

## อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย

## Influence of Microwave-accelerated Curing on the Compressive strength of

## Fly ash-based Geopolymer Mortar

สันติ ประมูลมาก<sup>1</sup> บุรฉัตร ฉัตรวีระ<sup>2</sup> และ ฉันทันท์ มากุล<sup>3</sup><sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120<sup>3</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220E-mail: <sup>1</sup>gorly44@gmail.com, <sup>2</sup>cburacha@engr.tu.ac.th, <sup>3</sup>shinomomo7@hotmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยภายใต้การบ่มเร่งด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยมอร์ตาร์มีอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก สมบัติที่ศึกษาได้แก่ ความต้องการน้ำ ระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น และ โครงสร้างทางจุลภาค นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบ กำลังอัดที่ได้จากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟกับการบ่มด้วยเตาอบ ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดและระยะเวลาก่อตัวต่ำลง โดยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าลอยซึ่งบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟเท่ากับ 100 วัตต์ ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 60 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) และคงที่ไว้ 45 นาที ที่อายุ 1 วัน มีค่าเทียบการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

## Abstract

This paper presents the compressive strength development of fly-ash based geopolymer mortar when subjected to microwave-accelerated curing. Fly ash-based geopolymer mortars have mixture proportions of the  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ratios of 0.5, 1.5 and 2.5 by weight. The parametric test includes water requirement, setting time and early-age compressive strength development. Further the compressive strengths of microwave-cured geopolymer-mortar specimens are also compared to curing in electric oven. The results indicated that increased  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

ratio gained decreasing compressive strengths and setting times. The fly-ash based geopolymer mortars cured by microwave energy at a power level of 100 watt and then controlled temperature not over  $60^{\circ}\text{C}$  for 45 min are similar to cure in oven at a temperature level of  $60^{\circ}\text{C}$  for 24 h.

## 1. คำนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานทำจากสารปอซโซลานที่มีองค์ประกอบเป็น ซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ ดังนั้นสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าลอยและดินขาวเผา [1]

กระบวนการในการบ่มจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัยที่ผ่านมากระทำที่อุณหภูมิห้องแล้วบ่มแห้งด้วยความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้า (Electric oven) หรือบ่มด้วยไอน้ำอุณหภูมิสูง อุณหภูมิบ่มอยู่ในช่วง 25 ถึง  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ถึง 4 วัน [2] การบ่มด้วยกระบวนการดังกล่าวเป็นการให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัสดุ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น [3] และเมื่อมองในแง่การพัฒนาจึงได้มีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟไม่เหมือนการให้ความร้อนโดยวิธีดั้งเดิมนั้นคือ เมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในโมเลกุลที่มี

RECEIVED 29 May, 2013

ACCEPTED 31 July, 2013

ขั้วไฟฟ้า สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำโมเลกุลเหล่านั้นให้หมุนขั้วเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงสลับไปมาเกิดเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุทำให้การกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ สม่ำเสมอ [4]

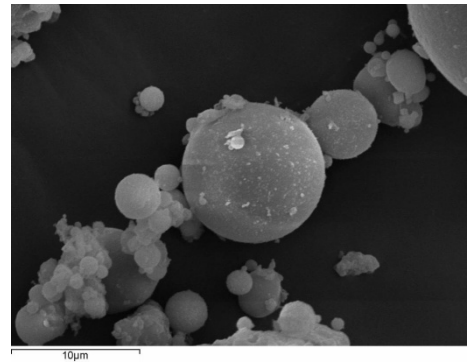
**2. ระเบียบวิธีวิจัย**

**2.1 วัสดุ**

วัสดุผงที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์คือเถ้าลอย และทราย โดยเถ้าลอยที่ใช้เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินปีทูนินัส จ.ระยอง โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 37.22 ไมโครเมตร จากภาพถ่ายขยายของเถ้าลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 3500 เท่า ดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีลักษณะทรงกลมขนาดคละกัน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) โดยมีมวลเท่ากับร้อยละ 32.62 ซึ่ง

ถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) และไอรอนออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.18, 13.15, 6.11 และ 5.09 โดยมวลตามลำดับ จะเห็นได้ว่า SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณสูง เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 1 อนุภาคของเถ้าลอย (กำลังขยาย 3500 เท่า)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบเคมี	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Free CaO
ร้อยละโดยน้ำหนัก	32.62	29.18	13.15	6.11	5.09	2.1	0.95	0.62	10.17

ทรายแม่น้ำละเอียดขนาด (Graded standard sand) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface-dry) ดังที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C778 [5]

สารละลายด่างที่ใช้มี 2 ชนิด คือสารละลาย อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkaline Hydroxide) ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkali-metal Silicate) ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

**2.2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์**

ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย 1) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ต่อ NaOH แปรค่า 0.5, 1.5 และ 2.5, 2) ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์ และ 3) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2.5 ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2

### 2.3 การผสมและการหล่อ

ขั้นตอนการผสมอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดที่ใช้ในการทดสอบสมบัติในสภาวะสควมมีรายละเอียดเริ่มจากการผสมเข้าลวอยทรายและสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพาย  $285 \pm 10$  รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วเทสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวต้ออีก 2 นาที เทอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาด  $\phi 5$  เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็นสองชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง ตามมาตรฐาน ASTM C109 [6] ในการวิจัยนี้ใช้น้ำเพื่อทำให้ตัวอย่างอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดมีค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 [6] นำไปทำการอัดแน่นด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างโดยการหุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันน้ำระเหยออก

### 2.4 วิธีการบ่ม

#### 2.4.1 การบ่มที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อตัวอย่างอายุครบ 24 ชม. จะทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเพื่อคัดเลือกอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดมาใช้งานวิจัยโดยแบ่งระยะเวลาการบ่มออกเป็น 5 ช่วงเวลาได้แก่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

#### 2.4.2 การบ่มในเตาอบไฟฟ้า

การบ่มในเตาอบไฟฟ้าโดยแบ่งสภาวะการบ่มเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ระยะเวลาก่อนบ่มที่บ่มทันทีหลังผสมเสร็จ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายที่อุณหภูมิ 40, 60, และ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 2.4.3 การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟกำหนดเงื่อนไขของการบ่มออกเป็นระยะเวลาก่อนบ่มที่บ่มทันทีหลังผสมเสร็จ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายที่อุณหภูมิใช้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 100 วัตต์โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 40, 60, และ 80 °C และคงที่อุณหภูมิไว้ 45 นาที

### 2.5 การทดสอบ

ค่าร้อยละการไหลแผ่เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะขึ้นเหลวปกติสามารถขึ้นรูปได้ โดยงานวิจัยนี้ทดสอบการไหลแผ่ของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดด้วยการใช้โต๊ะทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความขึ้นเหลวของมอร์ตาร์ดตามมาตรฐาน ASTM C 230 [7] และ ASTM C 1437 [8] สำหรับสัดส่วนผสมของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดที่ใช้ในการทดสอบการไหลแผ่แสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นนำมาทำการทดสอบได้ผลทดสอบจนกระทั่งได้ร้อยละการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 105 ถึง 115

หลังจากทำการบ่มตัวอย่างอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดแล้วตัวอย่างจะถูกทิ้งไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องจึงนำมาทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 [6] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

### 3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

#### 3.1 ค่าการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนส่วน โดยน้ำหนักของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ NaOH (NA/NH) พบว่าอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดที่มีอัตราส่วนเข้าลวอยต่อสารละลายต่างโดยน้ำหนัก (FA/AS) เท่ากันค่า ร้อยละการไหลแผ่ตามที่ควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของสารละลาย NA/NH เพิ่มขึ้นกล่าวคือ เมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลงการละลาย (Dissolve) ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เกิดน้อยลงส่งผลให้ปฏิกิริยาต้องการน้ำเพิ่มเพื่อปรับให้ตัวอย่างมีค่าการไหลแผ่ตามที่ควบคุมขึ้นตามไปด้วย โดยชุดตัวอย่าง 3.0FA0.5, 3.0FA1.5 และ 3.0FA2.0 ปริมาณน้ำที่เพิ่มลงไปจนได้การไหลแผ่ตามที่ควบคุมเท่ากับร้อยละ 4.4, 4.6 และ 4.8 ของปริมาณเข้าลวอย โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้เมื่อนำร้อยละการไหลแผ่ของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดไปคำนวณให้อยู่ในรูปแบบน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวดังแสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** สัดส่วนและร้อยละการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ชุดตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		สัดส่วนผสม (กรัม)					ร้อยละน้ำพิเศษโดยน้ำหนักของแก้ลย (ร้อยละค่าการไหลผ่าน)				
	FA/AS	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	ทราย	แก้ลย	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH	น้ำ*	40	42	44	46	48
3.0FA0.5	3	0.5	1125	450	50	100	189	73	83	107	-	-
3.0FA1.5	3	1.5	1125	450	90	60	198	74	90	99	113	-
3.0FA2.5	3	2.5	1125	450	107	43	207	61	74	83	96	112

หมายเหตุ : \* หมายถึงปริมาณน้ำพิเศษ (Extra Water) น้อยที่สุดที่ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลผ่านมาตรฐาน ASTM C109 [8] โดยสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบระยะเวลาก่อตัวเป็นสัดส่วนผสมที่ใช้ในขั้นตอนทำวิจัยต่อไป

**3.2 ระยะเวลาการก่อตัว**

ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของสารละลาย NA/NH เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะสุดท้ายลดลงเนื่องจากผลของสารละลายต่างต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Geopolymerisation) ที่ต้องการซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่อยู่ในแก้ลยโดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างซิลิเกตที่ได้จากการละลายของ ซิลิกาและอะลูมินาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นโมโนเมอร์ (Monomer) ใน 2 มิติของโพลิซิลิเกต (-Si-O-Al-O-(poly[silalate]) มีมากขึ้นทำให้โครงสร้างภายในแข็งแรงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนของสารละลาย NA/NH เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะสุดท้ายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณลดลงตามอัตราส่วน NA/NH ที่เพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการละลายของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และ อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ลดลง จึงทำให้การก่อตัวเป็นโมโนเมอร์ทำได้ช้าลงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตาม

**ตารางที่ 3** ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ชุดตัวอย่าง	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
	ระยะต้น	ระยะสุดท้าย
3.0FA0.5	57	100
3.0FA1.5	47	70
3.0FA2.5	53	80

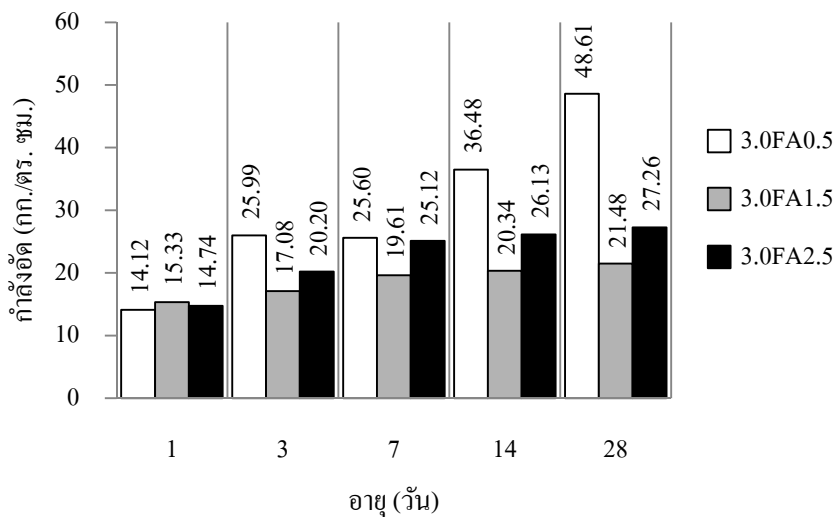
**3.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์**

การบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมแก้ลยเป็นแบบการบ่มแห้งสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีได้แก่ การบ่มในที่อุณหภูมิห้องโดยเป็นระยะเวลา 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ บ่มด้วยวิธีธรรมดาในเตาอบไฟฟ้า (Electric Oven) ภายใต้อุณหภูมิที่บ่มทันทีหลังผสมเสร็จ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย หลังผสมเสร็จ ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มด้วยเตาไมโครเวฟบ้าน (Domestic Microwave) ระยะเวลาก่อนบ่มที่บ่มทันทีหลังผสมเสร็จ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่อุณหภูมิใช้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 100 วัตต์โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 40, 60, และ 80 °C และคงที่อุณหภูมิไว้ 45 นาทีโดยผลการทดสอบค่ากำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2-4 ที่การบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง ความสามารถในการรับกำลังอัดมีแนวโน้ม

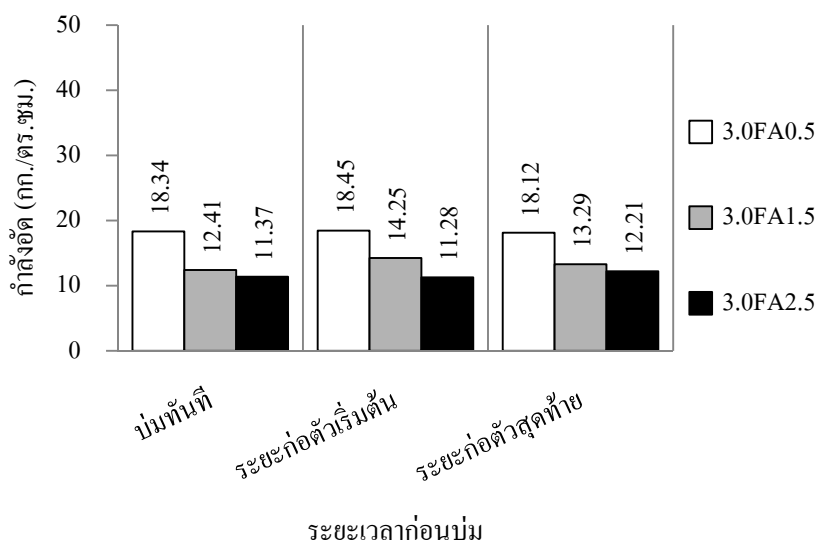
แปรผันกับระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นและอัตราส่วน NA/NH ที่ลดลง โดยระยะเวลาการบ่มที่ 28 วันของตัวอย่าง 3.0FA0.5 ให้กำลังอัดสูงสุด

เมื่อพิจารณาผลของกำลังอัดที่ผ่านการบ่มภายใต้เงื่อนไขต่างๆดังกล่าว กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วโดยมีแนวโน้มนั้นแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาการบ่มเนื่องจากผลของการปล่อยเวลาให้ซึดึกาและอะลูมินาก่อตัวเป็นโมโนเมอร์โครงสร้างโพลิเมอร์จึงมีเสถียรภาพพอที่จะรับพลังงานเพื่อพัฒนาการอัดและกำลังอัดมีแนวโน้มนั้นที่เพิ่มขึ้นตามพลังงานความร้อนที่ให้

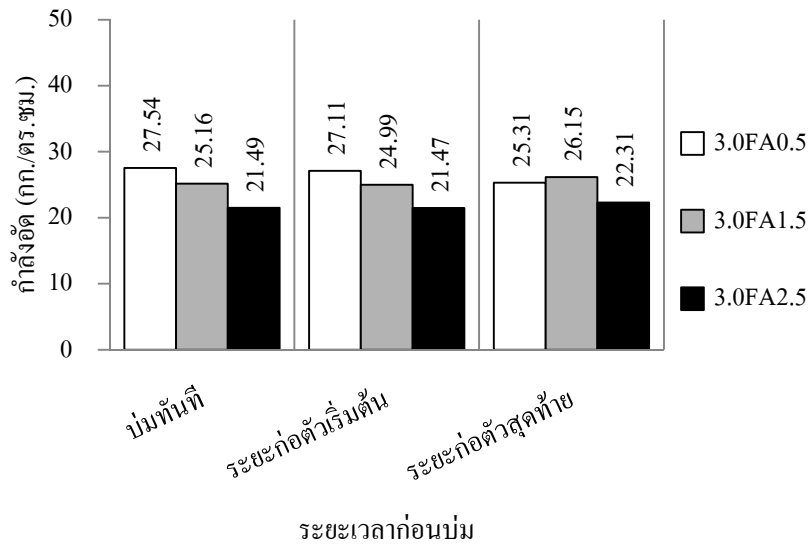
เพิ่มจากการบ่ม กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้บ่มสูงขึ้นกำลังอัดก็จะสูงขึ้นตาม โดยที่กำลังอัดสูงสุดได้จากชุดตัวอย่าง 3.0FA0.5 ที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า 80 °C ซึ่งการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟไม่สามารถพัฒนาอุณหภูมิภายในตัวอย่างให้ถึง 80 °C เนื่องจากตัวอย่างเกิดแห้งและแตกออกเมื่อเร่งอุณหภูมิได้เพียง 71 °C แต่อย่างไรก็ตามการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 60 °C นั้นยังคงให้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 °C แสดงได้ดังรูปที่ 2-4



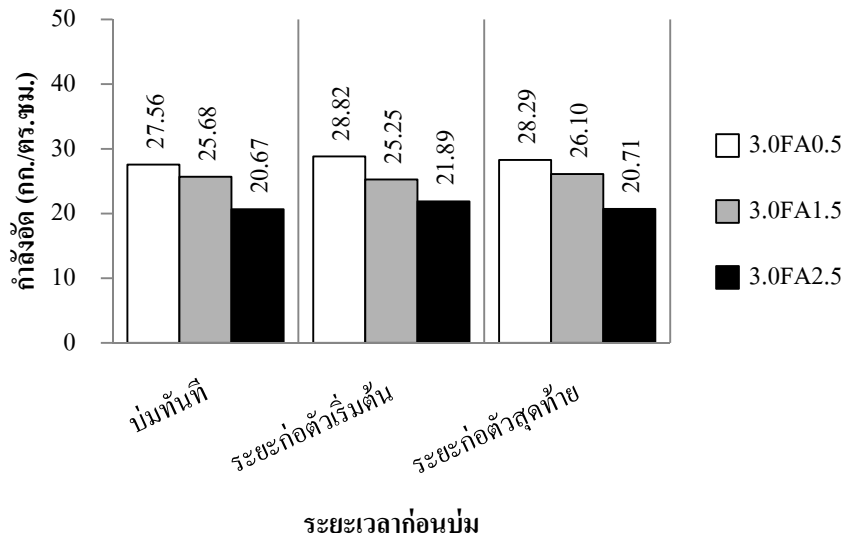
รูปที่ 2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วจากการบ่มที่อุณหภูมิห้อง



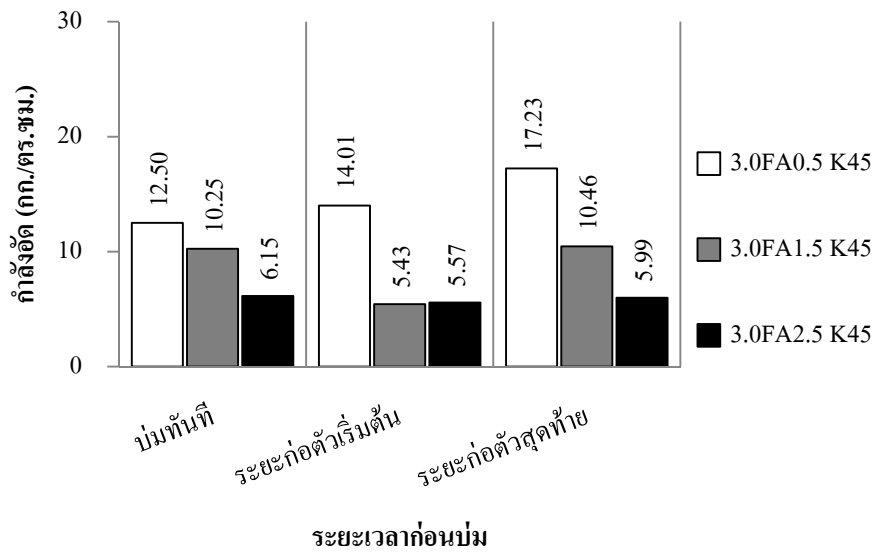
รูปที่ 3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วจากการบ่มเตาอบไฟฟ้า 40 °C



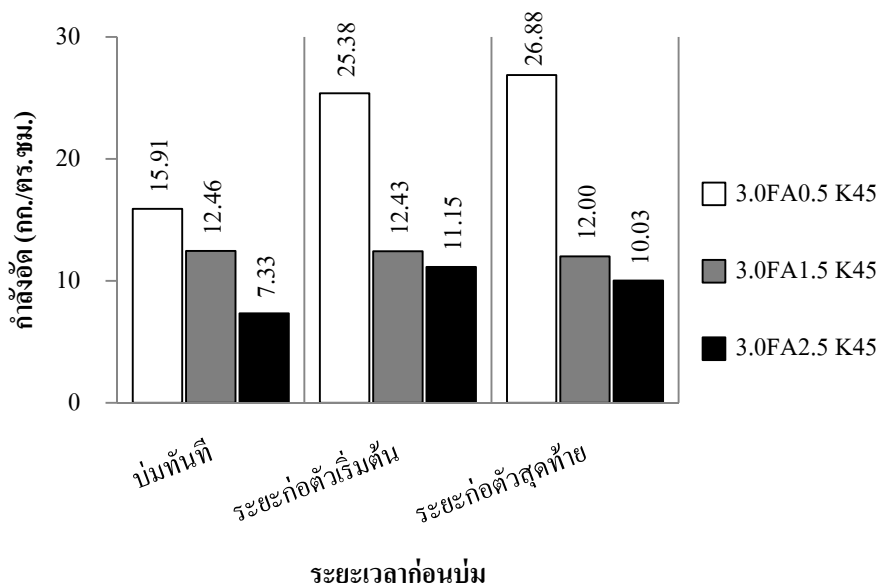
รูปที่ 4 ค่าตั้งอัดของอีโพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากการบ่มเตาอบไฟฟ้า 60 °C



รูปที่ 5 ค่าตั้งอัดของอีโพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากการบ่มเตาอบไฟฟ้า 80 °C



รูปที่ 6 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากการบ่มเตาอบไมโครเวฟ 40 °C คงอุณหภูมิ 45 นาที



รูปที่ 7 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากการบ่มเตาอบไมโครเวฟ 60 °C คงอุณหภูมิ 45 นาที

#### 4. สรุปผล

จากการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนประกอบ ภายใต้การบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าและพลังงานไมโครเวฟสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณน้ำสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลแต่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณน้ำที่เดิมเพิ่มขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  โดยน้ำนั้น

2. ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  เพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  เพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสม

3. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาก่อนบ่ม โดยวิธีการบ่มในเตาอบไฟฟ้าและพลังงานไมโครเวฟ โดยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

ตัวร้เข้าลอมที่บ่มด้วยเตอบไฟฟ้ามี่ค่าสูงกว่การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยไ้ร่ขอขอบคุณ คุณบุญสม กุลศิริ ผู้อู้เคราะห้ถ่้าลอมเพื่อใ้ในงานวิจัยและ คุณฉัฐวุฒิ กองม่วง ผู้ใ้การออนู้เคราะห้ใ้การทดสอบองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของถ่้าลอม

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2549, ถ่้าลอมใ้งานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง), พิมพ์ครั้งที่ 3, ศูนย์วิจัยและพัฒนา วิศวกรรมสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 119.
- [2] J. Davidovits, "Green-Chemistry and Sustainable Development Granted and False Ideas about Geopolymer-Concrete", Paper presented at the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete (GGC), Perth, Australia, 2004.
- [3] สายสุนิย์ จำรัส, 2554, "สมบัติของจีโโพลิเมอร์ถ่้าลอมบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยใ้เตาชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง", วิทยานิพนธ์ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] MJ. McCartry, RK. Dhir, 2005 Development of high volume fly ash cement for use in concrete construction, Fuel, 84 11, 1423-1432.
- [5] American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C 778 Standard Specification for Standard Sand, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.
- [6] American Society for Testing and Materials, 2006, "ASTM C 109/C109M-11a Standard Test Method For Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", Annual Book of ASTM Standard Vol.4.02, Philadelphia, PA, USA.

- [7] American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C 230/C230M-08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement Mortars", Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
- [8] American Society for Testing and Materials, 2007, "ASTM C 1437-07 Standard Testing Method for Flow of Hydraulic Cement Mortars", Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.