

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง ...การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตและกรดซัลฟิวริกของ
จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

(Evaluation of sulfate and sulfuric acid resistances of fly ash-based geopolymer
concrete)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

๕๐156947

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

- 6 ส.ย. 2556

เริ่มบริการ

321177

กันยายน พ.ศ. 2555

- 7 ส.ค. 2556

อภิรักษ์นันทนาการ

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตและกรดซัลฟิวริกของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 มีงบประมาณทั้งโครงการ 414,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	414,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) และกรดซัลฟิวริก เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) 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 และแช่ในกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกที่อายุ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน

ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al นอกจากนี้พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากกรดซัลฟิวริกมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของ NaOH สูงขึ้น

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต, เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, แมกนีเซียมซัลเฟต, กรดซัลฟิวริก, ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH, อัตราส่วน Si/Al

Abstract

This research, the effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations and Si/Al ratios on compressive strength of geopolymer concretes exposed to magnesium sulfate solution and sulfuric acid 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 specimens 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. The loss of concrete weight due sulfuric acid were investigated after exposed to sulfuric acid solution for 7, 14, 28, 60, and 90 days. In addition, 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. Also, weight loss of geopolymer concrete due to sulfuric acid solution founded to increase with NaOH concentration

Keywords: Geopolymer concrete, Fly ash, Compressive strength, Magnesium sulfate, sulfuric acid, NaOH concentration, Si/Al ratio

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบคุณ โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่เช่าตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้ จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุอิโพลีเมอร์ไปใช้ในงานคอนกรีตอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์	4
2.2 เถ้าถ่านหิน	10
2.3 การกักกร่อนโดยซัลเฟต	15
2.4 การกักกร่อนโดยกรด	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	24
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	26
3.3 การทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	28
3.4 การทดสอบตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	34

บทที่ 4 ผลการทดลอง	36
4.1 คุณสมบัติของเถาถ่านหิน	36
4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ	38
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	41
4.4 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	44
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการต้านทานกรดซัลฟิวริกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	47
4.6 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อการต้านทานกรดซัลฟิวริกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผล	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก ก	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์	7
3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	30
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด	37
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินแม่เมาะ	38
4.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ	40
4.4 ผลของความเข้มข้น NaOH ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก	48
4.5 ผลของ Si/Al ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก	52

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์	6
2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน	7
2.3 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต	9
2.4 จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ก่อนและหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5%	16
2.5 เถ้าถ่านหิน	17
2.6 จีโอพอลิเมอร์เพสต์ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / 10 \text{ M NaOH} = 3$	17
2.7 ส่วนที่ก่อตัวเมื่อแช่ในสารละลาย 5% MgSO_4	17
2.8 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแช่ใน 5% H_2SO_4	20
3.1 เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	24
3.2 ซิลิกาฟูม	24
3.3 สารละลายไซเดียมซิลิเกต	25
3.4 เกล็ดแมกนีเซียมซัลเฟต	25
3.5 เครื่องผสมมอร์ตาร์ดาร์	26
3.6 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง	26
3.7 เครื่องทดสอบกำลังอัด	27
3.8 เครื่องแคปหัวกำมะถั	27
3.9 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	34
3.10 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	35
4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	36
4.2 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ	40
4.3 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ	41
4.4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย MgSO_4 เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน	43
4.5 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลาย MgSO_4 เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน	44
4.6 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย MgSO_4 เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน	46
4.7 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลาย MgSO_4 เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน	47

4.8	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริก เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	49
4.9	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	49
4.10	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน NaOH	50
4.11	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน NaOH	51
4.12	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน อัตราส่วนระหว่าง Si/Al	53
4.13	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน อัตราส่วนระหว่าง Si/Al	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ถูกใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น การก่อสร้างอาคาร บ้านพักอาศัย และถนน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาจากการเผาสารที่ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ในช่วง 1,400-1,600 องศาเซลเซียส กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงต้องใช้พลังงานสูงมาก ในการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา และการบดละเอียด

ผลกระทบที่เกิดจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นนี้จึงควรที่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยการหาวัสดุประสานมาทดแทน เช่น การใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม จากเกษตรกรรม และจากธรรมชาติ เพื่อมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำปูนซีเมนต์ผสม (Blended Cement) ทั้งนี้จะเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับสารที่จะใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ตัวอย่างเช่น วัสดุปอชโซลาน (Pozzolan Materials) เป็นสารที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานในตัวเอง แต่เมื่อผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ดี ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งและลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตได้อีกด้วย สารปอชโซลานที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) นอกจากนี้ยังมีเถ้ากลบ (Rice Husk Ash) ดินขาวเผา (Calcined Kaolin) เถ้าชีวมวล (Biomass Ash) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามสารปอชโซลานไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าดังกล่าวต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาปอชโซลานต่อไป เพื่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรตที่มีคุณสมบัติยึดประสาน

นอกจากนี้ยังมีความพยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้สารปอชโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า “จีโอพอลิเมอร์” จีโอพอลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยการชะซิลิกอนและอะลูมินาในสารละลายเบสความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้

ซัลฟิดรอนและอะลูมินาเกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันเป็น โมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยสารจำพวกซัลฟิดรอนและอะลูมินาสามารถพบได้จากวัสดุปอซโซลาน ซึ่งในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาว่าเป็นสารที่ถูกชะออกมาจากปอซโซลานอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวอย่างเต็มที่จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีองค์ประกอบของซัลฟิดรอนผสมเพิ่มเข้าไปด้วย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Coal Fly Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานหรือโรงไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งมีเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นประมาณ 3.0 ล้านตันต่อปี เถ้าถ่านหินเหล่านี้หากไม่สามารถนำไปใช้ จะสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมต่อผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียง

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการแก้ปัญหา ทั้งในด้านราคาค่าต้นทุนการผลิตและปัญหาด้านพลังงานในประเทศไทย ทุกวันนี้ประเทศไทยได้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วย เถ้าถ่านหินและเถ้าก้นเตา นอกจากนี้ยังได้เถ้าถ่านหินจากโรงงานกระดาษและโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันนี้มีการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีต โดยการนำเถ้าถ่านหินมาแทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ตลอดจนสามารถช่วยลดความร้อนในคอนกรีตลงได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์เพื่อมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์น้อยมาก และการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจังยังไม่ปรากฏ แต่ผลการศึกษาพบว่า การทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ให้ผลของการศึกษาทางด้านซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ไปในทิศทางค่อนข้างดี ดังนั้นในการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานจริงจึงควรมีการศึกษาการใช้งานที่เกี่ยวกับคอนกรีตด้วย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกและสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

โดยการศึกษาครั้งนี้ได้นำเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีสภาพแห้งปราศจากความชื้นและสิ่งเจือปนมาใช้ หากสามารถพัฒนานำมาใช้ได้อย่างจริงจังจะเป็นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้แทนที่ของการใช้ปูนซีเมนต์และเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ลักษณะคล้ายคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ แต่จะไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารประกอบ ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการใช้วัสดุปูนซีเมนต์และเพื่อเพิ่มเป็นทางเลือกให้กับงานก่อสร้างต่อไปได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ที่มีผลต่อการต้านทานกักคร่อนของสารละลายซัลเฟต

1.2.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ต่อการกักคร่อนของกรซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ โดยทำการหล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 100×200 มม.² เพื่อทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ตาม ASTM C 39 หลังจากนั้นทำการแกะแบบบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศไว้ 28 วัน เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือบ่มในอากาศแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและแช่ในกรดซัลฟิวริก โดยจะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุทดสอบ 3 และ 6 เดือน ทำการทดสอบตัวอย่างที่แช่ในกรดซัลฟิวริกที่อายุทดสอบ 7, 14 และ 28 วัน และตัวอย่างที่บ่มในอากาศก็จะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุเดียวกันกับตัวอย่างที่แช่ในกรดซัลฟิวริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทำจากเถ้าถ่านหิน ที่มีผลทำให้การต้านทานการทำลายเนื่องจากกรดซัลฟิวริกและสารละลายซัลเฟตไปในทิศทางที่ดี ตลอดจนสามารถใช้แทนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ได้

1.4.2 ได้มีการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์มากขึ้น โดยให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมคือ แข็งแรง ทนทาน ปลอดภัย และประหยัด ตลอดจนเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้

1.4.3 เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตไปใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการกักคร่อนสูง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการก่อสร้างโดยเฉพาะในประเทศไทย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีตเพราะทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานส่วนผสมอื่น กระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ใช้พลังงานสูงมาก การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณ 7 % ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานปริมาณสูง และปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างกว้างขวาง สารซีเมนต์ดังกล่าวสาที่เรียกว่า “สารจีโอพอลิเมอร์”

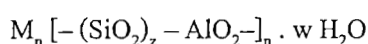
สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับค่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาถูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นค่างสูง โดยให้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย ดร. Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางธรณีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีไอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมินามากกระตุ้นด้วยค่าง กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าลอยซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น

ส่วนผสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จะใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาถ่านหินชนิดใดก็ได้ เถ้าถ่านหินมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ เทา-น้ำตาล ถึง น้ำตาลแดง หรือน้ำตาลเหลือง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยปกติจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อะลูมินาไดรอกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์รัสไดรอกไซด์ (Fe₂O₃) ผลรวมของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 90 โดยน้ำหนัก

2.1.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวิเชียร ชาลี, 2549)

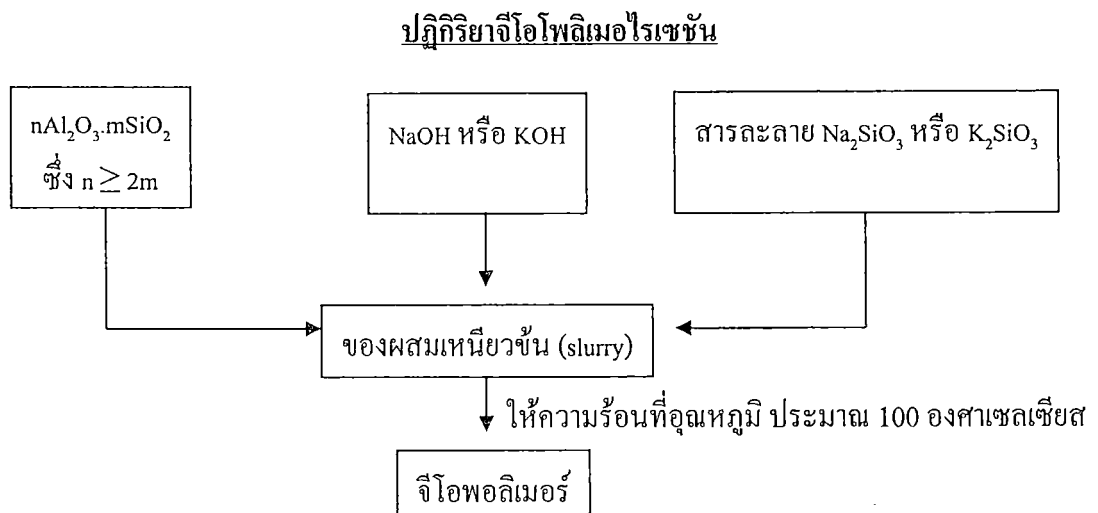
จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารที่เชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังสมการ



โดยที่	M	คือ ธาตุอัลคาไล
	-	คือ การยึดเกาะพันธะ
	z	คือ จำนวน โมเลกุล
	n	คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
	w	คือ จำนวน โมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60 - 90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยแผนผังการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้แสดงในรูปแบบที่ 2.1

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการช่วยยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

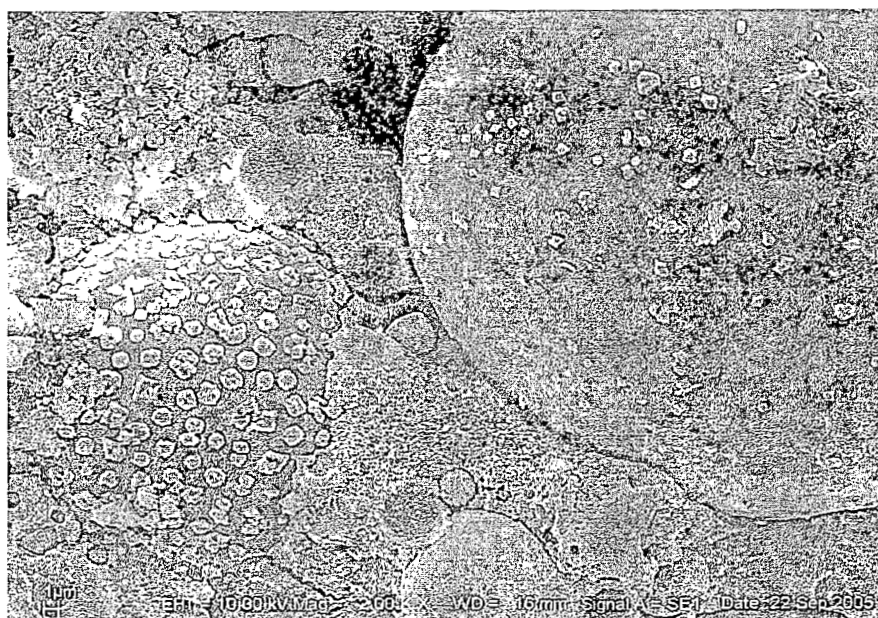


รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

2.1.2 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2548)

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ที่เกิดจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุอีโพอติเมอร์จากเถ่าถ่านหิน (อุปถัมภ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2548)

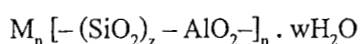
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และอีโพอติเมอร์ (อุปถัมภ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2548)

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาอีโพอติเมอร์เซชัน
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิกา
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ใน สารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟสดี
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควมแน่นของสาร เชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาใน เฟสดี
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90 - 300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็นกรด-เบส	6 - 11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่ แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐาน

	(unique crystal)	และกิ่งอสังฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

2.1.3 คุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี วัสดุนี้นี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้ สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต $[\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}]$ จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งาน วัสดุนั้นๆ อาทิเช่น อัตราส่วน 1, 2, และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบพอลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

อัตราส่วน 2:1

เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วน 3:1

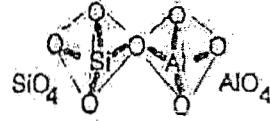
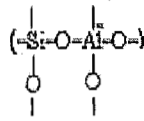
สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททาเนียม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200-1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนระหว่าง 20:1 – 35:1

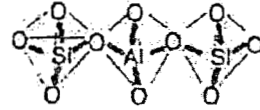
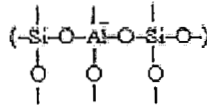
ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ใน 2 มิติ มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

อุณหภูมิในการผสมและวิธีการบ่มจะมีผลต่อคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่ได้ เช่น ไฟเบอร์กลาสประเภท E จะต้องมีการทำการผสมและบ่มที่อุณหภูมิห้อง สำหรับประเภทคาร์บอนจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สำหรับประเภทเหล็ก จะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ส่วนประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) จะทำการผสมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 1,800 องศาเซลเซียส

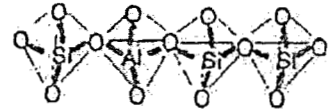
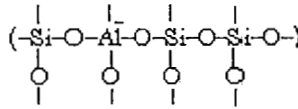
Si:Al = 1 โพลีไซอะเลต



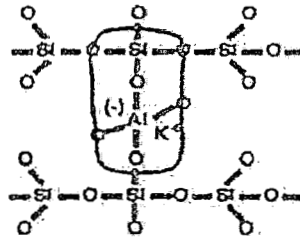
Si:Al = 2 โพลีไซอะเลตไซลอกโซ



Si:Al = 3 โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ



Si:Al > 3 ไซอะเลตเชื่อมขวางกัน



รูปที่ 2.3 สูตร โครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต

วัสดุอิพอลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทั้งซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่สามารถละลายในสารละลายอัลคาไล จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุอิพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์

วัสดุประสานอิพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ ก็สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่า วัสดุประสานอิพอลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่งและงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดีเช่นประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน มีความทนทานเป็นเลิศ และมีความต้านทานต่อกรดสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุอิพอลิเมอร์ สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิกส์และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุอิพอลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับฟลักซ์ทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือน พอลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุอิพอลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

การตรึงของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียในวัสดุซีโอพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุซีโอพอลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือเฟลด์สปาทอยด์ (Feldspatoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีที่ดี หรือทำของเสียเป็นก้อนของเสียทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์ วัสดุซีโอพอลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ได้โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง 3 มิติของวัสดุซีโอพอลิเมอร์

ปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1 ตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูบบรรยากาศ 1 ตัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) แต่สำหรับวัสดุประสานซีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุดิบสามารถหาได้ทั่วไป โดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และดินขาว เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูบบรรยากาศได้เป็นอย่างดี

การผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุซีโอพอลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบูรณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนักคือที่ประมาณ 45 - 90 องศาเซลเซียส หากต้องการผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา คาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จได้ ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องมาจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุซีโอพอลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

2.2 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าถ่านก้นเตา ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นต้น เถ้าที่ได้นี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมกับน้ำ จึงเป็นแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานก่อสร้างแทนปูนซีเมนต์และเพื่อลดปัญหาค่ามลภาวะได้อีกด้วย

2.2.1 ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

1. แอนทราไซต์ (Anthracite)
2. บิทูมินัส (Bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous)
4. ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

2.2.2 การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

1. การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลาย และรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ (Vitreous Particle)

2. การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอยที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผานี้ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

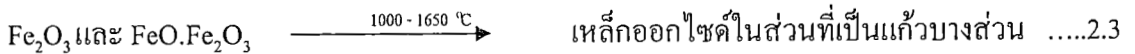
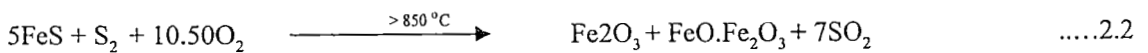
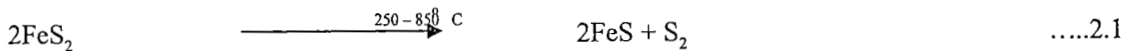
3. การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ

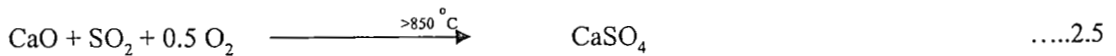
ในกระบวนการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆ ดังที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินที่ภายใต้การเผาดังต่อไปนี้

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz) เคาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

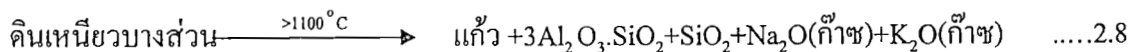
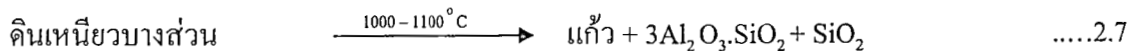
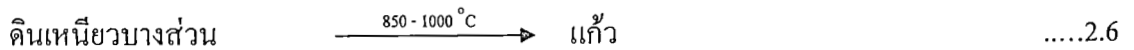
1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไทต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไทต์ ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของถ่านหิน ดังสมการ



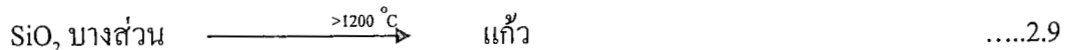
2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ดังสมการ



3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) และควอตซ์ (SiO_2) ในรูปของผลึกของคริสโตบาลิต (Cristobalite) ดังสมการ



4. ควอตซ์ (SiO_2) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้ว ดังสมการ



จะเห็นได้ว่าถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาระบบนี้ถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้ถ่านหินมีปริมาณ CaO และ CaSO_4 สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้ถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของ

เซมาไดต์ แมกเนไดต์ มุลไลต์ และควอตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมด และแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย ถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกลวง

2.2.3 ชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา อะลูมินา และเฟอริกออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้ถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 ถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า ถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำทำให้ถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

ถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้ถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง ถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นถ่านหินแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

2.2.4 รูปร่างและลักษณะของถ่านหิน

เมื่อถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้ถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) ถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่อขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อน

ไปได้ ทั้งนี้ถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง ถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

ถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในถ่านหิน และยังมีถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคถ่านหินเล็ก ๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลิโรสเฟีย (Plerosphere) ถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของถ่านหินกลวงคือ แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากถ่านหินกลวงเป็นถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และการเก็บเสียง (Acoustic)

ถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

2.2.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน ถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.²/ก. โดยค่าเฉลี่ยประมาณ 35,000 ซม.²/ก.

การวัดความละเอียดของถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8 - 30

2.2.6 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของถ่านหินได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มาตรฐาน ASTM C188 ถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียม

ออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเถ้านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้านหินละเอียด

2.2.7 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง อัตราส่วนของออกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเถ้านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI)

2.2.8 การใช้เถ้านหินในงานคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตที่สำคัญได้แก่ การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอนชั้นซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เช่นกัน

2.3 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นต้น

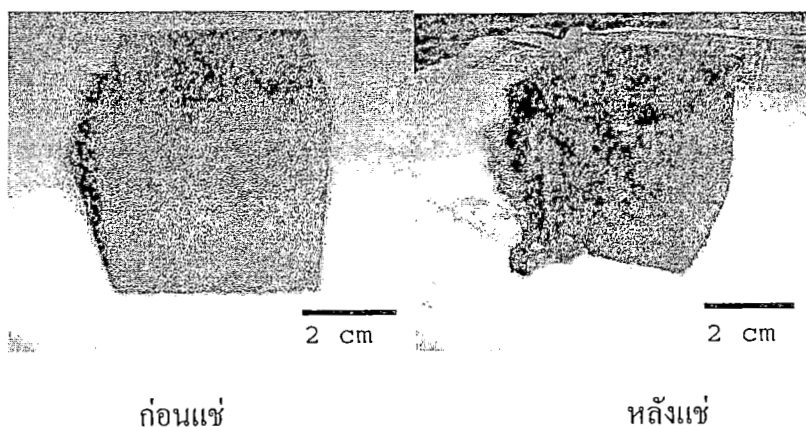
2.3.1 แหล่งของเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในดินบริเวณริมทะเล หรือ ในดินทั่วไป เกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือ โซเดียมซัลเฟตรองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักพบอยู่ในน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือตามแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติด้วย

2.3.2 กลไกของการทำลายโดยซัลเฟตต่อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)

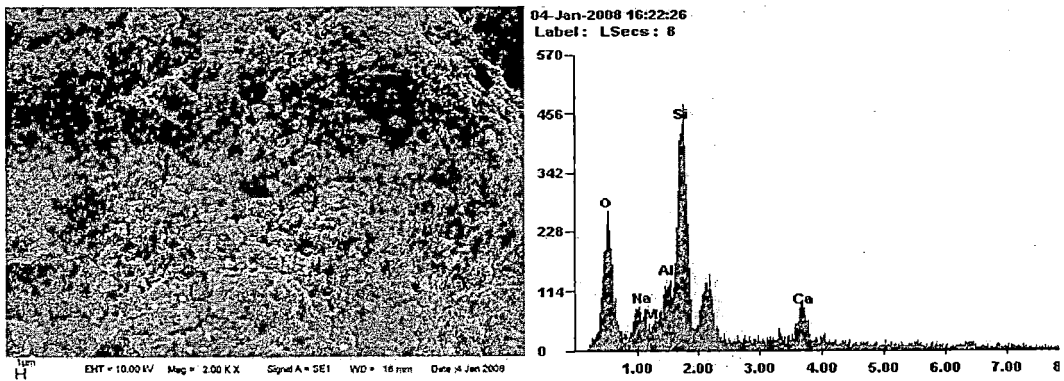
ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาหรือจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MS) แทน เมื่อสารทั้งสองดังกล่าวปรากฏอยู่ในดิน น้ำทะเล น้ำเสียก็มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจกลไกการทำลายโดยซัลเฟต เพื่อที่จะได้ป้องกันโครงสร้างคอนกรีตจาก

ตั้งแวดล้อมที่อันตรายดังกล่าว กลไกการเกิดจะพบส่วนที่ก่อตัวมาจากพื้นที่ผิวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต่า (ดังแสดงในรูป 2.4) สารที่เกิดขึ้นอาจจะเป็น $Mg(OH)_2$ จากปฏิกิริยาระหว่าง Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จาก $NaOH$ ที่ใช้ในการผสม) ดังสมการ 2.10

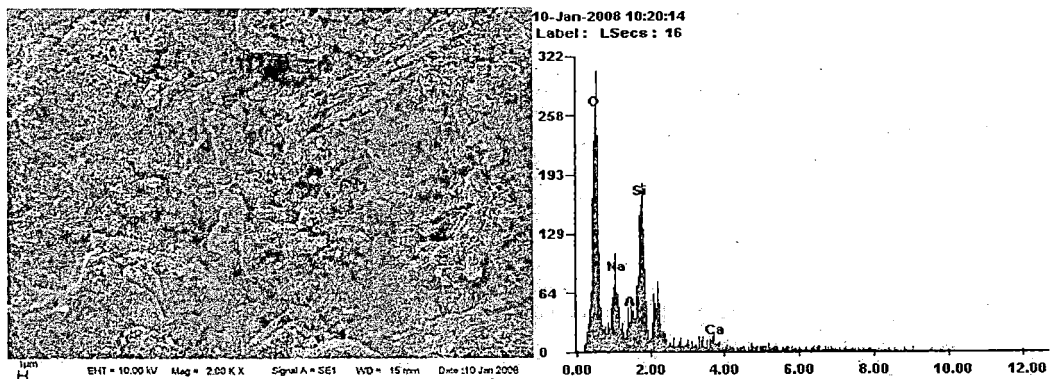


รูปที่ 2.4 จีโอพอลิเมอร์มอร์ต่าก่อนและหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)

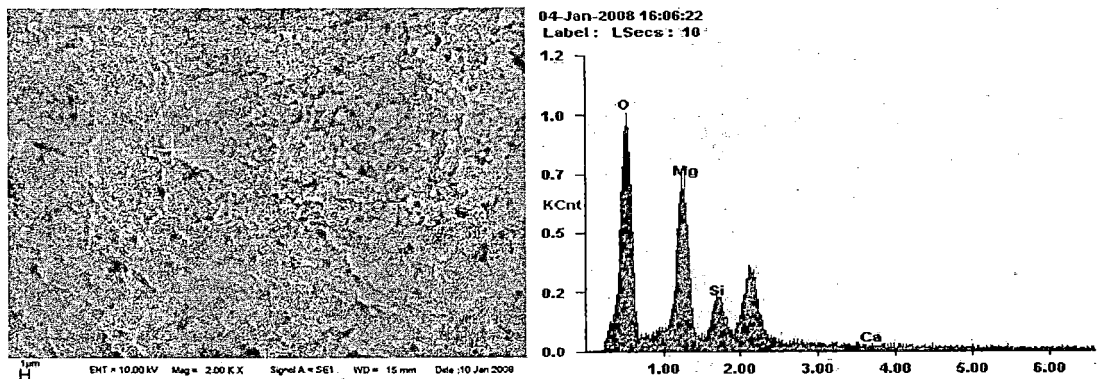
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณผิวของจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกา (Skalny et al., 2002) โดยการเกิดสารประกอบทั้งสองทำให้ตัวอย่างเกิดการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรูพรุนและช่องว่างในตัวอย่าง (Bakharev, 2005) เป็นผลให้ค่ากำลังอัดลดลงอีกทั้งการสูญเสียน้ำหนักเกิดจาก SiO_2 ที่ถูกชะออกมาจากมอร์ต่าเกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตออกมากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่พบที่ส่วนที่ก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ดังที่สามารถตรวจพบ Si ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (ดังรูปที่ 2.5 ถึง รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.5 ถ้ำก้นเตา (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)



รูปที่ 2.6 จีโอพอลิเมอร์เพสต์ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / 10 \text{ M NaOH} = 3$ (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)



รูปที่ 2.7 ส่วนที่ก่อตัวเมื่อแช่ในสารละลาย 5% MgSO_4 (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)

ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำก้นเตาที่ใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / 10 \text{ M NaOH}$ เท่ากับ 3 และตัวอย่างส่วนที่ก่อตัวที่พื้นผิวตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลาย 5% MgSO_4 เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดย (รูปที่ 2.5) แสดงโครงสร้างจุลภาคของถ้ำก้นเตาที่บดละเอียด พบว่าถ้ำก้นเตาพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และมีเม็ดเจลที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของถ้ำก้นเตา เมื่อนำถ้ำก้นเตามาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮดรอกไซด์และ โซเดียมซัลไฟด์ พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของ

จีโอพอลิเมอร์เกิดเจลก่อตัวเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2.6 ส่วนก่อตัวจากพื้นผิวจีโอพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.7 พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะแตกต่างจาก 2 ภาพแรกมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว โคนงมนไม่มีเหลี่ยมมุม

ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM-EDX พบว่าในส่วนของตัวอย่างที่ก่อตัวของพื้นผิวจีโอพอลิเมอร์องค์ประกอบหลักประกอบด้วยซิลิกอนและแมกนีเซียม แต่ไม่พบอลูมิเนียมในส่วนนี้ ซึ่งอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมซิลิเกต

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต มีดังต่อไปนี้

- 1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟต ตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต ถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงก็จะมี การทำลายที่รุนแรงมากขึ้น
- 2) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปใน คอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้ระดับความรุนแรงลดลง

2.4 การกัดกร่อนโดยกรด

คอนกรีตอาจถูกกระทำให้สึกกร่อนได้โดยสารเคมีหลายชนิด การสึกกร่อนของคอนกรีตที่เกิดจาก สารเคมีอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งอาจจะพบไม่มากเท่ากับซัลเฟต แต่ก็ยังเป็นลักษณะการสึกกร่อนที่รุนแรง นั่นคือ การกัดกร่อนโดยกรด คอนกรีตจะเกิดความเสียหายในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด โดยของเหลวที่มี pH ต่ำ กว่า 6.5 และหาก pH ต่ำกว่า 4.5 ก็จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงมาก ตัวอย่างของกรดที่สามารถกัด กร่อนคอนกรีตอย่างรุนแรงคือ กรดคาร์บอนิก (Carbonic), กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric), กรดไฮโดร ฟลูออริก (Hydrofluoric), กรดไนตริก (Nitric), กรดฟอสฟอริก (Phosphoric), กรดซัลฟิวริก (Sulfuric), กรดแอซิติก (Acetic), กรดซิตริก (Citric), กรดฟอร์มิก (Formic), กรดฮิวมิก (Humic), กรดแลคติก (Lactic) และกรดแทนนิก (Tannic)

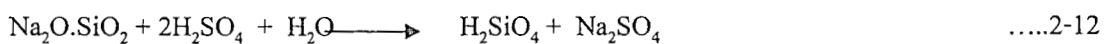
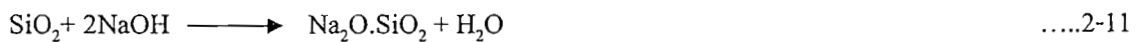
2.4.1 แหล่งที่มาของกรด

กรดที่มาทำลายคอนกรีตอาจมาจากแหล่งต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 1) จากโรงงานหรือแหล่งผลิตที่มีการใช้กรดในการผลิต หรือได้กรดเป็นผลผลิตจากการผลิต
- 2) จากระบบบำบัดน้ำเสียและท่อระบายน้ำเสียจากบ้านเรือน ซึ่งโดยระบบทางชีวภาพทำให้เกิด กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้
- 3) จากฝนกรด ซึ่งอาจจะมีกรด H_2SO_4 หรือ H_2CO_3 เป็นต้น

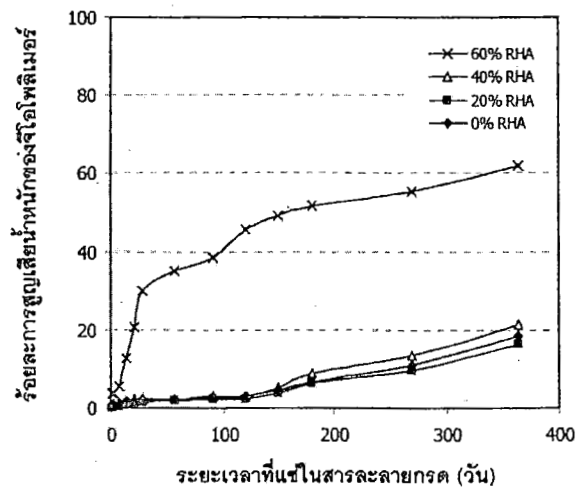
2.4.2 กลไกของการกักกร่อนโดยกรดต่ออีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญา จินดา ประเสริฐ, 2552)

การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุอีโอพอลิเมอร์ที่เกิดการกักกร่อนของสารละลาย 5% H_2SO_4 ของอีโอพอลิเมอร์ละลายผสมเข้าเคลือบแสดงในรูปที่ 2.8 การใช้เข้าเคลือบผสมกับละลายที่ปริมาณเข้าเคลือบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของละลาย ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ากรณีการใช้ละลายล้วนที่ทุกอายุการแช่ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาจากเข้าเคลือบกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ทำให้เนื้ออีโอพอลิเมอร์แน่นขึ้น นอกจากนี้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ลดการกักกร่อนของกรดได้ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณเข้าเคลือบในส่วนผสมอีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 40 พบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเข้าเคลือบที่ร้อยละ 60 เห็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเข้าเคลือบในส่วนที่มากเกินไป ทำให้มีปริมาณซิลิกาในส่วนผสมมากกว่าปริมาณซิลิกาที่มากเกินไปเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้โซเดียมซิลิเกต ซึ่งสามารถถูกชะด้วยกรดซัลฟูริกได้ เป็นสารประกอบของกรดซิลิก (Silicic acid, H_4SiO_4) ออกมาในสารละลายทำให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น สมการของปฏิกิริยาการชะระหว่างซิลิกากับกรดซัลฟูริกสามารถแสดงได้ดังนี้



ซึ่งจากสมการแสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลิกาที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาที่อยู่ในอีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อทำปฏิกิริยากับเบสแก่หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้โซเดียมซิลิเกต (ดังสมการที่ 2-11) และเมื่อโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกได้เป็นสารประกอบของกรดซิลิกซึ่งสามารถถูกชะได้ (ดังสมการที่ 2-12)

ดังนั้น ปริมาณการใช้เข้าเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตอีโอพอลิเมอร์ ปริมาณเข้าเคลือบที่ใช้ผสมละลายไม่ควรเกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของละลาย หากอีโอพอลิเมอร์นั้นต้องสัมผัสกับกรด เช่น บริเวณท่อน้ำ เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักได้



รูปที่ 2.8 ร้อยละการดูดซับเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแช่ใน 5% H_2SO_4 (อุบลลักษ์ณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

ความรุนแรงของการกัดกร่อนของกรดขึ้นอยู่กับชนิดของกรด ตลอดจนความเข้มข้นของกรด กรดที่มีการกัดกร่อนรุนแรงจะเป็นชนิดที่เปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตไปเป็นเกลือแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ง่าย ดังนั้นกรดเกลือ (HCl) จะเป็นกรดที่มีการกัดกร่อนคอนกรีตที่รุนแรงมาก เนื่องจากเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือแคลเซียมที่เกิดจากกรดชนิดอื่นๆ

2.4.3 วิธีการป้องกันการกัดกร่อนโดยกรด

การใช้สารเคลือบคอนกรีต เช่น อีพอกซี จะเป็นวิธีป้องกันที่ดีที่สุด แต่ก็มีข้อจำกัดที่ไม่อาจใช้วิธีนี้กับทุกพื้นที่ได้ และมีราคาแพง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุ และนักวิจัยด้านคอนกรีตมากขึ้น ฉะนั้นแล้วมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีดังต่อไปนี้

อุบลลักษ์ณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์หรือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง ในช่วงอัตราส่วนผสมโดยโมลดังนี้ $Na_2O/SiO_2 = 0.2 - 0.48$, $SiO_2/Al_2O_3 = 3.3 - 4.5$, $H_2O/Na_2O = 10 - 25$ และ $Na_2O/Al_2O_3 = 0.8 - 1.2$ โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ $65^\circ C$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง Optical Microscope (OM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่เป็นอัตราส่วนผสมต่างกัน เพื่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุ โดยจะเห็นเม็ดเจลาเกิดการก่อตัวรอบๆเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการ

เปลี่ยนแปลงเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ขึ้น ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 560 กก/ซม² ที่ระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง

พร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล (2551) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เมื่อใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยการเจาะรูตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม.³ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร จนทะลุผ่าน จากนั้นใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ฝังลงไปนคอนกรีตเป็นระยะ 150 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสานบริเวณรูเจาะ จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้จะมีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซิลิกาฟูมและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ผลที่ได้พบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมได้ โดยแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 79 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชิงพิณ (2552) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 10 ซม.³ ซึ่งกำหนดอัตราส่วนทางเคมีต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งอุณหภูมิบ่มเป็น 2 ชุด บ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ 60°C ทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 161 กก./ซม.² และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 329 กก./ซม.² จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้าถ่านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

Chindaprasirt et al., 2007 ได้ศึกษา ความสามารถในการทำงาน ได้ และกำลังของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมสูง ซึ่งพบว่า การไหลของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าต่ำลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น และการปรับปรุงการไหลของมอร์ตาร์ควรผสมน้ำและสารลดน้ำพิเศษแต่จะมีผลกระทบต่อกำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์จะไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์มากนัก

Songpiriyakij et al., 2010 ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดและระดับปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymers) พบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้สามารถให้ซิลิกาที่ดีในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ Si/Al ที่มีค่าสูง โดยใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหิน และค่า Si/Al ที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดคือ 8 (SiO₂/Al₂O₃ = 15.9) นอกจากนั้นพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อ Na₂O/SiO₂ และ Na₂O/Al₂O₃ มีค่าสูงขึ้น

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และคณะ (2553) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนา กำลังอัดในอัตราที่สูงช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

ในส่วนของการศึกษาผลของสารละลายซัลเฟตต่อคอนกรีตจะมีมากในคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งส่วนใหญ่การทำลายจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว แตกร้าวและสูญเสียกำลังอัดในที่สุด พิษญา ธีระมิตร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2544) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ซึ่งแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และประเภทที่ V ด้วยเถ้าถ่านหินที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และ วัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตั้งแต่อายุ 1 วันจนถึง 440 วัน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินทั้ง 3 ขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ได้ แท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดและอัตราการแทนที่เท่ากันในปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มีการขยายตัวมากกว่าแท่งมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ V การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินอนุภาคเล็กสามารถลดการขยายตัวได้มากกว่าเถ้าถ่านหินอนุภาคขนาดใหญ่ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินความละเอียดเดียวกันแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 40 มีการขยายตัวน้อยกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินสามารถลดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้ตามปริมาณการแทนที่และความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาผลของสารละลายซัลเฟตต่อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ วิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน โดยน้ำหนักของโซเดียมซัลเฟตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบกำลังหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษามุมฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (stretching) โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ที่ช่วงความถี่ 1200-950 cm^{-1} และ โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค

Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 35 เมกะปาสกาล และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัด ต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาคด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้และยังสามารถต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดซัลฟิวริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดและน้ำหนักที่สูญหายของในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดี จีโอพอลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้านหิน และดินขาวเผา เป็นต้น ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของจีโอพอลิเมอร์โดยการทำปฏิกิริยาที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมินาจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นจะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

666.94

05590

4.2

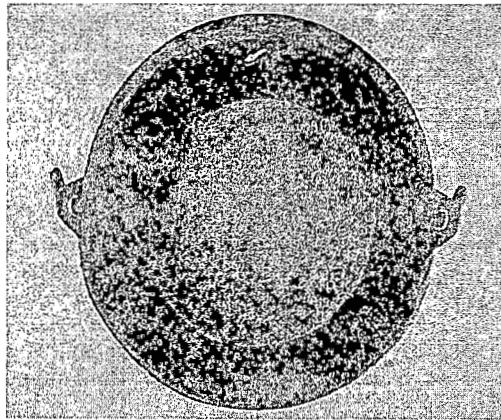
321177

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ถ้ำถ่านหิน (รูปที่ 3.1) : จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23

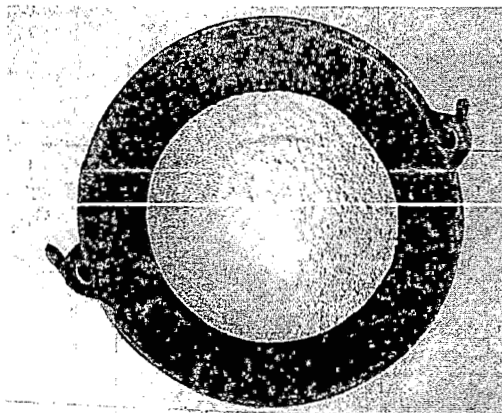


รูปที่ 3.1 ถ้ำถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

2. หิน : ใช้หินปูนมีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร ที่มีขนาดกะตามมาตรฐาน ASTM C33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 6.34 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.62

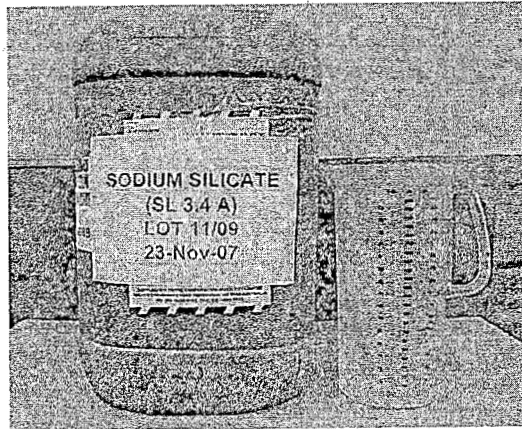
3. ทราย : ใช้ทรายแม่น้ำ ออบแห้งร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีขนาดมาตรฐาน ASTM C33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.61

4. ซีลิกาฟูม (รูปที่ 3.2) : ซีลิกาฟูม หรือไมโครซีลิกา มีค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.2



รูปที่ 3.2 ซีลิกาฟูม

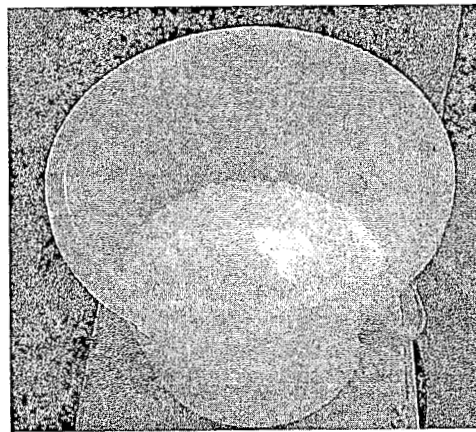
5. $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$: สารละลายโซเดียมซิลิเกต ตามมาตรฐาน มอก.433 - 2539 ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

6. NaOH : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด ตามมาตรฐาน มอก. 150 - 2518 ความเข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

7. MgSO_4 : เกล็ดแมกนีเซียมซัลเฟต (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เกล็ดแมกนีเซียมซัลเฟต

8. H_2SO_4 : กรดซิวฟิวริก (98% H_2SO_4 -Commercial grade)

9. น้ำ : ใช้น้ำประปา

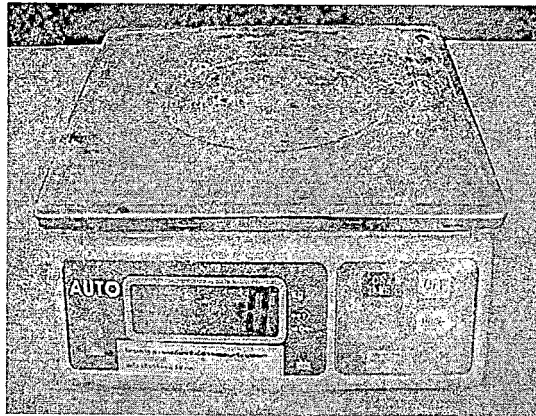
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมมอร์ตาร์ (รูปที่ 3.5)



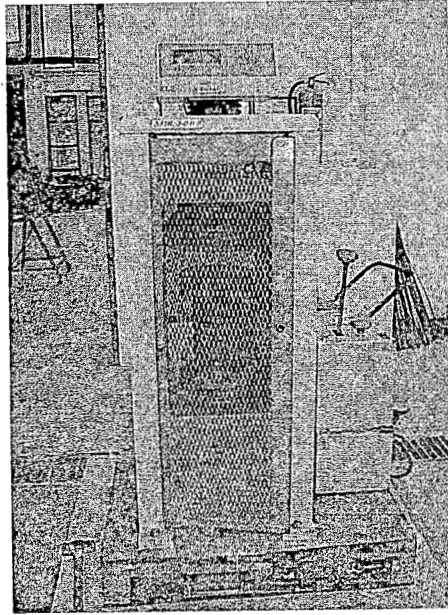
รูปที่ 3.5 เครื่องผสมมอร์ตาร์

2. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (รูปที่ 3.6)



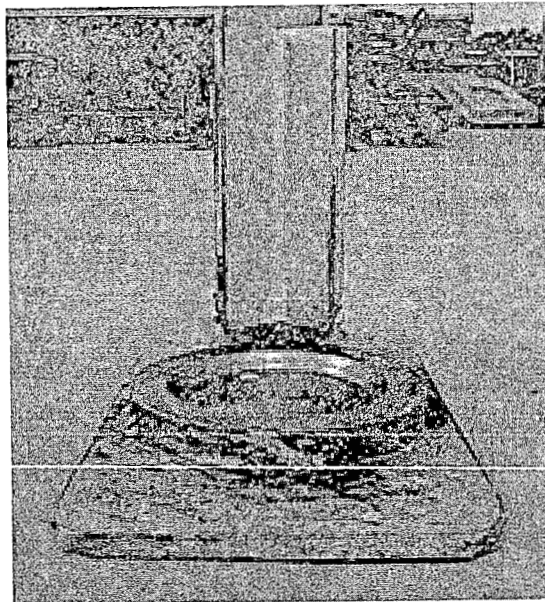
รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

3. เครื่องทดสอบแรงอัด ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังอัด

4. ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (ใช้สำหรับร่อนทราย)
5. แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100×200 มม²
6. ที่แคปหัวก้ำมะถัน (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องแคปหัวก้ำมะถัน

7. ปีกเกอร์พลาสติก
8. ถังใส่หินและทราย
9. ถุงมือยาง

10. เข็ยอกพลาสติก ขนาด 2200 มล. และ 1200 มล.

3.3 การทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

3.3.1 การเตรียมสารละลาย

3.3.1.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 320.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

3.3.1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 480.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

3.3.1.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 560.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์

3.3.1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 640.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 16 โมลาร์

3.3.1.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 720.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 โมลาร์

3.3.2 การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เตรียมโดยชั่งเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต 50 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ทำการเตรียมสารละลายจนได้ปริมาณสารละลายมากพอที่จะแช่ตัวอย่าง

3.3.3 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก

ทำการตวง (98% H_2SO_4 -Commercial grade) มา 1.7 มล. แล้วเจือจางให้ได้ 1000 มล. ทำการเตรียมสารละลายจนได้ปริมาณสารละลายมากพอที่จะแช่ตัวอย่าง

หมายเหตุ เนื่องจากกรด H_2SO_4 มีการแตกตัวของ H^+ 2 ครั้ง โดยครั้งแรกแตกตัว 100% ครั้งที่ 2 แตกตัวน้อยกว่าครั้งแรก จึงอาจทำให้ pH ที่เตรียมได้มากกว่าที่คำนวณ ดังนั้นเมื่อเตรียมสารแล้วให้หยดกรดเพิ่มเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ตามต้องการ

3.3.4 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งหมด โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเถ้านหิน ซิลิกาฟูม และมวลรวมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังนั้นการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 10 ส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก./ม. ³)						ค่ายุบตัว (ซม.)
		Fly Ash (FA, กก.)	หิน (R, กก.)	ทราย (S, กก.)	NaOH (กก.)	Na ₂ O:SiO ₃ (กก.)	ซิลิกาฟูม (SF, กก.)	
1	8M	390	1092	585	67	167	-	25
2	10M	390	1092	585	67	167	-	25
3	12M	390	1092	585	67	167	-	25
4	12M	390	1092	585	67	167	-	24
5	16M	390	1092	585	67	167	-	25
6	16M	390	1092	585	67	167	-	25
7	Si/Al=2.2	390	1103	585	28	212	5.9	25
8	Si/Al=2.4	390	1092	585	28	212	21.5	25
9	Si/Al=2.6	384	1075	576	30	222	35.5	24
10	Si/Al=2.2	390	1058	567	20	576	49.3	25

- การใช้สัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้

ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

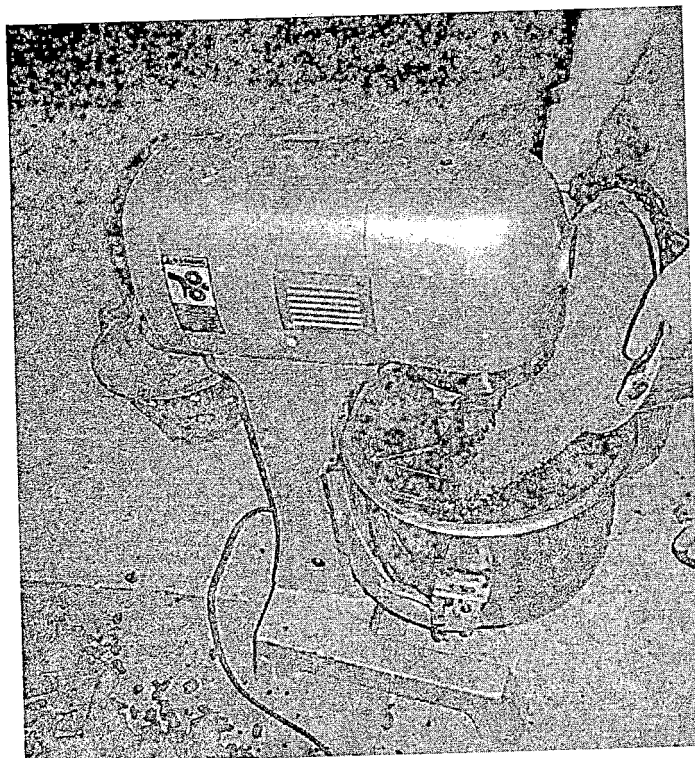
FA	หมายถึง	ถ้ำถ่านหิน
R	หมายถึง	หินปูน (ตากแห้ง) มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร
S	หมายถึง	ทรายแม่น้ำ (อบแห้ง) ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
SF	หมายถึง	ซิลิกาฟูม
NaOH	หมายถึง	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
Na ₂ O:SiO ₃	หมายถึง	สารละลายโซเดียมซิลิเกต
H ₂ SO ₄	หมายถึง	กรดซัลฟิวริก

3.3.5 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยทำการผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงชั่งสารละลายที่เตรียมไว้ จากนั้นทำการเทสารละลายที่ชั่งเตรียมไว้ผสมกับสารตั้งต้นให้เข้ากัน แล้วจึงใส่หินและทรายผสมด้วยเครื่องผสม เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงเทจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลงแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาด 100×200 มม.² (แสดงดังรูปที่ 3.9 (ก) – 3.9(จ)) เพื่อทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตาม ASTM C 39 หลังจากนั้นทำการแกะแบบบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศไว้ 28 วัน เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ บ่มในอากาศ แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และแช่ในกรดซัลฟิวริก โดยจะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุทดสอบ 3 และ 6 เดือนและทำการทดสอบตัวอย่างที่แช่ในกรดซัลฟิวริกที่อายุทดสอบ 7, 14 และ 28 วัน และตัวอย่างที่บ่มในอากาศก็จะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุเดียวกันกับตัวอย่างที่แช่ในกรดซัลฟิวริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



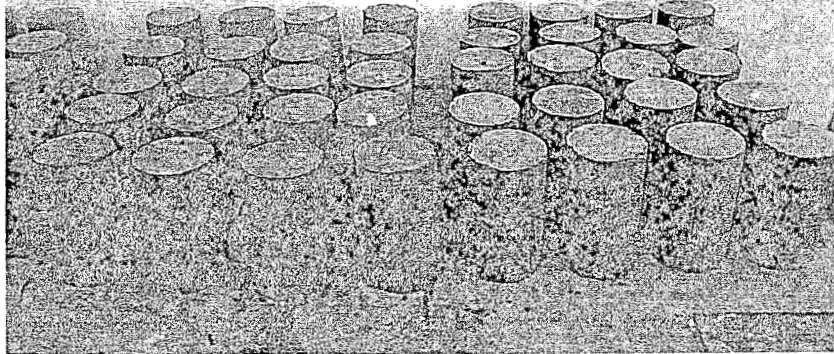
ก) เทสารละลายที่เตรียมไว้ผสมกับเถ้าถ่านหินให้เข้ากัน



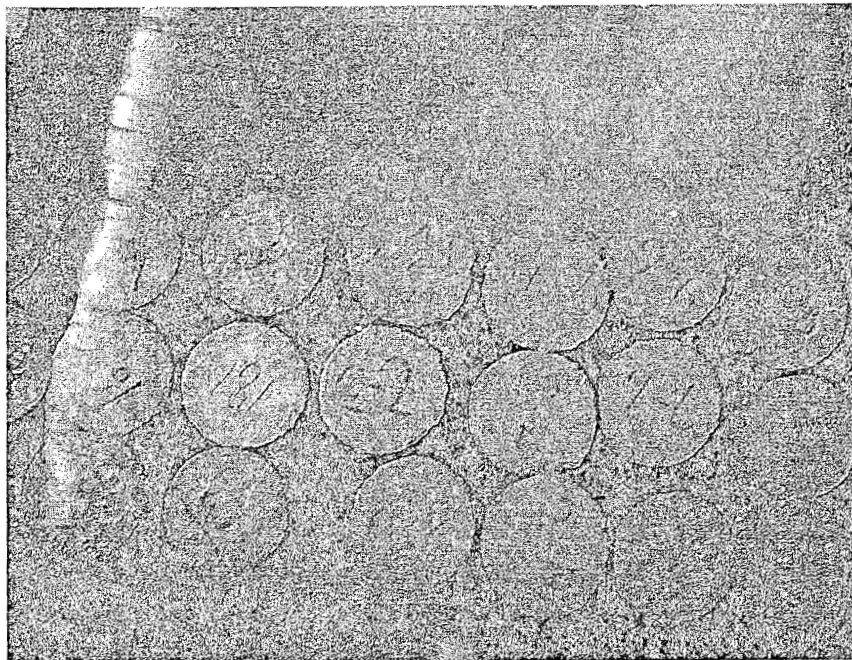
ข) เทมวลรวมที่เตรียมไว้ลงในเครื่องผสม



ค) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสด



ง) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัว



จ) การแช่ตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

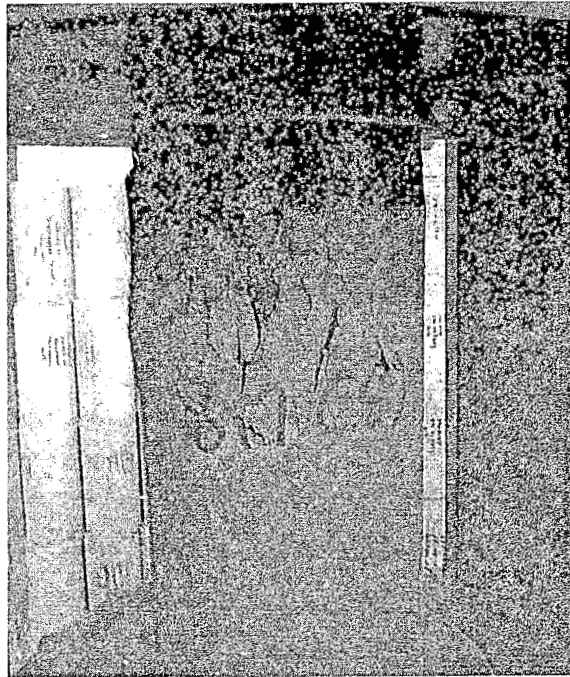
รูปที่ 3.9 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

3.4 การทดสอบตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การทดสอบหาลำดับรับแรงอัดของคอนกรีตได้ใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตด้วย เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตยังไม่มีมาตรฐานรองรับ ทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100×200 มม.² เมื่อคอนกรีตมีอายุครบตามอายุทดสอบจึงทำการชั่งน้ำหนักและทดสอบกำลังรับแรงอัด ตาม ASTM C 39 (ดังรูป 3.10) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลา และทดสอบกำลังอัดในกลุ่มที่แชนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่อายุ 90 และ 180 วัน



รูปที่ 3.10 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.4.2 การทดสอบน้ำหนักที่สูญหาย

ทดสอบน้ำหนักที่สูญหายโดยการชั่งน้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก่อนแช่และหลังแช่ในกรดซัลฟิวริกและเมื่อครบอายุทดสอบ ทำการศึกษาสภาพการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกในรูปของน้ำหนักที่สูญหาย ในการศึกษาครั้งนี้ทำการวัดน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากกรดซัลฟิวริก ที่อายุหลังแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

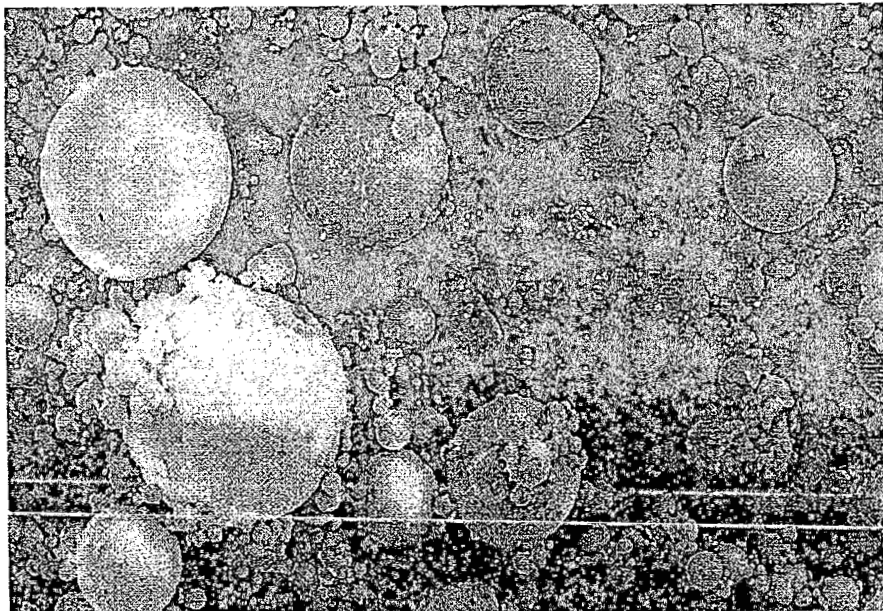
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งได้แก่ การทดสอบกำลังอัดและการสูญเสียกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต รวมถึงการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก

4.1 คุณสมบัติของเถ้านหิน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1.1 รูปร่างและลักษณะของเถ้านหิน

เถ้านหินมีสีน้ำตาลแดงและมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้านหินจากภาพถ่ายขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.1 เถ้านหินขนาดเล็กจะมีทรงกลมและผิวเรียบและเถ้านหินขนาดใหญ่ที่เกิดจากการปะทะกันของเถ้านหินขนาดเล็กจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้านหินแม่เมาะ

4.1.1.2 ขนาดและความละเอียด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งมีขนาดและมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน โดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยา โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงการพัฒนากำลังอัดในคอนกรีตจะเร็วขึ้นเพราะความละเอียดสูงก็หมายถึง มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด	
Specific Gravity	2.23
Retained on Sive No. 325 (%)	2.23
Median Particle Size (micron)	2.23

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) เมื่อรวมตัวกันกับสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO ₂	44.95
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	23.7
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	10.8
Calcium Oxide, CaO	13.8
Magnesium Oxide, MgO	3.47
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.07
Potassium Oxide, K ₂ O	2.38
Sulfur Trioxide, SO ₃	1.31
Loss On Ignition, LOI	0.52

4.2 กำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

ผลการทดสอบกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศแสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการบ่มต่อกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่ากำลั้งอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลั้งอัดสูงตามไปด้วย (Chindaprasirt al et.,2009 ; Klabprasit al et.,2008) อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ ทุกอายุทดสอบ พบว่ากำลั้งอัดมีค่าลดลงจากความเข้มข้นของ NaOH 16 โมลาร์ และการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 16 โมลาร์มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลั้งอัดสูงที่สุด เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลั้งอัดหลังบ่มในอากาศ 28 วัน เท่ากับ 180, 191, 216, 244, 322, และ 233 กก/ซม² ตามลำดับ การที่กำลั้งอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ อาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้การยึดเกาะของจีโอพอลิเมอร์เจลกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้

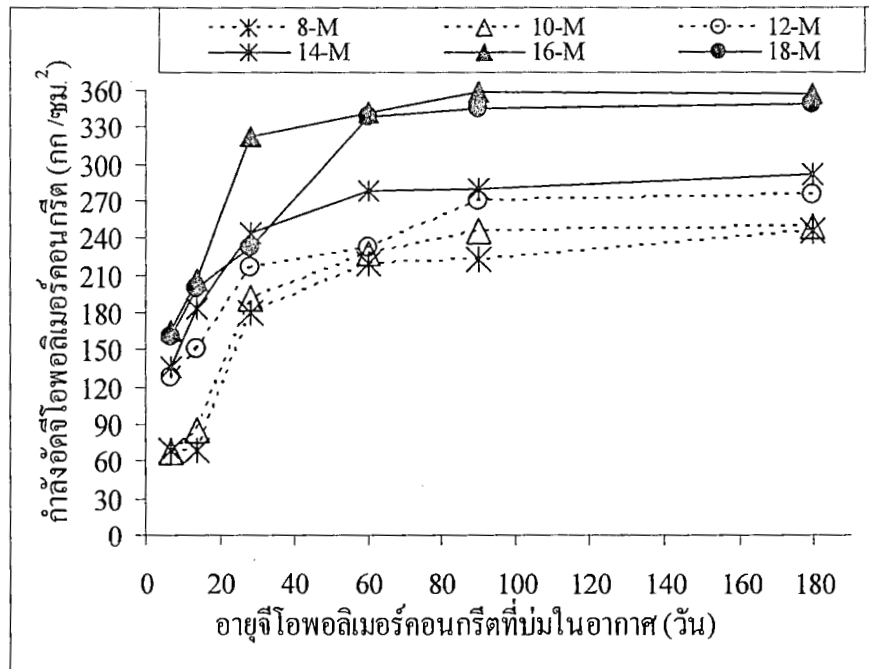
พิจารณาการพัฒนากำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามอายุที่บ่มในอากาศดังรูปที่ 4.2 พบว่ากำลั้งอัดมีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 28 วัน หลังจากนั้น การพัฒนากำลั้งอัดมีอัตราการเพิ่มที่ต่ำจนถึงอายุ 90 วัน และเกือบคงที่ในช่วงอายุ 90 ถึง 180 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดในรูปของร้อยละของกำลั้งอัดที่อายุต่างๆ เทียบกับกำลั้งอัดที่อายุ 28 วัน (ตารางที่ 4.3) ซึ่งพบว่า ร้อยละกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเทียบกับกำลั้งอัดที่อายุ 28 วัน เกือบคงที่ในช่วงอายุ 90 ถึง 180 วัน การพัฒนากำลั้งอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามความ

เข้มข้นของ 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

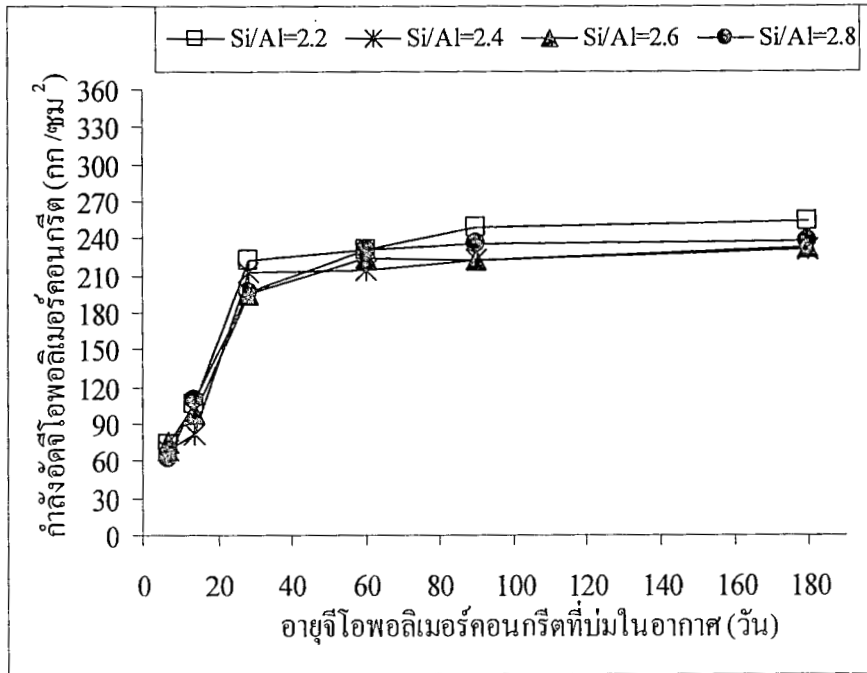
พิจารณาผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 พบว่า อัตราส่วน Si/Al มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยมาก โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบสามารถสังเกตได้ว่า อัตราส่วน Si/Al ที่สูงขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย อาจเป็นผลจากปริมาณของซิลิกาที่มีมากขึ้น และเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็น โซเดียมซิลิเกตและซิลิกาเจล ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่แข็งแรงจึงทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ำลงได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553; Fletcher et al., 2005; Rattanasak and Chindaprasirt, 2009; Neville, 1996) ดังนั้นปริมาณซิลิกาที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันควรมีปริมาณที่พอดีที่จะทำปฏิกิริยากับอลูมินาและออกซิเจน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นสารที่ให้ความแข็งแรงกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 223, 212, 195 และ 197 กก./ซม² ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ก็มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยอัตราการเพิ่มกำลังอัดในช่วงหลังจาก 28 วันค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงต้นสูงและอัตราการเพิ่มลดลงในช่วงหลังน่าจะเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นและลดลงเมื่ออายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น (Songpiriyakij et al., 2010) ซึ่งลักษณะของการพัฒนากำลังอัดดังกล่าว จะเหมือนกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่แตกต่างที่กลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความแข็งแรงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (chain or addition polymerization) พิจารณาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินแม่เมาะในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่างๆ 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

ตารางที่ 4.3 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=2.4	75	98	195	225	223	232	38.5	50.3	100.0	115.4	114.4	119.0
Si/Al=2.8	82	109	195	230	235	237	31.5	55.3	100.0	116.8	119.3	120.3



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ



รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการต้านทานสารละลาย MgSO₄ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

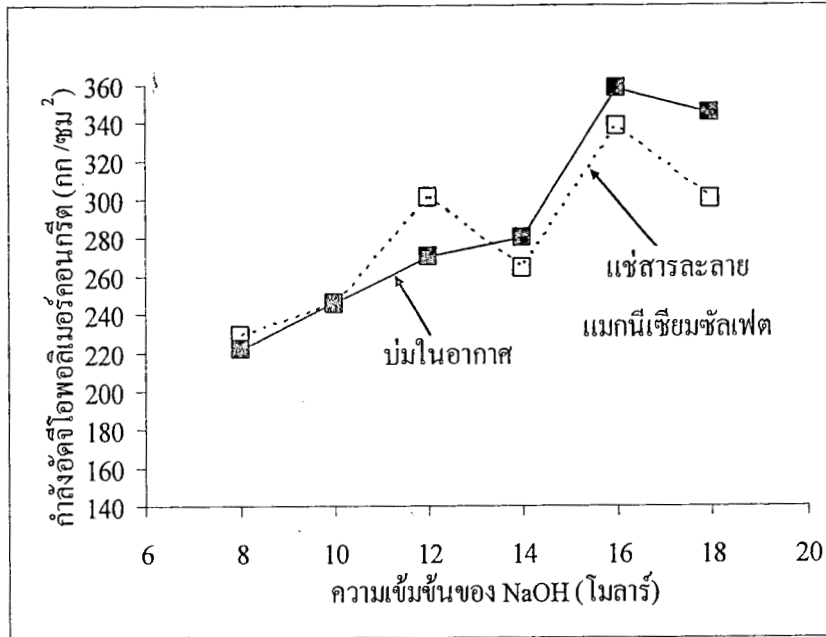
พิจารณาผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) เข้มข้นร้อยละ 5 ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 90 และ 180 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข)ตามลำดับ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นมีแนวโน้มเกิดการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.4(ก) จะเห็นว่า ที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและบ่มในอากาศ 90 วัน การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 14 โมลาร์ขึ้นไป มีผลให้กำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศ โดยชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มากขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ พบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศและที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ ถึงแม้จะแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตถึง 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/ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 229, 245, 301, 264, 338 และ 300 กก/ซม² ตามลำดับ การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้นถึง 180 วัน (รูปที่ 4.4ข)) โดยกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำก็เริ่มได้รับผลกระทบจากซัลเฟตเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ เริ่มมีกำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกัน ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 14 โมลาร์ ก็ยังมีผลการทำลายที่ชัดเจนมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 180 วัน เท่ากับ 245, 249, 275, 291, 356 และ 348 กก/ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 230, 247, 279, 232, 332 และ 298 กก/ซม² ตามลำดับ

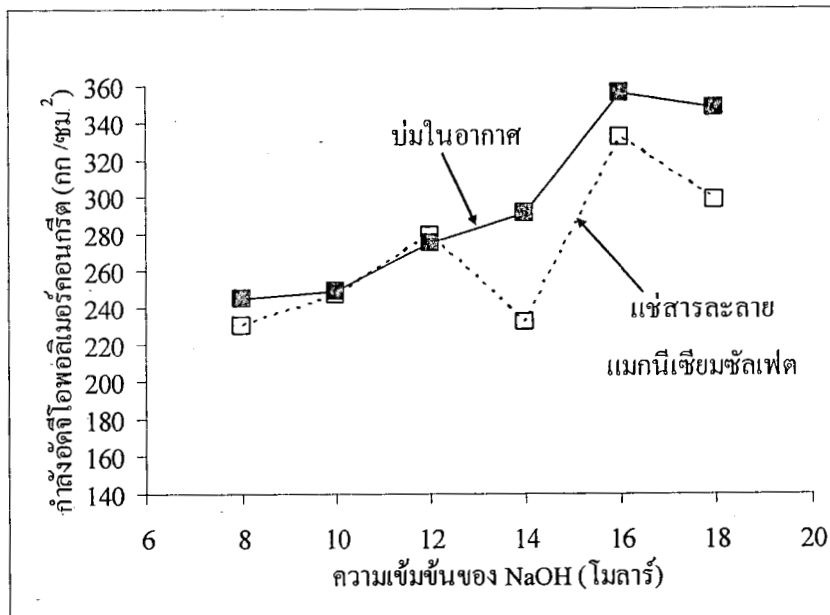
การทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ น่าจะเป็นผลจากปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกา และอลูมินาจากเม็ดผ่านหินได้มาก และส่งผลให้แมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้มากขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$) ที่มีความแข็งแรงต่ำและทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ NaOH เข้มข้นสูงมีกำลังอัดหลังสัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำลงอย่างชัดเจน (Bakharev al et., 2006; Skalny al et., 2002) ผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความชัดเจนมากขึ้น เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตดังรูปที่ 4.5 พบว่าการใช้สารละลาย 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

จากการศึกษาที่ผ่านมา (Pankhet al et., 2010) ได้ใช้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตเพื่อเป็นสารผสมเพิ่มในจีโอพอลิเมอร์เพสต์และมอร์ตาร์จากเม็ดผ่านหิน ผลการศึกษาพบว่า สารประกอบซัลเฟตทั้งสองไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในช่วงต้น และสารดังกล่าวมีผลให้เร่งการก่อตัวในระยะปลาย นอกจากนั้น ยังได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผสมสารละลายซัลเฟต พบว่า มีบางส่วนของผิวหน้าจีโอพอลิเมอร์เกิดเป็นเจลรูปเข็ม ซึ่งอาจเป็นลักษณะของเอทริงไกท์ หรือ แคลเซียมซัลโพลูมิเนต ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$) โดยสารดังกล่าวนี้จะมีการขยายตัวและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล,

2553) ดังนั้นการทำลายเนื้อสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากจะมีผลของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เกิดจากแมกนีเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับซิลิกาตั้งที่กล่าวมาแล้ว อาจมีผลของสารละลายซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบประเภทแคลเซียมในเถาถ่านหินได้ผลผลิตเป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือเอททริงไกท์ที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอีกด้วย

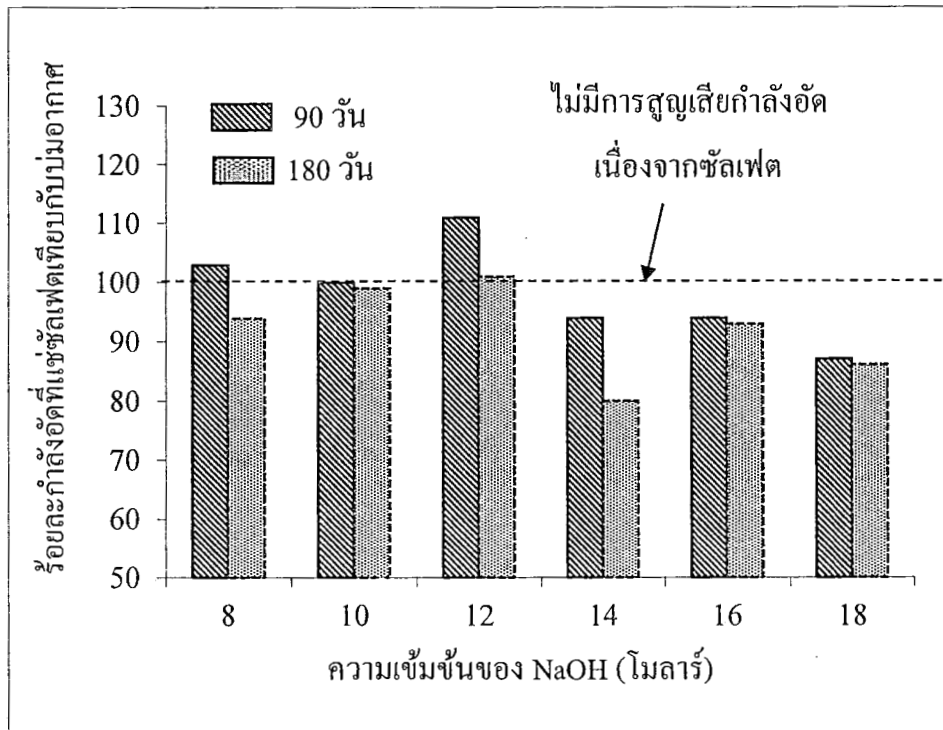


ก) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน



ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อร้อยละกำลัังอััดของอีโพอลิมเมอร์คอนกรีตที่แช่ใน สารละลาย $MgSO_4$ เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

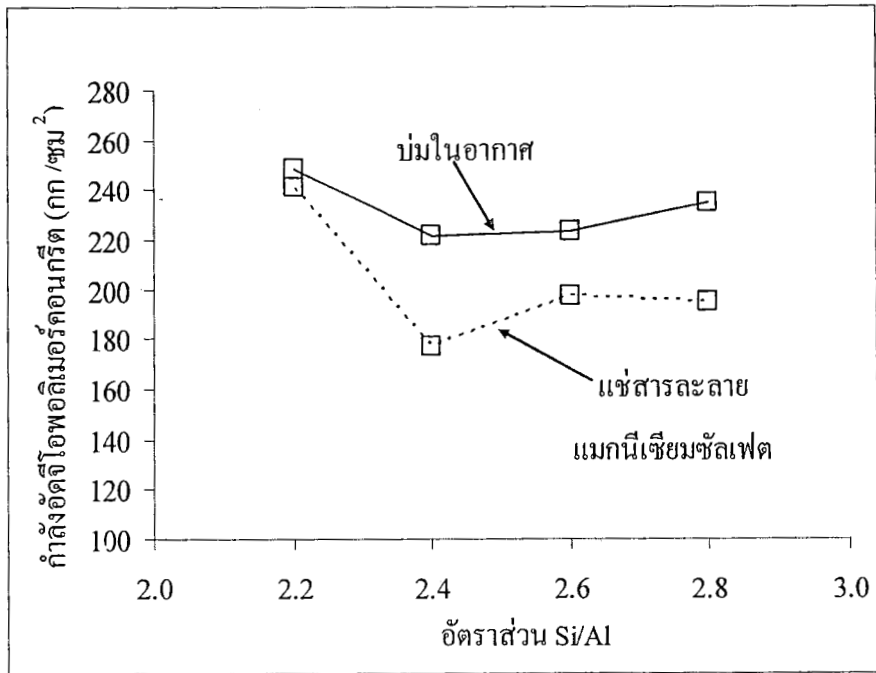
4.4 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของอีโพอลิมเมอร์คอนกรีต

พิจารณากำลัังอััดของอีโพอลิมเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/Al หลังแช่ใน สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 90 และ 180 วัน ดังรูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) ตามลำดับ พบว่า อีโพอลิมเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al มากขึ้น ทำให้การต้านทานการทำลาย เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตลดน้อยลง โดยอีโพอลิมเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพียง 90 วัน มีผลให้กำลัังอััดของอีโพอลิมเมอร์คอนกรีตลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ เดียวกันอย่างชัดเจน เช่น อีโพอลิมเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลัังอััด ที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248, 222, 223 และ 235 กก/ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่อีโพอลิมเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้กำลัังอััดลดลงเป็น 241, 177, 197 และ 195 กก/ซม² ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอีโพอลิมเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ที่ต่ำ (Si/Al=2.2) กับอัตราส่วน Si/Al ที่สูงถึง 2.8 ที่อายุการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน พบว่า กลุ่มที่ใช้ อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2 มีกำลัังอััดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248 กก/ซม² และหลังจากแช่ใน สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากัน ทำให้กำลัังอััดลดลงเป็น 241 กก/ซม² โดยคิดเป็นร้อยละกำลัังอััด ของอีโพอลิมเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศเท่ากับ 97

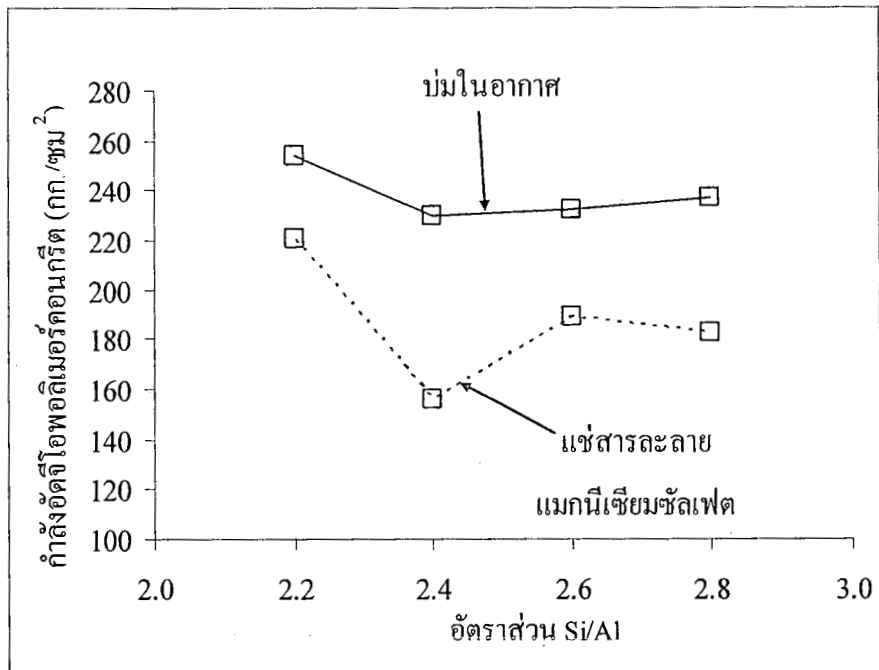
แสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังไม่มีผลชัดเจนต่อกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Si/Al สูงขึ้นเป็น 2.8 พบว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลัษณ์ โดยกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 83 ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2 ก่อนข้างชัดเจน การทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่อกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนในกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ต่ำ อาจเป็นผลจากปริมาณซัลเฟตที่มีมากขึ้นได้เข้าทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียม ไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้เป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้เกิดความพรุนและช่องว่างในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่งผลให้กำลัษณ์มีค่าลดลง (Bakharev al et.,2005; Skalny al et., 2002) นอกจากนั้นกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลงอาจเป็นผลจากแคลเซียมซัลเฟต โพลูมิเนต หรือเอททริงไทท์อีกด้วย (Pankhet al et., 2010) โดยกลไกการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเหมือนกับกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH ดังที่กล่าวมาข้างต้น

การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้นถึง 180 วัน (รูปที่ 4.6ข) โดยกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลัษณ์ต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศก่อนข้างชัดเจน และไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลัษณ์ระหว่างกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ที่ต่างกัน ได้ชัดเจน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีร้อยละของกำลัษณ์ของกลุ่มที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับบ่มในอากาศที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 87, 68, 81 และ 77 ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก่อนข้างชัดเจน ภายใต้วเวลาที่สัมผัสกับสารละลายดังกล่าวเพียง 180 วัน เท่านั้น นอกจากนั้นการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก็ไม่ส่งผลชัดเจนต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.7 ที่พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกกลุ่มมีการสูญเสียกำลัษณ์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตก่อนข้างมากและใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละกำลัษณ์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันต่ำกว่า 100 ก่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตามแนวทางในการเลือกอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ควรพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วน Si/Al ที่มีค่าต่ำ เพื่อลดการเกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ซึ่งอาจส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความพรุนและการสูญเสียกำลัษณ์มากขึ้น

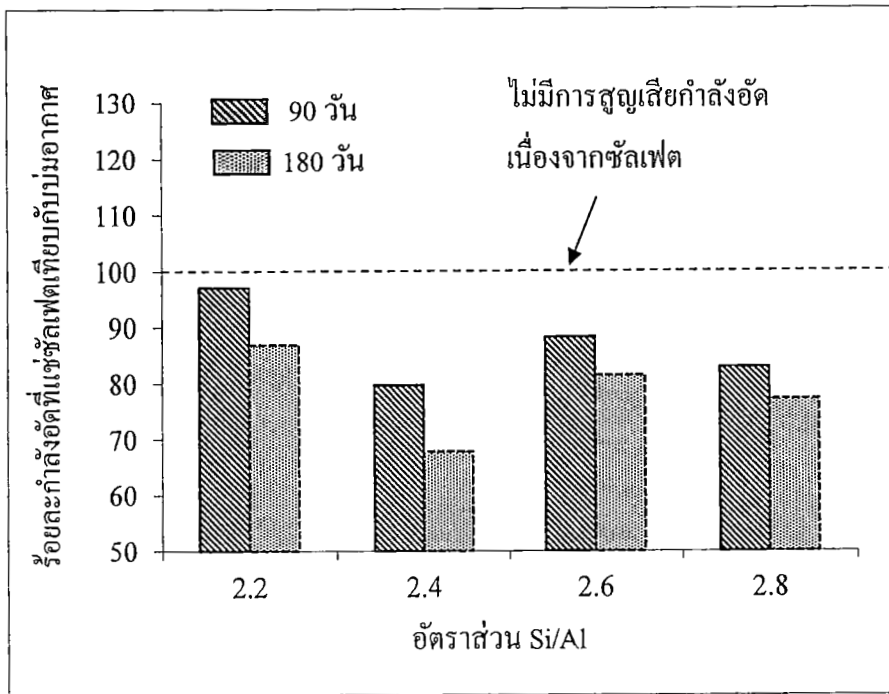


ก) อายุจีโอฟอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน



ข) อายุจีโอฟอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อค่าดังอัคจีโอฟอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย MgSO₄ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการต้านทานกรดซัลฟิวริกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

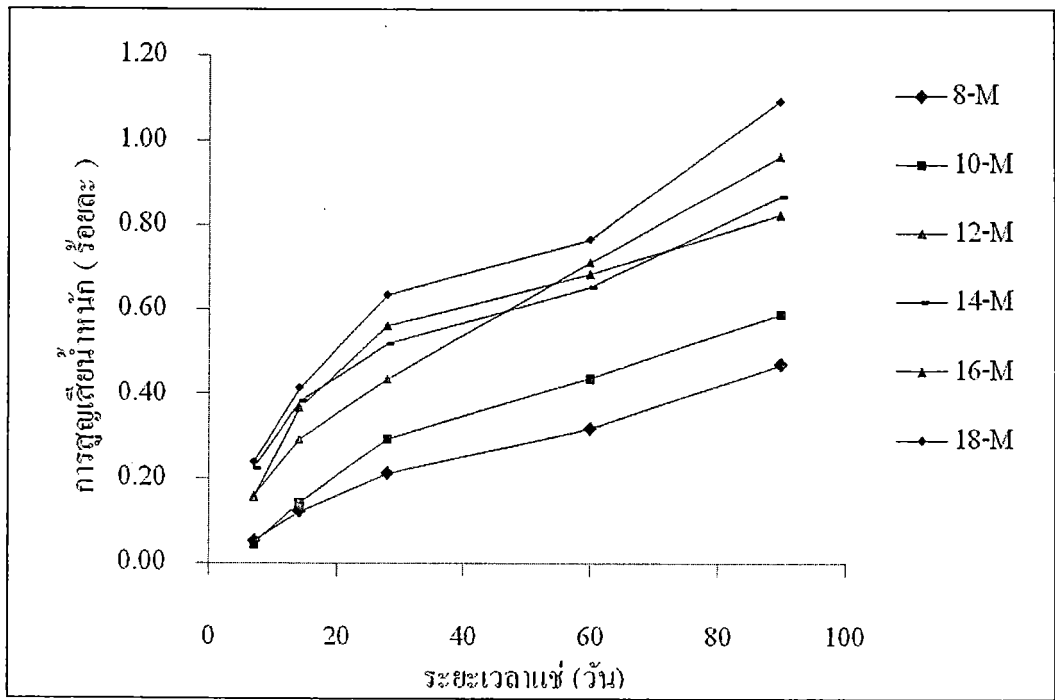
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก โดยพิจารณาในรูปของการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตร่วมกับสภาพความเสียหายของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตภายหลังจากแช่ในกรดซัลฟิวริก ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.8 ซึ่งผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากแช่ตัวอย่างในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน (บ่มในอากาศ 28 วันก่อนนำไปแช่กรดซัลฟิวริก) พบว่า การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกา(SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ออกมาได้มากเกินพอ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสทำให้ได้โซเดียมซิลิเกตซึ่งสามารถถูกชะได้ด้วยกรดซัลฟิวริกได้เป็นสารประกอบของกรดซิลิซิก (Silicic acid, H_4SiO_4) ออกมาในสารละลายทำให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ที่แช่ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากแช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 90 วัน มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เท่ากับ 0.47, 0.59, 0.82, 0.87, 0.96, 1.09 และ 0.74, 0.84, 1.03, 1.36, 1.54, 1.56 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่มากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

โดยทั่วไปการกัดกร่อนเนื่องจากกรดในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ทั่วไป เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง กรด กับ สารประกอบประเภทแคลเซียมที่มีอยู่ในคอนกรีต เช่น CSH, CAH และ $Ca(OH)_2$ เป็นต้น

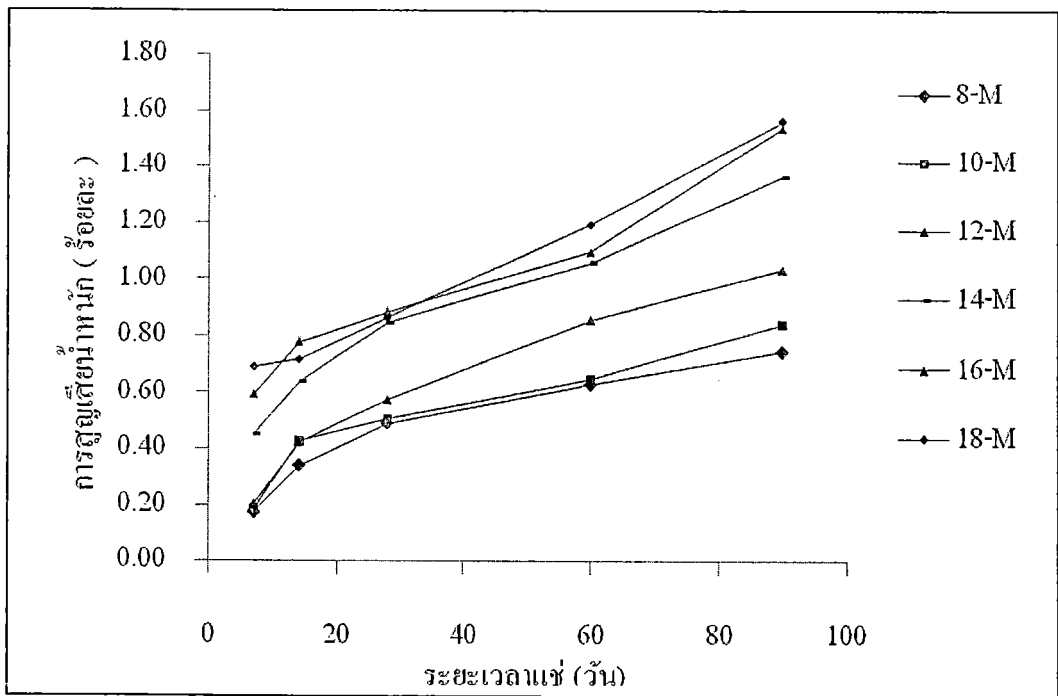
(ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553) โดยกรดจะเปลี่ยนสารประกอบเหล่านี้ให้เป็นเกลือ และคุณสมบัติของเกลือสามารถละลายน้ำได้ จึง ส่งผลให้เกิดความพรุน และ สูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการ กัดกร่อนได้ โดยคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (มีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสูง) จะมีการกัดกร่อนมากกว่า กลุ่มคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ (มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ) ทั้งนี้เนื่องจาก คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมี สารประกอบประเภทแคลเซียมมาก และ ถูกชะออกมาก่อนข้างมาก แนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทาง เดียวกันกับ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต กล่าวคือ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (ในกลุ่มที่ใช้ NaOH เข้มข้นสูง) มีผลทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดขึ้น ได้ชัดเจนมากกว่ากลุ่มที่มีกำลังอัดต่ำ แนวโน้มการ กัดกร่อนเนื่องจากการที่มีความเข้มข้นมากเป็นร้อยละ 5 ดังรูปที่ 4.9 ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันในกลุ่มที่แช่ ในกรดเข้มข้นร้อยละ 3 โดยการใช้น้ำ NaOH ที่เข้มข้นมากขึ้นการกัดกร่อนเนื่องจากการจะมากขึ้นและร้อยละ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดมากกว่ากลุ่มที่แช่ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 และสามารถ อธิบายได้ชัดเจนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 ที่แสดงลักษณะการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ NaOH เข้มข้น 16 และ 18 โม ลาร์ พบว่าบริเวณที่ผิวของการกัดกร่อนที่ผิวตัวอย่างส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักและการเสื่อมความ แข็งแรงต่อคอนกรีต

ตารางที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

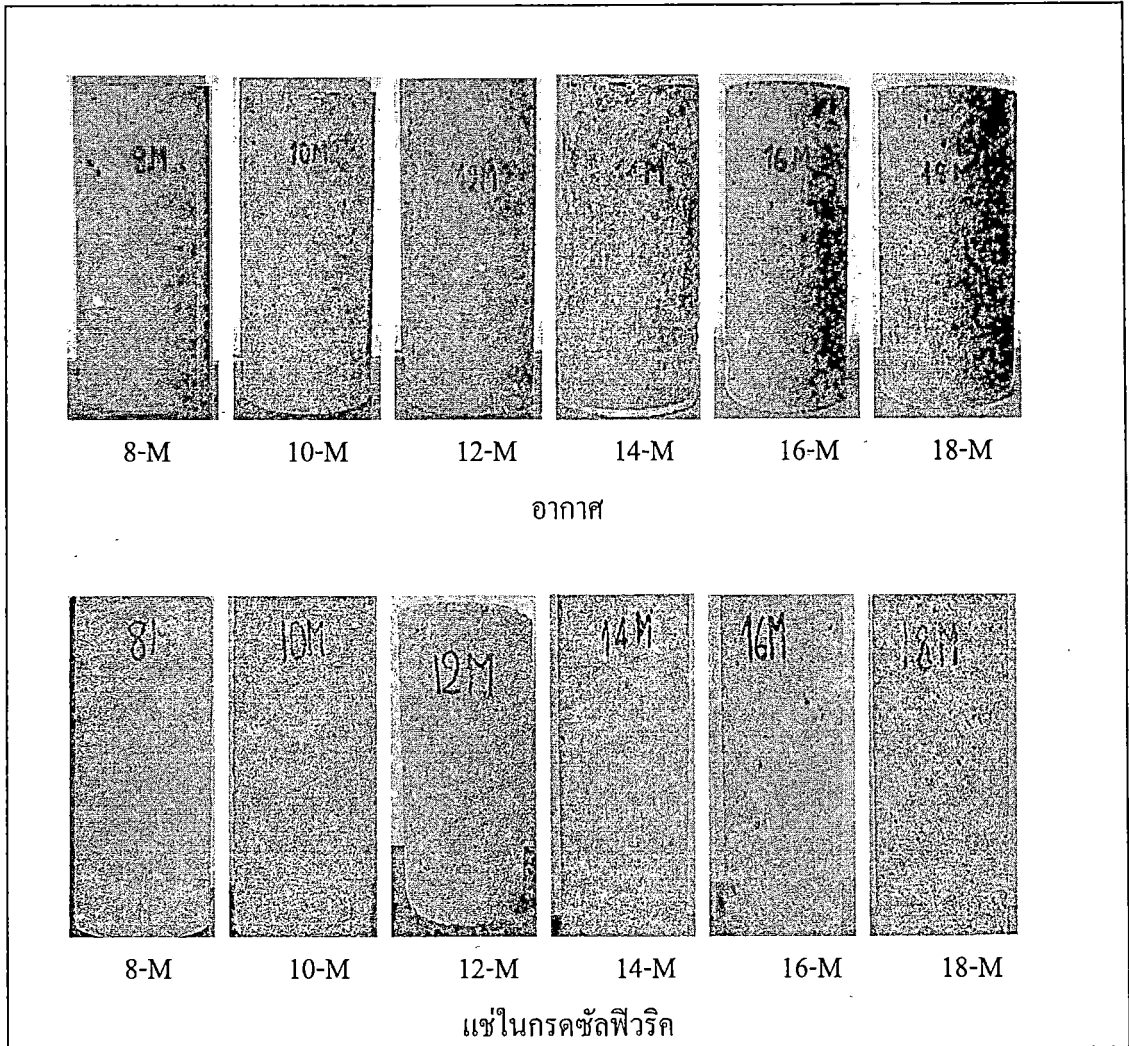
ส่วนผสม	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ใน กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 %					ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ใน กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 %				
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
8-M	0.05	0.12	0.21	0.32	0.47	0.17	0.74	0.49	0.63	0.74
10-M	0.04	0.14	0.29	0.44	0.59	0.19	0.43	0.51	0.63	0.84
12-M	0.16	0.37	0.56	0.68	0.82	0.20	0.42	0.57	0.84	1.03
14-M	0.22	0.38	0.52	0.65	0.47	0.45	0.64	0.84	1.06	1.36
16-M	0.16	0.29	0.44	0.71	0.96	0.59	0.78	0.84	1.10	1.54
18-M	0.04	0.41	0.44	0.71	1.09	0.69	0.72	0.84	1.10	1.36



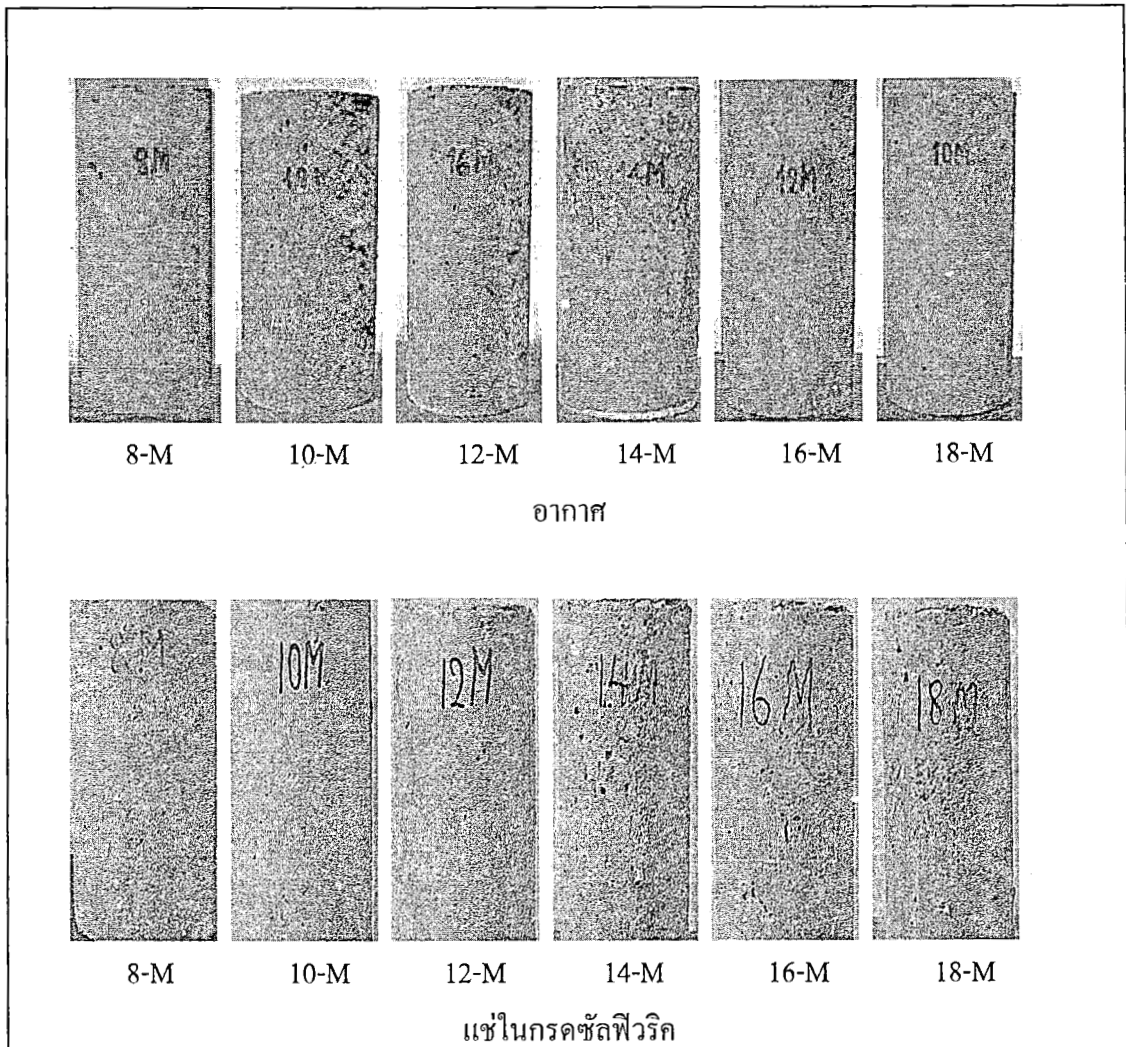
รูปที่ 4.8 ร้อยละการดูดซับน้ำหนักของอีพอกซีเรซินที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.9 ร้อยละการดูดซับน้ำหนักของอีพอกซีเรซินที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน NaOH



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน NaOH

4.6 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อการต้านทานกรดซัลฟิวริกของจีโพลิเมอร์คอนกรีต

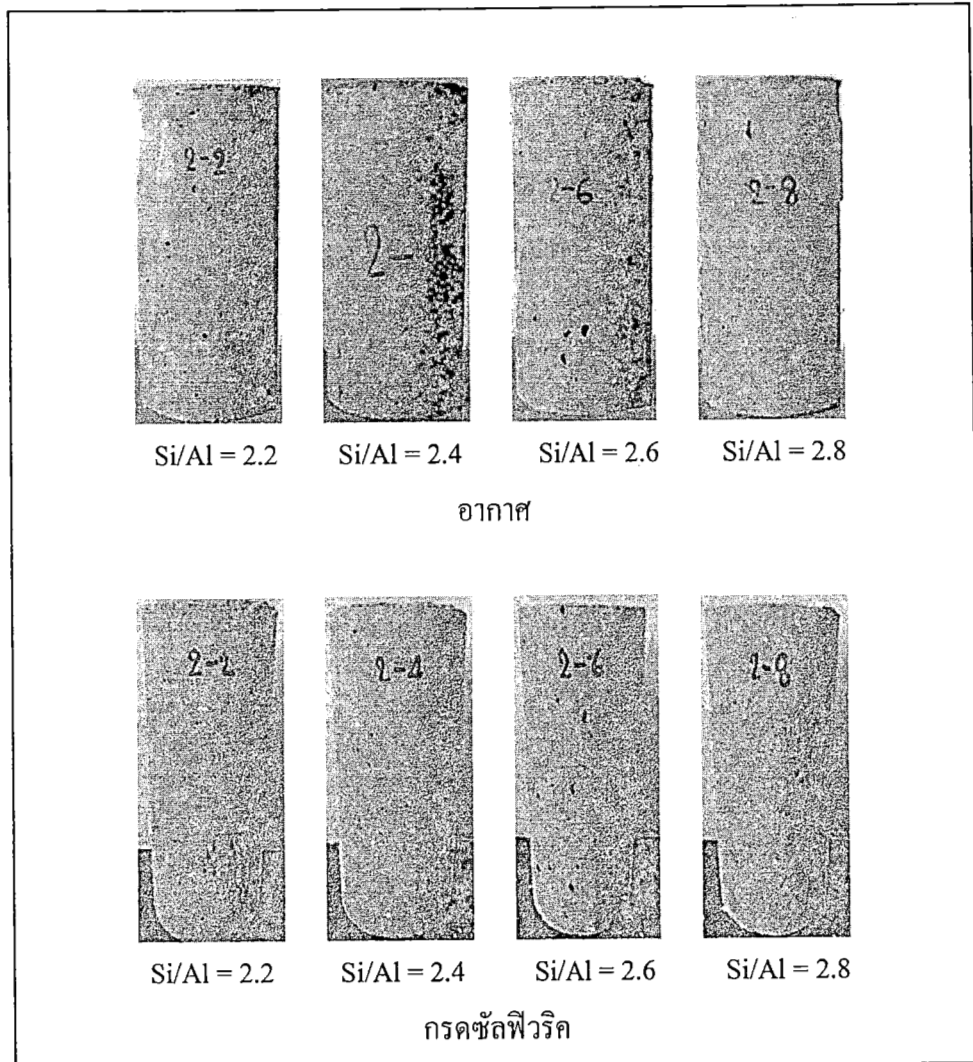
ผลการศึกษาผลกระทบจากการกักกร่อนของกรดซัลฟิวริกในรูปของการสูญเสียน้ำหนักของจีโพลิเมอร์คอนกรีต รวมถึงการพิจารณาสภาพการเสียหายของตัวอย่างจีโพลิเมอร์ที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/Al หลังแช่ในกรดซัลฟิวริกในกรดเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7, 10, 28, 60 และ 90 วัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักกร่อนมีค่าแปรปรวนสูง เช่น ตัวอย่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 2.2 มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 0.24, 0.35, 0.26, 0.57 และ 0.20 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกลไกการกักกร่อนเนื่องจากกรดในปูนซีเมนต์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับสารประกอบประเภทแคลเซียมที่มีอยู่ในคอนกรีต โดยกรดจะเปลี่ยนสารประกอบเหล่านี้ให้เป็นเกลือซึ่งสามารถละลายน้ำได้ สำหรับจีโพลิ

เมอร์คอนกรีตกลไกการทำลายจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถถูกชะด้วยกรดซัลฟิวริกได้ แต่เนื่องด้วยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ทำการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/Al แล้วคงที่ ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ (Molar) ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายเบสอาจมีความเข้มข้นไม่สูงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่มีมากขึ้นตามอัตราส่วนผสมที่แปรเปลี่ยนทำให้ไม่เกิดโซเดียมซิลิเกตที่สามารถถูกชะด้วยกรดซัลฟิวริกได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 60 และ 90 วัน เริ่มเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al สูงขึ้น ส่งผลให้มีการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกมากขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดจาก ปริมาณกรดที่มีความเข้มข้นมากขึ้นสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกต ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกา กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยอัตราส่วน Si/Al ที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณซิลิกามากขึ้น โซเดียมซิลิเกตก็สูงขึ้นด้วย จึงส่งผลให้มีการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกสูงขึ้นด้วย เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังแช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 1.42, 1.92, 2.05 และ 2.28 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ผิวของคอนกรีตมีการกัดกร่อนเกิดขึ้นยังไม่ชัดเจน

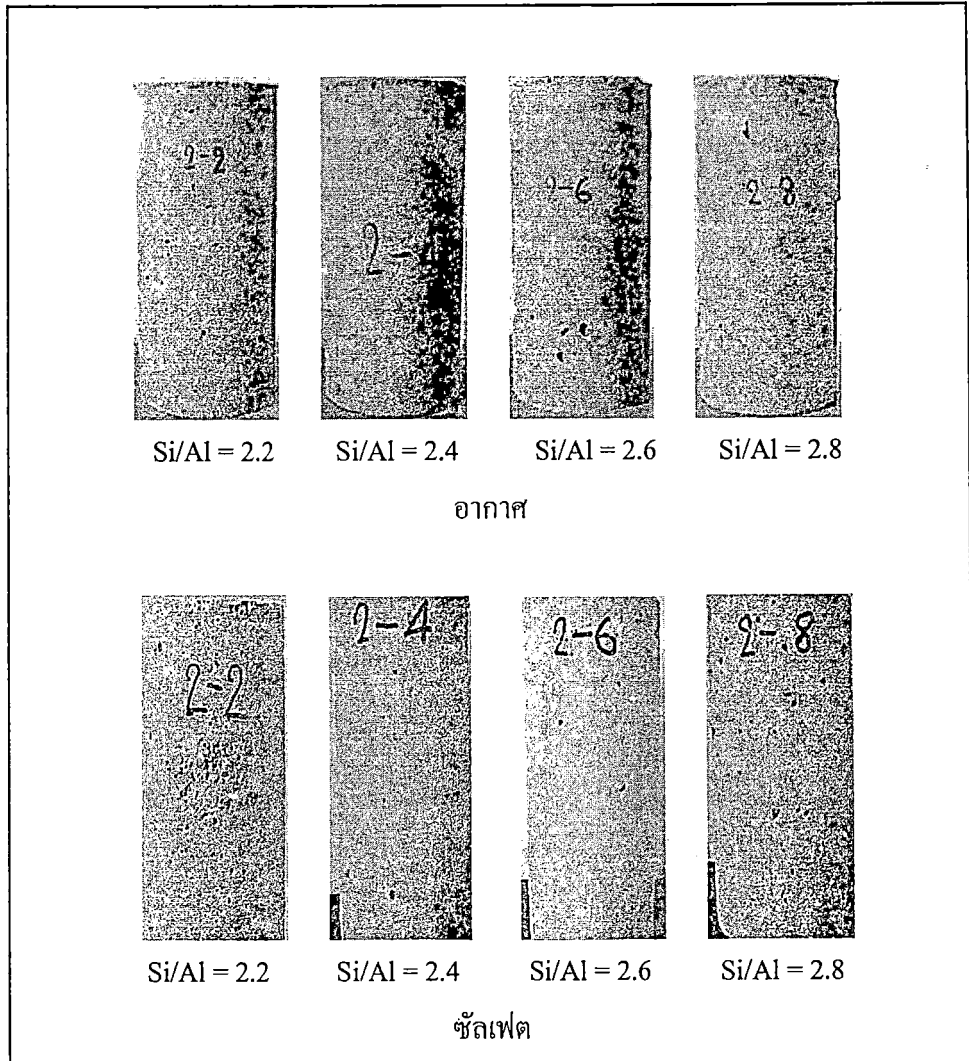
ตารางที่ 4.5 ผลของ Si/Al ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

ส่วนผสม	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เมื่อแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 %					ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เมื่อแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 %				
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
2.2	0.24	0.35	0.26	0.57	0.20	0.26	0.95	0.98	1.12	1.42
2.4	-0.10	-0.01	-0.62	-0.81	-0.19	0.56	0.95	1.01	1.46	1.92
2.6	0.04	0.11	-0.34	-0.56	-0.01	0.54	0.61	1.71	1.74	2.05
2.8	1.99	2.07	1.67	1.46	1.86	0.75	0.85	1.57	1.95	2.28

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น (น้ำหนักหลังแช่ลดลง)
เครื่องหมาย - หมายถึง มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักลดลง (น้ำหนักหลังแช่มากขึ้น)



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/Al



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/Al

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 5.1.1) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาโดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันแรก สูงกว่าอัตราการเพิ่มในช่วง 28 ถึง 180 วัน อย่างชัดเจน
- 5.1.2) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้นถึง 16 โมลาร์ และกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็น 18 โมลาร์
- 5.1.3) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้ดีขึ้น
- 5.1.4) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al ต่ำ สามารถลดการการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้ดีกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al สูง
- 5.1.5) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมในการใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังอัดค่อนข้างชัดเจน ภายใต้อายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 180 วัน
- 5.1.6) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริก ได้ดีขึ้น
- 5.1.7) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริก ได้ดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่เหมาะสม ให้ผลของการศึกษาทางด้านการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตและกรดซัลฟิวริก ไปในทิศทางค่อนข้างดี จึงควรนำไปใช้เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ให้มากขึ้น

5.2.2) ควรทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของเถ้าถ่านหิน และสารเคมีผสมเพิ่มชนิดต่างๆ

5.2.3) ควรทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์ม น้ำมัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท จุกทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-73.
2. ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน” *Burapha Sci.*, J.15 (1) หน้า 13-22
3. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 6, สมาคมคอนกรีตไทย
4. พร้อมพงษ์ ผุงเพิ่มตระกูล “กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นตัวประสาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 พัทยา ชลบุรี 14-16, พฤษภาคม, 2551
5. พิษญา ธีระมิตร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การขายตัวของเถ้าถ่านหินมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต, การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 17-18 พฤษภาคม 2544
6. สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ ป้อมเชียงพิน, จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ, การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836
7. วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, “การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, *Burapha Sci.*, J.14 (1) หน้า 47-55
8. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548, “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี
9. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ วิเชียร ชาลี, 2549, “การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิคนาइटและกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร* (4) หน้า 437-446
10. 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.
11. ASTM C39/C 39M-05. Standard test method for compressive strength of cylindrical Concrete specimens. Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02 2006.
12. ASTM C188-09. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.

13. ASTM C33 / C33M - 11a. Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
14. Bakharev, T., 2005 "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate Solutions", Cement and concrete Research. 35:1233-1246
15. Chindapasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., and Rattanasak U., 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," Waste Management 29, No. 2, pp 539-543
16. Chindapasirt P., Chareerat T., Sirivivatnanon V., 2007, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer" Cement & Concrete Composites 29, pp.224-229
17. Davidovits, J., 1999. Chemistry of geopolymer system, Terminology. pp 9–39. In Proceeding of Second International Conference Geopolymer '99, France.
18. 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.
19. 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.
20. Klabprasit T., Jaturapitakkul C., Chalee W., Chindapasirt 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.
21. Neville A.M., 1996, Properties of Concrete, 4th ed., England, Addison Wesley.
22. 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.
23. Rattanasak U., and Chindapasirt P., 2009, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer" Minerals Engineering, Vol. 22, pp. 1073-1078.
24. Rattanasak U., and Chindapasirt P., 2009, "Rice husk ash in concrete", 1st ed, Science and Engineering.
25. Sathonsaowaphak A., Chindapasirt P., Pimraksa K., 2009, "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar" Journal of Hazardous Materials 168, pp. 44-50
26. Skalny, J., Marchand, J., and Older, I. (2002). Sulfate attack on concrete, 1st Edition. Spon Press. New York.

27. 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* 24, pp.236-240
28. 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.
29. 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.
30. Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P., 2010 “Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete”, *Materials and Design* 3, pp. 4748-4754
31. 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.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) วิเชียร ชาติ และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555, “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 35(2), หน้า 157-170

การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

วิเชียร ชาลี¹ และ กิรติกร เจริญพร้อม²
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เติร์ยมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 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 Charoenprom²

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 solution 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 specimens 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 addition, 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 โพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ซึ่งเกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ [2-4] สารจำพวกซิลิกอนและอลูมินาที่ถูกชะออกมาจากวัสดุปอซโซลานอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ และส่งผลให้การยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนผสมเพิ่มเข้าไปด้วย ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์น้อยมาก และการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจังยังไม่ปรากฏ การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในประเทศไทยเริ่มจากคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์, มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตสดจนถึงสถานะที่แข็งตัว [4, 5, 7] โดยเน้นการใช้วัสดุปอซโซลาน

ในประเทศ และผลการศึกษาล้วนส่วนใหญ่ค่อนข้างยืนยันว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าถ่านหินให้ผลการศึกษา ด้านคุณสมบัติเชิงกลไปในทิศทางที่ดี [8-10] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่อนข้างน้อย และในการศึกษาความเป็นไปได้เพื่อใช้งานจริง จะต้องมีการเก็บข้อมูลให้มากขึ้น ตลอดจนครอบคลุมทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติความคงทนควบคู่กันไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคู่สมบัตินี้ด้านความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีสภาพแห้งปราศจากความชื้นและสิ่งเจือปนมาใช้ หากสามารถพัฒนาและมีข้อมูลยืนยันการนำมาใช้ได้อย่างจริงจัง จะเป็นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งหมด และเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่มีลักษณะคล้ายคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ แต่ไม่ได้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการใช้วัสดุปูนซีเมนต์และเป็นการเพิ่มทางเลือกในด้านวัสดุก่อสร้างให้กับงานก่อสร้างต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

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

มวลรวมละเอียดให้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 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°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO ₂ (%)	32.10
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ (%)	19.90
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	16.91
Calcium Oxide, CaO (%)	18.75
Magnesium Oxide, MgO (%)	3.47
Sodium Oxide, Na ₂ O (%)	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O (%)	2.38
Sulfur Trioxide, SO ₃ (%)	2.24
Loss On Ignition, LOI (%)	0.07

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้อัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

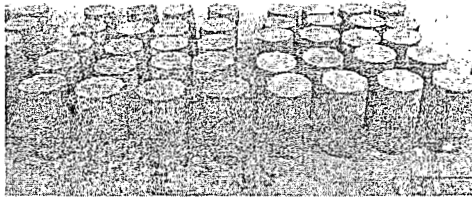
เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ส่วนกลุ่มที่สองใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 ซึ่งมีการใช้ซิลิกาฟุ่มเพื่อปรับปริมาณซิลิกาให้ได้อัตราส่วน Si/Al ตามที่กำหนด ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

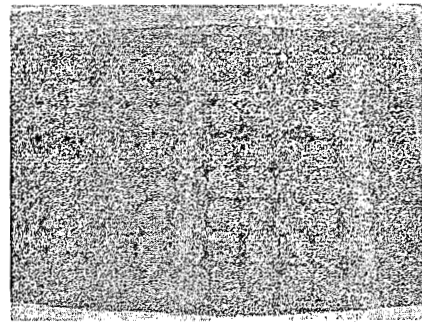
ลำดับที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก./ม. ³)						ค่ายุบตัว (ซม.)
		แก้วด้านหิน	หิน	ทราย	NaOH	N ₂ O:SiO ₃	ซิลิกาฟุ่ม	
1	8-M	390	1092	585	67	167	-	25
2	10-M	390	1092	585	67	167	-	25
3	12-M	390	1092	585	67	167	-	25
4	14-M	390	1092	585	67	167	-	24
5	16-M	390	1092	585	67	167	-	24
6	18-M	390	1092	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] ในกลุ่มที่แช่สารละลาย

แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) 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 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะซึลิกาและอลูมินาจากเม็ดถ่านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย [4, 5] อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18

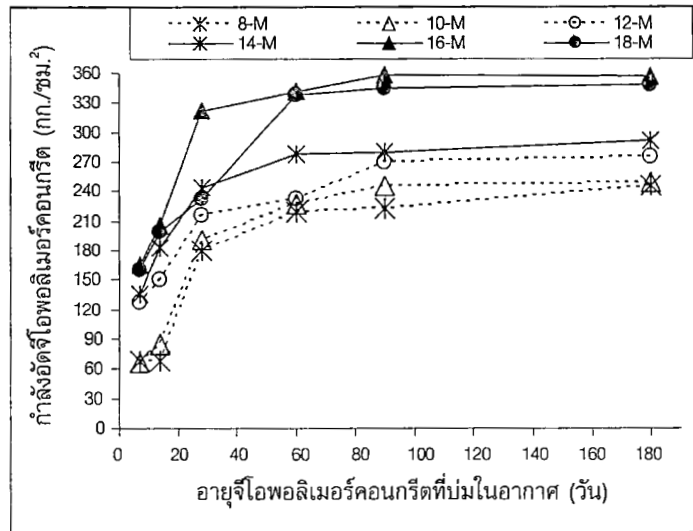
โมลาร์ ทุกอายุทดสอบ พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงจากความเข้มข้นของ NaOH 16 โมลาร์ และการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 16 โมลาร์มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุด เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดหลังบ่มในอากาศ 28 วัน เท่ากับ 180, 191, 216, 244, 322 และ 233 กก./ cm^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	90 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
16-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

พิจารณาการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามอายุที่บ่มในอากาศดังรูปที่ 2 พบว่า กำลังอัดมีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 28 วัน หลังจากนั้น การพัฒนา กำลังอัดมีอัตราการเพิ่มที่ต่ำจนถึงอายุ 90 วัน และเกือบคงที่ในช่วงอายุ 90 ถึง 180 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดในรูปของ ร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่างๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (ตารางที่ 3) ซึ่งพบว่า ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เกือบ

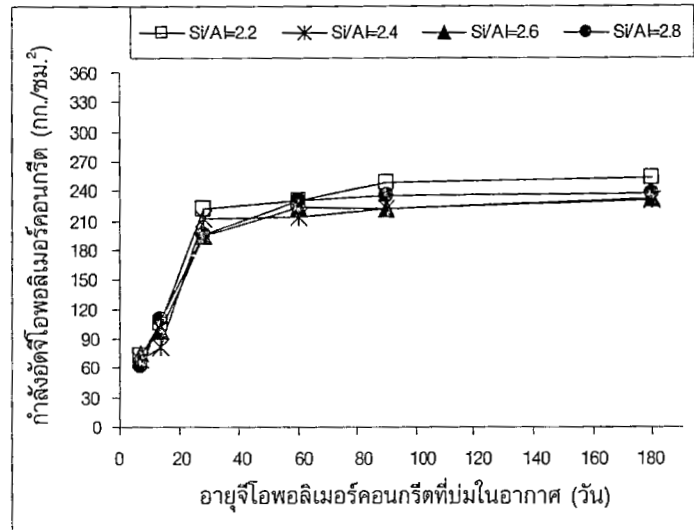
คงที่ในช่วงอายุ 90 ถึง 180 วัน การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ เช่น ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14 และ 16 โมลาร์ เท่ากับร้อยละ 136.1, 130.4, 127.3, 119.3 และ 110.6 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

พิจารณาผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 3 พบว่า อัตราส่วน Si/Al มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยมาก โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบสามารถสังเกตได้ว่า อัตราส่วน Si/Al ที่สูงขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย อาจเป็นผลจากปริมาณของซิลิกาที่มีมากขึ้นและเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมซิลิเกตและซิลิกาเจล ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่แข็งแรงจึงทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ำลงได้ [1, 13-15] ดังนั้นปริมาณซิลิกาที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันควรมีปริมาณที่พอดีที่จะทำปฏิกิริยากับอลูมินาและออกซิเจน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต 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 กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงต้นสูงและอัตราการเพิ่มลดลงในช่วงหลังน่าจะเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นและลดลงเมื่ออายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น [16] ซึ่งลักษณะของการพัฒนากำลังอัดดังกล่าวจะเหมือนกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่แตกต่างที่กลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความแข็งแรงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (chain or addition polymerization) พิจารณาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหินแม่เมาะในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่างๆ 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

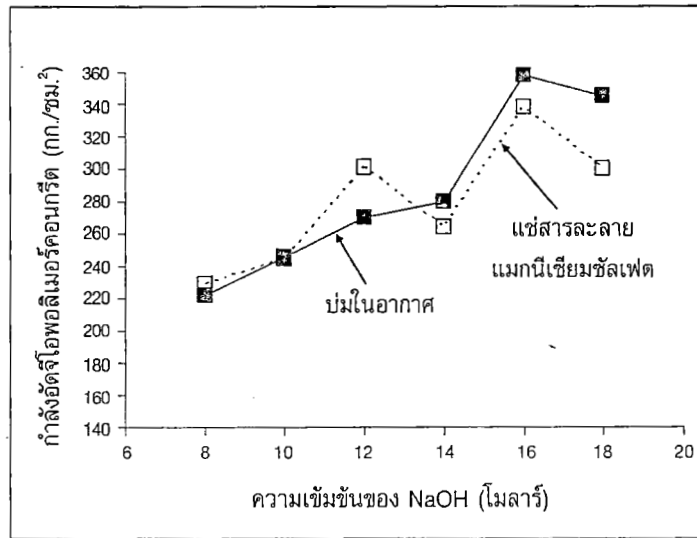


รูปที่ 3 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อค่าลึงอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

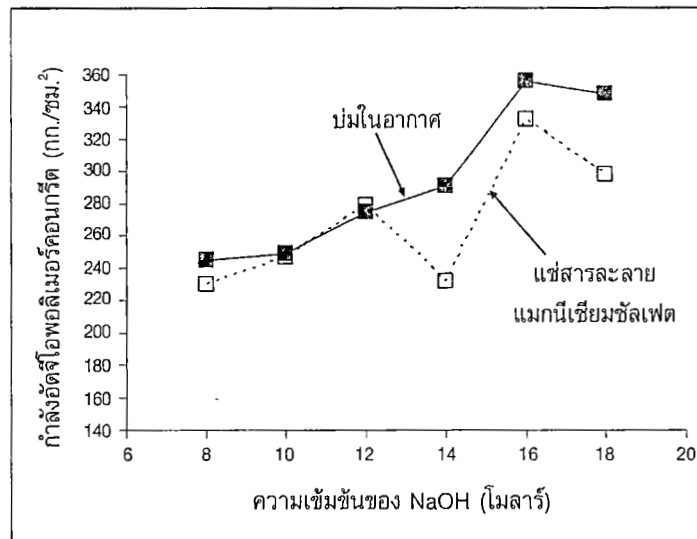
3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

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./ชม.² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 229, 245, 301, 264, 338 และ 300 กก./ชม.² ตามลำดับ การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้นเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้นถึง 180 วัน (รูปที่ (4ข)) โดยกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำก็เริ่มได้รับผลกระทบจากซัลเฟตเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ เริ่มมีกำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกัน ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 14 โมลาร์ ก็ยังมีผลการทำลายที่ชัดเจนมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 180 วัน เท่ากับ 245, 249, 275, 291, 356 และ 348 กก./ชม.² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 230, 247, 279, 232, 332 และ 298 กก./ชม.² ตามลำดับ



ก) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน



ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

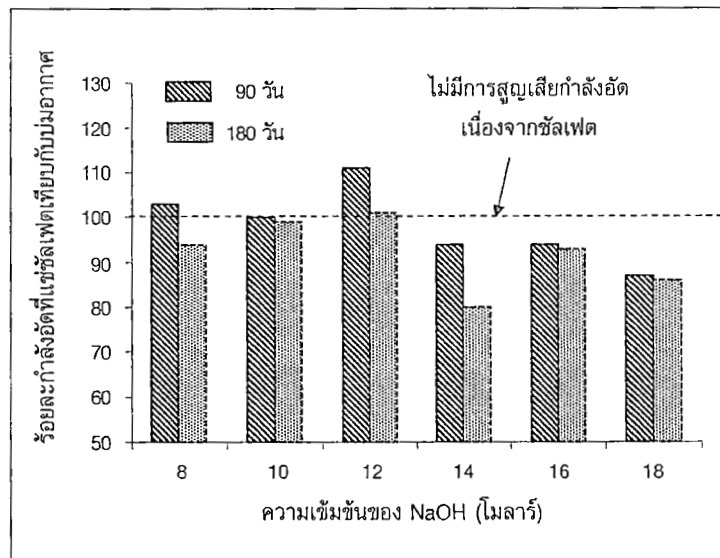
รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน

การทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ น่าจะเป็นผลจากปริมาณไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเม็ดถ่านหินได้มาก และส่งผลให้

แมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้มากขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$) 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

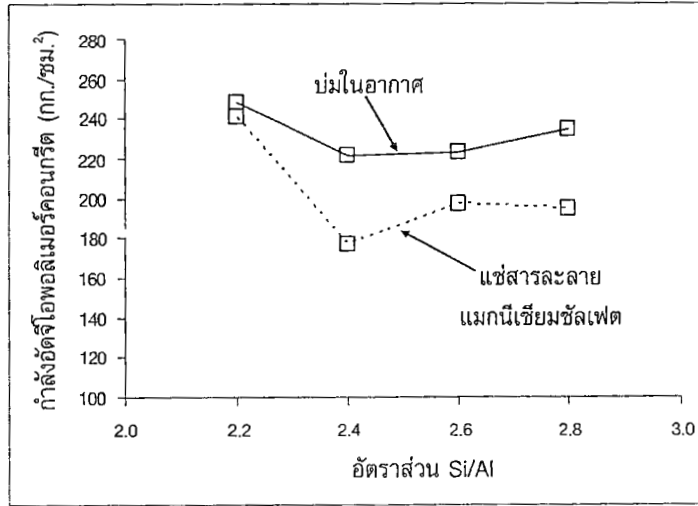
จากการศึกษาที่ผ่านมา [19] ได้ใช้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตเพื่อเป็นสารผสมเพิ่มในจีโอพอลิเมอร์เพสต์และมอร์ตาร์จากเต้าถ่านหิน ผลการศึกษาพบว่า สารประกอบซัลเฟตทั้งสองไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในช่วงต้น และสารดังกล่าวมีผลให้เร่งการก่อตัวในระยะปลาย นอกจากนั้น ยังได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผสมสารละลายซัลเฟต พบว่า มีบางส่วนของผิวหน้าจีโอพอลิเมอร์เกิดเป็นเจลรูปเข็ม ซึ่งอาจเป็นลักษณะของเอททริงโกท์ หรือ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต

($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$) โดยสารดังกล่าวนี้จะมีการขยายตัวและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตได้ [1, 15] ดังนั้นการทำลายเนื่องจากสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากจะมีผลของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เกิดจากแมกนีเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับซิลิกาตั้งที่กล่าวมาแล้ว อาจมีผลของสารละลายซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบประเภทแคลเซียมในเต้าถ่านหินได้ผลผลิตเป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือเอททริงโกท์ ที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอีกด้วย

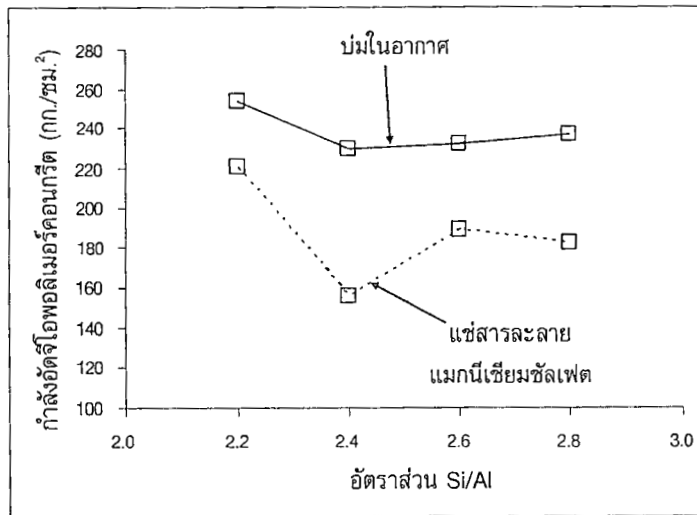
3.3 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อการต้านทานสารละลาย $MgSO_4$ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

พิจารณากำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วน 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 มีผลให้กำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันอย่างชัดเจน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลั่งอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248, 222, 223 และ 235 กก./ cm^2 ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้กำลั่งอัดลดลงเป็น 241, 177, 197 และ 195 กก./ cm^2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ที่ต่ำ (Si/Al=2.2) กับอัตราส่วน Si/Al ที่สูงถึง 2.8 ที่อายุการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน พบว่า กลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2 มีกำลั่งอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248 กก./ cm^2 และหลังจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากัน ทำให้กำลั่ง

อัดลดลงเป็น 241 กก./ cm^2 โดยคิดเป็นร้อยละกำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศเท่ากับ 97 แสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังไม่มีผลชัดเจนต่อกำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Si/Al สูงขึ้นเป็น 2.8 พบว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลั่งอัด โดยกำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 83 ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2 ก่อนข้างชัดเจน การทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่อกำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนในกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ต่ำ อาจเป็นผลจากปริมาณซิลิกาที่มีมากขึ้นได้เข้าทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้เป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($Mg \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้เกิดความพรุนและช่องว่างในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่งผลให้กำลั่งอัดมีค่าลดต่ำลง [17,18] นอกจากนั้นกำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลงอาจเป็นผลจากแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือเอททริงโกท์อีกด้วย [19] โดยกลไกการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเหมือนกับกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH ดังที่กล่าวมาข้างต้น



ก) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน



ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

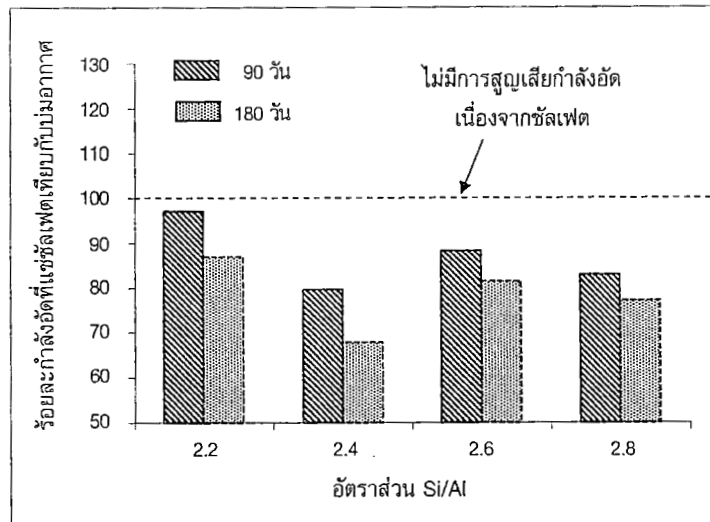
รูปที่ 6 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน

การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับละลายแมกนีเซียมซัลเฟต นานขึ้นถึง 180 วัน (รูปที่ 6ข) โดยกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศค่อนข้างชัดเจน และไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลัง

อัดระหว่างกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน 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

การศึกษาค้นคว้าพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตค่อนข้างชัดเจน ภายใต้อายุที่สัมผัสกับสารละลายดังกล่าวเพียง 180 วัน เท่านั้น นอกจากนี้การแปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก็ไม่ส่งผลชัดเจนต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสังเกตได้จากรูปที่ 7 ที่พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกกลุ่มมีการสูญเสียกำลัง

อัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตค่อนข้างมากและใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันต่ำกว่า 100 ค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตามแนวทางในการเลือกอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ควรพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วน Si/Al ที่มีค่าต่ำ เพื่อลดการเกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตซึ่งอาจส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความพรุนและมีการสูญเสียกำลังอัดมากขึ้น



รูปที่ 7 ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลาย MgSO₄ เทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

1) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินมีการพัฒนา กำลังอัดตามระยะเวลาโดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันแรก สูงกว่าอัตราการเพิ่มในช่วง 28 ถึง 180 วัน อย่างชัดเจน

2) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้นถึง 16 โมลาร์ และกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็น 18 โมลาร์

3) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มี

ความเข้มข้นต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีขึ้น

4) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al ต่ำ สามารถลดการการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้ดีกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al สูง

5) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมในการใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังอัดค่อนข้างชัดเจน ภายใต้อายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 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. Temujin 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. Temujin 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 Jen-jirapanya 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).