

# ผลกระทบของเถ้าแกลบต่อพฤติกรรมการรับแรงอัด ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง Effect of rice husk ash on compression behavior of high-calcium fly ash geopolymer concrete

สุนันต์ ชะนะมา<sup>1,\*</sup> พิชชา จงวิวัฒน์กุล<sup>2</sup> และ อัครวัชร เล่นวาริ<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: 6572090021@student.chula.ac.th

## บทคัดย่อ

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ และเพื่อส่งเสริมการนำเถ้าแกลบจากการเผาเปลือกเมล็ดข้าวในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลมาผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพและพฤติกรรมการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าแกลบตั้งแต่ 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รวมทั้งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายแอลคาไลกระตุ้น โดยมีอัตราส่วนของสารละลายทั้งสองเท่ากับ 1.0 และบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบหากล้างรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง จากการศึกษพบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.9 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าระหว่าง 12,000-19,000 MPa เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัด และค่าอัตราส่วนปัวซองตั้งแต่ 0.19 ถึง 0.31 นอกจากนั้น กราฟความเค้น-ความเครียดแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทำให้ความเหนียวของวัสดุเพิ่มขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัดได้มากขึ้นก่อนการวิบัติ

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต, เถ้าลอย, เถ้าแกลบ, การบ่มที่อุณหภูมิห้อง, กราฟความเค้น-ความเครียด

## Abstract

Geopolymer concrete is an alternative material that is more eco-friendly than Portland cement concrete. To promote the use of rice husk ash which is a by-product from biomass power plants for domestic geopolymer concrete production, this research investigated the physical properties and behavior in compression of geopolymer concrete utilizing high-calcium fly ash and rice

husk ash from 0 to 60 percent by mass. The 10 M sodium hydroxide and sodium silicate solutions were used as alkali activator solutions with the ratio of 1.0. Geopolymer concrete specimens were cured in ambient condition for 28 days before compression testing to determine compressive strength, modulus of elasticity, and Poisson's ratio. The results showed that geopolymer concrete using 20-percent rice husk ash exhibited the maximum compressive strength of 25.9 MPa. Modulus of elasticity of the geopolymer concrete varied from 12,000 to 19,000 MPa as compressive strength increased. Poisson's ratio varied from 0.19 to 0.31. Moreover, the stress-strain curves showed an increase in ductility of the geopolymer concrete using higher rice husk ash contents due to higher plastic deformation before fracture.

Keywords: geopolymer concrete, fly ash, rice husk ash, ambient curing, stress-strain curve

## 1. บทนำ

การผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) อันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน (global warming) ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างรุนแรงในปัจจุบัน ในปี พ.ศ. 2565 พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ทั่วโลกก่อให้เกิดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 1,605 ล้านตันซึ่งคิดเป็น 4.34 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดบนโลกในปีดังกล่าวและยังคงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น [1-2] จีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุประสาน (binder) ทางเลือกชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัตถุดิบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (ground granular blast furnace slag) เป็นต้น หรือแร่ธาตุธรรมชาติ เช่น ดินขาว (metakaolin) เป็นต้น กับสารละลาย

กระตุ้นแอลคาไลโดยปราศจากการใช้ปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างกระบวนการผลิตซีโอพอลิเมอร์ลง 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ [3] ทำให้ซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีคุณสมบัติเชิงกลและเคมีที่เทียบเท่าหรือมากกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ เช่น กำลังวัสดุ ความต้านทานต่อการสลายลายกรด และความทนทานต่อเพลิงไหม้

ปัจจุบันเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ได้แก่ เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (low-calcium fly ash) ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash) ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ [4] และงานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการศึกษาซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเป็นส่วนใหญ่ [5-8] ประเทศไทยมีการเพาะปลูกข้าวมากที่สุด แกลบจากการสีเมล็ดข้าวสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ทำให้เกิดเถ้าแกลบ (rice husk ash) ซึ่งเป็นของเสียจำนวน 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแกลบทั้งหมด เถ้าแกลบที่ได้มีปริมาณซิลิกาสูงมาก (85 – 90 เปอร์เซ็นต์) [9] จึงเหมาะสมในการนำไปเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าลอยในการทำซีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของการรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเถ้าแกลบซึ่งมีปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณเถ้าทั้งหมด โดยมีสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายกระตุ้นแอลคาไล (alkali activator solution)

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

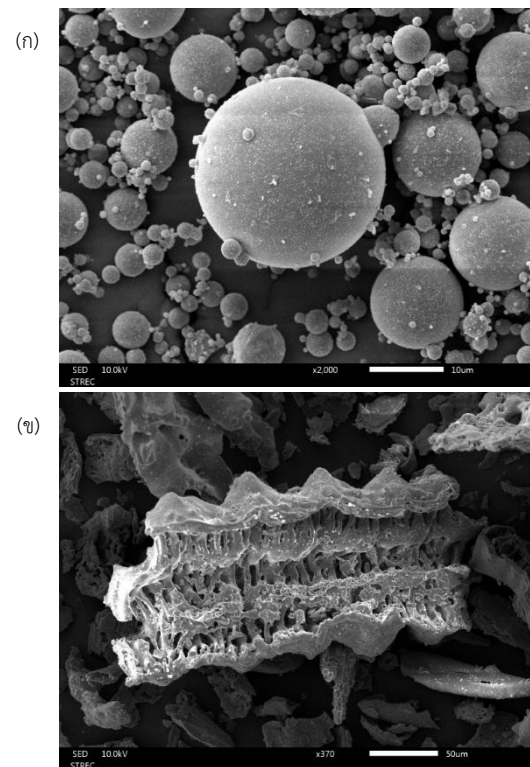
### 2.1 วัสดุ

#### 2.1.1. เถ้าลอยและเถ้าแกลบ

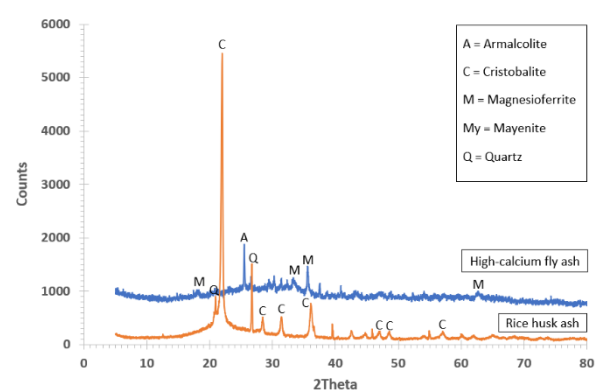
ซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจำแนกอยู่ในชั้นคุณภาพ C (class C) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [4] จากโรงไฟฟ้าฟ้ามะเข (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) ต.แม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เท่ากับ 2.67 อนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีผิวเรียบและขนาดอนุภาคเฉลี่ย เท่ากับ 33.2 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (amorphous) เป็นส่วนใหญ่มากับโครงสร้างผลึกบางส่วนชนิดอาร์มาลโคไลต์ (armalcolite:  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Ti}_2\text{O}_5$ ) แมกนีซิโอเฟร์ไรต์ (magnesioferrite:  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ) และเมย์ไนต์ (mayenite:  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ )

เถ้าแกลบได้มาจากการเผาไหม้ถ่านหินที่มีอุณหภูมิระหว่าง 900 – 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง ในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลของบริษัท พิจิตร ไบโอ เพาเวอร์ จำกัด ต.ท้ายน้ำ อ.โพทะเล จ.พิจิตร โดยมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.22 อนุภาคของเถ้าแกลบมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โครงสร้างของเถ้าแกลบส่วนใหญ่เป็นแบบอสัณฐานของซิลิกา (silica:

$\text{SiO}_2$ ) และโครงสร้างผลึกบางส่วนชนิดคริสโตบาไลต์ (cristobalite:  $\text{SiO}_2$ ) และควอตซ์ (quartz:  $\text{SiO}_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) และ 2 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำมาบดเพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.3 ไมโครเมตร) ซึ่งสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (sieve no. 325) ด้วยน้ำจันทน์คั่งค้างบนตะแกรงไม่เกิน 34 เปอร์เซ็นต์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันกับการหาความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามมาตรฐาน ASTM C188 [10] ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีจากการวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence: XRF) ของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ



รูปที่ 1 อนุภาคของ (ก) เถ้าลอย และ (ข) เถ้าแกลบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราด



รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

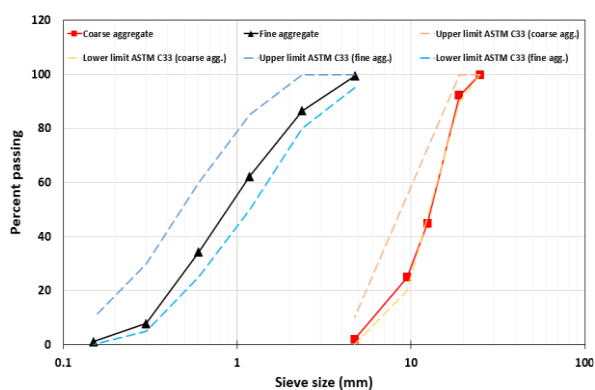
| องค์ประกอบทางเคมี (%)          | เถ้าลอย | เถ้าแกลบ |
|--------------------------------|---------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 31.5    | 94.3     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.0    | 0.759    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.0    | 0.435    |
| CaO                            | 20.9    | 0.737    |
| SO <sub>3</sub>                | 5.56    | 0.110    |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.88    | 637 PPM  |
| MgO                            | 2.77    | 0.498    |
| K <sub>2</sub> O               | 2.14    | 2.01     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.396   | 515 PPM  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.305   | 0.759    |
| MnO                            | 0.109   | 0.128    |

### 2.1.2. สารละลายกระตุ้นแอลคาไล

สารละลายกระตุ้นแอลคาไลที่ใช้ผสมทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide solution: NaOH (aq)) ซึ่งได้มาจากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแข็งที่มีความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ด้วยน้ำประปา (tap water) จนมีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10 โมลาร์ (Molar: M) และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.33 กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate solution: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (aq)) ซึ่งมีปริมาณ Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O เท่ากับ 16, 33 และ 51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.60

### 2.1.3. มวลรวม

มวลรวมละเอียด (fine aggregate) เป็นทรายหยาบ (coarse sand) สำหรับงานเทและหล่อคอนกรีตมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63, ค่ามอดุลัสความละเอียด (fineness modulus) เท่ากับ 3.09 และค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) เท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมวลรวมหยาบ (coarse aggregate) เป็นหินปูน (limestone) ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (maximum size of aggregate) เท่ากับ 3/4 นิ้ว (19.05 มม.), ค่ามอดุลัสความละเอียด เท่ากับ 7.36, ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.70 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.54 เปอร์เซ็นต์ การกลั่นขนาดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบมีคุณภาพตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C33 [11] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกลั่นขนาดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงหลักการออกแบบส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตของเถ้าลอย [12] โดยกำหนดให้ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ศึกษามีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายกระตุ้นแอลคาไลกับเถ้าเท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้ากับมวลรวมเท่ากับ 0.24 ดังแสดงในตารางที่ 2 รายชื่อส่วนผสมเขียนในรูปแบบตัวอักษรย่อดังนี้ R – a – b เมื่อ R หมายถึง การบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ambient curing), a หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของเถ้าแกลบ และ b หมายถึง อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-to-NaOH ratio by weight) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0 กระบวนการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเริ่มต้นด้วยการผสมเถ้าลอย, เถ้าแกลบ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าด้วยกันเป็นเวลา 3 นาที แล้วเติมทรายและหินที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry: SSD) ลงไปในของผสมและผสมเข้าด้วยกันเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นค่อยเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วผสมเพิ่มเติมอีก 3 นาที เมื่อครบระยะเวลา 9 นาที เทจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเหลวลงในแบบหล่อเหล็กรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และความสูง 200 มม. ซึ่งทำน้ำมันเคลือบผิวภายในก่อนนำไปจัดตัวอย่างเพื่อไล่ฟองอากาศภายในคอนกรีตด้วยเครื่องเขย่า (vibrating table) เป็นระยะเวลาไม่เกิน 1 นาที แต่ละส่วนผสม หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจำนวน 3 ชิ้น เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แล้วนำไปหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใส (plastic sheet) เพื่อป้องกันการระเหยของความชื้นในตัวอย่างและบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จนครบเวลา 28 วันก่อนนำไปทดสอบต่อไป

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าแกลบต่าง ๆ (kg / m<sup>3</sup> ของตัวอย่างคอนกรีต)

| ส่วนผสม  | เถ้าลอย | เถ้าแกลบ | NaOH  | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | ทราย  | หิน     |
|----------|---------|----------|-------|----------------------------------|-------|---------|
| R-0-1.0  | 400.0   | 0.0      | 140.0 | 140.0                            | 687.1 | 1,015.0 |
| R-20-1.0 | 320.0   | 80.0     | 140.0 | 140.0                            | 680.5 | 1,005.3 |
| R-30-1.0 | 280.0   | 120.0    | 140.0 | 140.0                            | 677.2 | 1,000.5 |
| R-40-1.0 | 240.0   | 160.0    | 140.0 | 140.0                            | 674.0 | 995.6   |
| R-60-1.0 | 160.0   | 240.0    | 140.0 | 140.0                            | 667.4 | 986.0   |

## 2.3 การทดสอบตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

หลังจากบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิห้องครบ 28 วัน ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของตัวอย่างเพื่อคำนวณหาความหนาแน่น (density) การทดสอบเพื่อกำลึงรับแรงอัด (compressive strength) โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress – strain curve) ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีขั้นตอนและรายละเอียดดังระบุในมาตรฐาน ASTM C39 [13] และ C469 [14] ตามลำดับ ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเค้นและความเครียดตามแนวแกนกับตามขวาง (combined compressometer – extensometer) กับตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแล้วนำไปให้แรงอัดในเครื่องทดสอบที่มีความสามารถให้แรงสูงสุด 500 kN (500-kN capacity universal testing machine) ด้วยอัตราการให้แรงอัดแบบควบคุมการกระจัด (displacement control regime) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อสามารถพล็อตช่วงหลังจุดสูงสุดจนถึงก่อนการวิบัติของกราฟความเค้น-ความเครียดได้ ระหว่างการทดสอบ ทำการวัดการกระจัด (displacement) ในทิศทางตามยาว (longitudinal) และตามขวาง (transverse) ของตัวอย่างโดยใช้ทรานสดิวเซอร์ (displacement transducer) ทิศทางละ 2 ตัว รวมทั้งวัดปริมาณแรงอัดด้วยอุปกรณ์วัดแรง (load cell) บันทึกค่าที่วัดได้เหล่านี้ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) รุ่น EDX-200A ยี่ห้อ KYOWA ผ่านโปรแกรม DCS-100A รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับอุปกรณ์การทดสอบที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

## 3. ผลการทดสอบ

### 3.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งมีปริมาณเถ้ากลบต่าง ๆ ณ อายุ 28 วัน

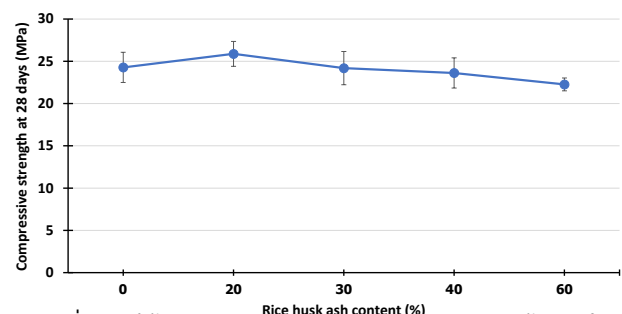
ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้ากลบต่าง ๆ ณ อายุ 28 วัน

| ส่วนผสม  | คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ณ อายุ 28 วัน |                      |                       |                 |
|----------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|
|          | ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )                                  | กำลังรับแรงอัด (MPa) | โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa) | อัตราส่วนปัวซอง |
|          | Mean±SD                                                           | Mean±SD              | Mean±SD               | Mean±SD         |
| R-0-1.0  | 2,418.5±4.1                                                       | 24.3±1.8             | 15,322.53±327.14      | 0.31±0.04       |
| R-20-1.0 | 2,380.6±9.1                                                       | 25.9±1.5             | 18,997.66±800.00      | 0.25±0.00       |
| R-30-1.0 | 2,388.7±6.2                                                       | 24.2±2.0             | 14,380.62±890.22      | 0.28±0.22       |
| R-40-1.0 | 2,339.3±2.9                                                       | 23.6±1.8             | 14,681.46±1,960.41    | 0.19±0.04       |
| R-60-1.0 | 2,343.9±27.7                                                      | 22.3±0.8             | 12,973.33±3,429.35    | 0.19±0.08       |

\* มาจากการหาค่าเฉลี่ยของจำนวนตัวอย่าง 2 ชิ้นจากทั้งหมด 3 ชิ้นของแต่ละส่วนผสม

ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงกับเถ้ากลบปริมาณต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 2,339 ถึง 2,420 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้ากลบส่งผลให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง (ตารางที่ 3)

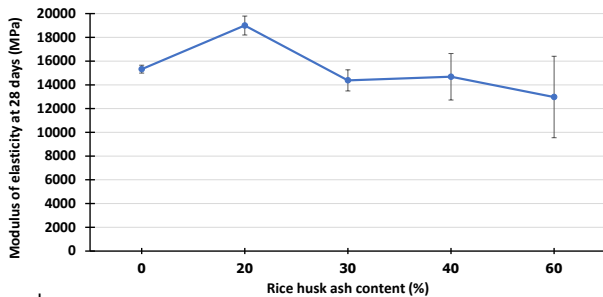
กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้ากลบ 0 20 30 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ณ อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 24.3 25.9 24.2 23.6 และ 22.3 MPa ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณเถ้ากลบจาก 0 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักรวมของปริมาณเถ้าทั้งหมดทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น 6.6 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเถ้ากลบในส่วนผสมมีค่าเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง 6.5 8.7 และ 14.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้ากลบ 30 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณเถ้ากลบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แนวโน้มของกำลังรับแรงอัด ณ อายุ 28 วันกับปริมาณเถ้ากลบในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

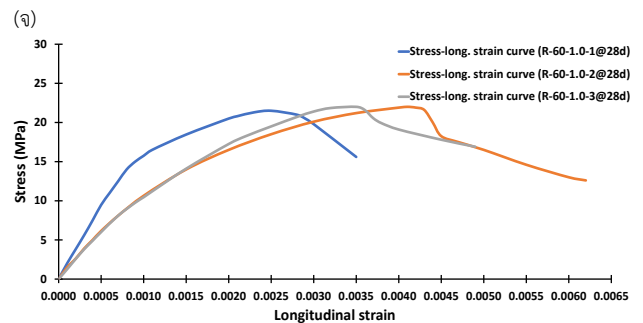
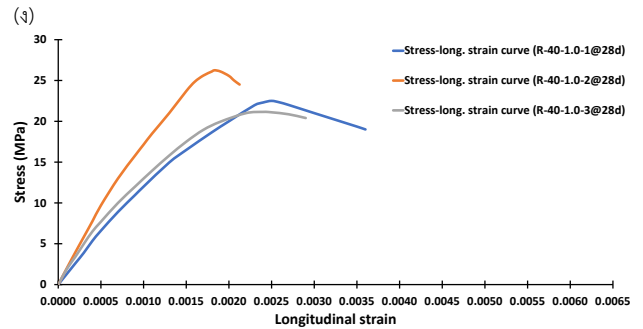
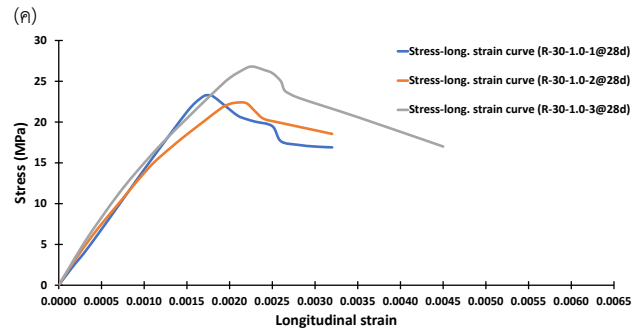
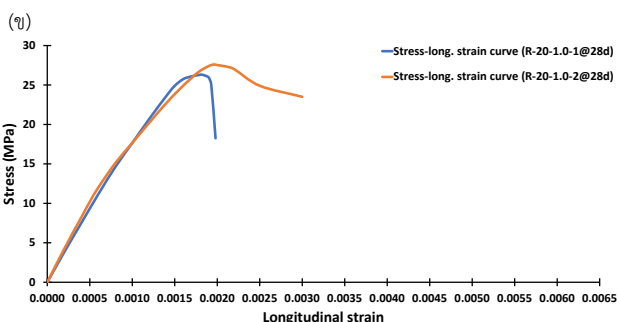
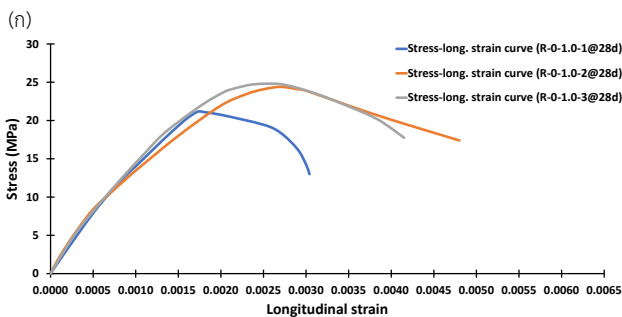
โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (secant modulus) และอัตราส่วนปัวซอง คำนวณมาจากค่าความเครียดตามยาว ความเครียดตามขวาง และความเค้น ณ 1. ความเครียดตามยาวเท่ากับ 0.000050 และ 2. ความเค้นเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัด [14] ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตซึ่งมีปริมาณเถ้าแกลบ 0 20 30 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ณ อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 15,323 18,998 14,381 14,681 และ 12,973 MPa ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 0.31 0.25 0.28 0.19 และ 0.19 ตามลำดับ รูปที่ 6 แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นกับปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสมซึ่งคล้ายกับแนวโน้มของกำลังรับแรงอัด บ่งชี้ว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 แนวโน้มของมอดุลัสยืดหยุ่น ณ อายุ 28 วันกับปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

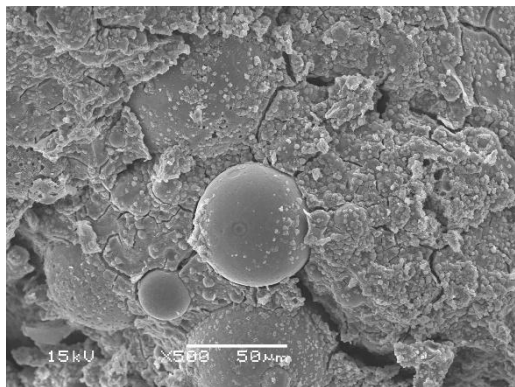
รูปที่ 7 แสดงกราฟความเค้น – ความเครียด (stress – strain curve) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ ณ อายุ 28 วัน ความชันและจุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวลดลงเมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบจนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความเครียดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อถูกกดจนเกิดการรอยแตกกว้างขึ้น (วิบัติแล้ว) อันเป็นความเครียดมากที่สุด (ultimate strain) ที่บันทึกได้ลดลง อย่างไรก็ตามค่าความเครียดดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตใช้ปริมาณเถ้าแกลบมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุดังกล่าวมีความเหนียว (ductility) มากขึ้น



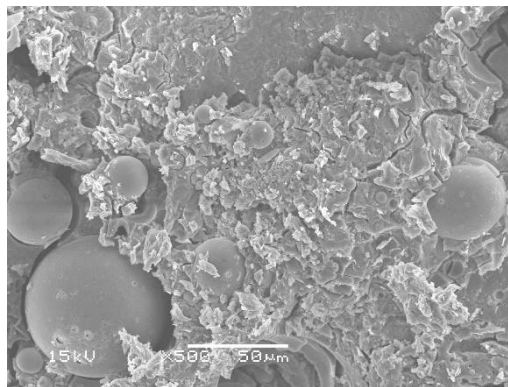
รูปที่ 7 กราฟความเค้น – ความเครียดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าแกลบ (ก) 0 (ข) 20 (ค) 30 (ง) 40 และ (จ) 60 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราด (scanning electron microscopy) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าแกลบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าแกลบจนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ มีความแน่นและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ากรณีที่ใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียวเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีสำคัญในสารตั้งต้นของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน (geopolymerization) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ในทางตรงกันข้าม หากใช้ปริมาณเถ้าแกลบมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปรากฏอนุภาคของเถ้าแกลบคงเหลือซึ่งไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วน (unreacted or partially reacted rice husk ash particles) เพิ่มมากขึ้นในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความแน่นและความแข็งแรงน้อยลง

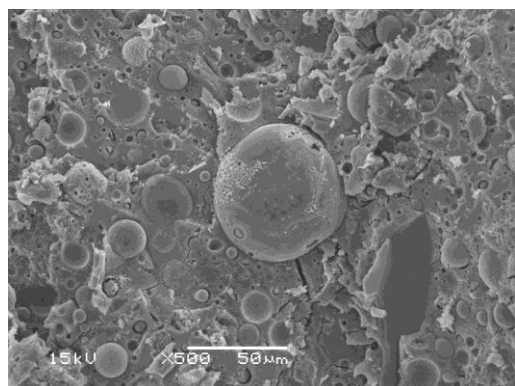
(ก)



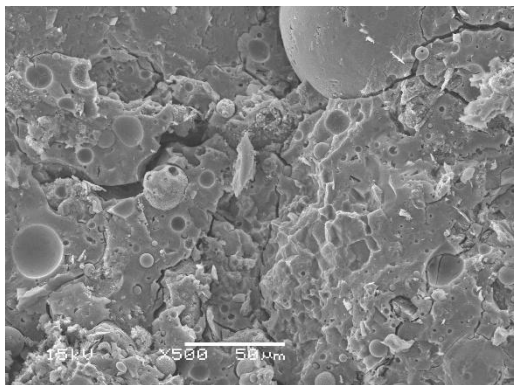
(จ)



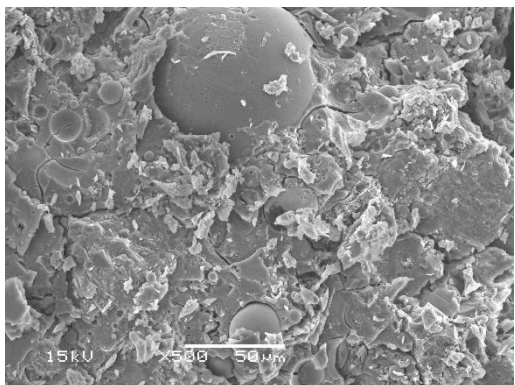
(ข)



(ค)



(ง)



รูปที่ 8 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าแกลบ (ก) 0 (ข) 20 (ค) 30 (ง) 40 และ (จ) 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4. บทสรุป

การใช้เถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และบ่มในอุณหภูมิห้อง ช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตของเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทำจากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงกับเถ้าแกลบมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และการใช้เถ้าแกลบทำให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบที่ใช้ร่วมกับเถ้าลอยทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าแกลบเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณเถ้าทั้งหมดมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด อย่างไรก็ตาม หากใช้ปริมาณเถ้าแกลบมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

การใช้ปริมาณเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูงสุดเช่นเดียวกัน การเพิ่มขึ้นและลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับขนาดของกำลังรับแรงอัด

อัตราส่วนปัวซองของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าแกลบที่มีปริมาณแตกต่างกันมีค่าตั้งแต่ 0.19 ถึง 0.31

นอกจากนี้ ปริมาณเถ้าแกลบที่ใช้ในส่วนผสมมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนวิบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้เนื่องจากวัสดุมีความเหนียวมากขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (6641/2566) และได้รับการสนับสนุนจากทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณอดิสร ขวณปี

และดร. กฤษฎา ภูมิ ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในระหว่างเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยีและการดำเนินการทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] “Data Page: Annual CO<sub>2</sub> emissions from cement”, part of the following publication: Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser (2023) - “CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions”. Data adapted from Global Carbon Project. Retrieved from <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-cement> [online resource].
- [2] “Data Page: Annual CO<sub>2</sub> emissions”, part of the following publication: Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser (2023) - “CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions”. Data adapted from Global Carbon Project. Retrieved from <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country> [online resource].
- [3] Davidovits J. Properties of geopolymer cements. In: Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994, pp. 131-149.
- [4] ASTM International. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete 2019; Designation: C618-19.
- [5] Hardjito D, Rangan BV. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research report GC1. Perth, Australia: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology; 2005.
- [6] Diaz-Loya EI, Allouche EN, Vaidya S. Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete. ACI Mater J 2011 (May-June):300-6.
- [7] Chithambaram SJ, Kumar S, Prasad MM, Adak D. Effect of parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete. Struct Concr 2018;19:1202-9.
- [8] Özbayrak A, Kucukgoncu H, Atlas O, Aslanbay HA, Aslanbay YG, Altun F. Determination of stress-strain relationship based on alkali activator ratios in geopolymer concretes and development of empirical formulations. Structures 2023;48:2048-61.
- [9] Davidovits J. Chapter 11: Silica-based geopolymer, sialate link and siloxo link in poly (siloxonate) Si:Al>5. In: Geopolymer chemistry and applications. 3rd ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère; 2011.
- [10] ASTM International. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement 2017; Designation: C 188-17.
- [11] ASTM International. Standard Specification for Concrete Aggregates 2009; Designation: C 33/C 33M-08.
- [12] Pavithra P, Reddy MS, Dinakar P, Rao BH, Satpathy BK, Mohanty AN. A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. J Clean Prod 2016;133:117-25.
- [13] ASTM International. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 2001; Designation: C 39/C 39M-01.
- [14] ASTM International. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression 2009; Designation: C 469-02.