

การประยุกต์ใช้วัสดุไบโอชาร์ในการป้องกันการกัดเซาะและเสถียรภาพของเชิงลาด Application of Biochar Material for Erosion Protection and Slope Stability

ธนพ เหมือนเหล่า^{1,*} อภินิติ โชติสังกา² ศุภกิจ นนทานันท์³ สุรเชษฐ์ อร่ามรักษ์⁴

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; E-mail address: tananop.mu@ku.th

^{2,3} รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ E-mail address: fengatj@ku.ac.th, fengskn@ku.ac.th

⁴ รองศาสตราจารย์ สาขาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ E-mail address: agrscar@ku.ac.th.

บทคัดย่อ

การกัดเซาะเป็นประเด็นสำคัญที่ทำให้ทางลาดมีเสถียรภาพลดลง เนื่องจากในช่วงฤดูฝนจะเกิดการชะล้างหน้าดินและเกิดกัดเซาะเป็นร่องลึกบริเวณตีนลาด (Toe slope) อาจส่งผลให้ลาดดินเกิดการพังได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการใช้ถ่านไบโอชาร์จากซังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินที่มีการกัดเซาะสูง โดยทำการทดสอบการกัดเซาะของดินด้วยวิธี Submerged Jet Test (JET) และศึกษาพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำโดยการสร้างแบบจำลองคอลัมน์ดินในห้องปฏิบัติการ พื้นที่ศึกษาบริเวณเขตทางหลวง ทล.1192 ต.ท่าพระ อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่ โดยใช้ทฤษฎีระบบกั้นคาพิลลารี (Capillary barrier System) จากผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการผสมไบโอชาร์ที่มากขึ้น โดยปราศจากการบ่ม ทำให้การยึดเกาะอนุภาคของดินต่ำลงในช่วงแรก การจัดเรียงอนุภาคหลวมขึ้นเนื่องจากไบโอชาร์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง หากไม่มีการบ่มจะส่งผลให้เกิดการกัดเซาะมากกว่าดินที่ไม่ได้ผสมไบโอชาร์ และพบว่าการใช้ระบบกั้นคาพิลลารีช่วยลดการแทรกซึมของน้ำได้ในช่วงแรก จึงควรบรรจุดินที่ได้รับการปรับปรุงในวัสดุจีโอเซล (Geocell) ในลักษณะของระบบกั้นคาพิลลารี ซึ่งส่งผลให้เสถียรภาพของลาดดินเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำฝนเกิดค่าวิกฤติซึ่งมีการไหลซึมทะลุผ่านชั้นคาพิลลารี และเสถียรภาพของลาดมีค่าลดลง

คำสำคัญ: การกัดเซาะ, ไบโอชาร์, ระบบกั้นคาพิลลารี, การไหลซึม

Abstract

Erosion is an important issue that reduces slope stability and causes failure. During the rainy season, soil erosion especially near slope toe are likely to result in slope failure. The study aims to evaluate the use of biochar from corn cobs to improve soil erodibility. A soil erosion test was conducted using the Submerged Jet Test (JET) and the 1D seepage behavior was studied using a vertical soil column on soil collected in the study area of the highway area. 1192, Tha Phra Subdistrict, Mae Cham District. Chiang Mai, based on the capillary barrier system (CBS)

theory. The results however show that by adding more biochar without curing time, the erodibility of the soil was increased. Therefore, in order to use biochar to promote plant growth in the capillary barrier system, some container like geocell should be used to contain the soil-biochar mix to increase stability. However, a critical rainfall was found that can cause the water to penetrate the barrier.

Keywords: Erosion, Biochar, Capillary Barrier System, Infiltration

1. คำนำ

การกัดเซาะของดินส่งผลอย่างมากต่อเสถียรภาพของลาดดิน และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้อาศัยบริเวณใกล้เคียงได้ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงได้สนใจการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ไบโอชาร์ เพื่อลดการกัดเซาะที่ผิวลาดดิน, รักษาความชื้น และชะลอไม่ให้น้ำฝนแทรกซึมไปถึงด้านล่างร่วมกับการใช้ทฤษฎีระบบกั้นคาพิลลารี (Capillary Barrier System, CBS) โดยสร้างแบบจำลองคอลัมน์ดินเพื่อจำลองลาดดินภายใต้สภาวะฝนตกในห้องปฏิบัติการ และทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ โดยพิจารณาดินในพื้นที่เขตทางหลวง 1192 ต.ท่าพระ อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่ (กรณีศึกษา) โดยอ้างอิงข้อมูลน้ำฝนที่ตรวจวัดในสนามเป็นเวลา 3 เดือน และนำผลการศึกษาที่ได้ไปพัฒนาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีการกัดเซาะสูง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพ และลดความเสี่ยงในการเกิดการพัง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการกัดเซาะของดินที่ผสมด้วยไบโอชาร์โดยเครื่องมือทดสอบ Submerged Jet Device ซึ่งได้ถูกดัดแปลงเพื่อให้สามารถทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สุรดี, 2565) และได้มีการพัฒนาเครื่องมือคอลัมน์ดินที่สามารถจำลองเหตุการณ์น้ำฝนที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม โดยใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ ซึ่งการทดสอบคอลัมน์ดินในห้องปฏิบัติการได้ดำเนินการโดยการใช้ข้อมูลดิน ปริมาณน้ำฝน ความหนาแน่นดินจากพื้นที่ทางหลวง 1192 ต.ท่าพระ อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่ เพื่อ

ดูพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผิวน โดยมีการใช้ทฤษฎีระบบกันคาพิลารี (capillary barrier system) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลซึม และเสถียรภาพของลาดดินจากแบบจำลอง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการกัดเซาะที่ผิวของลาดดิน (Erosion surface of soil slope) เป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในทางานวิศวกรรมและเป็นอีกหนึ่งปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายในพื้นที่บริเวณโดยรอบได้ ความรุนแรงของน้ำผิวนมีผลอย่างมากต่อการกัดเซาะที่ผิวและเสถียรภาพของลาดดิน จากปัญหาดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงมีความคิดริเริ่มที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีการกัดเซาะสูงด้วยไบโอชาร์ ซึ่งเป็นถ่านชีวภาพที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินให้มีความอุดมสมบูรณ์ขึ้นได้ (Jien, 2013) นอกจากนี้ น้ำฝนจะทำให้เกิดการกัดเซาะหน้าดินของลาดดินแล้ว การไหลซึมลงสู่ชั้นดินเป็นอีกหนึ่งสาเหตุสำคัญส่งผลให้แรงดันน้ำในดินเพิ่มสูงขึ้นจากสภาวะติดลบเป็นบวกส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลง ทำให้เกิดการพิบัติได้ จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการแทรกซึมของน้ำฝน ที่อาจส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.1.1 การใช้ไบโอชาร์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

การใช้วัสดุไบโอชาร์ปรับปรุงคุณภาพดินส่วนมากจะมีการใช้งานในเชิงเกษตรกรรม เช่น การเพาะปลูก การกักเก็บธาตุของสารอาหารของพืช เป็นต้น แต่ในเชิงวิศวกรรมยังไม่มีให้พบเห็นมากนัก มีนักวิจัยมากมายได้ศึกษาพฤติกรรมของไบโอชาร์ที่ปรับปรุงคุณภาพดิน โดย ทิวา และคณะ (2559) ได้ศึกษาการใช้ถ่านไบโอชาร์จากตอซังและฟางข้าว พบว่า ถ่านไบโอชาร์ที่ได้ผสมกับดินทราย สามารถอุ้มน้ำได้มากถึง 80% และเก็บความชื้นได้นาน 104 ชั่วโมง

Shih-Hao Jien (2013) ได้ศึกษาการใช้ถ่านไบโอชาร์ที่ทำจากเศษไม้ของต้นตะกั่วขาวผสมกับดินในพื้นที่ที่มีการกัดเซาะสูง ในอัตราส่วน 0, 2.5 และ 5% โดยน้ำหนัก โดยทำการบ่มเป็นเวลา 105 วันเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเมื่อเวลาผ่านไป และมีการจำลองสภาวะน้ำฝน 80 มม./ชั่วโมง เพื่อประเมินการกัดเซาะของดิน ซึ่งผลวิจัยพบว่าการผสมดินด้วยถ่านไบโอชาร์นั้นช่วยลดความเป็นกรดของดิน (ลด pH) มีความหนาแน่นรวมลดลง และช่วยลดการกัดเซาะของดินได้ถึง 50% และ 64% สำหรับดินที่ผสมไบโอชาร์ในอัตราส่วน 2.5% และ 5% โดยน้ำหนัก

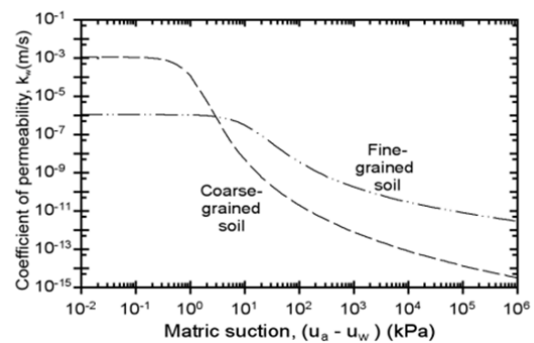
Pengfei Yu et. al, (2021) ได้ศึกษาการใช้ถ่านไบโอชาร์จากฟางข้าวโพด โดยผสมกับดินที่อัตรา 0, 6 และ 12 กก./ตรม. โดยน้ำหนัก บนเนินลาด 1.8°, 3.6°, 5.4° และ 7.2° และผลกระทบต่อการไหลบ่าของดินและอัตราการกัดเซาะ (erosion) ของดินของพื้นที่เพาะปลูก ผลการวิจัยพบว่าการเติมไบโอชาร์ขนาด 6 และ 12 กก./ตรม. ปริมาณน้ำอิ่มตัวของดินเพิ่มขึ้น 24.17 และ 42.91% อัตราส่วนของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้การไหลบ่าลดลงเล็กน้อย และการกัดเซาะของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษานี้พบว่าไบโอชาร์สามารถใช้เป็นการป้องกันการกัดเซาะของดินพื้นที่เพาะปลูกที่ลาดเอียง

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้านไบโอชาร์ที่ทำจากซังข้าวโพด โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิโดยรวม 700 องศาเซลเซียส เมาโดยใช้เตา 200 ลิตร (ข้อมูลจาก Warm Heart Worldwide)

2.1.2 ระบบกันคาพิลารี (Capillary Barrier System, CBS)

วิธีป้องกันหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับดินถมที่เกิดจากน้ำผิวนคือการใช้ระบบกันคาพิลารี (CBS) เป็นการนำดินชั้นเม็ดละเอียดวางทับดินชั้นเม็ดหยาบ ระบบกันคาพิลารีเป็นการปกคลุมทางลาด ซึ่งสามารถลดการแทรกซึมของน้ำผิวนเข้าสู่ทางลาดได้อย่างมีนัยสำคัญ และรักษาลาดดินให้อยู่ในสภาพที่ปลอดภัย นอกจากนี้ การใช้ระบบกันคาพิลารีเพื่อรักษาเสถียรภาพทางลาดเป็นมาตรการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้วิธีนี้ทำให้สามารถใช้ดินในท้องถิ่นสำหรับระบบกันคาพิลารี และพืชสามารถเติบโตได้บนเชิงลาดเหนือคันทางซึ่งมักเป็นหินผุซึ่งพืชพรรณขึ้นได้ยาก

Rahardjo (2004) ได้เสนอ CBS โดยทั่วไปจะเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและทำงานเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำเป็นลบ ข้อกำหนดพื้นฐานสำหรับระบบปกคลุม (Soil cover) ที่กำหนดให้เป็น Capillary Barrier กล่าวคือต้องมีชั้นดินเม็ดละเอียดที่ไม่อิ่มตัววางทับชั้นเม็ดหยาบที่ไม่อิ่มตัว โดยมีคุณสมบัติทางไฮดรอลิกตัดกันอย่างเหมาะสม (กล่าวคือ SWCC และฟังก์ชันการซึมผ่าน (Permeability)) ความแตกต่างในคุณสมบัติทางไฮดรอลิกของชั้นดินเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบก่อให้เกิดความต้านทานไฮดรอลิก ซึ่งจะจำกัดการเคลื่อนที่ของน้ำที่ไหลลงด้านล่าง น้ำที่ซึมเข้าไปจะถูกกักไว้ในชั้นเนื้อละเอียดที่อยู่ด้านบน และป้องกันไม่ให้เคลื่อนเข้าสู่ชั้นเนื้อหยาบที่อยู่ข้างใต้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน และแรงดูดเมทริกซ์ ใน CBS (Rahardjo, 2004)

2.1.3 การกัดเซาะ (Erosion)

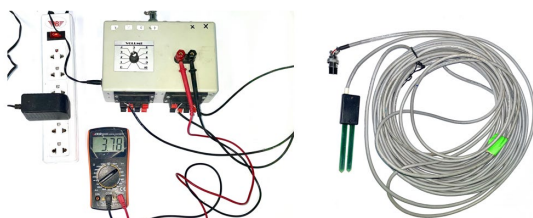
Semmad (2022) เสนอว่าการกัดเซาะเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมวลดินด้วยแรงดันหรือแรงทางกลศาสตร์ โดยเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของลาดดิน การกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อตลิ่งมีค่าเกินกว่าค่าความต้านทานการกัดเซาะของดิน สมการในการคำนวณค่าอัตราการกัดเซาะของดินเม็ดเนื่องจากการไหลของน้ำถูกนำเสนอโดยนักวิจัยหลายท่านดังแสดงในสมการที่ 1

$$\varepsilon_r = k_d (\tau_o - \tau_c)^a \quad (1)$$

เมื่อ ε คืออัตราการกัดเซาะ (Erosion rate, m/s), k_d คือสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility coefficient, $m^3 / N \cdot s$), τ คือค่าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, Pa), τ_c คือหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, Pa), และ a คือค่ายกกำลังเอกซิโพเนนเชียล โดยทั่วไปแล้ว พิจารณาให้เป็น 1 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดินเป็นตัวแปรสำคัญที่สามารถบอกถึงความสามารถในการต้านทานการกัดเซาะได้ ประกอบไปด้วยค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน

2.2 Time Domain Reflectometry

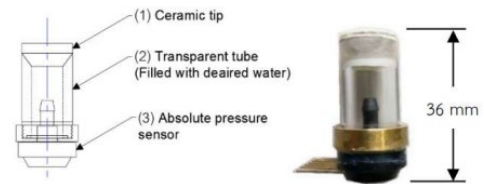
Time Domain Reflectometry (TDR) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความชื้น (Moisture sensor) ลักษณะโดยทั่วไปของ TDR ประกอบด้วยแท่งโลหะสองแท่งวางขนานกัน ต่อเข้ากับตัวรับสัญญาณไฟฟ้า ดินระหว่างแท่งโลหะนั้นจะทำหน้าที่เป็น Dielectric medium เมื่อทำการกระตุ่นสัญญาณ Step voltage pulse ให้เกิด Propagate ผ่านตัวกลางที่เป็นดิน คลื่นจะเดินทางไปยังปลายแท่งโลหะแล้วสะท้อนกลับ หลักการในการใช้ Time Domain Reflectometry (TDR) ในการวัดความชื้นของดินในสนาม คือ การใช้แท่งเหล็กหรือแท่งตัวนำ (rods) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณเสียบลงไปในดิน โดยแท่งตัวนำ (rods) จะทำหน้าที่เป็นตัวนำในขณะที่ดินโดยรอบนั้นจะเป็น dielectric หลังจากนั้นจะมีการส่งสัญญาณ เมื่อพบความต่างศักย์ของสัญญาณที่ได้รับอิทธิพลมาจากปริมาณน้ำ ในดินสัญญาณจะสะท้อนจากปลายแท่ง rods ไปที่เครื่องรับสัญญาณ ทางด้านวิศวกรรมปฐพีจะนิยมใช้สำหรับงานวัดความชื้นของดินในภาคสนามโดยจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ Data logger เพื่อทำการเก็บข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากเป็น Sensor ที่มีความแม่นยำและให้ค่าการตรวจวัดใกล้เคียงกับค่าความชื้นของตัวอย่างจากการคำนวณ Suchorab et al. (2014) และมีความทนทานสูงต่อสภาวะในภาคสนาม



รูปที่ 3 อุปกรณ์ Moisture sensor (TDR)

2.3 KU-Tensiometer

KU-Tensiometer เป็นเครื่องมือวัดแรงดึงน้ำของดินที่อยู่สภาวะสมดุลกับน้ำในกระเปาะที่มีหินรูพรุน โดยสามารถวัดแรงดูดได้เพียงในช่วงของแรงดูดเมทริกซ์ 0-90 kPa ซึ่งถ้าดินมีความชื้นต่ำและเริ่มแห้งดินจะค่อยๆดูดน้ำออกจากกระเปาะนั้นคือดินจะเริ่มมีสภาวะที่มีแรงดูดสูง (อภินิติ และวิษณุพงศ์, 2551) โดยรูปที่ 4 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัด KU-Tensiometer ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 4 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดูดน้ำในดิน KU-Tensiometer
ที่มา : ณัฐสิทธิ์ ทองเลิศ (2563)

2.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่มีกัดเซาะสูงในพื้นที่เขตทางหลวง ทล.1192 จังหวัดเชียงใหม่ และภาคมิลลิ่งยางมะตอยซึ่งเป็นวัสดุรีไซเคิลจากงานทาง สำหรับใช้เป็นชั้นวัสดุเม็ดหยาบในชั้น CBS โดยผลการทดสอบบ่งชี้ว่าดินดังกล่าวเป็นดินประเภท SC และ GW สำหรับดินในพื้นที่เขตทางหลวง ทล.1192 และภาคมิลลิ่งยางมะตอย ดังแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานไว้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 ตัวอย่างลาดดินที่มีการกัดเซาะสูงในพื้นที่เขตทางหลวง ทล.1192 จังหวัดเชียงใหม่ (a) และภาคมิลลิ่งยางมะตอยจากงานทาง (b)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

	Highway 1192	Milling Asphalt
Liquid Limit, LL (%)	24.31	NP
Plastic Limit, PL (%)	38.00	NP
Dry density, ρ_d (g/cm^3)	1.91	1.87
Optimum Moisture Content (%)	10.87	3.0
Specific Gravity, G_s	2.68	2.33
Saturated Permeability, K_s (cm/s)	2.41×10^{-6}	4×10^{-3}

2.4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดิน

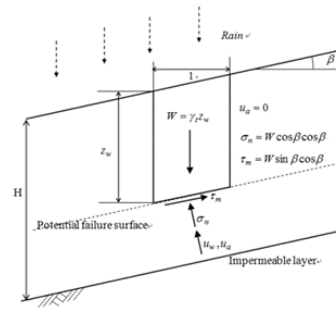
การทดสอบในส่วนของคุณสมบัติทางวิศวกรรมจะเป็นการทดสอบเพื่อหาเส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil Water Characteristic, SWCC) ซึ่งการทดสอบ SWCC จะสามารถบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของดินได้ ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูด (Suction) และความชื้นในดินเมื่อดินเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นการสูญเสียน้ำ (Drying-path) และปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Wetting-path) โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัด KU-Tensiometer ในหัวข้อ 2.3

2.4.3 การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความชื้นเป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น TDR หน่วยวัดเป็น โวลต์ (Voltage) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตรของดิน โดยการทดสอบจะจำลองการติดตั้งเซนเซอร์ในดินให้มีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงของดินในภาคสนามให้มากที่สุด โดยทำการบดอัดดินในโมลอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยม บดอัดด้วยความหนาแน่นธรรมชาติ แล้วทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นที่ความชื้นต่างกัน 3 จุด (10-30%) และจุดที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_r \geq 95\%$) โดยทำการแช่ตัวอย่างในน้ำ (Soak) เป็นจุดสุดท้าย เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์และค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้บ่งชี้ว่าเซนเซอร์ที่นำมาใช้งานนั้นมีความแม่นยำโดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรง (linear) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในดินทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ดินที่ผสมใบโอซาร์, กากมิลลิ่งยางมะตอย และดินตังเดิม ซึ่งให้ค่าความแม่นยำ $R^2 > 0.900$ โดยนำผลการสอบเทียบนี้ไปใช้ในการคำนวณหาความชื้นปริมาตรในแบบจำลองของหัวข้อ 2.5

2.5 การทดสอบคอลัมน์ดิน (Soil Column Test)

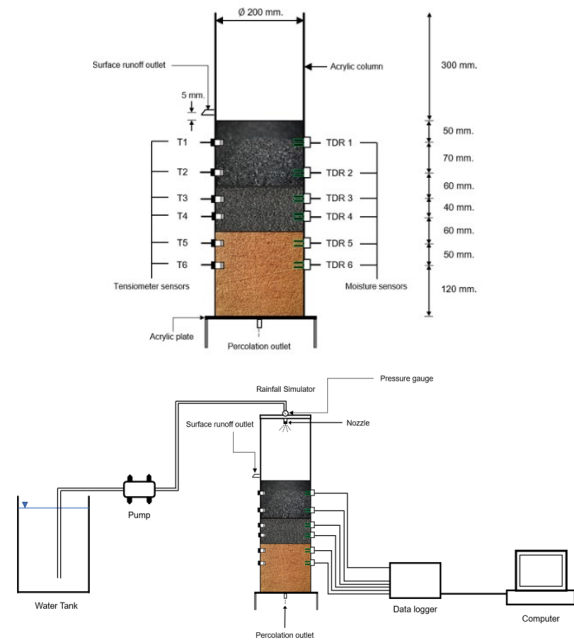
การทดสอบคอลัมน์ดินเป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการไหลซึมโดยมีการสร้างคอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกใส มีการเจาะรูเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำ 6 ตัว และความชื้น 6 ตัว ได้แก่ KU-Tensiometer และ Time Domain Reflectometry (TDR) โดยการทดสอบได้ทำการจำลองความหนาแน่นและชนิดดินตามพื้นที่ศึกษา ในคอลัมน์ดินจะประกอบไปด้วยดินทั้งหมด 3 ชั้น (นับบนลงล่าง) โดยสองชั้นแรกจะเป็นการใช้ทฤษฎีระบบกั้นคาพิลลารี (Capillary Barrier System) ประกอบด้วยดินผสมใบโอซาร์ (ชั้นเม็ดละเอียด) และกากมิลลิ่งยางมะตอย (ชั้นเม็ดหยาบ) ชั้นที่สามจะเป็นดินตังเดิมในพื้นที่ลาดดินเขตทางหลวง ทล.1192 โดยด้านล่างของแบบจำลองจะมีการใส่วัสดุใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อป้องกันเศษของดินไปอุดตันที่ระบายน้ำออก (Outlet flow) มีการจำลองสภาวะน้ำฝนโดยเลือกช่วงที่มีความเข้มฝนสูงสุด โดยนำข้อมูลน้ำฝนมาจากการตรวจวัดที่ได้ติดตั้งในภาคสนามจากเครื่องมือวัดน้ำฝน (Rain gauge) เป็นเวลา 3 เดือน โดยเลือกช่วงที่มีความเข้มฝนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 26.6 มม./ชั่วโมง ทำการทดสอบจนดินในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ และประเมินเสถียรภาพของลาดดินที่สภาวะฝนตกโดยใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope) เป็นวิธีการประเมินเสถียรภาพของลาดดินต้น ซึ่งจะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ต่ำที่สุดวิธีนี้เหมาะสำหรับการนำมาประเมินเสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ วิธีนี้ใช้แนวคิดสำหรับการพิบัติในระดับต้นหรือความลึกเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความยาวพื่นลาดเอียง (Shallow slope failure) ดังสมการที่ 2



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ลาดดินอนันต์ (Infinite slope)

$$FOS = \frac{c' + (\gamma \cdot z \cos^2 \beta) \cdot \tan \phi' - u_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ c' คือค่าการยึดเกาะประสิทธิผลของดิน, ϕ' คือมุมเสียดทานภายใน, ϕ^b คือมุมเสียดทานภายในเนื่องจากแรงดูด (Suction) โดยกำหนดให้ ϕ^b มีค่าเท่ากับ ϕ' เมื่อแรงดันน้ำ u_w มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ หรือเมื่อดินอยู่ในสภาวะอิ่มน้ำ, ค่า β คือ ความชันของลาดดิน, ค่า z คือ ความลึกของแนวการพิบัติ และค่า γ คือความหนาแน่นเปียกของดิน



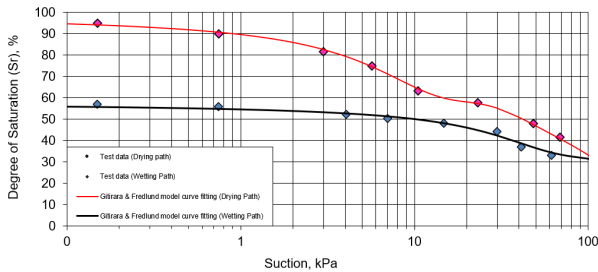
รูปที่ 7 รายละเอียดโดยรวมของแบบจำลองการทดสอบคอลัมน์ดิน

3. ผลการศึกษา

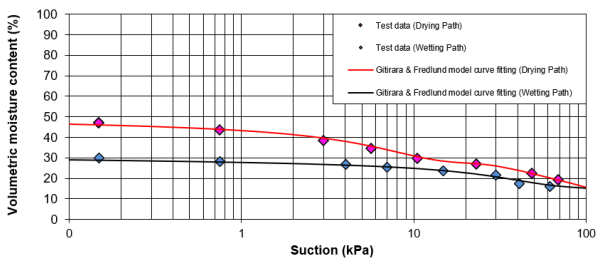
3.1 ผลการทดสอบเส้นอิทธิพลของดิน (SWCC)

การทดสอบในตัวอย่างดินพื้นที่เขตทางหลวง ทล.1192 จังหวัดเชียงใหม่ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ กับแรงดูดในรูปแบบที่ 8 สำหรับเส้น Drying Path โดยดินมีระดับความอิ่มตัวอยู่ที่

94% ซึ่งเกือบจะอิ่มตัวด้วยน้ำ และมีค่าลดลงตามแรงดูดเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินที่วิจัยเป็นดินประเภท SC เนื่องจากเม็ดหยาบ ทำให้ดินอุ้มน้ำได้น้อย ส่งผลให้ค่า S_r ลดลงเมื่อแรงดูดเพิ่มขึ้น โดยมีค่า Air-entry เท่ากับ 8 kPa สำหรับเส้น Wetting Path ดินจะมีระดับความอิ่มตัวอยู่ที่ 56% ในช่วงแรงดูดเท่ากับ 0 – 10 kPa พบว่าระดับความอิ่มตัวมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก จนถึงช่วงแรงดูด 10 – 100 kPa จึงมีค่าระดับความอิ่มตัวลดลงตามแรงดูดที่สูงขึ้น โดยมีค่า Water-entry เท่ากับ 40 kPa และได้มีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตร และแรงดูดในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลการทดสอบ SWCC ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ - แรงดูดในดิน



รูปที่ 9 ผลการทดสอบ SWCC ความชื้นโดยปริมาตร - แรงดูดในดิน

วัสดุภาคมีลักษณะขรุขระเป็นประเภทไม่ชอบน้ำ หรือ Hydrophobic เนื่องจากน้ำที่ซึมในตัววัสดุภาคมีลักษณะเป็นในรูปแบบของน้ำไหลอิสระ (Free water) อยู่รอบอนุภาค ส่งผลให้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดูดน้ำในดิน (KU-Tensiometer) ไม่สามารถตรวจหาแรงดูดน้ำในดินได้ และดินที่ผสมไบโอชาร์ โดยนำดินในเขตทางหลวง ทล.1192 ผสมกับไบโอชาร์ซึ่งชาวโพตเนื่องจากไบโอชาร์มีลักษณะที่มีรูพรุนสูง น้ำหนักเบา ทำให้มีปริมาณเยาะ ซึ่งการควบคุมความหนาแน่นในการบดอัดเข้าโมลการทดสอบได้ยาก และทำให้ดินในโมลทดสอบนั้นแน่น การทดสอบจึงไม่เป็นไปตามจริง

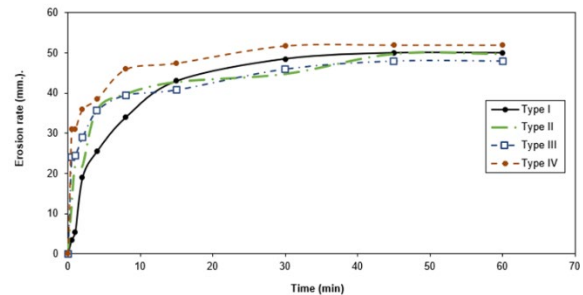
3.2 ผลการทดสอบการกัดเซาะของดิน (Submerged Jet Test)

การทดสอบการกัดเซาะของดินทำโดยการจำลองความหนาแน่นตามชนิดดินในพื้นที่ศึกษา เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีการกัดเซาะร่องลึกบริเวณหน้าผิวทางลาด ในการทดสอบนี้ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยไบโอชาร์ การทดสอบจะมีตัวอย่างดินที่ไม่ได้ปรับปรุง ดินที่ผสมไบโอชาร์ตามอัตราส่วนโดยปริมาตร และมีการใส่ปุ๋ยหมักเพื่อเป็นการเร่งกระบวนการระหว่างไบโอชาร์และดิน แสดงส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติดินของแบบจำลองการทดสอบการกัดเซาะ

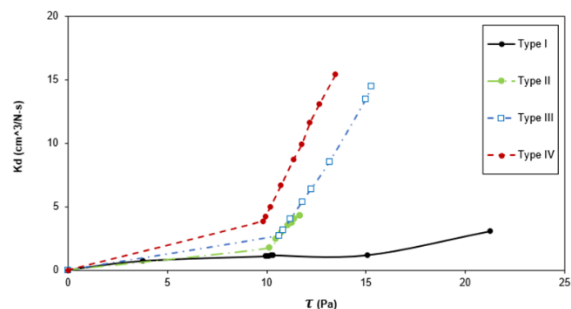
Sample no.	Material
I	ดินดั้งเดิม
II	ไบโอชาร์ : ปุ๋ยหมัก : ดิน (1:1:10)
III	ไบโอชาร์ : ปุ๋ยหมัก : ดิน (1:1:5)
IV	ไบโอชาร์ : ปุ๋ยหมัก : ดิน (2:1:5)

การทดสอบการกัดเซาะเริ่มขึ้นโดยทำการเปิดช่องส่งแรงดันน้ำ (Jet tube) และจับเวลา ผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาการกัดเซาะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ในช่วงเริ่มต้นที่ 5 นาทีแรก ดินดั้งเดิม (Type I) ค่าระยะเวลาการกัดเซาะต่ำที่สุด ในเวลา 15, 45 และ 60 นาที ดินที่ผสมไบโอชาร์ (Type III) ให้ค่าระยะเวลาการกัดเซาะต่ำที่สุดในเวลาที่ 30 นาที ดินที่ผสมไบโอชาร์ (Type II) ให้ค่าระยะเวลาการกัดเซาะต่ำที่สุดในเวลาที่ 60 นาที ดินที่ผสมไบโอชาร์ (Type IV) มีค่าระยะเวลาการกัดเซาะสูงที่สุดทุกช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 10

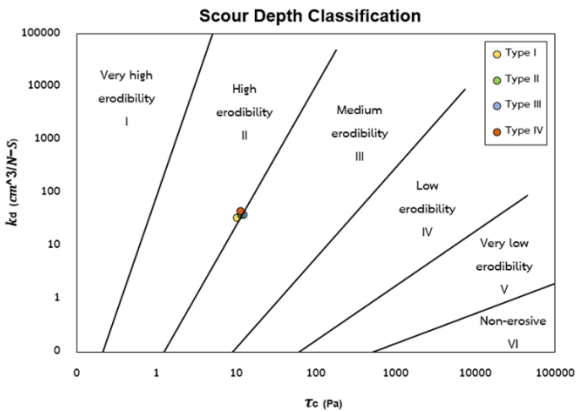


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกัดเซาะกับเวลา

ทำการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะ (Erosion rate, k_d) และ ความเค้นเฉือนวิกฤต (τ_c) โดยวิธีของ Scour depth พบว่าอัตราการกัดเซาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นที่ใช้แบบแปรผันตรงกัน ดินดั้งเดิมมีค่าอัตราการกัดเซาะต่ำที่สุด ดินที่ผสมไบโอชาร์มีอัตราการกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนไบโอชาร์ที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 และได้ทำการจำแนกโดย Scour Depth Method ผลการวิจัยพบว่าการผสมดินด้วยถ่านไบโอชาร์ที่อัตราส่วนมากขึ้นทำให้การกัดเซาะเพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอชาร์มีรูพรุนสูง ทำให้การยึดเกาะอนุภาคของดินต่ำลง การจัดเรียงอนุภาคหลวมส่งผลให้การกัดเซาะมีมากกว่าดินที่ไม่ได้ผสมด้วยถ่านไบโอชาร์ ดังแสดงในรูปที่ 12 อย่างไรก็ตามเนื่องจากในการศึกษานี้ไม่มีการบดตัวอย่างดินและไบโอชาร์ก่อนทดสอบ จึงคาดว่าเป็นสาเหตุหลักที่ไม่พบผลดีของไบโอชาร์ต่อการต้านทานการกัดเซาะ ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาในอดีต Shih-Hao Jien (2013) ซึ่งมีการบดไบโอชาร์ถึง 105 วัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์การทดสอบการกัดเซาะระหว่างสัมประสิทธิ์การกัดเซาะและความเค้นเฉือนวิกฤต



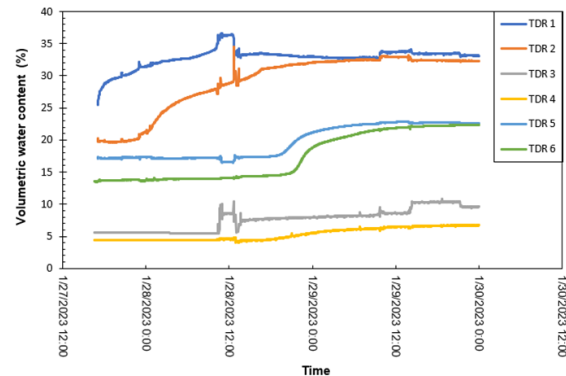
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะและความเค้นเฉือนวิกฤติ โดยวิธีการจำแนกของ Scour depth (Daly et.al, 2013)

3.3 ผลการทดสอบคอลัมน์ดิน (Soil Column Test)

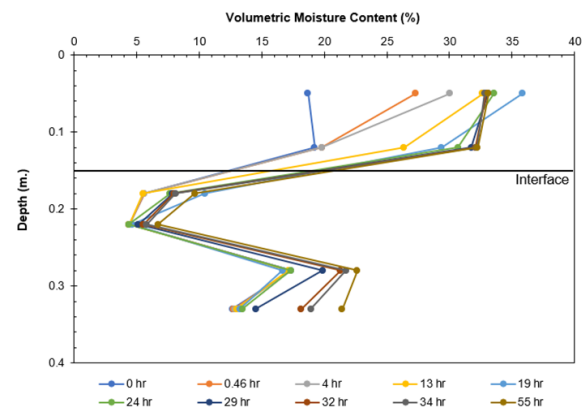
จากการดำเนินแบบจำลองภายใต้สภาวะน้ำฝน 26.6 มม./ชั่วโมง โดยการทดสอบประกอบไปด้วยดินทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ ดินผสมโปไอซอร์ (ชั้นที่ 1), กากมิลลิ่งยางมะตอย (ชั้นที่ 2) และดินดั้งเดิมในพื้นที่ (ชั้นที่ 3) นับจากบนลงล่าง โดยมีเซนเซอร์ติดตั้งสำหรับวัดความชื้นโดยปริมาตรทั้งหมด 6 ตัว ได้แก่ TDR1 ถึง TDR6 โดยมีความลึกของเซนเซอร์ในแบบจำลองจากผิวดินชั้นบนเท่ากับ 0.05, 0.12, 0.18, 0.22, 0.28 และ 0.33 เมตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

3.3.1 ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Moisture Content, VMCs) ที่ตำแหน่งต่างๆ

VMCs ของคอลัมน์ดินภายใต้รูปแบบปริมาณน้ำฝน แสดงไว้ในภาพที่ 12 ในช่วงเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) มีค่า VMCs เท่ากับ 25.52, 20.10, 5.63, 4.41, 17.18 และ 12.64% สำหรับเซนเซอร์ TD1 ถึง TDR6 ตามลำดับ ซึ่งในแบบจำลองคอลัมน์ดินประกอบไปด้วยดินทั้งสามประเภท ซึ่งในการבודอัดใช้ปริมาตรที่ต่างกัน เนื่องจากดินแต่ละชนิดมีความหนาแน่นแห้ง (γ_d) ต่างกัน ส่งผลให้ความชื้นในช่วงเริ่มต้นมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อเริ่มทำการทดสอบที่เวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าเซนเซอร์ TDR1 มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอยู่บนสุด ทำให้น้ำฝนแทรกซึมถึงก่อนเซนเซอร์ตัวอื่นๆ จนเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงพบว่าเซนเซอร์ TDR1 และ TDR2 ตัวที่อยู่ในดินชั้นที่ 1 มีค่า VMCs เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเวลาผ่านไป 17 ชั่วโมง พบว่าเซนเซอร์ TDR3 มีค่า VMCs เพิ่มขึ้น โดยเซนเซอร์ TDR2 มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันจนมีค่าสูงสุดที่ 35.82% ก่อนที่จะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งหมายถึงน้ำฝนได้แทรกซึมทะลุผ่านดินชั้นแรกไปยังชั้นที่ 2 เป็นผลกระทบที่เห็นได้ชัดของ CBS ที่มีอิทธิพลต่อการไหลซึมของชั้นดินเม็ดละเอียดไปเม็ดหยาบ กล่าวคือมีการสะสมความชื้นในช่วงเวลานี้ในดินชั้นแรก ก่อนน้ำจะทะลุผ่านชั้นดินเม็ดหยาบ เมื่อเวลาผ่านไป 26 -28 ชั่วโมง พบว่าเซนเซอร์ TDR4, TDR5 และ TDR6 เริ่มมีค่า VMCs เพิ่มขึ้น และอิมพัลส์ที่ 6%, 22.25%, 22.20% สำหรับเซนเซอร์ TDR4, TDR5, TDR6 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 ความแปรผันของความชื้นเชิงปริมาตรตามเวลาภายใต้สภาวะฝนตกในคอลัมน์ดิน

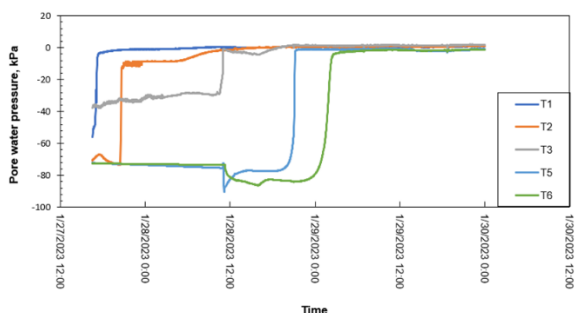


รูปที่ 13 ความแปรผันของความชื้นเชิงปริมาตรต่อความลึกของเซนเซอร์ตรวจวัดในคอลัมน์ดิน

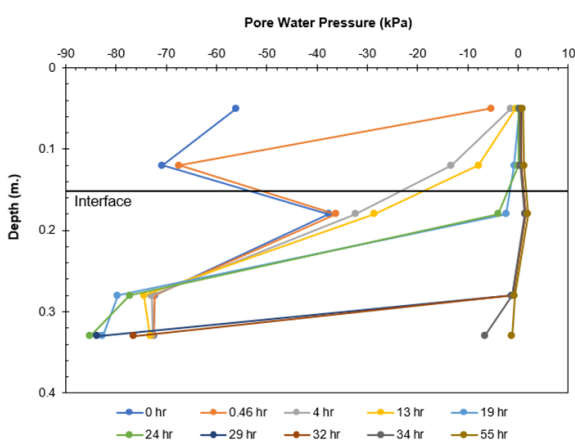
3.3.2 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure, PWP) ที่ตำแหน่งต่างๆ

ในช่วงเวลาเริ่มทดสอบที่ 30 นาที น้ำฝนเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ T1 ทำให้ค่า PWP เพิ่มขึ้นเนื่องจากอยู่ชั้นบนสุด จนเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงเซนเซอร์ T2 เริ่มมีการตอบสนองโดยมีค่า PWP สูงขึ้น โดยเซนเซอร์ T3 (ชั้นกากมิลลิ่งมะตอย) ยังไม่มีการตอบสนองใดๆ เนื่องจากน้ำฝนยังไม่ได้แทรกซึมมาถึงที่ความลึกนี้ จนกระทั่งเวลาผ่านไป 13 ชั่วโมง พบว่าเซนเซอร์ T3 เริ่มมีค่า PWP เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อทดสอบไป 17 ชั่วโมงพบว่าค่า PWP ของเซนเซอร์ T3 นั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการขัดขวางการไหลของน้ำที่ส่วนต่อประสาน (Interface) ของชั้นดินเม็ดละเอียดและชั้นดินเม็ดหยาบโดยกระบวนการของ CBS จนกระทั่งเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เซนเซอร์ T3 มีค่า PWP เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอาการบ่งบอกถึงน้ำเริ่มไหลลงด้านล่างจนทะลุเข้าสู่ดินเม็ดหยาบ หรือเรียกว่า Breakthrough จนมีค่า PWP คงที่ประมาณ 1.50 kPa โดย CBS สามารถชะลอการแทรกซึมของน้ำได้ถึง 5 ชั่วโมง สำหรับเซนเซอร์ T4 นั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับ T3 ซึ่งมองไม่เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเซนเซอร์ 2 ตัวนี้ จึงเลือกแสดงเฉพาะเซนเซอร์ T3 เนื่องจากอยู่ใกล้เคียงระหว่างส่วนต่อประสานระหว่างชั้น 1 และชั้นที่ 2 เพื่อดูพฤติกรรมการทำงานของ CBS ในส่วนของเซนเซอร์ T5 และ T6 มีค่า PWP ค่อยๆลดลง เนื่องจากตำแหน่งของเซนเซอร์ทั้งสองนั้นอยู่ชั้นสุดท้ายของคอลัมน์ ซึ่งน้ำยังไม่ไหลผ่านชั้นนี้ จึงทำให้ดินสูญเสีย

ความชื้นไปจนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไป 26 ชั่วโมง เซนเซอร์ T5 มีค่า PWP เริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าคงที่ที่ค่าประมาณ -0.50 kPa เมื่อการทดสอบผ่านไป 30 ชั่วโมง พบว่าเซนเซอร์ T6 มีค่า PWP เริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าคงที่ที่ค่าประมาณ -0.85 kPa ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15



รูปที่ 14 ความแปรผันของแรงดันน้ำ (PWP) ตามเวลาภายใต้สภาวะฝนตกในคอลัมน์ดิน



รูปที่ 14 ความแปรผันของแรงดันน้ำต่อความลึกของเซนเซอร์ตรวจวัดในคอลัมน์ดิน

4. บทสรุป

4.1 การศึกษาพฤติกรรมการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยไบโอชาร์เพื่อลดการกัดเซาะของดิน

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินในพื้นที่ลาดชัน เขตทางหลวง ทล.1192 ด้วยวัสดุไบโอชาร์ซึ่งข้าวโพด ผ่านการทดสอบการกัดเซาะ (Submerged Jet Test) จากวิธีการของ Scour depth พบว่าอัตราการกัดเซาะมีค่าเพิ่มขึ้นและแปรผันตรงตามค่าความเค้นที่ใช้งานโดยแรงดันน้ำจาก Jet tube สำหรับดินดั้งเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง มีการกัดเซาะที่ต่ำกว่าดินที่ผสมไบโอชาร์ และการกัดเซาะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอชาร์มีรูพรุนสูง ทำให้การยึดเกาะอนุภาคของดินต่ำลง การจัดเรียงอนุภาคหลวม ส่งผลให้การกัดเซาะมีมากกว่าดินที่ไม่ได้ผสมด้วยถ่านไบโอชาร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากในการศึกษานี้ไม่มีการบ่มตัวอย่างดินและไบโอชาร์ก่อนทดสอบ จึงคาดว่าเป็นสาเหตุหลักที่ไม่พบผลดีของไบโอชาร์ต่อการต้านทานการกัดเซาะ

4.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลซึมของแบบจำลองคอลัมน์ดินภายใต้สภาวะฝนตก

ปริมาณน้ำฝนสามารถส่งผลกระทบต่อความชื้นโดยปริมาตร (VMCs) และแรงดันน้ำ (PWP) ในแบบจำลอง ในดินชั้นแรก (ดินผสมไบโอชาร์) สามารถรักษาความชื้นได้ถึง 17 ชั่วโมง และมีความชื้น (VMCs) สูงสุดเท่ากับ 35.82% ก่อนที่จะลดลงเพราะน้ำไหลผ่านทะลุผ่านดินชั้นเม็ดหยาบ (ชั้นที่ 2) ซึ่งชี้ให้เห็นชัดเจนว่า CBS สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรักษาการแทรกซึมของน้ำก่อนที่จะทะลุไหลผ่านไปสู่อินทรีย์ดินเม็ดหยาบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ดินชั้นที่ 2 (กากมิลลิ่งยางมะตอย) มีค่า VMCs ไม่สูงมากเนื่องจากตัววัสดุเป็น Hydrophobic ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้น้ำที่ซึมผ่านไหลอย่างอิสระ (Free water) จึงไม่เกิดการสะสมความชื้นมากนักที่ชั้นนี้ แต่ยังคงตอบสนองชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลในช่วงที่ CBS ทำงานได้ สำหรับดินชั้นที่ 3 (ดินดั้งเดิม) มีความชื้นที่ต่ำกว่าดินที่ผสมด้วยไบโอชาร์ โดยมีค่าความชื้นสูงสุดเท่ากับ 22.08% แสดงให้เห็นว่าดินที่ผสมด้วยไบโอชาร์สามารถกักเก็บความชื้นได้ดีกว่าเนื่องจากไบโอชาร์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่รับน้ำหรือช่องว่างในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ดินที่ผสมไบโอชาร์มีความชื้นที่สูงกว่าดินดั้งเดิมเช่นเดียวกับกับ PWP ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับ VMCs ทั้งในเรื่องของการรักษาความชื้นของดินที่ผสมไบโอชาร์ ซึ่งในชั้นที่ 1 มีค่า PWP ที่สูงกว่าดินชั้นอื่นๆ และค่า PWP มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาเดียวกับกับ VMCs อันเนื่องมาจาก CBS ซึ่งบ่งบอกว่าการเปรียบเทียบนี้ให้ผลที่สอดคล้องกัน

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โชติสังกาศ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางอันดีที่ทำให้บทความนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรดีเสริมหมัด และคณะ (2565). การศึกษาพฤติกรรมการกระจายความชื้นและเสถียรภาพของกัมแพกดินเสริมแรงด้วยวัสดุสังเคราะห์ภายใต้สภาวะฝนตก. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า 41-45.
- [2] Jien, S.H. and Wang, C.S. (2013). *Effects of Biochar on Soil Properties and Erosion Potential in a Highly Weathered Soil*. *Catena*, 110, pp.225-233.
- [3] ทิวา ต้นสถิต, สุธรรม โรจนเมฆา และธรรณกร เทพวงษ์. (2560). การผลิตไบโอชาร์จากตอซังและฟางข้าวเพื่อการอุ้มน้ำในดิน. หน้า 401-410. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ครั้งที่ 1*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, นครปฐม.
- [4] Yu, P.; Li, T; Fu, Q; Liu, D.; Hou, R.; Zhao, H. (2021). *Effect of Biochar on Soil and Water Loss on Sloping Farmland in the*

Black Soil Region of Northeast China during the Spring Thawing Period., 13, 1460

- [5] Harianto Rahardjo. (2004). *Capillary Barrier for Slope Stabilisation*. Civil Engineering Research January 2004, pp. 122-126.
- [6] 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.
- [7] อภินิติ โชติสังกาศ (2555). เอกสารคำสอนวิชา 01203536 Unsaturated Soil Mechanics กลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 145-152.
- [8] อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ (2551). การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46, กรุงเทพฯ, 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551, หน้า 48-55