

ผลและวิจารณ์

ความสามารถในการซึมได้ของตัวกลางพรุน

ตัวกลางพรุนได้ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างทรายหยาบสภาพปกติ 1.55 ซม./วินาที และตัวอย่างทรายหยาบสภาพแน่น 1.09 ซม./วินาที นอกจากนี้ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างทรายละเอียดสภาพปกติ 6.18×10^{-2} ซม./วินาที และตัวอย่างทรายละเอียดสภาพแน่น 3.59×10^{-2} ซม./วินาที

ทรายหยาบสภาพปกติมีความหนาแน่นแห้ง 1.62 กรัม/ลบ.ซม. อัตราส่วนช่องว่าง 0.61 และทรายหยาบสภาพแน่นมีความหนาแน่นแห้ง 1.76 กรัม/ลบ.ซม. อัตราส่วนช่องว่าง 0.49 สำหรับรายละเอียดของทรายละเอียดสภาพปกติมีความหนาแน่นแห้ง 1.58 กรัม/ลบ.ซม. อัตราส่วนช่องว่าง 0.69 และทรายหยาบสภาพแน่นมีความหนาแน่นแห้ง 1.69 กรัม/ลบ.ซม. อัตราส่วนช่องว่าง 0.58 รายละเอียดทั้งหมดสามารถสรุปดังตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของตัวกลางพรุน

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของตัวกลางพรุน

คุณสมบัติ	ทรายหยาบ		ทรายละเอียด	
	ปกติ	แน่น	ปกติ	แน่น
ค่าความซึมน้ำ (ซม./วินาที)	1.55	1.09	6.18×10^{-2}	3.59×10^{-2}
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	1.62	1.76	1.58	1.69
อัตราส่วนช่องว่าง (e)	0.61	0.49	0.69	0.58
ความถ่วงจำเพาะ	2.62		2.68	

จากการเทียบเคียงสมการความสัมพันธ์ของ Shahabi, Das and Tarquin (1984) (1956) และ Hazen (1911) พบว่า ค่าความซึมน้ำของทรายหยาบ 1.37 ซม./วินาที และทรายละเอียด 3.24×10^{-2} ซม./วินาที ตามลำดับ โดยรายละเอียดของการทดสอบคุณสมบัติต่างๆแสดงในภาคผนวก ข

จากการทดลองจะเห็นว่าตัวอย่างทรายหยาบ มีค่า $D_{10} = 0.67$ มม. ค่า $D_{30} = 0.85$ มม. และค่า $D_{60} = 1.3$ มม. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค 1.2 มม. ดังภาพที่ 31

$$\text{ค่า } Cu = 1.94$$

$$\text{ค่า } Cc = 0.83$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่าชี้ให้เห็นว่าตัวกลางพรุนมีขนาดค่อนข้างไม่ดี นอกจากนี้จะเห็นว่าจากกราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินเป็นแบบ Uniform graded ขนาดเม็ดดินส่วนใหญ่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์มีขนาดระหว่าง 0.6 ถึง 2 มม.

สำหรับตัวอย่างทรายละเอียด มีค่า $D_{10} = 0.18$ มม. ค่า $D_{30} = 0.24$ มม. และค่า $D_{60} = 0.36$ มม. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค 0.3 มม. ดังภาพที่ 32

$$\text{ค่า } Cu = 2$$

$$\text{ค่า } Cc = 0.89$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่าชี้ให้เห็นว่าตัวกลางพรุนมีขนาดค่อนข้างไม่ดี นอกจากนี้จะเห็นว่าจากกราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน เป็นแบบ Uniform graded ขนาดเม็ดดินส่วนใหญ่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์มีขนาดระหว่าง 0.15 ถึง 0.6 มม.

การทดลองแบบจำลองกายภาพ

ผลการทดสอบแบบจำลองกายภาพในกรณีของทรายหยาบและทรายละเอียดได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองแบบจำลองกายภาพในทรายหยาบ

กรณี	Δh (cm)	z (cm)	L (cm)	Qเฉลี่ย (ml/s)	H (cm)	B (cm)	$\frac{Q}{k \cdot \Delta h^2}$	$\frac{L}{H}$	$\frac{H}{Z}$
1	5	10	80	76.8	40	12.5	2.0	16.0	4.0
2	10	10	80	126.2	40	12.5	0.8	8.0	4.0
3	15	10	80	176.6	40	12.5	0.5	5.3	4.0
4	5	10	100	78.3	40	12.5	2.0	20.0	4.0
5	10	10	100	144	40	12.5	0.9	10.0	4.0
6	15	10	100	200.8	40	12.5	0.6	6.7	4.0
7	5	10	120	98.17	40	12.5	2.5	24.0	4.0
8	10	10	120	148.5	40	12.5	1.0	12.0	4.0
9	15	10	120	234	40	12.5	0.7	8.0	4.0
10	5	15	80	60	40	12.5	1.5	16.0	2.7
11	10	15	80	121.6	40	12.5	0.8	8.0	2.7
12	15	15	80	169.6	40	12.5	0.5	5.3	2.7
13	5	15	100	66.4	40	12.5	1.7	20.0	2.7
14	10	15	100	128.8	40	12.5	0.8	10.0	2.7
15	15	15	100	182	40	12.5	0.5	6.7	2.7
16	5	15	120	65.8	40	12.5	1.7	24.0	2.7
17	10	15	120	126.2	40	12.5	0.8	12.0	2.7
18	15	15	120	182.2	40	12.5	0.5	8.0	2.7
19	5	20	80	50	40	12.5	1.3	16.0	2.0
20	10	20	80	107	40	12.5	0.7	8.0	2.0
21	15	20	80	150	40	12.5	0.4	5.3	2.0
22	5	20	100	52	40	12.5	1.3	20.0	2.0
23	10	20	100	109.2	40	12.5	0.7	10.0	2.0
24	15	20	100	157.8	40	12.5	0.5	6.7	2.0
25	5	20	120	57	40	12.5	1.5	24.0	2.0
26	10	20	120	109.6	40	12.5	0.7	12.0	2.0
27	15	20	120	158.4	40	12.5	0.5	8.0	2.0

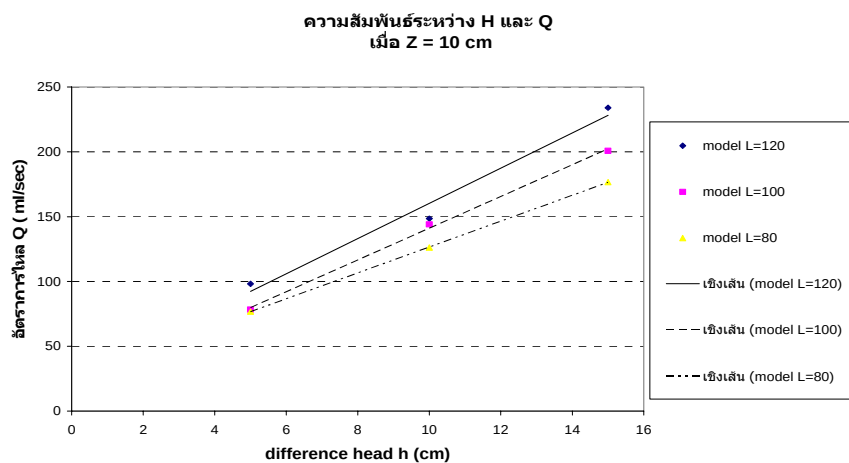
ตารางที่ 7 แสดงผลการทดลองแบบจำลองกายภาพในทรายละเอียด

กรณี	Δh (cm)	z (cm)	L (cm)	Qเฉลี่ย (ml/s)	H (cm)	B (cm)	$\frac{Q}{k \cdot \Delta h^2}$	$\frac{L}{H}$	$\frac{H}{Z}$
1	5	15	80	2.50	40	12.5	1.6	16.0	2.7
2	10	15	80	4.90	40	12.5	0.8	8.0	2.7
3	15	15	80	6.60	40	12.5	0.5	5.3	2.7
4	5	15	100	2.80	40	12.5	1.8	20.0	2.7
5	10	15	100	5.12	40	12.5	0.8	10.0	2.7
6	15	15	100	6.83	40	12.5	0.5	6.7	2.7
7	5	15	120	2.90	40	12.5	1.9	24.0	2.7
8	10	15	120	5.20	40	12.5	0.8	12.0	2.7
9	15	15	120	7.10	40	12.5	0.5	8.0	2.7

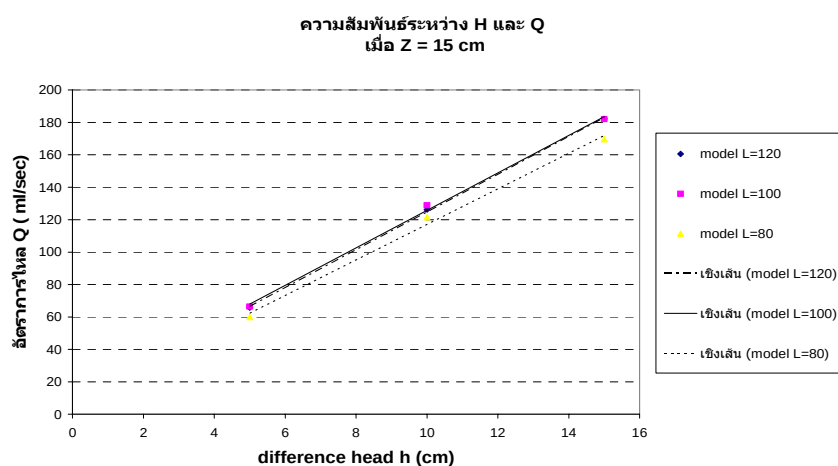
สำหรับรายละเอียดการวัดระดับน้ำที่ตำแหน่งต่างๆแสดงได้ในภาคผนวก ค

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าขนาดของแบบจำลองต่างกัน ส่งผลต่อปริมาณการไหลซึม ต่างๆกัน ได้แก่

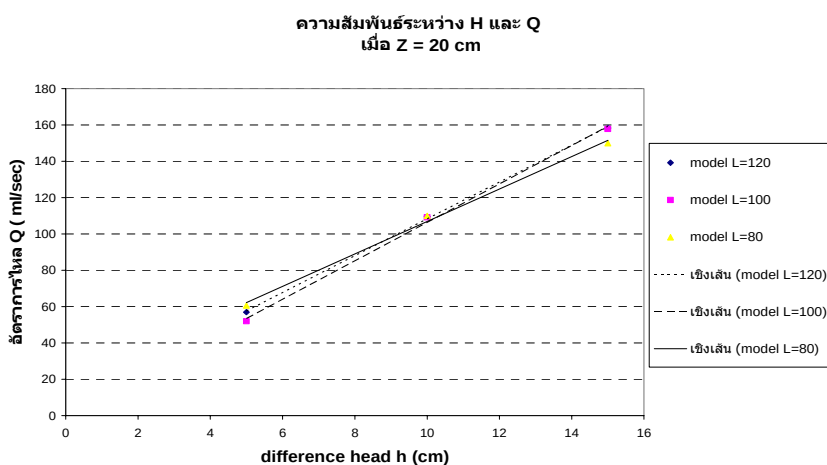
1. ปริมาณการไหลเป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับความแตกต่างของศักย์น้ำระหว่างด้านเหนือน้ำ และทำน้ำแสดงดังภาพที่ 33 ถึงภาพที่ 35
2. ปริมาณการไหลเป็นส่วนผกผันกับระยะฝั่งของผนังที่บน้ำแสดงดังภาพที่ 36 ถึงภาพที่ 38
3. ขนาดของแบบจำลองที่ใหญ่ขึ้นทำให้ปริมาณการไหลเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 39 ถึงภาพที่ 41
4. ปริมาณการไหลขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางพรุนด้านความสามารถในการไหลซึม ดังนั้นปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านทรายหยาบมีค่ามากกว่าปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านทรายละเอียดดังแสดงตามภาพที่ 42



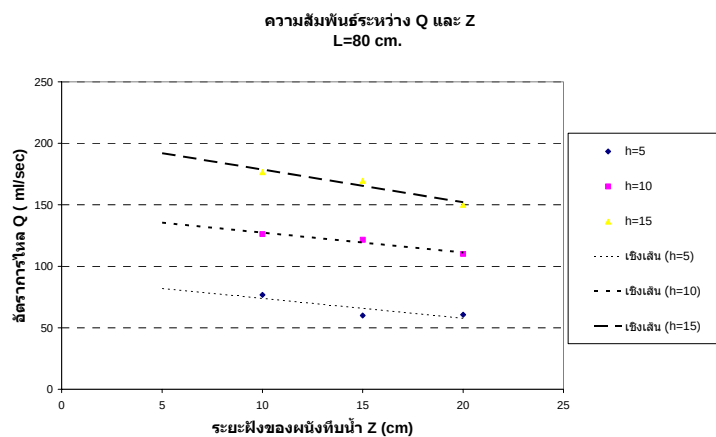
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความต่างของศักย์น้ำ กรณีระยะฝัง 10 ซม.



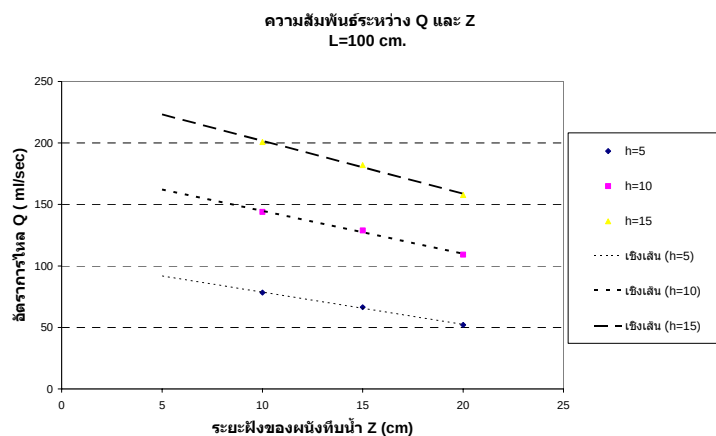
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความต่างของศักย์น้ำ กรณีระยะฝัง 15 ซม.



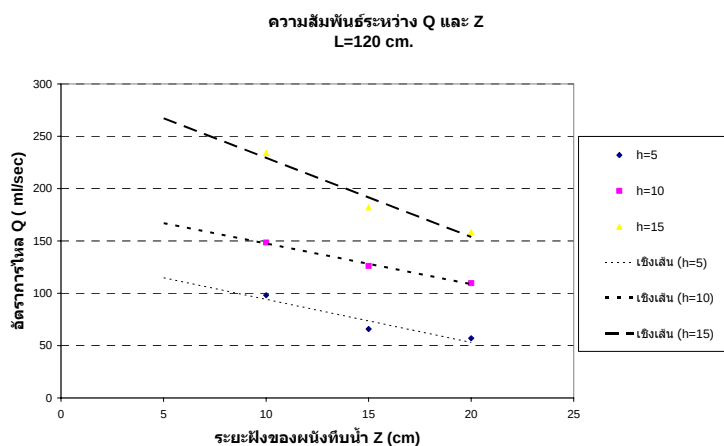
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความต่างของศักย์น้ำ กรณีระยะฝัง 20 ซม.



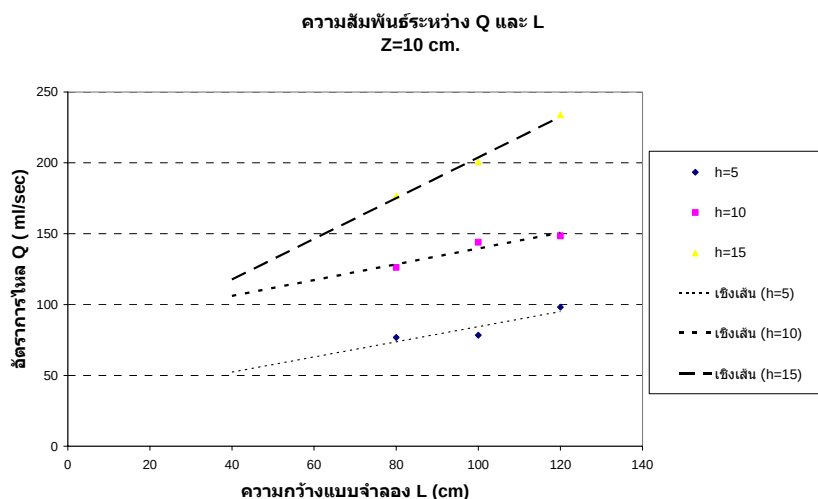
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะฝั่ง กรณีความกว้างแบบจำลอง 80 ซม.



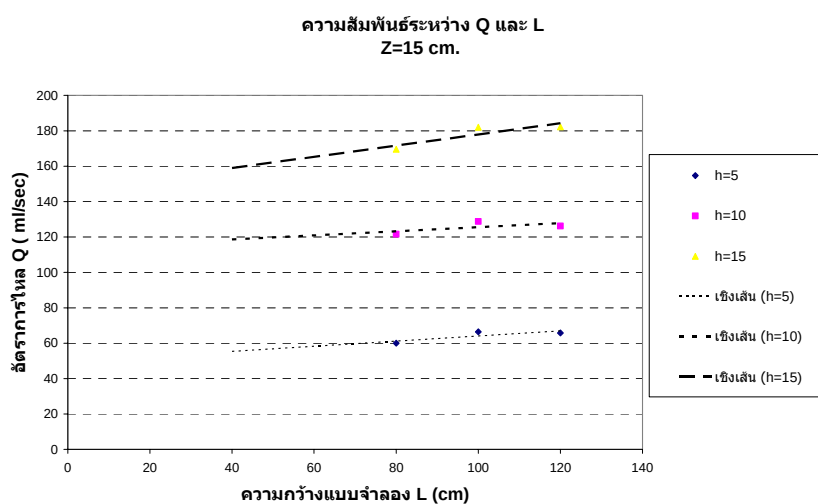
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะฝั่ง กรณีความกว้างแบบจำลอง 100 ซม.



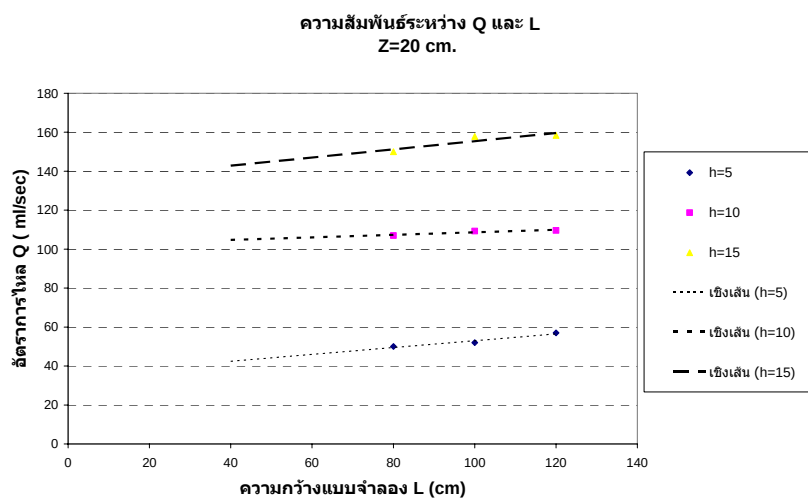
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะฝั่ง กรณีความกว้างแบบจำลอง 120 ซม.



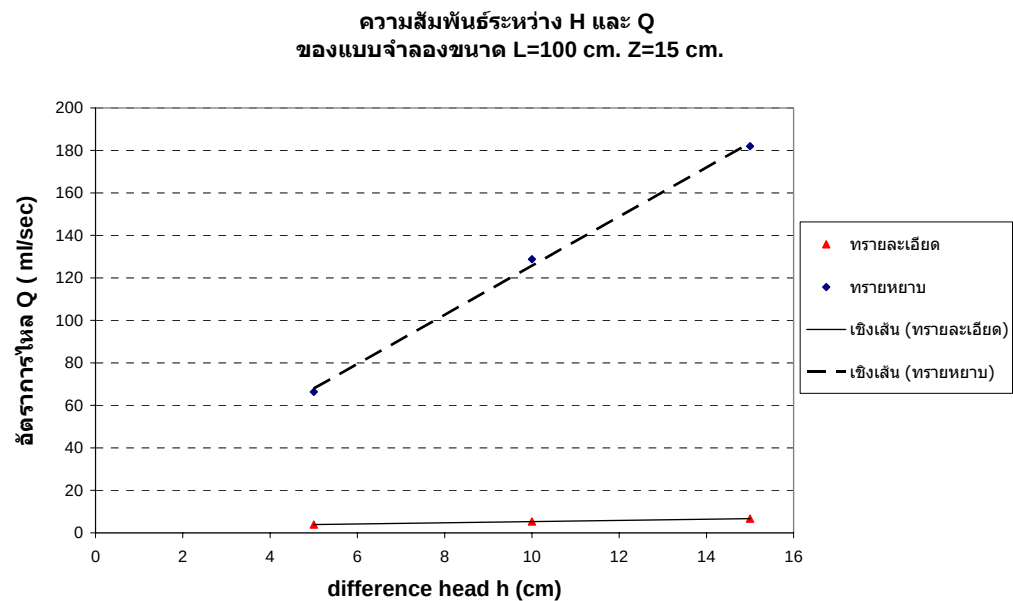
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความกว้างแบบจำลอง กรณีระยะฝัง 10 ซม.



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความกว้างแบบจำลอง กรณีระยะฝัง 15 ซม.

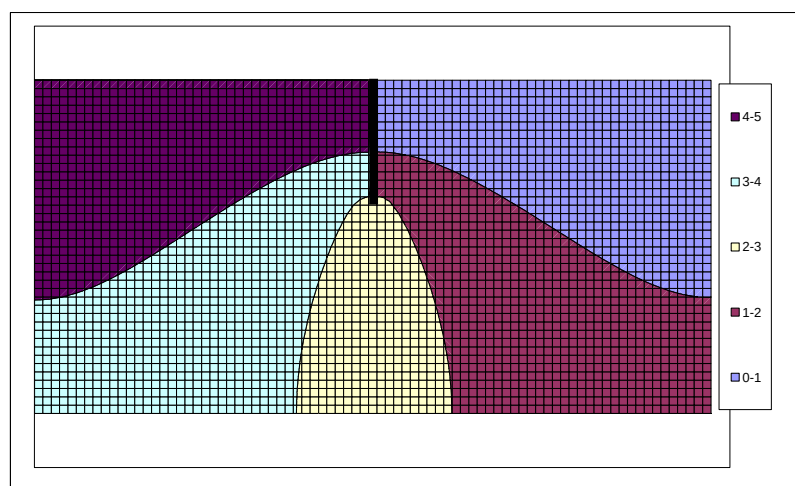


ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความกว้างแบบจำลอง กรณีระยะฝัง 20 ซม.

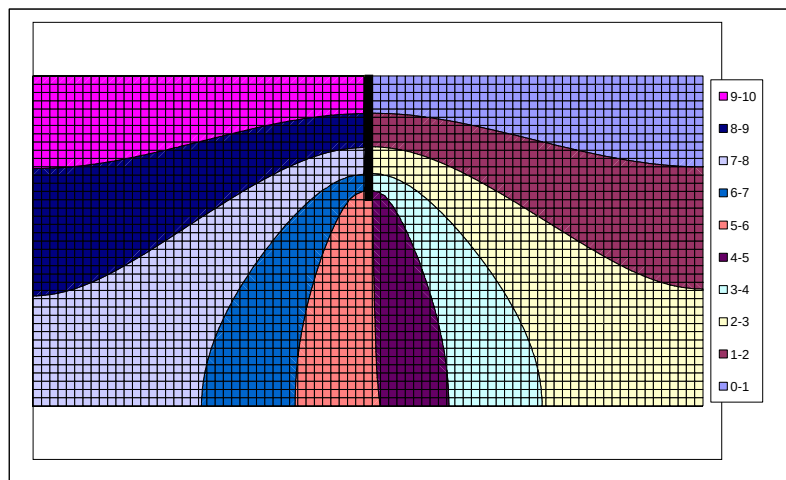


ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความต่างของศักย์น้ำ กรณีแบบจำลองขนาด 100 ซม. ระยะฝัง 20 ซม. ของทรายหยาบและทรายละเอียด

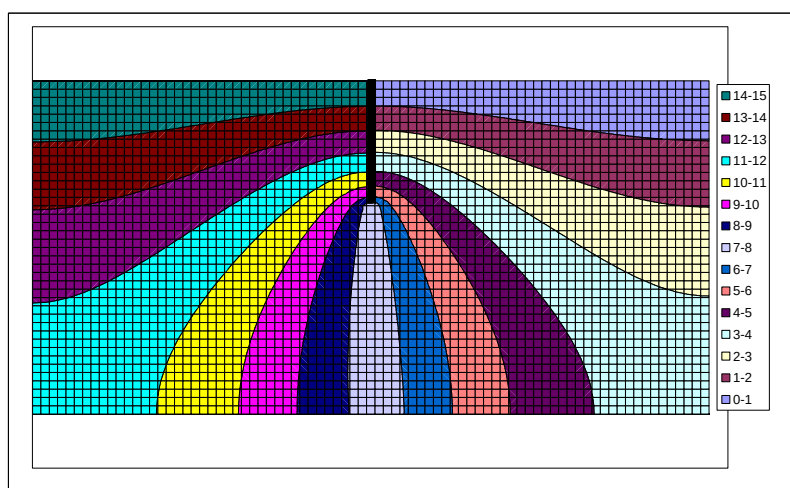
จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องทำให้ได้ผลการกระจายศักย์น้ำบนพื้นที่การไหลซึม ดังแสดงในภาพที่ 43 ถึงภาพที่ 45



ภาพที่ 43 การกระจายศักย์น้ำสำหรับกรณีที่ 1 (N1 ทรายละเอียด)



ภาพที่ 44 การกระจายศักย์น้ำสำหรับกรณีที่ 2 (N2ทรายละเอียด)

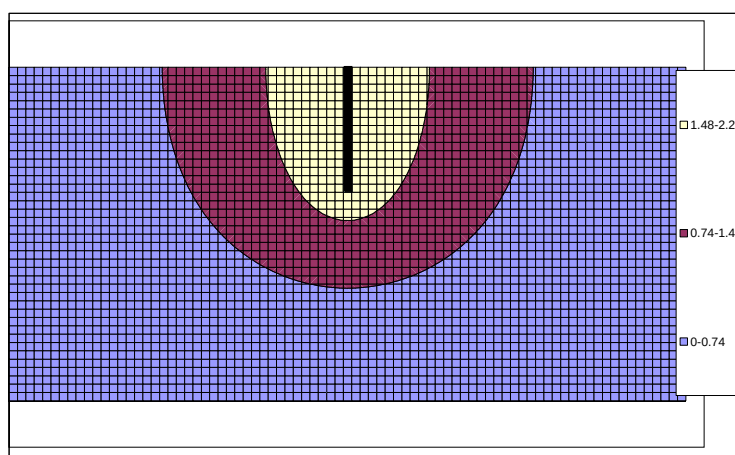


ภาพที่ 45 การกระจายศักย์น้ำสำหรับกรณีที่ 3 (N3ทรายละเอียด)

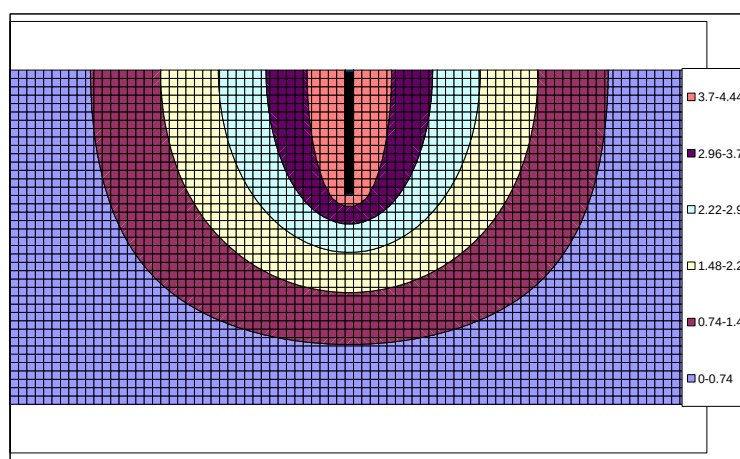
จากภาพที่ 43 ถึงภาพที่ 45 จะเห็นได้ว่าบนพื้นที่การไหลซึมทั้ง 3 กรณี มีขนาด $80 \times 40 \text{ cm}^2$ โดยพื้นที่กริดที่ถูกแบ่งย่อยมีขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ สำหรับการกระจายศักย์การไหลมีคอลัมน์พิเศษได้ผนังที่บ้น้ำเพิ่มมาหนึ่งคอลัมน์ พื้นที่การไหลซึม จึงมีขนาด $81 \times 40 \text{ cm}^2$ แต่จะไม่ส่งผลต่อการคำนวณหาปริมาณการไหลซึม แถบสีเดียวกันจะแสดงค่าศักย์น้ำในช่วง 1 เซนติเมตร ศักย์น้ำเพิ่มขึ้นหรือลดหล่นตามชั้นของแถบสี สังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำเมื่อเทียบกับระยะทางการไหลซึม ในช่วงใกล้กับผนังที่บ้น้ำมีการเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำมากกว่าการเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำ

ของพื้นที่การไหลซึมที่ห่างออกไป และการกระจายศักย์น้ำค่อนข้างสม่ำเสมอและแนวการกระจายศักย์การไหลมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรกันทั้งสองด้านของพื้นที่การไหล

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องทำให้ได้ผลการกระจายปริมาณการไหลบนพื้นที่การไหลซึมดังแสดงในภาพที่ 46 ถึงภาพที่ 48

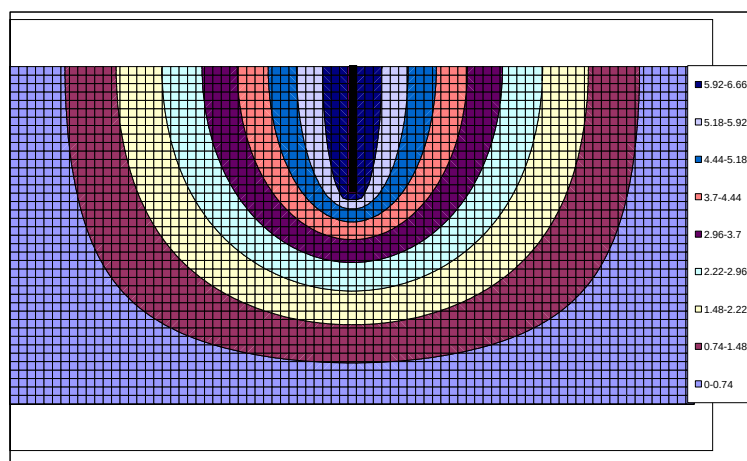


ภาพที่ 46 แนวเส้นการไหลสำหรับกรณีที่ 1 (N1ทรายละเอียด)



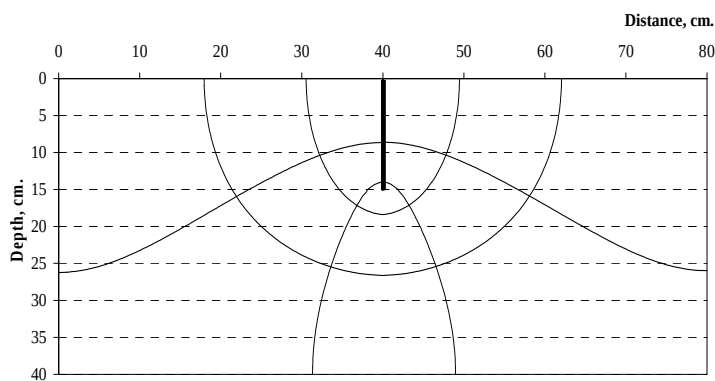
ภาพที่ 47 แนวเส้นการไหลสำหรับกรณีที่ 2 (N2ทรายละเอียด)

จากภาพที่ 46 ถึงภาพที่ 48 จะเห็นได้ว่า แถบสีเดียวกันจะแสดงค่าปริมาณการไหลซึม ในช่วง 0.74 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าปริมาณการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามชั้นของ แถบสี แนวการไหลที่ขอบนอกของพื้นที่การไหลซึมมีค่าน้อยสุดซึ่งเริ่มจากศูนย์และเพิ่มขึ้นมาเมื่อ แถบสีชั้นเข้าใกล้ผนังทึบน้ำ สังเกตได้ว่าปริมาณการไหลในช่วงใกล้กับผนังทึบน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ เทียบกับพื้นที่การไหลขนาดเดียวกัน

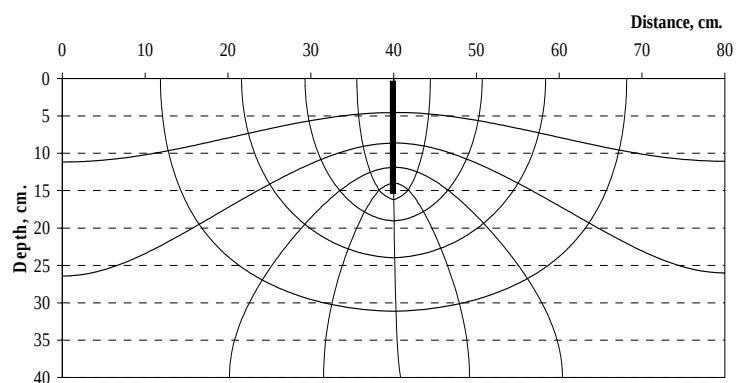


ภาพที่ 48 แนวเส้นการไหลสำหรับกรณีที่ 3 (N3ทรายละเอียด)

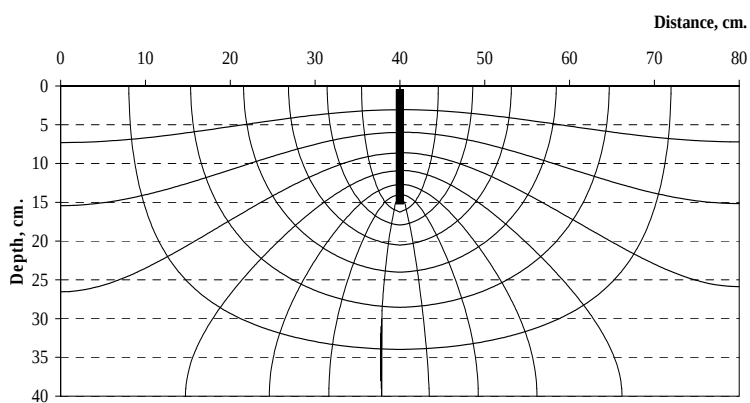
จากการรวมค่าศักย์น้ำและแนวการไหลซึมเข้าไว้ด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 49 ถึง ภาพที่ 51 แสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 49 ค่าข่ายการไหลสำหรับกรณีที่ 1



ภาพที่ 50 ค่าข่ายการไหลสำหรับกรณีที่ 2

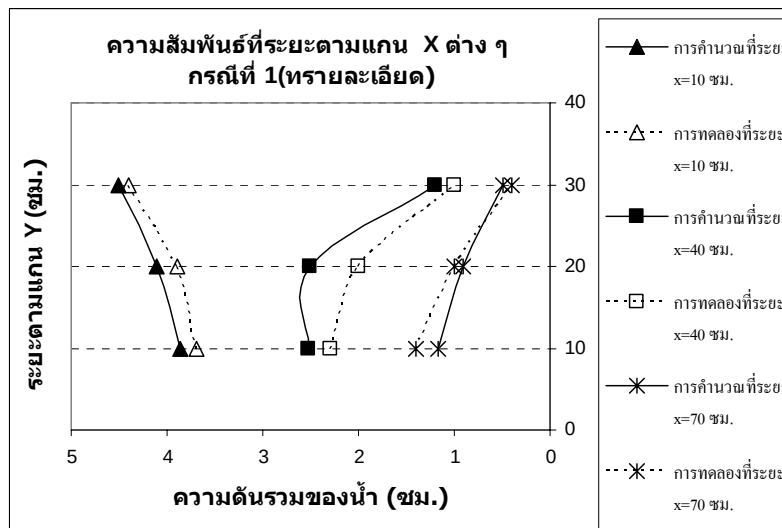


ภาพที่ 51 ค่าข่ายการไหลสำหรับกรณีที่ 3

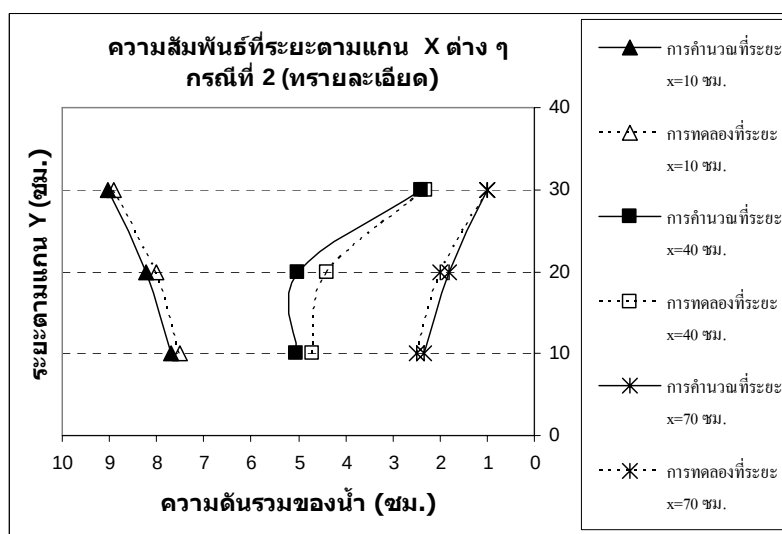
สำหรับผลวิเคราะห์กรณีที่เหลือทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ง

ผลการเปรียบเทียบศักย์น้ำด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขและจากการทดลอง

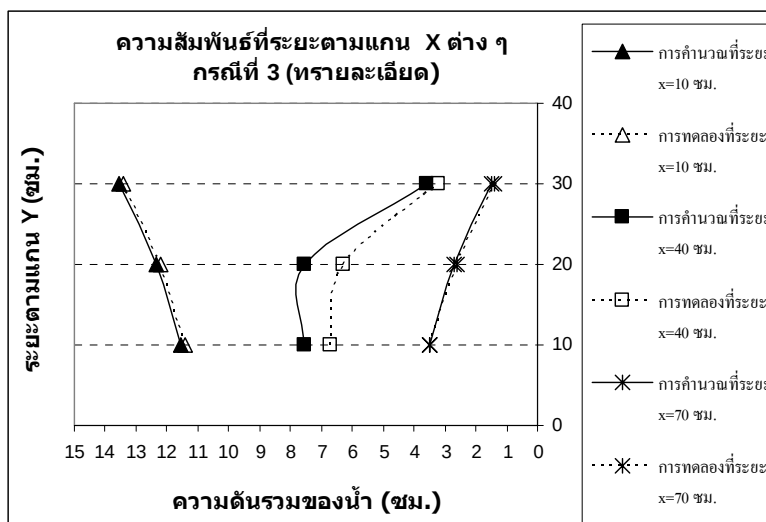
ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำของสองแบบจำลองที่ตำแหน่งของหลอดวัดความดัน
ต่างๆแสดงดังภาพ



ภาพที่ 52 ศักย์น้ำที่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของแบบจำลอง ณ ตำแหน่ง $x = 10, 40$ และ 70 ซม.
ในกรณีที่ 1 (ทรายละเอียด)



ภาพที่ 53 ศักย์น้ำที่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของแบบจำลอง ณ ตำแหน่ง $x = 10, 40$ และ 70 ซม.
ในกรณีที่ 2 (ทรายละเอียด)



ภาพที่ 54 สักย์น้ำที่เปลี่ยนแปลงตามความลึกของแบบจำลอง ณ ตำแหน่ง $x = 10, 40$ และ 70 ซม.
ในกรณี ที่ 3 (ทรายละเอียด)

สำหรับกรณีที่เหลืออื่นๆทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก จ

ผลการเปรียบเทียบสักย์น้ำจากการทดลองและจากการคำนวณโดยเฉลี่ยในกรณีทรายหยาบ
สามารถสรุปดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 8 ผลเปรียบเทียบสักย์น้ำจากการทดลองและจากการคำนวณโดยเฉลี่ยในกรณีทรายหยาบ

กรณี	Δh (cm)	z (cm)	L (cm)	ผลต่างของความดันที่วัดจริงและจากการคำนวณโดยเฉลี่ย (cm)
1	5	10	80	0.54
2	10	10	80	0.93
3	15	10	80	1.35
4	5	10	100	0.42
5	10	10	100	0.63
6	15	10	100	0.93
7	5	10	120	0.42
8	10	10	120	0.52
9	15	10	120	0.89
10	5	15	80	0.1
11	10	15	80	0.4
12	15	15	80	0.7
13	5	15	100	0.14
14	10	15	100	0.36
15	15	15	100	0.28
16	5	15	120	0.26
17	10	15	120	0.41
18	15	15	120	0.53
19	5	20	80	0.21
20	10	20	80	0.44
21	15	20	80	0.49
22	5	20	100	0.26
23	10	20	100	0.38
24	15	20	100	0.58
25	5	20	120	0.1
26	10	20	120	0.24
27	15	20	120	0.47

ผลการเปรียบเทียบสัจพจน์จากการทดลองและจากการคำนวณในกรณีทรายละเอียด
สามารถสรุปดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 9 ผลเปรียบเทียบสัจพจน์จากการทดลองและจากการคำนวณ โดยเฉลี่ยในกรณีทรายละเอียด

กรณี	Δh (cm)	Z (cm)	L (cm)	ผลต่างของความดันที่วัดจริงและจากการคำนวณโดยเฉลี่ย (cm)
1	5	15	80	0.2
2	10	15	80	0.22
3	15	15	80	0.35
4	5	15	100	0.14
5	10	15	100	0.38
6	15	15	100	0.38
7	5	15	120	0.17
8	10	15	120	0.28
9	15	15	120	0.59

1. โดยทั่วไปค่าสัจพจน์ที่ได้จากการวัดส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าสัจพจน์ที่ได้จากการคำนวณ โดยทั่วไปเมื่อพิจารณาผลต่างของสัจพจน์โดยเฉลี่ยของทรายหยาบในกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=10$ เซนติเมตร 0.737 เซนติเมตร กรณีระยะฝังผนังที่ $Z=15$ เซนติเมตร 0.353 เซนติเมตรและกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=20$ เซนติเมตร 0.352 เซนติเมตร สำหรับผลต่างของสัจพจน์โดยเฉลี่ยของทรายละเอียด ในกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=15$ เซนติเมตร 0.30 เซนติเมตร

2. ความแตกต่างของสัจพจน์ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะฝังของผนังที่น้ำลดลงดังนั้นจะเห็นว่าความแตกต่างของสัจพจน์ในกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=10$ เซนติเมตร มีแนวโน้มที่มากกว่าความแตกต่างของสัจพจน์ในกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=15$ เซนติเมตร และความแตกต่างของสัจพจน์ในกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=15$ เซนติเมตร มีแนวโน้มที่มากกว่าความแตกต่างของสัจพจน์ในกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=20$ เซนติเมตร โดยในช่วงกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=10$ เซนติเมตร ความแตกต่างสูงสุดมีค่า 3.51 ซม. สำหรับในช่วงกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=15$ เซนติเมตร ความแตกต่างสูงสุดมีค่า 1.25 ซม. สำหรับในช่วงกรณีระยะฝังผนังที่ $Z=20$ เซนติเมตร ความแตกต่างสูงสุดมีค่า 1.64 ซม.

3. ค่าความแตกต่างของสัจพจน์สูงสุดดังที่กล่าวในข้อ 2 เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของหลอดวัดความดัน no. 8 และ ตำแหน่ง no.9 โดยอยู่ที่ปลายผนังที่น้ำ

4. จากการเปรียบเทียบศักย์น้ำที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองพบว่าโดยส่วนใหญ่ศักย์น้ำที่ได้จากการวัดต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากแบบจำลองเชิงตัวเลขเกิดขึ้นจากชุดของสมการโดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าน้ำมีการไหลเอื้อย ซึ่งโดยสภาพความเป็นจริงความไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุพูน ค่าความซึมซึ่งไม่เท่ากันทุกทิศทาง ขนาดของอนุภาคตัวกลางพูนมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ทำให้ความเร็วการไหลไม่เป็นไปตามสมมติฐานดังนั้นอิทธิพลของความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง การทดลองจริงจึงมีการสูญเสียศักย์ของน้ำเนื่องจากความเร็วการไหลทำให้ค่าที่วัดได้จึงต่ำกว่าในแบบจำลองเชิงตัวเลข

5. ความแตกต่างของศักย์น้ำที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะฝั่งของผนังที่น้ำลดลงอาจเนื่องมาจากเหตุผลที่เกี่ยวข้องข้างต้นคือเมื่อระยะฝั่งของผนังที่น้ำลดลงทำให้ระยะทางซึมผ่านของน้ำลดลงตลอดย่านขอบเขตการไหลของแบบจำลอง ความลาดชันชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วการไหลซึมมีค่าเพิ่มขึ้น การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเร็วการไหลซึมมากขึ้น ศักย์น้ำที่ได้จากการคำนวณและการทดลองจึงแตกต่างกันมาก

6. จากการเปรียบเทียบศักย์น้ำที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองพบว่าบางตำแหน่งของหลอดวัดความดัน no. 8 และ no.9 ค่าที่ได้จากการวัดศักย์น้ำต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ อาจเป็นเพราะเหตุผลดังที่กล่าวในข้อแรกและเหตุผลในเรื่องของอัตรา การเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำตามแนวเส้น Top Flow Line จากภาพการกระจายเส้นศักย์น้ำบริเวณปลายผนังที่น้ำมีอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ความเร็วการไหลสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณนี้และเมื่อความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้สภาพการไหลไม่เป็นไปตามกฎของดาร์ซี จึงมีการสูญเสียศักย์น้ำเนื่องจากความเร็วมากกว่าในบริเวณอื่นค่าที่วัดได้จึงต่ำกว่าในแบบจำลองเชิงตัวเลขมาก

ผลการเปรียบเทียบปริมาณการไหลด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีของทรายหยาบและทรายละเอียดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10 และตารางที่ 11 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการไหลในทรายหยาบ

กรณีที่	ค่าความซึมผ่าน k (cm/sec)	$\Sigma \frac{\partial h}{\partial y}$	ปริมาณการไหลจากการ คำนวณ (cm ³ /sec)	ปริมาณการไหลจากการ ทดลอง (cm ³ /sec)
1	1.55	3.58	69.56	76.8
2	1.55	7.17	138.92	126
3	1.55	10.76	208.48	177
4	1.55	3.70	71.59	78.3
5	1.55	7.39	143.18	144
6	1.55	11.09	214.68	201
7	1.55	3.96	76.73	98.2
8	1.55	7.92	153.45	149
9	1.55	11.88	230.18	234
10	1.55	2.88	55.61	60
11	1.55	5.75	111.41	122
12	1.55	8.63	167.01	170
13	1.55	2.98	57.74	66.4
14	1.55	5.97	115.67	129
15	1.55	8.95	173.41	182
16	1.55	3.03	58.71	65.8
17	1.55	6.06	117.41	126
18	1.55	9.09	176.12	182
19	1.55	2.38	46.11	50
20	1.55	4.76	92.23	107
21	1.55	7.13	138.14	150
22	1.55	2.47	47.86	52
23	1.55	4.94	95.71	109
24	1.55	7.42	143.57	158
25	1.55	2.51	48.63	57
26	1.55	5.02	97.26	110
27	1.55	7.54	146.09	158

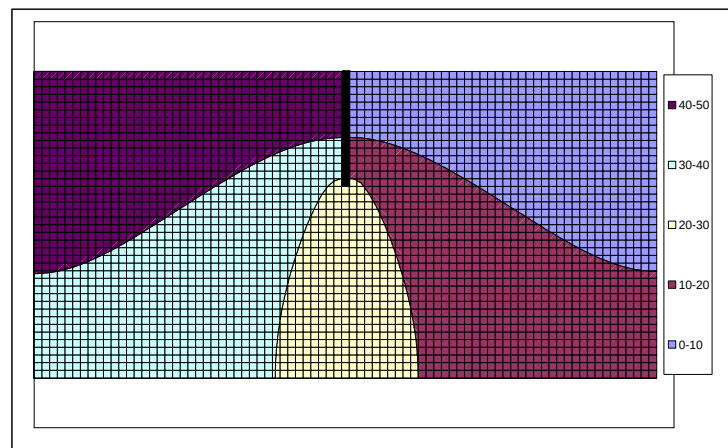
ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการไหลในทรายละเอียด

กรณีที่	ค่าความซึมผ่าน k (cm/sec)	$\Sigma \frac{\partial h}{\partial y}$	ปริมาณการไหลจากการ คำนวณ (cm ³ /sec)	ปริมาณการไหลจากการ ทดลอง (cm ³ /sec)
1	6.18×10^{-2}	2.88	2.22	2.50
2	6.18×10^{-2}	5.75	4.44	4.90
3	6.18×10^{-2}	8.63	6.66	6.60
4	6.18×10^{-2}	2.98	2.3	2.80
5	6.18×10^{-2}	5.97	4.61	5.12
6	6.18×10^{-2}	8.95	6.91	6.83
7	6.18×10^{-2}	3.03	2.39	2.90
8	6.18×10^{-2}	6.06	4.80	5.20
9	6.18×10^{-2}	9.09	7.20	7.10

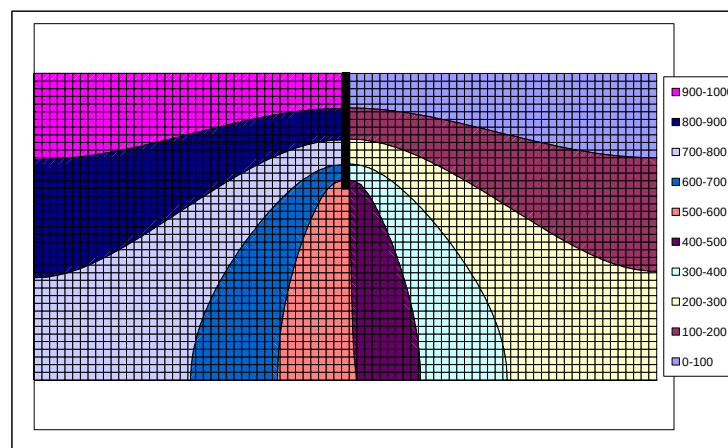
ผลต่างของปริมาณการไหลที่วัดได้เทียบกับปริมาณการไหลจากการคำนวณในกรณีของทรายหยาบโดยเฉลี่ย 9.66% รายละเอียดปริมาณการไหลแสดงในตารางที่ 5
สำหรับผลต่างของปริมาณการไหลที่วัดได้เทียบกับปริมาณการไหลจากการคำนวณในกรณีของทรายละเอียดโดยเฉลี่ย 9.88% รายละเอียดปริมาณการไหลแสดงในตารางที่ 6

ถ้าให้ P1 , P2 และ P3 แทนแบบจำลองกายภาพในกรณีที่ 1 , 2 และ 3 ตามลำดับและ N1 , N2 และ N3 แทนแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 , 2 และ 3 ตามลำดับ สำหรับทรายละเอียดพบว่า กรณี P1 และ N1 ผลต่างของความดันน้ำประมาณ 4 % ผลต่างของปริมาณการไหล ประมาณ 12.6% ความแตกต่างของทั้ง 2 แบบจำลองเนื่องมาจากสภาพการไหลของแบบจำลองกายภาพไม่เป็นไปตามกฎของดาร์ซีบางส่วน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าแบบจำลอง P1 และ แบบจำลอง N1 มีความสมมูลกันหรือ $P1 \Leftrightarrow N1$ ทำนองเดียวกันกับ P2 และ N2 มีผลต่างของความดันน้ำประมาณ 2.2% ผลต่างของปริมาณการไหล ประมาณ 10.4% P3และ N3 มีผลต่างของความดันน้ำประมาณ 2.3% ผลต่างของปริมาณการไหล ประมาณ 0.9% หรือกล่าวได้ว่า $P2 \Leftrightarrow N2$ และ $P3 \Leftrightarrow N3$ และถ้าพิจารณาให้ N1,N2 และ N3 มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 10N1 , 100N2 และ 1000N3 ดังนั้นจะได้ว่า $10P1 \Leftrightarrow 10N1$, $100P2 \Leftrightarrow 100N2$, และ $1000P3 \Leftrightarrow 1000N3$

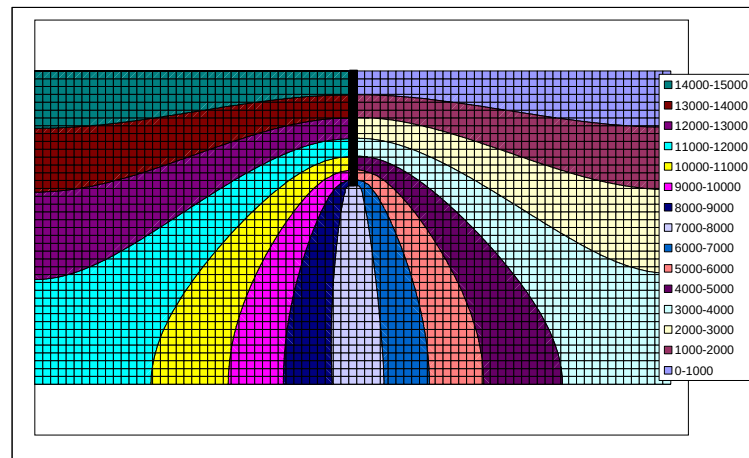
ผลการวิเคราะห์การกระจายค่าศักย์น้ำและแนวการไหลซึมเมื่อพิจารณาขนาดของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีขนาดเป็น 10 เท่าของN1 , 100 เท่าของN2และ1,000 เท่าของN3 แสดงได้ดังภาพที่ 55 ถึง ภาพที่ 60 ดังนี้



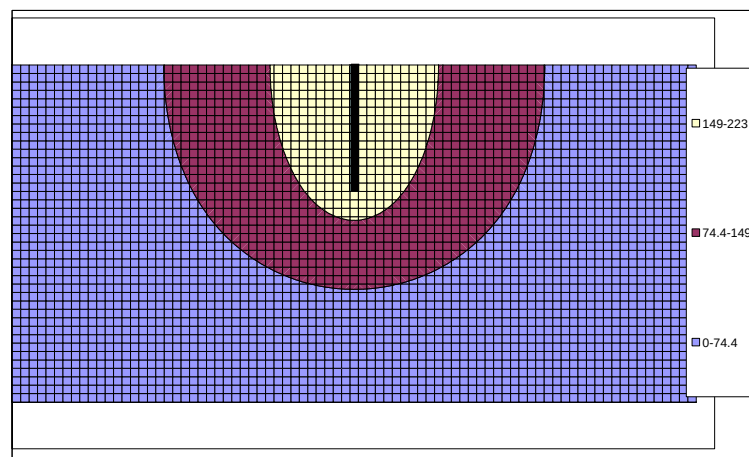
ภาพที่ 55 แนวศักย์น้ำของแบบจำลองขนาด 10 N1



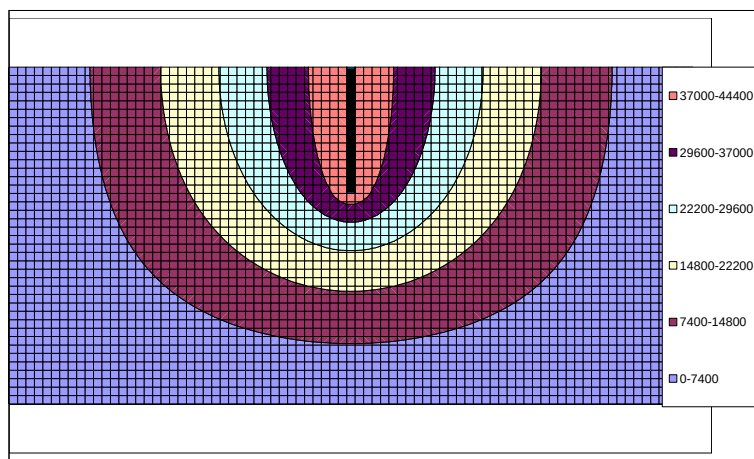
ภาพที่ 56 แนวศักย์น้ำของแบบจำลองขนาด 100 N2



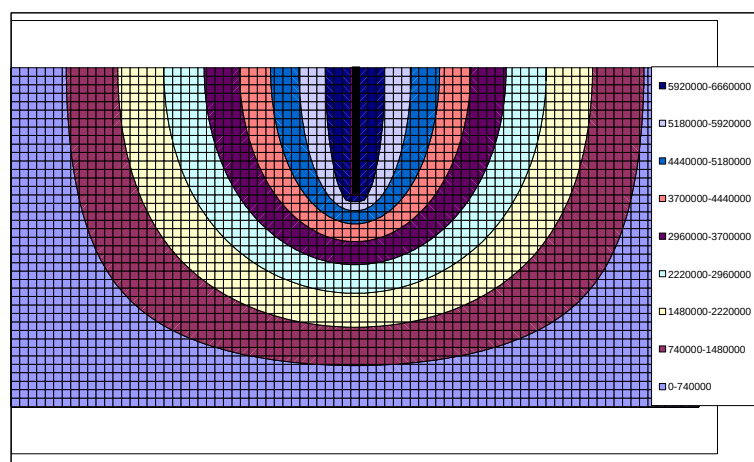
ภาพที่ 57 แนวกึ่งน้ำของแบบจำลองขนาด 1,000 N3



ภาพที่ 58 แนวการไหลของแบบจำลองขนาด 10 N1



ภาพที่ 59 แนวการไหลของแบบจำลองขนาด 100 N2



ภาพที่ 60 แนวการไหลของแบบจำลองขนาด 1,000 N3

ผลการวิเคราะห์เมื่อขนาดของแบบจำลองเพิ่มขึ้นเป็น 10 , 100 และ 1,000 เท่าของแบบจำลองในกรณีที่ 1 , 2 และ 3 ของทรายละเอียดตามลำดับ

1. พิจารณาการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 , 2 และ 3 ของทรายหยาบโดยแทนด้วย N1 , N2 และ N3 ตามลำดับ ถ้าให้ขนาดของแบบจำลองเพิ่มเป็น 10,100 และ 1,000 เท่าของแบบจำลอง N1,N2 และ N3 ตามลำดับ พบว่าศักย์น้ำที่ตำแหน่ง (X,Y) บนพื้นที่การไหลของ

แบบจำลองขนาดย่อมมีศักย์น้ำเพิ่มขึ้น 10 , 100 , และ 1,000 เท่า ที่ตำแหน่ง (10X,10Y),(100X,100Y) และ(1,000X,1,000Y) บนพื้นที่การไหลของ N1 , N2 และ N3 ตามลำดับ

2. พิจารณาการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 , 2 และ 3 ของทรายละเอียดโดยแทนด้วย N1 , N2 และ N3 ตามลำดับ ถ้าให้ขนาดของแบบจำลองเพิ่มเป็น 10,100 และ 1,000 เท่าของแบบจำลอง N1,N2 และ N3 ตามลำดับ พบว่าปริมาณการไหลที่ตำแหน่ง (X,Y) บนพื้นที่การไหลของแบบจำลองขนาดย่อมมีศักย์น้ำเพิ่มขึ้น 10^2 , 100^2 , และ $1,000^2$ เท่า ที่ตำแหน่ง (10X,10Y),(100X,100Y) และ(1,000X,1,000Y) บนพื้นที่การไหลของ N1 , N2 และ N3 ตามลำดับ

3. ขนาดและรูปทรงของพื้นที่การไหลซึมมีผลต่อการกระจายของศักย์น้ำและปริมาณการไหลซึม โดยแบบจำลองมีความคล้ายคลึงทางด้านรูปทรงเรขาคณิตโดยมีอัตราส่วนของขนาด model จริงต่อขนาดของ model ขนาดเล็กเป็น n

4. เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของตัวกลางพรุนคงที่ ($\frac{k_p}{k_m} = 1$) ความเร็วของน้ำที่ซึมผ่านตัวกลางพรุนของ model สภาพจริงพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าเท่ากับความเร็วของน้ำที่ซึมผ่านตัวกลางพรุนของ model ขนาดเล็ก โดยพิจารณาจากความลาดชันชลศาสตร์ของแบบจำลอง $i_m = \frac{\partial h}{\partial l}$ และ model สภาพจริง $i_p = \frac{n \cdot \partial h}{n \cdot \partial l} = \frac{\partial h}{\partial l}$ มีค่าเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองมีความคล้ายคลึงด้านชลศาสตร์โดย $\frac{v_p}{v_m} = 1$

การพิจารณาหาความเร็วการไหลที่ทำให้เกิดสภาพการไหลซึมตามกฎของดาร์ซี

หากพิจารณาตามหลักเกณฑ์ของ Muskat (1937) กล่าวว่าย่านการไหลที่เป็นไปตามกฎของดาร์ซี อาศัยปริมาณ เรโนลด์ส์นัมเบอร์ $R_n = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$ โดยที่

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

v = ความเร็วปรากฏ (เซนติเมตร/วินาที)

d = ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (เซนติเมตร)

μ = ความหนืดพลศาสตร์ (กรัม/(เซนติเมตร.วินาที))(ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)

สำหรับสภาพการไหลซึมแบบเอื้อย ค่า Renolds number (R_n) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1

$$R_n = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \leq 1$$

พิจารณาทรายหยาบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $d = 0.12$ เซนติเมตร , $\rho = 1$ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
 $\mu = 10^{-5} \times 981$ กรัม/(เซนติเมตร.วินาที) ทำให้ได้ค่าความเร็วปรากฏ 0.0817 เซนติเมตร/วินาที
 จากค่าความชื้นน้ำของทรายหยาบ $k = 1.55$ เซนติเมตร/วินาที ค่าความลาดชันชลศาสตร์ $i = 0.05$
 พิจารณาทรายละเอียดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $d = 0.03$ เซนติเมตร , $\rho = 1$ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
 $\mu = 10^{-5} \times 981$ กรัม/(เซนติเมตร.วินาที) ทำให้ได้ค่าความเร็วปรากฏ 0.327 เซนติเมตร/วินาที
 จากค่าความชื้นน้ำของทรายละเอียด $k = 0.0618$ เซนติเมตร/วินาที ค่าความลาดชันชลศาสตร์
 $i = 5.29$ กรณีที่ความลาดชันชลศาสตร์มากกว่าค่านี้จะทำให้ความเร็วการไหลมากกว่าปกติและไม่
 เป็นไปตามกฎของดาร์ซี

จาก
$$i = \frac{\Delta h}{l}$$

โดยที่ Δh = ความแตกต่างของศักย์น้ำด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ(เซนติเมตร)

l = ความยาวของการไหลซึม (เซนติเมตร)

ดังนั้นระยะทางการไหลซึมที่ต่ำสุดที่ยอมให้ในแต่ละกรณีที่ยังคงทำให้สภาพการไหลเป็นไปตาม
 กฎของดาร์ซีดังตารางเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของ Muskat ตามตารางที่ 12 ซึ่งแสดงค่าความชัน
 ชลศาสตร์และระยะทางการไหลต่ำสุดที่ยอมให้ในแต่ละกรณี

ตารางที่ 12 ผลการคำนวณค่าความชันชลศาสตร์และระยะทางการไหลต่ำสุดที่ยอมให้ในแต่ละ
 กรณีของทรายหยาบและทรายละเอียด

กรณี Δh (เซนติเมตร)	l เมื่อค่า $i=0.05$ (เซนติเมตร)	l เมื่อค่า $i=5.29$ (เซนติเมตร)
5	100	0.95
10	200	1.890
15	300	2.836

และจากผลจากการทดลองเมื่อทำการฉีดสีของสารละลายต่างทับทิมเพื่อสังเกตความเร็วการไหล
 ของน้ำซึมผ่านตัวกลางทรายหยาบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการทดลองฉีดสีสารละลายต่างทับทิมเพื่อสังเกตแนวการไหลในกรณีทรายหยาบ

กรณี Δh (เซนติเมตร)	กรณีฉีดสีที่ระยะห่าง จากผนังที่บนน้ำ (เซนติเมตร)	L ระยะทางที่น้ำซึม (เซนติเมตร)	time (วินาที)	V_s (เซนติเมตร)	i
5	0	40	46	0.87	0.13
	25	80	236	0.34	0.063
	50	130	708	0.18	0.038
10	0	40	24	1.67	0.25
	25	81	110	0.74	0.123
	50	134	310	0.43	0.075
15	0	40	18	2.22	0.38
	25	80	96	0.83	0.188
	50	132	244	0.54	0.114

เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของ Muskat สามารถสรุปได้ว่าย่านการไหลซึมที่ทำให้การไหลเป็นไปตามกฎของดาร์ซีโดยที่ตัวกลางพรุนเป็นทรายหยาบ ได้แก่ แฉกที่แรกเนื่องจากค่า $i = 0.038$ มีค่าน้อยกว่าความลาดชันสูงสุดที่ยอมให้ในกรณีของทรายหยาบ $i = 0.05$ หรือกล่าวได้ว่าช่วงระยะห่างจากผนังที่บนน้ำ 25-50 เซนติเมตรเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลจากการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งใกล้เคียงกับผนังที่บนน้ำมาเป็นช่วงการไหลเอื้อยซึ่งอยู่ไกลจากผนังที่บนน้ำออกมา

ผลการทดลองเมื่อทำการฉีดสีเพื่อสังเกตความเร็วการไหลของน้ำซึมผ่านตัวกลางทรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการทดลองฉีดสีสารละลายต่างทับทิมเพื่อสังเกตแนวการไหลในกรณีทรายละเอียด

กรณี Δh (เซนติเมตร)	กรณีฉีดสีที่ระยะห่าง จากผนังที่บนน้ำ (เซนติเมตร)	L ระยะทางที่น้ำซึม (เซนติเมตร)	time (วินาที)	V_s (เซนติเมตร)	i
10	0	40	1260	0.03	0.25
	25	78	5520	0.01	0.128

จะเห็นได้ว่าในกรณีของทรายละเอียดค่าความชันชลศาสตร์ที่วัดได้น้อยกว่าค่าความชันชลศาสตร์ที่คำนวณได้ค่อนข้างมากดังนั้นในทุกกรณีของการไหลเป็นไปตามกฎของดาร์ซี เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของ Muskat

หากพิจารณาความเร็วการไหลซึมจากแบบจำลองเชิงตัวเลข อัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำที่ปลายผนังที่บนน้ำมีค่าสูงสุดดังแสดงตามภาพที่ 61

y/x	36	37	38	39	40	40	41	42	43	44
0	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0
1	4.89624	4.89459	4.89335	4.89259	4.89234	0.10882	0.10856	0.1078	0.10656	0.10491
2	4.79212	4.78875	4.78624	4.78468	4.78416	0.21815	0.21763	0.21607	0.21355	0.21018
3	4.68727	4.68206	4.67816	4.67575	4.67493	0.32854	0.32772	0.3253	0.3214	0.31617
4	4.58132	4.57406	4.5686	4.56521	4.56406	0.44057	0.43942	0.43602	0.43055	0.42327
5	4.47388	4.46425	4.45698	4.45244	4.4509	0.55491	0.55336	0.54882	0.54153	0.53188
6	4.36452	4.35209	4.34262	4.33667	4.33464	0.67234	0.67031	0.66435	0.65486	0.6424
7	4.25283	4.23696	4.22474	4.21699	4.21433	0.79384	0.79117	0.78341	0.77116	0.75526
8	4.1384	4.11819	4.10238	4.09222	4.0887	0.92066	0.91714	0.90696	0.89112	0.87088
9	4.02084	3.99503	3.97436	3.9608	3.95604	1.05452	1.04976	1.03618	1.01547	0.98962
10	3.89996	3.86673	3.83923	3.82058	3.81386	1.19792	1.19119	1.17252	1.14498	1.11171
11	3.77588	3.73271	3.69524	3.66844	3.65823	1.35478	1.34457	1.31773	1.28023	1.237
12	3.64945	3.59298	3.5406	3.49969	3.4822	1.53206	1.51456	1.47362	1.42119	1.36466
13	3.52282	3.44918	3.37448	3.30753	3.27117	1.74435	1.70799	1.641	1.56625	1.49254
14	3.40013	3.30644	3.20061	3.08477	2.98744	2.02937	1.93203	1.81616	1.71027	1.61649
15	3.28774	3.17583	3.03674	2.8435	2.50906	2.50906	2.17461	1.98133	1.84218	1.73017
16	3.19206	3.07238	2.92704	2.74343	2.50973	2.50973	2.27602	2.09236	1.94695	1.82717

ภาพที่ 61 การเปลี่ยนแปลงศักย์น้ำที่บริเวณปลายผนังที่น้ำของแบบจำลองกรณีที่ 10

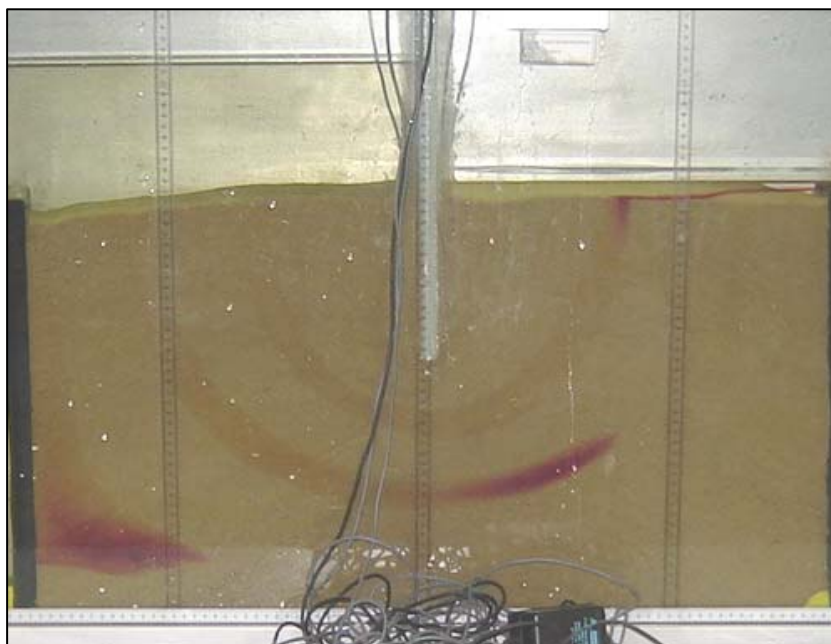
จากภาพที่ 61 สามารถหาความเร็วการไหลในแนวแกน y จาก $v = k \cdot \frac{\partial h}{\partial l}$
 ดังนั้นความเร็วที่ปลายผนังที่น้ำ $v = 1.55 \times (2.987 - 2.509) = 0.74$ เซนติเมตร/วินาที
 ความเร็วเมื่อเริ่มต้นไหลซึม $v = 1.55 \times (5 - 4.892) = 0.17$ เซนติเมตร/วินาที จะเห็นว่า
 ความเร็วการไหลซึมจะไม่เท่ากันตลอดแนวการไหล โดยความเร็วการไหลซึมในช่วงเริ่มต้นมีค่าน้อยและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนสูงสุดเมื่อเข้าใกล้ผนังที่น้ำและจะลดลงเมื่อเลยผนังที่น้ำไปทางด้านท้ายน้ำแล้ว

จากการทดสอบผลสี่ในแบบจำลองกายภาพข้างต้นความเร็วการไหลซึมที่วัดได้เป็นความเร็วการไหลซึมแท้จริงเฉลี่ย ซึ่งแนวโน้มที่ความเร็วการไหลซึมน้อยกว่าความเร็วการไหลซึมแท้จริงเฉลี่ยเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการไหลซึมและช่วงไหลซึมเลยผ่านผนังที่น้ำไปแล้ว ดังนั้นโอกาสที่ความเร็วการไหลซึมมีค่ามากกว่าความเร็วการไหลซึมเฉลี่ยอยู่ในช่วงกลางของพื้นที่การไหลซึมหรือใต้ผนังที่น้ำซึ่งความเร็วการไหลซึมอาจมีค่าสูงและทำให้ย่านการไหลบริเวณนี้ไม่เป็นไปตามกฎของดาร์ซี

โอกาสในการเกิดการกัดเซาะและพัดพา เมื่อพิจารณาจากค่าความลาดชันชลศาสตร์วิกฤติ สำหรับทรายหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะ(G_s) 2.62 ค่าอัตราส่วนช่องว่าง(e) 0.61 ความลาดชันชลศาสตร์วิกฤติ $i_c = 1.006$ สำหรับทรายละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะ(G_s) 2.68 ค่าอัตราส่วนช่องว่าง(e) 0.69 ความลาดชันชลศาสตร์วิกฤติ $i_c = 0.994$

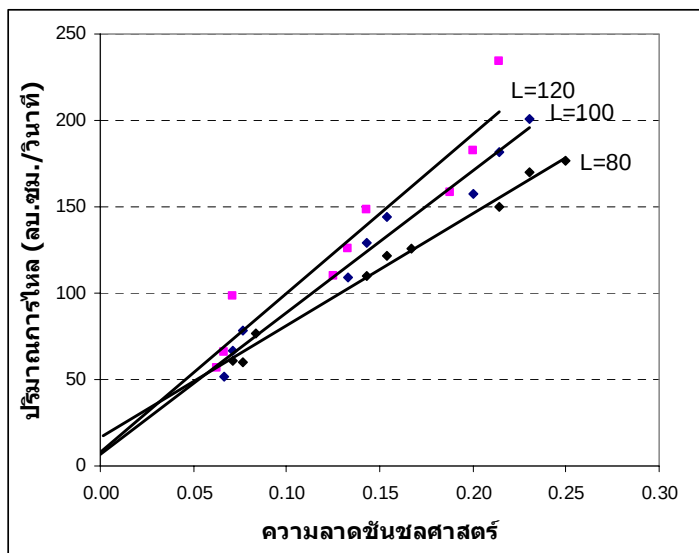
กล่าวโดยสรุปว่าผลการทดลองคิดสี่เพื่อสังเกตแนวการไหลในทรายหยาบกรณีระยะฝั่งผนังที่บ้น้ำ $z=20$ เซนติเมตร ค่าความชันชลศาสตร์ที่มากที่สุดจากตารางข้างบน 0.38 ซึ่งเป็นช่วงที่การไหลเกินย่านการไหลตามกฎของดาร์ซี ($0.38 > 0.05$) โดยตำแหน่งที่เกิดค่าความชันชลศาสตร์สูงสุดเป็นตำแหน่งที่ติดกับผนังที่บ้น้ำ แต่ความเร็วการไหลยังไม่ทำให้เกิดการเซาะโพรงเนื่องจาก $i < i_c$ (i_c) กรณีระยะฝั่งของผนังที่บ้น้ำลดลงแนวโน้มที่การไหลมีโอกาสเกิดการเซาะโพรงมีมากขึ้นเนื่องจากค่าความชันชลศาสตร์มีมากขึ้นโดยในกรณีนี้คำนวณค่าความชันชลศาสตร์ที่สูงสุดได้ประมาณ 0.75 ซึ่งก็ยังน้อยกว่า i_c (1.006) ดังนั้นยังไม่เกิดการเซาะโพรง

สำหรับกรณีทรายละเอียด คำนวณค่าความชันชลศาสตร์ที่สูงสุดได้ประมาณ 0.75 ซึ่งก็ยังน้อยกว่า i_c (0.994) ดังนั้นยังไม่เกิดการเซาะโพรง และการไหลซึมยังอยู่ในช่วงการไหลเอื้อตามกฎของดาร์ซีเนื่องจาก $0.75 < 5.29$

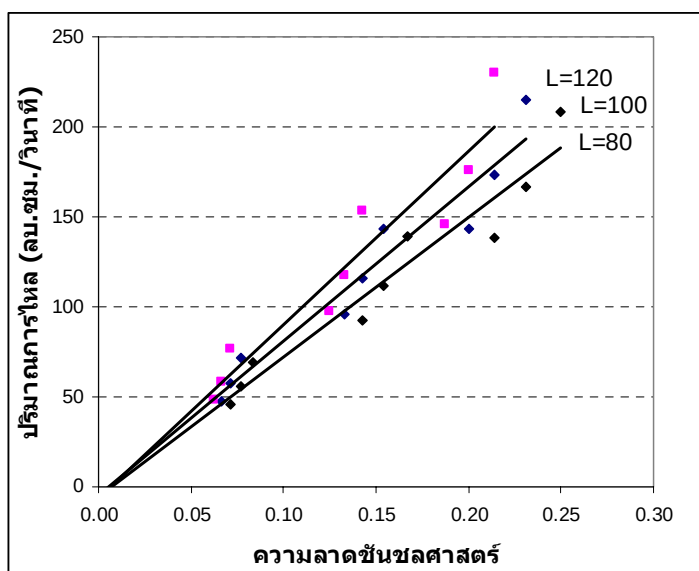


ภาพที่ 62 แนวเส้นการไหลของแบบจำลองเมื่อนิดสีสารละลายต่างที่บ้น้ำ

จากผลการทดลองแบบจำลองทางกายภาพ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับค่าความชันชลศาสตร์ของแบบจำลองแต่ละขนาดโดยแสดงดังภาพ



ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลและความลาดชันชลศาสตร์ของแบบจำลองกายภาพ



ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลและความลาดชันชลศาสตร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข

จากผลการทดลองแบบจำลองกายภาพพบว่าเมื่อต่อเส้นความสัมพันธ์ให้มาตัดแกน y เส้นกราฟไม่ได้ตัดแกน y ที่ $(0,0)$ หรือกล่าวได้ว่าความชันของกราฟไม่ได้ผ่านจุดกำเนิด โดยถ้าความชันของกราฟยิ่งเบนจากจุดกำเนิดไปทางด้านบวกมากเท่าไรแล้วแสดงให้เห็นถึงการไหลในช่วงนั้นไม่สอดคล้องตามกฎของคาร์ซีมากกว่านั้น ถ้าพิจารณาตามหลักเกณฑ์นี้สามารถกล่าวได้ว่าการไหลของแบบจำลองทั้งหมดอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงจากการไหลเอื่อยเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากความชันของเส้นกราฟมีการเบี่ยงเบนไปจากจุดกำเนิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่แนวโน้มของแบบจำลองขนาดที่เล็กกว่าความชันของเส้นกราฟมีการเบี่ยงเบนมากกว่าแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ซึ่งสอดคล้องกับผลการพิจารณาย่านการไหลตามเกณฑ์ของ Muskat ก่อนหน้านี้ที่ว่าแบบจำลองที่มีขนาดกว้างกว่ามีโอกาสที่จะพบย่านการไหลที่สอดคล้องตามกฎของคาร์ซีมากกว่าแบบจำลองขนาดเล็ก

จากผลการคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลและความลาดชันชลศาสตร์ของแบบจำลองทั้ง 3 ขนาดมีค่าใกล้เคียงจุดกำเนิดโดยตัดแกน x ที่ 0.01 โดยอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากประมาณค่าความชันชลศาสตร์เฉลี่ยไว้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

การวิเคราะห์ Dimensional Analysis

จากการทดลอง เมื่อพิจารณาปริมาณการไหลเป็นหลัก ตัวแปรทั้งหมดซึ่งคาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการทดลองทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

	$f(Q, \Delta h, L, \frac{H}{Z}, k, \mu, \rho) = 0$	
โดยที่	Q	เป็นปริมาณการไหล
	Δh	เป็นความแตกต่างศักย์ของน้ำ
	L	ความยาวของแบบจำลองกายภาพ
	$\frac{H}{Z}$	คืออัตราส่วนระหว่างความสูงของตัวอย่างทรายและระยะฝั่งของผนังที่บ้น้ำ
	k	สัมประสิทธิ์ความสามารถในการซึมได้ของน้ำ
	μ	ความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ
	ρ	ความหนาแน่นของน้ำ

มิติพื้นฐานของแต่ละปริมาณแสดงได้ดังตาราง

	Q	Δh	L	$\frac{H}{Z}$	k	μ	ρ
M	0	0	0	0	0	1	1
L	3	1	1	0	1	-1	-3
T	-1	0	0	0	-1	-1	0

จำนวนปริมาณที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจำนวน 7 ตัว หรือ $j = 7$

จำนวนมิติพื้นฐานมีจำนวน 3 ตัว ได้แก่ M, L และ T หรือ $j = 3$

กำหนดให้จำนวนตัวแปรซ้ำมี 2 ตัว ได้แก่ Δh , k และ μ

ดังนั้นจำนวนของกลุ่มปริมาณไม่มีหน่วยมีจำนวน $7-3=4$ กลุ่ม

หรือ $f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0$

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \Delta h^a k^b \rho^c Q ; & L^a \left(\frac{L}{T}\right)^b \left(\frac{M}{L}\right)^c \left(\frac{L^3}{T}\right) &= M^0 L^0 T^0 \\
 \pi_2 &= \Delta h^d k^e \rho^f L & L^d \left(\frac{L}{T}\right)^e \left(\frac{M}{L}\right)^f L &= M^0 L^0 T^0 \\
 \pi_3 &= \Delta h^g k^h \rho^i \frac{H}{Z} & L^g \left(\frac{L}{T}\right)^h \left(\frac{M}{L}\right)^i L^0 &= M^0 L^0 T^0 \\
 \pi_4 &= \Delta h^j k^k \rho^l \mu & L^j \left(\frac{L}{T}\right)^k \left(\frac{M}{L}\right)^l \left(\frac{M}{LT}\right) &= M^0 L^0 T^0
 \end{aligned}$$

จากการแก้สมการทำให้ทราบค่าของยกกำลัง

$a=-2$, $b=-1$, $c=-1$, $d=-1$, $e=0$, $f=0$, $g=0$, $h=0$, $i=0$, $j=-1$, $k=-1$ และ

$l=-1$,

จะได้กลุ่มของปริมาณไม่มีหน่วย 4 กลุ่มดังนี้

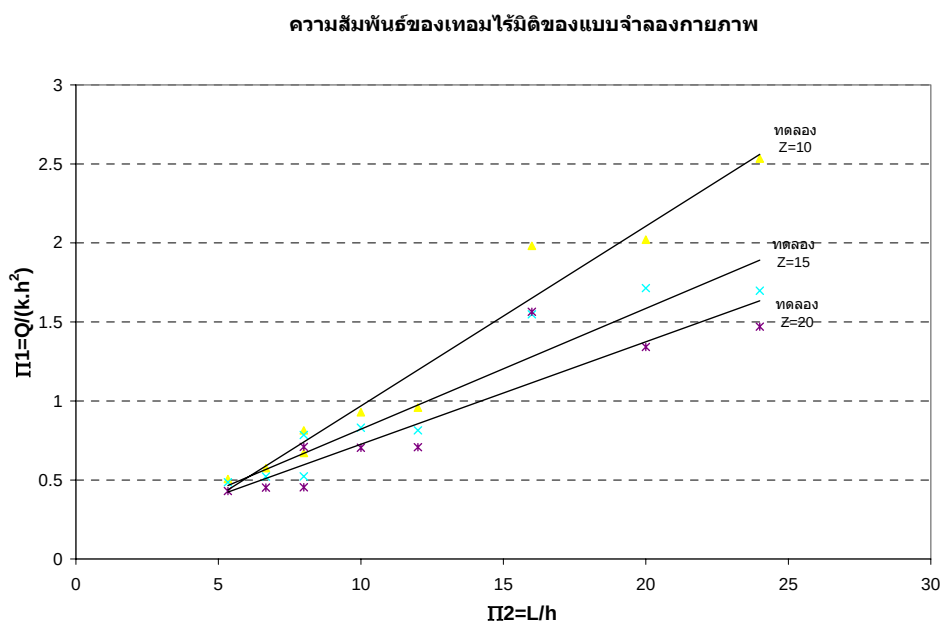
$$\pi_1 = \frac{Q}{k \cdot \Delta h^2}$$

$$\pi_2 = \frac{L}{\Delta h}$$

$$\pi_3 = \frac{H}{\mu^z}$$

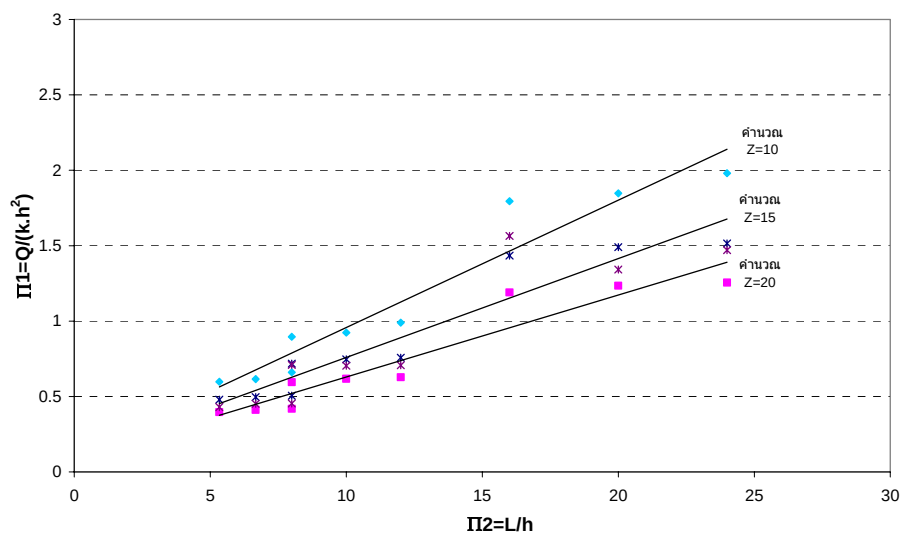
$$\pi_4 = \frac{\mu^z}{\rho \cdot k \cdot \Delta h}$$

กลุ่มปริมาณไม่มีหน่วยทั้ง 4 กลุ่มเป็นอิสระต่อกันและ กลุ่มของปริมาณไม่มีหน่วยเหล่านั้นสามารถนำมาจัดความสัมพันธ์ต่อกันเป็นรูปแบบต่างๆดังนี้



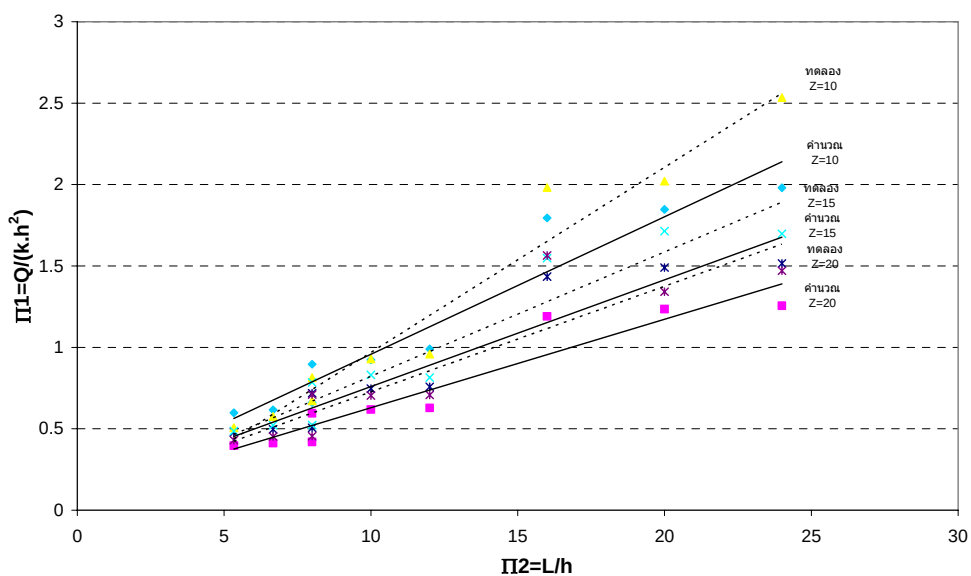
ภาพที่ 65 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไร้มิติ 2 กลุ่มจากแบบจำลองกายภาพ

ความสัมพันธ์ของเทอมไร้มิติของแบบจำลองเชิงตัวเลข



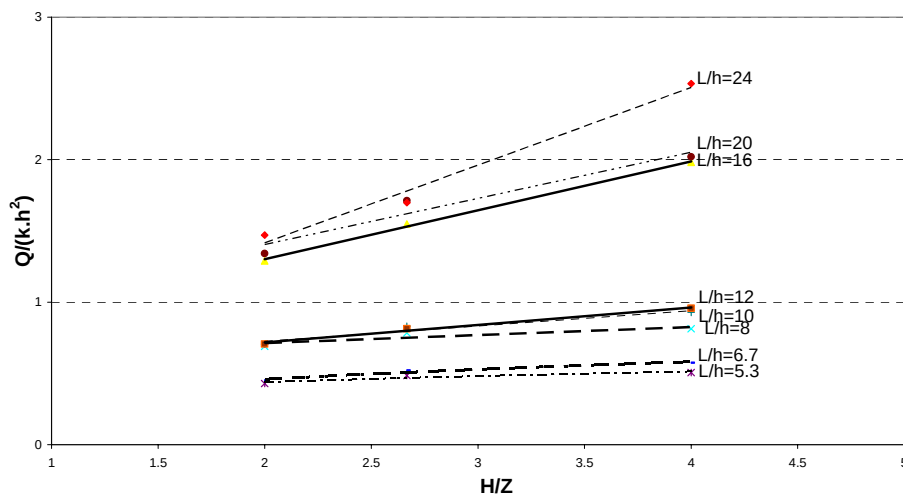
ภาพที่ 66 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไร้มิติ 2 กลุ่มจากแบบจำลองเชิงตัวเลข

ความสัมพันธ์ของเทอมไร้มิติของแบบจำลองเชิงตัวเลขและแบบจำลองกายภาพ



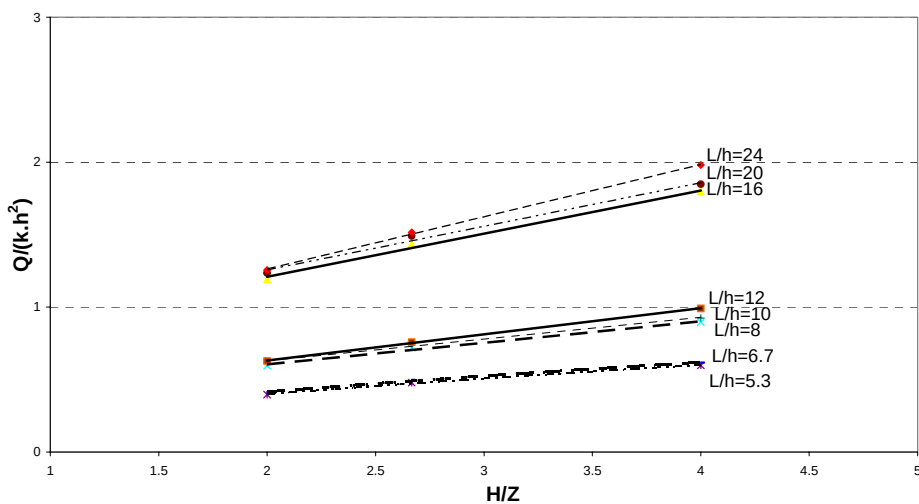
ภาพที่ 67 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไร้มิติ 2 กลุ่ม เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกายภาพ และแบบจำลองเชิงตัวเลข

ความสัมพันธ์ของเทอมไร้มิติของแบบจำลองกายภาพ



ภาพที่ 68 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไร้มิติ 3 กลุ่มจากแบบจำลองกายภาพ

ความสัมพันธ์ของเทอมไร้มิติของแบบจำลองเชิงตัวเลข



ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไร้มิติ 3 กลุ่มจากแบบจำลองเชิงตัวเลข

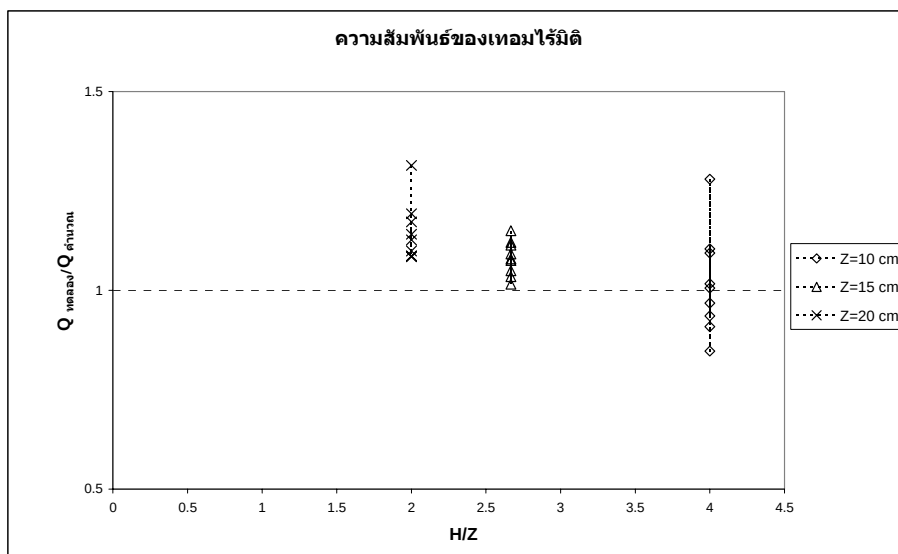
จากกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 65 ถึงภาพที่ 67 ของกลุ่มปริมาณไม่มีหน่วยได้แก่ $\frac{Q}{k.\Delta h^2}$ และ $\frac{L}{\Delta h}$ จากแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ซึ่งแทนด้วย

สมการทำนายแบบเส้นตรง มีความใกล้เคียงและคล้ายคลึงกันประกอบด้วยความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มเมื่อระยะที่บ่น้ำ $Z = 20$ เซนติเมตร เส้นแนวโน้มเมื่อระยะที่บ่น้ำ $Z = 15$ เซนติเมตร และเส้นแนวโน้มเมื่อระยะที่บ่น้ำ $Z = 10$ เซนติเมตร ทำให้สามารถเทียบเคียงได้ว่าได้ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขและผลการทดสอบด้วยแบบจำลองกายภาพมีความใกล้เคียงกัน และสามารถใช้ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขประเมินการไหลในสภาวะต่างๆได้

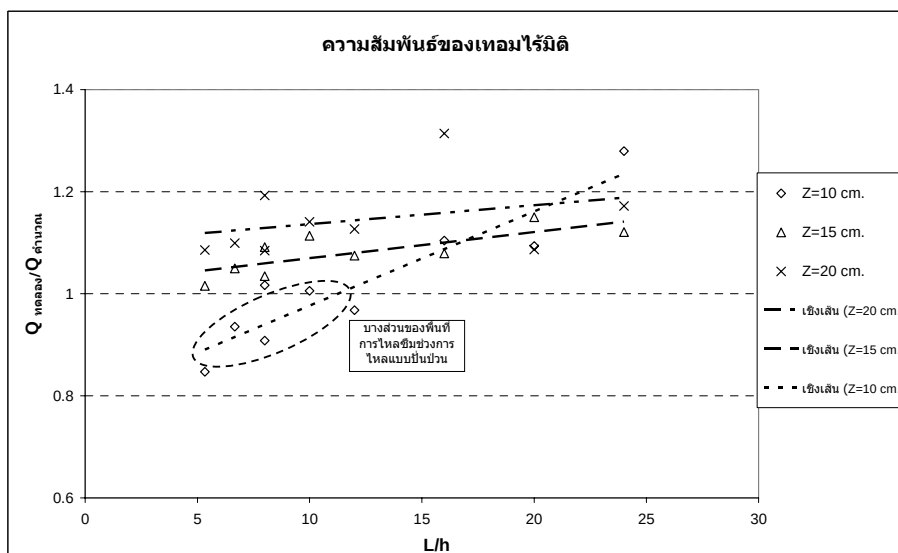
จากกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 68 และภาพที่ 69 ของกลุ่มปริมาณไม่มีหน่วยได้แก่ $\frac{L}{\Delta h}$ และ $\frac{H}{Z}$ จากแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ซึ่งแทนด้วยสมการทำนายแบบเส้นตรงของแต่ละแนวโน้มเมื่อปริมาณ $\frac{L}{\Delta h}$ มีค่าน้อย ๆ ตั้งแต่ $\frac{L}{\Delta h} = 5, 3, 6, 7, 8, 10$ และ 12 มีความใกล้เคียงกัน เริ่มต่างกันมากขึ้นเมื่อปริมาณ $\frac{L}{\Delta h}$ มีค่าเพิ่มขึ้น และปริมาณ $\frac{H}{Z}$ มีค่ามากขึ้นโดยหรือกล่าวได้ว่าที่ระยะที่บ่น้ำ $Z = 10$ เซนติเมตร มีค่าแตกต่างระหว่างแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขกันมากที่สุด รองมาเป็นระยะที่บ่น้ำ $Z = 15$ เซนติเมตร และลำดับสุดท้ายเมื่อระยะที่บ่น้ำ $Z = 20$ เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ก่อนหน้านี้

จากความสัมพันธ์ทั้งหมดที่แสดงสามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน ผลที่ต่างกันเกิดจากการทดลองแบบจำลองกายภาพในกรณีระยะฝั่งบ่น้ำที่บ่น้ำ $Z=10$ เซนติเมตร มีระยะสั้นเกินไปทำให้ขอบเขตพื้นที่การไหลในช่วงที่ใกล้กับผนังที่บ่น้ำ น้ำที่ซึมผ่านในช่วงนี้มีความเร็วเกินกว่าการไหลแบบเอื้อย และไม่ปฏิบัติตามกฎของดาร์ซี ทำให้ปริมาณการไหลรวมทั้งศักย์น้ำในช่วงนี้แตกต่างจากการคำนวณมากกว่าบริเวณอื่น ดังแสดงในภาพที่ 70 และภาพที่ 71

จากการคำนวณเมื่อขนาดของแบบจำลองเชิงตัวเลขเพิ่มขึ้น เป็น n เท่า หมายถึงขนาดรูปทรงได้แก่ ระยะ L , H , Z และ Δh เพิ่มขึ้นเป็น n เท่า โดยที่คุณสมบัติตัวกลางพุนยังคงเหมือนเดิม ไม่ว่าจะเป็นรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวของอนุภาค พบว่าปริมาณการไหลมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น n^2 เท่าด้วย ลักษณะเช่นนี้ทำให้กราฟความสัมพันธ์ไม่มีหน่วยของแบบจำลองเชิงตัวเลขดังภาพที่ 66 และภาพที่ 67 มีรูปร่างคงเดิม จึงสามารถสรุปได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ไม่มีหน่วยของแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถนำไปใช้ประเมินปริมาณการไหลหรือปริมาณอื่นๆได้ เมื่อขนาดรูปทรงของแบบจำลองเพิ่มขึ้น n เท่า ในทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์ไม่มีหน่วยของแบบจำลองกายภาพสามารถนำไปใช้ประเมินปริมาณการไหลที่เกิดขึ้นในสภาพจริงได้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 70 แสดงพิสัยการกระจายของปริมาณการไหลที่สัมพันธ์กับ $\frac{H}{Z}$



ภาพที่ 71 แสดงพิสัยการกระจายของปริมาณการไหลที่สัมพันธ์กับ $\frac{L}{\Delta h}$

จากปริมาณกลุ่มไม่มีหน่วย $\pi_1 = \frac{Q}{k \cdot \Delta h^2}$ และแบบจำลองมีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตจะ
ได้ว่า

$$\frac{Q_m}{k_m \cdot \Delta h_m^2} = \frac{Q_p}{k_p \cdot \Delta h_p^2}$$

เมื่อสภาพจริงในสนามมีขนาดรูปทรงเพิ่มขึ้นเป็น n เท่าของแบบจำลองขนาดเล็กและ
คุณสมบัติตัวกลางพรุนไม่เปลี่ยนแปลง

$$k_m = k_p$$

$$\Delta h_p = n \Delta h_m$$

ดังนั้น

$$\frac{Q_m}{k_m \cdot \Delta h_m^2} = \frac{Q_p}{k_p \cdot (n \Delta h_m)^2}$$

$$Q_p = n^2 Q_m$$

จากความสัมพันธ์

$$k = \frac{K\gamma}{\mu}$$

โดยที่

k คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน

K คือค่าความซึมผ่านแท้จริง

γ คือค่าหน่วยน้ำหนักของของเหลว

μ คือค่าความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว

ทำให้ทราบว่าค่าความซึมผ่านขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลซึ่งก็คือค่าความหนืดพลศาสตร์

ปริมาณ π_1 จะเปลี่ยนเป็น

$$\frac{Q}{k \cdot \Delta h^2} = \frac{\mu \cdot Q}{K \cdot \rho g \Delta h^2}$$

พิจารณาเมื่อความหนืดของของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและคุณสมบัติของ
ตัวกลางพรุนคงเดิม

จะได้

$$K_m = K_p$$

ดังนั้น

$$\frac{\mu_m \cdot Q_m}{K_m \cdot \rho_w g \Delta h_m^2} = \frac{\mu_p \cdot Q_p}{K_p \cdot \rho_w g \Delta h_p^2}$$

เมื่อสภาพจริง model มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น n เท่า และความหนืดของของไหลไม่เท่ากัน
เนื่องมาจากอุณหภูมิในห้องทดลองกับสภาพจริงในสนามไม่เท่ากันทำให้ ปริมาณการไหลในสภาพ
จริงมีขนาด

$$\frac{\mu_m \cdot Q_m}{K_m \cdot \rho_w g \Delta h_m^2} = \frac{\mu_p \cdot Q_p}{K_p \cdot \rho_w g (n \Delta h_m)^2}$$

$$Q_p = n^2 \cdot \left(\frac{\mu_m}{\mu_p} \right) Q_m$$

ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นชนิดเดียวกันทั้งในแบบจำลองและในสภาพจริง และเมื่อพิจารณากรณีที่ความหนืดของของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและคุณสมบัติของตัวกลางพอร์เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวของอนุภาคตัวกลางสมการข้างต้นกลายเป็น

$$Q_p = n^2 \cdot \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right) \left(\frac{K_p}{K_m}\right) Q_m$$

ในกรณีที่ของเหลวที่ใช้ในแบบจำลองและในสภาพจริงเป็นของเหลวต่างชนิดกัน และคุณสมบัติของตัวกลางพอร์เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวของอนุภาคตัวกลางสมการข้างต้นกลายเป็น

$$Q_p = n^2 \cdot \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right) \left(\frac{K_p}{K_m}\right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right) Q_m$$

จากผลในการวิเคราะห์หาค่าของแบบจำลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าสภาพการไหลที่เกิดขึ้นจริงในสนามไม่ว่าขอบเขตการไหลที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่เป็นกี่เท่าก็ตาม หรือวัสดุตัวกลางพอร์เป็นดินชนิดต่างๆ โดยทั่วไปเป็น ดินเม็ดหยาบหรือดินเนื้อละเอียด นอกจากนี้ของเหลวประเภทต่างๆกันโดยทั่วไปของเหลวในสภาพการไหลจริง คือน้ำ หรืออาจเป็นของเหลวอื่นๆ สภาพการไหลที่เกิดขึ้นจริงเหล่านี้ สามารถนำมาจำลองเป็นแบบจำลองขนาดเล็กตามมาตราส่วนที่ต้องการตัวกลางพอร์ที่ใช้ในแบบจำลองอาจเป็นวัสดุเดียวกันกับสภาพจริงหรือเป็นวัสดุต่างชนิดกันซึ่งสามารถทดสอบหาคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของวัสดุตัวกลางทั้ง 2 ได้ และของเหลวที่ใช้ในแบบจำลองอาจเป็นของเหลวชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ จากผลการทดสอบแบบจำลองกายภาพสามารถขยายผลนั้นไปสู่ค่าจริงในสภาพการไหลที่เกิดขึ้นจริงๆได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายศักย์ของน้ำและปริมาณการไหลได้เนื่องจากผลจากการเปรียบเทียบศักย์น้ำและปริมาณการไหลที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกัน ส่วนที่ต่างกันมากสามารถอธิบายได้โดย เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วการไหล
2. ค่าความแตกต่างของศักย์น้ำสูงสุด เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของหลอดวัดความดัน no. 8 และ no.9 โดยตำแหน่งอยู่ที่ปลายผนังที่น้ำซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วการไหลซึมสูงกว่าบริเวณอื่นๆ มีแนวโน้มทั้งกรณีทรายหยาบและทรายละเอียดแต่ในทรายละเอียดความแตกต่างลดลง
3. ผลต่างของปริมาณการไหลที่วัดได้เทียบกับปริมาณการไหลจากการคำนวณในกรณีของทรายหยาบโดยเฉลี่ย 9.66% สำหรับผลต่างของปริมาณการไหลที่วัดได้เทียบกับปริมาณการไหลจากการคำนวณในกรณีของทรายละเอียดโดยเฉลี่ย 9.88%
4. จากการวิเคราะห์การกระจายศักย์น้ำของแบบจำลองที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น n เท่า พบว่า ศักย์น้ำที่ตำแหน่ง (x,y) ใดๆบนขอบเขตการไหลซึมของแบบจำลองขนาดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเป็น n เท่าของศักย์น้ำ ที่ตำแหน่ง $(1/n).(x,y)$ บนขอบเขตการไหลซึมของแบบจำลองขนาดเดิม
5. จากการวิเคราะห์การกระจายเส้นการไหลของแบบจำลองที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น n เท่า พบว่าปริมาณการไหลที่ตำแหน่ง (x,y) ใดๆบนขอบเขตการไหลซึมของแบบจำลองที่มีขนาดเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น n^2 เท่าของปริมาณน้ำ ที่ตำแหน่ง $(1/n).(x,y)$ บนขอบเขตการไหลซึมของแบบจำลองขนาดเดิม
6. ขนาดและรูปทรงของพื้นที่การไหลซึมมีผลต่อการกระจายของศักย์น้ำและปริมาณการไหลซึม

7. ย่านการไหลในช่วงพื้นที่บริเวณใกล้กับผนังที่น้ำกรณีทรายหยาบ สภาพการไหลที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามกฎของดาร์ซี เนื่องจากค่าเรโนลด์ส์น้อยกว่า 1 ตามเกณฑ์ของ Muskat

8. จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่า ความเร็วการไหลซึมตลอดแนวการไหลมีค่าไม่คงที่ โดยเริ่มต้นการไหลซึมมีความเร็วค่าหนึ่งและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่บริเวณใกล้ผนังที่น้ำจากนั้นจะค่อยๆลดลง

9. ขอบเขตการไหลซึมที่เกิดขึ้นในสภาพจริงและมีขนาดใหญ่ สามารถนำมาจำลองสภาพให้ใกล้เคียงกับสภาพจริงเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่สนใจเช่นปริมาณการไหล ความเร็วการไหล หรือปริมาณอื่นๆ โดยทราบข้อมูลมาตราส่วนที่จะทำการย่อขนาดลงมา ชนิดของของเหลวที่ใช้ทดสอบ และคุณสมบัติด้านการซึมของตัวกลางพรุน ทำให้สามารถคำนวณค่าไปยังการไหลที่เกิดขึ้นในสภาพจริงได้ โดยจากการวิเคราะห์มิติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองทั้งหมดพบว่า

$$Q_p = N^2 \cdot \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right) \left(\frac{K_p}{K_m}\right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right) Q_m$$

โดยที่ N^2 เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับขนาดแบบจำลอง
 $\left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)$ เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดของของเหลว
 $\left(\frac{K_p}{K_m}\right)$ เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความซึมของตัวกลางพรุน
 $\left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right)$ เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของของเหลว

ข้อเสนอแนะ

1. การประยุกต์วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการแบ่งพื้นที่ย่อยออกเป็นกริดขนาดเล็กและเท่าๆกันดังนั้นสำหรับปัญหาของพื้นที่การไหลที่มีความซับซ้อนและรูปทรงเรขาคณิตยากๆไม่สามารถแบ่งกริดที่ขนาดเท่ากันได้ อาจต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน นอกจากนี้วิธีการผลต่างสืบเนื่องเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ผลของการคำนวณให้ค่าที่เป็นเฉพาะขนาดที่ตำแหน่งกริดต่างๆ ต่อไปควรพัฒนาให้สามารถแสดงผลในรูปแบบทิศทางของความเร็วย่อยในแต่ละพื้นที่ย่อยได้หรือแสดงเป็นปริมาณเวกเตอร์ของความเร็ว โดยตัวอย่างโปรแกรมที่แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของเวกเตอร์ของความเร็วเช่น โปรแกรม SEEP/W
2. ค่าที่วัดได้จาก pressure sensor มีความคลาดเคลื่อนพอสมควรอาจเนื่องมาจากความยุ่งยากในการวัดทำให้เกิด human error หรืออาจเกิดจากหัววัด pressure sensor เองในขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ หัววัดอาจยังไม่ ชุ่มน้ำหรือยังมีฟองอากาศอยู่ภายใน sensor อาจทำการแก้ไขได้โดยนำหัว sensor ไปแช่ในน้ำอุ่นพร้อมทั้งเขย่าเพื่อช่วยไล่ฟองอากาศออก และทำให้หัว pressure sensor เกิด saturation ได้ 100 %
- 3 ถ้ามีการศึกษาในเรื่องการไหลซึมในครั้งต่อไปอาจต้องพิจารณาเลือก grain size ให้มีขนาดไม่ใหญ่เกินไปจนกระทั่งการไหลไม่เป็นไปตามสมมติฐาน