

# การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

## Soft clay improvement using kaolin-Rice husk ash geopolymer activated by sodium hydroxide

มนากานต์ มาคโอสถ<sup>1</sup> พานิช วุฒิพฤษย์<sup>1</sup> อธิธิพล มีผล<sup>1</sup> สยาม แกมขุนทด<sup>1</sup> และ ศิริศักดิ์ คงสมศักดิ์สกุล<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\*Corresponding author; E-mail address: S6102032856199@email.kmutnb.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพโดยใช้ดินขาวและเถ้าแกลบกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยนำดินขาว (KA) ผสมกับเถ้าแกลบ (RA) ในสัดส่วน KA: RA 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 จากนั้นผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์โดยใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $q_u$ ) คือตัวอย่างที่มีสัดส่วน KA: RA 70:30 ซึ่งใช้เป็นสารปรับปรุงดิน นำดินเหนียวตัวอย่างมาปรับปรุงด้วยการแทนที่ด้วยจีโอโพลิเมอร์ KA-RA ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยนำหนักของดินแห้ง บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25, 70 และ 100°C เป็นเวลา 7, 14, 28, 60 และ 120 วัน นำตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมประกอบด้วยความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ( $q_u$ ) ความคงทนภายใต้สภาวะแห้งและเปียก และการซึมผ่าน ตัวอย่างดินถูกแทนที่ด้วย KA-RA geopolymer 30% ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วันและอุณหภูมิการบ่ม 70°C ให้ค่า  $q_u$  152.98 ksc ซึ่งใกล้เคียงกับ  $q_u$  ที่อุณหภูมิการบ่ม 100°C แต่มีข้อดีคือประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้ค่า  $q_u$  หลังจากรอบการบ่มและแห้ง 12 รอบเท่ากับ 93.55 ksc ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.105/2515 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) เท่ากับ  $4.89 \times 10^{-10}$  m/s ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุที่ไม่อนุญาตให้น้ำซึมผ่านและยืดอายุการใช้งานได้เช่นกัน

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, กำลังรับแรงอัดแบบไม่ จำกัด, โซเดียมไฮดรอกไซด์, ความทนทาน

### Abstract

This research studied the improvement of Bangkok clay using kaolin - rice husk ash activated by sodium hydroxide. Kaolin (KA) was thoroughly mixed with rice husk ash (RA) in the proportion of KA: RA 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50. The mixture was then activated by sodium hydroxide solution of 8 molar concentrations at the optimum moisture content. The maximum unconfined compressive strength ( $q_u$ ) was obtained from sample with KA: RA 70:30 which was used as soil stabilizing agent. The clay samples were treated by KA-RA geopolymer

replacement of 10, 20, 30, 40, and 50% by weight of dry soil. The samples were cured at 25, 70, and 100°C for 7, 14, 28, 60 and 120 days. Engineering properties were tested including unconfined compressive strength, durability in term of wetting and drying condition, and permeability. Clay sample replaced by 30% KA-RA geopolymer at curing period 60 days and curing temperature 70°C exhibited  $q_u$  152.95 ksc, which is close to  $q_u$  at curing temperature 100°C but the advantage is more energy saving. Moreover, unconfined compressive strength after 12 rounds of wet and dry conditions was 93.55 ksc which comply with the Department of Highways DH-T 105/1972 A permeability coefficient (k) is  $4.89 \times 10^{-10}$  m/s which can be used as impervious material and extends service life as well.

Keywords: geopolymer, unconfined compressive strength, Sodium hydroxide, durability

### 1. คำนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านเสถียรภาพและการทรุดตัวของโครงสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครรวมถึงลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง เกิดจากชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งเป็นดินที่มีเม็ดละเอียดมาก มีปริมาณน้ำประกอบอยู่เป็นอัตราส่วนที่สูงมากและมีค่าขีดจำกัดเหลวสูงใกล้เคียงกับค่าปริมาณ ความชื้นในมวลดินธรรมชาติ [1] จึงทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนต่ำ มีการยุบตัวได้สูง ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ต่ำ หากปัจจัยดังกล่าวไม่เหมาะสม จะส่งผลทำให้ดินไม่สามารถนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมได้ [2] เพราะฉะนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อช่วยลดปัญหา และลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้

การวิจัยนี้ให้ความสำคัญต่อปัจจัยหลักที่เป็นผลมาจากการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวโดยใช้ดินขาวและเถ้าแกลบกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้สามารถนำมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้ ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่าง สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ ดินขาว และเถ้าแกลบ เป็นวัสดุตั้งต้น

ศึกษากำลัรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดิน ความคงทนของตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ดินขาว และเถ้าแกลบ กล่าวคือ นำดินขาว (KA) ผสมให้เข้ากันดีกับเถ้าแกลบ (RA) ในสัดส่วน KA: RA 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ตามลำดับ จากนั้นผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสม จะสามารถนำค่าสัดส่วนความเหมาะสมในการผสมดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวเพื่อให้สามารถนำดินนั้นมาใช้งานวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสมต่อไป

## 2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### 2.1 วัสดุ

#### 2.1.1 เถ้าแกลบ (Rice husk ash)

ตัวอย่างเถ้าแกลบที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าว ผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส [3] โดยคัตขนาดของเถ้าแกลบที่มีขนาดของเม็ดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ เบอร์ 325

#### 2.1.2 ดินขาว (Kaolin)

ตัวอย่างดินขาวที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำเซรามิก โดยส่วนใหญ่เป็นดินขาวจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการผุพังตามธรรมชาติของหินต่าง ๆ [4] โดยคัตขนาดของดินขาวที่มีขนาดของเม็ดผ่านตะแกรงเบอร์ 200

#### 2.1.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สารละลายมีลักษณะของแข็งที่มีลักษณะเป็นเกล็ดชนิดเกรตการค่านำมาละลายกับน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายให้มีค่า 8 โมลาร์ทำได้โดยการละลาย NaOH 400 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร [5]

### 2.2 ตัวอย่าง KA-RA จีโอโพลิเมอร์

ตัวอย่างดินผสมโดยอัตราส่วนผสมได้จากการนำดินขาว (KA) ที่ผ่านการคัตขนาดแล้ว ผสมให้เข้ากันดีกับเถ้าแกลบ (RA) ในสัดส่วน KA: RA 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ตามลำดับ จากนั้นผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 8 โมลาร์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสม นำไปทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $q_u$ ) ดังแสดงในตารางที่ 1

### 2.3 ขั้นตอนการนำดินเหนียวมาปรับปรุงด้วย KA-RA จีโอโพลิเมอร์

การศึกษาในครั้งนี้ผู้วิจัยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนบริเวณกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีค่าขีดจำกัดเหลว 51.13% ขีดจำกัดพลาสติก 28.94% ดัชนีพลาสติก 22.18% และค่าขีดจำกัดหดตัว 7.41% แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีปริมาณน้ำประกอบอยู่เป็นอัตราส่วนที่สูงมากและมีค่าขีดจำกัดเหลวสูงใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นในมวลดินธรรมชาติ จึงต้องปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน เพื่อให้มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ดีขึ้น โดยการนำดินเหนียวตัวอย่างมาปรับปรุงด้วยการ

แทนที่ด้วย KA-RA จีโอโพลิเมอร์ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักของดินแห้ง

ตารางที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $q_u$ ) ของ KA : RA จีโอโพลิเมอร์

Unconfined Compressive Strength (kN/m <sup>2</sup> ) ที่ 70 c					
ส่วนผสมดินขาว:เถ้าแกลบ	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	120 วัน
90:10	2,966.49	3,262.35	3,642.63	4,052.32	4,287.13
80:20	3,548.43	4,058.16	4,539.19	5,012.11	5,287.45
70:30	4,236.58	5,186.42	5,963.43	6,884.04	7,259.10
60:40	4,044.21	4,866.58	5,326.84	5,893.76	6,138.91
50:50	3,826.43	4,666.61	5,026.42	5,574.01	5,839.51

จากตารางที่ 1 พบว่าตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $q_u$ ) คือตัวอย่างที่มีสัดส่วน KA: RA 70:30 ซึ่งจะนำสัดส่วนนี้ไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน เพื่อนำไปผสมกับดินเหนียว

### 2.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ แบบหล่อ (Mold) ที่ใช้เป็นแบบหล่อประกอบทำจากเหล็กกล้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มม. ความสูง 70 มม. ขั้นตอนต่อไปนำดินขาว (KA) ผสมให้เข้ากันดีกับเถ้าแกลบ (RA) ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ต่อมานำไปผสมกับตัวอย่างดินเหนียวที่เตรียมไว้ผสมให้เข้ากันดี และนำมาขึ้นตัวอย่างในแบบหล่อ และหล่อตัวอย่างด้วยพลาสติกใส เพื่อป้องกันตัวอย่างสูญเสียความชื้น นำตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7, 14, 28, 60 และ 120 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมประกอบด้วยความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ( $q_u$ ) ความคงทนภายใต้สภาวะแห้งและเปียก และการซึมผ่าน

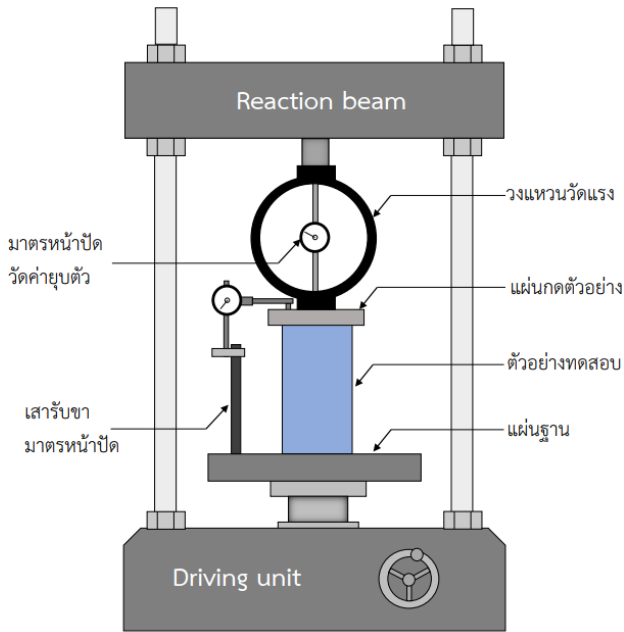


รูปที่ 1 ก) แบบหล่อ (Mold) ข) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

## 3. ผลการทดสอบ

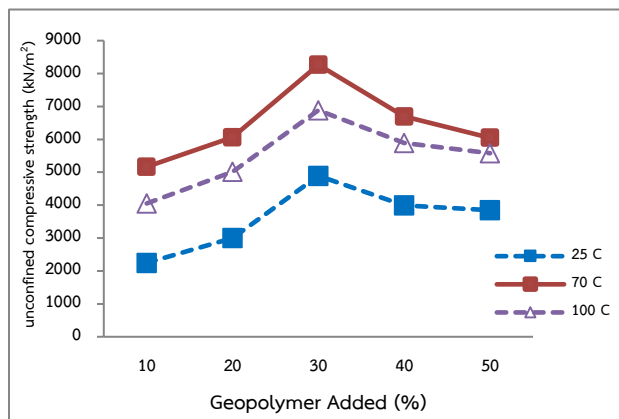
### 3.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ( $q_u$ )

### 3.1.1 อิทธิพลสัดส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด

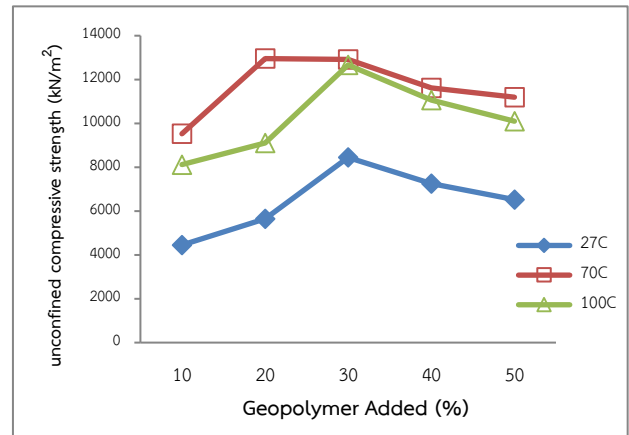


รูปที่ 2 วิธีการทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ( $q_u$ )

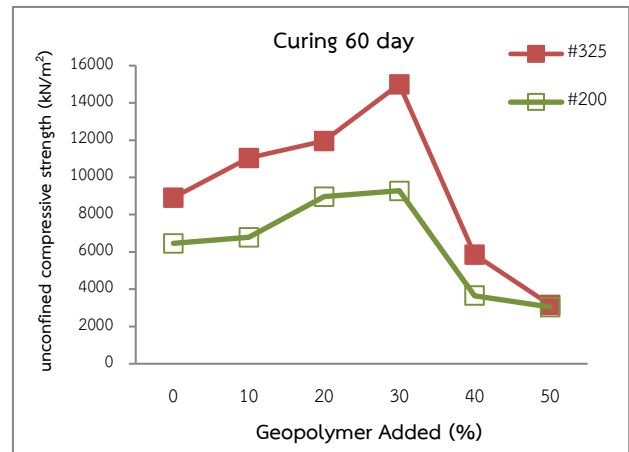
เมื่อพิจารณากำลังอัดสูงสุดของดินผสมจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์ การพัฒนา กำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ เบอร์ 325 ในสัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่ 30 % จะมีค่ากำลังอัดสูงสุด และ กำลังอัดจะลดลงเมื่อสัดส่วน 40%-50% ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 และเมื่อนำ กำลังอัดระหว่างวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยเถ้าแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เปรียบเทียบกับที่จีโอโพลิเมอร์ผสมด้วยเถ้าแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 325 พบว่า การพัฒนา กำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 มีกำลังสูงกว่าที่จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ใน ทุกสัดส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากเถ้าแกลบที่ร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 325 มวลเม็ดจะมีความละเอียดกว่าเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น เกิดการยึดเกาะและเชื่อมแน่น ระหว่างมวลเม็ด จึงส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน [6]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจีโอโพลิเมอร์ดินขาว #200 และเถ้า แกลบ #200



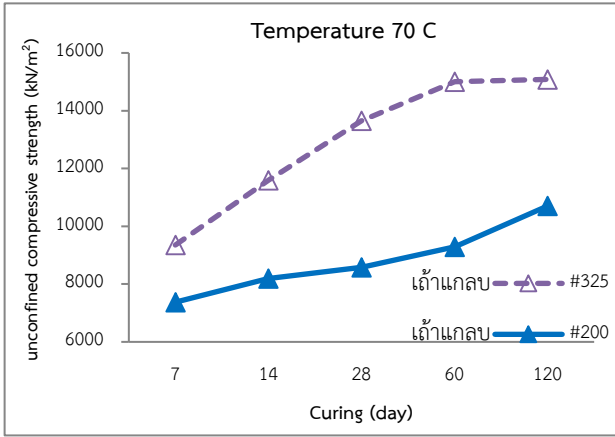
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจีโอโพลิเมอร์ดินขาว #200 และเถ้า แกลบ #325



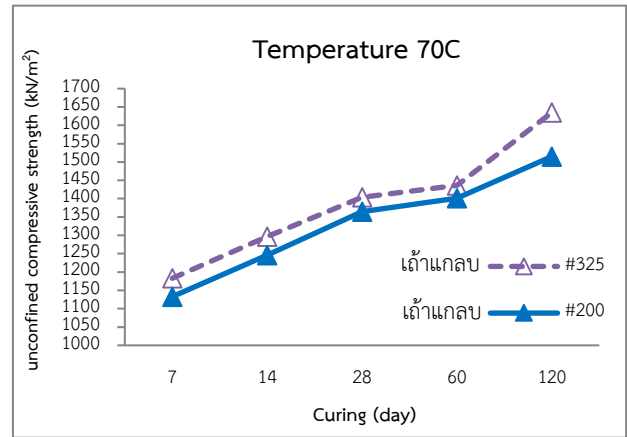
รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างจีโอโพลิเมอร์ดินขาว #200 เถ้าแกลบ #200 และ จีโอโพลิเมอร์ดินขาว #200 เถ้าแกลบ #325 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

### 3.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดสูงสุด

ระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นทุกตัวอย่างการทดสอบดังรูปที่ 5 พบว่าการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ ระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน และหลังจากเกิน 60 วันไปแล้วการพัฒนา กำลังอัดยังคงมีต่อเนื่องแต่จะเป็นไปอย่างช้า ๆ ซึ่งการพัฒนากำลังที่เพิ่ม สูงขึ้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน เกิดจากการพัฒนาโมเลกุลลูกโซ่ของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [7] จากขบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน [11]

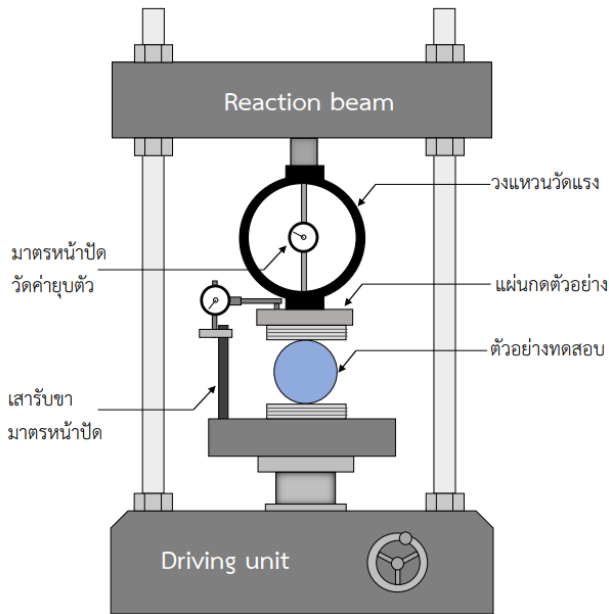


รูปที่ 6 เปรียบเทียบระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ #200 และ #325 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด ( $T_r$ ) ที่อุณหภูมิ 70 °C สัดส่วนของดินเหนียวต่อจีโอพอลิเมอร์ที่ 70 : 30

### 3.2 ผลการทดสอบ Splitting Tensile Strength ( $T_r$ ) (ASTM D3967)

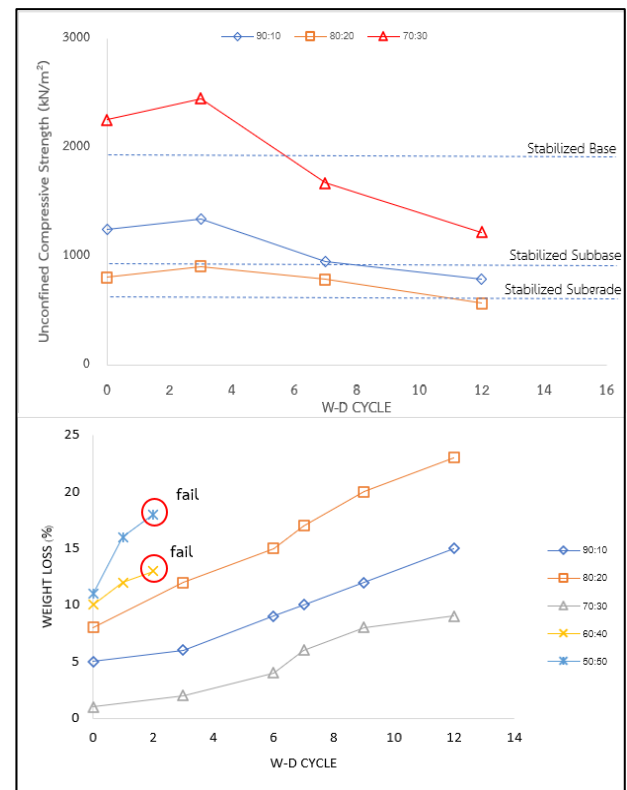


รูปที่ 7 วิธีการทดสอบความต้านทานแรงดึง ( $T_r$ )

จากการทดสอบ Splitting Tensile Strength เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด ( $T_r$ ) ของดินขาวผสมเถ้าแกลบและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน KA-RA จีโอพอลิเมอร์ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักและปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำใช้ความเข้มข้น 8 โมลาร์ (Molar) ที่ปริมาตร OMC ที่อายุ 7 วัน 14 วัน 28 วัน 60 วัน และ 120 วัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด ( $T_r$ ) ที่อุณหภูมิ 70 °C สัดส่วนของดินเหนียวต่อจีโอพอลิเมอร์ที่ 70 : 30 จะมีค่าสูงที่สุด และจะเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่าง ดังรูปที่ 6

### 3.3 ผลการทดสอบ Wetting and Drying (ASTM D557)

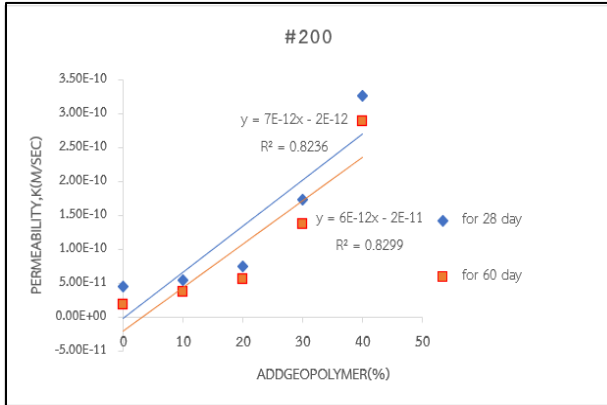
จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ดินขาวและซีเถ้าแกลบ [10] พบว่า เมื่อปริมาณจีโอพอลิเมอร์ต่ำร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการทดสอบเปียกสลับแห้งมีแนวโน้มที่ลดลง แต่เมื่อปริมาณจีโอพอลิเมอร์สูงร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการทดสอบเปียกสลับแห้งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยการทดสอบ Wetting and Drying พบว่า สัดส่วนดินเหนียวต่อจีโอพอลิเมอร์ที่ 70 : 30 มีค่ากำลังที่สูงและทนทานที่สุด



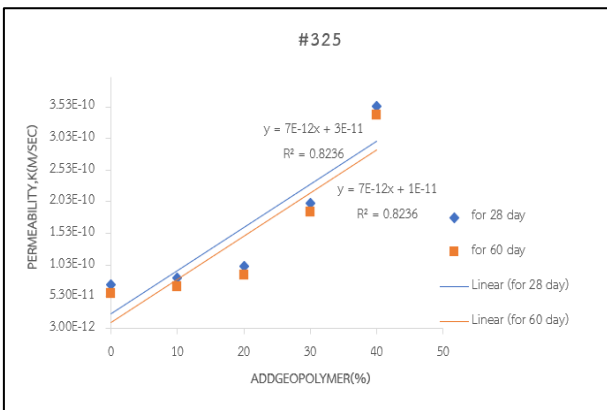
รูปที่ 9 ผลการทดสอบความคงทนภายใต้สภาวะแห้งและเปียก

### 3.4 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (ASTM D2434)

จากการทดสอบ พบว่าสัดส่วน KA-RA geopolymer 70:30 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบใช้ความดันเข้าช่วย (Constant Head) ที่อุณหภูมิ น้ำ 25 องศาเซลเซียส (Coefficient K 20° C) [8] ในดินเหนียวมีค่าเท่ากับ  $4.89 \times 10^{-10}$  ม./วินาที จากการทดสอบในอัตราส่วนอื่น ๆ ไม่สามารถรายงานผลการทดสอบได้เนื่องจากน้ำไม่สามารถซึมผ่านตัวอย่างได้ (ที่บ้น้ำ) จึงไม่สามารถรายงานผลการทดลองได้ ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ดินขาว #200 และ เถ้า  
แกลบ #200

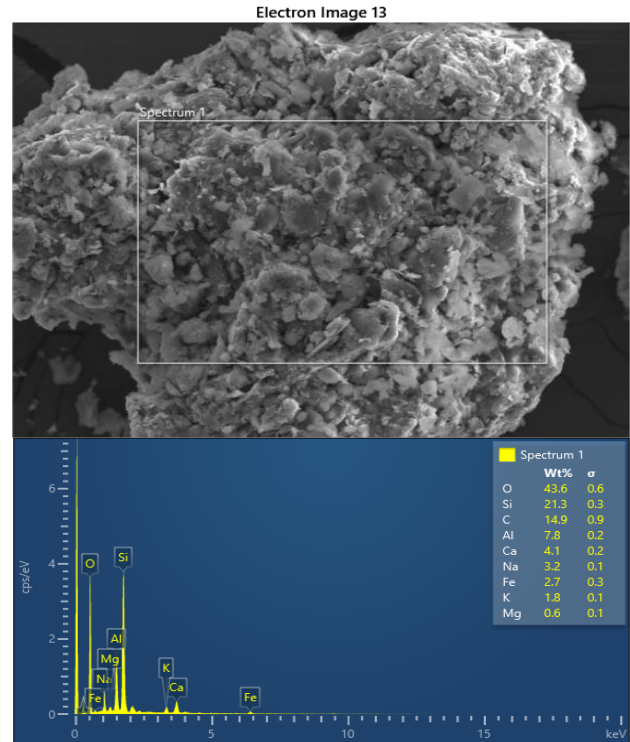


รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ดินขาว #200 และ เถ้า  
แกลบ #325

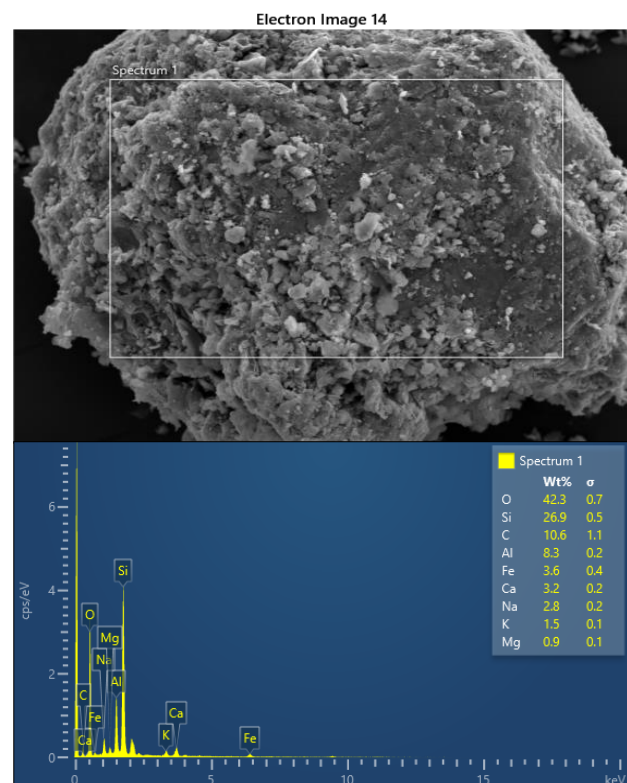
### 3.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

จากการทดสอบ พบว่าเถ้าแกลบที่ผ่าน #325 มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และไอออนออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) สูงกว่าเถ้าแกลบที่ผ่าน #200 มีโครงสร้าง 3 มิติแบบ อัสัฐาน (amorphous) เกิดจากสารละลายต่าง (alkaline) ทำปฏิกิริยากับ สารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมิเนียม (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่อยู่ใน วัสดุปอซโซลาน โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนทำให้สารประกอบ เหล่านั้นแตกตัวและทำปฏิกิริยาลูกโซ่ซึ่งมีลักษณะเป็นโมเลกุลย่อยๆ

ต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ทำให้เกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้โดย เรียงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) [12] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ากำลังอัดสูงสุดที่ตัวอย่างเถ้าแกลบ #325 สูงกว่า เถ้าแกลบ #200 ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของตัวอย่างด้วยกล้อง  
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เถ้าแกลบที่ผ่าน #200



**รูปที่ 13** ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แก้วแก้วที่ผ่าน #325 แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) 26.9% อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 8.3% และไอออนออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 3.6% โดยน้ำหนัก

#### 4. บทสรุป

จากผลการทดลองสรุปได้นำตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมประกอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ( $q_u$ ) ความคงทนภายใต้สภาวะแห้งและเปียก และการซึมผ่าน ตัวอย่างดินถูกแทนที่ด้วย KA-RA geopolymer 30% ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วันและอุณหภูมิการบ่ม 70°C ให้ค่า  $q_u$  152.98 ksc ซึ่งใกล้เคียงกับ  $q_u$  ที่อุณหภูมิการบ่ม 100°C แต่มีข้อดีคือประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้ค่า  $q_u$  หลังจากสภาวะเปียกและแห้ง 12 รอบเท่ากับ 93.55 ksc ซึ่งสอดคล้องกับ ASTM D559 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) เท่ากับ  $4.89 \times 10^{-10}$  m/s ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุที่ไม่อนุญาตให้น้ำซึมผ่านและยืดอายุการใช้งานได้เช่นกัน เมื่อนำผลการทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ( $q_u$ ) และกำลังรับแรงดึง Splitting Tensile Strength ( $T_r$ ) มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ระบุไว้ ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ผลการทดสอบเมื่อเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง

คุณสมบัติ	Added Geopolymer 30 %	Added Geopolymer 20 %
1. กำลังรับแรงอัด (UCS) ไม่น้อยกว่า 17.5 ksc (1,716.75 kN/m <sup>2</sup> ) (ทล.-ท.105/2515, ASTM D2166) [9]	15,001.64 kN/m <sup>2</sup> เพิ่มขึ้น 68.14%	11,963.48 kN/m <sup>2</sup> เพิ่มขึ้น 34.09%
2. กำลังรับแรงดึง ( $T_r$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 5% เมื่อเทียบกับดินที่ไม่เติมจีโอฟิลิเมอร์	1,435.83 kN/m <sup>2</sup> เพิ่มขึ้น 29.04%	1,321.99 kN/m <sup>2</sup> เพิ่มขึ้น 18.81%

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความละเอียดของแก้วแก้วซึ่งใช้เป็นสัดส่วนผสมจีโอฟิลิเมอร์ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ 325 ยังมีผลต่อการพัฒนา กำลังอัด สังเกตได้จากค่ากำลังอัดสูงสุดของ ปรากฏว่า ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแก้วแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 325 กำลังอัดสูงสุดมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแก้วแก้วที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ในทุกสัดส่วนผสม

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ อาจารย์ ดร.อิทธิพล มีผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยดูแลเอาใจใส่ ให้คำแนะนำวิธีการทดสอบ คอยติดตามผลการดำเนินงาน คอยให้คำปรึกษาและช่วยหาแนวทางในการ

แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทั้งในด้านทฤษฎีและปฏิบัติ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการพิจารณาบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 ที่ให้ความกรุณาตอบรับบทความเพื่อนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการฯ ดังกล่าว

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษม เพชรเกต. (2530) หนังสือโยธาสาร. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [2] กฤตย์ คมขำ, ศุภกิจ นนทนนันท์, บาร์เมศ วรธนะภูติ, ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์, ปณิธาน เต็งยะ (2557). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยจีโอฟิลิเมอร์จากแก้วลอย *วารสารวิชาการ* หน้า 1-2
- [3] สุทัศน์ จันบัวลา (2554) ผลของแก้ว แก้ว และแก้ว ขานอ้อย ต่อสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผามวลเบา คลังปัญญา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUIR) หน้า 35-37
- [4] อาบีเต็ง ฮาวา, วรพจน์ ประชาเสรี (2559) จีโอฟิลิเมอร์ดินขาวเผาวารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2559 หน้า 8-9
- [5] เจริญศักดิ์ กลับประสิทธิ์ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญา จินดาประเสริฐ และ สมิตร ส่งพิริยะกิจ จีโอฟิลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากแก้วถ่านหินและแก้วชีวมวล ตอนที่ 1 : ผลกระทบของสัดส่วนผสมต่อกำลังอัด วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2551, หน้า 9-16
- [6] ภูวิศ ตรีสุวรรณ สมิตร ส่งพิริยะกิจ ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ผลกระทบของความละเอียดของแก้วแก้ว-เปลือกไม้ ต่อกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของจีโอฟิลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากแก้วแก้ว-เปลือกไม้ผสมแก้วถ่านหิน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, 14 - 16 พฤษภาคม 2551, ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา จังหวัดชลบุรี, หน้า (MAT) 306-311
- [7] ธนกฤษณ์ ทิพย์มนตรี, พานิช วุฒิพฤกษ์, ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข (2553) วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 ม.ค. - มิ.ย. 2553 หน้า 5
- [8] วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ สหลาก หอมวุฒิวังค์ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ เอกชัย ภัทรวงค์ไพบูลย์ ผลกระทบของแก้วขานอ้อยที่มีผลต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, ณ โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ. พิษณุโลก , บทความวิจัย MAT-015, p. 199-206.
- [9] กรมทางหลวง วิธีการหาค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) (ทล.-ท.105/2515, ASTM D2166) หน้า 1-8
- [10] ศักรินทร์ เหลืองกำจร (2557) วัสดุจีโอฟิลิเมอร์ ( Geopolymer Material) วารสารสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย หน้า 1-9

- [11] กรกนก บุญเสริม1\* อารีพร เบ้าอุฬาล1 สิริรัตน์ ลิคนันท์ (อินทรกำ  
แหง ณ์ัฐคณิน สุภเมธานนท์2 สุตาร์ตัน สมบัติศรี (2561) การ  
สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินพินายผสมเถ้าลอย วารสารวิจัยและ  
พัฒนา มจร. ปีที่ 41 ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม 2561หน้าที่ 6-7
- [12] วิเชียร ซาลี (2560) ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบและความ  
เข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
(Effect of rice husk ash fineness and NaOH concentration  
on the compressive strength of geopolymer concrete)  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยบูรพา พฤศจิกายน 2560  
หน้า 4-11