

คุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญ
บดละเอียด

Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Paste Mixed with Ground Clay Brick

ไพฑูรย์ นาแซง¹ อำพล วงศ์ษา¹ วันชัย สะตะ^{1*} และปริญญญา จินดาประเสริฐ^{1,2}

Phaithun Nasaeng¹ Ampol Wongsas¹ Vanchai Sata^{1*} and Prinya Chindaprasirt^{1,2}

Received: October 28, 2022; Revised: December 6, 2022; Accepted: December 6, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด วัสดุหลักใช้คือ เถ้าลอยแคลเซียมสูงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เศษอิฐมอญบดละเอียดใช้แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ในอัตราส่วนเท่ากับ 1.0 กำหนดอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลต่อวัสดุผงคงที่เท่ากับ 0.60 ทุกอัตราส่วนผสม ทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้ SEM/EDS, XRD และ FTIR ผลวิจัยพบว่าเศษอิฐมอญบดละเอียดเป็นวัสดุซิลิกาที่มีความเป็นผลึกสูง การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษอิฐมอญบดละเอียดในส่วนผสมช่วยเพิ่มให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น ในขณะที่การไหลแผ่และกำลังอัดลดลง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าสารประกอบ C-S-H หรือ C-A-S-H และเจลจีโอโพลิเมอร์ได้ก่อตัวขึ้นในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงจะเกิดผลึกและอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางกลในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 25 - 50 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 60 วันต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อย

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์เพสต์; เถ้าลอยแคลเซียมสูง; เศษอิฐมอญบดละเอียด; โครงสร้างทางจุลภาค

¹ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ภาควิชาเคมี ราชบัณฑิตยสถาน สนามเสือป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

¹ Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Bangkok

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

Abstract

This research aimed to study the properties of geopolymer paste using high calcium fly ash mixed with ground clay brick. The main raw material used was high-calcium fly ash from Mae Moh Power Plant, Lampang Province. Ground clay brick was used to partially replace high calcium fly ash at the ratios of 0, 25, 50, 75, and 100 by weight. Sodium silicate and 10 molar of sodium hydroxide solutions were used as alkali solutions at the ratio of 1.00. The alkali liquid to solid powder ratio was kept constant for all mixes at 0.60. The flow value, setting time, compressive strength, and microstructure analysis by SEM/EDS, XRD, and FTIR of the geopolymer paste were tested. The results showed that ground clay brick had highly crystalline silica materials. An increase in the number of ground clay bricks increased the setting time while the flow value and compressive strength decreased. The microstructural analysis showed that the C-S-H or C-A-S-H compounds and geopolymer gels were formed in the geopolymer pastes. When high-calcium fly ash was replaced with ground clay brick, more crystals and non-reactive particles were generated, which negatively affected the mechanical properties at an early age. However, the replacement at a rate of 25 - 50 % had slightly lower 60-day compressive strength than the control sample.

Keywords: Geopolymer Paste; High Calcium Fly Ash; Ground Clay Brick; Microstructure

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นในหลายด้าน มีความแข็งแรงและคงทนใกล้เคียงหรือดีกว่าสารซีเมนต์แบบดั้งเดิม [1] การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยใช้วัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกตทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไล [2] ในปฏิกิริยาจะเกิดการชะละลายอนุภาคของวัตถุดิบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นสารละลายแล้วเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างสามมิติที่มีความซับซ้อน [3] ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์มีการศึกษาและวิจัยมาอย่างต่อเนื่องทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถก่อตัวได้เร็ว มีกำลังสูงและทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดและซัลเฟต [4] - [6] อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากในการผลิตใช้พลังงานและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่ำ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม อาทิเช่น ในปี ค.ศ. 2017 การศึกษาเชิงทดลองของ [7] ได้ผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 40 เมกะปาสคาล โดยใช้เถ้าลอยผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 [8] ได้ผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกำลังสูงจากเถ้าลอยที่เหลือทิ้งจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถปรับปรุงคุณภาพและนำมาใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ อย่างเช่น ในการศึกษาของ [9] พบว่าเถ้าถ่านเตาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดให้มีขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่มีความสามารถทำงานได้และความแข็งแรงค่อนข้างดีได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ [10] ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าขยะที่มีความละเอียดสูงผสมเถ้าลอยสามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ได้

ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากวัสดุต่างชนิดกัน โดยมีงานวิจัยจำนวนมากกว่าร้อยละ 70 ใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบหลัก [11] ซึ่งอาจจะมาจากเหตุผลที่เถ้าลอยเป็นเถ้าทิ้งจากโรงไฟฟ้าและมีปริมาณมากในแต่ละวัน สามารถพบได้ในหลายพื้นที่และทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ในประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนหลายแห่งที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติและพลังงานนิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ตั้งอยู่ในทางตอนเหนือของประเทศ

โรงไฟฟ้าแห่งนี้มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงทำให้มีเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเกิดขึ้นประมาณ 3.0 ล้านตันต่อปี [12] เถ้าลอยส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต [13] และยังสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุเติมในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเถ้าลอยมีออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาที่มีทั้งความเป็นอสัณฐานและผลึกในอนุภาคเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาพบว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีแนวโน้มสูงขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว จากรายงานวิจัยของ [14] พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายอยู่ในช่วงประมาณ 60 - 100 นาที และจากรายงานวิจัยของ [15] แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นกว่าคอนกรีตทั่วไปเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไอออน Ca^{2+} อาจจะพัฒนาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) [14] หรือแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-(A)-S-H) ช่วยเร่งการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ในอุณหภูมิปกติได้ [16]

การใช้วัสดุร่วมเพื่อลดปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้ [17] ได้กล่าวถึงประเด็นนี้ว่าการลดปริมาณเถ้าลอยแคลเซียมสูงโดยการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแคลเซียมต่ำในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะช่วยลดปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ทำหน้าที่เร่งการก่อตัวเนื่องจากเกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ [18] ที่พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C (ปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18) มีระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายเท่ากับ 80 และ 105 นาที ตามลำดับ การใช้ตะกอนเหล็กชนิดที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ (ประมาณร้อยละ 13) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายได้มากกว่าสองเท่า แต่การใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดรูพรุนและโพรงคัปิลลารีมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของการใช้วัสดุผสมร่วมแต่ละชนิดที่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

เศษอิฐมอญเป็นวัสดุขยะจากการผลิตอิฐเพื่อจำหน่ายและการก่อสร้างหรือเกิดจากการรื้อถอนทำลายในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าผงละเอียดจากเศษวัสดุนี้มีซิลิกาออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก [19] เมื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต [20] เมื่อพิจารณาถึงศักยภาพเบื้องต้นมีความเป็นไปได้และควรศึกษาเพิ่มเติมในการใช้เศษอิฐมอญเป็นวัตถุเติมร่วมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการ ได้แก่ ชะลอการก่อตัวเพิ่มระยะเวลาในการทำงานได้และการพัฒนากำลังอัด นอกจากนี้ยังเพิ่มแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์และเพิ่มตัวเลือกวัสดุที่สามารถนำมาใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างในอนาคต จากข้อมูลดังกล่าวมางานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญและการใช้เศษอิฐมอญล้วนเป็นวัสดุตั้งต้น โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติของเพสต์ที่แข็งตัว ได้แก่ กำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาค

วิธีดำเนินการวิจัย

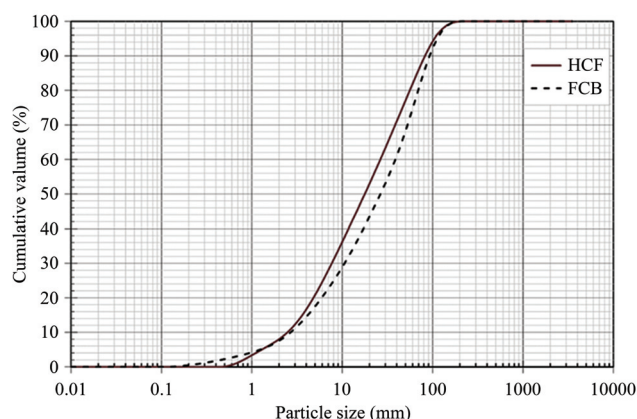
การดำเนินการวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบหลักใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง วัสดุทดแทนใช้เศษอิฐมอญบดละเอียด (FCB) จากสถานที่ก่อสร้างในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยจะนำเศษอิฐมอญมาอบให้แห้งในตู้อบ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบให้มี

ขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย จากการทดสอบความละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C430 - 17 [21] พบว่าเถ้าลอยและเศษอิฐบดละเอียดมีค่าร้อยละค้ำตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 25.3 และ 28.3 การกระจายตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ดังตารางที่ 1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผงโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) พบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [22] เนื่องจากมีผลรวมออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 55.40 และมีออกไซด์ของ CaO มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ในส่วนของเศษอิฐบดละเอียดพบว่ามีออกไซด์ของ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีผลรวมออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 เป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุ ปอซโซลานประเภท N [23] รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าลอยและเศษอิฐบดละเอียดพบว่า อนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะกลมมีขนาดเล็กและขนาดกลางคลอบกับขนาดใหญ่ ในขณะที่เศษอิฐบดละเอียด จะมีขนาดใหญ่กว่าสอดคล้องกับการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค รูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ สัณฐานวิทยาของเถ้าลอยและเศษอิฐบดละเอียดพบว่าอนุภาคที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยประกอบด้วย เฟสผลึกของแอนไฮไดรต์ ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$, A) ควอตซ์ (SiO_2 , Q) แคลเซียมออกไซด์ (CaO , L) และแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, P) โดยมีพิกกว้างแสดงความเป็นออสติเนียนในช่วงระหว่าง 20° ถึง 35° 2Theta เศษอิฐบดละเอียดประกอบด้วย เฟสผลึกนอนโทรไนต์ (Nontronite) ซึ่งเป็นกลุ่มหนึ่งของแร่ดินเหนียว

สารละลายอัลคาไลใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ละลายในน้ำกลั่น ให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 30.24 โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 12.53 และ น้ำ (H_2O) ร้อยละ 48.62 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00 เพื่อให้ประหยัดและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงตามคำแนะนำของ [24]



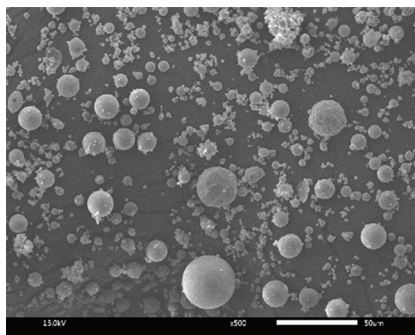
รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐบดละเอียด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐบดละเอียด

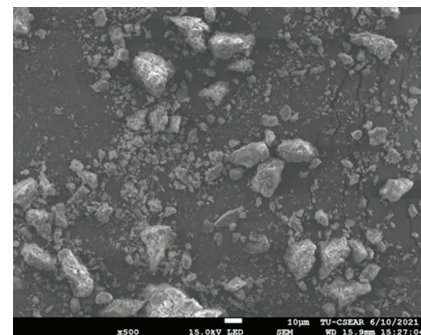
คุณสมบัติของวัสดุ	HCF	FCB
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)		
- SiO_2	27.5	67.9
- CaO	25.5	0.6
- Al_2O_3	14.3	15.2
- Fe_2O_3	13.6	5.1
- SO_3	6.33	-

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐมอญบดละเอียด (ต่อ)

คุณสมบัติของวัสดุ	HCF	FCB
- MgO	2.47	1.2
- Na ₂ O	2.04	0.8
- K ₂ O	1.85	1.5
- TiO ₂	0.33	0.8
- P ₂ O ₅	0.32	-
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.55
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	2,719	4,850
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	20.2	30.6

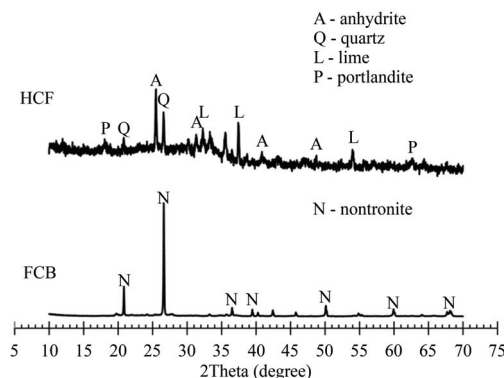


(ก) เถ้าลอย



(ข) เศษอิฐมอญบดละเอียด

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของวัสดุผง



รูปที่ 3 XRD ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐมอญบดละเอียด

2. การออกแบบส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดต่อคุณสมบัติของซีเมนต์โพสท์ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปางเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก เพื่อศึกษาใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดในปริมาณที่มากจึงนำมาแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ออกแบบอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.60 เพื่อให้ง่ายต่อการเทโดยไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสม โดยอัตราส่วนผสมทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 2 ในการผสมใช้วัสดุผงผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดในภาชนะแบบปิดแล้วทำการเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทวัสดุผงที่เตรียมไว้ลงในเครื่องผสมแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมทำการผสมต่ออีก 5 นาที

เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้เทลงแบบหล่อทำการปาดผิวหน้าให้เรียบแล้ว ท่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น ปล่อยให้ตัวอย่างก่อตัวในท้องควบคุมอุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าตูอบควบคุมอุณหภูมิภายในไว้ที่ 60 °C เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากตูอบแล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอย่างน้อย 6 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกและบ่มในท้องที่มีอุณหภูมิระหว่าง 25 - 30 °C จนถึงอายุทดสอบ และเพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดในสภาวะอุณหภูมิห้องของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ได้กำหนดปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษอิฐมอยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยทำการบ่มตัวอย่างหลังจากผสมเสร็จในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบและแสดงสัญลักษณ์ -A ที่ชื่ออัตราส่วนผสม

3. วิธีการทดสอบ

เพื่อศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สดและจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ การพัฒนากำลังอัดและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอยบดละเอียดทำการทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ 28 วัน

3.1 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test) ทำการทดสอบโดยใช้กรวยขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนเท่ากับ 19 มิลลิเมตร สูง 57 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่างเท่ากับ 38 มิลลิเมตร [25] เติมน้ำในแบบกรวยจนเต็มจากนั้นปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วยกกรวยขึ้นในแนวตั้ง ปล่อยให้เพสต์ไหลแผ่บนแผ่นพลาสติกใสในแนวระดับทิ้งไว้จนแห้งและทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง

3.2 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์โดยเข็มไวแคตโดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเทลงแบบหล่อรูปกรวย ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-19 [26]

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างเพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20b [27]

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้เศษตัวอย่างที่อายุ 28 วัน แขนสารอะซิโตนเพื่อหยุดปฏิกิริยาที่เกิดในจีโอโพลิเมอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [18] แล้วนำมาอบให้แห้งในตูอบหลังจากนั้นทำการทดสอบ ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (SEM/EDS) การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึก (XRD) และการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

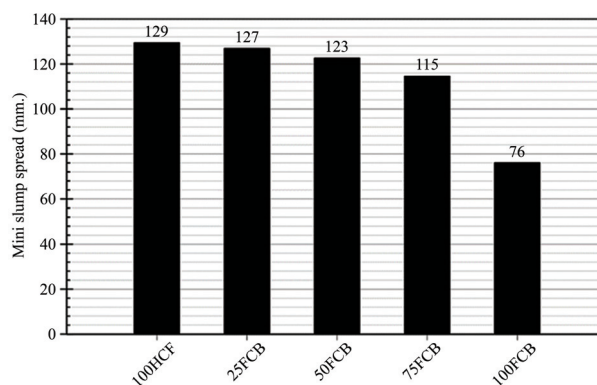
ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมและอัตราส่วนโมลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วนผสม	HCF	FCB	Na ₂ SiO ₃	NaOH	อัตราส่วนโดยโมล			
	(g.)	(g.)	(g.)	(g.)	Si/Al	Na/Si	Ca/Al	Ca/Si
100HCF	100	-	30	30	4.34	0.34	3.24	0.75
25FCB	75	25	30	30	5.45	0.26	2.41	0.44
50FCB	50	50	30	30	6.53	0.21	1.61	0.25
75FCB	25	75	30	30	7.58	0.18	0.83	0.11
100FCB	-	100	30	30	8.59	0.15	0.07	0.01
100HCF-A	100	-	30	30	4.34	0.34	3.24	0.75
50FCB-A	50	50	30	30	6.53	0.21	1.61	0.25

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ค่าการไหลแผ่

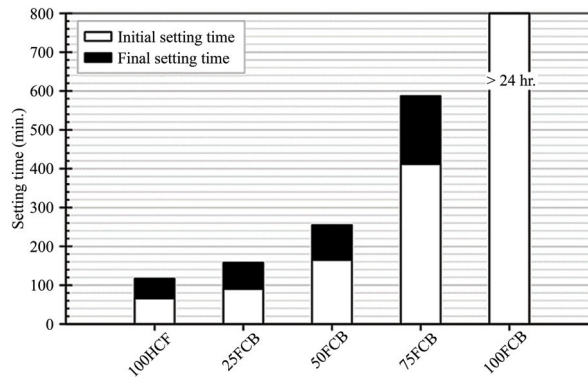
รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอยบดละเอียดในปริมาณแตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เศษอิฐมอยบดละเอียดเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างควบคุม (100HCF) มีเส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่เฉลี่ยเท่ากับ 129 มิลลิเมตร การแทนที่เศษอิฐมอยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 50 และ 75 โดยน้ำหนัก ค่าการไหลแผ่ของเพสต์ลดลงร้อยละ 2 5 และ 11 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้เศษอิฐมอยบดละเอียดเป็นวัสดุดิบเพียงชนิดเดียว (100FCB) พบว่ามีค่าการไหลแผ่ลดลงสูงถึงร้อยละ 41 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมอาจจะมีสาเหตุเนื่องจากลักษณะอนุภาคของเศษอิฐมอยบดละเอียดเป็นเหลี่ยมเป็นมุมดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ทำให้ความลื่นไหลลดลงตรงข้ามกับเถ้าลอยที่มีอนุภาคทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ทำให้ลื่นไหลได้ดี นอกจากนี้อนุภาคของเศษอิฐมอยบดละเอียดที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเถ้าลอยอาจบ่งบอกถึงลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนสูงคล้ายเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการของเหลวไปเคลือบผิวมากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จึงมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง [28]



รูปที่ 4 ค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอยบดละเอียด

2. ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอยบดละเอียดในปริมาณแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีระยะเวลาการก่อตัวและปลายเท่ากับ 66 และ 117 นาที ในระบบจีโอโพลิเมอร์เมื่อใช้วัสดุดิบที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ไม่สูงมากนักและใช้ค่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ สูง การชะละลายซิลิกาและอะลูมินาทำได้ยาก [29] จะเกิดไอออนของแคลเซียมมากกว่าไอออนของซิลิกาและอะลูมินา [30] โดยเมื่อทำปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [31] การแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษอิฐมอยบดละเอียดมีแนวโน้มช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายของเพสต์ ในตัวอย่าง 25FCB 50FCB และ 75FCB มีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 90 145 และ 412 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 158 225 และ 587 นาที ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของโมลในตารางที่ 2 พบว่าการลดลงของอัตราส่วน Ca/Si และ Ca/Al มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น การลดลงของแหล่งผลิตแคลเซียมทำให้ปริมาณไอออน Ca^{2+} ลดลง การควบแน่นในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับไอออนของซิลิกา (Si^{4+}) และอะลูมินา (Al^{3+}) ที่สามารถทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซนจึงใช้เวลาในการก่อตัวมากขึ้น [24] ในส่วนของการใช้เศษอิฐมอยบดละเอียดเป็นวัสดุดิบเพียงชนิดเดียวในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ (ตัวอย่าง 100FCB) มีการก่อตัวช้าในอุณหภูมิห้องทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวมากกว่า 24 ชั่วโมง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ [32]



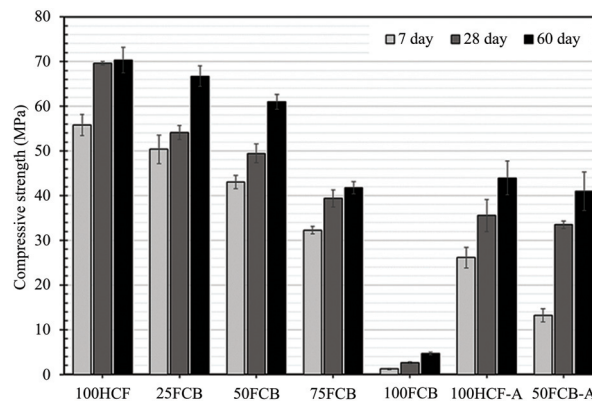
รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เฟสผสมเศษอิฐมอยบดละเอียด

3. กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เฟสผสมเศษอิฐมอยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ที่อายุการทดสอบ 7 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 6 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเศษอิฐมอยบดละเอียดเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่นที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างควบคุมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 69.6 เมกะปาสกาล เมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 50 และ 75 และทำการบ่มด้วยสภาวะแบบเดียวกันมีค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 78 71 และ 57 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม การลดลงของกำลังรับแรงอัดอาจเกิดจากปริมาณซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะละลายออกมาจากเศษอิฐมอยบดละเอียดทำได้ยากกว่าเถ้าลอยเนื่องจากมีค่าความเป็นกรดต่ำสังเกตได้จากรูปที่ 3 ที่ตำแหน่งพิกกว้างในช่วงระหว่าง 20° ถึง 27° 2θ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความเป็นกรดสูงกว่าสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จึงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงตามไปด้วย นอกจากนี้การลดลงของปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมอาจจะเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เมทริกซ์ของจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จากวัตถุดิบที่มีแคลเซียมสูงจะทำให้เกิด C-S-H และ C-(A)-S-H ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจลและมีส่วนช่วยพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ [4], [33] เมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอยบดละเอียดทำให้อัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al เพิ่มขึ้นในขณะที่ Ca/Si ลดลง ดังตารางที่ 2 การเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาในส่วนผสมอาจทำให้เกิดอัตราส่วน Si/Al และ Na/Si ที่ไม่สมดุลส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยา [34] นอกจากนี้การตกตะกอนของเจล C-(A)-S-H และโซเดียมอะลูมิเนตซิลิเกต (N-A-S-H) อาจลดลงเนื่องจากการลดลงของ Ca และ Al อย่างไรก็ตามในช่วงอายุปลายตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ใช้เศษอิฐมอยบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดดีขึ้นอย่างชัดเจนจากการศึกษาของ [35] พบว่าองค์ประกอบของเศษอิฐมอยที่มีความเป็นผลึกสูงบางส่วนสามารถถูกชะละลายออกมาและทำปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ได้ และจากงานวิจัยของ [36] กล่าวว่า การสลายตัวของซิลิกาและอะลูมินายังคงเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและทำให้เกิดเจลโพลิเมอร์มากขึ้นซึ่งช่วยพัฒนาความแข็งแรงของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นในช่วงอายุปลายซิลิกาและอะลูมินาที่มีปริมาณมากในเศษอิฐมอยบดละเอียดอาจจะถูกชะละลายออกมามากขึ้นแล้วเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตและเพิ่มความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้

สำหรับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสที่บ่มในอุณหภูมิห้องทั่วไปพบว่ามีความกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนผลการศึกษาก็ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] ยกตัวอย่างที่อายุ 7 วัน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง 100HCF และ 50FCB มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 55.8 และ 43.1 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง 100HCF-A และ 50FCB-A มีค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 47 และ 31 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C โดยทั่วไปแล้วการบ่มด้วยความร้อนจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ให้เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

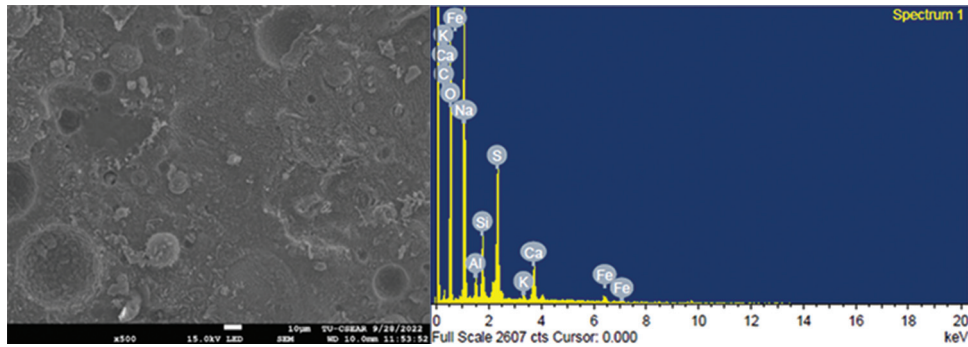
สอดคล้องกับงานวิจัยของ [37] เนื่องจากเฟสสัณฐานเป็นเหตุผลประการเดียวที่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยที่เฟสผลึกไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [38] แต่อย่างไรก็ตามที่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มในอุณหภูมิห้องทั่วไปสามารถพัฒนากำลังได้สูงขึ้น ซึ่งหลังจากอายุ 28 วัน ตัวอย่าง 100HCF-A และ 50FCB-A มีค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 63 และ 68 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนเดียวกันที่บ่มด้วยความร้อน



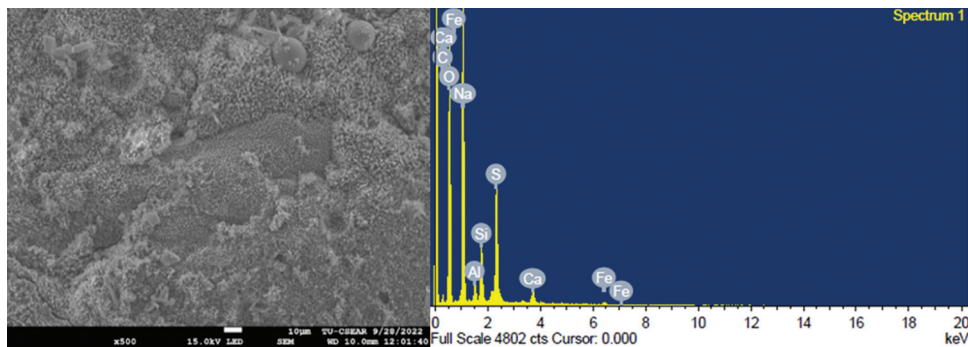
รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของเกล็ดลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด

4. การวิเคราะห์ด้วย SEM-EDS

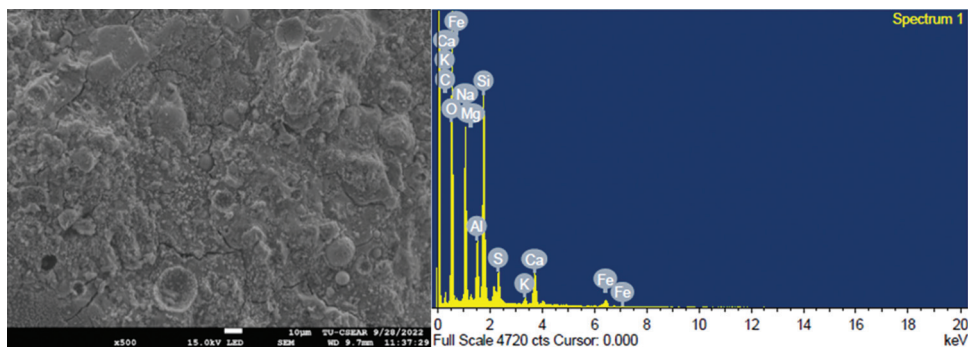
ในการวิเคราะห์ SEM-EDS ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเกล็ดลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดจะนำชิ้นส่วนที่แตกจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A ตามลำดับ จากรูปที่ 7(ก) สังเกตได้ว่าตัวอย่าง 100HCF มีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกันและมีอนุภาคของเกล็ดลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือที่ถูกชะละลายเพียงบางส่วน เหลือน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่ค่อนข้างสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุพบว่ามีอะตอมของออกซิเจน (O) ซิลิกา (Si) โซเดียม (Na) อะลูมินา (Al) และแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบหลักบ่งชี้ถึงการเกิดเจล N-A-S-H อยู่ร่วมกับ C-(A)-S-H [34] เมื่อแทนที่เกล็ดลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 ตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อนจะเกิดผลึกและปรากฏอนุภาคของวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 7(ข) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีความหนาแน่น ปริมาณรูพรุนและรอยแตกขนาดเล็กปรากฏเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่บ่มในอุณหภูมิห้องพบว่า เนื้อส่วนมากผิวไม่เรียบ มีความพรุนสูง โครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ในจีโอโพลิเมอร์เจลมากกว่าตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 7(ค) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุพบว่าตัวอย่าง 50FCB และ 50FCB-A มีองค์ประกอบของธาตุเช่นเดียวกับตัวอย่าง 100HCF แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H เป็นสารประกอบที่ให้สมบัติทางด้านกำลังแก่จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเกล็ดลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด แต่เนื่องจากความเป็นผลึกสูงของอิฐมอญอาจจะทำให้เศษอิฐมอญบดละเอียดเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อย จึงทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก [39] จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลเนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กเหล่านี้ทำให้กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่ำกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วนน้อยกว่า [40]



(ก) 100HCF



(ข) 50FCB



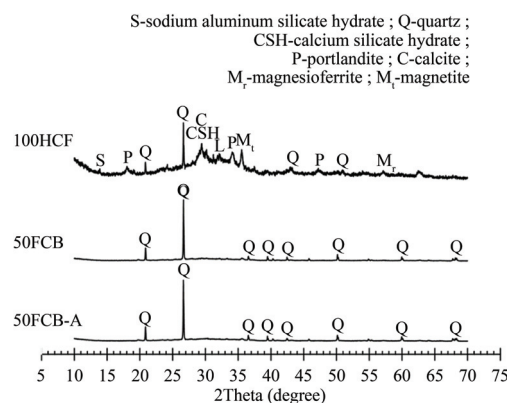
(ค) 50FCB-A

รูปที่ 7 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและองค์ประกอบของธาตุของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

5. สันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

รูปที่ 8 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A ที่อายุ 28 วัน เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง และจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐบดละเอียดในสภาวะการบ่มที่แตกต่างกันพบว่าในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกปรากฏพื้นฐานกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ตำแหน่ง 2θ $23^\circ - 37^\circ$ ตัวอย่าง 100HCF ตรวจพบเฟสผลึกของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_{60}(\text{H}_3\text{O})_{32}(\text{Si}_{100}\text{Al}_{92}\text{O}_{384})(\text{H}_2\text{O})_{24}$) ควอตซ์ (SiO_2) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (Fe_2MgO_4) แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) พอร์ตแลนด์ต์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แคลไซต์ ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) และลาร์ไนต์ (Ca_2SiO_4) นอกจากนี้ยังปรากฏฟีกของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่คล้ายกับสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับที่ตำแหน่ง 29.5 และ 30.1 2θ [41] - [42] การตรวจพบสารประกอบสนับสนุนผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและปลายที่สั้นในตัวอย่าง 100HCF ในส่วนของตัวอย่างที่ใช้เศษอิฐบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 50 ทั้งตัวอย่างที่บ่มร้อนและบ่ม

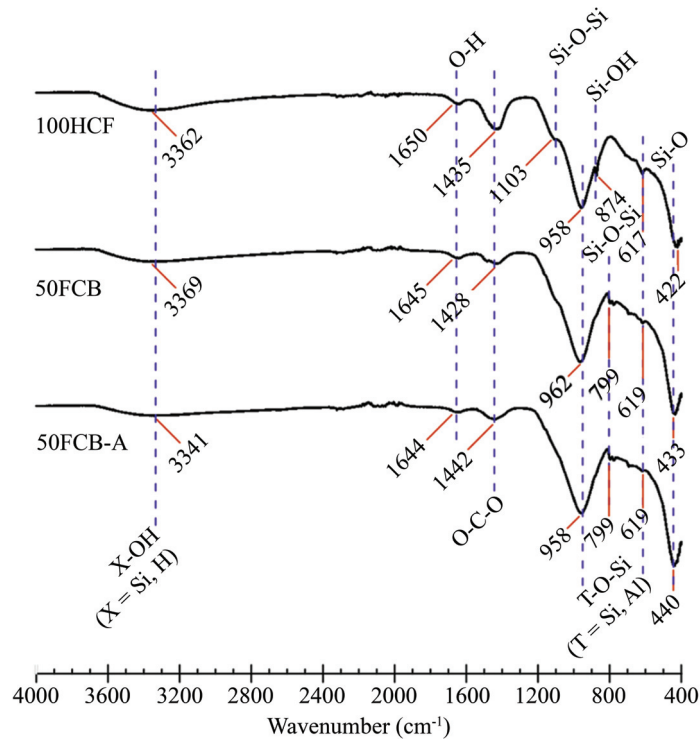
ในอุณหภูมิห้อง (50FCB และ 50FCB-A) ตรวจพบเฟสผลึกของควอตซ์เป็นส่วนใหญ่สอดคล้องกับงานวิจัยของ [35] แต่ไม่พบเฟสผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์อาจจะมีสาเหตุเนื่องจากเมื่อปริมาณ Ca ในส่วนผสมต่ำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของวัตถุดิบร่วมและสารละลายอัลคาไลจะเป็นสารประกอบแบบไฮบริดเจล ได้แก่ C-(N)-A-S-H และ N-(C)-A-S-H [43] ด้วยเหตุนี้จึงโพลิเมอร์เฟสที่ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดจึงมีการก่อตัวที่ช้ากว่าโพลิเมอร์เฟสที่จากแคลเซียมสูงเพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่แคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 50 จะทำให้เกิดผลึกของควอตซ์สูง แต่การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนเป็นผลให้กำลังอัดของตัวอย่าง 50FCB มีค่ามากกว่า 50FCB-A เนื่องจากการบ่มร้อนทำให้โพลิเมอร์เจลมีหนาแน่น มีจำนวนอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาน้อยและมีรูพรุนน้อยกว่า ดังแสดงในการวิเคราะห์ด้วย SEM



รูปที่ 8 รูปแบบ XRD ของตัวอย่างแคลเซียมสูงโพลิเมอร์เฟสที่ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดที่อายุ 28 วัน

6. การวิเคราะห์ด้วย FTIR

สเปกตรัมอินฟราเรดของโพลิเมอร์เฟสที่จากแคลเซียมสูง และโพลิเมอร์เฟสที่จากแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดแสดงในรูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ตรวจพบการสั่นของโมเลกุลที่แตกต่างกันแสดงถึงเอกลักษณ์ของตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A โดยที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 3369 - 3341 และ 1650 - 1644 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ X-OH Stretching เมื่อ X คือ Si หรือ H และ H-O-H Bending ตามลำดับ ซึ่งการสั่นที่ตำแหน่งนี้เกิดจากโมเลกุลของน้ำ [44] - [45] และที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1442 - 1428 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบ O-C-O Stretching ของการคั่งของคาร์บอนของ CO_3 และการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ [44], [46] ซึ่งในหมู่ฟังก์ชันทั้งสองตรวจพบในทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ การสั่นสะเทือนแบบอสมมาตร Si-O-Si ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1100 cm^{-1} [47] เนื่องจากควอตซ์ตรวจพบเฉพาะในตัวอย่าง 100HCF เมื่อแทนที่แคลเซียมด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดอาจทำให้เกิดผลึกของ SiO_2 เพิ่มมากขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง 50FCB และ 50FCB-A จึงทำให้เกิดการสั่นแบบอสมมาตร Si-O-Si ที่ตำแหน่ง 799 cm^{-1} [48] - [49] ที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 962 - 958 cm^{-1} และเป็นการสั่นแบบอสมมาตรของการยึดตัวของพันธะ T-O-Si อาทิเช่น Si-O-Si และ Si-O-Al และการสั่นแบบยืดของ Si-O ของพันธะสี่หน้าของซิลิเกต [34] ที่ตำแหน่งนี้แสดงถึงการก่อตัวของวัสดุโพลิเมอร์ [44] ในตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A และที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้กับ 440 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดสมมาตรของ Si-O ในโพลิเมอร์เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้การสังเคราะห์ [50]



รูปที่ 9 สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เฟสผสมเศษอิฐบดละเอียด ที่อายุ 28 วัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าการใช้เศษอิฐบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เฟสผสมเศษอิฐบดละเอียดมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างควบคุมเกิดสารผลิตภัณฑ์ C-S-H และ C-A-S-H ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจลทำให้มีความแข็งแรงสูงมีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน การใช้เศษอิฐบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงจะทำให้เกิดผลึกของอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นลดลง นอกจากนี้วิธีการบ่มยังส่งผลกระทบบ่อยอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เฟสผสมเศษอิฐบดละเอียด การบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้องทั่วไปจะทำให้พัฒนากำลังได้ช้าทำให้ความแน่นตัวลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุเท่ากับตัวอย่างที่บ่มร้อน แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ใช้อิฐบดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังดีขึ้นในช่วงอายุปลาย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐบดละเอียดเป็นวัสดุประสานอีกหนึ่งชนิดสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างที่มีระยะเวลาก่อไม่เร็วมากและมีกำลังอัดสูง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้เขียนขอขอบคุณ การสนับสนุนทุนการศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น

References

- [1] Toniolo, N., Rincón, A., Roether, J. A., Ercole, P., Bernardo, E., and Boccaccini, A. R. (2018). Extensive Reuse of Soda-Lime Waste Glass in Gly Ash-Based Geopolymers. **Construction and Building Materials**. Vol. 188, pp. 1077-1084. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.096
- [2] Davidovits, J. (1991). Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, No. 8, pp. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193
- [3] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, A., Palomo, G. C., and Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art. **Journal of Materials Science**. Vol. 42, No. 9, pp. 2917-2933. DOI:10.1007/s10853-006-0637-z
- [4] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. **Materials and Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.018
- [5] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., and Cao, T. (2011). High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 23, Issue 3, pp. 264-270. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000161
- [6] Sata, V., Sathonsaowaphak, A., and Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar to Sulfate and Sulfuric Acid Attack. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 34, Issue 5, pp. 700-708. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010
- [7] Saha, S. and Rajasekaran, C. (2017). Enhancement of the Properties of Fly Ash Based Geopolymer Paste by Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag. **Construction and Building Materials**. Vol. 146, pp. 615-620. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139
- [8] Topark-Ngarm, P., Chindaprasirt, P., and Sata, V. (2015). Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 27, Issue 7, p. 04014198
- [9] Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., and Pimraksa K. (2009). Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 168, Issue 1, pp. 44-50. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.120
- [10] Wongsas, A., Boonserm, K., Waisurasingha, C., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2017). Use of Municipal Solid Waste Incinerator (MSWI) Bottom Ash in High Calcium Fly Ash Geopolymer Matrix. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 148, pp. 49-59. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.147
- [11] Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., and Ling, Y. (2020). Fabrication and Engineering Properties of Concretes Based on Geopolymers/alkali-activated Binders - A Review. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 258, p. 120896. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120896
- [12] Wongsas, A., Zaetang, Y., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Properties of Lightweight Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash as Aggregates. **Construction and Building Materials**. Vol. 111, pp. 637-643. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.135

- [13] 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
- [14] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems. **Journal of Materials Science**. Vol. 47, pp. 4876-4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y
- [15] Pangdaeng, S., Ngamtavee, S., Tho-In, T., Hanjitsuwan, S., and Phoo-ngernkham, T. (2022). Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 2, pp. 1-10 (in Thai)
- [16] Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., and Sahmaran, M. (2021). Development of Normal and Very High Strength Geopolymer Binders Based on Concrete Waste at Ambient Environment. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 279, p. 123436. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123436
- [17] Nuaklong, P., Wongsas, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J., and Chindaprasirt, P. (2019). Properties of High-Calcium and Low-Calcium Fly Ash Combination Geopolymer Mortar Containing Recycled Aggregate. **Heliyon**. Vol. 5, Issue 9, p. e02513. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02513
- [18] Song, W., Zhu, Z., Peng, Y., Wan, Y., Xu, X., Pu, S., Song, S., and Wei, Y. (2019). Effect of Steel Slag on Fresh, Hardened and Microstructural Properties of High-Calcium Fly Ash Based Geopolymers at Standard Curing Condition. **Construction and Building Materials**. Vol. 229, p. 116933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116933
- [19] Li, S., Li, Q., Zhao, X., Luo, J., Gao, S., Yue, G., and Su, D. (2019). Experimental Study on the Preparation of Recycled Admixtures by Using Construction and Demolition Waste. **Materials (Basel)**. Vol. 12, Issue 10, pp. 1-16. DOI: 10.3390/ma12101678
- [20] Tang, Q., Ma, Z., Wu, H., and Wang, W. (2020). The Utilization of Eco-Friendly Recycled Powder from Concrete and Brick Waste in New Concrete: A Critical Review. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 114, p. 103807. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103807
- [21] American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve. ASTM C430-17. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [22] 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**. Vol. 4, No. 2
- [23] Hwang, C. L., Damtie Yehualaw, M., Vo, D. H., and Huynh, T. P. (2019). Development of High-Strength Alkali-Activated Pastes Containing High Volumes of Waste Brick and Ceramic Powders. **Construction and Building Materials**. Vol. 218, pp. 519-529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143
- [24] Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. **Minerals Engineering**. Vol. 22, Issue 12, pp. 1073-1078. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.022

- [25] Collins, F., Lambert, J., and Duan, W. H. (2012). The Influences of Admixtures on the Dispersion, Workability, and Strength of Carbon Nanotube-OPC Paste Mixtures. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 34, Issue 2, pp. 201-207. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013
- [26] 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**. Vol. 4, No. 1
- [27] 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**. Vol. 4, No. 1
- [28] Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., and Sata V. (2020). Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Fire Resistance of Recycled Aggregate High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 252, p. 119797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119797
- [29] Tho-In, T., Latulee, C., Phoo-ngernkham, T., Amornpinyo, P., Phonkasi, S., and Yodsiri, P. (2021). Influence of Ordinary Portland Cement and Different Alkali Solution Ratio in Geopolymer Mortar on Time of Setting and Compressive Strength for Use as a Repaired Materails. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 14, No. 3, pp. 20-31 (in Thai)
- [30] Phair, J. W. and Van Deventer, J. S. J. (2001). Effect of Silicate Activator pH on the Leaching and Material Characteristics of Waste-Based Inorganic Polymers. **Minerals Engineering**. Vol. 14, Issue 3, pp. 289-304. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00002-4
- [31] Rattanasak, U., Pankhet, K., and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**. Vol. 18, No. 3, pp. 364-369. DOI: 10.1007/s12613-011-0448-3
- [32] Nath, P. and Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. **Construction and Building Materials**. Vol. 66, pp. 163-171. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080
- [33] 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
- [34] Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., and Sahmaran, M. (2021). Synthesis and Optimization of Binary Systems of Brick and Concrete Wastes Geopolymers at Ambient Environment. **Construction and Building Materials**. Vol. 276, p. 122217
- [35] Tuyan, M., Andiç-Çakir, Ö., and Ramyar, K. (2018). Effect of Alkali Activator Concentration and Curing Condition on Strength and Microstructure of Waste Clay Brick Powder-based Geopolymer. **Composites Part B: Engineering**. Vol. 135, pp. 242-252. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.10.013
- [36] Gunasekara, C., Law, D. W., and Setunge S. (2016). Long Term Engineering Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete. In **Proceedings of the Sustainable Construction Materials and Technologies**. Las Vegas: USA
- [37] Chen, W. and Zhu, Z. (2018). Utilization of Fly Ash to Enhance Ground Waste Concrete-Based Geopolymer. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol. 2018, DOI: 10.1155/2018/4793917

- [38] Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., and Lukey, G. C. (2002). The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash - and Kaolinite-Based Geopolymers. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 89, pp. 63-73. DOI: 10.1016/S1385-8947(02)00025-6
- [39] Nuaklong, P., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Influence of Recycled Aggregate on Fly Ash Geopolymer Concrete Properties. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 112, Part 4, pp. 2300-2307. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.109
- [40] Zhang, J., Li, S., Li, Z., Liu, C., and Gao, Y. (2020). Feasibility Study of Red Mud for Geopolymer Preparation: Effect of Particle Size Fraction. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. Vol. 22, No. 5, pp. 1328-1338. DOI: 10.1007/s10163-020-01023-4
- [41] Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2016). Improvement of Durability of Cement Pipe with High Calcium Fly Ash Geopolymer Covering. **Construction and Building Materials**. Vol. 112, pp. 956-961. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.023
- [42] Dong, M., Feng, W., Elchalakani, M., (Kevin) Li, G., Karrech, A., and May, E. F. (2017). Development of a High Strength Geopolymer by Novel Solar Curing. **Ceramics International**. Vol. 43, Issue 14, pp. 11233-11243. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.05.173
- [43] Djobo, J. N. Y., Tchakouté, H. K., Ranjbar, N., Elimbi, A., Tchadjié, L. N., and Njopwouo, D. (2016). Gel Composition and Strength Properties of Alkali-Activated Oyster Shell-Volcanic Ash: Effect of Synthesis Conditions. **Journal of the American Ceramic Society**. Vol. 99, Issue 9, pp. 3159-3166. DOI: 10.1111/jace.14332
- [44] 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, No. 2-3, pp. 115-126. DOI: 10.1016/S0927-7757(02)00239-X
- [45] Nana, A., Epey, N., Rodrique, K. C., Deutou, J. G. N., Djobo, J. N. Y., Tomé, S., Alomayri, T. S., Ngouné, J., Kamseu, E., and Leonellif, C. (2021). Mechanical Strength and Microstructure of Metakaolin/Volcanic Ash-Based Geopolymer Composites Reinforced with Reactive Silica from Rice Husk Ash (RHA). **Materialia**. Vol. 16, p. 101083. DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101083
- [46] Lecomte, I., Henrist, C., Liégeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., and Cloots, R. (2006). (Micro)-Structural Comparison Between Geopolymers, Alkali-Activated Slag Cement and Portland Cement. **Journal of the European Ceramic Society**. Vol. 26, Issue 16, pp. 3789-3797. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.021
- [47] Uchino, T., Sakka, T., Hotta, K., and Iwasaki, M. (1989). Attenuated Total Reflectance Fourier-Transform Infrared Spectra of a Hydrated Sodium Silicate Glass. **Journal of the American Ceramic Society**. Vol. 72, Issue 11, pp. 2173-2175. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1989.tb06051.x
- [48] Ben Messaoud, I., Hamdi, N., and Srasra, E. (2018). Physicochemical Characterization of Geopolymer Binders and Foams Made from Tunisian Clay. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol. 2018, DOI: 10.1155/2018/9392743
- [49] Mezni, M., Hamzaoui, A., Hamdi, N., and Srasra, E. (2011). Synthesis of Zeolites from the Low-Grade Tunisian Natural Illite by Two Different Methods. **Applied Clay Science**. Vol. 52, Issue 3, pp. 209-218. DOI: 10.1016/j.clay.2011.02.017

- [50] Jaramillo Nieves, L. J., Elyseu, F., Goulart, S., Pereira, M. D. S., Valvassori, E. Z., and Bernardin, A. M. (2021). Use of Fly and Bottom Ashes from a Thermoelectrical Plant in the Synthesis of Geopolymers: Evaluation of Reaction Efficiency. **Energy Geoscience**. Vol. 2, Issue 2, pp. 167-173. DOI: 10.1016/j.engeos.2020.09.004