

การลดความชื้นของทรายในดินกรุงเทพฯชั้นที่ 1 โดยวิธีการเกราท์
ด้วยซิลิเกตเจล



นางสาวอรยา คำหนองไผ่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

REDUCTION OF PERMEABILITY OF 1ST BANGKOK AQUIFER SAND
BY GROUTING WITH SILICATE GEL

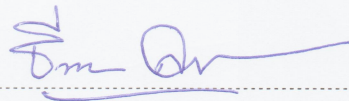


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil, Transportation and Geo-resources Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การลดความชื้นของทรายในดินกรุงเทพฯ ชั้นที่ 1 โดยวิธีการเกรทด้วยซิลิเกตเจล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

ประธานกรรมการ



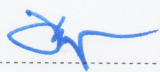
(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


อรรยา คำทองไผ่: การลดความซึมของทรายในดินกรุงเทพชั้นที่ 1 โดยวิธีการเกรทด้วยซิลิเกตเจล (REDUCTION OF PERMEABILITY OF 1ST BANGKOK AQUIFER SAND BY GROUTING WITH SILICATE GEL)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ ตันเส็ง, 81 หน้า.

คำสำคัญ : สารละลายโซเดียมซิลิเกต การเกรทแบบแตก การเกรทแบบซึม ทรายชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึง ประสิทธิภาพในการลดความซึมของทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพที่ผ่านเกรทด้วยสารละลายเคมี และอิทธิพลของแรงดันในการเกรท ความหนืด และอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ที่ส่งผลต่อรูปร่างและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกรท ในทราย 2 ชนิด ได้แก่ ทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพมหานคร และทรายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา การทดสอบใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นวัสดุในการเกรท โดยใช้ความหนืดเท่ากับ 110 เซนติพอยส์ และ 130 เซนติพอยส์ และใช้อัตราการฉีดเป็น 4.56, 6.08, และ 7.60 มิลลิลิตรต่ออนาที ผลการวิจัยพบว่าแรงดันในการเกรทต่ำรูปร่างของมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสมำเสมอ รูปแบบของทรายที่ผ่านการเกรทจึงเกิดในรูปแบบการเกรทแบบซึม สำหรับความหนืดพบว่า ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกรท และอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำลง พบว่ารูปร่างของทรายมีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสมำเสมอ รูปแบบทรายที่ผ่านการเกรทจึงผสมระหว่าง การเกรทแบบแตกและการเกรทแบบซึม นอกจากนี้ทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพที่ผ่านการเกรทด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมต่ำลง 1.32×10^5 เท่า

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา คำทองไผ่
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา พรพจน์


ORAYA KHAMNONGPAI: REDUCTION OF PERMEABILITY OF 1ST BANGKOK
AQUIFER SAND BY GROUTING WITH SILICATE GEL

THESIS ADVISOR : ASST. PROF DR. PORNPOT TANSENG, Ph.D., 81 PP.

KEYWORD : SODIUM SILICATE SOLUTION/ FRACTURE GROUTING/ PERMEATION
GROUTING/ FIRST BANGKOK AQUIFER SAND

This research studies investigates the effectiveness of reduction permeability of 1ST Bangkok aquifer sand through the process of grouting using the chemical solution. It also examines the influence of pressure grouting, viscosity of grout, and void ratio impact on the shape and pattern of grouted sand in two types of sand is the 1ST Bangkok aquifer sand and sand from Nakhon Ratchasima province. In the testing sand is grouted with sodium silicate solution at viscosity of 110 centipoise and 130 centipoise and at injection rate are 4.56, 6.08 and 7.60 mL/min. The results show that the low pressure grouting the grout forms in a uniform spherical grout bulb. Thus, the pattern of grouted sand is permeation grouting. For the viscosity of grout, it did not significantly affect the changes in the shape and pattern of the grouted sand. The void ratio of sand is decreased. The shape of sand was irregular and not uniform spherical grout bulb, indicate the pattern of grouted sand is between permeation grouting and fracture grouting. Additionally, the coefficient of permeability of the grouted 1ST Bangkok aquifer sand reduces 1.32×10^5 from the coefficient of permeability of un-grouted sand.

School of Civil Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน และการให้ความร่วมมือจากบุคคล และกลุ่มบุคคลที่กรุณาให้คำปรึกษาในเชิงวิชาการและการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ ของการวิจัย ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยในทุกๆ ขั้นตอน ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทิน คุหาเรืองรอง ที่กรุณาให้การสนับสนุนข้อมูล คำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับสารละลายเคมีที่ใช้เป็นวัสดุเกราท์ อีกทั้งให้ความช่วยเหลือในการผลิตสารละลายเคมีเพื่อใช้ในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณะกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์ทั้งด้านเนื้อหา ระเบียบ วิธีการวิจัย ตลอดจนแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา และผู้ที่ผู้วิจัยให้ความเคารพทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

อรยา คำหนองไผ่

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประวัติความเป็นมาของการเกราท์.....	5
2.2 วัสดุเกราท์.....	6
2.2.1 สารละลายเคมี (chemical solution).....	7
2.2.2 การไหลของเกราท์ (rheology of grout).....	8
2.2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไหล (basic rheological properties)	8
2.2.2.2 รูปแบบการไหล (rheological model).....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	รูปแบบการเกราท์.....	11
2.3.1	การเกราท์เพื่อเสริมความหนาแน่น (compaction grouting).....	11
2.3.2	การเกราท์แบบแตก (fracture grouting).....	11
2.3.3	การเกราท์แบบซึม (permeation grouting)	11
2.3.3.1	รูปแบบการซึมของเกราท์แบบการไหลทรงกลมในวัสดุที่มีความพรุน (spherical flow model of porous media).....	14
2.3.3.2	ความสามารถในการซึมของเกราท์กับขนาดของเม็ดดิน.....	17
2.3.4	การเกราท์เพื่อการแทนที่ (compensation grouting).....	18
2.3.5	การเกราท์เพื่อเติมเต็มช่องว่าง (void filling)	18
2.3.6	การเกราท์ด้วยแรงดันสูง (jet grouting)	18
2.4	การศึกษากการเกราท์แบบแตกในทราย.....	18
2.5	การศึกษากการเกราท์แบบซึมในทราย	21
บทที่ 3	วิธีการวิจัย.....	26
3.1	ตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ	27
3.2	วัสดุที่ใช้ในการเกราท์.....	28
3.3	เครื่องมือทดสอบ	29
3.4	วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	31
3.5	ขั้นตอนการทดสอบ	32
บทที่ 4	ผลการวิจัย	34
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันที่ใช้ในการเกราท์.....	34
4.2	รูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ความเข้มของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี.....	47
4.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์.....	48
4.4.1 แรงแต้นในการเกราท์.....	48
4.4.2 ความหนืดของสารละลายเคมี.....	49
4.4.3 อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย.....	50
4.5 การนำประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม.....	51
บทที่ 5 บทสรุป.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก บทความและวารสารทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	57
รายชื่อบทความและวารสารทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ส่วนต่อขยาย ที่สถานีสนามไชย.....	3
2.1 ประเภทของวัสดุเกราท.....	6
2.2 ค่าคงที่การไหลของเกราทแต่ละประเภท	13
2.3 เวลาที่ใช้ในการซึมตามรัศมีการซึมของเกราทที่กำหนด.....	13
2.4 ผลการทดสอบการอัดฉีดเมื่อพิจารณาจากปริมาณอัดฉีดเกราทที่แตกต่างกัน	22
3.1 สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีด.....	33
3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	33
4.1 ขนาดทรายที่ผ่านการเกราทและขนาดเชิงทฤษฎีในทรายชนิดที่ 1	44
4.2 ขนาดทรายที่ผ่านการเกราทและขนาดเชิงทฤษฎีในทรายชนิดที่ 2	44
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายก่อนและหลังผ่านการเกราท	48

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร 2
1.2	piezometric pressure ที่ได้จากการขุดก่อสร้างชั้นใต้ดินของชั้นทรายในชั้นดินกรุงเทพ..... 3
2.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับอัตราเฉือนในของไหลนิวโตเนียน 9
2.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับอัตราเฉือนในของไหลบิงแฮม..... 10
2.3	กลไกการทำงานของรูปแบบการเกราท์ที่แตกต่างกัน (a) การเกราท์เพื่อความหนาแน่น (b) การเกราท์แบบแตก (c) การเกราท์แบบซึม..... 12
2.4	การพิจารณาแรงดันของการเกราท์ที่ไหลผ่านท่อฉีดลงที่ดิน..... 15
2.5	การซึมของเกราท์ผ่านปลายท่อฉีดและซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นรูปทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายท่อฉีด..... 16
2.6	ขนาดของเม็ดดินกับประเภทของวัสดุเกราท์ที่เหมาะสมในการเกราท์ 17
2.7	ผลการทดสอบการเกราท์ในทราย (a) การเกราท์เพื่อความหนาแน่น ทรายที่ผ่านการเกราท์มีความเป็นทรงกลมมากกว่า (b) การเกราท์แบบแตก เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง 19
2.8	อิทธิพลของแรงดันและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ส่งผลต่อการขยายตัวของเกราท์ลงในตัวอย่างทราย (a) แรงดันต่ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ (b) แรงดันสูงและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง 20
2.9	อิทธิพลของระดับความอิ่มตัวของตัวอย่างทรายที่ส่งผลต่อการขยายตัวของเกราท์ลงในตัวอย่างทราย (a) ระดับความอิ่มตัว 5% (b) ระดับความอิ่มตัว 40% (c) ระดับความอิ่มตัวที่ 60% 20
2.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเกราท์ที่อัดฉีดกับระดับความอิ่มตัวของทรายตัวอย่างภายใต้แรงดันอัดฉีด 200 กิโลปาสคาล 21
2.11	ผลการอัดฉีดเกราท์เมื่อแปรผันปริมาณการอัดฉีดเกราท์..... 23
2.12	ความแตกต่างระหว่างการเกราท์ด้วยซีเมนต์และการเกราท์แบบซึมด้วยสารละลายเคมี 24
3.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเกราท์กับระยะเวลา 28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ภาพถ่ายเกราท์เคมีก่อนและหลังก่อตัวกลายเป็นเจล	29
3.5 ภาพถ่ายเกราท์เคมีหลังก่อตัวกลายเป็นเจล (a) เกราท์เคมีหดตัวเมื่ออยู่ในสภาวะที่แห้ง (b) เกราท์เคมีเมื่อทิ้งอยู่ในสภาวะที่มีน้ำโดยรอบเป็นระยะเวลา 7 วัน (c) เกราท์เคมีเมื่อทิ้งอยู่ในสภาวะที่มีน้ำโดยรอบเป็นระยะเวลา 28 วัน	29
3.7 ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกราท์และโมลทดสอบ	31
3.8 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (a) ใส่ น้ำลงในโมลทดสอบ (b) ใส่ตัวอย่างทรายแห้งผ่านกรวยยาวลงในโมลทดสอบ (c) ตัวอย่างทรายหลังเตรียมเสร็จ	32
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกราท์กับปริมาตรเกราท์ด้วยความหนืด V110 ในทรายชนิดที่ 1	35
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกราท์กับปริมาตรเกราท์ด้วยความหนืด V130 ในทรายชนิดที่ 1	35
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกราท์กับปริมาตรเกราท์ด้วยความหนืด V110 ในทรายชนิดที่ 2	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกราท์กับปริมาตรเกราท์ด้วยความหนืด V130 ในทรายชนิดที่ 2	36
4.5 อนุภาคเจลที่เกิดจากสารละลายเคมีในท่อพลาสติกทนแรงดัน	37
4.6 การเพิ่มขึ้นของแรงดันเนื่องจากการอุดตันจากอนุภาคในเกราท์ และการลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลังจากส่วนที่อุดตันหลุดออกไปในช่องว่าง	38
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกราท์สูงสุด	38
4.8 ภาพถ่ายทรายชนิดที่ 1 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V110 (a) ตัวอย่าง R3_V110 (b) ตัวอย่าง R4_V110 (c) ตัวอย่าง R5_V110	40
4.9 ภาพถ่ายทรายชนิดที่ 1 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V130 (a) ตัวอย่าง R3_V130 (b) ตัวอย่าง R4_V130 (c) ตัวอย่าง R5_V130	41
4.10 ภาพถ่ายทรายชนิดที่ 2 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V110 (a) ตัวอย่าง R3_V110 (b) ตัวอย่าง R4_V110 (c) ตัวอย่าง R5_V110	42
4.11 ภาพถ่ายทรายชนิดที่ 2 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V130 (a) ตัวอย่าง R3_V130 (b) ตัวอย่าง R4_V130 (c) ตัวอย่าง R5_V130	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับค่า pH.....	46
4.13 ภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ	47
4.14 การออกแบบตำแหน่งการเกราท์ (a) ตำแหน่งการเกราท์ในทางปฏิบัติ (b) ตำแหน่งการ เกราท์ในอุดมคติ.....	51



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Q	=	อัตราการฉีดเกราท์
τ	=	ความเค้นเฉือน
τ_0	=	ความเค้นครากเริ่มต้น
μ	=	ความหนืดเกราท์
μ_w	=	ความหนืดน้ำ
$\frac{dv}{dz}$	=	อัตราเฉือน
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
i	=	ความลาดเชิงชลศาสตร์
A	=	หน้าตัดการไหล
P_e	=	แรงดันสุทธิในการเกราท์
P_g	=	แรงดันในการเกราท์
P_w	=	แรงดันน้ำ
k_G	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเกราท์
R_0	=	รัศมีปลายท่อฉีด
R	=	ระยะทางในการซึมของเกราท์
γ_G	=	ความถ่วงจำเพาะของเกราท์
V_{in}	=	ปริมาตรเกราท์ที่ฉีดลงในดิน
$V_{out,grout}$	=	ปริมาตรเกราท์ที่ซึมในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
n	=	ความพรุนของดิน
t	=	ระยะเวลาในการซึมของเกราท์
R3	=	อัตราการฉีดเกราท์เท่ากับ 4.56 มิลลิลิตรต่ออนาที
R4	=	อัตราการฉีดเกราท์เท่ากับ 6.08 มิลลิลิตรต่ออนาที
R5	=	อัตราการฉีดเกราท์เท่ากับ 7.60 มิลลิลิตรต่ออนาที
V110	=	ความหนืดเกราท์เท่ากับ 110 ± 8 เซนติพอยส์
V130	=	ความหนืดเกราท์เท่ากับ 130 ± 8 เซนติพอยส์

บทที่ 1

บทนำ

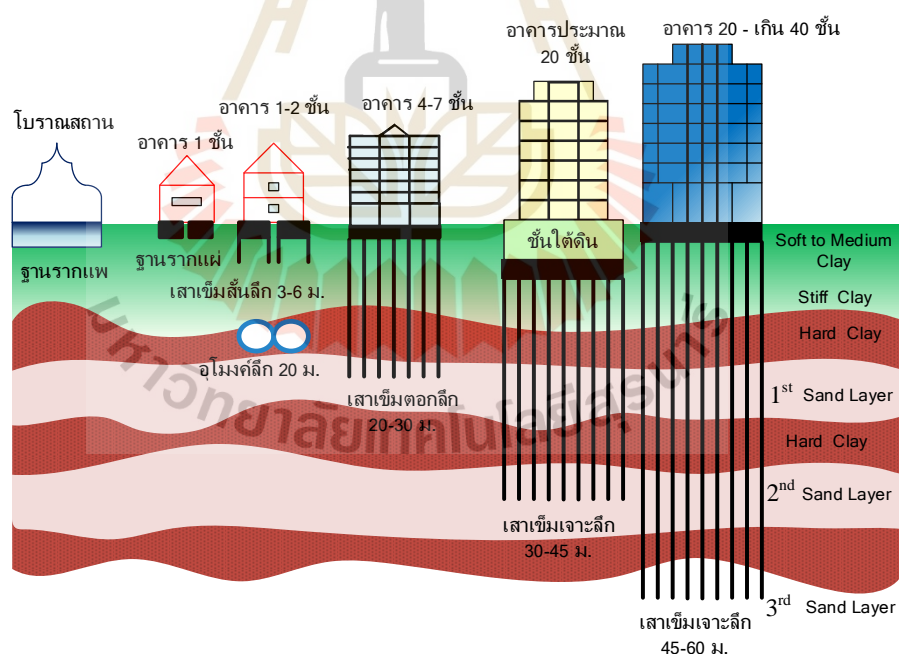
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันความต้องการพื้นที่ใต้ดินในกรุงเทพมหานครมีสูงขึ้น เนื่องจากความจำกัดของพื้นที่ ส่งผลให้โครงการสาธารณูปโภคจำเป็นต้องสร้างให้มีความลึกลงไปจากผิวดิน อาทิเช่น การก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม (ประชาชาติธุรกิจ, 2563) ที่มีความลึกของโครงสร้างใต้ดินอยู่ที่ประมาณ 25-30 เมตร หรือโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนที่มีความลึกของการขุดดินอยู่ที่ประมาณ 30 เมตร (มติชนออนไลน์, 2564) ซึ่งชั้นดินในกรุงเทพมหานครประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวส่วนบนจนถึงความลึกประมาณ 25 เมตร หลังจากนั้น เป็นชั้นทรายชั้นที่ 1 ที่มีความลึกตั้งแต่ 22 เมตร ถึง 39 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง ตามด้วยชั้นทรายชั้นที่ 2 ดังรูปที่ 1.1 เห็นได้ว่าการก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยความลึกระดับนี้จำเป็นต้องขุดดินลึกไปถึงชั้นทราย ในอดีตการขุดลึกในระดับนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงการก่อสร้างเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลทำให้ระดับน้ำใต้ดินของชั้นดินกรุงเทพฯอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับน้ำสถิตย์ (hydrostatic level) แต่ในปัจจุบันพบว่าประสบกับปัญหาน้ำใต้ดินอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ สาเหตุที่ทำให้น้ำใต้ดินสูงขึ้นมีการศึกษาโดย (Paveechana et al., 2012) จากการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินด้วย Piezometer ในปี ค.ศ. 2011 ที่ระดับความลึก 80 เมตร และข้อมูลจากการวัดระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำประประแดง พบว่า หลังจากปี ค.ศ. 1997 ที่ระดับน้ำใต้ดินลดลงต่ำสุด ได้มีมาตรการควบคุมและลดการใช้สูบน้ำบาดาล ทำให้เกิดการไหลเติมของน้ำในชั้นน้ำบาดาลธรรมชาติ แรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาลจึงฟื้นคืนสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันน้ำในชั้นดินที่มีผลต่อโครงสร้างใต้ดินฟื้นคืนสูงด้วย และจากการขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยทั่วไปเทียบกับข้อมูลแรงดันน้ำใต้ดินโดย (Phienwej et al., 2018) พบว่าระดับน้ำใต้ดินมีการคืนตัวอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 1.2

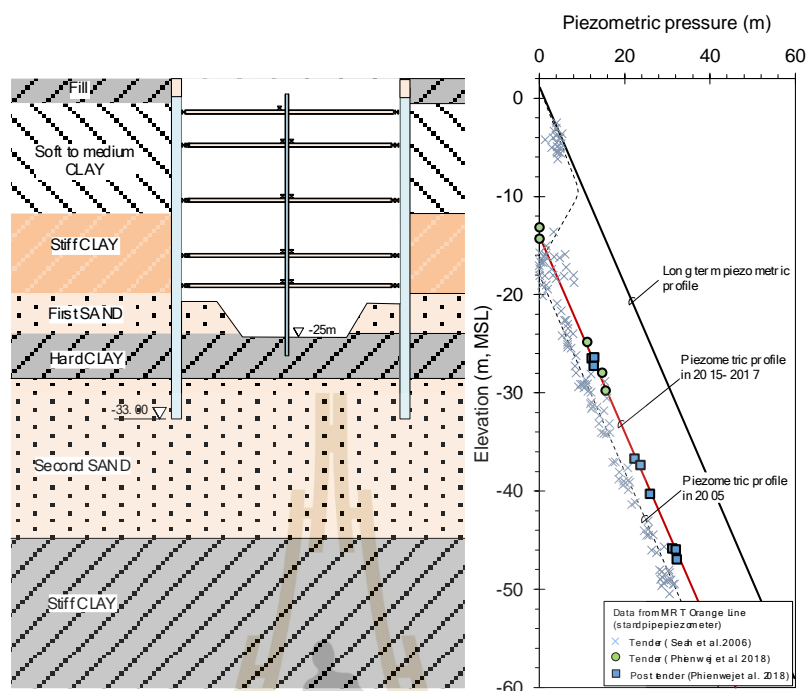
การแก้ปัญหาน้ำใต้ดินมีหลายแนวทางด้วยกัน เช่น การสูบน้ำใต้ดิน การออกแบบให้กำแพงกันดินยาวขึ้นเพื่อปิดทางไหลของน้ำหรือลดอัตราการไหลของน้ำ หรือการใช้วิธีทำให้น้ำในดินกลายเป็นน้ำแข็ง (ground freezing) แต่หนึ่งในทางเลือกที่นำมาใช้มากขึ้นคือ การปรับปรุงทรายให้มีสัมประสิทธิ์ความซึมที่ลดลงด้วยเทคนิคการเกราท์ (grouting) โดยวัสดุเกราท์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นซีเมนต์ แต่หากชั้นทรายที่ต้องการปรับปรุงมีความละเอียดมาก การเกราท์ด้วยซีเมนต์อาจเป็นไปได้ยาก เนื่องจากอนุภาคของซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่มีขนาดเล็กได้ยากและจำเป็นต้องใช้แรงดันสูงซึ่งแรงดันสูงนี้อาจทำให้เกิดการแตก (fracturing) ในมวลดินได้ จึงได้มีการใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุเกราท์แทน โดยสารละลายเคมีที่ใช้มีการออกแบบให้มีความหนืดต่ำและไม่มีอนุภาคแขวนลอยเหมือนซีเมนต์ จึงสามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายได้โดยไม่ต้องใช้แรงดันสูง ซึ่งสารละลายเคมีต้องก่อตัวกลายเป็นเจล (gel) อุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดทราย เพื่อให้ความซึมของดินลดลง โดย (Wiryatharaj et al., 2015) ได้รายงานถึงวิธีการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินในการ

ก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสนามไชย ที่ต้องขุดดินลึก 30 เมตร ลงในทรายชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยวิธีใช้วิธีการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี ที่มีส่วนผสมของ Sodium silicate, MK reactive, Silicon dioxide, Sodium compound และ น้ำ การฉีดใช้วิธี Tube-A-Manchette Grout (TAM grout) ซึ่งเป็นการอัดสารละลายให้ซึมเข้าในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพื่อลดความชื้นน้ำ ทำให้สามารถก่อสร้างชั้นใต้ดินได้โดยไม่มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามาในโครงการ จากตารางที่ 1.1 เห็นได้ว่าการใช้วิธีดังกล่าว มีค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการก่อสร้างที่ต่ำกว่าการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินโดยวิธีอื่น

สำหรับประเทศไทยการศึกษาพฤติกรรมของการเกราท์ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ ด้วยสารละลายเคมียังไม่มีการศึกษาวิจัย และยังต้องอาศัยเทคโนโลยีและวิธีผสมสารละลายเคมีจากต่างประเทศเป็นหลัก ทำให้เกิดเป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูง งานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของการเกราท์โดยใช้สารละลายเคมีที่ได้พัฒนาขึ้น โดยมุ่งเป้าไปที่ประสิทธิภาพในการลดความชื้นของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี และปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์ ได้แก่แรงดันที่ใช้ในการเกราท์ ความหนืดของสารละลายเคมีและอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย (void ratio) เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ในการเกราท์ของทรายชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพฯ และใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตำแหน่งในการเกราท์ การพัฒนาเครื่องจักรและเครื่องมือการอัดฉีดเกราท์ให้มีประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 1.1 โครงสร้างใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร (Paveechana et al., 2012)



รูปที่ 1.2 piezometric pressure ที่ได้จากการขุดก่อสร้างชั้นใต้ดินของชั้นทรายในชั้นดินกรุงเทพฯ (ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินจาก Seah et al., 2006 และ Phienwejet et al., 2018)

ตารางที่ 1.1 วิธีการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ส่วนต่อขยาย ที่สถานีสนามไชย (Wiriyatharakij et al., 2015)

Method	Material used	Impact on			
		Environmental	Cost (MBath)	Time	Adjacent building
TAM Grout (Tube-A-Manchette-Grout)	1.Sodium Silicate 2.MK Reactive 3.Silicon Dioxide 4.Sodium Compound 5.Water	No	375 MB.	8 Months	No
Jet Grout	Liquid Cement	Disposal of water	810 MB.	10 Months	No
Ground Freezing	Brine or Liquid Nitrogen	Disturb existing soil strength	> 3,000 MB.	> 12 Months	No

* Cost based on 57,000 cu.m.

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงพฤติกรรมของการเกราท์ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯด้วยสารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้น ในห้องปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดความชื้นของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมีที่มีองค์ประกอบหลักเป็น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate)
2. ศึกษาถึงอิทธิพลแรงดันในการเกราท์ที่ส่งผลต่อรูปร่างและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์
3. ศึกษาถึงอิทธิพลของความหนืดของสารละลายเคมีที่ส่งผลต่อรูปร่างและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์
4. ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ส่งผลต่อรูปร่างและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯและทรายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาเป็นตัวอย่างในการศึกษา และมีการทำให้ตัวอย่างทดสอบอิมมิตด้วยน้ำเพื่อจำลองสถานะที่ดินมีระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าตำแหน่งเกราท์ และเนื่องจากตัวอย่างทรายที่ใช้มีสัมประสิทธิ์ความชื้นสูง ในการทดสอบจึงปล่อยให้ น้ำในตัวอย่างไหลภายใต้แรงดันของเจลไหลออกมาจากตัวอย่างได้

วัสดุเกราท์ที่ใช้คือ สารละลายเคมีที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมซิลิเกต โดยเกราท์เคมีที่ใช้เป็นสูตรที่ได้ยื่นขอรับอนุสิทธิบัตรภายใต้ชื่อ โซเดียมซิลิเกตเจลกันน้ำ คำขอหมายเลข 1903001237 โดยในการทดสอบอัดฉีดเกราท์ไม่ทำการทดสอบในกรณีที่มีแรงดันกดทับ (overburden pressure) และไม่ได้ศึกษาผลที่เกิดจากการละลายของเจล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้ในการออกแบบตำแหน่งของการเกราท์และเลือกปั๊มที่ใช้ในการทำงานจริงได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการก่อสร้างจริง

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการเกราท์

Hausmann (1990) กล่าวว่า เทคนิคการเกราท์ (grouting) ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของพื้นผิวในวัสดุ เช่น เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน, ลดการทรุดตัว หรือ ลดการซึม ในวัสดุ โดยของเหลวที่เรียกว่า เกราท์ (grout) สามารถทำมาจากของเหลวผสมต่างๆ มากมาย แต่ที่พบมากส่วนใหญ่ คือ ซีเมนต์ (cement) ที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ หรือสารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของเกราท์ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น โดยเกราท์สามารถเป็นได้ทั้ง โฟม (foam), เรซินอินทรีย์ (organic resin), สารละลาย (solution) และสารผสมอื่นๆ เทคนิคการเกราท์เป็นที่รู้จักครั้งแรกในปี ค.ศ. 1802 โดย Charle Berigny วิศวกรชาวฝรั่งเศส ใช้เทคนิคการเกราท์ในการปรับปรุงฐานรากของประตูน้ำในเมือง Dieppe ประเทศฝรั่งเศส โดยเกราท์ที่ใช้เป็นสารแขวนลอยที่เกิดจากการผสมระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บ่มลงในหลุมเจาะเพื่อเติมเต็มโพรงในฐานรากของประตูน้ำที่เกิดความเสียหาย การใช้ประโยชน์ของเทคนิคการเกราท์ในช่วงแรก โดยส่วนใหญ่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกราท์ เพื่อปรับปรุงเขื่อนและอำนวยความสะดวกในกิจกรรมการทำเหมือง (Evans et al., 2021)

สำหรับการลดความชื้นของดินและการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนให้มีเสถียรภาพในการรับน้ำหนักกำลังแบกทาน (bearing capacity) มากขึ้น พบว่าการใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุในการเกราท์ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากอนุภาคของซีเมนต์ต้องผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดเล็กได้ จึงได้มีการกำหนดขอบเขตในการใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุในการเกราท์ ในกรวดที่มีขนาดคละปานกลางไปจนถึงหยาบ ในขณะเดียวกันในประเทศเยอรมันพบว่ามีความก้าวหน้าในการพัฒนาเกราท์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้สารผสม ซึ่งพื้นฐานเป็นสารละลายเคมี จากการพัฒนาโดย H. Joosten ในปี ค.ศ. 1926 ด้วยระบบ Joosten จากการใช้โซเดียมซิลิเกต (water glass) ที่มีความเข้มข้นสูงกับแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) เป็นวัสดุเกราท์ ในกรวดและทรายที่มีขนาดปานกลางไปจนถึงหยาบ โดยพบว่าการทำปฏิกิริยาของสารเคมี เป็นผลทำให้การเกราท์ในดินมีความชื้นผ่านที่ลดลงและมีกำลังที่มากขึ้น หลังปี ค.ศ. 1930 ระบบ Joosten ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานอุโมงค์รถไฟ แต่หลังจากทศวรรษที่ 1980 ได้มีการตระหนักถึงการพัฒนาในด้านสิ่งแวดล้อมและความต้องการในการบำบัดน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น การเกราท์โดยการใช้สารละลายเคมีจึงลดลง และมีการใช้เทคนิคการเกราท์ด้วยแรงดันสูง (Jet grouting) แทนการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี ในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับดิน หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาโดยการใช้ เรซิน และโฟม เป็นวัสดุในการเกราท์แทน (Kutzner, 1996)

2.2 วัสดุเกราท

วัสดุเกราท หากพิจารณาที่ขนาดของอนุภาคเกราทเป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ สารแขวนลอย (suspension) อิมัลชัน (emulsion) และสารละลาย (solution) โดย (Camberfort, 1987) ได้จำแนกวัสดุเกราทตามความเหมาะสมต่อการใช้งานไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของวัสดุเกราท (Camberfort, 1987)

Grout type	State									
	Suspensions			Solutions			Emulsions			
	Unstable		Stable	Chemical products						
Description	เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ที่แขวนลอยในตัวกลางที่มีอนุภาคเป็นของเหลว แล้วเกิดการแทรกซึมไปยังช่องว่างของเม็ดวัสดุก่อนเกิดการแข็งตัวภายในช่องว่าง			เป็นโมเลกุลของของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดมาผสมกันจนกลายเป็นสารเนื้อเดียว กลไกการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งนั้นจะมีความแตกต่างจากการเกราทโดยการใช้สารแขวนลอย			เป็นสารผสมที่เกิดจากอนุภาคของของเหลวที่ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน กระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว นอกจากนี้ยังรวมถึงโฟม ที่เกิดจากการใช้ก๊าซ เป็นตัวประสานในวัสดุเกราท			
Example	Cement	Bentonite + cement	Deflocculated bentonite	Sodium silicate hard gels	Sodium silicate diluted gels	Organic resins	Cement foams	Organic foams		
Range of use	Fissures		Sands and gravels, k m/s				Cavities	High water flows		
	>5 × 10 ⁻⁴	>10 ⁻⁴	>10 ⁻⁴	>10 ⁻⁵	>10 ⁻⁶					
Grouting control	Refusal pressure	Limited quantities					Filling			
Relative cost for the products to fill 1-m ³ voids	4.2 (deposit with $\gamma_d = 1.5$)	1 (cement 200 kg; bentonite 30 kg)	0.8 - 1	6	2 - 4	10 - 50	1.2	10		

2.2.1 สารละลายเคมี (chemical solution)

ในงานวิจัยนี้วัสดุเกราท์ที่ใช้เป็นสารละลายเคมี สำหรับลดความชื้นของน้ำในดิน (Warner et al., 2004) รายงานว่า เกราท์ประเภทสารละลายเคมีสำหรับลดความชื้นของน้ำ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้

1) อะคริลิกโพลิเมอร์ (acrylic polymer)

อะคริลิกโพลิเมอร์เกราท์ หรือไฮโดรเจล (hydrogels) เป็นสารละลายเคมีที่มีลักษณะเหมือนน้ำ สามารถแทรกซึมได้สูงในดิน และรอยแตกในหิน รวมถึงคอนกรีต หรือตัวกลางประเภทอื่นที่คล้ายเคียงกัน

เกราท์ประเภทนี้เมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว ก่อตัวกลายเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งมักเกิดการพองตัวเมื่อสัมผัสน้ำ และเกิดการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้แห้ง โดยพบว่าหากเกิดการขยายตัวซ้ำเมื่อสัมผัสน้ำ คุณสมบัติของเจลที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนสภาพ

2) โพลียูรีเทน (polyurethane)

โพลียูรีเทนเกราท์ ถือว่าเป็นเกราท์ประเภทสารละลายเคมี ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการควบคุมน้ำ โดยเฉพาะในการแก้ไขการรั่วซึมในโครงสร้าง เกราท์ประเภทนี้มีองค์ประกอบและประเภทที่หลากหลาย ส่งผลให้มีคุณสมบัติทั้งในด้านสถานะของไหลและของแข็งที่แตกต่างกัน โดยพบว่าบางส่วนของสารละลายต้องผสมกับน้ำ ในขณะที่บางส่วนเกิดการแยกตัว ก่อนการผสม โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีสมบูรณ์ได้เมื่อมีความชื้น ส่งผลให้สูตรผสมที่แตกต่างกันเกิดปฏิกิริยากลายเป็นเจล ของแข็ง หรือโฟม ที่แตกต่างกัน

เนื่องจากสูตรผสมของโพลียูรีเทน มีหลายสูตร พบว่า บางสูตร สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อมีความชื้น แต่บางสูตรต้องมีการผสมกับปริมาณน้ำขั้นต่ำ เนื่องจากองค์ประกอบของยูรีเทน คือ พรีโพลิเมอร์ (prepolymer) ซึ่งกระบวนการนี้ไม่สามารถสมบูรณ์ได้หากปราศจากความชื้น ดังนั้นปริมาณน้ำที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์

3) โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate)

โซเดียมซิลิเกตเกราท์ หรือ water glass solution เป็นส่วนประกอบของ สารอนินทรีย์ (inorganic) กับสารละลายออสัญฐานแก้ว (amorphous glass in solution) ซึ่งผลิตโดยการผสมทรายซิลิกากับโซดาแอส (soda ash) หรือโปแตช (potash) ภายใต้อุณหภูมิที่สูงมาก เมื่อเกิดการเย็นตัว แก้วเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นของเหลวหรือผง โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีความบริสุทธิ์พบว่า มีคุณสมบัติความเหนียวและการสร้างพันธะที่แข็งแรงได้หากอยู่ในพื้นที่แห้ง แต่หากเกิดการสัมผัสกับน้ำ การสร้างพันธะนี้มีความอ่อนตัวและเกิดการสลายของพันธะได้

โดยทั่วไป หากค่า pH ของซิลิกาเหลวต่ำกว่า 10.7 ความสามารถในการละลายจะลดลงและเริ่มเกิดการก่อตัวกลายเป็นเจล เช่นเดียวกับการใช้สารละลายตั้งต้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตเพื่อช่วยลดค่า pH แต่ถึงแม้ว่าวัสดุดังกล่าวมีความเป็นกรด การเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถถูกชะลอให้เพียงพอต่อความสามารถในการอัดฉีดได้ จึงเป็นสาเหตุให้มีการจำกัดสารละลายตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาเคมีกับโซเดียมซิลิเกต เพื่อให้สารมีพันธะที่แข็งแรงและมีความทนทานในการทำงานจริงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสารตั้งต้นทั่วไปที่ใช้ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน สามารถจำแนกได้ 3 กลุ่ม คือ เกลืออนินทรีย์ (inorganic salts), สารอินทรีย์/อะลิฟาติก

เอสเทอร์และเอไมด์ (organic/aliphatic esters and amides) และสารที่ทำให้มีความคงตัว (stabilizer)

ความเข้มข้นของซิลิเกตเริ่มต้น มีผลต่อคุณสมบัติและความทนทานในระยะยาวของเกราท์โดยอัตราส่วนน้ำหนักของซิลิเกตที่ละลายน้ำ ถือเป็นตัวกำหนดความสามารถในการละลายของแข็งและความไวต่อปฏิกิริยาของซิลิเกต ตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพของเกราท์ เช่น ค่า pH และความหนืด เป็นต้น

โดยทั่วไปปริมาณโซเดียมซิลิเกตที่นำมาใช้งานอยู่ที่ 30 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเกราท์ทั้งหมด เพื่อให้เกราท์มีความแข็งแรงและความทนทานต่อการใช้งานในระยะยาว แต่หากต้องการใช้งานอย่างถาวรพบว่า ปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่ำสุดที่ควรใช้คือ 50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเกราท์ทั้งหมด

ถึงแม้ว่าความหนืดของโซเดียมซิลิเกตเกราท์ที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าการใช้เกราท์ความหนืดต่ำชนิดอื่น แต่เกราท์เหล่านี้มีความสามารถในการซึมผ่านได้ดีในวัสดุ นอกจากนี้หากมีการรวมตัวกันของโซเดียมซิลิเกตกับสารลดแรงตึงผิว พบว่าความสามารถในการซึมผ่านวัสดุสูงขึ้น

2.2.2 การไหลของเกราท์ (rheology of grout)

rheology คือ การศึกษาเกี่ยวกับการไหลของวัสดุ โดยสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการศึกษาดังกล่าวประกอบด้วย คุณสมบัติพื้นฐานของไหล และ รูปแบบการไหล ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไหล (basic rheological properties)

Hausmann (1990) กล่าวว่า คุณสมบัติพื้นฐานของเกราท์ที่สำคัญประกอบไปด้วย ความคงตัว (stability), เวลาในการก่อตัว (setting time) และความหนืด (viscosity)

1) ความคงตัว เกราท์มีความคงตัวได้ ก็ต่อเมื่ออนุภาคของเกราท์นั้นยังคงแขวนลอยอยู่ในสารละลายจนกว่าถึงบริเวณดินที่ทำการเกราท์ เพราะหากเกราท์เกิดการตกตะกอนทันที ถือว่าเกราท์ไม่มีความคงตัว นอกจากนี้ยังพบว่าการแตกตัวของอิมัลชันและกระบวนการหลังของเหลวจากคอลลอยด์ประเภทเจล (syneresis) อาจถือว่าเป็นกระบวนการตกตะกอนได้เช่นกัน

2) เวลาในการก่อตัว คือ เวลาที่ทำให้เกราท์เกิดการแข็งตัว โดยพบว่าเกราท์ที่ป็นซีเมนต์นั้น ปกติเกิดการแข็งตัวภายใน 4 ถึง 24 ชั่วโมง โดยขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เติมแต่ง แต่สำหรับเกราท์เคมีนั้น เวลาในการก่อตัว คือเวลาที่ทำให้เกราท์เกิดการกลายเป็นเจล โดยระยะเวลาในการก่อตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับซีเมนต์

3) ความหนืด (μ) ถูกกำหนดโดยกฎความหนืดของนิวตัน ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนในของไหล (shear resistance, τ) กับอัตราเฉือน (velocity gradient, $\frac{dv}{dz}$) ดังสมการที่ 2.1

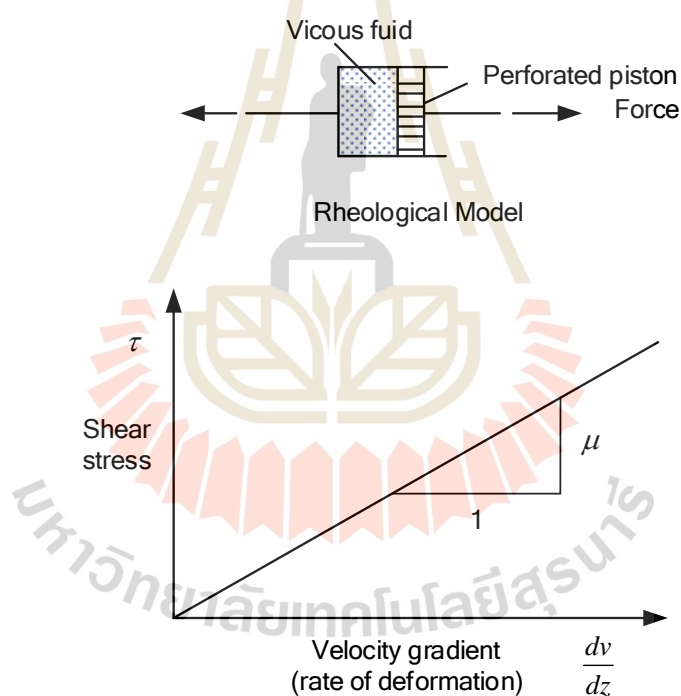
$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 การไหลของเกราทเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หมายความว่าอนุภาคของเกราทไหลไปในแนวราบเรียบ ไม่ถูกรบกวน

2.2.2.2 รูปแบบการไหล (rheological model)

Kutzner (1996) กล่าวว่าพฤติกรรมกรไหลของวัสดุเกราท ถูกกำหนดด้วยความหนืดและขีดจำกัดการไหล (flow limit) ซึ่งพฤติกรรมกรไหลในวัสดุเกราทนี้แบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

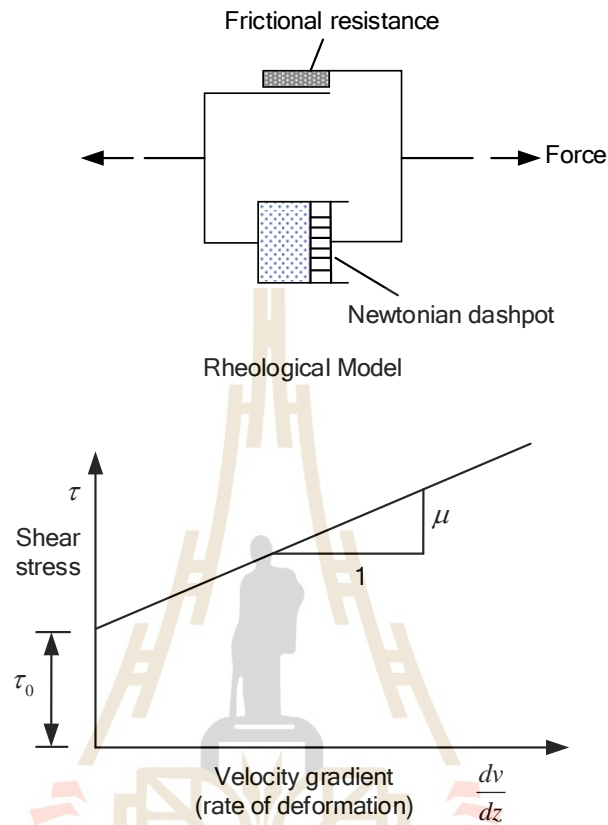
1) รูปแบบการไหลเชิงเส้น (linear) เป็นรูปแบบที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเค้น (stress) ความเครียด (strain) และอนุพันธ์ของของไหลที่เกี่ยวข้องกับเวลา ดังรูปที่ 2.1 โดยพบว่า ในของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ซึ่งเป็นของไหลที่ความเค้นเฉือน (shear stress) แปรผันโดยตรงกับอัตราเฉือน (velocity gradient) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1 มีรูปแบบการไหลเป็นแบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับอัตราเฉือนในของไหลนิวโตเนียน (Hausmann, 1990)

2) รูปแบบการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นรูปแบบที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน ซึ่งมีความเค้นครากเริ่มต้นก่อนการเสียรูป ดังรูปที่ 2.2 ของไหลที่เป็นไปตามกฎเช่นนี้เรียกว่า บิงแฮมบอดี (Bingham body) โดยบิงแฮมบอดีไม่ใช่ของเหลว แต่เป็นของแข็งหนืดพลาสติก ซึ่งพฤติกรรมกรไหลของของไหลบิงแฮมนี้ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.2

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dz} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับอัตราเฉือนในของไหลบิงแฮม (Hausmann, 1990)

ความเค้นครากเริ่มต้น (τ_0) อาจเรียกอีกอย่างว่าความแกร่ง (rigidity), การยึดเกาะ (cohesion) หรือขีดจำกัดการไหล (Lombardi, 1985) ซึ่งพฤติกรรมการไหลที่เป็นไปตามรูปแบบของไหลบิงแฮมบางครั้งเรียกว่า “พลาสติกในอุดมคติ (plastic ideal)”

สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน ความเร็วของการไหลมีเส้นแนวโน้มเป็นพาราโบลาโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดศูนย์กลางท่อฉีด ในขณะที่ของไหลแบบบิงแฮมลักษณะการไหล เป็นแกนแข็งที่เคลื่อนที่ไปตามจุดศูนย์กลางของหน้าตัด โดยมีแรงดันต่ำสุด กระตุ้นให้สารเกิดการไหล เนื่องจากของไหลประเภทนี้มีความแกร่ง

สำหรับที่สภาวะและความหนืดเดียวกัน พบว่า เกรทท์ที่เป็นของไหลแบบนิวโตเนียนมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าของไหลบิงแฮม โดยของไหลที่มีพฤติกรรมคล้ายน้ำ ของไหลประเภทนี้ ถูกจัดไว้ในกลุ่มของไหลแบบนิวโตเนียน ในขณะที่ซีเมนต์หรืออนุภาคดินเหนียวที่แขวนลอยถูกจัดไว้ในของไหลแบบบิงแฮม

สำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากเกรทท์ที่ใช้เป็นสารละลายเคมี ซึ่งเป็นของไหลนิวโตเนียน ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเฉพาะพฤติกรรมการไหลของของไหลดังกล่าว มาใช้ในการอธิบายการไหลของเกรทท์ในงานวิจัย

2.3 รูปแบบการเกรทท์

รูปแบบการเกรทท์สามารถจำแนกตามวิธีการอัดฉีดสารลงสู่พื้นดิน หรือใช้หลักเกณฑ์อื่น ในการแยกความแตกต่าง เช่น ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการเกรทท์, การนำไปใช้งาน รวมถึงลำดับขั้นตอนในการอัดฉีดและการก่อสร้าง โดย (Evans et al., 2021) จำแนกรูปแบบการเกรทท์ตามกลไกการทำงานไว้ดังนี้

2.3.1 การเกรทท์เพื่อความหนาแน่น (compaction grouting)

การเกรทท์เพื่อความหนาแน่น เป็นการอัดฉีดเกรทท์ที่มีความหนืดสูง ด้วยแรงดันสูงไปในบริเวณดินที่แยกออกจากกัน เพื่อให้เกรทท์เกิดการแทนที่ได้อย่างเหมาะสม โดยหลังจากทำการอัดฉีดเกรทท์แล้ว เกรทท์ยังคงมีความเป็นเนื้อเดียวกันพร้อมกับเกิดการขยายตัวไปแทนที่รอยแยกในดิน ทำให้ดินบริเวณข้างเคียงถูกอัดแน่น ส่งผลทำให้ดินมีความหนาแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการซึมลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเกาะตัวกันของดินอาจเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการที่ถูกทำให้แน่นขึ้น

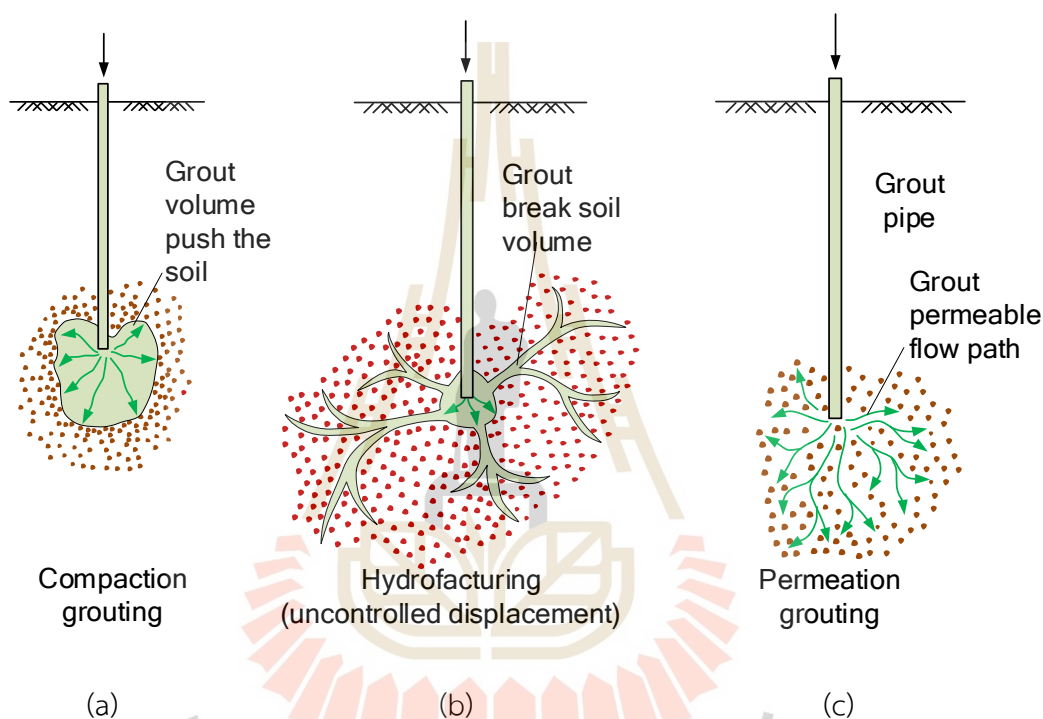
2.3.2 การเกรทท์แบบแตก (fracture grouting)

การเกรทท์แบบแตก เป็นการอัดฉีดของเหลวผสมไปในรอยแตกที่มีอยู่หรือรอยแตกที่เกิดขึ้นจากการสร้างชั้นในดิน ด้วยแรงดันสูงเพื่อให้เกรทท์เกิดการสร้างหรือขยายรอยแตกลงในดิน ทำให้เกิดโครงข่ายเกรทท์ที่แทรกซึมลงไปในช่วงว่างระหว่างเม็ดดินหรือรอยแตก ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของดิน โดยดินที่ติดกับรอยแตก ความหนาแน่นของดินมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับรูปแบบการเกรทท์นี้นิยมใช้ในการปรับระดับโครงสร้างหรือทำให้โครงสร้างที่วางอยู่มีเสถียรภาพมากขึ้น เกรทท์ที่ใช้มีตั้งแต่ความหนืดต่ำไปถึงสูง ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการฉีดและขนาดของการเกรทท์ โดยทั่วไปวัสดุเกรทท์ที่ใช้เป็นสารแขวนลอย

2.3.3 การเกรทท์แบบซึม (permeation grouting)

การเกรทท์แบบซึม เป็นการอัดฉีดของเหลวผสมให้ซึมไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยไม่เกิดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงใดๆในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือปริมาตร ส่งผลให้ดินมีความแกร่งและการไหลซึมของน้ำลดลง จุดเด่นของรูปแบบการเกรทท์ประเภทนี้คือ สามารถใช้ได้กับวัสดุเกรทท์ทุกประเภทที่สามารถอัดฉีดเข้าไปได้ แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้สารละลายในการเกรทท์ เนื่องจากความสามารถในการไหลไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพมากกว่า

รูปที่ 2.3 แสดงถึงกลไกการทำงานของรูปแบบการเกราท์ที่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ โดยรูปที่ 2.3 (a) แสดงถึงกลไกการทำงานของรูปแบบการเกราท์เพื่อความหนาแน่น โดยเกราท์เกิดการขยายตัวไปแทนที่รอยแยกในดิน ทำให้ดินบริเวณข้างเคียงถูกอัดแน่น รูปที่ 2.3 (b) แสดงถึงกลไกการทำงานของรูปแบบการเกราท์แบบแตก เมื่อเกราท์เกิดการสร้างหรือขยายรอยแตกลงในดิน ทำให้เกิดโครงข่ายเกราท์ที่แทรกซึมลงไปในช่วงว่างระหว่างเม็ดดิน รูปที่ 2.3 (c) แสดงถึงกลไกการทำงานของรูปแบบการเกราท์แบบซึม เมื่อเกราท์เกิดการซึมไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยช่องว่างระหว่างเม็ดดินไม่เกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของรูปแบบการเกราท์ที่แตกต่างกัน (a) การเกราท์เพื่อความหนาแน่น (b) การเกราท์แบบแตก (c) การเกราท์แบบซึม

Hausmann (1990) กล่าวว่ารูปแบบการไหลทรงกลม (spherical flow) และทรงกระบอก (radial flow) ในวัสดุที่มีความพรุน (porous media) มีความเหมาะสมในการอธิบายการเกราท์แบบซึมของดินจากหลุมเจาะ โดยใช้หลักการคือระยะทางที่เกราท์เคลื่อนที่ มีความสัมพันธ์กับอัตราการฉีดและระยะเวลา สำหรับการศึกษาค่าการซึมผ่านของเกราท์ในภาคสนามมีการศึกษาโดย (Raffle et al., 1961) ซึ่งรายงานไว้ว่า การเกราท์ในสนามของวัสดุที่มีความละเอียด มีความสัมพันธ์กับการซึมและช่องว่างของวัสดุ จึงได้ทำการบันทึกค่าคงที่ของการไหลของเกราท์บางชนิดไว้ ซึ่งในงานวิจัยได้นิยามให้ค่าคงที่การไหล คือ ความหนืดของเกราท์ สำหรับเกราท์ที่เป็นของไหลประเภทนิวโตเนียน เพื่อใช้ประมาณค่าอัตราการซึมของเกราท์ในการฉีดให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยค่าคงที่การไหลของวัสดุที่ใช้ในการเกราท์แต่ละประเภทเป็นไปตามตารางที่ 2.2 และได้ค่าอัตราการซึมของเกราท์ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่การไหลของเกรทที่แต่ละประเภท (Raffle et al., 1961)

Measured Rheological Constant of Typical Grouts					
	d ₈₀	Viscosity (cP)	Shear Strength (dynes/cm ²)		Relaxation time (minutes)
			on mixing	after standing	
Newtonian Grout 10% AM-9 solution Sodium Silicate M75		1.2 - 45			
Non - Newtonian Grout O.P. cement in water W/C ratio 0.4 W/C ratio 0.5 W/C ratio 0.66 W/C ratio 0.9 5% Wyoming Bentonite 5% Fulbent 570	60 μ	*116 *37 *14 *8.4 10 4.5	67.6 25.6 6.6 3.1 <2 <2	50 38	2 20
*At shear rate 100 sec ⁻¹					

ตารางที่ 2.3 เวลาที่ใช้ในการซึมตามรัศมีการซึมของเกรทที่กำหนด (Raffle et al., 1961)

Grouts	Time for permeation to specified radius (mins)							
	k = 10 ⁻¹			k = 10 ⁻²			k = 10 ⁻³	
	1 ft	2 ft	4 ft	1 ft	2 ft	4 ft	1 ft	2 ft
AM-9*	0.015	0.12	1	0.15	1.2	10	1.5	12
Sodium Silicate M.75	0.35	4.1	38	3.5	41			
* Acrylamide grout manufactured by American Cyanamid Company								

จากตารางที่ 2.3 พบว่า จากการคำนวณโดยประมาณให้ขอบเขตในการเกรทที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน เวลาที่ใช้ในการซึมตามรัศมีที่กำหนด ได้มาจากการประมาณค่าความหนืดเกรทสำหรับเกรทที่เป็นของไหลแบบนิวโตเนียน แต่สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เพียงรูปแบบการซึมของเกรทแบบทรงกลมในการอธิบายการซึมของเกรท เนื่องจากพิจารณาให้การเริ่มไหลของเกรทเป็นครึ่งรูปทรงกลมบริเวณปลายท่อฉีด

2.3.3.1 รูปแบบการซึมของเกรทแบบการไหลทรงกลมในวัสดุที่มีความพรุน (spherical flow model of porous media)

การซึมผ่านของเกรทไปยังดินโดยทั่วไป มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการซึมของเกรท ซึ่งสามารถวัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ที่เป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังสมการที่ (2.3)

$$Q = kiA \quad (2.3)$$

Hausmann (1990) กล่าวว่า การอัดฉีดเกรทผ่านท่อลงในดิน เกรทที่เกิดการซึมลงในดิน โดยคิดว่าเป็นรูปครึ่งทรงกลมจากบริเวณปลายท่อที่มีรัศมี R_0 ดังรูปที่ 2.4 ภายใต้อิทธิพลของแรงดันสุทธิ ซึ่งคือความแตกต่างระหว่างแรงดันในการเกรทกับแรงดันน้ำ ดังสมการที่

$$(2.4) \text{ ซึ่งคิดเป็นเฮดแรงดันได้ } \frac{P_e}{\gamma_G}$$

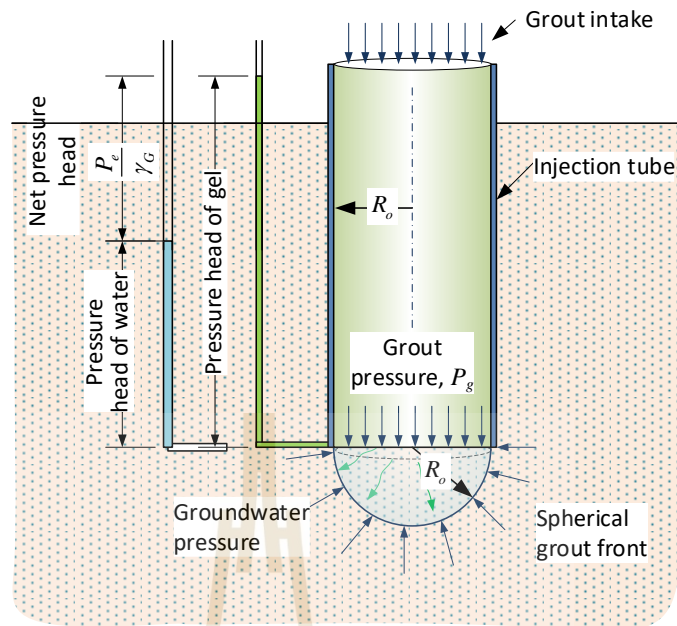
$$P_e = P_g - P_w \quad (2.4)$$

เมื่อ P_e คือ แรงดันสุทธิในการเกรท

P_g คือ แรงดันในการเกรท

P_w คือ แรงดันน้ำในดิน

γ_G คือ ความถ่วงจำเพาะของเกรท



รูปที่ 2.4 การพิจารณาแรงดันของการเกราท์ที่ไหลผ่านท่อฉีดลงดิน

จากสมการที่ (2.3) อัตราการไหลของเกราท์ผ่านท่อฉีดที่มีรัศมีปลายท่อเป็น R_0 แสดงได้ดังสมการที่ (2.5)

$$Q = kiA$$

$$Q = k_G i (4\pi R_0^2)$$

$$Q = k_G \frac{\Delta h}{\Delta x} (4\pi R_0^2)$$

$$Q = k_G \left(\frac{P_e}{\gamma_G} \cdot \frac{1}{R_0} \right) (4\pi R_0^2)$$

$$Q = k_G \left(\frac{P_e 4\pi R_0}{\gamma_G} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการฉีดเกราท์

k_G คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเกราท์

Kutzner (1996) ได้กล่าวว่า สำหรับของไหลนิวโตเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของของไหลกับความหนืด นั้นเป็นไปตามสมการที่ (2.6)

$$\frac{k}{k_G} = \frac{\mu}{\mu_w} \quad (2.6)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำ

μ คือ ความหนืดเกราท์

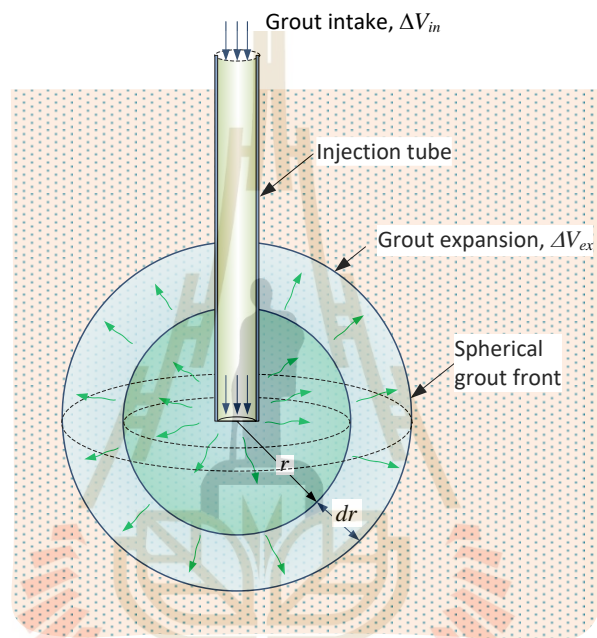
μ_w คือ ความหนืดของน้ำ

จากสมการที่ (2.5) จะได้แรงดันสุทธิในการเกราท์สำหรับการไหลแบบทรงกลมดังสมการที่ (2.7)

$$P_e = \frac{Q \gamma_G \mu_w}{4\pi R_0 \mu k} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) เห็นได้ว่าแรงดันสุทธิในการเกรทแปรผันตรงกับอัตราการฉีดและความหนืดของเกรท

ในระหว่างทำการเกรทแบบซึมเป็นเวลา dt เกรทเกิดการซึมเป็นระยะทาง dr ดังนั้นปริมาณการเกรทในเวลา t ได้จากการพิจารณาให้ปริมาตรของเกรทที่ฉีดลงที่ดิน (V_{in}) เท่ากับปริมาตรของเกรทที่แทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (V_{out}) โดยคิดให้ปริมาตรของเกรทที่ซึมลงดินเป็นรูปทรงกลมที่มีเกรทแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยรูปที่ 2.5 แสดงถึงแนวคิดของปริมาตรเกรทที่ฉีดลงดินกับปริมาตรเกรทที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ด



รูปที่ 2.5 การซึมของเกรทผ่านปลายท่อฉีดและซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นรูปทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายท่อฉีด

จากรูปที่ 2.5 เมื่อปริมาตรช่องว่างคำนวณได้จาก $V_v = nV$ (n คือ ความพรุนของดิน) ปริมาตรทรงกลมที่ขยายออกสัมพันธ์กับปริมาตรของเกรทที่ฉีดลงที่ดินตามสมการ (2.8)

$$V_{out,grout} = nV_{out}$$

$$V_{out,grout} = n(4\pi r^2 dr)$$

เมื่อ $V_{in} = V_{out,grout}$

$$\text{จะได้ } Qdt = n(4\pi r^2 dr) \quad (2.8)$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการซึมของเกรทให้มีรัศมี R ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.8) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.9)

$$\int_0^t Qdt = (4\pi n) \int_{R_0}^R r^2 dr$$

$$Q_t = \frac{4\pi n}{3} (R^3 - R_0^3) \quad (2.9)$$

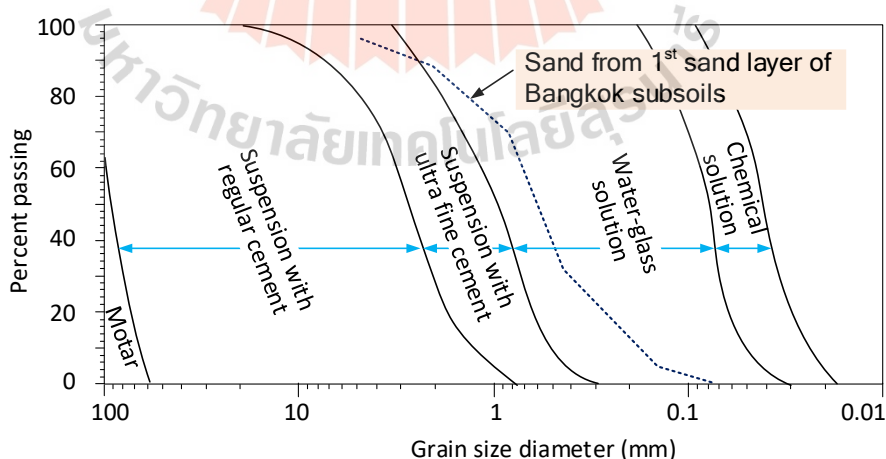
จากสมการที่ (2.9) เห็นได้ว่าขนาดของทรงกลมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการซึมของเกราท์ แปรผันตรงกับอัตราการฉีดและระยะเวลาที่ฉีด แต่แปรผกผันกับความพรุนของดิน ดังนั้นหากดินมีความพรุนสูงขนาดของทรงกลมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกราท์ จึงมีขนาดเล็กกว่าดินที่มีความพรุนต่ำ เมื่อทำการอัดฉีดเกราท์ในปริมาณเท่ากัน

2.3.3.2 ความสามารถในการซึมของเกราท์กับขนาดของเม็ดดิน

Hausmann (1990) กล่าวว่าขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของเกราท์ไปยังดิน ดังนั้นพารามิเตอร์หลักของดินที่ใช้ในการเลือกวัสดุเกราท์ ให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพในการเกราท์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สำหรับการเกราท์แบบซึม เพื่อเติมเต็มช่องว่างที่มีขนาดเล็ก โดยส่วนใหญ่ วัสดุเกราท์ที่ใช้เป็นประเภท สารละลาย เนื่องจากสารละลายมีอนุภาคขนาดเล็กหรือแทบไม่มี เมื่ออนุภาคเหล่านั้นถูกละลายในของเหลว ส่งผลทำให้เกราท์ประเภทนี้มีแนวโน้มการไหลได้อย่างอิสระ และง่ายกว่าเกราท์ประเภทอื่น ดังนั้นจึงได้มีการใช้สารละลายเป็นวัสดุในการเกราท์ในดินที่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดเล็ก (Evans et al., 2021)

ด้วยเหตุนี้การเกราท์ในดินทรายที่มีช่องว่างขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้สารละลายเคมีที่สามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้โดยไม่เกิดการแยกในมวลดิน ซึ่งสารละลายนี้ต้องก่อตัวเป็นเจลอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินหลังจากเกราท์เพื่อให้ความชื้นน้ำของดินลดลง รูปที่ 2.6 ชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุเกราท์แต่ละชนิดที่สัมพันธ์กับขนาดคละของเม็ดดิน ในกรณีของดินทรายที่อยู่ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ การใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกราท์ไม่เหมาะสมเท่ากับการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (water-glass solution) ซึ่งเป็นสารละลายเคมี



รูปที่ 2.6 ขนาดของเม็ดดินกับประเภทของวัสดุเกราท์ที่เหมาะสมในการเกราท์ (Kutzner, 1996)

2.3.4 การเกราท์เพื่อการแทนที่ (compensation grouting)

การเกราท์เพื่อการแทนที่ เป็นกระบวนการอัดฉีดที่มีการประยุกต์การใช้ การเกราท์เพื่ออุดรอยแตกและการเกราท์เพื่อเสริมความหนาแน่น โดยใช้แรงดันสูง มาแก้ไขการทรุดตัวของพื้นผิวที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น โพรงหินที่เกิดจากการถูกละลาย และกิจกรรมการก่อสร้าง เช่น การขุดอุโมงค์ การขุดเปิดขนาดใหญ่

2.3.5 การเกราท์เพื่อเติมเต็มช่องว่าง (void filling)

การเกราท์เพื่อเติมเต็มช่องว่าง เป็นการประยุกต์ใช้การอัดฉีด เพื่อเติมเต็มช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ใต้พื้นผิว ซึ่งช่องว่างขนาดใหญ่นี้อาจเกิดจากธรรมชาติ เช่น หลุมที่เกิดการยุบตัว หินปูนที่ถูกน้ำทำละลายให้เป็นหลุมบ่อ หรือจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น อุโมงค์ เหมือง เป็นต้น โดยวัตถุประสงค์ของการเกราท์รูปแบบนี้ คือ เติมเต็มช่องว่างเพื่อป้องกันการพังทลายในอนาคตที่อาจทำให้พื้นผิวเกิดการผิรุจนก่อให้เกิดความเสียหาย

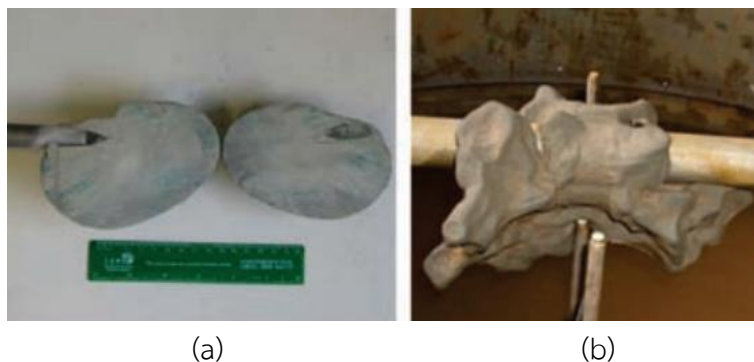
2.3.6 การเกราท์ด้วยแรงดันสูง (jet grouting)

การเกราท์ด้วยแรงดันสูง เป็นการเกราท์โดยใช้ของไหลด้วยแรงดันสูง เพื่อให้เกิดการกัดเซาะและผสมกับดินไปพร้อมกัน โดยใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนที่มีคุณภาพต่ำ เพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นดินที่มีความแข็งตัวมากขึ้น ซึ่งหลังจากทำการเกราท์ด้วยรูปแบบนี้ อนุภาคของดินกับของไหลเกิดการประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มวลดินมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยส่วนใหญ่กระบวนการนี้วัสดุเกราท์ที่ใช้เป็น สารแขวนลอย

จากรายละเอียดรูปแบบการเกราท์ที่จำแนกตามกลไกการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการเกราท์เพื่ออุดรอยแตก และการเกราท์แบบซึม มาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์ เนื่องจากวัสดุเกราท์ที่ใช้ เป็นสารละลายเคมี ดังนั้นการใช้รูปแบบการเกราท์ที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีความเหมาะสมในการใช้อธิบายรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์ในงานวิจัย

2.4 การศึกษาการเกราท์แบบแตกในทราย

Bezuijen et al. (2007) รายงานว่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า การอัดฉีดเกราท์ลงในทราย ทำให้ทรายที่ผ่านการเกราท์มีรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water cement ratio : w/c) เท่ากับ 1 ถึง 2 ทรายที่ผ่านการเกราท์ส่วนใหญ่เกิดในรูปแบบการเกราท์เพื่อความหนาแน่น และมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 5 ถึง 20 พบว่าเกิดการแตกในทรายรูปทรงกลมมากขึ้น ทรายที่ผ่านการเกราท์จึงเกิดในรูปการเกราท์แบบแตก ส่งผลให้โครงสร้างเกราท์ที่เกิดขึ้นค่อนข้างบาง ดังรูปที่ 2.7

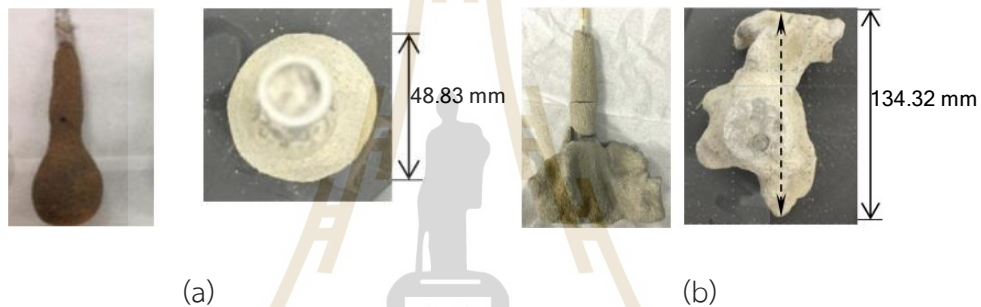


รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบการเกราท์ในทราย (a) การเกราท์เพื่อความหนาแน่น ทรายที่ผ่านการเกราท์ มีความเป็นทรงกลมมากกว่า (b) การเกราท์แบบแตก เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง (Bezuijen et al., 2007)

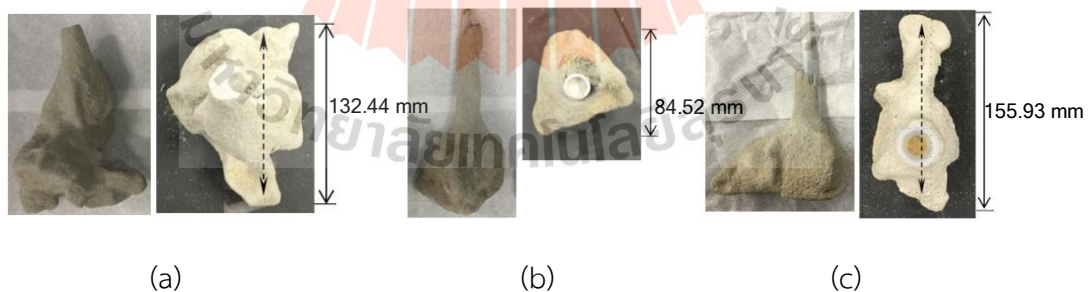
Garfa et al. (2008) ศึกษาปรากฏการณ์แตกในทรายเนื่องมาจากการเกราท์เพื่อการแทนที่ในเกราท์ที่เป็นของผสมในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณละเอียด ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการเริ่มต้นของการแตกในทราย เกิดจากบริเวณตำแหน่งการฉีกโดยรอบเกิดความไม่สม่ำเสมอ ซึ่ง (Bezuijen et al., 2007 และ Bezuijen & Van Tol, 2007) ได้รายงานว่าการแตกในมวลทรายเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มีแรงสัมผัสระหว่างเม็ดทราย ซึ่งในกรณีของดินที่ไม่มีการเกาะตัว เม็ดดินไม่มีความต้านทานแรงดึง ส่งผลให้แรงดันที่ก่อให้เกิดการแตก (fracture pressure) มีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้ทรายเกิดการแตก ซึ่งในความเป็นจริงเห็นได้ว่าทรายไม่ได้มีความเป็นเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายบริเวณโดยรอบภายใต้ขอบเขตที่กำหนด อาจมีอนุภาคทรายบางส่วนเกิดการสัมผัสหรือใกล้ชิดกัน ทำให้ทรายเกิดความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับการค้นพบจากการอิงตามกลศาสตร์ระดับจุลภาคของวัสดุที่เป็นเม็ด โดย (Thallak, 1991) ที่เสนอว่า การเริ่มต้นการแตกหักด้วยของไหลนั้น แรงสัมผัสระหว่างอนุภาคต้องเท่ากับ 0 เพราะหากอนุภาคมีความต้องการกระจายแรงเฉพาะที่ในระดับจุลภาค อาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในการแตก จึงสรุปว่าการเริ่มต้นการแตกหักด้วยของไหลขึ้นอยู่กับความไม่สม่ำเสมอในระดับจุลภาคของดินเป็นหลัก

Wang et al. (2016) ศึกษากระบวนการขยายตัวของเกราท์ในทรายภายใต้แรงดันคงที่ ในห้องปฏิบัติการ ในการทดสอบตัวอย่างทรายมีระดับความอิ่มตัว (degree of saturation) ตั้งแต่ 5 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ด้วยวิธีการฉีดพ่นน้ำและถูกบดอัดให้มีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.8 (ซึ่งถูกจัดเป็นทรายที่มีการจัดเรียงตัวแบบหลวม) ใช้วัสดุเกราท์เป็นซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water cement ratio : w/c) เท่ากับ 0.5 และ 1 ในการเกราท์ ผลการทดสอบพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการการขยายตัวของเกราท์ในตัวอย่างทราย คือแรงดันในการอัดฉีดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยแรงดันต่ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ การขยายตัวของเกราท์เกิดในรูปแบบการเกราท์เพื่อความหนาแน่น ดังรูปที่ 2.8 (a) ในขณะที่แรงดันสูงและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง การขยายตัวของเกราท์มีผลเนื่องมาจากการแตกของมวลดินด้วยของไหล (hydrofracturing) จึงเกิดในรูปแบบการเกราท์แบบแตก ดังรูปที่ 2.8 (b) นอกจากนี้จากผลทดสอบยังพบว่า ทรายที่มีระดับความอิ่มตัวแตกต่างกัน รูปแบบการ

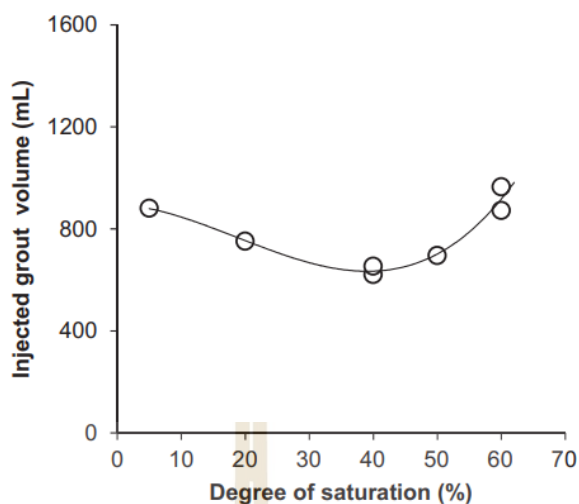
เกราะที่เกิดขึ้น เกิดในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยความสามารถในการอัดฉีดที่ลดลงรูปแบบการเกราะที่เกิดการพัฒนาจากรูปแบบการเกราะแบบแตกไปสู่การเกราะเพื่อความหนาแน่น ดังรูปที่ 2.9 (a) ระดับความอึดตัว 5% รูปแบบการเกราะเป็นแบบการเกราะแบบแตก รูปที่ 2.9 (b) ระดับความอึดตัว 40% รูปแบบการเกราะเป็นแบบการเกราะเพื่อความหนาแน่น และ รูปที่ 2.9 (c) ระดับความอึดตัว 60% รูปแบบการเกราะเป็นแบบการเกราะแบบแตก ทั้งนี้ความสามารถในการอัดฉีดที่ลดลง เกิดจากการที่ทรายมีความสามารถในการเกาะตัวกันมากขึ้น โดยพบว่าที่ระดับความอึดตัวของทรายที่เพิ่มขึ้นจาก 5 เปอร์เซ็นต์ (การเกาะตัวในเม็ดทรายเพิ่มขึ้น) ส่งผลทำให้ความสามารถในการอัดฉีดลดลง แต่เมื่อถึงจุดหนึ่ง ที่ระดับความอึดตัวของทราย ทำให้แรงตึงผิวของน้ำเกิดการแขวนลอยอยู่ระหว่างโพรงที่เกิดการแตก ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ทรายมีการเกาะตัวที่ลดลง ทำให้ความสามารถอัดฉีดเกราะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเกราะที่อัดฉีดกับระดับความอึดตัวของทรายตัวอย่างภายใต้แรงดันอัดฉีด 200 กิโลปาสคาล



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของแรงดันและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ส่งผลต่อการขยายตัวของเกราะลงในตัวอย่างทราย (a) แรงดันต่ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ (b) แรงดันสูงและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง (Wang et al., 2016)



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของระดับความอึดตัวของตัวอย่างทรายที่ส่งผลต่อการขยายตัวของเกราะลงในตัวอย่างทราย (a) ระดับความอึดตัว 5% (b) ระดับความอึดตัว 40% (c) ระดับความอึดตัวที่ 60% (Wang et al., 2016)



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกรทท์ที่อัดฉีดกับระดับความอิ่มตัวของทรายตัวอย่าง ภายใต้แรงดันอัดฉีด 200 กิโลปาสกาล (Wang et al., 2016)

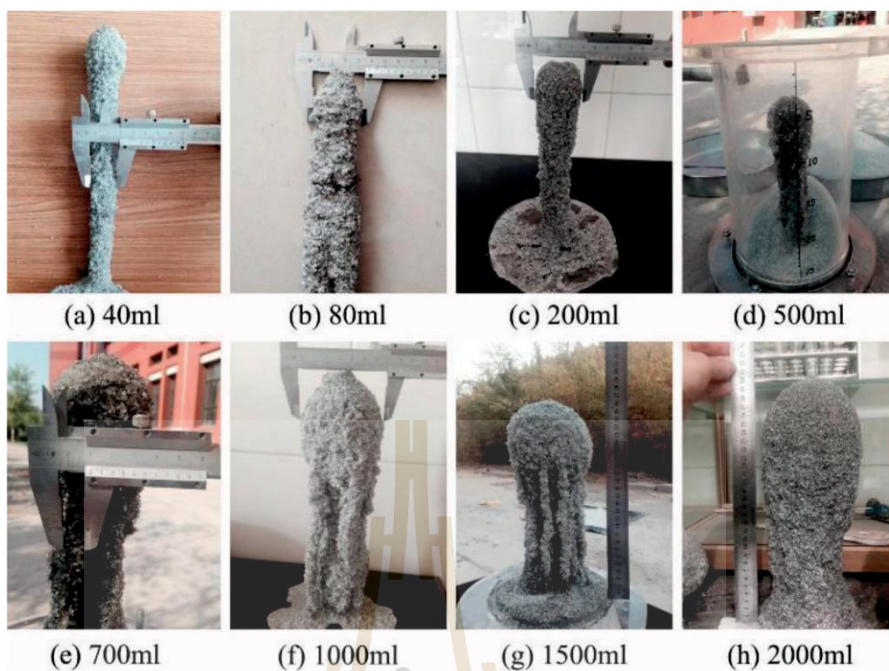
2.5 การศึกษาการเกรทท์แบบซิมในทราย

Liu et al. (2020) เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีของการแพร่กระจายแบบซิมในของไหลบึงแอมภายใต้แรงโน้มถ่วง ในการทดสอบใช้ตัวอย่างทรายที่มีอนุภาคขนาดกลางมาบรรจุใส่ในกระบอกที่จำลองขึ้นพร้อมกับทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ วัสดุเกรทท์ที่ใช้คือโพลีคาร์บอเนตอีเทอร์ชนิด SP ซึ่งมีลักษณะเป็นของไหลที่มีความสามารถในการไหลสูงและมีความแรงในช่วงแรก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการแพร่กระจายแบบซิมนี้ เกรทท์เกิดการกระจายตัวเป็นทรงกลม พร้อมกับเกิดการกระจายตัวเป็นแถบยาวภายใต้การแพร่กระจายทรงกลม ซึ่งการกระจายตัวเป็นแถบยาวนี้เกิดขึ้นจากการเสียรูปของการแพร่กระจายทรงกลมภายใต้แรงโน้มถ่วง ทำให้เกรทท์เกิดการแพร่กระจายไปยังด้านล่างของท่อฉีด

จากตารางที่ 2.4 เป็นผลการทดสอบการอัดฉีดเมื่อพิจารณาจากปริมาณอัดฉีดเกรทท์ที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณอัดฉีดเกรทท์เพิ่มขึ้น แถบหลักมีความหนาเพิ่มขึ้น ในขณะที่แถบด้านข้างจำนวนและความหนาค่อยเกิดการเพิ่มขึ้นและเกิดการประสานกับแถบหลักในที่สุด ดังรูปที่ 2.11

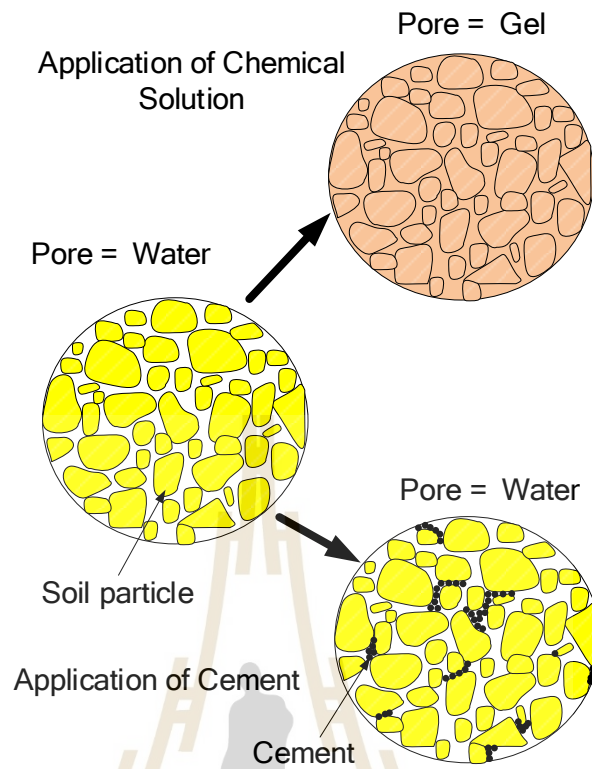
ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบการอัดฉีดเมื่อพิจารณาจากปริมาณอัดฉีดเกราะที่แตกต่างกัน (Liu et al., 2020)

Number	Grouting Quantity (ml)	Grouting Pressure (MPa)	Remark
a	40	0.012	One 22 mm main grout vein found at the lower end of the sphere
b	80	0.011	Two 22 mm lateral veins
c	200	0.012	Three 20 mm lateral veins with cementation phenomenon
d	500	0.023	One 25 mm main grout vein and four 15 mm lateral veins
e	700	0.039	One 25 mm main grout vein and seven 17 mm lateral veins
f	1000	0.068	One 30 mm main grout vein and nine 17 mm lateral veins
g	1500	0.071	One 45 mm main grout vein and thirteen 17 mm lateral veins
h	2000	0.075	One 60 mm main grout vein, and lateral veins were cementer



รูปที่ 2.11 ผลการอัดฉีดเกราทเมื่อแปรผันปริมาณการอัดฉีดเกราท (Liu et al., 2020)

Yamazaki et al. (2005) ศึกษาพฤติกรรมการเกราทแบบซึ่มด้วยสารละลายเคมีพร้อมกับการทดสอบในสนาม, คุณสมบัติพื้นฐานของทรายที่ผ่านการปรับปรุงโดยใช้ซิลิกาเจล และการนำการเกราทแบบซึ่มไปใช้ในงานจริง ในงานวิจัยได้มีการเสนอแนวความคิดไว้ว่า การเกราทแบบซึ่มด้วยสารละลายเคมี การแข็งตัวของอนุภาคดินมีความแตกต่างจากการเกราทโดยใช้ซีเมนต์ เนื่องจากสารละลายเคมีที่ฉีดเข้าไปแทนที่น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้ความสามารถในการซึ่มมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ซีเมนต์ อนุภาคดินที่เกิดขึ้นจึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ดังรูปที่ 2.12 จากแนวคิดดังกล่าวพบว่ามีผลสอดคล้องกับผลการทดสอบในสนามดังรูปที่ 2.13 นอกจากนี้จากผลทดสอบ การศึกษาลักษณะพื้นฐานของดินที่ผ่านการปรับปรุง โดยการทำให้ น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินถูกทำให้แข็งตัวด้วยซิลิกาเจล จากการทดสอบแบบ cyclic triaxial พบว่า ความสามารถในการซึ่มผ่านและการคายประจุลดลง เมื่อเกิดการแทนที่ของน้ำด้วยซิลิกาเจล



รูปที่ 2.12 ความแตกต่างระหว่างการเกราท์ด้วยซีเมนต์และการเกราท์แบบซึมด้วยสารละลายเคมี (Yamazaki et al., 2005)



รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบการเกราท์แบบซึมด้วยสารละลายเคมีในสนาม (Yamazaki et al., 2005)

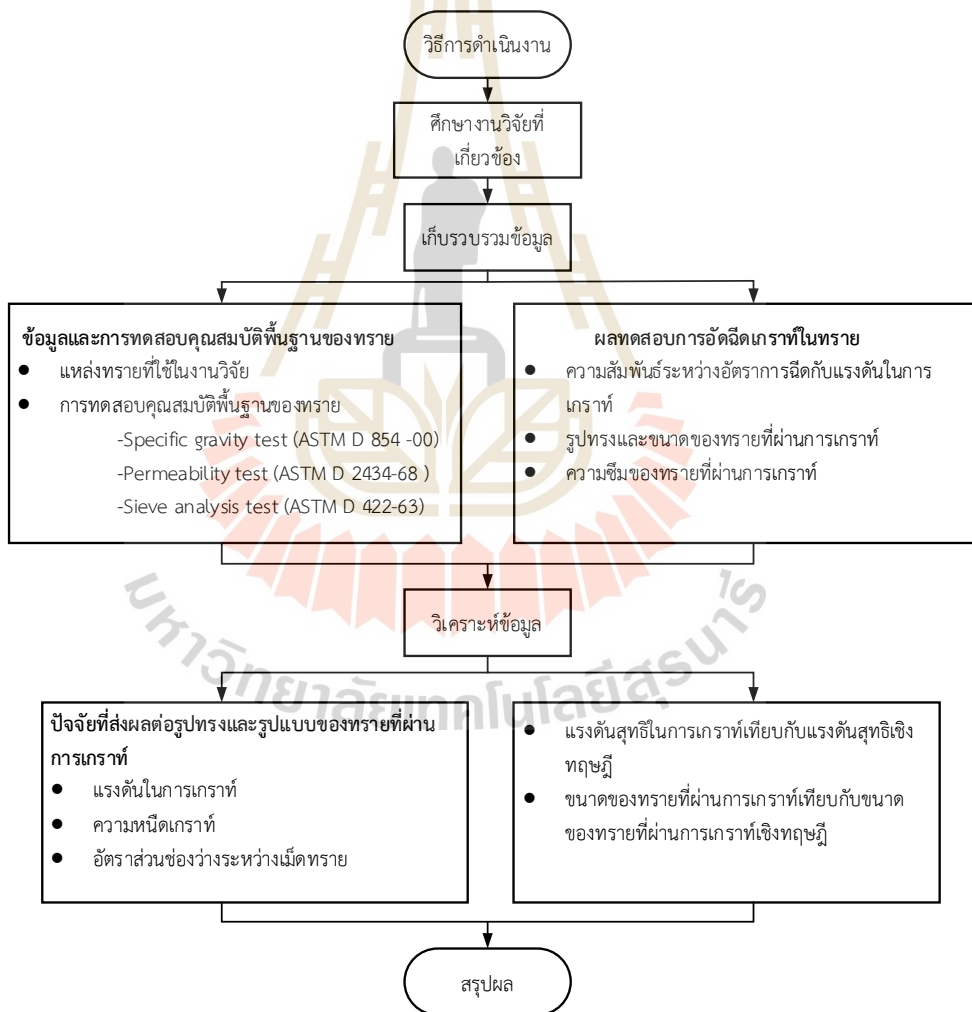
จากรูปที่ 2.13 เป็นภาพดินซูดหลังจากทำการเกราทแบบซิมด้วยสารละลายเคมีคือ ซิลิกาเจล เป็นระยะเวลา 1 เดือน จากผลการทดสอบพบว่า ดินที่ถูกเกราทด้วยซิลิกาเจลนั้น เมื่อเกิดการแข็งตัวมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมออกจากจุดฉีด

Mollamamutoglu et al. (2016) ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานการไหลของเกราทที่เป็นโซเดียมซิลิเกต และความซึ่มในตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท โดยตัวอย่างทดสอบมีการแปรผันของขนาดอนุภาคและความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) ผลการทดสอบคุณสมบัติการไหลพื้นฐานของเกราทพบว่า เมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น การก่อตัวกลายเป็นเจลลดลง ความหนืดของเกราทเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณโซเดียมซิลิเกตส่งผลต่อการขับของเหลวออกจากเจล (syneresis) อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า เมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น การขับของเหลวออกจากเจลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มเกิน 50 เปอร์เซ็นต์ การขับของเหลวออกจากเจลลดลง สำหรับความซึ่มในตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท พบว่า ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท มีความสามารถในการซึ่มลดลง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 150 วัน ทรายที่ผ่านการเกราทมีความสามารถในการซึ่มเพิ่มขึ้นประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการขับของเหลวออกจากเจล ส่งผลให้ความสามารถในการซึ่มลดลง 1 ถึง 4 เท่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป 150 วัน สำหรับขนาดของอนุภาคและความหนาแน่นสัมพัทธ์ในตัวอย่างทดสอบพบว่า ไม่ส่งผลต่อความซึ่มในทรายที่ผ่านการเกราท



บทที่ 3 วิธีการวิจัย

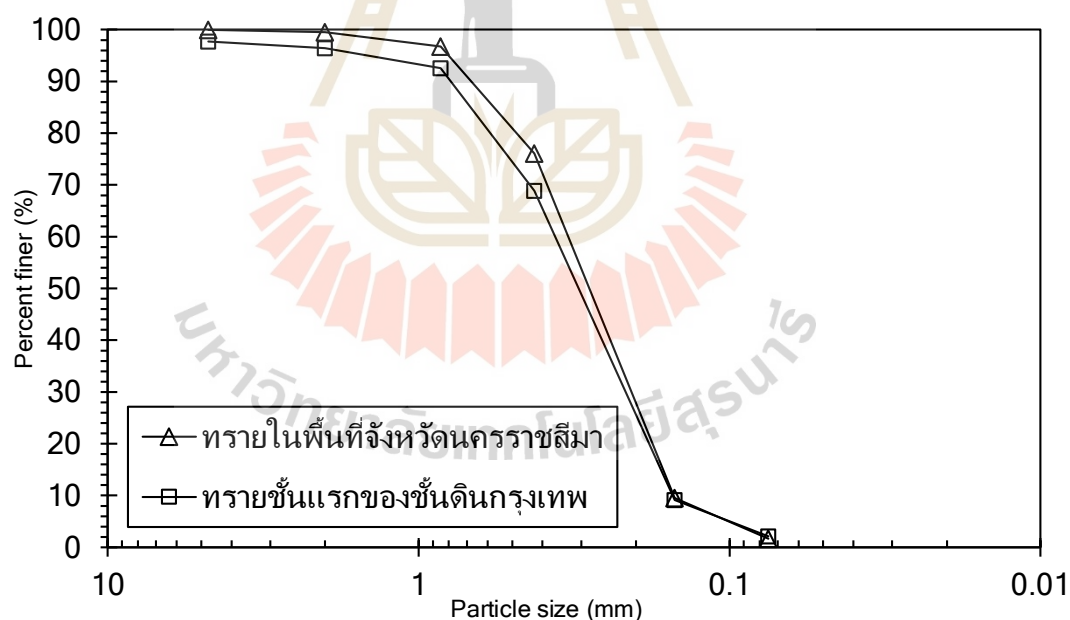
วิธีการวิจัยประกอบด้วย ตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ, วัสดุที่ใช้ในการเกราท์, เครื่องมือทดสอบ, วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ จากนั้นทำการวิเคราะห์ห้อิทธิพลของแรงดันที่ใช้ในการเกราท์, ความหนืดของสารละลายเคมีและอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ส่งผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ

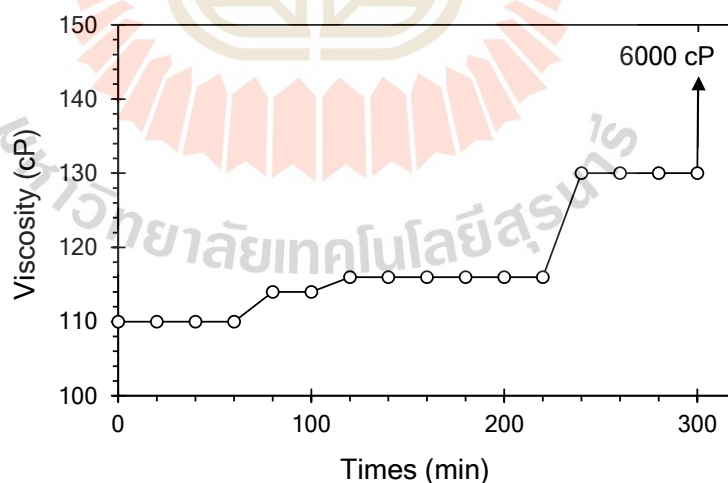
ในงานวิจัยต้องการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์ ตัวอย่างทรายในงานวิจัยจึงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ทรายชนิดที่ 1 เป็นตัวอย่างทรายที่เก็บจากชั้นทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯที่ระดับความลึก 30 – 30.5 เมตร ในโครงการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ ของอาคารคอนโดมิเนียม บนถนนจันทน์ เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร การเก็บตัวอย่างใช้วิธีเก็บโดยใช้ถังเก็บทราย (bucket) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร จากหลุมเจาะ BH-1 ตัวอย่าง SS-11 งานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดคละของตัวอย่างทรายที่เก็บขึ้นมาจากสนาม เป็นต้นแบบเพื่อสร้างทรายที่มีขนาดคละเหมือนกัน เพื่อให้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเกราท์ในทรายชนิดที่ 1 มีความสม่ำเสมอ สำหรับทรายชนิดที่ 2 เป็นทรายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีขนาดคละใกล้เคียงกับทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯเพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำกว่า ตัวอย่างทรายทั้ง 2 ชนิด มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 และ 2.60 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 854-00, ความหนาแน่นเท่ากับ 2.17 และ 2.22 ตันต่อลูกบาศก์เมตร, อัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.52 และ 0.46, และมีสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเท่ากับ 2×10^{-4} และ 1×10^{-4} เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2434-68 ในทรายชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ รูปที่ 3.2 เป็นขนาดคละของทรายตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 422-63



รูปที่ 3.2 ขนาดคละของทรายตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด

3.2 วัสดุที่ใช้ในการเกราท์

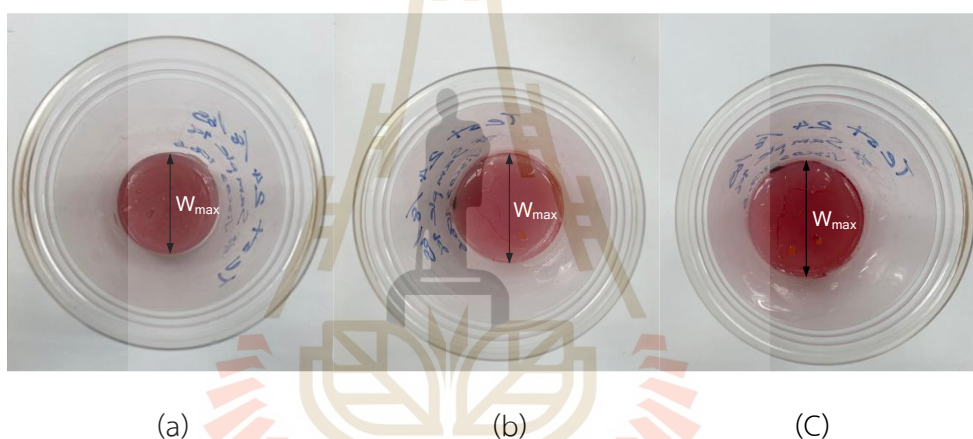
วัสดุเกราท์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้นโดยมีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมซิลิเกตและสารเคมีผสมเพิ่มที่ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นเจล โดยเกราท์เคมีที่ใช้เป็นสูตรที่ได้ยื่นขอรับอนุสิทธิบัตรภายใต้ชื่อ โซเดียมซิลิเกตเจลกั้นน้ำ คำขอหมายเลข 1903001237 เกราท์เคมีตามสูตรที่ยื่นขอนี้ มีค่า pH ประมาณ 11.4 โดยเกราท์หลังจากผสมเสร็จเป็นสารละลายเคมีที่มีความหนืดประมาณ 110 เซนติพอยส์ ถึง 115 เซนติพอยส์ จนถึง 220 นาที จากนั้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 เซนติพอยส์ จนถึง 300 นาที ก่อนที่เกราท์เคมีจะมีความหนืดสูงขึ้นด้วยอัตราที่สูงจนมีความหนืดเป็น 6000 เซนติพอยส์ ดังรูปที่ 3.3 ดังนั้นในงานวิจัยจึงใช้เกราท์เคมีที่มีความหนืดประมาณ 110 เซนติพอยส์ ทำการฉีดลงตัวอย่างทรายเป็นระยะเวลาไม่เกิน 220 นาทีหลังการเตรียมสาร และเกราท์เคมีที่มีความหนืดประมาณ 130 เซนติพอยส์ ฉีดลงตัวอย่างทรายเป็นหลังจาก 220 นาทีหลังการเตรียมสาร และฉีดเสร็จภายในเวลาไม่เกิน 300 นาที ในการทดสอบเลือกใช้เกราท์เคมีที่การควบคุมให้อยู่ในช่วงความหนืด 110 ± 8 เซนติพอยส์ (V110) และ 130 ± 8 เซนติพอยส์ (V130) และเกราท์เคมีนี้เมื่อเกิดการก่อตัวกลายเป็นเจลพบว่า ภายใต้สภาวะที่มีน้ำเกราท์เคมีเกิดการบวมตัว (swelling) โดยรูปที่ 3.4 เป็นภาพถ่ายเกราท์เคมีหลังจากผสมจนถึง 300 นาที ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำและเกราท์เคมีหลังจากทิ้งไว้เกิน 300 นาที จนก่อตัวกลายเป็นเจล และรูปที่ 3.5 เป็นภาพถ่ายเกราท์เคมีหลังก่อตัวกลายเป็นเจลโดยพบว่า เมื่ออยู่ในสภาวะที่แห้งเกราท์เคมีเกิดการหดตัวและมีความกว้างมากที่สุด (W_{max}) เท่ากับ 5.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 (a) แต่เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีน้ำโดยรอบเมื่อระยะเวลาผ่านไป 7 วัน และ 28 วัน พบว่า เกราท์เคมีเกิดการบวมตัวพร้อมกับดูดน้ำบริเวณโดยรอบทำให้มีความกว้างมากที่สุดเท่ากับ 7 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 (b) และ 3.5 (c)



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเกราท์กับระยะเวลา



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเกร้าท์เคมีก่อนและหลังก่อตัวกลายเป็นเจล

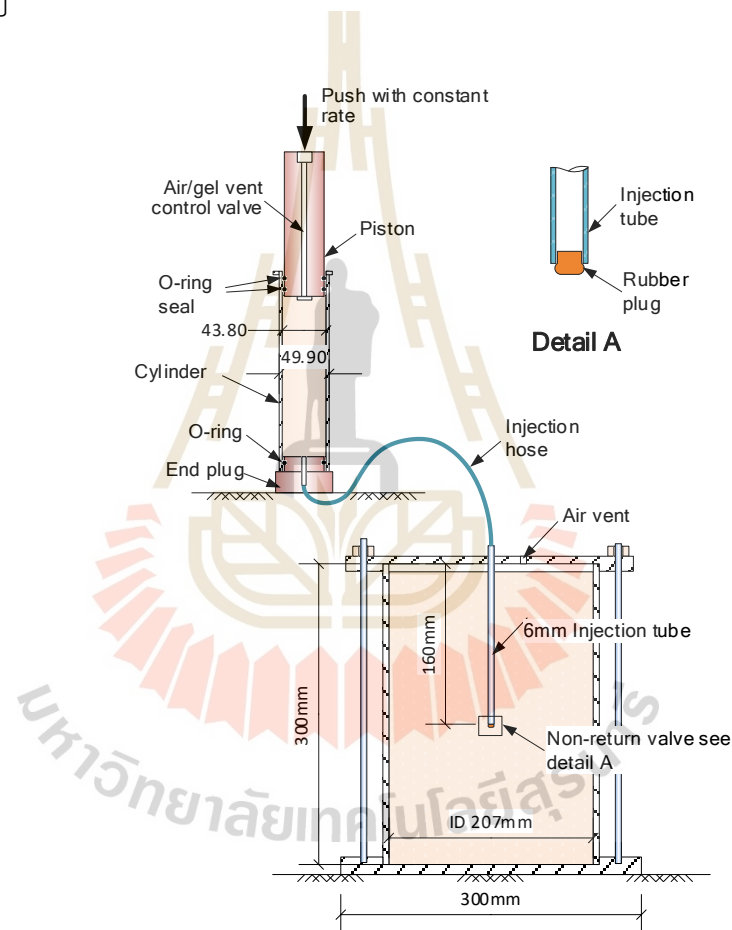


รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเกร้าท์เคมีหลังก่อตัวกลายเป็นเจล (a) เกร้าท์เคมีหดตัวเมื่ออยู่ในสภาวะที่แห้ง (b) เกร้าท์เคมีเมื่อทิ้งอยู่ในสภาวะที่มีน้ำโดยรอบเป็นระยะเวลา 7 วัน (c) เกร้าท์เคมีเมื่อทิ้งอยู่ในสภาวะที่มีน้ำโดยรอบเป็นระยะเวลา 28 วัน

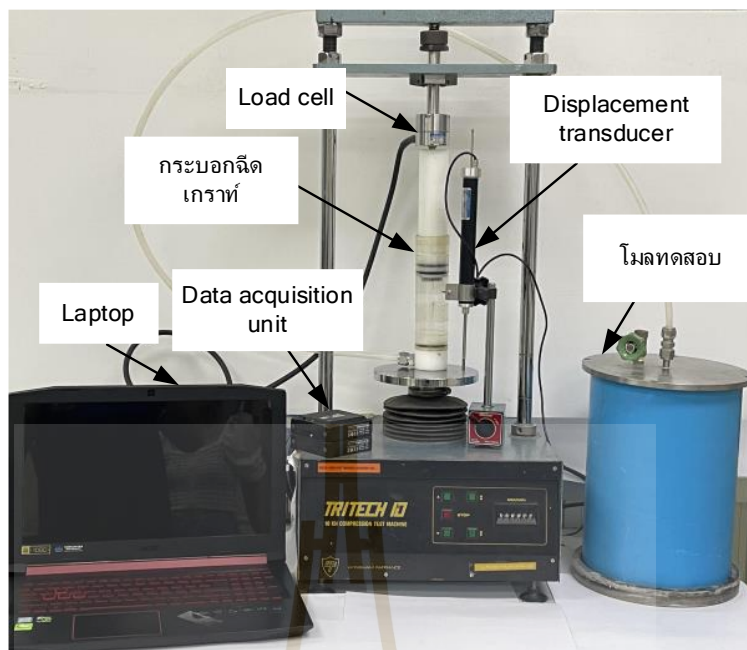
3.3 เครื่องมือทดสอบ

ในงานวิจัยได้ออกแบบเครื่องมืออัดฉีดเกร้าท์ลงในทรายที่มีอัตราฉีดเกร้าท์คงที่ โดยใช้หลักการของกระบอกฉีดและลูกสูบ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ (Wang et al., 2016) ที่ใช้แรงดันอากาศเพื่อทำให้แรงดันของการเกร้าท์คงที่ เหตุผลที่ใช้อัตราฉีดเกร้าท์คงที่เพื่อให้ตรงกับวิธีฉีดเกร้าท์ที่ใช้ในสนามซึ่งใช้กระบอกสูบและลูกสูบในการฉีดเกร้าท์ที่มีความต่อเนื่อง รูปที่ 3.6 เป็นแบบเครื่องมือที่ใช้อัดฉีดเกร้าท์ โดยเครื่องมือประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่กระบอกฉีดเกร้าท์และโมลบรรจุทรายสำหรับทดสอบ กระบอกฉีดเกร้าท์ทำจากท่ออะคริลิกใสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 43.8 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ส่วนลูกสูบที่ใช้อัดเกร้าท์ทำจากพลาสติกทนสารเคมีที่มีโอริงขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกฉีดเพื่อใช้สร้างแรงดันในการฉีดเกร้าท์ลงในโมลทดสอบ ตรงแกนกลางลูกสูบลูกสูบมีวาล์วสำหรับเปิดเพื่อใช้ไล่อากาศหลังจากบรรจุเกร้าท์เคมีลงในกระบอกฉีดหรือเปิดเพื่อขจัด

สูญญากาศเมื่อถอนกระบอกลัดหลังจากทดสอบเสร็จ และวาล์วนี้จะถูกปิดเมื่อกดลูกสูบในขณะที่อัดเกราะที่ในกระบอกลัด เมื่อฉีดเกราะที่ จะไหลผ่านท่อพลาสติกทนแรงดันที่ส่วนล่างของกระบอกลัด ท่อพลาสติกทนแรงดันต่อกับท่อฉีดสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 160 มิลลิเมตร ฝังลงในตัวอย่างทราย ที่ปลายท่อฉีดมีวาล์วที่ป้องกันการไหลย้อนกลับ (non-return valve) เพื่อกันทราย, น้ำ, และสารละลายเคมีที่มีแรงดันไหลย้อนเข้ามาในท่อฉีด วาล์วจะเปิดออกเมื่อแรงดันเกราะที่สูงเกินกว่าแรงดันภายนอก และจะปิดเมื่อแรงดันภายนอกสูงกว่าแรงดันภายใน สำหรับโมลทดสอบทำจากพลาสติก PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 207 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โมลมีฝาปิด และมีวาล์วระบายแรงดันซึ่งยึดโมลไว้กับฐาน รูปที่ 3.7 เป็นภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกราะ และโมลทดสอบ



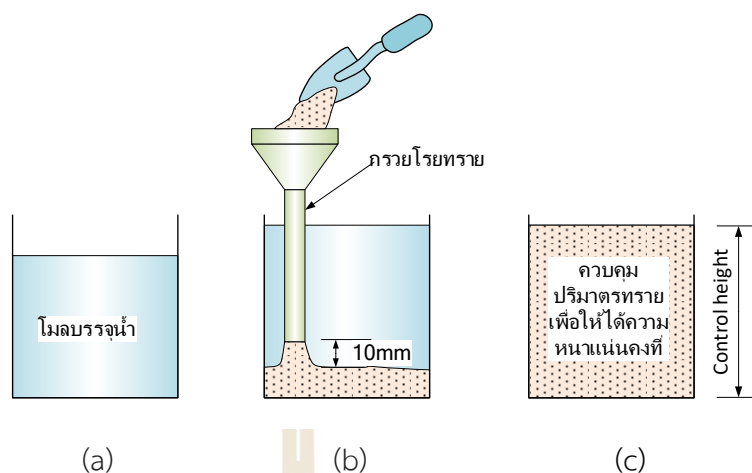
รูปที่ 3.6 โมลทดสอบและระบบฉีดเกราะด้วยอัตราฉีดคงที่



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกรทท์และโมลทดสอบ

3.4 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบนี้ได้จำลองสภาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินโดยใช้ตัวอย่างทรายอิมิต์ด้วยน้ำ ซึ่งแตกต่างไปจากงานวิจัยโดย (Wang et al., 2016) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ทำโดยนำทรายอบแห้ง 13 กิโลกรัม โรยผ่านกรวยลงโมลทดสอบที่มีน้ำบรรจุอยู่ โดยให้ปลายกรวยสูงกว่าระดับทราย 1 เซนติเมตรตลอดเวลา เพื่อควบคุมความหนาแน่นของทรายให้สม่ำเสมอ ตรวจสอบโดยการวัดปริมาตรของทรายในโมลหลังจากเตรียมตัวอย่างทดสอบ ซึ่งความหนาแน่นสัมพันธ์กับอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ในงานวิจัยนี้จึงใช้ความหนาแน่นของดินในโมล สำหรับควบคุมความสม่ำเสมอของตัวอย่าง รูปที่ 3.8 เป็นลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (a) ใส่น้ำลงในโมลทดสอบ (b) ใส่ตัวอย่างทรายแห้งผ่านกรวยยาวลงในโมลทดสอบ (c) ตัวอย่างทรายหลังเตรียมเสร็จ

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับการทดสอบการอัดฉีดเกรทลงในตัวอย่างทราย การฉีดใช้การกดด้วยอัตราคงที่ เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ โดยวัดแรงอัดด้วยอุปกรณ์วัดแรง (load cell) และวัดระยะการเคลื่อนตัวของกระบอกฉีดด้วยเซนเซอร์วัดระยะขจัด (displacement transducer) โดยใช้หน่วยรับข้อมูล (data acquisition unit) ในการเก็บข้อมูล แรงดันของเกรทเคมีคำนวณจากแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีด และปริมาตรการฉีดคำนวณจากกระยะการเคลื่อนของกระบอกฉีดคูณกับพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีด เมื่อฉีดเกรทเคมีลงในทรายแล้วทิ้งไว้ 72 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายเคมีก่อตัวกลายเป็นเจล จากนั้นชุดทรายที่เกรทแล้วออกจากโมลเพื่อบันทึกภาพและวัดขนาดของทรายที่มีเกรทแทรกอยู่ ตารางที่ 3.1 เป็นสัญลักษณ์แทนอัตราการฉีดและตารางที่ 3.2 เป็นรายละเอียดจำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัย สำหรับการหาขอบเขตสารละลายเคมีที่ซึมลงในทราย เพื่อตรวจสอบขนาดของทรายที่ผ่านการเกรท ใช้วิธีตรวจสอบค่า pH ของสารละลายจากบริเวณที่คาดว่า จะเป็นขอบเขตของการเกรท โดยในการทดสอบหาก pH มีค่าไม่เกิน 6 ถือว่าเป็นทรายที่ไม่มีเกรทเคมีอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย การทดสอบการลดความชื้นของทรายที่ผ่านการเกรท ใช้การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ โดยวิธีความดันเปลี่ยน (variable head) เนื่องจากตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกรทด้วยสารละลายเคมีแล้ว มีการชึมน้ำต่ำมาก การทดสอบใช้ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกรทในกระบอกทดสอบ จากนั้นปล่อยให้แห้งผ่านตัวอย่างภายใต้แรงดันที่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีด

สัญลักษณ์ ตัวแปร	อัตราการเคลื่อน ของลูกสูบ (มิลลิเมตรต่อนาที)	อัตราฉีด (มิลลิลิตรต่อนาที)
R3	3	4.56
R4	4	6.08
R5	5	7.60

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

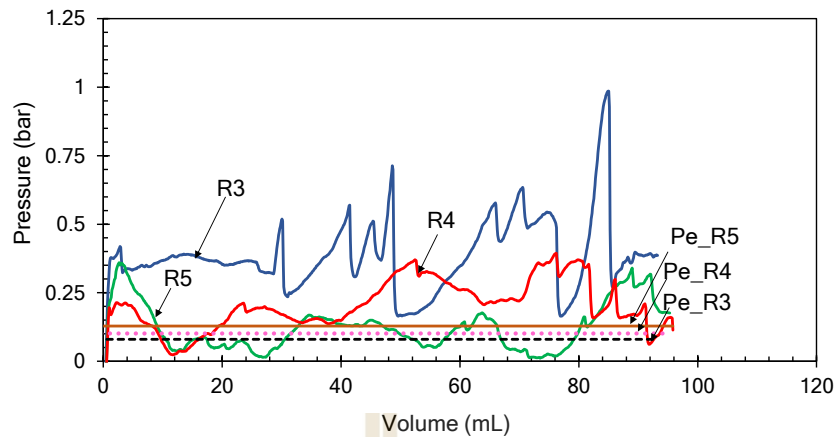
ตัวอย่าง	Void ratio	ความหนืด (เซนติพอยส์)	อัตราการฉีด		
			R3	R4	R5
1	0.52	V110	1	-	-
2		V110	-	1	-
3		V110	-	-	1
4		V130	1	-	-
5		V130	-	1	-
6		V130	-	-	1
7	0.46	V110	1	-	-
8		V110	-	1	-
9		V110	-	-	1
10		V130	1	-	-
11		V130	-	1	-
12		V130	-	-	1

บทที่ 4 ผลการวิจัย

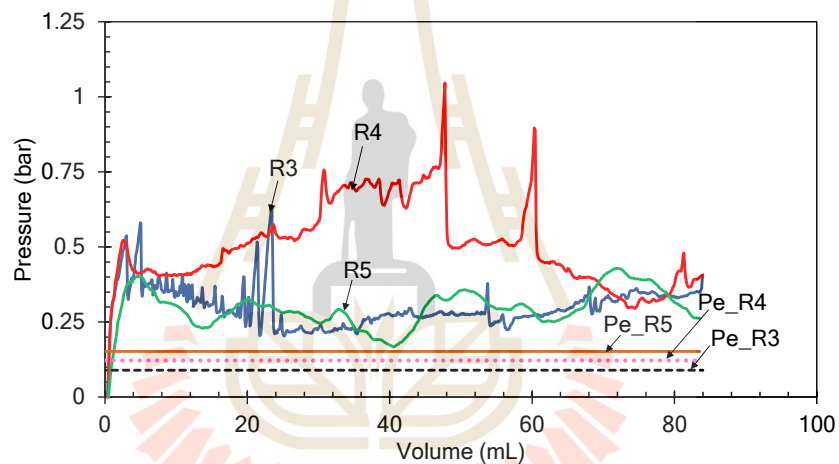
งานวิจัยนี้ได้รายงานผลการทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันในการเกราท์ รูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ และความชื้นของทรายที่ผ่านการเกราท์ จากการทดสอบการอัดฉีดเกราท์ลงในตัวอย่างทราย จากนั้นวิเคราะห์อิทธิพลของแรงดันที่ใช้ในการเกราท์, ความหนืดของสารละลายเคมีและอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ส่งผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์ รวมถึงขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เทียบกับขนาดเชิงทฤษฎี เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนตำแหน่งของการเกราท์ในการทำงานจริงได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันที่ใช้ในการเกราท์

รูปที่ 4.1 และ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกราท์กับปริมาตรเกราท์ในทรายชนิดที่ 1 ที่ความหนืด V110 และ V130 ตามลำดับ พบว่า ช่วงแรกของการทดสอบ แรงดันมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ฉีด แรงดันในช่วงนี้เป็นแรงดันที่ยางปิดปลายท่อฉีดยังไม่เปิดออก ซึ่งเมื่อยางปลายท่อเปิดออกแรงดันเริ่มลดลง โดยการพัฒนาแรงดันของทั้ง 3 อัตราการฉีด พบว่า ความหนืด V110 ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 มีการพัฒนาของแรงดันสูงที่สุดตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 และ อัตราการฉีดเท่ากับ R5 มีค่าต่ำสุด ในขณะที่ความหนืด V130 พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 เกิดการพัฒนาของแรงดันมากที่สุด ตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R5 ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 ความหนืด V110 และอัตราการฉีดเท่ากับ R4 ความหนืด V130 เกิดแรงดันสูงและลดลงอย่างฉับพลันในระหว่างการทดสอบ

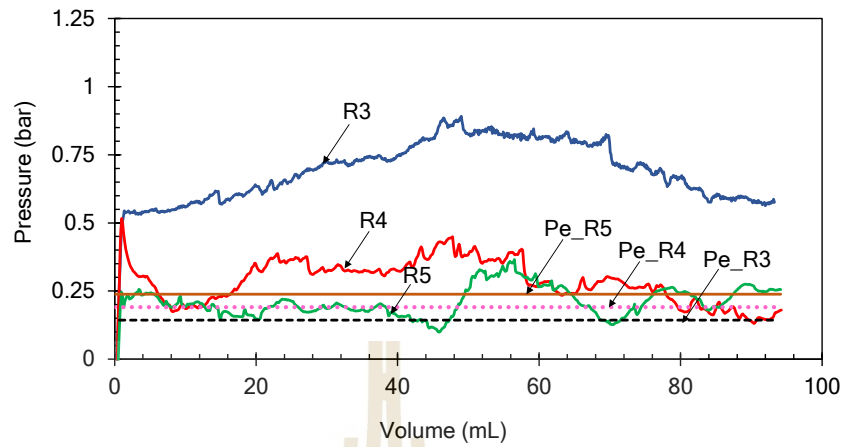


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกรงกับปริมาตรเกรงด้วยความหนืด V110 ในทราย ชนิดที่ 1

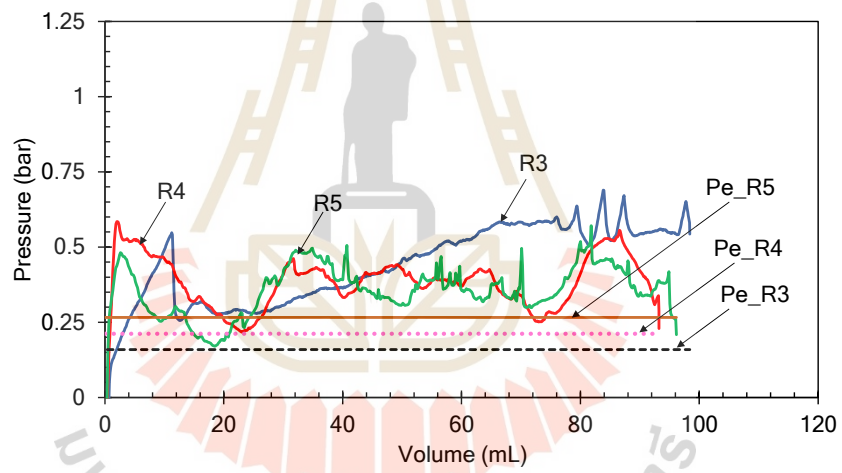


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกรงกับปริมาตรเกรงด้วยความหนืด V130 ในทราย ชนิดที่ 1

รูปที่ 4.3 และ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกรงกับปริมาตรเกรงในทรายชนิดที่ 2 ที่ความหนืด V110 และ V130 ตามลำดับ พบว่า ช่วงแรกของการทดสอบ แรงดันมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้ฉีดและเริ่มลดลงเช่นเดียวกับทรายชนิดที่ 1 โดยการพัฒนาแรงดันของทั้ง 3 อัตราการฉีดพบว่า ทั้งความหนืด V110 และ V130 ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 มีการพัฒนาของแรงดันสูงสุดตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 และ อัตราการฉีดเท่ากับ R5 มีค่าต่ำสุด จากแนวโน้มการพัฒนาแรงดันของทั้ง 3 อัตราการฉีด พบว่า มีแนวโน้มคล้ายกับการพัฒนาแรงดันของการเกรงที่ในทรายชนิดที่ 1 ด้วยความหนืด V110 โดยพบว่าที่ความหนืด V130 แรงดันในการเกรงที่เกิดการผ่นผวนมากกว่าที่ความหนืด V110



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกรงากับปริมาตรเกรงาที่ด้วยความหนืด V110 ในทราย ชนิดที่ 2

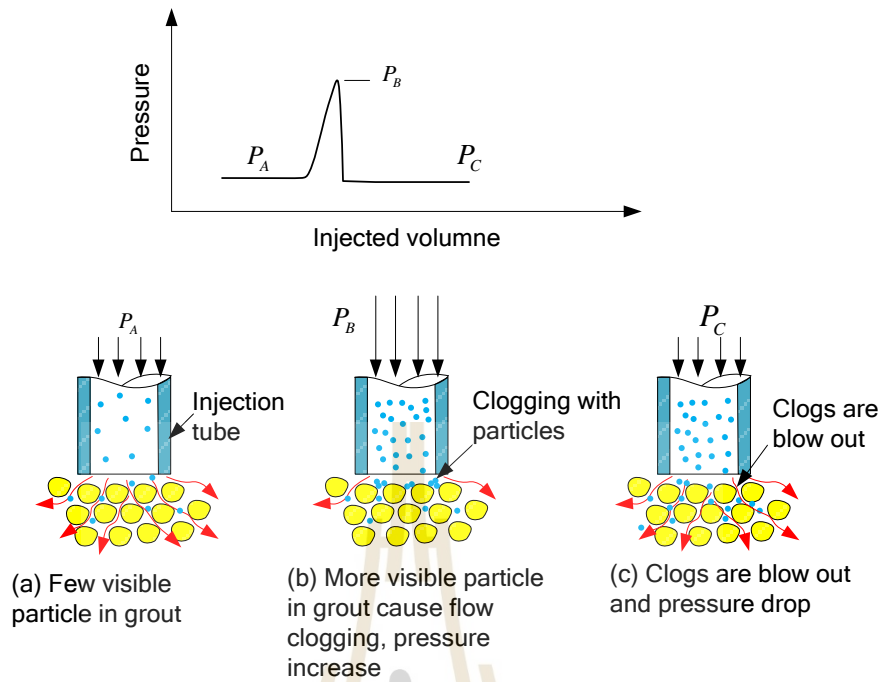


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเกรงากับปริมาตรเกรงาที่ด้วยความหนืด V130 ในทราย ชนิดที่ 2

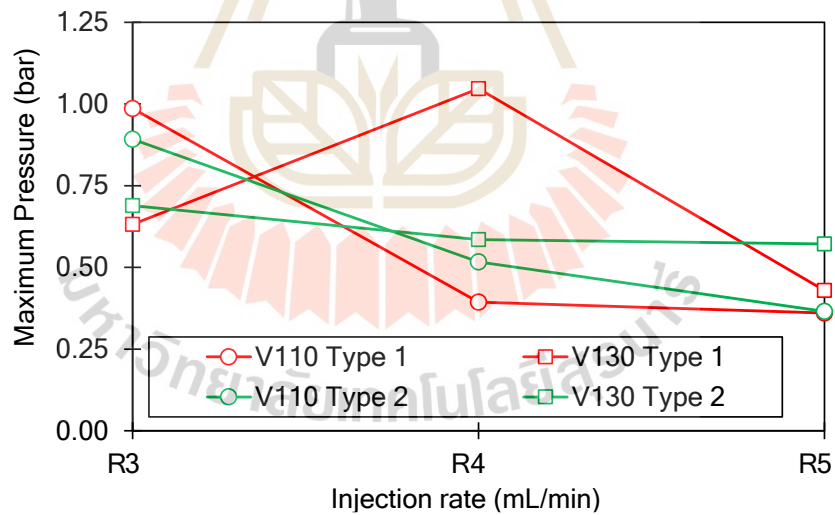
ทั้งนี้การพัฒนาแรงดันทั้ง 3 อัตราการฉีดในทรายทั้ง 2 ชนิด เกิดจากในระหว่างการทดสอบ สารละลายเคมีที่ใช้ในการเกราทเกิดการก่อตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก อนุภาคเหล่านี้ไม่ได้ก่อตัวเป็นเจลทั้งหมด จึงยังคงไหลในท่อฉีดได้ ก่อให้เกิดการผันผวนของแรงดัน โดยพบว่า ที่อัตราการฉีดต่ำ สารละลายเคมีไหลไปยังบริเวณปลายท่อฉีดได้ช้า จึงเกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่าที่อัตราการฉีดสูง ทำให้หน้าตัดการไหลบริเวณปลายท่อฉีดลดลง แรงดันจึงมีค่าสูงขึ้น โดยรูปที่ 4.5 เป็นภาพถ่ายอนุภาคเจลที่ก่อตัวขึ้นในท่อพลาสติกทนแรงดัน ขณะกำลังฉีดลงในโมล นอกจากนี้การก่อตัวของอนุภาคในสารละลายเคมียังส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลัน ซึ่งการเกิดแรงดันสูงในการทดสอบ เกิดขึ้นเพียงชั่วขณะและลดลงอย่างฉับพลัน ในขณะที่แรงดันลดลงอย่างฉับพลัน สังเกตเห็นสารละลายเคมีในท่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการไหลซึมในตัวอย่างทรายเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงเห็นว่า การพัฒนาและลดลงอย่างฉับพลันของแรงดัน เกิดจากการที่อนุภาคในสารละลายเคมีเกิดการกระจุกตัวในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นและเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นสูงมากกว่าการกระจุกตัวของอนุภาค ก็ถูกดันออกไปแรงดันจึงลดลง ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งการเกิดแรงดันสูงและลดลงอย่างฉับพลัน ส่งผลทำให้การพัฒนาแรงดันมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกราทสูงสุด เห็นได้ว่า แรงดันในการเกราทของทรายชนิดที่ 1 ที่ความหนืด V130 อัตราการฉีดเท่ากับ R4 เกิดการพัฒนาของแรงดันมากที่สุด



รูปที่ 4.5 อนุภาคเจลที่เกิดจากสารละลายเคมีในท่อพลาสติกทนแรงดัน



รูปที่ 4.6 การเพิ่มขึ้นของแรงดันเนื่องจากการอุดตันจากอนุภาคในเกรทท์ และการลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลังจากส่วนที่อุดตันหลุดออกไปในช่องว่าง



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกรทท์สูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบแรงดันในการเกรทท์ที่ได้จากการทดสอบกับแรงดันสุทธิเชิงทฤษฎี (P_t) ที่คำนวณจากสมการที่ 2.7 พบว่า แรงดันในการเกรทท์ที่ได้จากการทดสอบไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากการเกิดอนุภาคในสารละลายเคมี และการเกิดแรงดันสูงและลดลงอย่างฉับพลัน จากการกระจุกตัวของอนุภาคในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย แรงดันในการเกรทท์จึงมีค่าสูงกว่าแรงดันเชิงทฤษฎี

4.2 รูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์

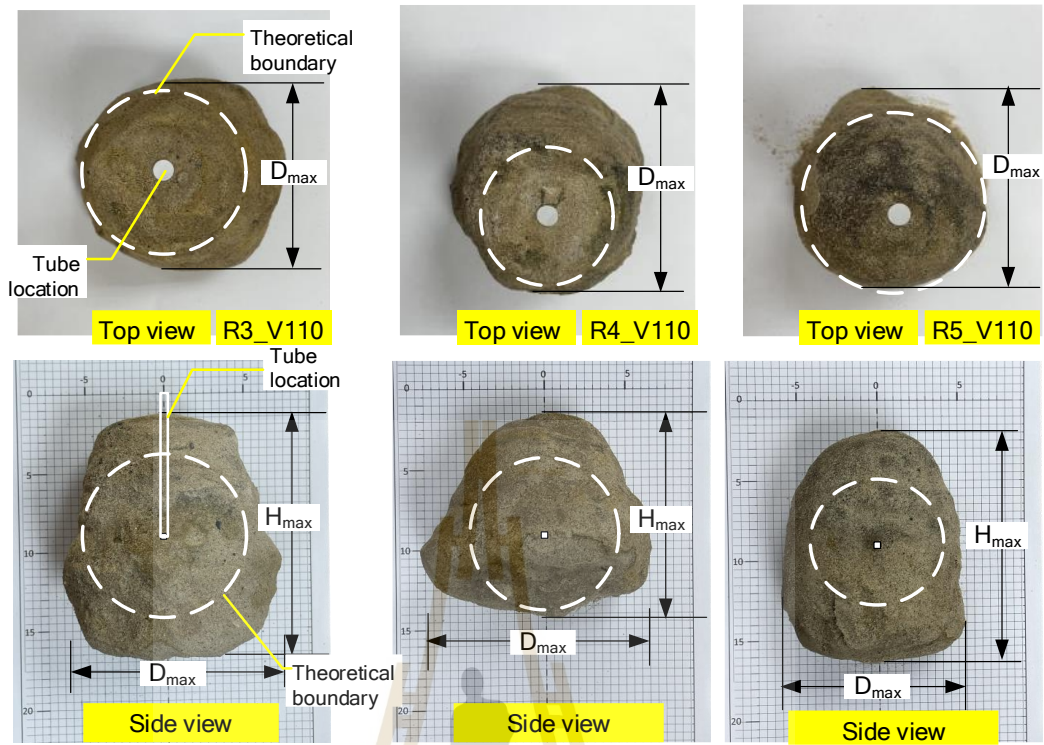
รูปที่ 4.8 และ 4.9 เป็นภาพถ่ายรูปทรงทรายที่ผ่านการเกราท์ (grout blub) ซึ่งได้จากการทดสอบการอัดฉีดเกราท์ลงในทรายชนิดที่ 1 ที่ความหนืด V110 และ V130 ตามลำดับ โดยพิจารณาให้รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีเป็นรูปทรงกลม ซึ่งมีขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีแสดงโดยเส้นประดังรูปที่ 4.8 (a) และ 4.9 (a) โดยมีจุดศูนย์กลางวงกลมเป็นตัวแทนท่อฉีดพบว่า รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรี โดยจากมุมมองด้านบนมีลักษณะเป็นวงกลม และจากมุมมองด้านข้างมีลักษณะเป็นวงรี

สำหรับความหนืด V110 จากมุมมองด้านบนเห็นได้ว่าตัวอย่าง R3_V110 และ R5_V110 มีลักษณะเป็นวงกลม แต่ตัวอย่าง R4_V110 พบว่า บางส่วนของเกราท์เกิดการซึมไปนอกขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี ลักษณะจึงไม่เป็นวงกลมเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบชุดอื่น และหากพิจารณาจากมุมมองด้านข้างเห็นได้ว่า ตัวอย่าง R3_V110 และ R5_V110 มีลักษณะมีเป็นวงรี ในขณะที่ตัวอย่าง R4_V110 มีลักษณะไม่เป็นวงรี และเกิดการซึมของเกราท์ในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดมากขึ้น

สำหรับความหนืด V130 จากมุมมองด้านบนเห็นได้ว่าตัวอย่าง R5_V110 มีลักษณะเป็นวงกลม แต่ตัวอย่าง R3_V130 และ R4_V130 พบว่า มีลักษณะไม่เป็นวงกลม โดยบางส่วนของเกราท์เกิดการซึมไปนอกขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี และเกิดการเสียรูปการซึมเป็นวงกลมอย่างชัดเจน และจากมุมมองด้านข้างเห็นได้ว่า มีเพียงตัวอย่าง R5_V130 ที่มีลักษณะเป็นวงรี แต่สำหรับตัวอย่าง R3_V130 และ R4_V130 พบว่า มีลักษณะไม่เป็นวงรี และเกิดการซึมของเกราท์ในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดมากขึ้น

สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของทรายเมื่อแปรผันอัตราการฉีด พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R5 รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ มีลักษณะเป็นทรงกลมรี ในขณะที่การเกราท์ในอัตราการฉีดที่ต่ำกว่า R5 รูปทรงของทรายบางส่วนเกิดการซึมของเกราท์ในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดในแต่ละด้านที่ปริมาณไม่เท่ากัน ส่งผลให้รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สม่ำเสมอ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของทรายเมื่อแปรผันความหนืด พบว่า ความหนืดที่เพิ่มขึ้นรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์เกิดการซึมในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดเพิ่มขึ้น และหากพิจารณาถึงลักษณะของรูปทรงทรายที่ผ่านการเกราท์ เห็นได้ว่า อัตราการฉีดที่ต่ำกว่า R5 รูปทรงทรายมีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกับการเกราท์ด้วยความหนืดที่ต่ำกว่า ในขณะที่อัตราการฉีดเท่ากับ R5 พบว่า รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอมากกว่าแม้ความหนืดเพิ่มขึ้น

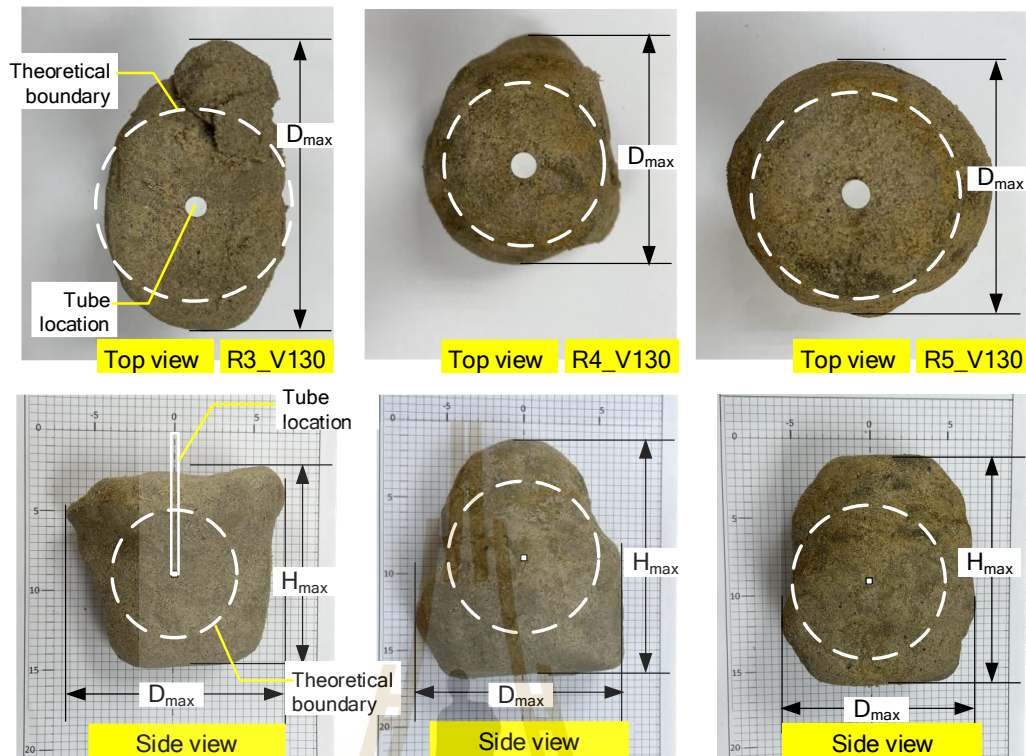


(a)

(b)

(c)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายหลายชนิดที่ 1 ที่ผ่านการเกรงด้วยความหนืด V110 (a) ตัวอย่าง R3_V110
(b) ตัวอย่าง R4_V110 (c) ตัวอย่าง R5_V110



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายทรายเป็นชุดที่ 1 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V130 (a) ตัวอย่าง R3_V130 (b) ตัวอย่าง R4_V130 (c) ตัวอย่าง R5_V130

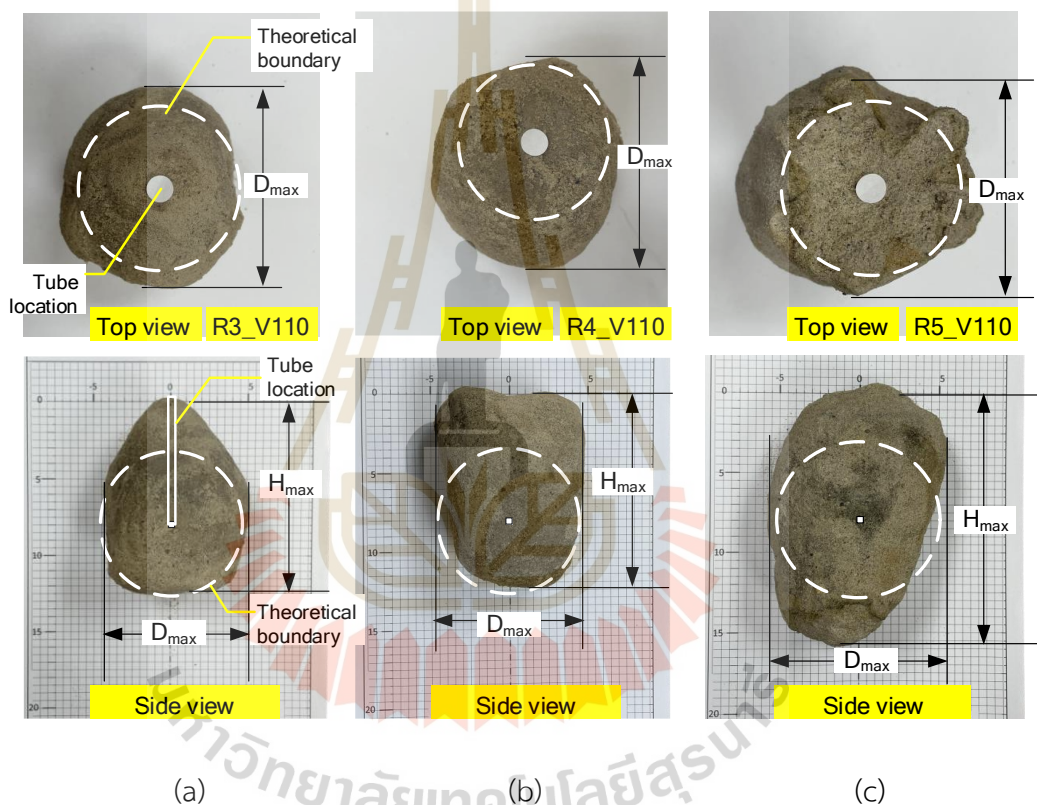
รูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นภาพถ่ายรูปทรงทรายที่ผ่านการเกราท์ ซึ่งได้จากการทดสอบการอัดฉีดเกราท์ลงในทรายเป็นชุดที่ 2 ที่ความหนืด V110 และ V130 ตามลำดับ โดยพิจารณาให้รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีเป็นรูปทรงกลม ซึ่งมีขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีแสดงโดยเส้นประดังรูปที่ 4.10 (a) และ 4.11 (a) ตามลำดับ โดยมีจุดศูนย์กลางวงกลมเป็นตัวแทนท่อฉีดอยู่ที่ระดับความลึก 9 เซนติเมตร จากผิวดิน พบว่า รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ ทุกตัวอย่างทดสอบ

สำหรับความหนืด V110 จากมุมมองด้านบนเห็นได้ว่าตัวอย่าง R3_V110, R4_V110 และ R5_V110 มีลักษณะไม่เป็นวงกลม บางส่วนของเกราท์เกิดการเชื่อมขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี โดยในตัวอย่าง R5_V110 หากพิจารณาจากมุมมองด้านข้าง เห็นได้ว่าทรายที่ผ่านการเกราท์ มีลักษณะไม่เป็นวงรีและเกิดการเชื่อมของเกราท์ในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดแต่ละด้านในปริมาณไม่เท่ากัน เมื่อเทียบกับตัวอย่าง R3_V110 และ R4_V110

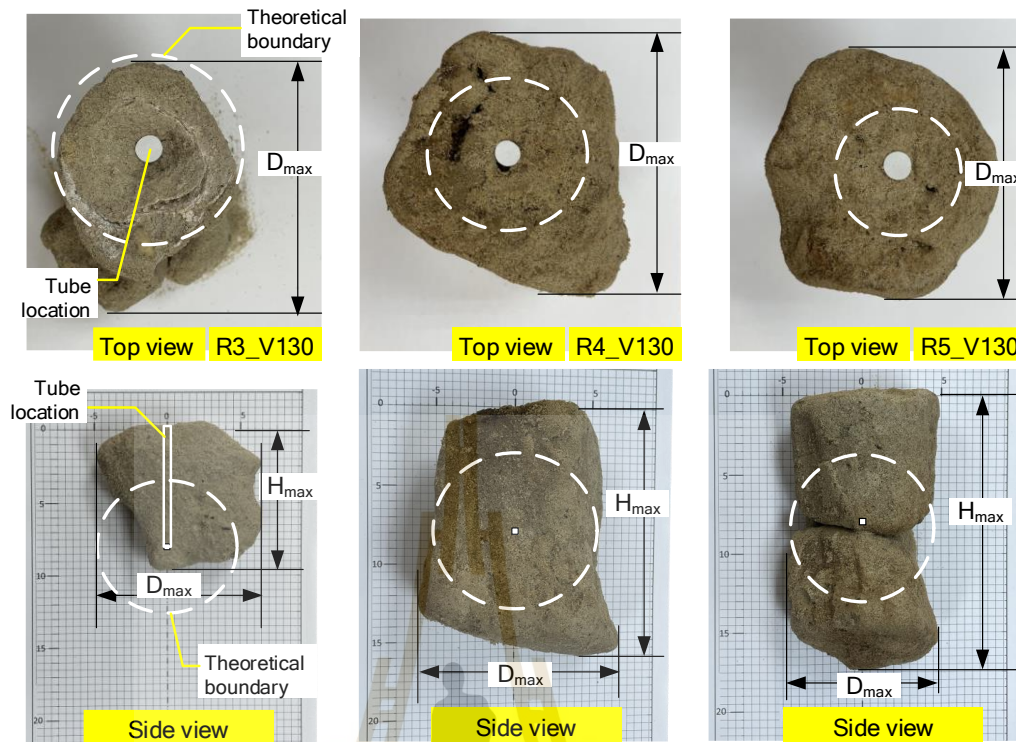
สำหรับความหนืด V130 จากมุมมองด้านบนเห็นได้ว่าตัวอย่าง R3_V130, R4_V130 และ R5_V130 มีลักษณะไม่เป็นวงกลม บางส่วนของเกราท์เกิดการเชื่อมไปนอกขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีมากขึ้น และเกิดการเสียรูปการเชื่อมเป็นวงกลมอย่างชัดเจน จากมุมมองด้านข้าง เห็นได้ว่า ตัวอย่าง R3_V130, R4_V130 และ R5_V130 พบว่า มีลักษณะไม่เป็นวงรี และเกิดการเชื่อมของเกราท์ในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดมากขึ้น เมื่อเทียบกับความหนืดเกราท์ต่ำกว่า

การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของทรายเมื่อแปรผันอัตราการฉีด พบว่า อัตราการฉีดที่ส่งผลให้แรงดันเกิดการผันผวน รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์บางส่วนของการเกราท์เกิดการซีมนอกขอบเขตทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีมากขึ้น ส่งผลให้รูปทรงทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของทรายเมื่อแปรผันความหนืด พบว่า ความหนืดที่เพิ่มขึ้น รูปทรงของทรายส่วนใหญ่ เกิดการซีมนอกเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีมากขึ้นและเกิดการซีมของเกราท์ในระนาบที่ตั้งฉากกับท่อฉีดในแต่ละด้านที่ปริมาณไม่เท่ากัน ทำให้ลักษณะรูปทรงของทรายที่ผ่านเกราท์ไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายทรายชนิดที่ 2 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V110 (a) ตัวอย่าง R3_V110 (b) ตัวอย่าง R4_V110 (c) ตัวอย่าง R5_V110



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายทรายนิตที่ 2 ที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืด V130 (a) ตัวอย่าง R3_V130 (b) ตัวอย่าง R4_V130 (c) ตัวอย่าง R5_V130

จากรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ในทรายนิตที่ 1 และ 2 พบว่า รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ไม่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมออกจากจุดชนิดเช่นเดียวกับงานวิจัยของ (Yamazaki et al., 2005) แต่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมรี เกิดจากเกราท์เกิดการเสียรูปการซึมเป็นทรงกลมภายใต้แรงโน้มถ่วง ทำให้เกราท์บางส่วนเกิดการซึมเป็นแถบยาวคล้ายทรงกลมรีไปยังด้านล่างของท่อฉีด รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงไม่เป็นรูปทรงกลมดังทฤษฎี ซึ่งจากผลทดสอบรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์เห็นได้ว่าใกล้เคียงกับผลทดสอบของ (Liu et al., 2020) ดังรูปที่ 2.11 (h) แต่ทั้งนี้การเสียรูปการซึมเป็นทรงกลมไม่ได้เกิดการซึมเป็นแถบที่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ (Liu et al., 2020) เนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กกว่า จึงส่งผลให้การซึมเป็นแถบมีขนาดสั้นกว่า สำหรับความไม่สม่ำเสมอในทรายที่ผ่านการเกราท์ คาดว่าเกิดจากการเกิดของอนุภาคเจลในสารละลายเคมี ส่งผลให้แรงดันในการเกราท์มีความผันผวน และเกิดแรงดันในการเกราท์สูงขึ้น จึงทำให้บางส่วนของมวลทรายเกิดการแตกตัวของไหล รูปทรงของทรายบางส่วนจึงเกิดการซึมนอกขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี

สำหรับขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี (theoretical boundary) โดยเทียบให้อยู่ในเทอมของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรายหลังการเกราท์เชิงทฤษฎี (D_{theory}) พิจารณาจากการให้ปริมาตรของเกราท์ที่ซึมลงทรายเป็นรูปทรงกลม จากการคำนวณดังสมการที่ 2.9 เมื่อเทียบกับขนาดความกว้างสูงสุดของทรายที่ผ่านการเกราท์ (D_{max}) ในทรายทั้ง 2 ชนิด ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ขนาดทรายที่ผ่านการเกราท์และขนาดเชิงทฤษฎีในทรายชนิดที่ 1

ตัวอย่าง	D _{max} (มิลลิเมตร)	H _{max} (มิลลิเมตร)	D _{theory} (มิลลิเมตร)
R3_V110	93.0	122.0	84.0
R4_V110	120.0	102.0	80.6
R5_V110	89.0	130.0	81.6
R3_V130	126.0	111.0	80.2
R4_V130	109.0	137.0	79.2
R5_V130	95.0	126.0	78.0

ตารางที่ 4.2 ขนาดทรายที่ผ่านการเกราท์และขนาดเชิงทฤษฎีในทรายชนิดที่ 2

ตัวอย่าง	D _{max} (มิลลิเมตร)	H _{max} (มิลลิเมตร)	D _{theory} (มิลลิเมตร)
R3_V110	85.0	111.0	83.4
R4_V110	89.0	110.0	83.4
R5_V110	80.0	135.0	82.8
R3_V130	90.0	89.0	84.2
R4_V130	100.0	130.0	82.6
R5_V130	89.0	142	83.4

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเทียบขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์กับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีเห็นได้ว่า สำหรับความหนืด V110 ตัวอย่าง R3_V110 และ R5_V110 ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี แต่ตัวอย่าง R4_V110 พบว่า ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดโตกว่า ในขณะที่ความหนืด V130 พบว่า ตัวอย่าง R5_V130 มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี แต่ตัวอย่าง R4_V130 และ R3_V130 พบว่า ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดโตกว่าขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี

โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความหนืดต่อขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ เห็นได้ว่า เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดที่โตขึ้น ในขณะที่เมื่อแปรผันอัตราการฉีดผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์พบว่า อัตราการฉีดที่ต่ำกว่า R5 ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ส่วนใหญ่มีขนาดที่โตกว่าขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเทียบขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์กับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีเห็นได้ว่า สำหรับความหนืด V110 ตัวอย่าง R3_V110, R4_V110 และ R5_V110 ตัวอย่างทดสอบทุกชุด ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี ในขณะที่ความหนืด V130 พบว่า ตัวอย่าง R4_V130 และ R5_V130 ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ส่วนใหญ่มีขนาดที่โตกว่า แต่ตัวอย่าง R3_V130 พบว่า ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดเล็กกว่าขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี

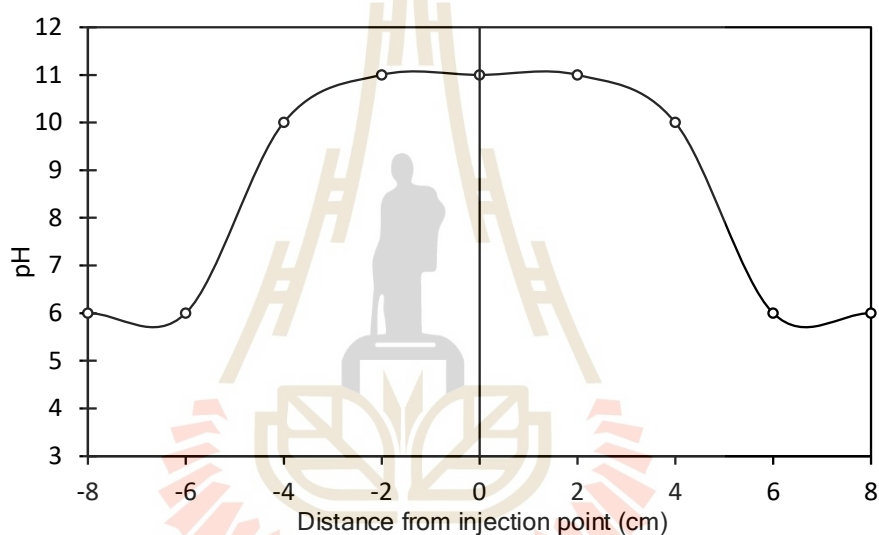
สำหรับตัวอย่าง R3_V130 พบว่า ทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างทดสอบอื่น เกิดจากการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบไม่ได้อิมตัวด้วยน้ำ เนื่องจากโมลทดสอบเกิดการรั่ว ทรายในตัวอย่างทดสอบบางส่วนมีความแห้ง อนุภาคของทรายบางส่วนจึงเกิดการเกาะตัวกัน ส่งผลให้ความสามารถในการซึมของเกราท์ในตัวอย่างทดสอบลดลง รวมถึงในระหว่างการทดสอบสังเกตเห็นว่า สารละลายเคมี เกิดการไหลย้อนกลับขึ้นมารอบบริเวณท่อฉีด ส่งผลให้สารละลายเคมีบางส่วนไม่ได้เกิดการซึมเข้าสู่ตัวอย่างทราย

โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความหนืดต่อขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ เห็นได้ว่า เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดโตขึ้น เช่นเดียวกับขนาดของทรายชนิดที่ 1 ที่ผ่านการเกราท์ ในขณะที่การแปรผันอัตราการฉีดต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์พบว่า อัตราการฉีดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ แต่เป็นการผันผวนของแรงดันที่ใช้ในการเกราท์ ส่งผลให้ทรายบางส่วนเกิดการซึมนอกของเขตเชิงทฤษฎี

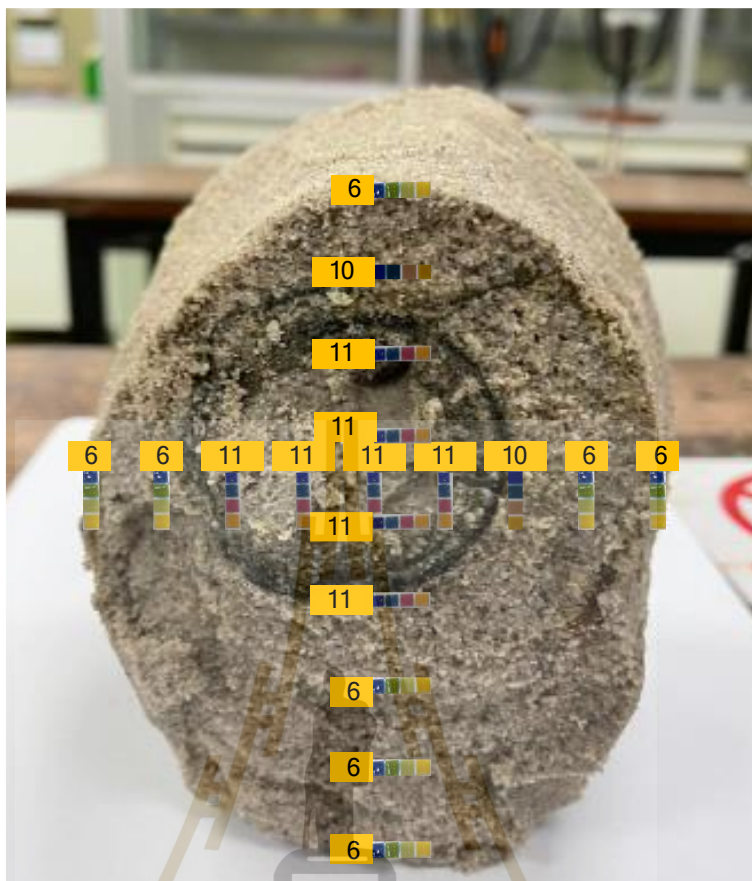
จากขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 เห็นได้ว่า สำหรับอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำลง ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดเล็กกว่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่สูงขึ้น เนื่องจากความสามารถในการซึมของเกราท์ไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดทรายป็นไปโดยยาก ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎีมากกว่าการเกราท์ในทรายที่อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายสูง สำหรับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ที่มีขนาดโตกว่าขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี เกิดจากแรงดันในการเกราท์ที่สูง รวมถึงการเกิดของอนุภาคในสารละลายเคมีเกราท์ในระหว่างทำการทดสอบ ส่งผลให้แรงดันในการเกราท์เกิดความผันผวน จึงทำให้เกิดการแตกของมวลทรายด้วยของไหล การซึมของเกราท์นอกขอบเขตเชิงทฤษฎีจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความหนืดเกราท์ยังส่งผลให้ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดที่โตขึ้น คาดว่าเกิดจากความเข้มข้นของสารละลายเคมีที่มีมากขึ้น เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการแพร่ (diffusion) ของสารละลายเคมี

โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์กับขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี เห็นได้ว่า ส่วนใหญ่มีขนาดที่โตกว่าขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์เชิงทฤษฎี เกิดจากการอัดฉีดเกราท์ลงในทราย ตัวอย่างทรายทดสอบมีการทำให้อิมตัวด้วยน้ำ รวมถึงเกราท์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นสารละลายเคมี ทำให้ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ไม่ได้เกิดจากการซึม ลงไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการแพร่ของสารละลายเคมีจากจุดที่มีความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย ก่อนการก่อตัวไปจากขอบเขตของการเกราท์ภายใต้แรงดัน

เพื่ออธิบายสาเหตุที่ขนาดของทรายที่ผ่านการเกราที่มีขนาดใหญ่กว่าเชิงทฤษฎี จึงทำการทดสอบการหาขอบเขตสารละลายเคมีที่ซึมลงในทราย พบว่า ทรายที่อยู่ใกล้บริเวณท่อฉีดมีค่า pH เท่ากับ 11 ซึ่งค่า pH ใกล้เคียงกับสารละลายเคมี ในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปจากท่อฉีดมีค่า pH เริ่มลดลงจนถึงค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า pH ของทรายทดสอบที่อิ่มตัวด้วยน้ำก่อนการเกราท์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สารละลายเคมีเกิดการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณท่อฉีดไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ห่างออกไปจากท่อฉีด แม้ไม่มีแรงดัน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ขนาดทรายที่ผ่านการเกราที่มีขนาดใหญ่กว่าเชิงทฤษฎี รูปที่ 4.12 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับค่า pH ของทรายในตัวอย่างทดสอบและรูปที่ 4.13 เป็นภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับค่า pH



รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ

4.3 ความชื้นของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี

วัตถุประสงค์ของการนำการเกราท์ด้วยสารละลายเคมีไปใช้คือ การลดสัมประสิทธิ์ความชื้นของทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ ผลการทดสอบความชื้นในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมีที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมซิลิเกต พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นมีค่าเท่ากับ 1.52×10^{-9} เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำกว่าทรายที่ไม่ผ่านการเกราท์ 1.32×10^5 เท่า จากผลการทดสอบดังกล่าวเห็นได้ว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Mollamamutoglu et al., 2016) ที่รายงานว่า การใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นวัสดุในการเกราท์ สามารถช่วยลดความชื้นน้ำในทรายได้ โดยผลเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายก่อนและหลังผ่านการเกราท์

ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์ความซึม (เมตรต่อวินาที)
ทรายไม่ผ่านการเกราท์	2.00×10^{-4}
ทรายผ่านการเกราท์	1.52×10^{-9}

4.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์

4.4.1 แรงดันในการเกราท์

จากผลรูปทรงของทรายชนิดที่ 1 ที่ผ่านการเกราท์ พบว่า แรงดันในการเกราท์ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยอัตราการฉีดต่ำกว่า R5 แรงดันในการเกราท์มีแนวโน้มสูง เนื่องจากการก่อตัวของอนุภาคในสารละลายเคมี ทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลบริเวณปลายท่อลดลง แรงดันจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังที่ได้อภิปรายไว้ในหัวข้อที่ 4.1 นอกจากนี้พบว่า การเกิดแรงดันสูงและลดอย่างฉับพลันระหว่างการทดสอบ ส่งผลให้ทรายบางส่วนเกิดการแตกของมวลทรายด้วยของไหลในระหว่างการเกราท์ รูปทรงทรายที่ผ่านการเกราท์บางส่วนจึงมีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สม่ำเสมอ รูปแบบเกราท์จึงพัฒนาจากรูปแบบการเกราท์แบบซิม ไปสู่รูปแบบการเกราท์แบบแตก ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ (Wang et al., 2016) ที่ได้รายงานไว้ สำหรับทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยแรงดันเกราท์ต่ำ เกราท์ค่อยเกิดการซึมไปแทนที่น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอมากกว่าการเกราท์ด้วยแรงดันสูง รูปแบบทรายที่ผ่านการเกราท์จึงเกิดในรูปแบบการเกราท์แบบซิมเป็นหลัก

จากผลรูปทรงของทรายชนิดที่ 2 ที่ผ่านการเกราท์ พบว่า แรงดันในการเกราท์ไม่ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยแรงดันสูง เห็นได้ว่า รูปทรงของทรายมีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอจากมุมมองด้านข้าง เช่นเดียวกับการเกราท์ด้วยแรงดันสูงในทรายชนิดที่ 1 ในขณะเดียวกันทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยแรงดันต่ำ พบว่า รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากการเกราท์ด้วยแรงดันต่ำในทรายชนิดที่ 1 คาดว่าเกิดจากอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการซึมของเกราท์ไปยังทรายเป็นไปโดยยาก รวมถึงการเกิดอนุภาคเจลของสารละลายเคมี ส่งผลให้แรงดันเกิดการผันผวน บางส่วนของทรายจึงเกิดการแตก รูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงเกิดผสมระหว่างการเกราท์แบบแตกและการเกราท์แบบซิม

4.4.2 ความหนืดของสารละลายเคมี

จากผลรูปทรงของทรายชนิดที่ 1 ที่ผ่านการเกราท์ พบว่า เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท์ที่อัตราการฉีดเดียวกันลักษณะรูปทรงทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สมมาตรหรือเป็นทรงกลมรีสมมาตรเหมือนกัน ต่างกันเพียงขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยพบว่า ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยอัตราการฉีดที่ต่ำกว่า R5 รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สมมาตรเช่นเดียวกับทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืดต่ำ ในขณะที่ทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยอัตราการฉีดเท่ากับ R5 เห็นได้ว่า ความหนืดที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีสมมาตรเช่นเดียวกับการเกราท์ด้วยความหนืดต่ำ ทั้งนี้เกิดจากที่อัตราการฉีดต่ำกว่า R5 ทรายที่ผ่านการเกราท์เกิดการเกราท์ด้วยแรงดันสูงส่งผลให้ทรายบางส่วนเกิดการแตก รูปทรงของทรายจึงมีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สมมาตร รูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงเกิดการพัฒนาจากรูปการเกราท์แบบซิมไปสู่การเกราท์แบบแตกดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1

จากผลรูปทรงของทรายชนิดที่ 2 ที่ผ่านการเกราท์ พบว่า เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท์ส่วนใหญ่มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรูปทรงกลมรีสมมาตรอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยความหนืดต่ำ ทั้งนี้เกิดจากความผันผวนของแรงดันในการเกราท์ที่เกิดขึ้นเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มวลทรายบางส่วนเกิดการแตกด้วยของไหลดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.1 นอกจากนี้ยังพบว่า ทรายที่ผ่านการเกราท์ทุกตัวอย่างทดสอบมีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสมมาตร เกิดจากอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำลงซึ่งมีการอภิปรายรายละเอียดดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4.3 ทำให้ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกราท์เกิดในรูปแบบผสมระหว่างการเกราท์แบบแตกและการเกราท์แบบซิม

ทั้งนี้งานวิจัยนี้จึงเห็นว่า ความหนืดของสารละลายเคมีเกราท์ไม่มีผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์ทั้ง 2 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความหนืดของสารละลายเคมีที่ใช้ในงานวิจัย มีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ รูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงเกิดในรูปแบบเช่นเดียวกันเมื่อแปรผันความหนืด ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ (Bezuijen et al., 2007 และ Wang et al., 2016) ที่รายงานว่า การเกราท์ด้วยซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงทำให้เนื้อดินแตกออกด้วยแรงดันของไหล รูปแบบการเกราท์จึงเป็นการเกราท์แบบแตก และถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ต่ำรูปแบบการเกราท์เป็นการเกราท์เพื่อเสริมความหนาแน่น

4.4.3 อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย

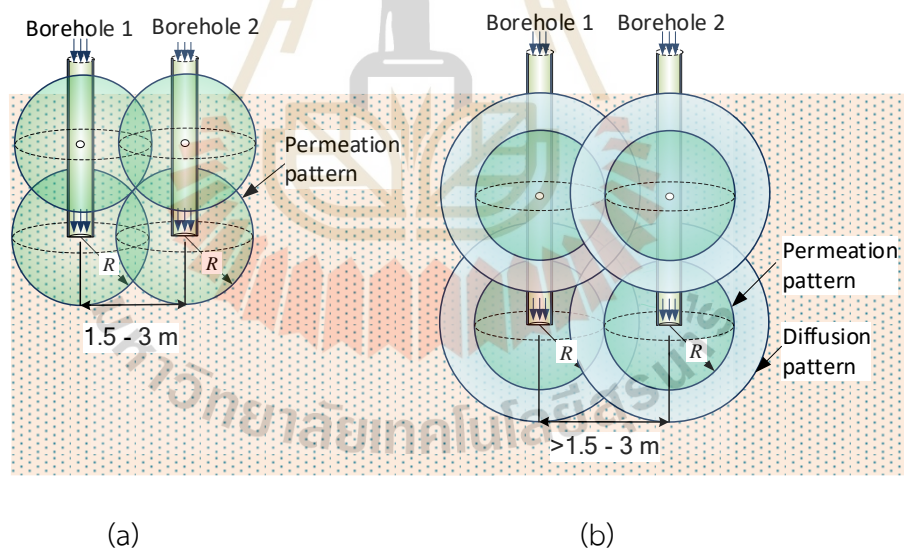
จากผลรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ พบว่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยทรายที่มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำ ทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ คาดว่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำลง ทำให้การซึมของเกราท์ไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเป็นไปได้โดยยาก เพราะด้วยมีอนุภาคขนาดเล็กของสารละลายเคมีที่เกิดขึ้น จึงทำให้ทรายบางส่วนเกิดการแตกของมวลทรายด้วยของไหล ทำให้รูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์เกิดการผสมระหว่างการเกราท์แบบแตกและการเกราท์แบบซึม

ในขณะที่อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายสูงขึ้น พบว่า รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ เกิดในลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของแรงดันในการเกราท์ที่ได้อภิปรายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.4.1 รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอและเป็นทรงกลมรีไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้รูปแบบทรายที่ผ่านการเกราท์เกิดในรูปแบบการเกราท์แบบซึม และรูปแบบที่ผสมระหว่างรูปแบบการเกราท์แบบซึมและการเกราท์แบบแตก



4.5 การนำประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม

ในการออกแบบตำแหน่งของการอัดฉีดเกรทท์เคมีลงในดิน (Kutzner, 1996) รายงานว่า ตำแหน่งของการอัดฉีดเกรทท์เพื่อลดการไหลซึมของน้ำ มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกรทท์เชิงทฤษฎี จากสมการที่ 2.9 โดยทั่วไปมีการออกแบบให้ตำแหน่งหลุมเจาะที่ใช้ในการอัดฉีดเกรทท์ห่างกันเป็นระยะทาง 1.5-3 เมตร เพื่อให้ขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกรทท์เชิงทฤษฎี เกิดพื้นที่ซ้อนทับระหว่างกัน ดังรูปที่ 4.14 (a) จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้เห็นได้ว่า ขนาดทรายที่ผ่านการเกรทท์มีขนาดโตกว่าขนาดของทรายที่ผ่านการเกรทท์เชิงทฤษฎี เนื่องจากการแพร่ของเกรทท์เคมีที่มีความเข้มข้นสูงก่อนการก่อดั้วไปจากขอบเขตของการเกรทท์ภายใต้แรงดัน ทำให้ขอบเขตความทึบน้ำจากการฉีดเกรทท์ใหญ่ขึ้น ดังนั้นหากนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผู้ออกแบบ อาจออกแบบให้ระยะห่างของหลุมเจาะมีระยะทางที่มากขึ้นได้ เนื่องจากพื้นที่บริเวณที่บ น้ำที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการแพร่ ดังรูปที่ 4.14 (b) เป็นแนวความคิดการออกแบบตำแหน่งหลุมเจาะในอุดมคติ นอกจากนี้ถึงแม้ว่ารูปแบบของทรายที่ผ่านการเกรทท์ในงานวิจัยนี้ เกิดในรูปแบบการเกรทท์แบบซึมผสมการเกรทท์แบบแตก แต่รูปแบบของการเกรทท์ที่เปลี่ยนไปไม่ส่งผลต่อการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากโดยทั่วไปมีการออกแบบให้ขอบเขตของทรายที่ผ่านการเกรทท์เกิดพื้นที่ซ้อนทับระหว่างกัน จึงอยู่ในด้านที่ปลอดภัยในทางปฏิบัติ



รูปที่ 4.14 การออกแบบตำแหน่งการเกรทท์ (a) ตำแหน่งการเกรทท์ในทางปฏิบัติ
(b) ตำแหน่งการเกรทท์ในอุดมคติ

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบการเกราท์ด้วยสารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้น ลงในตัวอย่างทรายในห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ต่ำกว่าทรายไม่ผ่านการเกราท์ 1.32×10^5 เท่า แสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายเคมีที่มีองค์ประกอบหลักเป็น โซเดียมซิลิเกต เป็นวัสดุในการเกราท์ สามารถลดความซึมน้ำในทรายได้
2. อิทธิพลของแรงดันในการเกราท์ส่งผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะเกิดเฉพาะในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ โดยแรงดันในการเกราท์ต่ำ เกราท์ค่อยเกิดการซึมไปแทนที่น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ ในขณะที่การเกราท์ด้วยแรงดันสูง มวลทรายเกิดการแตกด้วยของไหล ทรายบางส่วนจึงเกิดความไม่สม่ำเสมอรูปแบบการเกราท์จึงเกิดการพัฒนาจากการเกราท์แบบซึมไปสู่การเกราท์แบบแตก
3. อิทธิพลของความหนืดในสารละลายเคมีไม่มีผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารละลายเคมีที่ใช้ในงานวิจัยมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่งผลให้รูปแบบการเกราท์เกิดในรูปแบบเดียวกัน เมื่อแปรผันความหนืด
4. อิทธิพลของอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายส่งผลต่อรูปทรงและรูปแบบของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ต่ำลง รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ เนื่องจากการซึมของเกราท์ไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเป็นไปโดยยาก รูปแบบของทรายที่เกิดขึ้นจึงเกิดการผสมระหว่างการเกราท์แบบแตกและการกราท์แบบซึม

5.2 ข้อเสนอแนะ

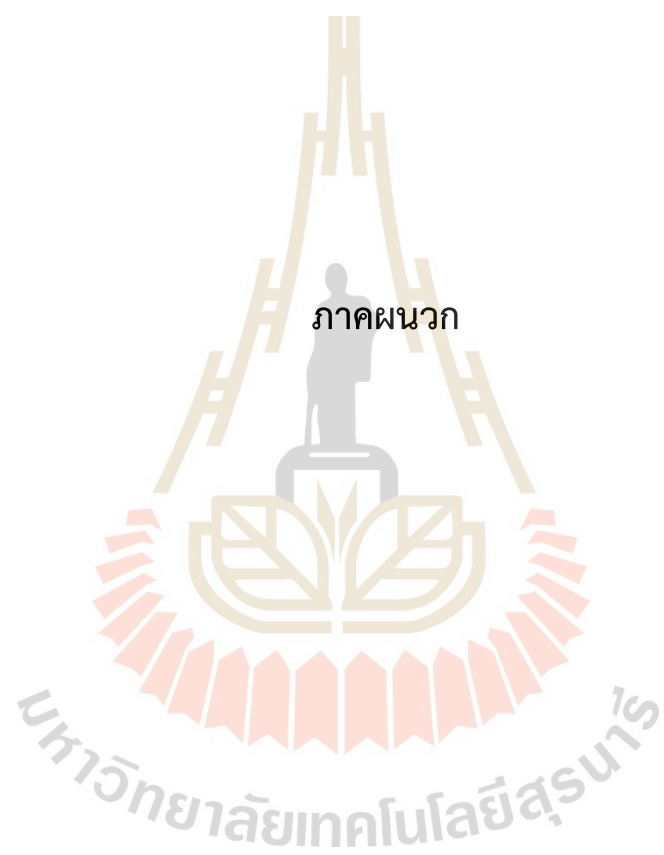
ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีส่วนของอนุภาคที่เกิดขึ้นในสารละลายเคมี ดังนั้นหากต้องการนำสารละลายเคมีไปใช้เกราฟีนในชั้นทรายที่มีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายต่ำกว่าทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ ควรมีการคำนึงถึงเรื่อง อนุภาคของสารละลายเคมีที่เกิดขึ้น นอกจากนี้สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้นยังไม่ได้ทดสอบด้านความคงทนต่อการละลาย ข้อเสนอสำหรับงานวิจัยต่อไปคือการศึกษาถึงพฤติกรรมการคงทนต่อการละลายน้ำของเจลที่แทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เมื่อใช้งานอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลาานาน



รายการอ้างอิง

- มุดใต้ดินไซท์ “อิตาเลียนไทย” ส่องอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีส้มศูนย์วัฒนธรรมฯ – มีนบุรี. (16 มกราคม 2563). ประชาชาติธุรกิจ. สืบค้นจาก <https://www.prachachat.net/property/news-411567>
- อุโมงค์น้ำบึงหนองบอนคืบ 86.70% คาดพร้อมเปิดใช้ มี.ค.65. (17 กันยายน 2564). มติชนออนไลน์. สืบค้นจาก https://www.matichon.co.th/local/new_2944429
- ASTM D 2434-68. (2000). Standard Test Method for Permeability of granular Soils (Constant Head). West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.
- ASTM D 422-63. (2002). Standard Test Method for Particles-Size Analysis of Soils. West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.
- ASTM D 854-00. (2000). Standard Test Method for Specific Gravity of Soils Solids by Water Pycnometer. West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.
- Bezuijen, A., Sanders, M.P.M., Hamer, D. and Tol, A.F.van (2007). Laboratory tests on compensation grouting, the influence of grout bleeding. Proc.World Tunnel Congress, Prague.
- Bezuijen, A. and Tol, A.F.van (2007). Compensation grouting in sand, fractures and compaction. Proc. XIV European Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Madrid.
- Camberfort H. (1987). “Grouts and Grouting”, chap. 32 in Bell, F.G. (ed): Ground Engineer’s Reference Book.
- Evans J., Ruffing D. and Elton D. (2021). Fundamentals of Ground Improvement Engineering, London, pp. 193-225.
- Gafar, K., Soga, K., Bezuijen, A., Sanders, M.P.M., van Tol, A.F. (2008). Fracturing of sand in compensation grouting. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shanghai.
- Hausmann M.R. (1990). Engineering principle of ground modification, McGraw-Hill, pp. 347-379.

- Kutzner C. (1996). Grouting of rock and soil, Netherland, pp. 4-27.
- Liu J., Zhang X., Li M., Lan X. and Hao P. (2020), Research on Permeation Grouting Mechanism Considering Gravity in the treatment of Mud Inrush Disaster, Polish Journal of Environmental Studies, Volume 30, No.1, 12 June 2020, pp.751-762
- Mollamahmutoglu M. and Avcı E. (2016). Syneresis effect on the permeability of chemically grouted sand, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Volume 49, pp. 327–335.
- Phienweij N., Asanprakit A., Kittiyodom P. and Timpong S. (2018). Increasing geotechnical challenges in the design and construction planning of the Third Phase Bangkok MRT Underground, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGC 2018
- Raffle J.F. and Greenwood D.A. (1961). The Relation Between the Rheological Characteristics of Grouts and their Capacity to Permeate Soil, 5th ICSMGE, Paris, pp. 789-793.
- Thallak, S. (1991). Numerical simulation of hydraulic fracturing in granular media. Phd thesis. University of Waterloo
- Wang Q., Wang S., Sloan W. S., Sheng D. and Pakzad R. (2016). Experimental investigation of pressure grouting in sand, Soils and Foundations, volume 56, Issue 2, April 2016, pp. 161-173.
- Warner J. and P.E (2004). Practical Handbook Grouting Soil Rock and Structures, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, pp.115-128.
- Wiriyatharakij W. (2015). MRTA station excavation under situation of space constraint and potential hydraulic uplift at base : cases of Sanamchai & Itsaraphap stations, Master Thesis No. no.GE-15-05, Asian Institute of Technology.
- Yamazaki H., Hayashi K. and Zen K. (2005). New liquefaction countermeasure based on pore water replacement, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.





รายชื่อบทความและวารสารทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

อรยา คำหนองไผ่, พรพจน์ ตันเส็ง และ สุทิน คูหาเรืองรอง (2566). การทดสอบบดเคาะเกราะในแบบจำลองทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อลดความชื้นด้วยซิลิกาเกตเจล, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 35 ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2568, จำนวน 14 หน้า

อรยา คำหนองไผ่, พรพจน์ ตันเส็ง และ สุทิน คูหาเรืองรอง (2566). ประสิทธิภาพของเกราะด้วยซิลิกาเกตเจลในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (The 28th National Convention on Civil Engineering), GTE05, โรงแรมภูเก็ตแกรนด์ แอนด์ รีสอร์ท แอน สปา, ภูเก็ต, วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566.





การทดสอบฉีดเกราท์ในแบบจำลองทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพ เพื่อลดความชื้นด้วยซิลิเกตเจล

อรยา คำหนองไม้* และ พรพจน์ ตันเล็ง

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุทิน คูหาเรืองรอง

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกซ์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 9119 2200 อีเมลล์: oryagroupfee@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการทดสอบการฉีดเกราท์ในแบบจำลองชั้นทรายของดินกรุงเทพชั้นที่ 1 เพื่อลดความชื้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยวิธีฉีดการฉีดคั่งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันและความหนืดของเกราท์ ที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของทรายที่ผ่านการเกราท์ ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ การทดสอบใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นวัสดุในการเกราท์ โดยใช้ความหนืดเท่ากับ 110 เซนติพอยส์ และ 130 เซนติพอยส์ และใช้อัตราการฉีดเป็น 4.56, 6.08, และ 7.60 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการวิจัยพบว่าแรงดันในการเกราท์ส่งผลต่อรูปร่างของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยแรงดันในการเกราท์ที่ต่ำส่งผลให้รูปร่างของทรายมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอ การเกราท์จึงเป็นรูปแบบการเกราท์แบบซึม ในส่วนของความหนืดไม่ส่งผลต่อรูปร่างของทรายที่ผ่านการเกราท์ เนื่องจากความหนืดของเกราท์ที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นต่ำลง 8.33 เท่า

คำสำคัญ: สารละลายโซเดียมซิลิเกต การเกราท์แบบซึม การเกราท์แบบแตก ทรายชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Modelling Grouting of First Bangkok Aquifer Sand to Reduce Permeability with Silicate Gel

Oraya Khamnongpai* and Pompot Tunseng

School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Sutin Kuharuangrong

School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Corresponding Tel. 09 9119 2200 Email: orayagroupfee@gmail.com

Abstract

This paper presents the model test of grouting of first Bangkok aquifer sand to reduce permeability with sodium silicate by constant injection rate. This study's objective is to influence grouting pressure and viscosity of grout impact on the size and shape of sand after grouting in first sand layer in Bangkok subsoils. The sand model is grouted with sodium silicate solution at viscosity of 110 centipoise and 130 centipoise and at injection rate are 4.56, 6.08 and 7.60 mL/min. The results show that the grouting pressure significantly affects the shape of the sand after grouting. At low grouting pressure the grout forms in a uniform spherical grout bulb which has the diameter larger than the theoretical diameter. Thus, the permeable grouting dominates. The viscosity has minor influence on the pattern of the grout since the different in viscosity is relatively small. The coefficient of permeability of the grouted sand reduces 8.33 from the coefficient of permeability of un-grouted sand.

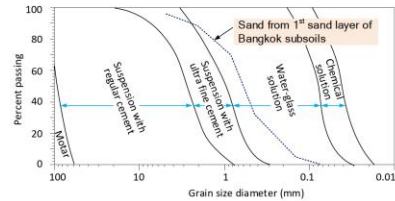
Keyword: sodium silicate solution, permeable grout, fracturing grout, first sand layer in Bangkok subsoils



1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันโครงการสาธารณูปโภคในพื้นที่กรุงเทพมหานครจำเป็นต้องสร้างให้มีความลึกลงไปจากผิวดินมากกว่าในอดีตเนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ อาทิเช่น โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีส้ม ที่โครงสร้างใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 25 - 30 เมตร [1] หรือ โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนที่ขุดดินลึกประมาณ 30 เมตร [2] ซึ่งในการขุดดินลึกถึงระดับนี้ต้องขุดลงไปถึงชั้นดินทรายซึ่งต้องประสบกับปัญหาน้ำใต้ดินอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการศึกษาโดย [3] และ [4] พบว่าระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครมีการคืนตัวสูงขึ้นเนื่องจากการไหลเติมของน้ำในชั้นน้ำบาดาล การแก้ปัญหาน้ำใต้ดินที่ไหลเข้ามาในบ่อขุดระหว่างการก่อสร้างชั้นใต้ดินที่ขุดลึกถึงชั้นทรายมีหลายวิธี ได้แก่การใช้กำแพงกันดินที่ยาวขึ้น หรือการสูบน้ำใต้ดิน แต่หนึ่งวิธีที่มีการนำมาใช้มากขึ้นในการป้องกันการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามาในบ่อขุดได้แก่การปรับปรุงทรายด้วยวิธีการเกรท (grouting) ให้มีความต่อเนื่องกันเพื่อเกิดขวางการไหลของน้ำเข้าในบ่อขุด วัสดุที่ใช้เกรทส่วนใหญ่เป็นซีเมนต์ เนื่องจากซีเมนต์มีอนุภาคที่โตกว่าขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคซีเมนต์จึงเข้าไปอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในการเกรทที่จึงต้องใช้แรงดันที่สูงจนมวลดินเกิดการแตก (fracturing) จากงานวิจัยของ [5] พบว่าการเกรทด้วยซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water cement ratio) สูงและแรงดันสูงทำให้เนื้อดินแตกออกด้วยแรงดันของเหลว (hydraulic fracturing) ซึ่งเรียกว่าเกรทเพื่ออุดรอยแตก (fracturing grout) และถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ต่ำและแรงดันต่ำการเกรทเป็นแบบการเกรทเพื่อเสริมความหนาแน่น (compaction grout)



รูปที่ 1 ขนาดของเม็ดดินกับประเภของวัสดุเกรทที่เหมาะสมในการเกรท

การแตกของมวลดินนี้ทำให้ขาดความต่อเนื่องซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการต้านทานการไหลไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะในกรณีที่ดินมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดเล็ก เช่น ทรายละเอียด ด้วยเหตุนี้การเกรทในดินทรายที่มีช่องว่างขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้สารละลายเคมีที่สามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้โดยไม่เกิดการแยกในมวลดิน ซึ่งสารละลายนี้ต้องก่อตัวเป็นเจลอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินหลังจากเกรทเพื่อให้ความชื้นน้ำของดินลดลง รูปที่ 1 ชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุเกรทแต่ละชนิดที่สัมพันธ์กับขนาดช่องว่างของเม็ดดิน ในกรณีของดินทรายที่อยู่ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ การใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกรทที่ไม่เหมาะสมเท่ากับการใช้ สารละลายไฮเดียมซิลิเกต (water-glass solution) ซึ่งเป็นสารละลายเคมี

[6] ได้รายงานถึงประสิทธิภาพในการลดความชื้นของทรายในชั้นดินกรุงเทพ โดยการใช้วิธีเกรทด้วยสารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของ sodium silicate, MK reactive, silicon dioxide sodium compound เพื่อป้องกันน้ำไหลผ่านชั้นทรายในระหว่างการขุดลึก 30 เมตร เพื่อก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินที่สถานีสนามไชย กรุงเทพมหานคร

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเกรทในทรายในชั้นดินกรุงเทพด้วยสารละลายเคมี และยังคงอาศัยการนำเข้าเทคโนโลยีการเกรทและนำเข้าสู่สารละลายเคมีจากต่างประเทศซึ่งเกือบทั้งหมดเป็นความลับทางการค้า งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกรทโดยใช้สารละลายเคมี



ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถเกราท์ในดินทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพได้ โดยมีมุ่งเป้าไปที่ประสิทธิภาพในการลดความชื้นของทรายหลังการเกราท์ และปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อขนาดและรูปทรงของเกราท์ ซึ่งได้แก่ความดันที่ใช้เกราท์และความหนืดของสารละลายเกราท์ ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบฉีดเกราท์เคมีที่พัฒนาขึ้น ลงในตัวอย่างทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพในห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตำแหน่งการเกราท์ และยังใช้เป็นข้อมูลให้วิศวกรที่ทำการก่อสร้างใช้ในการพัฒนาเครื่องจักร และวิธีในการฉีดเกราท์เพื่อให้การเกราท์มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 ทฤษฎีที่ใช้คำนวณขนาดของการเกราท์โดยการซึม

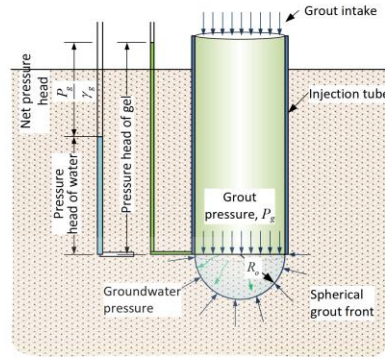
[7] กล่าวว่า การฉีดเกราท์ผ่านท่อลงในดินนั้น เกราท์จะซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยพิจารณาการเริ่มไหลเป็นรูปครึ่งทรงกลมบริเวณปลายท่อ (spherical flow model for porous media) ดังรูปที่ 2 ในกรณีที่เกราท์เป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (newtonian fluid) เมื่อพิจารณาว่าเกราท์นั้นซึมไปในทราย โดยคิดว่าเป็นรูปทรงกลมบริเวณปลายท่อ ที่มีรัศมีเป็น R_0 โดยความแตกต่างระหว่างแรงดันในการเกราท์กับแรงดันน้ำในดิน คิดเป็นแรงดันสุทธิที่ใช้ในการเกราท์มีค่าเท่ากับ P_c ซึ่งคิดเป็นเฮดแรงดันได้ $\frac{P_c}{\gamma_G}$ ดังนั้น P_c มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$P_c = P_g - P_w \tag{1}$$

เมื่อ P_c คือ แรงดันสุทธิ
 P_g คือ แรงดันของการเกราท์
 P_w คือ แรงดันน้ำในดิน

ดังนั้นอัตราการไหลของเกราท์ที่ผ่านท่ออัตรนั้น สัมพันธ์กับแรงดันสุทธิดังสมการที่ (2)

$$P_c = \frac{Q\gamma_G}{4\pi R_0 k_G} \tag{2}$$



รูปที่ 2 การพิจารณาแรงดันของการเกราท์ที่ไหลผ่านท่อฉีดลงในดิน

[8] ได้กล่าวว่า สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของของไหลกับความหนืดนั้นเป็นไปตามสมการที่ (3)

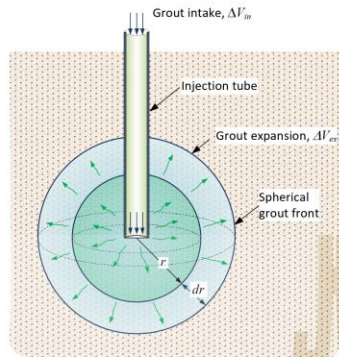
$$\frac{k_w}{k} = \frac{\mu}{\mu_w} \tag{3}$$

เมื่อ k_w คือ ความสามารถในการซึมของน้ำ, m/s
 k คือ ความสามารถในการซึมของของไหล, m/s
 μ_w คือ ความหนืดของน้ำ, Pa-s
 μ คือ ความหนืดของของไหล, Pa-s

เมื่อนำสมการที่ (2) และ (3) มาสัมพันธ์กันจะได้แรงดันสุทธิของการเกราท์ ดังสมการที่ (4)

$$P_c = \frac{Q\gamma_G\mu_w}{4\pi R_0\mu k_w} \tag{4}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการเกราท์, m³/s
 γ_G คือ หน่วยน้ำหนักของเกราท์, kN/m³
 k_w คือ สัมประสิทธิ์ความซึมของเกราท์ในดิน, m/s
 μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความซึมของน้ำในดิน, m/s



รูปที่ 3 การซึมของเกรทท์ผ่านปลายท่อฉีดและซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นรูปทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายท่อฉีด

ในระหว่างที่ทำการเกรทท์ด้วยการซึมเป็นเวลา dt นั้น เกรทท์จะซึมเป็นระยะทาง dr ดังนั้นปริมาณการเกรทท์ในเวลา t ได้จากการพิจารณาให้ปริมาตรของเกรทท์ที่ฉีดลงดินเท่ากับปริมาตรของเกรทท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยคิดให้ปริมาตรของเกรทท์ที่ซึมลงดินเป็นรูปทรงกลมที่มีเกรทท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินโดยรูปที่ 3 แสดงถึงแนวคิดของปริมาตรเกรทท์ที่ฉีดลงดินกับปริมาตรเกรทท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ด ดังนั้น ปริมาตรทรงกลมที่ขยายออกสัมพันธ์กับปริมาตรของเกรทท์ที่ฉีดลงดิน ดังสมการที่ (5)

$$\text{เมื่อ } V_m = V_{out} \\ \text{จะได้ } Qdt = n(4\pi r^2 dr) \quad (5)$$

โดยที่ n คือ ความพรุนของดิน

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการซึมของเกรทท์ให้มีรัศมี R จากปลายท่อที่มีรัศมี R_0 ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (5) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (6)

$$t = \frac{4}{3Q} \pi n (R^3 - R_0^3) \quad (6)$$

จากทฤษฎีการไหลของเกรทท์ ในงานวิจัยนี้ ใช้วัสดุเกรทท์ที่เป็นสารละลายเคมี วัสดุเกรทท์จึงเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน ดังนั้นการใช้ทฤษฎีการเกรทท์ที่กล่าวมาข้างต้นจึงใช้อธิบายการไหลของเกรทท์เคมีในงานวิจัยนี้ได้

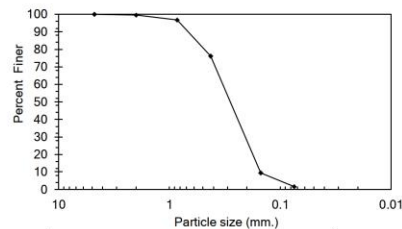
2. วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยในบทความนี้ประกอบไปด้วย วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ เครื่องมือทดสอบ วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ และวิธีการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างทรายที่เก็บจากชั้นทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯที่มีความลึก 30 – 30.5 เมตร ในโครงการก่อสร้างเสาเข็มของอาคารคอนโดมิเนียม บนถนนจันทน์ เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร การเก็บตัวอย่างใช้วิธีเก็บโดยใช้ถังเก็บทราย (bucket) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ทรายตัวอย่างมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 854-00 [9], ความหนาแน่นเท่ากับ 2.17 ตันต่อลูกบาศก์เมตร, อัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.52, และมีสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเท่ากับ 2×10^{-1} เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2434-68 [10] ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดผลของตัวอย่างทรายที่เก็บขึ้นมาจากสนาม เป็นต้นแบบเพื่อสร้างทรายที่มีขนาดผลเหมือนกัน เพื่อให้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเกรทท์มีความสม่ำเสมอ รูปที่ 4 เป็นขนาดผลของทรายตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 422-63 [11]



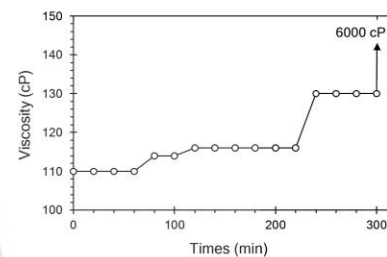
รูปที่ 4 ขนาดคละของตัวอย่างทรายจากทรายชั้นแรกของ
ชั้นดินกรุงเทพ

2.1.2 วัสดุเกราท์เคมี

ในงานวิจัยใช้สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้นโดยมีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) และสารเคมีผสมเพิ่มที่ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นเจล โดยเกราท์เคมีที่ใช้เป็นสูตรที่ได้ยื่นขอรับอนุสิทธิบัตรภายใต้ชื่อโซเดียมซิลิเกตเจลกั้นน้ำ คำขอหมายเลข 1903001237 เกราท์เคมีตามสูตรที่ยื่นขอนี้ มีค่า pH ประมาณ 11.4 โดยเกราท์หลังจากผสมเสร็จเป็นสารละลายเคมีที่มีความหนืดประมาณ 110 เซนติพอยส์ ถึง 115 เซนติพอยส์ จนถึง 220 นาที จากนั้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 เซนติพอยส์ จนถึง 300 นาที ก่อนที่เกราท์เคมีจะมีความหนืดสูงขึ้นด้วยอัตราที่สูงจนมีความหนืดเป็น 6000 เซนติพอยส์ ดังรูปที่ 5 ดังนั้นในงานวิจัยจึงใช้เกราท์เคมีที่มีความหนืดประมาณ 110 เซนติพอยส์ ทำการฉีดลงตัวอย่างทรายภายในระยะเวลาไม่เกิน 220 นาทีหลังการเตรียมสาร และเกราท์เคมีที่มีความหนืดประมาณ 130 เซนติพอยส์ ฉีดลงตัวอย่างทรายหลังจาก 220 นาทีหลังการเตรียมสาร และฉีดเสร็จภายในเวลาไม่เกิน 300 นาที ในการทดสอบเลือกใช้เกราท์เคมีที่ควบคุมให้อยู่ในช่วงความหนืด 110 ± 8 เซนติพอยส์ และ 130 ± 8 เซนติพอยส์ โดยใช้สัญลักษณ์ชื่อเรียกดังตารางที่ 2 รูปที่ 6 เป็นภาพถ่ายเกราท์เคมีหลังจากผสมจนถึง 300 นาที ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำและเกราท์เคมีหลังจากทิ้งไว้เกิน 300 นาที จนก่อตัวกลายเป็นเจล

ตารางที่ 2 ค่าใช้เรียกเกราท์ในงานวิจัย

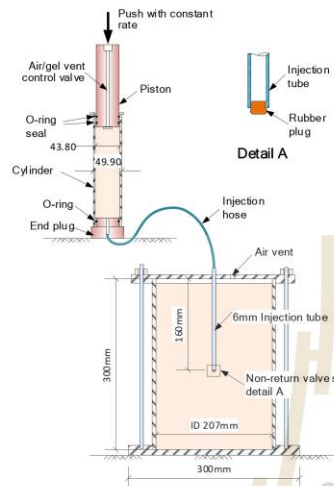
สัญลักษณ์ชื่อเรียก เกราท์เคมีที่ใช้	ความหนืดของเกราท์ (เซนติพอยส์)
V110	110 ± 8
V130	130 ± 8



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของ
เกราท์กับระยะเวลา



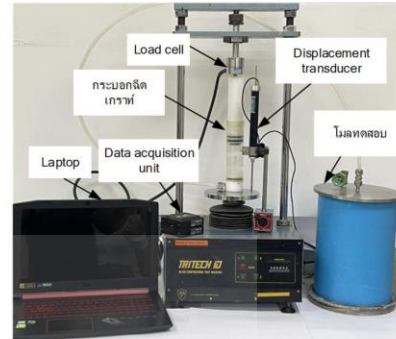
รูปที่ 6 ภาพถ่ายเกราท์เคมีก่อนและหลังก่อตัวกลายเป็น
เจล



รูปที่ 7 โมลทดสอบและระบบฉีดเกราท์ด้วยอัตราฉีดคงที่

2.2 เครื่องมือทดสอบ

ในงานวิจัยได้ออกแบบเครื่องมือฉีดเกราท์ลงในทรายที่มีอัตราฉีดเกราท์คงที่ โดยใช้หลักการของกระบอกฉีดและลูกสูบ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ [5] และ [12] ที่ใช้แรงดันอากาศเพื่อทำให้แรงดันของการเกราท์คงที่ เหตุผลที่ใช้อัตราฉีดเกราท์คงที่เพื่อให้ตรงกับวิธีฉีดเกราท์ที่ใช้ในสนามซึ่งใช้กระบอกสูบและลูกสูบในการฉีดเกราท์ที่มีความต่อเนื่อง รูปที่ 7 เป็นแบบเครื่องมือที่ใช้ฉีดเกราท์ โดยเครื่องมือประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่กระบอกฉีดเกราท์และโมลบรรจุทรายสำหรับทดสอบ กระบอกฉีดเกราท์ทำจากท่ออะคริลิกใสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 43.8 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ส่วนลูกสูบที่ใช้ฉีดเกราท์ทำจากพลาสติกทึบสีครีมที่มีโอริงขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกฉีดเพื่อใช้สร้างแรงดันในการฉีดเกราท์ลงในโมลทดสอบ ตรงแกนกลางลูกสูบลูกสูบมีวาล์วสำหรับเปิดเพื่อใช้ไล่อากาศหลังจากบรรจุเกราท์เคมีลงในกระบอกฉีดหรือเปิดเพื่อขจัดสุญญากาศเมื่อถอนกระบอกฉีดหลังจากทดสอบเสร็จ และวาล์วนี้อาจจะปิดเมื่อดูดลูกสูบ



รูปที่ 8 ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการฉีดเกราท์และโมลทดสอบ

ในขณะที่ฉีดเกราท์ในกระบอกฉีด เมื่อฉีดเกราท์จะไหลผ่านท่อพลาสติกทึบแรงดันที่ส่วนกลางของกระบอกลัด ท่อพลาสติกทึบแรงดันนี้ต่อกับท่อฉีดสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 160 มิลลิเมตร ผังลงในตัวอย่างทราย ที่ปลายท่อฉีดมีวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (non-return valve) เพื่อกันทราย, น้ำ, และสารละลายเคมีที่มีแรงดันไหลย้อนเข้ามาในท่อฉีด วาล์วจะเปิดออกเมื่อแรงดันเกราท์สูงเกินกว่าแรงดันภายนอก และจะปิดเมื่อแรงดันภายนอกสูงกว่าแรงดันภายใน สำหรับโมลทดสอบทำจากพลาสติก PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 207 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โมลมีฝาปิดและมีวาล์วระบายแรงดันซึ่งยึดโมลไว้กับฐาน รูปที่ 8 เป็นภาพถ่ายการประกอบเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

2.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

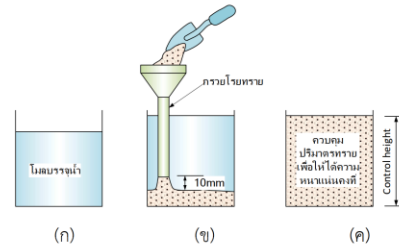
ในการทดสอบนี้ได้จำลองสภาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินโดยใช้ตัวอย่างทรายอิมิตัวด้วยน้ำ ซึ่งแตกต่างไปจากงานวิจัยโดย [5] การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ทำโดยนำทรายอบแห้ง 13 กิโลกรัม โรยผ่านกรวยลงโมลทดสอบที่มีน้ำบรรจุอยู่ โดยให้ปลายกรวยสูงกวาระดับทราย 1 เซนติเมตรตลอดเวลา เพื่อควบคุมความหนาแน่นของทรายให้สม่ำเสมอ ตรวจสอบโดยการวัดปริมาตรของทรายใน



โมลหลังจากเตรียมตัวอย่างทดสอบ ซึ่งความหนาแน่นสัมพันธ์กับอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ในงานวิจัยนี้จึงใช้ความหนาแน่นของดินในโมล สำหรับควบคุมความสม่ำเสมอของตัวอย่าง รูปที่ 9 เป็นลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

2.4 วิธีการทดสอบ

การฉีดใช้การกดด้วยอัตราคงที่ โดยวัดแรงอัดด้วยอุปกรณ์วัดแรง (load cell) และวัดระยะการเคลื่อนตัวของกระบอกฉีดด้วยเซนเซอร์วัดระยะขจัด (displacement transducer) โดยใช้หน่วยรับข้อมูล (data acquisition unit) ในการเก็บข้อมูล แรงดันของเกรทที่เคมีคำนวณจากแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดกระบอกฉีด และปริมาตรการฉีดคำนวณจากระยะการเคลื่อนของกระบอกฉีดคูณกับพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีด เมื่อดัดเกรทที่เคมีลงในทรายแล้วทิ้งไว้ 72 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายเคมีก่อตัวเป็นเจล จากนั้นชุดทรายที่เกรทที่เคมีออกจากโมลเพื่อบันทึกภาพและวัดขนาดของทรายที่มีเกรทที่เคมีอยู่ ตารางที่ 3 เป็นสัญลักษณ์แทนอัตราการฉีดและตารางที่ 4 เป็นรายละเอียดจำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัย การหาขอบเขตสารละลายเคมีที่ซึมลงในทราย ใช้วิธีตรวจสอบค่า pH ของสารละลายจากบริเวณที่คาดว่าจะเป็นขอบเขตของการเกรท โดยในการทดสอบหาก pH มีค่าไม่เกิน 6 ถือว่าเป็นทรายที่ไม่มีเกรทที่เคมีอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย การทดสอบการลดความชื้นของทรายที่ผ่านการเกรท ใช้การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ โดยวิธีความดันเปลี่ยน (variable head) เนื่องจากตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกรทที่เคมีด้วยสารละลายเคมีแล้ว มีการซึมน้ำตามาก การทดสอบใช้ตัวอย่างทรายที่ผ่านการเกรทที่เคมีในกระบอกทดสอบ จากนั้นปล่อยให้แห้งผ่านตัวอย่างภายใต้แรงดันที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 9 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (ก) ใส่น้ำลงในโมลทดสอบ (ข) ใสตัวอย่างทรายแห้งผ่านกรวยยาวลงในโมลทดสอบ (ค) ตัวอย่างทรายหลังเตรียมเสร็จ

ตารางที่ 3 สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีด

สัญลักษณ์ตัวแปร	อัตราการเคลื่อนของลูกสูบ (มิลลิเมตรต่อนาที)	อัตราฉีด (มิลลิลิตรต่อนาที)
R3	3	4.56
R4	4	6.08
R5	5	7.60

ตารางที่ 4 จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่าง	ความหนืด (เซนติพอยส์)	R3	R4	R5
1	V110	1	-	-
2	V110	-	1	-
3	V110	-	-	1
4	V130	1	-	-
5	V130	-	1	-
6	V130	-	-	1



3. ผลการทดสอบ

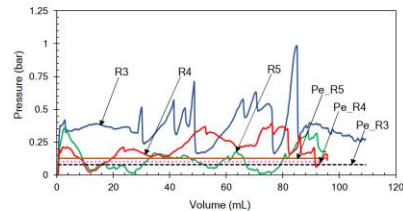
ผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างการฉีดกับแรงดัน รูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกรท และ ความชื้นของทรายที่ผ่านการเกรท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดัน

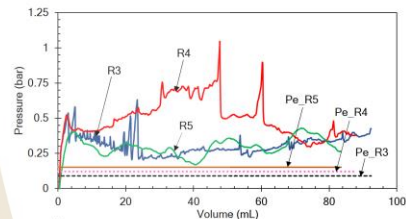
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกรทกับปริมาตรเกรท ที่ความหนืด V110 พบว่า แรงดันมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้ฉีด แรงดันในช่วงนี้เป็นแรงดันที่ยังปิดปลายท่อฉีดยังไม่เปิดออก ซึ่งเมื่อปลายท่อเปิดออกแรงดันจะเริ่มลดลง โดยการพัฒนาแรงดันทั้งสามอัตราการฉีด พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 มีค่าแรงดันสูงที่สุดตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 และ อัตราการฉีดเท่ากับ R5 มีค่าต่ำสุด

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกรทกับปริมาตรเกรท ที่ความหนืด V130 พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 เกิดการพัฒนาของแรงดันมากที่สุด ตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R5 ตามลำดับ

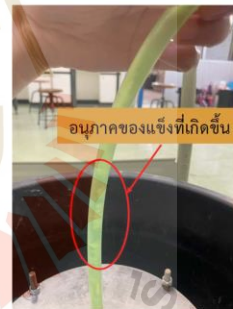
ทั้งนี้การพัฒนาของแรงดันทั้งสามอัตราการฉีดเกิดจากในระหว่างการทดสอบ สารละลายเคมีที่ใช้ในการเกรทเกิดการก่อตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก อนุภาคเหล่านี้ไม่ได้ก่อตัวเป็นเจลทั้งหมด จึงยังคงไหลในท่อฉีดได้ โดยพบว่าที่อัตราการฉีดต่ำ สารละลายเคมีไหลไปยังบริเวณปลายท่อฉีดได้ช้า จึงเกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่าที่อัตราการฉีดสูง ทำให้หน้าตัดการไหลบริเวณปลายท่อฉีดลดลง แรงดันจึงมีค่าสูงขึ้น รูปที่ 12 เป็นภาพถ่ายอนุภาคเจลที่ก่อตัวขึ้นในท่อพลาสติกทนแรงดัน ขณะกำลังฉีดลงในโมล นอกจากนี้การก่อตัวของอนุภาคในสารละลายเคมียังส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันซึ่งการเกิดแรงดันสูงในการทดสอบเกิดขึ้นเพียงชั่วขณะและลดลงอย่างฉับพลัน ในขณะที่แรงดันลดลงอย่างฉับพลัน สังเกตเห็นสารละลายเคมีในท่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการไหลซึมในตัวอย่างทรายเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงเห็นว่า การพัฒนาและลดลงอย่างฉับพลันของแรงดันเกิดจากการที่อนุภาคในสารละลายเคมีเกิดการกระจุกตัวในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นและเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นสูงมากกว่าการกระจุกตัวของอนุภาค ก็



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรทกับปริมาตรเกรทที่ V110



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรทกับปริมาตรเกรทที่ V130



รูปที่ 12 อนุภาคเจลที่เกิดจากสารละลายเคมี

ถูกดันออกไปแรงดันจึงลดลง ดังรูปที่ 13 ซึ่งการเกิดแรงดันเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างฉับพลัน ส่งผลทำให้การพัฒนาแรงดันมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกรทที่สูงสุด พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 (ความหนืดเกรท V110) และ ที่อัตราการฉีดเท่ากับ

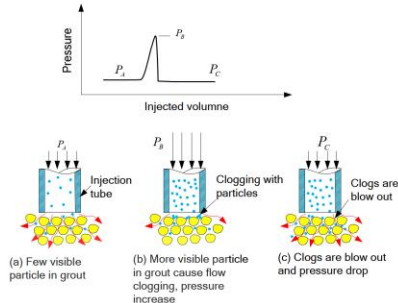


R4 (ความหนืดเกราท V130) แรงดันมีค่ามากที่สุด เมื่อพิจารณาที่ความหนืดเกราทเท่ากัน

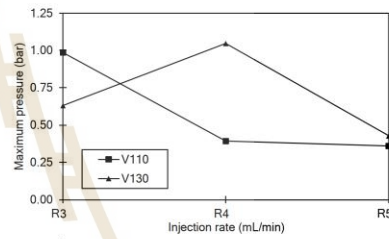
เมื่อเปรียบเทียบแรงดันในการเกราทที่ได้จากการทดสอบกับแรงดันสุทธิเชิงทฤษฎี (P_c) ที่คำนวณจากสมการที่ (4) พบว่าแรงดันในการเกราทไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากการเกิดอนุภาคในสารละลายเคมี ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลัน จากการกระจัดตัวของอนุภาคในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย แรงดันในการเกราทจึงมีค่าสูงกว่าแรงดันเชิงทฤษฎี

3.2 รูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท

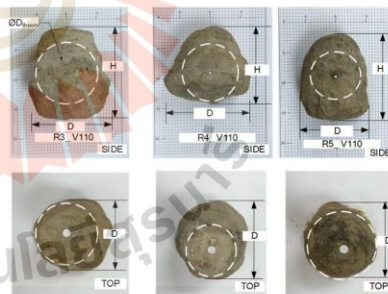
รูปที่ 15 และ 16 เป็นภาพถ่ายรูปทรงทรายหลังการเกราท (grout blub) ที่ความหนืด V110 และ V130 ตามลำดับพบว่า ทรายที่ผ่านเกราทมีลักษณะเป็นทรงกลมรี โดยมีลักษณะเป็นวงกลมจากภาพถ่ายด้านบน และมีรูปร่างเป็นทรงรีจากภาพถ่ายด้านข้าง เส้นผ่านศูนย์กลางของทรายหลังการเกราทเชิงทฤษฎี (D_{theory}) คิดจากการให้ปริมาตรของเกราทที่ซึมลงทรายเป็นรูปทรงกลมที่มีเกราทแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ที่คำนวณจากสมการที่ (6) เมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรายหลังการเกราท (D) ได้ผลดังตารางที่ 5



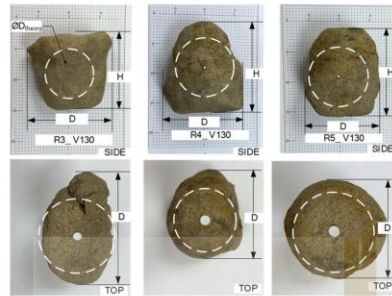
รูปที่ 13 การเพิ่มขึ้นของแรงดันเนื่องจากการอุดตันจากอนุภาคในเกราท และการลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลังจากส่วนที่อุดตันหลุดออกไปในช่องว่าง



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกราทสูงสุด



รูปที่ 15 ภาพถ่าย grout blub ที่ V110



รูปที่ 16 ภาพถ่าย grout blub ที่ V130

ตารางที่ 5 ขนาดทรายหลังการเกราท์ตามทฤษฎีและขนาดทรายหลังการเกราท์

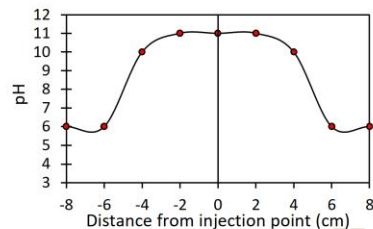
อัตราส่วนช่องว่าง	D (มิลลิเมตร)	H (มิลลิเมตร)	D_{theory} (มิลลิเมตร)
0.52	93.0	122.0	84.0
0.52	120.0	102.0	80.6
0.52	89.0	130.0	81.6
0.52	126.0	111.0	80.2
0.52	109.0	137.0	79.2
0.52	95.0	126.0	78.0

จากตารางที่ 5 พบว่า ขนาดของทรายหลังการเกราท์มีขนาดใหญ่กว่าทฤษฎี เกิดจากเกราท์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นสารละลายเคมี ซึ่งเกิดอนุภาคในสารละลายเคมีระหว่างทำการทดสอบ ทำให้การกระจายตัวของเกราท์นั้นไม่ได้เกิดจากการซึม (permeation) ลงไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการแพร่ (diffusion) ของสารละลายเคมีจากจุดที่มีความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย

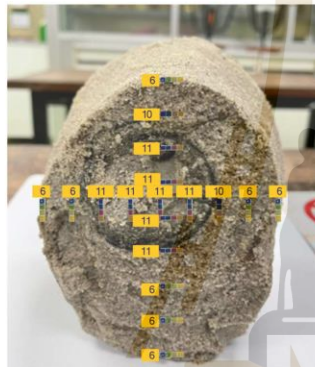
เพื่ออธิบายสาเหตุที่รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดใหญ่กว่าเชิงทฤษฎี จึงทำการทดสอบการหาขอบเขตสารละลายเคมีที่ซึมลงในทราย พบว่า ทรายที่อยู่ใกล้บริเวณที่อัดจะมีค่า pH เท่ากับ 11 ซึ่งค่า pH ใกล้เคียงกับสารละลายเคมี ในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปจากที่อัดจะมีค่า pH เริ่มลดลงจนถึงค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า pH ของทรายทดสอบที่อัดตัวด้วยน้ำก่อนการเกราท์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สารละลายเคมีเกิดการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งคือตำแหน่งบริเวณที่อัดไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งคือตำแหน่งที่ห่างออกไปจากที่อัด ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ขนาดทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดใหญ่กว่าเชิงทฤษฎี รูปที่ 17 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากที่อัดกับค่า pH ของทรายในตัวอย่างทดสอบและรูปที่ 18 เป็นภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงดันเกราท์ต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ พบว่า แรงดันเกราท์ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยแรงดันเกราท์สูง เกราท์เกิดการกระจายตัวในแนวตามขวางจากปลายที่อัดได้มากกว่าที่แรงดันต่ำ ทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สม่ำเสมอจากภาพถ่ายด้านข้าง คาดว่าเกิดจากแรงดันที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างฉับพลันระหว่างการทดสอบ จึงก่อให้เกิดการแตกของมวลดินด้วยสารละลายเคมีในทรายระหว่างการเกราท์ รูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นการเกราท์เพื่ออุดรอยแตก ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ [5]

สำหรับทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยแรงดันเกราท์ต่ำ เกราท์เกิดการกระจายตัวในแนวตามขวางจากปลายที่อัดได้น้อยกว่าที่แรงดันสูง ทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอมากกว่าการเกราท์โดยแรงดันสูง เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายด้านข้าง รูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นจึงผสมระหว่างการเกราท์เพื่ออุดรอยรอยแตก และการเกราท์แบบซึม (permeable grout)



รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับค่า pH



รูปที่ 18 ภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความหนืดเกราที่ต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกรา พบว่า ความหนืดของเกราที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อรูปทรงของทรายหลังการเกรา เกิดจากความหนืดของเกราที่ใช้ในการวิจัย มีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบรูปทรงของทรายหลังการเกราจึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับทรายที่ผ่านการเกราด้วยซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.5 และ 1 ในงานวิจัยของ [5]

3.3 ความซึมของทรายที่ผ่านการเกรา

วัตถุประสงค์หลักของการนำการเกราด้วยสารเคมีไปใช้คือการลดสัมประสิทธิ์ความซึมของทราย ผลการทดสอบความซึมของทรายที่ผ่านการเกราด้วยสารละลายเคมีพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมมีค่าเป็น 2.4×10^{-5} เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าลดลงกว่าทรายที่ไม่ผ่านการเกรา 8.33 เท่า ดังผลเปรียบเทียบในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายก่อนและหลังผ่านการเกรา

ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์ความซึม (เมตรต่อวินาที)
ทรายไม่ผ่านการเกรา	2.0×10^{-4}
ทรายผ่านการเกรา	2.4×10^{-5}

ในการออกแบบตำแหน่งของการฉีดเกราเคมีลงในดินควรใช้วิธีคำนวณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกราที่เชิงทฤษฎีโดยใช้สมการที่ 6 จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกรานั้นใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงทฤษฎี เนื่องจากการแพร่ของเกราเคมีที่มีความเข้มข้นสูงก่อนการก่อตัวไปจากขอบเขตของการเกราภายใต้แรงดัน ทำให้ขอบเขตความตึงน้ำจากการฉีดเกราใหญ่ขึ้นจึงอยู่ในด้านที่ปลอดภัยในทางปฏิบัติ

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดัน พบว่า การก่อตัวของอนุภาคในสารละลายเคมี ส่งผลต่อการพัฒนาแรงดันของทั้งสามอัตราการฉีดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการฉีดต่ำ มีการพัฒนาของแรงดันสูง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ลดลง จากการสะสมของอนุภาคบริเวณหน้าตัดการไหล แรงดันจึงมีค่าสูงขึ้น



2. ผลทดสอบรูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์ พบว่า แรงดันในการเกราท์ ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยแรงดันในการเกราท์ต่ำ ทรายที่ผ่านการเกราท์จะมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอมากกว่า การใช้แรงดันสูง เนื่องจากเกิดการเกราท์แบบซิม แสดงให้เห็นว่า การใช้แรงดันในการเกราท์ต่ำ ประสิทธิภาพของทรายหลังการเกราท์เพื่อลดความซิมมีน้ำ มีมากกว่าการใช้แรงดันในการเกราท์สูง ในส่วนอิทธิพลเนื่องจากความหนืดเกราท์ พบว่า ความหนืดเกราท์ไม่ได้ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ เนื่องจากเกราท์เคมีที่ใช้ในงานวิจัยมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อแปรผันความหนืด

3. ผลทดสอบความซิมของทรายที่ผ่านการเกราท์ พบว่า ทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์การซิมผ่านที่ต่ำกว่าทรายไม่ผ่านการเกราท์ 8.33 เท่า แสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุในการเกราท์สามารถลดความซิมมีน้ำในทรายได้

ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ซึ่งยังไม่ได้ทดสอบด้านความคงทนต่อการละลาย ข้อเสนอสำหรับงานวิจัยต่อไปคือการศึกษาถึงพฤติกรรมการคงทนต่อการละลายน้ำของเจลที่แทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เมื่อใช้งานอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลาาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณพีระพัฒน์ ถิ่นหนองแขง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณบุญญฤทธิ์ บุญเกิด, คุณณัฐดนัย ป้อมบุญมี, คุณพีเชษฐพงศ์ ชรรมะกิตติกร และนักศึกษาปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Matichon Public Co.,Ltd. (2020, Jan.). Exploration of the construction underground site

“Italian-Thai” MRT Orange line Thailand culture center – Min Buri. Bangkok., Thailand. [Online]. Available: <https://www.prachachat.net/property/news-411567>

[2] Matichon Public Co.,Ltd. (2021, Sep.). Implementation progress Tunnel of Bueng Nong Bon Construction on March 2022. Bangkok., Thailand.[Online].Available: https://www.matichon.co.th/local/new_2944429

[3] T. Paveenchana and K. Saowiang, “The change of piezometric pressure in the subsoil strata affecting substructures in the Bangkok area,” in *Proceedings of the Seminar of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 1-12.

[4] N. Phienwej, A. Asanprakit, P. Kittiyodom, and S. Timpong, “Increasing geotechnical challenges in the design and construction planning of the third phase Bangkok MRT underground”, in *Proceeding of the 20th SEAGC*, Indonesia, 2018.

[5] Q. Wang, S. Wang, S.W. Sloan, D. Sheng and R. Pakzad, “Experimental investigation of pressure grouting in sand,” *Soils and Foundations*, volce. 56, no. 2, pp. 161-173, March 2016

[6] W. Wiriyatharakij, “MRTA station excavation under situation of space constraint and potential hydraulic uplift at base: cases of Sanamchai & Itsaraphap stations,” M.Eng. thesis, Department of Civil and Infrastructure Engineering, Asian Institute of Technology, 2016 (in Thai).



- [7] M.R. Hausmann, "Modification at depth by grouting," Engineering principle of ground modification, Singapore, 1990, pp. 347-379.
- [8] C. Kutzner, "Grouting Theory," Grouting of rock and soil, Rotterdam, Netherland, 1996, pp. 9-27.
- [9] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D 854-00, 2000.
- [10] *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*, ASTM D 2434-68, 2000.
- [11] *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM D 422-63, 2002.
- [12] S. Lirer, A. Flora, M. Borrelli and A. Evangelista, "Modelling low pressure grouting of unsaturated silty sanda," in Proceeding of the 5th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur, 2004, 211-218.

ประสิทธิภาพของเกรทด้วยซิลิเกตเจลในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ Effectiveness of silicate grout in sand of the first sand layer of Bangkok subsoil

อรยา คำหนองไม้¹ พรพจน์ ตันเส็ง^{2*} และ สุทิน คูหาเรือรอง³

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: pompot@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบการเกรทในชั้นทรายด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตโดยวิธีอัตราการฉีดคงที่ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการฉีดและความหนืดของเกรท ที่ส่งผลต่อเกรทที่เกิดขึ้น ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ การทดสอบใช้ตัวอย่างทรายอิ่มตัวด้วยน้ำที่จำลองสภาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินทำการเกรทด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีความหนืดเท่ากับ 110 และ 130 centipoise ที่อัตราการฉีดเท่ากับ 4.56, 6.08 และ 7.60 มิลลิลิตรต่อวินาที ผลการวิจัยพบว่า อัตราการฉีดส่งผลต่อรูปแบบเกรทที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ส่วนความหนืดเกรทไม่ได้ส่งผลต่อรูปแบบเกรทที่เกิดขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าอัตราการฉีดต่ำที่เกิดจากการเกรทเพื่ออุดรอยแตก (fracture grout) ส่วนอัตราการฉีดที่สูงกว่าจะเกิดแบบผสมระหว่างการเกรทเพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม (permeable grout) และ fracture grout ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันของการอัดเกรทลงในตัวอย่าง

คำสำคัญ: สารละลายโซเดียมซิลิเกต, การเกรทเพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม, การเกรทเพื่ออุดรอยแตก, การเกรท

Abstract

This paper presents the research work on grouting of sodium silicate solution into sand with constant injection rate. The influence of rate of injection and grout viscosity on the grout shape is reported. The sand sample was collected from the first sand layer of Bangkok subsoil. The sodium silicate solution with viscosity of 110 centipoise and 130 centipoise is injected into the saturated sample in the test mold. The rate of injection is 4.56, 6.08, and 7.60 mL/min. The results show that the rate of injection has a significant influence on the grout results. Additionally, the low grouting rate cause fracture grout in soil and high grouting rate cause mixture between permeable grout type and fracture grout type is related to the pressure grouting in sample.

Keywords: sodium silicate solution, permeable grout, fracture grout, grouting

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพื้นที่ใต้ดินในกรุงเทพมหานครนั้นมีสูงขึ้นเนื่องจากความจำกัดของพื้นที่ ส่งผลให้โครงการสาธารณูปโภคจำเป็นต้องสร้างให้มีความลึกลงไปจากผิวดิน อาทิเช่น โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดิน

สายลึสม ที่โครงสร้างใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 25 - 30 เมตร [1] หรือโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนที่ขุดดินลึกประมาณ 30 เมตร [2] การก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยระดับความลึกนี้จำเป็นต้องขุดดินลึกไปถึงชั้นดินทรายที่ประสบกับปัญหาน้ำใต้ดิน ซึ่งในอดีตเมื่อปี ค.ศ. 1997 โครงการที่มีการขุดดินลึกถึงระดับ 21 - 23 เมตร ในชั้นดินกรุงเทพนั้นไม่พบปัญหาน้ำใต้ดินในระหว่างก่อสร้าง ตัวอย่างเช่นโครงการขุดเพื่อก่อสร้างปล่องกลมสำหรับรับน้ำเสียเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เมตร ขุดดินลึก 21 เมตร ในเขตยานนาวา กรุงเทพมหานคร โดยใช้ diaphragm wall ที่มีระยะฝังลงไปจากกันบ่อเพียง 3 เมตร พบว่าไม่มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามาจากกันบ่อแต่อย่างใด ดังรูปที่ 1 แต่ในทางกลับกันในปี ค.ศ. 2017 การขุดดินที่ความลึกเพียง 17 เมตร ในชั้นดินกรุงเทพ กลับประสบปัญหาน้ำใต้ดินไหลเข้ามาจากกันบ่อขุดถึงแม้ว่าจะใช้ diaphragm wall ฝังลึกจากกันบ่อ 8 เมตร ก็ตาม ดังรูปที่ 2



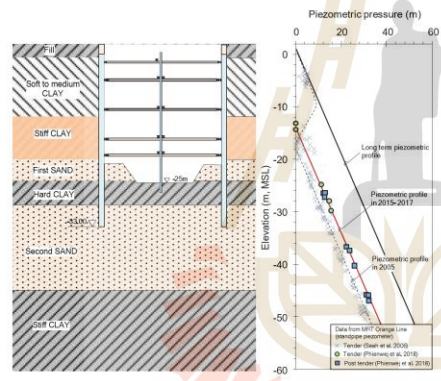
รูปที่ 1 การขุดเพื่อก่อสร้างปล่องที่ระดับความลึก 21 เมตร เมื่อปี ค.ศ. 1997 ดินกันบ่อแห้งไม่มีน้ำใต้ดินเข้ามาในบ่อ



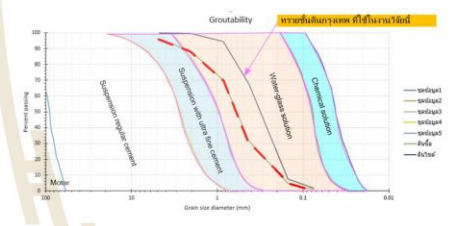
รูปที่ 2 การขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินที่ความลึก 18.50 เมตร เมื่อปี ค.ศ. 2017 มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามาในบ่อขุด

โดย [3] ได้ทำการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินที่ระดับความลึก 80 เมตร โดยใช้ Piezometer และข้อมูลจากการวัดแรงดันน้ำใต้ดินในชั้นน้ำประประแดงพบว่า หลังจากปี ค.ศ. 1997 ที่ได้มีการลดการสูบน้ำบาดาล เกิดการไหลเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาล แรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาลจะเพิ่มขึ้นสูงขึ้น มีผลทำให้แรงดันน้ำในชั้นดินพื้นดินสูงขึ้นด้วย จากการเทียบการขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยทั่วไปกับข้อมูลแรงดันน้ำใต้ดินโดย [4] ได้แสดงถึงระดับน้ำที่มีการคืนตัวอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3 ซึ่งโครงการที่มีระดับดินขุดลึกกว่านี้ [5] ได้รายงานถึงวิธีการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินในการก่อสร้างสถานีรถไฟใต้ดินสนามไชย ที่ต้องขุดดินลึก 30 เมตร ลงในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ การลดได้ด้วยวิธีการที่ด้วยสารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของ sodium silicate, MK reactive, silicon dioxide sodium compound, และ น้ำ การอัดฉีดด้วยวิธี Tube-A-Manchette GROUT (TAM grout) ซึ่งเป็นกรอติสารละลายให้ซึมเข้าในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพื่อลดความชื้นน้ำ ทำให้ก่อสร้างโครงสร้างชั้นใต้ดินได้โดยไม่มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามา ในประเทศไทย การใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุเกรทาท์ในการลดความชื้นของน้ำจึงต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ และมีการศึกษาวิจัยไม่มากนัก งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาถึงรูปแบบของเกรทาท์ที่เกิดขึ้น จากอิทธิพลของอัตราการผลิตและความหนืดเกรทาท์ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ในการเกรทาท์ในชั้นดินทรายของชั้นดินกรุงเทพฯ ด้วยวิธีการอัดฉีดด้วยสารละลายเคมีในชั้นทราย เพื่อใช้งานก่อสร้างชั้นใต้ดินที่อาจประสบปัญหาน้ำใต้ดิน

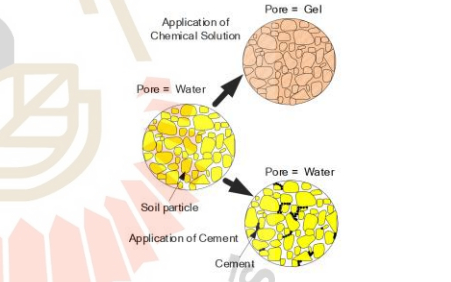
สารละลายเคมีนี้จะมีความหนืดต่ำและไม่มือนอกแควนลอยด์เหมือนซีเมนต์ ความสามารถในการซึมผ่านไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจึงเป็นไปได้โดยง่ายและใช้แรงดันที่ต่ำกว่า โดยหลังจากที่สารละลายเคมีก่อตัวกลายเป็นเจลในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายแล้วนั้น การไหลซึมของน้ำผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจะลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาเกี่ยวกับมาตรการในการรับมือแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นได้โครงสร้าง และคุณสมบัติพื้นฐานของดินทรายหลังถูกปรับปรุงด้วยเทคนิคการเกรทาท์โดย [6] รายงานว่า การใช้เทคนิคการเกรทาท์เพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม (permeation grouting) ด้วยซิลิกาเจลซึ่งเป็นสารละลายเคมี พบว่า ถ้าโพรงน้ำในดินเกิดการแทนที่ด้วยซิลิกาเจลที่มีความเข้มข้นเหมาะสมความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะลดลงอย่างมากในดิน เนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านของสารละลายเคมีไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีประสิทธิภาพมากขึ้น รูปที่ 4 แสดงถึงความสามารถในการซึมผ่านของเกรทาท์แต่ละประเภทกับขนาดของเม็ดดิน และรูปที่ 5 แสดงถึงลักษณะการซึมผ่านของสารละลายเคมีและซีเมนต์ไปยังดิน



รูปที่ 3 piezometric pressure ที่ได้จากการขุดก่อสร้างชั้นใต้ดินของชั้นทรายในชั้นดินกรุงเทพฯ (ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินจาก Seah et al., 2006 และ Phienweij et al., 2018)



รูปที่ 4 ขนาดของเม็ดดินกับประเภทของวัสดุเกรทาท์ที่เหมาะสมในการเกรทาท์



รูปที่ 5 ความแตกต่างระหว่างการซึมผ่านของสารละลายเคมีและซีเมนต์ในดิน (Yamazaki et al., 2005)

2. การแก้ไขปัญหาใต้ดิน
 การแก้ไขปัญหาใต้ดินในประเทศไทยมีหลายแนวทางด้วยกัน เช่น การสูบน้ำใต้ดิน การออกแบบให้กำแพงกันดินยื่นขึ้นเพื่อปิดทางไหลของน้ำหรือลดอัตราการไหลของน้ำ แต่หนึ่งในวิธีที่มีความนิยมคือ การปรับปรุงทรายให้มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ลดลงด้วยเทคนิคการเกรทาท์ (grouting) โดยการใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกรทาท์ แต่หากชั้นทรายที่ต้องการปรับปรุงมีความละเอียดมาก การใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกรทาท์อาจเป็นไปได้ยาก เนื่องจากขนาดของอนุภาคซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่จะซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่มีขนาดเล็กไปได้ยากและต้องใช้แรงดันสูง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการแตกในมวลดิน (fracturing) จึงมีการใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุเกรทาท์แทน โดย

จากรายงานถึงวิธีการแก้ไขปัญหาใต้ดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ที่สถานีสนามไชย โดย [5] พบว่าวิธีที่ใช้กับโครงการเป็นวิธีเกรทาท์ด้วยสารละลายเคมี ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้วิธีนี้ในการลดความชื้นของน้ำ มีค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการก่อสร้างที่ต่ำกว่าการใช้วิธีอื่น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินของโครงการก่อสร้างไฟฟ้าใต้ดินสายสั้นเงินส่วนต่อขยาย ที่สถานีสนามชัย (Wiriyatharakij et al., 2015)

Method	Material Used	Impact on			
		Environmental	Cost (MBath)	Time	Adjacent building
TAM Grout (Tube-A-Manchette Grout)	1.Sodium Silicate 2.MK Reactive 3.Silicon Dioxide 4.Sodium Compound 5.Water	No	375 MB.	8 Months	No
Jet Grout	Liquid Cement	Disposal of water	810 MB.	10 Months	No
Ground Freezing	Brine or Liquid Nitrogen	Disturb existing soil strength	> 3,000 MB.	> 12 Months	No

* Cost based on 57,000 cu.m.

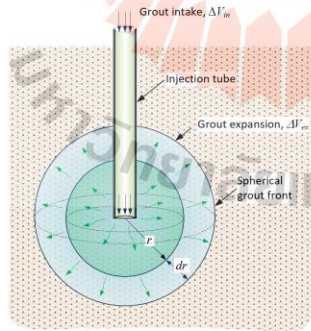
3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการซึมของเกราท์ในดิน

[7] กล่าวว่าการซึมของเกราท์ด้วยระยะเวลา dt นั้น เกราท์จะซึมเป็นระยะทาง dr ปริมาณการเกราท์ในเวลา t จึงได้จากการพิจารณาให้ปริมาตรของเกราท์ที่ฉีดลงในดิน V_m เท่ากับปริมาตรของเกราท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน V_{out} โดยคิดให้ปริมาตรของเกราท์ที่ซึมลงดินเป็นรูปทรงกลมที่มีเกราท์แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน รูปที่ 6 แสดงถึงแนวคิดของปริมาตรเกราท์ที่ฉีดลงในดินกับปริมาตรเกราท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ดังนั้น ปริมาตรทรงกลมที่ขยายออกจึงสัมพันธ์กับปริมาตรของเกราท์ที่ฉีดลงในดิน ($V_m = V_{out}$) ดังสมการที่ (1)

$$Qdt = n(4\pi r^2 dr) \tag{1}$$

เมื่อ Q คืออัตราการเกราท์ และ n คือความพรุนของดิน ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการซึมของเกราท์ให้มีรัศมี R จากปลายท่อที่มีรัศมี R_0 ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (1) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2)

$$t = \frac{4}{3Q} \pi n (R^3 - R_0^3) \tag{2}$$



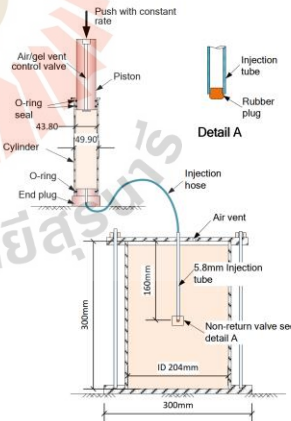
รูปที่ 6 แนวคิดการซึมของปริมาตรเกราท์

จากงานวิจัยของ [8] ที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการแพร่ของเกราท์จากการเกราท์ในทรายด้วยอัตราฉีดด้วยแรงดันคงที่ โดยใช้ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water cement ratio) เป็น 0.5 และ 1 เป็นวัสดุเกราท์ลงในทรายที่มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเท่ากับ 0.8 พบว่า แรงดันในการฉีดต่ำและ water cement ratio ที่ต่ำ รูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นเป็นการเกราท์เพื่อเสริมความหนาแน่น (compaction grout) ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันและ water cement ratio เกราท์ที่เกิดขึ้นมีผลเนื่องมาจากการแตกของมวลดินด้วยน้ำ (hydraulic fracturing) จึงเกิดการเกราท์เพื่ออุดรอยแตก (fracture grout)

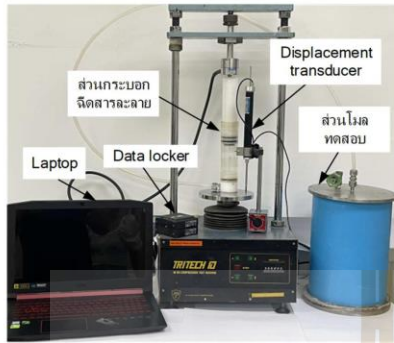
4. วิธีการวิจัย

4.1 การพัฒนาและออกแบบเครื่องมือ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษารูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นด้วยอัตราฉีดคงที่ จึงได้มีการประยุกต์เครื่องมือที่ใช้ในการฉีดเกราท์ในทรายจากงานวิจัยของ [8] โดยการดัดแปลงหลักการทำงานให้ควบคุมด้วยอัตราการทดแทนการใช้แรงดันอากาศ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของเกราท์ได้ใกล้เคียงกับปั๊มที่ใช้ในงานจริงมากกว่า ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนกระบอกฉีดสารละลายที่ใช้บรรจุสารละลายเคมี โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูงเท่ากับ 44.9 และ 200 มิลลิเมตร และส่วนโมลต์ทดสอบที่ใช้บรรจุทราย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูงเท่ากับ 207 และ 300 มิลลิเมตร ทำการฉีดสารละลายเคมีจากกระบอกฉีดไปยังโมลต์ทดสอบโดยการกดกระบอกลูกสูบที่มีวาล์วควบคุม เพื่อใช้ไล่อากาศในกระบอกสูบก่อนการฉีด และระบายอากาศในขั้นตอนการถอนลูกสูบออกหลังทดสอบเสร็จ ในระหว่างทำการเกราท์ สารละลายเคมีจะถูกอัดผ่านกระบอกฉีดไปยังท่อแรงดันลงในโมลต์ทดสอบผ่านท่อฉีดสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.8 มิลลิเมตร ที่มีวาล์วขั้วกันการไหลย้อน (non-return valve) เพื่อกันทราย, น้ำ, และสารละลายเคมีที่มีแรงดันไหลย้อนเข้ามาในบริเวณปลายท่อฉีด โดยวาล์วจะเปิดออกเมื่อแรงดันเกราท์สูงเกินกว่าแรงดันภายนอก และจะปิดเมื่อแรงดันภายนอกสูงกว่าแรงดันภายใน โดยรูปที่ 7 เป็นส่วนเครื่องมือที่ออกแบบเพื่อใช้ในการทดลอง และรูปที่ 8 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี



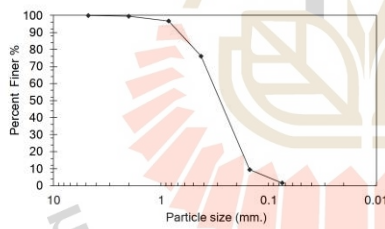
รูปที่ 7 โมลต์บรรจุตัวอย่างทดสอบและระบบฉีดเกราท์ด้วยอัตราคงที่



รูปที่ 8 ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกร้าท์

4.2 ตัวอย่างทรายที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดความชื้นของน้ำในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ จึงได้มีการเก็บตัวอย่างทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ จากโครงการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณถนนจันทน์ เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 30-30.5 เมตร โดยตัวอย่างเก็บด้วยถังเก็บทรายในกระบวนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ (Bucket) ที่มีขนาด 1 เมตร ทรายตัวอย่างมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63, ความหนาแน่นเท่ากับ 2.17 ตันต่อลูกบาศก์เมตร, อัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.52, และมีสัมประสิทธิ์ความชื้นเท่ากับ 2×10^{-4} เมตรต่อวินาที แต่เนื่องจากทรายที่เก็บในสนามมีปริมาณจำกัด ในงานวิจัยจึงได้มีการสร้างทรายในห้องปฏิบัติการที่มีขนาดคละเหมือนกับทรายตัวอย่างในสนามแทน รูปที่ 9 เป็นขนาดคละของทรายตัวอย่าง



รูปที่ 9 ขนาดคละของเม็ดดิน

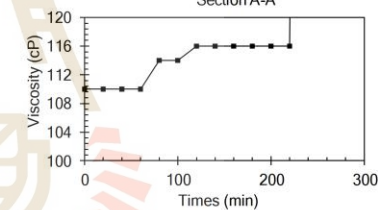
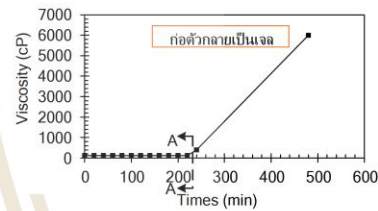
4.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายเคมีที่ใช้เป็นวัสดุเกร้าท์ในงานวิจัย ได้มีการพัฒนาโดยใช้องค์ประกอบหลักเป็น Sodium Silicate และสารผสมที่ทำให้เกิดการก่อตัวของเจล โดยสารละลายเคมีนี้ได้ขอรับอนุสิทธิบัตรชื่อ โซเดียมซิลิเกตเจลกันน้ำ หมายเลข 1903001237 มีค่า pH ประมาณ 11.4 ในการทดลองใช้สารละลายเคมีที่มีความหนืดแตกต่างกัน 2 ค่า เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความหนืดที่มีผลต่อรูปแบบเกร้าท์ที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความหนืดของสารละลายเคมีได้อย่างแม่นยำ จึงใช้คำเรียกของสารละลายเคมีที่มีความหนืดแตกต่างกันดังตารางที่ 2 โดยรูปที่ 10 เป็นสารละลายเคมี

ก่อนและหลังปล่อยทิ้งให้เกิดการก่อตัว และรูปที่ 11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวเป็นเจลของสารละลายเคมี



รูปที่ 10 สารละลายเคมีก่อนและหลังก่อตัวเป็นเจล



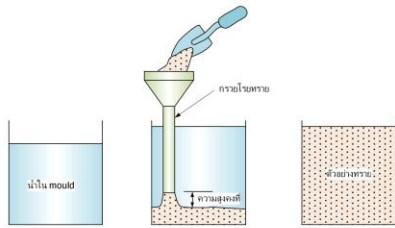
รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระยะเวลาก่อตัวเป็นเจลของสารละลายเคมี

ตารางที่ 2 ค่าที่ใช้เรียกชื่อสารละลายเคมี

Description	Viscosity (cP)
V110	110 ± 8
V130	130 ± 8

4.4 วิธีการเตรียมตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ

ในงานวิจัยได้ใช้ตัวอย่างทรายอิมิตด้วยน้ำ เพื่อจำลองสภาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งแตกต่างไปจากงานวิจัยที่มีผู้ทำมาในอดีต โดยการเตรียมตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ จากการนำทรายอบแห้ง 13 กิโลกรัม เติลงโมลทดสอบมีน้ำบรรจุอยู่ ผ่านกรวย โดยให้ปลายกรวยสูงกว่าระดับทราย 1 เซนติเมตรตลอดเวลา เพื่อควบคุมความหนาแน่นของทรายในโมลทดสอบให้สม่ำเสมอและมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับทรายในสนาม รูปที่ 12 เป็นลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง



รูปที่ 12 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (ก) ใส่ น้ำลงใน
โมลทดสอบ (ข) ใส่ตัวอย่างทรายแห้งผ่านกรวยวางลงในโมลทดสอบ (ค)
ตัวอย่างทรายหลังเตรียมเสร็จ

4.5 ขั้นตอนการทดสอบ

บรรจุสารละลายเคมีในกระบอกฉีดสารละลายเป็นปริมาตร 350 มิลลิลิตร แล้วอัดกันกระบอกลูกสูบด้วยอัตราการฉีดเท่ากับ 4.56, 6.08 และ 7.60 มิลลิลิตรต่อวินาที เพื่อให้เข้าใจง่ายผู้ทำการวิจัยได้ใช้สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีดที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3 วัดการเคลื่อนตัวของก้านกระบอกลูกสูบด้วย displacement transducer เพื่อคำนวณอัตราการไหลที่ถูกอัดอีกครั้ง เมื่อฉีดแล้วทิ้งไว้ 72 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายเคมีก่อตัวกลายเป็นเจล จากนั้นรื้อทรายเพื่อนำที่ภาพและวัดขนาดของทรายที่มีเกรทท์แทรกอยู่

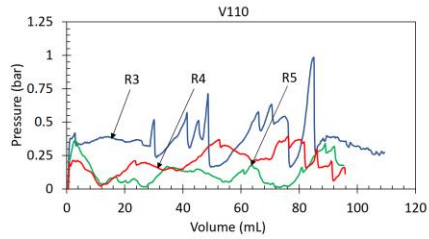
ตารางที่ 3 สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีด

Injection rate (mL/min)	Symbol
4.56	R3
6.08	R4
7.60	R5

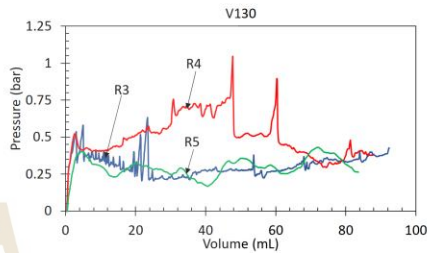
5. ผลการทดลอง

5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรทท์กับปริมาตรเกรทท์

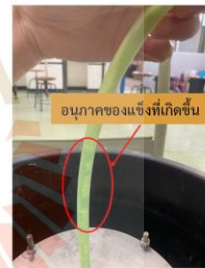
รูปที่ 13 และ 14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรทท์กับปริมาตรทั้งหมดที่ใช้ในการเกรทท์ ด้วยความหนืด V110 และ V130 จากกราฟการทดสอบพบว่า ช่วงแรกของการทดสอบแรงดันมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้ฉีด การเพิ่มขึ้นของแรงดันช่วงนี้เกิดจากวาล์วยางบริเวณปลายท่อฉีดยังปิดอยู่ และเมื่อวาล์วยางเริ่มเปิดออกแรงดันจะเริ่มลดลง โดยพบว่าที่อัตราการฉีดต่ำสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ R3 เกิดการพัฒนาของแรงดันมากที่สุด เกิดจากระหว่างการทดสอบ สารละลายเคมีที่อยู่ในท่อเกิดการก่อตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคเหล่านี้ไม่ได้ก่อตัวเป็นเจลทั้งหมด จึงยังคงไหลในท่อฉีดได้ ดังรูปที่ 15 ซึ่งที่อัตราการฉีดต่ำ สารละลายเคมีมีอัตราการไหลไปยังบริเวณปลายท่อฉีดได้ช้ากว่าที่อัตราการฉีดสูง จึงเกิดการสะสมอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่า การพัฒนาของแรงดันจึงมีค่าสูงกว่าที่อัตราการฉีดสูง ในสารละลายแบบ V110 ดังรูปที่ 16



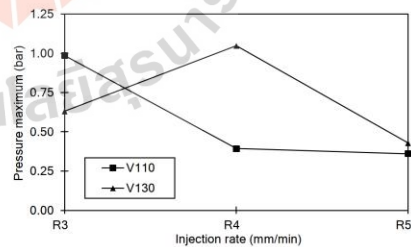
รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรทท์กับปริมาตรเกรทท์ที่ V110



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรทท์กับปริมาตรเกรทท์ที่ V130

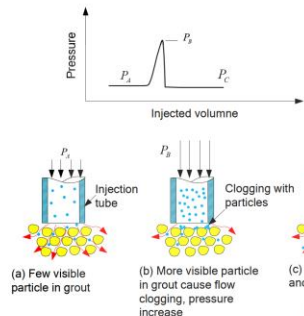


รูปที่ 15 อนุภาคที่เกิดสารละลายเคมี



รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกรทท์สูงสุด

อย่างไรก็ตามพบว่าการก่อตัวของอนุภาคที่เกิดจากสารละลายเคมี ทำให้บางช่วงไม่เกิดการทดสอบการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันชั่วคราว สันนิษฐานว่าเกิดจากอนุภาคของสารละลายเคมี อุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดทรายชั่วคราว เมื่อแรงดันสูงพอที่จะดันอนุภาคที่อุดตันออกไปได้ แล้วแรงดันจึงลดลง ดังรูปที่ 17 ซึ่งการเกิดเหตุการณ์เช่นนี้มีผลทำให้การพัฒนาของแรงดันมีแนวโน้มสูงขึ้น เช่น จากรูปที่ 16 เมื่อใช้สารละลายเคมีแบบ V130 จะเห็นได้ว่า แรงดันที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 มีค่ามากที่สุดตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R5 ตามลำดับ



รูปที่ 17 การเพิ่มขึ้นของแรงดันเนื่องจากการอุดตันจากอนุภาคในเกรท และการลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลังจากส่วนที่อุดตันหลุดออกไปในช่องว่าง

5.2 อิทธิพลของอัตราการฉีดกับรูปแบบเกรทที่เกิดขึ้น

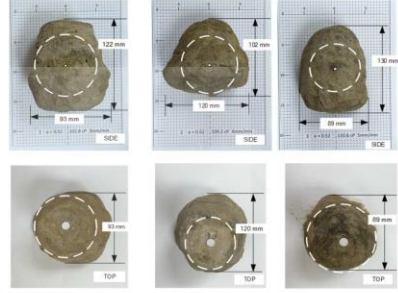
รูปที่ 13 และ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกรทกับปริมาตรทั้งหมดที่ใช้ในการเกรท ที่ความหนืดแบบ V110 และ V130 เทียบกับลักษณะของเกรทที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 18 และ 19 พบว่า อิทธิพลของอัตราการฉีดมีผลต่อรูปแบบเกรทที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยพบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R4 ในระหว่างทำการทดสอบสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันในหลายช่วงของการทดสอบ คาดว่าเหตุการณ์เช่นนี้ทำให้เกิด hydraulic fracturing ในทราเยระหว่างเกรทที่ทำให้เกรทที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นข้อสันนิษฐานว่าเกรทที่เกิดขึ้นมีรูปแบบ fracture grout ในขณะที่อัตราการฉีดเท่ากับ R5 เหตุการณ์การเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลัน แทบไม่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบ เกรทที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่า โดยคาดว่ารูปแบบเกรทที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งรูปแบบ fracture grout และการเกรทเพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม (permeable grout) ในทราเยระหว่างเกรท

5.3 อิทธิพลของความหนืดกับรูปแบบเกรทที่เกิดขึ้น

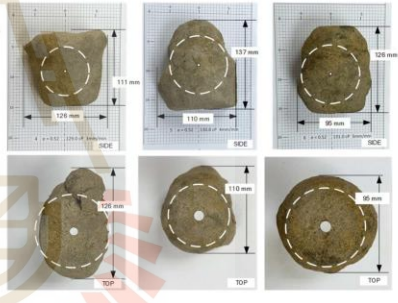
รูปที่ 18 และ 19 เป็นลักษณะของเกรทที่เกิดขึ้น ที่ความหนืดแบบ V110 และ V130 หากพิจารณาที่อัตราการฉีดเท่ากัน เมื่อความหนืดของสารละลายเคมีเพิ่มขึ้น พบว่า อิทธิพลของความหนืดไม่ได้ส่งผลต่อรูปแบบเกรทที่เกิดขึ้น เกิดจากความแตกต่างของความหนืดจากสารละลายเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มีความหนืดใกล้เคียงกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ เกรทที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับเกรทในนางนิจของ [8]

5.4 ขนาดของเกรทที่เกิดขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรทในทฤษฎี

จากสมการที่ (2) เมื่อทราบเวลาที่ใช้ในการซึมของเกรทจากปลายท่อฉีดที่มีรัศมี R_0 ในขณะทำการทดสอบ สามารถคำนวณหารัศมีของเกรทที่เกิดขึ้น R จากทฤษฎีให้อยู่ในเทอมของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรท D_0 เทียบกับขนาดความกว้างของเกรทที่เกิดขึ้นจริง D และความสูงของเกรทที่เกิดขึ้นจริง H ได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 18 ภาพถ่าย grout bulb ที่ความหนืด V110



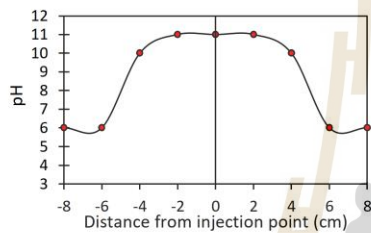
รูปที่ 19 ภาพถ่าย grout bulb ที่ความหนืด V130

ตารางที่ 4 ขนาดเกรทที่เกิดขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางจากทฤษฎี

Sample	Type	D (mm)	H (mm)	D_0 (mm)
1	$e = 0.52$	93.0	122.0	84.0
2	$e = 0.52$	120.0	102.0	80.6
3	$e = 0.52$	89.0	130.0	81.6
4	$e = 0.52$	126.0	111.0	80.2
5	$e = 0.52$	110.0	137.0	79.2
6	$e = 0.52$	95.0	126.0	78.0

จากตารางที่ 4 พบว่าขนาดเกรทที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดตามทฤษฎี เกิดจากขนาดเกรทที่ตามทฤษฎี คิดให้เกรทที่เกิดขึ้น เกิดจากการซึม (permeation) ของสารละลายเคมีไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้คำนึงถึงความเข้มข้นของสารละลายเคมีที่ใช้ในการเกรท ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงได้มีการตรวจสอบพฤติกรรมดังกล่าว โดยการฉีด

สารละลายเคมีลงไปในทรายตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นใช้ pH indicator ตรวจสอบความเป็นกรด - ด่าง ในตัวอย่างทดสอบ พบว่า ทรายที่อยู่ใกล้บริเวณท่อฉีดจะมีค่า pH ประมาณ 11 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างเช่นเดียวกับสารละลายเคมีในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปจากท่อฉีดจะมีค่า pH เริ่มลดลงจนถึงค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนเช่นเดียวกับทรายทดสอบที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่า เกราะที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากการซึมเพียงอย่างเดียวแต่ยังเกิดจากกระบวนการแพร่ (diffusion) ของสารละลายเคมี จากจุดที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ทำให้เกราะที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่า รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับความเป็นกรด - ด่าง ของทรายในตัวอย่างทดสอบและรูปที่ 21 ผลการทดสอบความเป็นกรด - ด่างในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับความเป็นกรด - ด่าง

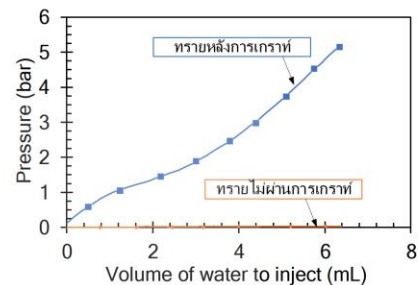


รูปที่ 21 ผลการทดสอบความเป็นกรด - ด่างในตัวอย่างทดสอบ

5.5 การทดสอบการลดความชื้นน้ำของทรายหลังการเกราะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดความชื้นของน้ำในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ โดยเทคนิคการเกราะด้วยสารละลายเคมี จึงได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของทรายที่ผ่านการเกราะด้วยการบรรจุทรายลงในกระบอกฉีดสารละลายให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบจริง ทำการอัดฉีดสารละลายเคมีลงไปในตัวอย่างทดสอบทิ้งไว้ 72 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ทรายที่อยู่ในสภาวะหลังการเกราะ จากนั้นทำการอัดฉีดน้ำลงไปในทรายหลังการเกราะ พบว่า แรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำลงในทรายหลังการเกราะที่มีค่าสูง

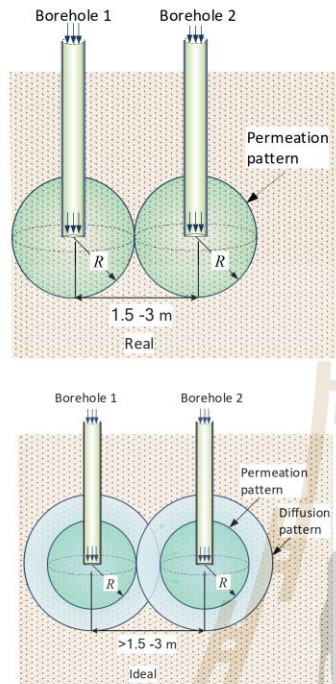
กว่าแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำ เกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดทรายบางส่วนหลังการเกราะ เกิดการแทนที่น้ำด้วยสารละลายเคมี ส่งผลให้แรงดันในการอัดฉีดน้ำให้ซึมไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อที่น้ำจะได้ซึมไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายได้ รูปที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำกับปริมาตรน้ำที่ฉีดในทรายที่ผ่านการเกราะและทรายที่ไม่ผ่านการเกราะ



รูปที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำกับปริมาตรน้ำที่ฉีดในทรายที่ผ่านการเกราะและทรายที่ไม่ผ่านการเกราะ

5.6 การประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม

ในการประมาณตำแหน่งหลุมเจาะเพื่อใช้ในการอัดฉีดเกราะที่เหมาะสม [9] ได้กล่าวไว้ว่า ตำแหน่งหลุมเจาะที่ใช้ในการอัดฉีดเกราะเพื่อลดการไหลซึมของน้ำในดินมีความสัมพันธ์กับรัศมีประสิทธิผล (effective radius) หรือรัศมีที่คำนวณได้จากทฤษฎี R จากสมการที่ (2) โดยทั่วไปได้มีการออกแบบให้ตำแหน่งหลุมเจาะห่างกันเป็นระยะทาง 1.5-3 เมตร แต่จากผลการศึกษารายละเอียดพบว่า ขนาดเกราะที่เกิดขึ้นจริงจากการวิจัยมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเกราะที่เกิดจากการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งมีผลมาจากกระบวนการแพร่ของสารละลายเคมี ส่งผลให้พื้นที่บริเวณที่น้ำที่เกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดทรายบางส่วนหลังการเกราะ เกิดการแทนที่น้ำด้วยสารละลายเคมีเพิ่มขึ้น ซึ่งหากนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม ผู้ออกแบบ อาจออกแบบให้ระยะห่างของหลุมเจาะมีระยะทางที่มากขึ้นได้ เนื่องจากพื้นที่บริเวณที่น้ำที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการแพร่ ส่งผลให้ทรายมีประสิทธิภาพในการไหลซึมของน้ำลดลง รูปที่ 23 แสดงแนวคิดการออกแบบตำแหน่งหลุมเจาะในงานจริงกับอุดมคติ



รูปที่ 23 แนวคิดการออกแบบตำแหน่งหลุมเจาะในงานจริงกับอุดมคติ

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิทธิพลของความหนืดเกราท์ที่ไม่ส่งผลต่อรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเกราท์ที่ใช้เป็นสารละลายเคมีที่มีความหนืดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นรูปแบบเกราท์จึงไม่ได้แตกต่างไปจากเดิมเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น
2. อิทธิพลของอัตราการฉีดส่งผลต่อรูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยพบว่าที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R4 มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันในหลายช่วงของการทดสอบ จากอนุภาคของสารละลายเคมี ทำให้เกราท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ อันมีผลมาจาก hydraulic fracturing ในทรายระหว่างการเกราท์ ซึ่งเกิดเกราท์ในรูปแบบ fracture grout แต่ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R5 เหตุการณ์ดังกล่าวแทบไม่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ รูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นจึงผสมระหว่าง fracture grout และ permeable grout
3. จากผลการศึกษาสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น คือการก่อตัวของอนุภาคจากสารละลายเคมีและอัตราการฉีด เพราะอัตราการฉีดต่ำ อัตราการไหลของสารละลายเคมีไปยังบริเวณปลายท่อฉีดต่ำกว่าที่อัตราการฉีดสูง จึงเกิดการก่อตัวของอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่ามีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลบริเวณปลายท่อฉีดลดลง จึงเกิดการ

พัฒนาของแรงดัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น อีกทั้งการก่อตัวของอนุภาคยังทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลายช่วงของการทดสอบ อันก่อให้เกิด hydraulic fracturing ในทรายระหว่างการเกราท์ เกราท์ที่เกิดขึ้นจึงเกิดในรูปแบบ fracture grout

4. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อก็คือ การเกราท์ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯด้วยสารละลายไฮเดรียมซิลิเกตที่ปราศจากอนุภาคแล้วศึกษาขนาดเกราท์เพื่อใช้ในการประมาณตำแหน่งการฉีดเกราท์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายพีระพัฒน์ ถิ่นหนองแขง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณนายบุญญฤทธิ์ บุญเกิด, นายณัฐดนัย ป้อมบุญมี, นายพีเชษฐพงศ์ ชรรมะกิตติกร และนักศึกษาริทยูชาติตรีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] มุดไต้ดินไฮต์ “อิตาเลียนไทย” ส่งอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีส้มศูนย์วัฒนธรรมมา - มินบุรี. (16 มกราคม 2563). ประชาชาติธุรกิจ. สืบค้นจาก <https://www.prachachat.net/property/news-411567>
- [2] อุโมงค์น้ำบึงหนองบอนคืบ 86.70% คาดพร้อมเปิดใช้ มี.ค.65. (17 กันยายน 2564). มติชนออนไลน์. สืบค้นจาก https://www.matichon.co.th/local/news_2944429
- [3] Paveenchana, T. and Saowiang, K. (2012). The change of piezometric pressure in the subsoil strata affecting substructures in the Bangkok area, *The Seminar of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 1-12.
- [4] Phienweij, N., Asanprakit, A., Kittiyodom, P. and Timpong, S. (2018). Increasing geotechnical challenges in the design and construction planning of the third phase Bangkok MRT underground. *20th Southeast Asian Geotechnical Conference (SEAGC)*, Indonesia, 6-7 November 2018.
- [5] Wiriatharakij, W. (2016). *MRTA station excavation under situation of space constraint and potential hydraulic uplift at base: cases of Sanamchai & Itsaraphap stations*. M.Eng. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [6] Yamazaki, H., Hayashi, K. and Zen, K. (2005). New liquefaction countermeasure based on pore water replacement, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE)*, Osaka, Japan, 2005, pp.2741-2744.
- [7] Hausmann, M.R. (1990). *Engineering principle of ground modification*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.347-379.
- [8] Wang, Q., Wang, S., Sloan, S.W., Sheng, D. and Pakzad, R. (2016). Experimental investigation of pressure grouting in sand. *Soils and Foundations*, vol. 56, no. 2, pp.161-173.
- [9] Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*, Rotterdam, Netherland, 1996, pp. 86-90.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอรยา คำหนองไผ่ เกิดเมื่อวันอังคารที่ 3 มิถุนายน 2540 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนแก้งคร้อวิทยา ในปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษา กับ บริษัท ซีพีแฉัก จำกัด (มหาชน) เป็นระยะเวลา 4 เดือน และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563 และมีผลงานเผยแพร่จำนวน 2 เรื่อง คือ วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 35 ฉบับที่ 1 และการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566 ณ ภูเก็ต

