

อิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์¹ ไพฑูรย์ นาแซง² ชัยชาญ ยวนะศิริ^{3*}

^{1,2,3*}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ขอนแก่น, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: chaichan.yu@neu.ac.th

รับต้นฉบับ: 30 พฤศจิกายน 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 28 มีนาคม 2569; ตอบรับบทความ: 1 เมษายน 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานสูง อย่างไรก็ตาม การบ่มด้วยความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเร่งกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยในอุณหภูมิแวดล้อมทั่วไป โดยใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงและเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุตั้งต้นหลักในอัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เท่ากับ 1.0 โดยน้ำหนัก ทดสอบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการไหลและระยะเวลาการก่อตัวลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน 75:25 โดยน้ำหนัก แสดงค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 44.3 เมกะปาสคาล การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเผยให้เห็นว่าแคลเซียมที่ละลายออกมาจากเปลือกหอยทำปฏิกิริยากับซิลิเกตและอะลูมินาเกิดเป็นแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตร่วมกับเจลจีโอพอลิเมอร์หลักส่งผลโครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้นและความแข็งแรงต่อแรงอัดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียดมีศักยภาพสูงในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ: กำลังอัด เถ้าลอย จีโอพอลิเมอร์เพสต์ เปลือกหอยนางรมบดละเอียด โครงสร้างจุลภาค

Influence of Ground Oyster Shell on Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Paste

Worawit Projan¹ Phaithun Nasaeng² Chaichan Yuwanasiri^{3*}

^{1,2,3*}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University, Khon Kaen, Thailand

*Corresponding author e-mail: chaichan.yu@neu.ac.th

Received: 30 November 2025; Revised: 28 March 2026; Accepted: 1 April 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

Geopolymer paste is one type of environmentally friendly binder material with outstanding mechanical properties and high durability. However, heat curing is necessary to accelerate the geopolymerization. This research aimed to study the influence of ground oyster shells on the properties of fly ash geopolymer paste at a normal ambient temperature. High-calcium fly ash and ground oyster shells were used as the main raw materials in the ratios of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100 by weight. The liquid-to-powder material ratio at 0.6 and the sodium silicate to 10 M sodium hydroxide ratio at 1.0 by weight were used. Geopolymer paste properties were tested, including flow value, setting time, compressive strength, and microstructure analysis. The experimental results found that the flow rate and setting time of the geopolymer paste decreased when the quantity of ground oyster shells increased. The 75:25 mixture of fly ash and ground oyster shells achieved the maximum compressive strength of 44.3 MPa at 28 days. Microstructural analysis revealed that calcium leached from the shell reacted with silicates and aluminates to form C-A-S-H alongside the main geopolymer gel, resulting in a denser microstructure and enhanced compressive strength. It was shown that geopolymer paste from fly ash mixed with ground oyster shells has high potential for producing environmentally friendly construction materials, with good compressive strength development under room temperature curing.

Keywords: Compressive strength, Fly ash, Geopolymer paste, Ground oyster shells, Microstructure

บทนำ

ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ถือเป็นวัสดุประสานหลักที่จำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างหลักส่วนใหญ่ล้วนเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานความร้อนสูงในกระบวนการเผาเม็ดปูนซึ่งไม่เพียงแต่ใช้เชื้อเพลิงจำนวนมาก แต่ปฏิกิริยาเคมีของการสลายตัวของหินปูนยังปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาโดยตรง ส่งผลให้อุตสาหกรรมซีเมนต์ถูกจัดเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญ โดยคาดว่าคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาทั้งหมดของโลก [1] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่เร่งให้เกิดภาวะโลกร้อน

เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติคล้ายกับซีเมนต์เพสต์แต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์จะได้มาจากการใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกตผสมกับสารละลายต่าง โดยเถ้าลอยถูกชะล้างด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตต่างสังเคราะห์ หลังจากนั้นจะเกิดส่วนผสมที่ซับซ้อนของซิลิเกตอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมซิลิเกต ในกระบวนการแข็งตัวเจลที่อุณหภูมิสูงจะจัดเรียงโครงสร้างใหม่และเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่เสถียร ซึ่งเชื่อมต่อกันเป็นสายอะลูมิเนียมซิลิเกตสามมิติที่ซับซ้อน [2] ในกรณีที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง แคลเซียมที่ละลายออกมาจะมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาร่วม โดยนอกจากจะเกิดเจลโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต (N-A-S-H gel) แล้ว ยังเกิดการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) หรือแคลเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H gel) แทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นร่วมกันนี้จะช่วยส่งเสริมให้วัสดุมีการก่อตัวที่รวดเร็วและมีกำลังอัดสูงขึ้น [3] อย่างไรก็ตามการผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดสูงในช่วงต้นจำเป็นต้องกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อเร่งการควบแน่นของจีโอพอลิเมอร์เจลที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส (°C) และใช้เวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง [4] การเติมวัสดุที่มีแคลเซียมสูงในระบบจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถส่งผลต่อพฤติกรรมของการก่อตัวและสมบัติเชิงกลได้ โดยไอออน Ca^{2+} ที่ละลายออกมาอาจเร่งกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและส่งเสริมการเกิดเจลชนิด C-S-H และ C-A-S-H ร่วมกับ N-A-S-H ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้นและกำลังอัดเพิ่มขึ้น [5] ในการศึกษาของ Nath and Sarker [6] ได้ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 40 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักสามารถผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดสูงกว่า 40 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Pangdaeng et al. [7] ที่พบว่าการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยสามารถเร่งการก่อตัวและปรับปรุงกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้เป็นอย่างดี

ขยะประเภทเปลือกหอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งอีกชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากเปลือกหอยที่ผ่านการเผาเพื่อกำจัดอินทรีย์สารและบดจนเป็นผงละเอียดพบว่ามีความเข้มข้นแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้ร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในสัดส่วนร้อยละ 5 ต่อ 95 สามารถผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังอัดได้มากกว่า 35 เมกะปาสคาล [8] จากผลการศึกษาของ Djobo et al. [9] พบว่าการใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าภูเขาไฟช่วยเร่งการก่อตัวของเพสต์ภายใต้อุณหภูมิห้องได้เป็นอย่างดี การแทนที่เถ้าภูเขาไฟด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในสัดส่วนร้อยละ 10 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าตัวอย่างควบคุมที่อายุทดสอบ 28 วัน อย่างไรก็ตาม หากเปลือกหอยนางรมบดละเอียดทำหน้าที่เพียงวัสดุเติมเต็มอาจทำให้ส่วนที่ทำหน้าที่สารเชื่อมประสานลดลง ด้วยเหตุนี้ การทำความเข้าใจบทบาทของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบวิธีวิจัยในงานนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอย่างเป็นระบบถึงอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนเถ้าลอยต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ โดยได้ออกแบบอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อเปลือกหอยนางรมบดละเอียดไว้ 5 ระดับ ได้แก่ อัตราส่วน 100:0 (ส่วนผสมควบคุม) 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 การศึกษาจะครอบคลุมการประเมินสมบัติทั้งในสภาวะที่ยังไม่แข็งตัว ได้แก่ ความสามารถในการไหลและเวลาการก่อตัว กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ตลอดจนการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเฟสเพื่อทำความเข้าใจกลไกและบทบาทของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย

ระเบียบวิธีวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

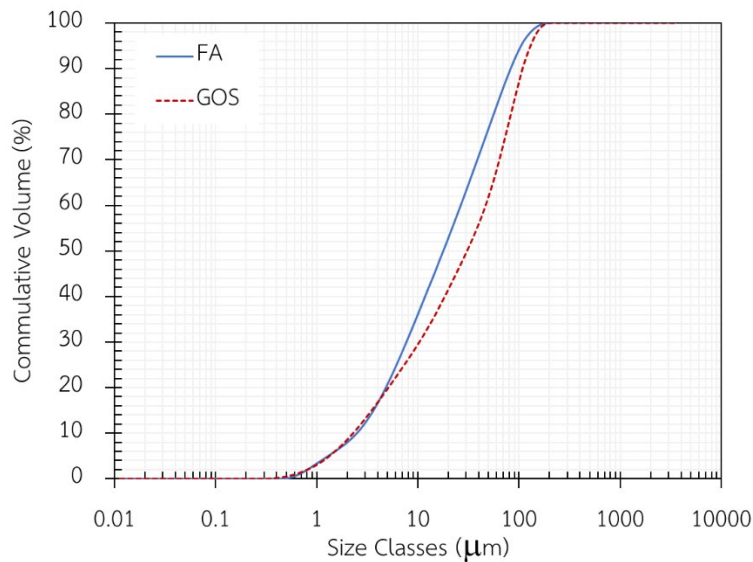
ในงานวิจัยนี้ ใช้เถ้าลอย (FA) และเปลือกหอยนางรมบดละเอียด (GOS) เป็นวัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกต เถ้าลอยได้จากการเผาลำไยหิน ลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง เปลือกหอยนางรมเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมประมงในพื้นที่จังหวัด ชลบุรี นำมาล้างทำความสะอาดและเผาในเตาไฟฟ้าเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 30 นาที เศษวัสดุที่เหลือจากการเผาถูกนำมาบดให้เป็นผงโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอลเหล็กจนมีขนาดผ่านตะแกรงเหล็กขนาดช่องเปิด 0.11 มิลลิเมตร ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและเปลือกหอยนางรมบดละเอียด พบว่าเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จัดเป็นเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [10] เนื่องจากมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 55.40 และมีปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1: องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกต

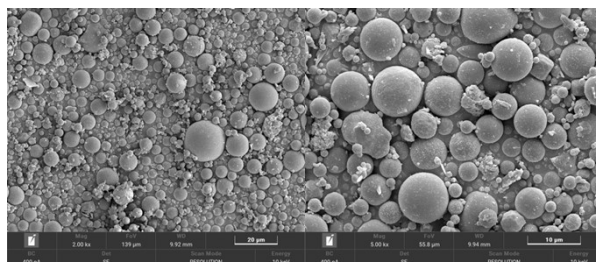
คุณสมบัติ	FA	GOS
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	27.50	9.00
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	25.50	85.50
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	14.30	0.90
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	13.60	0.80
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	6.33	0.80
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.47	1.40
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	2.04	0.60
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.85	0.30
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.33	0.10
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5)	0.32	0.10
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.72
ร้อยละค่าตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	25.00	24.70
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	2,719	5,293
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	20.17	30.40

สำหรับเปลือกหอยนางรมบดละเอียด พบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งตรวจพบในปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 โดยการกระจายตัวของอนุภาค ภาพถ่ายขยายกำลังสูง และรูปแบบวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแสดงดังรูปที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ จากภาพถ่ายขยายกำลังสูงพบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบดังรูปที่ 2(a) ในขณะที่เปลือกหอยนางรมบดละเอียดมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเนื่องจากถูกบดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอย เมื่อพิจารณารูปแบบโครงสร้างผลึกของเถ้าลอยพบว่า ลักษณะที่เด่นชัดที่สุดปรากฏแถบโค้งนูนกว้างในช่วงมุม 2θ ประมาณ 20 ถึง 35 องศา (°) บ่งชี้ว่าเถ้าลอยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก้วอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน สำหรับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดปรากฏฟีกที่แหลมคมของแคลไซต์ (calcite) จำนวนมากซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างที่เป็นผลึกสูง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นฟีกของควอตซ์ (quartz) ซึ่งอาจมาจากการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติของหอยนางรม การควบคุมความละเอียดของวัสดุผงตั้งต้นในงานวิจัยนี้ได้บดเปลือกหอยนางรมให้มีความละเอียดคล้ายคลึงกับเถ้าลอยโดยใช้ร้อยละค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เป็นค่าอ้างอิงเพื่อลดผลของการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาผลทดสอบความละเอียดของวัสดุโดยวิธีซีเอ็มผ่านของอากาศพบว่า เปลือกหอยนางรมบดละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยสูงกว่าเถ้าลอยแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเปลือกหอยนางรมบดละเอียดอาจมีรูพรุนสูง ซึ่งอาจเกิด

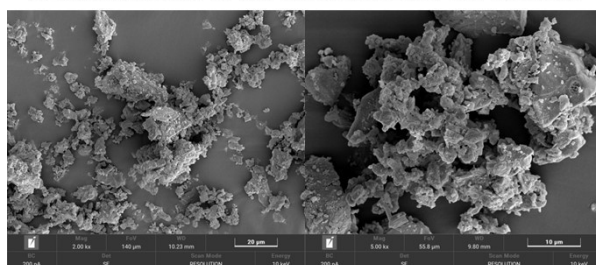
จากการจับตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2(b) สารละลายแอลคาไลใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เตรียมจากเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผสมกับน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 10 โมลาร์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกรดเชิงพาณิชย์ประกอบด้วยซิลิคอนออกไซด์ร้อยละ 30.24 โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 21.53 และน้ำร้อยละ 57.23 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 1: ภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผงอะลูมิเนียมซิลิเกต

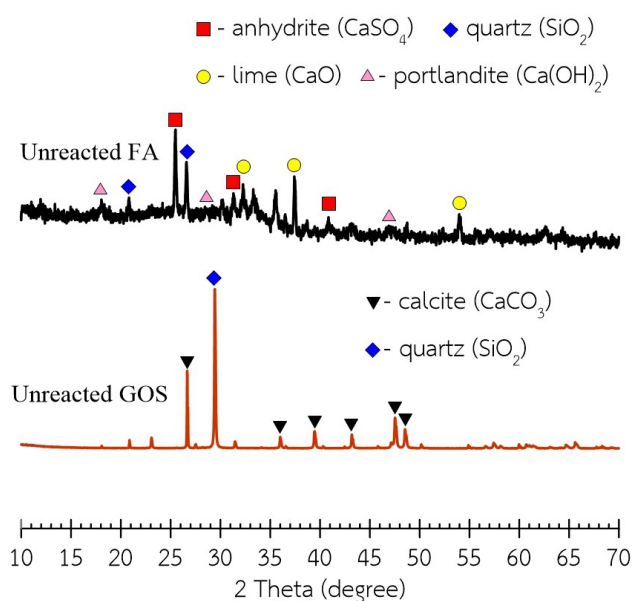


(a) ภาพถ่าย FESEM ของ FA ที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า



(b) ภาพถ่าย FESEM ของ GOS ที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า

รูปที่ 2: ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกต



รูปที่ 3: รูปแบบ XRD ของวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกต

2. การออกแบบส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อความสามารถในการไหล ระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เฟส โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก จากนั้นผสมเถ้าลอยร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก รวมทั้งหมด 5 สัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00 อัตราส่วนของสารละลายแอลคาไลต่อวัสดุสารตั้งต้นเท่ากับ 0.60 ในทุกอัตราส่วน และทำการบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

ตารางที่ 2: ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เฟสที่ใช้ละลายผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

อัตราส่วน FA:GOS	วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง (กรัม)				อัตราส่วนโมล	
	FA	GOS	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Si:Al	Ca:Si
100:0	100	-	30	30	4.34	0.75
75:25	75	25	30	30	4.95	1.36
50:50	50	50	30	30	6.10	2.18
25:75	25	75	30	30	9.06	3.33
0:100	-	100	30	30	34.07	5.07

3. การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เฟส

การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เฟสจะนำเกล็ดและเปลือกหอยนางรมเผาบดละเอียดตามสัดส่วนที่กำหนดเทลงในภาชนะแบบปิดแล้วทำการเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที นำวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องผสมขนาด 5 ลิตรแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมทำการผสมต่ออีก 5 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำจีโอพอลิเมอร์เฟสที่ได้เทลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ 5×5×5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20b [11] ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วห่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น เมื่อครบระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกและบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

4. วิธีการทดสอบ

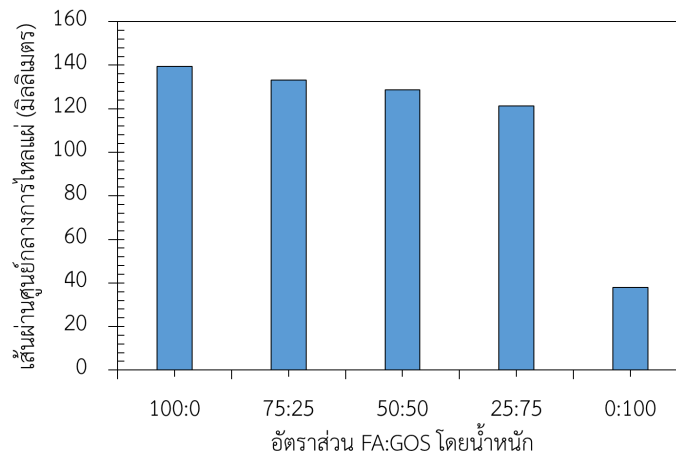
ทดสอบความสามารถในการไหลโดยใช้อุปกรณ์การไหลแผ่นขนาดเล็กและทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟส [12] ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเฟสโดยเพิ่มไคเควตามมาตรฐาน ASTM C191-19 [13] ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ด้วยเครื่องทดสอบเบรกประสมงค์ การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เฟส ได้แก่ การวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) รุ่น D8 ADVANCE บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy รุ่น Nicolet iS50 บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานและวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM/EDS) รุ่น Tescan Mira 4 ในการทดสอบใช้เศษชิ้นส่วนตัวอย่างเฟสที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ความสามารถในการไหล

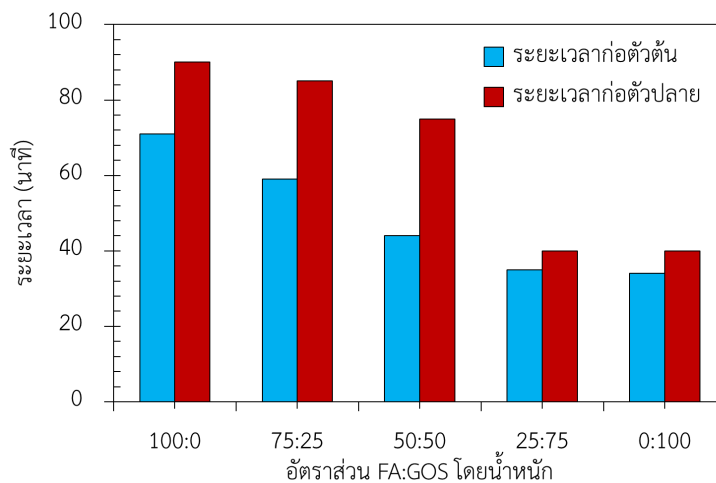
จากผลการทดสอบในรูปที่ 4 พบว่า ค่าการไหลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 139.4 มิลลิเมตร การแทนที่เกล็ดด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดร้อยละ 25 50 และ 75 โดยน้ำหนัก ค่าการไหลเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์เฟสลดลงร้อยละ 4.4, 7.7 และ 13.0 ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นเหลี่ยมเป็นมุมดังรูปที่ 2(b) ทำให้ความลื่นไหลลดลงตรงข้ามกับเกล็ดที่มีรูปร่างเป็นอนุภาคทรงกลมและพื้นผิวเรียบดังรูปที่ 2(a) ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวยึดกันช่วยเพิ่มค่าการไหลเฉลี่ยสุดท้ายของจีโอพอลิเมอร์ [14] นอกจากนี้ลักษณะของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเกล็ดบ่งบอกถึงลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนสอดคล้องกับภาพถ่ายขยายกำลังสูงทำให้มีความต้องการของเหลวไปเคลือบผิวมากกว่า จีโอพอลิเมอร์เฟส

จึงมีความสามารถทำงานได้ลดลง ในขณะที่การใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100) พบว่ามีการก่อตัวอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ



รูปที่ 4: ค่าการไหลผ่านขนาดเล็กของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

2. ระยะเวลาการก่อตัว

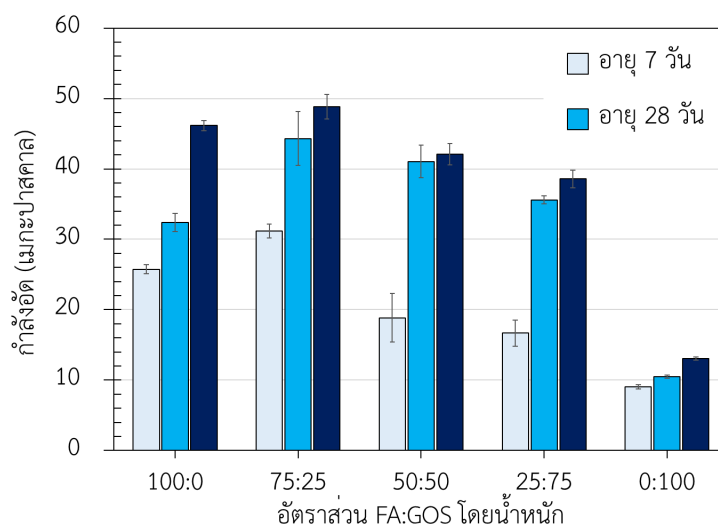


รูปที่ 5: ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

จากการศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า การแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ทั้งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวปลาย (final setting time) สั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) มีระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเท่ากับ 71 และ 90 นาที ตามลำดับ ในระบบจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมมากกว่าร้อยละ 18 หรือเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [10] ไอออนของแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อเริ่มแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่ร้อยละ 25 50 และ 75 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งสองลดลงอย่างต่อเนื่อง และในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100 มีระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นที่สุด โดยมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพียงประมาณ 34 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายที่ 40 นาที สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งค่อนข้างเสถียร แต่

ในของเหลวที่มีความเป็นด่างสูงแคลเซียมบางส่วนสามารถละลายออกมา (Ca^{2+}) และทำปฏิกิริยากับซิลิเกตได้อย่างรวดเร็ว เกิดเป็นเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของจีโอพอลิเมอร์เจลช่วยเร่งการก่อตัวได้ [9] ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของเถ้าลอยอย่างมาก ดังนั้น ในส่วนผสมแบบผสมผสาน (hybrid systems) ที่มีทั้งเถ้าลอยและเปลือกหอยนางรมบดละเอียดจึงเกิดปฏิกิริยาสองชนิดพร้อมกัน การตกตะกอนอย่างรวดเร็วของ C-S-H นี้เองที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการแข็งตัวทำให้เพสต์สูญเสียความสามารถในการไหลและเริ่มก่อตัวเร็วขึ้น สำหรับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100 ซึ่งไม่มีเถ้าลอยเกิดการก่อตัวที่รวดเร็วผิดปกติจึงสันนิษฐานได้ว่าไม่ใช่ผลลัพธ์จากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ แต่เป็นปฏิกิริยาหลักระหว่างแคลเซียมจากเปลือกหอยนางรมบดละเอียดกับซิลิเกตจากสารกระตุ้นโดยตรง ซึ่งยืนยันว่ากลไกของแคลเซียมนั้นส่งผลต่อการก่อตัวที่รวดเร็วอย่างยิ่ง สอดคล้องกับผลวิจัยของ Chindaprasit et al. [5] ที่ศึกษาพบว่าการเติมวัสดุที่อุดมไปด้วยแคลเซียมช่วยเร่งการก่อตัวของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม

3. กำลังอัด



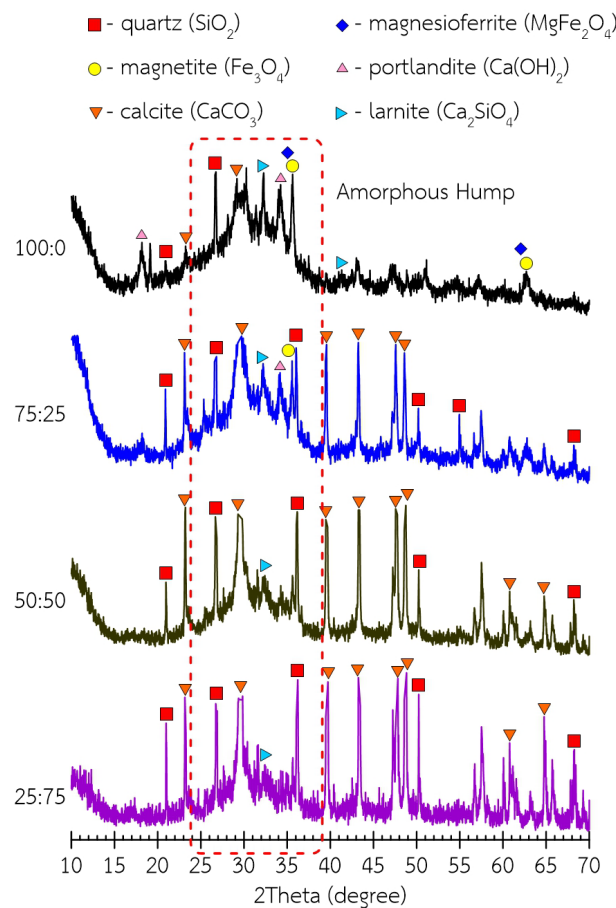
รูปที่ 6: กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลที่ซับซ้อนของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียด เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดตามอายุการบ่มพบว่า ในส่วนผสมที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75 ค่ากำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการสร้างโครงข่ายโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) ที่ให้กำลังยังคงดำเนินต่อไป แม้จะผ่านช่วงการบ่มเร่งในระยะแรกไปแล้ว เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดพบว่า อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 ให้กำลังอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุ โดยเฉพาะที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดสูงถึงประมาณ 44.3 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่มีกำลังอัดเท่ากับ 32.4 เมกะปาสคาล คิดเป็นเพิ่มขึ้นร้อยละ 37 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 อาจจะเกี่ยวข้องกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์เจลและสารประกอบไฮเดรชันซึ่งเป็นเจลลักษณะเดียวกับในปูนซีเมนต์ เจล C-S-H นี้จะแทรกสลับอยู่ร่วมกับเจล N-A-S-H กลายเป็นโครงข่ายแบบผสมผสานที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าการมีเจล N-A-S-H เพียงอย่างเดียวดังที่ Djobo et al. [9] ได้เคยศึกษาไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา เมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นร้อยละ 50 และ 75 พบว่ากำลังอัดเริ่มลดลงเมื่อเทียบกับจุดสูงสุดที่อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 แม้ว่าที่อายุ 28 และ 60 วัน กำลังอัดของทั้งสองอัตราส่วนผสมนี้จะยังคงสูงกว่าหรือเทียบเคียงได้กับตัวอย่างควบคุมก็ตาม การลดลงนี้อาจเกิดจากการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไป

ทำให้ปริมาณ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่มีอยู่ในเถ้าลอยซึ่งจำเป็นต่อการสร้างโครงข่าย N-A-S-H ลดลง แม้ผลกระทบเชิงบวกจาก C-S-H หรือ C-A-S-H จะยังคงอยู่ แต่ก็ไม่สามารถชดเชยการขาดหายไปของเจล N-A-S-H ที่เป็นตัวประสานหลักได้ สำหรับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100 กำลังอัดลดลงอย่างมาก และไม่มีการพัฒนากำลังอัดที่ชัดเจนระหว่าง 7 ถึง 60 วัน ผลลัพธ์นี้ยืนยันอย่างชัดเจนว่าการใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุผงตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ไม่สามารถทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ เนื่องจากปริมาณอะลูมิเนียมซิลิเกตที่จำเป็นไม่เพียงพอ โดยกำลังอัดเล็กน้อยที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับโซเดียมซิลิเกตซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงต่ำมาก หรืออาจเกิดจากการอัดแน่นตัวทางกายภาพเท่านั้น

4. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เฟส

4.1 รูปแบบ XRD: การทำปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและสารละลายแอลคาไลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแถบโค้งนูนกว้าง เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบ XRD ของเถ้าลอยในรูปที่ 3 ในช่วงมุม 2Theta ระหว่าง 20–35° กับรูปแบบ XRD ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เฟสควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) ดังแสดงในรูปที่ 7

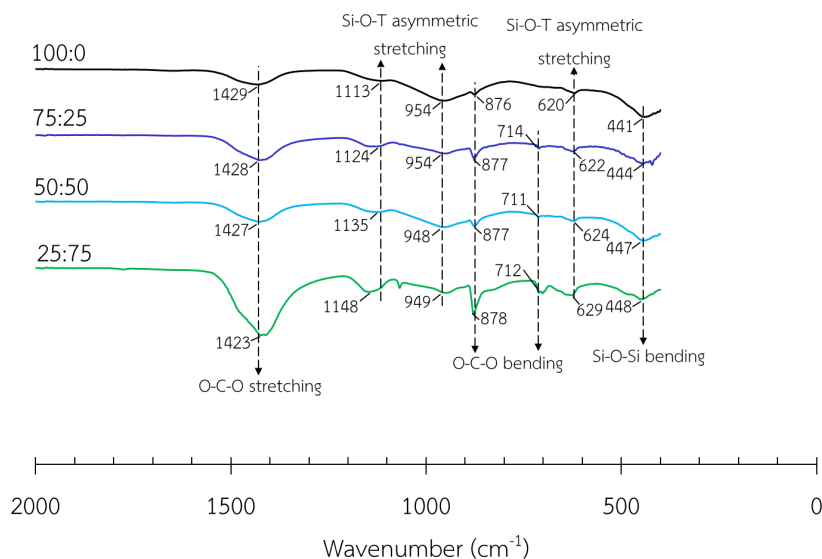


รูปที่ 7: ผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75

โดยเมื่อแก้วอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาได้ถูกละลายและทำปฏิกิริยาทำให้แถบโค้งนูนนั้นได้เลื่อนไปทางมุม 2Theta ที่สูงขึ้นเล็กน้อย [15] ประมาณ 25–38° ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดเจลจีโอพอลิเมอร์ (geopolymer gel) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ทำให้กำลังอัด เมื่อพิจารณาเฟสผลึกที่หายไปจากการทำปฏิกิริยาพบว่า เฟสของแอนไฮไดรต์ (anhydrite; CaSO_4) และไลม์ (lime; CaO) ไม่ปรากฏในรูปแบบ XRD ของจีโอพอลิเมอร์เฟส สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าแหล่งแคลเซียมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาในเถ้าลอยได้ถูกละลายโดยสารละลายแอลคาไลและเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาดังกล่าว และคาดว่าจะทำให้เกิดเจลไฮบริด C-A-S-H และ N-A-S-H [3] ซึ่งมีคุณสมบัติร่วมของ

ผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนและจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม ยังคงมีเฟสผลึกที่เนื้อเยื่อของควอตซ์ และแร่เหล็กแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) หรือ magnesioferrite (MgFe_2O_4) ที่ปรากฏอยู่ สิ่งนี้ยืนยันว่า ควอตซ์และแร่เหล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็มในโครงสร้างจุลภาคและไม่ได้มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังปรากฏพิคของแคลไซต์ในตัวอย่างควบคุมแต่ไม่ปรากฏในรูปแบบ XRD ของเถ้าลอย มีงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า คาร์บอนที่เพิ่มขึ้นใหม่เป็นผลของปฏิกิริยาคาร์บอนชัน (carbonation) โดยปอร์ตแลนด์ไดต์ (portlandite; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทั้งที่มีอยู่เดิมหรือที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างกระบวนการ จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ [16] ผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคแบบคอมโพสิต (composite microstructure) โดยมีส่วนของเฟสผลึกที่เนื้อเยื่อและเจลไฮบริดอสัณฐานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในรูปแบบ XRD ของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 ปรากฏพิคของแคลไซต์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาน้อยมากโดยมีพิคสูงสุดที่มุม 29.4° และมีพิคย่อยที่ตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งมาจากเปลือกหอยที่เติมเข้าไป พิคที่สูงเป็นอันดับสองคือที่มุม 26.7° ซึ่งเป็นควอตซ์ที่มาจากทั้งเถ้าลอยและส่วนที่ปนเปื้อนในเปลือกหอย เมื่อพิจารณาเฟสอสัณฐานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพบว่า จะแสดงลักษณะเนินกว้าง (broad amorphous hump) ในช่วงมุม 2θ ประมาณมุม $25-38^\circ$ (บริเวณขอบเขตเส้นประ) เรายังคงเห็นแถบคิงนูนของเจลไฮบริด C-A-S-H และ N-A-S-H ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานหลัก อย่างไรก็ตาม การใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากในรูปแบบ XRD ของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 50:50 และ 25:75 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 จะสังเกตเห็นพิคของผลึกแคลไซต์สูงเด่นจนไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนที่เป็นเจลไฮบริดอสัณฐานที่มีอยู่ได้แสดงให้เห็นว่าส่วนที่เป็นวัสดุเติมเต็มมีปริมาณเพิ่มขึ้นและส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมีปริมาณลดลง โดยผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 50:50 และ 25:75 ที่มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25

4.2 สเปกตรัม FTIR: ลักษณะสเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของจีโอพอลิเมอร์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75 ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 8

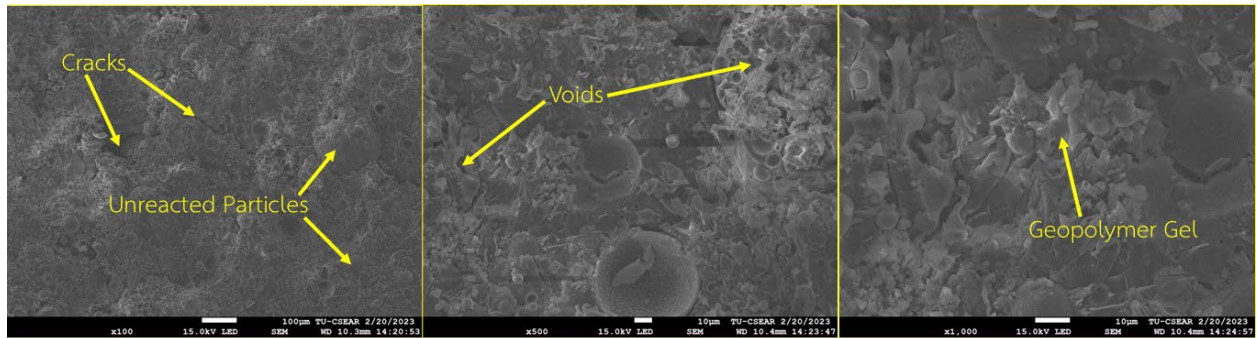


รูปที่ 8: สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75

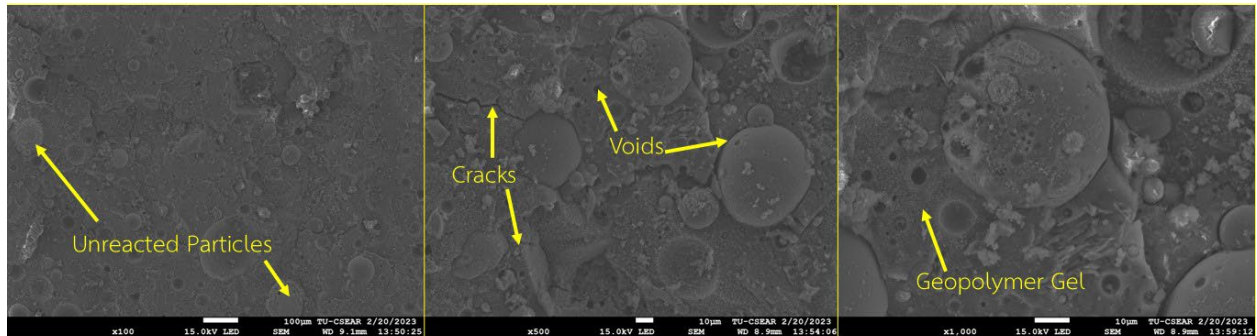
พบว่า ทุกตัวอย่างปรากฏแถบการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น $1410-1480\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ O-C-O stretching และที่ตำแหน่งใกล้เคียงคลื่น 875 cm^{-1} และเลขคลื่นในช่วง $711-714\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ O-C-O bending แสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) [17] ในตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) แถบนี้ปรากฏด้วยความเข้มต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนชันตามธรรมชาติระหว่างสารละลายแอลคาไลส่วนเกินกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ สำหรับตัวอย่างที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยความเข้มของพิคในช่วงนี้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณเปลือกหอยที่เพิ่มขึ้น โดยในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ

25:75 แลบบคาร์บอนเนตได้กลายเป็นแถบหลักที่สังเกตได้ชัดเจนที่สุดในสเปกตรัม FTIR ซึ่งยืนยันว่าโครงสร้างหลักของวัสดุได้เปลี่ยนสภาพจากการเป็นเมทริกซ์อีพอกซีโพลีเมอร์ไปเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณแคลไซต์สูง ในช่วงเลขคลื่น $950\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของการสั่นแบบยืดตัวไม่สมมาตรของพันธะ Si-O-T (โดยที่ T คือ Si หรือ Al) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้หลักของการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซีโพลีเมอไรเซชัน [18] ในตัวอย่างควบคุมปรากฏพีกที่มีความเข้มสูงและกว้างโดยมีจุดยอดที่ตำแหน่งคลื่น 954 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการละลายของเฟสแก้วอะลูมิเนียมซิลิเกตในแอลลอยและการก่อตัวใหม่เป็นโครงข่ายเจล N-A-S-H ที่สมบูรณ์ การแทนที่แอลลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 แลบบพันธะ Si-O-T ยังคงปรากฏชัดเจน แต่มีการเลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง จากผลวิจัยของ García-Lodeiro et al. [19] พบว่า มีแคลเซียมเข้าไปอยู่ในระบบจะทำให้โครงสร้างพันธะเปลี่ยนไป โดยแลบบ Si-O-T จะเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง อาจจะบ่งชี้ถึงการรวมตัวของไอออนแคลเซียมเข้าสู่โครงข่ายเจลเกิดเป็นเจลไฮบริด ซึ่งการเกิดขึ้นร่วมกันของเจลอีพอกซีโพลีเมอร์และเจลแคลเซียม ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีก FTIR และช่วยเสริมกำลังอัดให้สูงขึ้น [20] อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้นความเข้มของแลบบ Si-O-T ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 25:75 แลบบนี้ได้ลดลงอย่างชัดเจน อาจเกิดจากการลดลงของสารเชื่อมประสาน เนื่องจากปริมาณแอลลอยไม่เพียงพอที่จะสร้างเจลเพื่อยึดเกาะอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาจำนวนมากได้ ในช่วงเลขคลื่นประมาณ $440\text{--}470\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ Si-O-Si Bending [21] เกิดจากแร่ควอตซ์ที่ไม่ละลายและยังคงค้างอยู่ในเนื้อวัสดุของทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบ XRD

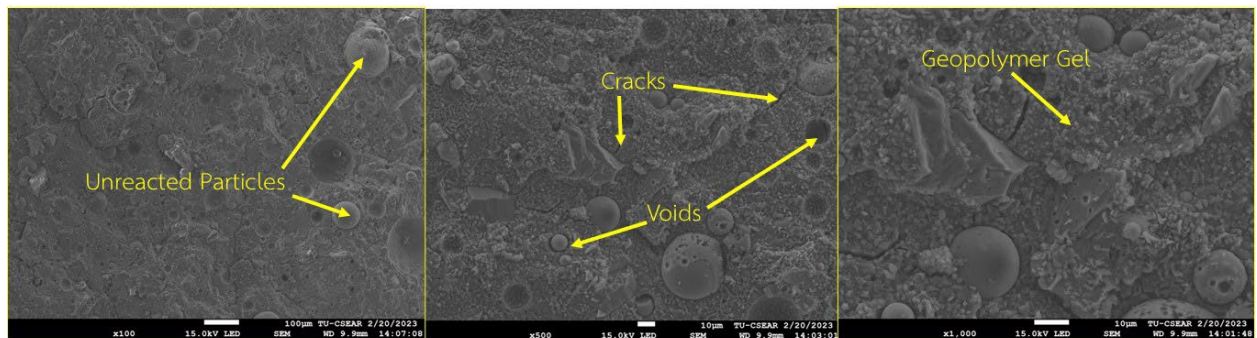
4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด FE-SEM: ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพอกซีโพลีเมอร์เฟสแสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) มีลักษณะโครงสร้างที่มีความหลากหลาย โดยพบอนุภาคแอลลอยทรงกลมกระจายตัวอย่างหนาแน่น ซึ่งมีทั้งส่วนที่ผิวเรียบเนียนเนื่องจากยังไม่เกิดปฏิกิริยา และส่วนที่มีร่องรอยการชะละลายจากการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างดังแสดงในรูปที่ 9(a) อนุภาคทรงกลมเหล่านี้ถูกเชื่อมประสานด้วยเจลอีพอกซีโพลีเมอร์ที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การบ่มที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้กระบวนการละลายเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้ยังคงเหลืออนุภาคแอลลอยเดิมทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็กและรูพรุนบางส่วนแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาค ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 แสดงในรูปที่ 9(b) พบว่า โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นสูงซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างชัดเจน อาจจะเกิดจากแคลเซียมที่ละลายออกมาจากเปลือกหอยนางรมบดละเอียดช่วยเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัว และสร้างเจลไฮบริดที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นทำหน้าที่ห่อหุ้มและยึดเกาะอนุภาคไม่ทำให้ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วนไว้ด้วยกัน ผลจากการทำงานของสองส่วนนี้ออนุภาคแคลไซต์ขนาดเล็กจากเปลือกหอยอาจจะเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่างอนุภาคแอลลอยที่ใหญ่กว่าทำให้โครงสร้างจุลภาคโดยรวมมีความหนาแน่นสูงขึ้น ทำให้ภาพรวมของเนื้อวัสดุมีความต่อเนื่องกันดีส่งผลให้มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงที่สุด รูปที่ 9(c) แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 50:50 พบการกระจายตัวของอนุภาคเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคแอลลอยทรงกลม โดยโครงสร้างเจลอีพอกซีโพลีเมอร์มีลักษณะหลวมกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 มีช่องว่างระหว่างอนุภาคให้เห็นชัด สำหรับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 25:75 โครงสร้างเจลอีพอกซีโพลีเมอร์มีลักษณะหลวมมากขึ้นและมีพื้นผิวขรุขระเกิดจากอนุภาคเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 9(d) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ที่ตรวจพบเฟสผลึกเด่นชัดกว่าเฟสอสัณฐาน และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FTIR ที่ตรวจพบการแทรกตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต



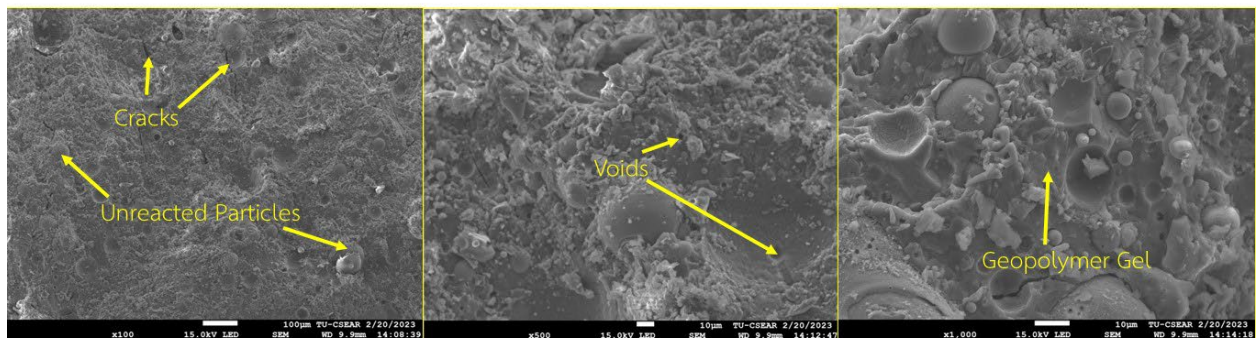
(a) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 100:0 ที่กำลังขยาย 100 500 และ 1,000 เท่า



(b) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 75:25 ที่กำลังขยาย 100 500 และ 1,000 เท่า



(c) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 50:50 ที่กำลังขยาย 100 500 และ 1,000 เท่า



(d) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 25:75 ที่กำลังขยาย 100 500 และ 1,000 เท่า

รูปที่ 9: ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของถ้ำลอยจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่อายุ 28 วัน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ธาตุประกอบหลักในเมทริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และแคลเซียม (Ca) โดยที่ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของออกไซด์ทุกชนิดและคาร์บอนบ่งชี้ถึงความเป็นสารประกอบคาร์บอนเนตสำหรับ Na Al Si และ Ca ซึ่งอธิบายถึงการตกตะกอนร่วมกันของสารผลิตภัณฑ์ N-A-S-H และ C-A-S-H เจลที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ [22] เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการแทนที่ถ้ำลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดแสดงให้เห็นถึงการ

เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณธาตุ Si และ Al ที่ตรวจพบมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้น สิ่งนี้ทำให้ค่าอัตราส่วน Ca:Si และ Si:Al เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Chindaprasirt et al. [23] และ Detphan & Chindaprasirt [24] พบว่า เมื่ออัตราส่วน Si:Al เพิ่มขึ้นจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน Ca:Si ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าอัตราส่วน Si:Al เท่ากับ 2.70 คืออัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงสุด อาจเป็นไปได้ว่าอัตราส่วน Ca:Si และ Si:Al ที่สูงช่วยกระตุ้นการก่อตัวของสารประกอบที่มีแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนประกอบหลักในเมทริกซ์เพสต์แบบไฮบริด ซึ่งเติมรูพรุนและช่องว่างเล็ก ๆ และมีส่วนสำคัญต่อความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น [25]

ตารางที่ 3: อัตราส่วนอะตอมของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วน FA:GOS	ร้อยละโดยอะตอม										อัตราส่วนอะตอม	
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ca:Si	Si:Al
100:0	12.17	58.85	9.51	0.70	2.87	7.40	1.69	0.38	4.81	1.62	0.65	2.58
75:25	13.90	57.29	13.38	0.37	1.69	4.56	2.08	0.34	4.97	1.41	1.09	2.70
50:50	16.09	57.24	13.64	0.30	0.97	3.99	2.74	0.18	4.31	0.56	1.08	4.11
25:75	10.16	60.17	11.13	0.61	2.78	6.72	2.55	0.42	4.04	1.42	0.60	2.42

สรุปผล

จากการศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากถั่วลันเตาภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การแทนที่ถั่วลันเตาด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมที่ไวต่อปฏิกิริยาช่วยเร่งกระบวนการไฮเดรชันและการแข็งตัว นอกจากนี้ ความสามารถในการไหลของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคเปลือกหอยที่มีความเป็นเหลี่ยมมุม รวมถึงความต้องการน้ำที่สูงขึ้น

2. อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ถั่วลันเตาร้อยละ 75 ผสมร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดร้อยละ 25 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 44.3 เมกะปาสคาล โดยมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 37 การปรับปรุงกำลังอัดนี้เกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างถั่วลันเตาและเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

3. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคยืนยันกลไกการเสริมแรงในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 โดยแคลเซียมที่ละลายออกจากเปลือกหอยเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิเกตและอะลูมิเนต เกิดเป็นเจล C-A-S-H ร่วมกับ N-A-S-H โดยการเลื่อนตำแหน่งของแถบพันธะ Si-O-T ใน FTIR และผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS ที่พบองค์ประกอบของ Ca Si และ Al อยู่ร่วมกันในปริมาณสูงช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของเนื้อเจลเชื่อมประสาน

4. การแทนที่ถั่วลันเตาด้วยเปลือกหอยนางรมในปริมาณที่สูงเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณถั่วลันเตาซึ่งเป็นแหล่งของซิลิกาและอะลูมินาไม่เพียงพอที่จะสร้างเจลเพื่อยึดเกาะอนุภาคฟิลเลอร์จำนวนมากได้ ทำให้โครงสร้างเจลขาดความต่อเนื่องและมีลักษณะหลวมเพิ่มขึ้น

5. การใช้อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 มีศักยภาพสูงในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถพัฒนา กำลังอัดได้ดีภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ต้องพึ่งพาการบ่มด้วยความร้อน ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบ

REFERENCES

- [1] M. Hanifa, R. Agarwal, U. Sharma, P. C. Thapliyal, and L. P. Singh, "A review on CO₂ capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies," *J. CO₂ Utilization*, vol. 67, 2023, Art. no. 102292, doi: 10.1016/j.jcou.2022.102292.
- [2] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [3] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, pp. 4876–4883, 2012, doi: 10.1007/s10853-012-6353-y.
- [4] P. Zhang, Y. Zheng, K. Wang, and J. Zhang, "A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar," *Composites Part B: Eng.*, vol. 152, pp. 79–95, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.031.
- [5] P. Chindaprasirt, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, S. Horpibulsuk, A. Poowancum, and B. Injorhor, "Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 9, 2018, Art. no. e00198, doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00198.
- [6] P. Nath and P. K. Sarker, "Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 1, 2017, Art. no. 32, doi: 10.1617/s11527-016-0893-6.
- [7] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive," *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 269–274, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.018.
- [8] B. Yang and J. G. Jang, "Environmentally benign production of one-part alkali-activated slag with calcined oyster shell as an activator," *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, 2020, Art. no. 119552, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119552.
- [9] Y. J. N. Djobo, A. Elimbi, J. Dika Manga, and I. B. Djon Li Ndjock, "Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanic ash-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 673–681, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.104.
- [10] *Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-23e1, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://store.astm.org/c0618-23e01.html>
- [11] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M-20b, Mar. 2020. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0109_c0109m-20.html
- [12] C. Namchiengtai, P. Nasaeng, and V. Sata, "Effect of ground pumice on the properties of fly ash geopolymer paste," (in Thai), *Thai Sci. Technol. J.*, vol. 33, no. 1, pp. 87–105, 2025.
- [13] *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-19, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://store.astm.org/c0191-19.html>
- [14] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, S. Hatanaka, and T. Cao, "High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 264–270, 2011, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000161.
- [15] U. Rattanasak, K. Pankhet, and P. Chindaprasirt, "Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 18, pp. 364–369, 2011, doi: 10.1007/s12613-011-0448-3.
- [16] E. Ruiz-Agudo, K. Kudłacz, C. V. Putnis, A. Putnis, and C. Rodriguez-Navarro, "Dissolution and carbonation of portlandite [Ca(OH)₂] single crystals," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 19, pp. 11342–11349, 2013, doi: 10.1021/es402061c.
- [17] Z. H. Cheng, A. Yasukawa, K. Kandori, and T. Ishikawa, "FTIR study on incorporation of CO₂ into calcium hydroxyapatite," *J. Chem. Soc. - Faraday Trans.*, vol. 94, pp. 1501–1505, 1998, doi: 10.1039/a708581h.

- [18] W. K. W. Lee and J. S. J. van Deventer, "Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions," *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 211, no. 1, pp. 49–66, 2002, doi: 10.1016/S0927-7757(02)00237-6.
- [19] I. García-Lodeiro, A. Fernández-Jiménez, M. T. Blanco, and A. Palomo, "FTIR study of the sol–gel synthesis of cementitious gels: C–S–H and N–A–S–H," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 63–72, 2008, doi: 10.1007/s10971-007-1643-6.
- [20] C. K. Yip, G. C. Lukey, and J. S. J. Van Deventer, "The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 9, pp. 1688–1697, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.042.
- [21] W. K. W. Lee and J. S. J. Van Deventer, "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers," *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 211, no. 2–3, pp. 115–126, 2002, doi: 10.1016/S0927-7757(02)00239-X.
- [22] O. Mahmoodi, H. Siad, M. Lachemi, and M. Sahmaran, "Synthesis and optimization of binary systems of brick and concrete wastes geopolymers at ambient environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 276, 2021, Art. no. 122217, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122217.
- [23] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 539–543, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.023.
- [24] S. Detphan and P. Chindapasirt, "Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 720–726, 2009, doi: 10.1016/S1674-4799(10)60019-2.
- [25] W. Punurai, W. Kroehong, A. Saptamongkol, and P. Chindapasirt, "Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 62–70, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115.