

# สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จาก เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมผงเส้นใยบะซอลต์จากฉนวนกันความร้อนเหลือทิ้ง

## Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash Containing Basalt Fiber Powder from Waste Insulation

อาดัม ศัพทมงคล<sup>1</sup> ไพฑูรย์ นาแซง<sup>2</sup> อำพล วงศ์ษา<sup>1</sup> วันโชค เครือหงษ์<sup>3</sup> วันชัย สะตะ<sup>1\*</sup> และ  
ปริญญา จินดาประเสริฐ<sup>1,4</sup>

Adam Saptamongkol<sup>1</sup> Phaithun Nasaeng<sup>2</sup> Ampol Wongsas<sup>1</sup> Wunchock Kroehong<sup>3</sup>  
Vanchai Sata<sup>1\*</sup> and Prinya Chindaprasit<sup>1,4</sup>

*Received: July 9, 2024; Revised: August 27, 2024; Accepted: August 27, 2024*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่แทนที่ด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนในอัตราร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สารกระตุ้นปฏิกิริยาใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (Sodium Silicate/ Sodium Hydroxide, NS/NH) เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุผง (Liquid, Binder, L/B) เท่ากับ 0.6 บ่มตัวอย่างเพสต์ที่อุณหภูมิปกติ ศึกษาผลกระทบของเวลาในการแข็งตัว กำลังอัด กำลังคด และโครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้งหมดมีอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  อยู่ระหว่าง 3.79 - 4.49 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์นานขึ้นตามการเพิ่มปริมาณการใช้ผงเส้นใยบะซอลต์ ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) และ Calcium (Alumino) Silicate Hydrate (C-(A)-S-H) ในส่วนผสมกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์ร้อยละ 20 (BP20) ให้กำลังอัดสูงสุดโดยมีกำลังอัดเป็น 32.0 53.6 และ 68.0 เมกะปาสกาลที่อายุการทดสอบ 7 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังคดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณการเพิ่มผงเส้นใยบะซอลต์ นอกจากนั้นการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 ช่วยทำให้เนื้อเจลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการสร้างผลึกใหม่มากขึ้น ส่งผลให้มีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเพสต์

คำสำคัญ : เส้นใยบะซอลต์; กำลังอัด; กำลังคด; โครงสร้างจุลภาค; ฉนวนกันความร้อน

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

<sup>3</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

<sup>4</sup> ภาควิชาเคมี ราชบัณฑิตยสภา สนามเสือป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Khon Kaen University<sup>2</sup> Faculty of Engineering, North Eastern University<sup>3</sup> Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus<sup>4</sup> Academy of Science, Royal Society of Thailand, Bangkok

\* Corresponding Author, Tel. 08 1592 8191, E - mail: vancsa@kku.ac.th

## Abstract

In this study, the properties of geopolymer paste from high calcium fly ash replaced by basalt fiber powder from insulation waste at the rates of 0, 10, 20, 30, and 40 wt% were evaluated. The activator with sodium silicate to sodium hydroxide (10 Molar) ratio (NS/NH) at 1.0 and the liquid to binder (L/B) ratio at 0.6 were used. The curing of the paste sample was conducted at room temperature. The setting time, compressive strength, flexural strength, and microstructure were tested. The results showed that all the geopolymer paste mixtures had  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratios between 3.79 and 4.49. The setting time of the paste was prolonged with increasing basalt fiber powder content. This is due to the reduction of calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium (alumino) silicate hydrate (C-(A)-S-H) in the mixture. The compressive strength of 20 % basalt fiber powder paste (BP20) gave the highest compressive strength with the compressive strength of 32.0, 53.6, and 68.0 MPa at the test ages of 7, 28, and 90 days, respectively. The flexural strength increased significantly with the increase in the amount of basalt fiber powder. In addition, replacing fly ash with basalt fiber powder at a ratio not exceeding 20 % helps the gel of geopolymer paste to form more new crystals, resulting in a denser structure that increases the paste's strength.

**Keywords:** Basalt Fiber; Compressive Strength; Flexural Strength; Microstructure; Insulation

## บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่ได้จากวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตที่ไม่เป็นผลึกสภาพของแข็งถูกชะละลายในสารละลายด่างอัลคาไล ซึ่งส่งผลให้พันธะ Silicon-Oxygen (Si-O) และ Aluminum-Oxygen (Al-O) ของสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  แตกตัวเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นสารละลายซิลิเกตและอะลูมินेट เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลจำเพาะจะเกิดสารประกอบซิลิเกตและอะลูมินेटโมโนเมอร์ที่ซับซ้อน หลังจากนั้นส่วนออสซิลฐานจะกลายเป็นเจลที่มีความอึดตัวสูง โครงสร้างของโครงข่ายเชิงพื้นที่ที่ออสซิลฐานหรือกิ่งผลึกระหว่าง  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  เชื่อมต่อกันเพื่อสร้างโครงสร้างทรงสี่หน้าเมื่อแข็งตัวได้เป็นจีโอโพลิเมอร์ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน [1] ภายใต้กระบวนการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ใช้พลังงานความร้อนต่ำและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้จีโอโพลิเมอร์ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วการก่อตัวและสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับ การก่อตัวของสารโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Sodium Aluminosilicate, N-A-S-H) ดังนั้นในช่วงแรกการผลิตจีโอโพลิเมอร์จำเป็นต้องทำการบ่มที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาและเร่งการก่อตัว เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ระบบจีโอโพลิเมอร์เกิดพลังงานจลน์แล้วโมเลกุลของธาตุต่าง ๆ ที่ถูกชะละลายออกมาเกิดปฏิกิริยาได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์

เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบเคมีหลักเป็น  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และมีปริมาณ  $\text{CaO}$  ค่อนข้างสูง สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่ก่อตัวได้เร็วกว่าซีเมนต์เพสต์ทั่วไปโดยมีระยะเวลาก่อตัวประมาณ 60 ถึง 100 นาที การก่อตัวที่รวดเร็วเป็นผลเนื่องจากไอออนแคลเซียมที่ถูกชะละลายออกมาจะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี [2] แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประสานจากจีโอโพลิเมอร์ก็มีความเปราะเพราะมีกำลังคืบน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดคล้ายกับวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ทั่วไป ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มวัสดุอื่น ๆ เข้าไปในส่วนผสม

เส้นใยเบซอลต์ (Basalt Fiber) เป็นเส้นใยขนาดเล็กที่ได้จากการหลอมหินเบซอลต์แล้วขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นมาที่สามารถใช้แทนการใช้แร่ใยหิน (Asbestos) ได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปลอดภัยไม่เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติ มีสมบัติทางกลที่ดี มีความต้านทานการกัดกร่อน มีความเป็นฉนวน จึงมีการนำมาใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อนหรือวัสดุกันเสียง นอกจากนั้นยังมีการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติในส่วนผสมคอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์ได้อีกด้วย [3] ในขณะเดียวกันงานอาคารเองก็ยังมีเศษฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยเบซอลต์เป็นขยะเหลือทิ้งจากการก่อสร้างหรือการรื้อถอน ซึ่งเศษเส้นใยเหล่านี้มีสมบัติทางกลที่ดีและมีองค์ประกอบเคมีที่เหมาะสมจะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ช่วยปรับปรุงสมบัติจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยได้ อย่างไรก็ตามก่อนนำมาใช้ต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเบซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนก่อนโดยทำให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอยแล้วผสมร่วมกันทำเป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่และลดเศษวัสดุจากงานก่อสร้างในอนาคตต่อไป

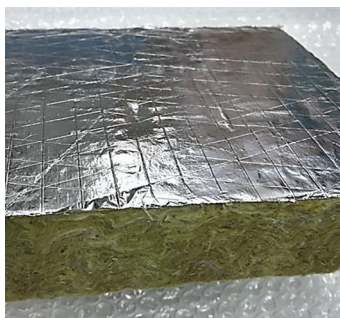
#### วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยผงเส้นใยเบซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
2. เพื่อหาปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยเบซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนที่มีความเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มภายใต้อุณหภูมิปกติ
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ผงเส้นใยเบซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนที่แทนที่เถ้าลอยบางส่วน

#### วิธีการวิจัย

##### 1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นหลักนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง ส่วนผงเส้นใยเบซอลต์ (Basalt Fiber Powder, BP) ได้จากเศษฉนวนกันความร้อนซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากการก่อสร้างและรื้อถอนในประเทศไทย โดยใช้ส่วนที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ภายในภายหลังจากลอกชั้นอะลูมิเนียมฟอยล์ออกเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 1(ก) จากนั้นทำการปรับปรุงขนาดอนุภาคให้เล็กลงโดยการบดให้ละเอียดดังรูปที่ 1(ข) สมบัติทางกายภาพและการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและผงเส้นใยเบซอลต์ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2



(ก) ก่อนทำการบด



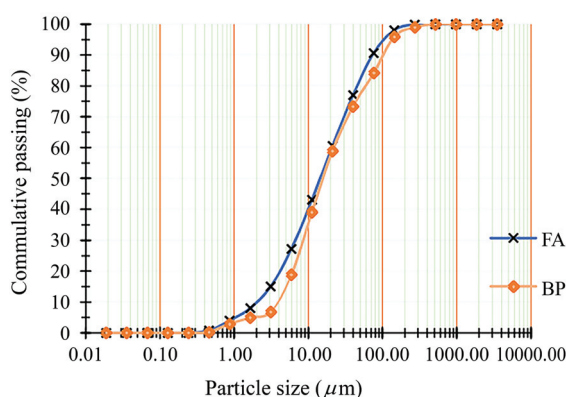
(ข) หลังทำการบด

รูปที่ 1 เส้นใยหินบะซอลต์จากฉนวนกันความร้อน

สารกระตุ้นอัลคาไลสำหรับระบบปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันกำหนดใช้สารละลายสองชนิดร่วมกัน ชนิดแรกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ชนิดเกิดจากความเข้มข้นร้อยละ 98 ถึง 99 เจือจากความเข้มข้นโดยละลายด้วยการแทนที่น้ำกลั่นเพื่อปรับระดับความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์และทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนใช้งาน สุดท้ายสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ใช้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมโดยมีสารประกอบโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 28.66 ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 11.67 และน้ำร้อยละ 59.67 โดยปริมาตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผงตั้งต้น

| Material | Particle Size Distribution |                       |                       | Physical Properties |                                         |                            |
|----------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
|          | D10 ( $\mu\text{m}$ )      | D50 ( $\mu\text{m}$ ) | D90 ( $\mu\text{m}$ ) | Specific Gravity    | Surface Area ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | Retained on Sieve 325# (%) |
| FA       | 2.34                       | 16.40                 | 83.20                 | 2.63                | 4,145                                   | 24.06                      |
| BP       | 4.56                       | 18.83                 | 122.67                | 2.72                | 4,340                                   | 39.83                      |



รูปที่ 2 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและผงเส้นใยบะซอลต์

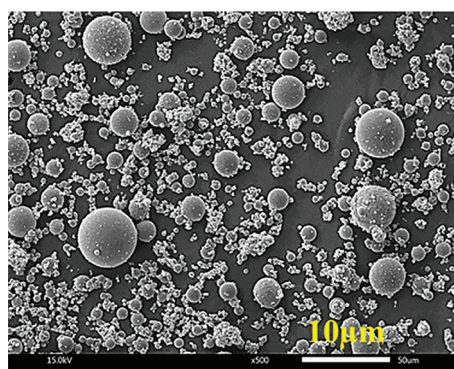
ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและผงเส้นใยบะซอลต์ ดังตารางที่ 2 พบว่าเถ้าลอยประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นหลัก เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618 [4] สามารถจัดเป็นสารปอซโซลานชั้นคุณภาพ C หรือเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เนื่องจากมีผลรวมออกไซด์ของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 57.40 และมีออกไซด์ของ  $\text{CaO}$  มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก สำหรับผงเส้นใยบะซอลต์มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับ



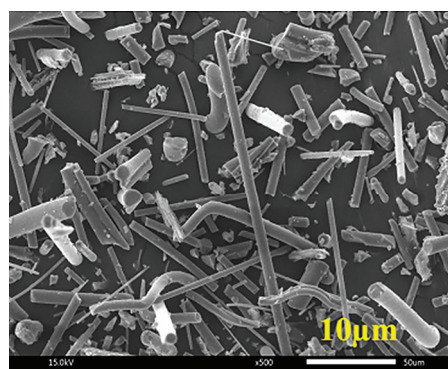
เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีปริมาณซิลิกาออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่จำเป็นต่อการทำปฏิกิริยามากกว่า เถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุผงตั้งต้นหลัก ซึ่งคล้ายกับเส้นใยบะซอลต์ที่ได้จากโรงงานผลิตโดยตรง [3] ดังรูปที่ 3 แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยเปรียบเทียบกับผงเส้นใยบะซอลต์พบว่า เถ้าลอยมีลักษณะเป็น ทรงกลมผิวเรียบ ในขณะที่ผงเส้นใยบะซอลต์มีรูปทรงคล้ายแท่งกระบอกตันแต่มีพื้นผิวเรียบ เมื่อพิจารณารูปแบบ X-Ray diffraction (XRD) พบว่า อนุภาคของเถ้าลอยตรวจพบพีคแหลมของเฟสผลึก Anhydrite (Calcium Sulphate,  $\text{CaSO}_4$ ), Quartz (Silicon Dioxide,  $\text{SiO}_2$ ), Portlandite (Calcium Hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และ Lime (Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ) ดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาออกไซด์ในอนุภาคของเถ้าลอยส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ ของผลึก Quartz มากกว่าที่จะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งผลวิเคราะห์จากเครื่องทดสอบ XRD พบว่า เถ้าลอยมีส่วนที่เป็นอสัณฐานร้อยละ 79.97 ในขณะที่รูปแบบ XRD ของผงเส้นใยบะซอลต์ไม่พบพีคแหลม แต่ตรวจพบส่วนฐานกว้างในช่วง 14 ถึง  $40^\circ$  2Theta แสดงถึงองค์ประกอบทางแร่มีรูปแบบอสัณฐาน ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [5]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

| Oxides | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{SO}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | LOI  |
|--------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|---------------|--------------|-----------------------|----------------------|----------------|------|
| FA     | 29.30          | 14.70                   | 13.40                   | 28.20        | 6.09          | 2.69         | 2.33                  | 2.02                 | 0.37           | 1.55 |
| BP     | 38.30          | 12.30                   | 5.47                    | 24.90        | 0.22          | 11.30        | 2.75                  | 1.68                 | 2.02           | 3.01 |

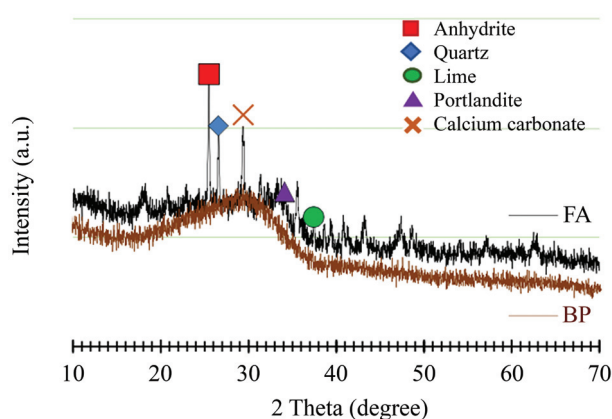


(ก) เถ้าลอย



(ข) ผงเส้นใยบะซอลต์

รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพขยายกำลัง 500 เท่า



รูปที่ 4 รูปแบบ XRD ของเถ้าลอย (FA) และผงเส้นใยบะซอลต์ (BP)

## 2. การออกแบบส่วนผสมและการจัดเตรียมตัวอย่าง

การศึกษานี้ได้ออกแบบสัดส่วนผสมทั้งหมด 5 อัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3 โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นหลักและใช้ผงเส้นใยบะซอลต์แทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามแนวทางการศึกษาที่ผ่านมา [5] กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา คือ ตัวเลขหน้าหลังอักษรย่อแสดงถึงร้อยละการแทนที่เถ้าลอยบางส่วนด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ ตัวอย่างเช่น BP00 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียวหรือตัวอย่างควบคุม และ BP20 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์เป็นวัสดุแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นต้น จากการทดลองผสมเพื่อให้ได้เพสต์ทุกส่วนผสมสามารถทำงานได้ง่ายและไม่ขึ้นหรือเหลวจนเกินไป จึงเลือกอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลต่อวัสดุผงตั้งต้นและอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.60 และ 1.0 โดยน้ำหนัก การผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์วัสดุผงตั้งต้นทั้งสองชนิดจะถูกผสมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด โดยใช้เครื่องผสมมาตรฐานที่ความเร็วต่ำเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลาย  $\text{NaOH}$  ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที ด้วยความเร็วรอบต่ำเมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดเติมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และทำการผสมต่อไปอีก 3 นาที จึงเพิ่มความเร็วการหมุนและผสมต่อไปอีก 2 นาที หลังจากนั้นเทส่วนผสมที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร เมื่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์แข็งตัวจึงห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและปล่อยให้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทำการถอดแบบหล่อและห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกและนำไปเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสม

| No | Specimens | FA (g) | BP (g) | $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (g) | $\text{NaOH}$ (10M.) (g) | $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Mol.) |
|----|-----------|--------|--------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| 1  | BP00      | 100    | 0      | 30                            | 30                       | 3.79                                        |
| 2  | BP10      | 90     | 10     | 30                            | 30                       | 3.95                                        |
| 3  | BP20      | 80     | 20     | 30                            | 30                       | 4.13                                        |
| 4  | BP30      | 70     | 30     | 30                            | 30                       | 4.31                                        |
| 5  | BP40      | 60     | 40     | 30                            | 30                       | 4.49                                        |

## 3 วิธีการทดสอบ

3.1 ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เครื่องมือทดสอบไวแคต (Vicat Consistency Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191 [6]

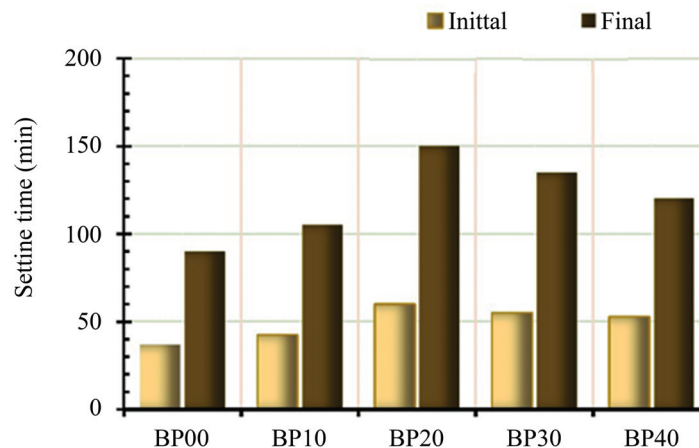
3.2 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 [7] ทำการทดสอบความต้านทานแรงดัดของตัวอย่างปริซึมที่มีขนาด  $4 \times 4 \times 16$  เซนติเมตร เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน มาตรฐาน ASTM C348 [8] โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์แทนที่เถ้าลอยบางส่วน โดยใช้แกนกลางของชิ้นส่วนที่เหลือจากการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน นำไปแช่ในสารละลายอะซิโตนเพื่อหยุดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำไปทำการทดสอบวิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบหรือโครงสร้างผลึก (XRD) วิเคราะห์พันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล (FTIR) และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี (SEM/EDS)

## ผลการวิจัย

### 1. ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟส

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของตัวอย่างควบคุม (BP00) มีค่าเท่ากับ 36.8 และ 90 นาที การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ทำให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 63 50 และ 44 ตามลำดับ ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 17 67 50 และ 33 ตามลำดับ การก่อตัวที่ช้าลงของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสที่แทนที่เถ้าลอยบางส่วนด้วยผงเส้นใยบะซอลต์อาจมีสาเหตุจากการลดลงของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงตั้งต้นแบบสองชนิดผสมกัน จากงานวิจัยของ Chindaprasirt, P. และคณะ [9] อธิบายไว้ว่าการก่อตัวที่รวดเร็วของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ผลิตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) ที่ถูกชะละลายออกมาจากวัสดุผงตั้งต้นและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ดังนั้นการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จะทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบจีโอโพลิเมอร์ลดลงเมื่อการตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต C-(A)-S-H ส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 20 พบว่าค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อส่วนผสมของตัวอย่าง BP30 และ BP40 มีผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณซิลิกาออกไซด์มากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $SiO_2/Al_2O_3$  ที่คำนวณได้จากการเตรียมส่วนผสมทั้งหมดในตารางที่ 3 จึงพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาในส่วนผสมสามารถเร่งการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสจากเถ้าลอยได้ [9]

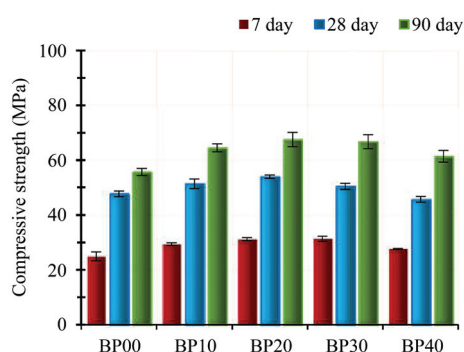


รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสจากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์

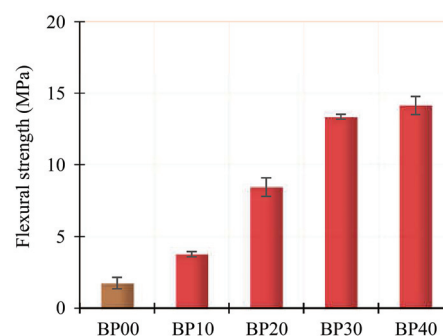
### 2. กำลังอัดและกำลังคัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส

รูปที่ 6 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ต่อสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เฟส รูปที่ 6(ก) แสดงผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน พบว่าตัวอย่าง BP00 (ควบคุม) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.3 44.2 และ 55.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักช่วยปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้เป็นอย่างดี โดยค่ากำลังอัดทุกอายุการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม จากนั้นค่ากำลังอัดจะมีแนวโน้มลดลง จากผลการทดสอบครั้งนี้พบว่า เมื่อใช้ผงเส้นใยบะซอลต์เป็นวัสดุทดแทนเถ้าลอยในอัตราส่วน

ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จีโอโพลิเมอร์เฟสค์มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วันสูงสุดเท่ากับ 32.0 53.6 และ 68.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากงานวิจัยของ [9] อธิบายไว้ว่า การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ได้จากการเตรียมส่วนผสม เมื่อส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์มีอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่เหมาะสม กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขณะที่ค่ากำลังอัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มสูงขึ้น สำหรับการศึกษาครั้งนี้ การเตรียมส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  อยู่ในช่วง 3.79 ถึง 4.49 ผลการทดสอบจึงพบว่า พงเส้นใยบะซอลต์ช่วยปรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 6(ข) จึงได้แสดงผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของตัวอย่าง BP00 (ควบคุม) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1.75 เมกะปาสคาล เปรียบเทียบการแทนที่เถ้าลอยด้วยพวงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่า พวงเส้นใยบะซอลต์ช่วยเพิ่มกำลังอัดคิดเป็น 2.2 4.8 7.7 และ 8.1 เท่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม พิจารณาได้ว่าการปรับปรุงกำลังอัดของพวงเส้นใยบะซอลต์เกิดจากความสามารถในการต้านทานแรงดึงของพวงเส้นใยบะซอลต์ที่มีลักษณะที่เป็นแท่งยาวสังเกตจากรูปที่ 3(ข) นั้นช่วยลดการแตกหักในชิ้นงานทดสอบขณะเพิ่มแรงอัดด้วยการถ่ายโอนแรงอัดและชะลอการเกิดรอยแตกและสามารถกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นได้จึงทำให้พวงเส้นใยบะซอลต์มีผลกระทบอย่างมากต่อความต้านทานแรงอัด [10] อย่างมีนัยสำคัญ



(ก) กำลังอัด



(ข) กำลังดัดที่อายุ 28 วัน

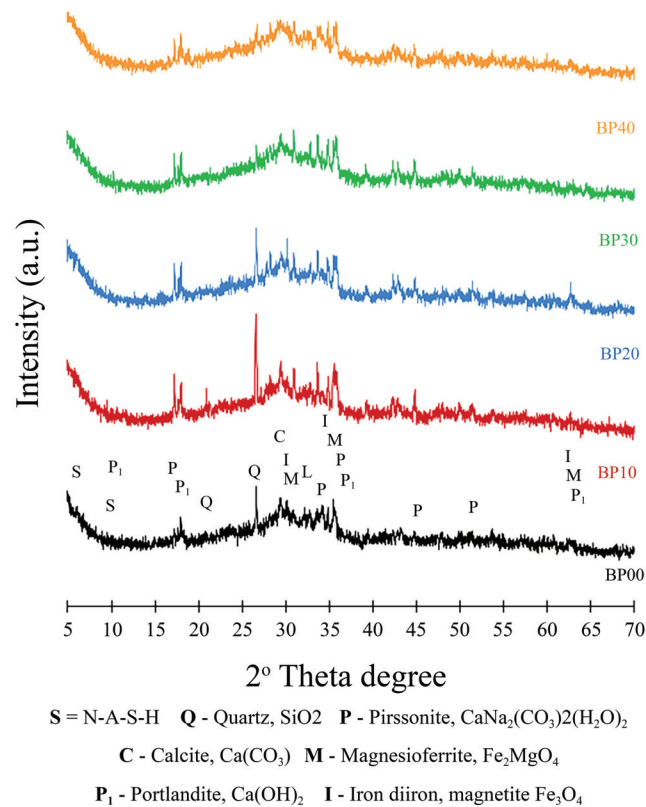
รูปที่ 6 สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยผสมพวงเส้นใยบะซอลต์

### 3. โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยผสมพวงเส้นใยบะซอลต์

3.1 สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ลักษณะสัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยผสมพวงเส้นใยบะซอลต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 7 พบว่ารูปแบบ XRD ของตัวอย่างควบคุม (BP00) ปรากฏพื้นฐานกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ตำแหน่งประมาณ  $20^\circ$  ถึง  $28^\circ$  2Theta นั้นยังปรากฏเฟสผลึกโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (N-A-S-H) ควอตซ์ (Quartz) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (Magnesioferrite) แมกนีไทต์ (Magnetite) ปอร์ตแลนด์ไคต์ (Portlandite) แคลไซต์ (Calcite) ลาร์ไนต์ (Larnite) และเพียร์โซไนต์ (Pirssonite) นอกจากนี้ยังตรวจพบเฟสผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ที่ตำแหน่ง  $29.5^\circ$  และ  $32.05^\circ$  2Theta [9] เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยพวงเส้นใยบะซอลต์ พบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยพวงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ปรากฏพีกสูงของควอตซ์ที่ตำแหน่ง  $26.6^\circ$  2Theta และพีกสูงของแคลไซต์ที่ตำแหน่ง  $29.5^\circ$  2Theta ที่มีความเข้มข้นมากกว่าตัวอย่างควบคุม (BP00) เมื่อพิจารณารูปแบบ XRD ของพวงเส้นใยบะซอลต์ดังรูปที่ 4 ไม่ปรากฏพีกสูงที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นความเข้มของพีกที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งนี้อาจบ่งบอกถึงการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ [11] นอกจากนี้ในโครงสร้างของ พวงเส้นใยบะซอลต์ การเพิ่มขึ้นของเฟสผลึกทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและมีความเป็นระเบียบมากขึ้นผลที่ได้คือ



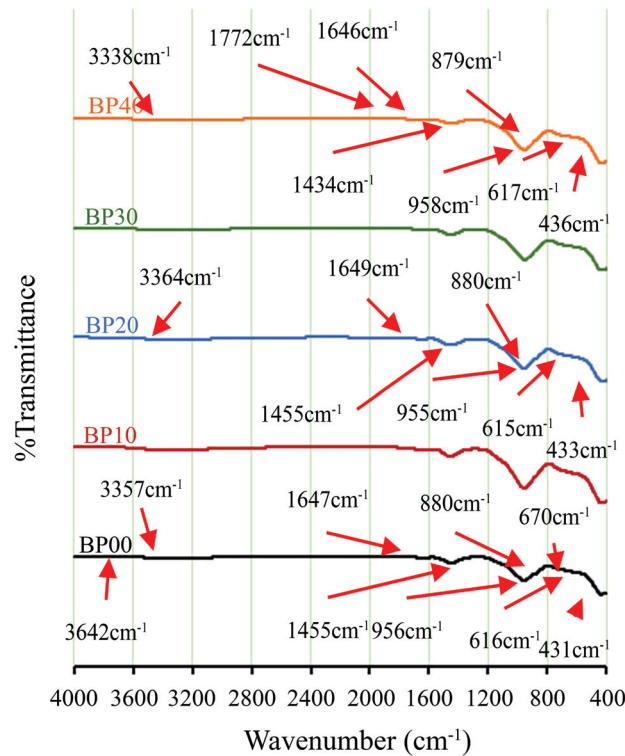
จีโอโพลิเมอร์เฟสมีความแข็งแรงมากขึ้นเช่นเดียวกัน ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสนี้ จึงสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่าง BP10 และ BP20 ที่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่า ความเข้มของพีคที่แสดงถึงเฟสผลึกต่าง ๆ ลดลงใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้นการลดลงของเฟสผลึก อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงด้วย



รูปที่ 7 รูปแบบ XRD ของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน

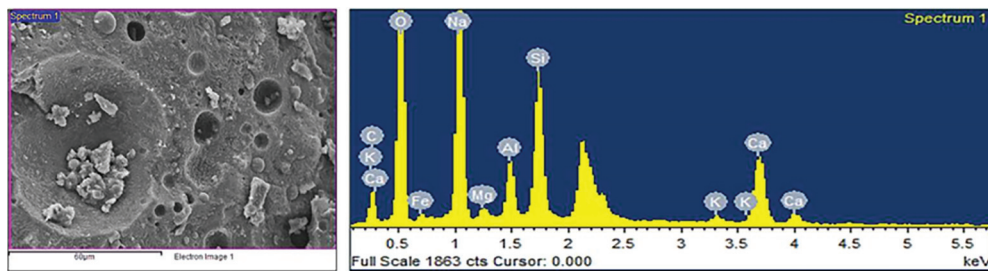
3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR สเปกตรัมอินฟราเรดจากเครื่องวิเคราะห์ FTIR ของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ดังรูปที่ 8 พบว่าในตัวอย่างที่ทำการทดสอบตรวจพบโมเลกุลของน้ำอิสระทำให้เกิดการสั่นแบบยืดของพันธะ X-OH (เมื่อ X คือ Si หรือ H) ที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 3,600 ถึง 2,200  $\text{cm}^{-1}$  และยังทำให้เกิดการสั่นแบบงอของพันธะ O-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1,700 ถึง 1,600  $\text{cm}^{-1}$  [12] การก่อตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) จากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย NaOH กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในบรรยากาศทำให้ตรวจพบการสั่นแบบงอของพันธะ O-C-O ที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้ 1,400  $\text{cm}^{-1}$  [13] การสั่นแบบยืดไม่สมมาตรของพันธะ Si-O-Si หรือ Al-O-Si ที่สามารถบ่งบอกระดับการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันในตัวอย่าง BP00 BP10 BP20 BP30 และ BP40 เกิดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 956 956 955 952 และ 958  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ การลดลงของเลขคลื่นแสดงถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน [14] โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักอาจเป็นอัตราส่วนการทดแทนที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มเติมและมีการเชื่อมโยงของสารประกอบแคลเซียมในระดับสูงขึ้นส่งผลให้ตัวอย่าง BP20 มีความสามารถในการอัดสูง การสั่นเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซต์ในลักษณะของพันธะ C-O เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 880  $\text{cm}^{-1}$  [15] ตรวจพบในทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบซึ่งผลวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับรูปแบบ XRD ที่ปรากฏ พิกเฟสผลึกของแคลไซต์แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์

น้อยกว่าไม่ส่งผลทำให้การเชื่อมโยงระหว่างแคลเซียมหายไป แต่ในทางกลับกันการสั่นที่ตำแหน่งนี้เด่นชัดกว่าเมื่อมีปริมาณผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะผงเส้นใยบะซอลต์มีความเป็นอสัณฐานสูงมากจึงสามารถทำปฏิกิริยาในระดับที่สูงกว่าได้

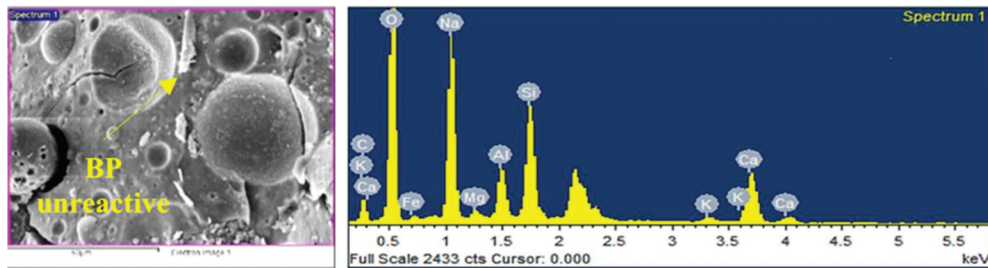


รูปที่ 8 สเปกตรัม FTIR ของอีพอกซีโพลีเมอร์พอสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน

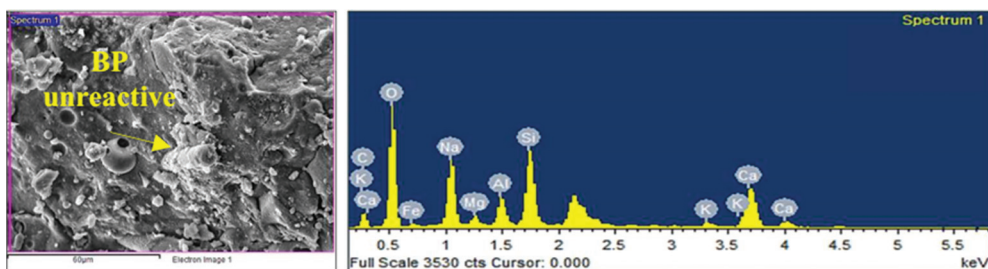
3.3 การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายขยายกำลังสูงและปริมาณธาตุ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นผิวของอีพอกซีโพลีเมอร์พอสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 9 พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีลักษณะขรุขระและไม่สม่ำเสมอ สามารถเห็นรูพรุนที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป รูพรุนเหล่านี้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซีโพลีเมอร์และการระเหยของน้ำในกระบวนการผลิต [16] เมื่อพิจารณาการก่อตัวของเจลหรือเฟสที่มีการจัดเรียงตัวในลักษณะพิเศษ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอัลคาไลน์กับวัสดุผงตั้งต้น พิจารณาได้ว่าตัวอย่างอีพอกซีโพลีเมอร์พอสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยล้วน (BP00) มีการก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์เจลที่หนาแน่นและต่อเนื่อง การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบกลุ่มอีพอกซีโพลีเมอร์เจลที่หนาแน่นและต่อเนื่องในลักษณะเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม (BP00) แต่จะมีลักษณะที่แตกต่างคือ อนุภาคขนาดเล็กที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือไม่ได้รวมตัวเข้ากับโครงสร้างอีพอกซีโพลีเมอร์เจล ดังรูปที่ 9(ก) ขณะที่พื้นผิวของตัวอย่าง BP00 ปรากฏส่วนที่เป็นแก้วหรือผลึกที่ยังคงอยู่จากเถ้าลอยเดิมเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จะปรากฏเส้นใยที่ทำปฏิกิริยาบางส่วนหรือที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอย ดังรูปที่ 9(ข) - (จ) แนวโน้มที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังคดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเส้นใยบะซอลต์เช่นเดียวกัน อาจเป็นไปได้ว่าผงเส้นใยบะซอลต์ที่อยู่ร่วมกับอีพอกซีโพลีเมอร์เจลช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลการทดสอบความสามารถรับแรงอัดของอีพอกซีโพลีเมอร์พอสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์แทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 6(ก) มีแนวโน้มลดลงทุกอายุการทดสอบ



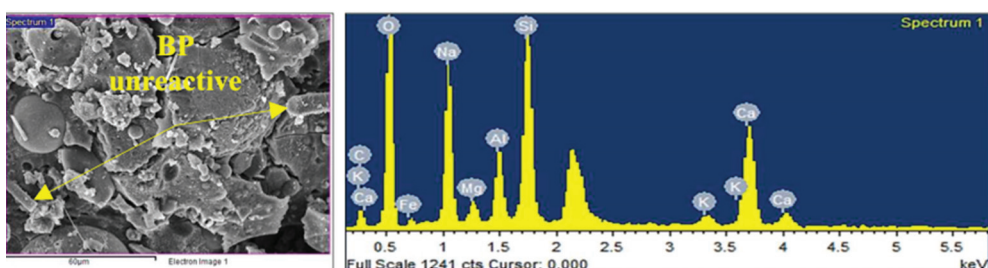
(ก) BP00



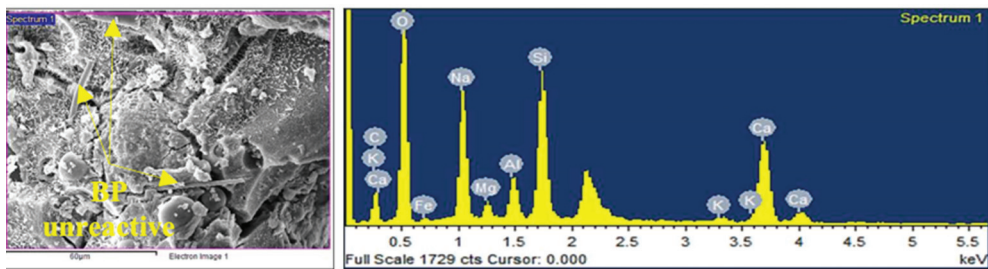
(ข) BP10



(ค) BP20



(ง) BP30



(จ) BP40

รูปที่ 9 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยชะลอตที่อายุ 28 วัน

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้จากถ้อยผสมผงเส้นใยหินบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 4 อธิบายได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ทำการทดสอบประกอบด้วย Carbon (C), Oxygen (O), Sodium (Na), Magnesium (Mg), Aluminum (Al), Silicon (Si) Calcium (Ca) และ Iron (Fe) ซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อตัวของสารประกอบ C-S-H หรือ C-(A)-S-H และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) [17] เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Si/Al พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ถ้อยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Si/Al จึงทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารประกอบที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักจึงส่งเสริมการพัฒนาของเจลทำให้รูปทรงลดลง ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อเดียวกันและหนาแน่นมากขึ้น [11] ผลวิเคราะห์นี้สนับสนุนผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ถ้อยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้นจึงสนับสนุนข้อสมมุติฐานที่อธิบายก่อนหน้านี้ว่า ผงเส้นใยบะซอลต์มีความเป็นอัลลูนาสูงทำให้สามารถละลายแคลเซียมออกไซด์ออกมาทำปฏิกิริยาได้สูง การวิเคราะห์จึงตรวจพบการเชื่อมโยงของแคลเซียมที่เด่นชัดกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ผลิตจากถ้อยเพียงชนิดเดียว

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อายุ 28 วัน วิเคราะห์โดย EDS

| Atomic% |       | Mixture |       |      |      |       |
|---------|-------|---------|-------|------|------|-------|
| Element | Ratio | BP00    | BP10  | BP20 | BP30 | BP40  |
| Na      |       | 12.45   | 10.64 | 8.81 | 9.88 | 10.04 |
| Mg      |       | 0.75    | 0.65  | 0.91 | 0.92 | 1.36  |
| Al      |       | 2.69    | 2.40  | 2.51 | 2.60 | 2.67  |
| Si      |       | 6.27    | 6.01  | 6.95 | 8.25 | 9.28  |
| Ca      |       | 5.31    | 4.72  | 5.38 | 5.75 | 6.19  |
| Fe      |       | 1.45    | 1.15  | 1.51 | 1.79 | 2.39  |
|         | Na/Al | 4.63    | 4.43  | 3.51 | 3.80 | 3.76  |
|         | Si/Al | 2.33    | 2.50  | 2.77 | 3.17 | 3.48  |
|         | Ca/Si | 0.85    | 0.79  | 0.77 | 0.70 | 0.67  |
|         | Fe/Mg | 1.93    | 1.77  | 1.66 | 1.95 | 1.76  |

## สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่ถ้อยด้วยแคลเซียมสูงด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษจนวนกันความร้อนต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟส ทาปริมาณการแทนที่ถ้อยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เฟสและตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เฟส สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จีโอโพลิเมอร์เฟสที่มีระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ถ้อยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงเส้นใยบะซอลต์มีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่าทำให้ปริมาณแคลเซียมอิสระในระบบช่วงเริ่มต้นลดลงส่งผลให้การตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮดรตลดลง ทำให้จีโอโพลิเมอร์เฟสใช้เวลาในการก่อตัวเพิ่มมากขึ้น

2. กำลังอัดในทุกอายุการทดสอบของจีโอโพลิเมอร์เฟสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ถ้อยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จนถึงอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง การแทนที่ถ้อยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดโดยที่อายุ 7 28 และ 90 วัน



มีค่าเป็น 32.0 53.6 และ 68.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ช่วยเพิ่มกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการใช้ผงเส้นใยบะซอลต์มากขึ้น ด้วยสมบัติและลักษณะเฉพาะที่เป็นแท่งยาวจึงสามารถถ่ายโอนแรงดัดชะลอการเกิดรอยแตกและสามารถกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นได้

3. ผลวิเคราะห์ที่โครงสร้างจุลภาคสามารถสนับสนุนการปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เฟสจากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ได้จากตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักช่วยทำให้เนื้อเจลของจีโอโพลิเมอร์เฟสมีการสร้างผลึกใหม่เพิ่มมากขึ้น โครงสร้างจึงมีความแน่นส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด เพราะผงเส้นใยบะซอลต์มีรูปแบบโครงสร้างเป็นอสัณฐานสูง การชะละลายและทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างอัลคาไลทำให้เกิดการตกตะกอนของ C-S-H หรือ C-(A)-S-H อยู่ร่วมกับ N-A-S-H เมื่อแข็งตัวเกิดการพัฒนาคความแข็งแรงสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนที่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มทำให้เกิดเส้นใยที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือเกิดปฏิกิริยาเพียงบางส่วนจากการใช้น้ำในระบบ อนุภาคเหล่านี้บางส่วนทำให้จีโอโพลิเมอร์เฟสสูญเสียความแข็งแรง

4. จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เฟสจากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์มีกำลังอัดและกำลังดัดมีแนวโน้มที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม เช่น เฟสสำหรับงานเกร้าท์หรือเฟสสำหรับเทรองรับแผ่นเหล็กหัวเสาและฐานเครื่องจักร เป็นต้น นอกจากนั้นยังเป็นฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาต่อเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และห้องปฏิบัติการและเครื่องมือทดสอบ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย ที่อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ

## References

- [1] Davidovits, J. (1991). Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, No. 8, pp. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193
- [2] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers. **Waste Management**. Vol. 29, Issue 2, pp. 539-543. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.023
- [3] Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol, A., and Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical Properties, Microstructure and Drying Shrinkage of Hybrid Fly Ash-basalt Fiber Geopolymer Paste. **Construction and Building Materials**. Vol. 186, pp. 62-70. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115
- [4] American Society for Testing and Materials. (2019). **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. ASTM C618-19. Annual Book of ASTM Standards.
- [5] Saptamongkol, A., Sata, V., Wongsas, A., Kroehong, W., Ekprasert, J., and Chindaprasirt, P. (2023). Hybrid Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash and Glass Wool: Mechanical, Microstructure, and Sulfuric Acid and Magnesium Sulfate Resistance Characteristics. **Journal of Building Engineering**. Vol. 76, 107245. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107245

- [6] American Society for Testing and Materials. (2019). **Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. ASTM C191-19. Annual Book of ASTM Standards.
- [7] American Society for Testing and Materials. (2020). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)**. ASTM C109/C109M-20b. Annual Book of ASTM Standards.
- [8] American Society for Testing and Materials. (2021). **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars**. ASTM International. ASTM C348-21. Annual Book of ASTM Standards.
- [9] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems. **Journal of Materials Science**. Vol. 47, No. 12, pp. 4876-4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y
- [10] Ziada, M., Erdem, S., Tammam, Y., Kara, S., and Lezcano, R. A. G. (2021). The Effect of Basalt Fiber on Mechanical, Microstructural, and High-Temperature Properties of Fly Ash-Based and Basalt Powder Waste-Filled Sustainable Geopolymer Mortar. **Sustainability**. Vol. 13, Issue 22, DOI: 10.3390/su132212610
- [11] Parveen, S. and Pham, T. M. (2020). Enhanced Properties of High-Silica Rice Husk Ash-Based Geopolymer Paste by Incorporating Basalt Fibers. **Construction and Building Materials**. Vol. 245, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118422
- [12] Lee, W. K. W. and Van Deventer, J. S. J. (2002). The Effects of Inorganic Salt Contamination on the Strength and Durability of Geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Vol. 211, Issue 2-3, pp. 115-126. DOI: 10.1016/S0927-7757(02)00239-X
- [13] Yaseri, S., Hajiaghaei, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M., and Farokhzad, R. (2017). The Role of Synthesis Parameters on the Workability, Setting and Strength Properties of Binary Binder Based Geopolymer Paste. **Construction and Building Materials**. Vol. 157, pp. 534-545. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.102
- [14] Luo, Y., Li, S. H., Klima, K. M., Brouwers, H. J. H., and Yu, Q. (2022). Degradation Mechanism of Hybrid Fly Ash/slag Based Geopolymers Exposed to Elevated Temperatures. **Cement and Concrete Research**. Vol. 151, 106649. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106649
- [15] Veerasingam, S. and Venkatachalapathy, R. (2014). Estimation of Carbonate Concentration and Characterization of Marine Sediments by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Infrared Physics & Technology**. Vol. 66, pp. 136-140. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.06.005
- [16] Yang, Y., Wang, B., Yuan, Q., Huang, D., and Peng, H. (2023). Characterization, Factors, and Fractal Dimension of Pore Structure of Fly Ash-Based Geopolymers. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 26, pp. 3395-3407. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.157
- [17] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Fuel**. Vol. 90, Issue 6, pp. 2118-2124. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.01.018