ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน

ณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์[1] และ วิเชียร ชาลี[2*]
มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ และใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวม หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (25°C) 30°C 65°C และ 90°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65°C ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90°C

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ / เถ้าถ่านหิน / กำลังอัด / อุณหภูมิบ่ม / ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

* *Corresponding Author : wichian@buu.ac.th*

1 *นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

2 *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Effect of Curing Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar

Nutthaphatt Phatitriwatt[1] and Wichian Chalee[2*]

Burapha University, Saensook District, Muang, Chonburi, 20131

Abstract

This research aimed to study the effects of curing temperature and sodium hydroxide (NaOH) concentration on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. The geopolymer mortar was prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The concentration of NaOH was varied at 10, 12, 14, 16 and 18 molar. River sand was used as an aggregate. The geopolymer mortar cube speciments of 50x50x50 mm were cast for compressive strength test at 7, 14 and 28 days. The samples were air cured at room temperature (25°C), 30°C, 65°C and 90°C for 48 hours; they were then cured in air until the age test. The results showed that the compressive strength of geopolymer mortar increased with an increase in the NaOH concentration up to the value of 16 molar. An increase in the curing temperature up to 65°C resulted in increased compressive strength. However, the strength decreased when the curing temperature increased to 90°C.

Keywords : Geopolymer Mortar / Fly Ash / Compressive Strength / Temperature Curing / NaOH Concentration

* *Corresponding Author : wichian@buu.ac.th*

1 *Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

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

1. บทนำ

ปัจจุบันเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง โดยมีผลงานวิจัยที่ยืนยันได้ว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะเป็นเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากมีอนุภาคที่กลมตันและมีความละเอียด ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นในระยะยาว มีความทึบน้ำที่ดี และลดความร้อนในคอนกรีตหลา [1-3] อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตในประเทศไทยยังคงมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมด้วย เนื่องจากต้องการสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกันสารประกอบซิลิกาหรืออลูมินาในเถ้าถ่านหิน แนวคิดในการพัฒนาการใช้งานของเถ้าถ่านหินโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากจะสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนลงได้ ตลอดจนเป็นการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้จาก ซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และวัสดุปอซโซลาน โดยการนำสารละลายแอลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงมากระตุ้นวัสดุปอซโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าถ่านหินหรือเถ้าชีวมวล หรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติอื่นๆ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชัน และได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ [4]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลที่สามารถพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้ใช้งานจริงในอนาคตได้ โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้ความร้อนในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นได้ในช่วงระยะต้นๆ [5, 6] ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญในการรับแรงของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ก็อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและสูญเสียการรับแรงได้ นอกจากนั้นการบ่มจีโอพอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูง อาจทำให้ยากต่อการพัฒนาเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมจริง รวมทั้งเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นควรมีการศึกษาอุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถพัฒนามาใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ และให้ผลการรับแรงเชิงกลที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดี มีความเหมาะสมในการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์มากที่สุดในประเทศไทย โดยการศึกษามุ่งประเด็นที่ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน เพื่อให้ได้อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ภายใต้การรับแรงเชิงกลที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 4.3 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 16 14 12 10 และ 18 โมลาร์ โดยความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่กำหนดใช้ในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับฐานข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมา [7, 8] ที่ให้สมบัติเชิงกลไปในทิศทางที่ดี ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO_2 (%)	32.10
Aluminum Oxide, Al_2O_3 (%)	19.90
Iron Oxide, Fe_2O_3 (%)	16.91
Calcium Oxide, CaO (%)	18.75
Magnesium Oxide, MgO (%)	3.47
Sodium Oxide, Na_2O (%)	0.69
Potassium Oxide, K_2O (%)	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3 (%)	2.24
Loss On Ignition, LOI (%)	0.07

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ได้ใช้ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน (เถ้าถ่านหิน) ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลว (สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ขนาด 5x5x50 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (25°C) 30°C 65°C และ 90°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

ส่วนผสม	อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ (โดยน้ำหนัก)			
	เถ้าถ่าน	ทราย	NaOH	Na_2O:SiO_3
10-M	1	2.75	0.218	0.433
12-M	1	2.75	0.218	0.433
14-M	1	2.75	0.218	0.433
16-M	1	2.75	0.218	0.433
18-M	1	2.75	0.218	0.433

รูปที่ 1 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน (ตารางที่ 3) ของกลุ่มที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้องที่มีความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับ 7 วัน เท่ากับ 177 173 180 158 และ 165 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินออกมาได้มาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี จึงมีกำลังอัดในช่วงต้น (7 วัน) สูง [7] จึงมีผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับ 7 วัน ต่ำลงได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและเร่งให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์รับแรงได้ดีขึ้นในช่วงต้น โดยสังเกตได้จากกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ค่อนข้างชัดเจน การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น เพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต ทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุที่บ่ม [7, 8]

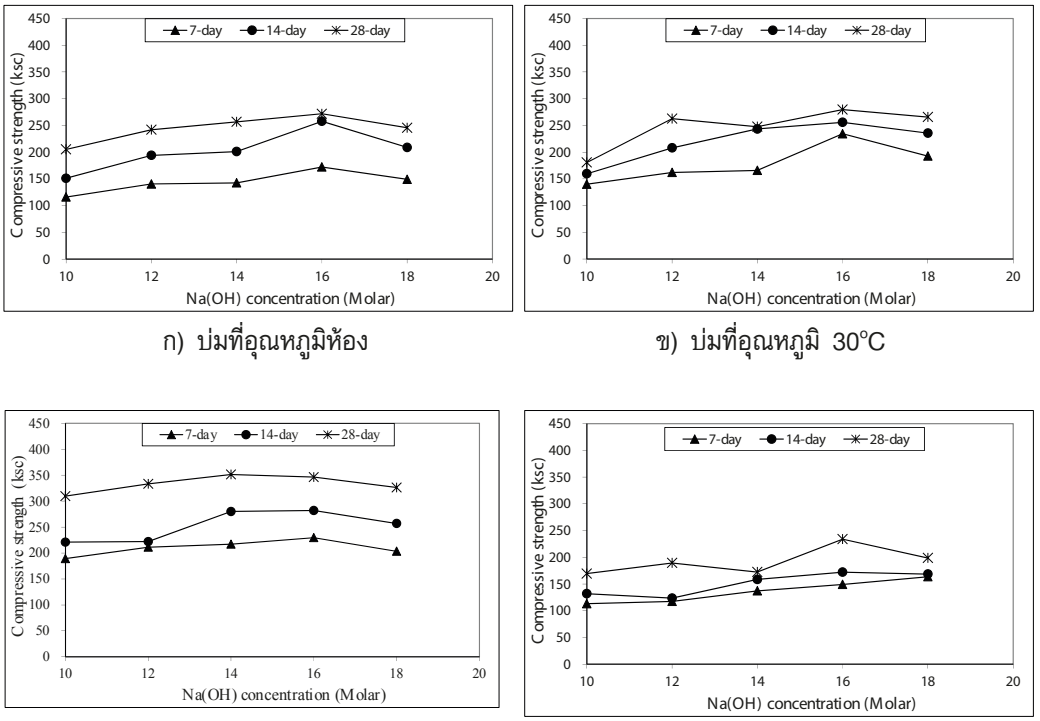
ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})												ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง			บ่มที่อุณหภูมิ 30 °C			บ่มที่อุณหภูมิ 65 °C			บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C			อุณหภูมิห้อง	30 °C	65 °C	90 °C
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน				
10-M	116	151	205	140	160	181	189	221	310	113	132	170	177	129	164	150
12-M	140	194	242	162	208	263	211	222	333	117	124	189	173	162	144	162
14-M	143	201	257	166	243	248	217	280	351	137	159	172	180	149	166	126
16-M	172	258	272	234	256	280	230	282	346	149	172	234	158	120	150	157
18-M	149	209	246	193	236	266	203	257	326	164	169	199	165	138	170	121

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง 30°C 65°C และ 90°C ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) 2 (ข) 2 (ค) และ 2 (ง) ตามลำดับ พบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดเท่ากับ 205 242 257 272 และ 246 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจากด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดีขึ้น และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังอัดและความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8] ที่พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูง มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์เป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น นอกจากนั้นอาจมีผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถ้าถ่านหินและด่างที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมา ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นสารที่มีกำลังต่ำและละลายน้ำได้ ส่งผลทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความทึบน้ำมากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะลดสารประกอบที่ไม่เป็นประโยชน์ลงแล้ว ยังได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย [9] อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ กลับส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้สมบัติในการยึดประสานลดลงได้ [10]

ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า กำลังอัดช่วงต้น (อายุไม่เกิน 14 วัน) ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิบ่ม 90°C) และใช้ความเข้มข้นของ NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ มีผลให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สูงขึ้นเล็กน้อย เช่น กำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในอุณหภูมิ 90°C ที่ใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ เท่ากับ 113 117 137 149 และ 164 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันที่ให้กำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นได้



ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ข) บ่มที่อุณหภูมิ 30°C

ค) บ่มที่อุณหภูมิ 65°C ง) บ่มที่อุณหภูมิ 90°C

รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

3.3 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65°C เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 16 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิห้อง 30°C 65°C และ 90°C มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 272 280 346 และ 234 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่ม เป็นผลจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันถูกเร่งให้ทำปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ระหว่างซิลิกาและอลูมินา โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาจำพวกสารอัลคาไลซิลิเกตและความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการอัดตัวและมีสมบัติเป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังกับมอร์ต้าร์ได้ดีขึ้น [5, 6, 11, 12] อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงถึง 90°C กลับมีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่ำลง อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นรุนแรงเกินไป ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน และทำให้กำลังอัดลดลงได้ [6]

พิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม ที่ 65°C ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ตามสมการที่ (1)

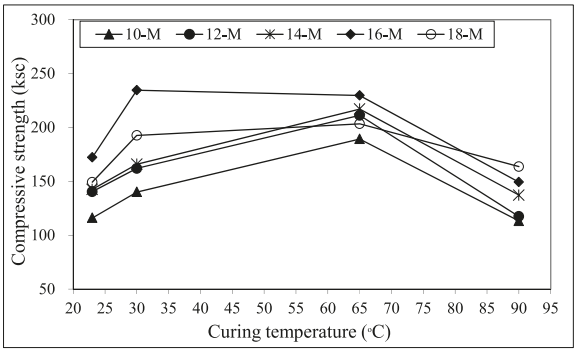
$$E_T = \frac{[(C_{65} - C_R)x100]}{C_R} \quad \textbf{(1)}$$

เมื่อ E_T = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่ 65°C (ร้อยละ)

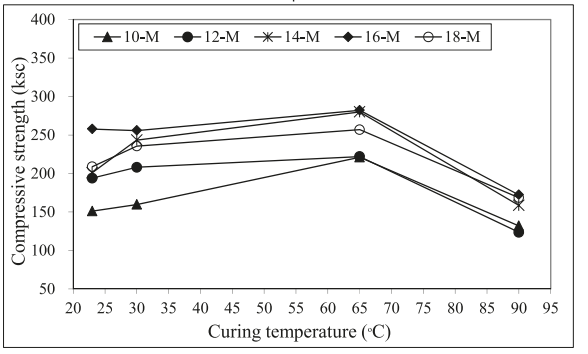
C_{65} = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในอุณหภูมิ 65°C (กก./ซม.^{2})

C_R = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (กก./ซม.^{2})

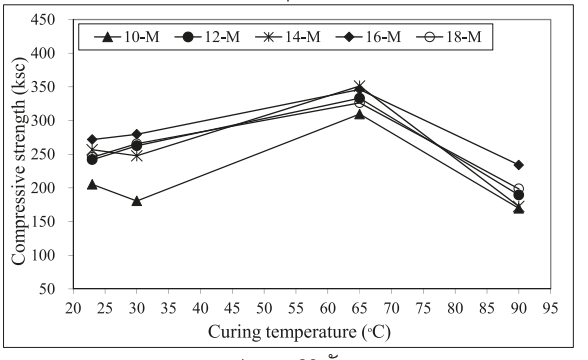
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อุณหภูมิ 65°C ในจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4 พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลง โดยเหมือนกันทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ ร้อยละ 51 38 37 27 และ 33 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง ซึ่งน่าจะเกิดจากสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นต่ำ และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่ส่งผลให้จีโอพอลิมอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงในอุณหภูมิห้องได้ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [12-15]



ก) อายุ 7 วัน

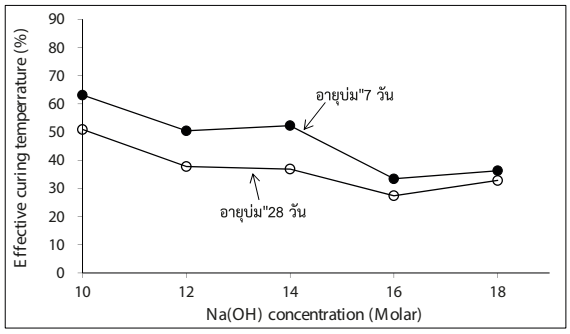


ข) อายุ 14 วัน



ค) อายุ 28 วัน

รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความเข้มข้นของ NaOH มากขึ้น ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แสดงในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับอายุ 7 วัน มีแนวโน้มลดลง

2) จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์

3) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65°C และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90°C

4) การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ลดลง

5) การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานได้แก่ จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 14 ถึง 16 โมลาร์ และใช้อุณหภูมิบ่ม 65°C เนื่องจากให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ไปในทิศทางที่ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติเลขที่สัญญา 130/2559

6. เอกสารอ้างอิง

1. Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W., 2014, “Concrete Durability Presented by Acceptable Chloride Level and Chloride Diffusion Coefficient in Concrete : 10-year Results in Marine Site,” *Materials and Structures*, 47, pp. 1501-1511.

2. Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C., 2010, “Utilization of Fly Ash Concrete in Marine Environment for Long Term Design Life Analysis,” *Mater Design*, 3, pp. 1242-1249.

3. Chalee, W. and Chuapolb, T., 2013, “Evaluation of Chloride Penetration in Fly Ash Concrete under Marine Environment by Ultrasonic Wave,” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (2), pp. 197-213 (In Thai).

4. Davidovits, J., 1991, “Geopolymer Inorganic Polymeric New Materials,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37, pp. 1633-1659.

5. Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C. and Rattanasak U., 2009, “Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers,” *Waste Manage*, 29, pp. 539 - 543.

6. Bakharev, T., 2005, “Geopolymeric Materials Prepared using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing,” *Cement and Concrete Research*, 35 (6), pp. 1224-1232.

7. Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P., 2009, “Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer,” *Minerals Engineering*, 22, pp. 1073-1078.

8. Sanawong, C. and Chalee, W., 2011, “Chloride Penetration of Fly Ash-based Geopolymer Concrete under Marine Environment,” *The Journal of KMUTNB*, 21 (2), pp. 257-265 (In Thai).

9. Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2008, Cement, Pozzolan and Concrete, 5th ed, Thailand Concrete Association, pp. 11-13 and 238-240. (In Thai)

10. Chindaprasirt, P. and Chalee, W., 2014, “Effect of Sodium Hydroxide Concentration on Chloride Penetration and Steel Corrosion of Fly Ash-based Geopolymer Concrete under Marine Site,” *Construction and Building Materials*, 63, pp. 303–310

11. Rattanasak, U. and Chindaprasirt, C., 2008, “A Comparative Study on Properties of Geopolymeric Material from Coal Ash,” *KMUTT Research and Development Journal,* 31 (2), pp. 171-381. (In Thai)

12. Panto, J., Kuengjuk, K., Khemkumnert, N., Muhummud, M. and Piyaphanuwat, R., 2016, “Effects of Curing Temperature and Alkali Concentration on Compressive Strength of Geopolymer Synthesized from Ceramic Waste,” *KMUTT Research and Development Journal,* 39 (4), pp. 533-546. (In Thai)

13. Rattanasak, U. and Chalee, W., 2006, “Study of Leaching of Lignite Fly Ash and Strength of Fly Ash Based-geopolymer,” *KMUTT Research and Development Journal,* 29 (4), pp. 437-446. (In Thai)

14. Panha Huy, Soklam Mov, and Chalee, W., 2016, “Production of Hollow Load-bearing Concrete Masonry Blocks from Fly Ash-based Geopolymer,” *Burapha Science Journal*, 12 (2), pp. 31-46. (In Thai)

15. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2016, “Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks,” *KMUTT Research and Development Journal,* 39 (2), pp. 271-286. (In Thai)