การประยุกต์เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่งเพื่อประเมินความชื้นและรอยแตกจากการแห้งระเหยของดินเม็ดละเอียด

Application of Remote Sensing Technology to Assessment of Moisture and Cracks from Dry Evaporation of Fine Grained Soils

ขจรศักดิ์ ศิริโรจน์วัฒนกูล[1,*] อภินิติ โชติสังกาศ[2] สรวิศ สุภเวชย์[3] กฤตนัย ต่อศรี[4] และ ณัฐสิทธิ์ ทองเลิศ[5]

[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[4] นักพัฒนาแบบจำลอง ชำนาญการพิเศษ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.)
[5] ผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
* Corresponding author; E-mail address: kajornsak.si@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการอุ้มความชื้นของดินเม็ดละเอียดที่ทำให้เกิดการบวมและหดตัว จนเกิดรอยแตก (Crack) ขึ้นในดิน รวมถึงเสนอแบบจำลองเพื่อประมาณค่าความลึกรอยแตกในดิน ด้วยการประยุกต์ทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soils mechanics) นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลความชื้นจากเทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง (Remote sensing technology) โดยการสอบเทียบข้อมูลความชื้นจากเทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่งและอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นภาคสนาม แล้วแปลงเป็นค่าแรงดูดในดิน (Soil suction) ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงของความชื้นนั้น โดยอาศัยเส้นอัตลักษณ์ของดิน Soil Water Characteristic Curve (SWCC) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความลึกของรอยแตกที่เกิดขึ้นโดยทฤษฎีอิลาสติก

คำสำคัญ: รีโมทเซนซิ่ง, รอยแตกในดิน, การประเมินความชื้น, ดินเม็ดละเอียด

Abstract

This paper presents a study on the moisture holding behavior of fine-grained soils and their swelling and shrinkage. The study also proposes modeling approach to estimate the depth of soil cracks that may occur by applying unsaturated soils mechanics and remote sensing technology. By calibrating moisture data from remote sensing technology with those obtained from field measurement and converting it to soil suction based on the soil water characteristic curve (SWCC) obtained from laboratory tests. The suction change can then be used to predict the depth of cracks based on elastic theory.

Keywords: Remote Sensing, Crack of soils, Moisture assessment, Fine Grained Soils

1. บทนำ

ปัญหาการแตกของดิน (Crack of soils) เป็นปัญหาหนึ่งที่สามารถพบได้บ่อยในงานวิศวกรรมปฐพีและเกษตรกรรม มักจะพบในดินจำพวกดินเหนียวหรือดินเม็ดละเอียด โดยมีสาเหตุมาจากการได้รับและสูญเสียความชื้นในปริมาณมากจนปรากฏเป็นรอยแตกขึ้น โดยมีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดรอยแตกนั่นก็คือ เรื่องของแรงดูดน้ำในดิน (Soil suction) โดยจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวราบ (Horizontal stress) อันก่อให้เกิดรอยแตกตามมา โดยผลกระทบที่เกิดจากปัญหารอยแตกในดินนั้น จะขึ้นอยู่กับระดับของความลึกที่เกิดรอยแตก กล่าวคือหากรอยแตกยิ่งมีความลึกมากก็จะยิ่งมีโอกาสสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพี อาทิ เช่น โครงสร้างถนน แนวสันเขื่อน หรือความเสียหายที่เกิดในพื้นที่ทำการเกษตรได้มากขึ้น ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับความลึกที่เกิดรอยแตกจึงเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่สำคัญในการศึกษาถึงปัญหาการแตกของดิน

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและความลึกของการเกิดรอยแตกในดินเม็ดละเอียด ซึ่งเป็นการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าระดับความลึกของรอยแตกที่เกิดขึ้น จากการประยุกต์ใช้ความชื้นที่ได้จากเทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่งของโครงการ Soil Moisture Active Passive (SMAP) ซึ่งเป็นโครงการดาวเทียมตรวจวัดความชื้นขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติหรือ NASA เนื่องจากเป็นข้อมูลที่เปิดเป็นสาธารณะทำให้บุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ และมีข้อดีคือมีข้อมูลตรวจวัดครอบคลุมทั่วพื้นผิวโลกทำให้สะดวกในการคัดเลือกชุดข้อมูลของพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้ โดยการใช้องค์ความรู้จากทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil Mechanics) และทฤษฎีอิลาสติกซิตี้ในส่วนของค่ามอดูลัสของการดูด (H-

modulus) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ และอีกนัยหนึ่งในการศึกษานี้ยังต้องการใช้ข้อมูลความชื้นจากเทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง มาใช้สอบเทียบร่วมกับข้อมูลความชื้นที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นภาคสนาม (Moisture sensors) เพื่อสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความชื้นจากทั้งสองแหล่งที่มา แล้วจึงเสนอแนวทางการใช้ข้อมูลความชื้นเพื่อประเมินรอยแตกร้าวของดินเม็ดละเอียด

2. วิธีการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการแตกของดิน (Crack of soil) เป็นปัญหาหนึ่งที่สามารถพบได้บ่อยในดินที่มีการสูญเสียความชื้นโดยมีสาเหตุมาจากการที่ดินเหนียวที่มีคุณสมบัติบวมตัวเนื่องจากมีส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวที่มีศักยภาพในการอุ้มความชื้นได้สูง หรือในดินเม็ดละเอียด (Fine grain soil) ได้รับความชื้นในปริมาณที่สูงขึ้นในฤดูกาลที่มีน้ำมากหรือในฤดูฝนจนทำให้ดินมีการขยายปริมาตร จนมาถึงในฤดูแล้งความชื้นที่เคยมีการถูกดูดซับไว้ในปริมาณที่มากจากฤดูฝนเริ่มมีการระเหยออก ดินที่เคยอยู่ในสภาวะบวมตัวจึงเริ่มมีการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น จนเกิดเป็นรอยแตกขึ้นในดิน เนื่องจากปัญหาที่เกิดจากรอยแตกของดิน นั้นเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในงานทางวิศวกรรมและเป็นอีกหนึ่งปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับโครงสร้างต่างๆได้อย่างมากมาย โดยปัญหาความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างนั้นมักจะขึ้นอยู่กับความลึกของการเกิดรอยแตก (Crack depth) ความลึกของรอยแตกที่มีมากนั้นก็มีโอกาสที่จะสร้างความเสียหายได้มากกว่า ซึ่งรอยแตกในดินนั้นส่วนใหญ่จะพบในดินที่ศักยภาพการบวมตัวที่ค่อนข้างสูงหรือในดินเม็ดละเอียด จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดเป็นความคิดริเริ่มที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมการอุ้มความชื้นของดินเม็ดละเอียดที่ทำให้เกิดการบวมและหดตัว (shrinkage – swell) จนทำให้เกิดการ crack ตามมา โดยในการประเมินความเสียหายอันเกิดจากความลึกของรอยแตกนั้นจำเป็นจะต้องเข้าใจในพฤติกรรมของการแตกในดินดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.1.1 พฤติกรรมการแตกร้าวในดิน

ในการอธิบายถึงพฤติกรรมการแตกที่เกิดขึ้นในดินต้องเริ่มจากการทำความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวกับแรงดันดินในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral earth pressure at rest) ซึ่งโดยส่วนมากการเกิดรอยแตกมักจะพบในบริเวณผิวดินหรือในดินที่มีระดับไม่ลึกมากได้ก่อนบริเวณชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป และมักจะเกี่ยวข้องกับชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นไปจนถึงระดับพื้นผิว ดังนั้นในการอธิบายถึงพฤติกรรมการแตกของดินในที่นี้จึงมีความเกี่ยวข้องกับทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและผลจากแรงดึงดูด (Suction) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนตัว (Coefficient of earth pressure at rest, K_0) โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ K_0 เป็นอัตราส่วนของ Net horizontal stress และ Net vertical stress โดยในกรณีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำค่าของสัมประสิทธิ์ K_0 จะขึ้นอยู่กับ Stress history ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลจากแรงดูดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ K_0 ได้โดยใช้ทฤษฎี Elastic equilibrium ได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\varepsilon_h = \frac{(\sigma_h - u_a)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_v + \sigma_h - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad (1)$$

โดยที่ μ คือ อัตราส่วนปัวซอง E คือ ค่าอีลาสติกมอดูลัสสำหรับหน่วยแรงสุทธิ H คือ ค่าอีลาสติกมอดูลัสสำหรับแรงดูด และ ε_h คือค่าความเค้นในแนวราบ ซึ่งในสำหรับกรณี K_0 ที่อยู่ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยจะกำหนดให้ ($\varepsilon_h = 0$) ดังนั้นค่า K_0 ในกรณีของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งมีผลมาจาก suction สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$K_0 = \frac{\mu}{(1-\mu)} - \frac{1}{(1-\mu)}\frac{E}{H}\frac{(u_a - u_w)}{(\sigma_v - u_a)} \quad (2)$$

เมื่อ K_0 คือ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนตัว u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่างของเม็ดดิน และ u_w คือแรงดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน

2.1.2 การประเมินความลึกรอยแตกในดิน

จากความรู้เกี่ยวกับค่า Elastic modulus สามารถใช้อัตราส่วน E/H ในการประเมินความลึกรอยแตกในดินได้เนื่องจากอัตราส่วน E/H จะขึ้นกับความเป็นพลาสติกของดิน ดังนั้นเมื่ออัตราส่วน E/H มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินในปริมาณที่สูง โดยความลึกรอยแตกที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย (อภินิติ, 2555)

โดย Shrestha et al. (2019) ได้ทำการศึกษาการประเมินความลึกของรอยแตกที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีอิลาสติก แสดงในสมการที่ 1 และความรู้ในเรื่องของค่าอัตราส่วน Elastic modulus (อัตราส่วน E/H) ร่วมกับการทดสอบ SWCC ในด้านแห้ง และคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินในบริเวณที่พบรอยแตก โดยพบว่าปัจจัยสำคัญของการเกิดรอยแตกนั้นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า Suction เนื่องจากในการตรวจวัดพบว่ารอยแตกมีความลึกที่เพิ่มมากขึ้นตามค่า Suction ที่เพิ่มขึ้น โดยในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ผลจากการทดสอบ SWCC มาคำนวณหาค่า H - modulus แสดงในสมการที่ 3 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์

$$H = \frac{\Delta(u_a - u_w)}{\Delta\varepsilon_{vol}} \quad (3)$$

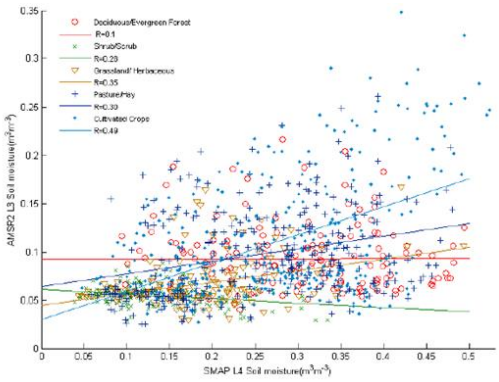
เมื่อ $\Delta(u_a - u_w)$ คือการเปลี่ยนแปลงของค่า suction และ $\Delta\varepsilon_{vol}$ คือการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเชิงปริมาตร

2.2 ดาวเทียม SMAP

ดาวเทียม SMAP คือ เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote sensing technology) ในอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นดาวเทียมของโครงการ Soil Moisture Active Passive (SMAP) เป็นดาวเทียมตรวจวัดความชื้นที่บริเวณพื้นผิวโลกขององค์การ NASA มีหลักการทำงานคือการใช้ข้อมูลสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่อากาศยานในการตรวจวัด ซึ่งแบ่งได้เป็น เทคนิคแบบแพสสิฟ จับสัญญาณที่ส่งออกมาหรือสะท้อนจากพื้นดิน และ เทคนิคแบบแอ็คทีฟ ซึ่งใช้วิธีสร้างสัญญาณแล้วส่งไปยังพื้นดินแล้ววัดการตอบสนองจากพื้นดินนั้น ประโยชน์คือเพื่อใช้เก็บข้อมูลความชื้น โดยมีพิสัยการเก็บข้อมูลครอบคลุมทั่วพื้นผิวโลก ความละเอียดของการบันทึกข้อมูลจะมีอยู่หลายระดับด้วยกันแต่ที่นิยมใช้คือค่าความละเอียดที่ 1 กิโลเมตร และที่ 3 กิโลเมตร ซึ่งเป็นค่าความละเอียดที่มากที่สุดของการเก็บข้อมูลด้วยระบบดาวเทียม SMAP

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีความคิดริเริ่มที่จะนำข้อมูลจากส่วนนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นข้อมูลที่เปิดเป็นสาธารณะให้บุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ แต่การจะนำเอาข้อมูลจากดาวเทียมไปใช้นั้นจำเป็นจะต้องทำการสอบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องก่อนการนำไปใช้

Zhang et al. (2017) ได้ทำการศึกษาโดยการสอบเทียบข้อมูลจาก SMAP และเครื่องมือ Advance Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) ในแปลงศึกษาที่ได้กำหนดให้มีสิ่งปกคลุมผิวดิน ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากการสอบเทียบมีความน่าพึงพอใจโดยให้ค่า $R^2 = 0.49$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในแง่ของการนำไปใช้ เนื่องจากข้อมูลจากดาวเทียมค่อนข้างมีความกระจายตัวสูงโดยผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลการการเปรียบเทียบข้อมูลความชื้นระหว่าง SMAP และ AMSR2 กรณีที่มีสิ่งปกคลุมผิวดิน (Zhang et al. 2017)

2.3 Time Domain Reflectometry

อุปกรณ์ Time Domain Reflectometry (TDR) คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความชื้นซึ่งจัดว่าเป็น Moisture sensor ในอีกรูปแบบหนึ่ง นิยมใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโดยเฉพาะงานทางด้านวิศวกรรม โดยมีลักษณะทั่วไปคือเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดขนาดเล็กมีขา (Probe) จำนวน 2-3 ขา ใช้สำหรับเสียบเข้ากับตัวอย่างมีทั้งชนิดที่เป็นโลหะและพลาสติก (Adelakun and Sri Ranjan, 2013) ซึ่งในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีจะนิยมใช้สำหรับงานวัดความชื้นของดินในภาคสนามโดยจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ Data logger เพื่อทำการเก็บข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากเป็น Sensor ที่มีความแม่นยำและให้ค่าการตรวจวัดใกล้เคียงกับค่าความชื้นของตัวอย่างจากการคำนวณ Suchorab et al. (2014) และมีความทนทานสูงต่อสภาวะในภาคสนาม จากความสามารถและข้อดีที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงได้เลือกใช้อุปกรณ์ TDR ในการทดสอบวัดความชื้นภาคสนามในงานวิจัยครั้งนี้



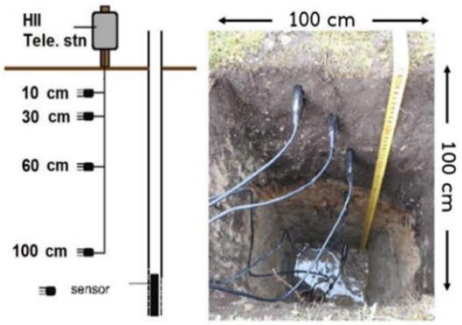
รูปที่ 2 อุปกรณ์ Moisture sensor (TDR) ที่ใช้จริงในภาคสนาม

2.4 การดำเนินงานในภาคสนาม

สำหรับการดำเนินงานในภาคสนาม ได้มีการลงพื้นที่เพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในภาคสนามและเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ ตำบลหันคา อำเภอหันคา จังหวัดชัยนาท มีชื่อย่อรหัสสถานีคือ HNKA โดยมีรายละเอียดของการลงปฏิบัติงานในพื้นที่คือ การติดตั้งสถานีตรวจวัดและติดตั้ง Moisture sensor (TDR) สำหรับการเก็บข้อมูลความชื้น โดยในการติดตั้งสถานีและตัวเซ็นเซอร์กระทำโดยการตั้งสถานีโทรมาตรในบริเวณพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้ เพื่อทำการติดตั้ง Data logger และทำการขุดเปิดหลุมขนาด กว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และลึก 100 เซนติเมตร ที่บริเวณใกล้กับสถานีโทรมาตร เพื่อทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ในหลุมเปิดนั้น

สำหรับในส่วนวิธีการติดตั้ง จะทำการติดตั้งโดยแบ่งเป็นระดับความลึก 4 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร 30 เซนติเมตร 60 เซนติเมตร และที่ 100 เซนติเมตร โดยการใช้สว่านมือเจาะรูที่ผนังของหลุมเปิด ตามระดับความลึกดังกล่าว แล้วทำการเสียบตัวขา (Probe) ของเซ็นเซอร์เข้าไปในรูเจาะนั้นแสดงในรูปที่ 3 โดยในระหว่างการเสียบขาเข้าไปในรูเจาะจะทำการใช้ดินที่ขุดออกมาก่อนหน้า (ตามระดับความลึกต่างๆ) มาทำการผสมน้ำให้เปียกชุ่มในระดับที่สามารถปั้นเป็นก้อนได้ แล้วทำการอัดกลับเข้าไปในรูเจาะก่อนที่จะนำเซ็นเซอร์แทงเข้าไปในรูเจาะที่ผนัง แสดงในรูปที่ 4A เพื่อเป็นการกระตุ้นการทำงานของเซ็นเซอร์และเพื่อเป็นการสร้างความคุ้นเคยระหว่างตัวเซ็นเซอร์กับสภาพของชั้นดินนั้นๆโดยผ่านทางความชื้นของดินที่เปียกชุ่มที่ใช้อัดกลับเข้าไปในรูเจาะที่บริเวณผนังของหลุมเปิด โดยในทุกๆครั้งที่มีการขุดเปิดหน้าดินจนถึงระดับความลึกที่ต้องการจะมีการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) โดยการใช้

เครื่องมือเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพที่มีชื่อว่า KU Miniature Sampler ที่ได้พัฒนาและออกแบบโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของแต่ละระดับความลึกดังแสดงไว้ในรูปที่ 4B แล้วจากนั้นจะนำดินตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณพื้นที่ดังกล่าวไปใช้ทดสอบต่อในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของดินทั้งในด้านคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของดิน (Basic soil properties) และการศึกษาในด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน (Engineering soil properties) โดยดินที่มาจากการขุดเปิดชั้นดินจะถูกจัดวางไว้ตามระดับความลึก โดยจะมีการเก็บตัวอย่างดินแบบไม่คงสภาพ (Disturbed sample) บางส่วนจากกองดินในจุดนี้ หลังจากนั้นจะทำการนำไปฝังกลบคืนในแต่ละระดับความลึกที่ขุดออกมาหลังจากการติดตั้งเซ็นเซอร์แล้วเสร็จ



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ Moisture sensor (TDR) ที่ระดับความลึกต่างๆ (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ, 2564)



รูปที่ 4 การอัดดินก้อนจากการผสมน้ำเข้าไปยังรูเจาะก่อนการติดตั้งเซ็นเซอร์ (A) และการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (B)

2.5 การดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ

2.5.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

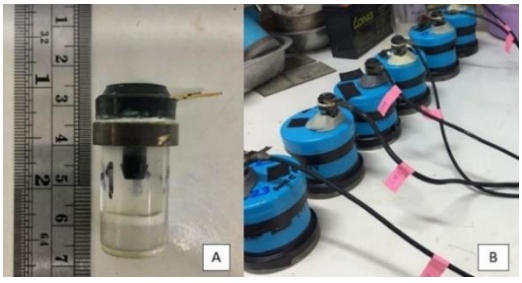
ในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่เก็บมาจากภาคสนาม เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บมาสามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วงระดับความลึก คือ Upper, Middle และ Lower โดยในงานนี้จะเลือกใช้ดินเพียงสองช่วงความลึกนั่นก็คือ ชั้น Upper และ Middle เนื่องจากเป็นดินที่มีคุณสมบัติตรงกับหัวข้อในงานวิจัย คือเป็นดินที่มีส่วนผสมของดินเม็ดละเอียด โดยผลการทดสอบบ่งชี้ว่าดินทั้ง 2 ชั้นดังกล่าวเป็นดิน SC และดินในชั้น Lower นั้นเป็นดินจำพวก SM ซึ่งจัดเป็นดินเม็ดหยาบที่ไม่มีการผสมของดินเม็ดละเอียด โดยผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

สถานีตรวจวัดจังหวัดชัยนาท (HNKA)							
Layer	Depth (cm.)		Atterberg's Limits (%)			% Finer	USCS
	From	To	LL	PL	PI	#200	Group
UPPER	0	10	33.4	18.52	14.88	49.95	SC
MIDDLE	10	40	24.1	14.51	9.59	45.09	SC
LOWER	40	100	-	-	-	34.94	SM

2.5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบในส่วนของคุณสมบัติทางวิศวกรรมจะเป็นการทดสอบเพื่อหาเส้นอัตลักษณ์ของดิน หรือ Soil Water Characteristic Curve (SWCC) ซึ่งการทดสอบ SWCC จะสามารถบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของดินได้ ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดูด (Suction) และความชื้นในดิน เมื่อดินเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การสูญเสียความชื้น (ดินแห้ง) และปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (ดินเปียก) โดยในส่วนนี้จะใช้การทดสอบในส่วนของดินแห้ง (Drying path) เนื่องจากในงานนี้จะมุ่งเน้นถึงการศึกษาเกี่ยวกับรอยแตกในดินซึ่งเกี่ยวกับการแห้งระเหยของความชื้น โดยในการทดสอบจะใช้อุปกรณ์ KU-Tensiometer ชนิดแรงดูดต่ำ (Low Suction) เพื่อใช้ในการวัดค่าแรงดันน้ำด้านลบซึ่งพัฒนาโดย อภินิติ และ วิษณุพงศ์ (2551) ด้วยการ ประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดแรงดันซึ่งเป็นเทคโนโลยีระดับจุลภาค (MicroElectro- Mechanical Systems Technology, MEMS) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ชนิด Single Silicon Piezoresistive ที่ให้ผลการตรวจวัดที่มีความไวสูง โดยขณะที่ ทำการทดสอบภายในอุปกรณ์ทุกส่วนต้องมีน้ำบรรจุอยู่เต็มช่องว่าง ปราศจากฟองอากาศ ซึ่งหากภายในอุปกรณ์มีฟองอากาศเกิดขึ้นจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพการส่งถ่ายแรงดึงลดลง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการทดลองได้หลากหลายเนื่องจากเซ็นเซอร์มีขนาดเล็กโดยมีช่วงวัดแรงดึงดูดที่สามารถใช้งานได้ดีอยู่ในช่วง 0 – 90 กิโลปาสคาล หรือ 0.0 – 0.9 บาร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของเซ็นเซอร์และค่า Air Entry Value ของถ้วยหินพรุนที่นำมาใช้ในการทดสอบ (ณัฐสิทธิ์, 2563) ลักษณะของ KU-Tensiometer และการทดสอบ SWCC แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 KU-Tensiometer (A) และการทดสอบ SWCC (B)

2.5.3 การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความชื้นเป็นการทดสอบที่จัดทำขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอ่านกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นที่มีหน่วยวัดเป็น มิลลิแอมป์ กับเปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตรของดิน เนื่องจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดที่ใช้ในภาคสนามไม่สามารถอ่านค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นความชื้นของดินได้โดยตรง จึงต้องทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์จากหน่วยวัดทั้งสองชนิดเพื่อการนำเอาค่าอ่านกระแสไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดไปแปลงเป็นเปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตรของดิน จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบ โดยในการทดสอบจะจำลองการติดตั้งเซ็นเซอร์ในดินให้มีความใกล้เคียงกับสภาวะในภาคสนามให้มากที่สุด โดยการบดอัดดินในโมลอะคริลิคทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ความหนาแน่นแห้งในธรรมชาติ แล้วทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นทั้งหมด 3 จุด ที่ระดับความชื้นที่ต่างกันตั้งแต่ 10-30% และอีก 1 จุดที่ระดับเข้าใกล้ความอิ่มตัวด้วยน้ำจากการแช่ตัวอย่างในน้ำ (Soak) หลังการบดอัดที่ความชื้นสุดท้าย ลักษณะของการบดอัดและการตรวจวัดแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งในขณะที่ทำการบดอัดจะทำการติดตั้ง Dummy sensor ที่ช่องเปิดของโมลอะคริลิกแทนการติดตั้งเซ็นเซอร์จริงเพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายขณะทำการบดอัด

รูปที่ 6 การบดอัดดินตัวอย่างเพื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

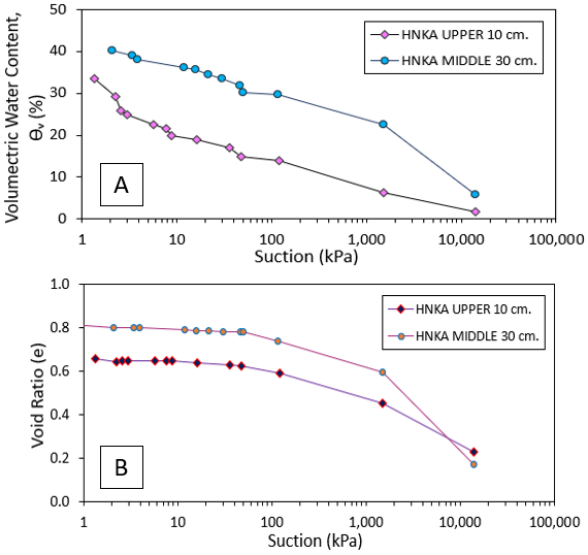
ผลที่ได้สามารถบ่งชี้ว่าเซ็นเซอร์ที่นำมาใช้งานสามารถอ่านค่าได้อย่างแม่นยำมีความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรงโดยที่กำหนดให้ θ คือ ความชื้นโดยปริมาตรของดิน และ mA คือ ค่าอ่านในรูปแบบกระแสไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ โดยมีค่า R^2 อยู่ที่ 0.980 ในดินชั้น Upper และ 0.987 ในชั้น Middle โดยหลังจากนี้จะนำความสัมพันธ์ที่ได้จากการสอบเทียบดังกล่าวมาใช้ในการแปลงค่าอ่านที่อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่ได้ติดตั้งไว้ที่ภาคสนามให้กลายมาเป็นความชื้นของดินในรูปแบบของเปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตร เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปสอบเทียบร่วมกับข้อมูลความชื้นจากดาวเทียม SMAP ในลำดับต่อไป

2.5.4 ข้อมูลความชื้นจากดาวเทียม SMAP

ในการได้มาซึ่งข้อมูลความชื้นจากดาวเทียม SMAP จำเป็นจะต้องเข้าไปโหลดข้อมูลจากทางเว็บไซต์ที่ให้บริการของทาง NASA โดยข้อมูลที่ได้มานั้นจะอยู่ในรูปของไฟล์ .h5 ซึ่งต้องใช้ซอฟแวร์เฉพาะทางในการเปิดไฟล์ข้อมูล โดยข้อมูลที่ได้มาจะอยู่ในรูปของความชื้นในหน่วย m^3/m^3 ซึ่งข้อมูลจากดาวเทียม SMAP นั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายระดับตั้งแต่ Level 1 ไปจนถึง Level 4 โดยจะแบ่งตามความละเอียด [illegible] ข้อมูลที่นำมาใช้สำหรับในการวิเคราะห์ของงานนี้นั้นจะเลือกใช้เป็นข้อมูลจาก SMAP Level 2 หรือ SMAP radiometer/Copernicus Sentinel-1 soil moisture (L2_SM_SP) เป็นข้อมูลที่มีความละเอียดอยู่ที่ 3 กิโลเมตร ในการจะนำข้อมูลความชื้นจากระบบดาวเทียมในส่วนนี้มาใช้นั้นจะต้องทำการแปลงหน่วยความชื้นให้มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็น (%) ให้ตรงกันกับความชื้นที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม โดยจะต้องทำการคำนวณร่วมกับ ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel เพื่อให้มีความละเอียดอยู่ที่ 1 กิโลเมตร ซึ่งเป็1

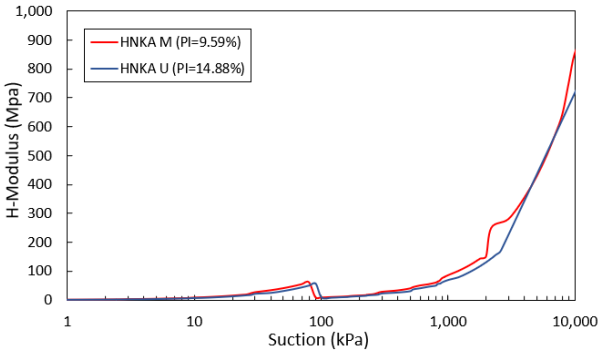
3.1.2 เปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตรและอัตราส่วนช่องว่าง

สำหรับในส่วนของเปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตรและอัตราส่วนช่องว่าง ของดินชั้นดินที่ 1 และ ชั้นดินที่ 2 นั้นค่อนข้างที่จะมีความคล้ายคลึงกันในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดกับปริมาณความชื้นโดยปริมาตร แสดงในรูปที่ 8A และค่า อัตราส่วนช่องว่างในดิน แสดงในรูปที่ 8B ของตัวอย่างดินในช่วงแรงดึงดูด 0 – 100,000 kPa พบว่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 มีความคล้ายคลึงกัน เมื่อตัวอย่างดินค่อยๆแห้ง แรงดึงดูดจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความชื้นโดยปริมาตรของดิน และอัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ก่อนจะมีค่าคงที่ในช่วงแรงดึงดูด 14,012 kPa



รูปที่ 8 ผลการทดสอบ SWCC โดยที่ (A) พลอตระหว่าง เปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตร - แรงดูดในดิน และ (B) พลอตระหว่าง อัตราส่วนช่องว่าง - แรงดูดในดิน

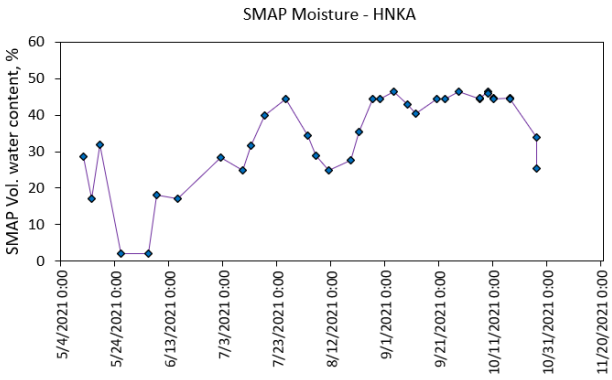
ลักษณะการลดลงของความชื้นโดยปริมาตรและอัตราส่วนช่องว่างจะเป็นการลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีส่วนผสมของดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียด (SC) โดยหลังจากได้ทำการทดสอบ SWCC ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาค่ามอดูลัสของการดูด (H-modulus) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3 เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความลึกของรอยแตกโดยผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณเป็นไปตามแนวโน้มของค่า Suction คือเมื่อค่า Suction มีการเพิ่มสูงขึ้น ค่า H-modulus ก็จะมีค่าที่สูงขึ้นตาม และผลที่ได้ยังเป็นไปตามแนวโน้มของค่า Plasticity Index (PI) โดยจะแปรผกผันกับค่า PI ของดินตัวอย่างดังกล่าว แต่จากกราฟจะเห็นว่ามีช่วงที่มีการลดค่าลงประมาณค่าแรงดูดที่ 100 kPa เนื่องจากเป็นช่วงเปลี่ยนความชันของอัตราส่วนช่องว่างจากพฤติกรรมการหดตัวของการคายความชื้น



รูปที่ 9 ผลการคำนวณค่า H-modulus ของดินตัวอย่าง

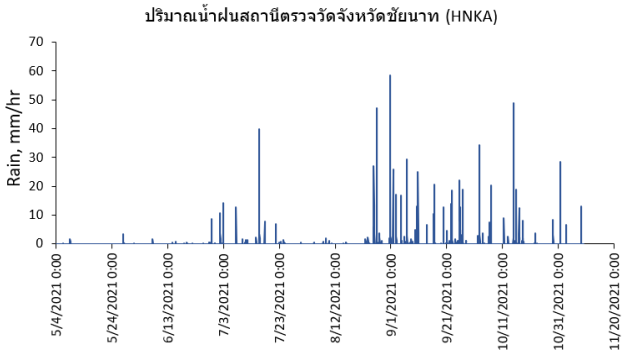
3.2 ผลการสอบเทียบข้อมูลความชื้นระหว่างดาวเทียม SMAP และ TDR

ข้อมูลความชื้นที่ได้จากการตรวจวัดของดาวเทียม SMAP แสดงในรูปที่ 10 โดยผลจากการตรวจวัดได้ให้แนวโน้มของค่าความชื้นในบริเวณพื้นที่ทดสอบสอดคล้องกับความชื้นที่มาจากปริมาณน้ำฝน ตั้งแต่ช่วงเดือน พฤษภาคม ถึง เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2564 โดยความชื้นในช่วงเดือน พฤษภาคม จนถึงเดือน มิถุนายน ที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำเส้นกราฟแสดงค่าความชื้นจากดาวเทียมแสดงการลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากมีปริมาณฝนตกน้อย โดยมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในช่วงเดือนดังกล่าวไม่เกิน 10 mm/hr แสดงในรูปที่ 11 แต่ในช่วงตั้งแต่เดือน กรกฎาคม ถึงเดือน ตุลาคม ความชื้นของพื้นที่ทดสอบที่ตรวจวัดได้จากดาวเทียม SMAP มีค่าเพิ่มขึ้นสูงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 40- 45% โดยมีการลดลงของความชื้นในช่วงเดือน สิงหาคม เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ลดน้อยลง ค่าที่ตรวจวัดได้จากดาวเทียม SMAP จึงได้ให้ผลสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝนในช่วงเดือนดังกล่าว ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าการเก็บข้อมูลความชื้นจากระบบดาวเทียมให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดได้ในช่วงเวลาเดียวกัน

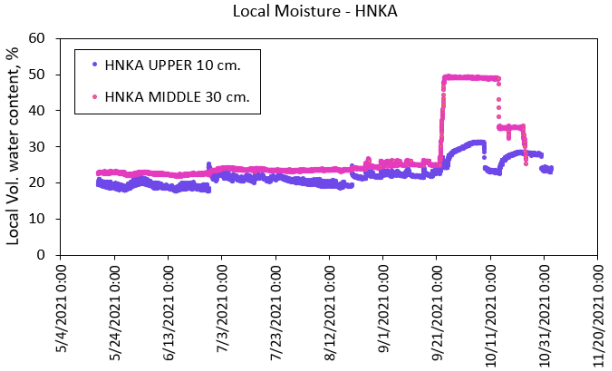


รูปที่ 10 ผลการตรวจวัดความชื้นจากดาวเทียม SMAP

ในส่วนของความชื้นจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้ติดตั้งในภาคสนามได้ให้ผลการตรวจวัดความชื้นของบริเวณพื้นที่ทดสอบสอดคล้องกับความเป็นจริงของลักษณะพื้นที่ คือเป็นพื้นที่ที่เป็นดินถมเคยผ่านการบดอัดทำให้ดินในบริเวณนี้มีความหนาแน่นสูงจึงทำให้การวัดค่าในช่วงแรกตั้งแต่ช่วงเดือน พฤษภาคม ไปจนถึงเดือน กันยายน ค่อนข้างที่จะมีความคงที่ในแง่ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเนื่องจากในช่วงเดือนดังกล่าวมีปริมาณฝนตกสะสมน้อย และประกอบกับการที่เป็นพื้นที่ที่เคยผ่านการบดอัดจึงยังไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความชื้นอย่างชัดเจนเท่าที่ควร แต่ในช่วงเดือน กันยายน จนถึงเดือน ตุลาคม เป็นช่วงเดือนที่มีฝนตกสะสมในปริมาณมากโดยมีปริมาณที่วัดได้สูงที่สุดอยู่ที่ 60 mm/hr ในเดือนกันยายน แสดงในรูปที่ 11 นั่นจึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่ตรวจวัดได้อย่างชัดเจน โดยความชื้นที่วัดได้ในช่วงความลึก 30 เซนติเมตร (Middle) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่าที่ความลึก 10 เซนติเมตร (Upper) เนื่องจากความชื้นของชั้นดินที่อยู่ลึกลงไปเริ่มมีอัตราคงที่เมื่อเทียบกับความชื้นที่บริเวณผิวดิน โดยผลการตรวจวัดข้อมูลความชื้นจากภาคสนามแสดงในรูปที่ 12



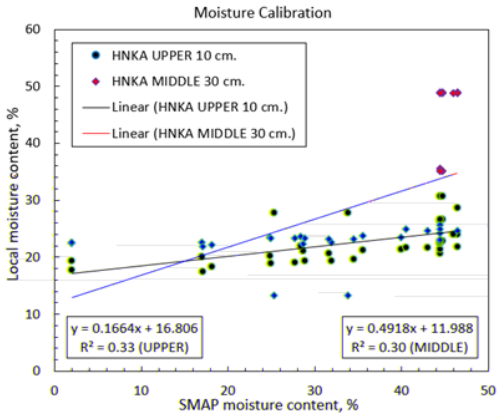
รูปที่ 11 ปริมาณน้ำฝนของพื้นที่ทดสอบจังหวัดชัยนาท



รูปที่ 12 ผลการตรวจวัดความชื้นจากอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม

ผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าความชื้นจากทั้งสองแหล่งที่มาคือจากระบบดาวเทียม SMAP และจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นภาคสนาม จะได้นำมาทำการสอบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อมูลจาก SMAP และหาความสัมพันธ์ของข้อมูลจากทั้งสองแหล่งที่มาซึ่งจะเห็นว่าผลการสอบเทียบข้อมูลความชื้นของพื้นที่ทดสอบทั้ง 2 ระดับ คือชั้น Upper 10 เซนติเมตร และในชั้น Middle 30 เซนติเมตร ให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างสมเหตุสมผลและสามารถที่จะเห็นความเป็นไปได้ของแนวโน้มที่เกิดขึ้นโดยปรากฏให้เห็นแนว trend line จากผลการทดสอบที่มีความน่าพึงพอใจสำหรับข้อมูลตรวจวัดจากดาวเทียมที่มีการกระจายตัวสูง (Zhang et al. 2017)

อย่างไรก็ตามจากผลการสอบเทียบมีสิ่งที่น่าสนใจก็คือ ในส่วนของความชื้นของดินในบริเวณพื้นที่ทดสอบจากการตรวจวัดโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดที่ภาคสนามได้แสดงให้เห็นถึงความชื้นคงค้างของดินที่ยังคงหลงเหลืออยู่ถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาวะที่มีการแห้งแล้ง โดยความชื้นคงค้างจากดินทั้งสองชั้น Upper และ Middle แสดงค่าความชื้นดังกล่าวอยู่ที่ 18% และ 12% ตามลำดับ ผลการตรวจวัดจากดาวเทียมได้บ่งชี้ว่าที่บริเวณผิวดินความลึกไม่เกิน 10 เซนติเมตร มีความชื้นค่อนข้างต่ำแต่สามารถตรวจพบความชื้นในระดับที่อยู่ลึกลงไป ณ ที่ความลึก 10 เซนติเมตร และที่ความลึก 30 เซนติเมตร ซึ่งผลการสอบเทียบได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) อยู่ที่ 0.33 และ 0.30 ตามลำดับ ผลการสอบเทียบแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลการสอบเทียบความชื้นระหว่างข้อมูลจาก SMAP และ TDR

จากผลการสอบเทียบของชุดข้อมูลความชื้นจากทั้ง ระบบเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) ซึ่งใช้ดาวเทียม SMAP ในการเก็บข้อมูลและข้อมูลความชื้นที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นที่ได้ทำการติดตั้ง ณ ภาคสนาม โดยผลจากการวิเคราะห์สามารถสรุปความสัมพันธ์ของข้อมูลความชื้นจากทั้งสองแหล่งที่มาได้ในรูปของสมการเชิงเส้นโดยมีการกำหนดตัวแปรอิสระ (Independent Variable, x) และ ตัวแปรตาม (Dependent Variable,y) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ 4

$$\theta_{Local} = m\theta_{SMAP} + c \quad (4)$$

โดยที่ θ_{Local} คือความชื้นโดยปริมาตรจากภาคสนาม θ_{SMAP} คือความชื้นโดยปริมาตรจากดาวเทียม SMAP ซึ่งตัวแปร m และ c จะได้มา

จากการทำนายโดยใช้คุณสมบัติของดินจากการทดสอบ ด้วยวิธี Multiple linear regression

3.3 ผลการจำลองการประมาณค่าความลึกของรอยแตกในดิน

จากทฤษฎี Elastic equilibrium แสดงในสมการที่ 1 (Fredlund and Rahardjo, 1993) และจากทฤษฎีกลไกการแตกร้าวของดิน ซึ่งส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการลด Horizontal stress หรือเมื่อมีการ Unloading เกิดขึ้น เนื่องจากดินมีลักษณะยืดหยุ่น นอกจากนี้ดินที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวจะมีพฤติกรรมแบบไอโซโทรปิกมากกว่าดินลึก ดังนั้น จึงพิจารณาแบบจำลองยืดหยุ่นไอโซโทรปิกโดยกำหนดให้ ε_h และ σ_v, u_a เท่ากับ 0 และกำหนดให้ $\psi = u_a - u_w$ คือแรงดูดในดิน จะสามารถจัดรูปสมการที่ 1 ได้โดยแสดงในสมการที่ 5

$$\sigma_h = -\frac{E}{H(1-\mu)}\psi \tag{5}$$

ซึ่งมีเงื่อนไขว่าสภาพพื้นดินเริ่มต้นอิ่มตัวและ Suction = 0 โดย Initial horizontal stress สามารถคำนวณได้จากพจน์ $k_0\gamma Z_c$ โดยที่ k_0 คือ Coefficient of earth pressure at rest, γ คือ Total unit weight of soil และ Z_c คือ ความลึกของดินที่เกิดรอยแตก การพิจารณา k_0 จะคำนวณโดยใช้สมการของ Jaky's แสดงในสมการที่ 6

$$k_0 = 1 - \sin\phi' \tag{6}$$

โดยที่ ϕ' คือ Friction angle ซึ่งแรงดูดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ Horizontal stress ลดลงจนถึงจุดที่กลายเป็นลบและเท่ากับความต้านทานแรงดึงของดิน (σ_t) เป็นผลให้เกิดรอยแตกร้าวจากพื้นผิวลงสู่ระดับความลึก Z_c จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของ Horizontal stress กลายเป็น $k_0\gamma Z_c + \sigma_t$ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าความลึกรอยแตกจึงสามารถจัดรูปใหม่จากสมการที่ 5 แล้วแสดงได้ในสมการที่ 7

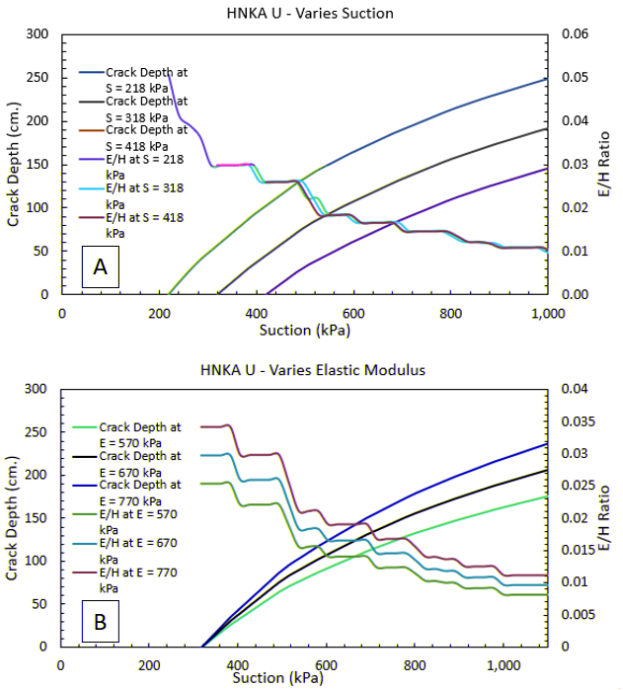
$$Z_c = \frac{E}{k_0\gamma H(1-\mu)}\psi - \frac{\sigma_t}{k_0\gamma} \tag{7}$$

จากผลการสอบเทียบความชื้นระหว่างข้อมูลตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP และ อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นภาคสนาม (รูปที่ 13) และผลจากการทดสอบ SWCC ในส่วนของความชื้นโดยปริมาตรและแรงดูดในดิน (รูปที่ 8A) ของตัวอย่างดินทั้ง 2 ตัวอย่าง สามารถนำความชื้นจากระบบดาวเทียม SMAP มาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองในการประมาณค่าความลึกรอยแตกได้ เนื่องจาก ผลการสอบเทียบของข้อมูลจาก SMAP และจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ช่วงของความชื้นที่ต้องการได้ แล้วนำช่วงความชื้นนั้นไปหาความชื้นจากภาคสนามซึ่งเป็นเปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตรในความสัมพันธ์ของการสอบเทียบเดียวกัน แล้วจากนั้นจึงจะนำช่วงความชื้นที่ได้จากความสัมพันธ์สอบเทียบนี้ ไปเทียบกับเปอร์เซ็นความชื้นโดยปริมาตรจากการทดสอบ SWCC อีกครั้งเพื่อหาช่วงของ Suction ที่เปลี่ยนแปลงไป ($d\psi$) เพื่อใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง โดยในการวิเคราะห์ได้เลือกใช้ช่วงความชื้นจาก SMAP ในช่วง 35-45% โดยในชั้น Upper จะได้ช่วง θ_{Local} = 23-25% และ 30-35% ในชั้น Middle จากนั้นนำช่วงความชื้นจากภาคสนามที่ได้ไปเทียบกับ ความชื้นโดยปริมาตรของ SWCC จะได้ค่าแรงดูดที่เปลี่ยนแปลงไป ($d\psi$) ในช่วงความชื้นนั้นของดินทั้ง 2 ชั้น เท่ากับ 6 kPa และ 27 kPa โดยคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบติของดินตัวอย่างที่ใช้ในกาวิเคราะห์ความลึกของรอยแตก

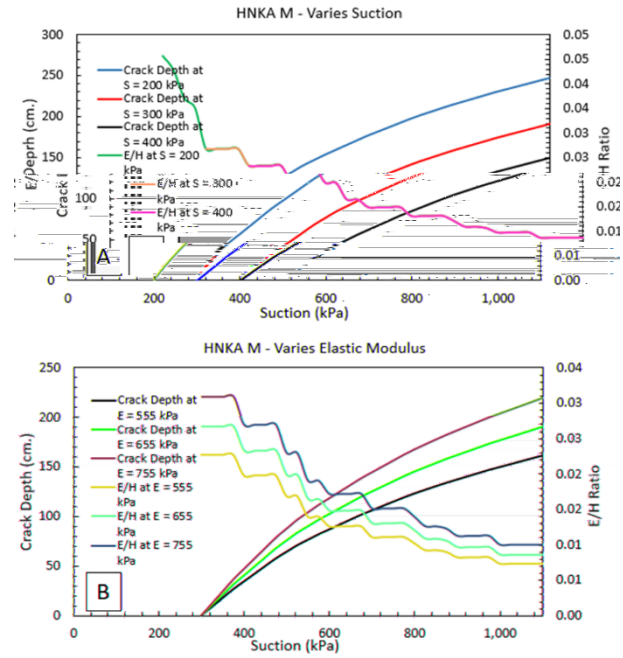
Properties	Soil samples		Units
	Upper	Middle	
Suction value of the crack	318	300	kPa
H-modulus	11,083	9,023	kPa
k_0	0.52	0.55	-
Poisson's ratio, μ	0.35	0.37	-
Young's Modulus, E	670	655	kPa
Total unit weight, γ	19.8	18.5	kN/m^3

และผลการวิเคราะห์การประมาณค่าความลึกของรอยแตกจะคำนวณโดยการใช้สมการที่ 7 ในการวิเคราะห์จะทำโดยการจำแนกตามคุณสมบัติของดินแต่ละชั้นที่แสดงในตารางที่ 2 โดยในการวิเคราะห์ จะทำการทดลองสมมุติค่า Suction และ E ให้ครอบคลุมช่วงที่เป็นไปได้ โดยในดินชั้น Upper และ Middle ได้กำหนดสมมติฐานให้ Suction ที่ทำให้เกิดรอยแตกเท่ากับ 318 และ 300 kPa และค่า E ที่ได้เท่ากับ 670 และ 655 kPa ตามลำดับ ซึ่งในการวิเคราะห์เพื่อจำลองการเกิดรอยแตก จะทำการสมมุติค่า Suction และ E ขึ้นมาเพิ่ม ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการที่จะทำให้เกิดรอยแตก เพื่อให้เห็นความแตกต่าง ของระดับความลึกรอยแตกที่จะเกิดขึ้นจากช่วงของค่า Suction และ E ดังกล่าว ซึ่งค่า Suction และค่า Modulus เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการทำให้เกิดรอยแตก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติด้านความแข็งและความยืดหยุ่นของดิน โดยในชั้น Upper ได้ทดลองกำหนดค่า Suction คือที่ 218, 318 และ 418 kPa ตามลำดับ และค่า E อยู่ในช่วง 570, 670 และ 770 kPa ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ความลึกรอยแตกของดินชั้น Upper (A) วิเคราะห์โดยการกำหนดค่า Suction และ (B) วิเคราะห์โดยการกำหนดค่า E - modulus

ซึ่งในดินชั้น Middle ก็ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ในแบบเดียวกัน คือ กำหนดค่า Suction ในช่วง 200, 300 และ 400 kPa ตามลำดับ และในช่วงค่า E กำหนดที่ 555, 655 และ 755 kPa ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความลึกรอยแตกของดินชั้น Middle (A) วิเคราะห์โดยการกำหนดค่า Suction และ (B) วิเคราะห์โดยการกำหนดค่า E - modulus

ซึ่งในผลการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบความลึกของการเกิดรอยแตกและอัตราส่วน E/H จากการคำนวณในแต่ละช่วงของค่า Suction และ E ที่ได้มีการกำหนดขึ้นมา เนื่องจากอัตราส่วน E/H เป็นอัตราส่วนที่มีผลและเกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกในดิน ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Suction จากผลการวิเคราะห์ในดินชั้น Upper ในกรณีของการ Varies suction รูปที่ 14A จะเห็นว่าความลึกของรอยแตกมีค่าเพิ่มมากขึ้นในทุกๆช่วงของค่า Suction ที่กำหนดแต่จะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออยู่ในช่วงของค่า Suction เริ่มต้นที่เพิ่มมากขึ้นโดยความลึกของรอยแตกที่ได้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 145-250 เซนติเมตร และค่าอัตราส่วน E/H มีค่าลดลงในทุกๆการกำหนดค่า Suction เริ่มต้น โดยการลดลงจะลดลงในลักษณะที่อยู่ในช่วงเดียวกันเส้นกราฟจึงแสดงออกมาในลักษณะของแนวเส้นที่ทับกันดังแสดงในรูป ในส่วนของกรณี Varies elastic modulus รูปที่ 14B ในการกำหนดค่า E ต่างๆกันและใช้ค่า Suction เริ่มต้นที่เกิดรอยแตกมีค่าคงที่ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน E/H ซึ่งมีค่าลดลงปรากฏให้เห็นชัดทั้ง 3 ช่วงตามระดับของค่า E ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ค่าความลึกของรอยแตกเพิ่มขึ้นตามค่า Suction และค่า E ที่ได้ทดลองกำหนดใช้ในการวิเคราะห์โดยค่าความลึกที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 170 - 235 เซนติเมตร เนื่องจากค่า E มีผลต่อความแข็งและความยืดหยุ่น การที่ค่าความลึกรอยแตกมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการกำหนดค่า E นั่นจึงหมายความว่าค่า E เป็นตัวบ่งบอกถึงความแข็งหรือแห้งของดินที่เพิ่มมากขึ้นจากการสูญเสียความชื้นจึงปรากฏให้พบรอยแตกดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์ในชั้น Middle นั้นให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ในชั้น Upper โดยในรูป 15A แสดงการวิเคราะห์โดยใช้การ Varies suction ค่าความลึกรอยแตกเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดูดที่กำหนดโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 150 - 245 เซนติเมตร อัตราส่วน E/H ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกรอยแตกอันมีผลมาจากค่า Suction และรูป 15B ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ในกรณี Varies elastic modulus แสดงให้เห็นว่าความลึกของรอยแตกมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากลักษณะพฤติกรรมของค่าอีลาสติกมอดูลัสซึ่งใช้ในการวิเคราะห์โดยค่าความลึกที่ได้อยู่ระหว่าง 160-220 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากความยืดหยุ่นและความแข็งเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจนเกิดเป็นรอยแตกขึ้นในดิน

นอกจากนี้ยังพบว่าผลการวิเคราะห์การประมาณค่าความลึกรอยแตกของดินทั้ง 2 ชั้น ที่ค่า Suction เดียวกันนั้น ความลึกของรอยแตกจะเกิดขึ้นในดินชั้น Upper มากกว่าชั้น Middle เนื่องจากดินชั้น Upper นี้มีค่า PI = 14.88% ซึ่งมากกว่าดินชั้น Middle ที่มีค่า PI = 9.59% นั่นจึงหมายความว่าความลึกรอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นมีความเกี่ยวพันกับคุณสมบัติการอุ้มความชื้น โดยดินที่มีความสามารถในการอุ้มความชื้นได้ดีกว่า จะแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวออกมาได้ชัดเจนกว่าดินที่มีศักยภาพในการอุ้มความชื้นได้ต่ำ ซึ่งดินที่มีศักยภาพในการอุ้มความชื้นได้ดีก็จะจัดอยู่ในกลุ่มของดินเหนียว (Clay) หรือในดินเม็ดละเอียดที่มี Clay content รวมอยู่ด้วย

4. สรุปผลการศึกษา

4.1 การสอบเทียบข้อมูลความชื้นจากดาวเทียม SMAP และ TDR

สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลความชื้นจากอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม หรือ TDR และข้อมูลตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP นำมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกันโดยผ่านทางการสอบเทียบ ซึ่งผลจากการสอบเทียบได้บ่งชี้ว่า ความสัมพันธ์จากการสอบเทียบข้อมูลระหว่างดาวเทียมและเซ็นเซอร์ตรวจวัดภาคสนาม ได้ให้ความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 4 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) อยู่ที่ 0.30 และ 0.33 จากการทดสอบด้วยดินจำนวน 2 ตัวอย่าง จากระดับความลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าค่า R^2 ที่ได้ มีค่าต่ำ เนื่องจากข้อมูลจากดาวเทียมนั้นมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสูง

4.2 การวิเคราะห์ความลึกรอยแตกในดินจากแบบจำลอง

ผลจากการสอบเทียบในหัวข้อที่ 4.1 ยังได้นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาความลึกของรอยแตกในดินโดยการใช้ช่วงความชื้นโดยปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม (θ_{Local}) โดยการกำหนดช่วงความชื้นของข้อมูลตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP (รูปที่ 13) มาใช้เทียบกับความชื้นโดยปริมาตร (θ_V) ที่ได้จากผลการทดสอบ SWCC (รูปที่ 8A) ณ ช่วงความชื้นเดียวกันแล้วทำการอ่านช่วงของค่า Suction ที่เปลี่ยนแปลงไป ($d\psi$) เพื่อใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง (สมการที่ 7) แสดงให้เห็นว่าความลึกของรอยแตกมีการเพิ่มขึ้นตามค่า Suction ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก Suction มีผลต่อการลดลงของ Horizontal stress จึงปรากฏให้เห็นเป็นรอยแตก และอัตราส่วน E/H มีการลดลงในลักษณะตรงกันข้ามกับการเพิ่มขึ้นของความลึกรอยแตก เนื่องจาก Suction มีผลทำให้ค่า H – modulus สูงขึ้น (รูปที่ 9) อัตราส่วน E/H จึงมีค่าลดลง โดยในผลการวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นอีกว่า ค่า E-modulus เป็นตัวบ่งบอกถึงความแข็งหรือความแห้งของดินที่เพิ่มมากขึ้นในกรณีของการสูญเสียความชื้น จึงปรากฏให้พบรอยแตกดังกล่าว

ซึ่งผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถนำไปใช้ประมาณค่าความลึกรอยแตกได้ โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองในขั้นตอนนี้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลความลึกรอยแตกที่วัดได้จริงในภาคสนาม (Shrestha et al. 2019) สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับหัวข้อนี้ในอนาคต เนื่องจากผลการศึกษาในบทความนี้ยังเป็นเพียงการนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์และดำเนินการโดยใช้การทดลองกำหนดค่า Suction at crack point และค่า E-modulus ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้เกิดรอยแตกที่ค่าต่างๆกัน (Varies parameter) สำหรับใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาให้เห็นถึงความแตกต่างของความลึกรอยแตกที่เกิดขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงที่มีผลมาจากปัจจัยดังกล่าว และจะได้รวบรวมเป็นข้อมูลปฐมภูมิสำหรับใช้เป็นแนวทางของการศึกษาในครั้งต่อไป ซึ่งในการศึกษาและวิจัยในครั้งต่อไปนั้นจะต้องมีการทดสอบให้ได้มาซึ่งค่าแรงดูด ณ จุดที่เกิดรอยแตก (Suction at crack point) ค่า Elastic modulus ของดินบริเวณที่พบรอยแตก และทำการวัดความลึกของรอยแตกที่พบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในแบบจำลอง

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางอันดีที่ทำให้บทความนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนสถานที่ของการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Shrestha,A.,Jotisankasa, A., Chaiprakaikeow, S., Pramusandi, S., Soralump, S., and Nishimura, S. (2019). Determining Shrinkage Cracks Based on the Small-Strain Shear Modulus–Suction Relationship. *MDPI Geosciences*, 22 August 2019, pp.520-526

[2] Zhang, X., Zhang, T., Zhou, P., Shao, Y., and Gao, S. (2017). Validation Analysis of SMAP and AMSR2 SoilMoisture Products over the United States Using Ground-Based Measurements. *MDPI Remote Sensing*, 25 January 2017 pp.23-232.

[3] Suchorab, Z., Widomski M.K., Lagod, G., and Barnat-Hunek, D. (2014). Methodology of Moisture Measurement in Porous Materials Using Time Domain Reflectometry. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, December 2014 pp. 473-478.

[4] Adelakun, I.A. and Sri Ranjan, R. (2013). Design of a Multilevel TDR Probe for Measuring Soil Water Content at Different Depths. *Transactions of the ASABE*, July 2013 pp. 575-580.

[5] ณัฐสิทธิ์ ทองเลิศ และ อภินิติ โชติสังกาศ (2563). ผลกระทบจากการรบกวนตัวอย่างดินต่อพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 410-417.

[6] อภินิติ โชติสังกาศ (2555). *เอกสารคำสอนวิชา 01203536 Unsaturated Soil Mechanics กลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 145-152.

[7] อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พ่อลิละ (2551). การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. *การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46*, กรุงเทพฯ, 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551, หน้า 48-55.