

อิทธิพลของความละเอียดแก่ล้อยแคลเซียมสูง ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ^{1*}

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง ตำบลชมพู อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100

ธนากร ภูเงินขำ² และ ปริญญา จินดาประเสริฐ³

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของความละเอียดของแก่ล้อยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยการตัดขนาดของแก่ล้อยแคลเซียมสูงเป็น 3 ขนาด คือ แก่ล้อยดั้งเดิม (OFA), แก่ล้อยขนาดกลาง (MFA) และ แก่ล้อยขนาดละเอียด (FFA) การศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารละลายต่างในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความละเอียดแก่ล้อยแคลเซียมสูงส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลง และกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่โครงสร้างทางจุลภาคของแก่ล้อยขนาดกลางและแก่ล้อยขนาดละเอียดมีความหนาแน่นของเพสต์มากกว่าแก่ล้อยดั้งเดิม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระหว่างแก่ล้อยขนาดกลางและแก่ล้อยขนาดละเอียด พบว่าสมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยค่ากำลังรับแรงอัดของแก่ล้อยขนาดกลางและแก่ล้อยขนาดละเอียดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 56.2 และ 56.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ / ความละเอียดแก่ล้อยแคลเซียมสูง / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังรับแรงอัด / โครงสร้างทางจุลภาค

* Corresponding author. Email:yim_kachan@yahoo.com

1 อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

2 นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3 ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Influence of Fineness of High Calcium Fly ash on Properties of Geopolymer Paste

Sakonwan Hanjitsuwan^{1*}

Lampang Rajabhat University, Lampang, Thailand 52100

Tanakorn Phoo-ngernkham² and Prinya Chindaprasirt³

Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand 40002

Abstract

This article presents the influence of fineness of high calcium fly ash (FA) on properties of geopolymer paste. The high calcium fly ash was classified according to its fineness, namely, original fly ash (OFA), classified medium fly ash (MFA) and fine fly ash (FFA). Sodium silicate (Na_2SiO_3) and 10-molar sodium hydroxide (NaOH) solutions were used as the alkaline solutions in the reaction. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 2.0 and the liquid/binder (L/B) ratio of 0.60 and curing at ambient temperature were used for in all cases. The results showed that the setting time decreased while the compressive strength increased with an increase in the fly ash fineness. In addition, the microstructure of MFA and FFA was denser than that of OFA. However, comparison between MFA and FFA indicated that their mechanical properties and microstructure were quite close. The compressive strength at 28 days of MFA and FFA geopolymer pastes were 56.2 and 56.9 MPa, respectively.

Keywords : Geopolymer / Fineness high calcium fly ash / Setting time / Compressive strength / Microstructure.

* Corresponding author: Email:yim_kachan@yahoo.com

¹ Lecturer, Program in Civil Technology, Faculty of Industry Technology.

² Ph.D. candidate, Department of Civil engineering, Faculty of Engineering.

³ Professor, Department of Civil engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานก่อสร้าง จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีการพัฒนาเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องขั้นตอนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือไม่ใช้พลังงานในการผลิตที่สูงและไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ โดยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้จากการผสมวัสดุจำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกตกับสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต ซึ่งกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถผสมได้ทั้งในอุณหภูมิปกติและใช้ความร้อนเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น [1]

ในประเทศไทยวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ เถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังนั้นการนำวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์จึงเป็นการลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลัก จากรายงานของ Chindaprasit et al. [2] พบว่ามีปริมาณเหลือทิ้งประมาณ 3 ล้านตัน โดยปกติแล้วเถ้าลอยในประเทศไทยจะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณที่สูง ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน [3] โดยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยศึกษาถึงสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงในการผลิตจีโอโพลิเมอร์พบว่าสมบัติที่ดีในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [3, 4]

โดยปกติแล้วเป็นที่ยอมรับว่าการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสามารถพัฒนาสมบัติของคอนกรีตได้ [5] กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเถ้าลอยเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่มีความหยาบมากกว่า [6] ขณะเดียวกันสมบัติด้านอื่นๆ อาทิเช่น ความสามารถทำงานได้และการหดตัวสามารถปรับปรุงสมบัติดังกล่าวได้เมื่อใช้ความละเอียดที่มากกว่า [7] จากรายงานของ Diaz et al. [8] พบว่าปัจจัยต่างๆ ของเถ้าลอยนั้นมีผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ เช่น การกระจายตัวของอนุภาค ระดับของ

ความเป็นเนื้อแก้ว (amorphous) ที่แสดงถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังเป็นปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ซึ่งกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีซึ่งจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส [9] แต่การนำไปใช้ในงานทางด้านก่อสร้างมีความลำบากและยุ่งยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความละเอียดเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของความละเอียดเถ้าลอยแคลเซียมสูง อีกทั้งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) [10] จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยแบ่งความละเอียดเถ้าลอยออกเป็น 3 ขนาด คือ เถ้าลอยดั้งเดิม (OFA) เถ้าลอยที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (MFA) และเถ้าลอยที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (FFA) ขณะที่สารละลายต่างที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Rattanasak et al. [11] ที่ได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยได้ดี และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) (13.89% Na_2O , 32.15% SiO_2 และ 46.04% H_2O)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของ

เถ้าลอยทั้ง 3 ขนาดไม่มีแตกต่างกัน สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยประกอบด้วยความละเอียดทดสอบตามวิธีของเบลน (Blain fineness) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ OFA, MFA และ FFA เท่ากับ 4300, 4680, 5100 ซม²/ก และ 15.5, 8.5, 7.6 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 รูปร่างอนุภาคจากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยทั้ง 3 ขนาดมีลักษณะกลม ผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 1

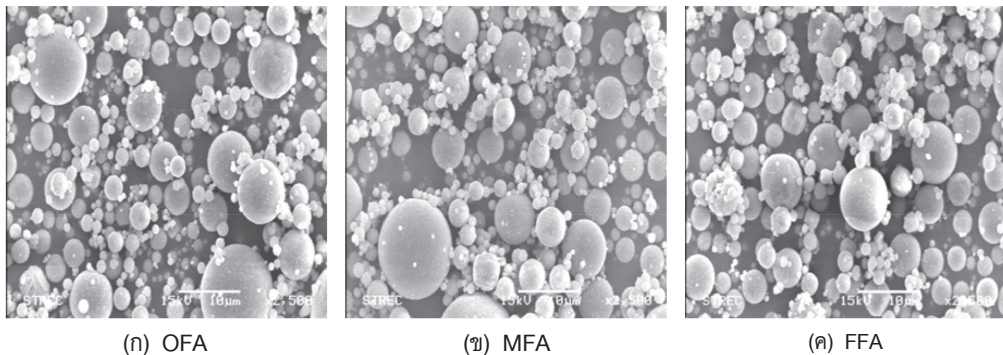
การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 2 จากผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเถ้าลอยพบว่าเถ้าลอยทั้ง 3 ขนาดประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อแก้วที่มุม 25-35 องศา และส่วนที่เป็นผลึกของควอตซ์ (SiO₂) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (MgFe₂O₄) แคลไซต์ (CaCO₃) ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย

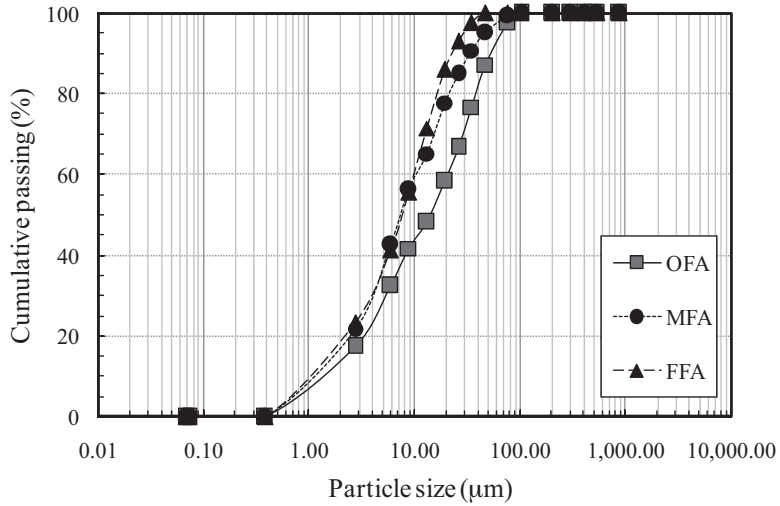
Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
OFA	29.32	12.96	15.64	25.79	2.94	2.93	2.83	7.29	0.30
MFA	27.55	12.28	16.14	26.91	2.91	-	-	7.85	0.50
FFA	26.98	12.02	15.47	26.98	2.98	-	-	9.19	0.50

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

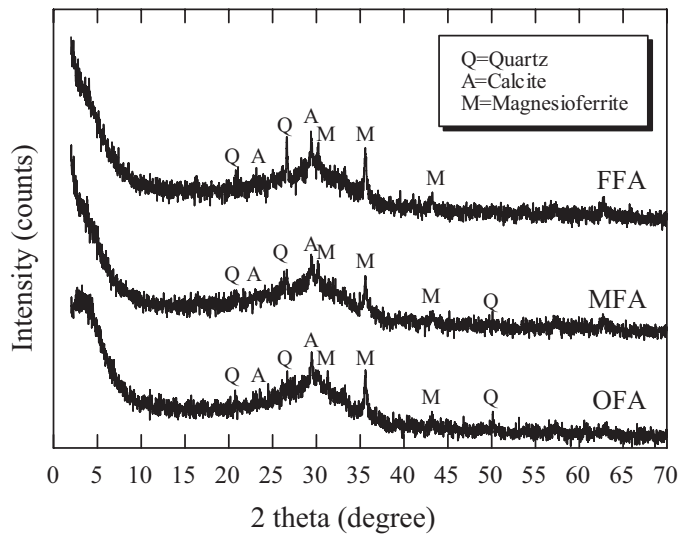
Materials	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)	Blaine fineness (cm ² /g)
OFA	2.61	15.5	4300
MFA	2.69	8.5	4680
FFA	2.72	7.6	5100



รูปที่ 1 รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำลอย



รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของถ้ำลอย

3.2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) เท่ากับ 0.60 และ 2.0 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนผสม โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. [12] ซึ่งได้มีการรายงานไว้ว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) เท่ากับ 2.0 มีความเหมาะสมในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ขณะขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยเถ้าลอยถูกเติมด้วยสารละลายต่างและผสมเป็นเวลา 5 นาที โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกผสมให้เข้ากันก่อนนำไปใช้เป็นสารละลายต่างในส่วนผสม

3.3 การทดสอบตัวอย่าง

3.3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเครื่องมือไอแคตตามมาตรฐาน ASTM C191 [13] โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ครั้ง

3.3.2 การทดสอบกำลังอัด

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้น หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้วทำการเทลงแบบขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [14] ทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง ตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [14] โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3.3.3 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เลือกชิ้นตัวอย่างที่อยู่ตรงกลางของทรง

ลูกบาศก์ ใช้ลิวส์กัดตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ให้เป็นก้อนเล็กๆ ขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร

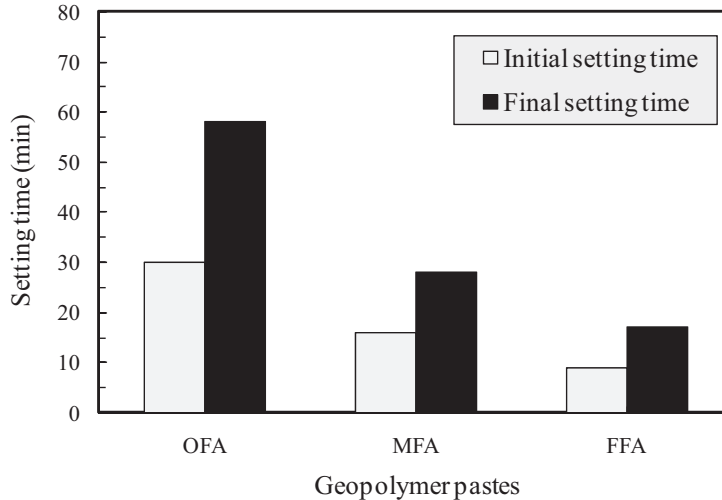
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ OFA, MFA และ FFA มีค่าเท่ากับ 30, 16 และ 9 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายมีค่าเท่ากับ 58, 28 และ 17 นาที จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวของ FFA มีระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นมากเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ OFA และ MFA ซึ่งการประยุกต์นำไปใช้งานจริงควรมีปริมาณของเนื้องานหรือพื้นที่ไม่มากเพื่อให้สามารถเทลงแบบได้ทันเวลา นอกจากนี้จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดเพิ่มขึ้น แสดงถึงจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการทำปฏิกิริยาที่เร็วขึ้นตามความละเอียดเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถทำงานได้ลดลง เนื่องจากความละเอียดเถ้าลอยที่สูงมีพื้นที่ผิวสูงและมีความเป็นเนื้อแก้วมากส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้น [3] เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยดั้งเดิม (OFA) นอกจากนี้การลดลงของระยะเวลาการก่อตัวอาจมีสาเหตุเนื่องจากการลดลงของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ [15] และปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [16] นอกจากนี้ความละเอียดเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นจากผลการทดสอบจึงพบว่า FFA มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ OFA และ MFA เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chindapasirt et al. [3] พบว่างานวิจัยนี้มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วกว่ามาก อาจเนื่องจากเถ้าลอยตั้งต้นมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่แตกต่างกัน ตลอดจนกระบวนการเตรียมเถ้าลอยตั้งต้น ซึ่งในงานวิจัยของ Chindapasirt et al. [3] มีการใช้เถ้าลอยดั้งเดิมในส่วนผสมของ MFA และ FFA ถึงร้อยละ 60 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อีกทั้งจากงานวิจัยของ Rattanasak and Chindapasirt [17] มีการรายงานว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผสมแบบรวม (NaOH และ Na_2SiO_3 ผสมรวมกันก่อน) จะมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าจีโอโพลิเมอร์

ที่มีการผสมแบบแยก (มีการชะละลายด้วย NaOH ก่อน จากนั้นเติม Na_2SiO_3 เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์) ในทำนองเดียวกันกับ รายงานวิจัยของ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ [18] ที่ต้องใช้อัตราส่วนของสารละลาย Na_2SiO_3 /NaOH ในช่วง 1.5-2.0 จะสามารถก่อตัวเป็น

จีโอโพลิเมอร์ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการใช้อัตราส่วนของสารละลาย Na_2SiO_3 /NaOH เท่ากับ 2.0 การก่อตัวที่รวดเร็วของแฉัลลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เมื่อมีความละเอียดที่เพิ่มขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมหรืองานอื่นๆ ที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว



รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

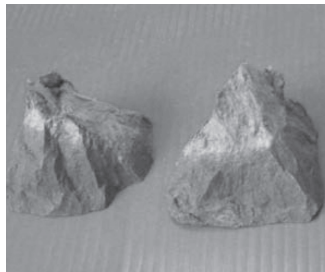
4.2 กำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความละเอียดแฉัลลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ของ OFA มีค่าเท่ากับ 30.4 และ 50.7 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ขณะที่กำลังรับแรงอัดของ MFA และ FFA ที่อายุการบ่ม เท่ากับ 56.2 และ 56.9 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 185 และ 187 เปอร์เซ็นต์ของ OFA ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่ามีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 67.1 และ 77.9 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 132 และ 154 เปอร์เซ็นต์ของ OFA ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2, 19] การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดตามความละเอียดแฉัลลอยอาจเนื่องจากความละเอียดแฉัลลอยที่สูงมีพื้นที่ผิวสูงและมีความเนื้อแก้ว

มากส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้น [3] เมื่อเปรียบเทียบกับแฉัลลอยดั้งเดิม (OFA) ส่งผลให้มีผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ (NASH) เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ (NASH) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CASH) สามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ให้มีขนาดเล็กลงภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์และทำหน้าที่เหมือนมวลรวมเล็กๆ ส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงและกำลังรับแรงอัด [20, 21] จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิบัติจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่า OFA มีลักษณะฉีกหรือรุกรวย ส่วน MFA และ FFA มีลักษณะแบบระเบิด ซึ่งลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงถึงการใช้ความละเอียดแฉัลลอยที่เพิ่มขึ้นสามารถพัฒนาเป็นจีโอโพลิเมอร์กำลังสูงได้

ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส

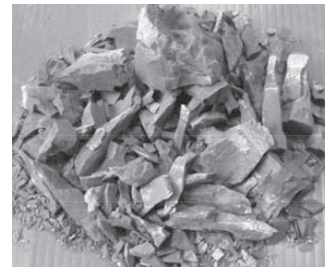
Mix	Symbol	Compressive strength (MPa)			Normalized compressive strength (%)		
		7 days	28 days	90 days	7 days	28 days	90 days
1	OFA	26.8	30.4	50.7	100	100	100
2	MFA	35.2	56.2	67.1	131	185	132
3	FFA	39.6	56.9	77.9	148	187	154



(ก) OFA



(ข) MFA



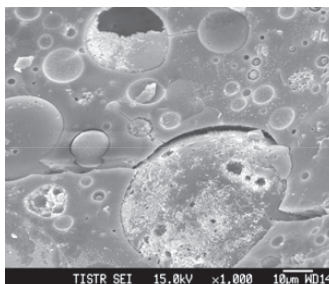
(ค) FFA

รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เฟส

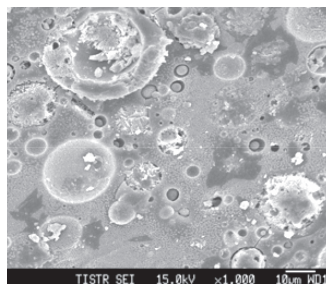
4.3 โครงสร้างทางจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เฟสที่มีการคัดขนาดความละเอียดของตัวอย่างแคลเซียมสูง ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์จากตัวอย่างทั้ง 3 ขนาดมีลักษณะคล้ายกันคือประกอบด้วยอนุภาคเดี่ยวที่ไม่เกิดปฏิกิริยา และมีอนุภาคเดี่ยวฝังอยู่ในเนื้อของระบบจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์จาก MFA และ FFA มีลักษณะโครงสร้างที่

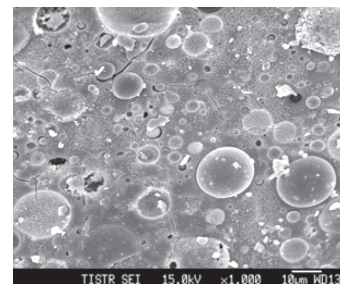
มีแนวโน้มแน่นกว่า OFA เนื่องจากความละเอียดต่ำลงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์สามารถเกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) อยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) [22, 23] ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีการปรับปรุงภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนาอย่างชัดเจน



(ก) OFA



(ข) MFA



(ค) FFA

รูปที่ 6 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อายุการบ่ม 28 วัน

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

5.1 ความละเอียดแตกตัวของแคลเซียมสูงสามารถลดระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้ เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและความมีเนื้อแก้วของแคลเซียมสูง โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัว ปลายของ MFA และ FFA เท่ากับ 9-16 นาที และ 17-28 นาที

5.2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสเพิ่มขึ้น เมื่อแคลเซียมสูงมีความละเอียดมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลผลิตดังกล่าวสามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ โดย MFA และ FFA ที่อายุการบ่ม 90 วัน สามารถให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 67.1 และ 77.9 เมกะปาสคาล

5.3 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้มีการปรับปรุงและความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อแคลเซียมสูงมีความละเอียดเพิ่มขึ้น (MFA และ FFA) เป็นผลเนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ทำให้สามารถเกิดผลผลิตภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ OFA

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้คณบดีศาสตราจารย์พิเศษชั้นสูง มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

7. เอกสารอ้างอิง

1. Davidovits J., 1999, "Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In: Davidovits J, Davidovits R, James C , editors. Géopolymère'99", *Proceedings of Geopolymer Second International Conference, Saint-Quentin*, pp. 9-39.

2. Chindapasirt P., Chareerat T. and Sirivivatnanon V., 2007, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 3, pp. 224-229.

3. Chindapasirt 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, No. 3, pp. 264-270.

4. Phoo-ngernkham T., Chindapasirt P., Sata V., Pangdaeng S. and Sinsiri T., 2013, "Properties of high calcium fly ash geopolymer pastes containing Portland cement as additive", *International Journal of Minerals, metallurgy and Materials*, Vol. 20, No. 2, pp. 214-220.

5. Rukzon S. and Chindapasirt P., 2008, "Development of classified fly ash as a pozzolanic material", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, No. 6, pp. 1097-1102.

6. Erdogdu K. and Trker P., 1998, "Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 1217-1222.

7. Chindapasirt P., Homwuttivong S. and Sirivivatnanon V., 2004, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1087-1092.

8. Diaz E.I., Allouche E.N. and Eklund S., 2010, "Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers", *Fuel*, Vol. 89, No. 5, pp. 992-996.

9. Bakharev T., 2006, "Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 6, pp. 1134-1147.

10. ASTM C618, 2008, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan

for use in cement", *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.01.

11. Rattanasak U., Chalee W. and Chindaprasirt P., 2006, "Study of leaching of lignite fly ash and strength of fly ash based-geopolymer", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 437-446 (In Thai).

12. Phoo-ngernkham T. and Sinsiri, T., 2011, "A study on properties of geopolymer mortar made from fly ash incorporated natural zeolite", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 31-44 (In Thai).

13. ASTM C191, 2008, "Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle", *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

14. ASTM C109, 2002, "Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)", *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

15. Silva P.D., Sagoe-Crenstil K. and Sirivivatnanon V., 2007, "Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 4, pp. 512-518.

16. Temuujin J., van Riessen A. and Williams R., 2009, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 167, No. 1-3, pp. 82-88.

17. Rattanasak U. and Chindaprasirt P., 2009, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer", *Minerals Engineering*, Vol. 22, No. 12, pp. 1073-1078.

18. Rattanasak U. and Chindaprasirt P., 2008, "A comparative study on properties of geopolymeric materials", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 371-381 (In Thai).

19. Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J. and Rangan B.V., 2004, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 467-472.

20. Yip C.K., Lukey G.C. and Van Deventer J.S.J., 2005, "The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 1688-1697.

21. Yip C.K. and Van Deventer J.S.J., 2003, "Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder", *Journal of Materials Science*, Vol. 38, No. 18, pp. 3851-3860.

22. Guo X., Shi H. and Dick W.A., 2010, "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 2, pp. 142-147.

23. Somna K., Jaturapitakkul C., Kajitvichyanukul P. and Chindaprasirt P., 2011, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature", *Fuel*, Vol. 90, No. 6, pp. 2118-2124.