

อิทธิพลของการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวดิ่งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และแบบสองต่อ
หนึ่ง ต่อการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า



นางสาวมณฑนา จุลวรรค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2566

EFFECTS OF 1:1 AND 2:1 ELECTRODES CONFIGURATED
VERTICALLY ON DEWATERING SOFT BANGKOK CLAY USING
ELECTROKINETIC



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil, Transportation and Geo-Resources Engineering


Suranaree University of Technology

Academic Year 2023

อิทธิพลของการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และแบบสองต่อหนึ่ง
ต่อการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

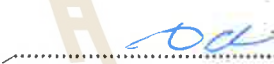
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



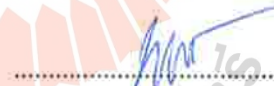
(อาจารย์ ดร.สมใจ ยุบลชิต)

ประธานกรรมการ



(ศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(รศ.ดร.ยุพาพร รักกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ



(รศ.ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มัทนา จุลวรรค์ : อิทธิพลของการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และแบบสองต่อหนึ่ง ต่อการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า (EFFECTS OF 1:1 AND 2:1 ELECTRODES CONFIGURATED VERTICALLY ON DEWATERING SOFT BANGKOK CLAY USING ELECTROKINETIC)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 93 หน้า

คำสำคัญ: จลนศาสตร์ไฟฟ้า/อิเล็กโทรออสโมซิส/การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง/การเร่งการระบายน้ำ/การทรุดตัว

การก่อสร้างที่ต้องถมดินก่อนทำการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งสามารถรับน้ำหนักได้ไม่มาก ต้องเร่งระบายน้ำในดินออกเพื่อไม่เกิดการวิบัติของดิน แต่ดินเหนียวมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ ส่งผลให้การระบายน้ำและการอัดตัวคายน้ำเสร็จสมบูรณ์ใช้ระยะเวลานาน เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวอ่อนได้ ซึ่งเหมาะกับดินที่มีความชื้นสูงและมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ แต่การเกิดรอยแตกกว้างของดินที่บริเวณรอบ ๆ ขั้วไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ลดลง ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการเกิดรอยแตกกว้างของดิน การศึกษานี้จึงทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบการจัดเรียงรูปแบบขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่งในแนวตั้งเพื่อลดปัญหาการเกิดรอยแตกกว้างของดิน และศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยเปรียบเทียบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า 4 รูปแบบ แบ่งเป็นการจัดวางแบบหนึ่งต่อหนึ่ง 2 รูปแบบ และการจัดวางแบบสองต่อหนึ่ง 2 รูปแบบ ดังนี้ Anode top and Cathode bottom (1AT), Anode bottom and Cathode top (1AB), Anode middle and Cathode top & bottom (2CTB) และ Anode top & bottom and Cathode middle (2ATB) ผลการศึกษา พบว่า การจัดเรียงรูปแบบ 2ATB สามารถลดความชื้นในดินได้สูงสุด สูงถึง 147.78% และรูปแบบ 1AB ทำให้เกิดการทรุดตัวมากที่สุด (27.08 มิลลิเมตร) เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพรีซิสร่วมกับแรงโน้มถ่วงจึงส่งผลให้เมื่อจัดวางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างจะเกิดการทรุดตัวได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามการวางขั้วแอโนดไว้ด้านบนส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างภายในมวลดินเนื่องจากอนุภาคดินเคลื่อนที่ขึ้น (อิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพรีซิส) ตรงข้ามการทรุดตัวของดิน และดินบริเวณด้านบนจะเกิดการแข็งตัวส่งผลให้อัตราการทรุดตัวช้าลง การศึกษานี้ยังยืนยันข้อเท็จจริงที่ว่า การระบายน้ำเกิดจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิสมากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิ การลดลงของความชื้นในดินยังทำให้ปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น กระแสไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ทั้งนี้ความชื้นในดินที่ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าลดลง ซึ่งการใช้เทคนิคนี้อาจเหมาะสมในการใช้ระยะสั้นมากกว่าระยะยาว เนื่องจากสามารถเร่งการระบายน้ำการหลุดตัวได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น เมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งจะช้าลงจนเริ่มคงที่



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา..... Mth

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Od

MANTANA JULVORAWONG : EFFECTS OF 1:1 AND 2:1 ELECTRODES CONFIGURATED VERTICALLY ON DEWATRING SOFT BANGKOK CLAY USING ELECTROKINETIC. THESIS ADVISOR : PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 93 PP.

Keyword: Electrokinetic/ Electro-osmosis/ Vertical Configured Electrodes/
Dewatering/ Settlement

Dewatering in soft clay is vital to improve the soft clay prior to construction. Since soft clay has very low permeability coefficient, dewatering in soft clay through consolidation process needs a long time to achieve the target water content. Electrokinetic is an alternative technique through which water is drained out faster than the that does through the technique based on consolidation process. This technique is suitable for very high water content clay, however cracks generated in the soil nearby the electrodes during dewatering affect the effectiveness of this technique. In order to minimize cracks nearby the electrodes, electrodes that laid horizontally and equally apart vertically from the other were installed in this study.

This study conducted a series of experiments to examine electrokinetic performance of Bangkok clay subjected to various configurations of electrode each of which is laid horizontally and equally apart vertically. In total, there were 4 configurations; two configurations for 1:1 type and two configurations for 2:1 type. For 1:1 type, anode and cathode were placed at top and bottom boundaries respectively, and vice versa for the other 1:1 configuration. These configurations are later labeled as 1AT and 1AB respectively. There were also two configurations for 2:1 type; 1) two electrodes were assigned as cathode and placed at the top and bottom boundaries while an anode was placed at the middle between two cathodes (2CTB), 2) two electrodes were assigned as anode and placed at the top and bottom boundaries while a cathode was placed at the middle between two anodes (2ATB). It was found that the 2ATB configuration yielded the best result in term water content reduction, while the 1AB yielded the best result in term of settlement. It was concluded that the

influence of electrophoresis and gravity played roles to the magnitude of settlement. Due to upward moving of clay particles during settlement (influence of electrophoresis), placing an anode above a cathode would generate cracks which interferes drainage of water, and hence settlement. This study also confirms that soil dewatering is governed by electro-osmosis rather than temperature. Reduction of water content during the experiment affects the efficiency of electrokinetic, including electric current, electrical resistance, electro-osmotic permeability coefficient. As such, this technique is suitable for any problem that requires smaller amount of dewatering within very short time period.



School of Civil Engineer

Academic Year 2023

Student's Signature *Mh J*

Advisor's Signature *D d*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะและช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.สมใจ ยุบลชิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิศวกรรมปฐพี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณบุคคลในครอบครัว เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจ

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดูส่งเสริมการศึกษา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มณฑนา จุลวรรค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry).....	7
2.2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)	7
2.3 Diffuse Double Layer (DDL).....	11
2.3.1 Helmholtz Model	12
2.3.2 Gouy-Chapman Model	13
2.3.2 Gouy-Chapman Model	13
2.3.3 Stern Model	13
2.4 จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic)	14
2.4.1 อิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis).....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	อิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis).....	14
2.4.3	Streaming Potential.....	15
2.4.4	Sedimentation potential.....	15
2.5	ข้อดีและข้อเสียในการใช้เทคนิคปรับปรุงดินจลนศาสตร์ไฟฟ้า	16
2.5.1	ข้อดีของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า	16
2.5.2	ข้อเสียของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	17
2.6	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า	18
2.6.1	ปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า	18
2.6.2	ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า	24
2.7	วิธีที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	29
2.7.1	การใช้ไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent current).....	29
2.7.2	การกลับขั้วไฟฟ้า (Polarity reversal).....	29
2.7.3	การเติมสารเคมี (Chemical).....	30
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	31
3.1	บทนำ.....	31
3.2	การเตรียมตัวอย่างดิน.....	34
3.3	คุณสมบัติของดิน.....	34
3.4	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ การหลุดตัว ความเป็นกรด-ด่าง ความต่างศักย์ไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดไฟฟ้า.....	35
3.3.1	เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20.....	35
3.3.2	Arduino MEGA 2560	37
3.3.3	เบรดบอร์ด (BreadBoard).....	38
3.3.4	เวอร์เนีย (Vernier Caliper).....	39
3.3.5	เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH).....	40
3.3.6	มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter).....	40
3.3.7	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply)	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	ขั้นตอนและการเตรียมตัวอย่างการทดสอบด้วยเทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า	41
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล	44
4.1	บทนำ.....	44
4.2	ผลการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง.....	44
4.2.1	ความชื้นในดิน และการระบายน้ำ	44
4.2.2	การทดสอบ.....	47
4.2.3	กระแสไฟฟ้า และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
4.2.4	ความต้านทานไฟฟ้า	52
4.2.5	อุณหภูมิ	54
4.2.6	ความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	56
4.2.7	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential Different)	58
4.2.8	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก	59
4.2.9	สรุปและอภิปรายผล	61
4.3	เปรียบเทียบผลการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง	62
4.3.1	ความชื้นในดิน และการระบายน้ำ	63
4.3.2	การทดสอบ.....	64
4.3.3	กระแสไฟฟ้า และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	65
4.3.4	ความต้านทานไฟฟ้า	67
4.3.5	อุณหภูมิ	68
4.3.6	ความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	69
4.3.7	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential Different)	70
4.3.8	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก	71
4.3.9	สรุปและอภิปรายผล	72
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	74
5.1	สรุปผลการวิจัย	74
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	82
ประวัติผู้เขียน	93



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า.....	32
3.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดิน	35
3.3	ข้อมูล Arduino MEGA 2560	37
4.1	Energy Consumption เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง.....	52
4.2	Energy Consumption เปรียบเทียบจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง.....	67



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เซลล์กัลป์วานิก (Galvanic Cell).....	9
2.2 เซลล์ถ่านไฟฉาย.....	8
2.3 เซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว.....	9
2.4 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte cell).....	11
2.5 การทำโลหะให้บริสุทธิ์.....	10
2.6 การชุบโลหะ.....	11
2.7 การกระจายไอออนที่บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว	12
2.8 Helmholtz Model	12
2.9 Gouy-Champman Model.....	13
2.10 Stern Model	14
2.11 การเกิดปฏิกิริยา Electrophoresis.....	14
2.12 การเกิดขึ้นของกระบวนการ Electro-osmosis.....	15
2.13 การเกิดขึ้นของกระบวนการ Streaming Potential.....	15
2.14 การเกิดขึ้นของกระบวนการ Sedimentation potential.....	16
2.15 การเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส.....	17
2.16 ระนาบการเกิด Zeta potential	20
2.17 การจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวราบ.....	27
2.18 ตัวอย่างการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง	28
3.1 การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง.....	32
3.2 การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง	32
3.3 ฟังก์ชันดำเนินงานวิจัยการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า	33
3.4 ลักษณะดินตัวอย่าง	34
3.5 ลักษณะดินตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้น 170%.....	34
3.6 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20	36
3.7 ลักษณะหัววัดอุณหภูมิ และขาที่ต้องเชื่อมต่อ	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	Arduino MEGA 2560 37
3.9	หน้าต่างโปรแกรม Arduino..... 38
3.10	เบรด์บอร์ด (BreadBoard)..... 39
3.11	การจ่ายไฟของ เบรด์บอร์ด (BreadBoard) 39
3.12	เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH)..... 40
3.13	Digital Multimeter 40
3.14	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า..... 41
3.15	แบบทดสอบ 42
3.16	ลักษณะฐานของแบบทดสอบและรายละเอียดรูเจาะ 42
3.17	ลักษณะขั้วไฟฟ้าและรายละเอียดรูเจาะบริเวณขั้วแคโทด 43
3.18	แผนภาพการทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... 43
4.1	ปริมาณความชื้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ..... 45
4.2	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับเวลาที่ผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT..... 45
4.3	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับเวลาที่ผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB..... 46
4.4	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนไปกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อ หนึ่ง 47
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT..... 48
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB..... 48
4.7	เปรียบเทียบการทรุดตัวของดินกับเวลาเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่ง 49
4.8	ดินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ..... 49
4.9	ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT 50
4.10	ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB..... 50
4.11	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่ง..... 51
4.12	Energy Consumption 52
4.13	ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT..... 52
4.14	ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB..... 53

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ หนึ่งต่อหนึ่ง 53
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา เมื่อจัดวางขั้วไฟฟารูปแบบ 1AT 54
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา เมื่อจัดวางขั้วไฟฟารูปแบบ 1AB 55
4.18	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ... 55
4.19	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้า รูปแบบ 1AT..... 56
4.20	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้า รูปแบบ 1AB..... 56
4.21	pH ณ ตำแหน่ง ต่าง ๆ เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง 57
4.22	ขั้วแอโนดก่อนและหลังการทดสอบเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง 57
4.23	ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AT 58
4.24	ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AB 58
4.25	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อ จัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AT..... 60
4.26	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อ จัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AB..... 60
4.27	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่าน สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง 61
4.28	แสดงปริมาณความชื้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ หนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง 63
4.29	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดสอบสำหรับการ จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง 64
4.30	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง..... 65
4.31	ดินเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบสำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง.... 65

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 66
4.33	Energy Consumption เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 67
4.34	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 68
4.35	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 69
4.36	pH ของดิน ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบสำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 70
4.37	ขั้วไฟฟ้าหลังการทดสอบเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 70
4.38	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 71
4.39	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง..... 72
ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา รูปแบบ 2CTB.....83
ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา รูปแบบ 2ATB.....83
ก.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา รูปแบบ 2CTB.....84
ก.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา รูปแบบ 2ATB.....84
ก.5	Energy consumption รูปแบบ 2CTB.....85
ก.6	Energy consumption รูปแบบ 2ATB.....85
ก.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา รูปแบบ 2CTB.....86
ก.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา รูปแบบ 2ATB.....86
ก.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา รูปแบบ 2CTB.....87
ก.10	ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา รูปแบบ 2ATB.....87
ก.11	ความขึ้นเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ รูปแบบ 2CTB.....88
ก.12	ความขึ้นเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ รูปแบบ 2ATB.....88

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนไปกับเวลา รูปแบบ 2ATB.....	89
ก.15 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) รูปแบบ 2CTB.....	90
ก.16 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) รูปแบบ 2ATB.....	90
ก.17 ความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้า รูปแบบ 2CTB.....	91
ก.18 ความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้า รูปแบบ 2ATB.....	91
ก.19 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป รูปแบบ 2CTB	92
ก.20 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป รูปแบบ 2ATB	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การก่อสร้างในบริเวณที่มีลักษณะเป็นหนองน้ำ หรือพื้นที่ที่ต้องมีการถมดินก่อนทำการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากดินบริเวณนั้นเป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งสามารถรับน้ำหนักได้ไม่มาก มีกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ต่ำ ก่อนทำการก่อสร้างจำเป็นต้องเร่งระบายน้ำในดินเหนียวออกก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติของดินในระหว่างการก่อสร้างหรือในอนาคตเมื่อก่อสร้างเสร็จสิ้น แต่เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability) ต่ำ และมีปริมาณความชื้น (Water Content) สูง จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการระบายน้ำและการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation) ใช้เวลานานเพื่อให้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งการก่อสร้างโดยที่ดินยังไม่มีการอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์ อาจทำให้เกิดปัญหาการทรุดตัวในระหว่างการก่อสร้างหรือในอนาคตได้ ดังนั้นการทำการก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ดินเหนียวอ่อนต้องทำการปรับปรุงดิน โดยการเร่งการระบายน้ำในดินออก เพื่อเป็นการลดระยะเวลาการก่อสร้างและเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาตามมา และเป็นการประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง ซึ่งปัญหาการก่อสร้างในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนหากไม่ดำเนินการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน อาจเกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมาดังนี้

การวิบัติของงานถมหรืออาคาร เนื่องจากดินเหนียวอ่อนสามารถรับน้ำหนักได้ไม่มาก เมื่อเพิ่มน้ำหนักให้กับดินเหนียวอ่อนโดยตรงจึงอาจส่งผลให้ดินรับน้ำหนักไม่ได้และเกิดการวิบัติขึ้น

การวิบัติของงานขุด เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีความอ่อนตัว เมื่อมีการขุดหลุมหรือบ่อ ดินอาจเคลื่อนตัวลงไปในช่วงว่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อทั้งสิ่งปลูกสร้างในบ่อขุดหรือบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงบ่อขุด หากมีการขุดลึกลงไปส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวมากขึ้นตามไปด้วย

การทรุดตัว เนื่องจากดินเหนียวมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ ทำให้ระยะเวลาในการระบายน้ำออกของดินเหนียวนานขึ้น หากทำการก่อสร้างโดยที่ดินเหนียวยังไม่มีการอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์จะเกิดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างในอนาคต

ดังที่กล่าวมาข้างต้นการตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในทางวิศวกรรมโยธา เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่อโครงสร้างในอนาคต ซึ่งเทคนิคการปรับปรุงดินที่ใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

เทคนิคการระบายน้ำแนวตั้ง (Prefabricated vertical drained) เป็นการปรับปรุงดินโดยการเร่งการระบายน้ำของดินในแนวตั้ง ซึ่งจะสามารถเร่งการทรุดตัวของดินให้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคนี้การระบายน้ำในแนวตั้ง ในชั้นดินเหนียวอ่อนอาจเกิดการเสีรูปด้านข้างในขณะที่การทรุดตัวต่ำ และทำให้การระบายน้ำออกจากดินไม่ลดลงตามเวลาที่กำหนด ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคระบบการระบายน้ำแนวตั้ง จำเป็นต้องติดตั้งชุดตรวจวัดการทรุดตัว (Settlement plate) สำหรับตรวจสอบการทรุดตัวและการเสีรูปด้านข้าง เพื่อป้องกันการเสีรูปในชั้นดินเหนียว

เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยสุญญากาศ (Vacuum preloading) เป็นการใช้แรงดันสุญญากาศมาทดแทนการนำดินถมเพื่อทำให้น้ำหนักกดทับถ่วงหน้า โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศและน้ำออกจากชั้นดินเหนียว ด้วยการผ่าน PVD ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการปรับปรุงดินโดยการเร่งการระบายน้ำในดิน อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยสุญญากาศ อาจส่งผลทำให้พื้นที่ข้างเคียงเกิดความเสียหาย หรืออาจเกิดรอยแยกที่บริเวณพื้นดินของขอบพื้นที่ที่ทำการปรับปรุงดินได้ เนื่องจากอิทธิพลของแรงดูดที่สูง (สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2561)

เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic) เป็นเทคนิคที่ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาใหม่ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในดินที่มีความชื้นสูงและมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำ โดยการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า จะให้พลังงานไฟฟ้าแก่มวลดินโดยมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นตัวกลางทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมวลดิน เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มมีการไหลผ่านมวลดินแล้วทำให้เกิดการไหลของน้ำจากขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานวิศวกรรมที่หลากหลาย เช่น การเสริมลาดดินให้มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น การเร่งการอัดตัวคายน้ำของดิน การเพิ่มเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม และการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในดิน เป็นต้น (Estabragh A.R. et al., 2014; Sedigheh Mohamadi et al., 2021; Fatemeh et al., 2021)

อย่างไรก็ตามเทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบการทดสอบที่เหมาะสม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางวิศวกรรม และยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในดินเมื่อเริ่มทำการทดสอบซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดินได้ การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า และ ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการศึกษาลักษณะการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่

ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ เมื่อทำการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยทำการสังเกตพฤติกรรมของสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นกับมวลดิน เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ความร้อน, ความชื้นในดิน ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดสอบ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยการสร้างแบบจำลองของดินในกล่องการทดสอบ (Box test) ซึ่งดินที่ใช้ในการทดสอบคือดินบริเวณพื้นที่เขตนองจอก กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 3-5 เมตร ซึ่งมีปริมาณความชื้นสูงและมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินต่ำ มีรายละเอียดขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

1.3.1 การศึกษานี้จะเปรียบเทียบการวัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1:1 electrodes vertically configured) และสองต่อหนึ่ง (2:1 electrodes vertically configured) โดยการจัดเรียงทั้งสองรูปแบบเป็นการจัดเรียงในแนวตั้ง (Vertical configuration) คือ ขั้วไฟฟ้าจะเรียงตัวด้านบนและล่างของดิน (การเคลื่อนที่ของน้ำเกิดขึ้นในแนวตั้ง)

1.3.2 สร้างแบบจำลองสี่เหลี่ยมโดยมีความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร และความสูง 180 มิลลิเมตร พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดทางไฟฟ้า (Power supply) เชื่อมกับขั้วไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและทนการกัดกร่อนได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดโลหะ

1.3.3 ตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบเมื่อปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า เช่น ความร้อน, pH และความชื้นในดิน

1.3.4 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของมวลดินในระหว่าง และ เสร็จสิ้นการทดสอบเมื่อปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นองค์ความรู้เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการศึกษาการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม และทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ในการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และปัจจัยที่ควร

คำนึงถึงหรือตรวจสอบเมื่อใช้เทคนิคนี้ในการปรับปรุงดิน เพื่อให้เทคนิคนี้แพร่หลายมากขึ้นในทางวิศวกรรม และสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในทางปฏิบัติมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีปริมาณความชื้นสูง และมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำ เพื่อลดระยะเวลาและต้นทุนในการก่อสร้าง



บทที่ 2

ปฐพีวิศวกรรมกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การก่อสร้างสำหรับโครงสร้างทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นบ้าน อาคาร สิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ สะพาน หรือแม้แต่ถนน ต้องทำการตรวจสอบดินที่จะนำมาใช้รับน้ำหนักสิ่งก่อสร้างเหล่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างบริเวณพื้นที่ดินเหนียวอ่อน เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีความสามารถในการรับแรงอัดแรงเฉือน และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ ฯลฯ ซึ่งการก่อสร้างบริเวณพื้นที่ดินเหนียวอ่อนมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน หากไม่ดำเนินการปรับปรุงอาจเกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา เช่น การวิบัติของงานถมหรืออาคาร การวิบัติของงานขุด และปัญหาการทรุดตัว เป็นต้น ซึ่งดินในเขตกรุงเทพมหานครส่วนมากมักเป็นชั้นของดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีปริมาณความชื้นสูง และมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ ดินประเภทนี้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสมแก่การก่อสร้าง ถ้าบริเวณพื้นที่ก่อสร้างต้องมีการถมดินก่อน หรือแม้แต่มีความจำเป็นต้องก่อสร้างอย่างเร่งด่วนไม่สามารถรอให้ดินในพื้นที่นั้น ๆ มีการอัดตัวคายน้ำของดินได้อย่างสมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงดินก่อนเสียก่อน และเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกพัฒนาหลายเทคนิค ดังนี้

การบดอัดดิน (Soil compaction) เป็นเทคนิคการปรับปรุงดินที่ง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรม การบดอัดดินจะช่วยเพิ่มหน่วยน้ำหนัก กำลังต้านทานแรงเฉือน ความต้านทานการอัดตัว และลดการซึมผ่านน้ำในดิน ทำให้กำลังแบกทานของดินสูงขึ้น การทรุดตัวของดินลดลง และเสถียรภาพของลาดดินสูงขึ้น เทคนิคนี้นิยมใช้ในงานก่อสร้างถนน เขื่อนดิน และงานโครงสร้างพื้นฐานทั่วไป (Infrastructure) แต่การปรับปรุงดินด้วยเทคนิคนี้ไม่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อนที่มีปริมาณความชื้นในดินค่อนข้างสูง

เทคนิคทางเคมี (Chemical) การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินด้วยวิธีการทางเคมี เป็นเทคนิคการผสมสารเคมีให้เป็นเนื้อเดียวกับเม็ดดิน เช่น ปูนขาว ซีเมนต์ แกลบลอย เป็นต้น ในการผสมสารเคมีเหล่านี้ช่วยเสริมความแข็งแรงให้ดิน และทำให้ดินมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น (Abd-Allah & Omer A., 2021; C.V. Nilna & S. Chandrakaran, 2022)

แต่อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคทางเคมีจำเป็นต้องใช้เวลาในบ่มให้ดินและสารเคมีที่นำมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ดินมีความแข็งแรงที่เหมาะสม และการใช้เทคนิคนี้ไม่ได้ช่วยเร่งการอัดตัวของน้ำของดินในกรณีที่ใช้กับดินที่มีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูง และช่วยเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของดินและสารเคมีที่นำมาผสม

ระบบระบายน้ำในแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drains) เป็นเทคนิคการปรับปรุงในชั้นดินเหนียวที่นิยมเป็นอย่างมาก เทคนิคนี้จะวางน้ำหนักบรทุกช่วงคราก่อนทำการก่อสร้างโครงสร้างถาวรบนชั้นดินเหนียว เพื่อเพิ่มกำลังแบกทาน (Bearing capacity) และลดการทรุดตัว (Settlement) ของชั้นดินเหนียวก่อนทำการก่อสร้างโครงสร้างถาวร อีกทั้งยังช่วยเร่งระบายน้ำในดินออก ส่งผลให้ระยะเวลาในการอัดตัวของน้ำในชั้นดินเหนียวสั้นลง เทคนิคนี้เป็นที่นิยมในการก่อสร้างอาคารและงานโครงสร้างดินที่มีชั้นดินเหนียว การปรับปรุงดินด้วยเทคนิคระบบระบายน้ำในแนวตั้ง จำเป็นต้องมีการติดตั้งชุดตรวจวัดการทรุดตัว เพื่อตรวจวัดค่าการทรุดตัว ค่าการเสีรูปด้านข้าง และความดันน้ำส่วนเกินกับเวลา ซึ่งถ้าหากดินเหนียวอ่อนมาก ๆ อาจทำให้เกิดการเสีรูปด้านข้างมากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคระบบระบายน้ำในแนวตั้งลดลง และอาจส่งผลให้ชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดการวิบัติได้ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงด้วยเทคนิคระบายน้ำในแนวตั้งราคาต่ำก่อสร้างส่วนใหญ่เป็นค่าดินถมเพื่อใช้ในการเป็นน้ำหนักบรทุกช่วงหน้า และเทคนิคนี้ไม่เหมาะกับชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก ๆ สาเหตุจากไม่สามารถถมดินเพื่อเป็นน้ำหนักบรทุกช่วงหน้าได้สูงมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการวิบัติ ดังนั้นจึงต้องมีการถมหลายชั้นซึ่งทำให้การปรับปรุงดินด้วยเทคนิคระบายน้ำในแนวตั้งใช้ระยะเวลานานขึ้น

การปรับปรุงดินด้วยวิธีสุญญากาศ (Vacuum consolidation method, VCM) เป็นระบบที่ใช้แรงดันสุญญากาศมาทดแทนการใช้ดินถมมาเป็นน้ำหนักกดทับช่วงหน้า โดยเทคนิคนี้จะใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศและน้ำออกจากชั้นดินเหนียว โดยต้องป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของระบบสุญญากาศ เทคนิคนี้เป็นการเร่งการทรุดตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการระบายน้ำในดินออกเมื่อใช้เทคนิคสุญญากาศอาจไม่ลดลงมากนัก เนื่องจากในระหว่างการปรับปรุงเมื่อดินเกิดการทรุดตัวแผ่น PVD จะยุบตัวและพับตัวลงด้วย ส่งผลให้การระบายน้ำในดินลดลง และการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคสุญญากาศอาจส่งผลต่อพื้นที่ใกล้เคียง เนื่องจากอิทธิพลของแรงดันสุญญากาศทำให้ดินที่อยู่บริเวณขอบของพื้นที่ปรับปรุงดินทรุดตัวตามไปด้วย และอาจส่งผลให้อาคารที่อยู่บริเวณใกล้เคียงเกิดการแตกร้าวได้ (สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2561)

การปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ไม่เป็นที่นิยม ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในดิน ส่งผลให้ให้อนุภาคของน้ำในดินเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น กำลังรับแรง-

เดือน กำลังรับแรงอัด และสามารถเร่งการอัดตัวคาน้ำในดิน เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเหมาะสำหรับดินที่มีปริมาณความชื้นสูง ดังที่กล่าวไปข้างต้นเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไม่เป็นที่นิยม จึงไม่มีมาตรฐานในการออกแบบการทดสอบที่ชัดเจน และขาดความเข้าใจอีกมากเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า เช่น การจัดเรียงในแนวราบหรือแนวตั้ง ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ กล่าวคือ การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในรูปแบบทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม หรือหกเหลี่ยม เป็นต้น หรือการจัดเรียงแบบหนึ่งมิติหรือสองมิติ ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า การศึกษานี้จึงศึกษาการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และสังเกตการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินระหว่างการทดสอบและเสร็จสิ้นการทดสอบ และตรวจสอบอิทธิพลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเมื่อปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

2.2 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry)

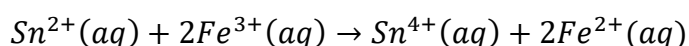
2.2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron) หรือมีการให้หรือการรับอิเล็กตรอน ทำให้เลขออกซิเดชันของธาตุเปลี่ยนแปลง การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังแสดงต่อไปนี้



$\text{Zn}(s) \rightarrow \text{Zn}^{2+}(aq)$ คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ปฏิกิริยานี้จะเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) ทำให้เกิดการเสียอิเล็กตรอน เลขออกซิเดชัน จึงเพิ่มขึ้น

$2\text{H}^+(aq) \rightarrow \text{H}_2(g)$ คือ ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ปฏิกิริยานี้จะเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ซึ่งจะถูกรีดิวซ์ (Reduced) ทำให้เกิดการรับอิเล็กตรอน เลขออกซิเดชัน จึงลดลง

ครึ่งปฏิกิริยา (Half-Reaction) แม้ว่ากระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน นั้นเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน แต่สามารถพิจารณาสองกระบวนการแยกกัน และจะเรียกแต่ละกระบวนการว่า ครึ่งปฏิกิริยาจะมีอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อรวมสองครึ่งปฏิกิริยาจะได้ปฏิกิริยารวมรีดอกซ์ และจำนวนอิเล็กตรอนจะต้องสมดุล ตัวอย่างครึ่งปฏิกิริยา แสดงดังต่อไปนี้



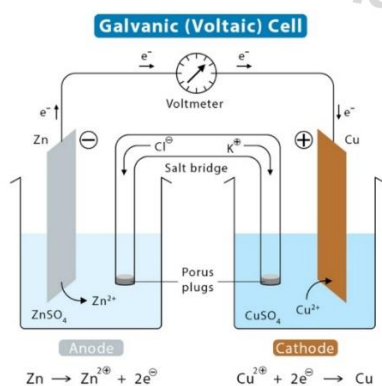
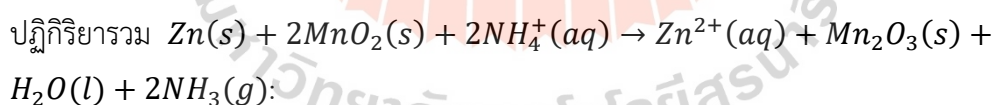
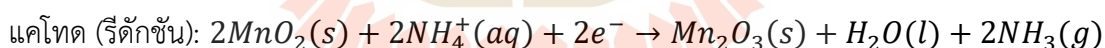
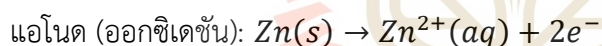
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ $\text{Sn}^{2+}(aq) \rightarrow \text{Sn}^{4+}(aq) + 2e^-$ (เสียอิเล็กตรอน)

ปฏิกิริยารีดักชัน คือ $2\text{Fe}^{3+}(aq) + 2e^- \rightarrow 2\text{Fe}^{2+}(aq)$ (รับอิเล็กตรอน)

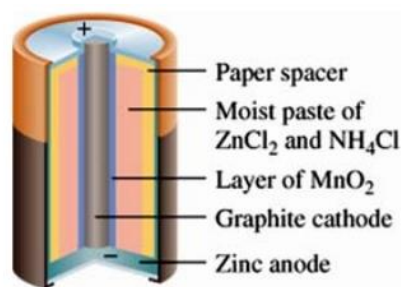
2.2.2 เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical Cell) คือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) คือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า เกิดจากสารเคมีทำปฏิกิริยาในเซลล์แล้วเกิดกระแสไฟฟ้า ประกอบด้วยครึ่งเซลล์สองครึ่งเซลล์มาต่อกัน แล้วเชื่อมให้ครบวงจรด้วยการใช้สะพานเกลือต่อระหว่างครึ่งเซลล์ไฟฟ้าทั้งสอง ดังรูปที่ 2.1 โดยที่สะพานเกลือจะทำหน้าที่รักษาสสมดุลของไอออน ในเซลล์กัลวานิกขั้วแอโนดจะเป็นขั้วลบเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งจะเสียอิเล็กตรอน และขั้วแคโทดจะเป็นขั้วบวกเกิดปฏิกิริยารีดักชันซึ่งรับอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นแล้วที่ขั้วแอโนดจะถูกกัดกร่อนและกระแสไฟจะเกิดขึ้น ซึ่งศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็นบวก เซลล์กัลวานิกมี 2 ประเภทคือ

เซลล์ปฐมภูมิ คือ เมื่อสร้างเซลล์ประเภทนี้ขึ้นมาแล้วสามารถใช้ได้ทันที แต่เมื่อใช้หมดแล้วต้องทิ้ง เช่น เซลล์ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ เซลล์ปรอท เซลล์เชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะประกอบไปด้วยแท่งกราไฟต์ (แคโทด) และสังกะสี (แอโนด) ภายในจะอัดด้วยสารผสม NH_4Cl , $ZnCl_2$, MnO_2 และแป้งเปียก ($NH_4Cl(aq) + ZnCl_2(aq)$) ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังต่อไปนี้



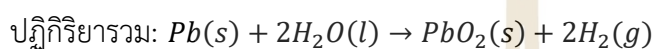
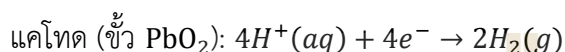
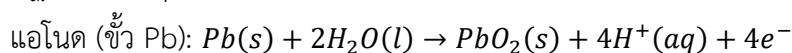
รูปที่ 2.1 เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell)
(ที่มา: <https://www.chemistrylearner.com>)



รูปที่ 2.2 เซลล์ถ่านไฟฉาย (ธานินทร์, 2559)

เซลล์ทุติยภูมิ คือ เซลล์ที่สร้างมาแล้วต้องมีการประจุไฟฟ้าก่อน เมื่อใช้หมดแล้วสามารถประจุใหม่ได้อีก เช่น เซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว เซลล์นิเกิล-แคดเมียม เซลล์โซเดียม-ซัลเฟอร์ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นโลหะตะกั่วอยู่ในสารละลายกรด H_2SO_4 เมื่อสร้างเสร็จจะต้องนำไปประจุไฟฟ้าก่อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแบ่งเป็นปฏิกิริยาประจุไฟและปฏิกิริยาจ่ายไฟแสดงดังต่อไปนี้

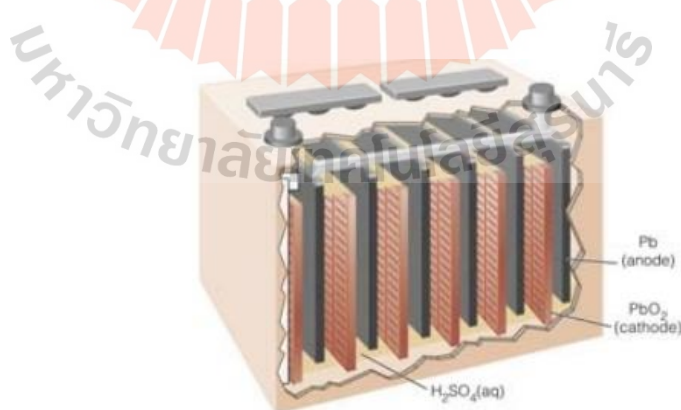
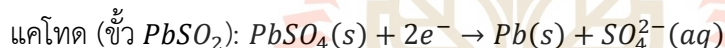
ปฏิกิริยาประจุไฟ:



ปฏิกิริยาจ่ายไฟ:



เมื่อจ่ายไฟหมดจะเกิด $PbSO_4$ ขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำให้ต้องประจุใหม่ได้ PbO_2 และ Pb กลับมา ดังปฏิกิริยาประจุไฟครั้งที่ 2

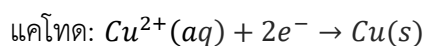
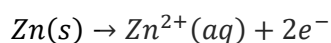
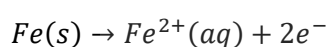
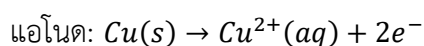


รูปที่ 2.3 เซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว (ธานินทร์, 2559)

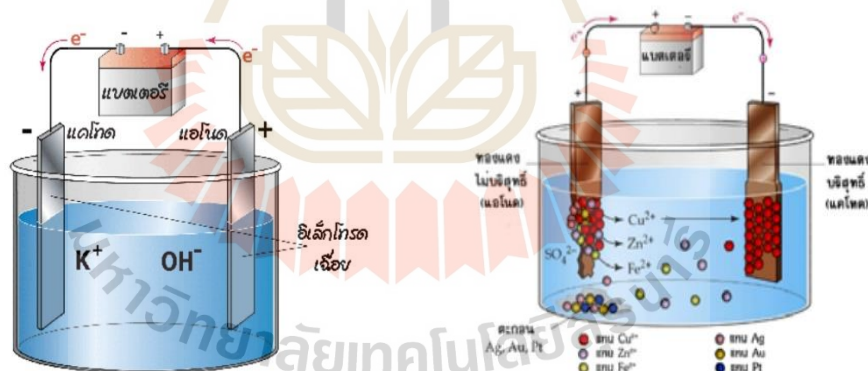
2) เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นการนำพลังงานไฟฟ้าจ่ายเข้าไปในเซลล์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการย้อนกลับปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผันกลับได้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์จึงมีค่าเป็นลบ ส่วนประกอบของเซลล์นั้นมี ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 โดยที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์ขั้วแอโนดเป็นขั้วบวก เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขั้วแคโทดเป็นขั้วลบ เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เซลล์อิเล็กโทรไลต์สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ดังนี้

การทำให้โลหะบริสุทธิ์โดยใช้เซลล์อิเล็กโทรไลต์ เช่น การทำทองแดงให้บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 2.5 โดยให้ทองแดงที่ไม่บริสุทธิ์ให้เป็นขั้วแอโนดหรือขั้วบวก และโลหะทองแดงที่บริสุทธิ์ให้เป็นขั้วแคโทดหรือขั้วลบ นำทั้งสองขั้วจุ่มในสารละลายทองแดง จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



โดยโลหะ Ag, Au, Pt เกิดการตกตะกอนเพราะมี E^0 มากกว่า Cu และปริมาณโลหะที่หลุดหรือเคลือบอยู่บนโลหะ คำนวณได้โดยอาศัยกฎของฟาราเดย์ (ไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ (96,487C) จะแยกสารได้ $1/n$ โมล) เช่น $\text{Cu}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Cu}(s)$ ถ้าใช้ไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์จะแยก Cu ได้ $1/2$ โมล หรือ 31.75 กรัม



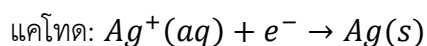
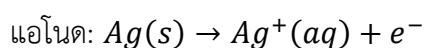
รูปที่ 2.4 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte cell)

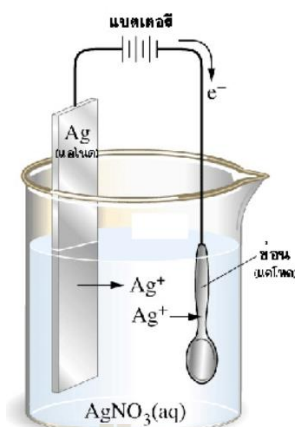
(ธานินทร์, 2559)

รูปที่ 2.5 การทำโลหะให้บริสุทธิ์

(ธานินทร์, 2559)

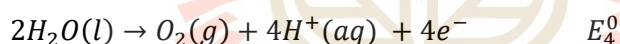
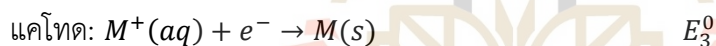
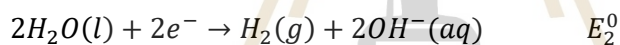
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เช่น การชุบซ้อนด้วยเงิน ดังรูปที่ 2.6 โดยขั้วแอโนดหรือขั้วบวกจะเป็นโลหะที่ใช้ชุบ ซึ่งในที่นี้คือแท่งเงิน และขั้วแคโทดหรือขั้วลบเป็นโลหะที่ต้องการชุบ ซึ่งในที่นี้คือข้อ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ โลหะที่เป็นไอออนของโลหะที่เป็นแอโนด ในที่นี้คือเงิน การเกิดปฏิกิริยาเป็นดังต่อไปนี้





รูปที่ 2.6 การชุบโลหะ (ชานินทร์, 2559)

การแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า เช่น การแยกสารประกอบ MX สารประกอบจะเกิดการแตกตัวและประจุบวกนั้นเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดหรือขั้วลบและประจุลบนั้นเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดหรือขั้วบวกและการแยกดังกล่าวจะมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย การเกิดปฏิกิริยาแสดงดังต่อไปนี้

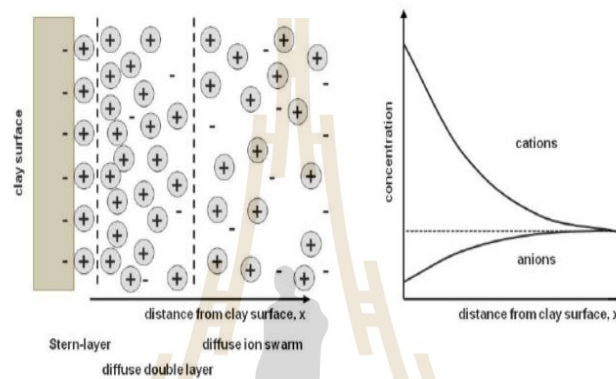


ที่แคโทดหรือขั้วลบถ้า $E_1^0 > E_2^0$ แสดงว่า M^+ รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า H_2O จะเกิดเป็นโลหะ $M(s)$ และที่แอโนดหรือขั้วบวกถ้า $E_3^0 > E_4^0$ แสดงว่า X^+ ให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่า H_2O จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส $X_2(g)$

2.3 Diffuse Double Layer (DDL)

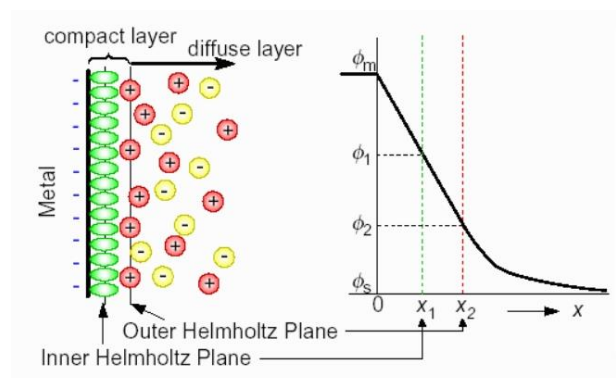
เป็นโครงสร้างไอออนที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวที่มีประจุไฟฟ้า เช่น ดินเหนียว และทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ โครงสร้างของดินเหนียวเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเมื่อไอออนเหล่านี้ถูกแทนที่ด้วยธาตุที่มีประจุต่างกัน เช่น อะลูมิเนียม (Al^{3+}) อาจถูกแทนที่ด้วยเหล็ก (Fe^{2+}) หรือแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของดินเหนียวเกิดเป็นประจุลบขึ้น เมื่อมีสารแขวนลอยอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิของดินเหนียวจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ ซึ่งประจุบวกจะวิ่งเข้าหาประจุลบของดินทำให้เกิดชั้นของไอออนบวกรอบผิวดิน นอกจากนี้ ด้านนอกจะเกิดการก่อตัวของชั้นที่มีขั้วไอออนตรงข้ามกัน (มีทั้งไอออนบวกและลบ) เพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งเรียกชั้นนี้ว่า Diffuse Layer ชั้นนี้เกิดจากอิทธิพลของ

แรงสองแรงที่เท่ากัน ได้แก่ แรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิตและแรงกระจายตัว ส่วนชั้นของไอออนบวกเกิดจากแรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิต ดังนั้นโครงสร้างนี้จะประกอบด้วยอนุภาคดินที่มีพื้นผิวเป็นประจุลบ ชั้นของไอออนบวกและชั้นของ Diffuse Layer ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เกิดจากอนุภาคดินที่มีประจุลบ ชั้นของไอออนบวกที่อยู่บริเวณพื้นผิวของดิน และชั้นของ Diffuse Layer ที่มีการกระจายตัวของประจุบวกและประจุลบ เรียกว่า Diffuse Double Layer ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายไอออนที่บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว (Diffuse Double Layer, DDL)
(Dahlak et al. 2016)

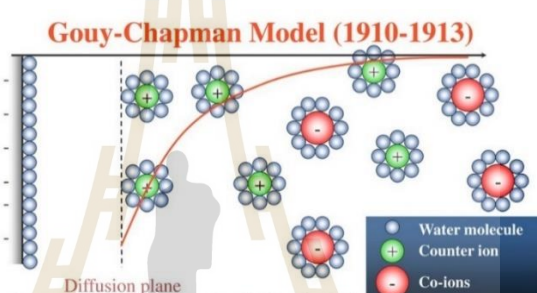
2.3.1 Helmholtz Model เป็นแบบจำลองแรกที่เสนอเกี่ยวกับ Diffuse Double Layer เสนอโดย Helmholtz (1879) ซึ่งสันนิษฐานว่าประจุบวกที่สมดุลทางไฟฟ้า (ไอออนบวก) จะรวมตัวกันอยู่ในระนาบขนานกับพื้นผิวของอนุภาคโดยมีประจุไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ และมีระยะห่างจากอนุภาคเพียงเล็กน้อย ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่พื้นผิวและลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อระยะห่างจากพื้นผิวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Helmholtz Model

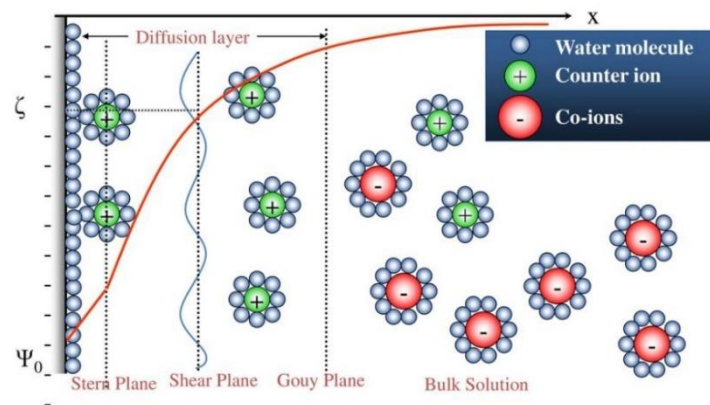
(ที่มา: https://web.nmsu.edu/~sasm/classes/chem435/Lab14/double_layer.html)

2.3.2 Gouy-Chapman Model เป็นแบบจำลองไฟฟ้าสถิตของการกระจายตัวของไอออนในอนุภาคดิน เสนอโดย Gouy (1910) และ Chapman (1913) เมื่อในอนุภาคดินเหนียวมีโมเลกุลของน้ำหรือมีความชื้น ไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคดินเหนียว ทำให้บริเวณพื้นผิวของอนุภาคดินเหนียวมีความเข้มข้นของไอออนสูง และไอออนอิสระที่เหลือจะกระจายตัวห่างจากอนุภาคดินเหนียวเรื่อย ๆ เพื่อพยายามให้ความเข้มข้นของไอออนเท่ากันพื้นผิวที่มีประจุไฟฟ้ากระจายอยู่ในสารละลาย เรียกว่า Gouy Chapman Diffuse Double Layer และแบบจำลองนี้จะถือว่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดบนพื้นผิวอนุภาคมีความสมดุลโดยไอออนบวกส่วนเกิน ดังนั้นประจุไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคและลดลงแบบทวีคูณตามระยะทางที่ห่างออกจากพื้นผิวของอนุภาค ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Gouy-Chapman Model (Daltan, 2019)

2.3.3 Stern Model เป็นแบบจำลองที่ได้ปรับปรุงแก้ไขจากแบบจำลองของ Gouy-Chapman เนื่องจากแบบจำลองของ Gouy-Chapman ไม่ได้คำนึงถึงขนาดของไอออน แบบจำลอง Stern เสนอโดย Stern (1924) ในแบบจำลองนี้คำนึงขนาดของไอออน ในแบบจำลองนี้สันนิษฐานว่า Double layer ประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนของไอออนบวกที่ถูกดึงดูดด้วยพื้นผิวที่มีประจุลบซึ่งอยู่ในชั้น Stern และไอออนที่กระจายตัวอยู่บริเวณภายนอก ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค Diffusion layer จะถูกแยกโดย Stern plane ซึ่งอยู่ห่างจากพื้นผิวประมาณรัศมีของไฮเดรตไอออน (ไอออนที่มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ) ในชั้น Stern จะเต็มไปด้วยไอออนบวก และศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเป็นเส้นตรงตามระยะห่างจากพื้นผิว ตามแบบจำลองของ Helmholtz ส่วนในชั้น Diffuse Layer ศักย์ไฟฟ้าจะลดลงแบบทวีคูณตามระยะห่างจากพื้นผิวตามแบบจำลอง Gouy-Chapman ดังรูปที่ 2.10

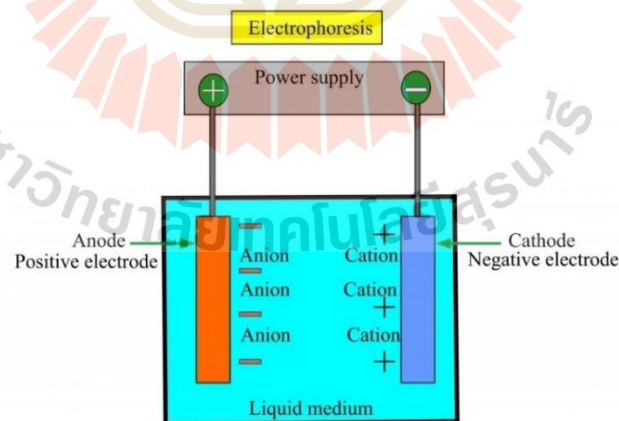


รูปที่ 2.10 Stern Model (Daltan, 2019)

2.4 จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic)

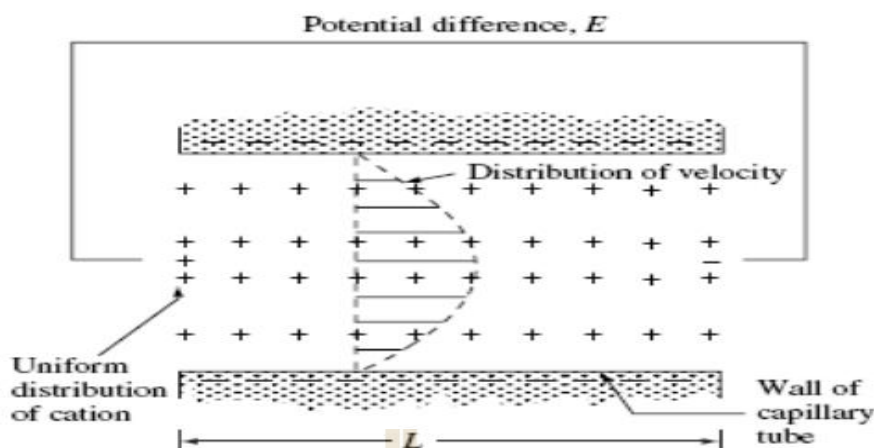
จลนศาสตร์ไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่เกิดจากการรวมตัวกันของผลของการเคลื่อนที่และแหล่งกำเนิดไฟฟ้า การจะเกิดสิ่งเหล่านี้ขึ้นได้เป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าใน Double layer ของอนุภาคดิน และในปีคริสต์ศักราช 1880 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าได้ถูกค้นพบดังนี้

2.4.1 อิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งของเหลวหรือสารละลายจะหยุดนิ่งไม่เกิดการเคลื่อนที่ เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามากระทำตัวอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ดังรูปที่ 2.11



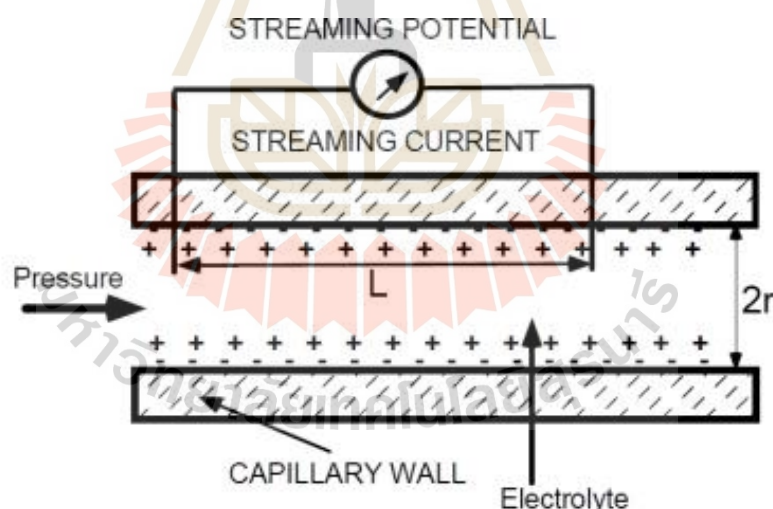
รูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยา Electrophoresis (ที่มา: <https://www.smacgigworld.com/>)

2.4.2 อิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis) เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้ของเหลวหรือสารละลายละลายอิเล็กโทรไลต์รอบ ๆ อนุภาค เกิดการเคลื่อนที่ โดยที่อนุภาคจะหยุดนิ่ง ดังรูปที่ 2.12



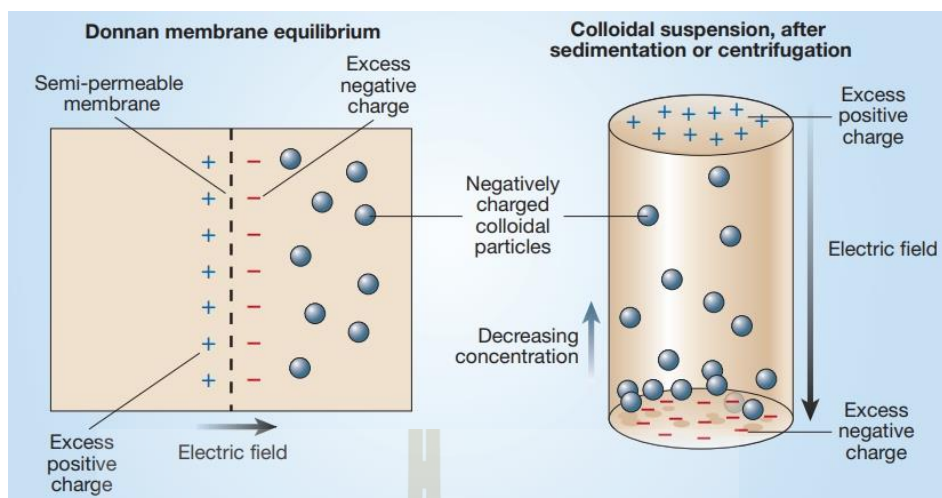
รูปที่ 2.12 การเกิดขึ้นของกระบวนการ Electro-osmosis (Asadi, 2013)

2.4.3 Streaming Potential กระบวนการนี้จะตรงกันข้ามกับกระบวนการอิเล็กโทรออสโมซิสในกระบวนการอิเล็กโทรออสโมซิสสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า มากระทำ แต่ในกระบวนการ Streaming Potential จะสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น (Pressure gradient) และเมื่อมีการเคลื่อนที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น (Electric field) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเกิดขึ้นของกระบวนการ Streaming Potential (Volkov & Brown, 2014)

2.4.4 Sedimentation potential อนุภาคคอลลอยด์ (Colloid particle) สามารถเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงเมื่อประจุของอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้มีการพัฒนาของสนามไฟฟ้าขึ้น (Electric field) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิดขึ้นของกระบวนการ Sedimentation potential (Warren, 2004)

2.5 ข้อดีและข้อเสียในการใช้เทคนิคปรับปรุงดินจลนศาสตร์ไฟฟ้า

2.5.1 ข้อดีของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

การปรับปรุงด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า สามารถใช้ปรับปรุงดินได้กับดินหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียว และดินที่มีลักษณะเป็นน้ำโคลน มีปริมาณความชื้นในดินสูงความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำ การปรับปรุงด้วยเทคนิคนี้ยังไม่ส่งผลต่อพื้นที่ข้างเคียง และประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ ชนิดของดิน และแร่ธาตุในดิน มีหลายการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าปรับปรุงดิน สามารถลดความชื้นในดิน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhou et al., 2019; Zhuang et al., 2021; Ling et al., 2021) ซึ่งสอดคล้องกับเมื่อปริมาณความชื้นในดินลดลงช่องว่างในเม็ดดินจะลดลง ดินจะเกิดการรวมตัวกันมากขึ้น ทำให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น สิ่งนี้ส่งผลให้ดินสามารถรับน้ำหนักและมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่ดีขึ้น (Estabragh et al., 2014; Hunter et al., 2021)

Sadeghian et al. (2022) นำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไปใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของเสาเข็ม และพบว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับเสาเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ ยังมีหลายการศึกษาที่นำเอาเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ ดังนี้

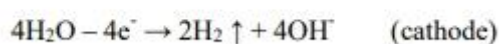
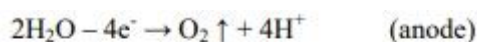
Ren et al. (2001) ได้นำเอาเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไปใช้ในการลดปริมาณของอนุภาคดินที่เกาะอยู่บนเครื่องจักรทางวิศวกรรม (เครื่องจักรที่ใช้ในการขุดดินและเครื่องจักรที่ใช้ในการขุดดิน) ซึ่งดินที่เกาะติดกับเครื่องจักรนั้นมีถึง 20-30% ของพื้นที่ที่ใช้งานในเครื่องจักรทั้งหมด ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรลดลงประมาณ 30% ของงานทั้งหมดที่ควรได้รับใน

การใช้เครื่องจักรแต่ละครั้ง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคนี้สามารถทำให้ลดดินที่เกาะติดกับเครื่องจักรได้

Mohamadi et al. (2021) และ Mohamedelhassan & Shang (2021) นำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าใช้กำจัดสารปนเปื้อนในดินและแหล่งน้ำต่าง ๆ พบว่าการกำจัดสารปนเปื้อนรวดเร็วและมีประสิทธิภาพกว่าการกำจัดด้วยวิธีดั้งเดิม เนื่องจากวิธีแบบดั้งเดิมอาจมีข้อจำกัดในการนำมาใช้กับสารปนเปื้อน และไม่สามารถใช้กับดินที่หลากหลายประเภท

2.5.2 ข้อเสียของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า คือ การให้พลังงานไฟฟ้ากับดิน โดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวกลางทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านอนุภาคดิน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินจะลดลง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในอนุภาคดินซึ่งในอนุภาคดินจะมีโมเลกุลน้ำ โดยน้ำเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ที่บริเวณขั้วแอโนด และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ที่บริเวณขั้วแคโทด ดังรูปที่ 2.15 โดยไฮโดรเจนไอออน จะเคลื่อนที่ไปจับกับประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวดินซึ่งมีประจุลบ เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าตรงข้ามกันจะเคลื่อนที่และจับตัวกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะช้าลง เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่เป็นไฮโดรเจนไอออน จับตัวกับประจุลบที่ผิวดินทั้งหมดแล้ว ส่งผลให้ประจุอิสระบางประจุเท่านั้นที่จะเริ่มกระจายตัวไปจับตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในมวลดินลดลง เมื่อประจุในไฟฟ้าในดินลดลง ส่งผลให้กระแสในดินลดลงและส่งผลให้ความต้านทานทางเพิ่มขึ้นและการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในดิน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของประจุไฟฟ้า และ ทำให้ pH ในดินเกิดการเปลี่ยนแปลง (Alshawabkeh & Acar, 1993; Alshawabkeh & Acar, 1996; Sah & Chen, 1998; Bergado et al., 2003)



รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส (Asadi, 2013)

ระหว่างการทำปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าทำให้มีการสูญเสียของกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดิน และการทำให้กระแสไฟฟ้ากลับมาคงที่เป็นสิ่งที่รักษาให้ประสิทธิภาพของการใช้เทคนิคนี้ ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ในระหว่างการทดสอบเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่ง ๆ เพื่อเป็นการรักษาประสิทธิภาพให้คงที่ แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้การใช้พลังงานสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุน (Sadeghian et al., 2022) เนื่องจากการใช้ขั้วไฟฟ้าเป็น

ตัวกลางในการทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในอนุภาคดิน จึงมีหลายการศึกษา พบว่า เทคนิคการจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อเวลาผ่านไปขั้วไฟฟ้าจะถูกกัดกร่อนที่ขั้วแอโนด เนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งปัจจัยนี้ส่งผลให้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลง (Xue et al., 2017; Sadeghian et al., 2022) การถูกกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้ายังอาจทำให้เกิดสารปนเปื้อนในดินได้ (Alshwabkeh & Acar, 1993) แต่อย่างไรก็ตามการเกิดการปนเปื้อน จะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วไฟฟ้า และสารประกอบที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบที่ชัดเจนและประสิทธิภาพของการออกแบบการทดสอบที่แตกต่าง หลากหลายรูปแบบนั้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน

2.6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

การปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ส่งผลให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินและคุณสมบัติทางเคมีของดินเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ปัจจัยภายใน และ ปัจจัยภายนอก ดังนี้

2.6.1 ปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1) ปริมาณความชื้น การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดินที่นำมาใช้ควรมีความชื้นในดินเพียงพอที่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอนุภาคดินได้ ดินที่มีความชื้นในดินต่ำนั้นไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และนักวิจัยหลายท่านที่นำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้และประสบความสำเร็จ มักพบในดินที่มีปริมาณความชื้นสูง (Jayasekera S. & Hall S., 2007; Malekzadeh et al., 2016; Xue et al., 2017) โดยความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าจะอยู่ที่ 1.6 ของขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ซึ่งพบว่าถ้าดินมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงนี้จะประสบความสำเร็จเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Malekzadeh et al., 2016)

2) ศักย์ไฟฟ้าซีตา (Zeta potential) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของระนาบเฉือนของอนุภาค เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่ออนุภาคมีชั้นของเหลวอยู่ล้อมรอบอนุภาค ซึ่งชั้นของเหลวประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ชั้นใน หรือ Stren layer เป็นชั้นที่มีประจุไฟฟ้าหรือไอออนที่เป็นประจุตรงข้ามกับพื้นผิวของอนุภาค เช่น ดินเหนียวมีพื้นผิวเป็นประจุลบ ในชั้นนี้จะมีประจุบวกยึดเกาะอย่างหนาแน่นอยู่ภายใน Stren layer และชั้นนอก หรือ Diffuse layer เป็นชั้นที่มีประจุไฟฟ้าหรือไอออนที่เป็นมีประจุไฟฟ้าเดียวกันและประจุตรงข้ามกับประจุที่เกาะยึดอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาค (ประจุลบและประจุบวก) ซึ่งจะกระจายตัวอยู่ภายในชั้นชั้นนอก หรือ Diffuse layer ซึ่ง

ไอออนในชั้นนี้จะยึดเกาะกันไม่หนาแน่นเท่าไอออนใน Stren layer ภายในชั้น Diffuse layer จะมีขอบเขตภายในและภายนอก ซึ่งขอบเขตภายในไอออนจะก่อตัวเป็นไอออนที่มีความเสถียร และเมื่ออนุภาคที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดการเคลื่อนตัว เช่น เนื่องจากแรงโน้มถ่วง ไอออนที่อยู่ภายในและภายนอกขอบเขตของชั้น Diffuse layer ก็จะมีการเคลื่อนที่ขึ้น และเมื่อมีการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดระนาบเฉือนของอนุภาคที่บริเวณขอบเขตภายในและภายนอกของขอบเขตชั้น Diffuse layer ซึ่งเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าซีตา ดังรูปที่ 2.16 การหาค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาได้จากความเร็วของอนุภาค (v) ในสนามไฟฟ้า (E) จะแสดงในสมการของ Smoluchowski ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคและสนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$v = \frac{E\epsilon_r\epsilon_0\zeta}{\eta_l} \quad (2.1)$$

และการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) μ_e แสดงดังสมการที่ 2.2

$$\mu_e = \frac{\epsilon_r\epsilon_0\zeta}{\eta_l} \quad (2.2)$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ของไฟฟ้าในสารตัวกลาง (dielectric constant of the medium)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ของไฟฟ้าของช่องว่าง (dielectric constant of the free space)

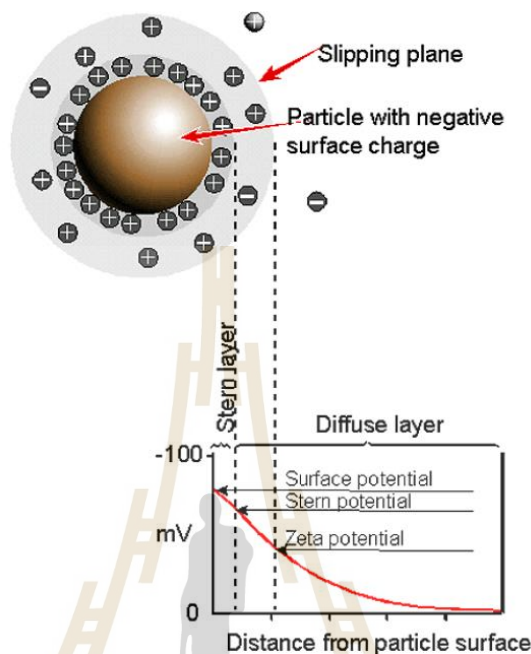
ζ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าซีตา (zeta potential)

η_l คือ ค่าความหนืดของของเหลว (liquid viscosity)

การที่ดินมีค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาสูง (ติดบวกและติดลบ) แสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนในอนุภาคดินได้ง่าย และถ้าดินมีศักย์ไฟฟ้าซีตาต่ำ (มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) แสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนในอนุภาคดินได้น้อยลง หรือ ดินจะเกิดการรวมตัวกันมากขึ้น ซึ่งสามารถตกตะกอนได้รวดเร็ว เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าซีตามีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะเรียกตำแหน่งนี้ว่า Isoelectric Point (IEP) เมื่ออนุภาคดินสัมผัสกับน้ำหรือมีของเหลวล้อมรอบจะเกิด Double layer ขึ้น และเมื่ออนุภาคดินเกิดการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดระนาบเฉือนของอนุภาคขึ้น ซึ่งทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าซีตา อนุภาคดินส่วนมากจะมีศักย์ไฟฟ้าซีตาติดลบสูง ซึ่งส่งผลให้น้ำมีแนวโน้มไหลผ่านในมวลดินได้มาก ดังนั้น ดินที่มีศักย์ไฟฟ้าซีตาติดลบสูง จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าซีตา และ pH มีความสัมพันธ์กันโดยตรง การเปลี่ยนแปลงของความเป็น pH ในอนุภาคดินระหว่างกระบวนการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินสูงขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของไอออน (Ion) ทำให้ความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าลดลง ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าซี-

ตารจึงลดลง (Liaki et al., 2010; Hamed & Acar, 1991; Lee & Yang, 2000) และ Zhang et al. (2020) ได้พบว่า pH ที่สามารถทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าซีตาสูงอยู่ที่ pH ประมาณ 2 และ 13 และ ถ้า pH ของดินประมาณ 3-4 จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าซีตามีค่าเป็นศูนย์หรืออยู่ในจุด Isoelectric Point (IEP)



รูปที่ 2.16 ระนาบการเกิด Zeta potential (Malvern Instruments Limited, 2015)

3) **ความเป็นกรด-ด่าง (pH)** ดินที่มี pH แตกต่างกัน ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและระยะเวลาที่ใช้ก็จะแตกต่างกัน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาข้างชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้เฉพาะช่วง pH ค่าหนึ่งเท่านั้น ดินที่มีความเป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) สูง คือ ดินที่เป็นกลางจะสามารถทนการเปลี่ยนแปลงของ pH ได้สูง ส่งผลให้รักษาเสถียรภาพทางไฟฟ้าได้ดีในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี การเปลี่ยนแปลงของ pH ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอนุภาคดิน การเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือประจุทางไฟฟ้า ความสามารถในการละลายหรือการแตกตัวของประจุทางไฟฟ้า และการตกตะกอนในดิน

Liaki et al. (2010) พบว่า เมื่อความเป็นกรด (Acid) ของแร่ดินขาว (Kaolinite) เพิ่มขึ้น ในบริเวณใกล้ขั้วแคโทดจะมีความแข็งแรงที่ลดลง และ pH ในแร่ดินขาวจะค่อยๆลดลงไปทางขั้วแอโนด ความแข็งแรงในบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้น

Jayasekera & Hall (2007) พบว่า ที่บริเวณขั้วแคโทดสภาพดินจะมีความเป็นด่าง (Alkaline) ในบริเวณขั้วแอโนด จะมีสภาพดินที่เป็นกรด และการนำปูนขาวมาใช้ในบริเวณที่มีความเป็นกรดสามารถช่วยลดความเป็นกรดลงได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถทำให้ดินมี pH เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ โดยการเติมสารเคมีที่มีความเป็นกรดหรือด่าง

Hamed & Acar (1991) ได้ทำการศึกษาการแยกตะกั่วออกจากแร่ดินขาว โดยใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า พบว่า ความเป็นต่างของดินที่บริเวณขั้วแคโทด จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง pH ประมาณ 11-12 หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อ pH ลดลง จะส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลง สาเหตุที่ทำให้ pH บริเวณขั้วแคโทดลดลง เนื่องจากความเป็นกรดที่บริเวณขั้วแอโนดเกิดการเคลื่อนที่ และแพร่กระจายไปยังขั้วแคโทด ทำให้บริเวณนี้มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ pH จึงค่อย ๆ ลดลง และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ pH ของดินที่บริเวณขั้วแคโทดอยู่ที่ประมาณ 2.7-3.0 แต่ pH ของน้ำในรูพรุนกลับสูงกว่า pH ในอนุภาคดิน

pH เป็นตัวบ่งชี้การเคลื่อนที่ของไฮโดรเจนไอออน ในสารละลาย การที่ pH ของดินที่บริเวณขั้วแคโทดมีค่าน้อยกว่าน้ำในอนุภาคดิน แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณผิวดินมีความอิ่มตัวของไฮโดรเจนไอออน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การกระจายตัวของกรดที่บริเวณขั้วแอโนดเป็นผลมาจากไฮโดรเจนไอออนถูกยึดเหนี่ยวโดยอนุภาคดินที่มีประจุลบ ในขณะที่ความเป็นกรดหรือไฮโดรเจนไอออนที่เหลือจะเคลื่อนตัวและแพร่กระจายไปยังอนุภาคดินบริเวณอื่น ๆ ทำให้เกิดการดูดซับไฮโดรเจนไอออนได้มากขึ้น น้ำในอนุภาคดินที่บริเวณขั้วแอโนดจึงมีค่าไฮโดรเจนไอออนที่ต่ำ และในบริเวณขั้วแคโทดจะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อน้ำในอนุภาคดินที่บริเวณขั้วแอโนดมีไฮโดรเจนไอออนมาบรรจบกับน้ำจากขั้วแคโทดที่มีไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้น้ำมีความเป็นกลาง และเกิดการแพร่ของน้ำในอนุภาคดินที่บริเวณขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด ทำให้น้ำในอนุภาคดินที่บริเวณขั้วแคโทดมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนลดลง ดังนั้นขอบเขตของ pH และอัตราการไหลจะควบคุมค่าของ pH น้ำในอนุภาคดินที่บริเวณขั้วแคโทด ในขณะที่ pH ของดินจะถูกควบคุมโดยการดูดซับของไฮโดรเจนไอออนของผิวดิน

Sadeghian et al. (2022) พบว่า ระหว่างการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดินบริเวณใกล้ขั้วแอโนด จะมี pH ลดลง แต่อัตราการลดลงของ pH ในสองชั่วโมงแรกจะต่ำ และจะเพิ่มขึ้นในชั่วโมงถัดมา อัตราการลดลงของ pH ของดินแสดงให้เห็นข้อเท็จจริงที่ว่าอนุภาคของที่ผิวดินเหนียวจะมีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อดินเหนียวมีน้ำและมีพลังไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลน้ำ และเกิดกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ซึ่งในการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ต้องใช้เวลาในการทำให้ดินเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส จึงทำให้ pH ของดินต่ำในช่วงแรก และการลดลงของ pH ทำให้ความหนาของชั้นดินเพิ่มขึ้น หรือทำให้เร่งเกิดการหลุดตัวของดิน และการเกิดกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าถูกกัดกร่อนที่บริเวณขั้วแอโนดเนื่องจากดินบริเวณนี้มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ pH ยังส่งผลต่อความแข็งแรงของดิน เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงของ pH จะค่อย ๆ ลดลงและเริ่มคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสค่อย ๆ ลดลง ปริมาณความชื้นเริ่มต้นและชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง pH ในระหว่างการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

Estabragh et al. (2014) ศึกษาการปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงของ pH เพิ่มขึ้นที่บริเวณขั้วแคโทด และจะลดลงที่บริเวณขั้วแอโนด เมื่อเวลาผ่านไป อัตราการเปลี่ยนแปลง pH ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ยิ่งแรงดันไฟฟ้าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลง pH ที่บริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจะสูงขึ้น การลดลงของแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสผลิตไอออน ได้น้อยลง นำไปสู่การเคลื่อนย้ายของไอออนบวก (Cations) ที่บริเวณผิวดินซึ่งมีความเป็นกรดเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด ทำให้บริเวณใกล้เคียงขั้วแคโทดมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ pH ค่อย ๆ ลดลงหลังจากผ่านไป 20 ชั่วโมง

Lee & Yang (2000) ศึกษาการควบคุม pH ในปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส เมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการแยกโลหะหนักในดิน โดยมีการไหลของน้ำ หมุนเวียนในระบบ พบว่า ช่วงเริ่มต้นการทดสอบ pH บริเวณขั้วแอโนดจะลดลงน้อยกว่า 2 และในบริเวณขั้วแคโทดจะเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 12 เป็นผลมาจากกการเกิดกระบวนการปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส และหลังจากการนั้น 10 วัน pH ที่บริเวณขั้วแคโทดจะลดลงเหลือ 6 เนื่องจากสภาพความเป็นกรดที่บริเวณขั้วแอโนดค่อย ๆ เคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด เมื่อ pH ที่บริเวณขั้วแคโทดลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าลดลง เนื่องจากอนุภาคดินมีประจุลบดูดซับไฮดรเจนไอออน สมบูรณ์ ทำให้ไฮดรเจนไอออนที่เหลือเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเคลื่อนที่ไปจับกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่บริเวณขั้วแคโทด จึงทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนลดลง และหลังจากนั้น 3-5 วัน pH ในปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสจะเริ่มสมดุล และกระบวนการดูดซับประจุไอออนจะเข้าสู่สมดุลด้วย ดังนั้น Lee & Yang (2000) จึงแนะนำให้ใช้อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนอยู่ที่ 1.1 ml/min ซึ่งทำให้เกิดความสมดุลของปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น

4) ความเค็มของดิน (Soil Salinity) เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าในดิน ปริมาณเกลือในดินมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าซีตา และการซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis permeability) ซึ่งส่งผลต่อการไหลของอิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis flow) (Mitchell and Soga, 2005) ดินที่มีศักย์ไฟฟ้าซีตาสูง จะส่งผลให้การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมซิสสูงขึ้น เนื่องจากไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งช่วยให้การไหลของไฟฟ้าในดินสูงขึ้น แต่เมื่อดินมีความเค็มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าซีตาลดลง ส่งผลให้การไหลของอิเล็กโทรออสโมซิสลดลง ดังนั้นเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าจึงไม่เหมาะสมกับดินที่มีความเค็มสูง ๆ

Bergado et al. (2003) พบว่า ดินที่ปริมาณเกลือเกินกว่า 6000 ppm ไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และ Mitchel (1991) พบว่า ดินที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า 2.5 mS/cm อาจไม่ตอบสนองต่อการรักษาเสถียรภาพด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

5) ความนำไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้า (Electrical conductivity and resistance)

ค่าความนำไฟฟ้าของดิน (Electrical conductivity) คือความสามารถในการไหลของกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดิน เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีประจุลบ เมื่อน้ำหรือความชื้นในอนุภาคดินจึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดิน ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าในอนุภาคดินมีหน่วยเป็นมิลลิซีเมนส์ต่อเมตร (mS/m) หรือ เดซิซีเมนส์ต่อเมตร (dS/m)

ความต้านทานไฟฟ้าของดิน (Resistance) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ผกผันกับค่าความนำไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินมีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร (Ω -m), โอห์ม-เซนติเมตร (Ω -cm) หรือ โอห์ม-นิ้ว (Ω -in) ความต้านทานของดินไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามชนิดของดินเท่านั้น แต่เปลี่ยนแปลงเนื่องจาก อุณหภูมิ ความชื้นในดิน ความเค็มของดิน ปริมาณแร่ธาตุในดินและความอัดแน่นของเนื้อดิน Sverko (1999) กล่าวว่า ปริมาณความชื้นในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของดิน ดินยิ่งแห้งยิ่งมีความต้านทานไฟฟ้าสูง ความชื้นในดินที่วิกฤตซึ่งทำให้ดินมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงหรือทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าไม่เหมาะสมคือ 15% การนำไฟฟ้าของดินสามารถแสดงในรูปของค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินได้ตามสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความนำไฟฟ้าของดิน (Electrical conductivity)

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน (Resistance)

ในระหว่างการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอนุภาคดินจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนยังมีความเข้มข้นของไอออนมาก การไหลของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดินมีความนำไฟฟ้าสูงขึ้น (Cho et al., 2010) การเคลื่อนที่เพื่อแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของไอออนในดินแต่ละพื้นที่จะมีความที่เข้มข้นต่างกันออกไป ดังนั้นการไหลของกระแสไฟฟ้าในดินแต่ละพื้นที่ก็จะต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความนำไฟฟ้าจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า (Electric potential)

Hamed et al. (1991), Xue et al. (2017) และ Tang et al. (2021) พบว่า เมื่อเริ่มการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการทดสอบ จนถึงจุดสูงสุด จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลงจนสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นการทดสอบจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ซึ่งมีความเข้มข้นมากในช่วงแรก ปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน และ ไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งทั้งสองไอออนนี้ควบคุมสภาพการนำไฟฟ้าโดยปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสจะเพิ่มความนำไฟฟ้าในรูปพูน และน้ำในอนุภาคของดินจะถูกกำจัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรออสโมซิสเมื่อน้ำในอนุภาคดินถูกกำจัดออกจึงทำให้ความต้านทานในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การนำไฟฟ้าของดินลดลง

6) อุณหภูมิ (Temperature) เมื่ออนุภาคของดินมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น อนุภาคดินจะเกิดความร้อนขึ้น ยิ่งมีความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าในมวลดินมาก ดินก็จะเกิดความร้อนมากขึ้นตาม Xue et al. (2017) กล่าวว่า ความร้อนของดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความนำไฟฟ้า และเมื่อดินมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ปริมาณน้ำในอนุภาคดินลดลงและยังทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.6.2 ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1) วัสดุของขั้วไฟฟ้า (Electrode material) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า มีผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น โลหะกลุ่มเหล็ก (เหล็กกล้า, เหล็กหล่อ) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (ทองแดง, ทองเหลือง, อลูมิเนียม) ขั้วไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบหลักจากคาร์บอน (แกรไฟต์) ในระหว่างการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าจะถูกกัดกร่อนที่บริเวณขั้วแอโนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจากวัสดุกลุ่มโลหะ โดยปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสจะทำให้เกิดการกัดกร่อน ดังสมการปฏิกิริยาต่อไปนี้ (Malekzadeh & Sivakugan, 2016)



เมื่อ M คือ อนุภาคของโลหะ MO คือ ออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide)

ถ้ากรณีที่วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำมาจากวัสดุทองแดง (Cu), เหล็กกล้า (Fe) หรือคาร์บอน (C) จะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน ดังนี้ (Malekzadeh & Sivakugan, 2016)



เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีในอนุภาคดิน ชั่วไฟฟ้าที่ถูกกัดกร่อนที่บริเวณชั่วคราวสามารถหาปริมาณที่ถูกกัดกร่อนได้ดังสมการต่อไปนี้ (Malekzadeh & Sivakugan, 2016)

$$\text{Degree of corrosion (\%)} = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \quad (2.8)$$

เมื่อ M_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชั่วคราวไฟฟ้า

M_f คือ น้ำหนักสุดท้ายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าของชั่วคราวไฟฟ้า

การเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นชั่วคราวไฟฟ้ามีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อชั่วคราวไฟฟ้าเริ่มถูกกร่อนประสิทธิภาพของเทคนิคนี้จะลดลง (Leinweber et al., 2006; Jayasekera & Hall, 2007) มีนักวิจัยหลายท่านนำเอาเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไปใช้กับงานหลากหลายประเภท และใช้กับชั่วคราวไฟฟ้าหลายชนิด ซึ่งมีการรายงานประสิทธิภาพของชั่วคราวไฟฟ้าแต่ละชนิด ดังนี้

Leinweber et al. (2006) พบว่าชั่วคราวไฟฟ้าชนิดไททาเนียมและทอง เมื่อเริ่มปฏิกิริยาแล้วชั่วคราวไฟฟ้าทั้งสองชนิดไม่แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันชนิดกัดกร่อน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ชั่วไฟฟ้าชนิดไททาเนียมและทองไม่เกิดการถูกกัดกร่อนเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสองชนิดนี้เป็นวัสดุที่มีราคาแพง จึงไม่นิยมนำเอามาเป็นวัสดุเพื่อทำเป็นชั่วคราวไฟฟ้า

Tang et al. (2021) นำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ควบคุมปริมาณความชื้นในการบดอัดดินในชั้นดินเดิม (Subgrade) โดยใช้ชั่วคราวไฟฟ้า 2 ชนิด คือ ทองแดง (Copper) และ Carbon fiber tape (CFT) พบว่า ชั่วไฟฟ้าชนิด Carbon fiber tape มีประสิทธิภาพดีกว่าชั่วคราวไฟฟ้าชนิดทองแดง เนื่องจากมีการสัมผัสระหว่างชั่วคราวไฟฟ้าและดินที่ดีกว่าและมีความต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ดีกว่า

Sadeghian et al. (2022) ศึกษาผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง และความต้านทานการกัดกร่อนของชั่วคราวไฟฟ้า 4 ชนิด คือ เหล็กกล้า (Iron), เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel), ทองแดง (Copper) และอลูมิเนียม (Aluminium) พบว่าอลูมิเนียม (Aluminium) มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชั่วคราวไฟฟ้าทั้งสามชนิด เนื่องจากอลูมิเนียม (Aluminium) มีการนำไฟฟ้าต่ำ และระหว่างการทดสอบ เมื่อเวลาผ่านไปชั่วคราวไฟฟ้าทุกชนิดจะถูกกัดกร่อน แต่ชั่วคราวไฟฟ้าชนิดเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกกัดกร่อนมากที่สุด

2) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ดินมีการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์มีความเข้มข้นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน

และทำให้ขั้วไฟฟ้า ถูกกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น (Sadeghian et al., 2022) และเมื่อเวลาผ่านไป แรงดันไฟฟ้าจะเริ่มลดลง (Estabragh et al., 2014) แต่อย่างไรก็ตามการลดลงของแรงดันไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของดิน แรงดันไฟฟ้า และวัสดุของขั้วไฟฟ้า (Mohamedelhassan & Shang, 2001)

Cho et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการรักษาดินเค็มด้วยการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันคือ 1 V/cm, 2 V/cm และ 3 V/cm พบว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของการรักษาดินเค็มได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า ที่สูงขึ้นไอออนของคลอไรด์ (Chloride), ซัลเฟต (Sulfate) และ ไนเตรต (Nitrate) ซึ่งไอออนเหล่านี้ส่งผลให้ดินมีความเค็ม จะถูกกำจัดออกไปมากขึ้น เนื่องจากกาเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ และทำให้ไอออนเหล่านี้เกิดการเคลื่อนย้ายลถูกกำจัดออก

Xue et al. (2017) ศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าเมื่อใช้เทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า กับดินเหนียวทะเล (Marine Clay) พบว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในอนุภาคดิน มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิสเข้มข้นขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการปรับปรุงดินเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความชื้นในดินที่ลดลงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

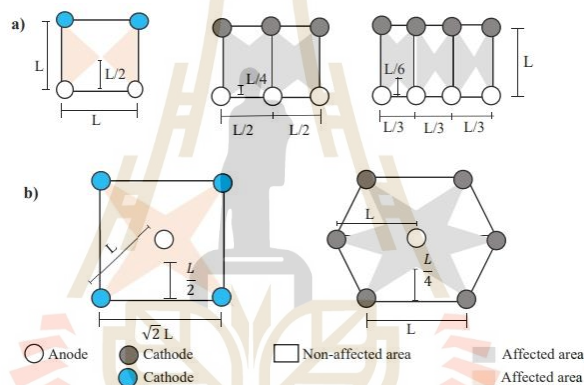
ถึงแม้ว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามยังมีหลายการศึกษา พบว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามีผลทำให้การกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า ที่บริเวณขั้วแอโนดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้การใช้พลังงาน (Energy Consumption) เพิ่มขึ้น (Sadeghian et al., 2022; Xue et al., 2017)

3) การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า (Electrode Configuration) การออกแบบการทดสอบ ให้มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าโดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ามีหลายหลายรูปแบบขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบแบบหนึ่งมิติ (One-dimensional horizontal configuration) คือ การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบ (การไหลของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เกิดขึ้นในแนวระนาบหรือแนวนอน) มีขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเท่ากัน เช่น เมื่อมีขั้วแอโนด 2 แห่ง จะมีขั้วแคโทด 2 แห่ง หรือ เมื่อมีขั้วแอโนด 5 แห่ง จะมีขั้วแคโทด 5 แห่ง ดังรูปที่ 2.7ก ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้านี้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า Malekzadeh & Sivakugan (2016) กล่าวว่า ยิ่งระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยลงจะทำให้ประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินด้วยเทคนิค

จลนศาสตร์ไฟฟ้าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะห่างของขั้วไฟฟ้าน้อยลง ทำให้ต้องมีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการใช้พลังงานมากขึ้น

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวนอนสองมิติ (Two-dimensional horizontal configuration) คือ การจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวราบ (การไหลของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเกิดขึ้นในแนวระนาบหรือแนวนอน) มีขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ไม่เท่ากัน เช่น เมื่อมีขั้วแอโนด 1 แท่ง อาจจะมีขั้วแคโทด 2 แท่ง หรือมากกว่านั้นก็ได้ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งการเลือกจัดเรียงขั้วไฟฟ้าว่าควรมีขั้วแอโนดหรือขั้วแคโทดมากกว่ากันนั้นขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน Malekzadeh & Sivakugan (2016) กล่าวว่าถ้าต้องการให้ดินมีการระบายน้ำเพิ่มขึ้นให้จัดเรียงขั้วไฟฟ้าโดยมีขั้วแคโทดมากกว่าขั้วแอโนด หรือ ถ้าต้องการเพิ่มความแข็งแรงให้อนุภาคดินให้จัดเรียงขั้วไฟฟ้าโดยมีขั้วแอโนดมากกว่าขั้วแคโทด

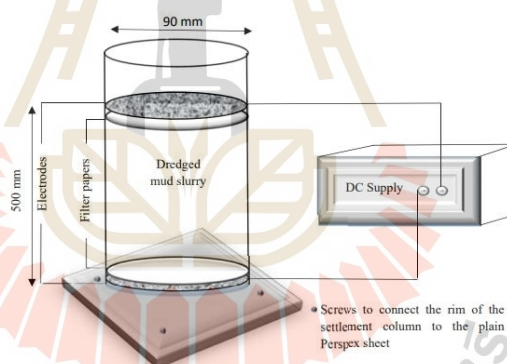


รูปที่ 2.17 การจัดวางขั้วไฟฟ้า (ก) one-dimensional configuration, (ข) Two-dimensional configuration (Malekzadeh & Sivakugan, 2016)

นักวิจัยหลายท่านแสดงให้เห็นว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวนอนสองมิติ มีประสิทธิภาพมากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบหนึ่งมิติ เนื่องจาก การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบสองมิติจะใช้พลังงานและจำนวนขั้วไฟฟ้าน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบสองมิติจะใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงดินมากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบแบบหนึ่งมิติ (Kim et al., 2012; Kim et al., 2013; Xu et al., 2020) ซึ่งในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบสองมิติสามารถจัดเรียงได้หลายรูปแบบ กล่าวคือ สามารถจัดเรียงได้หลายรูปทรงเรขาคณิต เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส สามเหลี่ยม และหกเหลี่ยม เป็นต้น ซึ่ง Kim et al. (2013) และ Xu et al. (2020) พบว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหกเหลี่ยมเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนในดินได้ดีกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่อย่างไรก็ตามในกรณีจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบแบบหนึ่งมิติหรือสองมิติ เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดรอยแตกของดินขึ้นโดยเฉพาะที่บริเวณขั้วแอโนด ทำให้ประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าลดลง เนื่องจากน้ำในอนุภาคดินมีปริมาณลดลง ส่งผลให้

การสัมผัสระหว่างมวลดินกับขั้วไฟฟ้าลดลง และทำให้การปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าไม่ได้รับการปรับปรุงอย่างเต็มที่ (Malekzadeh & Sivakugan, 2016)

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง (Vertical electrode configuration) เป็นการจัดรูปแบบที่มีทิศทางการไหลของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.8 การจัดวางขั้วไฟฟ้าในลักษณะนี้เหมาะกับการวัดการทรุดตัวของดินเมื่อเวลาผ่านไป และสามารถพิจารณาการระบายน้ำของดินได้ดีกว่าการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวราบ เนื่องจากการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวราบจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำ เนื่องจากความร้อนและเกิดรอยแตกขึ้นในระหว่างการทดสอบ Malekzadeh & Sivakugan (2016) กล่าวว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง โดยให้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง และขั้วแคโทดอยู่ด้านบน ทำให้อัตราการทรุดตัวของดินสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการจัดเรียงโดยให้ขั้วแคโทดอยู่ด้านล่างและขั้วแอโนดอยู่ด้านบน เนื่องจากดินมีประจุลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด ซึ่งอยู่ด้านล่างเนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรฟอรีซิส และของเหลวในอนุภาคดินจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส และการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแนวตั้งยังสามารถลดรอยแตกของดิน เมื่อเทียบกับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบ



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง (Vertical electrode configuration)

(Malekzadeh & Sivakugan, 2016)

4) กระแสไฟฟ้า (Current) การศึกษาส่วนใหญ่มักจะดำเนินการโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (Continuous current) แต่การให้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในอนุภาคดินลดน้อยลงเนื่องจากความเข้มข้นของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสลดลง จึงมีหลายการศึกษาการใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent current) นักวิจัยหลายท่านกล่าวว่า การใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าให้ดีขึ้น โดยการลดการกัดกร่อนที่ขั้วแอโนด (Shang et al., (1997, 2001); Malekzadeh & Sivakugan, 2016; Hassan et al., 2015)

2.7 วิธีที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

2.7.1 การใช้ไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent current) คือ การหยุดกระแสไฟฟ้าภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยมีรายงานการประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าใช้ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง Hassan et al. (2015) นำเอาเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ใช้ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนในดิน พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง แสดง pH ของดินที่ต่ำ และสามารถกำจัดสารปนเปื้อนในดินได้มากกว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากัน Micic et al. (2001) รายงานว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องสามารถลดปริมาณน้ำในดินได้ถึง 125% และเพิ่มความแข็งแรงในดินตะกอนทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถลดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนด และ ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ Islam & Shang (2018) ศึกษาการใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อเร่งการตกตะกอนของสารแขวนลอย พบว่า การใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องสามารถเร่งการตกตะกอนของสารแขวนลอยได้มากกว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่องและยังสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 40% เมื่อเทียบกับการใช้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่องการใช้พลังงานจะขึ้นกับอัตราส่วนไม่ต่อเนื่องซึ่งกำหนดเป็นอัตราส่วนของระยะเวลาที่ใช้กระแสไฟฟ้า t_{on} (h) ต่อเวลาที่ใช้ในการบำบัดทั้งหมด t_{total} (h) (Malekzadeh & Sivakugan, 2016)

$$\tau = \frac{t_{on}}{t_{total}} \quad (2.9)$$

เมื่อ τ คือ กระแสไฟฟ้าแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent current)

การใช้พลังงานสามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$W = Pt_{total} \quad (2.10)$$

เมื่อ W คือ พลังงานที่ใช้ (kWh/m^3) และ

$$P = \tau E_j \quad (2.11)$$

เมื่อ P คือ พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตรของดิน (W/m^3) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ($E = -\frac{dv}{dl}$) โดยมีหน่วยเป็น V/m และความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า ($j = \frac{I}{A}$) มีหน่วยเป็น (A/m^2)

2.7.2 การกลับขั้วไฟฟ้า (Polarity reversal) การใช้เทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงดิน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอนุภาคดินส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ถ้ามีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามากประสิทธิภาพจะสูง โดยการกลับขั้วไฟฟ้า

สามารถเพิ่มการไหลของกระแสไฟฟ้าและลดการกักกักของขั้วไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดได้ (Shang and Lo, 1997) และมีนักวิจัยหลายท่านนำเทคนิคการกลับขั้วไฟฟ้าไปใช้ร่วมกับเทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า เพื่อประโยชน์อื่น ๆ ซึ่ง Li et al. (2016) นำเทคนิคการกลับขั้วไฟฟ้าไปใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ในดินโดยทำการกลับขั้วไฟฟ้าทุก ๆ 2 ชั่วโมง ซึ่งระหว่างการทดสอบ พบว่า การไหลของกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินมีความเข้มข้นมากกว่าการไม่กลับขั้วไฟฟ้าถึง 5 เท่า ส่งผลให้การกลับขั้วไฟฟ้าสามารถกำจัดสารปนเปื้อนในดินได้มากกว่าการไม่กลับขั้วไฟฟ้า และยังมีรายงานการกลับขั้วไฟฟ้าสามารถทำให้การทำงานของเทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งยังสามารถลดการกักกัก เพิ่มการไหลของกระแสไฟฟ้า รักษา pH ของดิน และทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น (Luo et al., 2005; Lu et al., 2012; Cai et al., 2015) แต่อย่างไรก็ตามการกลับขั้วไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อการส่งเสริมการระบายน้ำในดินและไม่ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Ou et al., 2009) และเพิ่มการใช้พลังงานไฟฟ้า (Luo et al., 2005) ส่งผลให้การใช้การกลับขั้วไฟฟ้าเหมาะสำหรับการใช้งานในระยะยาว เนื่องจากช่วยลดการกักกักของขั้วไฟฟ้า

2.7.3 การเติมสารเคมี (Chemical) ในระหว่างการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในอนุภาคดิน ทำให้น้ำในอนุภาคดินเกิดการแตกตัวและเกิดการเคลื่อนที่ของไอออน ส่งผลให้บริเวณขั้วแอโนดมีสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้ขั้วไฟฟ้าที่บริเวณนี้ถูกกักกัก ซึ่งการลดการกักกัก สามารถทำได้โดยรักษาสภาพดินให้มีความเป็นกลาง โดยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว Ou et al. (2009) ศึกษาผลของการทดสอบด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยการฉีดสารละลายน้ำเกลือบนดินทรายแป้ง (Silt) พบว่า สามารถเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส และช่วยลดระยะเวลาในการบำบัด กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 5 เท่าของดินที่ไม่ผ่านการบำบัดและ 1.25 เท่าของดินที่บำบัดด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างเดียวไม่มีการฉีดสารละลายน้ำเกลือเพิ่ม สาเหตุเนื่องจากการฉีดสารละลายเกลือทำให้ความเข้มข้นของไอออนเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส มีความมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

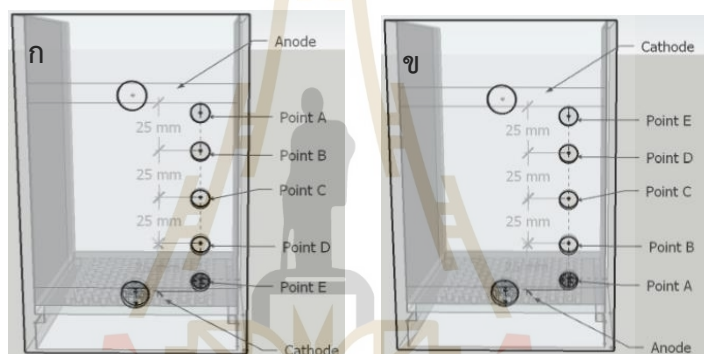
การทำวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ เมื่อทำการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และอิทธิพลของการจัดเรียงตัวขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ เมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการปรับปรุงดิน ซึ่งเป็นการต่อยอดโดยนำข้อดีจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวนอนแบบสองมิติ ซึ่งข้อดีของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบนี้ คือ ช่วยให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำในดินดีขึ้นเมื่อมีการใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วแคโทด มากกว่าขั้วแอโนด และการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งหนึ่งมิติ ซึ่งข้อดีของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบนี้ คือ สามารถเพิ่มการทรุดตัวของดินได้เมื่อเทียบกับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวนอน (Malekzadeh & Sivakugan, 2016) และสามารถลดปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวบริเวณรอบ ๆ ขั้วแอโนด การทดสอบเป็นการจำลองให้มีขนาดเล็ก เพื่อศึกษาในห้องปฏิบัติการ การศึกษานี้แบ่งการทดสอบตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.1 เป็นสองลักษณะ ดังนี้

1) การจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง จะเป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่มีขั้วแอโนดหนึ่งขั้วและแคโทดหนึ่งขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าจะวางตัวอยู่ด้านบนและด้านล่างของดินตัวอย่าง ซึ่งในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง จะทำการทดสอบสองรูปแบบ โดยรูปแบบที่หนึ่งจะวางขั้วไฟฟ้าขั้วแอโนดไว้ด้านบน ขั้วแคโทดไว้ด้านล่าง และรูปแบบที่สองจะวางขั้วแอโนดไว้ด้านล่าง ขั้วแคโทดไว้ด้านบน ดังรูปที่ 3.1

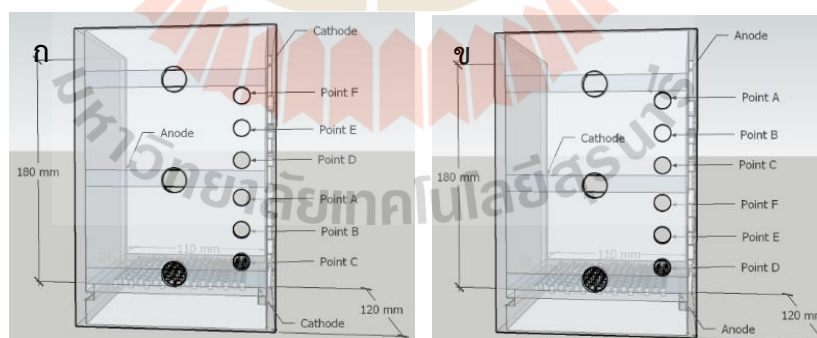
2) การจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบสองต่อหนึ่ง เป็นการจัดวางขั้วไฟฟ้าขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทั้งสิ้น 3 แถว เพื่อแยกชั้นดินออกเป็น 2 ชั้น โดยมี 2 รูปแบบ รูปแบบแรกวางขั้วแคโทดไว้ด้านบนและด้านล่าง และวางขั้วแอโนดไว้ตรงกลาง รูปแบบที่สอง วางขั้วแอโนดไว้บนและล่าง และวางขั้วแคโทดไว้ตรงกลาง ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า

	รูปแบบ (Pattern)	ขั้วบวก (Anode)	ขั้วลบ (Cathode)
การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1:1) Electrodes vertically configuration)	1AT	Top	Bottom
	1AB	Bottom	Top
การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง (2:1) Electrodes vertically configuration)	2CTB	Middle	Top and bottom
	2ATB	Top and bottom	Middle



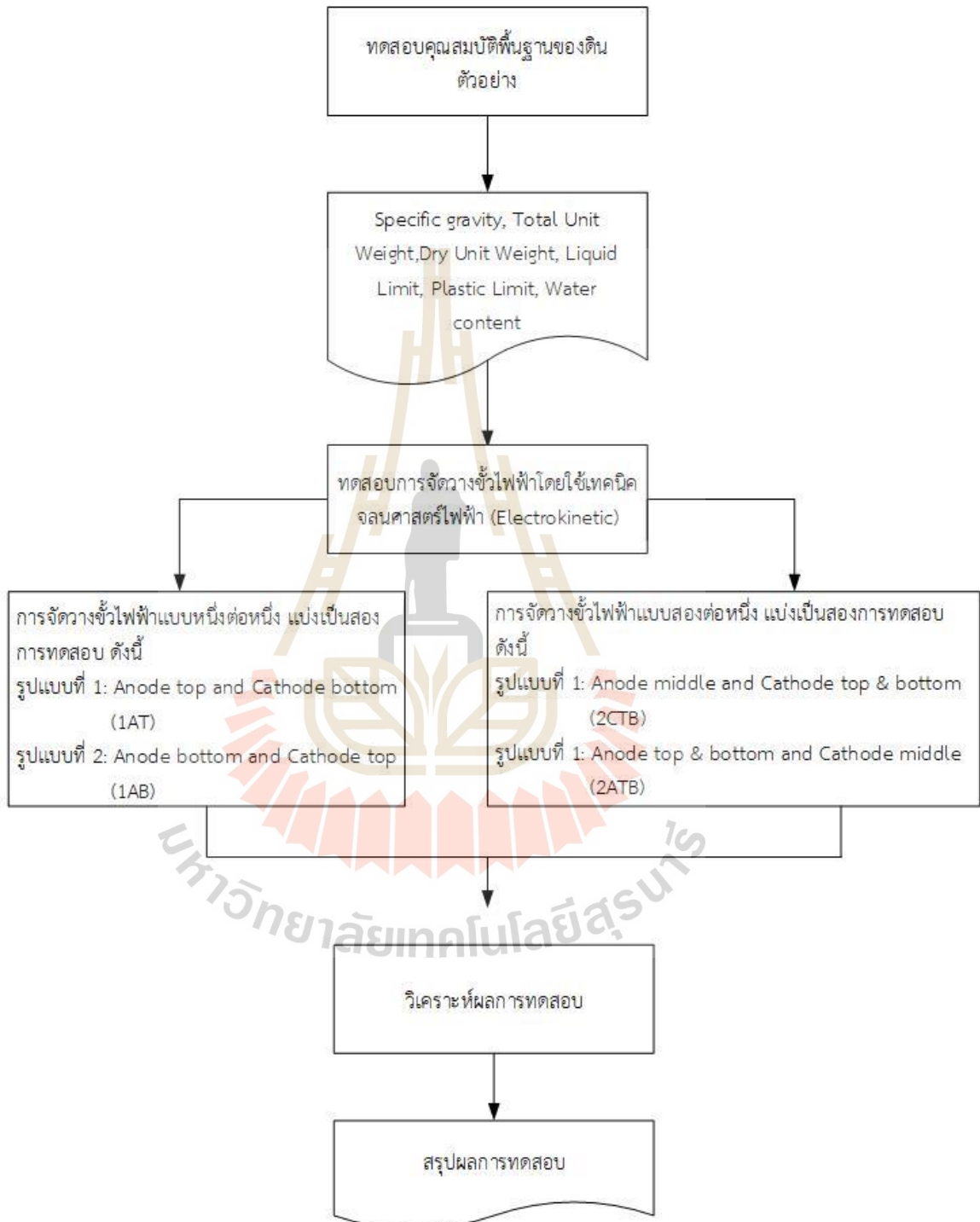
รูปที่ 3.1 การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 1AB



รูปที่ 3.2 การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง ก) รูปแบบ 2CTB ข) รูปแบบ 2ATB

การศึกษานี้วัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และการทรุดตัวของดิน และวัดปริมาณความชื้น pH ของดินที่เปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการทดสอบ ที่ส่งผลต่อแนวโน้มของพฤติกรรมดินเหนียวกรุงเทพฯระหว่างการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งการศึกษานี้ใช้แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง และวางน้ำหนักบรรทุกทุกบ้นตัวอย่างดิน 3 กิโลกรัม เท่ากันทุกรูปแบบ แต่จะใช้รูปแบบและตำแหน่งของ

ขี้เถ้าที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงขี้เถ้าในรูปแบบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผังการดำเนินงานวิจัยการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

3.2 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นดินเหนียวเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างแบบไม่คงสภาพ (Disturb) ที่ระดับความลึก 3-5 เมตร ดังรูป 3.4ก ทั้งนี้ในการศึกษานี้ทำการทดสอบโดยการทำให้ดินเป็นดินที่ไม่คงสภาพโดยสมบูรณ์ โดยการนำไปกวนให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงดังรูปที่ 3.4ข Malekzadeh & Sivakugan (2016) พบว่า เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน และจะมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้กับดินที่มีความชื้นเริ่มต้น 1.6 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดังนั้นการศึกษานี้จึงผสมน้ำให้แก่มวลดิน เพื่อให้ดินเป็นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีความชื้นในดินเริ่มต้น 170% โดยประมาณ ดินที่ผ่านการผสมน้ำเพิ่มแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ลักษณะดินตัวอย่าง ก) ดินอย่างที่ได้เก็บจากแหล่งตัวอย่าง ข) ดินตัวอย่างที่ถูกרבกวนโดยสมบูรณ์



รูปที่ 3.5 ลักษณะดินตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้น 170%

3.3 คุณสมบัติของดิน

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างก่อนทำให้ดินถูกรบกวนโดยสมบูรณ์ โดยหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water content) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216-98 หาหน่วยน้ำหนัก

ดิน (Unit weight) หาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-00 หาขีดจำกัดเหลวของดิน (Liquid limit) และขีดจำกัดพลาสติกของดิน (Plastic limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93 คุณสมบัติของดิน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน (ก่อน Remold)

Basic Soil Property	Value	Method
Specific gravity, G _s	2.63	ASTM D 854-00
Total Unit Weight, γ_t	1.42 g/cm ³	
Liquid Limit, LL	106.50%	ASTM D 4318-93
Plastic Limit, PL	18.97%	ASTM D 4318-93
Plasticity index, PI	87.53%	
Water content	111.71%	ASTM D 2216-98

3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น ออณหภูมิ การหลุดตัว ความเป็นกรด-ด่าง ความต่างศักย์ไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

3.3.1 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20

เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล รุ่น DS18B20 สามารถกั้นน้ำได้ การวัดอุณหภูมิมีความละเอียดตั้งแต่ 9 บิต ถึง 12 บิต โดยเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะมีสายสำหรับส่งสัญญาณค่าของอุณหภูมิ 1 สาย ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 DS18B20 แต่ละตัวมีรหัสซีเรียล 64 บิตที่ไม่ซ้ำกันซึ่งทำให้สามารถใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20 หลายเครื่อง ตั้งนั้นจึงสามารถใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อควบคุม DS18B20 ได้จำนวนมาก ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของเซ็นเซอร์รุ่น DS18B20 เป็นดังต่อไปนี้

- ใช้แรงดันไฟฟ้าเลี้ยง V_{dd} หรือ V_{cc} ได้ในช่วง 3.0 V ถึง 5.0 V
- ย่านการวัดตั้งแต่ -55 องศาเซลเซียส ถึง +125 องศาเซลเซียส
- ใช้เวลาในการแปลง 200 ms สำหรับข้อมูล 9 บิต และ 750 ms สำหรับ 12 บิต
- มี 3 ขา (ตัวถังแบบ TO-92) คือ Gnd (Pin 1), DAT (Pin 2), V_{cc} (Pin 3)
- ใช้งานได้สองแบบ: normal mode (ใช้ทั้ง 3 ขา) และ parasite power mode (ใช้เพียง 2 ขา คือ DQ และ GND ในขณะที่ขา V_{dd} จะต่อกับขา (Gnd))



รูปที่ 3.6 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20



รูปที่ 3.7 ลักษณะหัววัดอุณหภูมิ และขาที่ต้องเชื่อมต่อ

(ที่มา: <http://www.elecsensor.com/product/1108/ds18b20>)

3.3.2 Arduino MEGA 2560

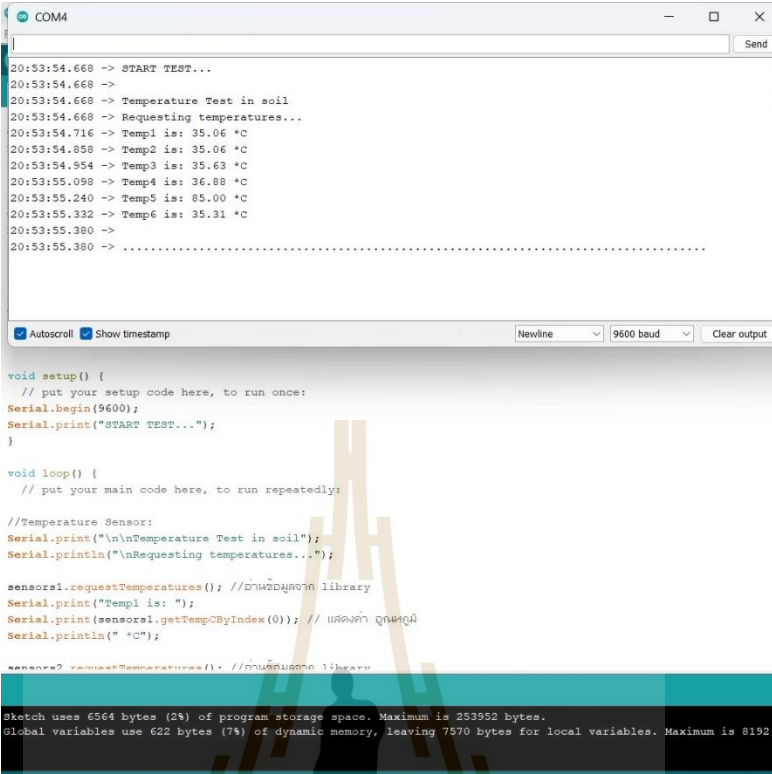
Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดที่ใช้ชิป ATmega2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก เป็นบอร์ดที่ต่อยอดมาจาก Arduino Uno R3 มี Digital input/output 54 ขา สามารถใช้เป็น output แบบ PWM ได้ 15 ขา มี Analog inputs 16 ขา มี UARTs (hardware serial ports) 4 ขา ทำงานที่ความถี่ 16 MHz ซึ่งลักษณะและรายละเอียดของ Arduino MEGA 2560 ดังรูปที่ 3.8 และ ตารางที่ 3.3 Arduino Mega 2560 สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิล USB หรือใช้ adaptor AC-to-DC เพื่อเริ่มต้นใช้งาน และมีปุ่ม reset สามารถต่อเข้ากับ shields ที่ออกแบบเพื่อใช้งานกับ Arduino Duemilanove หรือ Diecimila. ซึ่งถ้าใช้งาน Arduino MEGA 2560 โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ จะใช้โปรแกรม Arduino ในการป้อนข้อมูลให้กับ Arduino MEGA 2560 หน้าต่างของโปรแกรม Arduino แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 Arduino MEGA 2560

ตารางที่ 3.3 ข้อมูล Arduino MEGA 2560

ไมโครคอนโทรลเลอร์	ATmega2560
แรงดันการทำงาน	5 V แนะนำที่ 7-12 V และ จำกัดที่ 6-12 V
Digital input/output	54 ขา (ใช้เป็น PWM ได้ 15 ขา)
Analog inputs/output	16 ขา
กระแสไฟฟ้าในพิน input/output	20 มิลลิแอมป์
กระแสไฟฟ้าในพิน 3.3 V	5 มิลลิแอมป์
หน่วยความจำ	256 กิโลไบต์
SRAM	8 กิโลไบต์
EEPROM	4 กิโลไบต์
ความเร็วสัญญาณนาฬิกา	16 เมกะเฮิร์ตซ์
ไฟ LED แบบ Built-in	ขา 13
ขนาด	กว้าง 53.3 มิลลิเมตร ยาว 101.52 มิลลิเมตร
น้ำหนัก	37 กรัม



```

COM4
20:53:54.668 -> START TEST...
20:53:54.668 ->
20:53:54.668 -> Temperature Test in soil
20:53:54.668 -> Requesting temperatures...
20:53:54.716 -> Temp1 is: 35.06 °C
20:53:54.858 -> Temp2 is: 35.06 °C
20:53:54.954 -> Temp3 is: 35.63 °C
20:53:55.098 -> Temp4 is: 36.88 °C
20:53:55.240 -> Temp5 is: 85.00 °C
20:53:55.332 -> Temp6 is: 35.31 °C
20:53:55.380 ->
20:53:55.380 -> .....

[Autoscroll] [Show timestamp] [Newline] [9600 baud] [Clear output]

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("START TEST...");
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  //Temperature Sensor:
  Serial.print("\n\nTemperature Test in soil");
  Serial.println("\nRequesting temperatures...");

  sensors1.requestTemperatures(); //อ่านอุณหภูมิจาก library
  Serial.print("Temp1 is: ");
  Serial.print(sensors1.getTempCByIndex(0)); // แสดงค่า อุณหภูมิ
  Serial.println(" °C");

  sensors2.requestTemperatures(); //อ่านอุณหภูมิจาก library
}

Sketch uses 6564 bytes (2%) of program storage space. Maximum is 253952 bytes.
Global variables use 622 bytes (7%) of dynamic memory, leaving 7570 bytes for local variables. Maximum is 8192 bytes.

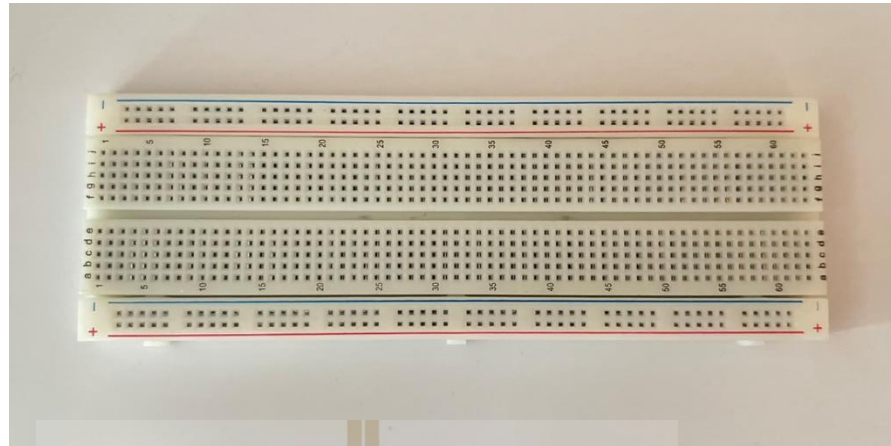
```

รูปที่ 3.9 หน้าต่างโปรแกรม Arduino

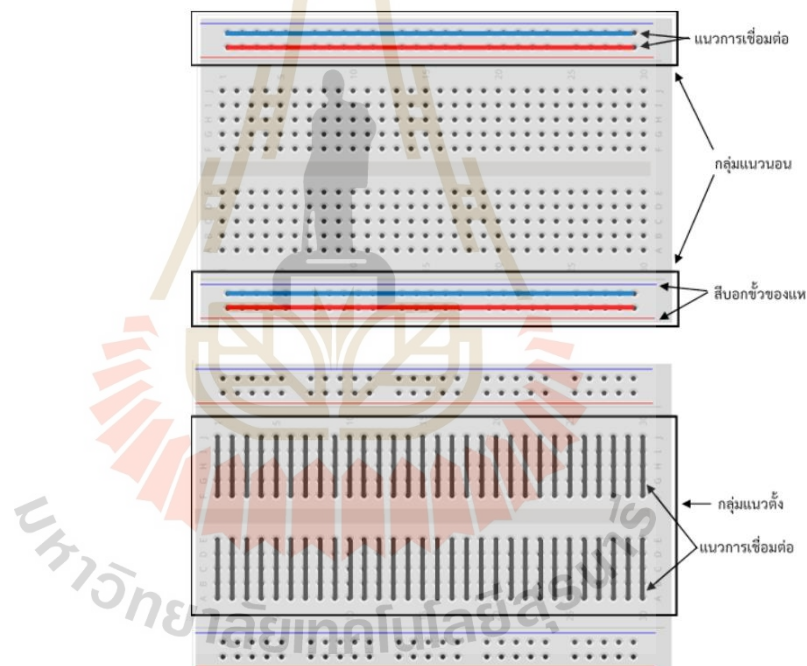
3.3.3 เบริดบอร์ด (BreadBoard)

เบรตบอร์ด (BreadBoard) หรือ โพรโทบอร์ด (Photoboard) เป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยให้สามารถเชื่อมต่อวงจรเพื่อทดลองง่ายขึ้น ลักษณะของบอร์ดจะเป็นพลาสติกมีรูจำนวนมาก ภายใต้อุปกรณ์เหล่านี้จะมีการเชื่อมต่อถึงกันอย่างมีรูปแบบ ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาเสียบ จะทำให้พลังงานไฟฟ้าสามารถไหลจากอุปกรณ์หนึ่ง ไปยังอุปกรณ์หนึ่งได้ ผ่านรูที่มีการเชื่อมต่อกันด้านล่าง พื้นที่การเชื่อมต่อกันของโพรโทบอร์ด จะแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- 1) กลุ่มแนวตั้ง เป็นกลุ่มพื้นฐานสำหรับการเชื่อมต่อวงจร วางอุปกรณ์ จะมีช่องเว้นกลางกลุ่มสำหรับเสียบไอซีตัวถังแบบ DIP และบ่งบอกการแบ่งเขตเชื่อมต่อ
- 2) กลุ่มแนวนอน เป็นกลุ่มที่มีการเชื่อมต่อกันในแนวนอน ใช้สำหรับพักไฟที่มาจากแหล่งจ่าย เพื่อใช้สำหรับเชื่อมต่อไฟจากแหล่งจ่ายเลี้ยงให้วงจรต่อไป และจะมีสัญลักษณ์เพื่อบ่งบอกขั้วที่แหล่งจ่ายไฟควรนำมาพักไว้ โดยที่สีแดงจะหมายถึงขั้วบวกและสีดำหรือสีน้ำเงินจะหมายถึงขั้วลบ



รูปที่ 3.10 เบรตบอร์ด (BreadBoard)



รูปที่ 3.11 การจ่ายไฟของ เบรตบอร์ด (BreadBoard)

(ที่มา: <https://www.artronshop.co.th/b/53>)

3.3.4 เวอร์เนีย (Vernier Caliper)

เป็นเครื่องมือวัดพื้นฐานใช้ในการวัดระยะห่างของด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน วัดได้ทั้งวัตถุที่เป็นทรงกระบอกและทรงตรง โดยหาค่าได้ทั้ง ความหนาบาง ความลึก ความกว้างภายนอก และยังสามารวัดความกว้างภายในของวัตถุเพื่อหาเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุ การวัดค่าของเวอร์เนียให้

ค่าที่มีความละเอียดออกมาเป็นมิลลิเมตร การที่เวอร์เนียสามารถวัดค่าได้ทศนิยมถึง 2 ตำแหน่ง ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยเวอร์เนียมีค่าเพียง 0.05 มิลลิเมตร

3.3.5 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH)

เครื่องวัด pH ชนิดปากกา ดังรูปที่ 3.12 แสดงผลแบบดิจิตอลมีช่วงในการวัด 0.0 ถึง 14.0 pH มีความละเอียด 0.1 pH ความแม่นยำ ± 0.1 pH มีการชดเชยอุณหภูมิตั้งแต่ 0 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH) แบบปากกา Jedto

3.3.6 มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)

มัลติมิเตอร์ คือ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งสามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้หลายหลายชนิด เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมัลติมิเตอร์บางรุ่นยังสามารถวัดคุณสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมได้ เช่น ค่าความถี่ ค่าความจุ และทดสอบทรานซิสเตอร์ มัลติมิเตอร์ยังสามารถเลือกการไหลของกระแสไฟฟ้าเป็นกระแสตรง (DC) หรือ กระแสสลับ (AC) ได้ซึ่งมีช่วงการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในช่วง 400 mV-1000 V ความแม่นยำ $\pm (0.5\%+2)$



รูปที่ 3.13 Digital Multimeter UNI-T UT136C+ (ที่มา: <https://www.uni-tthailand.com/>)

3.3.7 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.14 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งกำเนิดให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 แอมแปร์ ความละเอียด 0.1 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 โวลต์ ความละเอียด 0.1 โวลต์ ความถูกต้อง $\pm 1\%$



รูปที่ 3.14 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า MAISHENG รุ่น MP3020D

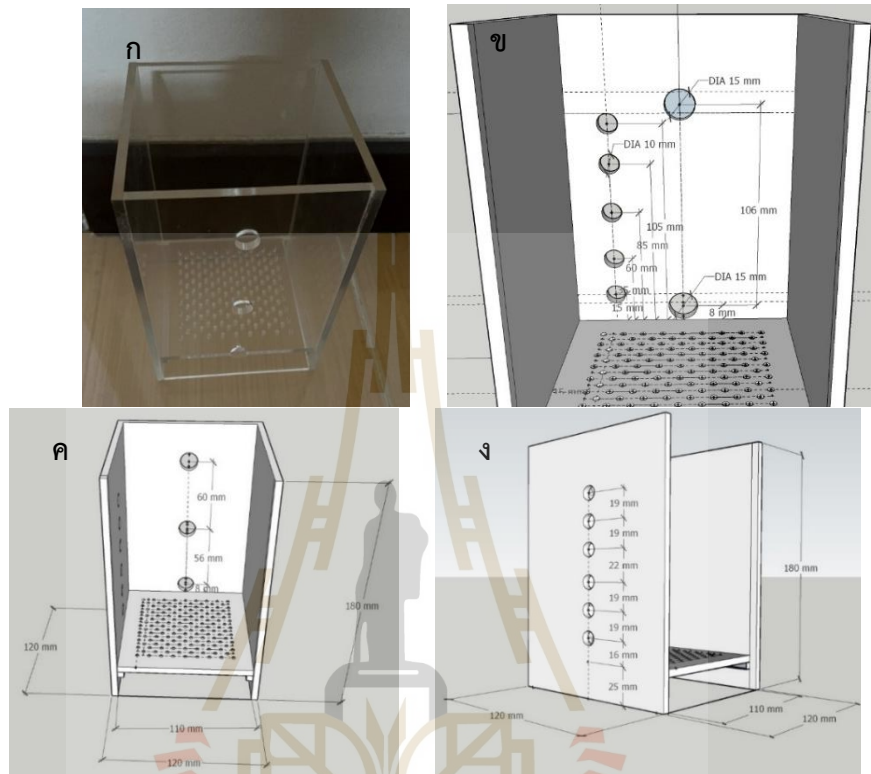
3.5 ขั้นตอนและการเตรียมตัวอย่างการทดสอบด้วยเทคนิคทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า

แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อใช้ในการบรรจุดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ทำจากอะคริลิกใสเพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมของดินที่เปลี่ยนไป มีความหนา 5 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร และสูง 180 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.15ก โดยฐานของกล่องทดสอบจะยกสูงขึ้นมาจากระดับด้านล่างสุด 25 มิลลิเมตร เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับรองรับน้ำที่ระบายออก ฐานของแบบทดสอบ ขนาด 110 X 110 ตารางมิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร โดยเจาะแบบสลับฟันปลา เพื่อให้สามารถระบายออกได้ ดังรูปที่ 3.16

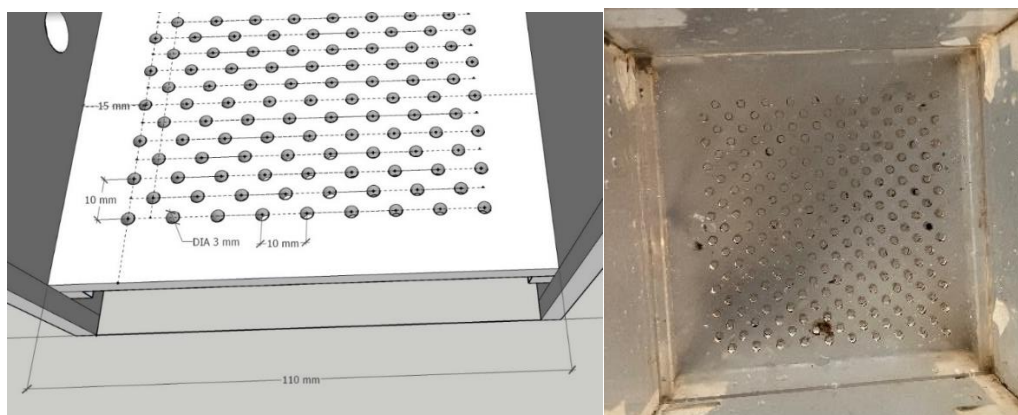
กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู ใช้สำหรับเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 8 และ 114 มิลลิเมตร ตามลำดับ และด้านข้างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู สำหรับเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและสายไฟเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าพร้อมทั้งใช้สำหรับระบายน้ำซึ่งมีระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 15, 35, 60, 85 และ 105 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.15ข

กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง ด้านข้างด้านหนึ่งของกล่องอะคริลิกเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู ใช้สำหรับเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 8 64 และ 124 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.15ค

และอีกด้านหนึ่งเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 6 รู สำหรับเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและสายไฟเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าพร้อมทั้งใช้สำหรับระบายน้ำ ซึ่งมีระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 16, 35, 54, 76, 95 และ 114 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.15

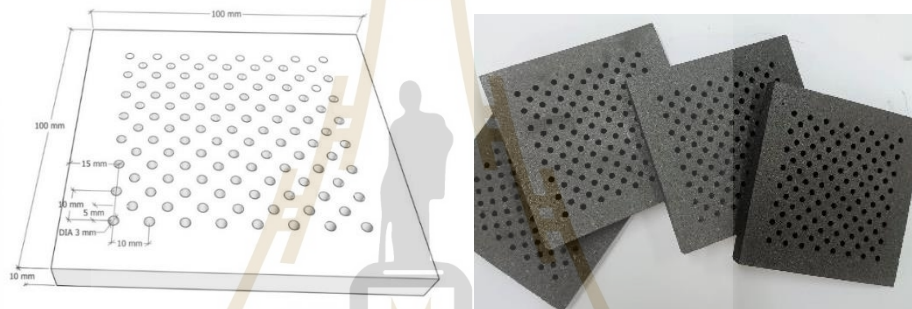


รูปที่ 3.15 แบบทดสอบ ก) แบบทดสอบโดยภาพรวม, ข) ลักษณะรูเจาะสำหรับเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และสายไฟวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ค) ลักษณะรูเจาะสำหรับเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง ง) ลักษณะรูเจาะสำหรับเชื่อมต่อเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และสายไฟวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง

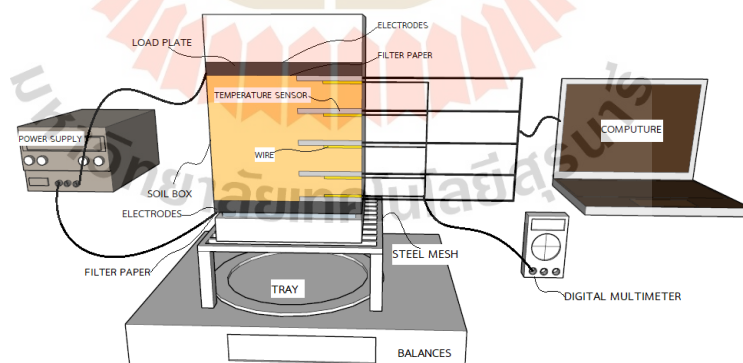


รูปที่ 3.16 ลักษณะฐานของแบบทดสอบและรายละเอียดรูเจาะ

ฐานด้านล่างวางกระดาษกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของดินที่ฐานอะคริลิก และใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์ ขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 10 มิลลิเมตร ที่ขั้วแคโทดเจาะรูเพื่อให้น้ำสามารถระบายออกได้ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เจาะลักษณะสลับฟันปลาโดยมีระยะห่างระหว่างรูเจาะ 10 มิลลิเมตร ดังรูป 3.17 ขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า MAISHENG รุ่น MP3020D เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบนำดินมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของ pH ของดินหลังการทดสอบที่ระยะห่าง 0, 25, 50, 75 และ 100 มิลลิเมตร จากขั้วแอโนด (กรณีจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง) และที่ระยะห่าง -25, -50, 0, 25 และ 50 มิลลิเมตร (กรณีจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง) และนำชุดทดสอบวางบนตาชั่งเพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบ ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำหนักน้ำที่หายไป เมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าปรับปรุงดิน ซึ่งรูปแบบการทดสอบเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ลักษณะขั้วไฟฟ้าและรายละเอียดรูเจาะบริเวณขั้วลบ



รูปที่ 3.18 แผนภาพการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

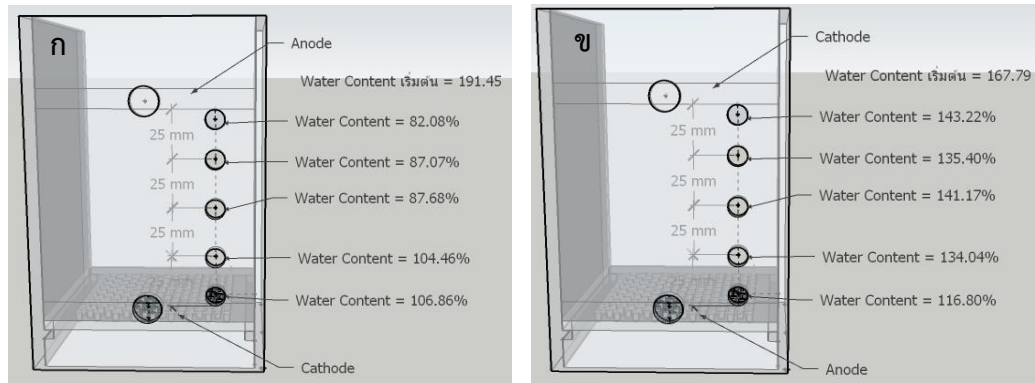
4.1 บทนำ

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งการทดสอบแบ่งเป็น การทดสอบโดยการวางขั้วไฟฟ้าแนวตั้งหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง ในการทดสอบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกกกดทับบริเวณผิวดินขนาด 3 กิโลกรัม ทุกรูปแบบการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบจะแสดง การทรุดตัว กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในระหว่างการทดสอบ วัดค่า pH ในดินและความชื้นในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนและหลังการทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

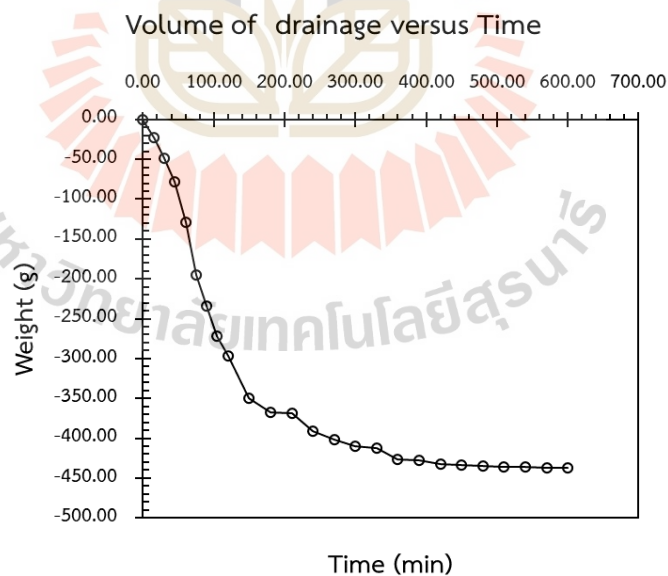
4.2.1 ความชื้นในดิน และการระบายน้ำ

ความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการเร่งการระบายน้ำในดิน (Bergado et al. 2003) รูปที่ 4.1 แสดงความชื้นในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบความชื้นในดินบริเวณขั้วแอโนด จะมีค่าลดลงมากที่สุดในการทดสอบทั้งสองรูปแบบ โดยการวางขั้วไฟฟ้าแบบ 1A จะมีความชื้นลดลงสูงสุด 109.33% ขณะที่การทดสอบแบบ 1AB จะมีความชื้นในดินลดลงสูงสุด 50.9

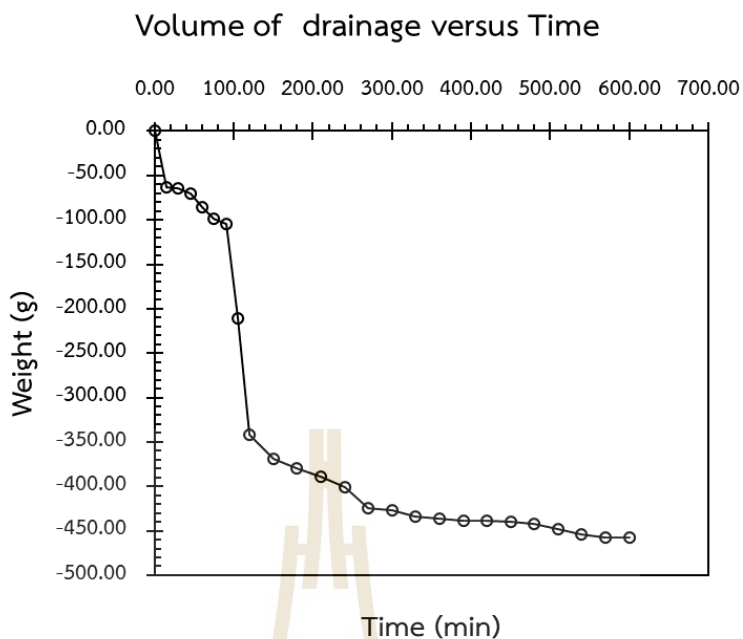


รูปที่ 4.1 ปริมาณความชื้น ณ ตำแหน่ง ต่าง ๆ ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 1AB

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบกับเวลาสำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 1AB ตามลำดับ ทั้งนี้ น้ำหนักที่หายไประหว่างการทดสอบแสดงถึงน้ำหนักของน้ำที่ระบายออกจากระบบระหว่างการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการระบายน้ำเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และการระบายน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อการทดสอบผ่านไประยะหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tang et al. (2020)

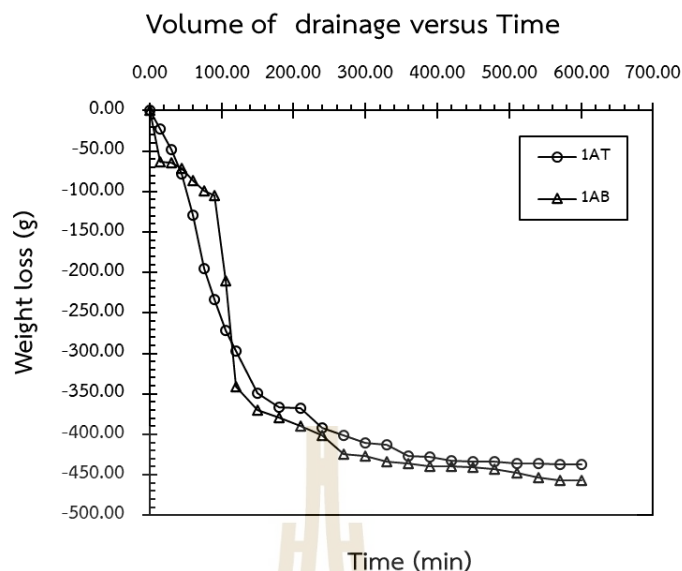


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับเวลาที่ผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับเวลาที่ผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบกับเวลา สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบปริมาณน้ำที่ระบายออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการทดสอบ 1AT มีน้ำหนักดินเริ่มต้น 1573 กรัม สามารถระบายน้ำออกได้ 437.40 กรัม และการทดสอบรูปแบบ 1AB มีน้ำหนักดินเริ่มต้น 1536.7 กรัม สามารถระบายน้ำออกได้ 457.20 กรัม อย่างไรก็ตามการทดสอบแบบ 1AB พบการหน่วงของการระบายน้ำออกจากระบบเป็นช่วง ๆ (ระหว่าง 20-100 นาที และระหว่าง 140-220 นาที) ทั้งนี้เนื่องการทดสอบแบบ 1AB จะระบายน้ำออกทางด้านบน ซึ่งมีการเจาะรูสำหรับระบายน้ำไว้ที่ความสูงระยะ 15, 35, 60, 85 และ 105 มิลลิเมตรจากฐานของแบบทดสอบ ดังรูปที่ 3.15x แต่ในระหว่างการทดสอบดินมีการทรุดตัวค่อนข้างมากทำให้ตำแหน่งที่เจาะรูไว้สำหรับให้น้ำระบายออกไม่สามารถใช้งานได้ การระบายน้ำในบางช่วงเวลาของการทดสอบแบบ 1AB จึงทำโดยการดูน้ำที่บริเวณผิวดินออกจากระบบ ทำให้เกิดการหน่วงของน้ำหนักที่หายไปจากระบบที่วัดได้จากกรทดสอบ

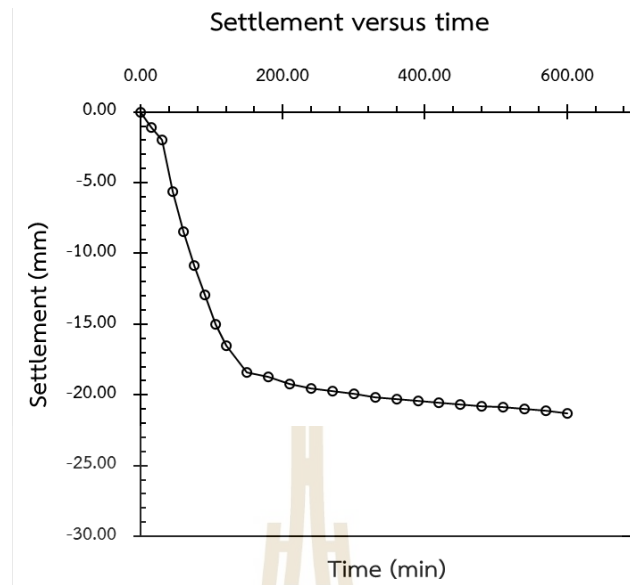


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนไปกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

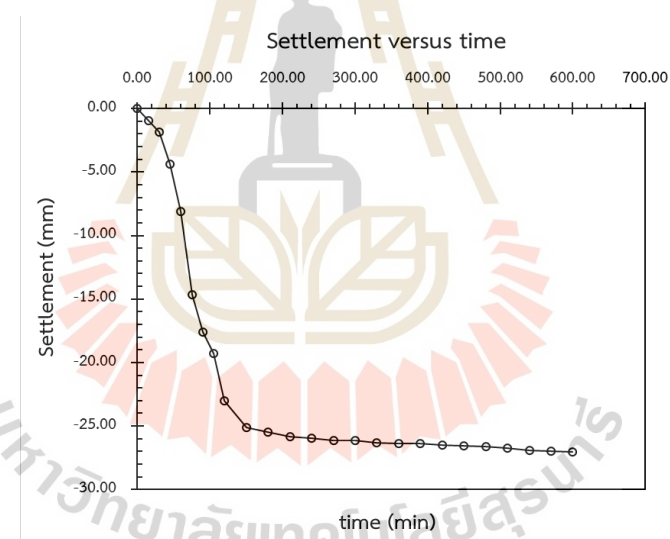
แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบในการศึกษานี้การระบายน้ำในระบบกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบไม่สอดคล้องกัน กล่าวคือ การทดสอบรูปแบบ 1AT มีการระบายน้ำจากการซึมน้ำหนักที่เปลี่ยนไปโดยรวมน้อยกว่ารูปแบบ 1AB แต่ความชื้นเมื่อสิ้นสุดการทดสอบรูปแบบ 1AT มีความชื้นโดยรวมน้อยกว่ารูปแบบ 1AB คาดว่าสาเหตุจากในการศึกษานี้ไม่ได้ซึมน้ำหนักดินโดยทันที หลังจากเก็บตัวอย่างดินจากตำแหน่งต่าง ๆ แต่พักดินไว้ระยะหนึ่งส่งผลให้ความชื้นที่ได้หลังการทดสอบเกิดความคาดเคลื่อน

4.2.2 การทรุดตัว

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 1AB ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าช่วยเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินจะเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบและการทรุดตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง สอดคล้องกับปริมาณการระบายน้ำออกจากระบบในหัวข้อ 4.2.1 และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shang (1997), Bergado et al. (2003) และ Islam & Shang (2018)



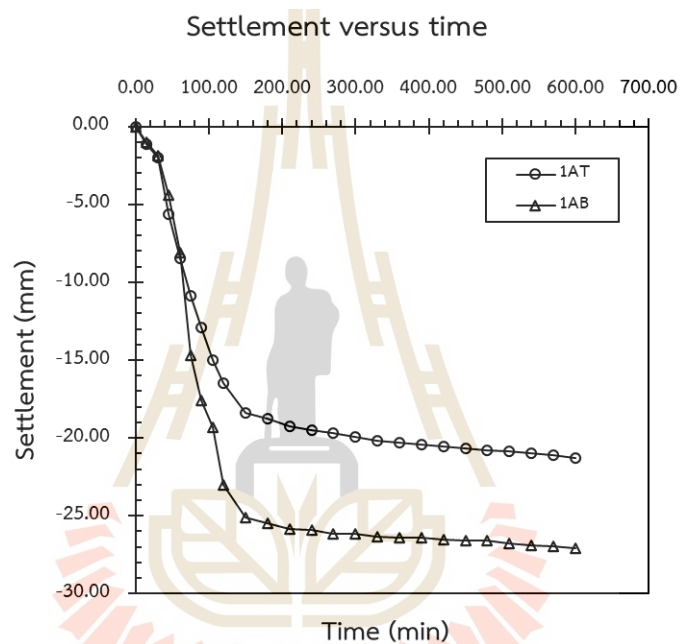
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการทรุดตัวของดินกับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า การทรุดตัวสุดท้ายมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยการทดสอบแบบ 1AT มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 21.28 มิลลิเมตร ขณะที่การทดสอบแบบ 1AB มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 27.08 มิลลิเมตร Malekzadeh & Sivagukan (2016) อธิบายว่าการที่การทดสอบแบบ 1AB มีอัตราการทรุดตัวสูงกว่าการทดสอบแบบ 1AT เนื่องจากการเสริมกันของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพรีซิส และปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส อย่างไรก็ตามการทรุดตัวจากผลการศึกษาครั้งนี้มีค่าแตกต่างกันอย่างมาก (มากถึงกว่า 25%) ส่วนหนึ่งเป็นผลจาก

อนุภาคดินเมื่อจัดเรียงด้วยไฟฟ้ารูปแบบ 1AT จะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดขึ้นด้านบน ซึ่งส่วนทางกับการทรุดตัวของดินจึงเหนียวนำทำให้เกิดรอยแตกภายในมวลดิน (Malekzadeh & Sivagukan, 2017) ซึ่งในการศึกษานี้ พบว่าดินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบรูปแบบ 1AT จะพบรอยแตกของดินมากกว่ารูปแบบ 1AB ดังรูปที่ 4.8 และบริเวณด้านบนของการทดสอบแบบ 1AT ซึ่งมีขั้วแอโนดอยู่ด้านบน จะมีการแข็งตัวมากกว่ารูปแบบ 1AB ที่มีขั้วแคโทดอยู่ด้านบน เนื่องจากน้ำจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด และการมีน้ำที่ซึ่งอยู่บริเวณผิวดินระหว่างการทดสอบแบบ 1AB ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.1 และผลดังกล่าวมีผลต่อค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



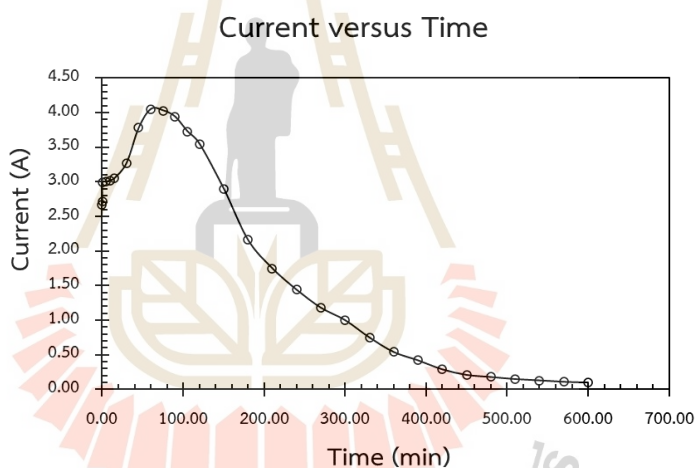
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการทรุดตัวของดินกับเวลาเมื่อจัดเรียงด้วยไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง



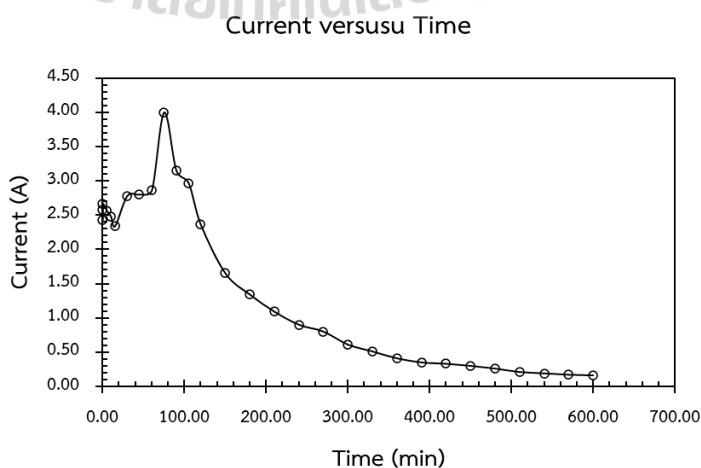
รูปที่ 4.8 ดินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 1AB

4.2.3 กระแสไฟฟ้า และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ

ในการศึกษานี้อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT และ 1AB ตามลำดับ จากรูปพบว่า กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ และเมื่อถึงจุดสูงสุดกระแสไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลง จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Xue et al. (2017), Tang et al. (2021) และ Sadeghian et al. (2022) เป็นต้น ทั้งนี้ในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสทำให้เกิดการแตกตัวของประจุไฟฟ้าในระบบ ประจุไฟฟ้าจึงมีความเข้มข้นมากในช่วงแรกส่งผลให้ปริมาณกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปประจุไฟฟ้าเริ่มจับตัวกันทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง นอกจากนี้การที่ความชื้นในมวลดินลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ความต้านทานของดินสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าจึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

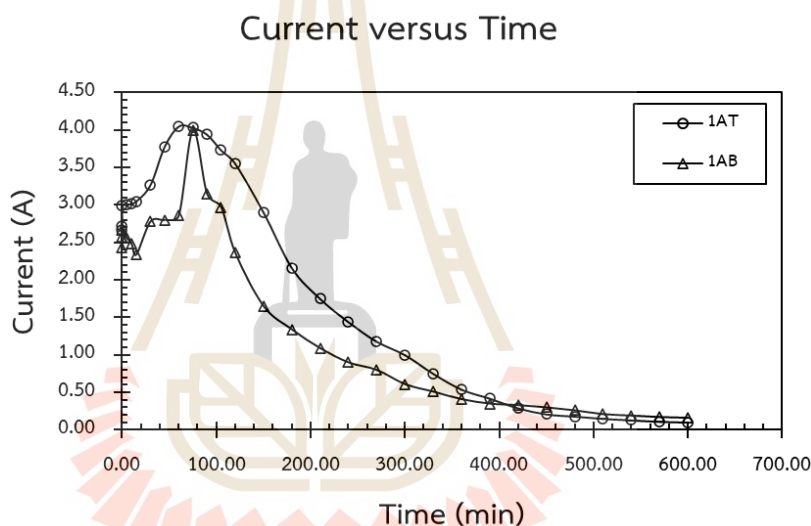


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า กระแสไฟฟ้าเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT โดยรวมสูงกว่า รูปแบบ 1AB เนื่องจาก น้ำเป็นตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีปริมาณความชื้นสูงจะทำให้มีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูง และรูปแบบ 1AT มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า รูปแบบ 1AB และการระบายน้ำน้อยกว่ารูปแบบ 1AB จึงทำให้รูปแบบ 1AT มีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงกว่ารูปแบบ 1AB แต่อย่างไรก็ตามหลังจาก 400 นาที กระแสไฟฟ้ารูปแบบ 1AT จะมีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่ารูปแบบ 1AB สาเหตุจาก รูปแบบ 1AT เกิดรอยแตกภายในมวลดินเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินจากขั้วแคโทดไปขั้วแอโนดขึ้นทางด้านบนซึ่งตรงข้ามกับกับทรุดตัวที่เกิดขึ้น ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบของรูปแบบ 1AT ลดลง



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

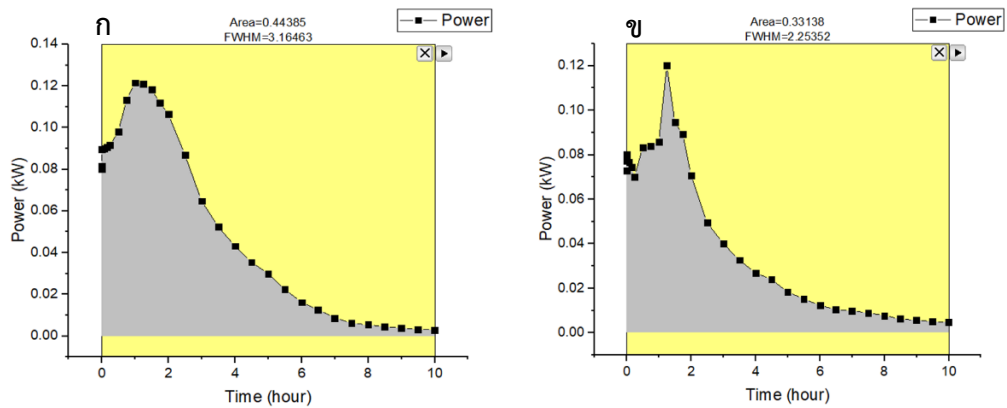
พลังงานที่ใช้ในการทดสอบ (สมการที่ 4.1) ซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา (รูปที่ 4.12) คูณด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์ จะได้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ดังตารางที่ 4.1 จากการศึกษาพบว่า การทดสอบแบบ 1AB จะใช้พลังงานน้อยกว่าการทดสอบแบบ 1AT ถึง 25% โดยประมาณ เนื่องจากรูปแบบ 1AT มีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าในระบบสูงกว่ารูปแบบ 1AB จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากกว่า

$$W = \int_0^t VI dt \quad (4.1)$$

เมื่อ W = Energy Consumption (kWh)

V = แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ (volt) ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ 30 โวลต์ทุกการทดสอบ

I = กระแสไฟฟ้า (amps.)



รูปที่ 4.12 Energy Consumption ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 1AB

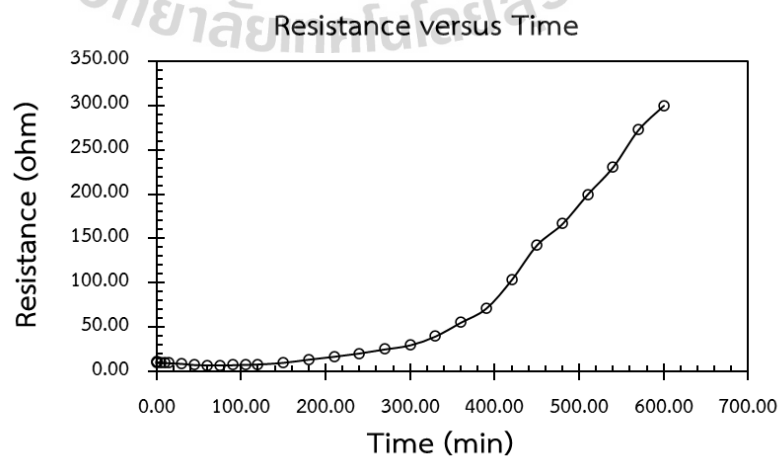
ตารางที่ 4.1 Energy Consumption เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

Energy Consumption (kWh)	Anode top and Cathode bottom (1AT)	Anode bottom and Cathode top (1AB)
	0.44385	0.33138

4.2.4 ความต้านทานไฟฟ้า

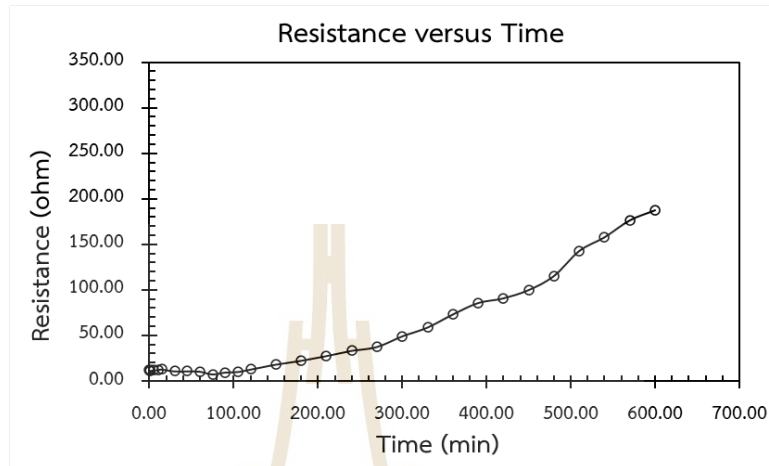
ความต้านไฟฟ้า คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะแปรผกผันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในมวลดิน ความต้านไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นได้ เนื่องจากปริมาณความชื้นในดิน เป็นต้น

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบที่ 1AT พบว่า ช่วง 0-300 นาทีแรก ความต้านทานไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และหลังจาก 300 นาที ความต้านทานจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว



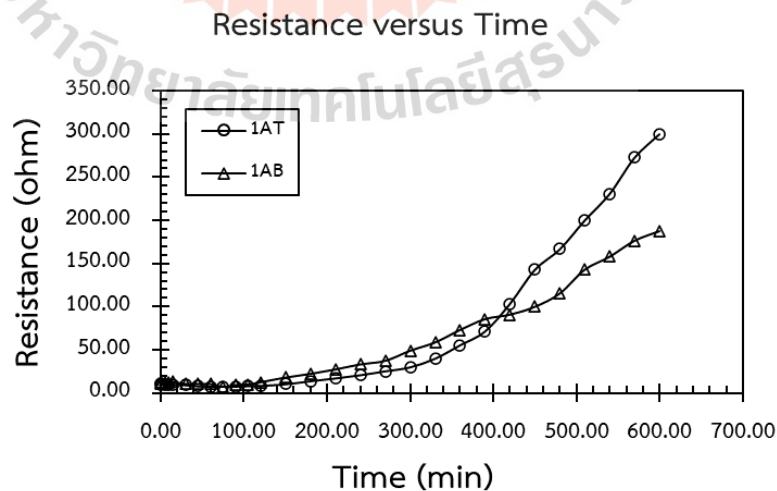
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียง ขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB พบว่า ช่วง 0-200 นาทีแรก ความต้านทานจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และหลังจาก 200 นาที ความต้านทานจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าที่มีการเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าในดินมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากดินมีปริมาณความชื้นลดลง แนวโน้มนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Xue et al. (2017) และเมื่อเวลาผ่านไป 400 นาที ความต้านทานไฟฟ้าของการทดสอบรูปแบบ 1AT จะต่ำกว่า รูปแบบ 1AB สาเหตุจากรูปแบบ 1AT เกิดรอยแตกภายในมวลดินส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลในระบบได้น้อยลง ความต้านทานไฟฟ้าจึงสูงขึ้น

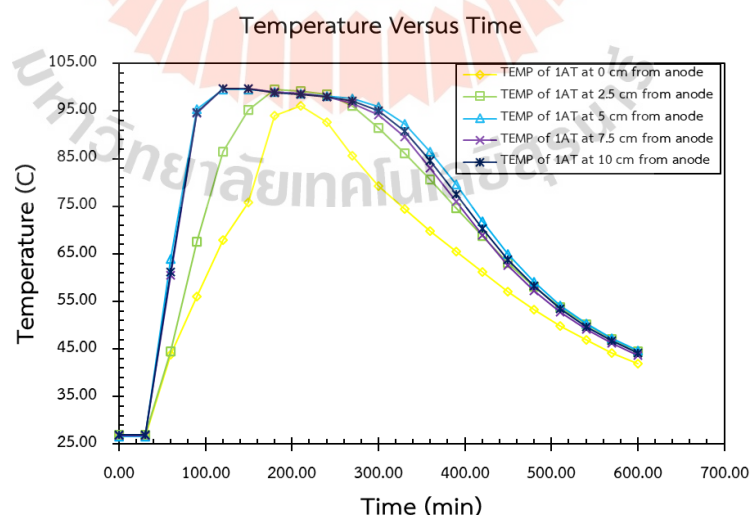


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

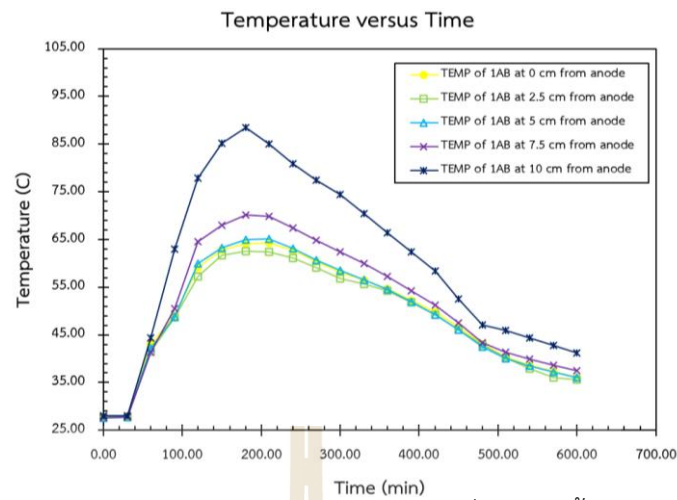
4.2.5 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสที่เกิดขึ้นในมวลดิน รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ในมวลดิน (0 2.5 5 7.5 และ 10 เซนติเมตรจากขั้วแอโนด) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 1AB ตามลำดับ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดในช่วง 100-200 นาทีแรก ก่อนจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสในช่วงเริ่มต้นสูง จึงส่งผลให้อุณหภูมิสูงในช่วงเริ่มต้น และเมื่อประจุไฟฟ้าในดินเกิดการถ่ายเท ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสลดลง ทำให้อุณหภูมิในดินโดยรวมค่อย ๆ ลดลง ทั้งนี้การที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสลดลง มีสาเหตุมาจากการลดลงของความชื้นในดินระหว่างการทดสอบ

สำหรับการทดสอบแบบ 1AT อุณหภูมิสูงสุดที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน (96.12 องศาเซลเซียส บริเวณขั้วแอโนด และ 99.75 องศาเซลเซียส ที่ขั้วแคโทด) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิของดินบริเวณขั้วแอโนดจะมีค่าสูงสุดเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ และลดลงเร็วกว่าการลดลงของอุณหภูมิในดินบริเวณขั้วแคโทดสำหรับการทดสอบแบบ 1AB พบว่า อุณหภูมิที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน (64.31 องศาเซลเซียส บริเวณขั้วแอโนด และ 88.50 องศาเซลเซียส ที่ขั้วแคโทด) การที่อุณหภูมิของดินบริเวณขั้วแคโทดสูงกว่าอุณหภูมิของดินบริเวณขั้วแอโนด สอดคล้องกับผลการการศึกษาของ Wu et al. (2012), Fu et al. (2017) และ Wen et al. (2020)

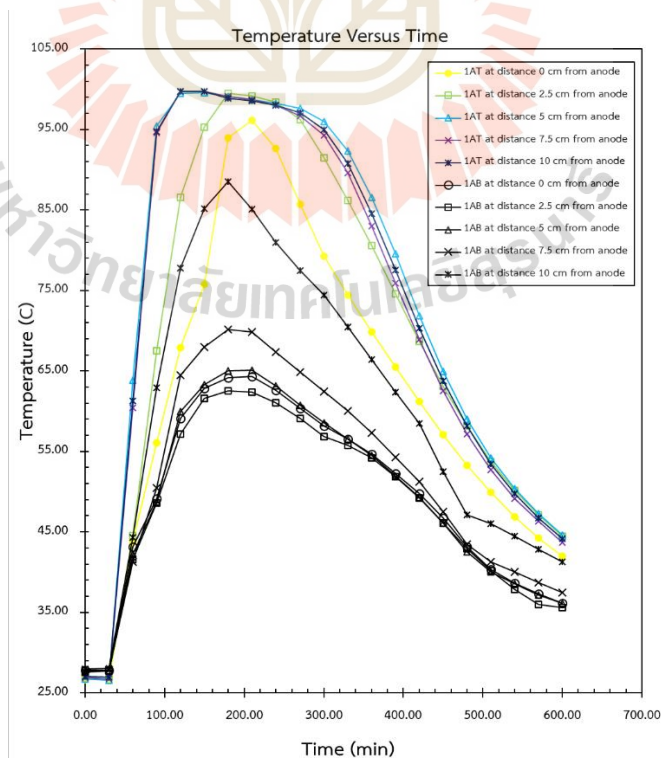


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT



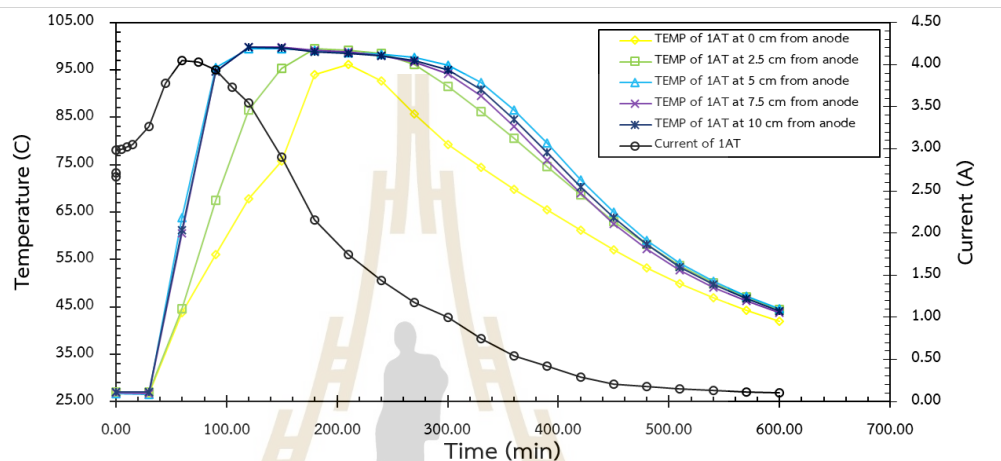
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดิน สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดิน สำหรับการทดสอบแบบ 1AT มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดในดิน สำหรับการทดสอบแบบ 1AB อย่างชัดเจน ทั้งนี้คาดว่าเพราะการทดสอบแบบ 1AB มีน้ำขังอยู่ที่บริเวณผิวดิน (ขั้วแคโทด) จึงช่วยลดอุณหภูมิของดินบริเวณนี้และส่งผลต่อการแพร่ของอุณหภูมิไปยังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในดิน ทั้งนี้ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมในประเด็นนี้เพื่อยืนยันอิทธิพลของน้ำที่ขังอยู่บริเวณผิวดินใกล้ขั้วแคโทด

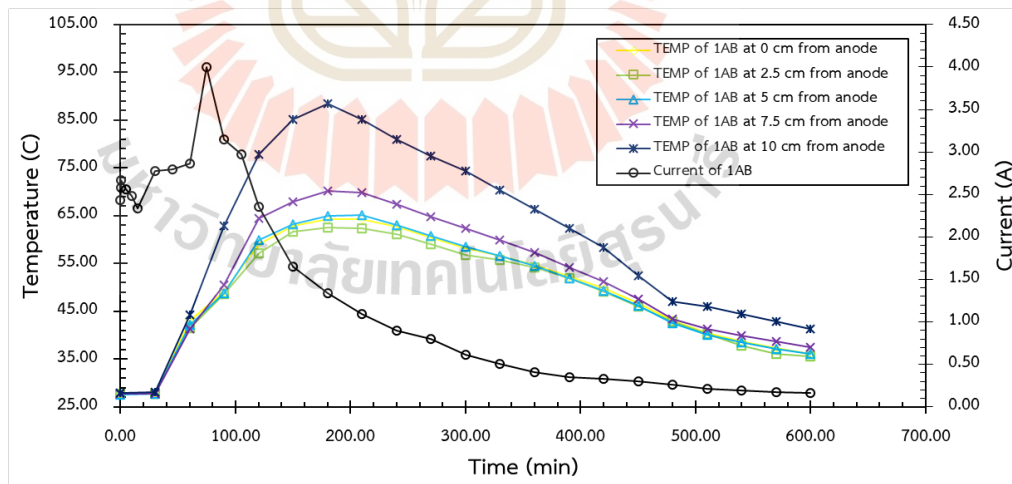


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 1AB ตามลำดับ พบว่า แนวโน้มของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ และลดลงเมื่อผ่านค่าสูงสุดไปแล้ว แต่การตอบสนองของอุณหภูมิจะช้ากว่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากการคายความร้อนในดินจะอาศัยเวลาระยะหนึ่ง ส่งผลให้อุณหภูมิมีการตอบสนองช้ากว่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้า
รูปแบบ 1AT

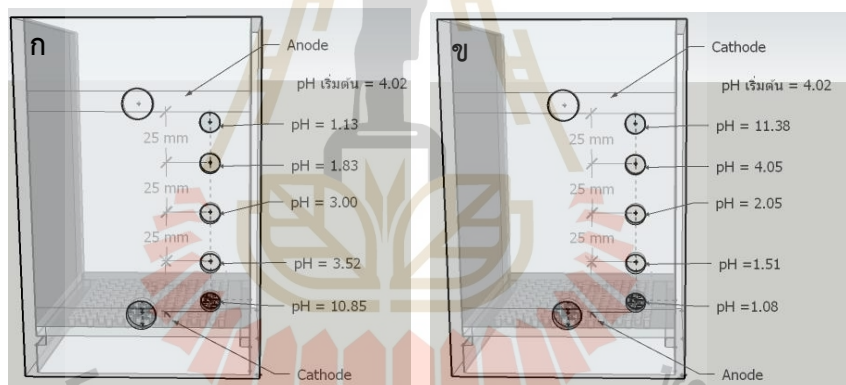


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้า
รูปแบบ 1AB

4.2.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

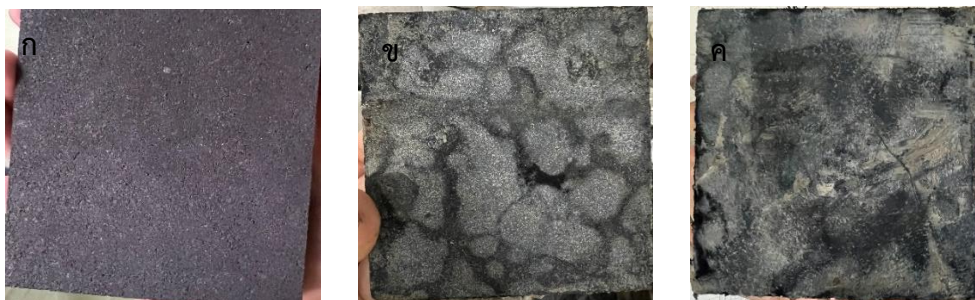
การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าช่วยในการระบายน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดิน เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส เหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนที่บริเวณ

ขั้วแอโนด และ ไฮดรอกไซด์ไอออนที่บริเวณขั้วแคโทด ประจุไฟฟ้าของดินเหนียวซึ่งมีประจุลบและ ประจุไฟฟ้าของน้ำที่เกิดการแตกตัวจะเกิดการรวมตัวและจับตัวกัน จึงส่งผลให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลง pH ในดิน รูปที่ 4.21 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนและหลังการทดสอบ สำหรับการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ pH ของการทดสอบรูปแบบ 1AT และ 1AB มี pH เท่ากับ 1.13 และ 1.08 ตามลำดับ ที่บริเวณขั้วแอโนด และ 10.85 และ 11.38 ตามลำดับ ที่บริเวณขั้วแคโทด สอดคล้องกับผลการการศึกษาของ Hamed & Acar (1991), Estabragh et al. (2014) และ Sadeghian et al. (2022) เนื่องจากอนุภาคของน้ำในมวลดินเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนที่ขั้วแอโนด และ ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ขั้วแคโทด ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนตัวเพื่อจับกับประจุลบที่ผิวดินเหนียวทำให้ดินที่บริเวณขั้วแอโนด มีสภาพเป็นกรด และบริเวณขั้วแคโทดมีสภาพเป็นด่าง Hamed & Acar (1991) อธิบายว่า เมื่อดินที่อยู่บริเวณขั้วแอโนดจับกับไฮโดรเจนไอออนจนสมบูรณ์ ไฮโดรเจนไอออนอิสระจะเคลื่อนที่ไปจับกับผิวดินบริเวณใกล้เคียง ทำให้ดินบริเวณอื่นมีสภาพที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น ดินบริเวณขั้วแคโทดจึงมีสภาพที่เป็นด่างลดลง



รูปที่ 4.21 pH ณ ตำแหน่ง ต่าง ๆ ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 1AB

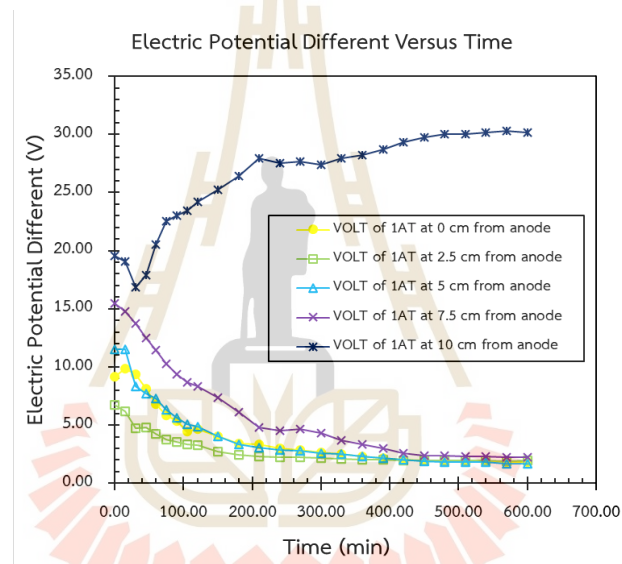
การศึกษานี้ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบดินที่บริเวณขั้วแอโนดมีสภาพเป็นกรดสูง ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าที่บริเวณนี้ถูกกัดกร่อนขึ้น ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sadeghian et al. (2022)



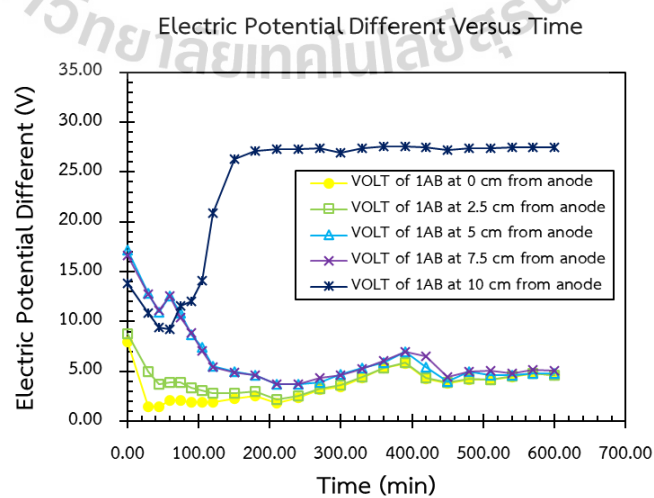
รูปที่ 4.22 ขั้วไฟฟ้าบริเวณขั้วแอโนดก่อนและหลังการทดสอบ ก) ก่อนการทดสอบ ข) รูปแบบ 1AT
ค) รูปแบบ 1AB

4.2.7 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential Different)

รูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ (0 2.5 5 7.5 และ 10 เซนติเมตร จากขั้วแอโนด) ทั้งนี้การศึกษานี้จะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้ขั้วแอโนดเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวัดเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ การทดสอบทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนหนึ่งเป็นสาเหตุจากความชื้นในดินลดลงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าจึงลดลง นอกจากนี้การศึกษานี้ พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแคโทดจะสูงกว่าขั้วแอโนด เนื่องจากตำแหน่งในการวัดที่ขั้วแคโทดจะเป็นการวัดคร่อมทั้งระบบ ส่งผลให้ความต่างศักย์ที่บริเวณนี้มีค่าสูงสุด แนวโน้มนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Wu et al. (2021)



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AT



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AB

การศึกษานี้ พบว่าที่บริเวณขั้วแคโทดความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงในช่วงเริ่มต้นการทดสอบเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง จะเริ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงเริ่มต้นการทดสอบที่บริเวณขั้วแอโนดและแคโทดมีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดจึงมีแนวโน้มลดลงในช่วงเริ่มต้น เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งน้ำเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด จากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมติก ทำให้บริเวณขั้วแอโนดมีความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามบริเวณขั้วแคโทดเป็นบริเวณที่น้ำเคลื่อนที่มาสะสมและจึงค่อย ๆ ระบายออก จึงมีปริมาณความชื้นที่สูงกว่า ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าที่บริเวณขั้วแอโนด กระแสไฟฟ้าจึงพยายามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ความต้านทานน้อยกว่า ส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มสูงขึ้น

4.2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก

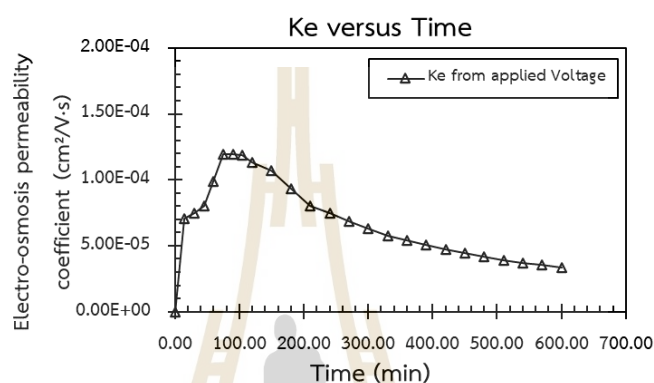
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก บ่งชี้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในอนุภาคดินภายใต้สนามไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของดิน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งเสนอโดย Casagrande (1949) การศึกษานี้ทดสอบโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด 10 เซนติเมตร และพื้นที่หน้าตัดของอนุภาคดินสำหรับการไหลของกระแสไฟฟ้า 121 ตารางเซนติเมตร ทั้งสองรูปแบบ

$$k_e = \frac{v_e L}{\Delta \phi A} \quad (4.2)$$

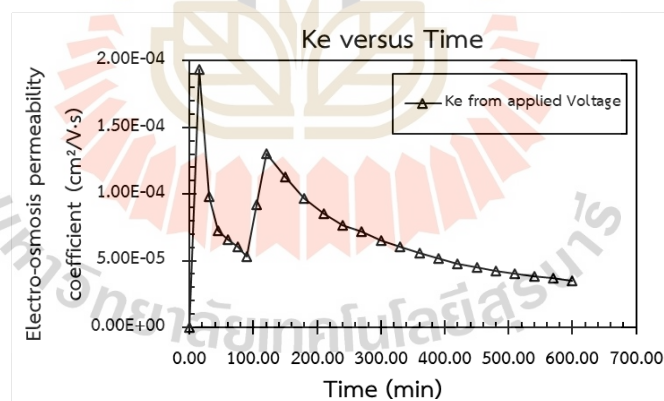
เมื่อ	k_e	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)
	v_e	คือ อัตราการระบายน้ำอิเล็กโทรออสโมติก (cm^3/sec)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนด และ ขั้วแคโทด (cm)
	$\Delta \phi$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ (Volt)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของมวลดินสำหรับการไหลของกระแสไฟฟ้า (cm^2)

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป สำหรับการทดสอบรูปแบบ 1AT พบว่าช่วง 0-100 นาทีแรกค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง จนเริ่มคงที่ แนวโน้มนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.1 รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป สำหรับการทดสอบรูปแบบ 1AB พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก

และลดลงในช่วง 15-100 นาที แล้วจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้งและหลังจาก 120 นาที จึงมีแนวโน้มลดลง จนเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบรูปแบบ 1AB พบการหน่วงของการระบายน้ำในระบบซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.1 แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบช่วงหลัง 120 นาทีของทั้งสองการทดสอบจะมีแนวโน้มลดลง จนเริ่มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tang et al. (2021) และแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกที่ลดลงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าจะลดลงเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่ง



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AT

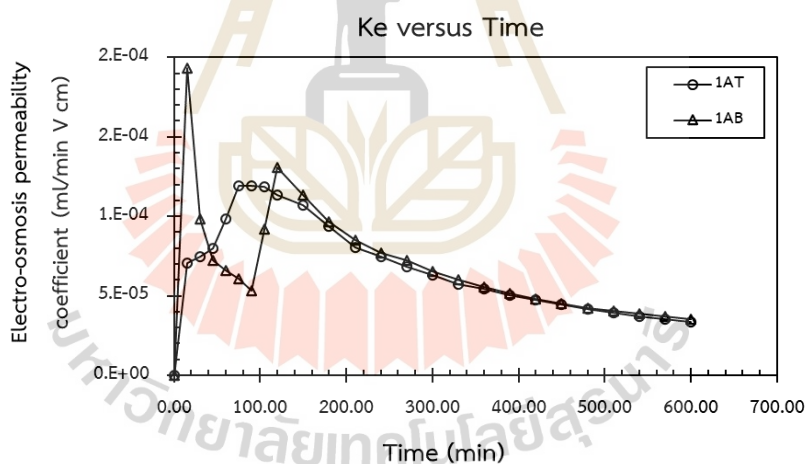


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟารูปแบบ 1AB

Asadi et al. (2013) อธิบายว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าซีตา ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าซีตา บ่งชี้ถึงความสามารถในการดึงดูดหรือผลักกันของอนุภาค ยิ่งมีค่ามากจะส่งผลให้อนุภาคผลักกัน และทำให้แนวโน้มของการรวมตัวกันของอนุภาคเกิดขึ้นได้ยาก แต่ถ้ามีค่าน้อยอนุภาคจะดึงดูดกัน ทำให้อนุภาคมีแนวโน้มรวมตัวกันมากขึ้น กล่าวคือ เมื่ออนุภาคมีศักย์ไฟฟ้าซีตาสูงทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคดินได้ง่าย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็ก-

โทรออสโมติกจะมีค่าคงที่ระหว่างการทดสอบด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง pH ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลง

Zhang et al. (2020) พบว่าดินที่มี pH 2 และ 13 ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าซีตาสูงสุด และดินที่มี pH 3 ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าซีตาต่ำสุด และพบว่า pH ที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าซีตาเป็น 0 หรือเรียกว่า Isoelectric point (IEP) อยู่ที่ประมาณ 3-4 การศึกษาในระหว่างการทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงของ pH ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกไม่คงที่ และมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลมาจากระหว่างการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของ pH ในดินโดยรวมอยู่ในช่วง 3-4 (pH เริ่มต้นของดินคือ 4.02 และ pH หลังการทดสอบอยู่ในช่วง 1-4 ยกเว้นบริเวณใกล้ขั้วแคโทดมี pH 11) ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าซีตาเป็นศูนย์ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ ศักย์ไฟฟ้าซีตายังขึ้นกับสภาพความนำไฟฟ้าของดิน ดินที่มีสภาพความนำไฟฟ้าสูงจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าซีตาสูง และการศึกษานี้ในระหว่างการทดสอบมีปริมาณความชื้นลดลงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นจึงส่งผลให้ดินมีสภาพความนำไฟฟ้าลดลง และส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าซีตาและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

4.2.9 สรุปและอภิปรายผล

ผลการศึกษาพฤติกรรมภายในและภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการเร่งระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1) ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อดินมีปริมาณ

ความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสมีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้การนำกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเทคนิคไฟฟ้าจลนศาสตร์สูงขึ้น

2) การศึกษานี้ยืนยันข้อเท็จจริงที่ว่าน้ำถูกระบายออกโดยการเคลื่อนที่ของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด จากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิสมากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิ เนื่องจากในการทดสอบ พบว่า การทดสอบรูปแบบ 1AB มีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่ารูปแบบ 1AT แต่มีการระบายน้ำและการหลุดตัวสูงกว่า

3) การหลุดตัวของดินเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพริซิสกับกับแรงโน้มถ่วง จึงทำให้การจัดเรียงรูปแบบ 1AB มีการหลุดตัวของดินสูงกว่ารูปแบบ 1AT เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพริซิสเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยังขั้วแอโนดและมีแรงโน้มถ่วงช่วยเร่งในการตกตะกอน ส่งผลให้ดินมีอัตราการหลุดตัวสูงขึ้นเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB และทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินเนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพริซิสส่งผลต่อการหลุดตัวของดินอย่างมีนัยสำคัญ

4) ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นลดลง ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และกระแสไฟฟ้าลดลง และความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดจะสูงกว่าบริเวณขั้วแอโนดเนื่องจาก ตำแหน่งการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดเป็นการวัดคร่อมทั้งระบบ ส่งผลให้ที่บริเวณขั้วแคโทดจึงมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

5) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลมาจากสภาพการนำไฟฟ้าของอนุภาคดินลดลงและการเปลี่ยนแปลงของ pH ของดินระหว่างการทดสอบในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มลดลง อยู่ในช่วง 3-4 (pH เริ่มต้นของดินคือ 4.02 และ pH หลังการทดสอบอยู่ในช่วง 1-4 ยกเว้นบริเวณใกล้ขั้วแคโทดมี pH 11) ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าชีตาเป็นศูนย์ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มลดลง และในช่วงเวลาดังกล่าวความความชื้นในดินลดลงไปค่อนข้างมาก ทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าในดินสูงขึ้น ความนำไฟฟ้าจึงลดลง และส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกมีแนวโน้มลดลง

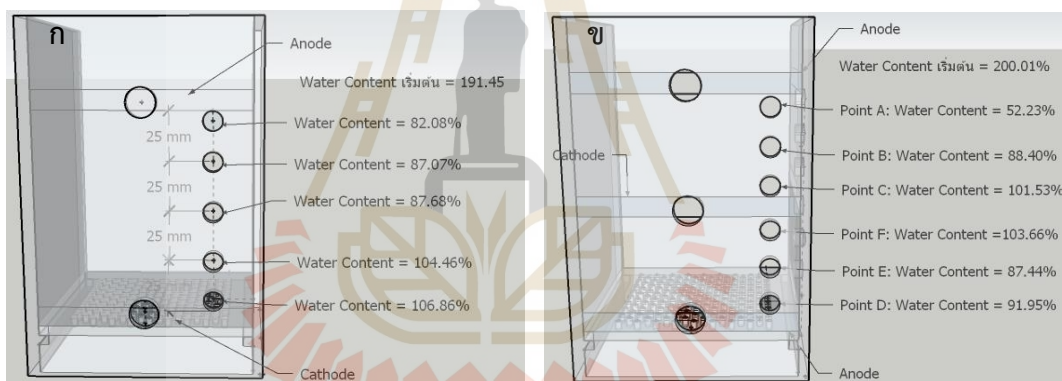
4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

การศึกษานี้ศึกษาประสิทธิภาพของการเร่งการระบายในดินเหนียวกรุงเทพฯโดยใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง ซึ่งรูปแบบที่เปรียบเทียบคือ 1AT และ 2ATB ดังรูปที่ 3.1ก และ 3.2ข เนื่องจากการทดสอบทั้งสองรูปแบบไม่มีการขังของน้ำที่บริเวณขั้วแคโทด

4.3.1 ความชื้นในดิน และการระบายน้ำ

รูปที่ 4.28 แสดงความชื้นในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง สำหรับการทดสอบรูปแบบ 1AT และ 2ATB ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบความชื้นในดินบริเวณขั้วแอโนด จะมีค่าลดลงมากที่สุดในการทดสอบทั้งสองรูปแบบ โดยการวางขั้วไฟฟ้าแบบ 1AT จะมีความชื้นลดลงสูงสุด 109.33% ขณะที่การทดสอบแบบ 2ATB จะมีความชื้นในดินลดลงสูงสุด 147.78%

การทดสอบรูปแบบ 2ATB ความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบจะมีลักษณะที่สมมาตรยกเว้นบริเวณขั้วแอโนดที่อยู่ด้านบนและด้านล่าง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เกิดจากการเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาปริมาณความชื้นผู้ทดสอบใช้วิธีปาดหน้าดินและเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาปริมาณความชื้น จึงอาจส่งผลให้ตัวอย่างดินเกิดการปนเปื้อนของดินตำแหน่งอื่น ๆ ได้

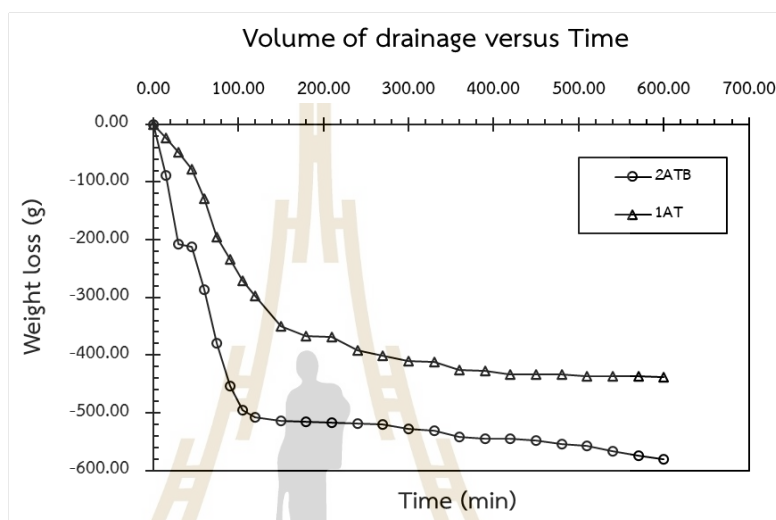


รูปที่ 4.28 แสดงปริมาณความชื้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 2ATB

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบกับเวลา สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบปริมาณน้ำที่ระบายออกจากระบบมีปริมาณ 437.40 กรัม (น้ำหนักดินเริ่มต้น 1536.7 กรัม) สำหรับการทดสอบ 1AT และ 580.60 กรัม (น้ำหนักดินเริ่มต้น 1524.6 กรัม) สำหรับการทดสอบ 2ATB ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการระบายน้ำเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก (0-120 นาที) และการระบายน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อการทดสอบผ่านไปประยะหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tang et al. (2020)

การศึกษานี้ พบว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 2ATB มีปริมาณความชื้นเมื่อสิ้นสุดการทดสอบน้อยกว่า รูปแบบ 1AT และปริมาณน้ำที่สามารถระบายออกจากระบบได้มากกว่าการ

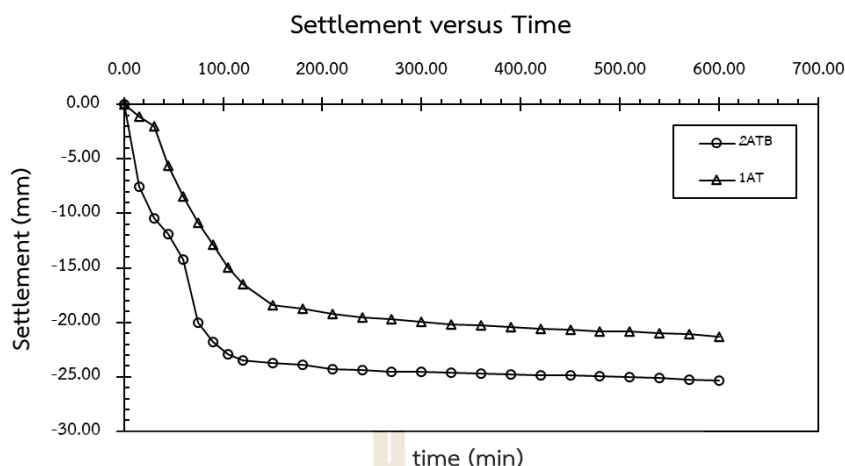
จัดเรียงไฟฟ้ารูปแบบ 1AT อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งยังสามารถเร่งการระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดน้อยกว่า ทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของน้ำลดลงและสามารถระบายน้ำออกได้เร็วขึ้น และกระแสไฟฟ้าในระบบของการทดสอบ 2ATB มากกว่า 1AT ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้การเคลื่อนตัวของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดรวดเร็วขึ้น



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดสอบสำหรับการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

4.3.2 การทรุดตัว

รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ สองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าช่วยเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินจะเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบและการทรุดตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง สอดคล้องกับปริมาณการระบายน้ำออกจากระบบในหัวข้อ 4.3.1 และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shang (1997), Bergado et al. (2003) และ Islam & Shang (2018) และพบว่า การทรุดตัวสุดท้ายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ประมาณ 20%) โดยการทดสอบแบบ 1AT มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 21.28 มิลลิเมตร ขณะที่การทดสอบแบบ 2ATB มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 25.32 อย่างไรก็ตามการทดสอบ 1AB มีการทรุดตัว 27.08 มิลลิเมตรซึ่งมากกว่ารูปแบบ 2ATB (ประมาณ 6%) จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง สามารถเร่งการทรุดตัวของดินได้มากกว่าการจัดเรียงไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับการจัดเรียง
ขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่มีการวางตำแหน่งขั้วแอโนดไว้ด้านบน และขั้วแคโทดไว้ด้านล่าง ไม่ว่าจะจัดวางในชั้นใดของดินก็ตาม จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดชั้นด้านบนเนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรโฟเรซิส ซึ่งเหนี่ยวนำให้ภายในมวลดินเกิดรอยแตกรอยขึ้น (Malekzadeh & Sivagukan, 2017) ซึ่งในการทดสอบรูปแบบ 1AT และ 2ATB มีการวางตำแหน่งของขั้วแอโนดด้านบนและแคโทดด้านล่างอย่างน้อยหนึ่งชั้น จึงส่งผลให้ดินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบเกิดรอยแตกกว้างของดินขึ้น ดังรูปที่ 4.31



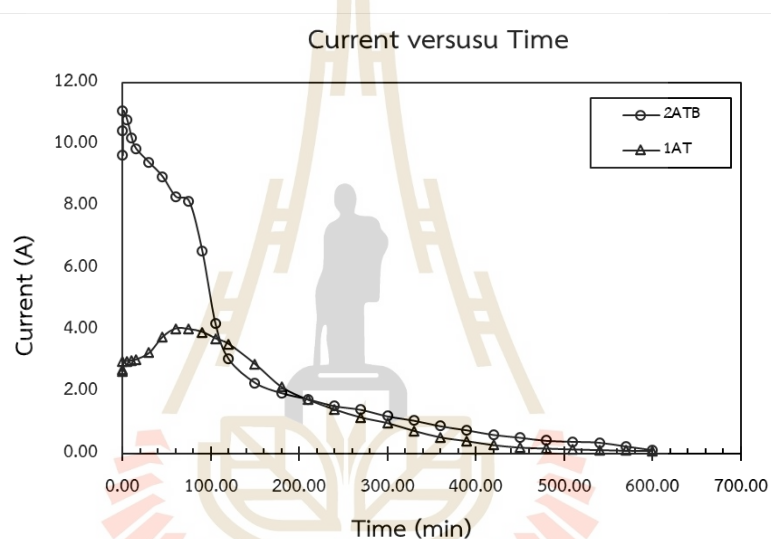
รูปที่ 4.31 ดินเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ ก) 1AT ข) 2ATB

4.3.3 กระแสไฟฟ้า และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษานี้อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB พบว่า รูปแบบ 2ATB กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดอย่างรวดเร็วแล้วจึงลดลงทันทีอย่างช้า ๆ และหลังจาก 100 นาที กระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่าง

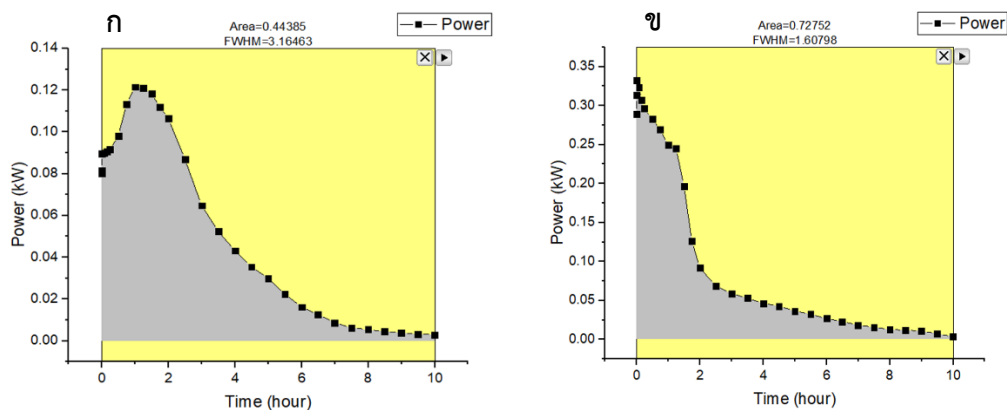
รวดเร็วและลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มคงที่และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้ารูปแบบ 1AT กระแสไฟฟ้าจะถึงจุดสูงสุดช้ากว่ารูปแบบ 2ATB แต่หลังจาก 100 นาทีทั้งสองรูปแบบจะมีแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าลดลงจนเริ่มคงที่จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

การศึกษานี้ พบว่า กระแสไฟฟ้าเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่งมีกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (4.05 แอมแปร์ สำหรับรูปแบบ 1AT และ 11.09 แอมแปร์ สำหรับรูปแบบ 2ATB) เนื่องจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่งมีการเพิ่มขั้วไฟฟ้าในระบบหนึ่งจุด ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเวียนในระบบได้สูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในมวลดินเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้นเป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าสูงสุดตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการทดสอบ



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง

พลังงานที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา (รูปที่ 4.33) คูณด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์ จะได้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ดังตารางที่ 4.2 จากการศึกษาพบว่า การทดสอบแบบ 1AT จะใช้พลังงานน้อยกว่าการทดสอบแบบ 2ATB ถึง 40% โดยประมาณ เนื่องจากรูปแบบ 2ATB มีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าในระบบสูงกว่ารูปแบบ 1AT จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากกว่า



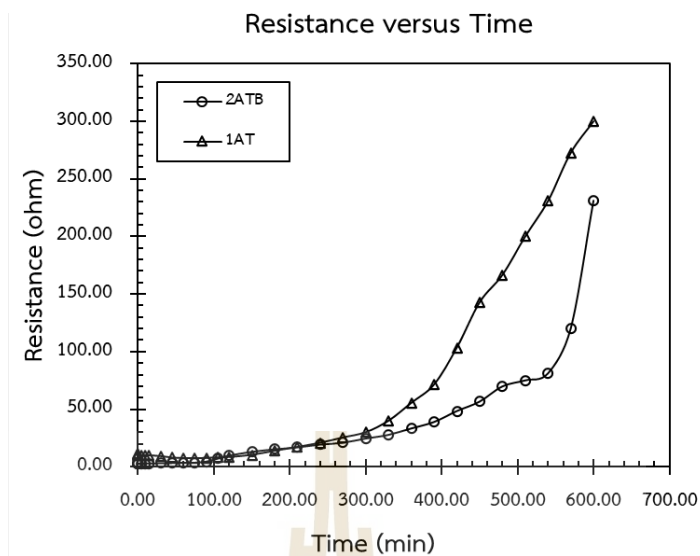
รูปที่ 4.33 Energy Consumption ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 1ATB

ตารางที่ 4.2 Energy Consumption เมื่อเปรียบเทียบจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

Energy Consumption (kWh)	Anode top and Cathode bottom (1AT)	Anode top & bottom and Cathode middle (2ATB)
	0.44385	0.72752

4.3.4 ความต้านทานไฟฟ้า

รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้า สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB ตามลำดับ พบว่า รูปแบบ 1AT หลังผ่านไป 300 นาที ความต้านทานจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และ รูปแบบ 2ATB หลังผ่านไป 500 นาที ความต้านทานจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงเวลาดังกล่าวปริมาณความชื้นในดินลดลงค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้ความต้านทานลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามแนวโน้มของความต้านทานไฟฟ้าสำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Xue et al. (2017)

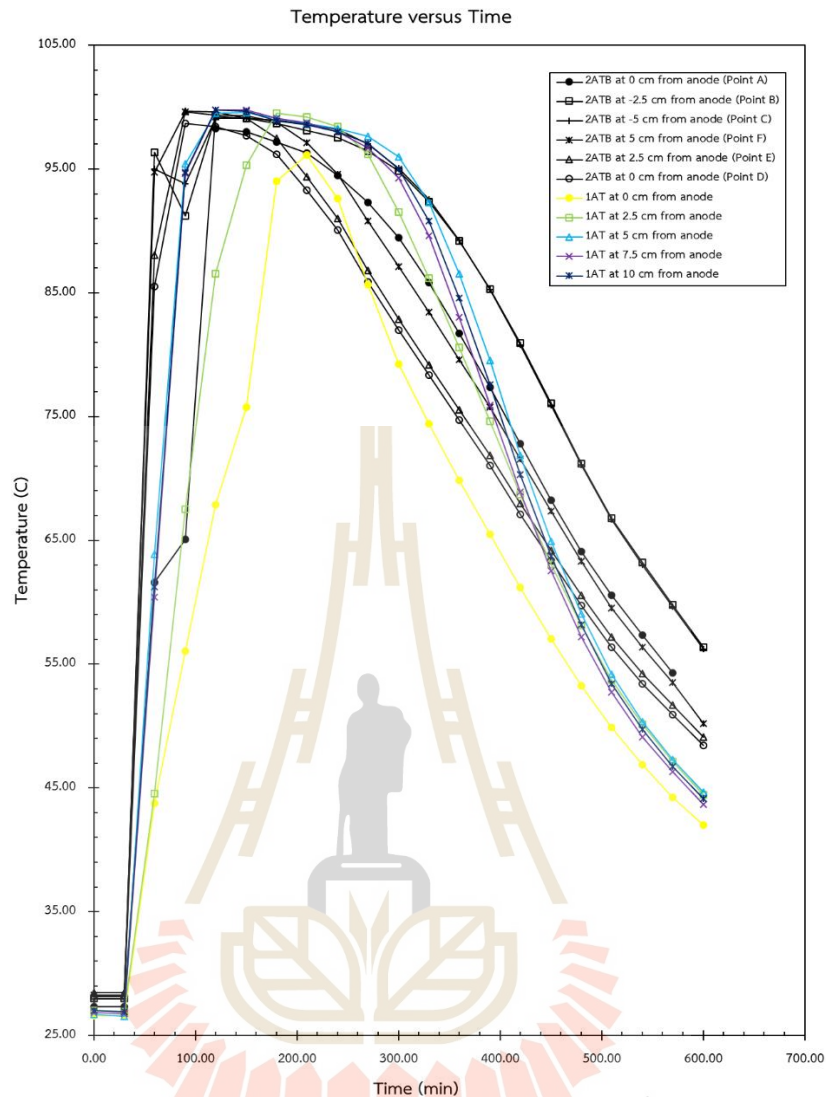


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

4.3.5 อุณหภูมิ

รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดิน (จุด A B C D และ E ดังรูปที่ 3.1ก) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT และ ที่ระยะ (จุด A B C F E และ D ดังรูปที่ 3.2ข) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB ตามลำดับ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดในช่วง 100-200 นาทีแรก ก่อนจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วงเริ่มต้นสูง จึงส่งผลให้อุณหภูมิสูงในช่วงเริ่มต้น และเมื่อประจุไฟฟ้าในดินเกิดการถ่ายเท ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลง ทำให้อุณหภูมิในดินโดยรอบค่อย ๆ ลดลง ทั้งนี้การที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลง มีสาเหตุมาจากการลดลงของความชื้นในดินระหว่างการทดสอบ

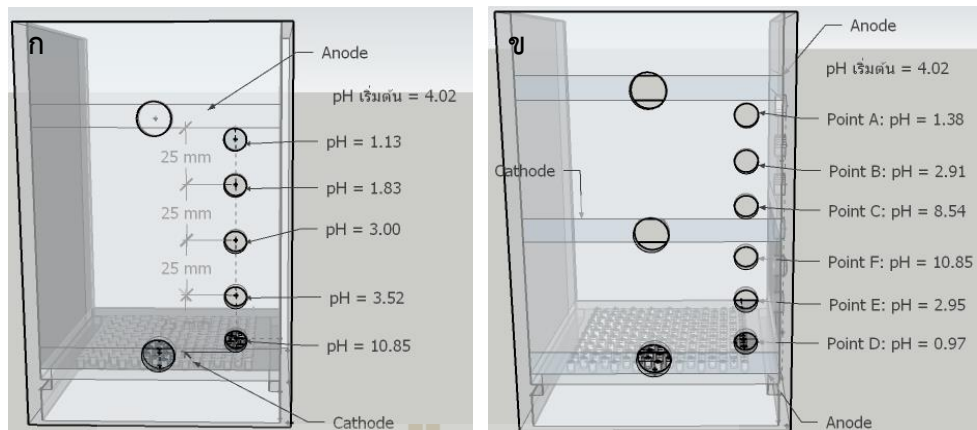
สำหรับการทดสอบแบบ 1AT และ 2ATB อุณหภูมิสูงสุดที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 96.12 องศาเซลเซียส บริเวณขั้วแอโนด และ 99.75 องศาเซลเซียส บริเวณขั้วแคโทด สำหรับรูปแบบ 1AT และ 99.44 และ 98.69 องศาเซลเซียส บริเวณขั้วแอโนด จุด A และ D ดังรูป 3.2ข ตามลำดับ 99.12 และ 99.62 องศาเซลเซียส บริเวณขั้วแคโทด จุด C และ จุด F ดังรูป 3.2ข ตามลำดับสำหรับรูปแบบ 2ATB อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของดินบริเวณขั้วแอโนดจะมีค่าสูงสุดเป็นช่วงเวลานาน ๆ และลดลงเร็วกว่าการลดลงของอุณหภูมิในดินบริเวณขั้วแคโทด การที่การทดสอบรูปแบบ 1AT และ 2ATB มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากรูปแบบ 1AT มีความต้านทานสูงกว่าแต่มีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า รูปแบบ 2ATB ส่งผลให้อุณหภูมิทั้งสองรูปแบบใกล้เคียงกัน



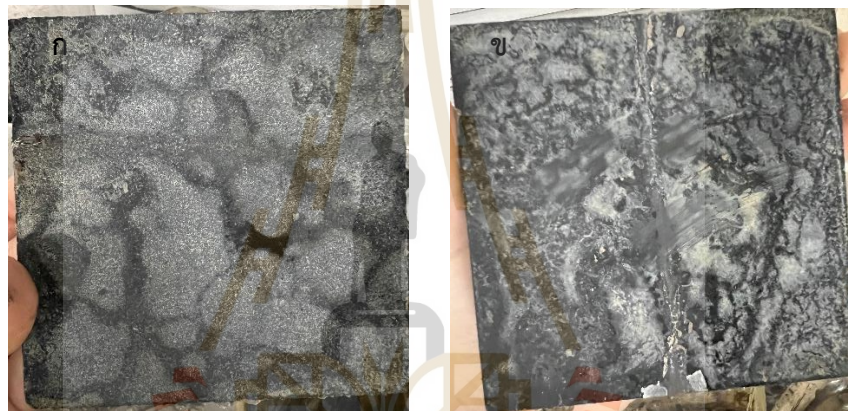
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง

4.3.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของดินหลังเสร็จสิ้นการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB ตามลำดับ ผลการทดสอบทั้งสองรูปแบบแสดงให้เห็นว่าที่ดินเมื่อเข้าใกล้บริเวณขั้วแอโนดจะมีค่า pH ที่น้อยลง เรื่อย ๆ หรือดินมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น และที่บริเวณขั้วแคโทดดินจะมีสภาพเป็นด่าง สอดคล้องกับการศึกษาของ Hamed & Acar (1991), Estabragh et al. (2014) และ Sadeghian et al. (2022) และการศึกษานี้ พบว่าขั้วไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดจะถูกกัดกร่อน เนื่องจากสภาพดินในบริเวณนี้มีความเป็นกรดสูง ดังรูปที่ 4.37 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sadeghian et al. (2022)



รูปที่ 4.36 pH ของดิน ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 2TAB



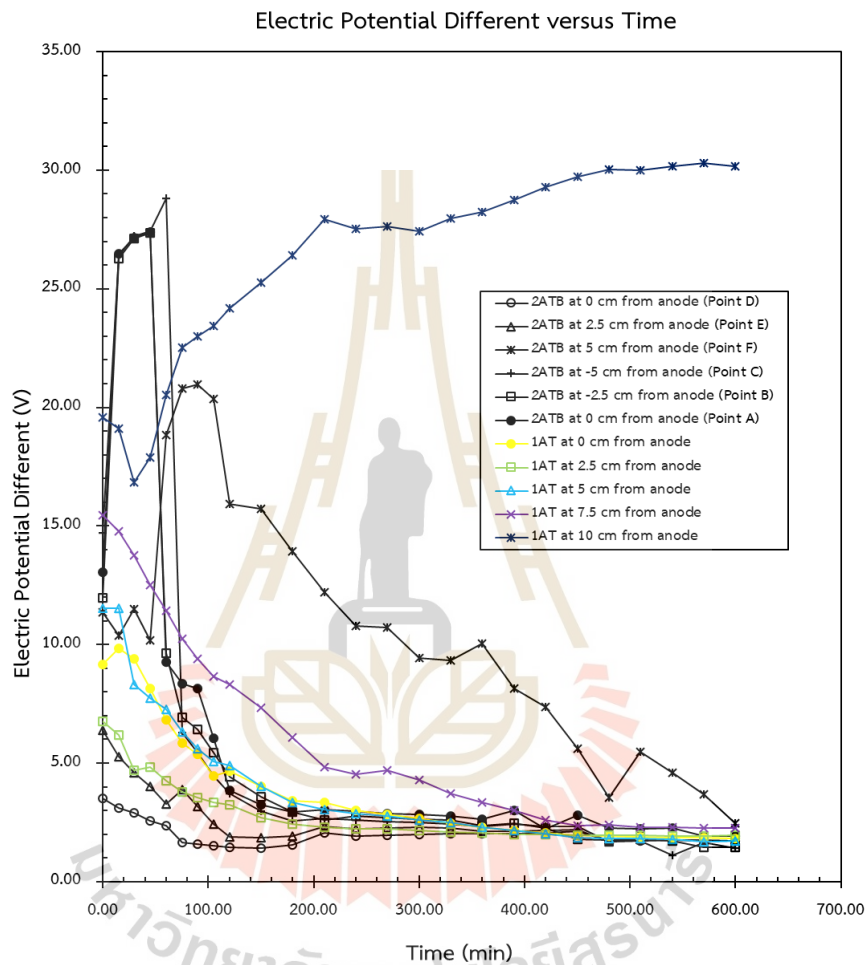
รูปที่ 4.37 ชั่วไฟฟ้าหลังการทดสอบ ก) รูปแบบ 1AT ข) รูปแบบ 2TAB

4.3.7 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential Different)

จากรูปที่ 4.38 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (A B C D และ E ดังรูปที่ 3.1ก) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1AT) และ ที่ตำแหน่ง (A B C F E และ D ดังรูปที่ 3.2ข)) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง (2ATB) ทั้งนี้การศึกษานี้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้ขั้วแอโนดเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวัดเปรียบเทียบกับตำแหน่งต่าง ๆ

การทดสอบรูปแบบ 1AT ความต่างศักย์ไฟฟ้าทุกตำแหน่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ยกเว้นที่บริเวณขั้วแคโทดเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น แต่การทดสอบรูปแบบ 2ATB จะขึ้นลงไม่สม่ำเสมอในช่วงเริ่มต้น โดยที่จุด A ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และค่อย ๆ ลดลงจนเริ่มคงที่ ในทางตรงข้ามที่จุด D ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นและหลังจากนั้นจึงเริ่มคงที่ และบริเวณขั้วแคโทดที่จุด C และ F แนวโน้มของความต่างศักย์ไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้น

หลังจากนั้นจึงลดลง แต่ที่จุด C จะลดลงอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ ในขณะที่จุด F จะค่อยๆลดลงอย่างสม่ำเสมอ (ตำแหน่งการวัดแสดงดังรูป 3.2ข) แต่อย่างไรก็ตามหลังผ่าน 100 นาทีความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นในดินลดลงทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าจึงลดลง

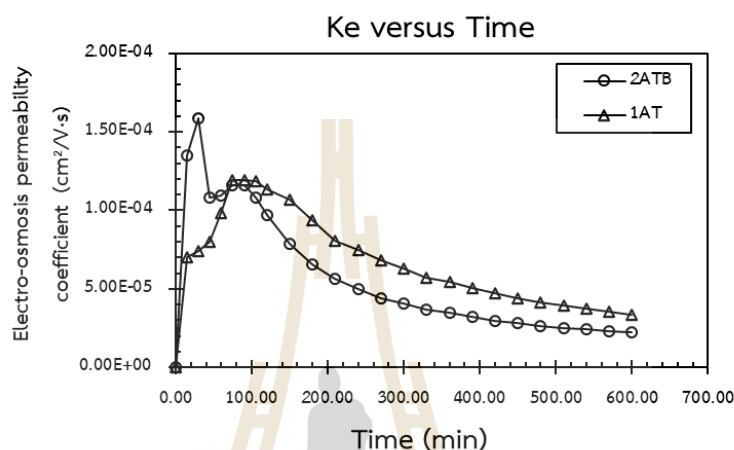


รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

4.3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก

รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB ตามลำดับ พบว่า การทดสอบรูปแบบ 2ATB สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติก จะสูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นหลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลงและเริ่มคงที่ ในขณะที่รูปแบบ 1AT จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อถึงจุดสูงสุด ณ ช่วงเวลาหนึ่งจึงลดลงและเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบ 2ATB กระแสไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการทดสอบและลดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกของการทดสอบ 2ATB สูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น ซึ่งสาเหตุที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกล่าวถึงหัวข้อ 4.3.3 อย่างไรก็ตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าทั้งสองรูปแบบจะมีแนวโน้มลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าลดลงเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่ง สอดคล้องกับการศึกษาของ Tang et al. (2021) เนื่องจากความต้านไฟฟ้าในดินสูงขึ้นสภาพการนำไฟฟ้าของดินจึงลดลง



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

4.3.9 สรุปและอภิปรายผล

ผลการศึกษาพฤติกรรมภายในและภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการเร่งระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯ สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT และ 2ATB สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่งรูปแบบ 2ATB สามารถระบายน้ำได้มากกว่ารูปแบบ 1AT ประมาณ 10% และปริมาณความชื้นสูงสุดที่บริเวณขั้วแอโนดได้ลดลงมากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT (ประมาณ 40%) แต่อย่างไรก็ตามความชื้นโดยรวมที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งสองต่อหนึ่งสามารถเร่งการระบายน้ำในดินได้มากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ

2) การทรุดตัวของดินเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่งรูปแบบ 2ATB ทำให้เกิดการทรุดตัวของดินมากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT (ประมาณ 20%) แต่น้อยกว่าการจัดเรียงรูปแบบ 1AB (ประมาณ 6%) จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งสองต่อหนึ่งสามารถเร่งการทรุดตัวของดินได้มากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งหนึ่งต่อหนึ่ง ทั้งนี้การศึกษานี้พบว่าการวางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างทำให้การเร่งการทรุดตัว จากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพรีซิสส์ร่วมกับการเร่งการตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วง แต่อย่างไรก็ตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ

สองต่อหนึ่งที่มีการวางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างและขั้วแคโทดด้านบนไม่ว่าตำแหน่งใดก็ตามจะเหนี่ยวนำให้เกิดรอยแตกภายในดินซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลในระบบได้น้อยลงและส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

3) การเพิ่มตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีในดินช่วงเริ่มการต้นทดสอบให้เกิดรวดเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็เป็น การเพิ่มพลังงานที่ใช้เช่นเดียวกัน

พฤติกรรมและแนวโน้มต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอก สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB มีแนวโน้มและพฤติกรรมสอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ พบว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง ไม่ช่วยเร่งการระบายน้ำหรือการหลุดตัวของดินได้อย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่า ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการระบายน้ำในดินเดี่ยวกรุงเทพได้อย่างมีนัยสำคัญ และมีการใช้พลังงานที่มากกว่า



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่งต่อการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยนำเสนอการจัดรูปแบบขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบ 1AT และ 1AB และเปรียบเทียบการจัดวางขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB เนื่องจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าทั้งสองรูปแบบนี้ไม่เกิดการขังของน้ำบริเวณขั้วแคโทด จากนั้นจึงเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการเร่งการระบายน้ำ เช่น กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความเป็น pH ปริมาณความชื้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรออสโมติก เป็นต้น ซึ่งสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1) ผลการศึกษานี้ยืนยันข้อเท็จจริงที่ว่าปัจจัยหลักในการเร่งระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯเกิดจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส ซึ่งจะเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด มากกว่าอิทธิพลของความร้อนหรืออุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในดินหรือน้ำเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในดิน และยังส่งผลกระทบต่อปัจจัยอื่น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น

2) เมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับดินเหนียวกรุงเทพฯ ปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งการหลุดตัวในดินเกิดจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรโฟรีซิสร่วมกับแรงโน้มถ่วง ดินที่มีประจุลบจะเคลื่อนตัวเข้าไปที่ขั้วแอโนด เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรโฟรีซิส ถ้าขั้วแอโนดถูกจัดวางไว้ด้านล่างจะส่งเสริมให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง และการวางขั้วแอโนดไว้ด้านบนทำให้ดินบริเวณด้านบนแข็งตัวส่งผลให้การหลุดตัวเกิดขึ้นช้าลง และทำให้เกิดรอยแตกภายในมวลดิน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินที่ตรงข้ามกับการหลุดตัวของดินจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโฟรีซิส

3) แนวโน้มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในดินเหนียวกรุงเทพฯ เช่น กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ การหลุด ความต่างศักย์ไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรออสโมติก มีแนวโน้มสอดคล้องกัน กล่าวคือ ปัจจัยเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบและ

จะถึงจุดสูงสุดภายใน 120 นาทีหลังเริ่มต้นการทดสอบ หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง และจึงเริ่มคงที่ ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกันทั้งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง

4) การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบสองต่อหนึ่ง ไม่ช่วยเร่งการระบายน้ำหรือการหลุดตัวของดินเหนียวกรุงเทพได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง เนื่องจากปริมาณความชื้นในดินโดยรวมเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และการหลุดตัวของดินน้อยกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งแต่สูญเสียพลังงานมากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

การนำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าใช้ในการเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพ ระหว่างการทดสอบมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และปัจจัยทางเคมี ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มหรือลดของอัตราการเร่งการระบายน้ำ ทั้งนี้หากมีการตรวจสอบอิทธิของปัจจัยเหล่านั้นต่อปริมาณความชื้น หรือ pH ของดินได้ละเอียดและแม่นยำ จะนำไปสู่การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เพื่อเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ซึ่งในการศึกษานี้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1) เนื่องจากปริมาณความชื้นในมวลดินเป็นปัจจัยที่แสดงถึงการลดลงของน้ำในมวลดิน ดังนั้น ควรวัดปริมาณความชื้นในทุกช่วงเวลาหรือควรมีความถี่ในการวัดค่อนข้างมาก เพื่อความแม่นยำในการตรวจสอบอัตราการระบายน้ำเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และยังสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์ความสอดคล้องของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า เช่น ความต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือปัจจัยทางเคมี ความเข้มข้นของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ปัจจัยทางไฟฟ้าหรือเคมีเหล่านั้นส่งผลต่อการระบายน้ำเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ

2) ควรมีการตรวจสอบแร่ธาตุหรือสารประกอบภายในดิน และน้ำที่นำมาใช้ในการทดสอบ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัจจัยทางเคมี ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาภายในมวลดินที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งปัจจัยทางเคมีเหล่านี้ยังส่งผลโดยตรงกับกระบวนการทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์สาเหตุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

3) ควรวัด pH ในดินทุกช่วงเวลาหรือมีความถี่ในการวัดมากขึ้น เนื่องจาก pH เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทางเคมีและไฟฟ้าเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อในระบบมี pH ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่การลดประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า และสามารถพัฒนาเพื่อทำให้ประสิทธิภาพของเทคนิคไฟฟ้าจลนศาสตร์ดีขึ้น เช่น การใส่สารเคมีเพื่อปรับ pH ให้มีความ

เหมาะสม และยังสามารถนำมาวิเคราะห์ปัจจัยทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิค
จลนศาสตร์ไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำขึ้น

4) เนื่องจากการศึกษานี้มีการขังของน้ำที่บริเวณขั้วแคโทด ทำให้ส่งผลต่ออุณหภูมิ และ
ปัจจัยทางไฟฟ้าอื่น ๆ ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการขังของน้ำบริเวณขั้วแคโทดที่ส่งผล
ต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

5) ควรมีการศึกษาอิทธิพลเคลื่อนที่ของน้ำที่ออกจากมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้ม
ถ่วงเปรียบเทียบกับทดสอบด้วยเทคนิคไฟฟ้าจลนศาสตร์ เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์สาเหตุ
ในการเร่งการระบายน้ำของดินให้แม่นยำขึ้น



รายการอ้างอิง

- สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์. 2561. การแก้ปัญหาการทรุดตัวของงานถนน งานถมที่ และถมบ่อดินในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยการปรับปรุงคุณภาพดิน และเทคนิค VCM, หน่วยวิจัยการออกแบบและวิจัยด้านวิศวกรรมปฐพี ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- Alshawabkeh A. and Acar Y. (1996). **ELECTROKINETIC REMEDIATION. II: THEORETICAL MODEL.** JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, 122(3), 186-196.
- Cai Z.P., Doren J.V., Fang Z.Q., Li W.S. (2015). **Improvement in electrokinetic remediation of Pb-contaminated soil near lead acid battery factory.** transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(9), 3088-3095.
- Cho J., Park S. and Baek K. (2010). **Electrokinetic restoration of saline agricultural lands.** Journal of Applied Electrochemistry, 40(6), 1085-1093.
- Bergado D.T., Sasanakul I. and Horpibulsuk S. (2003). **Electro-Osmotic Consolidation of Soft Bangkok Clay Using Copper and Carbon Electrodes with PVD.** Geotechnical Testing Journal, 26(3), สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/>
- Dahlaki M.H., Hatim M.K., Mosa A.M. (2016). **Inter-Particle Pressure as influenced by Physicochemical Parameters on Microscale of Saturated Heavy Clay.** Civil and Environmental Research, 8(12), สืบค้นจาก <https://www.researchgate.net/>
- A.R., Naseh M., Javadi A.A. (2014). **Improvement of clay soil by electro-osmosis technique.** Applied Clay Science, 95, pp. 32-36.
- Hamed J., Acar Y. and Gale R.J. (1991). **PB(II) REMOVAL FROM KAOLINITE BY ELECTROKINETICS.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 117, 241-271. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410) (1991) 117:2(241)

- Hassan I., Mohamedelhassan E., Ernest K. (2015). **Solar powered electrokinetic remediation of Cu polluted soil using a novel anode configuration.** *Electrochimica Acta*, 181, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.02.216>
- Hunter C., Mohamedelhassan E. and Sadhu A. (2021). **Monitoring the strength properties of electrokinetically treated soil by bender elements to determine the treatment period.** *Soils and Foundations*, 61(3), 675-691.
- Jayalakshamma M.P., Ji W., Khalil C.A. et al. (2021). **Removal of hydrocarbons from heterogenous soil using electrokinetics and surfactants.** *Environmental Challenges*, 4, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100071>
- Jayasekera S. and Hall S. (2007). **Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments.** *Geotechnical and Geological Engineering*, 25, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10706-006-0001-8>
- Kim D.H., Jo S.U., Choi J.H., et al. (2012). **Hexagonal two-dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study.** *Chemical Engineering Journal*, 198–199, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.076>
- Kim W., Jeon E., Jung j. and et al. (2014). **Field application of electrokinetic remediation for multi-metal contaminated paddy soil using two-dimensional electrode configuration.** *Environmental Science and Pollution Research*, 21(6), 4482-4491. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2424-0>
- Lee H. and Yang J. (2000). **A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation.** *Journal of Hazardous Materials*, 77(1–3), 227-240. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00251-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00251-X)
- Leinweber F., Eijkel L., Bomer J. and Berg A. (2006). **Continuous Flow Microfluidic Demixing of Electrolytes by Induced Charge Electrokinetics in Structured Electrode Arrays.** *American Chemical Society*, 78(5), 1425-1434.
- Liaki C., Rogers C.D.F. and Boardman D.I. (2010). **Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes.** *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(6), 1225-1237. <https://doi.org/10.1007/s10800-010-0096-8>

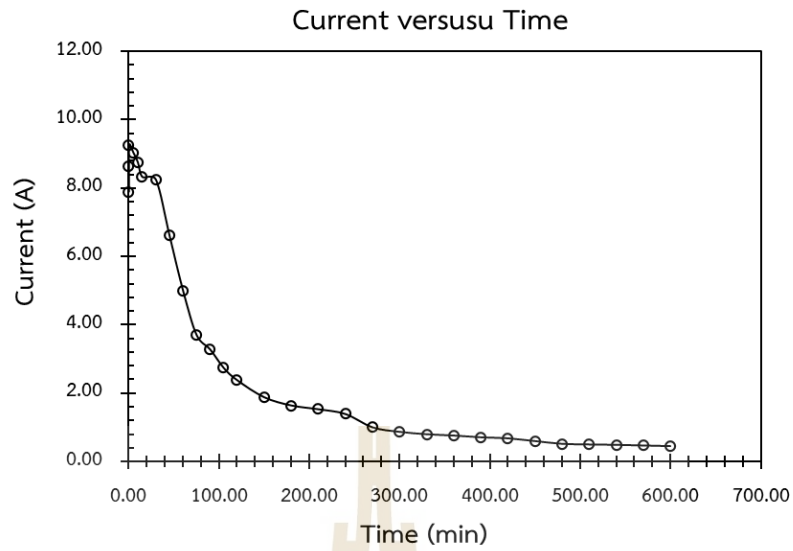
- Li T., Wang Y., Guo S., et al. (2016). **Effect of polarity-reversal on electrokinetic enhanced bioremediation of Pyrene contaminated soil.** *Electrochimica Acta*, 187, 567-575. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.097>
- Lu P., Feng Q., Meng Q., Yuan T. (2012). **Electrokinetic remediation of chromium- and cadmium-contaminated soil from abandoned industrial site.** *Separation and Purification Technology*, 98, 216-220. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.010>
- Luo Q., Zhang X., Wang H., Qian Y. (2005). **The use of non-uniform electrokinetics to enhance in situ bioremediation of phenol-contaminated soil.** *Journal of Hazardous Materials*, 121(1-3), 187-194.
- Malekzadeh, M., Lovisa, J. and Sivakugan, N. (2016). **An Overview of Electrokinetic Consolidation of Soils.** *Geotech Geol Eng*, 34, 759-776.
- Malekzadeh M. and Sivakugan N. (2016). **Assessing the Use of Aluminium Electrodes on the Electrokinetic Dewatering and Stabilization of Dredged Mud Slurries.** *Geo-Chicago*, (2016, August), 188-202. <https://doi.org/10.1061/9780784480168.020>
- Malekzadeh M. and Sivakugan N. (2017). **One-dimensional electrokinetic stabilization of dredged mud.** *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5), 603-609. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2016.1213778>
- Micic S., Shang J.Q., Lo K.Y. (2001). **Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current.** *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 287-302. <https://doi.org/10.1139/t00-098>
- Mitchell J.K. (1991). **Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice.** *Geotechnique*, 41(3), 299-340. <https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.3.299>
- Mohamedelhassan E. and Shang J.Q. (2001). **Analysis of electrokinetic sedimentation of dredged Welland River sediment.** *Journal of Hazardous Materials*, 85(1-2), 91-109. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00223-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00223-0)

- Mohamedelhassan E. and Shang J.Q. (2001). **Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis.** *Ground Improvement*, 5(1), 3-11.
- Mohamadi S., Saeedi M. and Mollahosseini A. (2021). **Strategies for the sustainable practice of electrokinetic technology: The case of mixed contaminants in a clayey soil.** *Cleaner Engineering and Technology*, 3.
- Ou C.Y., Chien S.C. and Chang H.H. (2009). **Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: field tests.** *Canadian Geotechnical Journal*, 46(6), 727-733. <https://doi.org/10.1139/T09-012>
- Ou C.Y., Chien S.C. and Wang Y.G. (2009). **On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions.** *Applied Clay Science*, 44(1-2), 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.014>
- Patrick W. (2004). **Electrifying effects in colloids.** *Nature*, 429(6994), 882.
- Rafalko S.D., Filz G.M. and Brandon T.L. (2007). **Rapid Chemical Stabilization of Soft Clay Soils.** *Journal of the Transportation Research Board*, 2026(1), 39-46.
- Ren L., Cong Q., Tong J. et al. (2001). **Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method.** *Journal of Terramechanics*, 38(4), 211-219. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(01\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(01)00002-7)
- Sadeghian F., Jahandari S., Haddad A. et al. (2022). **Effects of variations of voltage and pH value on the shear strength of soil and durability of different electrodes and piles during electrokinetic phenomenon.** *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 625-636.
- Sah J.G. and Chen J.Y. (1998). **Study of the electrokinetic process on Cd and Pb spiked soils.** *Journal of Hazardous Materials*, 58(1-3), 301-3015.
- Shang J.Q. and Lo K.Y. (1997). **Electrokinetic dewatering of a phosphate clay.** *Electrokinetic dewatering of a phosphate clay*, 55(1-3), 117-133.

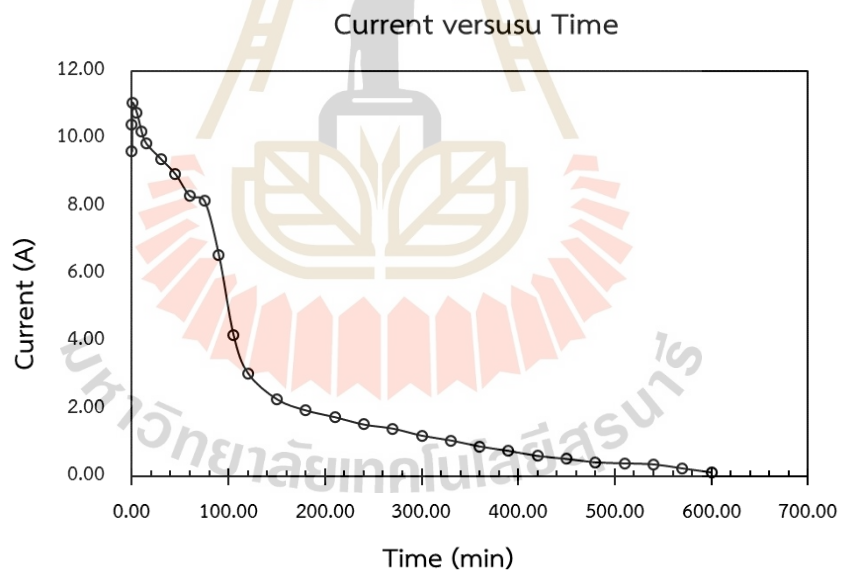
- Sverko E.R. (1999). **GROUND MEASURING TECHNIQUES: ELECTRODE RESISTANCE TO REMOTE EARTH & SOIL RESISTIVITY.** สืบค้นจาก <http://www.electro-specialties.com/>
- Tang K., Zhang F., Feng D. et al. (2021). **Moisture migration and electric distribution of unsaturated clay under electro-osmosis with carbon fiber tape as electrode.** *Engineering Geology*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106404>
- Volkov A.G. and Brown C.R. (2014). **Citrus Greening (Huanglongbing): Fast Electrochemical Detection and Phytomonitoring of the Trees Diseases.** *The Electrochemical Society*, 58(23), 9-17.
- Wall S. (2010). **The history of electrokinetic phenomena.** *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(3), 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.12.005>
- Xu H., Cang L., Song Y., et al. (2020) **Influence of electrode configuration on electrokinetic-enhanced persulfate oxidation remediation of PAH-contaminated soil.** *Environmental Science and Pollution Research*, 77(35), 44355-44367. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10338-6>
- Xue Z., Tang X., Yang Q. (2017). **Influence of voltage and temperature on electro-osmosis experiments applied on marine clay.** *Applied Clay Science*, 141, 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.033>
- Zhou Y., Deng A. and Fu J. (2019). **Modelling electro-osmosis–surcharge preloading combined consolidation of unsaturated soils.** *Computers and Geotechnics*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103145>
- Zhuang Y.F. (2021). **Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics.** *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 757-770.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง (2:1 Electrodes
vertically Configure

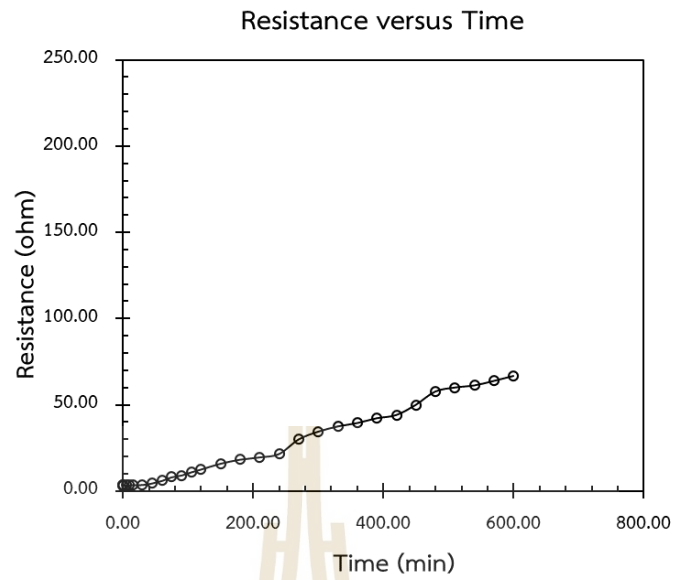
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



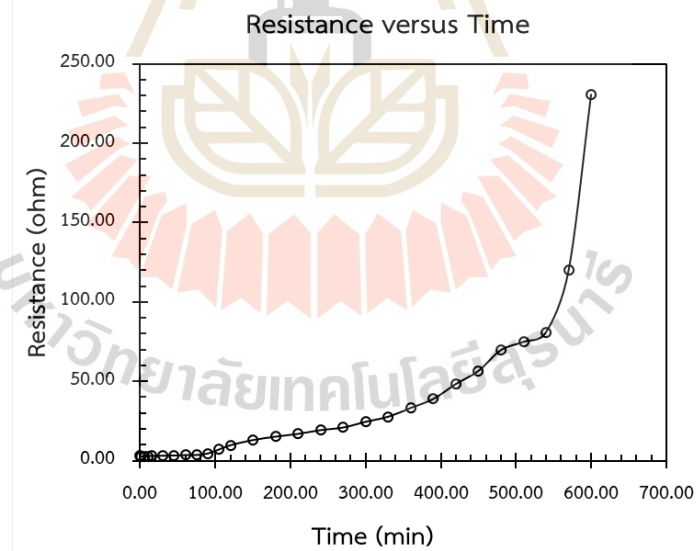
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



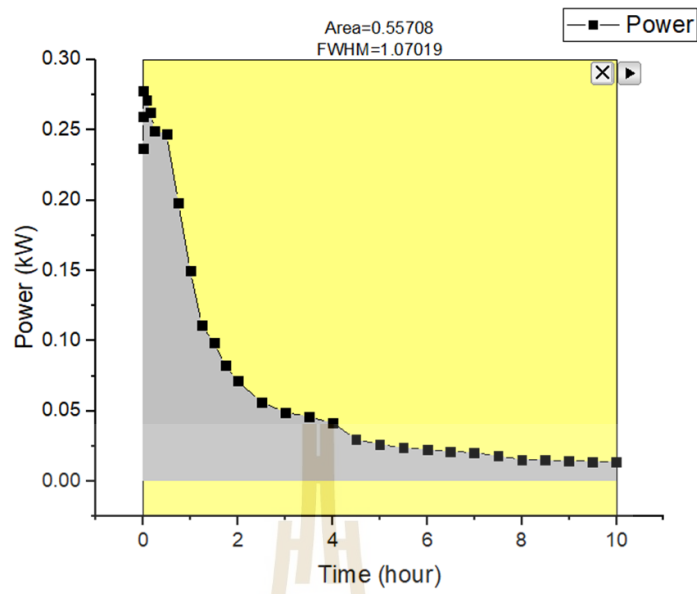
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB



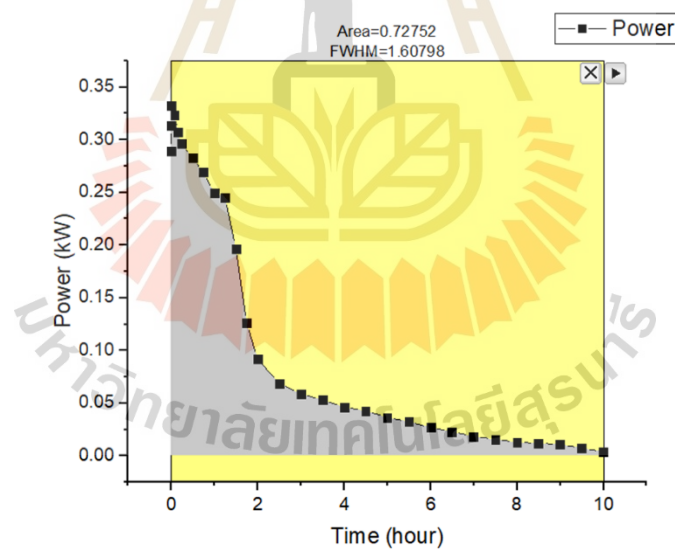
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



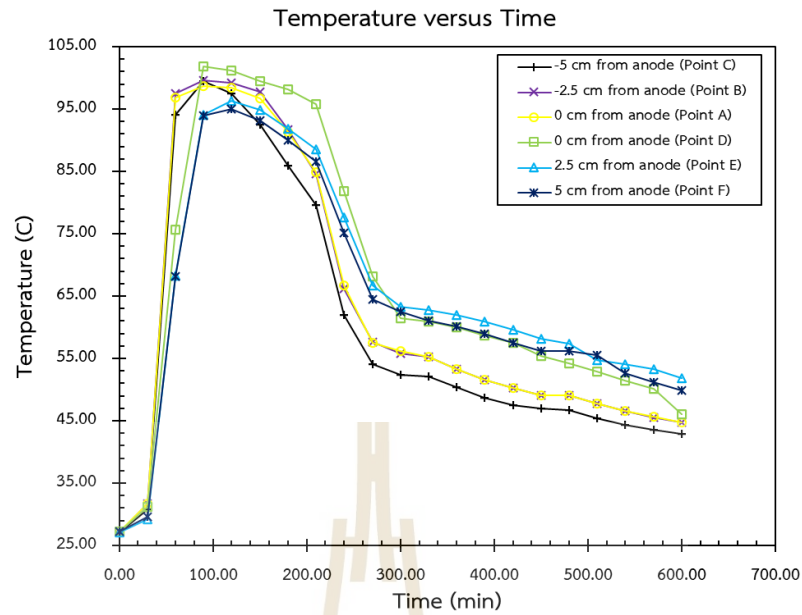
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB



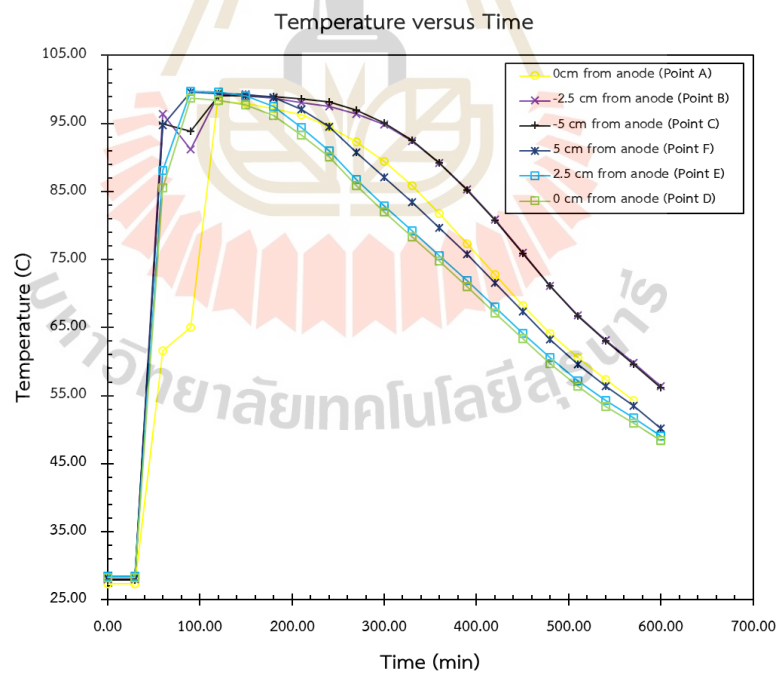
รูปที่ ก.5 Energy consumption เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



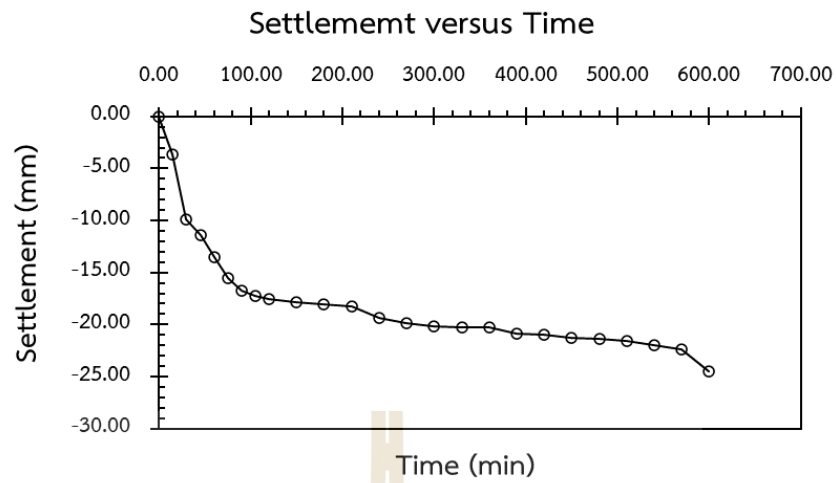
รูปที่ ก.6 Energy consumption เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB



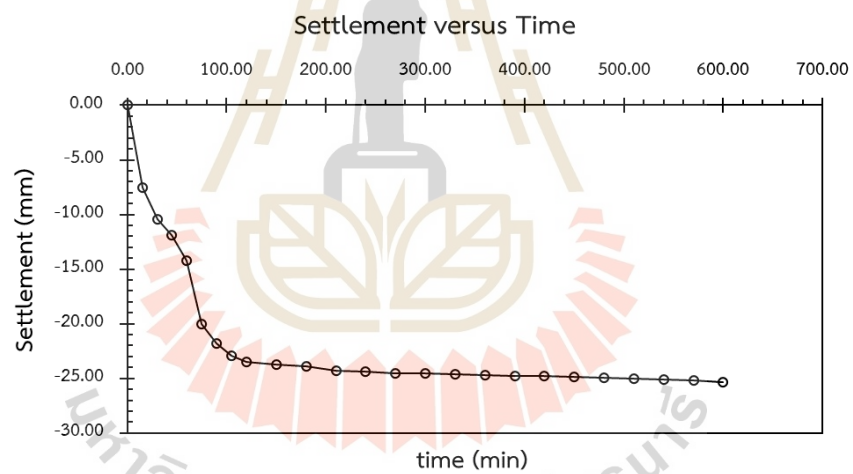
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



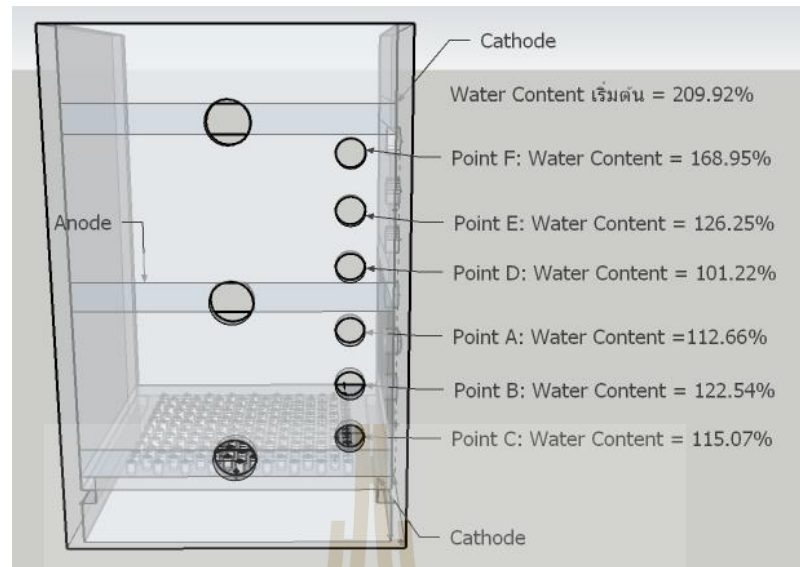
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB



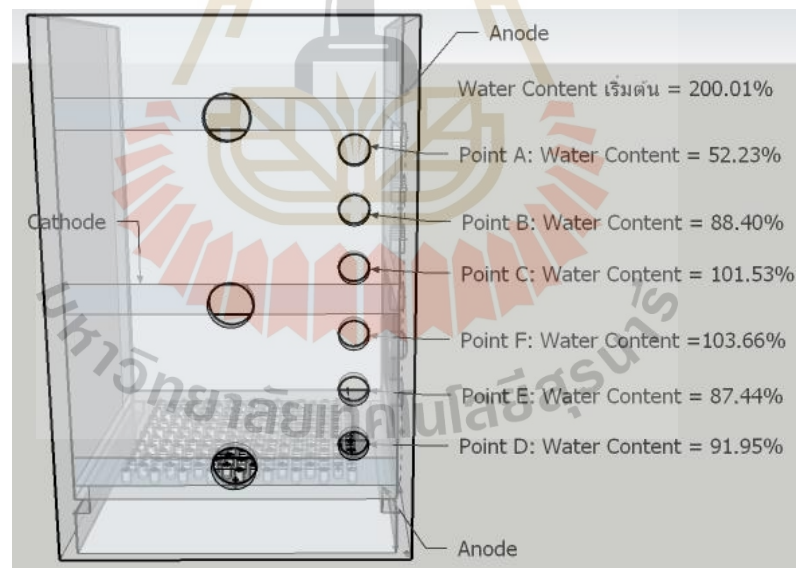
รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



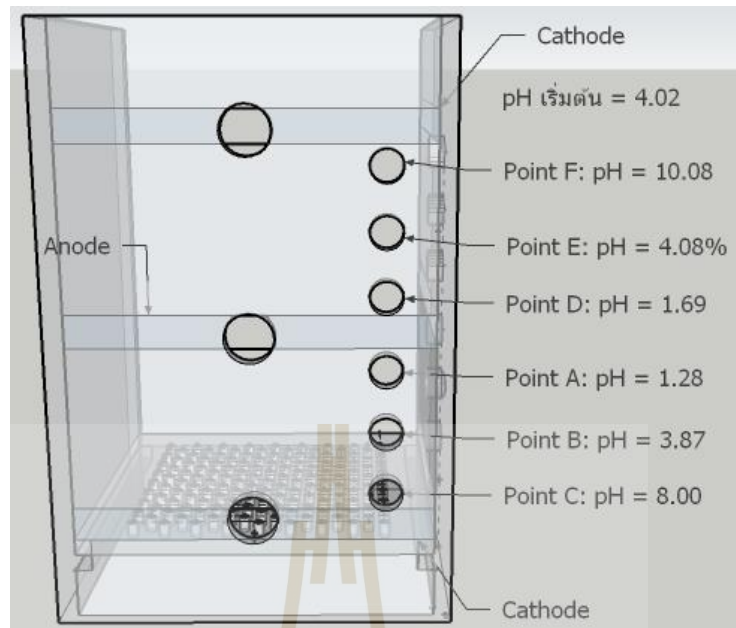
รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB



รูปที่ ก.11 ความชื้นเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง
รูปแบบ 2CTB

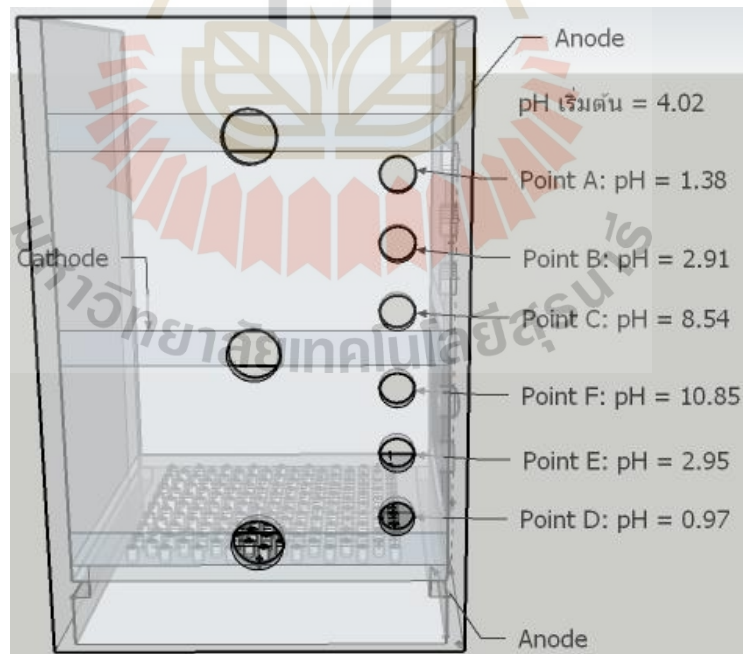


รูปที่ ก.12 ความชื้นเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง
รูปแบบ 2ATB



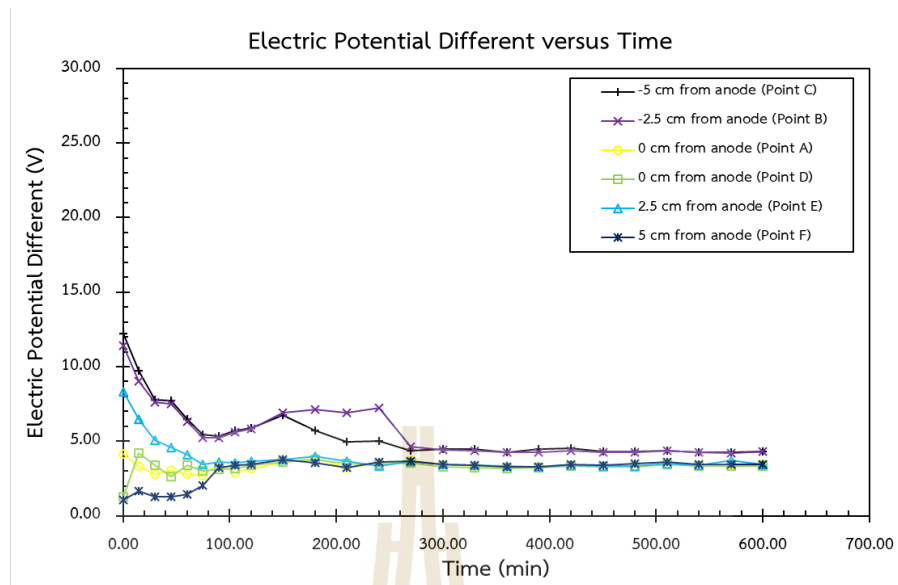
รูปที่ ก.15 pH เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง

รูปแบบ 2CTB

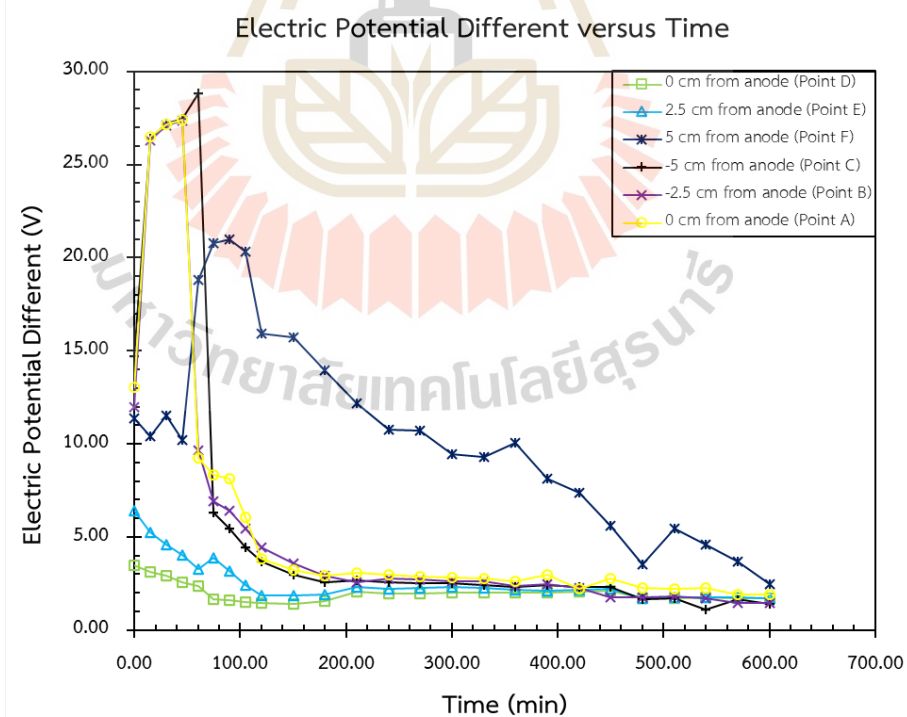


รูปที่ ก.16 pH เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง

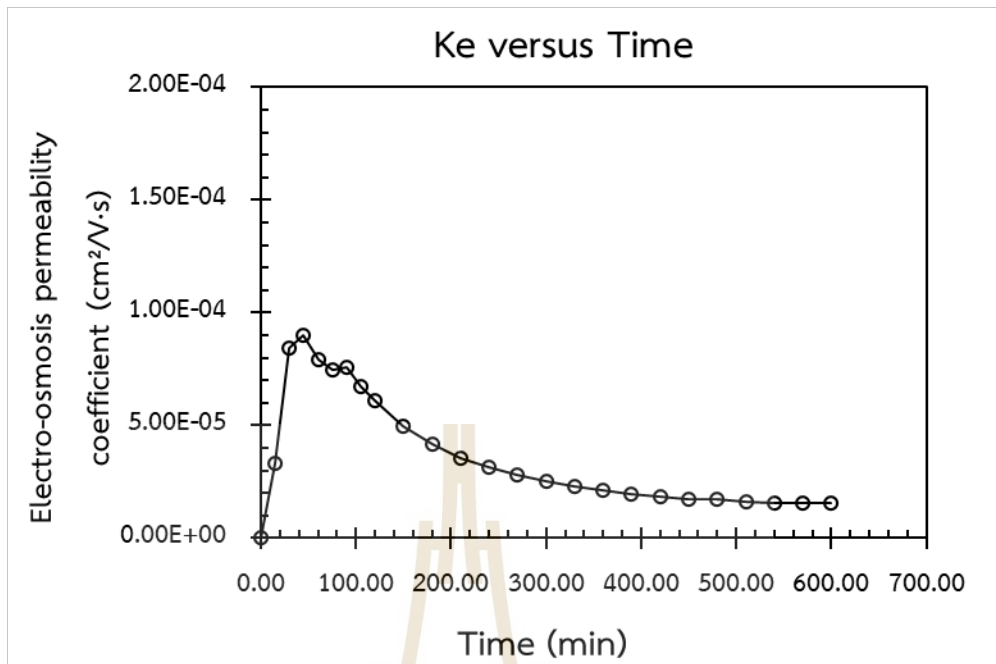
รูปแบบ 2ATB



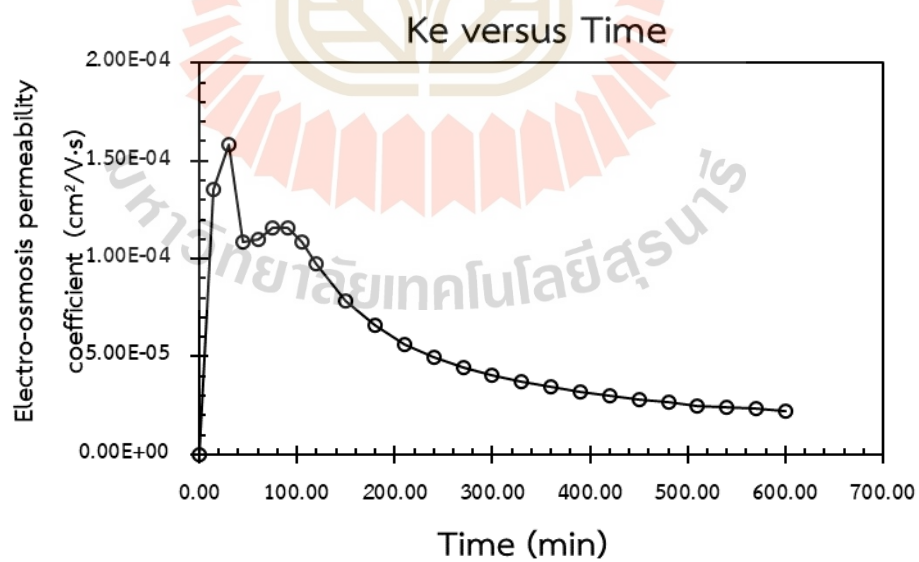
รูปที่ ก.17 ความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้า ณ ขั้วบวก และตำแหน่งอื่น ๆ เมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



รูปที่ ก.18 ความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้า ณ ขั้วบวก และตำแหน่งอื่น ๆ เมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB



รูปที่ ก.19 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2CTB



รูปที่ ก.20 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอิเล็กโทรออสโมติกเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB

ประวัติผู้เขียน

นางสาวมณฑนา จุลวรรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน 2541 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้นจากโรงเรียนพิมายวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม เมื่อปี พ.ศ.2564 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาจากแหล่งวิจัยภายนอก (OROG) ภายใต้อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

