การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

วิเชียร ชาลี[1*] และ กิรติกร เจริญพร้อม[2]
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 กลุ่มที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, และ 2.8 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในอากาศ และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต / เถ้าถ่านหิน / กำลังอัด / แมกนีเซียมซัลเฟต / ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH / อัตราส่วน Si/A

* *Corresponding author: E-mail: wichian@buu.ac.th*

1 *ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

2 *นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Evaluation of Sulfate Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete

Wichian Chalee[1*] and Keeratikorn Charoenprom[2]

Burapha University, Muang, Chonburi, 20131 Thailand

Abstract

This research, the effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations and Si/Al ratios on compressive strength of geopolymer concretes exposed to magnesium sulfate solusion were studied. The geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. In the first group, the concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, 14, 16 and 18 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. In the second group, the concentration of NaOH was kept constant at 14 molar and the Si/Al ratio was varied at 2.2, 2.4, 2.6 and 2.8. The concrete cylinder speciments of 100 mm in diameter and 200 mm in height were prepared for compressive strength test of concrete. The hardened geopolymer concretes were air-cured and immersed in 5%-magnesium sulfate concentration. The compressive strength of geopolymer concrete was tested after being exposed to magnesium sulfate solution for 90 and 180 days. In adddition, the compressive strength of air curing concrete was also investigated at the age of 7, 14, 28, 60, 90 and 180 days. The results showed that compressive strengths of geopolymer concrete significantly increased with the increase of a concentration of NaOH. The strength loss of geopolymer concrete due to magnesium sulfate solution increased with the increase of a concentration of NaOH and Si/Al ratio

Keywords : Geopolymer Concrete / Fly Ash / Compressive Strength / Magnesium Sulfate / NaOH Concentration / Si/Al Ratio

* *Corresponding author: E-mail: wichian@buu.ac.th*

1 *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

2 *Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ได้ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการเผาสารที่ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก [1] อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ในช่วง 1,400-1,600 องศาเซลเซียส กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงต้องใช้พลังงานสูงมากในการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา และการบดละเอียด ผลกระทบที่เกิดจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น จึงควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยหาวัสดุประสานมาทดแทน เช่น การใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และจากธรรมชาติ เพื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งหมด โดยให้สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตเพื่อแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้

การศึกษาที่ผ่านมา [2-6] ได้พยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ ซึ่งเรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและอลูมินาที่ถูกชะจากวัสดุปอซโซลานโดยด่างที่มีความเข้มข้นสูง ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า โพลิคอนเดนเซชั่น (Polycondensation) ซึ่งเกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ [2-4] สารจำพวกซิลิกอนและอลูมินาที่ถูกชะออกมาจากวัสดุปอซโซลานอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และส่งผลให้การยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนผสมเพิ่มเข้าไปด้วย ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์น้อยมาก และการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจังยังไม่ปรากฏ การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในประเทศไทยเริ่มจากคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์, มอร์ต้าร์ หรือคอนกรีตสดจนถึงสภาวะที่แข็งตัว [4, 5, 7] โดยเน้นการใช้วัสดุปอซโซลานในประเทศ และผลการศึกษาส่วนใหญ่ค่อนข้างยืนยันว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าถ่านหินให้ผลการศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงกลไปในทิศทางที่ดี [8-10] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่อนข้างน้อย และในการศึกษาความเป็นไปได้เพื่อใช้งานจริง จะต้องมีการเก็บข้อมูลให้มากขึ้น ตลอดจนครอบคลุมทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติความคงทนควบคู่กันไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีสภาพแห้งปราศจากความชื้นและสิ่งเจือปนมาใช้ หากสามารถพัฒนาและมีข้อมูลยืนยันการนำมาใช้ได้อย่างจริงจัง จะเป็นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งหมด และเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่มีลักษณะคล้ายคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ แต่ไม่ได้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการใช้วัสดุปูนซีเมนต์และเป็นการเพิ่มทางเลือกในด้านวัสดุก่อสร้างให้กับงานก่อสร้างต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30 °ซ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

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

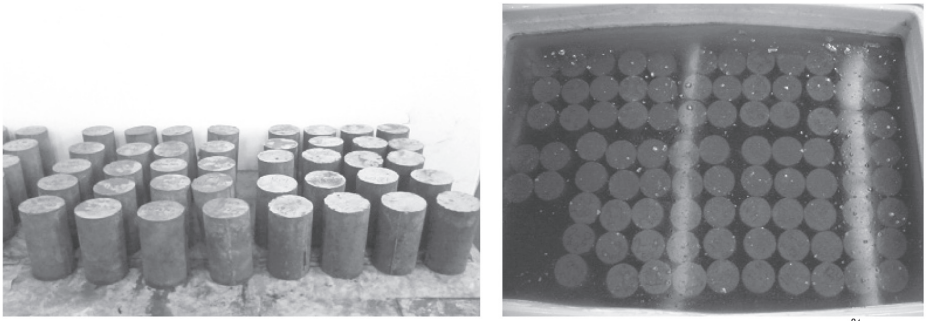
2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้อัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ส่วนกลุ่มที่สองใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 ซึ่งมีการใช้ซิลิกาฟูมเพื่อปรับปริมาณซิลิกาให้ได้อัตราส่วน Si/Al ตามที่กำหนด ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก./ม.^{3})						ค่ายุบตัว (ซม.)
		เถ้าถ่านหิน	หิน	ทราย	NaOH	N_2O:SiO_3	ซิลิกาฟูม	
1	8-M	390	1092	585	67	167	-	25
2	10-M	390	1092	585	67	167	-	25
3	12-M	390	1092	585	67	167	-	25
4	14-M	390	1092	585	67	167	-	24
5	16-M	390	1092	585	67	167	-	24
6	18-M	390	1092	585	67	167	-	25
7	Si/Al=2.2	394	1103	591	28	212	5.9	25
8	Si/Al=2.4	390	1092	585	29	218	21.5	24
9	Si/Al=2.6	384	1075	576	30	222	35.5	26
10	Si/Al=2.8	378	1058	567	30	226	49.3	25

หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบได้อ้างอิงกับมาตรฐาน ASTM C192 [11] ซึ่งเป็นมาตรฐานในงานคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชม. แกะแบบและบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในอากาศ และนำตัวอย่างทดสอบบางส่วนไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 [12] ในกลุ่มที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่อายุ 90 และ 180 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาและการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต รูปที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ก) บ่มในอากาศ ข) แช่ใน $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

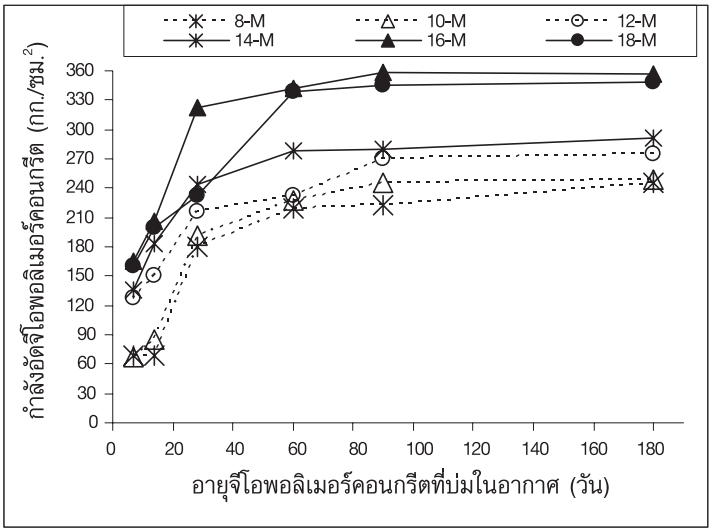
3.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศแสดงดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย [4, 5] อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ ทุกอายุทดสอบ พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงจากความเข้มข้นของ NaOH 16 โมลาร์ และการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 16 โมลาร์มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงที่สุด เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดหลังบ่มในอากาศ 28 วัน เท่ากับ 180, 191, 216, 244, 322 และ 233 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การที่กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ อาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้การยึดเกาะของจีโอพอลิเมอร์เจลกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้

ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

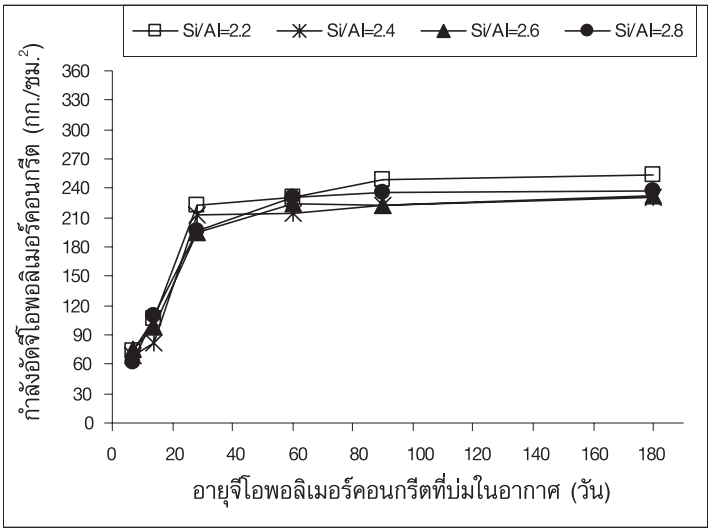
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})						ร้อยละกำลังอัดเทียบกับอายุ 28 วัน					
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
8-M	68	69	180	220	222	245	37.8	38.3	100.0	122.2	123.3	136.1
10-M	67	85	191	227	246	249	35.1	44.5	100.0	118.8	128.8	130.4
12-M	127	150	216	232	270	275	58.8	69.4	100.0	107.4	125.0	127.3
14-M	136	183	244	279	280	291	55.7	75.0	100.0	114.3	114.8	119.3
16-M	166	206	322	342	358	356	51.6	64.0	100.0	106.2	111.2	110.6
18-M	160	199	233	339	345	348	68.7	85.4	100.0	145.5	148.1	149.4
Si/Al=2.2	73	107	223	231	248	254	30.9	37.7	100.0	103.6	111.2	113.9
Si/Al=2.4	69	82	212	215	222	230	32.5	38.7	100.0	101.4	104.7	108.5
Si/Al=2.6	75	98	195	225	223	232	38.5	50.3	100.0	115.4	114.4	119.0
Si/Al=2.8	82	109	197	230	235	237	31.5	55.3	100.0	116.8	119.3	120.3

พิจารณาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามอายุที่บ่มในอากาศดังรูปที่ 2 พบว่า กำลังอัดมีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 28 วัน หลังจากนั้น การพัฒนากำลังอัดมีอัตราการเพิ่มที่ต่ำจนถึงอายุ 90 วัน และเกือบคงที่ในช่วงอายุ 90 ถึง 180 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่างๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (ตารางที่ 3) ซึ่งพบว่า ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เกือบคงที่ในช่วงอายุ 90 ถึง 180 วัน การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ เช่น ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14 และ 16 โมลาร์ เท่ากับร้อยละ 136.1, 130.4, 127.3, 119.3 และ 110.6 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

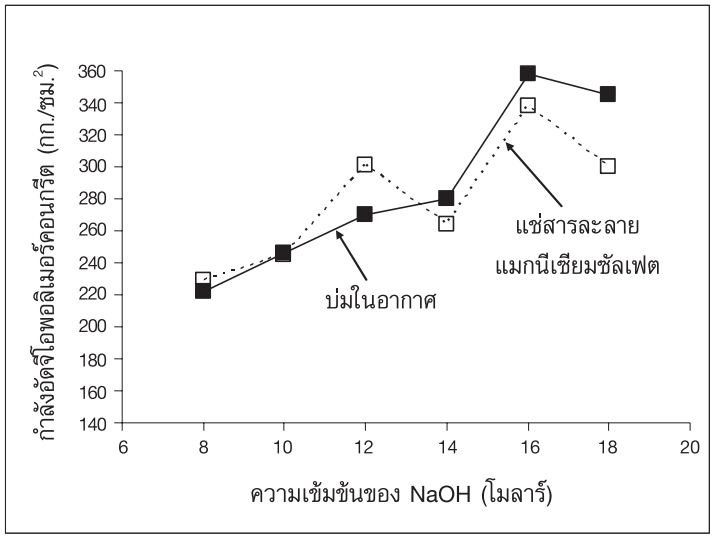
พิจารณาผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 3 พบว่า อัตราส่วน Si/Al มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยมาก โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบสามารถสังเกตได้ว่า อัตราส่วน Si/Al ที่สูงขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย อาจเป็นผลจากปริมาณของซิลิกาที่มีมากขึ้นและเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมซิลิเกตและซิลิกาเจล ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่แข็งแรงจึงทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ำลงได้ [1, 13-15] ดังนั้นปริมาณซิลิกาที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชั่นควรมีปริมาณที่พอดีที่จะทำปฏิกิริยากับอลูมินาและออกซิเจน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นสารที่ให้ความแข็งแรงกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 223, 212, 195 และ 197 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ก็มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยอัตราการเพิ่มกำลังอัดในช่วงหลังจาก 28 วันค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงต้นสูงและอัตราการเพิ่มลดลงในช่วงหลังน่าจะเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชั่น (Polymerization) ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นและลดลงเมื่ออายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น [16] ซึ่งลักษณะของการพัฒนากำลังอัดดังกล่าวจะเหมือนกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่แตกต่างที่กลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความแข็งแรงจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดจากปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (chain or addition polymerization) พิจารณาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่างๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า อัตราส่วนระหว่าง Si/Al ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เทียบกับ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 113.9, 108.5, 119.0 และ 120.3 ตามลำดับ



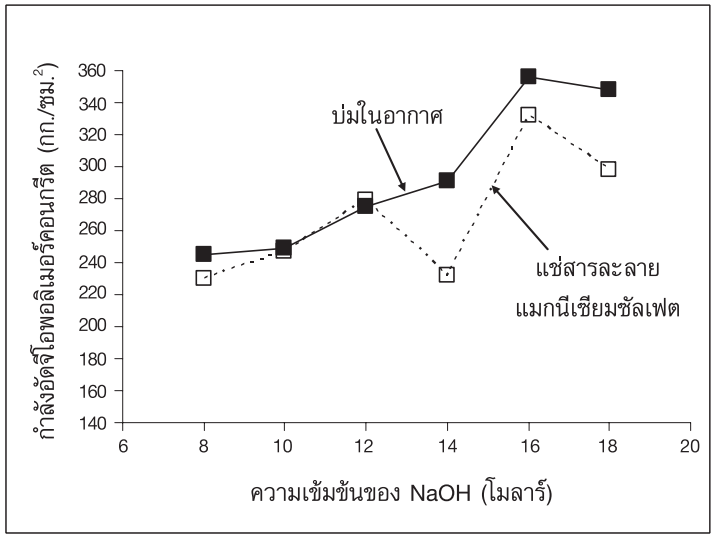
รูปที่ 3 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

พิจารณาผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เข้มข้นร้อยละ 5 ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 90 และ 180 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นมีแนวโน้มเกิดการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 4(ก) จะเห็นว่า ที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและบ่มในอากาศ 90 วัน การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 14 โมลาร์ขึ้นไป มีผลให้กำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศ โดยชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มากขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศและที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ถึงแม้จะแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตถึง 90 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 222, 246, 270, 280, 358 และ 345 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 229, 245, 301, 264, 338 และ 300 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้นเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้นถึง 180 วัน (รูปที่ (4ข)) โดยกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำก็เริ่มได้รับผลกระทบจากซัลเฟตเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ เริ่มมีกำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกัน ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 14 โมลาร์ ก็ยิ่งมีผลการทำลายที่ชัดเจนมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 180 วัน เท่ากับ 245, 249, 275, 291, 356 และ 348 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 230, 247, 279, 232, 332 และ 298 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ



ก) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน

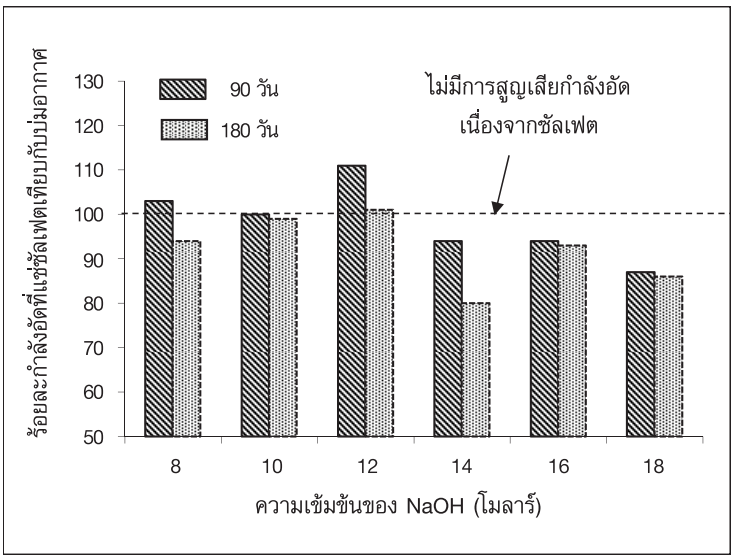


ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน

การทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ น่าจะเป็นผลจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มาก และส่งผลให้แมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกริยากับซิลิกาได้มากขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO.SiO_2.8H_2O$) ที่มีความแข็งแรงต่ำและทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ NaOH เข้มข้นสูงมีกำลังอัดหลังสัมผัสกับสารละลาย

แมกนีเซียมซัลเฟตต่ำลงอย่างชัดเจน [17,18] ผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความชัดเจนมากขึ้น เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตดังรูปที่ 5 พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 103, 100, 111, 94, 94 และ 87 ตามลำดับ ซึ่งเห็นผลการทำลายชัดเจนมากขึ้น เมื่อแช่คอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตถึง 180 วัน โดยมีร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 94, 99, 101, 80, 93 และ 86 ตามลำดับ จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ มีการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน เท่ากับ 111 และ 101 ตามลำดับ

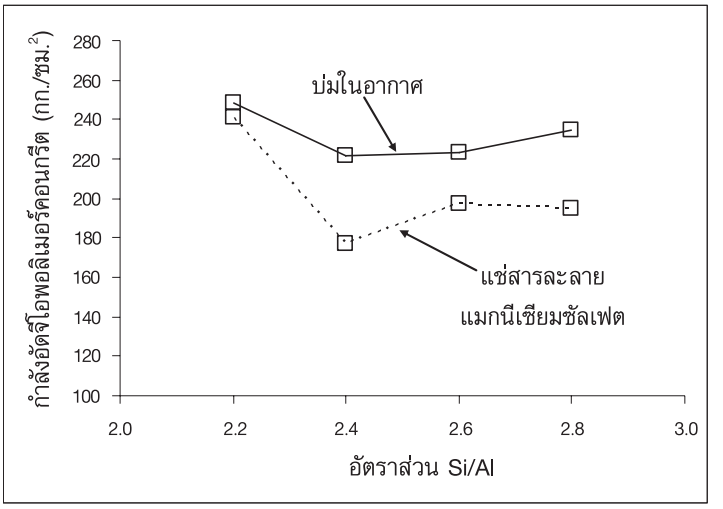


รูปที่ 5 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

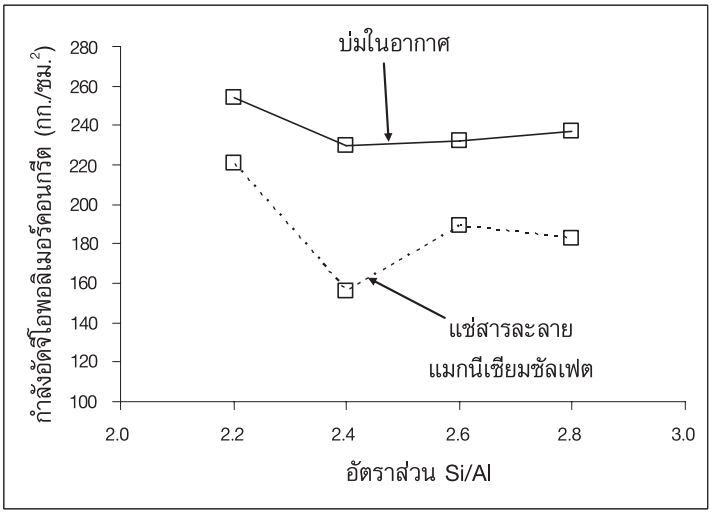
จากการศึกษาที่ผ่านมา [19] ได้ใช้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตเพื่อเป็นสารผสมเพิ่มในจีโอพอลิเมอร์เพสต์และมอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน ผลการศึกษาพบว่า สารประกอบซัลเฟตทั้งสองไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในช่วงต้น และสารดังกล่าวมีผลให้เร่งการก่อตัวในระยะปลาย นอกจากนั้น ยังได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผสมสารละลายซัลเฟต พบว่า มีบางส่วนของผิวหน้าจีโอพอลิเมอร์เกิดเป็นเจลรูปเข็ม ซึ่งอาจเป็นลักษณะของเอททริงไกท์ หรือ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ($CaO.Al_2O_3.CaSO_4.31H_2O$) โดยสารดังกล่าวนี้จะมีการขยายตัวและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตได้ [1, 15] ดังนั้นการทำลายเนื่องจากสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากจะมีผลของแมกนีเซียมซิลิเกตที่เกิดจากแมกนีเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับซิลิกาดังที่กล่าวมาแล้ว อาจมีผลของสารละลายซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบประเภทแคลเซียมในเถ้าถ่านหินได้ผลผลิตเป็น แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต หรือเอททริงไกท์ ที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอีกด้วย

3.3 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

พิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/Al หลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 90 และ 180 วัน ดังรูปที่ 6(ก) และ 6(ข) ตามลำดับ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al มากขึ้น ทำให้การต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตลดน้อยลง โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพียง 90 วัน มีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันอย่างชัดเจน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248, 222, 223 และ 235 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้กำลังอัดลดลงเป็น 241, 177, 197 และ 195 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ที่ต่ำ (Si/Al=2.2) กับอัตราส่วน Si/Al ที่สูงถึง 2.8 ที่อายุการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน พบว่า กลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2 มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248 กก./ซม.^{2} และหลังจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากัน ทำให้กำลังอัดลดลงเป็น 241 กก./ซม.^{2} โดยคิดเป็นร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศเท่ากับ 97 แสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Si/Al สูงขึ้นเป็น 2.8 พบว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลังอัด โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 83 ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2 ค่อนข้างชัดเจน การทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนในกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ต่ำ อาจเป็นผลจากปริมาณซิลิกาที่มีมากขึ้นได้เข้าทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้เป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($Mg.SiO_2.8H_2O$) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้เกิดความพรุนและช่องว่างในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดต่ำลง [17,18] นอกจากนั้นกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลงอาจเป็นผลจากแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต หรือเอททริงไกท์อีกด้วย [19] โดยกลไกการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเหมือนกับกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH ดังที่กล่าวมาข้างต้น



ก) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน

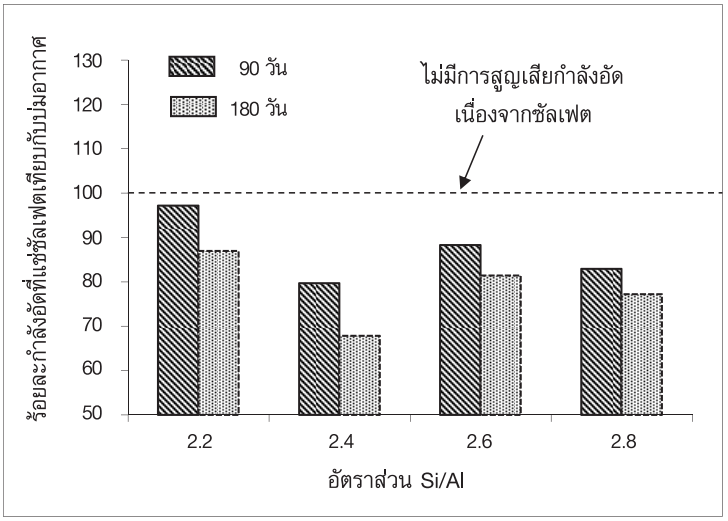


ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

รูปที่ 6 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน

การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้นถึง 180 วัน (รูปที่ 6ข) โดยกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศค่อนข้างชัดเจน และไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดระหว่างกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ที่ต่างกันได้ชัดเจน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีร้อยละของกำลังอัดของกลุ่มที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับบ่มในอากาศที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 87, 68, 81 และ 77 ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตค่อนข้างชัดเจน ภายใต้เวลาที่สัมผัสกับสารละลายดังกล่าวเพียง 180 วัน เท่านั้น นอกจากนั้นการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก็ไม่ส่งผลชัดเจนต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสังเกตได้จากรูปที่ 7 ที่พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกกลุ่มมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตค่อนข้างมากและใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันต่ำกว่า 100 ค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตามแนวทางในการเลือกอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ควรพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วน Si/Al ที่มีค่าต่ำ เพื่อลดการเกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ซึ่งอาจส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความพรุนและมีการสูญเสียกำลังอัดมากขึ้น



รูปที่ 7 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

1) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาโดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันแรก สูงกว่าอัตราการเพิ่มในช่วง 28 ถึง 180 วัน อย่างชัดเจน

2) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้นถึง 16 โมลาร์ และกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็น 18 โมลาร์

3) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีขึ้น

4) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al ต่ำสามารถลดการการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้ดีกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al สูง

5) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมในการใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังอัดค่อนข้างชัดเจน ภายใต้เวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 180 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2555

6. เอกสารอ้างอิง

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

2. Temuujin J., Riessen A. van, MacKenzie K.J.D., 2010, "Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1906-1910.

3. Temuujin J., Williams R.P., Riessen A.van, 2010, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5276-5280.

4. Chindaprasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., and Rattanasak U., 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Management*, Vol. 29, No. 2, pp. 539-543.

5. Klabprasit T., Jaturapitakkul C., Chalee W., Chindaprasirt P., and Songpiriyakij S., 2008, "Influence of Si/Al ratio on Compressive Strength of Rice Husk–Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste" *The 3rd ACF international conference ACF/VCA*, Rex Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam, pp. 151-157.

6. Xiaolu G., Huisheng S., Warren A. Dick, 2010, "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32, pp. 142-147.

7. Jumrat S., and Chatveera B., 2010, "Influence of Mix Proportions on Physical and Dielectric Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar", *KMUTT Research and Development Journal*, 33 (2), pp. 145-161 (In Thai).

8. 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*, 34 (1), pp. 31-44 (In Thai).

9. Rattanasak U., and Chindaprasirt P., 2009, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer" *Minerals Engineering*, Vol. 22, pp. 1073-1078.

10. Taebuanhuad S., Rattanasak U., and Jenjirapanya S., 2012, "Strength behavior of fly ash geopolymer with microwave pre-radiation curing", The Journal of Industrial Technology, 8 (2), In press (In Thai).

11. ASTM C192/C 192M-06. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02 2006.

12. ASTM C39/C 39M-05. Standard test method for compressive strength of cylindrical Concrete specimens. Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02 2006.

13. Fletcher R.A., Mackenzie K.J.D., Nicholson C.L., Shimada S., 2005, "The composition range of alumino silicate geopolymers", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, pp.1471–1477.

14. Rattanasak U., and Chindaprasirt P., 2009, "*Rice husk ash in concrete*", 1st ed, Science and Engineering (In Thai).

15. Neville A.M., 1996, *Properties of Concrete*, 4th ed., England, Addison Wesley.

16. Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P., 2010, "Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer", *Construction and Building*

Materials, Vol. 24, pp. 236-240.

17. Bakharev T., 2005, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1233-1246.

18. Skalny J., Marchand J., and Odler I., 2002, "*Sulfate attack on concrete*", 1st Edition. Spon Press. New York.

19. Pankhet K., and Rattanasak U., 2010, "Effect of Admixture on the Properties of Fly Ash Geopolymer", *KMUTT Research and Development Journal*, 33 (2), pp. 121-132 (In Thai).