

ผลกระทบของหินพัมมิสบดละเอียดต่อคุณสมบัติของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย

Effect of Ground Pumice on the Properties of Fly Ash Geopolymer Paste

เฉลิมศักดิ์ นามเชียงใต้¹, ไพฑูรย์ นาแซง^{1*}, วันชัย สะตะ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น 40000

²ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40000

Chalerm Sak Namchiengtai¹, Phaithun Nasaeng^{1*}, Vanchai Sata²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University, Khon Kaen 40000

²Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Faculty of Engineering,
Khon Kaen University, Khon Kaen 40000

Received 18 March 2024; Received in revised 23 July 2024; Accepted 7 August 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของหินพัมมิสบดละเอียดต่อค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย วัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตหลักใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในพื้นที่ประเทศไทย วัสดุทดแทนใช้หินพัมมิสบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลน์ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ออกแบบสัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุผงตั้งต้นและสัดส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตของทุกสัดส่วนผสมเท่ากับ 0.60 และ 1.00 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียดทำให้ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลงในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยมีค่าลดลงเมื่อปริมาณหินพัมมิสบดละเอียดเพิ่มขึ้น ผลทดสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียดส่งผลเสียต่อปฏิกิริยาในช่วงอายุต้นทำให้เกิดอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาจำนวนมากและโครงสร้างจุลภาคไม่แข็งแรง อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และบ่มที่อุณหภูมิห้องทั่วไปจะทำให้ได้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 70 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์เพสต์; เถ้าลอย; หินพัมมิสบดละเอียด; กำลังรับแรงอัด; โครงสร้างจุลภาค

*ผู้รับผิดชอบบทความ: phaithun.nas@neu.ac.th

doi: 10.14456/tstj.2025.7

Abstract

This research aimed to investigate the effect of ground pumice (GPM) on flow value, setting time, compressive strength, and microstructure of fly ash geopolymer paste. The primary aluminosilicate material used was fly ash (FA) sourced from the thermal power plants in Thailand. Ground pumice was incorporated as a partial replacement for fly ash at replacement levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% by weight. A 10 M sodium hydroxide solution and sodium silicate solution were used as the alkali solution. The alkali solution-to-powder material ratio and sodium hydroxide solution-to-sodium silicate solution ratio of all the mixes were designed at 0.60 and 1.00 by weight, respectively. The result showed that increasing the replacement of FA with GPM reduced the flow value of the geopolymer paste while prolonging the setting time. The compressive strength of the FA geopolymer paste decreased as the GPM content increased. Microstructure analysis revealed that replacing FA with GPM negatively impacted the reaction at an initial age, resulting in a large number of unreacted particles and a weak microstructure. However, when 50% of FA was replaced with GPM and the paste was cured at room temperature, the geopolymer paste achieved a compressive strength exceeding 70 MPa at 90 days of age.

Keywords: Geopolymer paste; Fly ash; Ground pumice; Compressive strength; Microstructure

1. บทนำ

เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการนำเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าไปชะละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการทำปฏิกิริยาออลอนซิลิกา ($\text{Si}4^+$) และอะลูมินา (Al^{3+}) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยถูกชะออกมากลายเป็นจีโอโพลิเมอร์เจลที่มีความหนาแน่น [1] เมื่อเกิดปฏิกิริยาถูกโซจะเกิดควบแน่นและเชื่อมโยงกันเกิดเป็นสายโซ่อะลูมิโนซิลิเกตสามมิติที่มีความซับซ้อน [2] โดยทั่วไปปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจะทำให้เกิดสารโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) ในระบบของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงจะเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ทำให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว [3] นอกจากนี้แคลเซียมที่มาจากวัสดุผงตั้งต้นยังทำให้เกิดแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (C-(A)-S-H) แคลเซียมบางส่วนจะไปแทนที่โซเดียมในเจล N-A-S-H ทำให้เกิดเจลไฮบริดโซเดียมแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-C-A-S-H) ซึ่งส่งผลให้มีระดับการเชื่อมโยงของสายโซ่อะลูมิโนซิลิเกตที่สูงขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงเริ่มต้นที่ดีโดยไม่จำเป็นต้องบ่มที่อุณหภูมิสูง [4]

คุณสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาผลของขนาดอนุภาคอิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณสารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลักษณะการบ่มและอุณหภูมิที่ใช้บ่มตัวอย่าง ผลวิจัยของ Assi และคณะ [5] แสดงให้เห็นว่าลักษณะของจีโอโพลิเมอร์เจลและคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าช่วยให้โครงสร้างเจลแน่นมีสัดส่วนรูพรุนที่น้ำซึมผ่านได้ลดลงและทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสอดคล้องกับผลวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [6] ที่ศึกษาพบว่าสารละลายอัลคาไลน์สามารถปฏิกิริยากับ

เถ้าลอยที่มีอนุภาคขนาดเล็กได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังช่วยให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีการหดตัวแห้งลดลง ผลวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย Hardjito และคณะ [7] พบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้จีโอโพลิเมอร์ก่อตัวเร็วขึ้นและมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการชะละลายวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตที่ดีกว่า สอดคล้องกับผลวิจัยของ Rattanasak และ Chindaprasirt [1] ที่ศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 15 โมลาร์ และใช้สัดส่วนปริมาณสารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 โดยน้ำหนักในการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยทำให้ตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมอื่นๆ ใดๆก็ตามเมื่อคำนึงถึงความประหยัดและความสะดวกในการผสมและเทเข้าแบบควรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 10 โมลาร์ และทำการผสมในระยะเวลาประมาณ 10 นาที สำหรับผลกระทบของวิธีการบ่มต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากการรวบรวมวรรณกรรมที่ปรากฏในบทความของ [8] มีผลวิจัยไปในทำนองเดียวกันคือการทำจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงในช่วงต้นจำเป็นต้องกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อเร่งการควบแน่นของจีโอโพลิเมอร์เจลที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง

การใช้วัสดุอะลูมิโนซิลิเกตชนิดอื่น ๆ ผสมกับเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุผงตั้งต้นสำหรับผลิตจีโอโพลิเมอร์กำลังเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากวิธีการนี้สามารถเพิ่มแนวทางการผลิตและวัสดุทางเลือกสำหรับการสังเคราะห์สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานสูงได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมทั่วไปและการบ่มตัวอย่างด้วยความร้อน ในงานวิจัยของ Nath & Sarker [9] ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยบางส่วนต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ผลวิจัยพบว่า เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีการก่อตัวเร็วขึ้นเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย

ด้วยปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับของเหลวอัลคาไลน์จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ที่เป็นออสซิลอนในจีโอโพลิเมอร์เจล โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และบ่มในอุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 50 เมกะปาสกาล อย่างไรก็ตามวัสดุวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตบางชนิดเมื่อใช้แทนที่เถ้าลอยบางส่วนอาจทำให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ยกตัวอย่างผลวิจัยของ Song และคณะ [10] แสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกั่วที่ไดจากการผลิตเหล็กจะทำให้จีโอโพลิเมอร์ก่อตัวช้าและมีค่าการไหลแผ่ลดลง เมื่อแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงเกินไปส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงเนื่องจากภายในจีโอโพลิเมอร์เจลเกิดรูพรุนและมีโพรงอากาศมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของการใช้วัสดุร่วมแต่ละชนิดซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม

หินพัมมิสเป็นมวลรวมธรรมชาติชนิดหนึ่งเกิดจากลาวาร้อนที่พ่นขึ้นไปในอากาศแล้วเย็นตัวอย่างรวดเร็วในพื้นที่ของประเทศไทยพบมากในจังหวัดลพบุรี ลักษณะเด่นของหินพัมมิส คือ มีน้ำหนักเบาเนื่องจากโครงสร้างภายในมีรูพรุนสูงจึงมีการนำมาใช้เป็นมวลรวมในผลิตภัณฑ์มวลเบา โดยเมื่อบดละเอียดจนเป็นผงพบว่าหินพัมมิสมีคุณสมบัติคล้ายกับสารปอซโซลานจากธรรมชาติและทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตได้ จากผลวิจัยของ Gencel [11] พบว่าหินพัมมิสเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเป็นจุดเด่นที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุผงตั้งต้นหรือใช้เป็นวัสดุผสมรวมสำหรับผลิตสารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียดต่อค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยผล

การวิจัยที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังส่งเสริมความยั่งยืนของการใช้วัสดุและเพิ่มวัสดุทางเลือกในการนำไปประยุกต์ใช้ให้มีความเหมาะสมในงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ อีกด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง หินพัมมิสที่มีขายในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร นำมาบดให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย โดยใช้เครื่องบดแบบตกรูกรอบ ทำการการบดหินพัมมิสด้วยลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 - 4 นิ้ว เป็นเวลา 10 นาที แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และทำการบดต่ออีก 10 นาที ด้วยลูกปืนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 - 8 มิลลิเมตร จากนั้นทำการร่อนผ่านแผ่นกรองสแตนเลสขนาด 0.060 มิลลิเมตร (Wire mesh 150) สุ่มทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 45 ไมโครเมตร เพื่อตรวจสอบความละเอียดโดยเฉลี่ยของหินพัมมิสเทียบกับเถ้าลอย ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียด (GPM) แสดงดัง Table 1 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียดแสดงดัง Figure 1 สารละลายอัลคาไลน์ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดคุณภาพระดับห้องปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นร้อยละ 98 ปรับลดความเข้มข้นโดยการละลายด้วยน้ำกลั่นให้เหลือความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ใช้ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตระดับห้องปฏิบัติการที่มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 30.24 โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 12.53 และน้ำร้อยละ 57.23 โดยน้ำหนัก

Table 1 The physical properties of FA and GPM

Properties	FA	GPM
Specific density (g/cm ³)	2.62	2.32
Retained on a 45-micron sieve by weight (%)	25.0	25.0
Blaine fineness (cm ² /g)	2,719	4,230
Median particle sizes (micron)	20.17	16.3

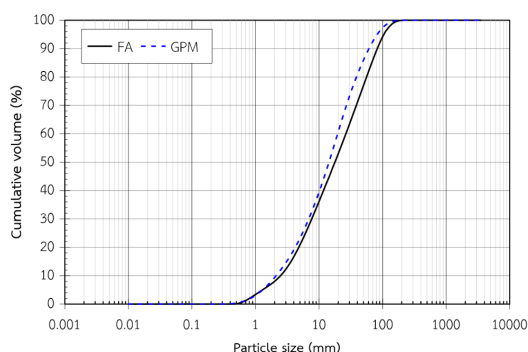


Figure 1 Particle size distribution of FA and GPM

2.2 การออกแบบส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การศึกษานี้ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผงตั้งต้นหลักสำหรับผลิตจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ จากนั้นใช้หินพัมมิสบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก สัดส่วนผสมทั้งหมดแสดงใน Table 2 โดยตัวเลขหน้าเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียดหมายถึงร้อยละการใช้งาน ตัวอย่างเช่น 100% FA แสดงถึงจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว และ 50% GPM แสดงถึงจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ที่ผลิตจากการแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุผงตั้งต้นเท่ากับ 0.60 ในทุกสัดส่วนผสม ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างนำเถ้าลอย

และหินพัมมิสบดละเอียดตามอัตราส่วนที่กำหนด เเทลงในภาชนะแบบปิดแล้วทำการเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที นำวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องผสมมอร์ตาร์แล้วเติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมมอร์ตาร์เป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลาย Na_2SiO_3 ลงในส่วนผสมทำการผสมต่ออีก 5 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดแบ่งจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเพื่อทดสอบค่าการไหลแผ่และระยะเวลาก่อตัวในอุณหภูมิห้องทั่วไปและอีกหนึ่งส่วนเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดในสภาพที่แข็งตัวแล้ว ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เฟสต์จะถูกเทลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วห่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น ปล่อยให้ตัวอย่างก่อตัวในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 48 ชั่วโมง รวมทั้งหมด 5 สัดส่วนผสม (กำหนดสัญลักษณ์ -T) และเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากสภาวะการบ่มปกติในสภาพแวดล้อมทั่วไป ทำการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ทั้งหมด 2 สัดส่วนผสม (กำหนดสัญลักษณ์ -AT) ได้แก่ สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผงตั้งต้นเพียงชนิดเดียว และสัดส่วนผสมที่ใช้หินพัมมิสบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

Table 2 Mix proportions

Mix names	Powder materials (g.)		Alkali solutions (g.)		Mole ratios		Curing methods
	FA	GPM	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Si/Al	Ca/Si	
100% FA-T	1,000	-	300	300	4.34	0.75	Temperature curing in oven at 60 °C for 48 h.
25% GPM-T	750	250	300	300	5.10	0.47	
50% GPM-T	500	500	300	300	5.80	0.28	
75% GPM-T	250	750	300	300	6.45	0.14	
100% GPM-T	-	1,000	300	300	7.06	0.04	Ambient temperature curing
100% FA-AT	1,000	-	300	300	4.34	0.75	
50% GPM-AT	500	500	300	300	5.80	0.28	

2.3 วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบค่าการไหลแผ่นขนาดเล็กโดยใช้อุปกรณ์และวิธีการทดสอบคล้ายกับการทดสอบของ Hadi และคณะ [12] ทำการทดสอบโดยเติมเพสต์ลงในกรวยจนเต็ม จากนั้นยกกรวยขึ้นในแนวตั้งแล้วปล่อยให้เพสต์ไหลออกจากกรวยจนหมด ปล่อยให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ไหลแผ่ด้วยตัวเองจนหยุดนิ่งและทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเพสต์แบบแห้งที่ไหลบนแผ่นพลาสติก

2. ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์โดยเพิ่มไวกเกต โดยนำจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเทลงแบบหล่อ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-19 [13] โดยทำการทดสอบ 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3. ทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างเพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20b [14] โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

4. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ได้แก่ การวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึก (XRD) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างทางสัญญาณและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (SEM/EDS) และการทดสอบความพรุนด้วยการซึมผ่านเข้าได้ของปรอท (MIP)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะของวัสดุผงตั้งต้น

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียดใช้เครื่องวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (XRF) แสดงผลการแยกชนิดธาตุเชิงปริมาณดัง Table 3 พบว่า เถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจัดเป็นเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [15] เนื่องจากมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 55.40 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ในส่วนของวัสดุทดแทนพบว่า หินพัมมิสบดละเอียดมี SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 70 เป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติชนิด N สอดคล้องกับผลวิจัยของ Hwang และคณะ [16] Figure 2 แสดงลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียดพบว่า เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ในขณะที่หินพัมมิสบดละเอียดมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเนื่องจากหินพัมมิสถูกบดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอย Figure 3 แสดงรูปแบบ XRD ของเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียดพบว่า อนุภาคของเถ้าลอยตรวจพบผลึกของแอนไฮไดรต์ (A, Ca(SO₄)) ควอตซ์ (Q, SiO₂) ปูนขาว (O, CaO) และปอร์ตแลนด์ไตรต์ (P,

Ca(OH)_2) คล้ายกับ [1] และสอดคล้องกับผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกาออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้การตรวจพบส่วนโค้งเด่นชัดในช่วง 15° ถึง 38° 2Theta บ่งชี้ถึงวัสดุผงที่มีความเป็นอณูฐานสูงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุ

ตั้งต้นหลัก สำหรับหินพื้มีสเปคตละเอียดตรวจพบส่วนที่เป็นอณูฐานที่แสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานปรากฏเส้นโค้งในช่วง 20° ถึง 35° 2Theta คล้ายกับ [2] และพบเฟสผลึกของอัลไบท์ ($\text{N, Na}_{0.499}\text{Ca}_{0.491}(\text{Al}_{1.488}\text{Si}_{2.506}\text{O}_8)$) และเฟสผลึกของรีเบคไคต์ ($\text{R, Na}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) สอดคล้องกับ [3]

Table 3 Chemical composition of FA and GPM

Oxides	FA	GPM
SiO_2	27.50	60.40
CaO	25.50	2.40
Al_2O_3	14.30	16.70
Fe_2O_3	13.60	4.00
SO_3	6.33	-
MgO	2.47	0.90
Na_2O	2.04	4.0
K_2O	1.85	3.40
TiO_2	0.33	0.50
P_2O_5	0.32	-

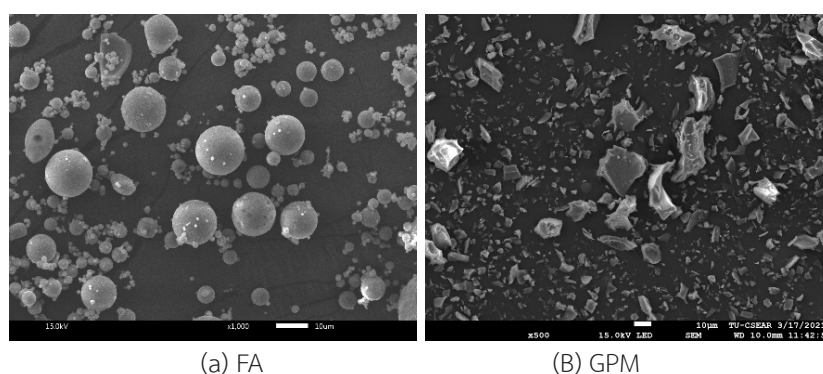


Figure 2 SEM micrographs of powder materials

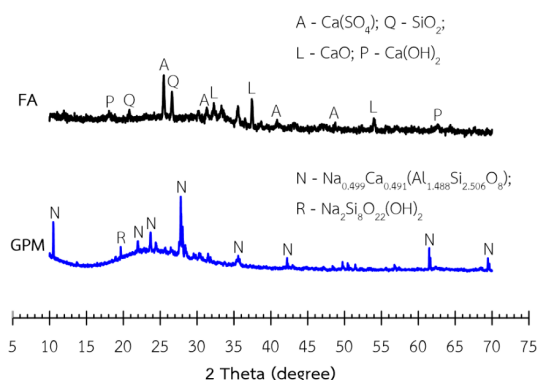


Figure 3 XRD pattern of powder materials

3.2 ผลกระทบของหินพัมมิสบนตะเอยดต่อเ้าลลยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ยังไม่แข็งตัว

Figure 4 แสดงค่าการไหลแผ่และระยะเวลาก่อตัวของเ้าลลยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมหินพัมมิสบนตะเอยดพบว่า จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเ้าลลยเพียงชนิดเดียว (สัดส่วนผสม 100% FA) มีเส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่เท่ากับ 128.7 มิลลิเมตร เมื่อแทนที่เ้าลลยด้วยหินพัมมิสบนตะเอยดในอัตราส่วนร้อยละ 25 50 และ 75 โดยน้ำหนัก ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่ลดลงร้อยละ 4 14 และ 30 ตามลำดับ สำหรับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากหินพัมมิสบนตะเอยดเพียงชนิดเดียว (สัดส่วนผสม 100% GPM) เกิดการสูญเสียความสามารถในการไหลทำให้ไม่สามารถไหลแผ่ออกเป็นวงกว้างได้ การสูญเสียความสามารถในการไหลตัวของสัดส่วนผสมที่มีหินพัมมิสบนตะเอยดอาจเกิดจากอนุภาคของหินพัมมิสที่เป็นเหลี่ยมเป็นมุมดังแสดงใน Figure 2 ทำให้ความถี่ไหลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลง นอกจากนี้หินพัมมิสบนตะเอยดมีขนาดอนุภาคเล็กน้อยกว่าเ้าลลยและยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าทำให้มีความต้องการของเหลวไปเคลือบผิวมากกว่าส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีความหนืดมากขึ้น [17] สำหรับผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเ้าลลยจีโอโพลิเมอร์เพสต์พบว่า สัดส่วนผสม 100% FA มีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเท่ากับ 66 และ 117 นาที ตามลำดับ สอดคล้องกับผลวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [18] เมื่อแทนที่เ้าลลยด้วยหิน

พัมมิสบนตะเอยดในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ 26 ตามลำดับ เมื่อแทนที่เ้าลลยด้วยหินพัมมิสบนตะเอยดในปริมาณสูงพบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการก่อตัวช้าลงมากในอุณหภูมิห้อง โดยสัดส่วนผสม 50% GPM และ 75% GPM มีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 ชั่วโมง และ 3 ถึง 9 ชั่วโมงตามลำดับ ในส่วนของสัดส่วนผสม 100% GPM พบว่าไม่สามารถก่อตัวได้ภายในระยะเวลา 1 วัน การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัวเมื่อเพิ่มปริมาณหินพัมมิสบนตะเอยดอาจมีสาเหตุเนื่องจากการลดลงของแคลเซียมออกไซด์ที่มาจากเ้าลลยสังเกตจากอัตราส่วน Ca/Si ใน Table 2 สอดคล้องกับผลวิจัยของ Pangdaeng และคณะ [4] ที่ศึกษาพบว่า เมื่อแคลเซียมออกไซด์จากการเตรียมส่วนผสมลดลงเ้าลลยจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น การควบคุมของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนของซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ผลวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [19] พบว่า จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเ้าลลยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงก่อตัวเร็วขึ้นเมื่อเตรียมส่วนผสมด้วยอัตราส่วน Si/Al เพิ่มขึ้น แต่จากผลการศึกษานี้พบว่า การแทนที่เ้าลลยด้วยหินพัมมิสบนตะเอยดทำให้อัตราส่วน Si/Al เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามหินพัมมิสบนตะเอยดเป็นวัสดุทดแทนที่มีความเป็นอนุฐานต่ำกว่าเ้าลลยทำให้ไอออนของซิลิกาและอะลูมินาถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าเ้าลลยในช่วงแรกส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ทั่วไปซึ่งทดสอบโดยเข้มไวแคตมีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และมีค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายไม่เกิน 345 นาที จะเห็นได้ว่าสัดส่วนผสม 100% FA 25% GPM และ 50% GPM มีระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในเกณฑ์ของสารเชื่อมประสานคอนกรีตทั่วไปสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกได้ นอกจากนี้สัดส่วนผสม 100% FA เกิดการก่อตัวค่อนข้างเร็วในสภาพแวดล้อมทั่วไปซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม

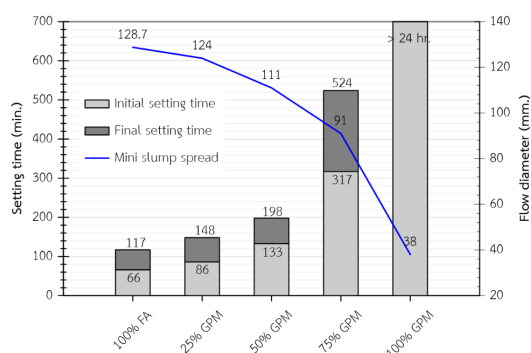


Figure 4 Fresh properties of geopolymers paste

3.3 ผลกระทบของหินพัมมีสต่อผลผลิตต่อถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

3.3.1 กำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากถั่วลอยผสมหินพัมมีสต่อผลผลิตเมื่อบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มในอุณหภูมิห้องทั่วไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการทดสอบดังแสดงใน Figure 5 โดยสัดส่วนผสม 100% FA-T ที่บ่มด้วยความร้อนมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน เท่ากับ 55.8 69.6 70.3 และ 66.9 เมกะปาสคาลตามลำดับ เมื่อแทนที่ถั่วลอยด้วยหินพัมมีสต่อผลผลิตพบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหินพัมมีสต่อผลผลิตที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างที่อายุ 28 วัน สัดส่วนผสม 25% GPM-T 50% GPM-T และ 75% GPM-T ที่บ่มด้วยความร้อนมีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 74 50 และ 31 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสม 100% FA-T ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถรับแรงอัดของถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์อาจเป็นผลจากการก่อตัวของ C-S-H หรือ C-(A)-S-H และ N-A-S-H [18] เมื่อส่วนผสมมีปริมาณถั่วลอยลดลงอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกซิลลดลงด้วยการลดลงของ C-S-H ในระบบจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากถั่วลอยส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สอดคล้องกับผลวิจัยของ Nasaeng และคณะ [19] ใช้เศษอิฐดินเหนียวเผาผลาญต่อผลผลิตที่มีปริมาณซิลิกาออกไซด์

สูงแทนที่ถั่วลอยบางส่วนเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสม 100% GPM-T พบว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำทุกอายุการทดสอบแม้ว่าหินพัมมีสมีความเป็นอสัณฐานใกล้เคียงกับถั่วลอยแต่อาจจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ช้าทำให้การพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มร้อนทำได้ยาก สอดคล้องกับผลทดสอบของ Nasaeng et al. และคณะ [20]

เมื่อพิจารณาตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มในอุณหภูมิทั่วไปพบว่า สัดส่วนผสม 100% FA-AT มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน เท่ากับ 26.1 35.5 44.0 และ 66.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 47 51 63 และ 99 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสม 100% FA-T ซึ่งเป็นตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อน การพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าเมื่อกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ระบบจีโอโพลิเมอร์เกิดพลังงานจลน์แล้วโมเลกุลของธาตุต่างๆ ที่ถูกชะละลายออกมาเกิดปฏิกิริยาได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ [21] แต่การบ่มในอุณหภูมิที่สูงจะเกิดการสูญเสียและเกิดรอยแตกร้าว [22] สำหรับสัดส่วนผสม 50% GPM-AT พบว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 9.5 31.6 49.3 และ 71.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สังเกตได้ว่าภายใต้สภาวะแวดล้อมทั่วไปจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากถั่วลอยผสมหินพัมมีสต่อผลผลิตมีค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากถั่วลอยเพียงชนิดเดียวในช่วงอายุ 7 วัน สาเหตุอาจเกี่ยวข้องกับความเป็นอสัณฐานของหินพัมมีสที่ต่ำกว่าถั่วลอย (พิจารณา Figure 3) อย่างไรก็ตามในช่วงอายุปลายสัดส่วนผสม 50% GPM-AT มีการพัฒนาที่ดีขึ้นอาจเป็นเพราะหินพัมมีสต่อผลผลิตมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคและเมื่ออายุมากขึ้นซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ในอนุภาคของวัสดุผงตั้งต้นสามารถละลายตัวได้ [23] ทำให้ถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีหินพัมมีสต่อผลผลิตผสมอยู่ซึ่งมีซิลิกา

และอะลูมินาสูงกว่าเถ้าลอยสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน ได้สูงกว่าสัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยเพียงชนิดเดียว ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มในอุณหภูมิทั่วไปสนับสนุนข้อสมมติฐานหินพัมมีสทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ในช่วงอายุต้น ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้หินพัมมีสบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเชื่อมประสานในคอนกรีตที่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุปลาย อย่างไรก็ตามสัดส่วนผสมเดียวกันแต่บ่มด้วยความร้อน (50% GPM-T) มีการพัฒนากำลังที่ต่ำกว่าที่อายุทดสอบเดียวกัน ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าในช่วงอายุปลายจีโอโพลิเมอร์เกิดการสูญเสียสารละลายอัลคาไลน์ในขณะบ่มร้อนทำให้หินพัมมีสไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ในช่วงอายุปลาย

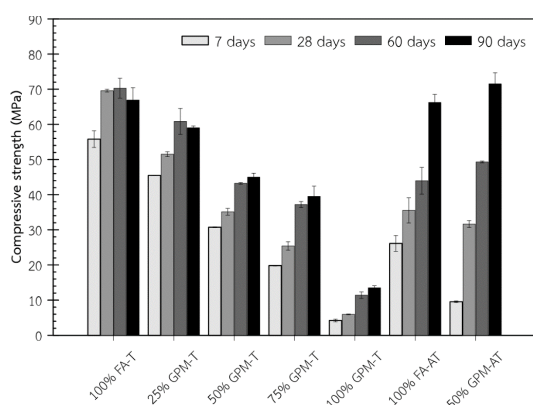


Figure 5 Compressive strength of geopolymer paste

3.2.2 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมหินพัมมีสบดละเอียด

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีควบคู่กับคุณสมบัติทางกายภาพจะทำให้เข้าใจถึงปฏิกิริยาและสิ่งที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมหินพัมมีสบดละเอียดที่สะท้อนถึงความแข็งแรงในช่วงอายุที่ใช้ในการออกแบบสารเชื่อมประสานคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกสัดส่วนผสม 100% FA-T 50% GPM-T

และ 50% GPM-AT ที่อายุ 28 วัน เป็นตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญ ได้แก่ การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา การพิสูจน์เอกลักษณ์ การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในและปริมาตรพร่องอากาศโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์ จาก Figure 6 แสดงรูปแบบ XRD ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมหินพัมมีสบดละเอียดพบว่า สัดส่วนผสม 100% FA-T ตรวจพบพิกฐานกว้างอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 20.00° ถึง 38.00° 2Theta บ่งชี้ถึงการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เจลที่เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน [24] โดยสารประกอบที่สำคัญ คือ พิกของ C-S-H และ N-A-S-H ที่ตำแหน่ง 29.50° และ 33.20° 2Theta ตามลำดับ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลวิจัยของ Chindaprasit และคณะ [18] ที่ศึกษาพบว่า การก่อตัวของเฟสจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C ตรวจพบที่ตำแหน่งประมาณ 28.00° 2Theta และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตตรวจพบที่ตำแหน่ง 29.05° และ 32.05° 2Theta นอกจากนี้ยังปรากฏเฟสผลึกของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Si}_{100}\text{Al}_{92}\text{O}_{384}(\text{H}_2\text{O})_{24}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันซึ่งอยู่ในรูปแบบอสัณฐานกระจายอยู่ทั่วไปในรูปแบบ XRD และปรากฏเฟสผลึกของควอตซ์ (Q) ปอร์ตแลนด์ไตรต์ (P) และลาร์ไนต์ (L, Ca_2SiO_4) เมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมีสบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ตรวจพบพิกฐานกว้างอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 20.00° ถึง 38.00° 2Theta คล้ายกับตัวอย่าง 100% FA-T และปรากฏเฟสผลึกของอะนอร์ไทต์ (T, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), แอลไบต์ (N) และควอตซ์ (Q) การตรวจพบอะนอร์ไทต์ซึ่งเป็นผลึกของสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกต (Calcium aluminum silicate) ที่มักจะมีอยู่ในเนื้อของวัสดุที่มีรูพรุน โดยผลึกของอะนอร์ไทต์ที่ตรวจพบนี้อาจเกิดจากอนุภาคของหินพัมมีสที่เป็นอสัณฐานถูกชะละลายโดยสารละลายอัลคาไลน์และเหลือส่วนที่เป็นผลึก จากผลการศึกษาของ Moon

และคณะ [25] ที่ศึกษาพบว่า อะนอร์ไทต์มีการทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบอื่นๆ ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ ทำให้เมื่อนำวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติเหล่านั้นมาผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะทำให้ตรวจพบเฟสผลึกของอะนอร์ไทต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาและส่งผลเสียต่อความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้การตรวจพบเฟสผลึกของแอลไบต์ (N) ที่ตำแหน่งเดียวกับรูปแบบ XRD ของหินพัมมิสที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาอาจแสดงถึงปริมาณของหินพัมมิสที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ จากผลการศึกษาที่ผ่านมาอนุภาคที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลง [26] ผลการทดสอบนี้สนับสนุนผลทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT ที่มีค่าต่ำกว่าสัดส่วนผสม 100% FA-T

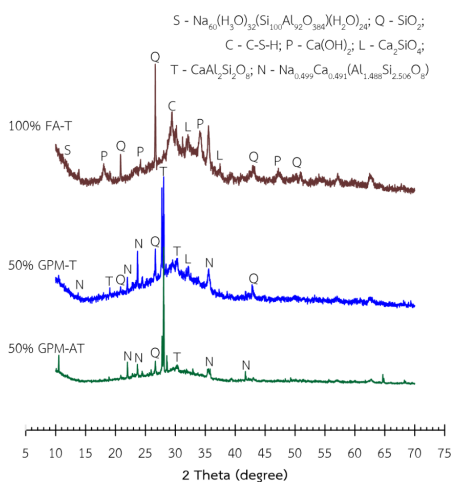


Figure 6 XRD pattern of geopolymer paste at 28 days

2. การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR จาก Figure 7 แสดงสเปกตรัม FTIR ของแกลลยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมหินพัมมิสบดละเอียดพบว่า ชิ้นส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้งหมดที่ทำการทดสอบตรวจพบโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในอนุภาคแกลลยหรือน้ำที่มาจากสาร

ละลายอัลคาไลน์ทำให้เกิดการสั่นแบบยืดของพันธะ X-OH (เมื่อ X คือ Si หรือ H) และการสั่นแบบงอของพันธะ O-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3,600 ถึง 2,200 cm^{-1} และ 1,700 ถึง 1,600 cm^{-1} ตามลำดับ [27] การก่อตัวของไอออนคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ภายใต้สภาวะบรรยากาศทำให้เกิดการสั่นแบบยืดไม่สมมาตรของพันธะ O-C-O ที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้ 1,400 cm^{-1} [28] เมื่อพิจารณาความกว้างของแถบคลื่นที่ตำแหน่งนี้พบว่า ทุกสัดส่วนผสมที่ทำการทดสอบเกิดการสั่นในลักษณะใกล้เคียงกันซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะ O-C-O ของคาร์บอเนตเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ การสั่นแบบยืดไม่สมมาตรของพันธะ T-O-Si เมื่อ T คือ Si หรือ Al เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1,200 ถึง 950 cm^{-1} และตำแหน่งใกล้เลขคลื่น 620 cm^{-1} เนื่องจากการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เจล [27] เมื่อพิจารณาผลทดสอบของสัดส่วนผสม 100% FA-T พบว่า ที่ตำแหน่งนี้เกิดการสั่นที่เด่นชัดมีพื้นที่กว้างกว่าและมีความลึกมากกว่าสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT แสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะ Si-O-Si และ Al-O-Si หรือการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่สูงกว่าทำให้ที่อายุ 28 วัน เมื่อสัดส่วนผสม 100% FA-T เกิดปฏิกิริยาดีกว่าจึงทำให้สามารถรับแรงอัดมากกว่าสัดส่วนผสมที่มีหินพัมมิสบดละเอียด

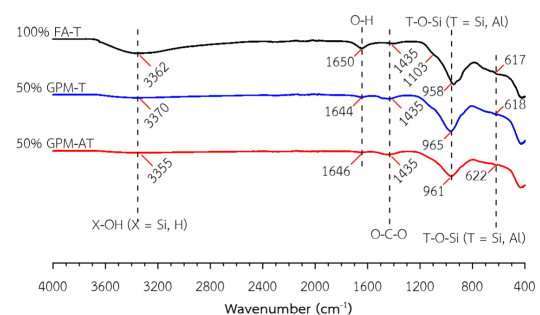
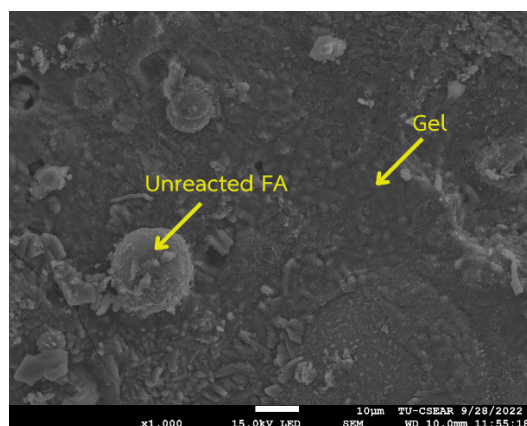
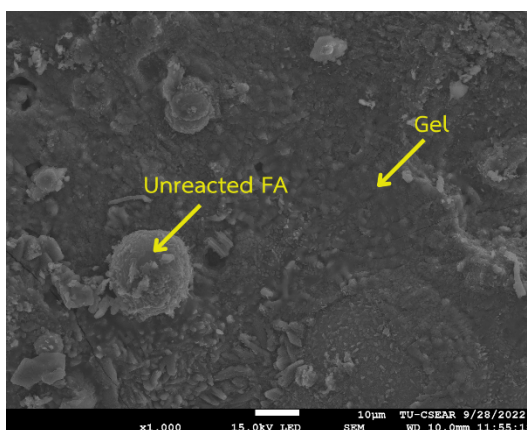


Figure 7 FTIR spectra of geopolymer paste at 28 days

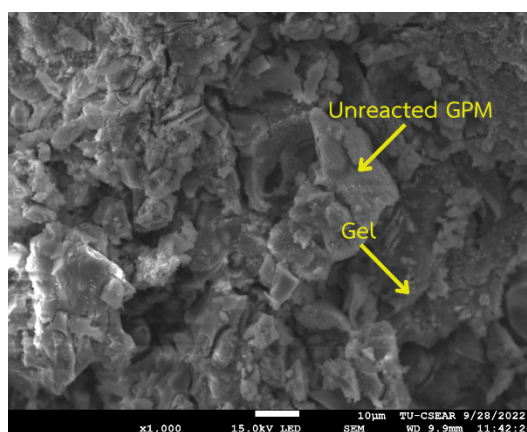
3. การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายขยายกำลังสูง จาก Figure 8 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่อายุ 28 วัน ของสัดส่วนผสม 100% FA-T 50% GPM-T และ 50% GPM-AT สังเกตได้ว่าสัดส่วนผสม 100% FA-T แสดงเนื้อจีโอโพลิเมอร์เจลที่มีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน และหลุมของอนุภาคเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือที่ถูกชะละลายเพียงบางส่วนที่หลุดออกในระหว่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงใน Figure 8(a) เมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วย หินพัมมีสบดละเอียดทำให้เกิดอนุภาคของหินพัมมีสในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เจลดังแสดงใน Figure 8(b) และ Figure 8(c) นอกจากนี้สัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT ยังปรากฏอนุภาคของวัสดุตั้งต้นที่ไม่ทำปฏิกิริยาและช่องว่างระหว่างจีโอโพลิเมอร์เจลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสม 100% FA-T ผลการตรวจพบนี้สอดคล้องกับผลวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT ที่ปรากฏผลผลิตของหินพัมมีสที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งอนุภาคของวัสดุตั้งต้นที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็กส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าสัดส่วนผสมที่มีอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วนน้อยกว่า [29] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษารังสีที่พบว่า การแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมีสบดละเอียดให้ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลง เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสม 50% GPM-T ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่บ่มในตู้อบเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสม 50% GPM-AT ที่บ่มในอุณหภูมิห้องทั่วไปพบว่าสัดส่วนผสม 50% GPM-AT แสดงให้เห็นถึงเนื้อจีโอโพลิเมอร์เจลที่หลวมกว่าและมีอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เจลที่หลวมและปริมาณอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาจำนวนมากเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของสัดส่วนผสม 50% GPM-AT ต่ำกว่าสัดส่วนผสม 50% GPM-T



(a) 100% FA-T



(b) 50% GPM-T



(c) 50% GPM-AT

Figure 8 SEM micrographs of geopolymer paste at 28 days

Table 4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องมือ EDS พบว่าสัดส่วนผสม 100% FA-T 50% GPM-T และ 50% GPM-AT มีอะตอมของ O Si Na Al และ Ca เป็นองค์ประกอบหลักบ่งชี้ถึงการเกิดเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตอยู่ร่วมกับแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต [30] เมื่อพิจารณาอัตราส่วนร้อยละอะตอมของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับอัตราส่วนอะตอมของส่วนผสมเริ่มต้นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Songpiriyakij และคณะ [31] ที่ศึกษาพบว่าอัตราส่วนร้อยละอะตอมของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าชีวมวลที่แข็งตัวแล้วมีค่าแตกต่างจากค่าอัตราส่วนร้อยละอะตอมเริ่มต้นเล็กน้อยและมีแนวโน้มในลักษณะเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสม 100% FA-T พบว่ามีปริมาณอะตอมของ Na สูงกว่าสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT โดยในกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันจะมีการใช้อิออนของ Na เพื่อปรับ

สมดุลประจุและสร้างผลิตภัณฑ์คริสตัลใหม่ [32] ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าในตัวอย่างที่มีปริมาณ Na น้อยกว่าสร้างผลิตภัณฑ์ที่ช่วยพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ได้น้อยกว่าส่งผลให้สัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสม 100% FA-T นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Si/Al พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าลอยหินพัมมิสตะเลเยียด จากผลการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ [33] พบว่าอัตราส่วน Si/Al ของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 3.00 ถึง 6.00 ทำให้ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ลดลงและมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการศึกษาในครั้งนี้ที่พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของสัดส่วนผสม 100% FA-T ($Si/Al = 2.66$) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT

Table 4 Atomic percentages and ratios of hardened geopolymer paste based on EDS analyses

Mix names	Atomic percentages (%)					Atomic ratios of Si/Al
	O	Na	Ca	Si	Al	
100% FA-T	54.30	18.27	2.09	2.66	1.00	2.66
50% GPM-T	56.60	15.96	1.59	6.40	1.74	3.68
50% GPM-AT	61.14	8.38	4.22	12.60	3.69	3.41

4. การวิเคราะห์การกระจายขนาดรูพรุนและการหาปริมาณรูพรุน จาก Table 5 แสดงผลทดสอบการซึมเข้าในตัวอย่างของโปรทโดยใช้แรงดันของสัดส่วนผสม 100% FA-T 50% GPM-T และ 50% GPM-AT เมื่อตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีอายุ 28 วัน พบว่าปริมาตรรูพรุนสะสมของสัดส่วนผสม 100% FA-T, 50% GPM-T และ 50% GPM-AT มีค่าเท่ากับ 0.1286 0.1402 และ 0.1043 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ความพรุนรวมมีค่าเท่ากับร้อยละ 21.35 22.48 และ 18.35 ตามลำดับ จากผลทดสอบจะสังเกตได้ว่าปริมาตรรูพรุนสะสมและความพรุนรวมในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้สะท้อนถึง

ความสามารถในการรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ววัสดุซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณรูพรุนสูงจะมีความแข็งแรงต่ำ เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสม 100% FA-T พบว่ามีปริมาณรูพรุนสูงกว่าสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT แต่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำแนกประเภทรูพรุนและหาปริมาณรูพรุนที่เป็นอันตรายต่อจีโอโพลิเมอร์เจลดังแสดงใน Figure 9 พบว่าสัดส่วนผสม 100% FA-T มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนในช่วง 0.003 ถึง 0.020 ไมโครเมตร และในช่วง 45.000 ถึง 357.000

ไมโครเมตร รูพรุนที่มีปริมาณมากที่สุดมีขนาดประมาณ 0.004 ไมโครเมตร จัดเป็นประเภทรูพรุนเจล [5] สำหรับ สัดส่วนผสม 50% GPM-T มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.003 ถึง 1.30 ไมโครเมตร รูพรุนที่มีปริมาณมากที่สุดมีขนาดประมาณ 0.012 ไมโครเมตร จัดเป็นประเภทรูพรุนคาปิลลารี [6] และสัดส่วนผสม 50% GPM-T ที่บ่มในอุณหภูมิห้องมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.100 ไมโครเมตร ถึง 3.000 ไมโครเมตร รูพรุนที่มีปริมาณมากที่สุดมีขนาดประมาณ 1.600 ไมโครเมตร จัดเป็นประเภทรูพรุนคาปิลลารีเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยหินพัมมีสบดละเอียดมีส่วนทำให้รูพรุนในจีโอโพลิเมอร์เจลมีขนาดใหญ่ขึ้น จากผลวิจัยของ Tho-In และคณะ [34] ได้ศึกษาพบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าแสดงถึงเนื้อจีโอโพลิเมอร์เจลที่มีความหนาแน่นกว่าและกำลังรับแรงอัดที่สูงสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์การจัดประเภทของรูพรุนที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ รูพรุนที่ไม่เป็นอันตราย (Harmless pore) เป็นรูพรุนประเภทที่มีขนาดเล็กกว่า 0.020 ไมโครเมตร รูพรุนที่เป็นอันตรายน้อย (Less-harmful pore) เป็นรูพรุนที่มีขนาด

ตั้งแต่ 0.020 ถึง 0.050 ไมโครเมตร รูพรุนที่เป็นอันตราย (Harmful pore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.200 นาโนเมตร และรูพรุนที่เป็นอันตรายมากกว่า (More-harmful pore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.200 ไมโครเมตร [35] จาก Figure 10 พบว่า สัดส่วนผสม 100% FA-T 50% GPM-T และ 50% GPM-AT มีปริมาณรูพรุนที่เป็นอันตรายมากกว่าที่ส่งผลเสียต่อความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เท่ากับร้อยละ 32.81 49.93 และ 92.04 ตามลำดับ การตรวจพบโพรงอากาศขนาดใหญ่เหล่านี้ในสัดส่วนผสม 50% GPM-T และ 50% GPM-AT อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดต่ำกว่าสัดส่วนผสม 100% FA-T ที่อายุทดสอบเดียวกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณรูพรุนจำเพาะรวมในสัดส่วนผสม 50% GPM-AT ที่บ่มในอุณหภูมิห้องอาจบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชันในระดับที่ต่ำในช่วงอายุ 28 วัน สอดคล้องกับผลทดสอบ XRD ที่พบเฟสผลึกของอะนอร์ไทต์และแอลไบต์คล้ายกับเฟสผลึกที่ตรวจพบในผงหินพัมมีสที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา และยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายขยายกำลังสูงแสดงใน Figure 7(c) ที่สังเกตเห็นเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่หลวมและมีโพรงจำนวนมาก

Table 5 Porosity and pore volume distribution of geopolymer paste at 28 days

Mix names	Average pore diameter (μm)	Pore volume (%)	Mercury volume (mL/g)
100% FA-T	0.010	21.35	0.1286
50% GPM-T	0.016	22.48	0.1402
50% GPM-AT	0.485	18.35	0.1043

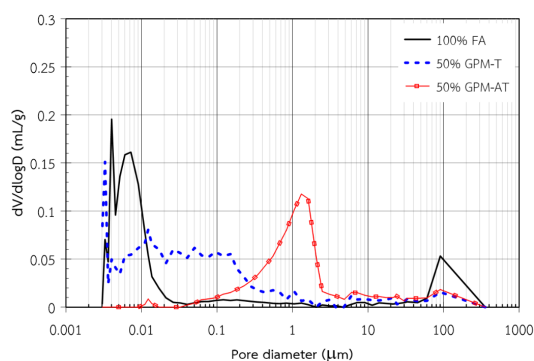


Figure 9 Pore size distribution of geopolymer paste at 28 days

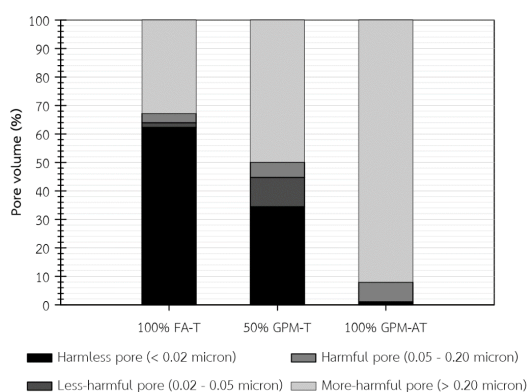


Figure 10 Percentages of incremental pore volume

4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของหินพัมมิสบดละเอียดต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย ในการศึกษานี้ใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียวเป็นตัวอย่างควบคุมทำการวิเคราะห์ผลกระทบของสัดส่วนการใช้งานร่วมกันของเถ้าลอยและหินพัมมิสบดละเอียด โดยทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่าการไหลผ่าน ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและโครงสร้างทางจุลภาค ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ค่าการไหลผ่านของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณหินพัมมิสบดละเอียดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยมีทรงกลมทำหน้าที่คล้ายลูกปืน

ช่วยให้เพสต์มีการไหลตัวที่ดีและต้องการของเหลวน้อยกว่าหินพัมมิสบดละเอียด

2. ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียด การเพิ่มปริมาณหินพัมมิสบดละเอียดสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแคลเซียมในระบบลดลงเพราะเถ้าลอยถูกทดแทนด้วยวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตเมื่อปริมาณแคลเซียมลดลงทำให้การตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตหรือแคลเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรตลดลงจีโอโพลิเมอร์เพสต์จึงมีระยะเวลาก่อตัวนานขึ้นเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเชื่อมประสานในคอนกรีตทั่วไปได้

3. กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณหินพัมมิสบดละเอียดเพิ่มขึ้นทั้งในสภาวะการบ่มในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงและการบ่มแบบทั่วไประยะ 25 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันใกล้เคียงร้อยละ 75 ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตามในช่วงอายุ 90 วัน การแทนที่เถ้าลอยด้วยหินพัมมิสบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และใช้กระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ในอุณหภูมิทั่วไปมีแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแสดงให้เห็นถึงวิธีการเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ลดต้นทุนด้านพลังงานที่ใช้ในการบ่มได้

4. ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สถานะของธาตุและโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยผสมหินพัมมิสมีค่าลดลงเนื่องจากการลดลงของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมในปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรเซชัน นอกจากนี้เฟสผลึกที่พบในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยผสมหินพัมมิสยืนยันข้อเท็จจริงที่หินพัมมิสบดละเอียดทำปฏิกิริยาได้ในระดับต่ำในช่วงอายุต้นสูง

ผลให้เมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์มีลักษณะหลวม มีอนุภาคที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและรูพรุนประเภทที่เป็นอันตรายสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว

5. จากผลการวิจัยนี้สรุปได้ว่าการผสมเถ้าลอยและหินปัมมีสับละเอียดในอัตราร้อยละ 50 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีความสามารถไหลตัวที่ดีและมีระยะเวลาอยู่ในเกณฑ์สารเชื่อมประสานทั่วไป นอกจากนี้การเลือกใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างในสภาพแวดล้อมทั่วไปจะทำให้ได้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 70 เมกะปาสคาล

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่สนับสนุนทุนวิจัยในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และห้องทดสอบ

6. References

- [1] Rattanasak, U., and Chindaprasirt, P., 2009, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Miner. Eng.* 22(12): pp. 1073-1078.
- [2] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and Van Deventer, J. S. J., 2007, Geopolymer technology: The current state of the art, *J. Mater. Sci.* 42(9): pp. 2917-2933.
- [3] Rattanasak, U., Pankhet, K., and Chindaprasirt, P., 2011, Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer, *IJMMM*. 18(3): pp. 364-369.
- [4] 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, *Cem. Concr. Res.* 151(February): 106649.
- [5] Assi, L. N., Eddie Deaver, E., and Ziehl, P., 2018, Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly ash-based geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 167: pp. 372-380.
- [6] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., and Cao, T., 2011, High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash, *J. Mater. Civ. Eng.* 23(3), pp. 264-270.
- [7] Hardjito, D., Cheak, C. C., and Lee Ing, C. H., 2008, Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar, *Mod. Appl. Sci.* 2(4): pp. 3-11.
- [8] Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., and Zhang, J., 2018, A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, *Composites Part B: Engineering*. 152(June): pp. 79-95.

- [9] Nath, P. and Sarker, P. K., 2015, Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature, *Cem. Concr. Compos.* 55(January): pp. 205-214.
- [10] 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, *Constr. Build. Mater.* 229(December), p. 116933.
- [11] Gencel, O., 2015, Characteristics of fired clay bricks with pumice additive, *Energy Build.*, 102 (September), pp. 217-224.
- [12] Hadi, M. N. S., Zhang, H., and Parkinson, S., 2018, Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability, *J. Build. Eng.* 23(November): pp. 301-313.
- [13] ASTM C191-19, 2019, Standard Test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [14] ASTM C109/C109M-20b, 2020, Standard Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] ASTM C618-19, 2019, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] 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, *Constr. Build. Mater.* 218(September), pp. 519-529.
- [17] Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., and Sata, V., 2020, Influence of rice husk ash on mechanical properties and fi resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete, *J. Clean. Prod.* 252(December), p. 119797.
- [18] 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, *J. Mater. Sci.*, 47(12). pp. 4876-4883.
- [19] Nasaeng, P., Wongsas, A., Sata, V., and Chindaprasirt, P., 2022, Properties of high-calcium fly ash geopolymer paste mixed with ground clay brick, *RMUTI J. Sci. Technol.* 15(3), pp. 40-56. (In Thai)
- [20] Nasaeng, P., Wongsas, A., Cheerarot, R., and Sata, V., 2022, Strength enhancement of pumice-based geopolymer paste by incorporating recycled concrete and calcined oyster shell powders, *Case Stud. Constr. Mater.* 17(June): p. e01307.
- [21] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., and Salem, H. A., 2016, Effect of cement

- addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance, *Constr. Build. Mater.* 123(October), pp. 581–593.
- [22] Bakharev, T., 2005, Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, *Cem. Concr. Res.* 35(6): pp. 1224-1232.
- [23] Gunasekara, C., Law, D. W., and Setunge, S., 2016, Long term engineering properties of fly ash geopolymer concrete, *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2016(Augus): pp. 1-10.
- [24] Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., and Zhang, L., 2012, Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash, *Constr. Build. Mater.* 35(October): pp. 718-729.
- [25] Moon, J., Bae, S., Celik, K, Yoon, S., Kim, K.H., Kim, K.S., and Monteiro, P.J.M., 2014, Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders, *Cem. Concr. Compos.*, 53(October): pp. 97-104.
- [26] Suttiaprapa, P., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Rattanasak, U., and Jitsangiam, P., 2021, Strength behavior and autogenous shrinkage of alkali-activated mortar made from low-calcium fly ash and calcium carbide residue mixture, *Constr. Build. Mater.* 312(October): p. 125438.
- [27] 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 Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 211(2-3): pp. 115-126.
- [28] Tchakoute, H. K., Rüschler, C. H., Djobo, J. N. Y., Kenne, B. B. D., and Njopwouo, D., 2015, Influence of gibbsite and quartz in kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymer cements, *Appl. Clay Sci.* 107(April): pp. 188-194.
- [29] 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, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 22(April): pp. 1328-1338.
- [30] 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, *Constr. Build. Mater.* 276(March): p. 122217.
- [31] Songpiriyakij S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P., 2010, Compressive strength and degree of reaction of biomass and fly ash-based geopolymer, *Constr. Build. Mater.* 24(3): pp. 236-240.
- [32] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P., 2011, NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Fuel*: 90(6), pp. 2118-2124.
- [33] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U., 2009,

- Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, Waste Management. 29(2), pp. 539-543.
- [34] Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K., and Chindaprasirt, P., 2018, Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash, J. Clean. Prod., 172(January), pp. 2892-2898.
- [35] Zhang, M. H. and Li, H., 2011, Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement, Constr. Build. Mater. 25(2): pp. 608-616.