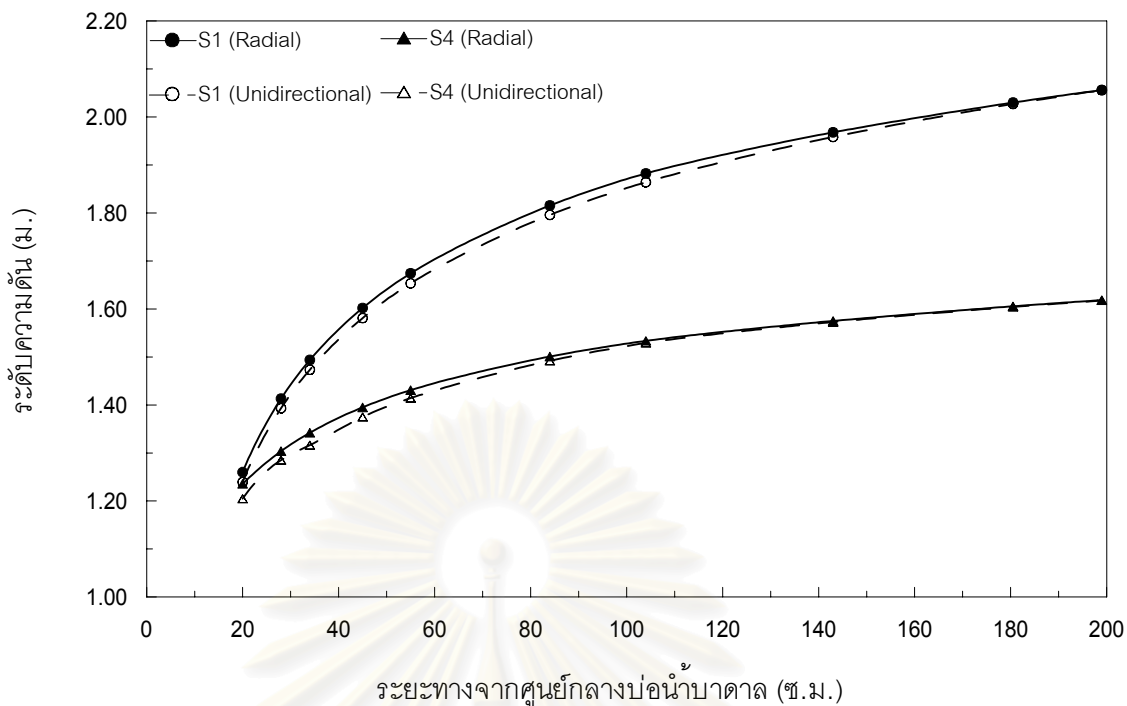
เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างระดับความดัน จากการคำนวณและการทดลองการไหลเข้าและออกบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำทุกขนาดและทุกอัตราการไหล จะได้ผลที่สอดคล้องกับที่กล่าวไว้ข้างต้น สรุปได้ว่าอิทธิพลของการไหลนำพาจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล และทรายขนาดเล็กจะได้รับอิทธิพลจากการไหลนำพามากกว่าทรายขนาดใหญ่หรือเฮดสูญเสียจากการไหลนำพา เนื่องจากทรายขนาดเล็กมีขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเล็กกว่า



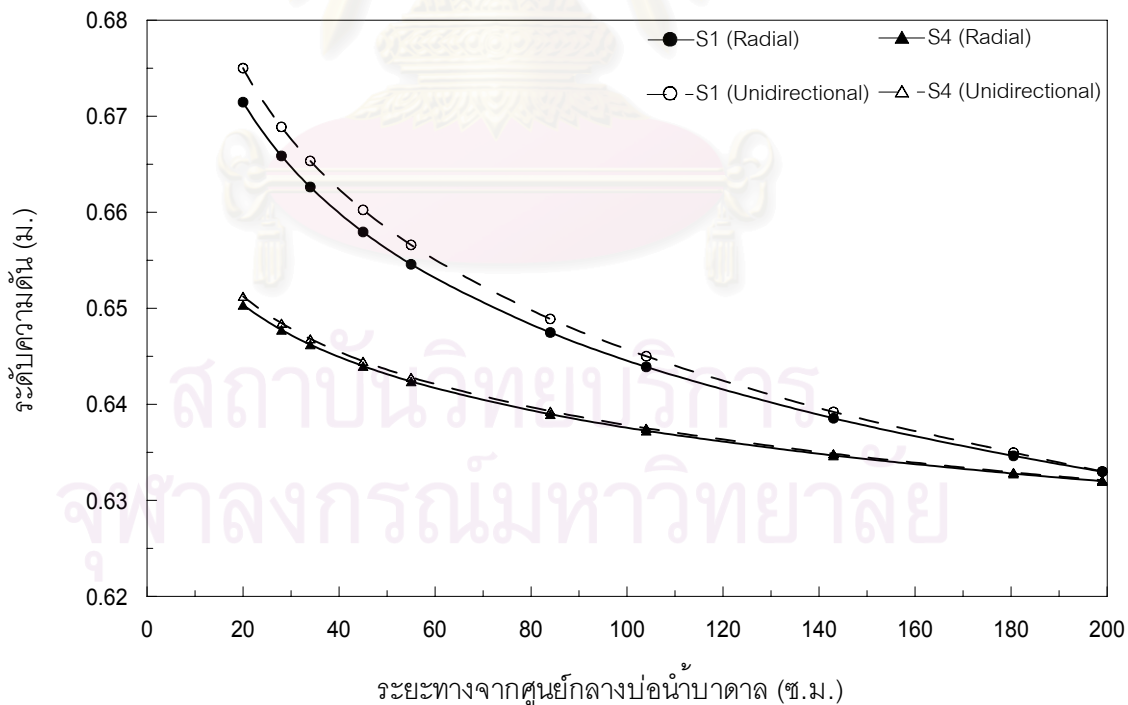
รูปที่ 5-31 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่สูบน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q1



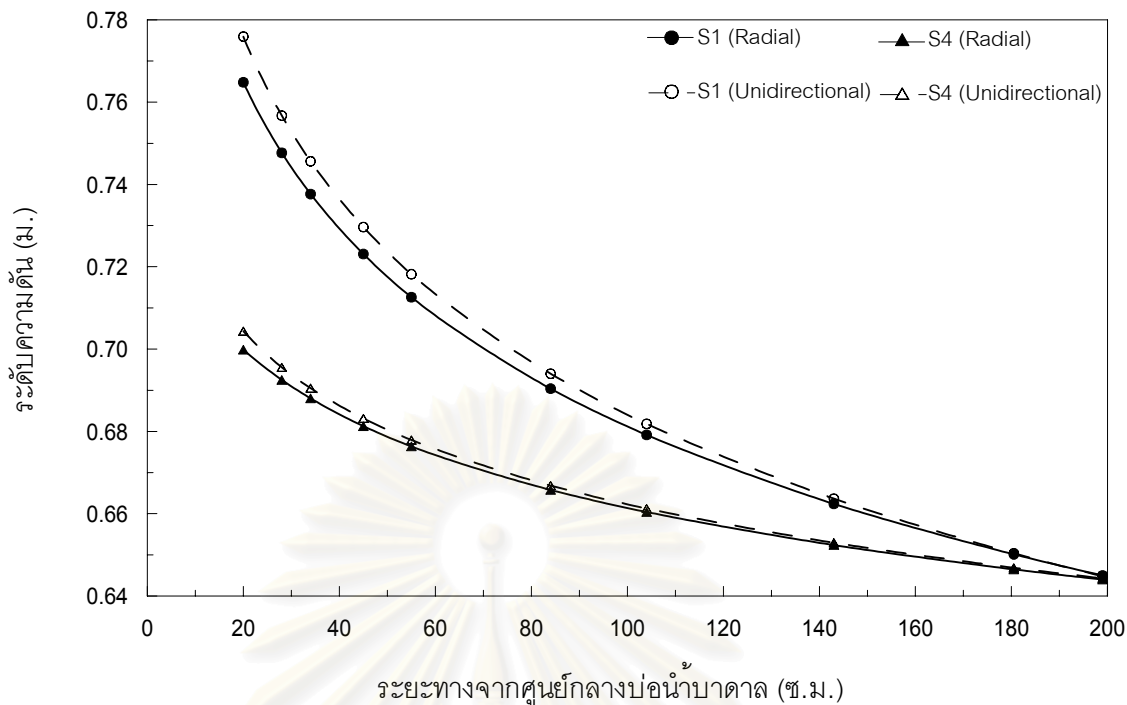
รูปที่ 5-32 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความดัน จากคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่สูบน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q3



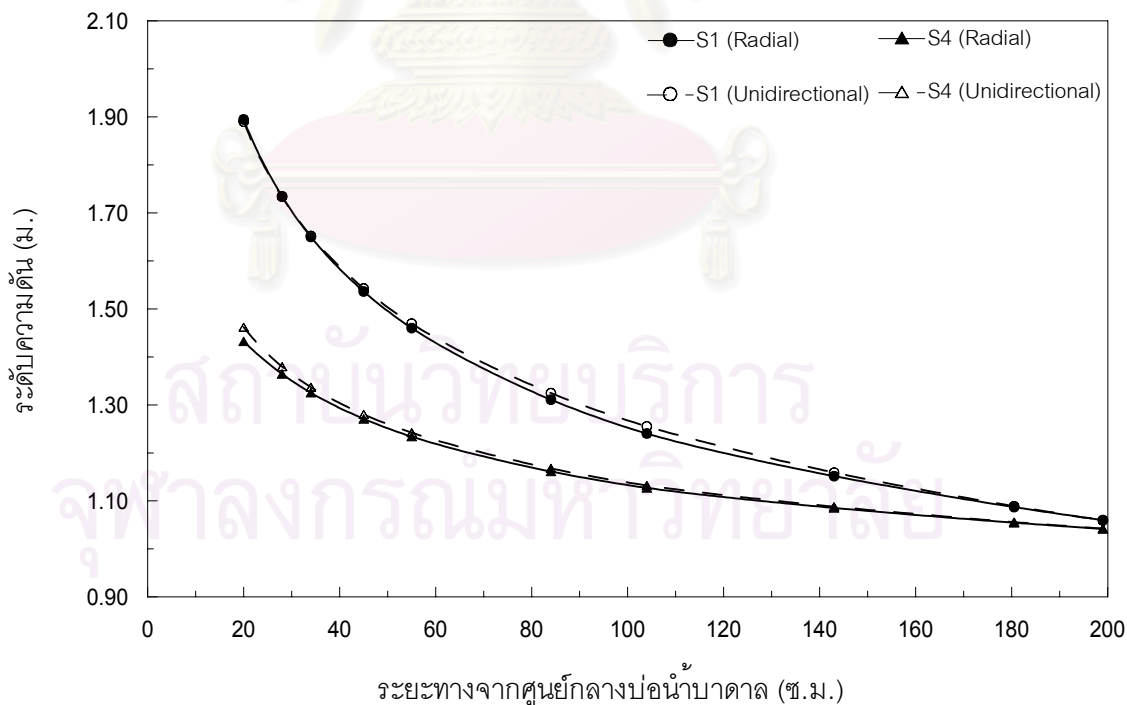
รูปที่ 5-33 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความชื้น จากคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q5



รูปที่ 5-34 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความชื้น จากคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q1



รูปที่ 5-35 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความชื้น จากคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q3



รูปที่ 5-36 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของเส้นระดับความชื้น จากคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการไหลในแนวรัศมี และการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล ด้วยอัตราการไหล Q5

5.7.5 แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

ในการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาจะต้องทราบขอบเขตการใช้งานก่อน ซึ่งจากการทดลองการไหลของน้ำใต้ดินเข้าและออกจากบ่อน้ำบาดาลในแนวรัศมี จะมีความเร็วการไหลไม่เกิน 0.065 เมตร/วินาที ในทรายชั้นน้ำขนาด 1.34-2.10 มิลลิเมตร มีความพรุนประมาณ 0.4 โดยค่าเรย์โนลด์มีค่าไม่เกิน 677.7 (ค่าสูงสุดที่ผิวบ่อ) ดังนั้นผลการศึกษาจึงสามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงดังกล่าว นอกจากนี้ค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่ได้จากการทดลองจะเป็นค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น (ตะแกรงเบอร์ 50 ซ้อนกับตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร) ถ้าท่อกรองหรือตะแกรงเปลี่ยนไปค่าความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลก็จะเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน

แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5-37 ประกอบด้วยขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการไหลและขั้นตอนการคำนวณระดับความดัน มีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์

จากการเจาะสำรวจจะได้ทรายชั้นน้ำตัวอย่างซึ่งนำไปหาค่าพารามิเตอร์ได้จาก 2 วิธีการ ดังต่อไปนี้

- นำทรายตัวอย่างไปวิเคราะห์หาการกระจายขนาด (sieve analysis) จะได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายชั้นน้ำ (d_{50}) เมื่อทราบ d_{50} แล้วจะหาค่า Re'_{cr} ได้ตามสมการที่ 5-1 จากค่า Re'_{cr} จะหาค่า K_2' , a_2' , b_2' และ c_2' ได้ ในกรณีการสูบน้ำจะใช้สมการที่ 5-23 5-9 5-10 และ 5-11 ตามลำดับ ขณะที่การเติมน้ำจะใช้สมการที่ 5-26 5-14 5-15 และ 5-16 ตามลำดับ

- นำทรายตัวอย่างไปทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน (permeability test) ในเพอร์เมียมิเตอร์ขนาดเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง(เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19.32 เซนติเมตร) จะได้ค่า Re'_{cr} , K_1' , a_1' และ b_1' จากนั้นทำการคำนวณค่า K_2' , a_2' , b_2' และ c_2' ในกรณีการสูบน้ำจะใช้สมการที่ 5-24 5-12 5-13 และ 5-11 ตามลำดับ ขณะที่การเติมน้ำจะใช้สมการที่ 5-27 5-17 5-18 และ 5-16 ตามลำดับ

2) ขั้นตอนการคำนวณระดับความดัน

ในการคำนวณระดับความดันต้องทราบระดับความดันเดิมในชั้นน้ำ (h_0) และรัศมีที่ได้รับอิทธิพล (r_0) ซึ่งจากการศึกษาของ Cox(1977) แนะนำว่า รัศมีที่ได้รับอิทธิพลจากการสูบน้ำด้วยบ่อน้ำบาดาลบ่อเดี่ยว (single well) ในชั้นน้ำภายใต้แรงดัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 กิโลเมตร ดังนั้นในการนำผลการศึกษาไปใช้คำนวณระดับความดัน ต้องทราบน้ำในบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ห่างจากบ่อที่ทำการออกแบบมากกว่า 1 กิโลเมตรและให้พิจารณาว่า ระดับความดันในบ่อสังเกตการณ์คือ ระดับความดันเดิมของชั้นน้ำ

จากพารามิเตอร์ที่ได้ เมื่อทราบอัตราการสูบน้ำหรือเติมน้ำที่ต้องการ (Q) ระดับความดันน้ำในชั้นน้ำ (h_0) โดยพิจารณาจากระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ห่างจากบ่อน้ำบาดาลที่ออกแบบไม่น้อยกว่า 1 กิโลเมตร ระยะห่างของบ่อน้ำบาดาลที่ออกแบบจากบ่อสังเกตการณ์ (r_0) ค่าสัมประสิทธิ์ C และค่ายกกำลัง n ของความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาลที่ออกแบบ จะสามารถทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดันได้ดังต่อไปนี้

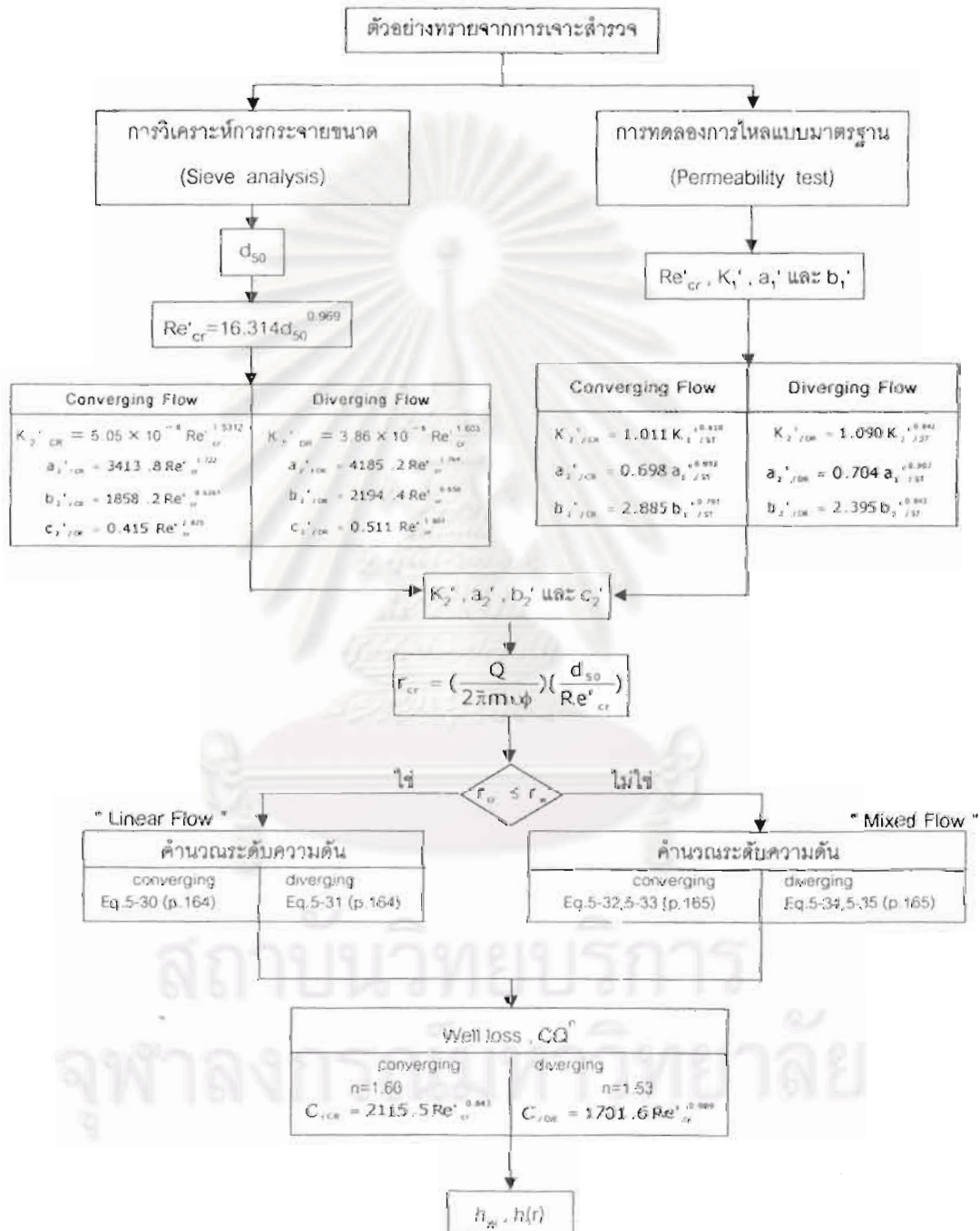
- หารัศมีวิกฤตบ่อน้ำบาดาล (r_{cr}) จากค่า Q และ Re'_{cr} ได้ตามสมการที่ 2-32 หรือจากค่า Q และ d_{50} ตามสมการที่ 5-2

- จากค่า h_0 เมื่อ $r_{cr} \leq r_w$ จะทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดันได้ โดยกรณีที่เป็นกรณีไหลเข้าใช้สมการที่ 5-30 และกรณีที่เป็นกรณีไหลออกใช้สมการที่ 5-31 แต่ถ้าค่า $r_{cr} > r_w$ จะทำนายรูปร่างของเส้นระดับความดันได้ โดยกรณีที่เป็นกรณีไหลเข้าจะใช้สมการที่ 5-32 และ 5-33 และกรณีที่เป็นกรณีไหลออกจะใช้สมการที่ 5-34 และ 5-35

- เมื่อทราบความสูญเสียของบ่อน้ำบาดาล (CQ^n) ก็หาระดับความดันน้ำในบ่อน้ำบาดาล (h_w) ได้ ซึ่งจะนำไปใช้ในการเลือกเครื่องสูบน้ำเพื่อใช้ในการสูบน้ำหรือเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลได้

อีกหนึ่งแนวทางที่เสนอมานี้ในรูปที่ 5-37 มาจากการวิเคราะห์อย่างละเอียด คือพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการไหลทุกตัว แต่จากการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์แบบรวมหรือแบบหยาบจากความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์เสียดทานและค่าเรย์โนลด์ ซึ่งใช้ค่าคงที่ A และ B ใน

การคำนวณระดับความดัน ซึ่งให้ความแตกต่างสูงสุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าจริง จึงสามารถนำไปใช้คำนวณแบบคร่าวๆ ได้ ถ้าบ่อน้ำบาดาลที่จะพัฒนาอยู่ในทรายเป็นชั้นน้ำที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยในช่วง 1.34-2.10 มิลลิเมตร



รูปที่ 5-37 แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กฤษดา วิศวธีรานนท์. INVERTER หลักการและเทคนิคการใช้งาน. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอฟ.เอ.เทค จำกัด และ บริษัท บูรพาการไฟฟ้า, 2541.
- กิริติ ลีวัจนกุล. ชลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2541.
- เจริญ เพียรเจริญ. น้ำบาดาล-บ่อบาดาล. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: กองควบคุมกิจการน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี, 2540.
- ฉลอง บัวผัน. น้ำบาดาล. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าส์, 2538.
- ธีรจิต จิตราภรณ์. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินโดยแรงโน้มถ่วงของโลกกับการกระจายตัวของขนาดทราย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- วชิ งามณรงค์. การระบายน้ำลงใต้ดินทางบ่อบาดาล. วิศวกรรมสาร (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2516)
- วรการ ไม้เรียง, จิรพัฒน์ โชติกไกร, และประทีป ดวงเดือน. ปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎีและปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2525.
- สมศักดิ์ กิรติวุฒิสเรษฐ. หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. 3,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.
- สุจิต คุณธนกุลวงศ์, กฤษดา วิศวธีรานนท์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำใต้ดิน. โครงการสิ่งประดิษฐ์ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- สุรพงษ์ เชียงทอง. การออกแบบและก่อสร้างโครงการทดลองเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลที่เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร. ในรายงานการสัมมนาทางวิชาการเรื่องเทคนิคการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาล, หน้า 17-22. 9 มีนาคม 2544 ณ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- Alyamani, M.S. and Sen, Z. Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. Ground Water vol.31 no.4 (July-August 1993)
- Arbhabhirama, A. and Dinoy, A.A. Friction factor and Reynolds number in porous media flow. Journal of the Hydraulics Division vol.99 no.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. Ground water and wells. 3rd ed. Minnesota: Johnson Filtration System, 1989.
- 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 vol.102 no.HY9 (September 1976): 1149-1165.
- 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 ground water 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. 1st 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 aquifer 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. 2nd ed. Toronto: University of Toronto, 1960.
- Sen, Z. Type curves for two-regime well flow. Journal of Hydraulic Engineering vol.114 no.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 vol.33 no.6 (November-December 1995): 892-898.

- Sphepherd, R.G. Correlations with permeability and grain size. Ground Water vol.27 no.5 (September-October 1989)
- Thiruvengadam, M. and Pradip Kumar, G.N. Validity of Forchheimer equation in radial flow through coarse granular media. Journal of Engineering Mechanics vol.123 no.7 (July 1997): 696-705.
- Todd, D.K. Groundwater hydrology. 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1959.
- Todd, D.K. Groundwater hydrology. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- Todd, D.K. Handbook of groundwater development. 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1990.
- Vadat B. Aquifer hydraulics. 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- Venkatartman, P. and Rama Mohan Rao, P. Darcient, transitional and turbulent flow through porous media. Journal of Hydraulic Engineering vol.124 no.8 (August 1997): 840-846.
- Ward, J.C. Turbulent flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division vol.90 no.HY5 (May 1964): 1-12.
- Williams, D.E. Modern techniques in well design. Journal of AWWA vol.77 (September 1985): 68-74.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณออกแบบแบบเครื่องมือ

เครื่องมือหลักที่จะต้องทำการออกแบบ คือ เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน โดยต้องออกแบบให้แบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ (แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี) และระบบหมุนเวียนน้ำ (เครื่องสูบน้ำ) สามารถจำลองสภาพการไหลในแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพเป็นจริงมากที่สุด ทั้งในแง่ของระดับความดันและอัตราการไหล ตามข้อจำกัดในเรื่องของสถานที่ วัสดุ และงบประมาณ รายละเอียดมีดังนี้

ก.1 สภาพการไหลจริง

เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำภายใต้แรงดันหรือการไหลของน้ำภายใต้แรงดัน เปรียบเสมือนกับการไหลในท่อ ซึ่งมีค่าเรย์โนลด์เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แบ่งชนิดการไหล ดังนั้นในการออกแบบต้องให้ค่าเรย์โนลด์ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองมีค่าเท่ากับที่เกิดขึ้นในสนาม นั่นคือมีความคล้ายคลึงเชิงพลศาสตร์นั่นเอง

ข้อมูลภาคสนามที่นำมาเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ คือ ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อน้ำบาดาลจากการอัดเติมน้ำในชั้นน้ำกรุงเทพฯ ของ ดร.ว.จี รามณรงค์ (การระบายน้ำลงใต้ดินทางบ่อน้ำบาดาล, 2516) มีรายละเอียด ดังนี้

- อัตราการเติมน้ำ (Q) = 200 ลบ.ม./ชั่วโมง = 0.056 ลบ.ม./วินาที ซึ่งถือว่าเป็นอัตราการเติมน้ำที่สูงมาก
- ท่อกรองที่ใช้เป็นประเภท perforated pipe เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 10 นิ้ว หรือ 0.25 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ช่องเปิด (A_p) 5 เปอร์เซ็นต์ และความยาวท่อกรอง (L) 23 เมตร
- บ่อน้ำบาดาลมีกรวดกรู เนื่องจากไม่ทราบขนาดกรวดที่ใช้ จึงสมมุติให้ใช้กรวดขนาดใหญ่สุดตามข้อกำหนดของกรมทรัพยากรธรณี คือ 0.25 นิ้ว หรือ 6.35 มม. (d_{50} =6.35 มม.) ความพรุน (ϕ) ประมาณ 0.4 และสมมุติว่าน้ำที่ใช้เติมมีอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส มีความหนืดเปรียบเทียบ (ν) ประมาณ 1×10^{-6} ม.²/วินาที

ดังนั้นหาความเร็วการไหลของน้ำที่ออกจากบ่อน้ำบาดาล (v) ได้ดังนี้

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{A \times \pi D \times L} = \frac{0.056}{0.05 \times \pi \times 0.25 \times 23} = 0.062 \text{ ม./วินาที}$$

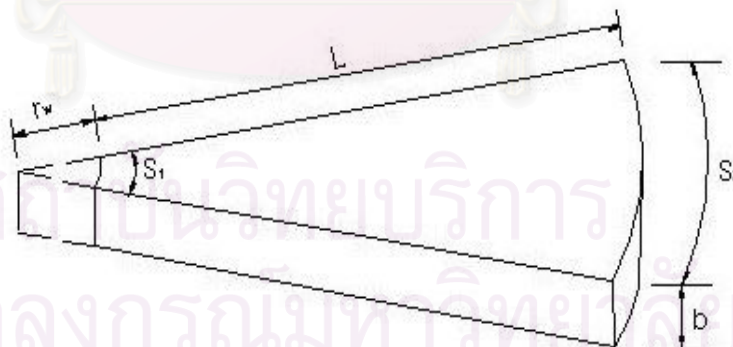
และค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อ

$$R_e' = \left(\frac{V}{\phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{v}\right) = \left(\frac{0.062}{0.4}\right) \left(\frac{0.00635}{0.897 \times 10^{-6}}\right) = 1097.3$$

ขณะที่ระดับความดันที่ใช้ในการออกแบบมาจากข้อมูลระดับน้ำลดในบ่อสูบน้ำบาดาล เมื่อทำการสูบน้ำบริเวณกรุงเทพมหานครที่ระดับน้ำในบ่อลดลงประมาณ 20 เมตร ดังนั้นในการออกแบบจะยึดค่าเรย์โนลด์มากที่สุดประมาณ 1100 และผลต่างความดันในบ่อน้ำบาดาลกับระดับความดันเดิม (ระดับความดันด้านท้าย) ในแบบจำลองเท่ากับ 20 เมตร เป็นหลักในการออกแบบ

ก.2 การออกแบบเครื่องมือ

ชั้นน้ำ (aquifer) : ทำเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม (sector) โดยให้มีมุม ความยาว ความหนา ดังแสดงในรูปที่ ก-1 โดยให้เหมาะสมกับข้อจำกัด ดังนี้



รูปที่ ก-1 มิติของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ ที่ต้องออกแบบ

1) ความยาวของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำ ต้องไม่เกิน 2.3 เมตร เนื่องจากการบรรจุทรายในแบบจำลองจะต้องตั้งแบบจำลองขึ้นโดยใช้ครนในการยก แต่ความสูงของครนในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์มีความสูงเพียงแค่ 2.3 เมตร

$$\text{นั่นคือ} \quad L+r_w \leq 2.3 \text{ m} \quad (\text{ก-1})$$

2) $S_1 \geq 0.1$ เมตร เพื่อลดผลของ model scale effect จากการตีक्षाของ Frazini (1956, Dinoy 1971) พบว่า “แบบจำลองต้องมีขนาดอย่างน้อย 40 เท่าของอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลองจะไม่ต้องคิดผลของ model scale effect” เนื่องจากทรายที่ใช้ในการทดลองมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุดประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังนั้น $S_1 = 40 * 0.002 = 0.08$ เมตร แต่คิดเผื่อเป็น 0.1 เมตร สำหรับทดลองในทรายที่มีขนาดใหญ่กว่านี้

$$\text{นั่นคือ} \quad S_1 = 2\pi r_w \left(\frac{\theta}{360} \right) \geq 0.1 \quad (\text{ก-2})$$

3) $S_2 \approx 1.0$ เมตร เพื่อให้ขนาดของแบบจำลองใหญ่เกินไป

$$\text{นั่นคือ} \quad S_2 = 2\pi(r_w + L) \left(\frac{\theta}{360} \right) \approx 1.0 \quad (\text{ก-3})$$

4) แบบจำลองควรหนาเพียงพอเพื่อให้ใส่ทรายได้สะดวก เพราะการใส่ทรายจะใส่ทางด้านบ่อน้ำบาดาล และเพื่อลดผลของ model scale effect

$$\text{นั่นคือ} \quad b \geq 0.1 \quad (\text{ก-4})$$

พิจารณาข้อจำกัดที่ 1 เพื่อจำลองสภาพการไหลให้ใกล้เคียงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นใช้ $L=2$ เมตร
พิจารณาข้อจำกัดที่ 4 เลือกความหนาของชั้นน้ำเท่ากับ 0.2 เมตร นั่นคือ $b=0.2$ เมตร
พิจารณาข้อจำกัดที่ 3 ถ้า $L=2$ เมตร ดังนั้น

$$S_2 = 2\pi(r_w + 2) \left(\frac{\theta}{360} \right) \approx 1.0 \quad (\text{ก-5})$$

เหลือมิติที่ต้องออกแบบ คือ r_w และ θ จากสมการที่ ก-2 และ ก-5 จึงทำการลองสุ่มเลือกค่า r_w และ θ ดังนี้

Trial 1: $\theta = 45^\circ$

$$(\text{ก-2}) \quad ; \quad r_w \geq \frac{0.1}{2\pi} \left(\frac{360}{45} \right) = 0.13 \text{ เมตร} \quad \text{เลือก } r_w = 0.15 \text{ เมตร}$$

$$(\text{ก-5}) \quad ; \quad S_2 = 2\pi(0.15 + 2) \left(\frac{45}{360} \right) = 1.68 \gg 1.0 \quad \text{Not O.K.}$$

Trial 2: $\theta = 30^\circ$

$$(\text{ก-2}) \quad ; \quad r_w \geq \frac{0.1}{2\pi} \left(\frac{360}{30} \right) = 0.19 \text{ เมตร} \quad \text{เลือก } r_w = 0.20 \text{ เมตร}$$

$$(\text{ก-5}) \quad ; \quad S_2 = 2\pi(0.20 + 2) \left(\frac{30}{360} \right) = 1.15 \approx 1.0 \quad \underline{\text{O.K.}}$$

ดังนั้นแบบจำลองจึงมีขนาดดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} r_w = 0.20 \text{ เมตร} \\ \theta = 30^\circ \\ L = 2 \text{ เมตร} \\ B = 0.2 \text{ เมตร} \end{array} \right\} \text{ขนาดของแบบจำลองบ่อน้ำบาดาล-ชั้นน้ำที่จะใช้ในการทดลอง}$$

เมื่อทราบขนาดแบบจำลองก็ต้องทำการออกแบบเครื่องสูบน้ำ เพื่อให้เกิดการไหลในสภาพที่ต้องการ คือสามารถทำการทดลองในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อน้ำบาดาลมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1100

$$\text{นั่นคือ} \quad Re'_{\max} = \left(\frac{v_{\max}}{\phi} \right) \left(\frac{d_{50,\max}}{v} \right) \quad \text{ใช้ } d_{50,\max} = 6.35 \text{ ม.ม.}$$

$$V_{\max} \text{ ที่ผิวบ่อน้ำบาดาล} = \frac{Re' \phi v}{d_{50,\max}}$$

$$\therefore V_{\max} = \frac{1100 \times 0.4 \times (0.897 \times 10^{-6})}{0.00635} = 0.062 \text{ ม./วินาที}$$

$$\text{แต่} \quad V_{\max} = \frac{Q_{\max}}{A} = \frac{Q_{\max}}{2\pi r_w \times b \times \frac{\theta}{360}}$$

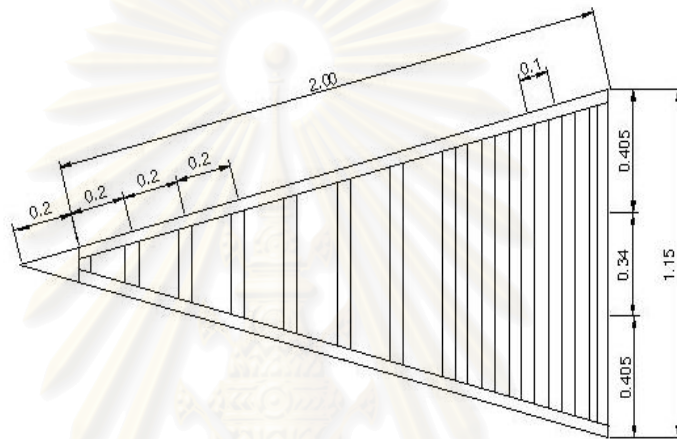
$$\therefore Q_{\max} = (0.062) (2\pi) (0.2) (0.2) \left(\frac{30}{360} \right) = 0.0013 \text{ ลบ.ม./วินาที}$$

จากค่าอัตราการไหลสูงสุดนำไปออกแบบเครื่องสูบน้ำ เลือกเครื่องสูบน้ำที่ให้อัตราการไหลเท่ากับ 0.0025 ลูกบาศก์เมตร/วินาที และเฮดด้านส่งเท่ากับ 50 เมตร ที่ความเร็วรอบ 2850 รอบ/นาที เนื่องจากการอัดเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำภายใต้แรงดันจะใช้แรงดันประมาณ 50 เมตรของน้ำ (ข้อเสนอแนะในการอัดเติมน้ำในชั้นน้ำนครหลวง ความลึกประมาณ 100 เมตรจากผิวดิน จากการศึกษาของ Pham H.G., 1997) และเพื่ออัตราการไหลสำหรับทดลองกรณีนี้วัสดุมีขนาดใหญ่กว่า 6.35 มิลลิเมตร

จากเฮดของเครื่องสูบน้ำ และในการออกแบบให้ผลต่างความดันในบ่อน้ำบาดาลกับระดับความดันเดิมในแบบจำลองสูงสุดเท่ากับ 20 เมตร ดังนั้นกรณีวิกฤติที่จะเกิดขึ้นในแบบจำลอง (ความดันที่สูงที่สุด) คือ การทดลองการเติมน้ำด้วยอัตราการไหล 0.0025 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ระดับความดันที่บ่อเท่ากับ

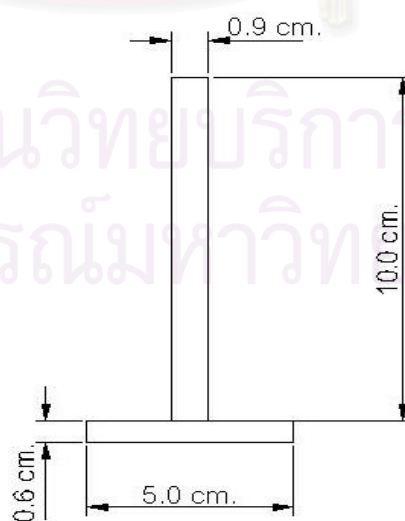
50 เมตร และระดับความดันเดิม (ระดับความดันด้านท้ายแบบจำลอง) เท่ากับ 30 เมตร นำข้อมูลดังกล่าวไปออกแบบเหล็กโครงสร้างของแบบจำลองต่อไป

ถ้าทำการเสริมคานเหล็กรัศรอบตัวแบบจำลองตามระยะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ก-2 และทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธี Column analogy โดยแรงดันที่กระทำกับโครงสร้างลดลงตามลักษณะของโค้งน้ำลด ในกรณีวิกฤตที่สุดที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง (กรณีที่ระดับความดันด้านบ่อบาดาลเท่ากับ 50 เมตร และระดับความดันด้านท้ายเท่ากับ 30 เมตร) จะเกิดโมเมนต์ที่ระยะต่างๆ จากศูนย์กลางบ่อบาดาลและค่า stiffness ของคานเหล็กที่ต้องการเพื่อรองรับโมเมนต์ดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ ก-1



รูปที่ ก-2 ตำแหน่งการเสริมคานเหล็กรัศรอบตัวแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี

หน้าตัดคานที่ทำการออกแบบ มีหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ ก-3 มีค่า stiffness เท่ากับ 21.86 เซนติเมตร² ซึ่งมากกว่าค่า stiffness ที่ต้องการจากการวิเคราะห์ (ค่าสูงสุด เท่ากับ 20.5 เซนติเมตร²)



รูปที่ ก-3 หน้าตัดคานที่ทำการออกแบบ

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็ก

ระยะจากศูนย์กลางบ่อบาดาล (เมตร)	ระดับความดัน (เมตร)	โมเมนต์ (กก.-ม.)	Stiffness (ชม. ²)
2.2	30	277.2	18.5
2.1	30	251.0	16.7
2.0	31	233.7	15.6
1.9	31	209.4	14.0
1.8	32	192.5	12.8
1.7	32	170.2	11.3
1.6	33	308.1	20.5
1.4	34	238.1	15.9
1.2	35	175.9	11.7
1.0	37	126.0	8.4
0.8	38	81.5	5.4
0.6	41	50.8	3.4
0.4	44	30.4	2.0
0.4	47	25.9	1.7
0.2	50	25.0	1.7

สรุปแล้วเครื่องมือที่ทำการออกแบบมีขอบเขตการใช้งานดังนี้

- 1) ค่าเรย์โนลด์ที่ผิวบ่อน้ำบาดาลสูงสุดเท่ากับ 1100
- 2) อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 0.0025 ลบ.ม./วินาที หรือ 150 ลิตร/นาที
- 3) ระดับความดันสูงสุดในบ่อน้ำบาดาล เท่ากับ 50 เมตรของน้ำ
- 4) ระดับความดันสูงสุดด้านท้ายแบบจำลอง เท่ากับ 30 เมตรของน้ำ

ภาคผนวก ข ผลสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์

ข.1 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน

การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน จะทำการสอบเทียบใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันด้วยวิธีมาตรฐาน และการสอบเทียบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยเซนเซอร์ที่นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันด้วยวิธีมาตรฐาน

ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันทั้ง 2 รุ่น ของ Honeywell คือ 4040PC100G5D ช่วงวัด 0-100 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งใช้ในการวัดระดับความดันในชั้นน้ำ และรุ่น 40PC001B มีช่วงการวัด 0-50 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งใช้ในการวัดระดับน้ำหน้าผายวัดอัตราการไหล เพื่อไปคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำต่อไป

การสอบเทียบทำโดยศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่ามี linearity สูงสุด คือ 0.134% of full scale ทั้งสองตัว แสดงว่าอยู่ในขีดจำกัดของความถูกต้องที่แสดงไว้ในเกณฑ์มาตรฐานของโรงงาน นั่นคือสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันตามที่โรงงานกำหนดได้ โดยมีรายละเอียดผลการทดสอบดังนี้

- เซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell : 4040PC100G5D” ดำเนินการสอบเทียบด้วย dead-weight tester โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกลาง ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ ข-1

- เซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell : 40PC001B” ดำเนินการสอบเทียบด้วย digital manometer โดยใช้อากาศบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ ข-2

ตารางที่ ข-1 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน “Honeywell : 4040PC100G5D”

Range : 0-100 psi / 0.5-4.5 volt DC			
Applied Pressure (psi)	Output Require (volt DC)	Actual Output (volt DC)	Error (volt DC)
Increasing Pressure :			
0.000	0.50000	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 mm Hg / 2.5-4.5 volt DC			
Applied Pressure (psi)	Output Require (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 :			
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			

2) การสอบเทียบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง ด้วยเซนเซอร์ที่นำไปทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน

เนื่องจากเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง (No.1 No.2 No.3 No.5 No.7 No.8 No.9 No.10 No.12 No.13 และ No.14) ไม่ได้นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน จึงต้องทำการสอบเทียบกับเซนเซอร์วัดความดันที่นำไปสอบเทียบด้วยวิธีมาตรฐาน ในที่นี้จะเรียกว่า “เซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน” เพื่อหาสมการที่ใช้ในการปรับแก้ความดันที่ได้โดยเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

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 2 นาที นำค่าระดับความดันที่เก็บได้มาเฉลี่ยเป็นระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์มาตรฐานที่ความเร็วรอบดังกล่าว

ข) ทำการทดลองเหมือนข้อ ก โดยเปลี่ยนเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง และเดินเครื่องสูบน้ำด้วยความเร็วรอบที่เท่ากับข้อ ก

ค) เมื่อทำครบทุกเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง แล้วให้กลับไปทำขั้นตอน ก และ ข อีกโดยเปลี่ยนค่าความเร็วรอบ

จากการสอบเทียบได้ผลการทดลอง แสดงในตารางที่ ข-3 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความดันที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน กับระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ตัวอื่นๆ ได้ดังนี้

No.1	:	$h = 0.0004(h_1)^3 - 0.0075(h_1)^2 + 1.0446$
No.2	:	$h = -0.0014(h_2)^3 + 0.0192(h_2)^2 + 0.9274$
No.3	:	$h = 0.0008(h_3)^3 - 0.0117(h_3)^2 + 1.0217$
No.5	:	$h = -0.0002(h_5)^3 + 0.0063(h_5)^2 + 0.9773$
No.7	:	$h = -0.0011(h_7)^3 + 0.0156(h_7)^2 + 0.9679$
No.8	:	$h = -0.0014(h_8)^3 + 0.0195(h_8)^2 + 0.9516$
No.9	:	$h = -0.0010(h_9)^3 + 0.0203(h_9)^2 + 0.8587$
No.10	:	$h = -0.0006(h_{10})^3 + 0.0102(h_{10})^2 + 0.9553$
No.12	:	$h = -0.0002(h_{12})^3 + 0.0014(h_{12})^2 + 1.0167$
No.13	:	$h = 0.0015(h_{13})^3 - 0.0218(h_{13})^2 + 1.0634$
No.14	:	$h = -0.0001(h_{14})^3 + 0.0015(h_{14})^2 + 0.9647$

เมื่อ h คือ ค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันตัวมาตรฐาน โดยที่ค่า h1 h2 h3 h5 h7 h8 h9 h10 h12 h13 และ h14 จะเป็นค่าระดับความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์ No.1 No.2 No.3 No.5 No.7 No.8 No.9 No.10 No.12 No.13 และ No.14 ตามลำดับ

ตารางที่ ข-3 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยเซนเซอร์ที่นำไปทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน

การทดสอบครั้งที่	ตัวมาตรฐาน (ม.)	No.1 (ม.)	No.2 (ม.)	No.3 (ม.)	No.5 (ม.)	No.7 (ม.)	No.8 (ม.)	No.9 (ม.)	No.10 (ม.)	No.12 (ม.)	No.13 (ม.)	No.14 (ม.)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3.616	3.535	3.694	3.653	3.627	3.584	3.604	3.916	3.671	3.547	3.601	3.733
3	6.958	6.881	7.015	7.103	6.895	6.817	6.833	7.283	6.966	6.836	7.074	7.179
4	10.220	10.139	10.521	10.350	10.060	10.141	10.196	10.585	10.214	10.096	10.258	10.570

ข.2 ผลการสอบเทียบเครื่อง data logger

จากการทดสอบเครื่อง data logger ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเปรียบเทียบความดันที่คำนวณได้จากเครื่อง data logger เมื่อใส่แรงดันมาตรฐานให้แก่เครื่อง data logger จะได้ผลการสอบเทียบดังแสดงในตารางที่ ข-4

ตารางที่ ข-4 ผลการสอบเทียบเครื่อง data logger

Applied Voltage (volt DC)	Output Required		Actual Output (m H ₂ O)	Error	
	(psi)	(m H ₂ O)		(m H ₂ 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

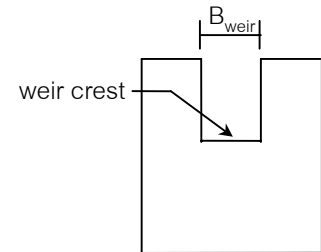
จากผลที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความดันระหว่างค่าที่ได้กับค่าจริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

ข.3 ผลการสอบเทียบฝายวัดอัตราการไหล

ฝายวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้คือ ฝายสันคม (sharp-crested weir) ซึ่งเป็นฝายที่นิยมใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำ โดยที่ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยม (rectangular notch weir) มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับระดับน้ำเหนือสันฝายดังนี้

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

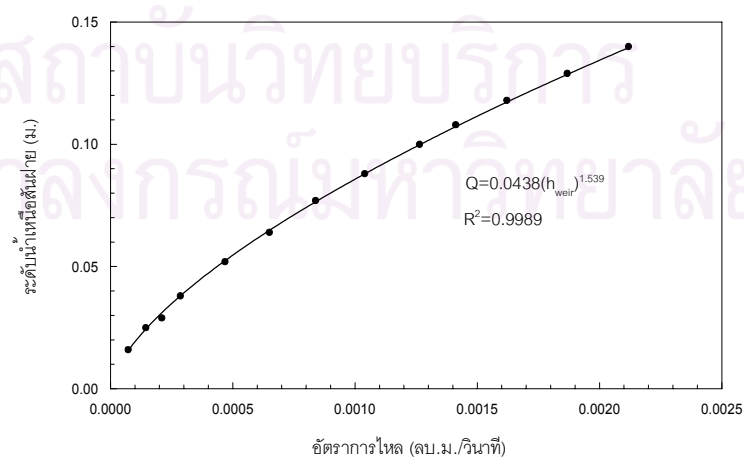
เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)
	c_d	คือ	สัมประสิทธิ์อัตราการไหล
	B_{weir}	คือ	ความกว้างของสันฝาย (ม.)
	h_{weir}	คือ	ระดับน้ำเหนือสันฝาย (ม.)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที ²)



การสอบเทียบฝายวัดอัตราการไหลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ขั้นพื้นฐาน ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถังวัดอัตราการไหลในการวัดอัตราการไหล ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ข-5 เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล แสดงดังรูปที่ ข-1 จะได้สมการของฝายวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองดังนี้

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

โดยค่า c_d เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.63



รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล

ตารางที่ ข-5 ผลการสอบเทียบฝายวัดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง

ความกว้างของสันฝาย(B_{weir}) = 2.12 ซม.

อุณหภูมิน้ำในการสอบเทียบ = 29 °C

การทดลอง	ระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir})		ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	เวลา (วินาที)	Q (ลิตร/วินาที)	Q_{avg} (ลิตร/วินาที)	$Q_{avg} * 10^{-5}$ (ลบ.ม./วินาที)	C_d
	หลอดวัดระดับน้ำ (ซม.)	ค่าเฉลี่ยจากเซ็นเซอร์ (มม.)						
1	0.00	70.0	0	-	0.000	0.000	0.0	-
			0	-	0.000			
			0	-	0.000			
2	1.60	86.0	1	14.42	0.069	0.072	7.2	0.57
			1	13.49	0.074			
			1	13.87	0.072			
3	2.50	95.0	2	13.25	0.151	0.144	14.4	0.58
			2	14.33	0.140			
			2	14.22	0.141			
4	2.90	99.0	3	14.25	0.211	0.209	20.9	0.68
			3	14.22	0.211			
			3	14.53	0.206			
5	3.80	108.0	3	10.44	0.287	0.285	28.5	0.61
			3	10.60	0.283			
			3	10.50	0.286			
6	5.20	122.0	5	10.71	0.467	0.468	46.8	0.63
			5	10.59	0.472			
			5	10.75	0.465			
7	6.40	134.0	5	7.50	0.667	0.650	65.0	0.64
			5	7.82	0.639			
			5	7.78	0.643			
8	7.70	147.0	5	5.81	0.861	0.838	83.8	0.63
			5	6.00	0.833			
			5	6.09	0.821			
9	8.80	158.0	5	4.72	1.059	1.039	103.9	0.64
			5	4.75	1.053			
			5	4.97	1.006			
10	10.00	170.0	10	7.90	1.266	1.264	126.4	0.64
			10	7.97	1.255			
			10	7.87	1.271			
11	10.80	178.0	10	7.13	1.403	1.411	141.1	0.64
			10	6.94	1.441			
			10	7.19	1.391			
12	11.80	188.0	10	6.00	1.667	1.621	162.1	0.64
			10	6.34	1.577			
			10	6.18	1.618			
13	12.90	199.0	10	5.03	1.988	1.868	186.8	0.64
			10	5.81	1.721			
			10	5.28	1.894			
14	14.00	210.0	10	5.15	1.942	2.118	211.8	0.65
			10	4.73	2.114			
			10	4.35	2.299			
								0.63

หมายเหตุ : ระดับความดันที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความดันต้องลบออก 70 มิลลิเมตร จึงจะเป็นระดับน้ำเหนือสันฝาย

ภาคผนวก ค
ผลการทดลอง

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

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

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ก่อนทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	0.6	0.12	0.12	99.88
No.10	1.65	5.0	0.97	1.09	98.91
No.16	1.19	483.1	93.95	95.04	4.96
No.20	0.83	23.2	4.51	99.55	0.45
No.30	0.59	1.7	0.33	99.88	0.12
No.50	0.30	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 (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	80.3	15.99	15.99	84.01
No.10	1.65	111.1	22.12	38.10	61.90
No.16	1.19	309.2	61.56	99.66	0.34
No.20	0.83	0.7	0.14	99.80	0.20
No.30	0.59	0.4	0.08	99.88	0.12
No.50	0.30	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 (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	118.6	23.82	23.82	76.18
No.10	1.65	199.1	39.99	63.81	36.19
No.16	1.19	164.3	33.00	96.81	3.19
No.20	0.83	7.9	1.59	98.39	1.61
No.30	0.59	3.6	0.72	99.12	0.88
No.50	0.30	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 (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	206.9	41.45	41.45	58.55
No.10	1.65	178.8	35.82	77.26	22.74
No.16	1.19	112.3	22.50	99.76	0.24
No.20	0.83	0.2	0.04	99.80	0.20
No.30	0.59	0.1	0.02	99.82	0.18
No.50	0.30	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 (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	0.7	0.14	0.14	99.86
No.10	1.65	6.8	1.34	1.48	98.52
No.16	1.19	477.6	94.33	95.81	4.19
No.20	0.83	19.8	3.91	99.72	0.28
No.30	0.59	1.2	0.24	99.96	0.04
No.50	0.30	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 (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	84.5	16.79	16.79	83.21
No.10	1.65	116.2	23.09	39.88	60.12
No.16	1.19	300.9	59.80	99.68	0.32
No.20	0.83	0.6	0.12	99.80	0.20
No.30	0.59	0.3	0.06	99.86	0.14
No.50	0.30	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
ถาด	-	0.1	0.02	100.00	0.00

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3 หลังทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	110.8	22.01	22.01	77.99
No.10	1.65	192.8	38.30	60.31	39.69
No.16	1.19	177.8	35.32	95.63	4.37
No.20	0.83	10.6	2.11	97.74	2.26
No.30	0.59	6.3	1.25	98.99	1.01
No.50	0.30	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
ถาด	-	0.1	0.02	100.00	0.00

ตารางที่ ค-8 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4 หลังทำการทดลอง

ขนาดตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	น้ำหนักสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
No.4	4.76	0.0	0.00	0.00	100.00
No.8	2.36	224.0	40.98	40.98	59.02
No.10	1.65	184.3	33.72	74.70	25.30
No.16	1.19	135.4	24.77	99.47	0.53
No.20	0.83	0.7	0.13	99.60	0.40
No.30	0.59	0.8	0.15	99.74	0.26
No.50	0.30	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
ถาด	-	0.2	0.04	100.00	0.00

ค.2 ผลการทดลองแบบมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำ
(ST1/S1 - ST14/S4)

การทดลองแบบมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ทำการทดสอบโดยวิธีความดันคงที่ (constant head) ในเพอร์เมียมิเตอร์รูปทรงกระบอก 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) Δh 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/ϕ คือ ความเร็วการไหลจริง
 - 8) Re' คือ ค่าเรย์โนลด์ คำนวณจากสมการที่ 2-13 $Re' = \left(\frac{V}{\phi}\right) \left(\frac{d_{50}}{v}\right)$
 - 9) l คือ ความลาดชันชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ Δh กับระยะห่างระหว่างจุดวัดระดับความดัน (0.8 เมตร)
- 10) f' คือ แฟคเตอร์เสียดทาน คำนวณจากสมการที่ 2-23 $f' = \frac{l g d_{50}}{2 \left(\frac{V}{\phi}\right)^2}$

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 44.491 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 25°C

ความถี่จําเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.897×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.414

การทดลอง	h_D (ม.)	h_U (ม.)	Δh (ม.)	h_{weir} (ซม.)	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	v/ϕ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
ST1/S1	0.705	0.632	0.073	0.85	0.000029	0.00097	0.0023	3.51	0.091	108.65
ST2/S1	0.806	0.651	0.155	1.40	0.000061	0.00210	0.0051	7.57	0.194	49.66
ST3/S1	0.963	0.670	0.293	2.10	0.000115	0.00391	0.0095	14.12	0.366	26.95
ST4/S1	1.113	0.706	0.407	2.60	0.000159	0.00544	0.0131	19.61	0.509	19.40
ST5/S1	1.355	0.743	0.612	3.30	0.000230	0.00785	0.0189	28.31	0.765	14.00
ST6/S1	1.546	0.776	0.770	3.70	0.000274	0.00936	0.0226	33.76	0.963	12.39
ST7/S1	1.750	0.816	0.934	4.10	0.000321	0.01096	0.0265	39.54	1.168	10.96
ST8/S1	1.998	0.856	1.142	4.50	0.000370	0.01264	0.0305	45.63	1.428	10.06
ST9/S1	2.358	0.938	1.420	5.15	0.000456	0.01556	0.0376	56.16	1.775	8.26
ST10/S1	3.399	1.376	2.023	6.00	0.000577	0.01969	0.0476	71.04	2.529	7.35
ST11/S1	4.358	1.577	2.781	7.10	0.000747	0.02551	0.0616	92.05	3.476	6.02
ST12/S1	6.135	1.980	4.155	8.60	0.001004	0.03426	0.0828	123.63	5.194	4.98
ST13/S1	8.602	2.548	6.054	10.20	0.001305	0.04455	0.1076	160.75	7.568	4.30
ST14/S1	10.116	2.926	7.190	11.10	0.001487	0.05074	0.1226	183.09	8.988	3.93

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.58 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 47.077 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 25°C

ความถี่จําเพาะ = 2.661

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.897×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.396

การทดลอง	h_D (ม.)	h_U (ม.)	Δh (ม.)	h_{weir} (ซม.)	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	v/ϕ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
ST1/S2	0.658	0.624	0.034	0.70	0.000021	0.00072	0.0018	3.21	0.043	99.23
ST2/S2	0.746	0.645	0.101	1.40	0.000061	0.00210	0.0053	9.33	0.126	34.91
ST3/S2	0.832	0.664	0.168	1.95	0.000102	0.00349	0.0088	15.53	0.210	20.94
ST4/S2	0.935	0.692	0.243	2.50	0.000150	0.00512	0.0129	22.76	0.304	14.10
ST5/S2	1.058	0.720	0.338	2.95	0.000193	0.00660	0.0167	29.37	0.423	11.78
ST6/S2	1.296	0.780	0.516	3.60	0.000263	0.00897	0.0226	39.90	0.645	9.74
ST7/S2	1.512	0.835	0.677	4.10	0.000321	0.01096	0.0277	48.74	0.846	8.57
ST8/S2	1.844	0.924	0.920	4.75	0.000403	0.01374	0.0347	61.12	1.150	7.40
ST9/S2	2.036	0.980	1.056	5.20	0.000463	0.01580	0.0399	70.26	1.320	6.43
ST10/S2	2.756	1.184	1.572	6.05	0.000584	0.01994	0.0504	88.69	1.965	6.01
ST11/S2	3.603	1.407	2.196	7.05	0.000739	0.02523	0.0637	112.24	2.745	5.24
ST12/S2	5.543	1.965	3.578	8.80	0.001040	0.03549	0.0896	157.88	4.473	4.31
ST13/S2	7.397	2.380	5.017	10.35	0.001335	0.04556	0.1151	202.66	6.271	3.67
ST14/S2	8.941	2.792	6.149	11.20	0.001507	0.05145	0.1299	228.84	7.686	3.53

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำต้วอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.80 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 46.142 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 25°C

ความถี่จําเพาะ = 2.654

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.897 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.407

การทดลอง	h_b (ม.)	h_u (ม.)	Δh (ม.)	h_{weir} (ซม.)	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	v/ϕ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
ST1/S3	0.662	0.626	0.036	0.80	0.000026	0.00089	0.0022	4.37	0.045	83.83
ST2/S3	0.733	0.640	0.093	1.50	0.000068	0.00233	0.0057	11.49	0.116	31.28
ST3/S3	0.809	0.654	0.155	2.10	0.000115	0.00391	0.0096	19.29	0.194	18.51
ST4/S3	0.890	0.674	0.216	2.55	0.000155	0.00528	0.0130	26.01	0.270	14.19
ST5/S3	1.055	0.702	0.353	3.20	0.000219	0.00748	0.0184	36.89	0.441	11.53
ST6/S3	1.200	0.730	0.470	3.70	0.000274	0.00936	0.0230	46.13	0.588	9.82
ST7/S3	1.376	0.774	0.602	4.10	0.000321	0.01096	0.0269	54.02	0.753	9.17
ST8/S3	1.572	0.812	0.760	4.60	0.000383	0.01308	0.0321	64.49	0.950	8.12
ST9/S3	1.789	0.864	0.925	5.15	0.000456	0.01556	0.0382	76.73	1.156	6.98
ST10/S3	2.604	1.255	1.349	6.25	0.000614	0.02096	0.0515	103.36	1.686	5.61
ST11/S3	3.202	1.377	1.825	7.15	0.000756	0.02579	0.0634	127.14	2.281	5.02
ST12/S3	4.735	1.723	3.012	8.70	0.001022	0.03488	0.0857	171.95	3.765	4.53
ST13/S3	6.175	2.164	4.011	10.00	0.001266	0.04321	0.1062	213.06	5.014	3.93
ST14/S3	8.008	2.628	5.380	11.30	0.001528	0.05215	0.1281	257.15	6.725	3.62

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองแบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทรายชั้นน้ำต้วอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 2.10 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 45.964 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 25°C

ความถี่จําเพาะ = 2.658

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.897 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.410

การทดลอง	h_b (ม.)	h_u (ม.)	Δh (ม.)	h_{weir} (ซม.)	Q (ลบ.ม./วินาที)	v (ม./วินาที)	v/ϕ (ม./วินาที)	Re'	l	f'
ST1/S4	0.625	0.591	0.034	0.90	0.000031	0.00106	0.0026	6.06	0.043	65.23
ST2/S4	0.722	0.640	0.082	1.60	0.000075	0.00257	0.0063	14.70	0.103	26.77
ST3/S4	0.777	0.650	0.127	2.10	0.000115	0.00391	0.0095	22.34	0.159	17.95
ST4/S4	0.864	0.666	0.198	2.70	0.000169	0.00576	0.0141	32.89	0.248	12.91
ST5/S4	0.947	0.680	0.267	3.20	0.000219	0.00748	0.0182	42.72	0.334	10.32
ST6/S4	1.018	0.693	0.325	3.50	0.000252	0.00859	0.0209	49.04	0.406	9.54
ST7/S4	1.211	0.727	0.484	4.20	0.000333	0.01137	0.0277	64.93	0.605	8.10
ST8/S4	1.375	0.758	0.617	4.70	0.000396	0.01352	0.0330	77.20	0.771	7.31
ST9/S4	1.542	0.788	0.754	5.25	0.000470	0.01603	0.0391	91.53	0.943	6.35
ST10/S4	1.902	0.864	1.038	6.05	0.000584	0.01994	0.0486	113.86	1.298	5.65
ST11/S4	2.763	1.287	1.476	7.20	0.000764	0.02606	0.0636	148.83	1.845	4.70
ST12/S4	3.854	1.534	2.320	8.70	0.001022	0.03488	0.0851	199.15	2.900	4.13
ST13/S4	5.105	1.857	3.248	10.00	0.001266	0.04321	0.1054	246.75	4.060	3.76
ST14/S4	5.762	2.089	3.673	10.60	0.001385	0.04727	0.1153	269.90	4.591	3.56

ค.3 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CR1/S1 - CR9/S4)

การทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำ และอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน โดยให้น้ำเข้าทางด้านท้ายแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี ในแต่ละอัตราการไหลเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล (h_w) และชั้นน้ำ ($h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$) จากการทดลองได้ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในตารางที่ ค-13 ถึง ค-16

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})= 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 372.527 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.401

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
CR1/S1	1.157	1.163	1.165	1.170	1.172	1.180	1.184	1.188	1.194	1.195	1.00
CR2/S1	1.160	1.175	1.182	1.191	1.199	1.214	1.222	1.236	1.245	1.247	1.70
CR3/S1	1.164	1.189	1.198	1.211	1.223	1.247	1.254	1.274	1.285	1.287	2.10
CR4/S1	1.182	1.315	1.364	1.432	1.486	1.574	1.631	1.684	1.730	1.752	5.00
CR5/S1	1.191	1.409	1.490	1.600	1.682	1.819	1.899	1.962	2.033	2.056	6.20
CR6/S1	1.197	1.485	1.593	1.738	1.830	2.010	2.091	2.200	2.282	2.303	7.00
CR7/S1	1.296	2.707	3.213	3.823	4.227	4.975	5.314	5.629	5.924	6.107	13.45
CR8/S1	1.308	2.921	3.486	4.229	4.719	5.424	5.903	6.217	6.590	6.643	14.00
CR9/S1	1.326	3.158	3.744	4.645	5.174	6.021	6.503	6.951	7.359	7.430	14.80

ตารางที่ ค-14 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})= 1.58 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 371.580 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.661

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.418

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
CR1/S2	1.155	1.159	1.161	1.164	1.166	1.171	1.174	1.177	1.180	1.182	1.00
CR2/S2	1.160	1.170	1.175	1.181	1.187	1.197	1.203	1.211	1.219	1.221	1.70
CR3/S2	1.163	1.182	1.189	1.200	1.206	1.220	1.228	1.241	1.247	1.249	2.10
CR4/S2	1.181	1.272	1.309	1.364	1.402	1.469	1.485	1.525	1.560	1.574	5.00
CR5/S2	1.190	1.348	1.408	1.483	1.530	1.635	1.675	1.740	1.788	1.800	6.20
CR6/S2	1.196	1.411	1.489	1.587	1.650	1.777	1.827	1.907	1.966	1.983	7.00
CR7/S2	1.295	2.340	2.728	3.179	3.413	3.946	4.253	4.521	4.647	4.743	13.45
CR8/S2	1.306	2.437	2.844	3.380	3.688	4.238	4.531	4.866	5.090	5.155	14.00
CR9/S2	1.324	2.671	3.122	3.721	4.075	4.783	4.964	5.391	5.713	5.759	14.80

ตารางที่ ค-15 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.80 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 372.459 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.415

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
CR1/S3	1.155	1.158	1.160	1.163	1.165	1.169	1.170	1.174	1.176	1.178	1.00
CR2/S3	1.160	1.169	1.173	1.179	1.183	1.192	1.197	1.205	1.211	1.213	1.70
CR3/S3	1.164	1.180	1.186	1.194	1.200	1.214	1.220	1.230	1.236	1.238	2.10
CR4/S3	1.181	1.262	1.291	1.339	1.367	1.430	1.455	1.491	1.519	1.528	5.00
CR5/S3	1.190	1.330	1.384	1.444	1.488	1.590	1.622	1.682	1.726	1.732	6.20
CR6/S3	1.196	1.382	1.444	1.531	1.588	1.706	1.762	1.842	1.884	1.898	7.00
CR7/S3	1.295	2.203	2.541	2.913	3.212	3.666	3.924	4.160	4.401	4.412	13.45
CR8/S3	1.305	2.340	2.696	3.140	3.417	3.890	4.129	4.437	4.639	4.684	14.00
CR9/S3	1.323	2.487	2.902	3.490	3.792	4.350	4.560	4.903	5.215	5.258	14.80

ตารางที่ ค-16 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 2.10 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 377.505 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.408

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
CR1/S4	1.155	1.157	1.159	1.161	1.163	1.166	1.168	1.169	1.171	1.173	1.00
CR2/S4	1.160	1.168	1.171	1.176	1.180	1.187	1.190	1.197	1.201	1.203	1.70
CR3/S4	1.163	1.177	1.182	1.189	1.194	1.204	1.210	1.218	1.223	1.225	2.10
CR4/S4	1.181	1.254	1.278	1.310	1.332	1.373	1.394	1.417	1.442	1.450	5.00
CR5/S4	1.190	1.307	1.344	1.400	1.434	1.502	1.542	1.575	1.613	1.618	6.20
CR6/S4	1.196	1.351	1.405	1.472	1.518	1.598	1.650	1.700	1.740	1.756	7.00
CR7/S4	1.295	2.095	2.301	2.670	2.869	3.251	3.478	3.693	3.758	3.801	13.45
CR8/S4	1.305	2.170	2.430	2.808	3.036	3.508	3.682	3.924	4.105	4.151	14.00
CR9/S4	1.323	2.310	2.616	3.103	3.314	3.818	4.052	4.327	4.478	4.520	14.80

ค.4 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล (DR1/S1 - DR9/S4)

การทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน โดยให้น้ำเข้าทางด้านบ่อน้ำบาดาล ในแต่ละอัตราการไหลเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล (h_w) และชั้นน้ำ ($h_{28}, h_{34}, \dots, h_{199}$) จากการทดลองได้ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในตารางที่ ค-17 ถึง ค-20

ตารางที่ ค-17 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})= 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 372.527 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.401

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
DR1/S1	0.671	0.666	0.663	0.658	0.654	0.646	0.642	0.638	0.635	0.633	1.00
DR2/S1	0.728	0.713	0.706	0.696	0.688	0.674	0.666	0.653	0.643	0.640	1.70
DR3/S1	0.769	0.747	0.737	0.722	0.712	0.692	0.681	0.663	0.649	0.645	2.10
DR4/S1	1.415	1.288	1.238	1.171	1.119	1.029	0.978	0.920	0.858	0.843	5.00
DR5/S1	1.940	1.746	1.655	1.545	1.471	1.312	1.240	1.155	1.092	1.060	6.20
DR6/S1	2.352	2.080	1.972	1.826	1.732	1.554	1.460	1.349	1.246	1.220	7.00
DR7/S1	9.481	8.221	7.627	7.100	6.435	5.772	5.493	4.966	4.645	4.607	13.45
DR8/S1	10.525	9.089	8.426	7.737	7.208	6.413	6.150	5.553	5.234	5.146	14.00
DR9/S1	11.993	10.287	9.670	8.862	8.202	7.311	6.991	6.333	5.968	5.838	14.80

ตารางที่ ค-18 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})= 1.58 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 371.580 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.661

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = $0.840 \cdot 10^{-6}$ ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.418

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
DR1/S2	0.660	0.656	0.654	0.650	0.648	0.642	0.640	0.637	0.634	0.633	1.00
DR2/S2	0.702	0.691	0.686	0.679	0.675	0.662	0.657	0.650	0.642	0.640	1.70
DR3/S2	0.732	0.716	0.709	0.699	0.691	0.676	0.668	0.658	0.649	0.645	2.10
DR4/S2	1.242	1.147	1.101	1.050	1.016	0.956	0.922	0.872	0.851	0.838	5.00
DR5/S2	1.682	1.531	1.464	1.386	1.338	1.244	1.196	1.126	1.068	1.054	6.20
DR6/S2	2.030	1.827	1.737	1.629	1.572	1.444	1.381	1.286	1.240	1.216	7.00
DR7/S2	8.173	7.211	6.756	6.381	5.974	5.421	5.224	4.900	4.641	4.563	13.45
DR8/S2	9.006	7.942	7.590	6.901	6.652	6.063	5.829	5.348	5.118	5.023	14.00
DR9/S2	10.397	9.136	8.651	8.034	7.592	6.892	6.608	6.275	5.946	5.818	14.80

ตารางที่ ค-19 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.80 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 372.459 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.840×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.415

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
DR1/S3	0.655	0.651	0.649	0.647	0.645	0.641	0.639	0.636	0.633	0.632	1.00
DR2/S3	0.692	0.683	0.679	0.672	0.668	0.660	0.654	0.647	0.641	0.639	1.70
DR3/S3	0.720	0.706	0.700	0.692	0.686	0.673	0.666	0.656	0.648	0.645	2.10
DR4/S3	1.186	1.111	1.078	1.030	1.003	0.934	0.916	0.886	0.846	0.836	5.00
DR5/S3	1.592	1.464	1.418	1.346	1.303	1.202	1.153	1.090	1.057	1.046	6.20
DR6/S3	1.915	1.739	1.673	1.591	1.510	1.407	1.347	1.286	1.227	1.207	7.00
DR7/S3	7.674	6.831	6.515	6.124	5.837	5.309	5.117	4.854	4.614	4.553	13.45
DR8/S3	8.416	7.526	7.194	6.700	6.425	5.836	5.638	5.294	5.069	4.975	14.00
DR9/S3	9.749	8.701	8.201	7.694	7.344	6.801	6.531	6.100	5.908	5.791	14.80

ตารางที่ ค-20 ผลการทดลองการไหลในแนวรัศมีออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 2.10 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 377.505 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 28°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.840×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.408

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)										h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{45}	h_{55}	h_{85}	h_{104}	h_{143}	$h_{180.5}$	h_{199}	
DR1/S4	0.650	0.648	0.647	0.644	0.643	0.639	0.637	0.635	0.633	0.632	1.00
DR2/S4	0.681	0.672	0.670	0.664	0.662	0.652	0.650	0.644	0.639	0.638	1.70
DR3/S4	0.704	0.693	0.690	0.681	0.676	0.667	0.661	0.654	0.646	0.644	2.10
DR4/S4	1.096	1.040	1.018	0.980	0.956	0.924	0.895	0.869	0.836	0.826	5.00
DR5/S4	1.466	1.372	1.334	1.273	1.243	1.165	1.133	1.089	1.052	1.042	6.20
DR6/S4	1.740	1.622	1.570	1.500	1.441	1.351	1.304	1.261	1.210	1.191	7.00
DR7/S4	6.733	6.067	5.869	5.495	5.347	4.864	4.656	4.533	4.299	4.262	13.45
DR8/S4	8.090	6.866	6.541	6.221	5.976	5.581	5.405	5.049	4.833	4.819	14.00
DR9/S4	8.676	7.920	7.568	7.142	6.850	6.284	6.153	5.883	5.608	5.542	14.80

ค.5 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล (CU1/S1 – CU5/S4)

การทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว ใช้ระบบหมุนเวียนน้ำและระบบควบคุม วัดและจัดเก็บข้อมูลของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน การทดลองให้น้ำเข้าทางด้านท้ายของแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียวในแต่ละอัตราการไหลเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล (h_w) และชั้นน้ำ ($h_{28}, h_{34}, \dots, h_{291}$) จากการทดลองได้ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในตารางที่ ค-21 ถึง ค-24

ตารางที่ ค-21 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})= 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 91.458 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27 °C

ความต่างจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.392

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
CU1/S1	1.193	1.200	1.207	1.213	1.220	1.234	1.257	1.295	1.345	1.397	1.436	1.00
CU2/S1	1.197	1.216	1.228	1.243	1.263	1.294	1.349	1.435	1.545	1.661	1.767	1.70
CU3/S1	1.203	1.228	1.245	1.267	1.297	1.343	1.421	1.545	1.705	1.868	2.000	2.10
CU4/S1	1.279	1.466	1.587	1.634	1.816	1.978	2.470	3.020	3.964	4.905	5.714	5.00
CU5/S1	1.306	1.567	1.749	1.854	2.144	2.461	3.197	4.168	5.632	6.974	8.322	6.20

ตารางที่ ค-22 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50})= 1.58 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 92.454 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27 °C

ความต่างจำเพาะ = 2.661

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.401

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
CU1/S2	1.193	1.198	1.201	1.208	1.213	1.223	1.239	1.265	1.297	1.337	1.368	1.00
CU2/S2	1.197	1.211	1.218	1.230	1.244	1.266	1.302	1.358	1.441	1.519	1.592	1.70
CU3/S2	1.202	1.221	1.234	1.250	1.268	1.299	1.346	1.432	1.544	1.660	1.758	2.10
CU4/S2	1.277	1.391	1.485	1.531	1.640	1.851	2.129	2.533	3.221	3.870	4.436	5.00
CU5/S2	1.304	1.485	1.626	1.684	1.918	2.184	2.644	3.380	4.392	5.403	6.323	6.20

ตารางที่ ค-23 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.80 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 90.957 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.409

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
CU1/S3	1.193	1.197	1.201	1.205	1.212	1.218	1.233	1.255	1.287	1.317	1.344	1.00
CU2/S3	1.197	1.209	1.216	1.225	1.239	1.253	1.289	1.338	1.401	1.473	1.534	1.70
CU3/S3	1.201	1.217	1.227	1.239	1.256	1.281	1.323	1.389	1.481	1.573	1.657	2.10
CU4/S3	1.275	1.375	1.445	1.498	1.544	1.812	2.009	2.403	2.944	3.500	3.999	5.00
CU5/S3	1.303	1.461	1.556	1.667	1.867	2.014	2.456	3.088	3.962	4.826	5.615	6.20

ตารางที่ ค-24 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 2.10 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 91.784 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27 °C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.405

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
CU1/S4	1.193	1.196	1.199	1.202	1.206	1.212	1.223	1.240	1.264	1.288	1.308	1.00
CU2/S4	1.197	1.207	1.212	1.219	1.228	1.242	1.267	1.303	1.355	1.407	1.452	1.70
CU3/S4	1.200	1.213	1.221	1.230	1.243	1.263	1.296	1.347	1.418	1.490	1.555	2.10
CU4/S4	1.275	1.361	1.412	1.471	1.555	1.682	1.892	2.230	2.693	3.157	3.579	5.00
CU5/S4	1.302	1.438	1.517	1.608	1.739	1.936	2.264	2.788	3.509	4.230	4.886	6.20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.6 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล (DU1/S1 – DU5/S4)

การทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาล ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว ใช้ระบบหมุนเวียนน้ำและระบบควบคุม วัดและจัดเก็บข้อมูลของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน การทดลองให้น้ำเข้าทางด้านบ่อน้ำบาดาล ในแต่ละอัตราการไหลเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวทำการบันทึกค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h_{weir}) และระดับความดันที่จุดต่างๆ ทั้งในบ่อน้ำบาดาล (h_w) และชั้นน้ำ ($h_{28}, h_{34}, \dots, h_{291}$) จากการทดลองได้ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในตารางที่ ค-25 ถึง ค-28

ตารางที่ ค-25 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 1

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) = 1.34 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 91.458 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.592

ความหนืดเปรียบเทียบ (ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.392

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
DU1/S1	1.478	1.470	1.465	1.457	1.447	1.434	1.414	1.375	1.320	1.268	1.220	1.00
DU2/S1	1.828	1.807	1.798	1.781	1.766	1.728	1.675	1.588	1.475	1.359	1.251	1.70
DU3/S1	2.087	2.063	2.048	2.022	1.989	1.943	1.873	1.752	1.581	1.422	1.271	2.10
DU4/S1	5.891	5.745	5.646	5.581	5.317	5.120	4.709	4.051	3.155	2.242	1.420	5.00
DU5/S1	8.596	8.364	8.145	8.026	7.815	7.334	6.802	5.680	4.241	2.800	1.509	6.20

ตารางที่ ค-26 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตัวอย่างที่ 2

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) = 1.58 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 92.454 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.661

ความหนืดเปรียบเทียบ (ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.401

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
DU1/S2	1.374	1.368	1.364	1.360	1.354	1.346	1.326	1.302	1.267	1.232	1.200	1.00
DU2/S2	1.624	1.611	1.602	1.592	1.580	1.553	1.518	1.458	1.378	1.297	1.222	1.70
DU3/S2	1.799	1.783	1.770	1.746	1.735	1.704	1.653	1.570	1.445	1.342	1.239	2.10
DU4/S2	4.552	4.445	4.375	4.313	4.156	4.001	3.709	3.242	2.601	1.956	1.372	5.00
DU5/S2	6.497	6.326	6.215	6.085	5.900	5.671	5.107	4.415	3.395	2.383	1.446	6.20

ตารางที่ ค-27 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 3

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 1.80 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 90.957 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.654

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

ความพรุน = 0.409

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
DU1/S3	1.345	1.340	1.336	1.332	1.326	1.320	1.303	1.280	1.249	1.215	1.186	1.00
DU2/S3	1.554	1.541	1.534	1.525	1.514	1.498	1.460	1.412	1.345	1.267	1.203	1.70
DU3/S3	1.683	1.665	1.657	1.643	1.630	1.604	1.558	1.489	1.405	1.301	1.216	2.10
DU4/S3	4.101	4.006	3.944	3.902	3.798	3.562	3.323	2.938	2.382	1.796	1.278	5.00
DU5/S3	5.863	5.711	5.612	5.528	5.303	5.107	4.657	4.021	3.120	2.223	1.397	6.20

ตารางที่ ค-28 ผลการทดลองการไหลในทิศทางเดียวออกจากบ่อน้ำบาดาลของทรายชั้นน้ำตื้นตัวอย่างที่ 4

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(d_{50}) = 2.10 มิลลิเมตร

น้ำหนัก = 91.784 กิโลกรัม

อุณหภูมิน้ำ = 27°C

ความถ่วงจำเพาะ = 2.658

ความหนืดเปรียบเทียบ(ν) = 0.860×10^{-6} ม.²/วินาที

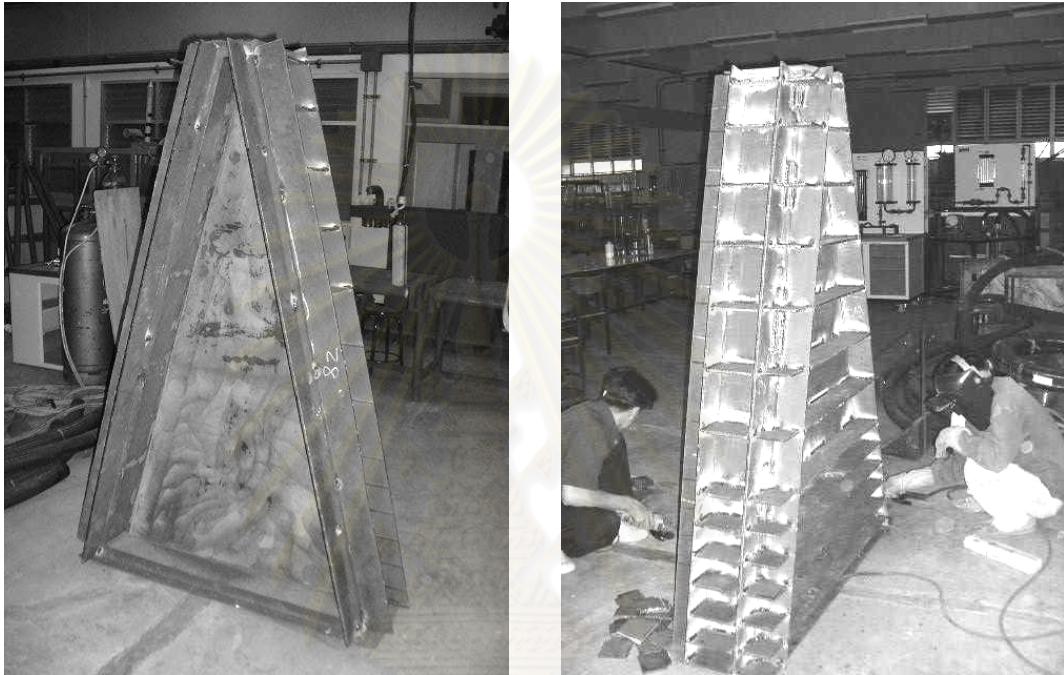
ความพรุน = 0.405

การทดลอง	ระดับความดันที่ตำแหน่งต่างๆ (เมตร)											h_{weir} (ซม.)
	h_w	h_{28}	h_{34}	h_{41}	h_{51}	h_{66}	h_{91}	h_{131}	h_{186}	h_{241}	h_{291}	
DU1/S4	1.288	1.284	1.282	1.279	1.274	1.268	1.257	1.240	1.216	1.193	1.171	1.00
DU2/S4	1.444	1.436	1.430	1.423	1.414	1.399	1.376	1.337	1.285	1.233	1.185	1.70
DU3/S4	1.555	1.542	1.534	1.525	1.512	1.492	1.459	1.406	1.333	1.261	1.195	2.10
DU4/S4	3.542	3.462	3.410	3.350	3.264	3.136	2.921	2.578	2.105	1.633	1.204	5.00
DU5/S4	4.860	4.734	4.654	4.560	4.426	4.225	3.890	3.354	2.617	1.880	1.210	6.20

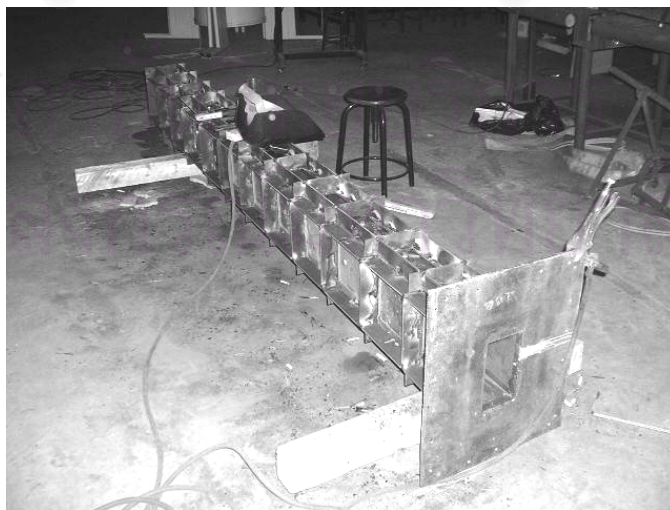
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง ภาพการทดลองและอุปกรณ์

ภาคผนวก ง เป็นการรวบรวมภาพถ่ายของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ตั้งแต่ขั้น
ตอนการประดิษฐ์ รวมถึงภาพถ่ายขณะดำเนินการทดลองในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ ง-1 การประกอบโครงสร้างเหล็กของแบบจำลองการไหลในแนวรัศมี



รูปที่ ง-2 การประกอบโครงสร้างเหล็กของแบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว



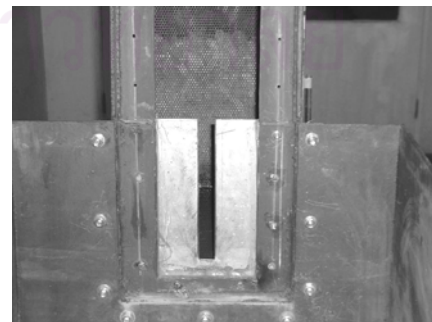
รูปที่ ง-3 การประกอบถังเก็บน้ำ



รูปที่ ง-4 การทำเกลียวที่แผ่นพลาสติกและการติดเซนเซอร์วัดความดัน



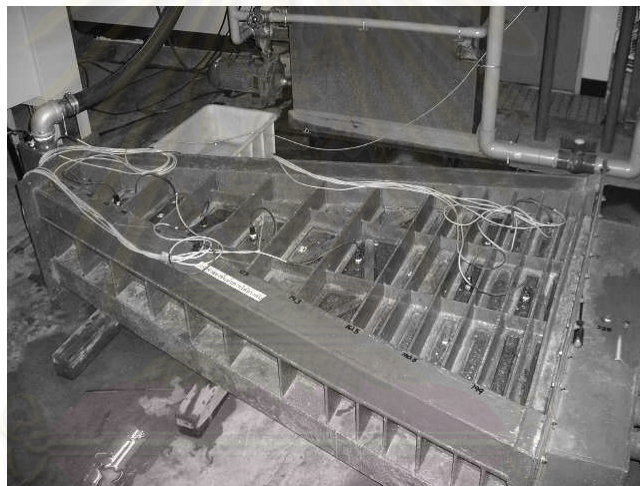
รูปที่ ง-5 ป่อน้ำบาดาลทดลอง



รูปที่ ง-6 ฝ่ายวัดอัตราการไหล



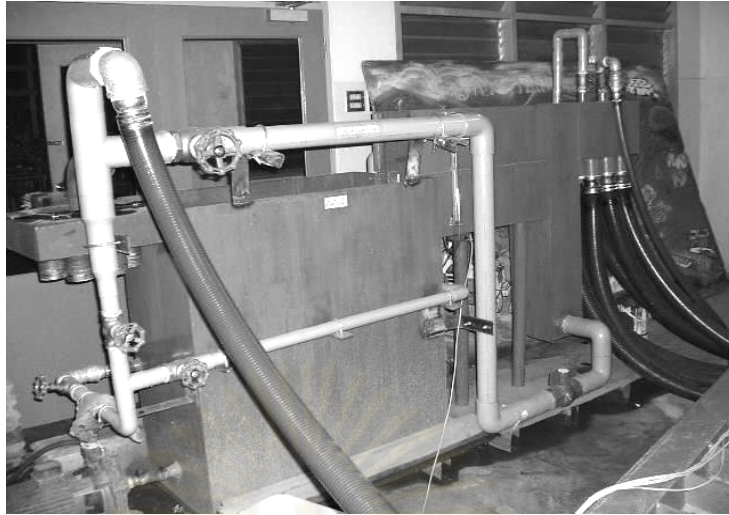
รูปที่ ง-7 ภาพรวมของเครื่องจำลองการสูบน้ำและอัดเติมน้ำภายใต้แรงดัน



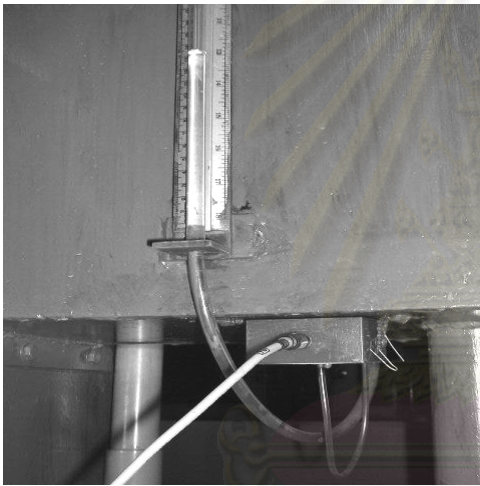
รูปที่ ง-8 แบบจำลองการไหลในแนวรัศมี



รูปที่ ง-9 ภาพถ่ายขณะทำการทดลองการไหลในแนวรัศมี



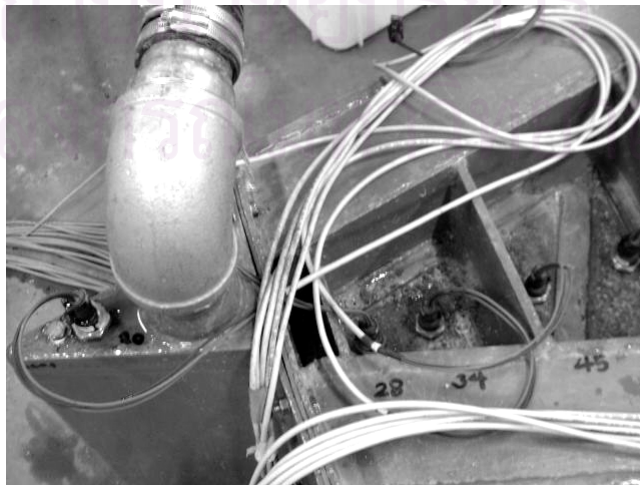
รูปที่ ง-10 ระบบหมุนเวียนน้ำ



รูปที่ ง-11 หลอดวัดระดับน้ำและเซนเซอร์วัดความดัน
สำหรับวัดระดับน้ำเหนือสันฝาย



รูปที่ ง-12 การไหลของน้ำผ่านสันฝาย



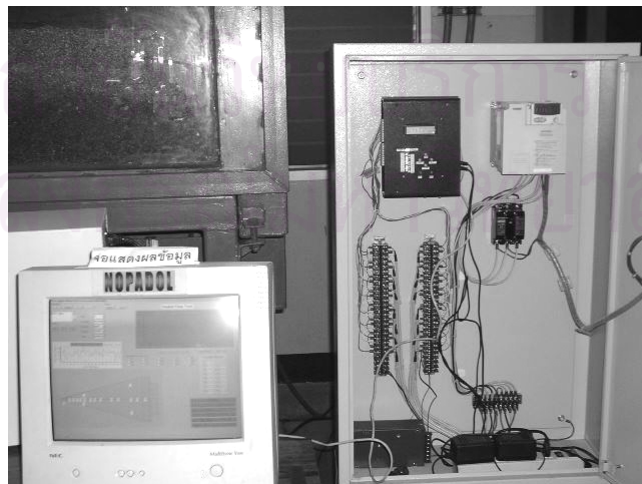
รูปที่ ง-13 การติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันที่บ่อน้ำบาดาลและชั้นน้ำ



รูปที่ ง-14 เซนเซอร์วัดความดันสำหรับวัดระดับน้ำเหนือสันฝาย



รูปที่ ง-15 เซนเซอร์วัดความดันสำหรับวัดระดับความดันในชั้นน้ำ



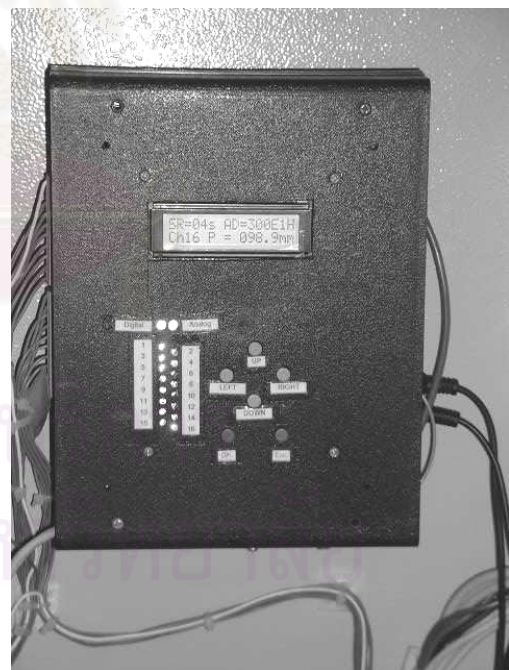
รูปที่ ง-16 การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องdata logger กับคอมพิวเตอร์



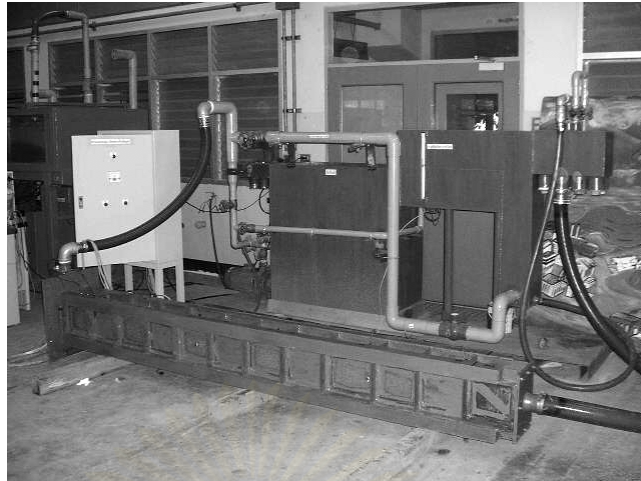
รูปที่ ง-17 ภายนอกและภายในตู้ควบคุม



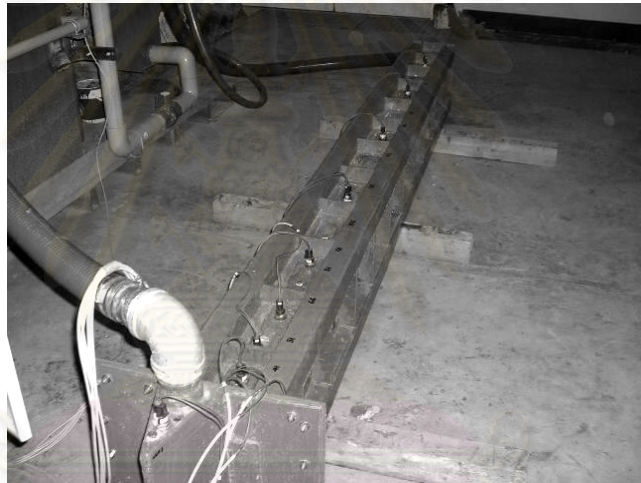
รูปที่ ง-18 ตัวรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ



รูปที่ ง-19 เครื่อง data logger



รูปที่ ง-20 ชุดเครื่องมือทดลองการไหลในทิศทางเดียว



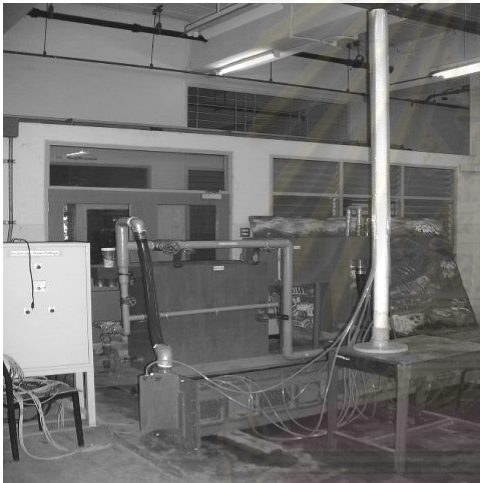
รูปที่ ง-21 แบบจำลองการไหลในทิศทางเดียว



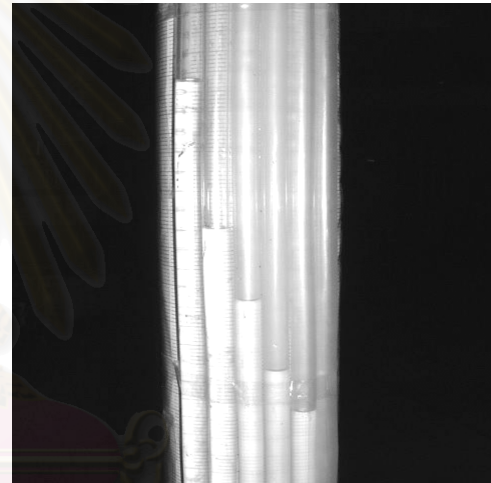
รูปที่ ง-22 ภาพขณะทำการทดลองการไหลในทิศทางเดียว



รูปที่ ง-23 การยกแบบจำลองขึ้นเพื่อใส่ทราย



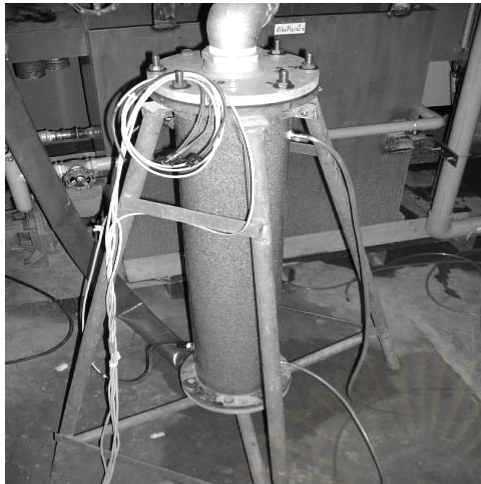
รูปที่ ง-24 การใช้สายยางวัดระดับความดัน



รูปที่ ง-25 ระดับน้ำในสายยางวัดระดับความดัน



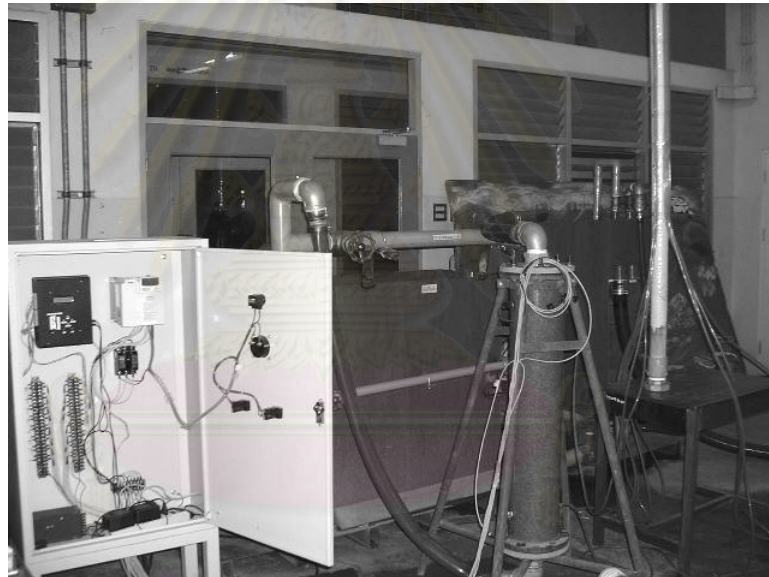
รูปที่ ง-26 การติดตั้งสายยางวัดระดับความดัน



รูปที่ ง-27 เพอร์ไมเอมิเตอร์ทรงกระบอก



รูปที่ ง-28 การต่อท่ออ่อนเข้าระบบหมุนเวียนน้ำ



รูปที่ ง-29 ภาพขณะทำการทดลองการไหลแบบมาตรฐาน

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ : นายนพดล เฉลิมชัยรัตน์กุล
- วันที่เกิด : 7 ธันวาคม พ.ศ. 2518
- สถานที่เกิด : จังหวัดปทุมธานี
- ประวัติการศึกษา :
- | | |
|---------------|---|
| 2536-2539 | ศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2542-ปัจจุบัน | ศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
- ประวัติการทำงาน :
- | | |
|---------------|--|
| 2540-2541 | บริษัทอินเตอร์เนชั่นแนล โปรเจ็ค แอดมินิสเตรชั่น จำกัด
ตำแหน่งวิศวกรสนาม |
| 2545-ปัจจุบัน | การประปาส่วนภูมิภาค
ตำแหน่งวิศวกร 4 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย