

ประสิทธิภาพของแบคทีเรียต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การไหล
ของน้ำในทราย

MICROBIAL APPLICATION METHOD AFFECT THE SPATIOTEMPORAL
VARIATIONS OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SAND



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-D-098-234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICROBIAL APPLICATION METHOD AFFECT THE SPATIOTEMPORAL
VARIATIONS OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SAND



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-EN-D-098-234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของแบคทีเรียต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในทราย
นักศึกษา	นาย ธิติ ชัดวงศ์
รหัสประจำตัว	59601038
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิรุพท์ คำชุม

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาประยุกต์ใช้แบคทีเรียวิธีต่างๆส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในทราย การวิจัยนี้จะใช้ทรายออกตาวาพร้อมกับทำการติดตั้งแบคทีเรียในวิธีที่แตกต่างกัน โดยกรณีศึกษาที่ 1 ใช้วิธีการฉีดเข้าไปในตัวอย่างทรายที่ได้รับการบดอัด กรณีศึกษาที่ 2 ใช้วิธีผสมกับทรายก่อนแล้วค่อยนำทรายที่ได้รับการผสมไปบดอัด และกรณีศึกษาที่ 3 จะเทราดแบคทีเรียลงบนทรายที่ได้รับการบดอัด ซึ่งทั้ง 3 วิธีจะนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินแบบความดันคงที่ ในขณะที่แบคทีเรียเจริญเติบโตจะทำให้โครงสร้างภายในดินมีการเปลี่ยนแปลง พร้อมทำการสังเกตโดยใช้วิธีการส่องกราดด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) และทำการวัดความเข้มข้นของเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดรูพรุน (Mercury Intrusion Porosity, MIP) จากการทดสอบปริมาณของเดกซ์ทรานจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงวันที่ 5-7 โดยเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียในตัวอย่างการทดลองที่ใช้วิธีแบบฉีดและวิธีแบบผสม มีปริมาณของเดกซ์ทรานกระจายตัวอย่างความสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามในส่วนของวิธีการเทราดพบว่าปริมาณของเดกซ์ทรานจะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ พร้อมกับพบมากในบริเวณใกล้กับพื้นผิว และเมื่อทำการหยุดให้อาหารเลี้ยงพบว่าปริมาณเดกซ์ทรานลดลงอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากการแย่งอาหารเลี้ยงจากแบคทีเรียชนิดอื่น เมื่อได้ผลการทดลองจากการหาปริมาณเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินที่ได้รับการทดสอบ พร้อมนำผลการทดสอบมาหาความสัมพันธ์โดยการมาวาดกราฟระหว่างความเข้มข้นของเดกซ์ทรานเฉลี่ยกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินจะลดลง เมื่อมีปริมาณเดกซ์ทรานที่มาก ซึ่งสาเหตุมาจากเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียจะเข้าไปอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินในวิธีการฉีดและผสม พบว่าเมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรีย ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินไม่มีความเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อเทียบกับขณะมีสารอาหารเลี้ยง

Thesis	Microbial application methods affect the spatiotemporal variations of the hydraulic conductivity of sand
Student	Mr. Thiti Khattiwong
Student ID.	59601038
Degree	Doctor of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Viroon Kamchoom

ABSTRACT

The spatiotemporal distributions of microbes in soil due to different application methods could affect the efficacy of the microbes to reduce the soil hydraulic conductivity. In this study, specimens of bio-mediated sands were prepared by three different methods, namely injecting, mixing, and pouring a given microbial solution onto compacted sand specimens. These specimens were tested for their hydraulic conductivity through laboratory constant-head tests, while any soil microstructural changes due to the addition of microbes were observed by Scanning Electronic Microscopy (SEM) and Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) tests. The amount of dextran concentration produced by microbes in each type of specimen was quantified by a refractometer. With the supply of culture medium, dextran production appeared to increase exponentially in all cases after five to seven days of microbial settling. The injection and mixing methods resulted in a similar amount and uniform distribution of dextran in the specimens. The pouring method, however, produced a nonuniform distribution, with a higher concentration found near the specimen surface. Nonetheless, as the supply of culture medium was discontinued, the dextran content near the surface produced by the pouring method decreased dramatically due to high competition for nutrients with foreign colonies. Strong negative, exponential correlation was found between average dextran concentration and hydraulic conductivity of bio-mediated soils, attributable to the clogging of the larger soil pores as the dextran formed in between. The hydraulic conductivity of the

injection and mixing cases did not change much when the supply of culture medium was absent.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก รศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา อีกทั้งสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษาแก่ผู้จัดทำ ตลอดจนให้ความรู้ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ รวมถึงเจ้าหน้าที่บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ความช่วยเหลือในด้านวิชาการและด้านอื่นๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว อันเป็นที่รักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้กำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้ผู้จัดทำสามารถสำเร็จการศึกษา ผู้จัดทำซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ชิตี ชิติวังค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 ขอบเขตการศึกษาวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน.....	7
2.2 สมบัติการซึมผ่านน้ำ (Permeability).....	19
2.2.1 ความชื้นน้ำของดิน.....	19
2.2.2 การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำ.....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	29
3.2 กรณีที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.2.1 กรณีที่ 1 การผสมแบริดที่เรียกด้วยตัวอย่างดินแบบฉืดแบริดที่เรียกไปบริเวณ กึ่งกลางของตัวอย่างดิน.....	30
3.2.2 กรณีที่ 2 การผสมแบริดที่เรียกด้วยตัวอย่างดินแบบผสมลงไปในเม็ดดิน.....	31
3.2.3 กรณีที่ 3 การผสมแบริดที่เรียกด้วยตัวอย่างดินแบบเทราดไปบริเวณพื้นผิวของ ตัวอย่างดิน.....	32
3.2.4 กรณีที่ 4 การนำตัวอย่างดินผสมกับปูนซีเมนต์.....	33

3.2.5	กรณีศึกษาที่ 5 ตัวอย่างดินเปล่า.....	33
3.2.6	กรณีศึกษาที่ 6 การให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรีย.....	33
3.3	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการศึกษา.....	34
3.3.1	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน	34
3.3.2	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแบคทีเรีย.....	36
3.3.3	ขั้นตอนการผสมแคปซูลกับตัวอย่างดิน.....	38
3.3.4	การทดสอบตัวอย่างดิน	41
บทที่ 4	ผลการศึกษาและอภิปราย	46
4.1	ผลของอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย	46
4.2	ผลการทดลองหาปริมาณของแบคทีเรีย.....	47
4.3	ผลการทดลองจากการส่องกราดโดย SEM.....	51
4.4	ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำในดินโดยวิธีความดันคงที่	56
4.5	ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการใช้แบคทีเรีย.....	63
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1	สรุปผลการวิจัย	69
5.2	ข้อเสนอแนะ	71
5.3	ข้อจำกัดของการศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์.....	72
บรรณานุกรม.....		73
ภาคผนวก ก	การตีพิมพ์วารสาร	80
ประวัติผู้เขียน.....		82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าโดยทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินชนิดต่างๆ (เสนอโดย Terzaghi และ Peck).....	25
ตารางที่ 2.2 ค่าอัตราส่วนของ $\mu T/ \mu 20^{\circ}c$	26
ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปตัวอย่างการทดลอง	34
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวแปรของทรายออกตดาวา	35
ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนของอาหารเหลวในการเลี้ยงแบคทีเรีย	37
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 nm และเวลาช่วงเวลากการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย	46
ตารางที่ 4.2 สรุป Fitting Equation และค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเด็กซ์ทรานและ อัตราการไหลของน้ำในดิน.....	62
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณ ราคาของแบคทีเรียและสารอาหารต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตร.....	63
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการฉีตอัดซีเมนต์.....	64
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการขุด ผสมซีเมนต์ บดอัดดิน	64
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการเทราตซีเมนต์	65
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการฉีตอัดแบคทีเรีย	65
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการขุด ผสม บดอัดแบคทีเรีย.....	66
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการเทราตแบคทีเรีย.....	66
ตารางที่ 4.10 สรุปค่าใช้จ่ายการติดตั้งแบคทีเรียและซีเมนต์ ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	67
ตารางที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพของการใช้แบคทีเรียต่อค่าใช้จ่ายในการใช้แบคทีเรียโดยวิธีติดตั้งที่ แตกต่างกัน.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้ง Soil Cement Column ในการปรับปรุงคุณภาพดิน(ที่มา Spar Geo).....	2
รูปที่ 1.2 แสดงการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการลดช่องว่างในการไหลของน้ำโดย Biopolymer และแบคทีเรีย.....	4
รูปที่ 2.1 แสดงการติดตั้งเสาเข็มเจาะของอาคาร.....	8
รูปที่ 2.2 แสดงการขุดเจาะทำอุโมงค์ใต้ดิน (Zhao et al.,2013)	8
รูปที่ 2.3 รูปแสดงการพังทลายของดิน.....	10
รูปที่ 2.4 รูปแสดงการรอดซึมผ่านของน้ำในเขื่อน จนเกิดการพังทลาย (Teton Dam).....	10
รูปที่ 2.5 รูปแสดงเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column).....	11
รูปที่ 2.6 รูปแสดงการทำกำแพงกันดินสำหรับการขุด (Bentonite Slurry Wall).....	12
รูปที่ 2.7 รูปแสดงการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการใช้แบคทีเรียแบบ MICP เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน (Sun et al., 2012).....	13
รูปที่ 2.8 รูปแสดงการใช้ SEM ในการตรวจสอบ Biopolymer กับตัวอย่างเม็ดดิน (ก).เบต้ากลูแคน กับลูกแก้ว, (ข).เกล็ดแลนกับดินเหนียว และ (ค).เกล็ดแลนกับทราย ที่มา Chang, I 2012, และ Chang, I.,2015.....	15
รูปที่ 2.9 รูปแสดง Biopolymer หรือ Dextran ที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Ham S. et al., 2018) 16	
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงระหว่างระยะเวลาและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ta X. et al., 2017).....	18
รูปที่ 2.11 รูปแสดงแบคทีเรีย Leuconostoc mesenteroides (LM TISTR473).....	19
รูปที่ 2.12 แสดงการไหลของน้ำในมวลดิน (พรพจน์ ต้นเส็ง,ปฐพีกลศาสตร์, 2554).....	21
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient, i) กับความเร็ว.....	23
รูปที่ 2.14 การทดสอบแบบเฮดคงที่ (Constant Head) (พรพจน์ ต้นเส็ง,ปฐพีกลศาสตร์, 2554)...	27
รูปที่ 2.15 การทดสอบแบบเฮดแปรค่า (Variable Head) (พรพจน์ ต้นเส็ง,ปฐพีกลศาสตร์, 2554) 28	
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย (ก) ระบุขอบเขต (ข) ตัวอย่างการทดสอบ (ค) ถึงเก็บกระบอก (ง) การวัดเดกซ์ทราน.....	30
รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบฉีดแบคทีเรีย	31
รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบผสมลงไปในเม็ดดิน..	32
รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 3 การผสมตัวอย่างแบคทีเรียกับดินด้วยวิธีเทราดลงบนผิว	33
รูปที่ 3.5 รูปกระบอกตัวอย่าง PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และสูง 650 มม.	36

รูปที่ 3.6 รูปแสดง (ก) <i>Leuconostoc mesenteroides</i> TISTR473 (ข) การผสมแบคทีเรียและอาหารเลี้ยง	36
รูปที่ 3.7 (ก)แสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียเพื่อนำไปทดสอบด้วย Spectrophotometer (ข)แสดงการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย	37
รูปที่ 3.8 แสดงเครื่อง Spectrophotometer.....	38
รูปที่ 3.9 แสดงการเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษากรณีที่ 1 เป็นขั้นตอนการฉีดแบคทีเรียเข้าไปในดิน....	38
รูปที่ 3.10 แสดงการเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2 ตัวอย่างดินที่ได้รับการผสมกับแบคทีเรีย	39
รูปที่ 3.11 แสดงการเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 3 การเทราดแบคทีเรียลงบนผิวตัวอย่างดิน	40
รูปที่ 3.12 รูปแสดงการเก็บรักษาตัวอย่างดินให้อยู่ในสภาพที่อิมมัวตลอดเวลา	40
รูปที่ 3.13 รูปแสดงตัวอย่างการให้สารอาหารแก่แบคทีเรียในกระบอกตัวอย่าง.....	41
รูปที่ 3.14 แสดงการทดสอบหาค่าการซึมของน้ำในดินโดยใช้อัตราคงที่	42
รูปที่ 3.15 แสดงการนำตัวอย่างดินเคลือบของตัวอย่างดินที่จะนำไปส่อง	43
รูปที่ 3.16 แสดงการใช้เครื่อง SEM เพื่อตรวจหาโครงสร้างระหว่างดินและเดกซ์ทราน	44
รูปที่ 3.17 แสดงหลอดโลหะใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน.....	45
รูปที่ 3.18 แสดงการเครื่องทดสอบการหารูพรุนโดย Mercury Intrusion Porosimeter	45
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียที่ 600 nm	47
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและปริมาณของเดกซ์ทรานในตัวอย่างการทดลองที่ 1	48
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและปริมาณของเดกซ์ทรานในตัวอย่างการทดลองที่ 2	49
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและปริมาณของเดกซ์ทรานในตัวอย่างการทดลองที่ 3	49
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องว่างของรูพรุนในตัวอย่างและปริมาณรูพรุนในตัวอย่าง.....	51
รูปที่ 4.6 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบน ใช้กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร	52
รูปที่ 4.7 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่าง ใช้กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร.....	52
รูปที่ 4.8 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบน ใช้กำลังขยาย 20 ไมโครเมตร	53

รูปที่ 4.9 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณกึ่งกลาง กำลังขยายที่ 200 ไมโครเมตร	53
รูปที่ 4.10 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณกึ่งกลาง กำลังขยายที่ 10 ไมโครเมตร	53
รูปที่ 4.11 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบน ใช้กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร.....	54
รูปที่ 4.12 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่าง ใช้กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร.....	55
รูปที่ 4.13 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่าง ใช้กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร.....	55
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมกับดินและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ	56
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน.....	57
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ3.....	58
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ3 บริเวณผิวด้านบน.....	59
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ3 บริเวณกึ่งกลาง.....	60
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ3 บริเวณด้านล่าง	60
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ3 ค่าเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตำแหน่ง.....	61

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

h	เฮดทั้งหมด
h_e	เฮดที่เกิดจากระดับน้ำที่ต่างกันโดยวัดจากระดับอ้างอิง
h_p	เฮดที่เกิดจากความดันที่ต่างกัน
h_v	เฮดของความเร็ว
u	ความดันของน้ำ
γ_w	ความหนาแน่นของน้ำ
v	ความเร็วที่น้ำไหลผ่าน
g	อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก
q	อัตราไหลของน้ำ
A	พื้นที่หน้าตัดขวางที่น้ำไหลซึมผ่านจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง
l	ความลาดชัน
k	สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน (Permeability of Soil)
Q	ปริมาณของน้ำไหลซึมผ่านดิน
t	ระยะเวลาของการตรวจวัดปริมาณของน้ำที่ซึมผ่าน
n	ความพรุนของดิน
e	อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
V_{actual}	ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดดิน ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตรดินต่อพื้นที่ผิวของมวลดิน
μ	ความหนืดของน้ำที่ไหลซึมผ่าน
C	ค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับรูปร่างของเม็ดดิน
C	ค่าคงที่ จะอยู่ที่ 1.0 ถึง 1.50
D_{10}	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ % finer เป็น 10
D_{15}	ขนาดของเม็ดดินที่สามารถรูดผ่านตะแกรงได้มากกว่า 15 %
$k_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$	ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่ 20 องศาเซลเซียส
k_T	ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่อุณหภูมิต่างๆ
μ_T	ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ
$\mu_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$	ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}\text{C}$ โดยมีค่าเท่ากับ 10.09 มิลลิพอยส์ (millipoise)



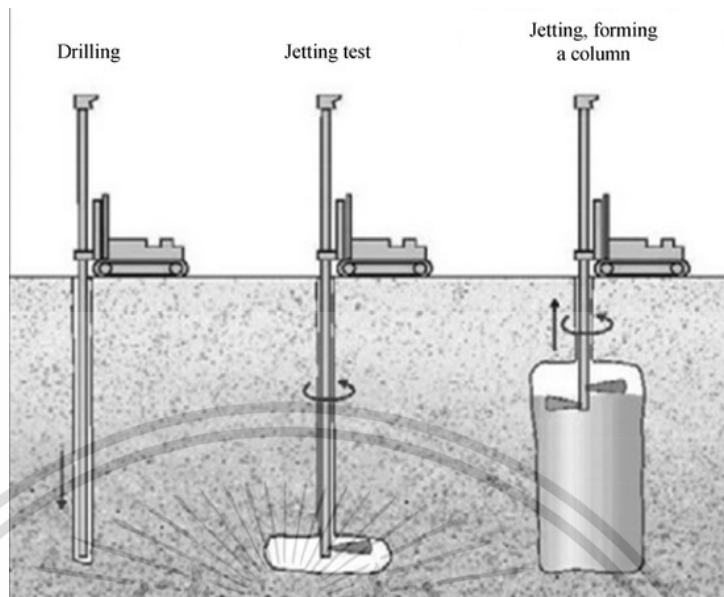
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในงานก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างต่างๆทั้งในอดีตและปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องกับดินทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นงานก่อสร้างฐานรากของโครงสร้าง การขุดอุโมงค์ คั่นดินกั้นน้ำ รวมไปถึงงานสร้างเขื่อนดิน เป็นต้น ซึ่งค่าซึมผ่านของน้ำในดิน กำลังรับแรงเฉือนในดินเป็นคุณสมบัติที่มีความจำเป็นในการออกแบบสิ่งก่อสร้างต่างๆ หากค่าการซึมผ่านของน้ำในดินมีค่าสูงหรือค่ากำลังรับแรงเฉือนในดินต่ำอาจทำให้เกิดการพังทลายหรือเกิดการเคลื่อนตัวในดิน จะทำให้เกิดความเสียหายต่องานก่อสร้าง โดยปัญหาที่เกิดจากค่าการซึมผ่านของน้ำในดินที่สูง หรือค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำ จึงมีการใช้วิธีต่างๆในการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งการปรับปรุงด้วยสารเคมี คือการใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ทำหน้าที่เชื่อมประสานเม็ดดิน (Sherwood P.T., 1993) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดจากซีเมนต์กับน้ำ การใช้ซีเมนต์สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินมีข้อดีในเรื่อง เพิ่มความแข็งแรง ความทนทาน ความสามารถในการทำงาน ความสามารถในการไหล เป็นต้น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ มีวิธีต่างๆ เช่น การใช้ Soil Cement Column และ Jet Grouting เป็นต้น โดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพเหล่านี้จะช่วยลดช่องว่างในดิน เพิ่มกำลังในดิน แต่ด้วยวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหล่านี้จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อพื้นที่รอบข้าง แต่การใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Larson A.,2011) และเมื่อคอนกรีตอยู่ในดินจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดินเพิ่มขึ้นเป็น 12-13 เนื่องจากมีการปล่อยไฮดรอกไซด์ (OH-) จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Taylor H.F.W.,1997) และการที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมในดิน (Hansen P.J.,2002) การใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินยังเป็นเรื่องยากที่จะกำจัดออกจากดิน และการใช้ซีเมนต์ในการก่อสร้างปรับปรุงดินจะทำให้เกิดฝุ่นซีเมนต์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ และอาจทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับปอดได้ (Meijer E. et al.,2001) ซึ่งการปล่อยสารปนเปื้อน การซึมผ่านของน้ำ ระหว่างการขุดถือเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความท้าทายในการก่อสร้างของการทำงานในด้านวิศวกรรมปฐพี จึงได้มีการปรับปรุงดินก่อนการขุดซึ่งมีการใช้สารเคมี ซีเมนต์ และปรับปรุงชั้นดินก่อนถึงชั้นทรายก่อนการขุด ซึ่งจะช่วยให้สภาพแวดล้อมใต้ผิวดินและน้ำใต้ดินเกิดการปนเปื้อนจากสารพิษ จึงได้ทำการศึกษาค้นหาการปรับปรุงคุณภาพดินที่เหมาะสมพร้อมกับการลดค่าใช้จ่ายในการทำงาน



รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้ง Soil Cement Column ในการปรับปรุงคุณภาพดิน(ที่มา Spar Geo)

เพื่อศึกษาหาวิธีที่แก้ไขปัญหาได้ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีการศึกษาการใช้วัสดุที่เป็นแบบชีวภาพในการปรับปรุงดินก่อน และได้มีการประยุกต์ใช้พืช (Umar et al., 2016; Phan et al., 2021; Apriyono et al., 2022; Kamchoom et al., 2022), ถ่านไบโอชาร์ (Chen et al., 2020; Grag et al., 2021; Chen et al., 2022) และแบคทีเรีย (Al Qabany et al., 2017; Lim et al., 2020) การใช้แบคทีเรียในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ (Whiffin et al., 2007; Lin et al., 2016; Konstaninou et al., 2021; Ahenkorah et al., 2022) พร้อมกับมีการศึกษาได้มีการนำแบคทีเรียยูรีโอไลติก ยูเรียและของเหลวที่มีแคลเซียมฉีดเข้าไปในดินทำให้เกิดแคลเซตในดินและยังเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ พร้อมทั้งมีลดค่าการไหลของน้ำในดิน (Kantzas et al., 1992; Xu et al., 2022) โดยการใช้แบคทีเรียได้มีการตรวจสอบด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Wu et al., 2022) เป็นต้น ซึ่งการใช้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการใช้แคลเซต (MICP) นั้นมีความเปราะและเสียหายได้ง่ายเมื่อได้รับแรงที่กระทำ (wang et al., 2022) ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำในดิน

ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความยั่งยืนมากขึ้นในด้านการลดอัตราการไหลของน้ำในดิน โดยมีเป้าหมายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในดินให้น้อยที่สุด จึงได้มีการศึกษาการใช้แบคทีเรียและผลิตภัณฑ์ของแบคทีเรีย (Biofilm, Exopolysaccharide (EPS)) โดย Biofilm หรือ EPS จะเป็นส่วนที่ใช้ในการยึดเกาะกับผิวของเม็ดดิน ซึ่งคุณสมบัติ Biofilm และ MICP มีความแตกต่างกัน (Harutoshi, 2013) เนื่องจาก Biofilm มีความเหนียวไม่แตกหักง่าย Biofilm สามารถปิดช่องว่างรูพรุนในดินได้ และสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน (Taylor et al. 1990; Rockhold et al., 2002) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า

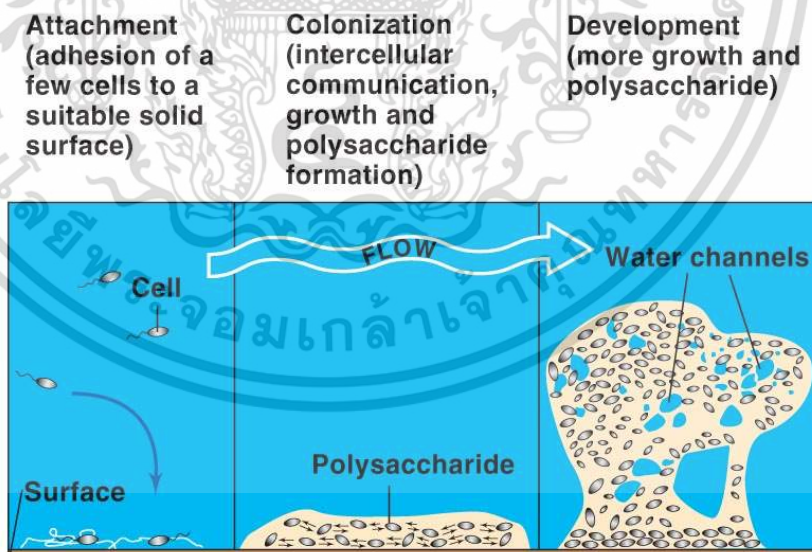
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bio-clogging พร้อมกับได้มีการศึกษาการใช้แบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยแบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* มีความสามารถในการเจริญเติบโตในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน (Zurera-Cosano et al.,2006)

การใช้แบคทีเรียช่วยในการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการก่อสร้าง ซึ่งพฤติกรรมต่างๆและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากแบคทีเรียสามารถปรับปรุงคุณภาพดิน โดยในส่วนของ Polysaccharides ยังส่งผลต่อคุณสมบัติของดินไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มกำลังของดิน ทำให้ดินแข็งแรง การลดอัตราการไหลของน้ำในดินโดย Polysaccharide เนื่องจาก Polysaccharide เคลือบเม็ดดินและอุดตันในช่องว่างเม็ดดิน (Baveye et al.,1998; Davis et al., 2009; Ivanov and Chu, 2008) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินที่ลดลงเนื่องมาจากค่าหนาแน่นของ EPS (Bozyigit et al.,2021;Wang et al.,2022) โดยแบคทีเรียจะวางตัวระหว่างเม็ดดิน พร้อมกับสร้าง Biofilm เข้าไปอุดตันในช่องว่าง ซึ่งช่องว่างจะลดลง 50-90% และค่าสัมประสิทธิ์การไหลยังจะลดลง 95-99% (Bouwer et al., 2000; Dunsmore et al., 2004) ในการศึกษาของ Dennis and Turner (1998) ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการซึมผ่านของน้ำในดินที่มี Biofilm ในขณะที่มีความเป็นกรดและด่าง ส่วนการศึกษาของ Chang and Cho (2016) การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินที่มี Biopolymer ที่แรงดันแตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 400 kPa (มีค่าเท่ากับความลึกของดินที่ลึก 25 เมตร) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากข้อมูลของ Treebupachatsak and Kamchoom (2021) กระบวนการ Bio-clogging จากการใช้แบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* ถึงแม้ว่าสารอาหารจะลดลง 50% ในส่วนของการศึกษาของ Cunningham et al.(2003) เป็นการสังเกตวิธีการติดตั้งจะส่งผลต่อการกระจายตัวของแบคทีเรียและการสร้าง EPS

การดำเนินการวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการติดตั้งโดยวิธีการ ฉีด ผสม และเทจุลินทรีย์ลงบนผิวพร้อมศึกษาการให้อาหารและหยุดอาหารแก่แบคทีเรีย ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้แบคทีเรียที่ชื่อว่า *Lueconostoc Mesentroides* TISTR 473 ในการศึกษา โดยแบคทีเรียที่ใส่ลงไปในตัวอย่างดินจะเข้าอาศัยในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งตัวแบคทีเรียเมื่อได้รับอาหารจะทำการสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็น Biopolymer ออกมาเคลือบผิวของเม็ดดิน (Lewandowski and Beyenal, 2007) เมื่อมีการผลิต Biopolymer ออกมาจะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการไหลของน้ำในดินที่มีแบคทีเรียอยู่ (Davis et al., 2009; Baveye et al., 1998) พร้อมกันนั้นยังศึกษาเมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียยังคงสภาพและยังส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำในดิน โดยจะทำการทดสอบอัตราการไหลที่คงที่ในตัวอย่างดินที่ได้รับแบคทีเรียและทำการเปรียบเทียบกับวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ซีเมนต์ พร้อมกับการตรวจสอบโครงสร้างเม็ดดินที่มีแบคทีเรียโดยการใช้การส่องกราดด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถึง 800,000 เท่า สามารถใช้ศึกษา

วัตถุที่มีขนาดเล็กได้ถึงระดับนาโนเมตร ทำให้สามารถศึกษาวัตถุที่มีขนาดเล็กมากเช่น ไวรัส หรืออนุภาคของสารประกอบ และจะทำการตรวจสอบรูพรุนด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimeter เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนของวัสดุโดยการแทนที่ด้วยปรอท โดยใช้หลักความสัมพันธ์ระหว่างความดันและรัศมีของรูพรุนตามสมการ Washburn Equation สำหรับตัวอย่างที่มีรัศมีรูพรุนขนาดโดยประมาณที่ 0.003 – 500 μm และในการศึกษานี้ก่อนหน้านั้นวิธีการติดตั้งแบคทีเรียจะเป็นในรูปแบบการฉีดแบคทีเรียเข้าไปในตัวอย่างดินในกระบอกเก็บดินที่มีขนาดเล็กโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3-7 เซนติเมตร (Hyun-Woo J.,2018;Soo-Min H.,2018;Tae-Hyuk K.,2016) ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้มีการใช้กระบอกตัวอย่างดินที่มีขนาดใหญ่โดยเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร เพื่อให้ใกล้เคียงกับการทำงานภาคสนามจริง และวิธีการติดตั้งแบคทีเรียจะมีติดตั้งวิธีที่แตกต่าง ซึ่งการติดตั้งแบคทีเรียจะทำการติดตั้งใน 3 รูปแบบ โดยมีวิธีการติดตั้งดังนี้ 1.การฉีด ,การผสม และการเทราด ซึ่งในแต่ละรูปแบบการติดตั้งจะส่งผลต่อการกระจายตัวของแบคทีเรีย เดกซ์ทรานที่แตกต่างกันไป ซึ่งปริมาณ การกระจายตัวของแบคทีเรียและเดกซ์ทราน จะส่งผลต่อค่าอัตราการไหลของน้ำในดินด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการติดตั้งส่งผลต่อปริมาณเดกซ์ทราน และการศึกษาเป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการติดตั้งที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาหาความเหมาะสมต่อการทำงานภาคสนาม พื้นที่การทำงานเงื่อนไขในการติดตั้งได้



รูปที่ 1.2 แสดงการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการลดช่องว่างในการไหลของน้ำโดย Biopolymer และแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* TISTR 473 ในอาหารเลี้ยง
2. ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในวิธีการติดตั้งที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน
3. ศึกษาประสิทธิภาพของเดกซ์ทรานที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากแบคทีเรียต่อค่าการซึมผ่านของน้ำในดินในวิธีการติดตั้งแบคทีเรียที่แตกต่างกัน
4. ศึกษาความสามารถของเดกซ์ทรานต่อค่าการซึมผ่านน้ำในดินในระหว่างการให้อาหารเลี้ยงและไม่ให้อาหารเลี้ยงในวิธีการติดตั้งแบคทีเรียที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษาวิทยานิพนธ์

1. งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดินเป็นทรายออกตาวา (Ottawa Sand) ในการศึกษา
2. งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้วิธีการติดตั้งแบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* TISTR 473 แบบที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าการซึมผ่านน้ำในดิน
3. งานวิจัยนี้ศึกษาหาปริมาณเดกซ์ทรานที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ในตัวอย่างแต่ละประเภทของการติดตั้ง
4. งานวิจัยนี้ควบคุมตัวอย่างดินให้ดินอิมมูน้ำและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมในงานก่อสร้าง
5. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเป็นเวลา 31 วัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 17 วันแรกจะทำการให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรีย หลังจากนั้นอีก 14 วันที่เหลือจะทำการงดให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรีย

1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* TISTR 473 และการใช้แบคทีเรียในการปรับปรุงคุณภาพดิน
2. วางแผนขั้นตอนการดำเนินงาน
3. เตรียมตัวอย่างดินและอุปกรณ์ต่างๆ
4. ทำการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและทำการทดสอบหาอัตราความเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
5. ทำการผสมแบคทีเรียและดินตัวอย่างตามกรณีที่ทำการศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีในการศึกษา พร้อมเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการผสมแบคทีเรียและดินที่ได้รับการผสมกับซีเมนต์
6. ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของดินที่มีแบคทีเรียและการยึดเกาะและอุดตันช่องว่างของเม็ดดินอันเป็นผลมาจากผลผลิตจากแบคทีเรียในดินด้วยวิธีการ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินโดยวิธีความดันคงที่ในกรณีศึกษาต่างๆ พร้อมกับตัวอย่างที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

8.ทดสอบหาปริมาณเดกซ์ทรานด้วยวิธีการทดสอบ Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) ในกรณีศึกษาต่างๆ

9.นำค่าต่างๆที่ได้มาวิเคราะห์ พร้อมสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การเจริญเติบโตแบบคทีเรียที่นำมาใช้ในการศึกษาส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในดิน

2. ขั้นตอนวิธีการติดตั้งแบบคทีเรียด้วยวิธีที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของตัวแบบคทีเรียและส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านของน้ำในดิน

3. วิธีการติดตั้งแบบคทีเรียที่แตกต่างกันมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบบคทีเรียและส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านของน้ำในดิน

4. แบบคทีเรียที่ได้รับสารอาหารและไม่ได้รับสารอาหารมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน

บทที่ 2

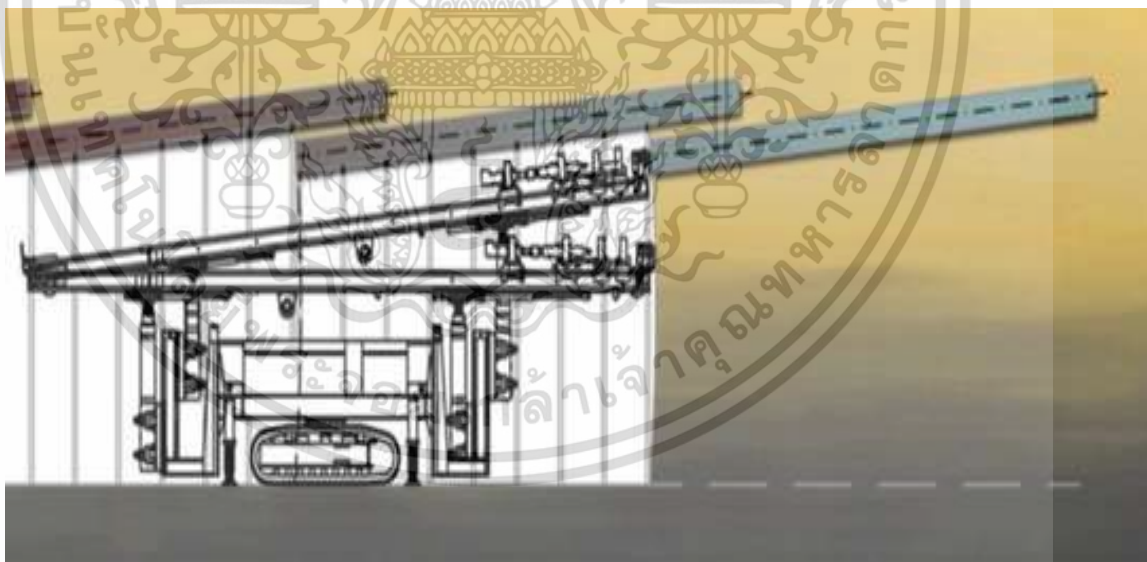
วรรณกรรมปริทัศน์และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน

ในงานก่อสร้างตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องกับดินมาตลอดไม่ว่าจะเป็นงานก่อสร้างพื้นฐาน การก่อสร้างอาคารบ้านเรือน (Pott D.T.,1997, Kemp B.J., 1989, Yang F. et al., 2010) ในปัจจุบันมีการก่อสร้างในดินที่มากขึ้น ซึ่งจะมีขั้นตอนก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นงานติดตั้งเสาเข็มเพื่อทำฐานรากอาคาร การขุดดินเพื่อทำคลองชลประทาน การเจาะเพื่อทำอุโมงค์ การใช้ดินมาทำเขื่อนดิน หรือการทำชั้นกันดิน ในทางวิศวกรรมมักจะสนใจในเรื่องการรับกำลังของดิน การซึมผ่านของน้ำ และการคงทน โดยการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับดินนั้นมักจะมีตัวแปรที่เข้ามาเกี่ยวข้องมาก ซึ่งมักจะส่งผลต่อการก่อสร้างหรือการออกแบบด้วย จึงมีการศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นงานการเพิ่มการรับกำลังในดิน การลดค่าซึมผ่านของน้ำเป็น และเพื่อป้องกันการพังทลายที่จะเกิดความสูญเสียต่อทรัพย์สินและการก่อสร้าง จึงการปรับปรุงคุณภาพดินซึ่งมีด้วยกัน 2 วิธีหลักคือ วิธีการปรับปรุงทางกายภาพ และวิธีการปรับปรุงทางเคมี ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพด้วยทางกายภาพนั้นจะเป็นการบดอัดดิน การดูดน้ำออกจากดิน การวางน้ำหนักรวมการยุบอัดตัวของดิน การติดตั้งเสาเข็มพืด การวางน้ำหนักรวมดูดน้ำออกจากดิน การบดอัดแบบไดนามิก การบดอัดแบบไดนามิกพร้อมดูดน้ำออกจากดิน การใช้การสั่น การใช้การสั่นพร้อมกับการแทนที่ดินเป็นต้น และการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีจะเป็นการใช้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือการใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ในดิน เช่นการนำแคลเซียมซิลิเกต (C-H-S) เข้าไประหว่างเม็ดดิน เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน (Sherwood P.T.,1993) เช่นวิธี Jet grouting หรือการผสมลึก (Deep mixing) เป็นต้น และ การใช้คุณสมบัติทางเคมีในแบบของความร้อนหรือความเย็น โดยการปรับปรุงดินด้วยวิธีต่างๆนั้นก็มีการพัฒนามาตลอดระยะเวลา ซึ่งบางวิธีอาจจะทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ที่ปรับปรุงและข้างเคียงได้ โดยในปัจจุบันก็ยังมีการพัฒนาเพื่อหาวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสม มีความยั่งยืน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.1 แสดงการติดตั้งเสาเข็มเจาะของอาคาร



รูปที่ 2.2 แสดงการขุดเจาะทำอูโมงค์ไต่ดิน (Zhao et al.,2013)

ในปัจจุบันการมีการก่อสร้างที่ค่อนข้างมากและกิจกรรมที่สำคัญที่สุดในงานก่อสร้างจะเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับดิน และเป็นงานที่ยากที่สุดในการก่อสร้าง ซึ่งการทำก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับดินนั้น จะต้องมีการออกแบบการเพื่อป้องกันการพังทลายของดิน หรือปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมก่อนการก่อสร้าง ซึ่งสาเหตุหลักของการพังทลายของดินก็คือกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ต่ำ หรือดินที่มีค่าการซึมผ่านของน้ำที่สูง ในกรณีของกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าต่ำจะเห็นได้จาก การพังทลายของเนินดิน หรือการกัดเซาะในดินที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำ (Jacob et al., 2011) ในส่วนของปัญหาและการพังทลายของค่าการซึมผ่านน้ำในดินที่สูงจะเห็นได้จากการรอดซึมผ่านน้ำจากเขื่อน ซึ่งสามารถเห็นตัวอย่างของการพังทลายจากหลายๆเหตุการณ์เช่น การพังทลายของเขื่อนเทตอน สหรัฐอเมริกา ซึ่งสาเหตุของการพังทลายเกิดจากค่ากำลังรับแรงเฉือนในดินที่ต่ำและค่าการซึมผ่านของน้ำในดินที่สูงจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการพังทลาย โดยสาเหตุที่กำลังรับแรงเฉือนในต่ำและค่าการซึมผ่านน้ำที่สูง จึงต้องมีการดำเนินการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพดินก่อน ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการก่อสร้างจะมีการปรับปรุงด้วยวิธี การผสมลึก (Deep Cement Mixing) และจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือการผสมแบบเชิงกล และการผสมแบบใช้แรงดัน การผสมแบบเชิงกลจะใช้เครื่องจักรที่มีการติดตั้งหัวเจาะที่เป็นใบพัดที่สามารถปั่นผสมดินและซีเมนต์ให้เข้ากัน (Porbaha et al., 1999) โดยการผสมจะสามารถทำได้ในดินที่แห้งหรือเปียก และการผสมแบบใช้แรงดันจะเป็นการฉีดน้ำเข้าไปในดินแล้วค่อยทำการฉีดน้ำปูนเข้าไป โดยเหตุของการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการใช้ซีเมนต์มีข้อดีมากมาย เช่น สามารถหาได้ง่าย ราคาต้นทุนต่ำ มีการพัฒนาใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงมานาน เนื่องจากการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงมีข้อดีในด้าน สามารถหาวัสดุได้ง่าย สามารถควบคุมในขณะการก่อสร้างได้ การตรวจสอบคุณภาพได้ง่าย สามารถเพิ่มกำลังรับแรงในดินได้มากขึ้นและสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินลงได้มาก ในทางกลับกันการใช้ก็ยังมีส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกันไม่ว่าจะเป็นกระบวนการผลิตซีเมนต์ และการติดตั้งซีเมนต์เข้าไปในดิน



รูปที่ 2.3 รูปแสดงการพังทลายของดิน



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการรอดซึมผ่านของน้ำในเขื่อน จนเกิดการพังทลาย (Teton Dam)

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการใช้ซีเมนต์มีการใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเป็นวัสดุหลักในการปรับปรุง เนื่องจากซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย ราคาค่อนข้างต่ำ มีการใช้งานที่แพร่หลายในการก่อสร้าง เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพและสามารถตรวจสอบ ควบคุมในการก่อสร้างได้ง่าย ซึ่งการใช้ซีเมนต์เป็นเป็นวิธีทางเคมีคือการใช้ซีเมนต์เข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งจะทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นพร้อมกับการลดค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำในดินด้วยอีกทาง วิธีการใช้ซีเมนต์อยู่หลายวิธีด้วยกันคือ การผสมลึก (Deep Cement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

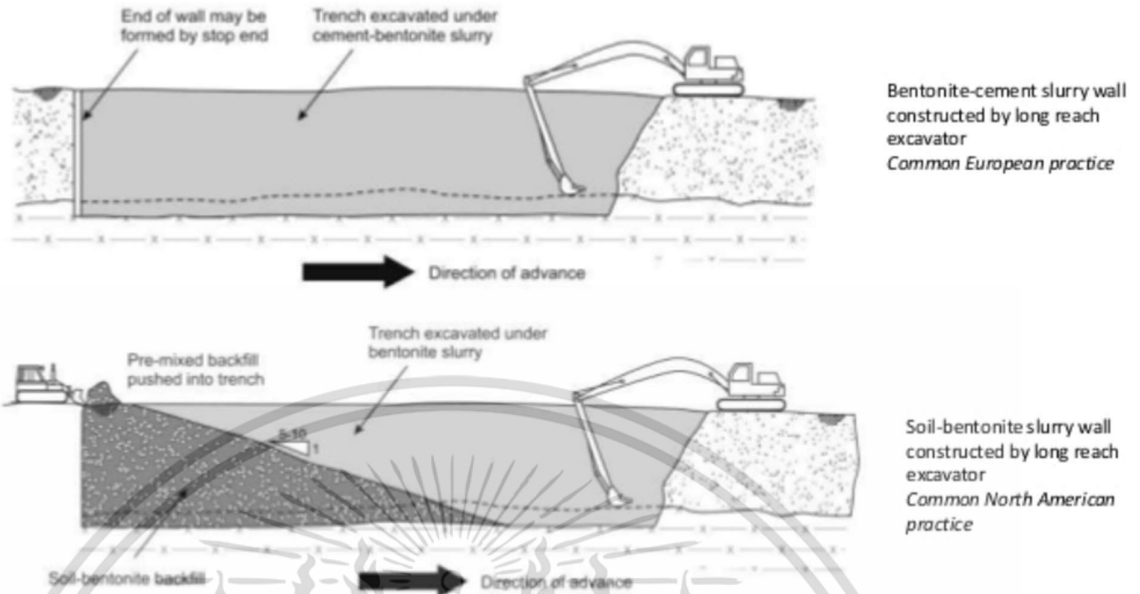
Mixing) การฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดัน (Jet Grouting) หรือการใช้เบนโทไนต์ (Bentonite Slurry) หรือ การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) โดยวิธีที่กล่าวมานั้นเป็นวิธีที่มีการใช้ซีเมนต์ในการช่วยปรับปรุงคุณภาพดินทั้งหมด ซึ่งการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินก็ยังคงผลเสีย ในแง่ของสิ่งแวดล้อมรอบด้านทั้งมลพิษในดิน น้ำใต้ดินและอากาศ



Boulanger

รูปที่ 2.5 รูปแสดงเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

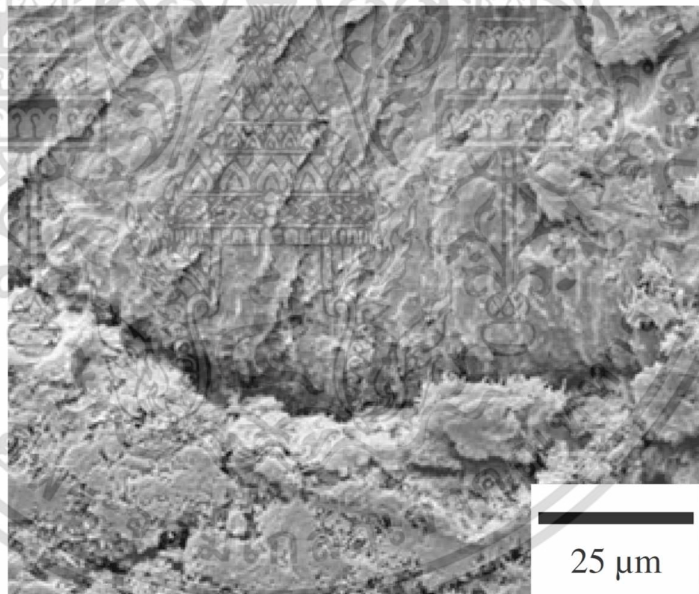


รูปที่ 2.6 รูปแสดงการทำกำแพงกันดินสำหรับการขุด (Bentonite Slurry Wall)

ซึ่งการใช้ซีเมนต์นั้นถึงแม้จะมีข้อดี แต่ก็ยังมีข้อเสียที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมทั่วไปไม่ว่าจะเป็นในดินและอากาศ พร้อมกันนั้นกระบวนการการผลิตของซีเมนต์ยังทำการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 0.55 ตัน ต่อปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 1 ตัน พร้อมกันนั้นยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกประมาณ 0.4 ตัน เนื่องการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตซีเมนต์ ซึ่งการผลิตซีเมนต์จะทำการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 0.95 ตัน ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน (Larson, A., 2011) พร้อมกับฝุ่นของซีเมนต์ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศพร้อมกับอาจทำให้เกิดมะเร็งปอด (Meijer, E. et al., 2001) และเมื่อฝุ่นของซีเมนต์ที่ลอยอยู่ในอากาศยังมีสารประกอบอัลคาไลน์ เมื่อเกิดฝนตก จะทำให้น้ำฝนมีความเป็นกรด (Gotoh, T. et al., 2002) การใช้ซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินไม่ว่าจะเป็นวิธีการใด จะทำให้ค่าความเป็นกรดในดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยจะเพิ่มขึ้นสูงถึง 12-13 และซีเมนต์ยังทำให้เกิดสารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ในดิน (OH-) เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Taylor, H.F.W., 1997) และการที่ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นในดินจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในดิน (Hansen, P.J., 2002) และการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เมื่อซีเมนต์ผสมลงไปอยู่ในดินแล้วนั้นจะยากแก่การกำจัดซีเมนต์ออกจากดินได้

โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาการปรับปรุงคุณภาพดินที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นการใช้ ฟีซ หรือแบคทีเรีย ซึ่งได้มีการศึกษาการใช้แบคทีเรียเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพดินโดยมีการใช้แบคทีเรีย *Sporosarcina pasteurii* และ *Bacillus pasteurii* ซึ่งแบคทีเรียทั้ง 2 ประเภท จะทำการผลิตแคลเซียมเข้าไปอุดตันในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยวิธีการนี้จะเรียกว่า Microbial induced calcite precipitation (MICP) (Dejong, J. et al., 2010; Whiffin V.S. et al., 2007) เมื่อแคลเซียม

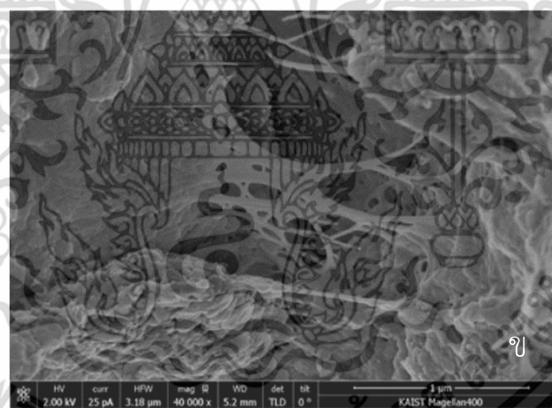
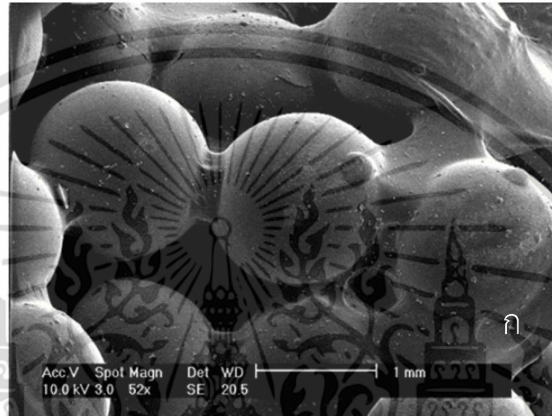
เข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินแล้ว จะส่งผลให้ดินมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น (Mortensen, B.M. et al., 2011) ยังมีการศึกษาใช้แบคทีเรีย *Sporosarcina pasteurii* ทำการฉีดเข้าไปในตัวอย่างดิน เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน พบว่าดินมีกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้นและมีความแข็งแรง พร้อมกับส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ (Kantzas et al., 1992; Xu et al., 2022) โดยได้มีการทดสอบด้วยวิธี Microfluidic chip test (Chu et al., 2022) และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการตรวจสอบ (Wu et al., 2022) อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ MICP ยังมีข้อบกพร่องอยู่ คือ การปรับปรุงคุณภาพดินแบบ MICP เหมาะกับการใช้ในดินที่มีขนาดเม็ดที่ใหญ่ ไม่เหมาะกับขนาดเม็ดดินที่เล็ก เนื่องจากเม็ดดินขนาดเล็กมีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ MICP (Rong, H., 2011) ยังพบว่าการเจริญเติบโตและความสามารถในการจับตัวของแบคทีเรียกับเม็ดดินนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ ในการใช้แบคทีเรียเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินแบบ MICP (Yasuharu, H. et al., 2012) และการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ MICP ยังพบว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงแบบ MICP ยังมีความเปราะและอาจเกิดการแตกได้ง่าย ภายใต้สภาวะของการกักน้ำหนัก (Wang et al., 2022)



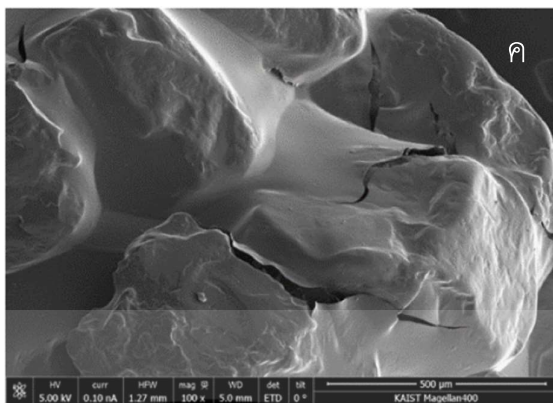
รูปที่ 2.7 รูปแสดงการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการใช้แบคทีเรียแบบ MICP เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน (Sun et al., 2012)

ได้มีการศึกษาโดยใช้การใช้ Biopolymer ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติในการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งวิธีการนี้ยังสามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดพร้อมเพิ่มกำลังการรับแรง ยังเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดเซาะในดิน และยังสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินได้อีกด้วย (Cole, D. et al., 2012) ซึ่ง Biopolymer นั้นสามารถพบเจอได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส แป้ง ไคโตซาน แชนแทนกัม เบต้ากลูแคน เป็นต้น สารดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ซึ่ง Biopolymer ที่อยู่ในดินจะมีส่วนสำคัญทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Biopolymer จะทำการยึดเกาะกับเม็ดดิน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการใช้เครื่องมือ SEM (Chang, I. et al.,2015) แต่การใช้ Biopolymer จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในส่วนดินที่ความความคละกันของเม็ดดินที่ดี โดยจะมีทั้งเม็ดหยาบและเม็ดละเอียด (Chang, I. et al.,2015) พร้อมกันนั้น Biopolymer ยังทำให้เกิดการอุดตันภายในดิน (Bio Clogging) เนื่อง Biopolymer ไปทำการอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Chang, C. et al,2010,Bueno, V.B., et al., 2013)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

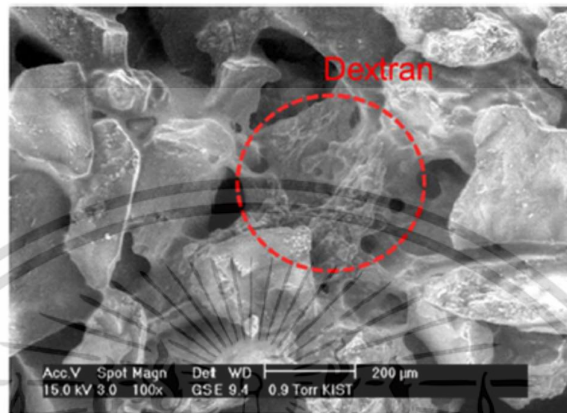


รูปที่ 2.8 รูปแสดงการใช้ SEM ในการตรวจสอบ Biopolymer กับตัวอย่างเม็ดดิน (ก).เบตักลูแคน กับลูกแก้ว, (ข).แกแลนกับดินเกาหลี และ (ค).เกาหลีกับทราย ที่มา Chang, I, 2012, และ Chang, I., 2015

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาการใช้แบคทีเรียเพื่อผลิต Exopolysaccharide (EPS) เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน โดย Eps จัดเป็นส่วนหนึ่งของ Biopolymer และได้มีการนำแบคทีเรียหลากหลายชนิดมาใช้ศึกษา โดยในการศึกษาจะทำการนำแบคทีเรียติดตั้งลงไปบนดิน แล้วให้อาหารแก่เชื้อแบคทีเรีย โดยหลังจากแบคทีเรียทำการปรับสภาพและได้รับสารอาหาร แบคทีเรียจะทำการผลิต EPS และเมื่อแบคทีเรียผลิต EPS ออกมาหุ้มเซลล์แบคทีเรียจะอยู่ในรูปของ Biofilm โดย Biofilm เป็นการผสมระหว่างเซลล์ของแบคทีเรียและ exopolysaccharide (EPS) ซึ่ง EPS ที่เกิดจากแบคทีเรียจะยึดเกาะกับเม็ดดิน พร้อมเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดกระบวนการ Bio-Clogging ในดินส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินลดลง (Baveye et al., 1998; Dunsmore et al., 2004) โดยมีการศึกษาด้วยการใช้แบคทีเรีย *Shewanella oneidensis* MR-1 (ATCC#700550) ติดตั้งลงไปบนทรายออกตตาวา แบคทีเรีย *Shewanella oneidensis* สามารถพบได้ในดินทั่วไปและในธรรมชาติ โดยแบคทีเรียชนิดนี้ยังมีความสามารถในการลดแร่เหล็ก ตะกั่ว ปรอทและยูเรเนียมในดิน ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียยังสามารถสร้างสื่อการนำไฟฟ้า (Roy et al., 2013; Gorby et al., 2006) แบคทีเรีย *Shewanella oneidensis* ยังสามารถทำให้ค่าการนำไฟฟ้าภายในดินลดลงมากกว่า 10% และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงถึง 70% (Joo H., 2018) ยังมีการศึกษาแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* ติดตั้งลงในดินตัวอย่างโดยการศึกษาใช้ทรายออกตตาวาในการศึกษา ซึ่งตัวแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* ช่วยในการลดกันเซาะบริเวณผิวดิน พร้อมกับดินตัวอย่างมีค่าความเค้นเฉือนที่ผิวดิน (Shear Stress) ตัวอย่างเพิ่มขึ้น (Ham S. et al., 2018) ในการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการนำแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* (*S. epidermidis*, ATCC35984) ซึ่งเป็นแบคทีเรียประเภท gram positive เช่นเดียวกับ *Leuconostoc Mensenteroides* ซึ่งถูกติดตั้งเข้าไปในดินตัวอย่างพร้อมกับทำการทดสอบแรงเฉือนแบบ 3 แกน ซึ่งผลการทดสอบจะพบว่า ค่า Ultimate Shear ในดินตัวอย่างที่มีเดกซ์ทรานค่าลดลง 7-9% เมื่อเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับดินเปล่า (Hai L., et al., 2018) และยังมีการศึกษาที่คล้ายกันโดยใช้ EPS ของ *Klebsiella oxytoca* พร้อมกับตรวจสอบพบว่ากำลังของดินลดลง (Daniels J., et al., 2009)

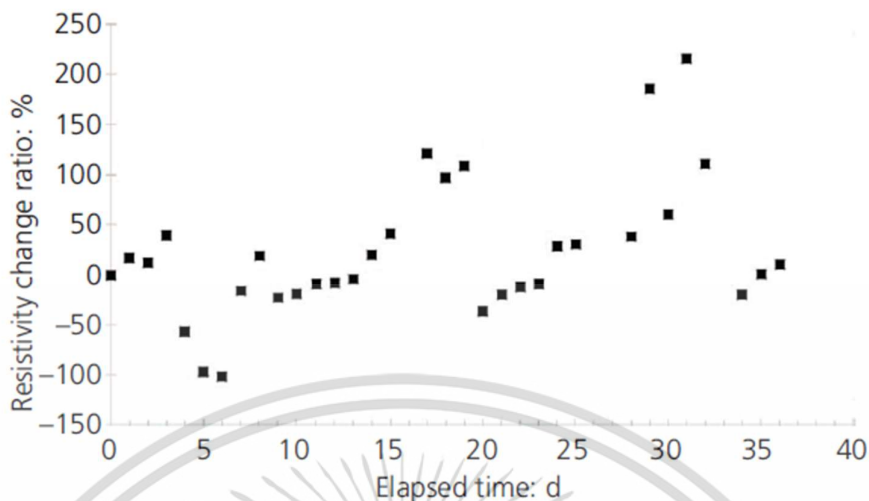


รูปที่ 2.9 รูปแสดง Biopolymer หรือ Dextran ที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Ham S. et al., 2018)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีความยั่งยืนมากขึ้น เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งทำการลดค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินไปด้วย ซึ่งได้มีการใช้แบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิต Biopolymer ออกมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน สิ่งที่ใช้ในการปรับปรุงจะเป็น มวลรวมของแบคทีเรีย หรือ Biofilm ซึ่งก็คือ Exopolysaccharide (EPS) โดยแบคทีเรียจะทำการสังเคราะห์ EPS มาทำการยึดเกาะกับพื้นผิวต่างระหว่างเม็ดดิน โดยลักษณะกลไก Biofilm ของ EPS และ MICP นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลของ (Harutoshi, 2013) และ EPS เป็นโพลีเมอร์ที่มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่น คงทนไม่แตกหัก และ EPS ยังสามารถอุดช่องว่างรูพรุนในดิน ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Bio-clogging (Taylor et al., 1990; Rockhold et al., 2002) และกระบวนการ Bio-clogging ของแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* ยังคงสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน (Zurera-Cosano et al., 2006) เพราะฉะนั้นแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* จึงสามารถปรับปรุงดินได้ในระดับที่ต้นและลึก แต่กระนั้นความหนาแน่นของดินจะแปรผกผันกับปริมาณช่องว่างในดิน ด้วยความที่ความที่ความหนาแน่นของดินที่มาก จะทำให้ช่องว่างในดินมีน้อยลงและขนาดความกว้างช่องว่างมีขนาดเล็ก ซึ่งจะส่งผลทำให้การเจริญเติบโตและการกระจายตัวของแบคทีเรานั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจาก แบคทีเรียไม่มีช่องว่างสำหรับการเจริญเติบโตและการกระจายตัว พร้อมกันนั้นการที่สารอาหารจะไหลตามช่องว่างรูพรุนก็จะเป็นไปได้ยาก อันเนื่องมาจากปริมาณช่องว่างมีปริมาณที่น้อย หรือขนาดช่องว่างมีขนาดเล็ก

โดย EPS ที่เกิดจากการสังเคราะห์ *Leuconostoc mesenteroides* จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลง และ EPS ที่แบคทีเรียสังเคราะห์ออกมาจะแตกต่างกันไปเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมภายในดิน ปริมาณแบคทีเรีย (Bozyigit et al.,2021, Wang et al.,2022) โดยก่อนหน้าได้มีการศึกษา Biofilm ของ *Leuconostoc mesenteroides* ให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรด-ด่าง แต่ Biofilm ก็ยังคงความสามารถในการลดค่าสัมประสิทธิ์การไหลได้ (Dennis and Turner, 1998) และได้มีการใช้ Biopolymer ศึกษาการลดอัตราการไหลของดิน ภายใต้สภาวะแรงดันที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0-400 Kpa โดยแรงดันที่ศึกษาสามารถเทียบเท่าได้เท่ากับดินที่อยู่ในระดับความลึกที่ 25 เมตร และแรงดันภายในช่องว่างของเม็ดดิน พบว่า Biopolymer สามารถคงทนได้เท่ากันในสภาวะแรงดันที่แตกต่างกัน (Chang and Cho, 2016) และยังพบว่า *Leuconostoc mesenteroides* ยังคงประสิทธิภาพได้ ถึงแม้สารอาหารจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (Treebupachatsakul and Kamchoom, 2021) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละการศึกษาจะมีการเตรียมตัวอย่างอย่างระมัดระวัง และทำการติดตั้งแบคทีเรียลงในตัวอย่างดินอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งเมื่อเทียบกับพื้นที่สภาพพื้นที่ก่อสร้างจริงหรือการทำงานทั่วไป การกระจายตัวของแบคทีเรียภายในพื้นที่ จะมีผลมาจากการติดตั้งและปริมาณของแบคทีเรีย (Cunningham et al.,2003) ซึ่งการติดตั้งและปริมาณของแบคทีเรียที่ติดตั้ง จะส่งผลทำให้ EPS ที่ถูกสังเคราะห์อาจกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (McSwain et al.2005; Jayathilake et al., 2017) พร้อมกันนั้นยังเคยมีการศึกษาที่ลักษณะคล้ายกันโดยนำแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroid* ติดตั้งลงในดิน แล้วทำการให้สารอาหารแก่แบคทีเรียเป็นระยะเวลา 16 วัน แล้วทำการหยุดให้สารอาหาร 14 วัน แล้วหลังจากนั้นนำตัวอย่างดินออกจากกระบอกแล้วนำอบแห้ง พร้อมกับนำดินดังกล่าวมาบดอัดใหม่อีกครั้ง พบว่าปริมาณเดกซ์ทรานส์ที่ลดลงเพียง 10% เมื่อเทียบกับปริมาณเดกซ์ทรานมากที่สุดที่พบในตัวอย่าง (Treesukon T,2020)

โดยในปัจจุบันได้มีการศึกษาการใช้แบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* จะเข้าไปอาศัยอยู่ในระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน และเมื่อแบคทีเรียได้รับสารอาหาร จะทำการผลิต Dextran ออกมา โดย Dextran ที่ออกมาจะเข้าไปยึดเกาะกับเม็ดดิน และทำให้ช่องว่างในเม็ดดินเกิดการอุดตันขึ้น (Bio clogging) ในงานศึกษาบางชิ้นได้ทำการใช้คลื่น P-Wave ในการตรวจตัวอย่างดินที่ไม่มี Dextran เทียบกับ ตัวอย่างดินที่มี Dextran อยู่พบว่า ตัวอย่างที่มี Dextran พบว่าค่าของ P-Wave ในความถี่ 0.4-0.8 MHz จะลดลง 80% เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินที่ไม่มี Biopolymer (Kwon T. et al.,2016) เนื่องมาจาก Dextran จะทำการดูดซับคลื่น และยังพบว่าแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* ที่ติดตั้งเข้าไปในดินตัวอย่างยังส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่ม (Ta X. et al., 2017) อันเป็นผลมาจากการที่เดกซ์ทรานเข้าไปแทนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงระหว่างระยะเวลาและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ta X. et al., 2017)

ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้แบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* (LM TISTR473) โดยแบคทีเรียชนิดนี้มีจำหน่ายทั่วไป หรือสามารถพบได้ในพืชทั่วไป ยังถูกใช้ในทางการแพทย์และอุตสาหกรรมอาหาร แบคทีเรียชนิดนี้เมื่อได้รับสารอาหารจะทำการผลิตเดกซ์ทรานออกมา ซึ่งเดกซ์ทรานที่ผลิตออกมามีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Bio-clogging ภายในดินอีกด้วย (Wingender et al., 1999) โดยสารอาหารของแบคทีเรียเป็นกากน้ำตาล พร้อมกันนั้นหากสารอาหารอุดมไปด้วยซูโครส แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดี (Soetaert et al., 1995; Surasini et al., 2013) และแบคทีเรียชนิดนี้ยังมีความสามารถทนอยู่ในสภาพอากาศ อุณหภูมิที่ 10-37 องศาเซลเซียส (Hamasaki et al., 2003; Mataragas et al., 2003) จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียมีความสามารถเจริญเติบโตภายในพื้นที่เขตร้อนได้ และแบคทีเรียยังสามารถอาศัยอยู่ในที่ที่มีความเป็นกรด-ด่างได้ pH 4.5-7 โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตมีค่า 5.5-6.5 (Björkroth J, et al., 2015, Mataragasa et al., 2003) พร้อมกันนั้นการตรวจสอบของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะวิเคราะห์จากความขุ่น (Dalgaard et al., 1994) และยังพบว่าในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียในช่วงแรกการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะเจริญเติบโตเป็นอย่างมาก โดยแบคทีเรียต้องใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพให้เข้ากับสารอาหาร (Rofle et al., 2012) เมื่อแบคทีเรียปรับสภาพได้แล้วการเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในกระบวนการเจริญเติบโตจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและสารอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย ซึ่งในสารอาหารของแบคทีเรียจะประกอบไปด้วย ซูโครส 10%, ทริปโตน 1% และยีสต์ 0.5 % โดยซูโครสจะเป็นสารอาหารหลักของแบคทีเรียที่ทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโต ส่วนของทริปโตนและยีสต์ เป็นแหล่งกรดอะมิโนและวิตามินที่จะส่งเสริมให้แบคทีเรียเจริญเติบโต จะเห็นได้ว่าซูโครสจะเป็นแหล่งอาหารหลักที่จะทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโต

โดยมีการศึกษาปริมาณซูโครสที่เหมาะสมกับแบคทีเรีย ซึ่งปริมาณซูโครสที่เหมาะสมตั้งแต่ 10-20 % (Farwa s.,2008)



รูปที่ 2.11 รูปแสดงแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* (LM TISTR473)

2.2 สมบัติการซึมผ่านน้ำ (Permeability)

2.2.1 ความชื้นน้ำของดิน

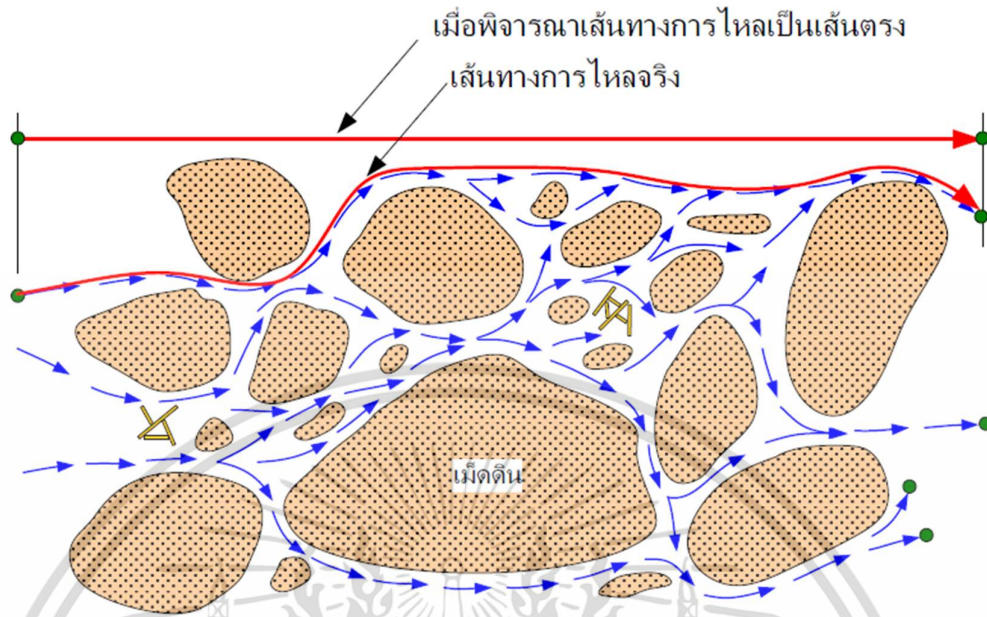
ในมวลดินจะประกอบไปด้วยชั้นดินต่างๆที่มีตะกอนทับถมกันหลายชั้น และภายในดินจะมีน้ำใต้ดิน โดยน้ำจะสามารถเคลื่อนที่ได้หลายทิศทาง ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดจากสภาวะจากความดันสูงไปยังความดันต่ำที่ต่ำเสมอ โดยผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งเรียงตัวคดเคี้ยวไปมาต่อเนื่องกัน ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเกิดจากน้ำผิวดินไหลซึมผ่านลงไป หรือการสูบน้ำ โดยอัตราการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ลักษณะของผิวเม็ดดิน ซึ่งการไหลของน้ำในดินมีส่วนสำคัญต่อการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นการทำเขื่อน การระบายน้ำ และการซึมผ่านของน้ำในดินยังเป็นส่วนสำคัญต่อความสามารถการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกของดิน การทรุดตัวของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของน้ำผ่านดินที่มีความอึดตัวเป็น Laminar Flow เมื่อน้ำไหลผ่านเม็ดดิน แรงดันน้ำจะเกิดการสูญเสียแรงดันอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานของเม็ดดินละช่องว่าง (Darcy, 1856) โดยน้ำไหลจากจุดที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังจุดที่มีพลังงานต่ำ น้ำจะไหลผ่านช่องว่างเหล่านี้ ดังนั้นหากช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กน้ำก็จะไหลผ่านได้ยากกว่าดินที่มีช่องว่างขนาดใหญ่ ความสามารถของมวลดินที่ยอมให้น้ำไหลผ่านเรียกว่า “ความซึมผ่านของดิน” (Permeability) ซึ่งค่าที่จะบอกถึงความซึมผ่านได้ในดินเรียกว่า “สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้” หรือ “Coefficient of Permeability, k” ซึ่งการทดสอบทางวิศวกรรมจะมีอยู่ 2 วิธีการคือการทดสอบแบบความดันคงที่ ซึ่งจะทดสอบพวกกับดินที่ขนาดเม็ดหยาบ และการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงความดันจะทดสอบกับดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด นอกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินแล้วยังมีอิทธิพลอื่นๆที่มีผลต่อการไหลซึมผ่านของน้ำในดิน ได้แก่

1. การกระจายตัวของเม็ดดิน (Particle Size Distribution)
2. รูปร่างและผิวของเม็ดดิน (Particle Shape and Texture)
3. องค์ประกอบแร่ธาตุในมวลดิน (Mineralogical Composition)
4. อัตราส่วนช่องว่างของดิน (Voids Ratio)
5. ระดับความอึดตัว (Degree of Saturation)
6. ลักษณะโครงสร้างของมวลดิน (Soil Fabric)
7. คุณสมบัติของของเหลวในช่องว่าง (Nature of Fluid)

ซึ่งการไหลของน้ำในดินเป็นคุณสมบัติหนึ่งของดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเม็ดดินหรือรูพรุนในดิน โดยดินที่ที่เป็นจำพวกทรายแป้งหรือดินเหนียวจะมีขนาดช่องว่างในเม็ดดินที่น้อยเนื่องจากขนาดของเม็ดดินมีความละเอียดจึงทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ยากและค่าสัมประสิทธิ์การซึมที่ต่ำ ส่วนเม็ดดินจำพวกทรายหรือกรวดจะเป็นจำพวกเม็ดหยาบมีช่องว่างที่มากจึงทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่ายและค่าสัมประสิทธิ์ที่สูง โดยจะมีกฎในการหาค่าการไหลของน้ำได้แก่ กฎพลังงานของการไหล กฎของดาร์ซี และกฎการต่อเนื่องการไหล



รูปที่ 2.12 แสดงการไหลของน้ำในมวลดิน (พรพจน์ ต้นเส็ง, ปรุทีกลศาสตร์, 2554)

2.2.1.1 กฎพลังงานของการไหล

น้ำจะไหลผ่านจากที่สูงไปยังที่ต่ำ หรือที่ที่มีพลังงานมากกว่าไปที่ที่พลังงานน้อยกว่าเสมอ กฎพลังงานของการไหล จะควบคุมการไหลของน้ำในดิน พลังงานจากความดันของน้ำ พลังงานจลน์ที่เกิดจากการไหลของน้ำในดิน พลังงานจลย์ และพลังงานศักย์ที่เกิดจากความต่างความสูงของดิน ซึ่งจะใช้ เหน็ด (head) เป็นตัวแทนของพลังงานดังกล่าวซึ่งนำเสนอโดย Daniel Bernoulli (1700-1782) ดังสมการ

$$h = h_e + h_p + h_v$$

เมื่อ h = เหน็ดทั้งหมด

h_e = เหน็ดที่เกิดจากระดับน้ำที่ต่างกันโดยวัดจากระดับอ้างอิง

h_p = เหน็ดที่เกิดจากความดันที่ต่างกัน

h_v = เหน็ดของความเร็ว

โดย $h_p = u/\gamma_w$

u = ความดันของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

และ $h_v = v^2/2g$

v = ความเร็วที่น้ำไหลผ่าน

g = อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก

เพราะฉะนั้น

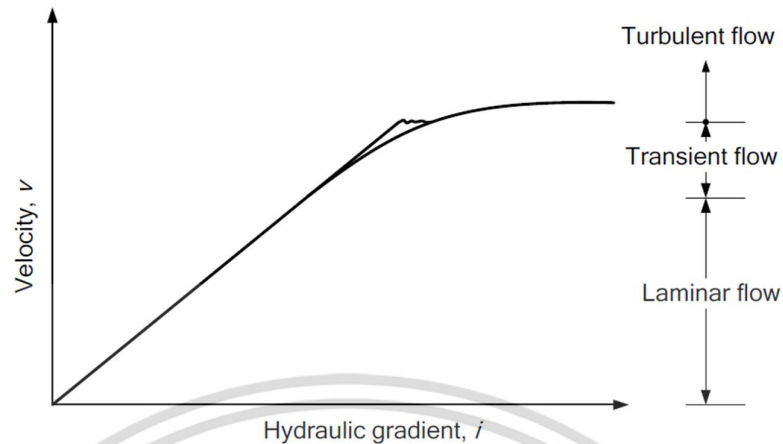
$$h = (u/\gamma_w) + (v^2/2g) + h_e \quad (2.1)$$

โดยการไหลของน้ำค่าความสัมพันธ์ของความเร็วกับความชันทางชลศาสตร์สามารถแบ่งออกได้ 3 โซน คือ 1. Laminar flow Zone, 2. Transition Zone และ 3. Turbulent flow Zone แต่เนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านมวลดินที่มีความอึดตัว จะเกิดการไหลช้าๆ ไม่รุนแรง ความเร็วคงที่ จึงถือเป็นการไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow) ดังนั้นจึงสามารถตัดในส่วนของความเร็วยกออกไปได้

ดังนั้น

$$h = (u/\gamma_w) + h_e$$

และการไหลของน้ำผ่านดินจะแตกต่างจากการไหลผ่านท่อ เนื่องมาจากน้ำที่ไหลผ่านดินจะเป็นการไหลไปตามช่องว่างของดิน โดยน้ำจะเกิดการสูญเสียพลังงานในการไหลเนื่องจากแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient, i) กับความเร็ว

2.2.1.2 กฎการไหลของดาร์ซี (Darcy's Law)

โดยการไหลซึมผ่านของน้ำในดินที่มีความอึดตัวจะเป็นการไหลแบบลามินาร์ พร้อมกับความเร็วคงที่ (Steady flow) ดังนั้นจึงสามารถใช้กฎของดาร์ซี มาหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึม (coefficient of permeability) โดยกฎของดาร์ซีจะพบความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของน้ำผ่านดินว่า “อัตราการไหลจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความชันชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)” จากกฎของดาร์ซี

$$v = q/A \propto i$$

หรือ

$$v = q/A = ki \quad (2.2)$$

เมื่อ q = อัตราการไหลของน้ำผ่านดิน

i = ความชันทางชลศาสตร์

k = สัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน (Permeability of Soil) ความซึมน้ำของดิน

A = พื้นที่หน้าตัดขวางที่น้ำไหลซึมผ่านจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง

หากปริมาณของน้ำไหลซึมผ่าน ภายในเวลาที่กำหนดดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึม

$$q = Q/t$$

เมื่อ Q = ปริมาณของน้ำไหลซึมผ่านดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t = ระยะเวลาของการตรวจวัดปริมาณของน้ำที่ซึมผ่าน

เพราะฉะนั้น

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

โดยความเร็วของการไหลซึมตามกฎดาร์ซี ซึ่งความเร็วจะเป็นความเร็วที่ต่อพื้นที่ของมวลหน้าตัดดิน ซึ่งเป็นมวลรวมทั้งส่วนของดิน รวมถึงช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่การไหลของน้ำในดินนั้น จะไหลซึมผ่านเพียงช่องว่างเท่านั้น ดังนั้นความเร็วที่แท้จริงของการไหลซึมของน้ำจึงต้องพิจารณาถึงความพรุนในดิน (porosity) ของมวลดินโดยสมการของความพรุนดังนี้

$$n = e/(1 + e) \quad (2.4)$$

เมื่อ n = ความพรุนของดิน

e = อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

ดังนั้น $V_{\text{actual}} = v/n = v(1+e)/e \quad (2.5)$

2.2.1.3 กฎการไหลต่อเนื่อง

กฎของการไหลต่อเนื่องจะพิจารณาในส่วนของมวลของน้ำในดินจะไม่เกิดการสูญหาย ซึ่งกฎนี้ทำให้สมการครอบคลุมการไหลซึมผ่านของน้ำในดิน เมื่อให้ดินเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการซึมผ่านของน้ำในดินเท่ากันทุกพื้นที่

2.2.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์การไหล

มวลดินแต่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่แตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและรูปร่างของเม็ดดิน รวมถึงคุณสมบัติของน้ำ ซึ่งจะเป็นความหนาแน่น ความหนืด ที่ไหลซึมผ่านมวลดิน อัตราส่วนระหว่างช่องว่างเม็ดดิน โครงสร้างของดิน ระดับความอึดตัวของดิน รวมถึงการดูดซึมของน้ำในดิน ซึ่งปกติทั่วไปสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์จากห้องปฏิบัติการหรือในสนามได้ โดยได้มีสมการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึม ในดินที่เป็นเนื้อเดียวกันพร้อมกับดินที่มีความอึดตัวด้วยน้ำเสนอโดย Taylor

$$k = D_s \cdot 2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (2.6)$$

เมื่อ D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดดิน ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตรดินต่อพื้นที่ผิวของมวลดิน

γ_w = ความหนาแน่นของน้ำที่ไหลซึมผ่าน

μ = ความหนืดของน้ำที่ไหลซึมผ่าน

e = อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

C = ค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับรูปร่างของเม็ดดิน

ตารางที่ 2.1 ค่าโดยทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินชนิดต่างๆ (เสนอโดย Terzaghi และ Peck)

ชนิดของดิน	สัมประสิทธิ์การซึมได้		ระดับการซึม
	ซม./วินาที	ฟุต/นาที	
กรวด	1-100	2-200	สูง
ทรายเม็ดหยาบ (Coarse Sand)	1-0.01	2-0.02	ปานกลาง
ทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand)	0.01-0.001	0.02-0.002	ต่ำ
ดินตะกอน (Silt)	0.001-0.00001	0.002-0.00002	ต่ำมาก
ดินเหนียว (Clay)	<0.000001	<0.000002	ซึมผ่านได้ยาก

พร้อมกันนั้นได้มีการนำเสนอการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านสำหรับกรณีทรายที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ และอยู่ในสภาพที่หลวม ซึ่งถูกนำเสนอโดย Hansen

$$k = c(D_{10})^2 \quad (2.7)$$

เมื่อ D_{10} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ % finer เป็น 10

c = ค่าคงที่ จะอยู่ที่ 1.0 ถึง 1.50

และได้มีการนำเสนอสมการสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านสำหรับกรณีดินที่มีขนาดเม็ดหยาบที่ได้รับการบดอัดแน่น ถูกนำเสนอโดย Sherard, Dunnigan และ Talbot

$$k = 0.35(D_{15})^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ D_{15} = ขนาดของเม็ดดินที่สามารถรอดผ่านตะแกรงได้มากกว่า 15 %

โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมจะแปรเปลี่ยนไปอุณหภูมิของน้ำ โดยจะใช้อุณหภูมิมาตรฐานในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสามารถหาค่า

สัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่อุณหภูมิต่างๆโดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิมาตรฐานที่ 20 องศาเซลเซียส จากสมการ

$$k_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = k_T \frac{\mu_T}{\mu_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}} \quad (2.9)$$

เมื่อ $k_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่ 20 องศาเซลเซียส

k_T = ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านที่อุณหภูมิต่างๆ

μ_T = ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

$\mu_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C โดยมีค่าเท่ากับ 10.09 มิลลิพอยส์ (millipoise)

ตารางที่ 2.2 ค่าอัตราส่วนของ $\mu_T / \mu_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$

อุณหภูมิ T°C	$\mu_T / \mu_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$
21	0.976
22	0.953
23	0.931
24	0.910
25	0.889
26	0.869
27	0.850
28	0.832
29	0.814
30	0.797

2.2.2 การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในห้องปฏิบัติการจะสามารถหาได้ด้วย 2 แบบคือ

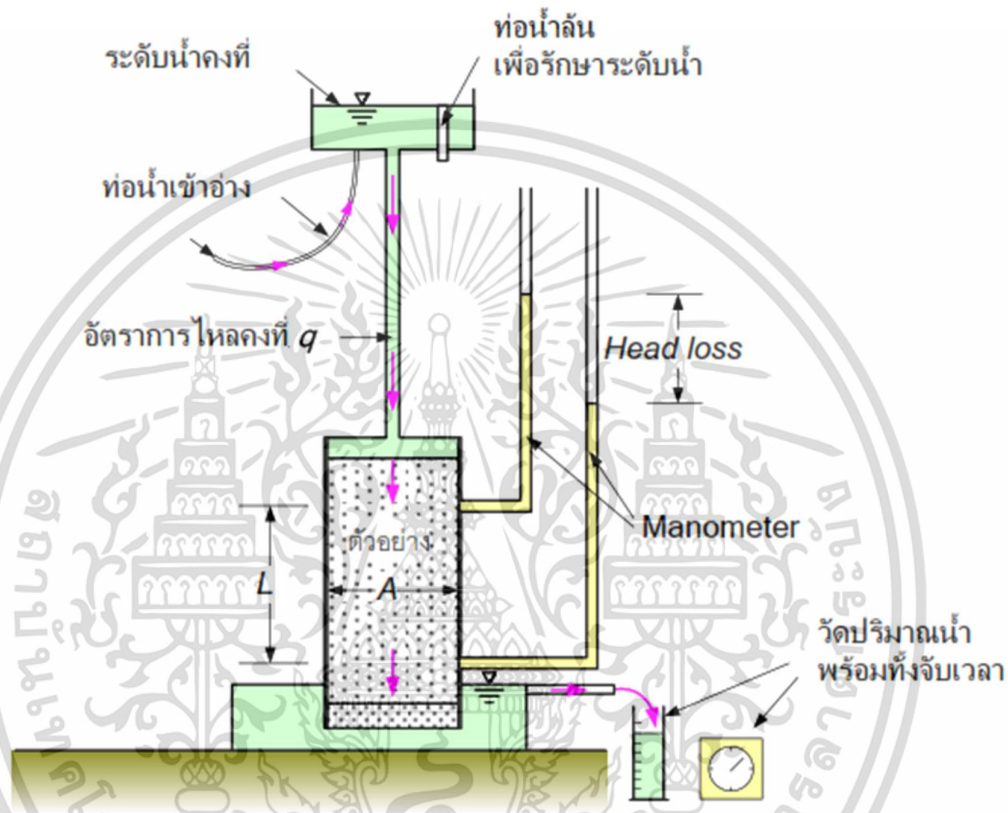
- 1.แบบเฮดคงที่ (Constant Head) สำหรับทดสอบในดินที่เป็นเม็ดหยาบ
- 2.แบบเฮดแปรค่า (Variable Head) สำหรับทดสอบในดินที่เป็นเม็ดละเอียด

2.2.2.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แบบเฮดคงที่ (Constant Head)

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำแบบเฮดคงที่เป็นวิธีที่เหมาะสมกับกรวด ททรายที่ไม่มีการเจือปนของดินเม็ดละเอียด โดยจะใช้เครื่องมือทดสอบแบบ Constant Head ซึ่งจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

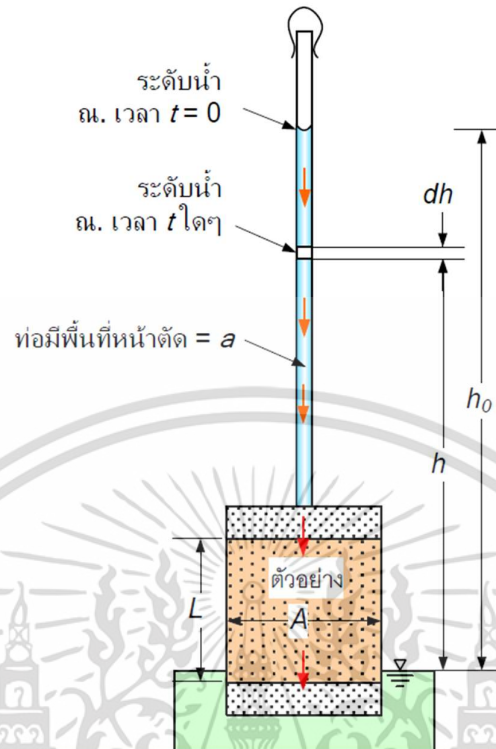
การปล่อยน้ำให้ไหลผ่านกระบอกที่มีดินตัวอย่าง พร้อมกับทำการควบคุมให้ระดับน้ำคงที่ อัตราการไหลของน้ำจะทำการวัดปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่าง พร้อมทั้งจับเวลา ซึ่งเมื่อได้ผลการทดลองจากปริมาณน้ำที่วัดได้กับช่วงเวลาที่ทำการวัดปริมาณน้ำที่ไหลออก จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้จากกฎของดาร์ซี สมการที่ 2.9



รูปที่ 2.14 การทดสอบแบบเฮดคงที่ (Constant Head) (พรพจน์ ดันเส็ง, ปรุพิทกลศาสตร์, 2554)

2.2.2.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แบบเฮดแปรค่า (Variable Head)

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แบบเฮดแปรค่า (Variable Head) เป็นวิธีทดสอบที่เหมาะสมสำหรับดินที่เม็ดละเอียดที่ยอมให้การไหลซึมผ่านของน้ำนั้นยากและผ่านได้น้อย หากใช้การทดสอบแบบเฮดคงที่จะใช้เวลานาน โดยในการทดสอบแบบเฮดแปรค่าจะทำการปล่อยให้น้ำไหลผ่านดินตัวอย่างที่มีความอึมน้ำ ซึ่งตัวอย่างจะมีพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างและความหนา พร้อมทั้งทำการติดตั้งน้ำเข้าไปในหลอดที่บอกระดับ



รูปที่ 2.15 การทดสอบแบบเฮดแปรค่า (Variable Head) (พรพจน์ ต้นเส็ง, ปรุพีกลศาสตร์, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

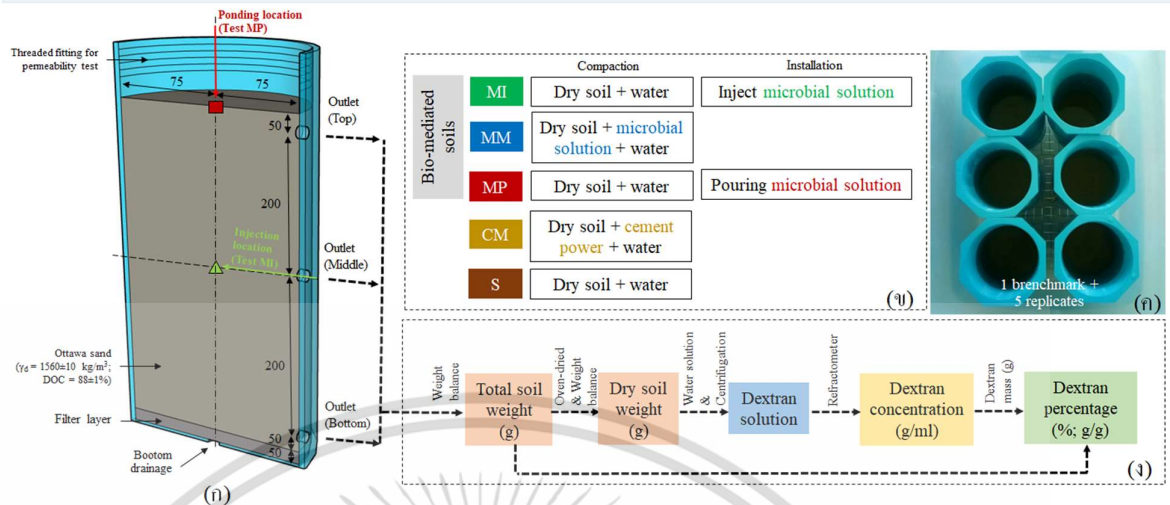
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้จะเป็นการศึกษาวิธีการติดตั้งแบคทีเรีย จะมีการใช้กรณีศึกษา 6 กรณี โดยกรณี ที่ 1, 2 และ 3 จะเป็นการติดตั้งแบคทีเรียในวิธีที่ต่างกัน ในกรณีที่ 4 และ 5 นั้นเป็นตัวอย่างดิน เปร่าและดินผสมกับซีเมนต์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการไหลของน้ำในดิน และในการศึกษา กรณีที่ 6 เป็นการแบ่งช่วงเวลาในการให้อาหารแก่แบคทีเรีย ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ให้อาหารแก่แบคทีเรียใน 16 วันแรก และหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียใน 14 วันหลังจากนั้น ซึ่งตัวอย่าง ดินทุกกรณีจะทำการเก็บรักษาไว้ในถังที่มีน้ำเพื่อรักษาสภาพของดินให้อิ่มน้ำ พร้อมกับควบคุม อุณหภูมิอยู่ที่ 30 ± 3 องศาเซลเซียส

การศึกษานี้จะมีการทดสอบหาโครงสร้างเม็ดดินกับเดกซ์ทรานด้วยวิธีการส่องกราด ด้วยอิเล็กตรอน (SEM) ทดสอบหาปริมาณเดกซ์ทรานด้วยการใช้ Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) และสุดท้ายจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินแบบคงที่ ซึ่งในกรณี การศึกษาที่ 1, 2 และ 3 จะทำการทดสอบด้วย SEM เพื่อตรวจสอบโครงสร้างเม็ดดินกับเดกซ์ทรานที่ เกิดขึ้น MIP เพื่อทดสอบหาปริมาณของเดกซ์ทราน และหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน ส่วน ในกรณีการศึกษาที่ 4 และ 5 จะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินเพียงอย่างเดียว ส่วนในกรณีที่ 6 จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างที่ให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียและไม่ให้อาหาร เลี้ยงโดยจะทดสอบ ในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3 โดยจะทำการทดสอบด้วย SEM เพื่อ ตรวจสอบโครงสร้างเม็ดดินกับเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้น MIP เพื่อทดสอบหาปริมาณของเดกซ์ทราน และ หาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน

ซึ่งในตัวอย่างกรณีที่ 1, 2, และ 3 จะทำตัวอย่างการทดลองชุดละ 6 ตัวอย่าง ในส่วน กรณีศึกษาที่ 4 และ 5 จะใช้เพียงชุดละ 1 ตัวอย่าง ส่วนในกรณีที่ศึกษาที่ 6 จะเป็นการใช้ตัวอย่างใน กรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3 ดำเนินการต่อ

โดยการศึกษานี้จะใช้ทรายออตตาวาออตตาวา (Ottawa F110, U.S. Silica, Frederick, Maryland, U.S.A.) ในการทดลอง และใช้แบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* ซึ่งแบคทีเรีย สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนได้ (Zurera-Cosano et al., 2006) และแบคทีเรียชนิดนี้ถึงแม้จะมีการหยุดให้อาหารเลี้ยงก็ยังสามารถคงสภาพได้ (Treebupachatsak and Kamchoom, 2021) พร้อมกันนั้นแบคทีเรียเมื่อได้รับสารอาหารจะทำการสร้าง Biopolymer เข้าไปอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินเปลี่ยนแปลง (Davis et al., 2009; Baveye et al., 1998)

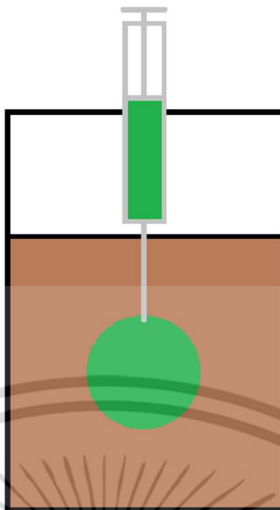


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย (ก) กระจกทดสอบ (ข) ตัวอย่างการทดสอบ (ค) ถึงเก็บกระจก (ง) การวัดเดกซ์ทราน

3.2 กรณีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 กรณีที่ 1 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบฉีดแบคทีเรียไปบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างดิน

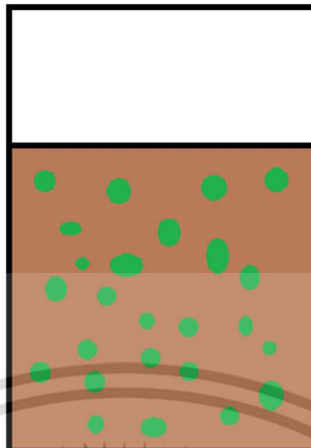
ในการศึกษากรณีที่ 1 จะทำการบดอัดดินตัวอย่างลงไปนในกระจกตัวอย่างดิน หลังจากนั้นนำแบคทีเรียที่เตรียมไว้ฉีดไปบริเวณกึ่งกลางดินตัวอย่าง โดยการให้อาหารแก่แบคทีเรียจะเป็นการเทราดสารอาหารลงบนผิวบนของตัวอย่างปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และให้สารอาหารไหลลงไปตามแรงโน้มถ่วง โดยด้านล่างของกระจกตัวอย่างจะทำการเจาะรูเพื่อให้น้ำและสารอาหารสามารถไหลผ่านได้ และการให้อาหารจะทำทุกๆ 4 วัน และการเก็บรักษาสภาพดินจะนำกระจกตัวอย่างลงไปแช่ในกล่องที่มีน้ำ โดยน้ำจะท่วมเหนือดินตัวอย่าง 1 เซนติเมตรเพื่อให้เป็นดินที่อิ่มน้ำ เมื่อครบตามกำหนดเวลาจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ ปริมาณเดกซ์ทราน และ ตรวจสอบโครงสร้างของเม็ดดินกับแบคทีเรีย



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบฉีดแบคทีเรีย

3.2.2 กรณีที่ 2 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบผสมลงไปในเม็ดดิน

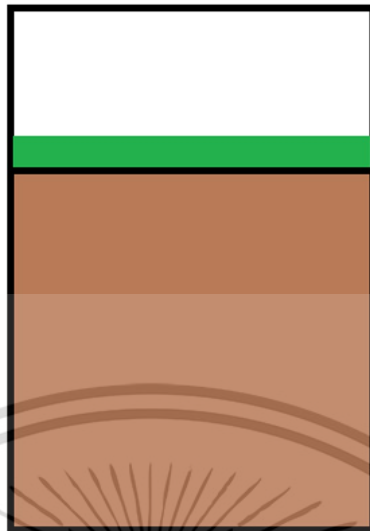
ในการศึกษากรณีที่ 2 จะทำการนำแบคทีเรียผสมลงไปในตัวอย่งดินที่เตรียมไว้ให้ทั่ว แล้วนำไปดินตัวอย่างที่ผสมแบคทีเรียไปบดอัดลงในกระบอกตัวอย่าง โดยการให้อาหารแก่แบคทีเรียจะเป็นการเทราดสารอาหารลงบนผิวบนของตัวอย่างปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และให้สารอาหารไหลลงไปตามแรงโน้มถ่วง โดยด้านล่างของกระบอกตัวอย่างจะทำการเจาะรูเพื่อให้ น้ำและสารอาหารสามารถไหลผ่านได้ และการให้อาหารจะทำทุกๆ 4 วัน และการเก็บรักษาสภาพดินจะนำกระบอกตัวอย่างลงไปแช่ในกล่องที่มีน้ำโดยน้ำจะท่วมเหนือดินตัวอย่าง 1 เซนติเมตรเพื่อให้เป็นดินที่อึมน้ำ เมื่อครบตามกำหนดเวลาจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ ปริมาณเดกซ์ทราน และ ตรวจสอบโครงสร้างของเม็ดดินกับแบคทีเรีย



รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบผสมลงไปในเม็ดดิน

3.2.3 กรณีที่ 3 การผสมแบคทีเรียกับตัวอย่างดินแบบเทราดไปบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างดิน

ในการศึกษากรณีที่ 3 จะทำการบดอัดดินตัวอย่างลงไปนในกระบอกตัวอย่างดิน หลังจากนั้นนำแบคทีเรียที่เตรียมไว้เทราดลงบนพื้นผิวดินตัวอย่าง โดยการให้อาหารแก่แบคทีเรียจะเป็นการเทราดสารอาหารลงบนผิวบนของตัวอย่างปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และให้สารอาหารไหลลงไปตามแรงโน้มถ่วง โดยด้านล่างของกระบอกตัวอย่างจะทำการเจาะรูเพื่อให้น้ำและสารอาหารสามารถไหลผ่านได้ และการให้อาหารจะทำทุกๆ 4 วัน และการเก็บรักษาสภาพดินจะนำกระบอกตัวอย่างลงไปแช่ในกล่องที่มีน้ำ เพื่อให้เป็นดินที่อมน้ำ เมื่อครบตามกำหนดเวลาจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ ปริมาณเดกซ์ทราน และตรวจสอบโครงสร้างของเม็ดดินกับแบคทีเรีย



รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 3 การผสมตัวอย่างแบคทีเรียกับดินด้วยวิธีเทราดลงบนผิว

3.2.4 กรณีที่ 4 การนำตัวอย่างดินผสมกับปูนซีเมนต์

ในการศึกษากรณีที่ 4 จะทำการนำตัวอย่างทรายออกตาวาที่ได้จากการอบ นำมาผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ จะใช้ 10% ของปริมาณดิน แล้วนำไปบดอัดลงกระบอกตัวอย่าง โดยการบดอัดจะบดอัด 5 ชั้น แต่ละชั้นมีความหนาแน่น 1560 ± 10 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งตัวอย่างนี้ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการผสมกับแบคทีเรียในเรื่องค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน ซึ่งการเก็บรักษาจะทำให้สภาพดินภายในอิ่มน้ำตลอดเวลา

3.2.5 กรณีที่ 5 ตัวอย่างดินเปล่า

ในการศึกษากรณีที่ 5 จะทำการนำตัวอย่างทรายออกตาวาที่อบแล้ว นำมาบดอัดลงกระบอกตัวอย่างลง 5 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนาแน่น 1560 ± 10 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 5 จะไม่มีการติดตั้งแบคทีเรีย แต่จะทำการเทราดสารอาหารเลี้ยงของแบคทีเรียลงบนผิวตัวอย่าง ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร ทุกๆ 4 วันเป็นระยะเวลา 16 วัน ซึ่งตัวอย่างนี้ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการผสมกับแบคทีเรียในเรื่องค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน ซึ่งการเก็บรักษาจะทำให้สภาพดินภายในอิ่มน้ำตลอดเวลา

3.2.6 กรณีที่ 6 การให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรีย

ในกรณีศึกษาที่ 6 เป็นการศึกษาการให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียในการกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 โดยจะให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียที่ผสมลงไปในกระบอกตัวอย่าง

เป็นเวลา 16 วัน และหลังจากนั้นทำการหยุดให้อาหารเลี้ยงเป็นเวลา 14 วันหลังจากวันที่ 16 เพื่อทำการตรวจสอบความสามารถ สภาพ และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินเมื่อแบคทีเรียขาดสารอาหาร เทียบกับสภาพตอนที่ได้รับอาหาร โดยจะทำการตรวจสอบโครงสร้างระหว่างเม็ดดินและแบคทีเรีย ปริมาณของเดกซ์ทราน และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน

ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปตัวอย่างการทดลอง

Series	ID	No. of sample	Cement (%)	Microbial medium (ml)	Culture medium (ml)	Measurement (Number of sample)			
						Hydraulic conductivity (m/s)		Dextran Concentration (%)	SEM&MIP
						During medium supply	Without medium supply		
1	MI	6	-	50	1,000	4	4	2	2
2	MM	6	-	50	1,000	4	4	2	2
3	MP	6	-	50	1,000	4	4	2	2
4	CM	1	10	-	-	1	1	-	-
5	S	1	-	-	1,000	1	-	-	-

3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการศึกษา

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน

ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างดินเป็น ทรายออกตตาวา โดยจะนำทรายออกตตาวาไปอบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำทรายมาที่อบผสมกับน้ำกลั่นปริมาณ 14 % แล้วนำมาบดอัด 5 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะควบคุมความหนาแน่นที่ 1560 ± 10 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร หลังจากนั้นจะทำการเตรียมตัวอย่างทั้งหมด 5 กรณีการศึกษา โดยในกรณีที่ 1, 2 และ 3 จะมีแบคทีเรียผสมอยู่ในทรายตัวอย่างตามกรณีศึกษา และจะมีการเตรียมตัวอย่างทรายสำหรับทำการเปรียบเทียบโดยมีการเตรียมทรายเปล่าโดยไม่มีการผสมสารเคมีหรือแบคทีเรีย และอีกตัวอย่างจะเป็นการเตรียมตัวอย่างผสมกับซีเมนต์ ซึ่งใน 2 ตัวอย่างหลังจะใช้เพื่อทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพียงเท่านั้น โดยในกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 จะทำการศึกษาโครงสร้างของแบคทีเรีย ปริมาณของเดกซ์ทราน และค่าสัมประสิทธิ์การไหล

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวแปรของทรายออกตาวา

Soil properties	Value	Unit
Specific gravity (Gs)	2.65	-
Maximum density	1,781	kg/m ³
Minimum density	1,469	kg/m ³
Maximum void ratio	0.80	-
Minimum void ratio	0.49	-
Mean grain diameter (d_{50})	0.2	mm
Saturated permeability	1.2×10^{-4}	m/s

3.3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. ครอบ PVC หน้า 8 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 มม. สูง 650 มม. พร้อมทำการเจาะรู 3 ตำแหน่ง คือ -150, -350 และ -550 มม. ตามลำดับ (เทียบจากปากครอบ) และทำการเจาะรูด้านล่างของครอบตัวอย่างเพื่อให้สามารถไหลผ่านได้
2. เครื่องชั่งแบบละเอียด 0.001 กิโลกรัม
3. ถาดสำหรับอบทราย

3.3.1.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างดิน

1. นำตัวอย่างร่อนด้วยตะแกรงเบอร์
2. นำตัวอย่างทรายไปอบที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. วัดขนาดครอบเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปหาปริมาณดิน
4. นำตัวอย่างดินไปบดอัดลงในครอบจำนวน 5 ชั้น ซึ่งก่อนการจะนำดินไปบดอัดจะทำการใส่ตัวกรองหนา 50 มม ไว้ที่ด้านล่างของครอบ หลังจากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการใส่ดินลงกระบอกตัวอย่าง โดยแต่ละชั้นจะทำการบดอัดดินและทำการชั่งเพื่อตรวจสอบหาความหนาแน่นที่ต้องการ โดยทรายจะทำการบดอัดสูง 550 มม.

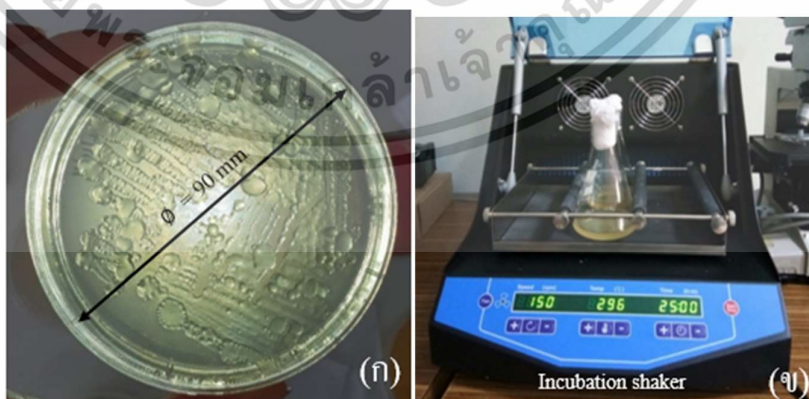


รูปที่ 3.5 รูปกระบอกตัวอย่าง PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และสูง 650 มม.

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแบคทีเรีย

การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในอาหารเหลวเพื่อหาช่วงเวลาการเจริญเติบโตสูงสุดของแบคทีเรียเพื่อนำไปใช้ในการผสมกับตัวอย่างดิน โดยการทดลองนี้จะใช้แบคทีเรียที่มีชื่อเรียก *Leuconostoc mesenteroides* TISTR473 ซึ่งแบคทีเรียประเภทนี้หาได้ง่ายและถูกใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร

โดยขั้นตอนการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์จะทำการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส พร้อมกับควบคุมจำนวนการหมุนของเครื่อง Incubation Shaking ที่ 150 รอบ/นาที และมีการตรวจสอบการเจริญเติบโตของแบคทีเรียโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer



รูปที่ 3.6 รูปแสดง (ก) *Leuconostoc mesenteroides* TISTR473 (ข) การผสมแบคทีเรียและอาหารเลี้ยง

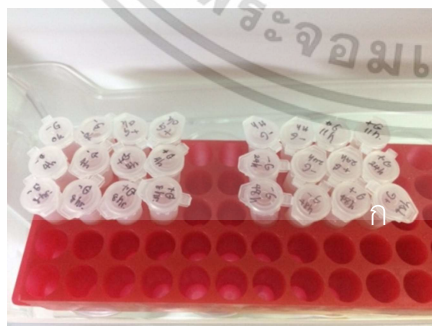
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนของอาหารเหลวในการเลี้ยงแบคทีเรีย

ส่วนผสมอาหาร	ปริมาณ (กรัม)
ซูโครส (Sucrose)	100
ทริปโตน (Tryptone)	10
ยีสต์ (Yeast Extract)	5
วุ้น (Agar)	15
น้ำกลั่น (Distilled Water)	1,000

วิธีการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย

- 1.เตรียมอาหารเหลวสำหรับแบคทีเรียโดยสารอาหารและสัดส่วนแสดงในตารางที่
- 2.นำแบคทีเรียใส่ลงไปในอาหารเลี้ยง
- 3.ทำการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียลงในขวดแก้ว Flask และนำเข้าเครื่อง Shaking Incubate โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส พร้อมทำการควบคุมการหมุนเครื่องที่ 150 รอบต่อนาที
- 4.ทำการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียที่ 4, 8, 11, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อทำการทดสอบการเจริญเติบโตโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ซึ่งจะทำการเลือกค่าการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียที่ 600 นาโนเมตร แล้วนำมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียและเวลา ซึ่งกราฟสามารถบ่งบอกถึงอัตราการเจริญเติบโตหรือจำนวนของแบคทีเรีย



รูปที่ 3.7 (ก)แสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียเพื่อนำไปทดสอบด้วย Spectrophotometer
(ข)แสดงการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่อง Spectrophotometer

3.3.3 ขั้นตอนการผสมแคทรีเรียกับตัวอย่างดิน

3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1

การเตรียมตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1 เป็นการนำแคทรีเรียที่เลี้ยงฉีดเข้าไปในบริเวณกึ่งกลางบริเวณตัวอย่างดินในกระบอกที่ทำการบดอัดแล้ว โดยจะใช้แคทรีเรียปริมาณ 50 มิลลิลิตร ขณะทำการฉีดจะควบคุมแรงดันในการฉีดโดยใช้เวลาในการฉีด 5 นาที



รูปที่ 3.9 แสดงการเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษากรณีที่ 1 เป็นขั้นตอนการฉีดแคทรีเรียเข้าไปในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 การเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2

การเตรียมตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 2 เป็นการนำแบริที่เรียผสมกับตัวอย่างดินก่อนการบดอัด เมื่อผสมเสร็จจึงนำดินตัวอย่างที่ได้รับการผสมไปบดอัดลงในกระบอกเก็บตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ปริมาณแบริที่เรียปริมาณ 50 มิลลิลิตร พร้อมผสมกับน้ำกลั่นปริมาณ 14 % โดยจะทำการบดอัดตัวอย่างดินจำนวน 5 ชั้น ให้ความหนาแน่น 1560 ± 10 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3.10 แสดงการเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2 ตัวอย่างดินที่ได้รับการผสมกับแบริที่เรีย

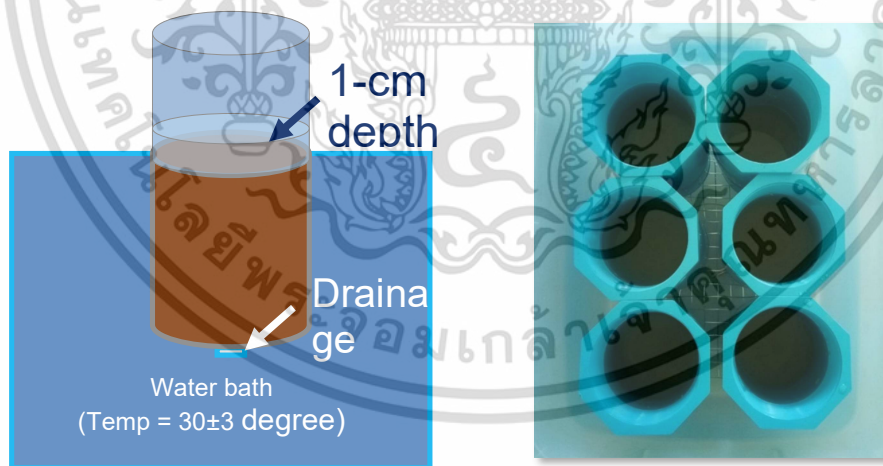
3.3.3.3 การเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 3

การเตรียมตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 3 เป็นการนำแบริที่เรียที่เลี้ยงเทราดบนพื้นผิวบนตัวอย่างดินในกระบอกที่ทำการบดอัดแล้ว โดยจะใช้แบริที่เรียปริมาณ 50 มิลลิลิตรเทราดลงไป



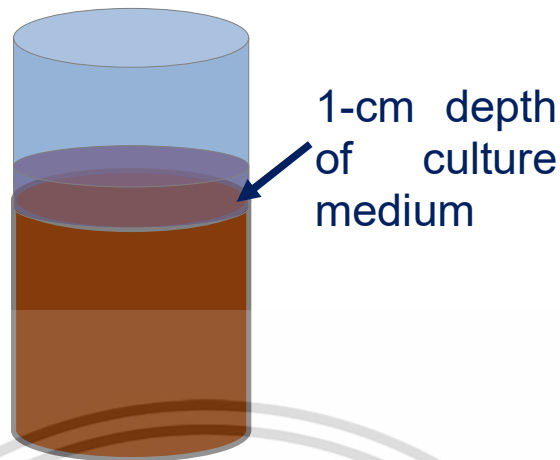
รูปที่ 3.11 แสดงการเตรียมตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 3 การเทรดแบคทีเรียลงบนผิวตัวอย่างดิน

ซึ่งการเก็บรักษาตัวอย่างดินที่ผสมกับแบคทีเรียจะทำการนำกระบอกตัวอย่างไปแช่ไว้ในถังน้ำเพื่อให้ดินมีความอมน้ำตลอดเวลา โดยอุณหภูมิจะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และจะทำการเติมอาหารเหลว 1000 มิลลิลิตร สำหรับแบคทีเรีย ทุกๆ 4 วันต่อครั้ง ในช่วง 16 วันแรก ซึ่งการให้อาหารจะทำการเทรดสารอาหารลงบนผิวดินตัวอย่าง และมีการเปิดช่องบริเวณใต้กระบอกตัวอย่างเพื่อให้สารอาหารสามารถไหลออกได้ ซึ่งเป็นการจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพดิน และหลังจาก 16 วันแรก จะทำการหยุดให้อาหารเลี้ยงอีก 14 วัน



รูปที่ 3.12 รูปแสดงการเก็บรักษาตัวอย่างดินให้อยู่ในสภาพที่อมน้ำตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 รูปแสดงตัวอย่างการให้สารอาหารแก่แบคทีเรียในกระบอกตัวอย่าง

3.3.4 การทดสอบตัวอย่างดิน

โดยในการทดสอบตัวอย่างจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 วิธี โดยจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของน้ำในดินซึ่งจะใช้การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดินแบบเสดคงที่ (Constant head) พร้อมทั้งทำการตรวจสอบโครงสร้างของเม็ดดินและแบคทีเรีย ซึ่งจะทำการทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และสุดท้ายจะเป็นการทดสอบหาค่าความพรุนในเม็ดดินเพื่อหาปริมาณความหนาแน่นของปริมาณเม็ดดินและการกระจายตัวของแบคทีเรียซึ่งจะใช้วิธี

3.3.4.1 การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำในดิน Soil Permeability Test (มาตรฐานอ้างอิง ASTM D 2434)

การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำในดิน Soil Permeability Test จะใช้วิธีทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Constant Head) เนื่องจากมาจากการทดลองในการวิจัยนี้เป็นประเภททราย ซึ่งมาค่าการซึมผ่านสูง โดยหลักการการทดสอบจะทำการปล่อยน้ำจากที่สูงให้ไหลผ่านกระบอกตัวอย่าง โดยการทดสอบตัวอย่างจะทำการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน ทุกๆ 4 วัน

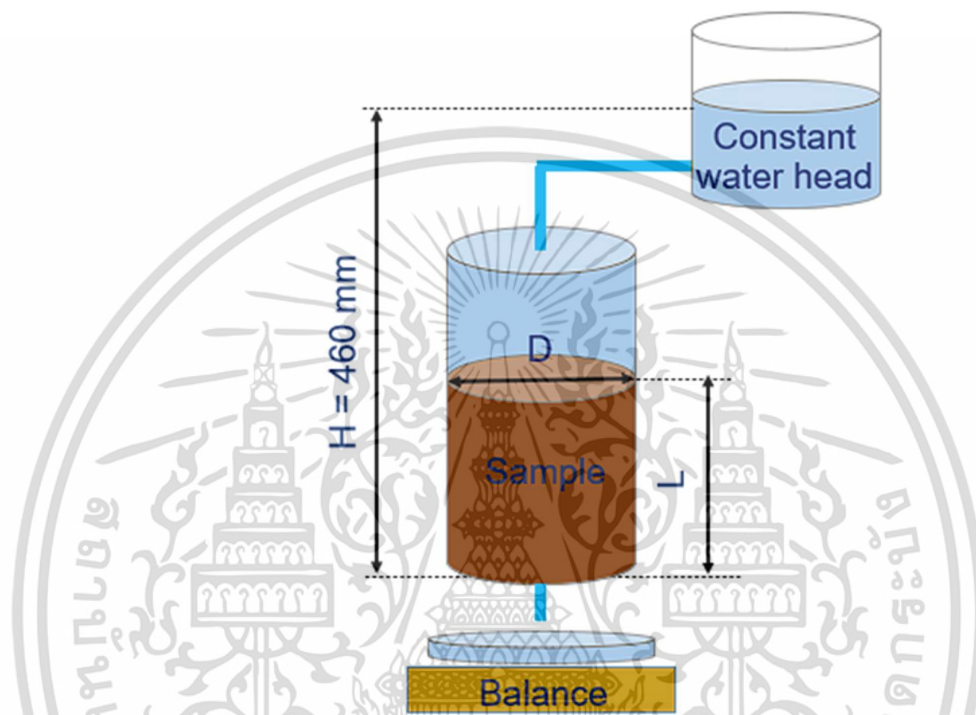
วิธีการทดลอง

1. นำกระบอกตัวอย่างประกอบเข้ากับชุดทดสอบวัดอัตราการไหลของน้ำแบบคงที่

2. เริ่มการทดสอบเข้าไปในกระบอกตัวอย่าง และทำการวัดน้ำที่ออกจากช่องน้ำออกที่เตรียมไว้แล้วจึงวัดปริมาณน้ำที่ไหลออกในเวลาที่กำหนด

3. เมื่ออัตราการไหลคงที่จะทำการเริ่มจับเวลาพร้อมตรวจหาปริมาณน้ำที่ไหลออกจากกระบอกตัวอย่าง

4. ทำการทดสอบซ้ำกับตัวอย่างทั้งหมด



รูปที่ 3.14 แสดงการทดสอบหาค่าการซึมของน้ำในดินโดยใช้อัตราคงที่

3.3.4.2 การทดสอบ SEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

Scanning Electron Microscopy หรือการวิเคราะห์ SEM ให้ภาพที่มีความละเอียดสูงซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการประเมินวัสดุต่างๆ สำหรับรอยแตกที่พื้นผิว ข้อบกพร่อง สิ่งปนเปื้อน หรือการกัดกร่อน ในการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจสอบการยึดเกาะของแบคทีเรียกับเม็ดดินด้วยเดกซ์ทราน ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างจากกระบอกแล้วนำมาตรวจสอบ โดยขั้นตอนการเก็บจะใช้หลอดโลหะขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ 5 มิลลิเมตร กระบอกหนา 1 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร ในการสอดเก็บตัวอย่าง บริเวณรูปที่ได้ทำการเจาะไว้ ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างยาว 5-7 มิลลิเมตร โดยให้อัตราส่วนความยาวในการเก็บตัวอย่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าใกล้เคียงเท่ากับ 1 เพื่อลดการรบกวนต่อตัวอย่างดินให้น้อยที่สุด (Clayton, 1986) พร้อมกับนำตัวอย่างที่ได้ไปอบ ซึ่งการอบจะ

ส่งผลเพียงเล็กน้อย โดยอัตราการรอดของแบคทีเรียจะอยู่ที่ 80% (Shinohara, 2000) โดยการทดสอบจะทำการเก็บตัวอย่างมาทดสอบทุกๆ 2 วัน ซึ่งขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำตัวอย่างดินที่ผสมกับแบคทีเรียไปอบในตู้อบ 24 ชั่วโมง
2. นำตัวอย่างดินที่ผสมแบคทีเรียไปเคลือบทองคำเพื่อให้ตัวอย่างเป็นสื่อสามารถนำไฟฟ้า
3. นำตัวอย่างเข้าเครื่อง SEM และทำการตรวจโครงสร้างของเม็ดดินและเดกซ์ทราน



รูปที่ 3.15 แสดงการนำตัวอย่างดินเคลือบทองคำตัวอย่างดินที่จะนำไปส่อง



รูปที่ 3.16 แสดงการใช้เครื่อง SEM เพื่อตรวจหาโครงสร้างระหว่างดินและเดกซ์ทราน

3.3.4.3 การทดสอบหารูพรุน Mercury Intrusion Porosimeter (MIP)

Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบหารูพรุนของวัสดุโดยใช้ปรอท โดยใช้หลักของความดันและรัศมีของรูพรุนวัสดุ โดยจะสามารถใช้รัศมีรูพรุนได้ตั้งแต่ 0.03-500 ไมโครเมตร

โดยทั่วไปโครงสร้างดินจะมีช่องว่างและรูพรุน แต่เมื่อทำการใส่แบคทีเรียพร้อมอาหารเลี้ยงเข้าไปในดิน แบคทีเรียจะเจริญเติบโตและขยายพื้นที่พร้อมสร้างเดกซ์ทรานออกมา และเดกซ์ทรานที่แบคทีเรียผลิตออกมาจะทำการเคลือบ ยึดติดกับเม็ดดินและอุดตัวช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะทำให้การเก็บตัวอย่างจากกระบอกตัวอย่างดินที่ระดับผิวดิน กึ่งกลาง และด้านล่าง โดยจะเก็บผ่านช่องที่เจาะเตรียมไว้ ขณะการเก็บตัวอย่างจะทำการรบกวนดินให้น้อยที่สุด โดยจะเก็บด้วยวิธีจะใช้หลอดโลหะขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ 5 มิลลิเมตร กระบอกหนา 1 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตรในการสอดเก็บตัวอย่างบริเวณรูที่ได้ทำการเจาะไว้ ซึ่งจะทำให้การเก็บตัวอย่างยาว 5-7 มิลลิเมตร โดยให้อัตราส่วนความยาวในการเก็บตัวอย่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าใกล้เคียงเท่ากับ 1 เพื่อลดการรบกวนต่อตัวอย่างดินให้น้อยที่สุด (Clayton, 1986) ซึ่งเมื่อเก็บตัวอย่างออกมาจากกระบอกตัวอย่างจะทำการแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเพื่อให้คงสภาพของโครงสร้างดินและแบคทีเรีย ซึ่งการใช้วิธีแช่ด้วยไนโตรเจนเหลวแบคทีเรีย *Lueconostoc Mesentroides* จะสามารถคงสภาพและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอดจากการแช่แข็งได้ถึง 80% (Shinohara et al., 2000) โดยการทดสอบจะทำการเก็บตัวอย่างมาทดสอบทุกๆ 2 วัน



รูปที่ 3.17 แสดงหลอดโลหะใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.18 แสดงการเครื่องทดสอบการหารูพรุนโดย Mercury Intrusion Porosimeter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

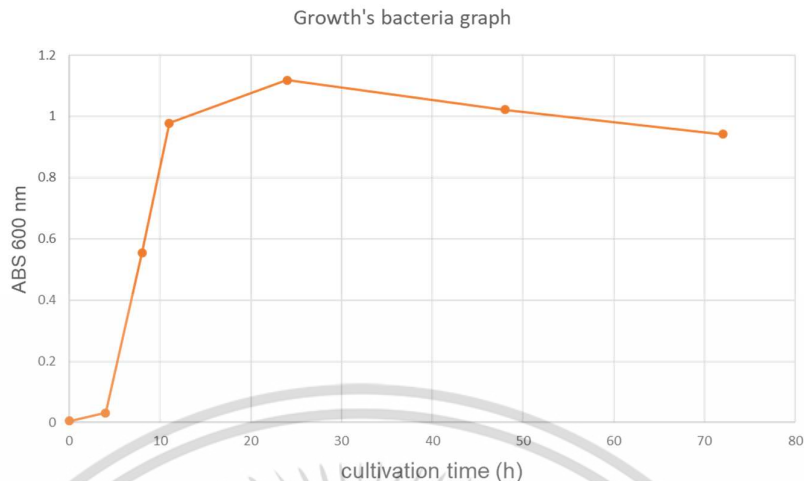
ผลการศึกษาและอภิปราย

4.1 ผลของอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

การตรวจสอบการเติบโตของแบคทีเรียโดยจะทำการนำแบคทีเรียที่เพาะนำไปผสมกับอาหารเลี้ยงโดยจะทำการเลี้ยงในห้องปฏิบัติการที่ปลอดเชื้อ แล้วนำแบคทีเรียที่ได้ผสมกับอาหารเลี้ยงเข้าเครื่อง Shaking Incubator โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส พร้อมกับควบคุมความเร็วในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเพื่อให้อาหารเลี้ยงและแบคทีเรียผสมกันได้ดี หลังจากนั้นจะทำการทดสอบการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียที่ 600 nm โดยเครื่อง Spectrophotometer ทุกเวลาตามที่กำหนด โดยระยะเวลาดังนี้ 0, 4, 8, 11, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 nm และเวลาช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

Cultivation time (hour)	Absorbance 600 nm
0	0.006
4	0.032
8	0.554
11	0.978
24	1.118
48	1.022
72	0.942



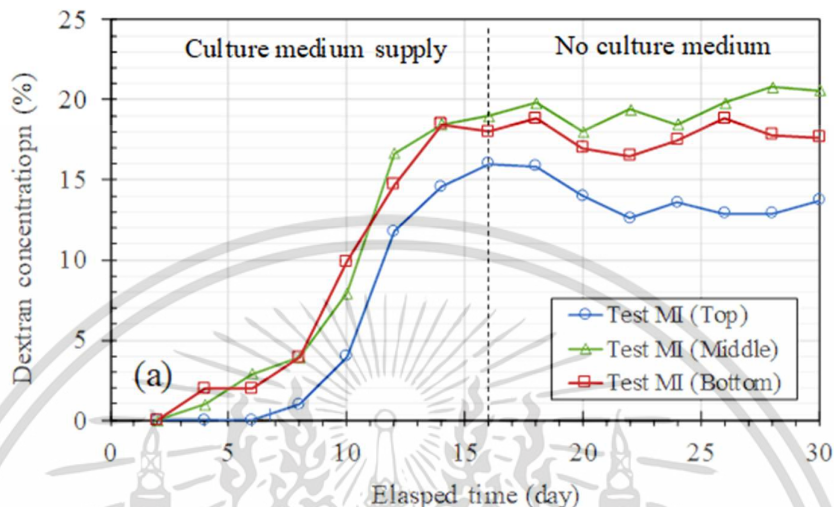
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียที่ 600 nm

จากตารางที่ 4.1 นำมาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4-1 โดยความสัมพันธ์ของกราฟคือระยะเวลาการเลี้ยงและค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 nm โดยระยะเวลาช่วง 0 ถึง 12 ชั่วโมงแรกอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะสูงมาก โดยหลังจาก 12 ชั่วโมงไปแล้วแบคทีเรียอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะช้าลง และเมื่อทำการทดสอบชั่วโมงที่ 24 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด โดยพบว่าหลังจากระยะเวลาที่ 24 ชั่วโมงแล้วอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเริ่มคงที่ ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้แบคทีเรียในชั่วโมงที่ 24 ในการนำไปติดตั้งลงในดินเพื่อให้แบคทีเรียมีประสิทธิภาพมากที่สุด

4.2 ผลการทดลองหาปริมาณของแบคทีเรีย

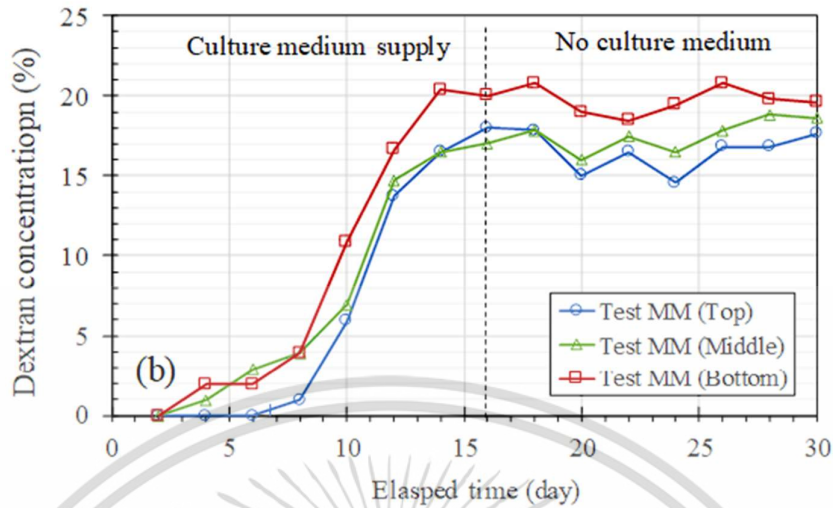
ผลการทดลองหาปริมาณของแบคทีเรียและผลิตภัณฑ์จากแบคทีเรียในตัวอย่างแต่ละประเภทการทดลอง ซึ่งตัวกระบอกตัวอย่างดินจะมีการเจาะรูไว้เพื่อสามารถเก็บตัวอย่างดินในระดับที่ผิวตัวอย่าง, กึ่งกลางตัวอย่าง และด้านล่างของกระบอกตัวอย่าง โดยทำการนำตัวอย่างดินออกกระบอกโดยรบกวนน้อยที่สุดโดยโดยขั้นตอนการเก็บจะใช้หลอดโลหะขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ 5 มิลลิเมตร กระบอกหนา 1 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร ในการสอดเก็บตัวอย่างบริเวณรูที่ได้ทำการเจาะไว้ ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างยาว 5-7 มิลลิเมตร เพื่อลดการรบกวนตัวอย่างโครงสร้างของเม็ดดินให้น้อยที่สุด หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างดินที่ได้ไปทดสอบหาปริมาณของแบคทีเรียด้วย Mercury Intrusion Porosimeter ซึ่งแบคทีเรียที่ผสมเข้าไปในดินจะเข้าไปอาศัยในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยขณะแบคทีเรียได้รับสารอาหารเลี้ยงจะแพร่ขยายพร้อมทั้งสร้างเด็กซ์ทรานเข้าไปอุดตันในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงทำให้ช่องว่างในดินเปลี่ยน ซึ่งการทดลองจะ

ทำการทดสอบในช่วงที่ให้สารอาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียเป็นเวลา 16 วัน และหลังจากวันที่ 16 จะหยุดให้อาหารเป็นเวลา 14 วัน



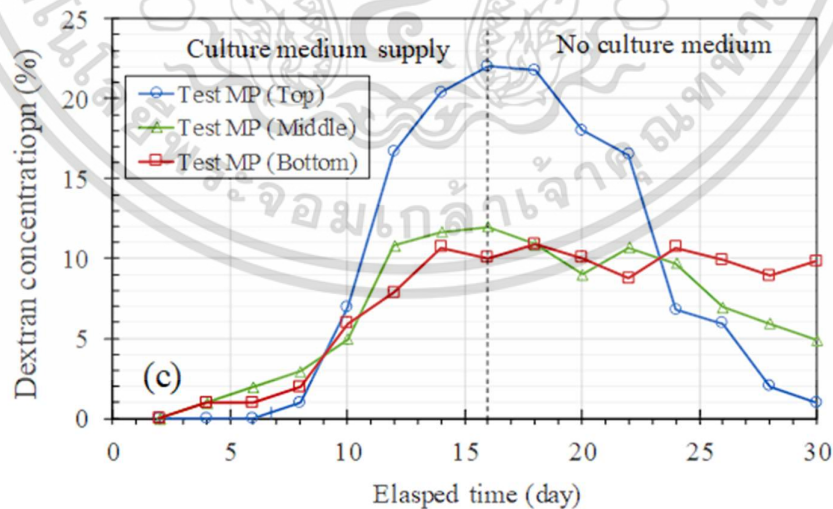
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและปริมาณของเดกซ์ทรานในตัวอย่างการทดลองที่ 1

รูปที่ 4.2 จะเป็นกราฟแสดงผลการทดลองของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1 ที่ใช้วิธีการฉีดแบคทีเรียเข้าไปบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างดิน ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง โดยปริมาณเดกซ์ทรานเกิดขึ้นสูงประมาณ 19% บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างและต่ำที่สุด 16% บริเวณใกล้ผิวของตัวอย่าง เมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียแนวโน้มของปริมาณเดกซ์ทรานกลับไม่ได้ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียช่วงระยะเวลาหนึ่งแบคทีเรียและเดกซ์ทรานยังสามารถคงสภาพได้อยู่



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและปริมาณของเดกซ์ทรานในตัวอย่างการทดลองที่ 2

รูปที่ 4.3 จะเป็นกราฟแสดงผลการทดลองของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 2 ที่ใช้วิธีการผสมแบคทีเรียพร้อมกับตัวอย่างดิน ซึ่งจากราฟจะเห็นได้ว่าเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณด้านล่างของกระบอกตัวอย่างโดยปริมาณเดกซ์ทรานเกิดขึ้นสูงประมาณ 19-21% และจากราฟยังเห็นได้ว่าปริมาณเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นในทุกบริเวณมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียแนวโน้มของปริมาณเดกซ์ทรานกลับไม่ได้ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียช่วงระยะเวลาหนึ่งแบคทีเรียและเดกซ์ทรานยังสามารถคงสภาพได้อยู่

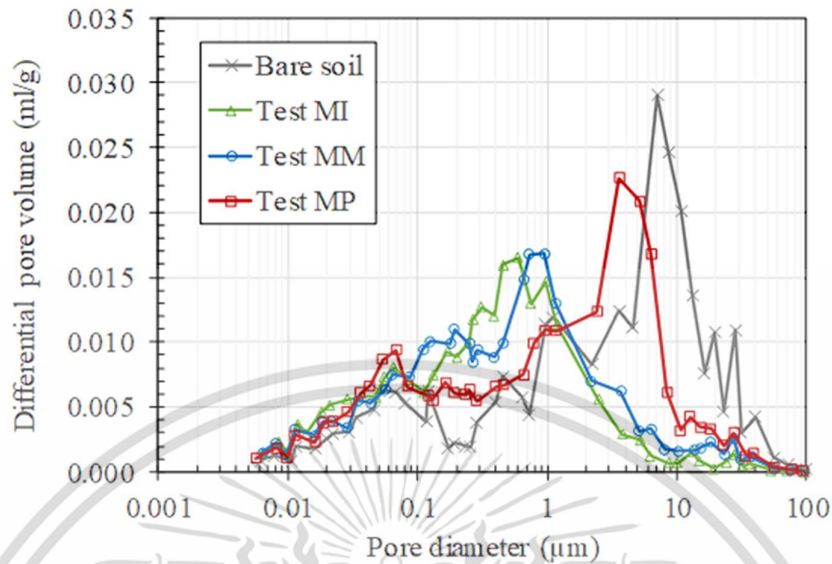


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและปริมาณของเดกซ์ทรานในตัวอย่างการทดลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 จะเป็นกราฟแสดงผลการทดลองของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 3 ที่ใช้วิธีการเทราดแบคทีเรียลงบนผิวตัวอย่างดิน ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากที่สุดในบริเวณผิวของกระบอกตัวอย่างโดยปริมาณเดกซ์ทรานเกิดขึ้นสูงประมาณ 22% บริเวณผิวบนของตัวอย่าง และปริมาณเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นในกึ่งกลางและด้านล่างของตัวอย่างนั้นเกิดเดกซ์ทรานน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างในกรณีการศึกษาที่ 1 และ 2 ซึ่งพบเพียง 10-12% โดยเทียบตำแหน่งเดียวกัน เมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียจะพบว่าเดกซ์ทรานที่บริเวณผิวของตัวอย่างนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยลดลงถึง 21% ซึ่งเมื่อเทียบกับบริเวณกึ่งกลางเดกซ์ทรานลดลงเพียง 5% และในส่วนบริเวณด้านล่างยังสามารถคงสภาพของเดกซ์ทราน

ซึ่งจากผลการทดสอบหาปริมาณของเดกซ์ทรานจะพบว่าในตัวอย่างการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ในช่วง 5 วันแรกที่มีการให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียจะพบเดกซ์ทรานได้น้อยมาก (Rofle M. et al.,2012) โดยเฉพาะบริเวณผิวด้านบนของทุกตัวอย่างจะพบปริมาณเดกซ์ทรานน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากช่วงแรกสารอาหารที่เลี้ยงแบคทีเรียมีการไหลลงด้านล่างอย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การไหลในทรายมีค่าสูง หลังจาก 5 วันกลับพบว่าปริมาณของเดกซ์ทรานเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากแบคทีเรียเริ่มมีการดูดซึมอาหาร (Mataragas M. et al.,2003) และเมื่อผ่านไป 15 วัน ค่าอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเริ่มคงที่ ซึ่งในกรณีการศึกษาที่ 1 พบปริมาณเดกซ์ทรานมากที่สุดที่ 19 % บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง และพบปริมาณที่ต่ำที่สุดปริมาณ 16% บริเวณใกล้เคียงกับผิวของตัวอย่าง โดยผลการทดสอบในกรณีการศึกษาที่ 1 และ 2 ในทุกความลึกพบว่ามีปริมาณแบคทีเรียที่ใกล้เคียงกัน ในส่วนของกรณีการศึกษาที่ 3 พบว่าเดกซ์ทรานจะเกิดขึ้นมากในบริเวณใกล้กับผิวบน โดยพบปริมาณ 22% และในส่วนของบริเวณกึ่งกลางและด้านล่างของตัวอย่างพบปริมาณเดกซ์ทราน 10-12%



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องว่างของรูพรุนในตัวอย่างและปริมาณรูพรุนในตัวอย่าง

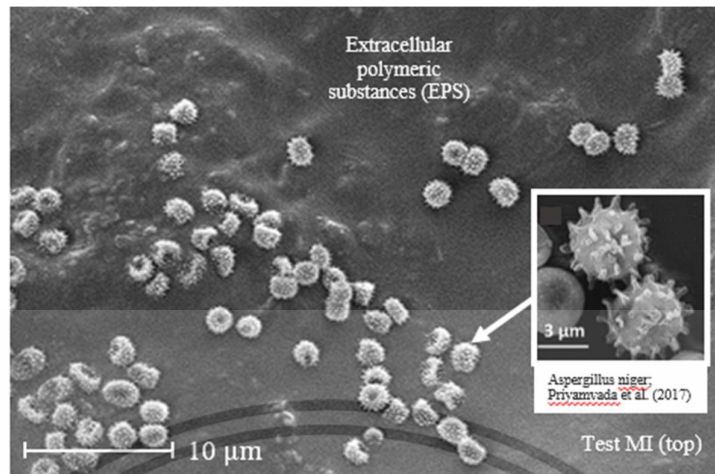
จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องว่างของรูพรุนในดินและปริมาณรูพรุนในตัวอย่าง ซึ่งมีการนำค่าขนาดของช่องว่างของรูพรุนกับปริมาณที่แตกต่างระหว่างรูพรุน ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3 มาเทียบกับตัวอย่างดินเปล่า ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างที่ 7 ไมโครเมตร

ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดความกว้างของรูพรุนในช่วงตั้งแต่ 6 ไมโครเมตรขึ้นไป ในตัวอย่างดินเปล่านั้นมีปริมาณรูพรุนที่สูง แต่เมื่อทำการติดตั้งแบคทีเรียเข้าไปในดินด้วยวิธีต่างๆ ปรากฏว่าปริมาณของรูพรุนที่มีความกว้างตั้งแต่ขนาด 6 ไมโครเมตรขึ้นไปมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากจากแบคทีเรียที่ติดตั้งเข้าไปในดินทำการผลิตเดกซ์ทรานออกมาและทำการอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

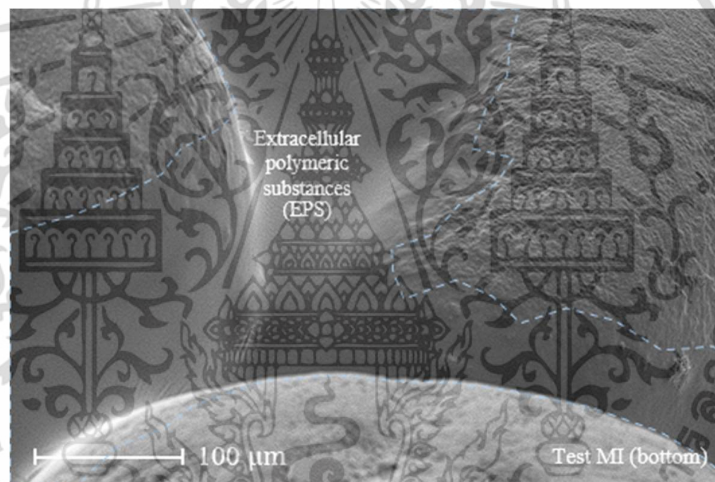
4.3 ผลการทดลองจากการส่องกราดโดย SEM

เมื่อทำการนำแบคทีเรียติดตั้งเข้าไปในดินในกรณีต่างๆ จะให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียซึ่งแบคทีเรียจะมีการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในช่วง 5-7 วัน โดยจะมีการนำดินตัวอย่างที่ได้รับการผสมแบคทีเรียมาตรวจสอบโดยจะใช้การตรวจสอบด้วยการส่องกราดด้วยวิธี SEM ซึ่งจะเป็นการนำตัวอย่างตัวนามาส่องเพื่อศึกษาโครงสร้างในเม็ดดิน ศึกษาลักษณะการอุดตันโดยเดกซ์ทรานที่เป็นผลผลิตจากแบคทีเรียในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะมีการเก็บตัวอย่างดินทุกกรณี โดยแต่ละกรณีจะทำการเก็บบริเวณใกล้เคียงกับผิวดิน กึ่งกลางตัวอย่าง และบริเวณด้านล่างของกระบอกตัวอย่าง ซึ่งการใช้วิธีการส่องกราดด้วยวิธี SEM ต้องมีการนำตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองเพื่อให้ตัวอย่างเป็นสื่อที่สามารถนำไฟฟ้าก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



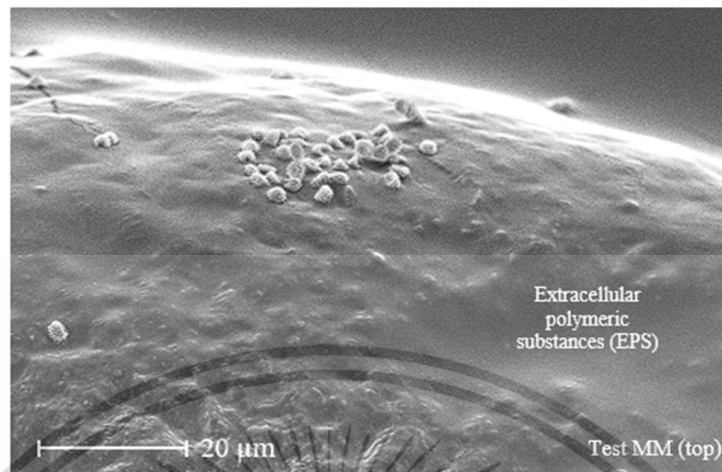
รูปที่ 4.6 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบน ใช้กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร



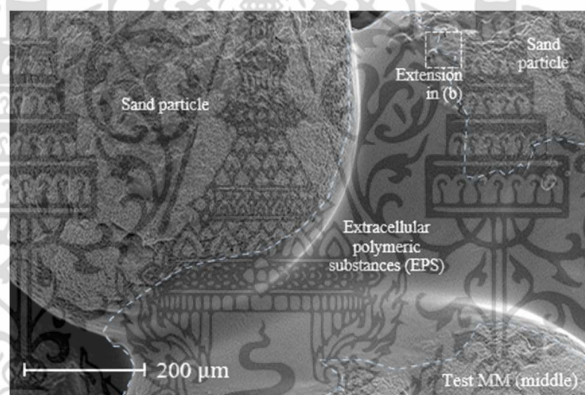
รูปที่ 4.7 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่าง ใช้กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะเป็นการถ่ายภาพด้วย SEM ในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1 โดยรูปที่ 4.6 เป็นภาพถ่ายจากผิวด้านบน ซึ่งจากรูปที่ 4.6 ที่เป็นการนำตัวอย่างผิวด้านบนของตัวอย่างมาส่องด้วย SEM โดยใช้กำลังขยายขนาด 10 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าระหว่างเม็ดดินจะมีเดกซ์ทรานปกคลุมอยู่ และยังพบเห็นแบคทีเรียชนิดอื่นเจริญเติบโตขึ้นมาซึ่งแบคทีเรียมีชื่อว่า *Aspergillus Niger* (Priyamvada H. et al., 2017) ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้เป็นเชื้อราประเภทหนึ่ง โดยแบคทีเรียชนิดนี้จะมีการแย่งอาหารจากแบคทีเรียที่ใช้ทดลอง ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ใช้ทำการศึกษา ส่วนในรูปที่ 4.7 จะใช้กำลังขยายขนาด 100 ไมโครเมตรในการส่องด้วย SEM ในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1 บริเวณด้านล่าง จากรูปจะเห็นได้ว่าเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรานั้นจะทำการเคลือบผิวเม็ดดินและอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

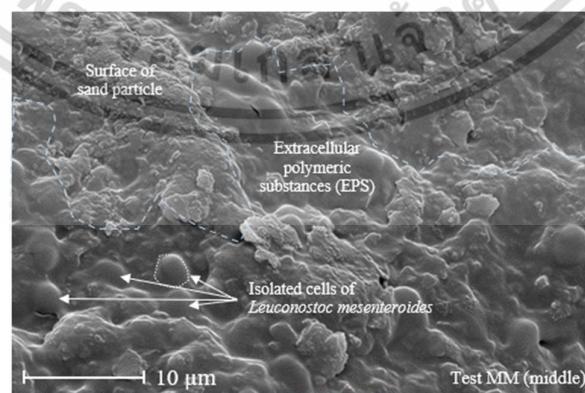
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบน ใช้กำลังขยาย 20 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.9 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณกึ่งกลาง กำลังขยายที่ 200 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.10 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณกึ่งกลาง กำลังขยายที่ 10 ไมโครเมตร

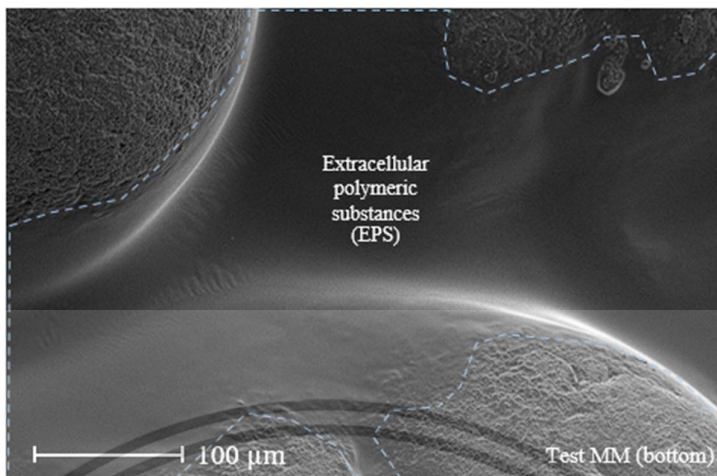
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 เป็นการถ่ายภาพด้วย SEM ของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 2 ซึ่งรูปที่ 4.8 เป็นถ่ายภาพที่ใช้กำลังขยาย 20 ไมโครเมตร ถ่ายตัวอย่างที่เก็บจากผิวด้านบนของกรณีการศึกษาที่ 2 ซึ่งผิวด้านบนของตัวอย่างจะพบเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง และยังพบแบคทีเรียชนิดอื่นอีกด้วย (Aspergillus Niger) ซึ่งเป็นแบคทีเรียประเภทเดียวที่พบในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1

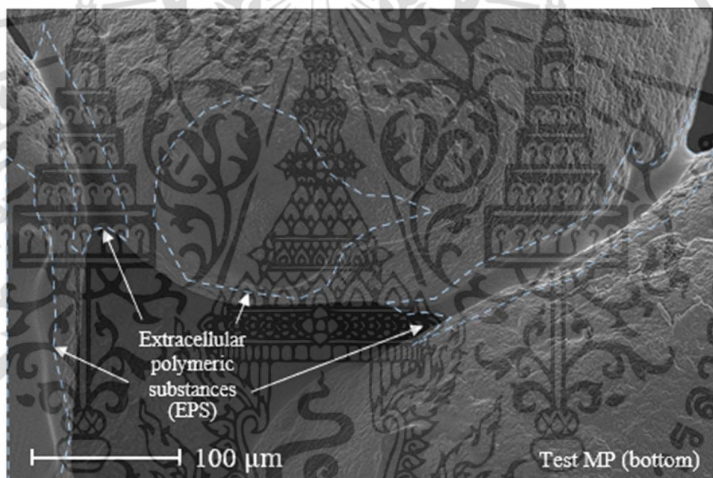
ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 เป็นภาพถ่ายจากตัวอย่างที่เก็บบริเวณกึ่งกลางของกรณีการศึกษาที่ 2 โดยใช้กำลังขยายที่ 200 และ 10 ไมโครเมตร ตามลำดับซึ่งรูป 4.9 จะเป็นการถ่ายโดยใช้กำลังขยาย 200 ไมโครเมตรจะเห็นได้ว่า เดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียปกคลุมระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ซึ่งจากรูปที่ 4.10 จะใช้กำลังขยายที่ 10 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียปกคลุมเม็ดดินและช่องว่าง



รูปที่ 4.11 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณด้านบน ใช้กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร



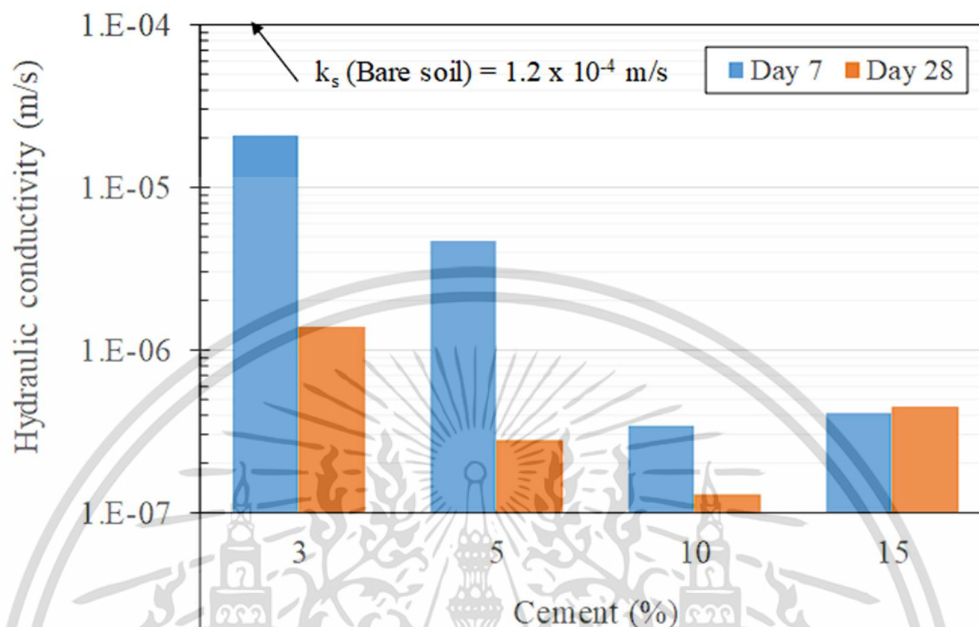
รูปที่ 4.12 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณ
ด้านล่าง ใช้กำลังขยาย 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.13 แสดงภาพจากการถ่ายด้วย SEM ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 โดยเก็บตัวอย่างบริเวณ
ด้านล่าง ใช้กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร

จากรูปที่ 4.11 เป็นการถ่ายภาพจากผิวด้านบนของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 3 ที่กำลังขยายที่ 10 ไมโครเมตร ซึ่งจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่า ในตัวอย่างดินมีเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียที่ใช้ทดลองเกิดขึ้น และยังมีเกิดการเกิดของแบคทีเรียชนิดอื่นขึ้นด้วย (*Aspergillus Niger*) ซึ่งในภาพจะเห็นได้ว่าแบคทีเรียชนิดอื่นจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการถ่ายภาพจากตัวอย่างด้านล่างของกรณีการศึกษาที่ 3 ที่กำลังขยายที่ 100 ไมโครเมตร ซึ่งจากภาพถ่ายทั้ง 2 ภาพ จะเห็นได้ว่าเดกซ์ทรานที่เกิดจากแบคทีเรียจะมียึดเกาะที่ผิวของเม็ดดิน อีกทั้งยังปิดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

4.4 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำในดินโดยวิธีความดันคงที่



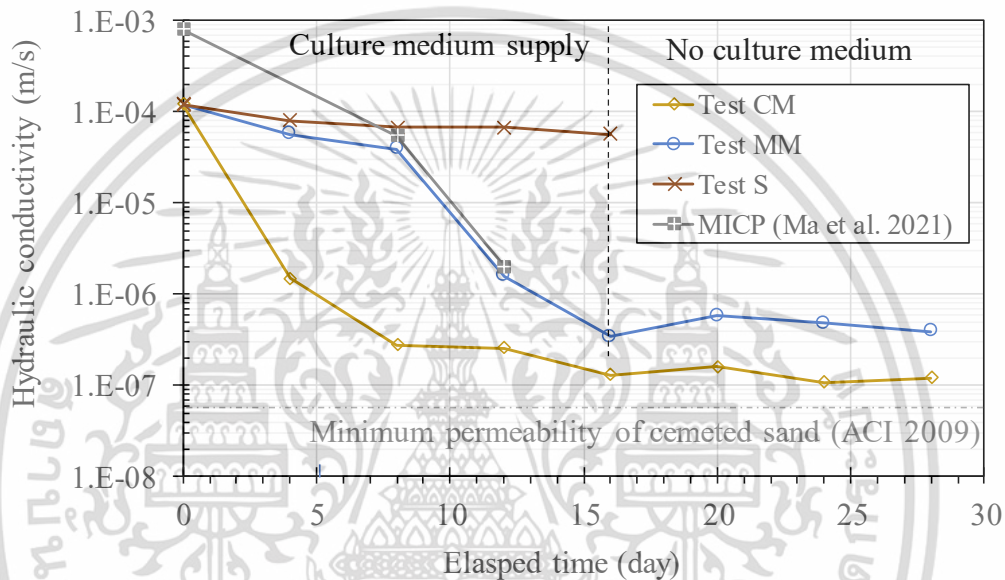
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมกับดินและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงค่าปริมาณซีเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวันที่ 7 และ 28 และพร้อมกับอัตราปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับตัวอย่างดินที่อัตราที่ 3, 5, 10 และ 15% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการผสมดินกับซีเมนต์เข้าด้วยกันและนำไปบดอัดในกระบอกตัวอย่างพร้อมกับบ่ม และในวันที่ 7 และ 28 จะทำการไปทดสอบอัตราการไหลแบบคงที่

ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินที่ไม่ได้รับการผสมจะอยู่ที่ 1.2×10^{-4} m/s ใช้ซีเมนต์ผสมกับตัวอย่างดินที่ 3% ในวันที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะเป็นที่ 2×10^{-5} ในวันที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงเหลือ 1.5×10^{-6} ใช้ซีเมนต์ผสมในอัตราส่วนที่ 5% ในวันที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะเป็นที่ 4.5×10^{-6} ในวันที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงเหลือ 2.8×10^{-7} ใช้ซีเมนต์ผสมในอัตราส่วนที่ 10% ในวันที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะเป็นที่ 3.3×10^{-7} ในวันที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงเหลือ 1.2×10^{-7} และใช้ซีเมนต์ผสมในอัตราส่วนที่ 15% ในวันที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะเป็นที่ 4×10^{-7} ในวันที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหล 4.5×10^{-7}

จากผลการทดลองการใช้ซีเมนต์จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน และอัตราส่วนผสมซีเมนต์ยังส่งผลค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินด้วย ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า

ตัวอย่างอัตราส่วนซีเมนต์ที่ 3 และ 5% ใน 7 วันแรกที่ดินได้รับการผสมของซีเมนต์อัตราการไหลของน้ำจะมีค่าสูง แต่เมื่อถึงวันที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ในส่วนของอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่ 15% จะเห็นได้ว่าในวันที่ 7 และ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลใกล้เคียงกัน และในส่วนอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่ 10% ค่าสัมประสิทธิ์การไหลในวันที่ 7 เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นมีค่าต่ำที่สุดที่ 3.3×10^{-7} และเมื่อวันที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินจะค่าต่ำสุดที่ 1.2×10^{-7} เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น

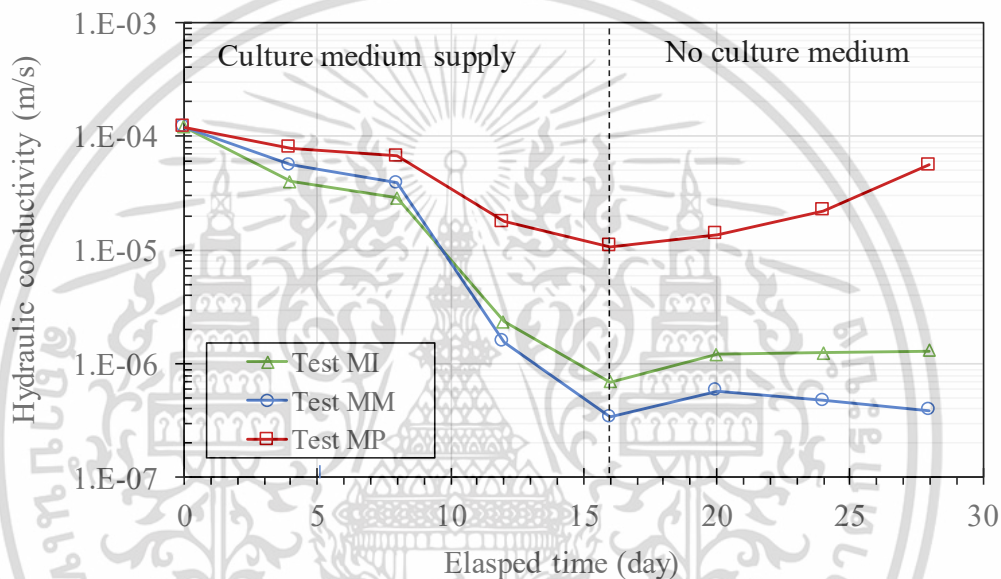


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน ในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2, ดินเปล่า, ดินผสมกับซีเมนต์ และดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแบคทีเรียแบบ microbially induced carbonate precipitation (MICP) ซึ่งวิธีนี้จะใช้แบคทีเรียช่วยในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการย่อยสลายเอโนไซม์แล้วทำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCl_2) ขึ้นในดิน ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะเข้าไปอุดตันในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่มีการให้อาหารแก่แบคทีเรียและช่วงที่หยุดการให้อาหารแก่แบคทีเรีย และในกราฟยังแสดงค่าสัมประสิทธิ์การไหลของที่ต่ำที่สุดซีเมนต์และทราย ตามมาตรฐาน ACI 2009

รูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลในตัวอย่างการศึกษาที่ 5 จะมีค่าเท่ากับ 1.2×10^{-4} เมตรต่อวินาที และทรายได้รับสารอาหารเลี้ยงค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำจะลดลงเหลือ 5.4×10^{-4} เมตรต่อวินาที ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลในดินที่ได้รับการผสมกับซีเมนต์จะอยู่ประมาณ 2.7×10^{-7} เมตรต่อวินาที ในช่วงสัปดาห์แรก ตามค่ามาตรฐาน ACI 2009 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหล

ในดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธี MICP แนวโน้มในช่วง 12 วันแรกค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะลดลงจาก 8×10^{-4} ถึง 2×10^{-6} เมตรต่อวินาที ส่วนกรณีตัวอย่างการศึกษาที่ 2 ในช่วง 5 วันแรก ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินจะอยู่ที่ 3.9×10^{-5} เมตรต่อวินาที เนื่องจากจากช่วงนี้แบคทีเรียอยู่ในช่วงปรับตัว โดยปริมาณเดกซ์ทรานจะเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อ วันที่ 10 (Treebupachatsakul and Kamchoom, 2021; Dashko R. and Shidlovskaya A., 2016; Greer J., 2018) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่น้อยสุดจะอยู่ประมาณที่ 3.5×10^{-7} เมตรต่อวินาที

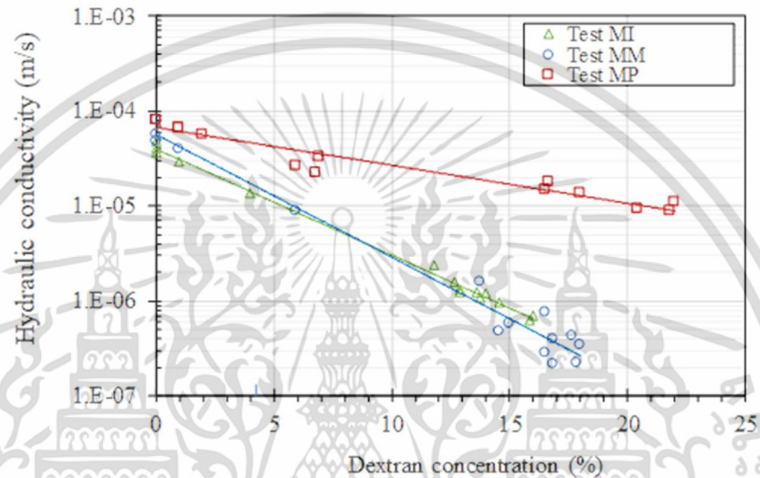


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3

จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 และจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่ให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียและช่วงที่หยุดให้อาหารเลี้ยง ซึ่งช่วงแรกจะทำการให้อาหารเป็นระยะเวลา 16 วัน พร้อมกับทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินไปด้วย และช่วงที่ 2 จะดำเนินการหยุดให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียหลังจากวันที่ 16 เป็นระยะเวลา 14 วัน พร้อมทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินไปด้วย

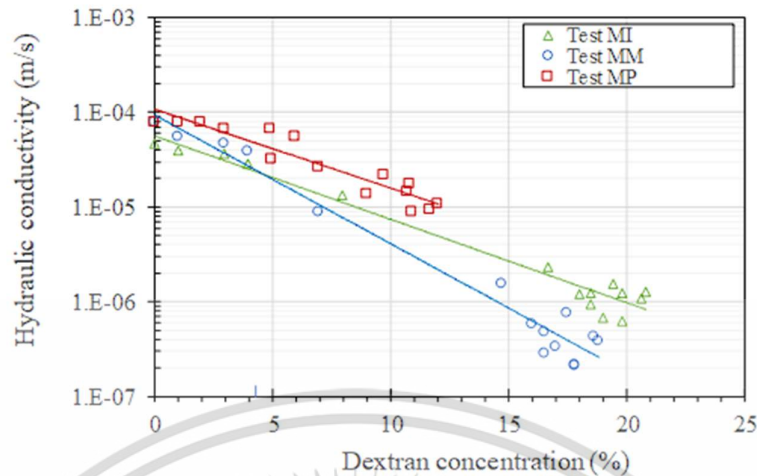
จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวอย่างการศึกษาที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงเหลือต่ำสุดที่ 7.2×10^{-7} เมตรต่อวินาที ส่วนกรณีศึกษาที่ 2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงเหลือประมาณ 3.9×10^{-7} เมตรต่อวินาที และกรณีการศึกษาที่ 3 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงเหลือประมาณ 9×10^{-6} เมตรต่อวินาที ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่กล่าวมาจะเป็นในช่วงที่มี

การให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรีย แต่เมื่อทำการหยุดให้อาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียในวันที่ 14 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลในตัวอย่างในกรณีการศึกษาที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะอยู่ที่ 4.2×10^{-7} เมตรต่อวินาที ส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในกรณีการศึกษาที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลจะอยู่ที่ 1.3×10^{-6} เมตรต่อวินาที และในส่วนของกรณีการศึกษาที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินกลับเพิ่มขึ้นโดยในวันที่ 30 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินมีค่าเท่ากับ 5.5×10^{-5} เมตรต่อวินาที



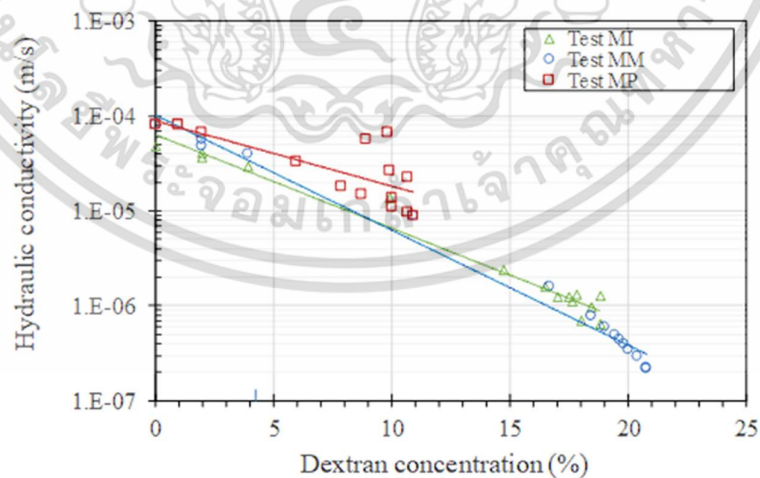
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณผิวด้านบน

จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณผิวด้านบน ในกรณีที่ 1 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบมากที่สุดที่ 16% กรณีที่ 2 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบ 18% ในส่วนกรณีที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณเดกซ์ทรานมากที่สุดที่ 22% ซึ่งเมื่อนำปริมาณเดกซ์ทรานของผิวด้านบนในกรณีต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน มาวาดกราฟจะทำให้เห็นค่าแนวโน้มได้ ซึ่งค่าแนวโน้มในกรณีที่ 1 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.976 กรณีที่ 2 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.996 และกรณีที่ 3 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.941



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณกึ่งกลาง

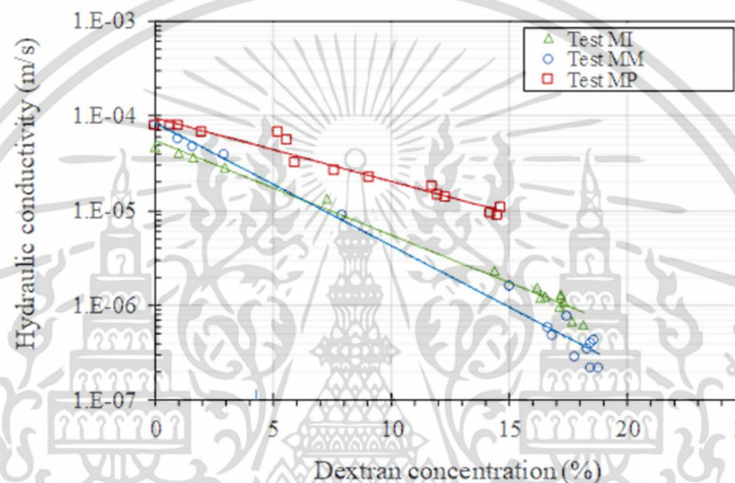
จากรูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณกึ่งกลาง ในกรณีที่ 1 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบมากที่สุดที่ 21% กรณีที่ 2 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบ 19% ในส่วนกรณีที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณเดกซ์ทรานมากที่สุดที่ 12% ซึ่งเมื่อนำปริมาณเดกซ์ทรานของผิวบนในกรณีต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน มาวาดกราฟจะทำให้เห็นค่าแนวโน้มได้ ซึ่งค่าแนวโน้มในกรณีที่ 1 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.968 กรณีที่ 2 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.967 และกรณีที่ 3 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.886



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณด้านล่าง ในกรณีที่ 1 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบมากที่สุดที่ 19% กรณีที่ 2 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบ 20% ในส่วนกรณีที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณเดกซ์ทรานมากที่สุดที่ 11% ซึ่งเมื่อนำปริมาณเดกซ์ทรานของผิวบนในกรณีต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน มาวาดกราฟจะทำให้เห็นค่าแนวโน้มได้ ซึ่งค่าแนวโน้มในกรณีที่ 1 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.985 กรณีที่ 2 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.972 และกรณีที่ 3 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.589



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยปริมาณเดกซ์ทราน ในกรณีที่ 1 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบมากที่สุดที่ 18% กรณีที่ 2 ปริมาณเดกซ์ทรานที่พบ 18% ในส่วนกรณีที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณเดกซ์ทรานมากที่สุดที่ 14.5% ซึ่งเมื่อนำปริมาณเดกซ์ทรานของผิวบนในกรณีต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดิน มาวาดกราฟจะทำให้เห็นค่าแนวโน้มได้ ซึ่งค่าแนวโน้มในกรณีที่ 1 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.984 กรณีที่ 2 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.989 และกรณีที่ 3 มีค่าความแปรผันเท่ากับ 0.953

จากรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินของตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 บริเวณใกล้ผิว บริเวณกึ่งกลาง ด้านล่าง และค่าเฉลี่ยปริมาณของเดกซ์ทรานของตัวอย่างกรณีศึกษาแต่ละตัว โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินชุดข้อมูลเดียวกันมาหาความสัมพันธ์กับปริมาณเดกซ์ทรานในตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3 ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ด้วยกราฟ จะสามารถหา

ความแม่นยำของชุดข้อมูลได้ด้วยค่า R² และสามารถหา Fitting equation ได้ โดยสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุป Fitting Equation และค่า R² ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเดกซ์ทรานและอัตราการไหลของน้ำในดิน

ID	Fitting equation	R ²
Top location		
MI	$6 \times 10^{-5} e^{-0.298x}$	0.976
MM	$4 \times 10^{-5} e^{-0.257x}$	0.996
MP	$7 \times 10^{-5} e^{-0.092x}$	0.941
Middle location		
MI	$9 \times 10^{-5} e^{-0.312x}$	0.968
MM	$6 \times 10^{-5} e^{-0.203x}$	0.967
MP	$1 \times 10^{-4} e^{-0.191x}$	0.886
Bottom location		
MI	$1 \times 10^{-4} e^{-0.279x}$	0.985
MM	$6 \times 10^{-5} e^{-0.227x}$	0.972
MP	$9 \times 10^{-5} e^{-0.158x}$	0.589
Average location		
MI	$8 \times 10^{-5} e^{-0.298x}$	0.984
MM	$5 \times 10^{-5} e^{-0.229x}$	0.989
MP	$9 \times 10^{-5} e^{-0.154x}$	0.953

จากตารางที่ 4.2 เป็นตารางสรุปค่า R² และ Fitting Equation ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเดกซ์ทรานและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ ของตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3 ในระดับที่ผิวบน กึ่งกลาง ด้านล่างและค่าเฉลี่ยของเดกซ์ทรานทั้ง 3 ตำแหน่ง จากกราฟและตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 จะเห็นได้ว่ายิ่งปริมาณเด็กซ์ทรานสูง อัตราค่าการไหลของน้ำจะลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตโครงสร้างด้วย SEM และจะเห็นได้ว่าค่า R^2 ในกรณีที่ 3 ค่าจะน้อยกว่ากรณีการศึกษาที่ 1 และ 2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้ผิวบนและกึ่งกลางของตัวอย่าง และพบว่าในกรณีการศึกษาที่ 1 จะพบเด็กซ์ทรานที่มากในบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง หรือในกรณีศึกษาที่ 3 จะพบเด็กซ์ทรานที่มากในบริเวณใกล้ผิวบน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของแบคทีเรียไม่มีความสม่ำเสมอ และเมื่อดูข้อมูลของกรณีการศึกษาที่ 3 ในส่วนของค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่าค่า R^2 มีค่า 0.953

4.5 ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการใช้แบคทีเรีย

การศึกษาวิจัยนี้จะเป็นการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียแล้วนำไปติดตั้งกับดินตัวอย่าง พร้อมให้สารอาหารแก่แบคทีเรีย โดยจะทำการให้สารอาหารทุก 4 วัน จนถึงวันที่ 16 แล้วทำการหยุดให้สารอาหารเป็นระยะเวลา 14 วัน ซึ่งสารอาหารที่ให้แก่แบคทีเรียจะประกอบไปด้วย ซูโครส 10% ทริปโตน 1% ยีสต์ 0.5 % และน้ำกลั่น โดยเมื่อเทียบกับการใช้แบคทีเรียต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตรแล้วจะได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณ ราคาของแบคทีเรียและสารอาหารต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตร

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรงงาน (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
1	แบคทีเรีย	4.35	ลิตร	-	-	-
2	สารอาหาร	87.05	ลิตร	-	-	-
2.1	ซูโครส	8.7	กก.	150.00	-	1,305.72
2.2	ทริปโตน	0.87	กก.	4,400.00	-	3,830.10
2.3	ยีสต์	0.44	กก.	200.00	-	87.05
2.4	น้ำกลั่น	87.05	ลิตร	0.04	-	3.48
	รวมเป็นเงิน					5,226.35

ตารางที่ 4.3 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายสำหรับการเพาะแบคทีเรียและการทำสารอาหารให้แก่แบคทีเรียต่อดิน 1 ลบ.ม. โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะเป็นของสารอาหารเนื่องมาจากแบคทีเรียสามารถเพาะเลี้ยงได้ตลอด ซึ่งการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายของการเพาะเลี้ยงและสารอาหารของแบคทีเรียต่อดิน 1 ลบ.ม. รวมเป็นเงิน 5224.48 บาท ซึ่งยังไม่ได้รวมค่าแรงในการติดตั้ง โดยดิน 1 ลบ.ม. จะใช้สารอาหาร 87.05 ลิตร ซึ่งจะประกอบด้วย ซูโครส 8.70 กิโลกรัม ทริปโตน 0.87 กิโลกรัม ยีสต์ 0.44 กิโลกรัม และน้ำ 87.05 ลิตร ตามอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งจากการทดลองการใช้แบคทีเรียพร้อมการติดตั้งด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละวิธีจะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแบคทีเรีย และจะแสดงค่าใช้จ่ายในการใช้ปูนซีเมนต์พร้อมการติดตั้งในรูปแบบการฉีดอัดปูนซีเมนต์ การผสมปูนซีเมนต์กับดิน และการเทราดปูนซีเมนต์ลงบนผิวดิน ซึ่งค่าใช้จ่ายสำหรับงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการฉีดอัดซีเมนต์

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
1	การฉีดอัดปูนซีเมนต์					
1.1	ค่าปูนซีเมนต์	1.00	ลบ.ม.	680.00	500.00	1,180.00
1.2	ค่าฉีดอัด	1.00	ลบ.ม.	-	1,215.93	1,215.93
1.3	รวมเป็นเงิน					2,395.93

ตารางที่ 4.4 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายในการฉีดอัดซีเมนต์เข้าไปในดินโดยจะมีค่าวัสดุ ค่าการผสมและค่าการฉีดอัดปูนซีเมนต์เข้าไปในดิน โดยจะมีค่าวัสดุและค่าแรงเป็น 2,395.93 บาท ซึ่งประกอบด้วยค่าปูนซีเมนต์ พร้อมค่าแรงผสมเป็นเงิน 1,180 บาทต่อลบ.ม. และค่าฉีดอัดปูนซีเมนต์ 1,215.93 บาทต่อลบ.ม.

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการขุด ผสมซีเมนต์ บดอัดดิน

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
2	การผสมซีเมนต์กับดิน					
2.1	ค่าปูนซีเมนต์	1.00	ลบ.ม.	680.00	500.00	1,180.00
2.2	ค่าขุดดิน	1.00	ลบ.ม.	-	150.00	150.00
2.3	ค่าถม	1.00	ลบ.ม.	-	150.00	150.00
2.4	ค่าผสม	1.00	ลบ.ม.	-	500.00	500.00
2.5	ค่าบดอัดดิน	1.00	ลบ.ม.	-	50.00	50.00
	รวมเป็นเงิน					2,030.00

ตารางที่ 4.5 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายในการผสมซีเมนต์บดอัดดินโดยจะมีค่าวัสดุ ค่าการผสมปูนซีเมนต์และค่าบดอัดดิน โดยจะมีค่าวัสดุและค่าแรงเป็น 2,030 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนซีเมนต์ พร้อมค่าแรงผสมเป็นเงิน 1,180 บาทต่อลบ.ม. ขุดดิน 150 บาทต่อลบ.ม. ค่าผสมปูนซีเมนต์กับดิน 150 บาทต่อลบ.ม. ค่าถมดินที่ได้รับการผสม 150 บาทต่อลบ.ม. และค่าบดอัดดิน 50 บาทต่อลบ.ม. (บดอัดแน่น)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการเทราดซีเมนต์

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
3	ค่าการเทราดซีเมนต์					
3.1	ค่าปูนซีเมนต์	1.00	ลบ.ม.	680.00	500.00	1,180.00
3.2	ค่าเทราด	1.00	ลบ.ม.	-	20.00	20.00
	รวมเป็นเงิน					1,200.00

ตารางที่ 4.6 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายในการเทราดซีเมนต์ลงผิวดินโดยจะมีค่าวัสดุ ค่าการผสมปูนซีเมนต์และค่าการเทราด โดยจะมีค่าวัสดุและค่าแรงเป็น 1,200 บาท โดยแบ่งเป็นค่าปูนซีเมนต์พร้อมค่าแรงผสมเป็นเงิน 1,180 บาทต่อลบ.ม. และค่าการเทราดปูนซีเมนต์ 20 ค่าปูนซีเมนต์ 20 บาทต่อลบ.ม.

โดยการใช้แบคทีเรียจะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าสารอาหารเลี้ยงแบคทีเรียและค่าการติดตั้งแบคทีเรียในแต่รูปแบบ โดยจะมีการฉีดอัดแบคทีเรีย การผสมกับดิน และการเทราดแบคทีเรีย ลงไปในดิน ซึ่งค่าใช้จ่ายของสารอาหารเลี้ยงและการติดตั้งแบคทีเรียรูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.9

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการฉีดอัดแบคทีเรีย

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
4	การฉีดแบคทีเรีย เข้าไปในดิน 1 ลบ.ม.					
	แบคทีเรียและสารอาหาร	1.00	ชุด	5,224.48	-	5,224.48
	ค่าฉีดอัด	1.00	ลบ.ม.	-	1,215.93	1,215.93
	รวมเป็นเงิน					6,440.41

ตารางที่ 4.7 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายในการฉีดอัดแบคทีเรียเข้าไปในดินโดยจะมีค่าวัสดุ ค่าการผสมและค่าการฉีดอัดแบคทีเรียเข้าไปในดิน โดยจะมีค่าวัสดุและค่าแรงเป็น 6,440.41 บาท โดยจะเป็นค่าแบคทีเรียและสารอาหาร 5,224.48 บาทต่อลบ.ม. และค่าฉีดอัด 1,215.93 บาทต่อลบ.ม.

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการขุด ผสม บดอัดแบบที่เรีย

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
5	การผสมแบบที่เรียกับดิน					
	แบบที่เรียและสารอาหาร	1.00	ชุด	5,224.48		5,224.48
	ค่าขุดดิน	1.00	ลบ.ม.	-	150.00	150.00
	ค่าถม	1.00	ลบ.ม.	-	150.00	150.00
	ค่าผสม	1.00	ลบ.ม.	-	500.00	500.00
	ค่าบดอัดดิน	1.00	ลบ.ม.	-	50.00	50.00
	รวมเป็นเงิน					6,074.48

ตารางที่ 4.8 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายในการผสมแบบที่เรียกับดินพร้อมบดอัดดินโดยจะมีค่าวัสดุ ค่าการผสมปูนซีเมนต์และค่าบดอัดดิน โดยจะมีค่าวัสดุและค่าแรงเป็น 6,074.48 บาท โดยจะเป็นค่าแบบที่เรียและสารอาหาร 5,224.48 บาทต่อลบ.ม. ค่าขุดดิน 150 บาทต่อลบ.ม. ค่าผสมแบบที่เรียกับดิน 150 บาทต่อลบ.ม. ค่าถมดิน 150 บาทต่อลบ.ม. และค่าบดอัดที่ได้รับการผสม 150 บาทต่อลบ.ม.

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าวัสดุและค่าแรงการเทราดแบบที่เรีย

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
6	การเทราดแบบที่เรียลงดิน					
	แบบที่เรียและสารอาหาร	1.00	ชุด	5,224.48		5,224.48
	ค่าเทราด	1.00	ลบ.ม.		20.00	20.00
	รวมเป็นเงิน					5,244.48

ตารางที่ 4.9 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายในการเทราดแบบที่เรียลงผิวดินโดยจะมีค่าวัสดุ โดยจะมีค่าวัสดุและค่าแรงเป็น 5,244.48 บาท โดยจะเป็นค่าแบบที่เรียและสารอาหาร 5,224.48 บาทต่อลบ.ม. ค่าเทราดแบบที่เรียพร้อมสารอาหาร 20 บาทต่อลบ.ม.

ตารางที่ 4.10 สรุปค่าใช้จ่ายการติดตั้งแบคทีเรียและซีเมนต์ ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมค่าวัสดุและแรง (บาท)
1	การฉีดอัด					
	การฉีดอัดแบคทีเรีย	1.00	ลบ.ม.	5,224.48	1,215.93	6,440.41
	การฉีดอัดปูนซีเมนต์	1.00	ลบ.ม.	680.00	1,715.93	2,395.93
2	การผสมกับดิน					
	การผสมแบคทีเรียกับดิน	1.00	ลบ.ม.	5,224.48	850.00	6,074.48
	การผสมซีเมนต์กับดิน	1.00	ลบ.ม.	680.00	1,350.00	2,030.00
3	การเทราด					
	การเทราดแบคทีเรียลงบนดิน	1.00	ลบ.ม.	5,224.48	20.00	5,244.48
	การเทราดซีเมนต์ลงบนดิน	1.00	ลบ.ม.	680.00	520.00	1,200.00

ตารางที่ 4.10 สรุปค่าใช้จ่ายการวิธีการติดตั้งแบคทีเรียและปูนซีเมนต์ต่างๆ ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าแรงและค่าวัสดุของการใช้แบคทีเรียและปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่า ค่าใช้จ่ายของค่าแบคทีเรียจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าค่าใช้จ่ายการใช้ปูนซีเมนต์ แต่การใช้แบคทีเรียนั้นมีความสามารถในด้านเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีการสร้างสารเรือนกระจก ซึ่งเมื่อเทียบกันแล้วปูนซีเมนต์จะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นเพิ่มมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นค่าความเป็นกรดในดิน (Larson, A., 2011) สร้างสารเรือนกระจกตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตไปจนถึงขั้นตอนการติดตั้งปูนซีเมนต์เข้าไปในดิน เนื่องจากมีการใช้เครื่องจักรในการติดตั้ง

จากผลการทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำที่ผ่านดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยแบคทีเรียแล้วนั้น ค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้นของดินทุกตัวอย่างจะอยู่ที่ 1.2×10^{-4} เมตรต่อวินาที และเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการใช้แบคทีเรียค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลจะลดลง โดยจะเห็นได้จากรูปที่ 4.16 แล้วนำมาเทียบอัตราส่วนกับค่าใช้จ่าย ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพของการใช้แบคทีเรียต่อค่าใช้จ่ายในการใช้แบคทีเรียโดยวิธี
ติดตั้งที่แตกต่างกัน

ที่	รายการ	ค่าสัมประสิทธิ์ การไหลเริ่มต้น (เมตร/วินาที)	ค่าสัมประสิทธิ์ การไหลลดลง มากที่สุด (เมตร/วินาที)	อัตราค่า สัมประสิทธิ์การ ไหลที่ลดลง (%)	งบการใช้ แบคทีเรียต่อดิน 1 ลบ.ม. (บาท)	ค่าใช้จ่ายต่อ ประสิทธิภาพ ของแบคทีเรีย (บาท)
1	การฉีดอัดแบคทีเรีย	0.00012	0.00000072	-99.40	6,440.41	64.79
2	การผสมแบคทีเรียกับดิน	0.00012	0.00000039	-99.68	6,074.48	60.94
3	การเทราดแบคทีเรียลงบน ดิน	0.00012	0.000009	-92.50	5,244.48	56.70

ตารางที่ 4.11 แสดงอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ลดลง โดยวิธีการฉีดอัดแบคทีเรียเข้าไปในดิน อัตราค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ลดลงจะอยู่ที่ -99.40% ค่าใช้จ่ายจะอยู่ที่ 6,440.41 บาทต่อลบ.ม. ซึ่งอัตราส่วนค่าใช้จ่ายต่ออัตราค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงเป็น 64.79 บาท/หน่วย วิธีการผสมแบคทีเรียกับดิน อัตราค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ลดลงจะอยู่ที่ -99.68% ค่าใช้จ่ายจะอยู่ที่ 6,074.48 บาทต่อลบ.ม. ซึ่งอัตราส่วนค่าใช้จ่ายต่ออัตราค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงเป็น 60.94 บาท/หน่วย และสุดท้ายวิธีการเทราดแบคทีเรียลงบนดิน อัตราค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ลดลงจะอยู่ที่ -92.50% ค่าใช้จ่ายจะอยู่ที่ 5,244.48 บาทต่อลบ.ม. ซึ่งอัตราส่วนค่าใช้จ่ายต่ออัตราค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงเป็น 56.70 บาท/หน่วย ซึ่งไม่ว่าจะเป็นวิธีการฉีดแบคทีเรีย การผสมแบคทีเรียกับดินแล้วนำไปฉีดและการเทราดแบคทีเรียเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินนั้นทั้ง 3 วิธี พอนำค่าสัมประสิทธิ์มาเทียบกับค่าใช้จ่ายแล้วจะเห็นว่าทั้ง 3 วิธีมีค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อสังเกตแล้วจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการเทราดแบคทีเรียเป็นวิธีทางเลือกที่มีค่าใช้จ่ายต่อหน่วยที่ถูกที่สุดเมื่อเทียบกับ 2 วิธีที่เหลือและประสิทธิภาพในการลดค่าอัตราการไหลสามารถลดลงได้ถึง 92.5 % เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ซึ่งใกล้เคียงกับวิธีการฉีดและผสมแบคทีเรีย

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้แบคทีเรียส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของน้ำในทราย ซึ่งมีกรณีศึกษาทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยทั้ง 3 ตัวอย่างจะใช้วิธีการติดตั้งแบคทีเรียที่แตกต่างกันไปคือ ฉีด ผสม และเทราดลงบนผิว แบ่งช่วงเวลาออกเป็น 2 ช่วงในการทดสอบคือช่วงที่ให้สารอาหารแก่แบคทีเรียและช่วงที่หยุดให้อาหารแก่แบคทีเรีย และมีตัวอย่างที่ใช้ในการเปรียบเทียบ 2 ตัวอย่างคือ ทรายเปล่าที่ได้รับเพียงแต่สารอาหาร และทรายผสมกับซีเมนต์

โดยตัวอย่างทรายจะใช้ทรายออกตาวา (Ottawa F110, U.S. Silica, Frederick, Maryland, U.S.A.) ในการทดลอง และแบคทีเรียประเภท *Lueconostoc Mesentroides* ซึ่งการเตรียมทรายจะทำทรายไปอบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำทรายที่ได้ไปผสมกับน้ำกลั่น 14% เมื่อผสมเสร็จนำทรายที่ได้ไปอัดลงในกระบอกตัวอย่างเป็นจำนวน 5 ชั้น พร้อมกับควบคุมความหนาแน่นของทรายอยู่ที่ 1560 ± 10 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยกระบอกที่ใช้จะเป็นกระบอก PVC เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 มิลลิเมตร สูง 650 มิลลิเมตร พร้อมกับทำการเจาะรูด้านข้าง 3 ตำแหน่ง ที่ -150, -350 และ -550 มิลลิเมตร (เทียบกับปากกระบอก) และทำการเจาะรูที่บริเวณด้านล่างของกระบอกเพื่อให้น้ำและสารอาหารสามารถไหลออกได้ ในส่วนของตัวอย่างแบคทีเรียจะทำการเพาะเชื้อให้ห้องปฏิบัติการ ซึ่งในส่วนของ การเพาะเลี้ยงจะมีการตรวจสอบการเจริญเติบโตของแบคทีเรียด้วยการใช้เครื่อง Spectrophotometer ในการตรวจค่าการดูดกลืนแสงของแบคทีเรีย

ในกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 จะใช้ตัวอย่างอย่างละ 6 ชุด ขั้นตอนการติดตั้งแบคทีเรียลงในทรายตัวอย่างโดยตัวอย่างกรณีการศึกษาที่ 1 จะใช้แบคทีเรียปริมาณ 50 มิลลิลิตร ฉีดลงไปในตัวอย่งทราย ซึ่งการฉีดจะทำการควบคุมการฉีด 10 มิลลิลิตร/นาที ในกรณีการศึกษาที่ 2 เป็นวิธีการผสมโดยใช้แบคทีเรีย 50 มิลลิลิตร ผสมกับทรายตัวอย่างและน้ำกลั่นปริมาณ 14% แล้วนำไปอัดลงในกระบอก PVC ตัวอย่างที่เตรียมไว้ และในกรณีที่ 3 จะนำแบคทีเรีย 50 มิลลิลิตร เทราดลงบนทรายที่เตรียมไว้ ในการให้สารอาหารเลี้ยงแก่แบคทีเรียจะเป็นการเทราดสารอาหารลงบนผิวทุกกรณีการศึกษา โดยจะใช้สารอาหาร 1000 มิลลิลิตร ทุกๆ 4 วัน และการเก็บรักษากระบอกตัวอย่างจะทำการนำกระบอกตัวอย่างลงไปแช่ไว้ในถังที่มีน้ำพร้อมกับใช้อุณหภูมิห้องในการควบคุมเพื่อรักษาสภาพให้ดินอึดตัว และในส่วนตัวอย่างที่ใช้ทำการเปรียบเทียบมีกรณีที่เป็นทรายผสมกับซีเมนต์ที่ 10% และตัวอย่างทรายที่ไม่ได้รับการติดตั้งแบคทีเรียแต่ได้รับสารอาหาร 1000 มิลลิลิตร

ทุก 4 วัน พร้อมกับการเก็บรักษากระบอตัวอย่างลงไปแช่ไว้ในถังที่มีน้ำพร้อมกับใช้อุณหภูมิห้องในการควบคุม

การศึกษานี้จะทำการทดสอบหาระยะเวลาอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบโครงสร้างภายในทรายและแบคทีเรีย พร้อมทั้งตรวจสอบหาขนาดของรูพรุนและปริมาณเดกซ์ทรานของแบคทีเรีย และในที่สุดท้ายทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในทรายที่ได้รับการติดตั้งแบคทีเรีย ซึ่งในส่วนนี้จะทำการทดสอบทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่ให้อาหารแก่แบคทีเรียและช่วงที่หยุดให้สารอาหาร

ผลการศึกษาของการตรวจอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทำการตรวจสอบด้วยการกลืนของแบคทีเรียด้วยเครื่อง Spectrophotometer ซึ่งจะใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตรในการตรวจ ซึ่งพบว่าในช่วง 0-12 ชั่วโมงแรกค่าอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงมาก หลังจาก 12 ชั่วโมงไปแล้วแบคทีเรียอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะช้าลง และเมื่อทำการทดสอบชั่วโมงที่ 24 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด โดยพบว่าหลังจากระยะเวลาที่ 24 ชั่วโมงแล้วอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเริ่มคงที่ หลังจากนั้นนำแบคทีเรียที่ได้ไปติดตั้งลงตัวอย่างที่เตรียมไว้ เมื่อแบคทีเรียถูกติดตั้งในวิธีต่างๆจะทำการทดสอบหาโครงสร้างของเม็ดดินและเดกซ์ทรานด้วยการส่องกราดด้วยอิเล็กตรอน (SEM) พร้อมตรวจสอบปริมาณเดกซ์ทรานที่เกิดด้วย Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) โดยการนำตัวอย่างดินออกมาจากกระบอตัวอย่างจะต้องทำการรบกวนโครงสร้างเม็ดทรายให้น้อยที่สุด (Clayton, 1986) พร้อมนำตัวอย่างที่ได้ไปแช่แข็งด้วยไนโตรเจน (Shinohara et al., 2000) พบว่าในช่วง 5 วันแรกปริมาณเดกซ์ทรานที่เกิดขึ้นจะน้อยมาก เนื่องจากอยู่ในช่วงปรับตัวของแบคทีเรีย (Rofle M. et al., 2012) ซึ่งหลังจาก 5 ถึง 7 วัน พบว่าปริมาณเดกซ์ทรานมีอัตราเกิดขึ้นสูงมากในทุกกรณีการศึกษา ซึ่งจากการทดสอบหาปริมาณเดกซ์ทรานด้วย MIP โดยจะพบปริมาณเดกซ์ทรานที่สูงบริเวณใกล้พื้นผิวของกระบอตัวอย่างในทุกกรณีการศึกษา และยังทำให้เห็นว่าในกรณีที่ 3 การเกิดของเดกซ์ทรานจะไม่กระจายตัวสม่ำเสมอทั้งตลอดความลึกของกระบอตัวอย่าง เมื่อทำการหยุดให้สารอาหารแก่แบคทีเรียเป็นเวลา 14 วัน ในกรณีการศึกษาที่ 1 และ 2 ปริมาณของเดกซ์ทรานยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ แต่กลับในส่วนกรณีศึกษาที่ 3 พบว่าปริมาณเดกซ์ทรานจะลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการตรวจพบเชื้อรา (*Aspergillus niger*; Priyamvada et al., 2017) ในบริเวณใกล้ผิวบนโดยพบเห็นได้จากการส่องด้วย SEM และเชื้อราดังกล่าวยังทำการแย่งสารอาหารจากแบคทีเรียที่ใช้ทำการศึกษา

ในการศึกษาวิธีการติดตั้งแบคทีเรียเข้าไปในทรายของกรณีการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินลดลง และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การไหลกับปริมาณของเดกซ์ทรานพบว่ามีความสัมพันธ์แบบเอกซโพเนนเชียลเชิงลบ ซึ่งหมายถึงค่าปริมาณของเดกซ์ทรานมากจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในดินจะลดลง และมีผลของค่ากระจายตัวของรูพรุนในดิน (Soil Pore Size Distribution, PSD) มาสอดรับ โดยพบว่าขนาดความกว้างของรู

พูนขนาดใหญ่ลดลงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลง เนื่องมาจาก EPS และเดกซ์ทราน ทำการอุดตันรูพูนของทราย

และจากการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการติดตั้งแบคทีเรียในรูปแบบที่แตกต่างกันโดยมีการติดตั้งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1.วิธีการฉีดแบคทีเรียเข้าไปในดิน 2.การผสมแบคทีเรียกับดิน แล้วนำไปไปบดอัด และ 3.การเทราดแบคทีเรียลงบนผิวดิน ซึ่งวิธีแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ซึ่งการใช้วิธีการแบบฉีดแบคทีเรีย และการผสมแบคทีเรียกับดินแล้วนำไปบดอัดนั้นจะมีข้อดีในด้านการกระจายตัวของแบคทีเรียได้ดีในทุกความลึก พร้อมกันนั้นเมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียในการติดตั้งแบบวิธีฉีดและวิธีผสมแบคทีเรีย นี้แล้วนั้นยังพบว่าผลิตภัณฑ์ของแบคทีเรียยังพบได้ ในส่วนของวิธีที่เทราดแบคทีเรียลงบนดินยังเป็นวิธีที่ง่ายแก่การติดตั้งเนื่องจากขั้นตอนการทำงานไม่ยุ่งยาก และยังสามารถพบปริมาณเดกซ์ทรานส์ได้มากบริเวณพื้นผิวของดินเมื่อเทียบกับวิธีการติดตั้งทั้ง 2 วิธีก่อนหน้านี้ แต่เมื่อทำการหยุดให้อาหารแก่แบคทีเรียกลับพบว่าค่าปริมาณเดกซ์ทรานในวิธีการเทราดแบคทีเรานั้นค่าเดกซ์ทรานกลับลดลงเหลือเพียง 1 % บริเวณผิวดินของดิน และจากงานวิจัยนี้ยังพบว่าปริมาณเดกซ์ทรานของแบคทีเรียยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำ ซึ่งในการใช้วิธีฉีดและผสมแบคทีเรียในดินจะพบปริมาณเดกซ์ทรานที่มากในทุกความลึก จึงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การไหล โดยความวิธีการฉีดแบคทีเรียสามารถเป็นวิธีทางเลือกในการ Jet Grouting ดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดิน ในส่วนของวิธีผสมแบคทีเรียกับดิน มีความเหมาะสมกับวิธีบดอัดถนน หรือการทำแกนดินเหนียวที่บ่งน้ำสำหรับเขื่อนเนื่องมาจากมีการบดอัดพร้อมความที่บ่งน้ำ ส่วนวิธีการเทราดแบคทีเรียเหมาะสำหรับวิธีการขุดทำฐานราก หรือขุดดินตื้น เพื่อทำการก่อสร้างช่วงที่ขุดดินเพียงชั่วคราว แต่ไม่ต้องการให้น้ำเข้ามาในพื้นที่ โดยวิธีการใช้แบคทีเรียจะมีข้อดีในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้แบคทีเรียด้วยวิธีต่างๆ เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในทราย ซึ่งการศึกษาใช้แบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* ควรได้รับพิจารณาในการใช้แบคทีเรียชนิดอื่นที่มีความสามารถในการผลิตเดกซ์ทรานในการศึกษา

2. การศึกษานี้ใช้ทรายออกตตาวาเป็นตัวแทนในการศึกษา ซึ่งมาค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่สูงควรมีการนำไปศึกษากับตัวอย่างดินประเภทอื่นอย่างเช่น ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นต้น หรือดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ต่ำ

3. จากการทดลองนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีการควบคุมตัวแปรหลายตัว ควรมีการนำไปพัฒนาศึกษาในสถานที่จริงที่มีตัวแปรผกผันที่มากและตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้

5.3 ข้อจำกัดของการศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์

1. เนื่องจากการทดลองนี้ได้ทำการติดตั้งในกระบอกตัวอย่างที่กำหนดไว้ ซึ่งกระบอกตัวอย่างมีการกำหนดขอบเขตการขยายตัวอย่างแคบที่เรียวไว้ จึงควรมีการศึกษาการกระจายตัวของแบคทีเรียในทั้งแนวตั้งและแนวราบของแบคทีเรียในพื้นที่ที่มีขนาดความกว้างมากกว่านี้ โดยขนาดกระบอกตัวอย่างที่เลือกในห้องทดลองเพียงพอที่จะให้เห็นผลแตกต่างของการเทราดหรือวิธีการอื่นๆ แต่ในภาคสนามก็ควรมีการทำ pilot test เพื่อสังเกตการณ์กระจายตัวของแบคทีเรียและ dextran ก่อน

2. เนื่องจากแบคทีเรียมีการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการควรมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ จึงควรมีการศึกษาวิธีการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียที่ง่ายและเหมาะสมโดยไม่ต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการ

3. เนื่องจากในการทดลองมีการใช้น้ำกลั่นในการผสมกับสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย ซึ่งในการก่อสร้างจริงการจัดหาน้ำกลั่นมาเพื่อมาผสมกับสารอาหารตัวอื่นสำหรับแบคทีเรีย อาจจะเป็นข้อจำกัดเรื่องงบประมาณและการจัดหา จึงควรมีการศึกษาในการใช้น้ำประปาหรือน้ำจากแหล่งอื่นที่ง่ายแก่การจัดหาทำการศึกษาความเหมาะสมในการมาเป็นสารประกอบสำหรับสารอาหารแบคทีเรีย

บรรณานุกรม

- ACI Committee 230. Report on soil cement. Technical Report ACI 230.1R-09. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 2009.
- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., Beecham, S., 2023. Unconfined compressive strength of MICP and EICP treated sands subjected to cycles of wetting-drying, freezing-thawing and elevated temperature: Experimental and EPR modelling. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 15 (5), 1226-1247.
- Al Qabany, A., Soga, K., Santamarina, C., 2012. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 138(8), 992-1001.
- Apriyono, A., Yuliana, Kamchoom, V., 2022. Serviceability of cut slope and embankment under seasonal climate variations. *Acta Geophy.* 1-13.
- ASTM D2434-19, 2019. Standard test method for permeability of granular soils (constant head). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2487-17, 2017. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., Kitazume, M., 2017. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 9(2), 329-339.
- Bozyigit, I., Javadi, A., Altun, S., 2021. Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 13(5), 1160-1172.
- Chang, I., Im, J., Cho, G.C., 2016. Soil-hydraulic conductivity control via a biopolymer treatment-induced bio-clogging effect. In: *Geotech. Str. Eng. Congress.* Publisher? p. 1006-1015.

- Chen, Z., Chen, C., Kamchoom, V., Chen, R., 2020. Gas permeability and water retention of a repacked silty sand amended with different particle sizes of peanut shell biochar. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 84(5), 1630-1641.
- Chen, Z., Kamchoom, V., Apriyono, A., Chen, R., Chen, C., 2022. Laboratory study of water infiltration and evaporation in biochar-amended landfill covers under extreme climate. *Waste Manage.* 153, 323-334.
- Chu, J., ASCE, M., Evans, T. M., ASCE, M., van Paassen, L. A., ASCE, M., 2022. Crystal growth of MICP through microfluidic chip tests. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 148(5), 06022002.
- Clayton, C. R. I., 1986. Sample disturbance and BS 5930. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications. 2(1), 33-40.
- Cunningham, A.B., Sharp, R.R., Hiebert, R., James, G., 2003. Subsurface biofilm barriers for the containment and remediation of contaminated groundwater. *Bioremediat. J.* 7(3-4), 151-164.
- Dalgaard, P., Ross, T., Kamperman, L., Neumeyer, K., McMeekin, T.A., 1994. Estimation of bacterial growth rates from turbidimetric and viable count data. *Int. J. Food Microbiol.* 23 (3-4), 391-404.
- Dashko, R., Shidlovskaya, A., 2016. Impact of microbial activity on soil properties. *Can. Geotech. J.* 53(9), 1386-1397.
- Dennis, M.L., Turner, J.P., 1998. Hydraulic conductivity of compacted soil treated with biofilm. *J. Geotech. Geoenviron Eng.* 124(2), 120-127.
- Dimic, G., 2006. Characteristics of the *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* strains from fresh vegetables. *Acta Periodica Technologica.* 37, 3-11.
- Garg, A., Huang, H., Cai, W., Reddy, N.G., Chen, P., Han, Y., Zhu, H.H., 2021. Influence of soil density on gas permeability and water retention in soils amended with in-house produced biochar. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 13(3), 593-602.

- Hamasaki, Y., Ayaki, M., Fuchu, H., Sugiyama, M., Morita, H., 2003. Behavior of psychrotrophic lactic acid bacteria isolated from spoiling cooked meat products. *Appl. Environ. Microb.* 69(6),3668-71.
- Harutoshi T., 2013. Exopolysaccharides of lactic acid bacteria for food and colon health applications. In: Kongo, J.M. (Ed.), *Lactic Acid Bacteria - R & D for Food, Health and Livestock Purposes*. <https://www.intechopen.com/chapters/42337>.
- Jayathilake, P.G., Jana, S., Rushton, S., Swailes, D., Bridgens, B., Curtis, T., Chen, J., 2017. Extracellular polymeric substance production and aggregated bacteria colonization influence the competition of microbes in biofilms. *Front. Microbiol.* 8, 1865.
- Kantzas, A., Stehmeier, L., Marentette, D.F., Ferris, F.G., Jha, K.N., Marentette, F.M., 1992. A novel method of sand consolidation through bacteriogenic mineral plugging. Annual Technical Meeting. In: *Proceedings of the Annual Technical Meeting*. <https://doi.org/10.2118/92-46>.
- Kamchoom, V., Leung, A.K., Boldrin, D., Sakolpanya, T., Wu, Z., Likitlersuang, S., 2022a. Shearing behaviour of vegetated soils with growing and decaying roots. *Can. Geotech. J.* <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0695>.
- Kamchoom, V., Boldrin, D., Leung, A.K., Sookkrajang, C., Likitlersuang, S., 2022b. Biomechanical properties of the growing and decaying roots of *Cynodon dactylon*. *Plant Soil.* 471(1), 193-210.
- Kenney, T.C., Van Veen, W.A., Swallow, M.A., Sungaila, M.A., 1992. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. *Can. Geotech. J.* 29(3), 364-374.
- Kim D.S., Fogler H S., 1999. The effects of exopolymers on cell morphology and culturability of *Leuconostoc mesenteroides* during starvation. *Appl. Microbiol. Biot.* 52(6), 839-844.

- Konstantinou, C., Biscontin, G., Jiang, N. J., Soga, K., 2021. Application of microbially induced carbonate precipitation to form bio-cemented artificial sandstone. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 13(3), 579-592.
- Ladd, RS., 1978. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotech. Test. J.* 1(1), 16-23.
- Lim, A., Atmaja, P.C., Rustiani, S., 2020. Bio-mediated soil improvement of loose sand with fungus. *J. Rock Mech Geotech Eng.* 12(1), 180-187.
- Lin, H., Suleiman, M. T., Brown, D. G., Kavazanjian Jr, E., 2016. Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation. *J. Geotech. Geoenviron Eng.* 142(2), 04015066.
- Mamou, G., Mohan, G.B.M., Rouvinski, A., Rosenberg, A., Ben-Yehuda, S., 2016. Early developmental program shapes colony morphology in bacteria. *Cell Rep.* 14(8), 1850-1857.
- Mataragas, M., Metaxopoulos, J., Galiotou, M., Drosinos, E.H., 2003. Influence of pH and temperature on growth and bacteriocin production by *Leuconostoc mesenteroides* L124 and *Lactobacillus curvatus* L442. *Meat Sci.* 64(3), 265-271.
- McCleskey, C.S., Faville, L.W., Barnett, R.O., 1947. Characteristics of *Leuconostoc mesenteroides* from Cane Juice. *J. Bacteriol.* 54(6), 697-708.
- McSwain, B.S., Irvine, R.L., Hausner, M., Wilderer, P., 2005. Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge. *Appl. environ. microb.* 71(2), 1051-1057.
- Miyamoto-Shinohara, Y., Imaizumi, T., Sukenobe, J., Murakami, Y., Kawamura, S., Komatsu, Y., 2000. Survival rate of microbes after freeze-drying and long-term storage. *Cryobiology.* 41(3), 251-255.

- Oualmakran, M., Mercatoris, B. C. N., François, B., 2016. Pore-size distribution of a compacted silty soil after compaction, saturation, and loading. *Can. Geotech. J.* 53(12), 1902-1909.
- Phan, T.N., Likitlersuang, S., Kamchoom ,V., Leung, A.K., 2021. Root biomechanical properties of *Chrysopogon zizanioides* and *Chrysopogon nemoralis* for soil reinforcement and slope stabilisation. *Land Degrad. Dev.* 32(16), 4624-4636.
- Priyamvada, H., Singh, R.K., Akila, M., Ravikrishna, R., Verma, R.S., Gunthe, S.S., 2017. Seasonal variation of the dominant allergenic fungal aerosols–One year study from southern Indian region. *Sci. Rep-UK.* 7(1).
- Rockhold, M.L., Yarwood, R.R., Nieme, M.R., Bottomley, P.J., Selker, J.S., 2022. Considerations for modeling bacterial-induced changes in hydraulic properties of variably saturated porous media. *Adv. Water Resour.* 25(5), 477–495.
- Rolfe, M.D., Rice, C.J., Lucchini, S., Pin, C., Thompson, A., Cameron, A.D.S., E.T., 2012. Lag phase is a distinct growth phase that prepares bacteria for exponential growth and involves transient metal accumulation. *J. Bacteriol.* 194(3), 686–701.
- Sasanian, S., Newson, T. A., 2013. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents. *Eng. Geol.* 158, 15-22.
- Soetaert, W., Schwengers, D., Buchholz, K., Vandamme, E.J., 1995. A wide range of carbohydrate modifications by a single micro-organism: *Leuconostoc mesenteroides*. *Progr. Biotechnol.* 10, 351–358.
- Surasani, V.K., Li, L., Ajo-Franklin, J., Hubbard, C.G., Hubbard, S., Wu, Y., 2013. Bioclogging and permeability alteration by *L. mesenteroides* in a sandstone reservoir: A reactive transport modeling study. *Energy and Fuels.* 27(11), 6538–6551.

- Taylor, S.W., Milly, P.C.D., Jaffé, P.R., 1990. Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium: 2. Permeability. *Water Resour. Res.* 26(9), 2161–2169.
- TIS 15-2562, 2019. Portland cement, www.tisi.go.th.
- Treebupachatsakul, T., Kamchoom, V., 2021. Permeability and setting time of bio-mediated soil under various medium concentrations. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 13(2): 401-409.
- Tuntiwaranuruk, U., Sriboon, W., Krapuoo, W., 2018. A study of diurnal soil temperature and moisture content changes in concrete pipe containers with lime tree planting after watering: A field experiment. *ARNP J. Eng. ApplSci.* 13(3), 784-791.
- Umar, M., Kassim, K.A., Ping Chiet, K.T., 2016. Biological process of soil improvement in civil engineering: A review. *J. Rock Mech. Geotech Eng.* 8(5), 767-774.
- Wang, J., Yin, S., Lu, L., Zhou, J., Fu, Q., 2022a. Characterization of microbial-induced concrete corrosion by combining morphology observation and fluorescence staining. *Case Studies in Construction Materials.* 17, e01586.
- Wang, X., Li, C., He, J., 2022b. A highly effective strain screened from soil and applied in cementing fine sand based on MICP-bonding technology. *J. Biotechnol.* 350, 55-66.
- Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., Harkes, M.P., 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiol J.* 24(5), 417–423.
- Wingender, J., Neu, T.R., Flemming, H-C., 1999. What are Bacterial Extracellular Polymeric Substances? In: Wingender, J., Neu, T.R., Flemming, H. (Eds.), *Microbial Extracellular Polymeric Substances*, Springer Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 1–19.
- Wu, H., Wu, W., Liang, W., Dai, F., Liu, H., Xiao, Y., 2022. 3D DEM modeling of biocemented sand with fines as cementing agents. *Int. J. Numer. Anal. Meth.* <https://doi.org/10.1002/nag.3466>.

- Xiao, Y., Tang, Y., Ma, G., McCartney, J. S., Chu, J., 2021. Thermal conductivity of biocemented graded sands. *J. Geotech Geoenviron Eng.* 147(10), 04021106-04021106.
- Xu, K., Huang, M., Zhen, J., Xu, C., Cui, M., 2023. Field implementation of enzyme-induced carbonate precipitation technology for reinforcing a bedding layer beneath an underground cable duct. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 15 (4), 1011-1022.
- Zurera-Cosano, G., García-Gimeno, R.M., Rodríguez-Pérez, R., Hervás-Martínez, C., 2006. Performance of response surface model for prediction of *Leuconostoc mesenteroides* growth parameters under different experimental conditions. *Food Control.* 17(6), 429-438.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วารสารวิชาการ

(1) Viroon Kamchoom, Thiti Khattiwong, Treesukon Treebupachatsakul, Suraparb Keawsawasvong, Anthony Kwan Leung. “Spatiotemporal Variations of Sand Hydraulic Conductivity by Microbial ApplicationMethos.” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.04.024>

2. การประชุมวิชาการ

(1) ธิติ ชัตติวงศ์, สกฤต ห่อวโนทยาน และ สุพจน์ ศรีนิล, การเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ HVDM, ระบบสูบน้ำด้วยความดันดีดลสูงและการทาบอดแบบไดนามิก บนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ธิติ ชัตติวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	31 มกราคม 2533
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 450/1 ตำบลเวียง อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา รหัสไปรษณีย์ 556000
ประวัติการศึกษา:	
2554	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:	
2558	ธิติ ชัตติวงศ์, สกฤต ท่อวินทยาน และ สุพจน์ ศรีนิล, การเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ HVDM, ระบบสูบน้ำด้วยความดันดีดสูงและการทาบดอัดแบบไดนามิก บนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20
2566	Viroon Kamchoom, Thiti Khattiwong, Treesukon Treebupachatsakul, Suraparb Keawsawasvong, Anthony Kwan Leung. "Spatiotemporal Variations of Sand Hydraulic Conductivity by Microbial Application Methods." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.04.024
2560-2562	วิศวกรโครงการและแผนงานโรงเรียนสาธิตนานาชาติพระจอมเกล้าลาดกระบัง
2562 - ปัจจุบัน	วิศวกร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง