กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย

Unconfined Compressive Strength of Bagasse Ash Geopolymer Admixed in Soft Bangkok Clay

วีรวัฒน์ ดีสวัสดิ์[1], ชยกฤต เพชรช่วย[2], เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[3] และจักษดา ธำรงวุฒิ[4]

[1,2,3,4] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
E-mail address: weerawat.jane@gmail.com, chayakrit.ph@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพปรับปรุงด้วยเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ที่แปรผันตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้ปรับปรุงดินเหนียวอ่อนทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้มาจากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งถูกนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์ สารอัลคาไลน์ที่ใช้ได้มาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารอัลคาไลน์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ปริมาณความชื้นของดินที่พิกัดเหลวของดิน และใช้ปริมาณเถ้าชานอ้อยที่ร้อยละ 30 ที่อายุบ่มต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตที่ 60:40 ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 7.5 โมลาร์ ปริมาณเถ้าชานอ้อยที่ร้อยละ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณความชื้นของดินที่ขีดจำกัดเหลว

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อน, เถ้าชานอ้อย, กำลังอัดแกนเดียว, จีโอโพลิเมอร์

Abstract

This research presents the unconfined compressive strength of the bagasse ash geopolymer admixed in soft clay Bangkok. The study on varies according to variables to find the possibility of using geopolymer improvement soft soil instead of using cement. Bagasse ash (BA), an industrial by-product, was used as a precursor of geopolymer. A mixture of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) was used as a liquid alkaline activator. This research was studied the suitable ratio between alkaline activator and sodium hydroxide concentration. The soil moisture content at the liquid limit and bagasse ash content at 30% per weight of dry soil were used in this research. The study found the highest 28 days unconfined compressive strength at the ratio of sodium hydroxide to sodium silicate at 60:40, the sodium hydroxide concentration at 7.5 molars, bagasse ash content at 30% and Liquid Limit (LL) of soil.

Keywords: Soft clay, Bagasse ash, Unconfined compressive strength, Geopolymer.

1. บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน หรือระบบสาธารณูปโภค เช่น โครงสร้างคันดิน โครงสร้างฐานราก และโครงสร้างถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อนในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลมักประสบกับปัญหาทางด้านวิศวกรรมเนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีปริมาณความชื้นในมวลดินสูง (ประมาณร้อยละ 60-140) และมีค่าอัตราส่วนช่องว่างสูง (Void ratio ประมาณ 2.0) [1],[2] ทำให้ความสามารถในการรับกำลังต่ำ และมีการทรุดตัวสูง จึงได้มีการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนเพื่อทำให้มีการรับกำลังได้ดีขึ้น โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเทคนิคการปรับปรุงดินแบบนี้ช่วยเพิ่มความต้านทานการอัดตัวและการรับกำลังอัด [3],[4],[5],[6] แต่เทคนิคการใช้ปูนซีเมนต์นั้นก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งขบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยายกาศ [7]

จากปัญหาที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงศึกษาการใช้จีโอโพลีเมอร์ประยุกต์ใช้ในการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อน วัสดุจีโอโพลีเมอร์สามารถผลิตได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 และกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่าง (Liquid alkaline) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งจะทำให้มีโครงสร้างจับตัวกันเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตเป็นโครงสร้างกึ่งผลึกมีความแข็งแรงเมื่อแข็งตัวสามารถรับกำลังได้เช่นเดียวกับซีเมนต์ [8]

อีกทั้งงานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลีเมอร์ ในการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เพื่อรองรับงานโครงสร้างพื้นฐาน โดยพิจารณาตัวแปรควบคุม (ตารางที่1) ได้แก่ ปริมาณเถ้าชานอ้อย ปริมาณความชื้น ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ อายุบ่ม และการจำลอง

อุณหภูมิในสภาวะอากาศฤดูร้อนที่ 38±2 องศาเซียลเซียส เพื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบดินผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียวตามมาตรฐานกรมทางหลวง (กำลังอัดที่สภาวะไม่ระบายน้ำ (Su) 500 กิโลปาสกาล) [9]

2. วัสดุและการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

2.1 วัสดุและสารละลาย

2.1.1 ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Bangkok clay)

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้มาจากโครงการก่อสร้างโดยเก็บที่ความลึกประมาณ 3-10 เมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 ขีดจำกัดความเหลว (LL) เท่ากับร้อยละ 63.93 ขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับร้อยละ 25.49 ดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับร้อยละ 34.88 เมื่อนำมาจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH)

2.1.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ มอก. 15-2547 และมาตรฐาน ASTM C-150 มีค่าถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีความละเอียดเท่ากับ 2,900 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยวัสดุเชื่อมประสานหลัก ร้อยละ 90 ถึง 95 จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A และ C_4AF [10]

2.1.3 เถ้าชานอ้อย

เถ้าชานอ้อยได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตไฟฟ้าที่อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา โดยการเผากากอ้อยที่อุณหภูมิประมาณ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียสเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ก่อนนำมาใช้ในการทดสอบได้ทำการบดโดยเครื่องบด (Los Angeles Machine) เป็นเวลา 30 นาที เถ้าชานอ้อยที่ได้มีความละเอียดอยู่ในช่วงระหว่าง 2,800 ถึง 3,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม อนุภาคของเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดจะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่สม่ำเสมอ [11]

2.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

NaOH เป็นสารเคมีของแข็งรูปเม็ด (bead) หรือแผ่นเกล็ด (flake) มีมวลโมเลกุล 40 กรัม/โมล ใช้กระบวนการอิเล็กโตไลซิสของเกลือในการผลิต เมื่อนำมาละลายน้ำมีฤทธิ์เป็นด่างแก่ คือสามารถแตกตัวให้อิออนโซเดียม (Na+) และอิออนไฮดรอกไซด์ (OH-) ได้หมด โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความ ถ่วงจำเพาะประมาณ 2.12 ที่อุณหภูมิ 20 °C และมีจุดหลอมเหลว 318 °C [12]

2.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตเป็นสารประกอบของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2) มีสถานะเป็นได้ทั้งของแข็งและของเหลว ในการใช้งานหากเป็นของแข็งต้องละลายน้ำก่อนใช้ โดยทั่วไปมักจำหน่ายอยู่ในรูปของสารละลายโซเดียมซิลิเกต [12]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่าง

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
อัตราส่วนเถ้าชานอ้อย	1	30% (ต่อน้ำหนักดินแห้ง)
ปริมาณความชื้นของดินเหนียวอ่อน	1	1.0LL (LL คือขีดจำกัดเหลว)
อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/NaOH)	4	70:30, 60:40, 50:50, 40:60
ปริมาณสารละลาย/เถ้าชานอ้อย	1	(L/BA = 1)
ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	6	2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 โมลาร์
อัตราส่วนปูนซีเมนต์	7	3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 20%, 30%
อายุบ่ม	3	7, 14, 28 วัน
อุณหภูมิการบ่ม	2	อุณหภูมิห้อง และ 38±2 องศาเซียลเซียส
จำนวนตัวอย่างต่อ 1ส่วนผสม	3	ตัวอย่าง

2.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

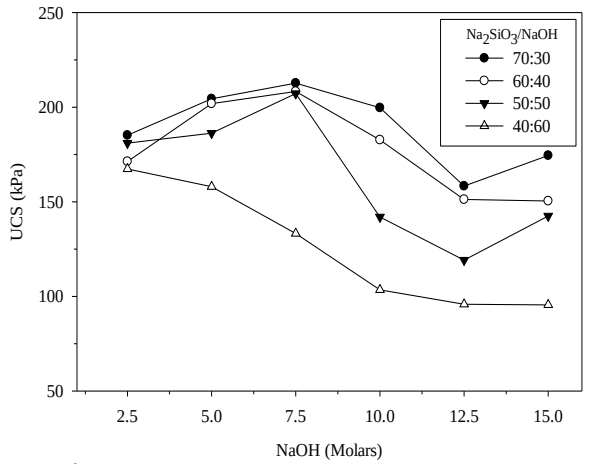
ตัวอย่างดินเหนียวจะถูกนำมาหาปริมาณความชื้นเตรียมไว้เพื่อนำมาปรับความชื้นด้วยการผสมเข้ากับน้ำตามปริมาณความชื้นที่กำหนดไว้ผสมดินเหนียวกับน้ำให้เข้ากันทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมกับเถ้าชานอ้อยและสารละลาย ที่อัตราส่วนที่กำหนด โดยทำการผสมในหม้อผสมจนกระทั่งส่วนผสมเข้ากันดีโดยใช้ระยะเวลาผสม 3 ถึง 5 นาที จากนั้นเทตัวอย่างลงในท่อพีวีซีที่มีขนาด 38 มม. และสูง 76 มม. บ่มตัวอย่างไว้ในแบบหล่อประมาณ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นสม่ำเสมอและแข็งตัว จากนั้นแกะตัวอย่างออกจากแบบแล้วนำไปหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น [13] และในการศึกษางานวิจัยนี้มีการจำลองสภาพอากาศในประเทศไทยในฤดูร้อนโดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ประมาน 38±2 °C ในงานวิจัยนี้จึงได้นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 38±2 °C ตลอดจนอายุการบ่มครบตามกำหนดหลังการนั้นจึงแกะพลาสติกใสออก วัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่าง นำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength) [14]

2.2.2 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแบบไม่ถูกจำกัด

เมื่อตัวอย่างที่เตรียมไว้มีอายุบ่มครบตามที่กำหนด จึงนำตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างมาทดสอบ แล้วนำค่าเฉลี่ยมาเป็นผลการทดสอบการทดสอบแรงอัดแกนเดียวแบบไม่ถูกจำกัดเป็นไปตามมาตรฐาน

ทล.ท.105/2525 หรือ ASTM D, 2166-06 [9] ในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวกำหนดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาทีจนกว่าตัวอย่างจะวิบัติโดยค่ากำลังที่ต้องการมีค่า Undrained Shear Strength ที่หาจาก Unconfined Compression Test ต้องไม่น้อยกว่า 500 กิโลปาสกาล ที่ 28 วัน [9]

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลทดสอบ

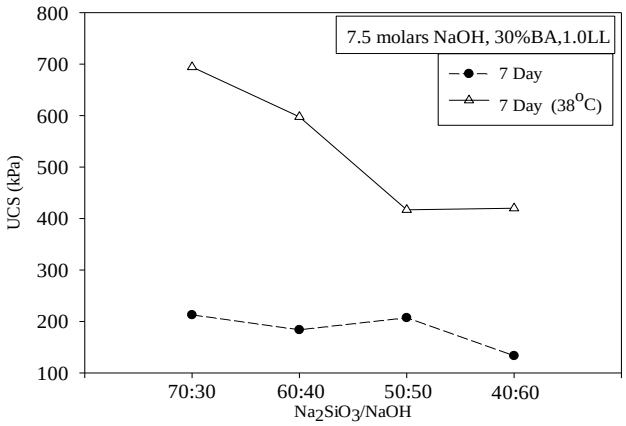


รูปที่ 1 อิทธิพลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าชานอ้อยจีโอโพลีเมอร์ ที่มีปริมาณความชื้น 1.0LL ที่อายุบ่ม 7 วัน

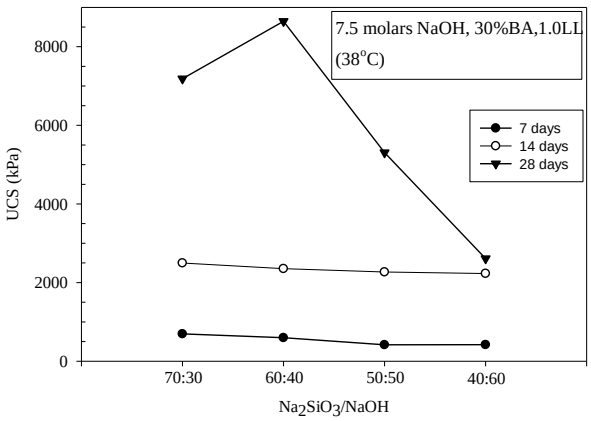
จากรูปที่ 1 กราฟแสดงอิทธิพลของอัตราส่วนปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3/NaOH ต่อ กำลังอัดของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าชานอ้อย จีโอโพลีเมอร์ ที่ปริมาณความชื้นของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 1.0LL อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อย 30 ต่อน้ำหนักดินแห้ง อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 70:30, 60:40, 50:50, และ 40:60 ที่แปรผันตามความเข้มข้นของ NaOH จะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH จะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 7.5 โมลาร์ เป็นจุดเหมาะสมที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 70:30, 60:40, และ 50:50 หลังจากนั้นค่ากำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของ NaOH มากกว่า 7.5 โมลาร์

จากรูปที่ 2 กราฟแสดงตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ ที่มีความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เท่ากับ 7.5 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/NaOH) เท่ากับ 70:30, 60:40, และ 50:50 ของตัวอย่างที่ไม่ได้นำไปอบมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันโดยพบค่าสูงสุดที่อัตราส่วน(Na_2SiO_3/NaOH=70:30) เท่ากับ 212 กิโลปาสคาล สำหรับตัวอย่างที่ถูกนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/NaOH) เท่ากับ 70:30 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 694 กิโลปาสคาล และพบว่าตัวอย่างที่ได้ถูกนำไปอบยังมีกำลังมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำไปอบทุกอัตราผสมสารละสาร Na_2SiO_3/NaOH ในระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน

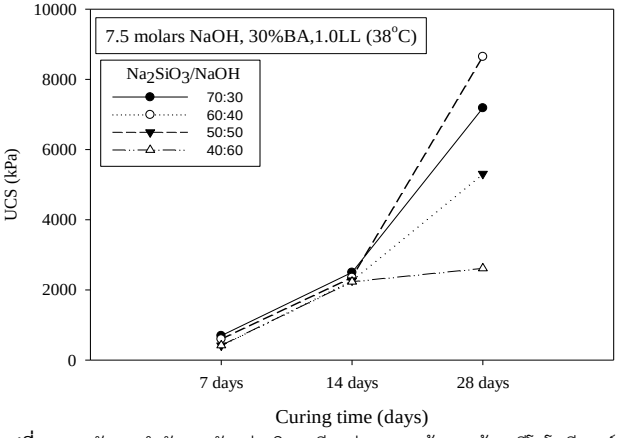
อิทธิพลของสารละลาย Na_2SiO_3/NaOH ต่อกำลังอัด แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 70:30 ที่ให้กำลังอัดสูงในช่วง 7-14 วัน แต่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 60:40 มีกำลังอัดสูงที่สุดที่อายุบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 อิทธิพลของอัตราส่วนสารละลาย Na_2SiO_3/NaOH ต่อค่ากำลังอัดที่ NaOH 7.5 โมลาร์, ปริมาณความชื้อ 1.0LL อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างดินที่บ่มแบบอบกับไม่อบ

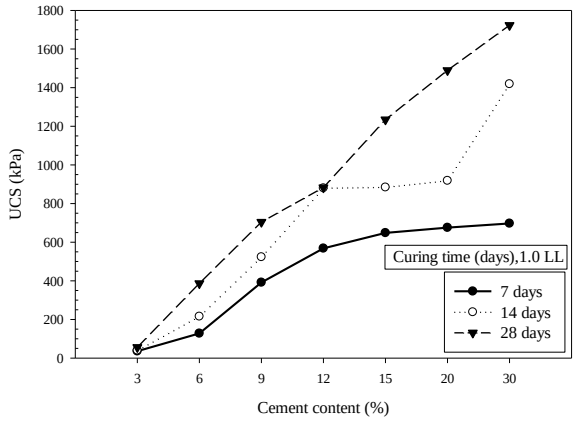


รูปที่ 3 อิทธิพลของสารละสาร Na_2SiO_3/NaOH ต่อกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าชานอ้อย จีโอโพลีเมอร์ ที่อบด้วยอุณภูมิ 38 °C



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าชานอ้อย จีโอโพลีเมอร์ ปริมาณความชื้น 1.0LL ที่อบด้วยอุณภูมิ 38 °C

จากรูปที่ 4 กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงอายุบ่ม 7 ถึง 14 วัน กำลังอัดมีความใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วนผสมของสารละลาย Na_2SiO_3/NaOH เมื่ออายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ชัดว่า อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 60:40 ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 8,647 กิโลปาสคาล และ 7,185 กิโลปาสคาล ที่อัตราส่วนอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 70:30 ของตัวอย่างดินดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าชานอ้อย จีโอโพลีเมอร์ ปริมาณความชื้น 1.0LL ที่อบด้วยอุณภูมิ 38 °C



รูปที่ 5 กราฟการพัฒนากำลังตามปริมาณของปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนผสมกับปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 1.0 LL ที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 6, 9, 12, 15, 20, และ 30 ต่อน้ำหนักดินแห้ง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทุกช่วงอายุบ่ม เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นทำให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินเหนียวผสมเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ในรูปที่ 4 พบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ดินเหนียวผสมเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า

4. สรุปผลการทดสอบ

บทความนี้ศึกษากำลังอัดของดินเหนียวผสมเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์เพื่อทดแทนการใช้ซีเมนต์ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ต้องการกำลังอัดแกนเดียวที่ 28 วัน เท่ากับ 1,000 kPa (500 kPa undrain shear strength) โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1) ความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงขึ้นสามารถชะล้างซิลิก้าและอลูมินาจากเถ้าชานอ้อยเพื่อมาทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไลเซชั่นได้มากขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นจนถึงแค่จุดเหมาะสมค่าหนึ่ง เนื่องจากปริมาณซิลิก้า อลูมินา และ Na_2SiO_3 ในระบบมีปริมาณที่จำกัดเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH มากเกินไปทำให้มี Na^+ และ OH^- อิสระมากเกินไปจนขัดขวางการทำปฏิกิริยา

2) อัตราส่วนผสมของสารละลาย Na_2SiO_3/NaOH ที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดโดยค่าเหมาะสม ได้แก่ค่า 60:40 ค่าอัตราส่วนสารละลายนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสภาพแวดล้อม อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยแรงการทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์เซชั่นของจีโอโพลิเมอร์ได้ดีขึ้น

3) เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่ 28 วัน กับดินซีเมนต์พบว่าดินเหนียวผสมเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าดินเดียวผสมซีเมนต์ โดยมีส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงตั้งแต่อายุบ่ม 14 วัน มีค่าความเข้มข้นของ NaOH ที่เหมาะสมอยู่ที่ 7.5 molars อัตราส่วนสารอัลคาร์ไลน์ (Na_2SiO_3/NaOH) ที่เหมาะสมอยู่ที่ 60:40 ได้กำลังอัด 2,500 kPa

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานและการขนส่งทางราง สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

เอกสารอ้างอิง

[1] เกษม เพชรเกตุ, พินิจ ตั้งบุญเติม (2536). การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ข่าวช่างฉบับที่ 254, น.41-45

[2] ชยานันท์ ศรีเจริญ, รุ้งลาวัลย์ ราชัน และสุขสันติ์ หอพิบูลสุข (2557). การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 37 ฉบับที่ 2, น.151-164

[3] Horpibulsuk, S., Miura, N., Koga, H., and Nagaraj, T.S., (2004). Analysis of strength development in deep mixing – a field study. Ground Improve. 8 (2), pp. 59–68.

[4] Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., and Raksachon, Y. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations, Construction and Building Materials 24 (2010), pp. 2011-2021

[5] Horpibulsuk, S., Yangsukaseam, N., Chinkulkijniwat, A., Du, YJ. (2011) Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite, Apply Clay Sci, pp. 150–9.

[6] Horpibulsuk, S., Phojan, W., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A., and Liu, M, D. (2011) Strength development in blended cement admixed saline clay, Applied Clay Science.

[7] Malhota, VM., (2002). Introduction: Sustainable development and concrete technology. ACI Concrete international, 24, pp. 7-22

[8] Davidovits J. (1999) Chemistry of geopolymer systems, terminology, Geopolyme 1999.

[9] กรมทางหลวง (2550). *คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวง*. หน้า 189-208.

[10] Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S, & Jongpradist, P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. Construction and Building Materials, 154, 61--71.

[11] Yoobanpot, N., Jamsawang, P., & Horpibulsuk, S. (2017). Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue. Applied Clay Science, 141(June), 146-156.

[12] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2560). วัสดุจีโอโพลีเมอร์, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

[13] Güllü, H. (2014). Factorial experimental approach for effective dosage rate of stabilizer: Application for fine-grained soil treated with bottom ash. *Soils and Foundations, 54*(3), 462-477.

[14] Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., Disfani, M.M., 2014. Calcium carbide residue: alkaline activator for clay-fly ash geopolymer. Constr. Build. Mater. 69, 285–294.