การศึกษากระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยเถ้าลอย
Investigation of Geopolymerization Process of Bangkok Clay Treated by Fly Ash form Distillery Slop and Sodium Hydroxide

ศิริพัฒน์ มณีแก้ว[1], ปิยรัตน์ เปาเล้ง[1] รักษ์ศิริ สุขรักษ์[1] พานิช วุฒิพฤกษ์[1] อิทธิพล มีผล[1*]

[1] ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: kwang@fte.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น ของจิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยน้ำกากส่า (GFA) ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเมื่อนำปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ โดยเมื่อสังเคราะห์จิโอโพลิเมอร์ โดยใช้สารละลายด่างคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 4, 6, 8 และ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในแต่ละความเข้มข้นต่อเถ้าลอยน้ำกากส่า เท่ากับ 0.5, 0.7 และ 1.0 พบว่าที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าลอยน้ำกากส่าเท่ากับ 0.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงที่สุดที่ 1,862 kPa เมื่อนำจิโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่แปลงสภาพให้มีค่าปริมาณความชื้น 1.1 เท่าของขีดจำกัดเหลว เมื่อใช้สัดส่วนดินเหนียวแปลงสภาพต่อจิโอโพลิเมอร์ 1:2, 1:1.5, 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงที่สุดที่อายุ 28 วัน และอุณภูมิการบ่ม 25 และ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 925 และ 1,175 kPa ตามลำดับ

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, เถ้าลอย, น้ำกากส่า

Abstract

The research aimed to study the geopolymerization process of geopolymers from distillery slop's fly ash (GFA) affecting to unconfined compressive strength of soft clay Improved with geopolymer. When synthetic geopolymer by sodium hydroxide solution concentrate 4, 6, 8, 10 molars and ratio of sodium hydroxide solution : distillery slop's fly ash equal 0.5, 0.7 and 1.0 found that at sodium hydroxide solution concentrate 6 molar and ratio of sodium hydroxide solution : distillery slop's fly ash equal 0.5 exhibit the highest compressive strength was 1,862 kPa. When using suitable geopolymer to improve remold Bangkok clay at moisture content 1.1 LL with ratio of remold clay : geopolymer from distillery slop's fly ash equal 1:2, 1:1.5, 1:1 and 2:1 by weight shown highest compressive strength at curing time 28 day at temperature and equal 925 and 1,175 kPa respectively.

Keywords: Geopolymer, Bangkok Clay, Distillery Slop, Fly Ash

1. คำนำ

ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) เป็นตะกอนชั้นบนที่พบในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่องานฐานรากเพราะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อมีน้ำหนักกดทับมากๆ จะบีบน้ำออกไปจากเนื้อดิน (ยุบตัว) ส่งผลให้เกิดอุปสรรคต่อการก่อสร้างเนื่องจากการรับน้ำหนักของดินเหนียวที่สามารถรับน้ำหนักได้น้อยมาก [1] จนทำให้ฐานรากแตกร้าวเสียหาย ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่าย เสียค่าแรงงานและเสียเวลาในการทำงานเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ดินมีคุณภาพและเหมาะสมกับการก่อสร้าง ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนก่อนการก่อสร้างจึงเป็นสิ่งสำคัญในปัจจุบัน

เถ้าลอยน้ำกากส่าเกิดจากกระบวนการกำจัดน้ำกากส่าด้วยการเผา ในระบบการบำบัดการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม [11] ซึ่งเถ้าลอยเหล่านี้ทำให้เกิดเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่ยังไม่สามารถทำลายทิ้งได้ โดยเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) หรือวัสดุกรอง (Filter) เพื่อไม่ให้ลอยไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบ จากนั้นเถ้าลอยจะถูกรวบรวมไว้ในถังเก็บเถ้า (Ash hopper) เถ้าลอยจะขนาดประมาณ 1 ไมครอน จนถึง 150 ไมครอน เถ้าลอยมีค่า

ความถ่วงจำเพาะต่ำอยู่ที่ 2.3 มีความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ในช่วง 320 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถนำมาปรับปรุงดินเหนียวได้ [6] หลังจากได้ทำการปรับปรุงพบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่แปลงสภาพให้มีค่าปริมาณความชื้น 1.1 เท่าของขีดจำกัดเหลว เมื่อใช้สัดส่วนดินเหนียวแปลงสภาพต่อจิโอโพลิเมอร์ 1:2, 1:1.5, 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงที่สุดที่อายุ 28 วัน และอุณภูมิการบ่ม 25 และ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 925 และ 1,175 kPa ตามลำดับ ซึ่งผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง [14]

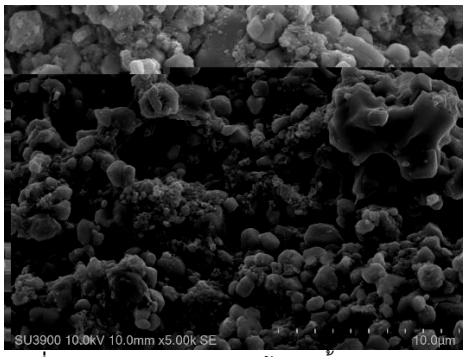
2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 การเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยน้ำกากส่า

เถ้าลอยน้ำกากส่านั้นถูกดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต จึงมีความละเอียดมากเมื่อนำมาร่อนผ่านตะแกรงพบว่า สามารถร่อนผ่านตะแกรง Sieve เบอร์ตะแกรง 325 ที่มีขนาดรูตะแกรง 45μm ได้ทั้งหมด จึงสามารถนำมาใช้ในการทดลองได้เลย



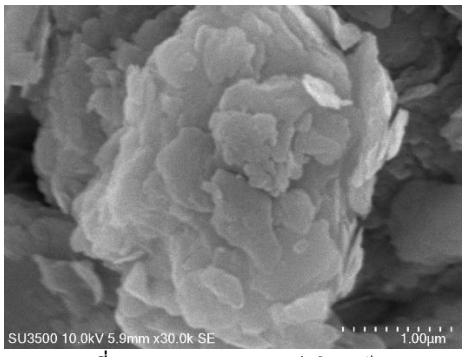
รูปที่ 1 เถ้าลอยน้ำกากส่า (Fad)



รูปที่ 2 ภาพขยาย 5,000 เท่าเถ้าลอยน้ำกากส่า (Fad)

2.2 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯนั้นได้มาจากการทำเสาเข็มเจาะบริเวณ เขตบางซื่อกรุงเทพมหานคร ในช่วงความลึก 3-4 เมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมาก โดยได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นธรรมชาติและหาขีดจำกัดความข้นเหลวมีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ที่ร้อยละ 87.50 ขีดจำกัดพลาสติกที่ร้อยละ 30.54 ค่าดัชนีความข้นเหลวร้อยละ 56.96 และค่าความถ่วงจำเพาะ 2.61 ปริมาณความชื้นธรรมชาติร้อยละ 49.64 ผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 1 จากนั้นนำมาทำเป็นน้ำโคลน ที่ปริมาณความชื้น 1.1 เท่า ของขีดจำกัดเหลว เพื่อเตรียมการผสมต่อไป



รูปที่ 3 ภาพขยาย 5,000 เท่าดินเหนียว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน

คุณสมบัติดิน	ผลการทดสอบ
Atterberg's Limits :	
Liquid Limit (LL)	87.50 %
Plastic Limit (PL)	30.54 %
Plasticity Index (PI)	56.96 %
Specific Gravity (Gs)	2.61
Natural Moisture Content	49.64

2.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดร็อกไซด์

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดร็อกไซด์ (NaOH) บริสุทธิ์ 99.99 % ซึ่งมีลักษณะ เม็ดไข่มุก มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ เท่ากับ 40 กรัมต่อ น้ำ 1,000 กรัม

2.4 การเตรียมโมลชิ้นตัวอย่าง

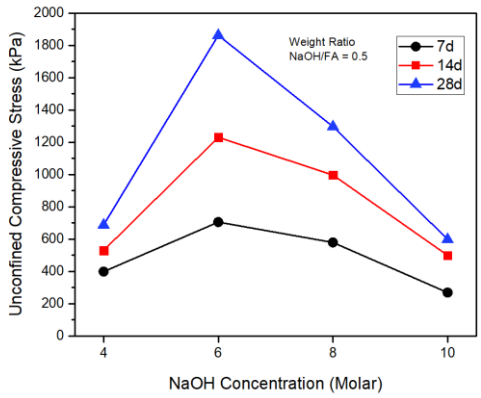
โมลตัวอย่าง ทำจากท่อพีวีซี ขนาด 38 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีความยาว 76 มิลลิเมตร (ขนาดเผื่อการหดตัว) ขัดให้เรียบและให้ได้ฉากจะได้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร สูง 74 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดต่อไป

3. การหาความเข้มข้นของโซเดียมไฮร็อคไซด์ (NaOH) ที่เหมาะสม ของเถ้าลอยน้ำกากส่า

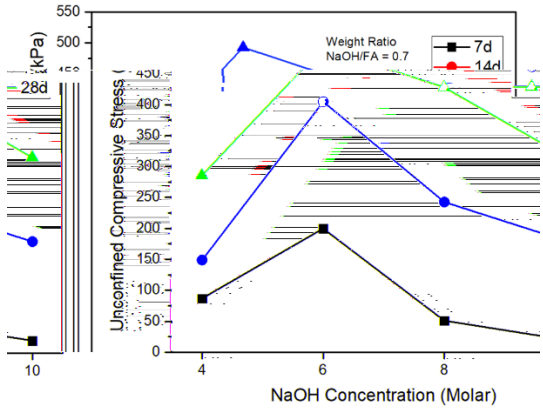
นำเถ้าลอยน้ำกากส่านำมาผสมกับน้ำที่อัตราส่วน NaOH/FA เท่ากับ 0.5, 0.7 และ 1.0 โดยน้ำหนักจากนั้นน้ำที่นำมาผสมนั้นจะแปรผันความเข้มข้นของ NaOH ที่ 4, 6 ,8 และ 10 โมลาร์ ตามลำดับ ทำการบ่มที่อายุตัวอย่าง 7, 14 และ 28 วันที่อุณหภูมิปกติก่อนที่จะนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ผลการทดลองพบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ เมื่อใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าลอยน้ำกากส่ามีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงที่สุด เท่ากับ 1,862 kPa ที่ NaOH/FA เท่ากับ 0.5



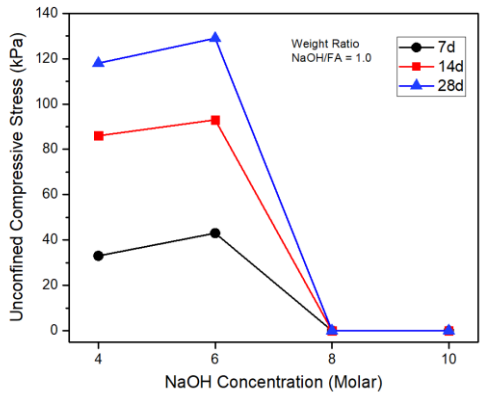
รูปที่ 4 หล่อตัวอย่างสำหรับใส่ตัวอย่างและบ่ม ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ของจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่มต่างๆ เมื่อ NaOH/FA 0.5



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ของจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่มต่างๆ เมื่อ NaOH/FA 0.7

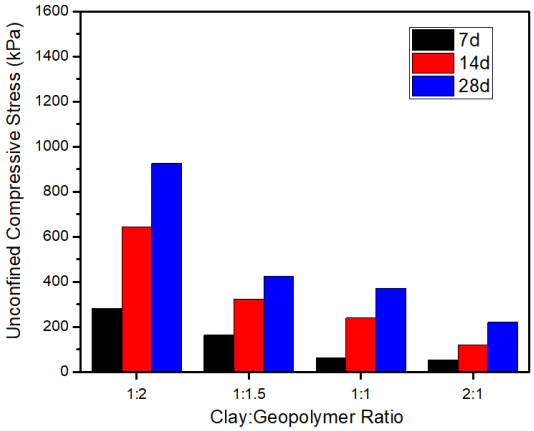


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ของจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่มต่างๆ เมื่อ NaOH/FA 0.1

4. ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่า

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเมื่อใช้จิโอโพลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน เมื่อให้สัดส่วนผสมระหว่าง ดินเหนียวอ่อนต่อจิโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 1:2, 1:1.5, 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องและจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยน้ำกากส่าเลือกใช้ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 6 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยน้ำกากส่า เท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด

ผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยจิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยน้ำกากส่าที่สัดส่วนดินเหนียวอ่อนต่อจิโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เท่ากับ 925 kPa และค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 220 kPa เมื่อใช้สัดส่วนดินเหนียวอ่อนต่อจิโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 2:1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณจิโอโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงขึ้นตามไปด้วย



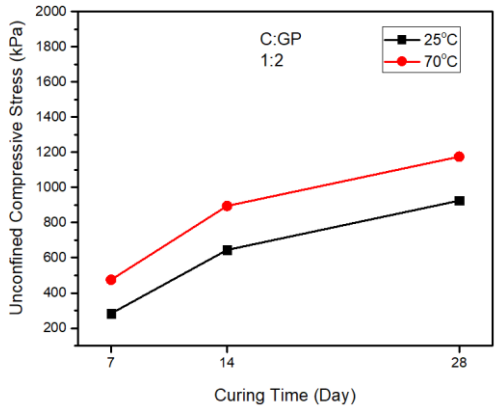
รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่สัดส่วน ดินเหนียวต่อจิโอโพลิเมอร์ บ่มที่อุณหภูมิห้อง

5. ผลกระทบด้านความร้อนต่อดินเหนียวอ่อนกรุงเทพปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่า

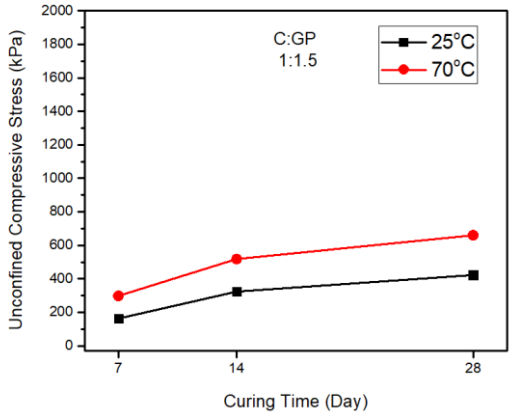
เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนที่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยจิโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่า ที่บ่มด้วยอุณภูมิห้องจนครบอายุ 7, 14 และ 28 วัน กับบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศา เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มต่อที่อุณภูมิห้อง จนครบอายุ 7, 14 และ 28 วัน

ผลการทดลองพบว่า เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างเป็นการกระตุ้นปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์เซชัน ให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยจิโอโพลิเมอร์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อน โดยเมื่ออายุบ่ม 28 วัน ที่สัดส่วนระหว่างดินเหนียวอ่อนกับจีโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 1:2 กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยอุณหภูมิ 70

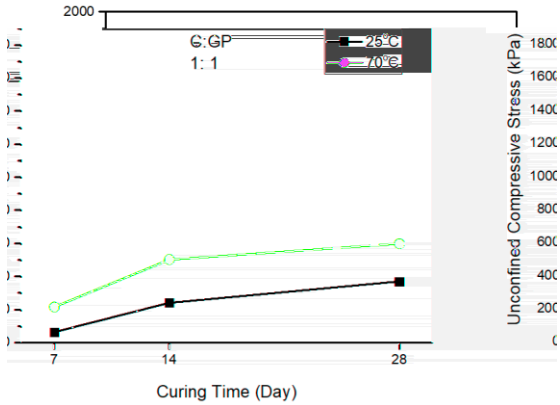
องศาเซลเซียสสอดคล้องกับ [8] มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1,175 kPa สูงกว่า ดินเหนียวอ่อนที่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยจิโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่า ที่บ่มด้วยอุณภูมิห้อง ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเท่ากับ 925 kPa หรือสูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 27 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานดินซีเมนต์กรมทางหลวงต้องมีค่า 689 kPa [14]



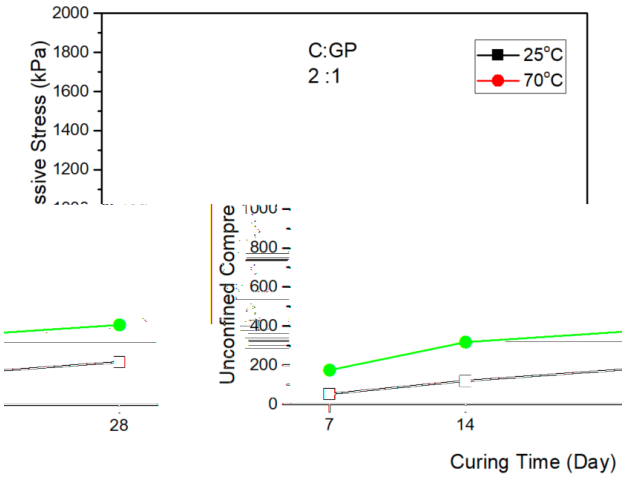
รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่สัดส่วนดินเหนียวต่อจิโอโพลิเมอร์เท่ากับ 1:2



รูปที่ 10 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่สัดส่วนดินเหนียวต่อจิโอโพลิเมอร์เท่ากับ 1:1.5



รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่สัดส่วนดินเหนียวต่อจิโอโพลิเมอร์เท่ากับ 1:1



รูปที่ 12 กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่สัดส่วนดินเหนียวต่อจิโอพอลิเมอร์เท่ากับ 2:1

แสดงให้เห็นว่าปริมาณสัดส่วนจิโอโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนมากขึ้นส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเพิ่มสูงขึ้น โดยสัดส่วนดินเหนียวต่อจิโอโพลิเมอร์เท่ากับ 1:2 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดทั้งกรณีที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง เท่ากับ 925 kPa และกระตุ้นด้วยความร้อน 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1,175 kPa ตามด้วยที่สัดส่วน 1:1.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดทั้งกรณีที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง เท่ากับ 423 kPa และกระตุ้นด้วยความร้อน 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 660 kPa และน้อยที่สุดที่สัดส่วนดินเหนียวต่อจิโอโพลิเมอร์เท่ากับ 2:1 หรือ 1:0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดทั้งกรณีที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง เท่ากับ 220 kPa และกระตุ้นด้วยความร้อน 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 410 kPa

6. สรุปผลการทดลอง

6.1 อายุการบ่ม

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของจิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยน้ำกากส่ากระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ โดยพบว่าอายุบ่ม 28 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ จิโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่ามีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่เท่ากับ 1,862.38 kPa

6.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

ผลการทดลองพบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ เมื่อใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าลอยน้ำกากส่า เท่ากับ 0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงที่สุดเท่ากับ 1,862 kPa และน้อยที่สุดเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายมากหรือน้อยเกินไป มีผลต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

6.3 สัดส่วนระหว่างดินเหนียวอ่อนและจิโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่า

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย จิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยน้ำกากส่า ที่สัดส่วนดินเหนียวอ่อนต่อจิโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

เท่ากับ 925 kPa และค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 220 kPa เมื่อใช้สัดส่วนดินเหนียวอ่อนต่อจิโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 2:1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณจิโอโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงขึ้นตามไปด้วย

6.4 กระตุ้นปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อน

เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างเป็นการกระตุ้นปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์เซชันให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยจิโอโพลิเมอร์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อน โดยเมื่ออายุบ่ม 28 วัน ที่สัดส่วนระหว่างดินเหนียวอ่อนกับจิโอโพลิเมอร์เท่ากับ 1:2 กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับ [8] มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1175 kPa สูงกว่า ดินเหนียวอ่อนที่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยจิโอโพลิเมอร์เถ้าลอยน้ำกากส่า ที่บ่มด้วยอุณภูมิห้อง ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเท่ากับ 925 kPa หรือสูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 27

7. กิติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยครั้งนี้กระผมและทีมงานขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เลขที่ทุน FTE-2563-10 ผู้ที่ช่วยเหลือในงานวิจัยทุกท่าน รวมไปถึง คณะผู้จัดงานการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Horpibulsuk and R. Rachan, "Novel approach for analyzing compressibility and permeability characteristics of Bangkok clayey soils," in The 15 th Southeast Asian Geotechnical, Bangkok, 2004.

[2] R. Rachan and S. Vichan, "Unconfined Compressive Strength Development and Microstructure of Calcium Carbide Residue and Biomass Ash Admixed in Compacted Soft Bangkok Clay," KMUTT Research and Development Journal, pp. 51-71, 2013.

[3] S. Muadmongkol and Y. Phasuk, "Improvement of Clay with cement by wet method," Burapha University , 2017.

[4] D. Bergado, L. Anderson, N. Miura and A. Balasubramaniam, Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments, New York: ASCE Press, 1996.

[5] V. N. S. Murthy , Geotechnical Engineering: Principles And Practices Of Soil Mechanics And Foundation Engineering, India: T and F India, 2012.

[6] P. Thanesthitiwat, "Properties of geopolymer paste from insulation fire brick dust," Thammasat University Theses, 2015.

[7] A. R. G. A. a. C. M. F. V. M. T. Marvila, "Reaction mechanisms of alkali-activated materials," Rev. IBRACON Estrut., vol. 14, no. 3, p. e14309, 2021.

[8] W. Chalee, "Effect of curing temperature on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar," Burapha university, Chonburi, 2016.

[9] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham and P. Chindaprasirt, "Study physical property of fly ash geopolymer paste containing Portland cement," Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal, pp. 60-69, 2013.

[10] T. Whangrattanacharoen, D. Ketrot, S. Anusontpornperm and S. Thanachit, "Effect of vinasse from ethanol plant and chemical fertilizer on yield and nutrients uptake of sugarcane, and some soil properties," KHON KAEN AGR. J., pp. 1276-1291, 2020.

[11] M. Ta-oun, C. Boonthai Iwai and S. Pruangka, "The impact on soil resources from spent wash in sugar cane area-base," KHON KAEN AGR. J, pp. 419-423, 2017.

[12] R. Lakoo and . W. Phoochinda, "Guidelines for Utilization of Distillery Slop From Liquor Production for Factory," Rajabhat Rambhai Barni Research Journal, pp. 139-148, 2019.

[13] P. Thumbumrung, "The Characteristic Study of Geopolymer Material from Kaolin, Palm Ash and Concentrated Latex Waste Sludge," Prince of Songkla University, Songkla, 2015.

[14] มาตราฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (2564) ทล.-ม 206/2564 กรมทางหลวง