



บทความวิจัย

อิทธิพลการวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งต่อการระบายน้ำในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยเทคนิค จลนศาสตร์ไฟฟ้า

Effects of electrodes configured vertically on dewatering soft Bangkok clay using electrokinetic

สมใจ ยุกบลชิต¹ อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์^{2*} มัณฑนา จุลวรรวงศ์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Somjai Yubonchit¹ Avirut Chinkulkijniwat^{2*} Mantana Julvorawong²

¹ School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, 744 Sura Narai Road, Meung, Nakhon Ratchasima 30000

² Center of Excellence in Civil Engineering, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Meung, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: avirut@sut.ac.th; Telephone: +66 9746 24161

วันที่รับบทความ 28 กรกฎาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 24 สิงหาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 26 มกราคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 16 ธันวาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ 9 มกราคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองกายภาพในห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการระบายน้ำและการทรุดตัวในดินเหนียวอ่อน ภายใต้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า 2 รูปแบบ คือ 1) รูปแบบการวางขั้วแอโนดไว้ด้านบนและแคโทดไว้ด้านล่าง (Anode top and Cathode bottom, 1AT) และ 2) วางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างและแคโทดไว้ด้านบน (Anode bottom and Cathode top, 1AB) ผลการศึกษา พบว่า รูปแบบ 1AB ทำให้เกิดการทรุดตัว (27.08 มิลลิเมตร) มากกว่ารูปแบบ 1AT (21.28 มิลลิเมตร) ซึ่งการทรุดตัวดังกล่าวเมื่อเทียบกับความหนาของดินคิดเป็นการทรุดตัวสูงถึง 27% และ 21% ตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพรีซิสร่วมกับแรงโน้มถ่วงจึงส่งผลให้เมื่อจัดวางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างเกิดการทรุดตัวได้เร็วขึ้น สำหรับการวางขั้วไฟฟารูปแบบ 1AT ทำให้เกิดรอยแตกร้าวภายในมวลดินเนื่องจากอนุภาคดินเคลื่อนที่ขึ้น (อิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพรีซิส) ตรงข้ามการทรุดตัวของดิน และดินบริเวณด้านบนเกิดการแข็งตัวส่งผลให้อัตราการทรุดตัวช้าลง การศึกษานี้ยังยืนยันข้อเท็จจริงที่ว่า การระบายน้ำเกิดจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิสมากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิจึง การลดลงของความชื้นในดินยังทำให้ปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น กระแสไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้ความชื้นในดินที่ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าลดลง ซึ่งการใช้เทคนิคนี้เหมาะสมในการใช้ระยะสั้นมากกว่าระยะยาว เนื่องจากสามารถเร่งการระบายน้ำการทรุดตัวได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น เมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งจะช้าลงจนเริ่มคงที่

คำสำคัญ

จลนศาสตร์ไฟฟ้า การระบายน้ำ การอัดตัวคาน้ำ ดินเหนียวอ่อน

Abstract

This research conducted a series of experiments to evaluate the effectiveness of electrokinetic techniques for water drainage and settlement in soft clay under two electrode configurations: (1) anode at the top and cathode at the bottom (1AT), and (2) anode at the bottom and cathode at the top (1AB). Results from this study show that the 1AB configuration produced greater settlement (27.08 mm, approximately 27% of soil thickness) than the 1AT configuration (21.28 mm, approximately 21%). This is attributed to the combined effects of electrophoresis and gravity, which accelerate settlement when the anode is placed at the bottom. In contrast, the 1AT configuration caused internal cracking due to upward particle movement induced by electrophoresis, opposing settlement. Stiffening of the upper soil layer further reduced the settlement rate. This study also confirms that soil dewatering is governed by electro-osmosis process rather than effect of temperature. Reduction of water content during the experiment affects the efficiency of electrokinetic technique, including electric current and electrical resistance. Therefore, electrokinetic techniques are more suitable for short-term applications, as they can rapidly enhance drainage and settlement during the initial stage, after which the process slows and stabilizes.

Keywords

electrokinetic; dewatering; consolidation; soft clay

1. บทนำ

การก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนที่สามารถรับน้ำหนักได้น้อย และกำลังรับแรงเฉือนต่ำ จำเป็นต้องการเร่งระบายน้ำเพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติของดินในระหว่างการก่อสร้างหรือในอนาคตเมื่อก่อสร้างเสร็จสิ้น แต่เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability) ต่ำ และมีปริมาณความชื้นสูง ทำให้ระยะเวลาในการระบายน้ำและการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation) ใช้ระยะเวลายาวนาน ทำให้ระยะเวลาการก่อสร้างยาวนานตามไปด้วย และหากกระบวนการอัดตัวคายยังไม่สิ้นสุด อาจก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวในระหว่างการก่อสร้างหรือในอนาคตได้ ดังนั้นการก่อสร้างในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนจำเป็นต้องทำการปรับปรุงดิน โดยการเร่งการระบายน้ำในดิน

เทคนิคการระบายน้ำแนวตั้ง (Prefabricated vertical drain) เป็นการปรับปรุงดินโดยการเร่งการระบายน้ำของดินในแนวตั้ง ซึ่งจะสามารถเร่งการทรุดตัวของดินให้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคนี้การระบายน้ำในแนวตั้ง ในชั้นดินเหนียวอ่อนอาจเกิดการเสีรูปด้านข้างในขณะที่การทรุดตัวต่ำ และทำให้การระบายน้ำออกจากดินไม่ลดลงตามเวลาที่กำหนด ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคระบบการระบายน้ำแนวตั้ง จำเป็นต้องติดตั้งชุดตรวจวัดการทรุดตัวสำหรับตรวจสอบการทรุดตัวและการเสีรูปด้านข้างเพื่อป้องกันการเสีรูปในชั้นดินเหนียว

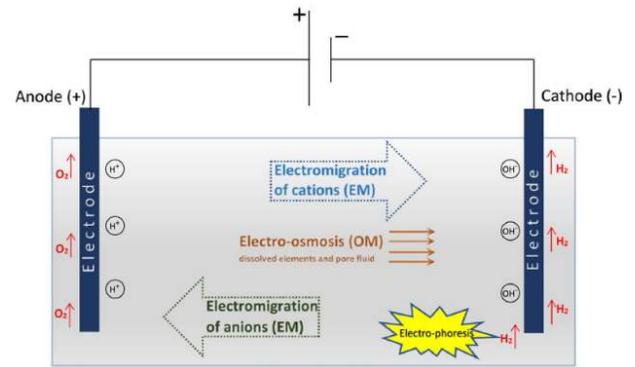
เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยสุญญากาศ (Vacuum preloading) เป็นการใช้แรงดันสุญญากาศมาทดแทนการนำมาดินถมเพื่อทำให้น้ำหนักกดทับถ่วงหน้า โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศและน้ำออกจากชั้นดินเหนียว ด้วยการผ่าน PVD ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการปรับปรุงดินโดยการเร่งการระบายน้ำในดิน อย่างไรก็ตาม การใช้เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยสุญญากาศ อาจส่งผลทำให้พื้นที่ข้างเคียงเกิดความเสียหาย หรืออาจเกิดรอยแยกที่บริเวณพื้นดินของขอบพื้นที่ทำการปรับปรุงดินได้เนื่องจากอิทธิพลของแรงดูดที่สูง [1]

เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic) เป็นเทคนิคที่ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาใหม่ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในดินที่มีความชื้นสูงและมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำ โดยการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า จะให้พลังงานไฟฟ้าแก่มวลดินโดยมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นตัวกลางทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมวลดินเมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มมีการไหลผ่านมวลดินแล้วทำให้เกิดการไหลของน้ำจากขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานวิศวกรรมที่หลากหลาย เช่น การเสริมลาดดินให้มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น การเร่งการอัดตัวคายน้ำของดิน การเพิ่มเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม และการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในดิน เป็นต้น [2-4] อย่างไรก็ตามเทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบการ

ทดสอบที่เหมาะสม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางวิศวกรรม และยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในดินเมื่อเริ่มทำการทดสอบซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดินได้ การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า และระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการศึกษาลักษณะการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ เมื่อทำการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยทำการสังเกตพฤติกรรมของสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นกับมวลดิน เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ความร้อน, ความชื้นในดิน ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดสอบ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

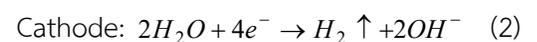
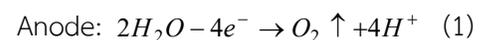
2. จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic)

รูปที่ 1 แสดงกระบวนการทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่ (1) อิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินที่มีประจุไฟฟ้าเมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระทำ โดยอนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่ (2) อิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis) เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้ของเหลวหรือสารละลายละลายอิเล็กโทรไลต์รอบ ๆ อนุภาค เกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่อนุภาคดินหยุดนิ่ง และ (3) อิเล็กโทรไมเกรชัน (Electro-migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออน (Ions) ไปยังขั้วตรงข้ามกับไอออนนั้นๆ โดยไอออนบวก (Cation) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่ไอออนลบ (Anion) เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด



รูปที่ 1 กระบวนการทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าโดย Hadjadj et al, [5]

การให้พลังงานไฟฟ้าแก่มวลดินโดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวกลางทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านอนุภาคดิน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินจะลดลง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในอนุภาคดินซึ่งในอนุภาคดินจะมีโมเลกุลน้ำ โดยน้ำเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็น 2 โดยไฮโดรเจนไอออน จะเคลื่อนที่ไปจับกับประจุไฟฟ้าที่บริเวณขั้วดินซึ่งมีประจุลบ เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าตรงข้ามกันจะเคลื่อนที่และจับตัวกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะช้าลง เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H+) ที่บริเวณขั้วแอโนด ตามสมการที่ 1 และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH-) ที่บริเวณขั้วแคโทด ดังสมการไฮโดรเจนไอออน จับตัวกับประจุลบที่ขั้วดินทั้งหมดแล้ว ส่งผลให้ประจุอิสระบางประจุเท่านั้นที่เริ่มกระจายตัวไปจับตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในมวลดินลดลง เมื่อประจุไฟฟ้าในดินลดลง ส่งผลให้กระแสในดินลดลงและส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในดิน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของประจุไฟฟ้า และ ทำให้ pH ในดินเกิดการเปลี่ยนแปลง [6-9] และเมื่อเวลาผ่านไปขั้วไฟฟ้าอาจถูกกัดกร่อนที่ขั้วแอโนดจากการสูญเสียอิเล็กตรอน [10, 11]



3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 แบบจำลองการระบายน้ำในดินเหนียวด้วยเทคนิค จลนศาสตร์ไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าต่อการระบายน้ำในแนวตั้งในดินเหนียวอ่อนผ่านแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

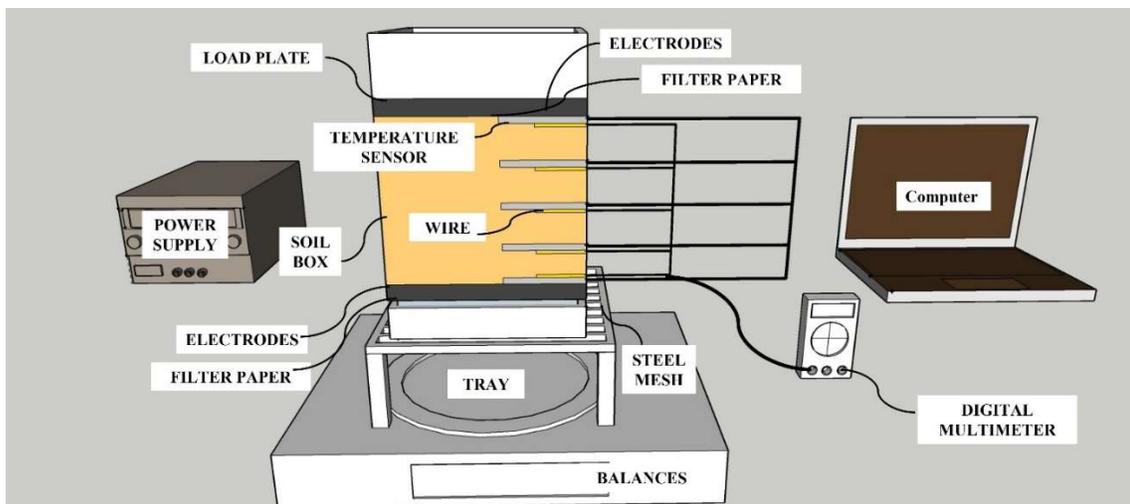
รูปที่ 2 แสดงภาพรวมของแบบจำลองกายภาพ โดยแบบจำลองประกอบด้วย

- 1) กล่องทดสอบอะคริลิกใสสำหรับใส่ตัวอย่างดิน
- 2) ฐานรองรับกล่องทดสอบ

3) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลการทดลอง

4) เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับอ่านค่าน้ำหนักที่หายไปในห้องทดสอบตลอดการทดลอง

5) แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) สำหรับแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งกำเนิดให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 แอมแปร์ ความละเอียด 0.1 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 โวลต์ ความละเอียด 0.1 โวลต์ ความถูกต้อง $\pm 1\%$

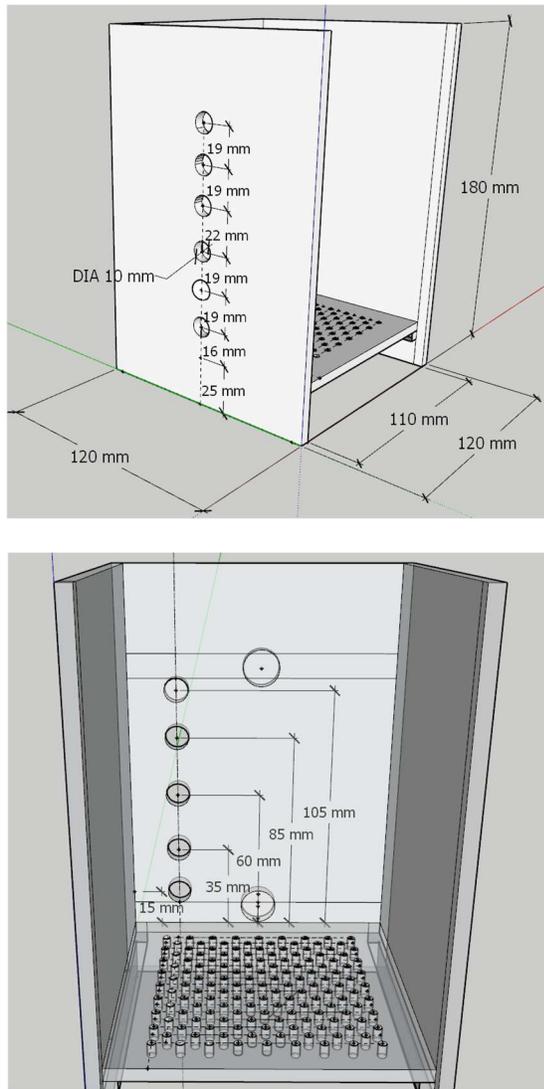


รูปที่ 2 แบบจำลองกายภาพในห้องปฏิบัติการ

6) มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า

7) เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH) ชนิดปากกา แสดงผลแบบดิจิตอลมีช่วงในการวัด 0.0 ถึง 14.0 pH

8) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20 วัดอุณหภูมิมีความละเอียดตั้งแต่ 9 บิต ถึง 12 บิต



รูปที่ 3 รายละเอียดดักกรองทดสอบ

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของกล่องทดสอบ โดยทำจากอะคริลิกใสเพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมของดินที่เปลี่ยนแปลง มีความหนา 5 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร และสูง 180 มิลลิเมตร โดยฐานของกล่องทดสอบจะยกสูงขึ้นมาจากระดับด้านล่างสุด 25 มิลลิเมตร เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับรองรับน้ำที่ระบายออก ฐานของแบบทดสอบ ขนาด 110 X 110 ตารางมิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร โดยเจาะแบบสลับพื้นปลา เพื่อให้สามารถระบายออกได้ ทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู ใช้สำหรับเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 8 และ 114 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ

ด้านข้างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู สำหรับเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและสายไฟเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าพร้อมทั้งใช้สำหรับระบายน้ำซึ่งมีระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 15, 35, 60, 85 และ 105 มิลลิเมตร ตามลำดับ

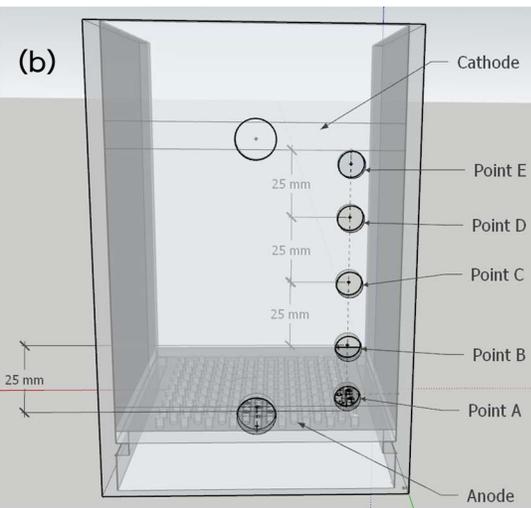
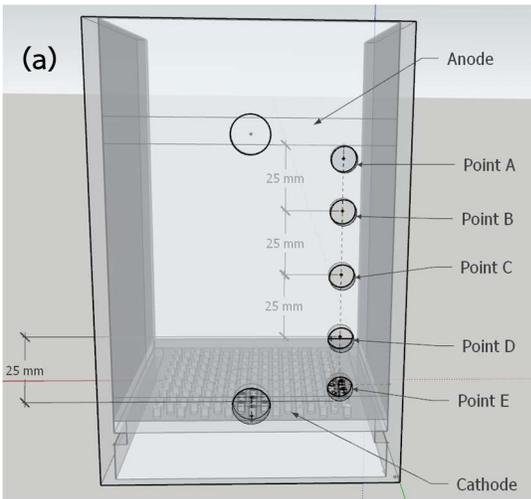
ในการศึกษานี้ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุแกรไฟต์ โดยแบ่งการทดสอบตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบ 1AT เป็นการจัดเรียงขั้วแอโนดหนึ่งขั้วและแคโทดหนึ่งขั้ว(1:1) โดยวางขั้วแอโนดไว้ด้านบนและขั้วแคโทดไว้ด้านล่าง (Anode Top and Cathode Bottom, 1AT) ดังแสดงใน รูปที่ 4(a) และ 2) รูปแบบ 1AB เป็นการจัดเรียงขั้วแอโนดหนึ่งขั้วและแคโทดหนึ่งขั้ว(1:1) วางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างและขั้วแคโทดไว้ด้านบน(Anode Bottom and Cathode Top, 1AB) ตามแสดงใน รูปที่ 4(b)

3.2 คุณสมบัติดินและการเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ทดลองเป็นตัวอย่างดินเหนียวที่เก็บมาจากเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร โดยเก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพ (Disturb Sample) ที่ระดับความลึก 3-5 เมตร จากผิวดิน ตัวอย่างดินถูกมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในห้องปฏิบัติ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-00 หาขีดจำกัดเหลวของดิน (Liquid limit) และขีดจำกัดพลาสติกของดิน (Plastic limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93 คุณสมบัติของดิน ดังแสดงในตารางที่ 1

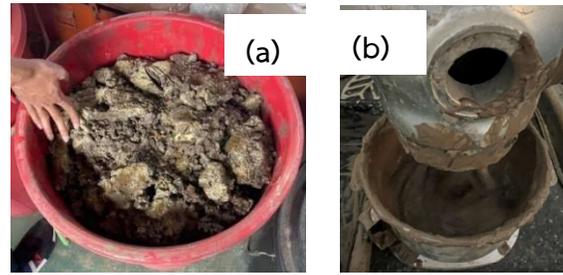
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ใช้ในการศึกษา

Soil Properties	Value	Method
Specific gravity, $G_s(-)$	2.63	ASTM D854-00
Liquid Limit, $LL(\%)$	80	ASTM D4318-93
Plastic Limit, $PL(\%)$	30	ASTM D4318-93
Plasticity index, $PI(\%)$	50	$PI=LL-PL$



รูปที่ 4 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสำหรับการศึกษานี้:(a) 1AT and (b) 1AB

รูปที่ 5 แสดงการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยดินตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งตัวอย่าง (รูปที่ 5a) ไปกวนด้วยเครื่องกวนให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงดัง รูปที่ 5(b) จากงานวิจัยของ Malekzadeh and Sivakugan [12] พบว่าเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเหมาะสมกับดินเหนียวอ่อนที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.6 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดังนั้นการศึกษานี้จึงผสมน้ำให้แถมวลดิน เพื่อให้ดินเป็นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีความชื้นในดินเริ่มต้น 170% โดยประมาณ ดินที่ผ่านการผสมน้ำเพิ่มแล้วมีลักษณะดัง รูปที่ 5(c)



รูปที่ 5 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (a) ตัวอย่างดินก่อนเตรียม (b) ปั่นตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน (c) เนื้อดินหลังการเตรียมตัวอย่าง

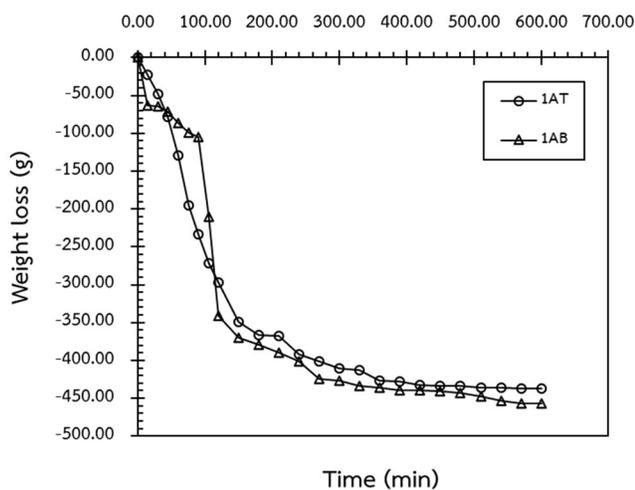
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวอ่อนด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า การทดสอบแบ่งเป็นการทดสอบโดยการวางขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ แบบ 1AT และ 1AB ในการทดสอบนี้ใช้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกกดทับบริเวณผิวดินขนาด 3 กิโลกรัม ทุกรูปแบบการทดสอบ ผลการทดสอบจะแสดงการระบายน้ำ การทรุดตัว กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่า pH ในตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

4.1 การระบายน้ำในตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

รูปที่ 6 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบกับเวลา 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) ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบแบบ 1AB จะระบายน้ำออกทางด้านบน ซึ่งมีการเจาะรูสำหรับระบายน้ำไว้ที่ความสูงระยะ 15, 35, 60, 85 และ 105 มิลลิเมตรจากฐานของแบบทดสอบ แต่ในระหว่างการทดสอบดินมีการทรุดตัวค่อนข้างมากทำให้ตำแหน่งที่เจาะรูไว้สำหรับให้น้ำระบายออกไม่สามารถใช้งานได้ การระบายน้ำในบางช่วงเวลาของการทดสอบแบบ 1AB จึงทำได้โดยการดูดน้ำที่บริเวณผิวดินออกจากระบบ ทำให้เกิดการหน่วงของน้ำหนักที่หายไปจากระบบที่วัดได้จากการทดสอบ

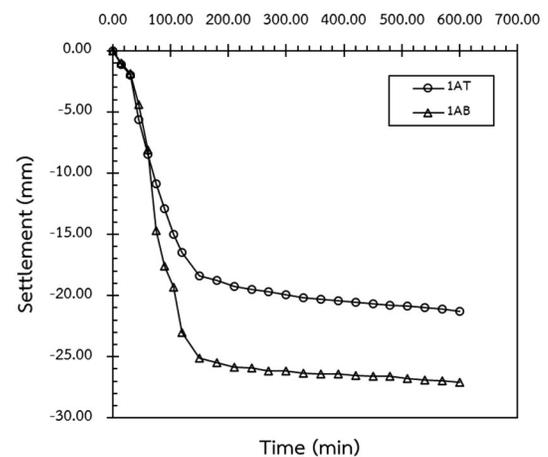


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา

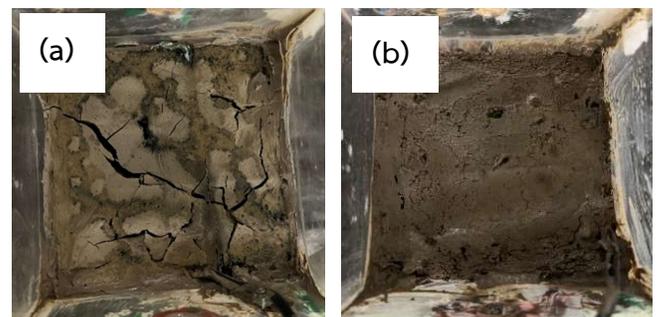
4.2 การทรุดตัวในตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

รูปที่ 7 แสดงการทรุดตัวของดินกับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่าการทรุดตัวสุดท้ายมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยการทดสอบแบบ 1AT มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 21.28 มิลลิเมตร ขณะที่การทดสอบแบบ 1AB มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 27.08 มิลลิเมตร Malekzadeh and Sivagukan [12] อธิบายว่าการที่การทดสอบแบบ 1AB มีอัตราการทรุดตัวสูงกว่าการทดสอบแบบ 1AT เนื่องจากการเสริมกันของปฏิกิริยาอิเล็กโทรโพริซิซ และปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิซ อย่างไรก็ตามการทรุดตัวจากผลการศึกษานี้มีค่าแตกต่างกันอย่างมาก (มากถึงกว่า 25%) ส่วนหนึ่งเป็นผลจาก

อนุภาคดินเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT มีการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดขึ้นด้านบน ซึ่งสวนทางกับการทรุดตัวของดิน จึงเหนี่ยวนำให้เกิดรอยแตกภายในมวลดิน [13] และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ รูปแบบ 1AT พบรอยแตกของดินมากกว่ารูปแบบ 1AB ดังแสดงใน รูปที่ 8 และบริเวณด้านบนของการทดสอบแบบ 1AT ซึ่งมีขั้วแอโนดอยู่ด้านบนจะมีการแข็งตัวมากกว่ารูปแบบ 1AB ที่มีขั้วแคโทดอยู่ด้านบน เนื่องจากน้ำจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด และการมีน้ำที่ขังอยู่บริเวณผิวดินระหว่างการทดสอบแบบ 1AB



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา

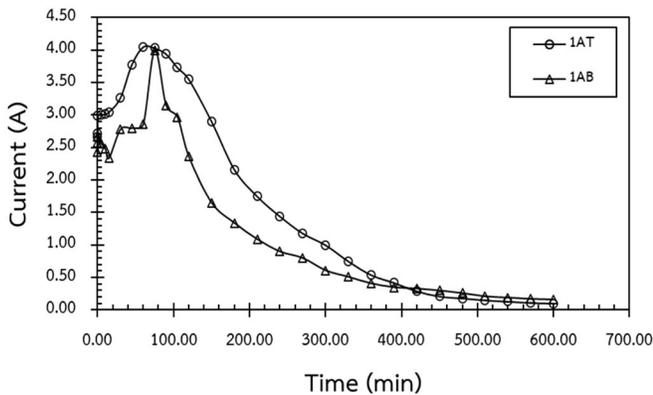


รูปที่ 8 ตัวอย่างดินเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ (a) 1AT (b) 2ATB

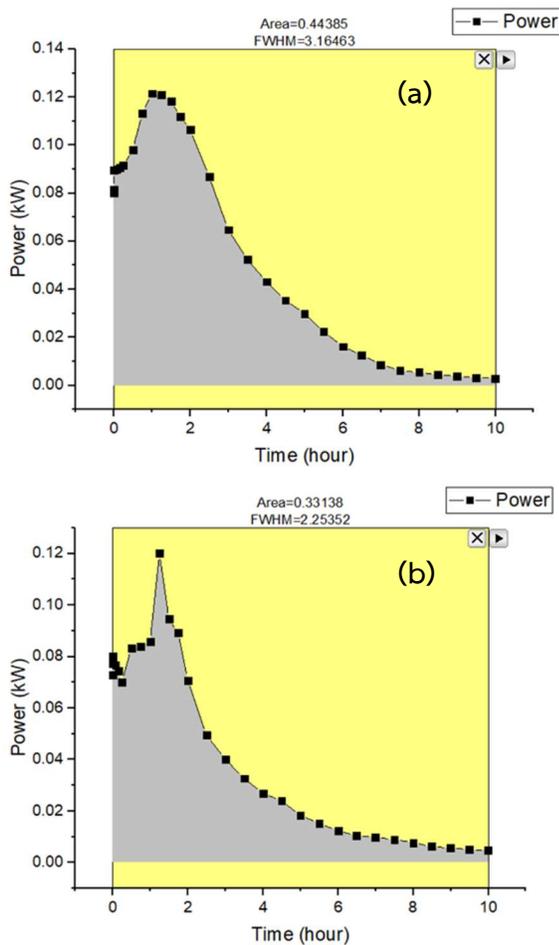
4.3 กระแสไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า กระแสไฟฟ้าเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT โดยรวมสูงกว่า รูปแบบ 1AB เนื่องจากน้ำเป็นตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีความชื้นสูงทำให้มีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูง และรูปแบบ 1AT มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า รูปแบบ 1AB

และการระบายน้ำน้อยกว่ารูปแบบ 1AB จึงทำให้รูปแบบ 1AT มีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงกว่ารูปแบบ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา



รูปที่ 10 Energy Consumption (a) รูปแบบ 1AT (b) รูปแบบ 1ATB

1AB แต่อย่างไรก็ตามหลังจาก 400 นาที กระแสไฟฟ้ารูปแบบ 1AT จะมีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่ารูปแบบ 1AB สาเหตุจาก

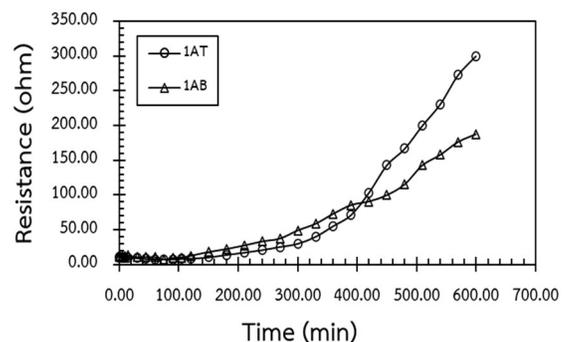
รูปแบบ 1AT เกิดรอยแตกภายในมวลดินเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินจากขั้วแคโทดไปขั้วแอโนดขึ้นทางด้านบนซึ่งตรงข้ามกับกับทรุดตัวที่เกิดขึ้น ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบของรูปแบบ 1AT ลดลง

พลังงานที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาตาม รูปที่ 10 คุณด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์ จากรูปพบว่าพื้นที่ใต้กราฟของการทดสอบแบบ 1AB เท่ากับ 0.33138 kWh ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการทดสอบแบบ 1AT ถึง 25% (0.44385 kWh) โดยประมาณ เนื่องจากรูปแบบ 1AT มีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าในระบบสูงกว่ารูปแบบ 1AB จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากกว่า

4.4 ความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้า คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะแปรผกผันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในมวลดิน ความต้านทานไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นได้ เนื่องจากปริมาณความชื้นในดิน เป็นต้น

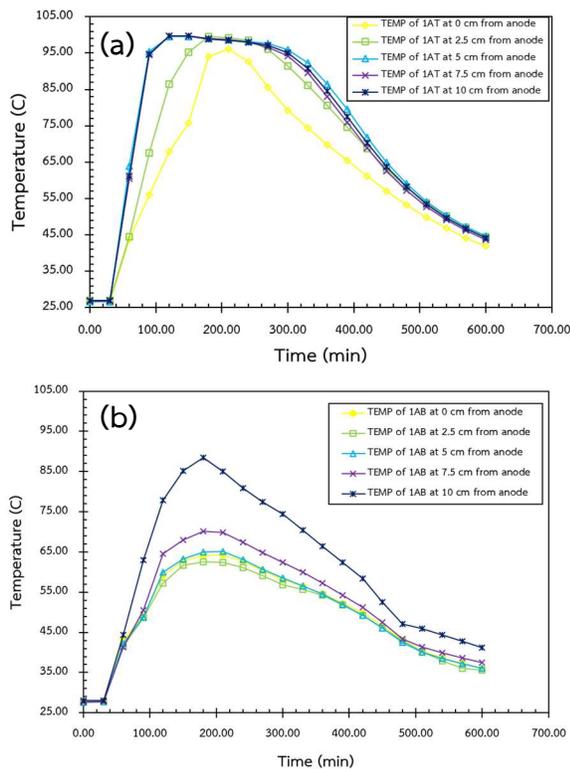
รูปที่ 11 แสดงความต้านทานไฟฟ้าที่มีการเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าในดินมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากดินมีปริมาณความชื้นลดลง แนวโน้มนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Xue et al. [10] และเมื่อเวลาผ่านไป 400 นาที ความต้านทานไฟฟ้าของการทดสอบรูปแบบ 1AT จะสูงกว่า รูปแบบ 1AB สาเหตุจากรูปแบบ 1AT เกิดรอยแตกภายในมวลดินส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลในระบบได้น้อยลง ความต้านทานไฟฟ้าจึงสูงขึ้น



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา

4.5 อุณหภูมิ

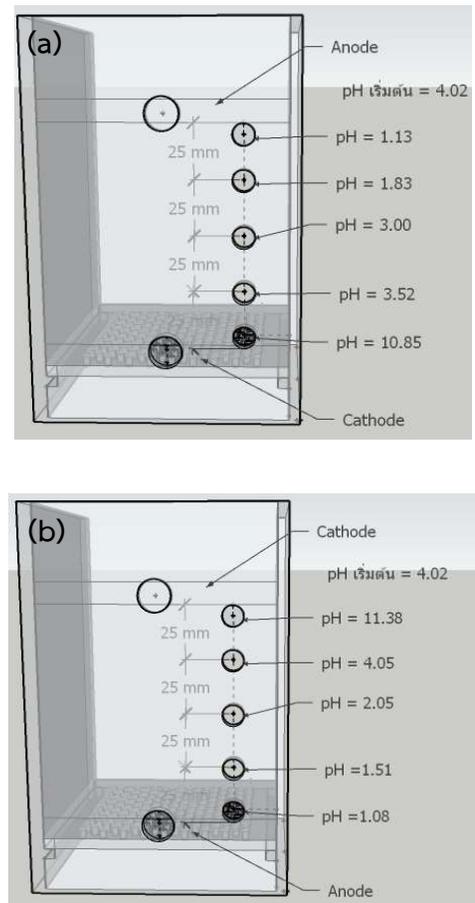
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดิน สำหรับการทดสอบ 1AT (รูปที่ 12a) และ 1AB (รูปที่ 12b) จากรูปพบว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดิน สำหรับการทดสอบแบบ 1AT มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดในดินของการทดสอบแบบ 1AB อย่างชัดเจน ทั้งนี้คาดว่าเพราะการทดสอบแบบ 1AB มีน้ำขังอยู่ที่บริเวณผิวดิน (ชั้นแคโทด) จึงช่วยลดอุณหภูมิของดินบริเวณนี้ และส่งผลต่อการแพร่อุณหภูมิไปยังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในดิน นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า แนวโน้มของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของการทดลองทั้ง 2 รูปแบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ และลดลงเมื่อผ่านค่าสูงสุดไปแล้ว แต่การตอบสนองของอุณหภูมิช้ากว่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากการคายความร้อนในใช้เวลานานกว่า



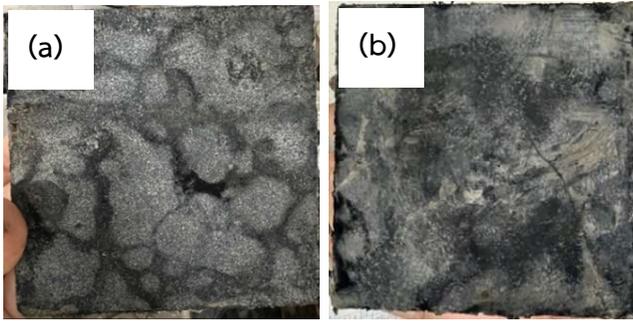
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ; (a) รูปแบบ 1AT (b) รูปแบบ 1AB

4.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าช่วยในการระบายน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดิน เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส เหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนที่บริเวณขั้วแอโนด และไฮดรอกไซด์ไอออนที่บริเวณขั้วแคโทด ประจุไฟฟ้าของดินเหนียวซึ่งมีประจุลบและประจุไฟฟ้าของน้ำที่เกิดการแตกตัวจะเกิดการรวมตัว จึงส่งผลให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลง pH ในดิน รูปที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับการทดสอบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั้งสองรูปแบบ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ pH ของการทดสอบรูปแบบ 1AT (รูปที่ 13a) และ 1AB (รูปที่ 13b) มี pH เท่ากับ 1.13 และ 1.08 ตามลำดับ ที่บริเวณขั้วแอโนด และ 10.85 และ 11.38 ตามลำดับ ที่บริเวณขั้วแคโทด



รูปที่ 13 pH ของดิน ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ; (a) รูปแบบ 1AT (b) รูปแบบ 1AB



รูปที่ 14 ขี้ไฟฟ้าหลังการทดสอบ; (a) รูปแบบ 1AT (b) รูปแบบ 1AB

ค่า pH ที่ได้จากการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [2],[6],[11] เนื่องจากอนุภาคของน้ำในมวลดินเกิดการแตกตัวเป็นไฮดรเจนไอออนที่ขั้วแอโนด และ ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ขั้วแคโทด ไฮดรเจนไอออนจะเคลื่อนตัวเพื่อจับกับประจุลบที่ผิวดินเหนียวทำให้ดินที่บริเวณขั้วแอโนด มีสภาพเป็นกรด และบริเวณขั้วแคโทดมีสภาพเป็นด่าง Hamed and Acar [6] อธิบายว่า เมื่อดินที่อยู่บริเวณขั้วแอโนดจับกับไฮดรเจนไอออนจนสมบูรณ์ ไฮดรเจนไอออนอิสระจะเคลื่อนที่ไปจับกับผิวดินบริเวณใกล้เคียง ทำให้ดินบริเวณอื่นมีสภาพที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น ดินบริเวณขั้วแคโทดจึงมีสภาพที่เป็นด่างลดลง

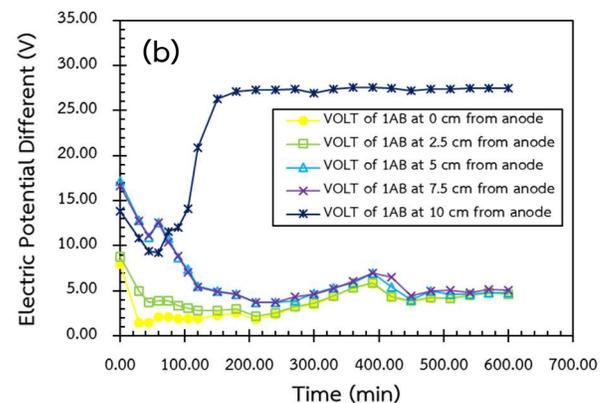
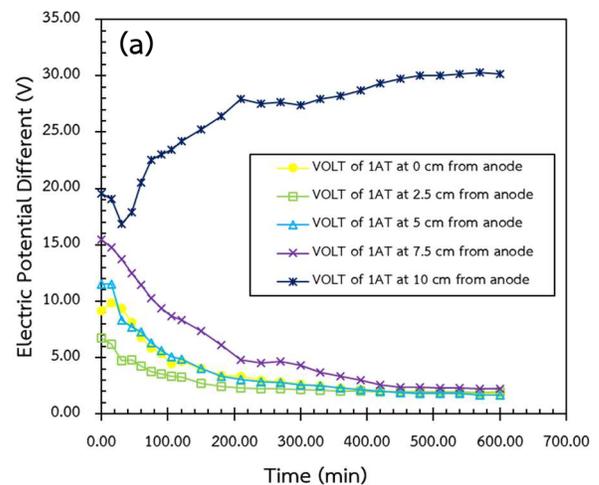
ในการศึกษานี้ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบดินที่บริเวณขั้วแอโนดมีสภาพเป็นกรดสูง ส่งผลให้ขี้ไฟฟ้าที่บริเวณนี้ถูกกัดกร่อนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sadeghian et al. [11]

4.7 ศักย์ไฟฟ้า

รูปที่ 15 แสดงศักย์ไฟฟ้ากับเวลา วัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ (0 2.5 5 7.5 และ 10 เซนติเมตร จากขั้วแอโนด) การทดสอบ 1AT พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0 cm from Anode วัดค่าได้สูงกว่าที่ 2.5 cm from Anode (รูปที่ 15a) เป็นผลมาจากหัววัด ที่ใช้ทำการวัดศักย์ไฟฟ้า ระหว่างการติดตั้งแล้วเกิดโพรงขึ้น ในช่วงแรกของการทดสอบจึงเกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดศักย์ไฟฟ้าในตำแหน่งที่เกิดโพรงในการติดตั้งหัววัด อย่างไรก็ตามผลการทดสอบทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มศักย์ไฟฟ้าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากความชื้นในดินลดลงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแคโทดจะสูงกว่าขั้วแอโนด ทั้งนี้เกิดจาก

การลดลงของศักย์ไฟฟ้าอย่างมากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างขี้ไฟฟ้ากับดิน สอดคล้องกับการศึกษาของ Wu et al. [14]

จากรูปที่ 15 พบว่าบริเวณขั้วแคโทดศักย์ไฟฟ้ามีการลดลงลดลงในช่วงเริ่มต้นการทดสอบเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง จะเริ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากช่วงเริ่มต้นการทดสอบที่บริเวณขั้วแอโนดและแคโทดมีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน ศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดจึงมีแนวโน้มลดลงในช่วงเริ่มต้น เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งน้ำเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด จากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส ทำให้บริเวณขั้วแอโนดมีความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม บริเวณขั้วแคโทดเป็นบริเวณที่น้ำเคลื่อนที่มาสะสม จึงมีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา (a) 1AT และ (b) 1AB

5. บทสรุป

ผลการศึกษาพฤติกรรมภายในและภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการเร่งระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งแบบหนึ่งมิติทั้งสองรูปแบบ สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1) ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอเล็กโทรลิซิส ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า เมื่อดินมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้ปฏิกิริยาอเล็กโทรลิซิสมีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้การนำกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเทคนิคไฟฟ้าจลนศาสตร์สูงขึ้น

2) การศึกษานี้ยืนยันว่าน้ำถูกระบายออกโดยการเคลื่อนที่ของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด จากอิทธิพลของปฏิกิริยาอเล็กโทรออสโมซิสมากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิ เนื่องจากในการทดสอบ พบว่า การทดสอบรูปแบบ 1AB มีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่ารูปแบบ 1AT แต่มีการระบายน้ำและการหลุดตัวสูงกว่า

3) การหลุดตัวของดินเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอเล็กโทรโฟรีซิสกับแรงโน้มถ่วง จึงทำให้การจัดเรียงรูปแบบ 1AB มีการหลุดตัวของดินสูงกว่ารูปแบบ 1AT เนื่องจากปฏิกิริยาอเล็กโทรโฟรีซิสเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยังขั้วแอโนดและมีแรงโน้มถ่วงช่วยเร่งในการตกตะกอน ส่งผลให้ดินมีอัตราการหลุดตัวสูงขึ้นเมื่อจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AB และทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินเนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาอเล็กโทรโฟรีซิสส่งผลต่อการหลุดตัวของดินอย่างมีนัยสำคัญ

4) ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นลดลง ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และกระแสไฟฟ้าลดลง และความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดจะสูงกว่าบริเวณขั้วแอโนดเนื่องจาก ตำแหน่งการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดเป็นการวัดคร่อมทั้งระบบ ส่งผลให้ที่บริเวณขั้วแคโทดจึงมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

5) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าตามรูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้าพบว่า การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ 1AB สามารถเร่งการระบายน้ำและการหลุดได้มากกว่า 1 AT อีกทั้งพลังงานที่ใช้ในการทดสอบมีค่าต่ำกว่า

ยังมีค่าต่ำกว่า หากนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมปฐพี จะเกิดความคุ้มค่าในการใช้งานมากกว่า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (รหัสโครงการ NRIS 179361)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Soralump S. *Solutions for settlement problems in road, embankment and landfill constructed on soft Bangkok clay by using ground improvement and VCM techniques* (in Thai). Bangkok: Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD), Faculty of Engineering, Kasetsart University; 2018.
- [2] Estabragh AR, Beytollahpou I, Moradi M. Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol. *Engineering Geology*. 2014;178:102–108.
- [3] Mohamadi S, Saeedi M, Mollahosseini A. Strategies for the sustainable practice of electrokinetic technology: the case of mixed contaminants in a clayey soil. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021;3:100130. DOI:10.1016/j.clet.2021.100130.
- [4] Sadeghian F, Haddad A, Jahandari H. Effects of electrokinetic phenomena on the load-bearing capacity of different steel and concrete piles: a small-scale experimental study. *Canadian Geotechnical Journal*. 2021;58(5):741–746.
- [5] Hadjadj FZ, Laredj N, Maliki M. Influence of electrokinetic process on compressibility behaviour of salt-affected soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40:4159–4170. DOI:10.1007/s10706-022-02147-0.
- [6] Acar YB, Alshawabkeh AN, Gale RJ. Fundamentals of extracting species from soils by

- electrokinetics. *Waste Management*. 1993;13(2): 141–151. DOI:10.1016/0956-053X(93) 90006-I.
- [7] Alshawabkeh AN, Acar YB. Electrokinetic remediation II: theoretical model. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1996;122(3):186–196.
- [8] Sah JG, Chen JY. Study of the electrokinetic process on Cd and Pb spiked soils. *Journal of Hazardous Materials*. 1998;58(1–3):301–315.
- [9] Bergado DT, Sasanakul I, Horpibulsuk S. Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay using copper and carbon electrodes with PVD. *Geotechnical Testing Journal*. 2003;26(3). DOI:10.1520/GTJ11309J.
- [10] Xue Z, Tang X, Yang Q. Influence of voltage and temperature on electro-osmosis experiments applied on marine clay. *Applied Clay Science*. 2017;141:3–22. DOI:10.1016/j.clay.2017.01.033.
- [11] Sadeghian F, Jahandari S, Haddad A. 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*. 2022;14(2):625–636.
- [12] Malekzadeh M, Sivakugan N. Assessing the use of aluminium electrodes on the electrokinetic dewatering and stabilization of dredged mud slurries. In: *Geo-Chicago 2016*. 2016. p.188–202. DOI:10.1061/9780784480168.020.
- [13] Malekzadeh M, Sivakugan N. One-dimensional electrokinetic stabilization of dredged mud. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2017;35(5):603–609. DOI:10.1080/1064119X.2016.1213778.
- [14] Wu J, Wei B, Lv Z, Fu Y . Improving the focusing phenomenon related to energy consumption and removal efficiency in electrokinetic remediation of Cr-contaminated soil. *Separation and Purification Technology*. 2021.