

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยบมด้วยเตาอบไฟฟ้า

วินัย หอมศรีประเสริฐ¹ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะการบ่มที่เหมาะสมที่สุดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แก้าลอยด้วยเตาอบไฟฟ้า ทั้งในแง่ของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดภายใต้แนวคิดของการประหยัดพลังงานและความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ ประเด็นแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแก้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) โดยแปรค่าที่ 2.0 และ 2.5 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) โดยแปรค่าที่ 0.5 และ 1.0 ส่วนประเด็นที่สอง เป็นการศึกษาค่าอิทธิพลการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยด้วยเตาอบไฟฟ้าโดยศึกษาที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะแปรค่าระยะเวลาการบ่มที่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าสภาวะการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ ใช้ระยะเวลาบ่มที่ 24 ชั่วโมง ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมได้แก่ 65 องศาเซลเซียส สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 0.5 และที่ 75 องศาเซลเซียส สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ / มอร์ตาร์ / แก้าลอย / กำลังรับแรงอัด / เตาอบไฟฟ้า

* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
และ วิศวกรโยธา บริษัท เอพี (ไทยแลนด์) จำกัด (มหาชน)

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar Cured with Electric Oven

Winai Homsriprasert¹ and Burachat Chatveera^{2*}

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

This research paid attention on the determination of the optimum condition (in terms of both temperature and curing period) for curing via electric oven of fly ash-based geopolymer mortars. The aim was to achieve the highest possible compressive strength at minimum energy consumption; environmental friendliness was also of concern. The study was divided into two parts. The first part was to study the influences of the fly ash-to-activator (FA/AS) ratio of 2.0 to 2.5 and the mass ratio of Na_2SiO_3 -to- NaOH (NS/NH) of 0.5 and 1.0. The second part was to study the influence of the curing temperature (55°C, 65°C, 75°C and 85°C) and curing period (24, 48 and 72 hours). The optimum points were noted to be the use of the curing temperature of 65°C for 24 hours and the mass ratio of Na_2SiO_3 -to- NaOH (NS/NH) of 0.5; or the use of the curing temperature of 75°C for 24 hours and the mass ratio of Na_2SiO_3 -to- NaOH (NS/NH) of 1.0.

Keywords : Geopolymer / Mortar / Fly Ash / Compressive Strength / Electric Oven

* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Doctoral Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Civil Engineer, AP (Thailand) Public Company Limited.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีความพยายามค้นคว้าวิจัยในการนำวัสดุปอซโซลานมาผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต แต่วิธีการดังกล่าวยังคงไม่ใช่วางออกที่ตอบโจทย์ด้านความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะสัดส่วนผสมในโครงสร้างคอนกรีตยังคงมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมหลักอยู่ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก อีกทั้งก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยการหาวัสดุอื่นมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ผสม (Blended Cement) ซึ่งตัวอย่างวัสดุดังกล่าว ได้แก่ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ดังนั้น จึงมีความพยายามในการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ใช้วัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาและอะลูมินา ผลิตวัสดุยึดประสานที่เรียกว่า “จีโอโพลีเมอร์”

จีโอโพลีเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) โดยการกระตุ้นด้วยด่างและบ่มด้วยความร้อน ในการนำต่างมาผลิตจีโอโพลีเมอร์เชิงอุตสาหกรรมควรมีระบบการจัดการส่วนที่เหลือจากการผลิตที่ดีและรอบคอบก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสมบัติเด่นของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีหลายประการ ได้แก่ ค่ากำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ การหดตัวต่ำ ความคืบต่ำ ทนไฟ ทนทานต่อสภาวะการแข็งและการละลายของน้ำสลัดกัน ทนทานต่อการสัมผัสสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของกรดเป็นต้น [1] เนื่องจากจีโอโพลีเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si)

และอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งถูกชะออกมาจากวัสดุโดยสารละลายต่างความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวแบบควบแน่นหรือโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลีเมอร์ (Polymer) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับการเชื่อมกันของโมเลกุลหินที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจึงทำให้จีโอโพลีเมอร์มีสมบัติเด่นสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตได้ [2]

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตจีโอโพลีเมอร์พบว่ายังต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงในประเด็นการออกแบบส่วนผสมและวิธีการบ่ม เพื่อให้การผลิตจีโอโพลีเมอร์มีความคุ้มค่าทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะนอกจากหลักการแนวคิดที่จะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลของพลังงานที่ใช้ในการบ่มด้วย เพื่อให้จีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง ดังนั้นหลักการแนวคิดที่จะพัฒนาการผลิตจีโอโพลีเมอร์ที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านส่วนผสมและวิธีการบ่มจึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ ทั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมและสภาวะการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่มีสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้ลดย

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 วัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกต (Solid aluminosilicate materials)

วัสดุผงที่ใช้เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินาในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [3]

2.1.2 มวลรวมละเอียด

ใช้ทรายแม่น้ำละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, S.S.D.) ตามมาตรฐาน ASTM C778 [4]

2.1.3 สารละลายต่าง

สารละลายต่างที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS) ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมออกไซด์ (Na_2O), ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และน้ำ (H_2O) เท่ากับ 9.58, 28.75 และ 61.67 ร้อยละโดยมวล ตามลำดับ

2.1.4 น้ำ

สำหรับน้ำที่ใช้เตรียมสารละลายต่างใช้เป็นน้ำกลั่น

2.2 วิธีการวิจัย

2.2.1 การทดสอบสมบัติของแก้วลอย

ประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สำหรับสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ความต้องการน้ำ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และดัชนีกำลัง ส่วนโครงสร้างทางจุลภาคของแก้วลอย ทำการศึกษาภาพถ่ายขยายโดยวิธีเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) การกระจายขนาดคละของอนุภาคแก้วลอยโดยวิธีเทคนิค Particle Size Distribution (PSD) และการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคแก้วลอยโดยวิธีเทคนิค X - Ray Diffraction (XRD)

2.2.2 การทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในสถานะสด

ได้แก่ การทดสอบการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [5] และระยะเวลาการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C191 [6]

สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ในสถานะสด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแก้วลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) เท่ากับ 2.0 และ 2.5

2. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 0.5 และ 1.0

3. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 10 โมลาร์

4. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทรายต่อแก้วลอย เท่ากับ 2.0

สำหรับขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในสถานะสด มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. ผสมแก้วลอยและสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพาย 285 \pm 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

2. เททรายลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 3 นาที

3. เติสารละลาย Na_2SiO_3 ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 2 นาที

4. นำจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเสร็จซึ่งอยู่ในสถานะสดไปทดสอบการไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัว

1. การไหลแผ่

เนื่องจากร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐานบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสถานะปั้นได้ ในงานวิจัยนี้จึงทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยวิธีโต๊ะ การไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ศึกษาความชื้นเหลว (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109

2. ระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อทดสอบการไหลแผ่แล้ว จึงทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์ โดยในงานวิจัยนี้ประยุกต์วิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวสำหรับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat needle apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับการทดสอบการไหลแผ่และระยะเวลาการก่อตัว

ชุดตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		น้ำหนัก (กรัม)			
	เถ้าลอย/ สารละลายต่าง (FA/AS)	สารละลาย Na ₂ SiO ₃ / NsOH (NS/NH)	ทราย	เถ้าลอย	สารละลาย Na ₂ SiO ₃ / NaOH	สารละลาย NaOH
1) 2.0FA0.5	2.0	0.5	600	300	50	100
2) 2.0FA1.0	2.0	1.0	600	300	75	75
3) 2.5FA0.5	2.5	0.5	600	300	40	80

หมายเหตุ : 1) น้ำหนักของส่วนผสมที่แสดงในตารางใช้ในการเตรียมตัวอย่าง 1 หม้อผสม ที่มีน้ำหนักโดยรวม 1,050 กรัม เท่ากันหมดทุกหม้อผสม

2) ทุกชุดตัวอย่างใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทรายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 2.0 โดยน้ำหนัก

3) สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่างสามารถอธิบายได้ ดังนี้

- FA หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย (Fly Ash)
- ตัวเลข xx หน้า FA หมายถึง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)
- ตัวเลข xx หลัง FA หมายถึง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH)
- เช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5 หมายถึง ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างเท่ากับ 2.0 และมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5

2.2.3 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสม และสภาวะการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การกำหนดสัดส่วนผสม

1. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) เท่ากับ 2.0 และ 2.5
2. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 0.5 และ 1.0
3. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 โมลาร์
4. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทรายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 2.0

การผสมและการหล่อตัวอย่าง

1. ผสมเถ้าลอยและสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพาย 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
2. เททรายลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 3 นาที
3. เทสารละลาย Na₂SiO₃ ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 1 นาที
4. เทน้ำพิเศษ (Extra Water) ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 1 นาที
5. เทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็นสองชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง ตามมาตรฐาน ASTM C109

6. ปิดผิวหน้าตัวอย่างโดยการห่อหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำระหว่างการทำปฏิกิริยา

การบ่ม

เมื่อทำการหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้สำเร็จแล้ว ตัวอย่างจะนำไปบ่มต่อ 2 สภาวะ ได้แก่

1. การบ่มที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อทำการหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสร็จแล้ว ตัวอย่างจะถูกบ่มในสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิห้องโดยตัวอย่างจะอยู่ในแบบหล่อ และปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกทึบที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2. การบ่มในเตาอบไฟฟ้า

ตัวอย่างที่อยู่ในแบบหล่อและปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกจะถูกทิ้งไว้ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงแกะแบบออก จากนั้นนำไปบ่มในเตาอบไฟฟ้า ด้วยสภาวะ การบ่ม 12 กรณี ได้แก่ อุณหภูมิ 55°C, 65°C, 75°C และ 85°C โดยแต่ละอุณหภูมิจะทำการบ่ม เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติเบื้องต้นของถ้ำลอย

3.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Chemical Compositions	% by weight	
	Fly Ash	Ordinary Portland Cement
Silicon Dioxide (SiO ₂)	36.44	20.66
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	20.48	5.38
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	15.76	3.32
Calcium Oxide (CaO)	16.35	65.20
Magnesium Oxide (MgO)	3.55	1.39
Potassium Oxide (K ₂ O)	2.25	0.38
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.98	0.07
Sulfur Trioxide (SO ₃)	3.35	2.24
Titanium Dioxide (TiO ₂)	0.37	0.25
Free CaO	1.24	0.50

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยที่นำมาใช้กับเถ้าลอยตามมาตรฐาน

Chemical Compositions	*Fly Ash	**Class of Fly Ash	
		F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), ร้อยละต่ำสุด	72.68	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), ร้อยละสูงสุด	3.35	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ร้อยละสูงสุด	0.06	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI), ร้อยละสูงสุด	0.59	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์เทียบเท่า (Na_2O), ร้อยละสูงสุด	0.98	1.5	1.5

หมายเหตุ : 1) สัญลักษณ์ (*) หมายถึง เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2) สัญลักษณ์ (**) หมายถึง ประเภทของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C618

3.1.2 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นว่า เถ้าลอย มีค่าความต้องการน้ำ

ความถ่วงจำเพาะ และพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวจะพบว่าปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความละเอียดมากกว่าเถ้าลอย

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ) (Loss On Ignition, %)	0.59	1.50
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) (Moisture Content, %)	0.06	0.19
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม ² /ก) (Surface Area, cm ² /g)	2135	3375
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.25	3.15
ความละเอียดขนาดของอนุภาค (ร้อยละผ่าน, ไมโครเมตร) (Fineness Particle Size, %Passing: Micrometer)		
75 ไมโครเมตร	24.4	5.2
45 ไมโครเมตร	38.6	3.6
36 ไมโครเมตร	44.6	90.6
ดัชนีการพัฒนากำลัง (ร้อยละ) (Strength Activity Index, day)		
ที่อายุ 7 วัน	80.7	100
ที่อายุ 28 วัน	90.8	100
ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละ) (Water Requirement, % of control)	95.8	100
ค่าความหนาแน่น (Bulk Density, kg/m ³)	958	1000

3.1.3 โครงสร้างทางจุลภาค

1. ลักษณะของอนุภาคโดยวิธีเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ ภาพถ่ายขยายของเถ้าลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ผลการทดสอบพบว่าอนุภาคของตัวอย่างเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงกลมและมีขนาดเล็กใหญ่

2. ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยโดยวิธีเทคนิค Particle Size Distribution (PSD)

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่า ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 14.71 ไมโครเมตร

3. การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคเถ้าลอยโดยวิธีเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

จากผลการทดสอบพบว่าองค์ประกอบธาตุที่พบมากที่สุดคือ แคลเซียมซัลเฟต หรือ Anhydrite (CaSO₄)

ซึ่งผลึกจะมีลักษณะเป็นแบบ Orthorhombic รองลงมาคือ ซิลิกาออกไซด์ หรือ Quartz alpha (SiO_2) โดยผลึกมีลักษณะเป็นแบบ Hexagonal ถัดมาคือ Iron Silicon Oxide (Fe_2O_4) โดยผลึกมีลักษณะเป็นแบบ Cubic และสุดท้ายคือ Mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) โดยผลึกจะมีลักษณะเป็นแบบ Orthorhombic

3.2 สมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในสภาวะสด

3.2.1 การไหลแผ่

จากผลการทดสอบ พบว่า ร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างทุกชุด (ที่ไม่ได้เติมน้ำ) ไม่อยู่ในมาตรฐานกำหนด (110 ± 5) โดยชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5 และ 2.0FA1.0 มีค่า

ร้อยละการไหลแผ่เท่ากับ 42 และ 27 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 ส่วนชุดตัวอย่างอื่นๆ ไม่สามารถหาค่าไหลแผ่ได้เนื่องจากมีความเหนียวชั้นสูง (บางชุดตัวอย่างเกิดการแข็งตัวทันที) จึงปรับปรุงค่าการไหลแผ่ด้วยการเติมน้ำ (ไม่ใช่สารลดน้ำพิเศษ เนื่องจากต้องการคงไว้ซึ่งแนวคิดในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม) เพิ่มลงไปในทุกชุดตัวอย่างเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง 115 ตามที่มาตรฐานกำหนด และเพื่อให้ค่าร้อยละของการไหลแผ่เกินมาตรฐาน จึงค่อยๆ ปรับปริมาณน้ำเพิ่ม เริ่มจากร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์-เพสต์ (แก้ลอย + สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$) ผลการทดสอบร้อยละการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์ทั้งกรณีไม่เติม และเติมน้ำเพิ่ม ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ร้อยละของการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

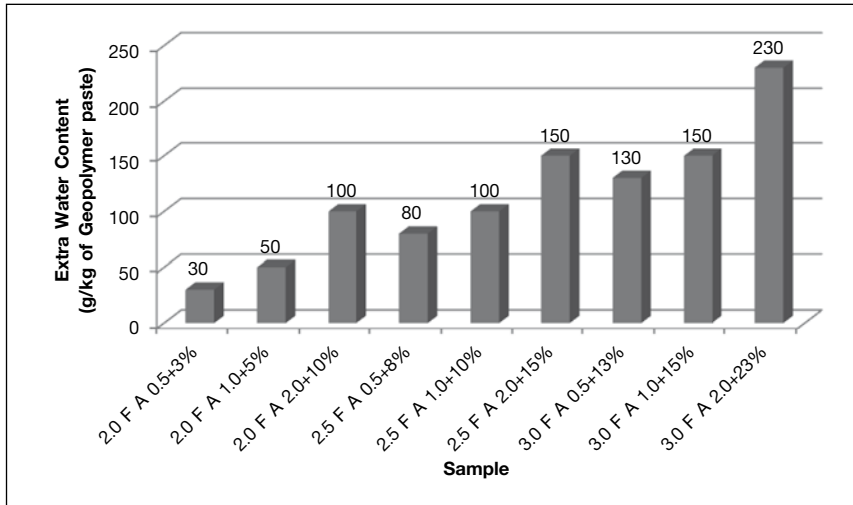
Samples	No Extra Water	Extra Water (% of Geopolymer paste)				
		3%	5%	8%	10%	13%
1) 2.0FA0.5	42	112*	152	NA	-	-
2) 2.0FA1.0	27	61	110*	245	NA	-
3) 2.5FA0.5	NA	23	67	113*	152	NA

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH) พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนแก้ลอยต่อสารละลายต่างโดยน้ำหนัก (FA/AS) ที่เท่ากับปริมาณน้ำที่เติมน้ำลงไป (จนตัวอย่างมีค่าร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐานกำหนด) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารละลาย NS/NH เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5 และ 2.0FA1.0 ปริมาณน้ำที่เติมลงไปจนได้ค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 3 และ 5 ของปริมาณจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งผลที่เกิดขึ้นพบว่า การพัฒนาโครงสร้างภายในของวัสดุจีโอ-

โพลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องเมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้น [7] ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารละลาย Na_2SiO_3 จะช่วยเติม SiO_2 ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อปรับอัตราส่วน Si/Al ให้เหมาะสมในการเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ [8] ดังนั้นเมื่อเติมสารละลาย Na_2SiO_3 ในปริมาณที่สูงกว่าก็จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดปฏิกิริยาและจับตัวกันได้ดีกว่า จึงต้องใช้น้ำในปริมาณมากกว่าเพื่อที่จะทำให้ตัวอย่างมีความชื้นเพียงพอเหมาะสมทำให้มีค่าร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐานที่กำหนด และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ FA/AS ที่มีต่อปริมาณน้ำพิเศษที่เติมเพิ่ม พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก

ของ NS/NH เท่ากัน ปริมาณน้ำที่เติมลงไปจนตัวอย่าง มีค่าร้อยละการไหลแผ่ตามอัตราส่วนมาตรฐานกำหนดจะ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลาย FA/AS เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 1

มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลาย FA/AS เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาณน้ำที่เติมจนทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ มีค่าร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 กำหนด

3.2.2 ระยะเวลาการก่อตัว

เนื่องจากการทดสอบการไหลแผ่ของตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์ในกรณีที่ไม่เติมน้ำเพิ่มพบว่า ร้อยละการไหลแผ่ไม่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C109 กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 5 นั่นคือความสามารถทำงานได้ (ความง่ายในการเทและอัดแน่น) ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเฉพาะชุดตัวอย่างที่เติมน้ำเพิ่มลงไปจนทำให้ได้ร้อยละการไหลแผ่อยู่ในมาตรฐานกำหนด รายละเอียดของสัดส่วนผสมของชุดตัวอย่างดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6 โดยการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ประยุกต์วิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวสำหรับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat Needle Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191 ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7 นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) และสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) มีอิทธิพลต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อย่างเด่นชัด

ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เดิมน้ำจันมีค่าร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109

Samples	Ratio by Weight		Weight (g)				
	FA/AS	NS/NH	Fly Ash	Alkaline Solution	Na ₂ SiO ₃	NaOH	*Extra Water
1) 2.0FA0.5+3%	2.0	0.5	300	150	50	100	14
2) 2.0FA1.0+5%	2.0	1.0	300	150	75	75	23
3) 2.5FA0.5+8%	2.5	0.5	300	120	40	80	34

ตารางที่ 7 เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะสุดท้ายของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Samples	Setting Time (minutes)	
	Initial	Final
1) 2.0FA0.5+3%	82	106
2) 2.0FA1.0+5%	27	34
3) 2.5FA0.5+8%	52	78

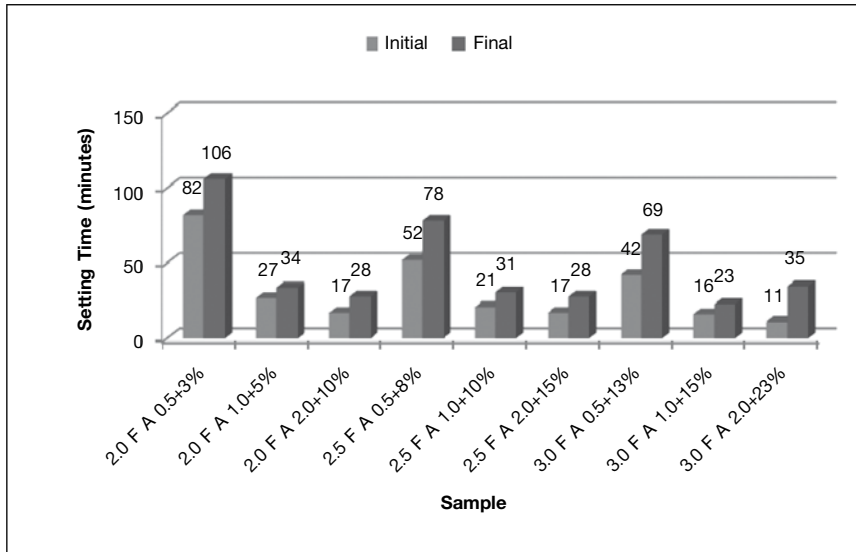
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วน NS/NH พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ FA/AS เท่ากัน ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะสุดท้ายมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน NS/NH เพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นชัดเจนในรูปที่ 2 ดังเช่นชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3% และ 2.0FA1.0+5% (อัตราส่วน FA/AS เท่ากัน คือ 2.0 และมีอัตราส่วน NS/NH ต่างกัน คือ 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ) มีเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 82 และ 27 นาที ตามลำดับ และเวลา การก่อตัวระยะสุดท้าย เท่ากับ 106 และ 34 นาที ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตและแก้วลอยมีส่วนช่วยในการเติมซิลิกอนหรือซิลิกาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นได้ดี [8]

สำหรับกรณีอิทธิพลของอัตราส่วนแก้วลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวพบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก

ของสารละลาย Na₂SiO₃ ต่อ NaOH (NS/NH) เท่ากัน ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะสุดท้ายมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วน FA/AS เพิ่มขึ้น ดังเช่นชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3% และ 2.5FA0.5+8% (อัตราส่วน NS/NH เท่ากัน คือ 0.5 และมีอัตราส่วน FA/AS ต่างกัน คือ 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ) มีระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 82 และ 52 นาที ตามลำดับ และระยะเวลาการก่อตัวระยะสุดท้าย เท่ากับ 106 และ 78 นาที ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วนแก้วลอยต่อสารละลายต่างมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวต้องการซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ที่มีอยู่ในแก้วลอย [9] ดังนั้นเมื่อส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีปริมาณ แก้วลอยมากกว่าจึงมีปริมาณ SiO₂ และ Al₂O₃ มากกว่า ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจึงเกิดได้สูง ทำให้โครงสร้างภายในแข็งแรงอย่างรวดเร็ว ระยะเวลาการก่อตัวจึงน้อยกว่า

ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จึงเกิดได้มากกว่า ดังในกรณีนี้ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายมากกว่า นั่นคือ ตัวอย่างที่มีปริมาณแก้วลอยหรือสารละลาย Na_2SiO_3

สูงกว่าจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดปฏิกิริยา และสามารถแข็งตัวอย่างรวดเร็วกว่า ดังนั้นระยะเวลาการก่อตัวจึงน้อยกว่า [10]



รูปที่ 2 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.3 สมบัติกำลังรับแรงอัด เมื่อจีโอโพลิเมอร์ถูกกระตุ้นด้วยความร้อน

3.3.1 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า

เมื่อหล่อตัวอย่างทั้ง 3 ส่วนผสม ได้แก่ 2.0FA0.5, 2.0FA1.0 และ 2.5FA0.5 เสร็จเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีบ่มในเตาอบไฟฟ้าซึ่งแปรค่าอุณหภูมิในการบ่มที่ 55, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะแปรค่าระยะเวลาในการบ่มที่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมงตามลำดับ จากผลการทดสอบดังรูปที่ 3, 4 และ 5 พบว่าเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ทั้ง 3 ส่วนผสม ได้แก่ 2.0FA0.5, 2.0FA1.0 และ 2.5FA0.5 โดยพิจารณาในแง่ของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทั้ง 3 ส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด พบว่าส่วนผสมของ 2.0FA0.5 มีสภาวะการบ่มที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง เท่ากับ 246 กก./ซม.² ในขณะที่ส่วนผสมของ 2.0FA1.0 มีสภาวะ

การบ่มที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง เท่ากับ 107 กก./ซม.² และส่วนผสมของ 2.5FA0.5 มีสภาวะการบ่มที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เท่ากับ 304 กก./ซม.²

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการบ่มที่ 24 ชั่วโมง พบว่าที่ส่วนผสม 2.0FA0.5 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 242 กก./ซม.² ในขณะที่ส่วนผสมของ 2.0FA1.0 ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 105 กก./ซม.² ซึ่งเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการบ่มที่ 24 ชั่วโมงกับที่ 48 ชั่วโมง พบว่าส่วนผสมของ 2.0FA0.5 และ 2.0FA1.0 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันมากเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มที่ค่าเดียวกัน แต่ที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ต้องใช้เวลาในการบ่มนานขึ้นอีก 24 ชั่วโมง (1 วัน) จึงเป็นแนวทางที่ไม่เหมาะสมในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ต้องเน้นเรื่องการรักษาสีแวดล้อมทั้งในด้านการได้มาของวัตถุดิบ และการประหยัดพลังงานในการผลิต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้สภาวะการบ่มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับส่วนผสมของ 2.0FA0.5 คือ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนผสมของ 2.0FA1.0 คืออุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และที่ส่วนผสม 2.5FA0.5 คืออุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้การบ่มจีโอโพลีเมอร์เป็นระยะเวลาเวลานานทำให้โครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์ไม่แข็งแรง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างที่สามารถแข็งตัวได้ของจีโอโพลีเมอร์ถูกทำลายทำให้เกิดการสูญเสียน้ำ และการหดตัวที่มากเกินไป [11] อีกทั้งยังพบว่า การบ่มที่เริ่มต้นด้วยอุณหภูมิที่สูง (มากกว่า 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส) ไม่ได้ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดเหมือนกับการบ่มที่อุณหภูมิห้องก่อนบ่มด้วยความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [12] เนื่องจากพบว่า การเก็บจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากหล่อตัวอย่างเสร็จก่อนการบ่มด้วยความร้อน (Pre-curing) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงบ่มที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้) จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าใกล้เคียงกับการเก็บจีโอโพลีเมอร์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากหล่อตัวอย่างเสร็จแล้วบ่มด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเก็บตัวอย่าง จีโอโพลีเมอร์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนการบ่มด้วยความร้อนจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้ลดย [13]

3.3.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH)

เมื่อหล่อตัวอย่างทั้ง 3 ส่วนผสม ได้แก่ 2.0FA0.5, 2.0FA1.0 และ 2.5FA0.5 เสร็จเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีบ่มในเตาอบไฟฟ้า ซึ่งแปรค่าอุณหภูมิในการบ่มที่ 55, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะแปรค่าระยะเวลาในการบ่มที่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 3, 4 และ 5 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่เท่ากัน คือส่วนผสมของ

2.0FA0.5 และ 2.0FA1.0 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้ลดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าลดลงและปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

จากลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่ในการชะลิกาและอะลูมินาออกจากเถ้าลอย ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการเกิดจีโอโพลีเมอร์ ดังนั้นหากมีปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง และมีปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่พอเหมาะเพื่อปรับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันเมื่อนำไปกระตุ้นด้วยความร้อน จะทำให้ได้จีโอโพลีเมอร์ได้ลดยที่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น [14]

3.3.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)

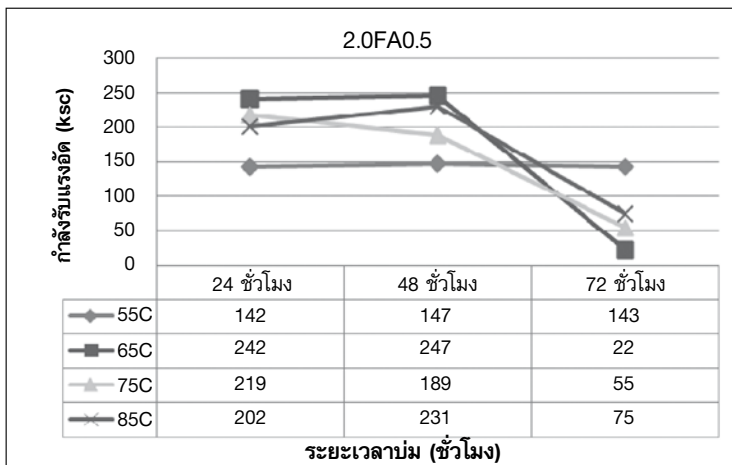
เมื่อหล่อตัวอย่างทั้ง 3 ส่วนผสม ได้แก่ 2.0FA0.5, 2.0FA1.0 และ 2.5FA0.5 เสร็จเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีบ่มในเตาอบไฟฟ้า ซึ่งแปรค่าอุณหภูมิในการบ่มที่ 55, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะแปรค่าระยะเวลาในการบ่มที่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 3, 4 และ 5 พบว่า เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เท่ากัน คือส่วนผสมของ 2.0FA0.5 และ 2.5FA0.5 พบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้ลดย ที่สภาวะบ่ม 65 ถึง 75 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาบ่ม 24 ถึง 48 ชั่วโมง ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 2.5FA0.5 จะมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 2.0FA0.5 ที่สภาวะบ่มเดียวกัน

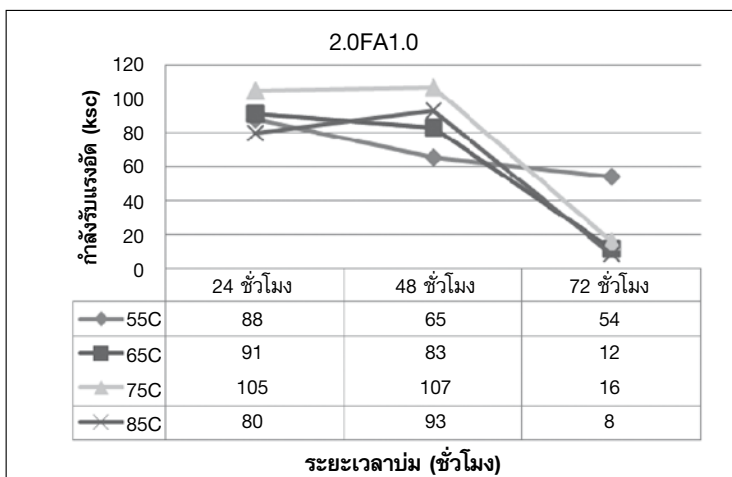
จากลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากสารละลายต่างที่ใช้กระตุ้นการเกิด จีโอโพลีเมอร์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะกระบวนการเกิดจีโอโพลีเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะ

ต่างของซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะออกมาจากวัสดุแหล่งกำเนิดโดยสารละลายไฮดรอกไซด์จะทำให้หน้าที่ช่วยชะซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ออกจากวัสดุ ส่วนสารละลายซิลิเกตเป็นตัวช่วยเติมซิลิกาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อปรับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาให้เหมาะสมในการเกิดจีโอโพลิเมอร์ [11] ซึ่งความสามารถในการชะและละลายนี้ทำให้อะตอมของซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ที่ผิววัสดุแหล่งกำเนิดละลายออกมาโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของต่างเกิดเป็นอะลูมิเนต (AlO₄)

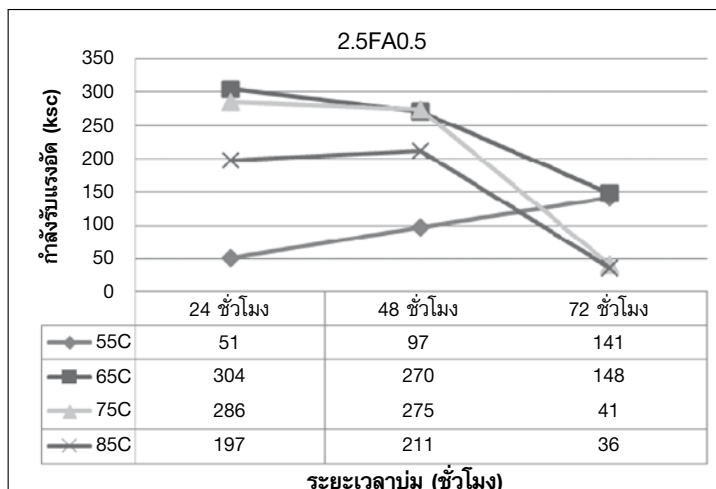
และซิลิเกต (SO₄) ในสารละลายแล้วไอออนของสารริเริ่ม (Precursor) รวมตัวกันเกิดเป็นเจลโมโนเมอร์ (Monomer) และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนในสภาวะที่เหมาะสมทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มจะทำให้เกิดกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นการรวมตัวแบบควบแน่น (Polycondensation) ของโมโนเมอร์และเกิดเป็นโครงสร้างโพลิเมอร์ (Polymer) ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงมากขึ้นตามไปด้วย [15]



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าของ 2.0FA0.5



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าของ 2.0FA1.0



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าของ 2.5FA0.5

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยอิทธิพลของสัดส่วนผสมและสถานะการบ่มที่มีต่อสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย ทั้ง 3 ส่วนผสม ได้แก่ 2.0FA0.5, 2.0FA1.0 และ 2.5FA0.5 เมื่อพิจารณาในแง่ของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม พบว่าสถานะการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ ใช้ระยะเวลาบ่มที่ 24 ชั่วโมงทั้ง 3 ส่วนผสม ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสม ได้แก่ 65 องศาเซลเซียส สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 0.5 และที่ 75 องศาเซลเซียส สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชาญวุฒิ ศรีรัตนกุล คุณสุนีย์รัตน์ ศรีสุวรรณ รวมทั้งบุคลากร บริษัท เอพี (ไทยแลนด์) จำกัด (มหาชน) ประจำปีโครงการเดอะเซ็นโพรรามอินทรา ทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกและโอกาสในการทำวิจัย อีกทั้งบุคลากรห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และที่สำคัญยิ่งขอขอบพระคุณ คุณสิริธร จิตารีย์ ผู้ช่วยในการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการและการจัดทำรายงาน

6. เอกสารอ้างอิง

1. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., and Van Deventer, J.S.J., 2007, "Geopolymer Technology: The Current State of The Art", *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 2917-2933.
2. Davidovits, J., 1994, "High-Alkali Cements for 21st Century Concretes", *Paper Presented at The V. Mohan Malhotra Symposium on Concrete Technology: Past, Present and Future*, University of California, Berkeley.
3. American Society for Testing Materials, 2009, ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol 04.02 Concrete and Aggregate.
4. American Society for Testing Materials, 2009, ASTM C778 Standard Specification for

Standard Sand, *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Vol 04.02 Concrete and Aggregate.

5. American Society for Testing Materials, 2009, ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Vol 04.02 Concrete and Aggregate.

6. American Society for Testing Materials, 2009, ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of International, *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Vol 04.02 Concrete and Aggregate.

7. Duxson, P., Provis J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Krivenand, W.M., and Van Deventer, J.S.J., 2005 "Understanding The Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties", *Colloids and Surfaces*, Vol. 269, pp. 47-58.

8. Ikeda, K., 1998, "Consolidation of Mineral Powders by The Geopolymer Binder Technique for Material Use", *Journal of Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol. 114, pp. 497-500.

9. Davidovits, J., 1991, "Geopolymer: Inorganics Polymeric New Materials", *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, No. 8, pp. 1633-1656.

10. Provis, J.L., and Van Deventer, J.S.J., 2007, "Geopolymerisation Kinetics 2: Reaction Kinetic Modelling", *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, pp. 2318-2329.

11. Khaliland, M.Y., and Merz, E., 1994, "Immobilisation of Intermediate-level Waste in Geopolymers", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 211, No. 2, pp.141-148.

12. Van Jaarsvelds, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., and Lukey, G.C., 2002, "The Effect of Compositions and Temperature on Properties of Fly Ash and Kaolinite-based Geopolymers", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89, pp. 63-67.

13. Bakharev, T., 2005, "Geopolymer Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1224-1232.

14. Fernandez-Jimenez, A., and Palomo, A., 2003, "Characterisation of Fly Ashes: Potential Reactivity as Alkaline Cements", *Fuel*, Vol. 82, pp. 2259-2265.

15. Xu, H., and Van Deventer, J.S.J., 2000, "The Geopolymerisation of Alumino-Silicates Minerals", *International Journal of Mineral Processing*, vol. 59, No.3, pp. 247-266.