

ประสิทธิภาพเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการระบายน้ำในดินเหนียวอ่อน ภายใต้การจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวดิ่ง

Electrokinetic Performance on Dewatering in Soft Clay Subjected to Vertical Configurations of Electrode

สมใจ ยุบลชิต¹ อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์^{2*} และมันทนา จุลวรรวงศ์²

Somjai Yubonchit¹ Avirut Chinkulkijniwat^{2*} and Mantana Julvorawong²

Received: July 31, 2024; Revised: October 4, 2024; Accepted: October 9, 2024

บทคัดย่อ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการระบายน้ำและการหลุดตัวในดินเหนียวอ่อน ภายใต้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวดิ่ง งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษารูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้า 2 รูปแบบ คือ Anode Top and Cathode Bottom (1AT) และ Anode Top & Bottom and Cathode Middle (2ATB) จากการศึกษาพบว่า การระบายน้ำและการหลุดตัวเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงแรกของการทดสอบ โดยรูปแบบ 1AT เกิดการหลุดตัวเท่ากับ 21.28 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่ารูปแบบ 2ATB ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และค่าการหลุดนี้สอดคล้อง ผลการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินของรูปแบบ 2ATB ที่สูงกว่า 1AT ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การวางขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 รูปแบบ เหนียวน้ำให้เกิดการแตกร้าวภายในมวลดิน โดยการจัดวางขั้วแอโนดไว้ด้านบนสุด (1AT) ทำให้ดินด้านบนเกิดการแข็งตัวจากการระบายน้ำลงหาขั้วแคโทด ในขณะที่รูปแบบ 2ATB ซึ่งวางขั้วแอโนดบน และล่างของตัวอย่างทดสอบ ทำให้เกิดการแข็งตัวของดินทั้งสองตำแหน่งจากการระบายน้ำเข้าหาขั้วแคโทดที่วางไว้ ตำแหน่งกึ่งกลาง นอกจากนี้ยังพบว่า การแตกร้าวที่เกิดขึ้นส่งผลต่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของเทคนิค จลนศาสตร์ไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น โดยพบว่าการทดสอบรูปแบบ 2ATB ใช้พลังงาน ในการทดสอบสูงกว่า 1AT ถึงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าอาจเหมาะสมในการใช้ระยะสั้น มากกว่าระยะยาว และควรคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเร่งการระบายและการหลุดตัวที่อาจก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองด้วย

คำสำคัญ : จลนศาสตร์ไฟฟ้า; การระบายน้ำ; ดินเหนียวอ่อน; ขั้วไฟฟ้า

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

² Center of Excellence in Civil Engineering, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. 09 7426 4161, E - mail: avirut@sut.ac.th

Abstract

To examine electrokinetic performance on dewatering and settlement in soft clay subjected to vertical configurations of electrode, this research conducted a series of experiments for two configurations of electrode. There were two configurations of electrode; 1) anode were placed at top and cathode placed at bottom boundaries namely as 1AT, and 2) two anodes were placed at top and bottom boundaries and cathode was placed at middle labeled as 2ATB. The results showed that greatest magnitudes of settlement and dewatering in soft clay for the both two configurations of electrode was shown in early stage of experiments. The 1AT yielded the settlement of 21.28 mm which was less than the settlement found in 2ATB test of about 20 %. The settlement results were corresponded to dewatering in the soil sample in which the dewatering for 2ATB was greater than that for 1AT of about 10 %. However, cracks in the soil sample were found in both the 1AT and the 2ATB. For the 1AT, the crack was appeared at top surface of the soil sample caused by downward dewatering from anode to cathode which was resulting in loss of water content nearby anode. While two anodes were placed at top and bottom boundaries of the soil sample for 2ATB, dewatering in both upward and downward directions from anodes to cathode placed at middle would generate cracks at top and bottom boundaries of the soil sample. The cracks due to reduction of water content during the experiment affects the efficiency of electrokinetic, including electric current and electrical resistance. It found that energy consumption used for 2ATB test was greater than that for 1AT of about 40 %. From the tested results, it can be conclude that electrokinetic technique is suited for any problem that requires smaller amount of dewatering within very short time period and energy consumption is also important to assess worthiness for electrokinetic usage.

Keywords: Electrokinetic; Dewatering; Soft Clay; Electrode

บทนำ

การก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนที่สามารถรับน้ำหนักได้น้อย และกำลังรับแรงเฉือนต่ำ จำเป็นต้องการเร่งระบายน้ำ เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติของดินในระหว่างการก่อสร้างหรือในอนาคตเมื่อก่อสร้างเสร็จสิ้น แต่เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability) ต่ำ และมีปริมาณความชื้นสูง ทำให้ระยะเวลาในการระบายน้ำและการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation) ใช้ระยะเวลายาวนาน ทำให้ระยะเวลาการก่อสร้างยาวนานตามไปด้วย และหากกระบวนการอัดตัวคายน้ำยังไม่สิ้นสุด อาจก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวในระหว่างการก่อสร้างหรือในอนาคตได้ ดังนั้นการก่อสร้างในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนจำเป็นต้องทำการปรับปรุงดิน โดยการเร่งการระบายน้ำในดิน

เทคนิคการระบายน้ำแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drained) เป็นการปรับปรุงดินโดยการเร่งการระบายน้ำของดินในแนวตั้ง ซึ่งสามารถเร่งการทรุดตัวของดินให้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคนี้การระบายน้ำในแนวตั้ง ในชั้นดินเหนียวอ่อนอาจเกิดการเสีรูด้านข้างในขณะที่การทรุดตัวต่ำ และทำให้การระบายน้ำออกจากดินไม่ลดลงตามเวลาที่กำหนด ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคระบบการระบายน้ำแนวตั้ง จำเป็นต้องติดตั้งชุดตรวจวัดการทรุดตัวสำหรับตรวจสอบการทรุดตัวและการเสีรูด้านข้าง เพื่อป้องกันการเสีรูดินในชั้นดินเหนียว

เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยสุญญากาศ (Vacuum Preloading) เป็นการใช้แรงดันสุญญากาศมาทดแทนการนำดินมาถมเพื่อทำให้น้ำหนักกดทับถ่วงหน้า โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศและน้ำออกจากชั้นดินเหนียว ด้วยการผ่าน PVD ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการปรับปรุงดินโดยการเร่งการระบายน้ำในดิน อย่างไรก็ตาม การใช้เทคนิคการปรับปรุงดินด้วย

สูญญากาศ อาจส่งผลทำให้พื้นที่ข้างเคียงเกิดความเสียหาย หรืออาจเกิดรอยแยกที่บริเวณพื้นดินของขอบพื้นที่ที่ทำการปรับปรุงดินได้เนื่องจากอิทธิพลของแรงดูดที่สูง (Soralump, 2018)

เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic) เป็นเทคนิคที่ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในดินที่มีความชื้นสูงและมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินต่ำ โดยการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า จะให้พลังงานไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) เป็นตัวกลางทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมวลดิน เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มมีการไหลผ่านมวลดินแล้วทำให้เกิดการไหลของน้ำจากขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานวิศวกรรมที่หลากหลาย เช่น การเสริมลาดดินให้มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น การเร่งการอัดตัวคายน้ำของดิน การเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม และการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในดิน เป็นต้น (Estabragh et al., 2014; Mohamadi et al., 2021; Sadeghian et al., 2021) อย่างไรก็ตาม เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบการทดสอบที่แน่นอน เนื่องจากประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบ (การไหลของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเกิดขึ้นในแนวราบ) แบบ 2 มิติ (จัดวางแอโนด 1 ขั้ว ต่อแคโทดมากกว่า 1 ขั้ว) มีประสิทธิภาพในการระบายน้ำและเร่งการทรุดได้ดีกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบแบบ 1 มิติ (จัดวางแอโนด 1 ขั้ว ต่อแคโทด 1 ขั้ว) แต่การจัดเรียงแบบ 2 มิติ จะใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงดินนานกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ 1 มิติ (Kim et al., 2012; Kim et al., 2014; Xu et al., 2020) อย่างไรก็ตาม จากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ยังพบข้อจำกัดบางประการของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวราบทั้ง 2 รูปแบบ คือปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกของดินบริเวณขั้วแอโนด เนื่องจากน้ำในมวลดินมีปริมาณลดลง จึงเกิดการแทรกตัวของโพรงอากาศตามรอยแตก ทำให้การสัมผัสระหว่างมวลดินกับขั้วไฟฟ้าลดลง และส่งผลให้ประสิทธิภาพการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย (Malekzadeh and Sivakugan, 2016)

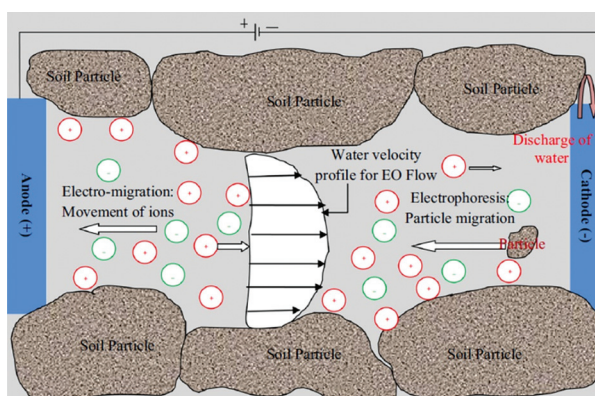
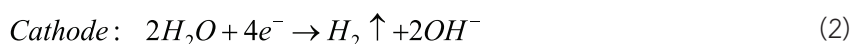
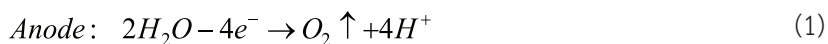
จากปัญหาการเกิดรอยแตกระหว่างการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่อาจมีอิทธิพลมาจากรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง ซึ่งรูปแบบที่ทำให้เกิดการไหลของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดในแนวตั้ง โดยทำการศึกษาด้วยแบบจำลองกายภาพย่อส่วนในห้องปฏิบัติการจากการสังเกตและตรวจวัดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในมวลดิน เช่น การระบายน้ำ การทรุดตัว การเกิดรอยแตก ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความร้อน รวมทั้งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการทดสอบ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

กระบวนการทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า

กระบวนการทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าประกอบด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่ (1) อิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินที่มีประจุไฟฟ้าเมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามากระทำ โดยอนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่ (2) อิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis) เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้ของเหลวหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์รอบ ๆ อนุภาค เกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่อนุภาคดินหยุดนิ่ง และ (3) อิเล็กโทรไมเกรชัน (Electro-migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออน (Ions) ไปยังขั้วตรงข้ามกับไอออนนั้น ๆ โดยไอออนบวก (Cation) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่ไอออนลบ (Anion) เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด ดังรูปที่ 1 (Pandey and Rajesh, 2019)

การให้พลังงานไฟฟ้าแก่มวลดินโดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวกลาง ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านอนุภาคดิน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปกระแสไฟฟ้าในอนุภาคดินจะลดลง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในอนุภาคดินซึ่งในอนุภาคดินจะมีโมเลกุลน้ำ โดยน้ำเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่บริเวณขั้วแอโนด ดังสมการที่ (1) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่บริเวณขั้วแคโทด ดังสมการที่ (2) โดยไฮโดรเจนไอออน จะเคลื่อนที่ไปจับกับประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวดินซึ่งมีประจุลบ เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าตรงข้ามกันจะเคลื่อนที่และจับตัวกัน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะช้าลง เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่เป็นไฮโดรเจนไอออน จับตัวกับประจุลบที่ผิวดินทั้งหมดแล้ว ส่งผลให้ประจุอิสระบางประจุเท่านั้นที่เริ่มกระจายตัวไปจับตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน จึงส่งผลให้

กระแสไฟฟ้าในมวลดินลดลง เมื่อประจุไฟฟ้าในดินลดลง ส่งผลให้กระแสในดินลดลงและส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในดิน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของประจุไฟฟ้า และทำให้ pH ในดินเกิดการเปลี่ยนแปลง (Acar et al., 1993; Alshawabkeh and Acar, 1996; Sah and Chen, 1998; Bergado et al., 2003) และเมื่อเวลาผ่านไปขั้วไฟฟ้าอาจถูกกัดกร่อนที่ขั้วแอโนดจากการสูญเสียอิเล็กตรอน (Xue et al., 2017; Sadeghian et al., 2022)



รูปที่ 1 กระบวนการจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Pandey and Rajesh, 2019)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบจำลองการระบายน้ำในดินเหนียวด้วยเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

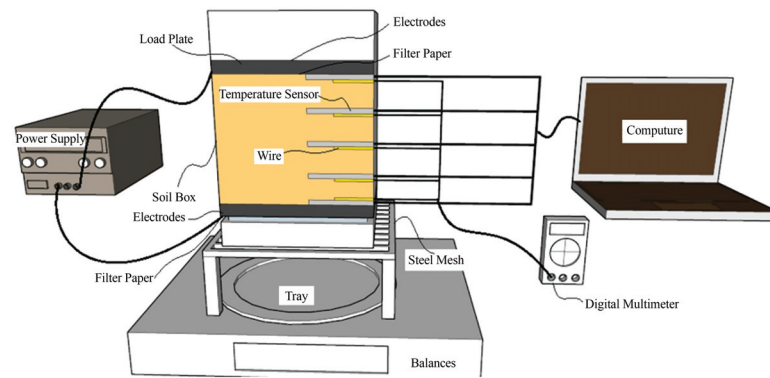
งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าต่อการระบายน้ำในแนวตั้งในดินเหนียวอ่อนผ่านแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 2 แสดงภาพรวมของแบบจำลองทางกายภาพ โดยแบบจำลองประกอบด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ดังนี้

- 1.1 กล้องทดสอบอะคริลิกใสสำหรับใส่ตัวอย่างดิน
- 1.2 ฐานรองรับรองกล้องทดสอบ
- 1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลการทดลอง
- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับอ่านค่าน้ำหนักที่หายไปในห้องทดสอบตลอดการทดลอง
- 1.5 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) สำหรับแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งกำเนิด

ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 แอมแปร์ ความละเอียด 0.1 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 โวลต์ ความละเอียด 0.1 โวลต์ ความถูกต้อง $\pm 1\%$

1.6 มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า

- 1.7 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH) ชนิดปากกา แสดงผลแบบดิจิทัลมีช่วงในการวัด 0.0 ถึง 14.0 pH
- 1.8 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิรุ่น DS18B20 วัดอุณหภูมิมีความละเอียดตั้งแต่ 9 - 12 บิต



(ก) ภาพร่างแบบจำลอง

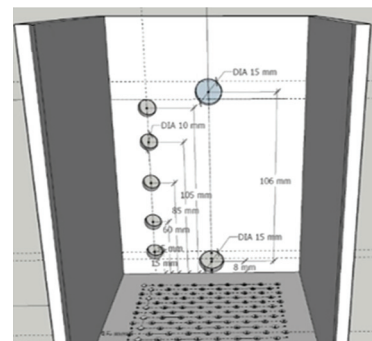


(ข) ภาพถ่ายแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 2 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

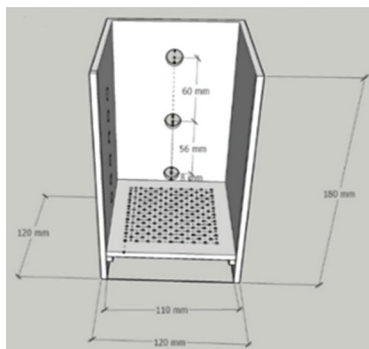


(ก) ภาพถ่ายกล่องทดสอบ

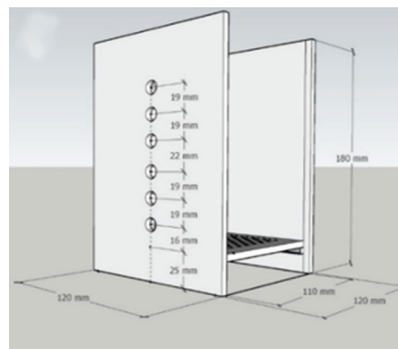


(ข) ลักษณะรูเจาะสำหรับเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้า
กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

รูปที่ 3 รายละเอียดกล่องทดสอบ



(ค) ลักษณะรูเจาะสำหรับเชื่อมต่อ
เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และสายไฟวัดความต่าง
ศักย์ไฟฟ้า กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า
แบบสองต่อหนึ่ง



(ง) ลักษณะรูเจาะสำหรับเชื่อมต่อ
กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ
และสายไฟวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า
กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง

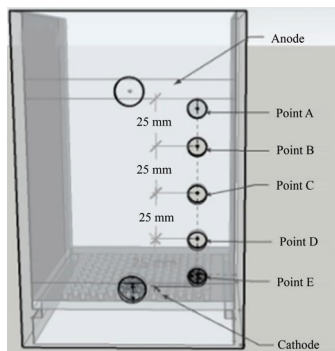
รูปที่ 3 รายละเอียดกล่องทดสอบ (ต่อ)

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของกล่องทดสอบ โดยทำจากอะคริลิกใสเพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมของดินที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 3(ก) มีความหนา 5 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร และสูง 180 มิลลิเมตร โดยฐานของกล่องทดสอบจะยกสูงขึ้นมาจากระดับด้านล่างสุด 25 มิลลิเมตร เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับรองรับน้ำที่ระบายออก ฐานของแบบทดสอบขนาด 110 X 110 ตารางมิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร โดยเจาะแบบสลับพื้นปลา เพื่อให้สามารถระบายออกได้

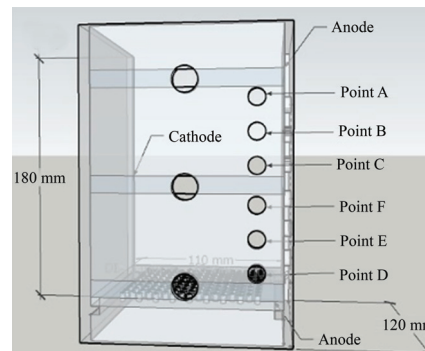
กรณีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู ใช้สำหรับเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 8 และ 114 มิลลิเมตร และด้านข้างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู สำหรับเชื่อมต่อเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและสายไฟเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าพร้อมทั้งใช้สำหรับระบายน้ำซึ่งมีระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 15 35 60 85 และ 105 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3(ข)

สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง ด้านข้างด้านหนึ่งของกล่องอะคริลิกเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู ใช้สำหรับเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 8 64 และ 124 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3(ค) และอีกด้านหนึ่งเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 6 รู สำหรับเชื่อมต่อเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและสายไฟเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าพร้อมทั้งใช้สำหรับระบายน้ำซึ่งมีระยะห่างจากฐานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 16 35 54 76 95 และ 114 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3(ง)

ในการศึกษานี้ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุแกรไฟต์ โดยแบ่งการทดสอบตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบ 1AT เป็นการจัดเรียงขั้วแอโนดหนึ่งขั้วและแคโทดหนึ่งขั้ว (1:1) โดยวางขั้วแอโนดไว้ด้านบนและขั้วแคโทดไว้ด้านล่าง (Anode Top and Cathode Bottom, 1AT) ดังรูปที่ 4(ก) และ 2) รูปแบบ 2ATB เป็นการจัดเรียงขั้วแอโนดสองขั้วและแคโทดหนึ่งขั้ว (2:1) วางขั้วแอโนดไว้ด้านบนและด้านล่าง และวางขั้วแคโทดไว้ตรงกลาง (Anode Top & Bottom and Cathode Middle, 2ATB) ดังรูปที่ 4(ข)



(ก) รูปแบบ 1AT



(ข) รูปแบบ 2ATB

รูปที่ 4 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสำหรับการศึกษาในบทความนี้

2. คุณสมบัติดินและการเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ทดลองเป็นตัวอย่างดินเหนียวที่เก็บมาจากเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร โดยเก็บตัวอย่างแบบ แปรสภาพ (Disturb Sample) ที่ระดับความลึก 3 - 5 เมตร จากผิวดิน ตัวอย่างดินถูกมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-00 หาขีดจำกัดเหลวของดิน (Liquid Limit) และขีดจำกัดพลาสติกของดิน (Plastic Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93 นอกจากนี้ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษามากกว่าร้อยละ 50 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) เมื่อนำไปจำแนกดินตามระบบ USCS (Unified Soil Classification System) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High Plasticity Clay, CH) โดยคุณสมบัติของดินทั้งหมดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

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	$PI = LL - PL$
Natural Water Content, $W_n(\%)$	111	ASTM D 4959-00
Soil Type	CH	USCS



(ก) ตัวอย่างดินก่อนเตรียม



(ข) ปั่นตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 5 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อน



(ค) เนื้อดินหลังการเตรียมตัวอย่าง

รูปที่ 5 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (ต่อ)

รูปที่ 5 แสดงการเตรียมตัวดินเหนียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยดินตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งตัวอย่าง (รูปที่ 5(ก)) ไปกวนด้วยเครื่องกวนให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันดังรูปที่ 5(ข) จากงานวิจัยของ Malekzadeh and Sivakugan (2016) พบว่า เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเหมาะสมกับดินเหนียวอ่อนที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1.6 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดังนั้นการศึกษานี้จึงผสมน้ำให้แก่มวลดิน เพื่อให้ดินเป็นดินเหนียวอ่อนซึ่งมีความชื้นในดินเริ่มต้นประมาณ 128 % โดยประมาณ ดินที่ผ่านการผสมน้ำเพิ่มแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 5(ค)

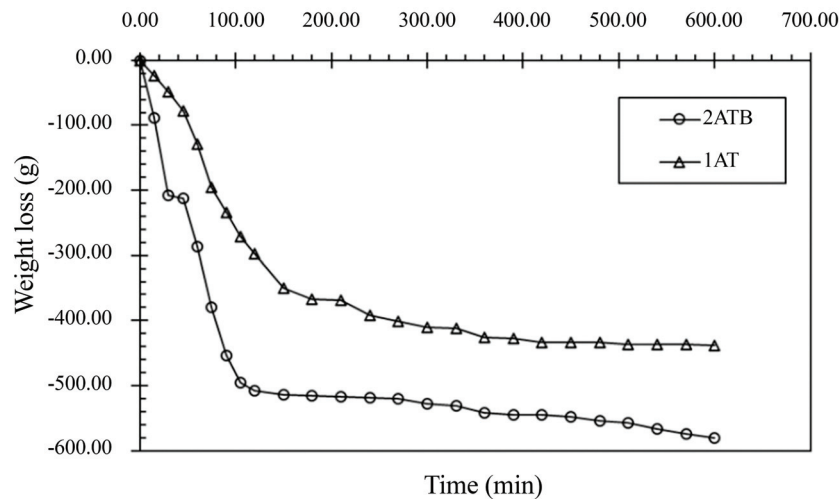
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การศึกษานี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ โดยการวางขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์แบบ 1AT และ 2ATB ในการทดสอบใช้ กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักบรรทุกกดทับบริเวณผิวดิน ขนาด 3 กิโลกรัม ทุกรูปแบบการทดสอบ ผลการทดสอบจะแสดงการระบายน้ำ การหลุดตัว กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่า pH ในตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ดังต่อไปนี้

1. การระบายน้ำในตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ในแนวตั้งแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดสอบปริมาณน้ำที่ระบาย ออกจากระบบมีปริมาณ 437.40 กรัม (น้ำหนักดินเริ่มต้น 1536.7 กรัม) สำหรับการทดสอบ 1AT และ 580.60 กรัม (น้ำหนักดินเริ่มต้น 1524.6 กรัม) สำหรับการทดสอบ 2ATB ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการระบายน้ำเมื่อใช้เทคนิค จลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก (0 - 120 นาที) และการระบายน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อการทดสอบผ่านไประยะหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tang et al. (2021)

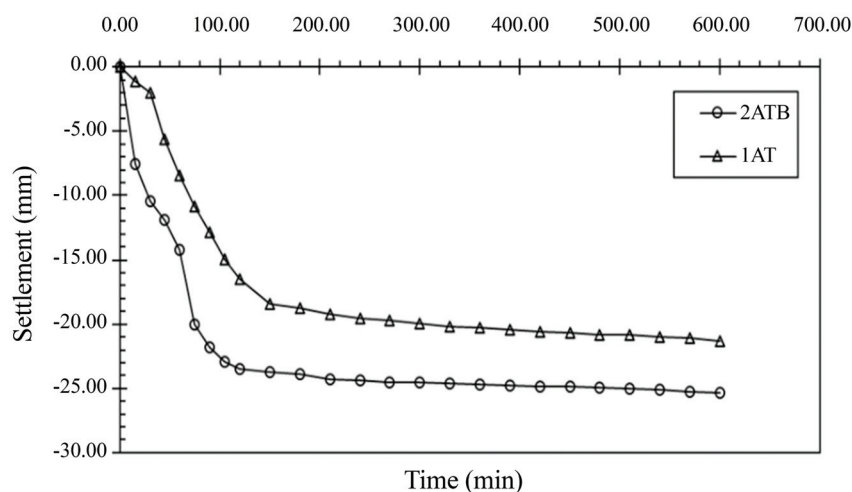
การศึกษานี้พบว่า การจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 2ATB ปริมาณน้ำที่สามารถระบายออกจากระบบได้มากกว่า การจัดเรียงไฟฟ้ารูปแบบ 1AT อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งยังสามารถเร่งการระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดน้อยกว่า ทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ ของน้ำลดลงและสามารถระบายน้ำออกได้เร็วขึ้น และกระแสไฟฟ้าในระบบของการทดสอบ 2ATB มากกว่า 1AT ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การเคลื่อนตัวของน้ำจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดรวดเร็วขึ้น



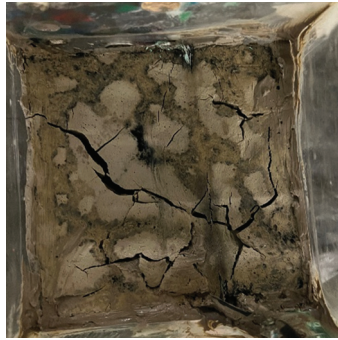
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา

2. การทรุดตัวในตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับเวลาของการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT และสองต่อหนึ่งรูปแบบ 2ATB ค่าการทรุดตัวที่ได้เป็นค่าการทรุดตัวที่วัดได้จากเวอร์เนีย โดยทำการเฉลี่ยค่าที่วัดได้ทั้ง 4 ด้านของกล่องทดสอบซึ่งการทรุดตัวอาจเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอทุกด้าน จากผลการทดสอบในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าช่วยเร่งการระบายน้ำในดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบและการทรุดตัวลดลงเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการระบายน้ำออกจากระบบ งานวิจัยของ Shang and Lo (1997) และ Bergado (2003) พบว่าการทรุดตัวสุดท้ายของทั้ง 2 รูปแบบมีค่าต่างกันประมาณ 20 % โดยการทดสอบแบบ 1AT มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 21.28 มิลลิเมตร ขณะที่การทดสอบแบบ 2ATB มีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบอยู่ที่ 25.32 มิลลิเมตร



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา



(ก) รูปแบบ 1AT



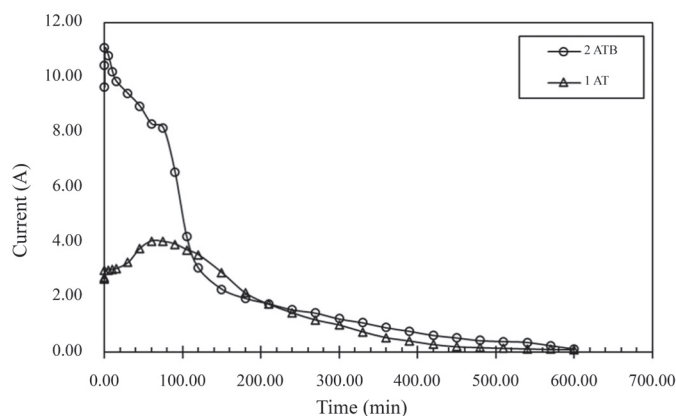
(ข) รูปแบบ 2ATB

รูปที่ 8 ตัวอย่างดินเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่มีการวางตำแหน่งขั้วแอโนดไว้ด้านบนและขั้วแคโทดไว้ด้านล่างส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดขึ้นด้านบนเนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรโฟรีซิส ซึ่งเหนี่ยวนำให้ภายในมวลดินเกิดรอยแตกรอยขึ้น (Malekzadeh and Sivakugan, 2017) ซึ่งในการทดสอบรูปแบบ 1AT และ 2ATB มีการวางตำแหน่งของขั้วแอโนดด้านบนและแคโทดด้านล่างอย่างน้อยหนึ่งชั้น จึงส่งผลให้ดินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบเกิดรอยแตกกว้างของดินขึ้น ดังรูปที่ 8

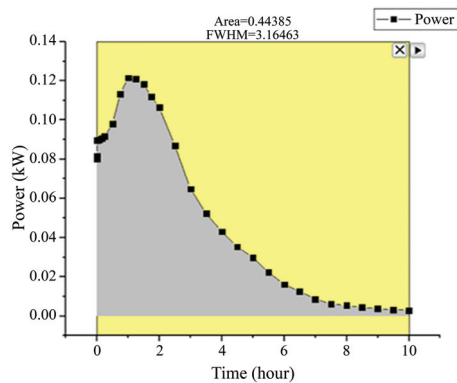
3. กระแสไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษานี้อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB พบว่า รูปแบบ 2ATB กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดอย่างรวดเร็วแล้วจึงลดลงทันทีอย่างช้า ๆ และหลังจาก 100 นาที กระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วและลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มคงที่และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้ารูปแบบ 1AT กระแสไฟฟ้าจะถึงจุดสูงสุดช้ากว่ารูปแบบ 2ATB แต่หลังจาก 100 นาทีทั้งสองรูปแบบจะมีแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าลดลงจนเริ่มคงที่จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

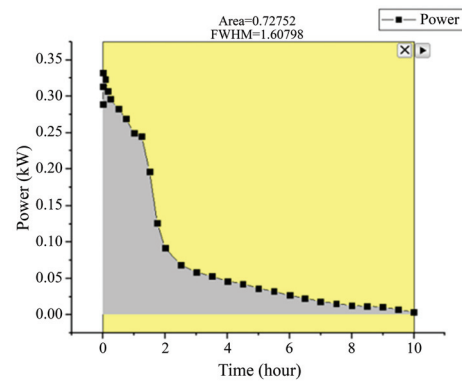


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา

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



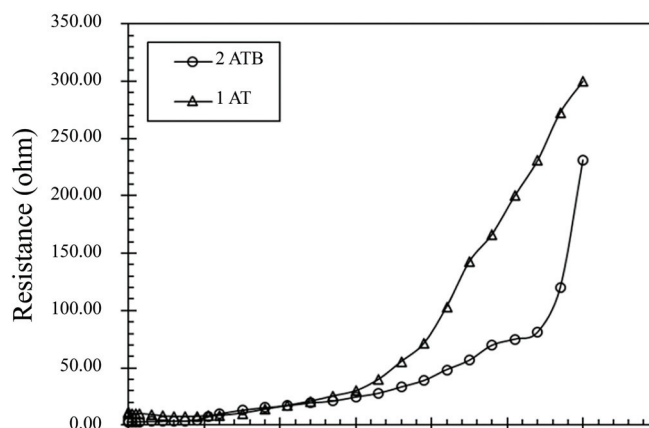
(ก) รูปแบบ 1AT



(ข) รูปแบบ 2ATB

รูปที่ 10 Energy Consumption

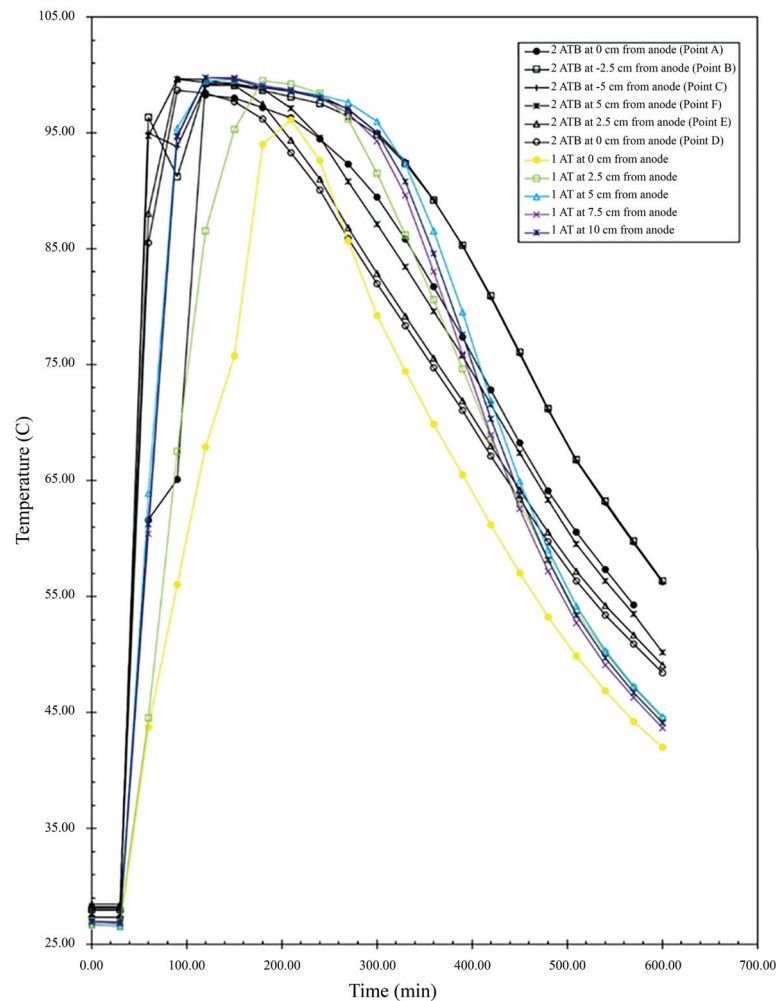
พลังงานที่ใช้ในการทดสอบแปรผันโดยตรงพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา (รูปที่ 10) ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของพื้นที่ใต้กราฟกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบขนาด 30 โวลต์ จากการอ่านค่าพื้นที่ใต้กราฟพบว่า การทดสอบแบบ 1AT มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 0.44385 kWh ซึ่งต่ำกว่าการทดสอบแบบ 2ATB (0.72752 kWh) ถึงประมาณ 40 % นั้นแสดงให้เห็นว่า การทดสอบแบบ 2ATB ใช้พลังงานสูงกว่า 1AT เนื่องจากรูปแบบ 2ATB มีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าในระบบสูงกว่ารูปแบบ 1AT จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากกว่า



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา

4. ความต้านทานไฟฟ้า

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB พบว่ารูปแบบ 1AT หลังผ่านไป 300 นาที ความต้านทานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และรูปแบบ 2ATB หลังผ่านไป 500 นาที ความต้านทานจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าว ปริมาณความชื้นในดินลดลงค่อนข้างมากจากผลของการระบายน้ำ จึงส่งผลให้ความต้านทานลงอย่างรวดเร็ว มีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาของ Xue et al. (2017)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

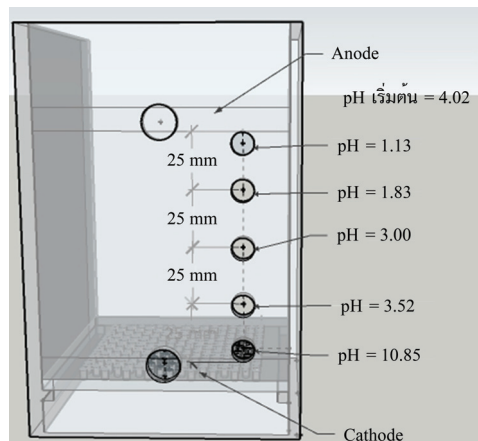
5. อุณหภูมิ

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดิน (จุด A B C D และ E ดังรูปที่ 4(ก)) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT และที่ระยะต่าง ๆ (จุด A B C F E และ D ดังรูปที่ 4(ข)) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 2ATB ตามลำดับ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดในช่วง 100 - 200 นาทีแรก ก่อนค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วงเริ่มต้นสูง และเมื่อประจุไฟฟ้าในดินเกิดการถ่ายเท ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลง อุณหภูมิในดินโดยรอบค่อย ๆ ลดลง ทั้งนี้การที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลง มีสาเหตุมาจากการลดลงของความชื้นในดินระหว่างการทดสอบ

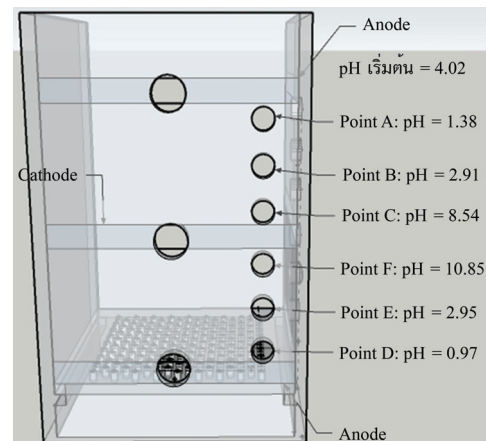
สำหรับการทดสอบแบบ 1AT และ 2ATB อุณหภูมิสูงสุดที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับรูปแบบ 1AT อุณหภูมิสูงสุดบริเวณขั้วแอโนดและแคโทดมีค่าประมาณ 96.12 และ 99.75 องศาเซลเซียส และสำหรับรูปแบบ 2ATB อุณหภูมิบริเวณขั้วแอโนด (จุด A และ D ดังรูปที่ 4(ข)) มีค่าเท่ากับ 99.44 และ 98.69 องศาเซลเซียส ขณะที่บริเวณขั้วแคโทด (จุด C และจุด F ดังรูปที่ 4(ข)) มีเท่ากับ 99.12 และ 99.62 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของดินบริเวณขั้วแอโนดจะมีค่าสูงสุดเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ และลดลงเร็วกว่าการลดลงของอุณหภูมิในดินบริเวณขั้วแคโทด การที่การทดสอบรูปแบบ 1AT และ 2ATB มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากรูปแบบ 1AT มีความต้านทานสูงกว่า แต่มีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า รูปแบบ 2ATB ส่งผลให้อุณหภูมิทั้งสองรูปแบบใกล้เคียงกัน

6. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

รูปที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของดินหลังเสร็จสิ้นการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับการจัดเรียง ขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่ง รูปแบบ 1AT และ 2ATB ผลการทดสอบทั้งสองรูปแบบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเข้าใกล้บริเวณขั้วแอโนด ดินเหนียวจะมีค่า pH ต่ำลงเรื่อย ๆ หรือดินมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น และมีสภาพเป็นด่างเมื่ออยู่ใกล้ขั้วแคโทด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hamed et al. (1991) Estabragh et al. (2014) และ Sadeghian et al. (2022) และยิ่งอีกพบว่า ขั้วแอโนดถูกกัดกร่อนเนื่องจากสภาพดินในบริเวณนี้มีความเป็นกรดสูง ดังรูปที่ 14 สอดคล้องกับการศึกษาของ Sadeghian et al. (2022)



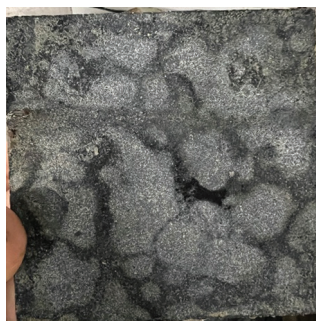
(ก) รูปแบบ 1AT



(ข) รูปแบบ 2ATB

รูปที่ 13 pH ของดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุจากอนุภาคของน้ำในมวลดินเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนที่ขั้วแอโนด และไฮดรอกไซด์ไอออนที่ขั้วแคโทด ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนตัวเพื่อจับกับประจุลบที่ผิวดินเหนียวทำให้ดินที่บริเวณขั้วแอโนดมีสภาพเป็นกรด และบริเวณขั้วแคโทดมีสภาพเป็นด่าง Hamed et al. (1991) ได้อธิบายว่า เมื่อดินที่อยู่บริเวณขั้วแอโนดจับกับไฮโดรเจนไอออนจนสมบูรณ์ ไฮโดรเจนไอออนอิสระจะเคลื่อนที่ไปจับกับผิวดินบริเวณใกล้เคียง ทำให้ดินบริเวณอื่นมีสภาพที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น ดินบริเวณขั้วแคโทดจึงมีสภาพที่เป็นด่างลดลง ดังนั้น การเลือกชนิดของขั้วไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด จึงควรให้ความสำคัญด้วยเช่นกัน เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อประสิทธิภาพของการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการเร่งระบายน้ำในดินเหนียวอ่อนในแง่ของอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า



(ก) รูปแบบ 1AT



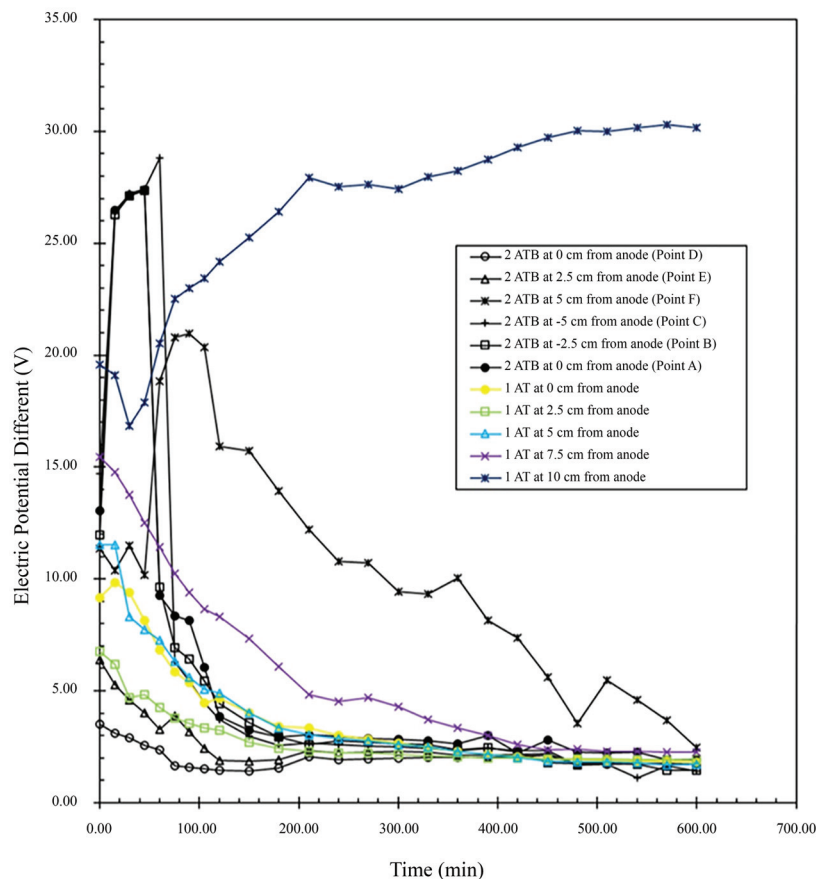
(ข) รูปแบบ 2ATB

รูปที่ 14 ขั้วแอโนดหลังการทดสอบ

7. ความต่างศักย์ไฟฟ้า

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (A B C D และ E ดังรูปที่ 4(ก)) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1AT) และที่ตำแหน่ง (A B C F E และ D ดังรูปที่ 4(ข)) สำหรับการทดสอบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่ง (2ATB) ทั้งนี้การศึกษานี้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้ขั้วแอโนดเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวัดเปรียบเทียบกับตำแหน่งต่าง ๆ

การทดสอบรูปแบบ 1AT ความต่างศักย์ไฟฟ้าทุกตำแหน่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ยกเว้นที่บริเวณขั้วแคโทดเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แต่การทดสอบรูปแบบ 2ATB ขึ้นลงไม่สม่ำเสมอในช่วงเริ่มต้น โดยที่จุด A ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และค่อย ๆ ลดลงจนเริ่มคงที่ ในทางตรงข้ามที่จุด D ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นและหลังจากนั้นจึงเริ่มคงที่ และบริเวณขั้วแคโทดที่จุด C และ F แนวโน้มของความต่างศักย์ไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงลดลงแต่ที่จุด C จะลดลงอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ ในขณะที่จุด F จะลดลงอย่างสม่ำเสมอ (ตำแหน่งการวัด ดังรูปที่ 4(ข)) แต่อย่างไรก็ตามหลังจากผ่าน 100 นาทีความต่างศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นในดินลดลงทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าเพื่อเร่งระบายน้ำในดินเหนียวอ่อน สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งและสองต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT และ 2ATB สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบสองต่อหนึ่งรูปแบบ 2ATB สามารถระบายน้ำได้มากกว่ารูปแบบ 1AT ประมาณ 10 %

2. การทรุดตัวของดินเมื่อจัดวางขั้วไฟฟ้าสองต่อหนึ่งรูปแบบ 2ATB ทำให้เกิดการทรุดตัวของดินมากกว่าการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าหนึ่งต่อหนึ่งรูปแบบ 1AT (ประมาณ 20%) ดังนั้นการวางขั้วแอโนดไว้ด้านล่างช่วยเร่งการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนได้ จากอิทธิพลของปฏิกิริยาอิเล็กโทรออสโมซิส ร่วมกับอิเล็กโทรโฟรีซิส และแรงโน้มถ่วง อย่างไรก็ตามการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 รูปแบบ เหนียวน้ำให้เกิดรอยแตกภายในดิน ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลในระบบได้น้อยลงและส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า

3. รูปแบบการทดสอบแบบ 2ATB ใช้พลังงานการทดสอบสูงกว่า 1AT ประมาณ 40 % จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีในดินช่วงเริ่มต้นทดสอบให้เกิดรวดเร็วขึ้น แต่สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ด้วยเช่นกัน

4. พฤติกรรมและแนวโน้มต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอก สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้ารูปแบบ 1AT และ 2ATB มีแนวโน้มและพฤติกรรมสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 รูปแบบ อาจยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดในการใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการระบายน้ำในดินเหนียวอ่อน ซึ่งต้องนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพและพลังงานที่ใช้กับการจัดวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งรูปแบบอื่น เช่น การวางขั้วแคโทดไว้ด้านบนและแอโนดด้านล่าง และการวางแคโทดที่ด้านบนและล่างแอโนดวางที่กึ่งกลาง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (รหัสโครงการ NRIIS 179361)

References

- Acar, Y.B., Alshawabkeh, A.N. and Gale, R.J. (1993). Fundamentals of Extracting Species from Soils by Electrokinetics. *Waste Management*, 13(2), 141-151. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(93\)90006-I](https://doi.org/10.1016/0956-053X(93)90006-I)
- Alshawabkeh, A.N. and Acar, Y.B. (1996). Electrokinetic Remediation. II: Theoretical Model. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(3), 186-196. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:3\(186\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:3(186))
- 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), 1-12. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/933>
- Estabragh, A.R., Beytollahpou, I., Moradi, M. and Javadi, A.A. (2014). Consolidation Behavior of Two Fine-Grained Soils Contaminated by Glycerol and Ethanol. *Engineering Geology*, 178, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.017>
- Hamed, J., Acar, Y. and Gale, R.J. (1991). PB(II) Removal from Kaolinite by Electrokinetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 117(2), 241-271.
- Kim, D.H., Jo, S.U., Choi, J.H., Yang, J.S. and Baek, K. (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.S., Jeon, E.K., Jung, J.M., Jung, H.B., Ko, S.H., Seo, C. and Baek, K. (2014). Field Application of Electrokinetic Remediation for Multi-Metal Contaminated Paddy Soil Using Two-Dimensional Electrode Configuration. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 4482-4491. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2424-0>

- Malekzadeh, M. and Sivakugan, N. (2016). *Assessing the use of Aluminium Electrodes on the Electrokinetic Dewatering and Stabilization of Dredged Mud Slurries*. In Geo-Chicago 2016, 188-202. From: sustainable waste management and remediation, 14-18 August 2016, Chicago, IL, USA. <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>
- 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, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100130>
- Pandey, B.K. and Rajesh, S. (2019). Enhanced Engineering Characteristics of Soils by Electro-Osmotic Treatment: An Overview. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 4649-4673. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00973-3>
- Sadeghian, F., Haddad, A., Jahandari, H., Rasekh, H. and Ozbakkaloglu, T. (2021). Effects of Electrokinetic Phenomena on the Load-Bearing Capacity of Different Steel and Concrete Piles: a Small-Scale Experimental Study. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(5), 741-746. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0650>
- Sadeghian, F., Jahandari, S., Haddad, A., Rasekh, H. and Li, J. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.017>
- 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), 301-315. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00140-4)
- Shang, J.Q. and Lo, K.Y. (1997). Electrokinetic Dewatering of a Phosphate Clay. *Journal of Hazardous Materials*, 55(1-3), 117-133. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00018-6)
- Soralump, S. (2018). *Solutions for Settlement Problems in Road, Embankment and Land Fill Constructed on Soft Bangkok Clay by using Ground Improvement and VCM Techniques* [Unpublished Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD), Faculty of Engineering]. Kasetsart University. (in Thai)
- Tang, K., Zhang, F., Feng, D. and Lu, X. (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>
- Xue, Z., Tang, X. and Yang, Q. (2017). Influence of Voltage and Temperature on Electro-Osmosis Experiments Applied on Marine Clay. *Applied Clay Science*, 141, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.033>
- Xu, H., Cang, L., Song, Y. and Yang, L. (2020). Influence of Electrode Configuration on Electrokinetic-Enhanced Persulfate Oxidation Remediation of PAH-Contaminated Soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 44355-44367. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10338-6>