

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

คุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

ชรินทร์ เสนาวงษ์

31 ส.ค. 2559

365504

TH0084580

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2555


ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

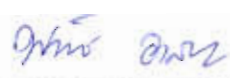
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ชรินทร์ เสนาวงษ์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์


.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

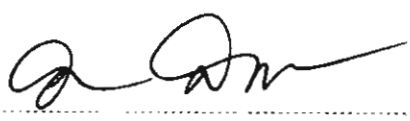
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ)


.....กรรมการ
(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)


.....กรรมการ
(ดร. ศรีสุดา แซ่อึ้ง)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาทิตย์ ดีพัฒนา)

วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2555

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา
จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา
ประจำภาคต้น ปีการศึกษา 2553

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลง ได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชา วิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบรวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุชาติ คุณแม่ดาวเรือง เสนาวงษ์ และพี่ ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูเวทิตาแด่บุพการี บुरพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ชรินทร์ เสนาวงษ์

51912081: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต/ เถ้าถ่านหิน/ คุณสมบัติเชิงกล/ คุณสมบัติความคงทน

ชรินทร์ เสนาวงษ์: คุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจาก
เถ้าถ่านหิน (Mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete)
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์: วิเชียร ชาลี, Ph.D. 218 หน้า. ปี พ.ศ. 2555.

งานวิจัยนี้ ศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนของ Si/ Al ต่อคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 2 กลุ่ม กลุ่มแรกกำหนดให้อัตราส่วนของ Si/ Al คงที่ และ เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ กลุ่มที่ 2 กำหนดให้ แปรเปลี่ยน อัตราส่วนของ Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 และกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ จากนั้นทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ กำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน กำลังรับแรงดึง แบบคัตและแบบผ่าซีก และกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วัน ทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ในห้องปฏิบัติการและในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยคุณสมบัติด้านความคงทนในห้องปฏิบัติการ ได้ทดสอบ การต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตในสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่วนความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล ได้เตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ ที่ฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในอากาศจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้งและ เก็บตัวอย่างมาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ (คลอไรด์อิสระ และคลอไรด์ทั้งหมด) และการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 180 วัน

ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัด กำลังดึง กำลังคัต และกำลังยึดเหนี่ยว ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากกรดซัลฟูริกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/ Al ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านน้ำ การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

51912081: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: GEOPOLYMER CONCRETE/ FLY ASH-BASED/ MECHANICAL
PROPERTY/ DURABILITY PROPERTY

CHARIN SANAWONG: MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF
FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE.

ADVISORY COMMITTEE: WICHIAN CHALEE, Ph.D. 218 P. 2012.

In this study, the effect of sodium hydroxide (Na(OH)) concentration and Si/ Al ratios on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete were studied.

The geopolymer concrete was prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (Na(OH)) solutions. In the first group, concentration of Na(OH) was varied at 8, 10, 12, 14, 16 and 18 molar and the Si/Al ratio was kept constant. In the second group, a concentration of Na(OH) was kept constant and Si/ Al ratio was varied at 2.2, 2.4, 2.6 and 2.8

The mechanical property of geopolymer concrete were tested for compressive strength at the ages of 7, 14, 28, 60, 90 and 180 days, splitting tensile strength, flexural strength and bond strength at 28 days. For durability study, the laboratory and marine site monitoring were investigated.

In laboratory study, geopolymer concrete were test for sulfate and sulfuric acid resistance, and water permeability. For marine site investigation, concrete specimens of $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at coverings of 20, 50 and 75 mm. Subsequently, the hardened concrete specimens are cured in air until the age of 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment. The specimens were tested for chloride penetration profile (free and total chloride content) and corrosion of embedded steel bar after being exposed to tidal of sea water for 180 days. The results showed that compressive strength, tensile strength, flexural strength and bond strength of geopolymer concrete tend to increase with the increase in concentration of NaOH. The strength loss of geopolymer concrete due to magnesium sulfate solution and weight loss due to sulfuric acid solution increased with the increase of a concentration of NaOH and Si/ Al ratio. In addition, water permeability, chloride penetration and embedded steel corrosion in geopolymer concrete tend to decrease with an increase in NaOH concentration.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของการศึกษา.....	3
แนวทางการศึกษา.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
วัสดุจีโอพอลิเมอร์.....	4
เด้าถ่านหิน.....	13
ฉลิกาฟูม.....	19
ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล.....	21
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์.....	24
การกัดกร่อนโดยซัลเฟต.....	28
การกัดกร่อน โดยกรด.....	31
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	33
3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง.....	40
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	40
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	40
การทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	42
การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	44
การทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	47

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	57
คุณสมบัติของเก้าอี้ถ่านหิน.....	57
กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	59
กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	67
กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	72
การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	78
ผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	85
การกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	93
ความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล.....	99
5 สรุปผลงานวิจัย.....	112
เอกสารอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	119
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	135
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม.....	152
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	167
ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดสอบกำลังอัดของการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่อ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	198
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรด ซัลฟิวริกต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	205
ภาคผนวก ช ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะ แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 6 เดือน.....	213
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	219

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์.....	8
2-2	คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบดตะกอนเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	20
3-1	อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	43
4-1	คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด.....	58
4-2	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ.....	59
4-3	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	61
4-4	แสดงร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน.....	61
4-5	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al.....	64
4-6	ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่บ่มในอากาศเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน.....	64
4-7	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงระบอบและรูปลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน.....	66
4-8	ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อ Si/ Al คงที่เท่ากับ 1.98.....	68
4-9	ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่.....	70
4-10	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	73
4-11	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กขี้ส้อย.....	76
4-12	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	78
4-13	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	87
4-14	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ระหว่างกลุ่มที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในสารละลายซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	91

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-15 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	94
4-16 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	97
4-17 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี.....	99
4-18 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อร้อยละของพื้นที่ผิวแห้งเหล็กที่เกิดสนิมใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน.....	105
4-19 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อร้อยละของพื้นที่ผิวแห้งเหล็กที่เกิดสนิมใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	110

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์.....	6
2-2	โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหิน.....	7
2-3	โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต.....	9
2-4	สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต.....	11
2-5	ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล.....	22
2-6	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าก่อนและหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เข้มข้น 5%.....	29
2-7	เถ้านหิน.....	29
2-8	จีโอพอลิเมอร์เพสต์ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/10\text{ M NaOH}=3$	30
2-9	ส่วนที่ก่อตัวเมื่อแช่ในสารละลาย 5% MgSO_4	30
2-10	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแช่ใน 5% H_2SO_4	32
3-1	ชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำ.....	41
3-2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการฝังเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	41
3-3	การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	45
3-4	การทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	46
3-5	การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม.....	47
3-6	การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	48
3-7	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	49
3-8	บริเวณแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี.....	50
3-9	การเจาะตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์.....	51
3-10	ตัดและบดตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์.....	51
3-11	การกดทำลายตัวอย่างเพื่อเอาเหล็กเสริมที่ฝังตัวอยู่ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	52
3-12	การทดสอบการซึมผ่านน้ำ.....	54
3-13	การแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต.....	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-14	การแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	56
4-1	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเม็ดด้านหินแม่เมาะ.....	58
4-2	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอากาศ.....	62
4-3	ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน.....	62
4-4	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 ที่บ่มในอากาศ.....	65
4-5	ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน.....	65
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงระบอกกับรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน.....	67
4-7	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	69
4-8	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละของกำลังคดและกำลังดึงเทียบกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	69
4-9	ผลของ Si/ Al ต่อกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	71
4-10	ผลของ Si/ Al ต่อร้อยละของกำลังคดและกำลังดึงเทียบกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน.....	71
4-11	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	74
4-12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	74
4-13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (u_{∞}) กับ $\sqrt{f_c} / D$	75
4-14	ผลของอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-15	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับกำลังยึดเหนี่ยวของ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	77
4-16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ (ก) 28 วัน และ (ข) 60 วัน ..	80
4-17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Si/ Al กับค่าการซึมผ่านของน้ำใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ (ก) 28 วัน และ (ข) 60 วัน	82
4-18	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับ อายุการบ่มของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	83
4-19	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน.....	84
4-20	ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ใน สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน.....	88
4-21	ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเทียบกับ กลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน.....	88
4-22	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย แมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน ...	92
4-23	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ใน สารละลายซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน.....	92
4-24	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริก เข้มข้นร้อยละ (ก) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (ข) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	95
4-25	ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน NaOH.....	96
4-26	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ (ก) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ข) ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	98

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-27	ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินหลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน.....
	101
4-28	ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แช่น้ำทะเล เป็นเวลา 180 วัน.....
	103
4-29	การกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน.....
	104
4-30	ผลของความเข้มข้นของ NaOH การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน.....
	106
4-31	การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่อัตราส่วน Si/ Al แปรเปลี่ยน 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน.....
	108
4-32	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 180 วัน.....
	109
4-33	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ ในน้ำทะเล 180 วัน.....
	109
4-34	ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน.....
	111

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สารซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ได้ถูกใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีคอนกรีต โดยเฉพาะประเทศไทยที่นิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตในการทำอาคารบ้านพักอาศัยและถนน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มาจากการเผาสารที่ประกอบไปด้วยซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก อุณหภูมิในการเผาอยู่ที่ประมาณ 1400–1600 °C กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงใช้พลังงานสูงมากจากการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา และการบด

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงมีการพยายามที่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยพยายามหาสารซีเมนต์อื่นมาใช้แทนหรือผสมเพิ่ม มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรกรรม และจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปูนซีเมนต์ผสม (Blended cement) เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารที่ใช้ผสมดังกล่าวเป็นสารพวกปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานในตัวเอง แต่เมื่อผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ วิธีการนี้เป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งได้เป็นอย่างดีและลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมคอนกรีต อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต สารปอซโซลานที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่เถ้าถ่านหิน

(Fly ash, FA) นอกจากนี้ยังมีเถ้าก้นเตา (Bottom ash, BT) เถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) ดินขาวเผา (Calcined kaoline, CK) เถ้าชีวมวล (Biomass ash) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash)

อย่างไรก็ตามสารปอซโซลานไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าดังกล่าวต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป เพื่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรตที่มีคุณสมบัติยึดประสาน

นอกจากนี้ยังมีความพยายามที่พัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า “จีโอพอลิเมอร์” จีโอพอลิเมอร์ เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอน

โดยการชะซึลิกอนและอลูมิเนียมในสารละลายเบสความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ซิลิกอนและอลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชัน เป็นโมเลกุลของลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์วัสดุ จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่ยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบรองรับและยังไม่มีข้อมูลยืนยันการใช้งานจริงในประเทศดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของ

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อเป็นข้อมูลที่เพิ่มความเชื่อมั่นในการนำไปใช้งานจริงในการศึกษาครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐาน คุณสมบัติด้านความคงทนที่ทดสอบระยะเวลาสั้นในห้องปฏิบัติการ และคุณสมบัติด้านความคงทนที่ศึกษาในสภาพแวดล้อมทะเลจริง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้สามารถใช้งานได้จริงในงานคอนกรีตต่อไป

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลของ ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ได้แก่ กำลังอัด กำลังรับแรงดึง แบบดัดและแบบผ่าซีก และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม
2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่มีต่อการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
3. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่มีต่อการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน
4. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่มีต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล
5. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน จากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล

ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้ได้ทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วน Si/ Al ต่อคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต กำหนดส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้กลุ่มแรกแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/ Al เท่ากับ 1.98 กลุ่มที่ 2 กำหนดให้อัตราส่วนของ Si/ Al แปรเปลี่ยน เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ โดยส่วนผสมทั้ง 2 กลุ่มนี้ ได้พิจารณาจากงานงานวิจัยที่เป็น จีโอพอลิเมอร์เพสต์หรือจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ให้ผลไปในทิศทางที่ดี ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลองคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน, ทดสอบกำลังรับแรงดึง แบบคัด และแบบผ่าซีก และทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว โดยใช้เหล็กที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ DB12, DB16 และ DB20 ที่อายุ 28 วัน

ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต, ความคงทนต่อกรดซัลฟิวริก และความคงทนต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และทำการศึกษาคูสมบัติด้านความคงทนในระยะยาวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเลจริง ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็กเสริม, การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ที่อายุแช่น้ำทะเล 180 วัน

แนวทางการศึกษา

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้ทั่วไป คุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์เถ้าถ่านหิน ตลอดจนการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวอย่างรวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาที่เกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการนำเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่าง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการก่อสร้าง โดยเฉพาะในประเทศไทย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีตเพราะทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานส่วนผสมอื่น กระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ใช้พลังงานสูงมาก การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานปริมาณสูง และปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสารซีเมนต์ดังกล่าวเรียกว่า “สารจีโอพอลิเมอร์”

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของจีโอพอลิเมอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอน (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

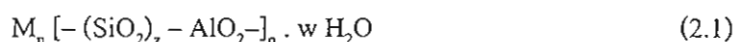
จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบออสซิลอน ซึ่งพบครั้งแรกโดย Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์กอนินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่ในรูปอสซิลอน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมินามากระตุ้นด้วยค่ากระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าลอยซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น

ส่วนผสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จะใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาถ่านหินชนิดใดก็ได้ เถ้าถ่านหินมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ เทา-น้ำตาล ถึง น้ำตาลแดง หรือน้ำตาลเหลือง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยปกติจะมีรูปร่างกลม เป็นส่วนใหญ่และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ i ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์รัสไดรอกไซด์ (Fe_2O_3) ผลรวมของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 90 โดยน้ำหนัก

1. วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารที่เชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็น โมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ ดังสมการ (2.1)



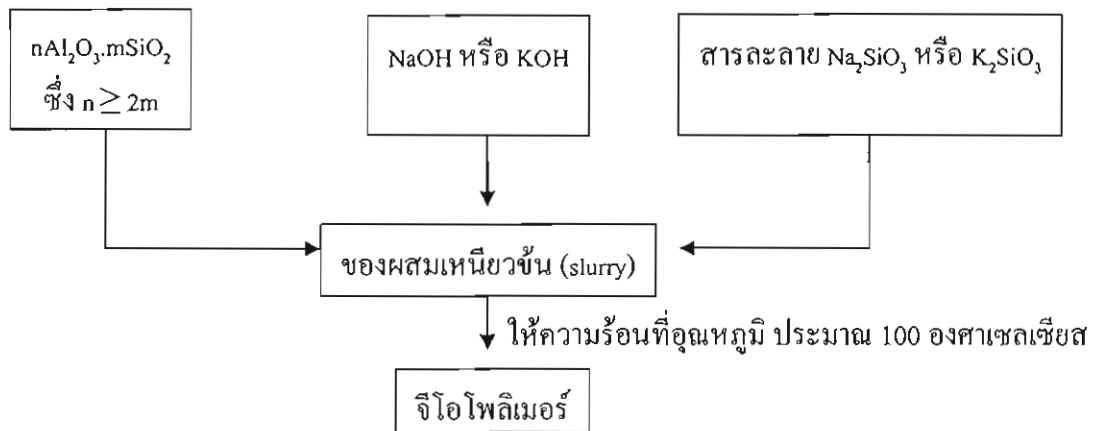
โดยที่ M คือ ธาตุอัลคาไล
 - คือ การยึดเกาะพันธะ
 z คือ จำนวน โมเลกุล
 n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
 w คือ จำนวน โมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์

(Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยแผนผังการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้แสดงในภาพที่ 2-1

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่ออบจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิปกติ และเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการช่วยยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

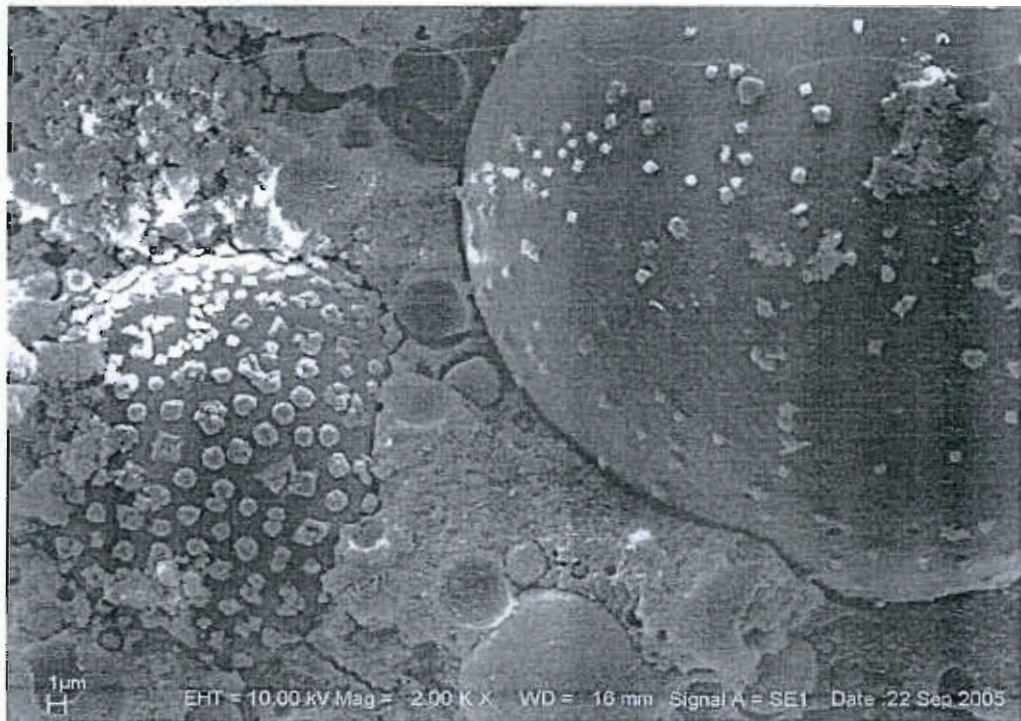


ภาพที่ 2-1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

2. โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินารวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เจือยต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัว และการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ($\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในภาพที่ 2-2 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

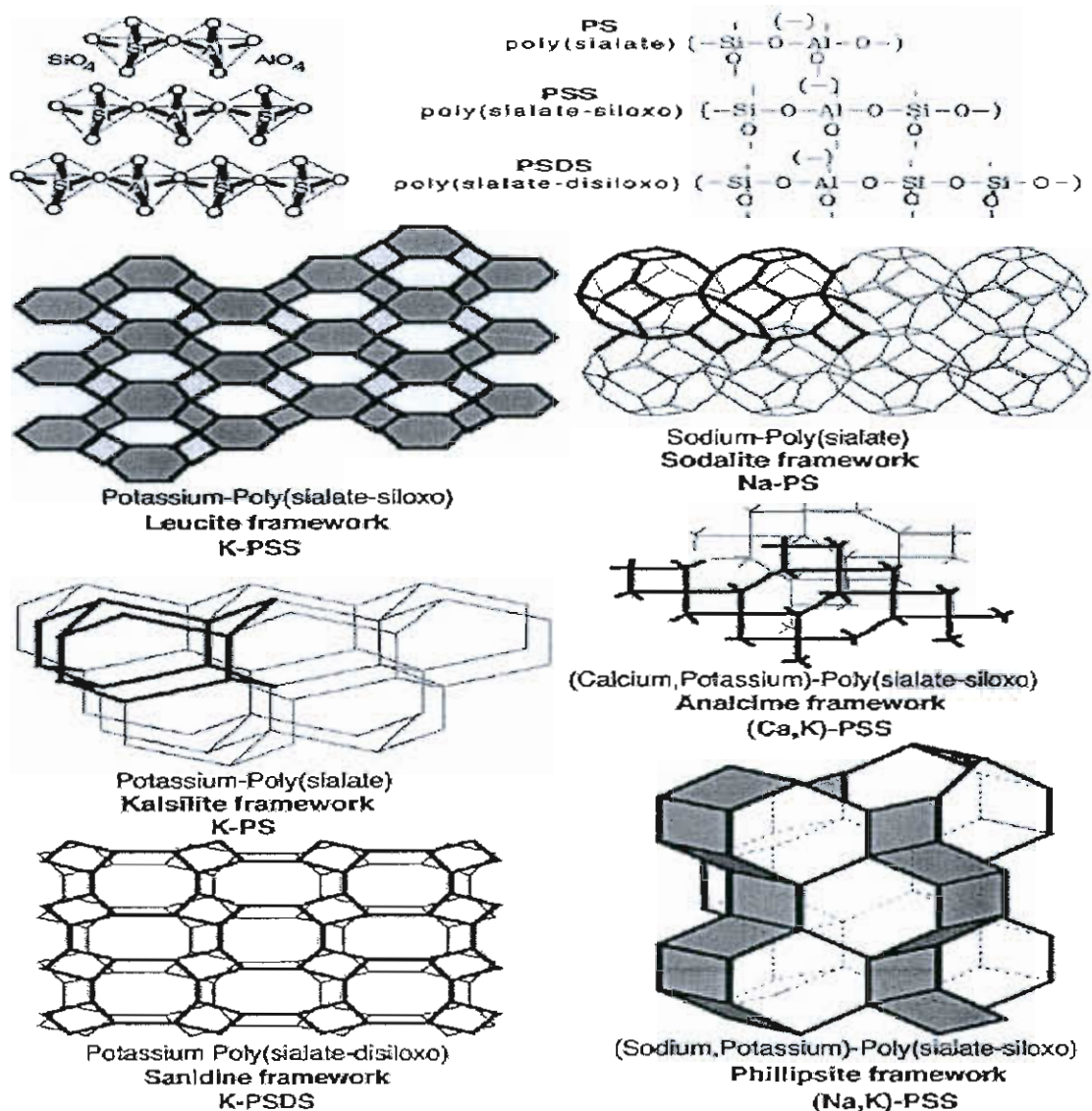
ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและ โครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

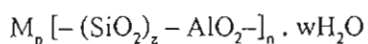
	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิเกต
ปฏิกิริยาช่วง เริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ในสารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วง ปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควมแน่นของสาร เชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาใน เฟส
อุณหภูมิที่ทำ ปฏิกิริยา	90-300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็น กรด-เบส	6 - 11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทาง เคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่ แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐาน และกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรง เชิงกล	ต่ำ	สูง



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ
 ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

3. ในด้านการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุนี้นี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสาร โพลีไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต $[\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}]$ จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซลอกไซ (PSS)

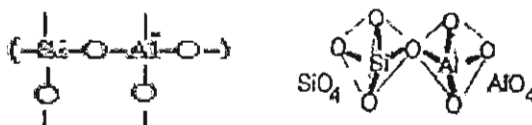
ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซลอกไซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้น ๆ อาทิเช่น อัตราส่วน 1, 2 และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-3 และภาพที่ 2-4 หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบพอลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

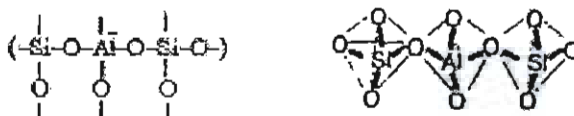
อัตราส่วน 2 : 1	เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต
อัตราส่วน 3 : 1	สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200-1,000 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนระหว่าง 20 : 1 – 35 : 1	ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ใน 2 มิติ มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

อุณหภูมิในการผสมและวิธีการบ่มจะมีผลต่อคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่ได้ เช่น ไฟเบอร์กลาส ประเภท E จะต้องมีการทำการผสมและบ่มที่อุณหภูมิห้อง สำหรับประเภทคาร์บอน จะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 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

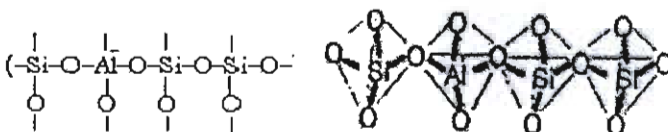
Si : Al = 1 โพลีไซอะเลต



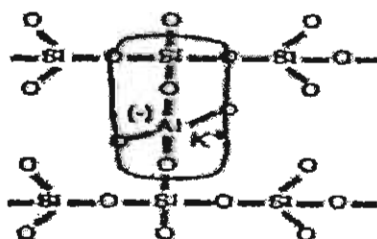
Si : Al = 2 โพลีไซอะเลตไซลอกโซ



Si : Al = 3 โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ



Si : Al > 3 ไซอะเลตเชื่อมขวางกัน



ภาพที่ 2-4 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ
ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

4. ลักษณะของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิบ่มที่ต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทั้งซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่สามารถละลายในสารละลายอัลคาไล จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์

วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่าวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่ง และงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดีเช่นประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน มีความทนทานเป็นเลิศ และมีความต้านทานต่อการกัดสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิกส์ และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุซีโอพอลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับฟลักซ์ทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือนพอลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุซีโอพอลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

5. ประโยชน์ของการผลิตซีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

5.1 การปรับสภาพของเสียที่มีพิษ

การตรึงของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียในวัสดุซีโอพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุซีโอพอลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือเฟลตสปาธรอยด์ (Feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีที่ดีหรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์ วัสดุซีโอพอลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง 3 มิติของวัสดุซีโอพอลิเมอร์

5.2 ปราบปรามการปล่อยโลกร้อนและการประหยัดพลังงาน

ในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุก ๆ 1 ตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศ 1 ตัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) แต่สำหรับวัสดุประสานซีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุซีโอพอลิเมอร์สามารถหาได้ทั่วไป โดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และดินขาว เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศได้เป็นอย่างดี

5.3 เศรษฐศาสตร์

การผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุซีโอพอลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบรูณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนัก คือที่ประมาณ 45-90 องศาเซลเซียส หากต้องการผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา คาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จ (Precast Concrete) ได้ ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงใน

ระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องมาจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2549)

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

1. ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

- 1.1 แอนทราไซต์ (Anthracite)
- 1.2 บิทูมินัส (Bituminous)
- 1.3 ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous)
- 1.4 ลิกไนต์ (Lignite)

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

2. การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกันได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

2.1 การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลาย

และรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ้ำถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นถ้ำถ่านหินและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ้ำถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นถ้ำถ่านหินซึ่งในระบบการเผาไหม้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ้ำถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใส ๆ (Vitreous Particle)

2.2 การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ้ำถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นถ้ำถ่านหิน ที่เหลือจะเป็นถ้ำถ่านหินหรือถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบซิลิเกต เป็นถ้ำถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

2.3 การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ถ้ำถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากถ้ำถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารประกอบซิลิเกตได้แต่ไม่เหมาะสำหรับถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ

3. ชนิดของถ้ำถ่านหิน

ถ้ำถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งถ้ำถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

3.1 ชนิด F (Class F) เป็นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซค์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปถ้ำถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ถ้ำถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) มาจากรังสีอินฟราเรดและควอร์ตซ์ ถ้ำถ่านหินแอนทราไซค์ และบิทูมินัสมีรังสีอินฟราเรดสูงจึงให้ถ้ำถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) สูง

3.2 ชนิด C (Class C) เป็นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 ถ้ำถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกชื่อหนึ่งว่า ถ้ำถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับ

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ทำให้เม็ดถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) แล้ว ยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ค้ำด้วย

เม็ดถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เม็ดถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เม็ดถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเม็ดถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเม็ดถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

4. รูปร่างและลักษณะของเม็ดถ่านหิน

เมื่อเม็ดถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ เม็ดถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เม็ดถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เม็ดถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เม็ดถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเม็ดถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เม็ดถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เม็ดถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เม็ดถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่าซิโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเม็ดถ่านหิน และยังมีเม็ดถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเม็ดถ่านหินเล็ก ๆ อยู่ภายในเรียกว่าเพลโรสเฟีย (Plerosphere) เม็ดถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเม็ดถ่านหินกลวงคือ แก้วอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากเม็ดถ่านหินกลวงเป็นเม็ดถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเม็ดถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และการเก็บเสียง (Acoustic)

เม็ดถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ เม็ดถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเม็ดถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอน และผิวขรุขระเช่นกัน

5. ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเม็ดถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน เม็ดถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเม็ดถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเม็ดถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเม็ดถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม²/ก. โดยค่าเฉลี่ยประมาณ 35,000 ซม²/ก.

การวัดความละเอียดของเม็ดถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเม็ดถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เม็ดถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8 - 30

6. ความด่างจำเพาะ

ความด่างจำเพาะ (ถ.พ.) ของเม็ดถ่านหินได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C188 เม็ดถ่านหินมีความด่างจำเพาะ ประมาณ 1.9-2.9 ซึ่งต่ำกว่าความด่างจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความด่างจำเพาะของเม็ดถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความด่างจำเพาะของเม็ดถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เม็ดถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความด่างจำเพาะสูงกว่าเม็ดถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเม็ดถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเม็ดถ่านหินละเอียด

7. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ Mg, Na₂O, K₂O, SO₃ เป็นองค์ประกอบรอง อัตราส่วนของออกไซด์จะขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI)

8. การใช้เม็ดถ่านหินในงานคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตที่สำคัญได้แก่ การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอนขึ้น ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเช่นกัน

8.1 การทำลายโดยสารซัลเฟต การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะนอกจากจะมีคุณสมบัติของปอซโซลานแล้วยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้เป็นอย่างดี ACI 232.2R กล่าวว่า เถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าถ่านหิน Class F ซึ่งต้านทานได้ดีมากกว่าการใช้เถ้าถ่านหิน Class C การต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดหรือซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการที่ปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของ Ca(OH)_2 ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่นอกจากจะเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตแล้วยังทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้สูงกว่า Ca(OH)_2 อย่างมาก

สารซัลเฟตสามารถทำลายโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้โดยทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ทำให้ยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) หรือเอททริงไทต์ (Ettringite) และซิลิกาเจล (Silica Gel) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตขยายตัวและเกิดการแตกร้าวได้ การใช้เถ้าถ่านหินทำให้การขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตลดลง การลดการทำลายของซัลเฟตยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ลดปริมาณน้ำและเข้าไปแทรกทำให้เพสต์แน่นขึ้นจึงทำให้สารซัลเฟตซึมเข้าสู่เนื้อภายในได้ยากขึ้น

8.2 การทำลายโดยกรด คอนกรีตและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ไม่ดีนัก เพราะมีความเป็นด่างสูงและถูกทำลายกรดได้ง่าย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ และส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมที่ละลายน้ำหรือเกลือของกรดนั้น ๆ ได้ น้ำหนักและกำลังรับแรงของมอร์ตาร์และคอนกรีตจะลดลงจากการทำลายของกรดซัลฟูริก การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะเพิ่มความต้านทานของการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน

การใช้เถ้าถ่านหินหยาบในส่วนผสมมอร์ตาร์สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินละเอียดในสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกร้อยละ 5 เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินหยาบทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เพราะการใช้เถ้าถ่านหินหยาบมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าถ่านหินละเอียดและปูนซีเมนต์ และจากการที่เถ้าถ่านหินหยาบสามารถยึดเกาะกับเพสต์ได้ดี

8.3 การซึมผ่านของคลอไรด์ การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผสมมีความเป็นด่างสูง และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มบาง ของ $\text{Y-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริม ไว้อิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้คลอไรด์

ที่ซึมเข้าในคอนกรีตและเมื่อมีปริมาณสูงกว่าระดับวิกฤต (Chloride Threshold Value) จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เถ้านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และการใช้เถ้านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้น

8.4 การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน การเพิ่มเถ้านหินจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทำให้ลดการเกิดคาร์บอนเนชันได้มากขึ้น และการบ่มคอนกรีต 7 และ 28 วัน สามารถลดการเกิดคาร์บอนเนชันได้เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับการบ่มเพียงวันเดียว การเลือกส่วนผสมที่มีเนื้อแน่น จะทำให้เกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนเนชันเฉพาะคอนกรีตที่แห้งพอประมาณและไม่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่เปียกชื้นตลอดเวลา สำหรับโครงสร้างประเภทนี้จึงไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดคาร์บอนเนชัน อย่างไรก็ตามการใช้เถ้านหินแม้ว่าจะลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้านหินทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดคาร์บอนเนชันลดลง ดังนั้นการใช้เถ้านหินจึงมีทั้งผลดีและผลเสียต่อการเกิดคาร์บอนเนชันคอนกรีต

โดยสรุปแล้ว เถ้านหินนิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรก พบว่าเถ้านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อะลูมินา และเหล็กซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองเนื่องจากเถ้านหินมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้านหินจะช่วยทำให้คอนกรีตมีการเดินไหลได้ดีขึ้นทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้เนื่องจากรูปร่างที่กลม และผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

การใช้เถ้านหินในงานคอนกรีตมีข้อดี ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ที่สำคัญคือ เพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้านหินจะมีข้อเสียด้วย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สาร

เพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ตซ์ (Quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอน โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) จะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวที่สูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว

เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคที่เล็กมากมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว แต่ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีต คือ ส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วยซิลิกาฟุ้งจากโรงงาน โลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟุ้งที่มีคุณภาพดีโดยร้อยละ 61 ถึง 98 ประกอบด้วยซิลิกอน ร้อยละ 85 ถึง 95 ของซิลิกอนดังกล่าวอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟุ้งที่ได้จากโรงงานเฟอร์โรซิลิกอนมีคุณภาพต่ำกว่า โดยมีซิลิกอนเพียงประมาณร้อยละ 50 และอยู่ในรูปของผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในงานคอนกรีตไม่คืบค

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่รูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO_2 มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่น ๆ อีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของ SiO_2 หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และดินขาวเผา จะพบว่ามีส่วนประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 2-2

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทา เทาดำหรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ้งควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ้งหลาย ๆ อนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 มีอนุภาค



จ.
๐๐๘๕๘
๒๕๕๖
๒๕๕๕
๐.๕

เฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ซม.²/ก. ซึ่งใช้ทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่เถ้าถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ซม.²/ก. ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้งเป็นขนาดเล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่า เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้ายเพื่อแก้ปัญหาจึงมีการนำซิลิกาฟุ้งมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าซิลิกาฟุ้งควบแน่น

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	เถ้าแกลบบด	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ้ง
ความละเอียดของเบลน (ซม. ² /ก.)	3,400	3,500	8,000	3,500	200,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.0	2.2	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มสีน้ำตาล	เทาถึงเทาคำ	เทา	เทาอมขาวจนถึงเทาคำ

* **หมายเหตุ** วิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดความละเอียดของซิลิกาฟุ้งได้ แต่ใช้วิธี Nitrogen Absorption แทน

1. การใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีต

ซิลิกาฟุ้งนิยมใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก เช่น กำลังอัดเท่ากับ 120 กก/ซม.² ที่อายุ 90 วัน โดยการใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ คอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดสูงมากแล้วยังมีค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำมาด้วย เพราะซิลิกาฟุ้งจะไปอุดโพรงของซีเมนต์เพสต์การใช้ซิลิกาฟุ้งในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่น ใช้ซิลิกาฟุ้ง 1 กิโลกรัมแทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กิโลกรัม ในคอนกรีตแต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อายุ 7 หรือ 28 วัน เท่ากัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่

อายุ 28 วัน ค่อนข้างมาก แต่คอนกรีตเหล่านี้เมื่อมีอายุครบ 5 ปี กลับพบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมมากคือร้อยละ 15 และ 20 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาและที่ใส่ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 10 ของวัสดุประสานจะให้ค่ากำลังค้ำทั้งที่อายุเริ่มแรกและที่อายุมากขึ้น

การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็มหรือน้ำทะเล รวมถึงการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา การที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมมีคุณสมบัติดังกล่าวดีขึ้นอาจเนื่องมาจากซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำและโพรงของซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง การใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 5 หรือ 10 สามารถลดค่าความพรุนและเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังทำให้เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมมีคุณภาพดีขึ้นกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

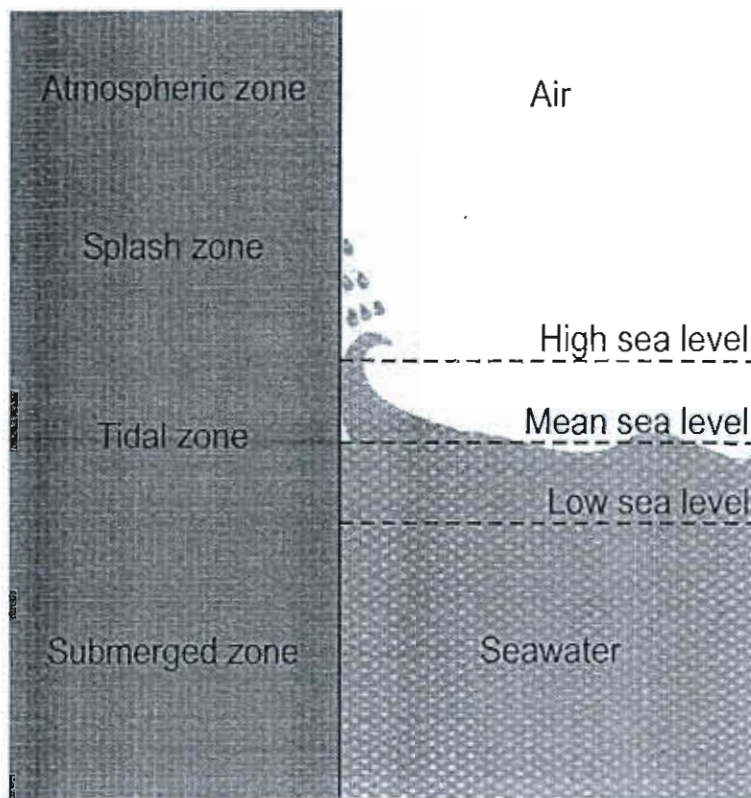
การใช้ซิลิกาฟูมจะช่วยลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในคอนกรีต การใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 15 ช่วยลดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาได้ดี เช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 หรือใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 การใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 20 สามารถลดการขยายตัวได้มากกว่าการใช้ร้อยละ 10 ถึง 15 แต่การใช้เพียงร้อยละ 10 ก็เพียงพอที่จะลดปัญหาการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา

ปัจจุบันนิยมใช้ซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก สิ่งที่ควรระมัดระวังให้มากคือการผสมซิลิกาฟูมในคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งคอนกรีต ควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟูมสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษที่ใช้อยู่เป็นประจำได้ดี เพื่อที่จะได้ไม่ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมากเกินไป ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่งคือควรทำการตรวจสอบทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพราะซิลิกาฟูมมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์มาก เพราะซิลิกาฟูมยังไม่สามารถผลิตขึ้นใช้ได้ในประเทศไทย กล่าวคือในประเทศไทยราคาของซิลิกาฟูมสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประมาณ 10 ถึง 15 เท่า

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพโดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีตรวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี ความเสียหาย

และความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง คอนกรีตที่อยู่ในสถานะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขจัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระแทกของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสถานะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สถานะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่าง ๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ ดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล

1. บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่าง

จากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2. บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ

3. บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

4. บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อน โดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การนำเปื้อนทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

5. บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การนำเปื้อนทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต สารละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เป็นต้น ซึ่งน้ำทะเลแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อม

ทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยทั่วไปปริมาณผลรวมของสารละลายเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำทะเลอีกด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

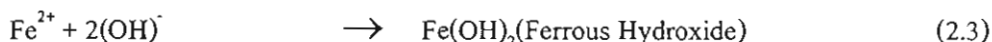
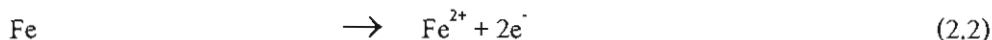
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดขึ้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำ และก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น

ความเป็นด่างของคอนกรีตอาจลดลงได้จากหลายสาเหตุ การแทรกซึมของคลอไรด์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง และหากค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น เมื่อคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริม และทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้น และก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่าน

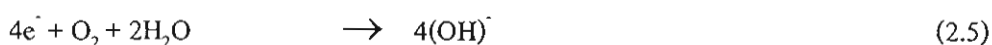
กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จะเกิดเป็น

เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการ 2.3 และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ และออกซิเจนเกิดเป็น เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ 2.4

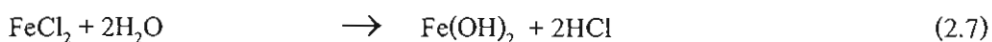
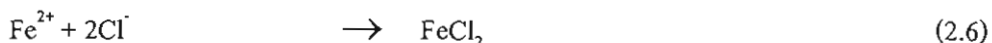
Anodic Reaction :



Cathodic Reaction :



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ 2.6 และ 2.7



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาณมากกว่า เนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 6 เท่า และคันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับ จุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting Crack) จนในที่สุดก็จะหลุดล่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึง บริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรงคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกระเทาะ ออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง อย่างเช่น น้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลอันตรายต่อการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมให้แตกร้าวในที่สุด ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตอาจได้รับมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำทะเล ดิน อากาศ หรือมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งโดยน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของคลอไรด์ไอออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต หรือการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่ใช่อันตราย

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการดูดน้ำ (Absorption) หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่

ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกักกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloroaluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะกับงานคอนกรีตหยาบ และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลายซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกักกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2. การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ในการศึกษาเกี่ยวกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์ถือว่ามีน้อย โดยการศึกษาที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งผสมเถ้าแกลบทดแทนในเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (20RHA-10M1.5) มีระยะแทรกซึมของคลอไรด์น้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย (0RHA-10M1.5)

จากการแช่จีโอโพลิเมอร์ใน 3% NaCl พบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยล้วนมีระยะแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมเถ้าแกลบ แสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อจีโอโพลิเมอร์ มีศักยภาพในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งอาจเนื่องมาจากซิลิกาในเถ้าแกลบสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการทำระหว่างแคลเซียมในเถ้าลอยและสารละลายเบสที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์ การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ นอกจากนี้ คอนกรีตที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ต่ำ ดังนั้นคอนกรีตจึงมีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ดีด้วย

การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack)

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

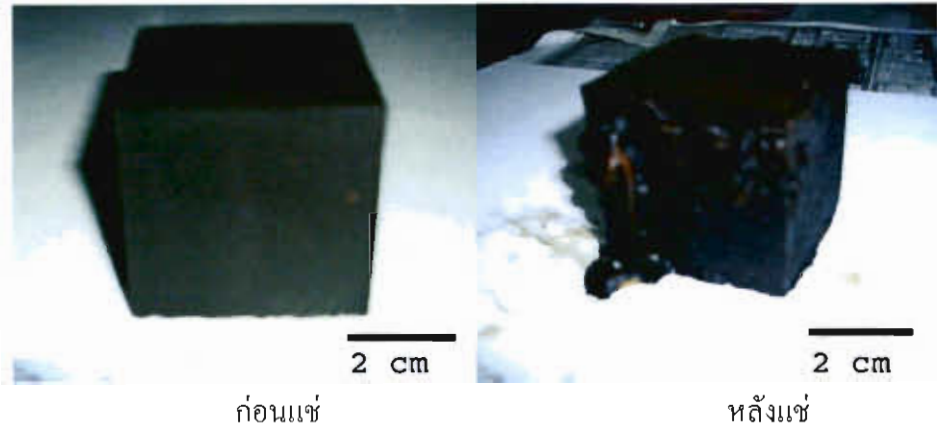
1. แหล่งของเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในดินบริเวณริมทะเล หรือ ในดินทั่วไป เกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟตรองลงมาก็คือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักจะพบอยู่ในน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือตามแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติด้วย

2. กลไกของการทำลายโดยซัลเฟต (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)

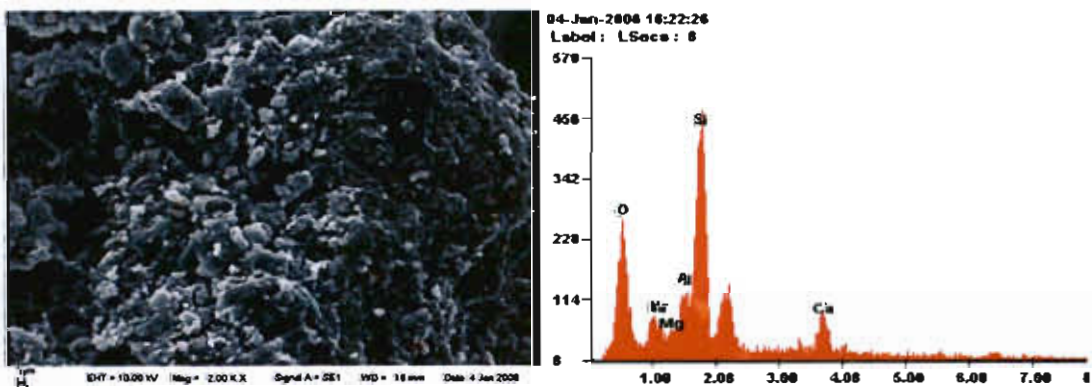
ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่าง จีโอฟอลิเมอร์มอร์ตาร์ หรือจีโอฟอลิเมอร์คอนกรีต ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือ แคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MS) แทน เมื่อสารทั้งสองดังกล่าวปรากฏอยู่ในดิน น้ำทะเล น้ำเสีย ก็มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจกลไกการทำลายโดยซัลเฟต เพื่อที่จะได้ป้องกัน โครงสร้างคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อมที่อันตรายดังกล่าว โดยกลไกการเกิดจะพบส่วนที่ก่อตัวมาจากพื้นที่ผิวของจีโอฟอลิเมอร์มอร์ตาร์ (ดังแสดงในภาพที่ 2-6) สารที่เกิดขึ้นอาจจะเป็น $\text{Mg}(\text{OH})_2$ จากปฏิกิริยาระหว่าง Mg^{2+} (จากสารละลาย MgSO_4) กับ OH^- (จาก NaOH ที่ใช้ในการผสม) ดังสมการ 2.8



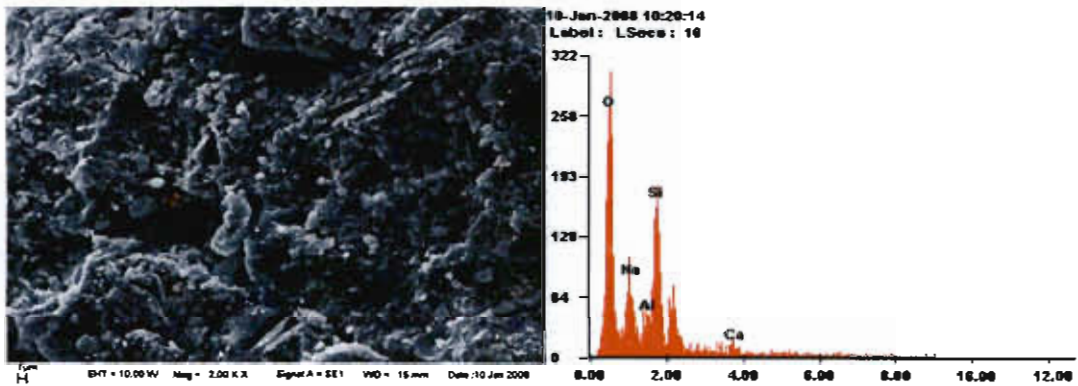


ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าก่อนและหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)

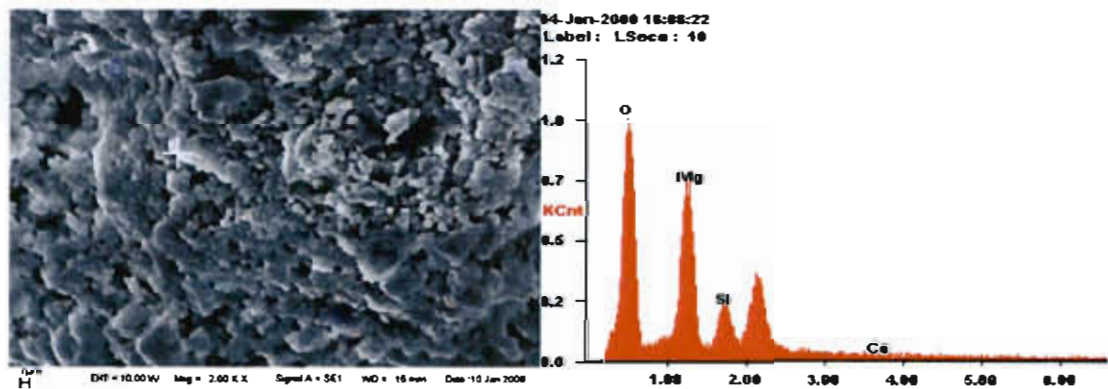
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณผิวของจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนั้นอาจเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาโดยการเกิดสารประกอบทั้งสองทำให้ตัวอย่างเกิดการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรูพรุนและช่องว่างในตัวอย่างเป็นผลให้ค่ากำลังอัดลดลงอีกทั้งการสูญเสียน้ำหนักเกิดจาก SiO_2 ที่ถูกชะออกมาจากมอร์ตาร์ดาร์เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตออกมากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่พบที่ส่วนที่ก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ดังที่สามารถตรวจพบ Si ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (ภาพที่ 2-7 ถึงภาพที่ 2-9)



ภาพที่ 2-7 แก้วกันตา (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)



ภาพที่ 2-8 จีโอพอลิเมอร์เฟสดี $\text{Na}_2\text{SiO}_3/10\text{ M NaOH} = 3$ (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)



ภาพที่ 2-9 ส่วนที่ก่อตัวเมื่อแช่ในสารละลาย 5% MgSO_4 (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552)

ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/10\text{ M NaOH}$ เท่ากับ 3 และตัวอย่างส่วนที่ก่อตัวที่พื้นผิวตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลาย 5% MgSO_4 เมื่อศึกษา โครงสร้างจุลภาค โดยภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเถ้าก้นเตาที่บดละเอียด พบว่าเถ้าก้นเตาพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และมีเม็ดเจลที่มีขนาดเล็กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเถ้าก้นเตา เมื่อนำเถ้าก้นเตามาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เกิดเจลก่อตัวเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 2-8 ส่วนก่อตัวจากพื้นผิวจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 2-9 พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะแตกต่างจาก 2 ภาพแรกมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว โค้งมนไม่มีเหลี่ยมมุม

ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM-EDX พบว่าในส่วนของตัวอย่างที่ก่อตัวของพื้นผิวจีโอโพลิเมอร์องค์ประกอบหลักประกอบด้วยซิลิกอนและแมกนีเซียม แต่ไม่พบอลูมิเนียมในส่วนนี้ ซึ่งอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมซิลิเกต

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต มีดังต่อไปนี้

3.1 สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟต ตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต ถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงก็จะมีการทำลายที่รุนแรงมากขึ้น

3.2 ความตึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความตึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้ระดับความรุนแรงลดลง

การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack)

1. แหล่งที่มาของกรด

กรดที่ทำลายคอนกรีตอาจมาจากแหล่งต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1.1 จากโรงงานหรือแหล่งผลิตที่มีการใช้กรดในการผลิต หรือได้กรดเป็นผลผลิตจากการผลิต

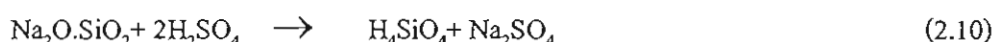
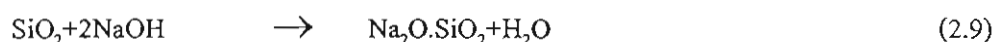
1.2 จากระบบบำบัดน้ำเสียและท่อระบายน้ำเสียจากบ้านเรือน ซึ่งโดยระบบทางชีวภาพทำให้เกิดกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้ (รายละเอียดของกลไกการเกิดกรดโดยวิธีนี้อยู่ในหัวข้อเรื่องการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากสาเหตุทางชีวภาพ)

-จากฝนกรด ซึ่งอาจจะมีกรด H_2SO_4 หรือ H_2CO_3 เป็นต้น

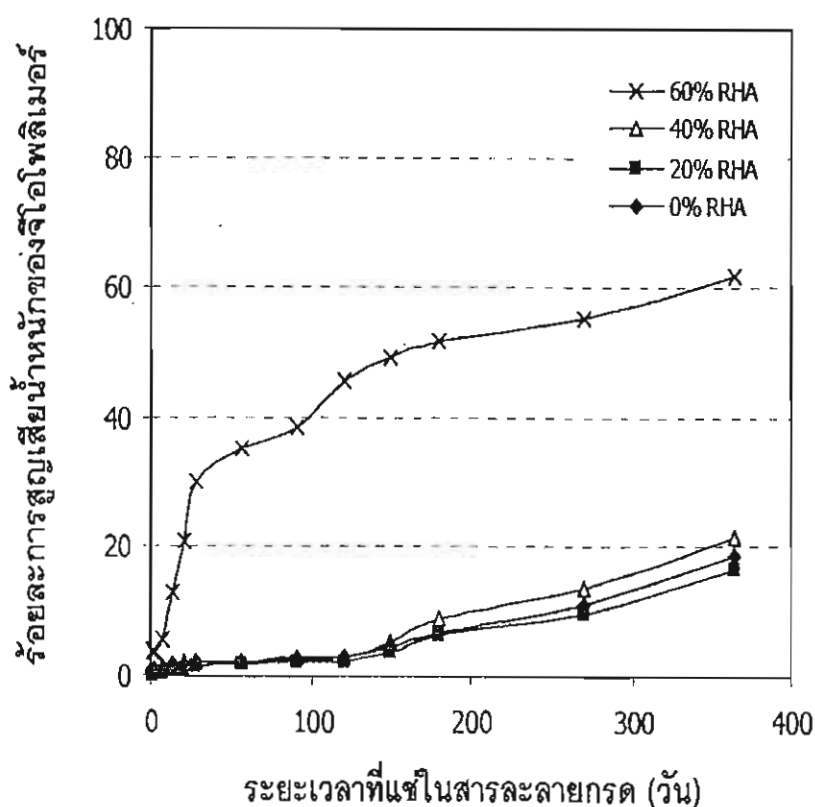
2. การต้านทานการกัดกร่อนของกรด

ในการศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานการกัดกร่อนของกรดในจีโอโพลิเมอร์ถือว่ามีน้อย โดยการศึกษาที่ผ่านมา (อูบลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552) ได้ทำการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดการกัดกร่อนของสารละลาย 5% H_2SO_4 ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมเถ้าแกลบแสดงในภาพที่ 2-10 การใช้เถ้าแกลบผสมกับเถ้าลอยที่ปริมาณเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ากรณีการใช้เถ้าลอยล้วนที่ทุกอายุการแช่ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาจากเถ้าแกลบกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ทำให้เนื้อจีโอโพลิเมอร์แน่นขึ้น นอกจากนี้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ลดการกัดกร่อนของกรดได้ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 40 พบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบที่ร้อยละ 60 เห็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละ

การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเถ้าเคลือบในส่วนที่มากเกินไป ทำให้มีปริมาณซิลิกาในส่วนผสมมากกว่าปริมาณซิลิกาที่มากเกินไปพอเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้โซเดียมซิลิเกต ซึ่งสามารถถูกชะด้วยกรดซัลฟูริกได้เป็นสารประกอบของกรดซิลิซิก (Silicic acid, H_4SiO_4) ออกมาในสารละลายทำให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น สมการของปฏิกิริยาการชะระหว่างซิลิกากับกรดซัลฟูริกสามารถแสดงได้ดังนี้



ดังนั้น ปริมาณการใช้เถ้าเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ปริมาณเถ้าเคลือบที่ใช้ผสมเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย หากจีโอโพลิเมอร์นั้นต้องสัมผัสกับกรด เช่น บริเวณท่อน้ำ เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักได้



ภาพที่ 2-10 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์เมื่อแช่ใน 5% H_2SO_4 (อุบลศักดิ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุ และนักวิจัยด้านคอนกรีตมากขึ้น ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งในประเทศไทยมีทิศทางของการวิจัยเพื่อพัฒนาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากวัสดุที่มีในประเทศ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เป็นต้น โดยแนวทางวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติด้านความคงทนที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ และศึกษาในรูปของเพสต์ และมอร์ตาร์เป็นหลัก โดยมีรายละเอียดดังนี้

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวิเชียร ชาลี (2549) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์หรือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง ในช่วงอัตราส่วนผสมโดยโมลดังนี้ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.2 - 0.48$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.3 - 4.5$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 10 - 25$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.8 - 1.2$ โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง Optical Microscope (OM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่เป็นอัตราส่วนผสมต่างกัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุ โดยจะเห็นเม็ดเจลาเกิดการก่อตัวรอบ ๆ เถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ขึ้น ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 56 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง การเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ในส่วนผสมมีผลต่อกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ พบว่าหากปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยเกินไป (ที่ $\text{NaOH}/$ โซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 0.5) ทำให้มีปริมาณ Al และ Si ที่ถูกชะออกจากอนุภาคเถ้าถ่านหินมีปริมาณน้อย และเกิดการก่อตัวเป็นโครงสร้างสามมิติของ Al และ Si ได้น้อยเช่นกัน แต่หากปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป (ที่ $\text{NaOH}/$ โซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 2) จะทำให้มีเจลา Si จากสารละลายโซเดียมซิลิเกตไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดพันธะกับ Si และ Al ที่ถูกชะออกมาจากเถ้าถ่านหิน

จะเห็นว่าคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ส่วนหนึ่งจะขึ้นกับการชะสารซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากวัสดุปอซโซลาน โดยในเรื่องนี้ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2549) ได้ศึกษาการชะของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าถ่านหินลิคไนต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และผลที่มีต่อกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยทำตัวอย่างเถ้าถ่านหินให้เป็นสารแขวนลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และนำสารละลายที่ระยะเวลาการชะต่างกัน ไปวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาและอะลูมินา นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการชะละลายของเถ้าถ่านหิน

ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการชะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นปานกลาง คือ 10 โมลาร์ และเลือกเวลาในการชะ 10 นาทีได้ให้กำลังอัดที่สูง สามารถทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังอัดสูงถึง 65 เมกะปาสกาล ซึ่งเทียบได้กับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกรดประเภทที่ 1

ในการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟต โดย วิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าก้นเตา โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 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} และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 35 เมกะปาสกาล และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัด ต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาศักยภาพของวัสดุขี้เถ้าที่มีในประเทศเพื่อสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดย Prinya Chindaprasirt และคณะ (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินและจากเถ้าก้นเตา (Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers) โดยจากผลการศึกษาพบว่า เถ้าก้นเตาบดละเอียด และเถ้าถ่านหินมีศักยภาพในการใช้เพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์ ระดับของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันขึ้นอยู่กับวัสดุขี้เถ้าที่ใช้ในการทำจีโอพอลิเมอร์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม และทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงคือ 10 โมลาร์

นอกจากนั้น Ubolluk Rattanasak และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลของสารละลายโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ต่อการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน ซึ่งพบว่า ความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอลูมินาออกจากเถ้าถ่านหินของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และช่วงเวลาที่ใช้ในการผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าถ่านหิน และส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด

ส่วนคุณสมบัติทางด้านการทำงานได้ของมอร์ตาร์สด Apha Sathonsaowaphak และคณะ (2009) ได้ศึกษาความสามารถในการทำงานได้ และกำลังของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินเตาของถ่านหินลิกไนท์ (Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar) จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ให้ผลดีในการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มากกว่าการใช้สารลดน้ำพิเศษ และภายใต้กำลังอัดที่ไม่ต่างกันมากพบว่า การใช้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

นอกจากนั้น Prinya Chindaprasirt และคณะ (2009) ได้ศึกษา ความสามารถในการทำงานได้ และกำลังของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer) ซึ่งพบว่า การไหลของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าต่ำลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น และการปรับปรุงการไหลของมอร์ตาร์ควรผสมน้ำ และสารลดน้ำพิเศษแต่จะมีผลกระทบต่อกำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์จะไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์มากนัก

พร้อมพงษ์ ผุงเพิ่มตระกูล และคณะ (2551) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เมื่อใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยการเจาะรูตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม.³ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร จนทะลุผ่าน จากนั้นใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ฝังลงไป ในคอนกรีตเป็นระยะ 150 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสานบริเวณรูเจาะจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้จะมีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าเคลบเปลือกไม้ ซิลิกาฟูมและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ผลที่ได้พบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมได้ โดยแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 79 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และคณะ (2552) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ ซึ่งกำหนดอัตราส่วนทางเคมีต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งอุณหภูมิบ่มเป็น 2 ชุด บ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ 60°C ทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 161 กก./ ซม.^2 และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 329 กก./ ซม.^2 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

J.Wongpa และคณะ (2010) ได้ศึกษา กำลังอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุอนินทรีย์ (Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete) โดยทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินและเถ้าแกลบเปลือกไม้ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีผลชัดเจนต่อกำลังอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุอนินทรีย์ โดย $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ลดลงมีผลให้คุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้เป็นไปในทิศทางที่ดี

นอกจากนั้น Smith Songpiriyakij และคณะ (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ กำลังอัด และระดับปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer) พบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้สามารถให้ซิลิกา (SiO_2) ที่ดีในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ Si/Al ที่มีค่าสูง โดยใช้ร่วมกับเถ้านหิน และค่า Si/Al ที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดคือ 8 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.9$) นอกจากนั้นพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าสูงขึ้น

ธวัชชัย สาสกุล และคณะ (2551) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัดและการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้านหิน 2 แหล่ง แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และกำหนดให้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 หล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100×200 มม. เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัด และหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.^3 เพื่อใช้ในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ ภายหลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน ได้ทดสอบกำลังอัด จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสถานะเปียกสลับแห้ง เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 6 และ 12 เดือน ได้เก็บ

ตัวอย่างทรงกระบอกเพื่อทดสอบกำลังอัด และเจาะคอนกรีตทรงลูกบาศก์เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ นอกจากนี้ยังทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาถึงอายุ 12 เดือน ผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้านหินผสมในคอนกรีตสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ และการแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้นการแทรกซึมคลอไรด์มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลครบ 12 เดือนมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาที่อายุเดียวกันเล็กน้อย

ภูมิภัทร์ สามหมอ และคณะ (2553) ได้ศึกษาคุณสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ กำลังรับแรงอัดและโครงสร้างจุลภาค จากอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของเถ้าลอยชนิด C และชนิด F อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 และ 65 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 : 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนต่อทราย 1 : 0, 1 : 2 และ 1 : 4 ผึ่งเหล็กในตัวอย่างให้มีระยะหุ้มของจีโอโพลิเมอร์โดยรอบเท่ากับ 25 มม. ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยการแช่ตัวอย่างในสารโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ทำการวัดระยะเวลาการซึมผ่านของคลอไรด์ในช่วงเวลา 3, 10, 20, 40 และ 70 วันจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมทำให้ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้น

พิชญา ธีระมิตรและคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ซึ่งแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และประเภทที่ V ด้วยเถ้านหินที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตั้งแต่อายุ 1 วันจนถึง 440 วัน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าการใช้เถ้านหินทั้ง 3 ขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ได้แท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้านหินที่มีความละเอียดและอัตราทดแทนที่เท่ากัน ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มีการขยายตัวมากกว่าแท่งมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ V การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินอนุภาคเล็กสามารถลดการขยายตัวได้มากกว่าเถ้านหินอนุภาคขนาดใหญ่ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้านหินความละเอียดเดียวกันแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 40 มีการขยายตัวน้อยกว่าการแทนที่ด้วยเถ้านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเถ้านหินสามารถลด

การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้ตามปริมาณการแทนที่และความละเอียดของเถ้า
 ด้านหินที่เพิ่มขึ้น

รัฐพล สมณา และคณะ (2547) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าด้านหินที่มี
 ผลต่อความคงทนของมอร์ตาร์โดยนำเถ้าด้านหินที่ได้จากโรงงาน โดยตรง 2 แหล่งผลิต มาปรับปรุง
 ความละเอียด จากนั้นนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30, 40 และ
 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการผสมมอร์ตาร์มาตรฐาน เพื่อทดสอบความต้านทาน
 การกัดกร่อนจากสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 0.02 โดยน้ำหนัก และทดสอบ
 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจาก
 ผลการศึกษาพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าด้านหินที่ละเอียดจะถูกกัดกร่อนจากสารละลายกรดซัลฟิวริก
 ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มากกว่าการใช้เถ้าด้านหินจากแหล่งผลิตโดยตรงแต่ถูกกัดกร่อน
 น้อยลงในสารละลายกรดความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าด้าน
 หินที่มีความละเอียดมากมีการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าด้านหิน
 จากโรงงาน โดยตรงในขณะที่ใช้เถ้าด้านหินที่มีปริมาณของ $\text{CaO} \cdot \text{SO}_3$ และอัลคาไลด์สูงจะทำให้เกิด
 การขยายตัวของมอร์ตาร์สูงขึ้นด้วย

J.Temuujin และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลของการการบดของเถ้าด้านหินต่อคุณสมบัติ
 ของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาพบว่า การบดเถ้าด้านหินให้มีความละเอียด
 มากขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าด้านหิน แต่ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์
 ที่บ่มในอุณหภูมิห้องสูงขึ้นอย่างชัดเจน (เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 80 ของเถ้าด้านหินก่อนบด) และยัง
 ได้ศึกษาต่อเนื่องถึงผลของปริมาณแคลเซียมในเถ้าด้านหินต่อคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์
 เพสต์จากเถ้าด้านหิน และผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณสารประกอบของแคลเซียมที่
 สูงขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าด้านหิน โดยแคลเซียมไฮดรอก
 ไซด์จะส่งผลดีมากกว่า แคลเซียมออกไซด์

ต่อมา J.Temuujin และคณะ (2010) ยังได้ศึกษาต่อเนื่องเกี่ยวกับ การเตรียมและลักษณะ
 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าด้านหิน (Preparation and characterization of fly ash based
 geopolymer mortars) ซึ่งให้ผลการศึกษาที่สำคัญคือ การเพิ่มปริมาณมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์
 ถึงแม้จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันลดลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของ
 คอนกรีตมากนัก และกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นกับความชื้นเป็นวัสดุประสานของเพสต์ และการยึด
 เกาะกับมวลรวม

ในส่วนของงานวิจัยจีโอพอลิเมอร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความคงทนพบว่า มีจำนวน
 ค่อนข้างน้อย และไม่มีผลการศึกษาที่จัดอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง โดย Zuhua Zhang และคณะ

(2010) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์ในการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทะเล (Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete) ซึ่งทำจีโอพอลิเมอร์ เมทาเคสลิโน และ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยพบว่า จีโอพอลิเมอร์จากวัสดุดังกล่าวมีศักยภาพในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเล โดยมีลักษณะของโครงสร้างอนุภาคที่ทำให้ค่าการซึมผ่านลดลง และมีการยึดเกาะที่ดี ซึ่งจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ เมทาเคสลิโน 90% และตะกรันเตาถลุงเหล็ก 10% ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 0.6 มล./กรัม ให้ผลการศึกษาที่ดี โดยมีความพรุนต่ำกว่าเพสต์ของปูนซีเมนต์ และสามารถใช้เคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลได้ดี

ส่วนของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ Xiaolu Guo และคณะ (2010) ได้ศึกษา กำลังอัดและ โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินชนิด C (Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer) พบว่า ค่าอัตราส่วน โดยโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ เท่ากับ 1.5 เป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน และให้กำลังอัดสูง แล้วมีความพรุนต่ำ สามารถที่จะพัฒนาเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูงได้ แต่ต้องมีการบ่มในอุณหภูมิสูงถึง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชม. และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ให้ถึงอายุ 28 วัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตด้านความคงทน และให้สามารถใช้งานได้ ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการกระตุ่นโดยใช้ความร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้น และเป็นการศึกษาที่เกี่ยวกับ มอร์ตาร์หรือเพสต์เท่านั้น ส่วนงานวิจัยที่เป็นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตส่วนมากจะเป็นการศึกษา คุณสมบัติเชิงกล และมีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และไม่พบผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจาก สภาวะแวดล้อมทะเลจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาเพื่อพัฒนา จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้วัสดุดิบในประเทศ ให้มีการใช้งานได้ ในสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรง และภายใต้การบ่มคอนกรีตในอากาศที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการพัฒนา เพื่อใช้ในงานจริงต่อไป

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. เถ้าถ่านหิน จาก โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23
2. หิน ใช้หินปูนมีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร ที่มีขนาดผลตามมาตรฐาน ASTM C33
3. ทราย ใช้ทรายแม่น้ำ อบแห้งร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีขนาดมาตรฐาน ASTM C33
4. ซิลิกาฟูม ซิลิกาฟูม หรือไมโครซิลิกา มีค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.2
5. $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ สารละลายโซเดียมซิลิเกตตามมาตรฐาน มอก.433-2539
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ดตามมาตรฐาน มอก. 150-2518
7. น้ำ ใช้น้ำประปา
8. เหล็กข้ออ้อย ขนาด DB12, DB16 และ DB20
9. เรซิน เรซินที่ใช้ทดสอบคือ เรซิน Cemcrete DM21 Part A

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมคอนกรีต
2. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง
3. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 30 ตัน (ทดสอบกำลังรับแรงอัด)
4. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 150 ตัน (ทดสอบแรงยึดเหนี่ยว)
5. แบบหล่อคอนกรีต
6. เครื่องตัดคอนกรีต
7. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
8. ตู้อบ (Oven) รุ่น BINDER
9. ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต (ภาพที่ 3-1)

11. เครื่องเจาะคอนกรีต
12. อุปกรณ์ Titration
13. อุปกรณ์ที่ใช้ในการฝังเหล็ก (ภาพที่ 3-2)



ภาพที่ 3-1 ชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำ



ภาพที่ 3-2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการฝังเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 320.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

1.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 480.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

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

1.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 720.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 โมลาร์

2. อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เม็ดานหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งหมด โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับ สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเม็ดานหิน ซิลิกาฟูม และมวลรวมที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังนั้นการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 10 ส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3-1

การใช้สัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้

ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

FA หมายถึง เม็ดานหิน

C หมายถึง หินปูน (ตากแห้ง) มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร

S หมายถึง ทรายแม่น้ำ (อบแห้ง) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

SF	หมายถึง	ซิลิกาฟูม
NaOH	หมายถึง	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
Na ₂ O: SiO ₃	หมายถึง	สารละลายโซเดียมซิลิเกต

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61

มวลรวมหยาบใช้หินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30C °

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

ถพ.ซิลิกาฟูม เท่ากับ 2.2

ถพ. NaOH เท่ากับ 1

ถพ.เม็ด่านหิน 2.23

ตารางที่ 3-1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก/ม ³)						ค่ายุบตัว (มม.)
		Fly Ash (FA)	หิน (C)	ทราย (S)	NaOH	Na ₂ O:SiO ₃	ซิลิกาฟูม (SF)	
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	14M	390	1092	585	67	167	-	24
5	16M	390	1092	585	67	167	-	24
6	18M	390	1092	585	67	167	-	24
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

หมายเหตุ 1) ส่วนผสมที่ 1-6 แปรเปลี่ยน NaOH ใช้อัตราส่วน Si/ Al คงที่ เท่ากับ 1.98

2) ส่วนผสมที่ 7-10 แปรเปลี่ยน Si/ Al ใช้ความเข้มข้นของ NaOH คงที่ เท่ากับ 14 โมลาร์

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1. การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดทรงลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ ที่อายุ 28 วัน และทรงกระบอกขนาด 100×200 มม.² ตาม ASTM C39 (2000) ที่อายุ 7, 14, 28, 60 และ 180 วัน

2. ความหนาแน่น (Density Test)

การหาความหนาแน่น (Density Test) โดยใช้ตัวอย่าง ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³

3. การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก

การทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 (2000) วางตัวอย่างนอนลงเพื่อรับแรงกด จนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแตกเป็น 2 ซีก โดยในงานวิจัยนี้ทำการหล่อตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร

การคำนวณค่าแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต โดยวิธีผ่าซีก สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยสมการทั้งสองใช้ทฤษฎีอีลาสติก (theory of elasticity) ในการวิเคราะห์

$$\text{แรงดึงของคอนกรีต} \quad \sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.1)$$

$$\text{แรงอัดของคอนกรีต} \quad \sigma_c = \frac{2P}{\pi LD} \left[\frac{D}{r(D-r)} - 1 \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ σ_t คือ แรงดึงของคอนกรีตตามแนวราบโดยวิธีผ่าซีก (กก/ ซม²)

σ_c คือ แรงอัดของคอนกรีตตามแนวตั้งโดยวิธีผ่าซีก (กก/ ซม²)

P คือ แรงกดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต (กก.)

L คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ซม.)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของคอนกรีต (ซม.)

r คือ ระยะทางที่วัดจากผิวด้านบนของคอนกรีต (ซม.)



ภาพที่ 3-3 การทดสอบกำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

4. การทดสอบกำลังรับแรงดิ่งของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาลักษณะกำลังรับแรงดิ่งของคอนกรีต ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตด้วย เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตยังไม่มีมาตรฐานรองรับ ทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 500$ มม.³ เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอายุครบ 28 วันจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงดิ่ง โดยวางบนจุดรองรับอย่างง่าย (Simple support) และใช้น้ำหนักกระทำแบบจุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3-4 ผลของกำลังต้านทานแรงดิ่งจะอยู่ในรูปของโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยเป็นค่าหน่วยแรงดิ่งสูงสุด ณ จุดแตกร้าวในคานที่ทำการทดสอบ ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Modulus of Rupture (R)} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.4)$$

โดยที่ R = โมดูลัสการแตกร้าว (กก/ ซม²)
 P = น้ำหนักสูงสุด (กก.)
 L = ความยาวคานระหว่างจุดรองรับ (ซม.)
 b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน (ซม.)
 d = ความลึกเฉลี่ยของคาน (ซม.)



ภาพที่ 3-4 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

5. การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

ในการทดลองจะต้องเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม.³ โดยฝังเหล็กไว้ในก้อนตัวอย่างทดสอบ (ดังภาพที่ 3-5) เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน จึงทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับเหล็กเสริมด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง วัฏระยะเลื่อนไถลในขณะที่ออกแรงดึงก่อนเหล็กนั้น การทดสอบกระทำจนกว่าแรงที่ใช้ดึงก่อนเหล็กมีค่าเท่ากับกำลังณจุดครากของเหล็กนั้น หรือ เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเริ่มชำรุดแยกออกจากกัน หรือ จนกระทั่งระยะเลื่อนไถลมีค่ามากกว่า 2.5 มม. การคำนวณหาค่ากำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength) หาได้จากแรงดึงหารด้วยพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีหน่วยเป็น กก/ ซม.² ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$u = \frac{P_{\max}}{\pi DL} \quad (3.5)$$

โดยที่ u = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก/ ซม.²)
 P_{\max} = น้ำหนักสูงสุด (กก.)
 L = ความยาวของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต (ซม.)
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็ก (ซม.)



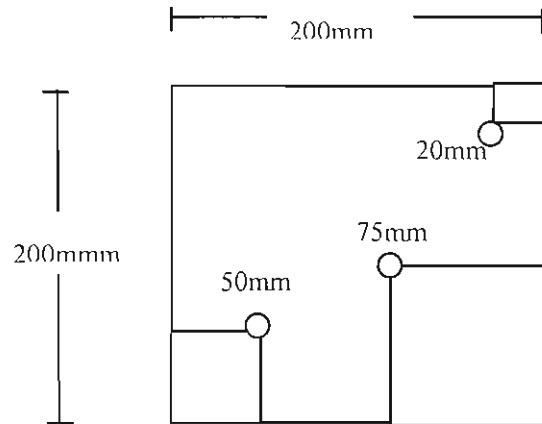
ภาพที่ 3-5 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

การทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

1. การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทน ทำการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 20, 50 และ 75 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3-6 และตัวอย่างทดสอบที่หล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วดังภาพที่ 3-7



(ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



(ข) ตำแหน่งที่ฝังเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ



(ค) การหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 3-6 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อทดสอบความคงทนในสิ่งแวดล้อมทะเล



(ก) ลักษณะของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสด



(ข) ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทดสอบความคงทนในสิ่งแวดล้อมทะเล

หลังจากที่หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและบ่มในอากาศจนอายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างทดสอบไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียก และแห้งตามน้ำขึ้น-ลง ดังแสดงในภาพที่ 3-8 และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และดูการเกิดสนิมเหล็กเมื่ออายุแช่น้ำทะเลครบ 180 วัน



ภาพที่ 3-8 บริเวณแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี
ณ ศรีราชา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี

2. การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

1. นำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ ที่เก็บมาจากสถานที่แช่ตัวอย่าง มาเจาะด้วยหัวเจาะเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. ได้เป็น ทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. ยาว 200 มม. ดังภาพที่ 3-9
2. นำตัวอย่างทรงกระบอกมาตัดเป็น 10 ชั้น (หนาชั้นละ 10 มม.) ดังภาพที่ 3-10
3. บดตัวอย่างทดสอบแต่ละชั้นด้วยครกหินแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 ดังภาพที่ 3-10 และนำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป



ภาพที่ 3-9 การเจาะตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์



ภาพที่ 3-10 ตัดและบดตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

2.2 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์

2.2.1 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรด (Acid soluble) มีขั้นตอนดังนี้

นำตัวอย่าง 10 กรัม, กรดไนตริก (1 : 1) 75 มล. และน้ำกลั่น 25 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระจกนาฬิกา นำไปต้ม 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น นำตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจาง 5 เท่า (เนื่องจากคลอไรด์มีความเข้มข้นสูง) แล้วคูดตัวอย่างที่เจือจางแล้วใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ

10 มล. เติม K_2CrO_3 5% 1 มล. และ $NaHCO_3$ 2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้มีการตกตะกอน จากนั้นนำมาหยดด้วย ซิลเวอร์ไนเตรด ($AgNO_3$) จนเกิดเป็นสีส้ม บันทึกค่าจากบิวเรตต์ ทำเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง

2.2.2 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยน้ำ (Water soluble) มีขั้นตอนดังนี้ นำตัวอย่าง 10 กรัม, นำกลั่น 10 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิลา นำไปต้ม 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ ปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น แล้วดูดตัวอย่างใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ 10 มล. เติม K_2CrO_3 5% 1 มล. และ $NaHCO_3$ 2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้ทั่ว จากนั้นนำมาหยดด้วย ซิลเวอร์ไนเตรด ($AgNO_3$) จนเกิดเป็นสีส้ม บันทึกค่าจากบิวเรตต์ ทำเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง

3. การวัดปริมาณสนิมเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

นำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³. มาดัดให้แตกด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (UTM) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 การกดทำลายตัวอย่างเพื่อเอาเหล็กเสริมที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³. ที่ผ่านการทำลายโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใส่แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1×1 มม.² มาทาครอบแบ่งเหล็กแล้วใช้ปากกา

หาพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด ค่าที่คำนวณได้คือพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็ก (ร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิม) ดังสมการที่ 3.6 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายรูปสนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

$$C, (\%) = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ C คือ ร้อยละของพื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม

RA คือ พื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม (มม.²)

SA คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็ก (มม.²)

4. ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยวิธีการไหลเวียนของน้ำในตัวอย่างทดสอบ โดยบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศก่อนทำการทดสอบเวลาที่ 28 วัน และ 60 วัน นำคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. ที่ได้จากการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 100×200 มม.² และนำตัวอย่างคอนกรีตมาเคลือบด้วยอิพอกซีหนาชั้นละ 40 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางรวมทั้งหมด 150 มม.) จากนั้นจึงนำตัวอย่างประกอบเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (ภาพ 3-12) และผ่านความดันของน้ำ 0.5 เมกะปาสกาล ในตัวอย่างทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตหาได้จากสูตรของ Darcy's Law และสมการความต่อเนื่องดังนี้

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (3.7)$$

เมื่อ K = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เมตร/วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

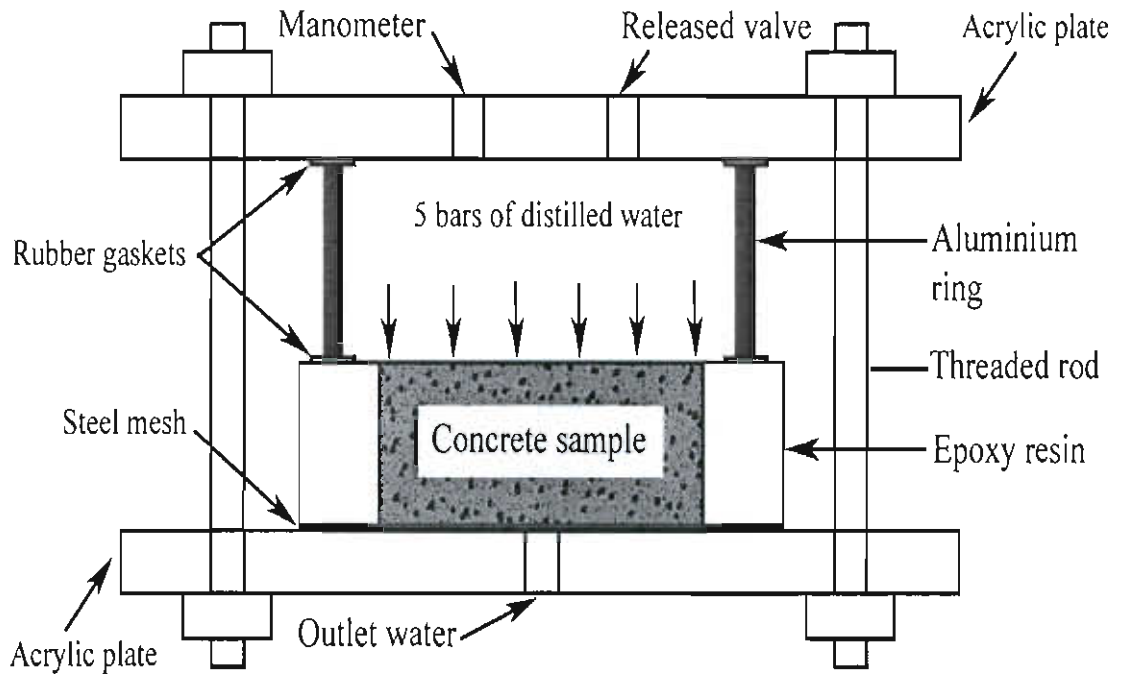
G = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที²)

Q = อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

L = ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (เมตร)

P = ความดันน้ำสมบูรณ์ (ปาสกาล)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเมตร)



(ก) แสดงลักษณะของการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ



(ข) ตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านน้ำ



(ค) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบในเครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ

5. การทดสอบผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เมื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีตครบ 24 ชม. จึงถอดแบบ จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 3-13) ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 เดือน และ 6 เดือน หลังแช่ตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 3-13 การแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

6. การทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายกรดซัลฟูริก

ทำการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เมื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีตครบ 24 ชม. จึงถอดแบบ แล้วนำไปบ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 3-14 จากนั้นทำการชั่งเพื่อวัดน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากกรดที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน



ภาพที่ 3-14 การแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

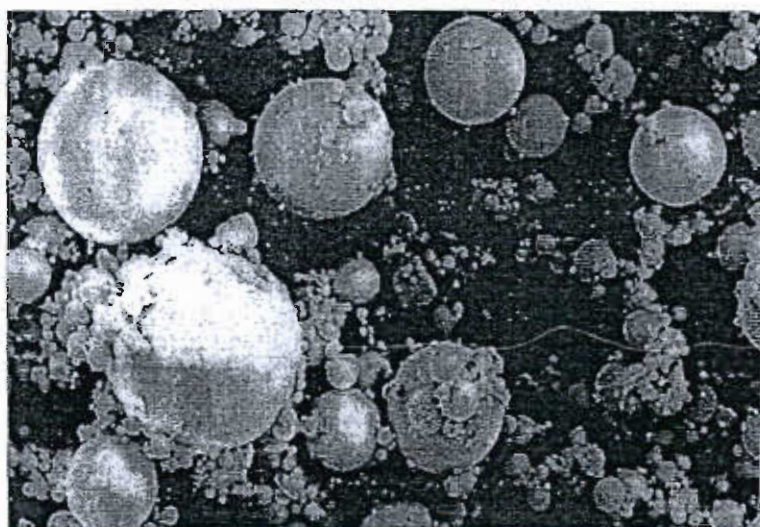
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ประกอบด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนของ Si/ Al ค่คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบ ได้แก่ กำลังอัด กำลังรับแรงดึงแบบดัดและแบบผ่าซีก และกำลังยึดเหนี่ยว ส่วนคุณสมบัติด้านความคงทนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบ ได้แก่ การต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตในสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ตลอดจนทำการทดสอบความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล ได้แก่ การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริม

คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน

1. คุณสมบัติทางกายภาพ

1.1 รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินมีสีน้ำตาลแดง และมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าถ่านหินจากภาพถ่ายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM แสดงดังภาพที่ 4-1 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีทรงกลม ผิวเรียบ และเถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่เกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนอนผิวขรุขระ และมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว



ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

1.2 ขนาดและความละเอียด

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด แสดงดังตารางที่ 4-1 ซึ่งมีขนาด และมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงมีพื้นที่ผิวมากขึ้น และสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาออกมาได้ง่ายขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ให้กำลังกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด	
Specific Gravity	2.23
Retained on Sieve No. 325 (%)	32
Median Particle Size (micron)	30.4

2. คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	
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

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศแสดงดังตารางที่ 4-3 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการบ่มดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย แต่กำลังอัดมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นถึง 18 โมลาร์ โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบกำลังอัด การศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 16 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุด โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 180, 191, 216, 244, 322 และ 233 กก/ ซม² ตามลำดับ การที่กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 18 โมลาร์ อาจเป็นผลจากปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากไป และเหลือจากการทำ

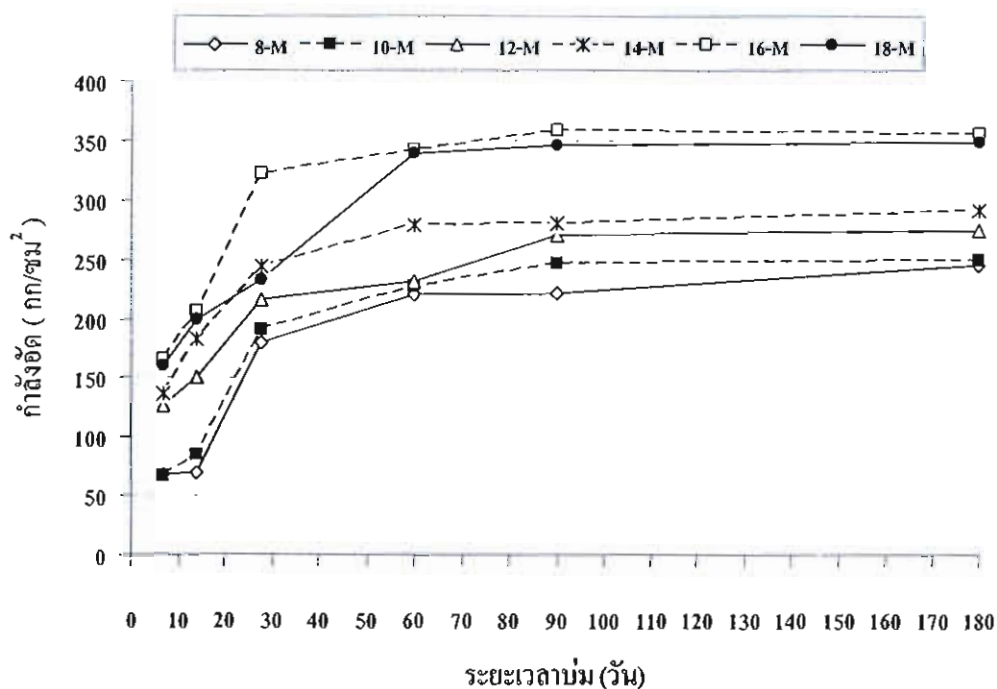
ปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อสัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจส่งผลต่อการยึดเกาะของจีโอโพลีเมอร์เจลกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้ อย่างไรก็ตาม การลดลงของกำลังอัดเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ถึง 18 โมลาร์ ไม่ค่อยชัดเจนมากนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเท่ากับ 8 ถึง 14 โมลาร์ ยังถือว่าให้แนวโน้มของกำลังอัดที่สูงกว่า จากตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-3 แสดงการพัฒนาำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินแม่เมาะที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยแสดงในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งพบว่า การพัฒนาำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดเทียบกับอายุ 28 วัน เริ่มคงที่ในช่วงอายุ 90 วัน ถึง 180 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินแม่เมาะมีค่าสูงในช่วง 90 วันแรก และหลังจากนั้นในช่วง 90 ถึง 180 วัน กำลังอัดเกือบจะคงที่ โดยสังเกตจากทุกส่วนผสมมีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 90 วัน และ 180 วัน ใกล้เคียงกัน เช่น จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 60, 90 วัน เมื่อเทียบกับ 28 วัน 68.7, 85.4, 145.5, 148.1 และ 149.4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึงแม้จะให้กำลังอัดที่สูงแต่ค่าใช้จ่ายในการทำจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตก็จะสูงด้วย ดังนั้นแนวทางในการศึกษาจะพิจารณาถึงความเหมาะสมของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อกำลังอัดที่ยอมรับและเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ ตลอดจนต้องมีความชื้นเหลือที่สามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่เกิดการแยกตัว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 และ 10 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุช่วงต้น (7-14 วัน) ก่อนข้างต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต ส่วนกลุ่มจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10 โมลาร์ ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดี ทั้งทางด้านกำลังอัดและความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด

ตารางที่ 4-3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์

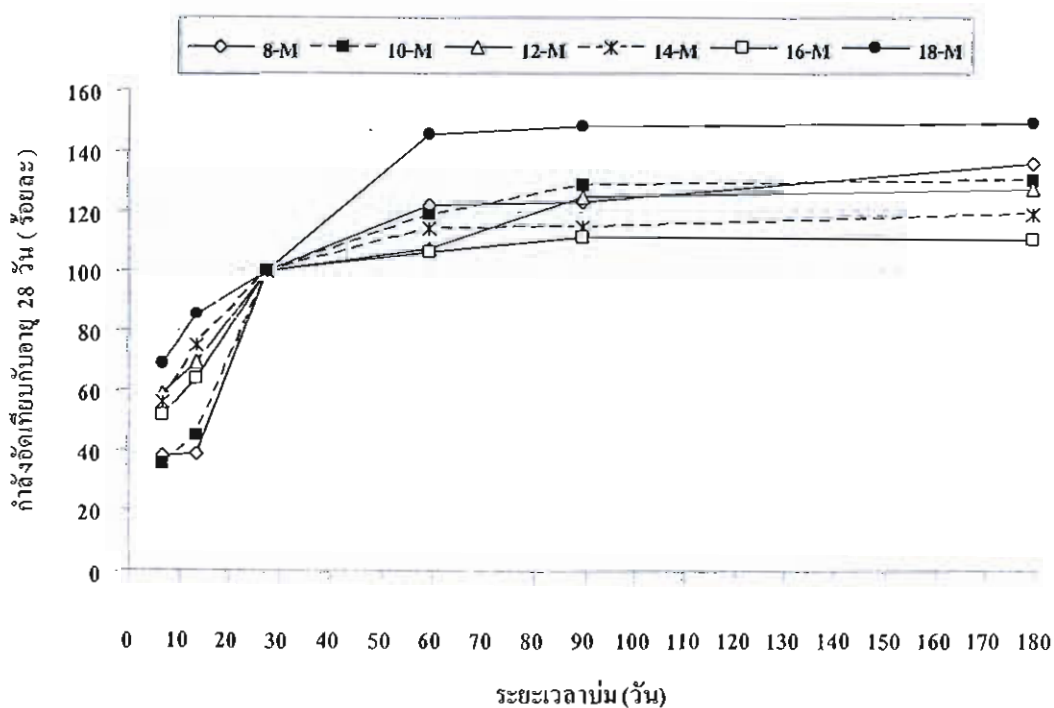
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ ซม ²)						ค่าการยุบตัว (ซม.)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน	
8-M	68	69	180	220	222	245	25
10-M	67	85	191	227	246	249	25
12-M	127	150	216	232	270	275	25
14-M	136	183	244	279	280	291	24
16-M	166	206	322	342	358	356	24
18-M	160	199	233	339	345	348	25

ตารางที่ 4-4 ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุต่างๆ เทียบกับ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัดเทียบกับอายุ 28 วัน (ร้อยละ)					
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
8-M	37.8	38.3	100	122.2	123.3	136.1
10-M	35.1	44.5	100	118.8	128.8	130.4
12-M	58.8	69.4	100	107.4	125.0	127.3
14-M	55.7	75.0	100	114.3	114.8	119.3
16-M	51.6	64.0	100	106.2	111.2	110.6
18-M	68.7	85.4	100	145.5	148.1	149.4



ภาพที่ 4-2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอากาศ



ภาพที่ 4-3 ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

2. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

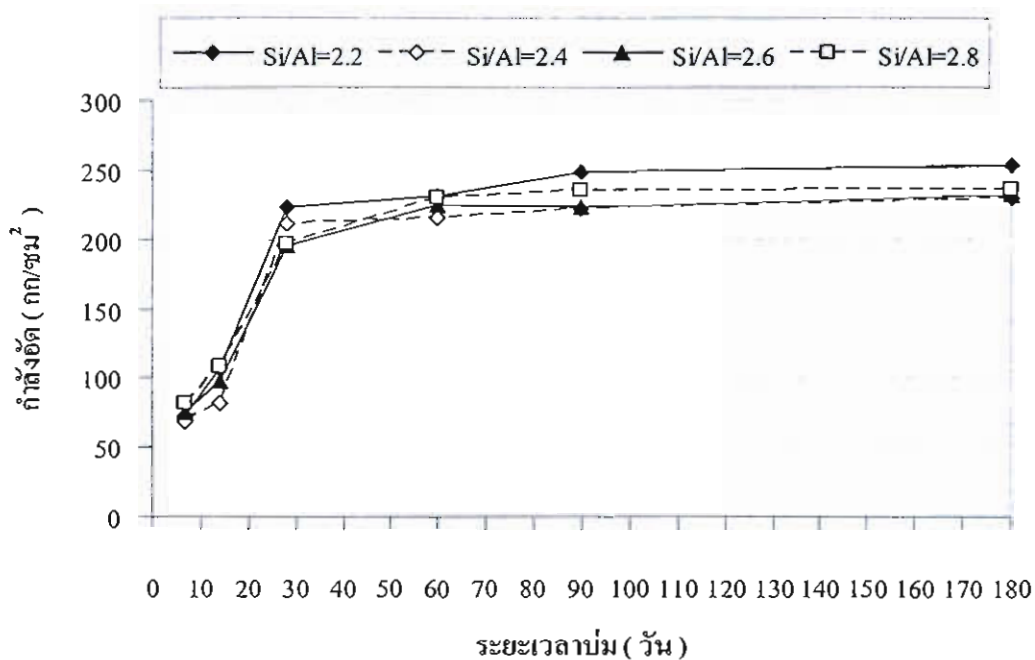
พิจารณาผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-4 พบว่า อัตราส่วน Si/ Al มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยมาก โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบสามารถสังเกตได้ว่าอัตราส่วน Si/ Al ที่สูงขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย อาจเป็นผลจากปริมาณของซิลิกาที่มากขึ้น และเข้าทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็น โซเดียมซิลิเกต และซิลิกาเจล ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่แข็งแรงจึงทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ำลงได้ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) ดังนั้น ปริมาณซิลิกาที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันควรมีปริมาณที่พอดีที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอะลูมินา และออกซิเจน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นสารที่ให้ความแข็งแรงกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 223, 212, 195 และ 197 กก/ ซม² ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยอัตราการเพิ่มกำลังอัดในช่วงหลังจาก 28 วันค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นในช่วงต้นสูง และอัตราการเพิ่มลดลงในช่วงหลัง น่าจะเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ที่เกิดขึ้นสูงในช่วงต้น และลดลงเมื่ออายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น ลักษณะของการพัฒนากำลังอัดดังกล่าว จะเหมือนกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่แตกต่างที่กลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความแข็งแรงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (chain or addition polymerization) พิจารณาผลของ Si/ Al ต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเส้นกราฟในรูป ร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4-5 พบว่า อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 113.9, 108.5, 119, และ 120.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al

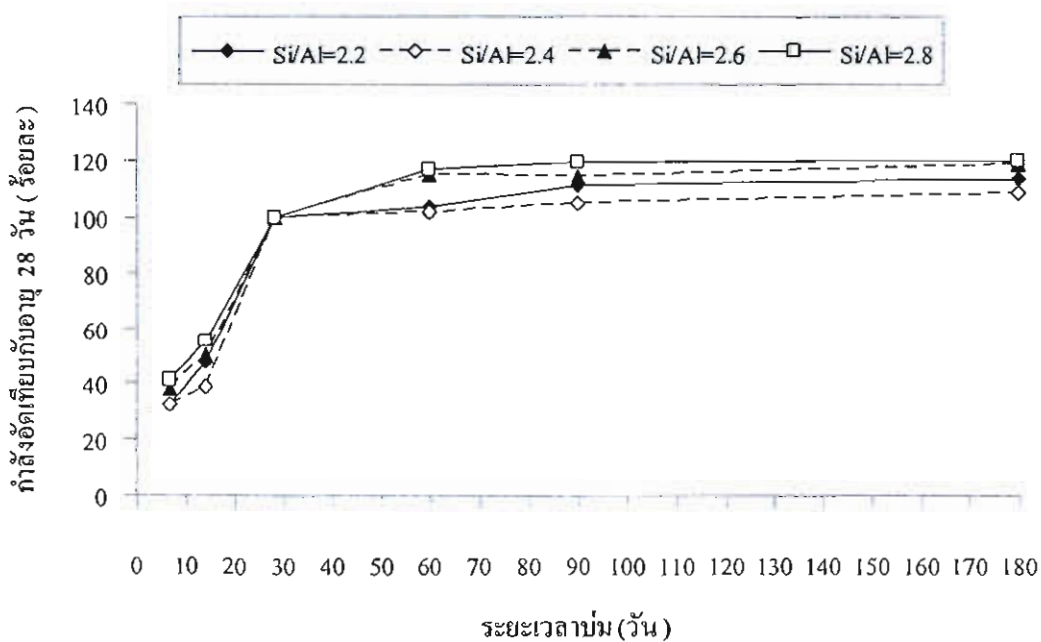
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ ซม ²)					
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
Si/Al=2.2	73	107	223	231	248	254
Si/Al=2.4	69	82	212	215	222	230
Si/Al=2.6	75	98	195	225	223	232
Si/Al=2.8	82	109	197	230	235	237

ตารางที่ 4-6 ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่อายุต่าง ๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	ร้อยละกำลังอัดเทียบกับอายุ 28 วัน					
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
Si/Al=2.2	32.7	48.0	100	103.6	111.2	113.9
Si/Al=2.4	32.5	38.7	100	101.4	104.7	108.5
Si/Al=2.6	38.5	50.3	100	115.4	114.4	119.0
Si/Al=2.8	41.6	55.3	100	116.8	119.3	120.3



ภาพที่ 4-4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 ที่บ่มในอากาศ



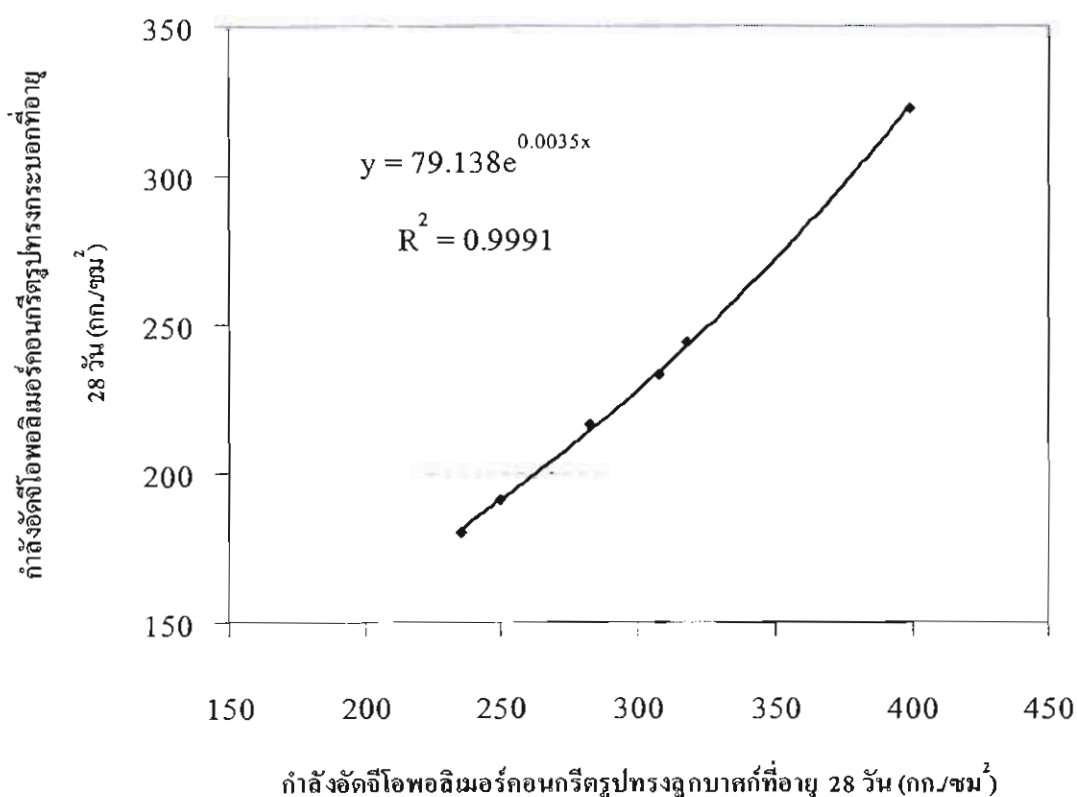
ภาพที่ 4-5 ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

3. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์

กำลังอัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบจากตัวอย่างรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C 39 และรูปทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108 ที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4-7 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 4-6 พบว่า กำลังอัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกมีค่าประมาณร้อยละ 79 ของรูปทรงลูกบาศก์ซึ่งใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รูปทรงกระบอกกับรูปทรงลูกบาศก์ ที่พบว่ากำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของรูปทรงลูกบาศก์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ตารางที่ 4-7 กำลังอัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกและรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัดทรงลูกบาศก์ อายุ 28 วัน (กก/ซม ²)	กำลังอัดรูปทรงกระบอก อายุ 28 วัน (กก/ซม ²)
8-M	235	180
10-M	250	191
12-M	282	216
14-M	318	244
16-M	399	322
18-M	307	233



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกกับรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน

กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

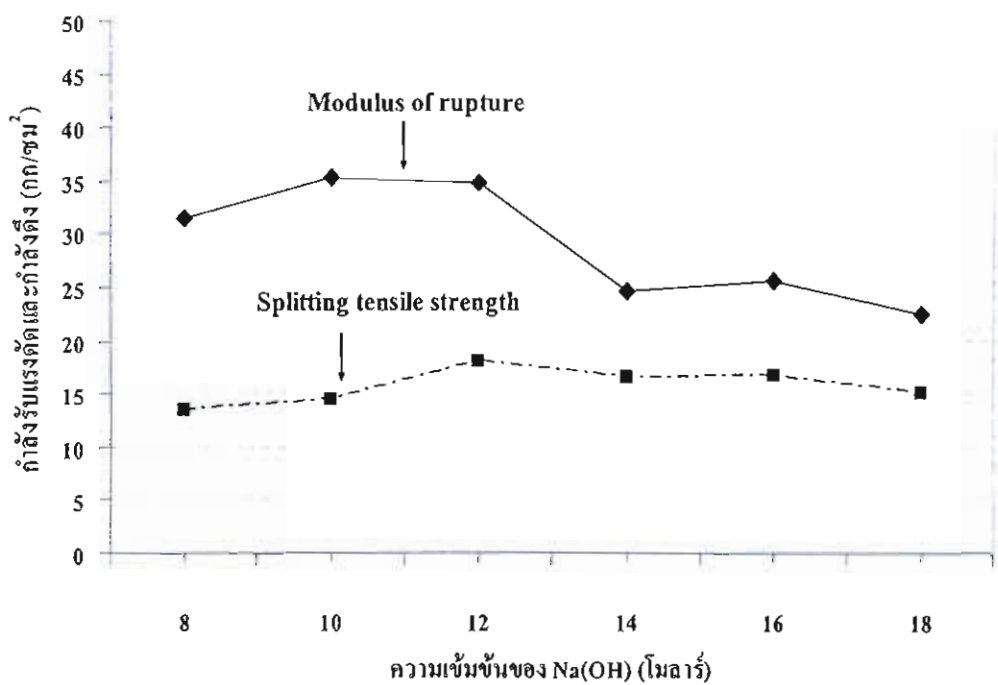
1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบ 3 จุด (Three point bending) และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile test) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-7 พบว่า กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น และลดต่ำลงที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 โมลาร์ ทั้งนี้พบว่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และกำลังรับแรงดึงสูงสุด เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

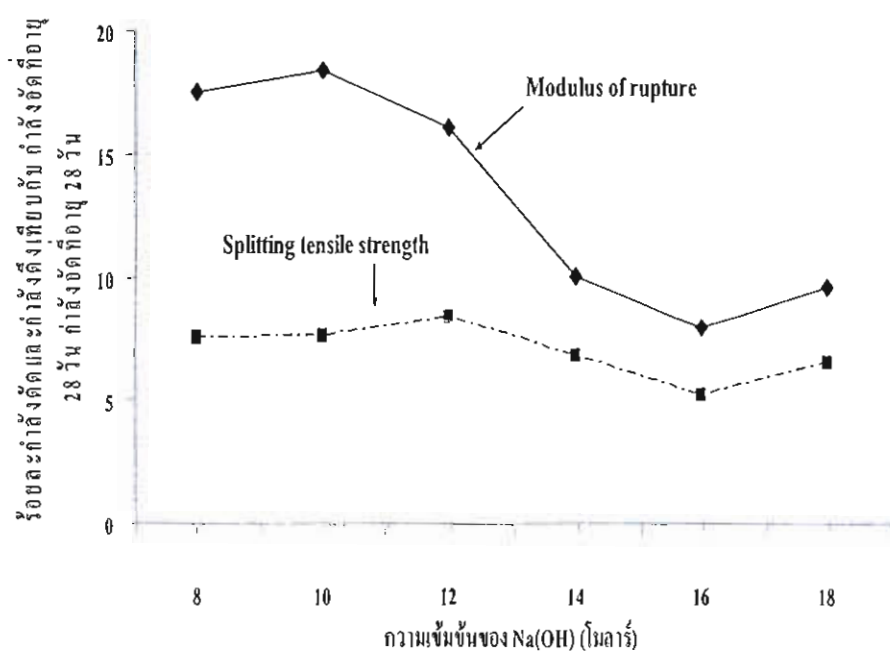
มีกำลังตัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 31.57, 35.27, 34.80, 24.68, 25.70 และ 22.52 กก/ ซม² ตามลำดับ ขณะที่กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก เท่ากับ 13.60, 14.60, 18.20, 16.60, 16.80 และ 15.20 กก/ ซม² ตามลำดับ ผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มนำสูงขึ้นตามกำลังอัด เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น อยู่ในช่วง 8 ถึง 12 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้นสูงถึง 14 โมลาร์ กลับพบว่า กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มนำลดลง ถึงแม้ว่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยแสดงให้เห็นชัดเจนใน ภาพที่ 4-8 ที่พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12 เป็น 18 โมลาร์ ร้อยละของโมดูลัสแตกร้าวและกำลังรับแรงดึง เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุทดสอบ เดียวกันมีแนวโน้มนำลดลง การที่ กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มนำลดลง เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ออกมาได้มาก และทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแข็งและเปราะ จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังสูงมีร้อยละของกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่า กำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัด มีค่าประมาณร้อยละ 5-8 ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีกำลังรับแรงดึงประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด (นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัวทัศนานนท์, 2552)

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ในกลุ่ม Si/ Al คงที่เท่ากับ 1.98

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)	กำลังดึง (กก/ซม ²)	กำลังคด (กก/ซม ²)	กำลังดึงเทียบ กำลังอัด (ร้อยละ)	กำลังคดเทียบ กำลังอัด (ร้อยละ)
8-M	180	13.6	31.57	7.54	17.51
10-M	191	14.6	35.27	7.62	18.41
12-M	216	18.2	34.8	8.42	16.09
14-M	244	16.6	24.68	6.79	10.10
16-M	322	16.80	25.70	5.21	7.97
18-M	233	15.20	22.52	5.27	9.67



ภาพที่ 4-7 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

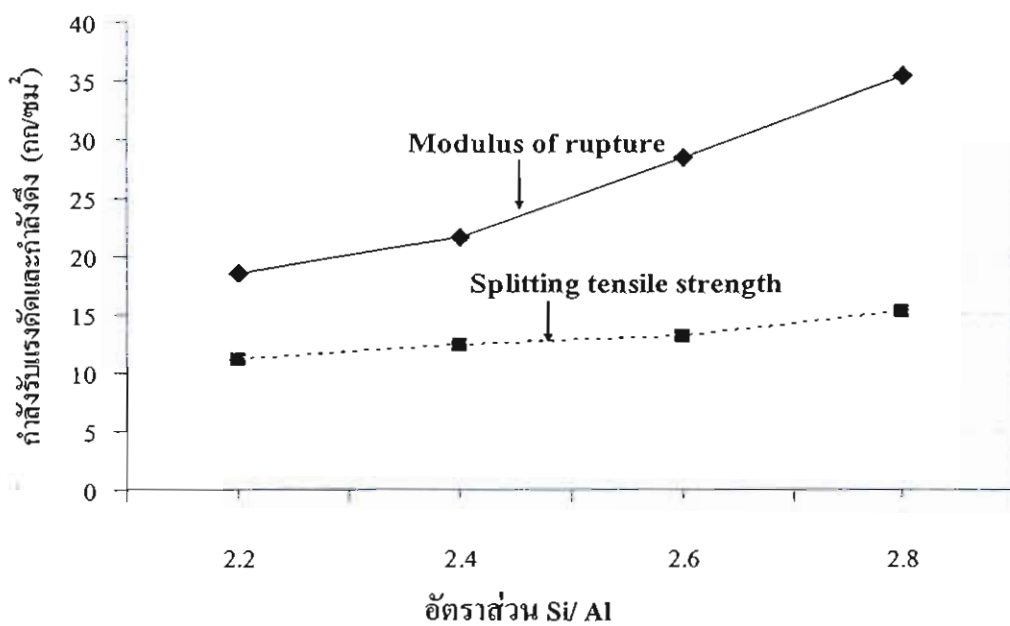


ภาพที่ 4-8 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละของกำลังคดและกำลังดึงเทียบกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

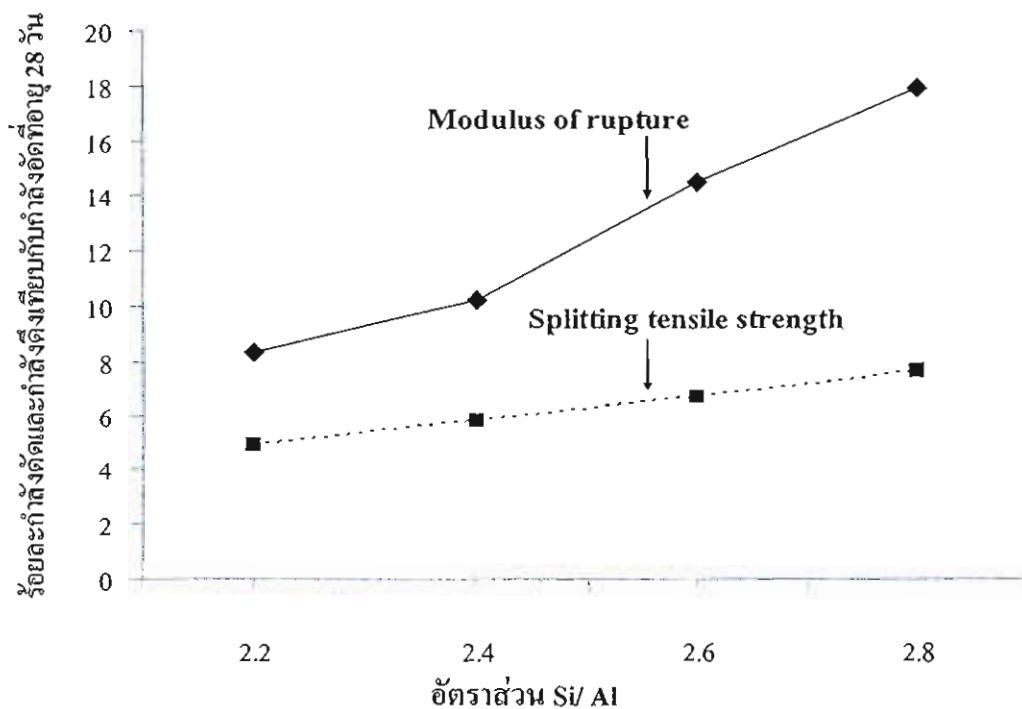
2. ผลของ Si/ Al ต่อกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เมื่อพิจารณาผลของ Si/ Al ต่อกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-9 พบว่า กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่ออัตราส่วน Si/ Al ที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น ทั้งนี้พบว่า กำลังรับแรงคดและแรงดึงสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.8 โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังคดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 18.51, 21.59, 28.32 และ 35.29 กก/ ซม² ตามลำดับ และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก เท่ากับ 11.0, 12.30, 13.0 และ 15.10 กก/ ซม² ตามลำดับ ผลการศึกษากำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยน Si/ Al เป็นที่น่าสังเกตว่า อัตราส่วน Si/ Al ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อกำลังอัดคดที่กล่าวมาข้างต้น แต่เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดึงทั้งที่ทดสอบโดยวิธีคด และแบบผ่าซีก กลับพบว่า กำลังรับแรงดึงทั้ง 2 แบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน Si/ Al ที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลิกา (SiO₂) ที่มากขึ้นน่าจะส่งผลต่อการต้านทานแรงดึงในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้มากขึ้น ขณะที่กำลังรับแรงอัดไม่ต่างกันมากนัก ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นชัดเจน เมื่อพิจารณาในรูปร้อยละของกำลังรับแรงดึงทั้ง 2 แบบ เทียบกับกำลังอัดที่อายุเดียวกัน ดังตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-10 ซึ่งพบว่า ร้อยละของกำลังคดและดึงเทียบกับกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอัตราส่วน Si/ Al ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ร้อยละของกำลังรับแรงดึงเทียบกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการศึกษานี้ยังต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คดที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่

ส่วนผสม	กำลังอัด 28 วัน (กก/ ซม ²)	กำลังดึง (กก/ ซม ²)	กำลังคด (กก/ ซม ²)	กำลังดึงเทียบ กำลังอัด (ร้อยละ)	กำลังคดเทียบ กำลังอัด (ร้อยละ)
Si/Al=2.2	223	11.0	18.51	4.93	8.30
Si/Al=2.4	212	12.3	21.59	5.80	10.18
Si/Al=2.6	195	13.0	28.32	6.67	14.52
Si/Al=2.8	197	15.1	35.29	7.66	17.91



ภาพที่ 4-9 ผลของ Si/Al ต่อกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4-10 ผลของ Si/Al ต่อร้อยละของกำลังคดและกำลังดึงเทียบกับกำลังอัดของ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

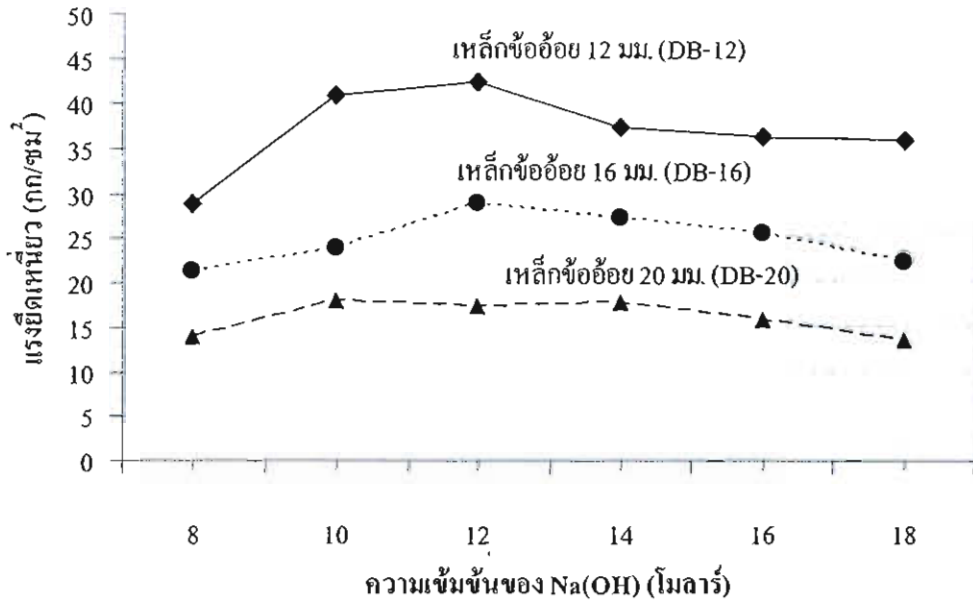
1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริมหาได้จากการวัดที่ทำการครูดหรือฉีกในไกล โดยที่เหล็กเสริมไม่ขาดหรือวิบัติ ผลการศึกษาพบว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในเหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเล็กว่ามีกำลังยึดเหนี่ยวสูงกว่าเหล็กที่มีขนาดใหญ่ แสดงดังตารางที่ 4-10 และให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาในคอนกรีตธรรมดาที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ, 2552) เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย ดังแสดงในภาพที่ 4-11 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นกำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดต่ำลงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ เช่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก DB 12 ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 28.92, 40.84, 42.33, 37.43, 36.23 และ 35.82 กก./ ซม² ตามลำดับ และมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังยึดเหนี่ยวในเหล็ก DB 16 และ DB 20 การศึกษาครั้งนี้ พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มสูงสุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ ผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับกำลังอัด เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง 8 ถึง 14 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 16 โมลาร์ ขึ้นไปกลับพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าลดต่ำลง ถึงแม้ว่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยทั่วไปแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ จะมีค่าแปรผันตรงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 200 กก./ ซม² เมื่อกำลังของคอนกรีตสูงขึ้นกว่านี้ กำลังยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงหรือเกือบคงที่ (นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ, 2552) ซึ่งแนวโน้มดังกล่าว สอดคล้องกับผลของการศึกษาในครั้งนี้ ที่กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามกำลังอัดที่สูงขึ้น จนกำลังอัดมีค่าประมาณ 250 กก./ ซม² กำลังยึดเหนี่ยวจึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย การที่กำลังยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงในคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง อาจเป็นผลมาจากปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาออกมาได้มาก และทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ได้ผลึกมีลักษณะแข็งและเปราะ อาจจะทำให้กำลังรับแรงดึงเมื่อเทียบกับกำลังอัดมีค่าลดลงได้ และการที่ผิวของเหล็กข้ออ้อยที่มีลักษณะเป็นครีบและยึดเกาะกับคอนกรีต และเมื่อดึงเหล็กออกจากคอนกรีต อาจทำให้การวิบัติเกิดขึ้นที่เนื้อของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบริเวณใกล้ผิวเหล็ก เป็นลักษณะของการวิบัติเนื่องจากแรงดึงได้ และนอกจากนั้นการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง

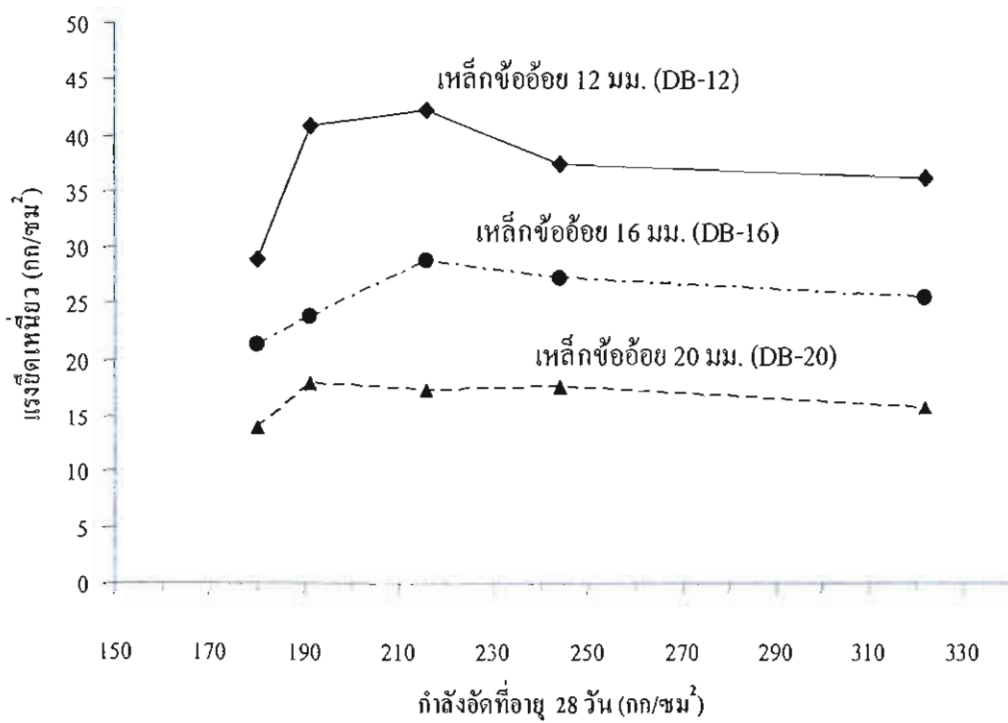
ทำให้มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อสารดังกล่าวสัมผัสกับความชื้น จะทำให้มีลักษณะลื่น ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเกาะกับคอนกรีตมีค่าลดลงได้ด้วย โดยแนวโน้มนดังกล่าวแสดงชัดเจนในภาพที่ 4-12 ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย ภาพที่ 4-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (u_{co}) กับ $\sqrt{f_c} / D$ และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ คือ $u_{co} = 2.66\sqrt{f_c} / D$ เมื่อ f_c คือ กำลังอัดประลัยของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน (อยู่ในช่วง 180 ถึง 320 กก/ ซม²) และ D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย (ซม) ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการที่แสดงค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งานของ วสท. คือ $u_{all} = 2.29\sqrt{f_c} / D$ (วสท.1007-34, 2537) พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ได้จากสมการของ วสท. เพียงร้อยละ 16 เท่านั้น

ตารางที่ 4-10 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

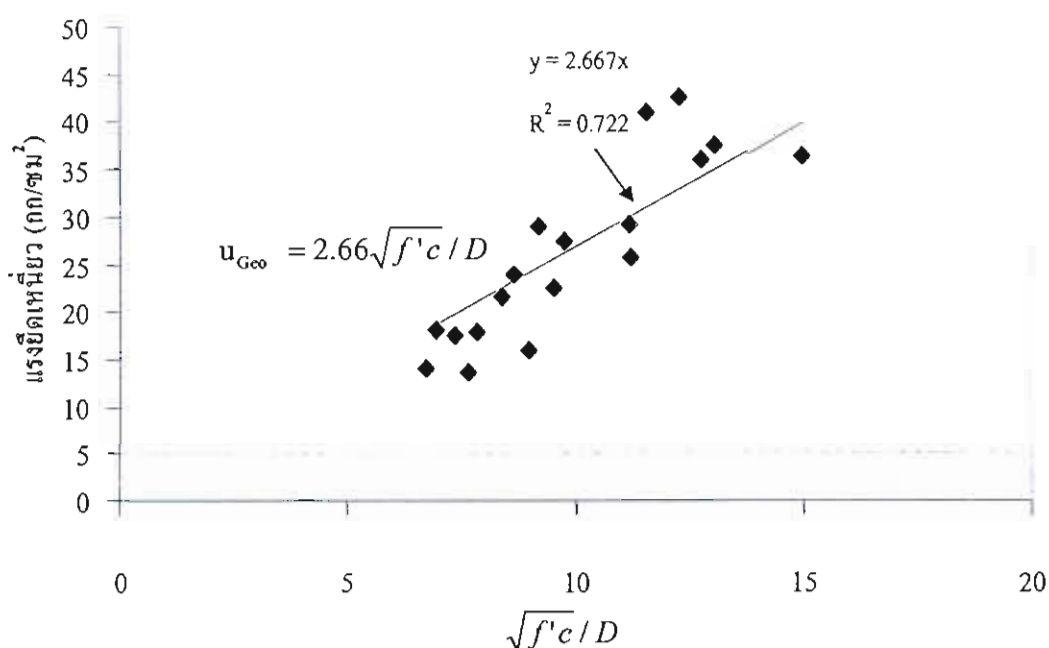
ส่วนผสม	กำลังอัด 28 วัน (กก/ ซม ²)	แรงยึดเหนี่ยว (กก/ ซม ²)		
		DB12	DB16	DB20
8-M	180	28.92	21.34	13.91
10-M	192	40.84	23.78	17.92
12-M	216	42.33	28.81	17.39
14-M	244	37.43	27.19	17.66
16-M	322	36.23	25.51	15.81
18-M	288	35.82	22.41	13.52



ภาพที่ 4-11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของ
จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับกำลังยึดเหนี่ยวของ
จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (u_{Goo}) กับ

$$\sqrt{f'_c}/D$$

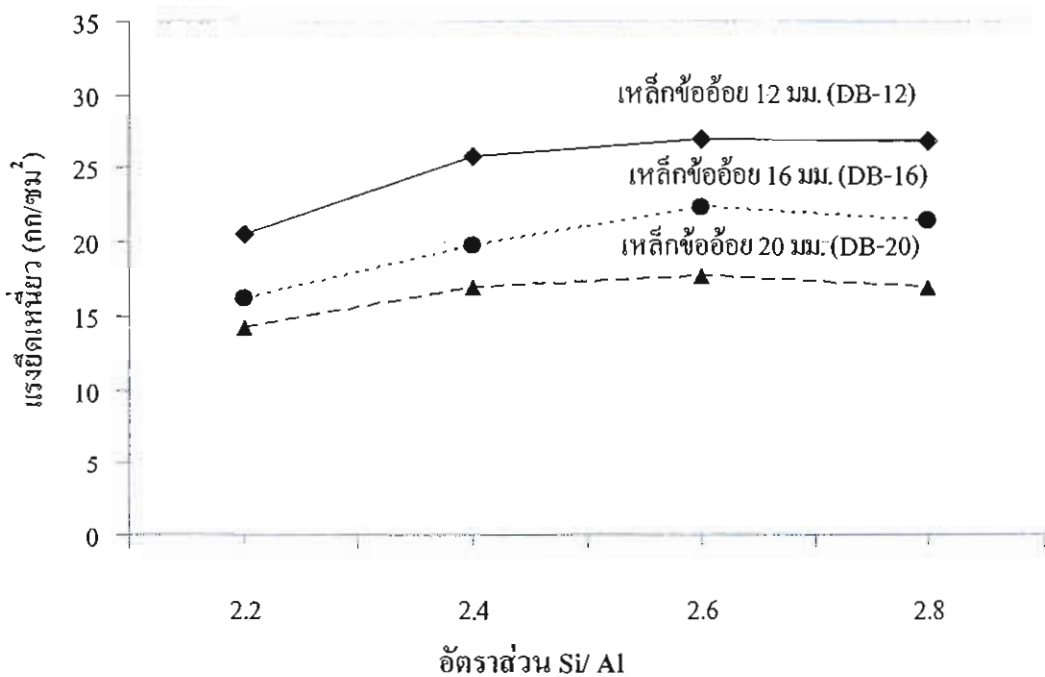
2. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย ดังแสดงในภาพที่ 4-14 พบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เพิ่มขึ้น กำลังยึดเหนี่ยวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัด ดังที่กล่าวมาข้างต้น เช่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก DB 12 ที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 ที่มีกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 20.56, 25.84, 27.05 และ 26.81 กก/ ซม² ตามลำดับ และมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังยึดเหนี่ยวในเหล็ก DB16 และ DB20 กำลังยึดเหนี่ยวในเหล็กข้ออ้อยทุกขนาดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.6 โดยมีกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดในเหล็ก DB12, DB16 และ DB20 เท่ากับ 27.05, 22.32 และ 17.66 กก/ ซม² ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามกำลังดึงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ที่อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.8 กลับพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าลดลงเล็กน้อย ถึงแม้ว่ากำลังดึงจะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม และกำลังอัดดังภาพที่ 4-15 ก็พบว่า กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในเหล็กทั้ง 3 ขนาด

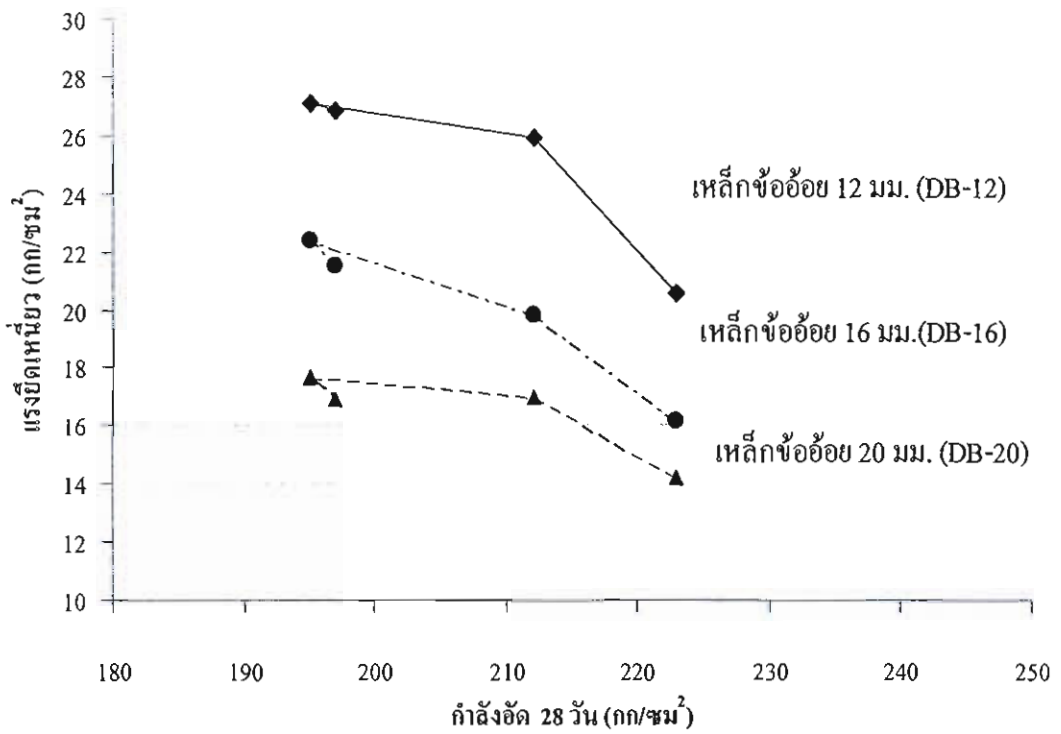
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลิกาที่สูงขึ้นส่งผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริมดีขึ้นซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงคด ดึงที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 4-11 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ ซม ²)	แรงยึดเหนี่ยว (กก/ ซม ²)		
		DB12	DB16	DB20
Si/Al=2.2	223	20.56	16.16	14.17
Si/Al=2.4	212	25.84	19.81	16.96
Si/Al=2.6	195	27.05	22.32	17.66
Si/Al=2.8	197	26.81	21.45	16.91



ภาพที่ 4-14 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับกำลังยึดเหนี่ยวของ
จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การศึกษานี้ได้แสดงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ ส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 4-12 และสามารถวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วน Si/ Al ต่อการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ดังนี้

ตารางที่ 4-12 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

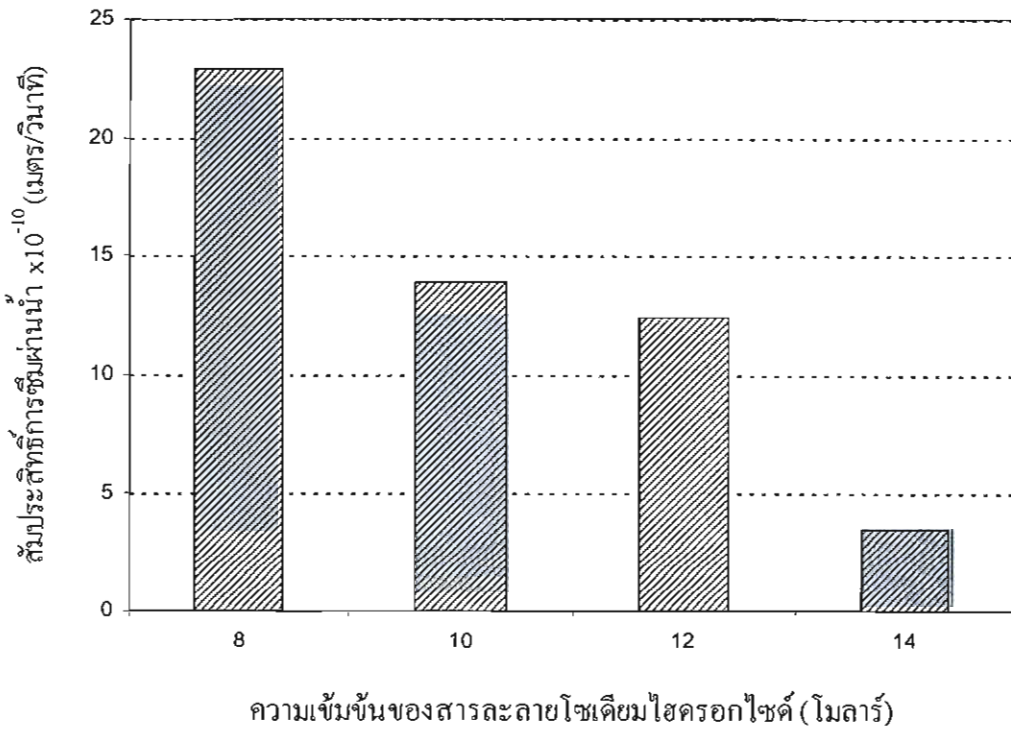
ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (เมตร/วินาที)		กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (กก/ ซม ²)
	อายุการบ่มที่ 28 วัน	อายุการบ่มที่ 60 วัน	
8-M	22.9×10^{-10}	0.93×10^{-10}	180
10-M	13.9×10^{-10}	0.86×10^{-10}	191
12-M	12.4×10^{-10}	0.78×10^{-10}	216
14-M	3.48×10^{-10}	0.56×10^{-10}	244
Si/Al=2.2	28.9×10^{-10}	9.88×10^{-10}	223
Si/Al=2.4	21.7×10^{-10}	9.46×10^{-10}	212
Si/Al=2.6	11.4×10^{-10}	2.45×10^{-10}	195
Si/Al=2.8	9.18×10^{-10}	1.88×10^{-10}	197

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

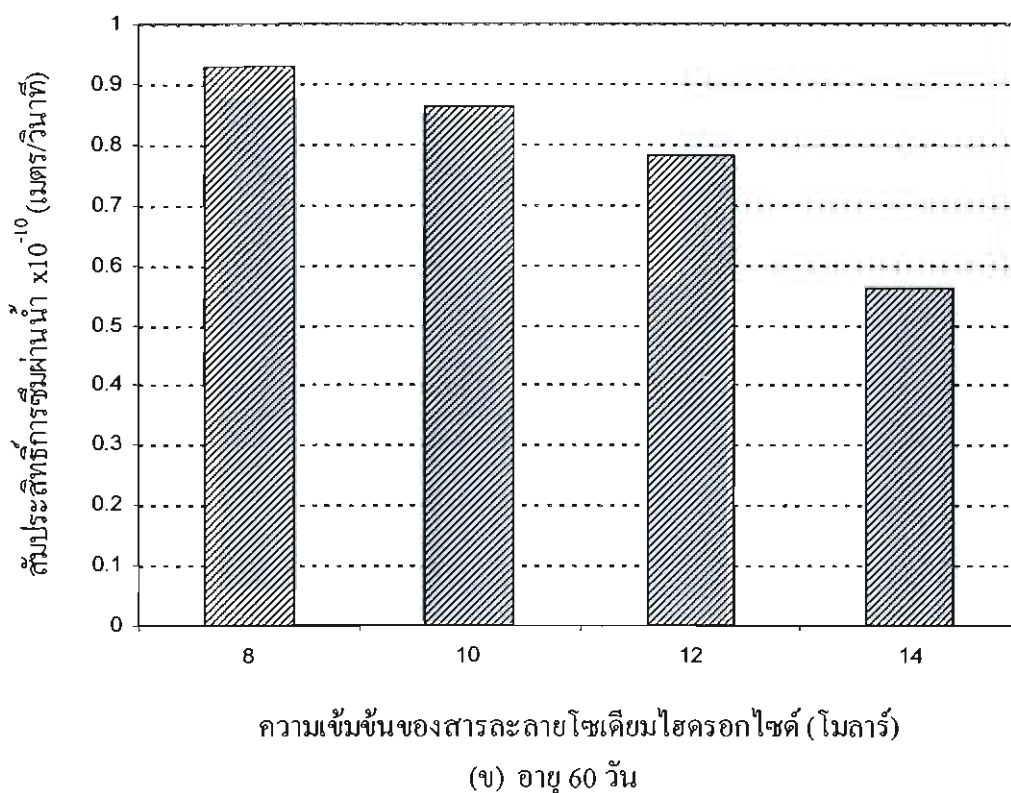
ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังตารางที่ 4-12 โดยภาพที่ 4-16(ก) และ 4-16(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่มีอายุ 28 วัน และ 60 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสอดคล้องกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยมีแนวโน้มเหมือนกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4-16(ข) เช่น ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 22.9×10^{-10} , 13.9×10^{-10} , 12.4×10^{-10} และ 3.48×10^{-10} เมตรต่อวินาที และที่อายุ 60 วัน มีค่าการซึมผ่าน (K) เท่ากับ 0.93×10^{-10} , 0.86×10^{-10} , 0.78×10^{-10} และ 0.56×10^{-10} เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลงตามความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) น่าจะเป็นผลจากกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และส่งผลให้น้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น นอกจากนี้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูงยังสามารถชะเอาซิลิกาจากอะลูมินาออกมาได้ จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากขึ้น และลดความพรุนในคอนกรีตได้ ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเทียบกับคอนกรีตธรรมดา พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติความคงทนอื่นควบคู่กัน ไป เช่น การเกิดสนิมเหล็ก การแทรกซึมของคลอไรด์ การต้านทานเนื่องจากกรดและซัลเฟต เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่จะเพิ่มความมั่นใจในการนำไปใช้งานต่อไป



(ก) อายุ 28 วัน

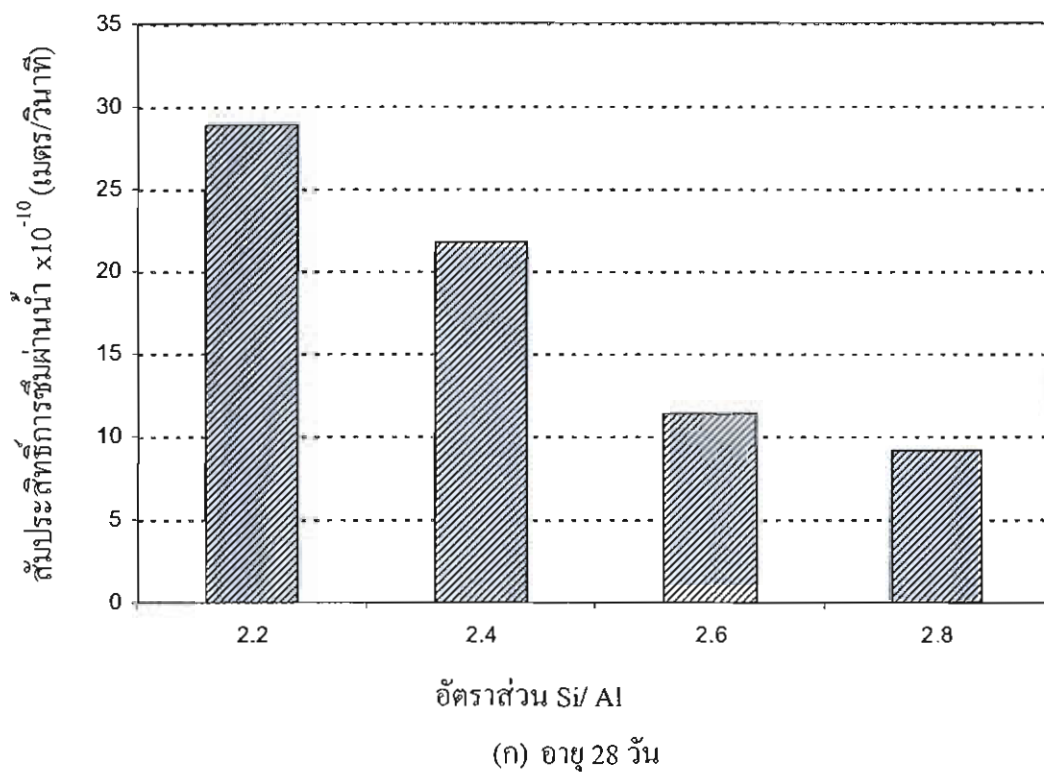


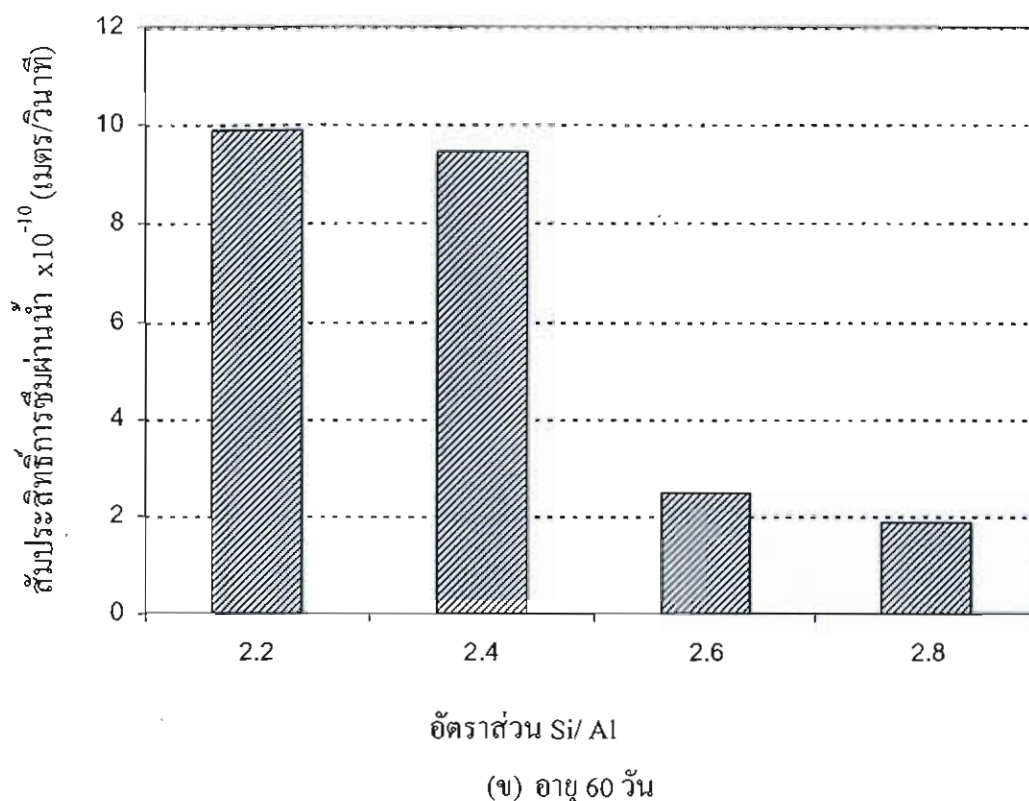
ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ (ก) 28 วัน และ (ข) 60 วัน

2. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4-12 โดยภาพที่ 4-17(ก) และ 4-17(ข) แสดงผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 และ 60 วัน ตามลำดับ พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงตามอัตราส่วน Si/ Al ที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28.9×10^{-10} , 21.7×10^{-10} , 11.4×10^{-10} และ 9.18×10^{-10} เมตรต่อวินาที และที่อายุ 60 วันมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) เท่ากับ 9.88×10^{-10} , 9.46×10^{-10} , 2.45×10^{-10} และ 1.88×10^{-10} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าอายุการบ่มที่มากขึ้น ทำให้การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน อาจเป็นผลมาจากอายุเวลาการบ่มที่นานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์มากขึ้น การที่อัตราส่วน Si/ Al เพิ่มขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีค่าลดลง อาจเป็นผลจากการใช้ซิลิกาฟุ่มในการปรับอัตราส่วน Si/ Al

เพราะซิลิกาฟลูมมีความละเอียดสูงจึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al ที่เพิ่มขึ้น มีความพรุนลดลง



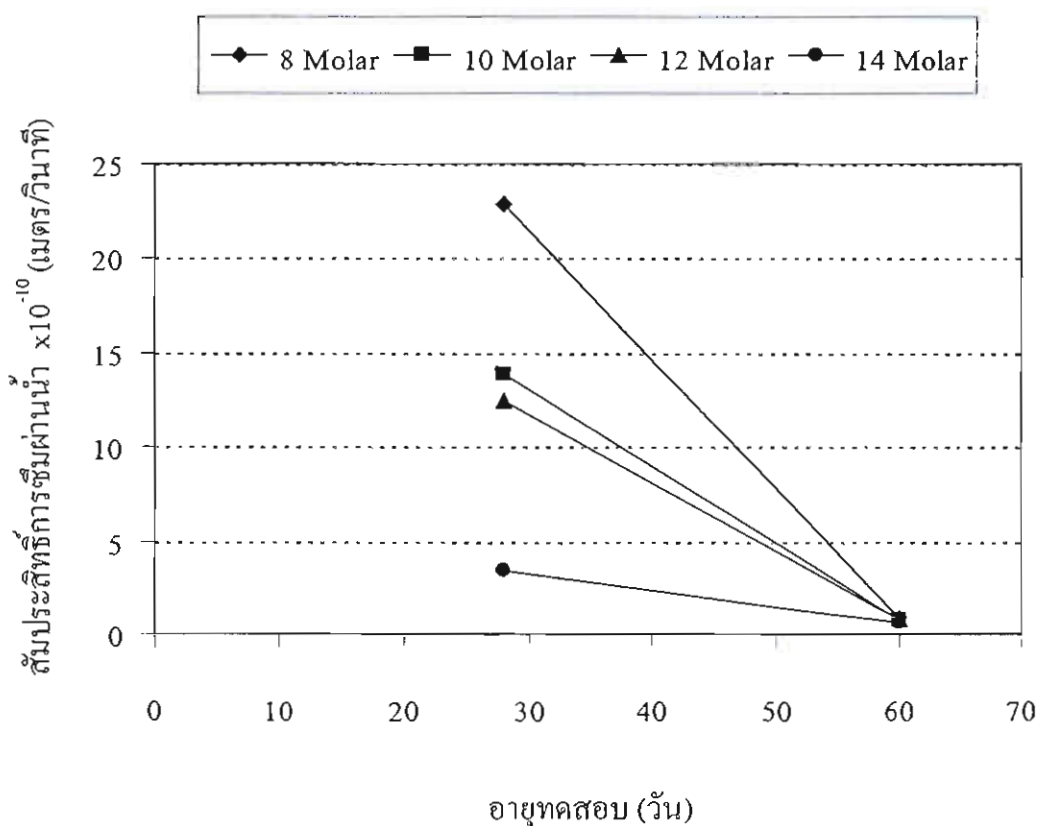


ภาพที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Si/ Al กับค่าการซึมน้ำใน
 จีโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุ (ก) 28 วัน และ (ข) 60 วัน

3. ผลของอายุการบ่มต่อการซึมน้ำในจีโพลีเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 4-18 แสดงผลของอายุการบ่มจีโพลีเมอร์คอนกรีตต่อการซึมน้ำโดยพิจารณาในกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำในจีโพลีเมอร์คอนกรีต ลดลงตามอายุการบ่มที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำ (K) จากการทดสอบที่อายุ 28 วัน ถึง 60 วัน พบว่า สัมประสิทธิ์การซึมน้ำที่อายุ 28 วัน แตกต่างกับอายุ 60 วัน ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นต่ำ โดยทุกกลุ่มมีสัมประสิทธิ์การซึมน้ำที่อายุ 60 วัน ใกล้เคียงกัน การลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำ (K) ในจีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่ำมีมากกว่ากลุ่มที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สูง เช่น จีโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 8 โมลาร์ มีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำ จาก 22.9×10^{-10} เมตรต่อวินาที ที่อายุ 28 วัน ไปเป็น 0.93×10^{-10} เมตรต่อวินาที ที่อายุ

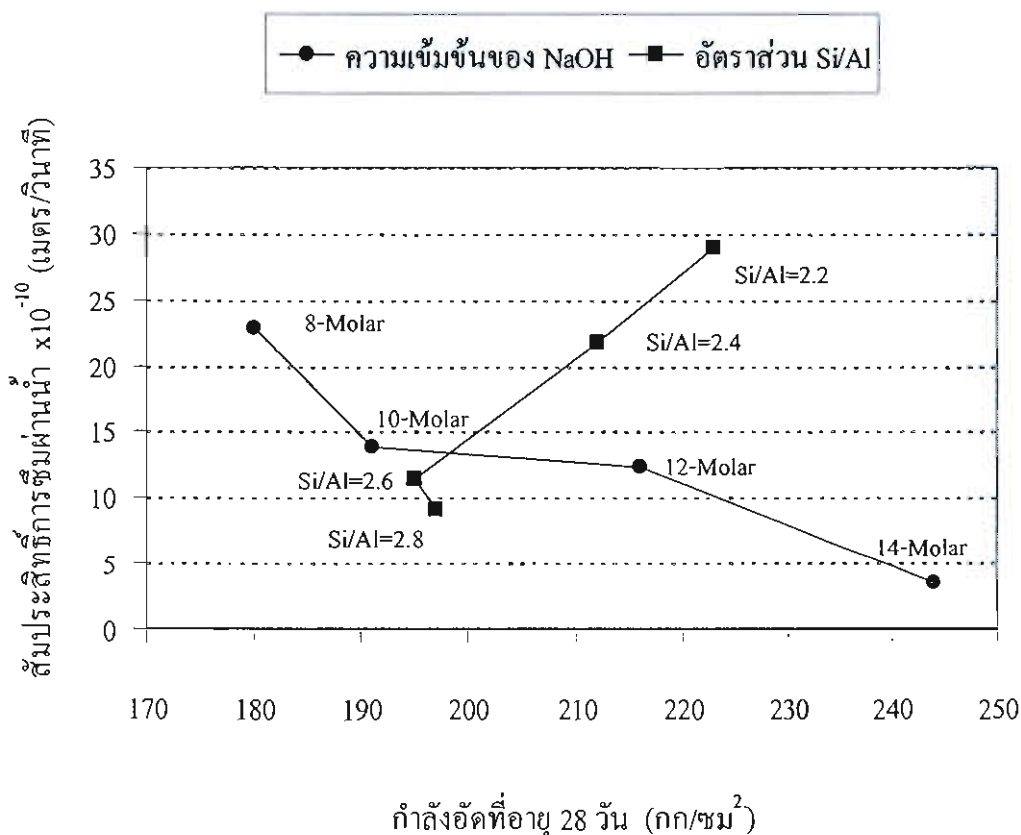
60 วัน ในขณะที่กลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 14 โมลาร์ มีการลดของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) ที่อายุ 28 วัน 3.48×10^{-10} เมตรต่อวินาที ไปเป็น 0.56×10^{-10} เมตรต่อวินาที ที่อายุ 60 วัน การที่อายุการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีผลต่อการซึมผ่านน้ำในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นต่ำมากกว่าสูง อาจเป็นเพราะในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์เซชันที่สูงในช่วงแรก และมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกที่อยู่แล้วจึงทำให้การซึมผ่านน้ำในอายุต้น ๆ ที่ต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) ในช่วงแรกมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดที่ต่ำ แต่เมื่อมีการบ่มคอนกรีตนานขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จึงส่งผลให้การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) มีความชัดเจนเช่นกัน



ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับอายุการบ่มของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

4. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการซึมผ่านของน้ำ

ภาพที่ 4-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทั้งกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH และแปรเปลี่ยน Si/ Al ซึ่งพบว่ากลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป โดยกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังสูงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นและลดการซึมผ่านของน้ำลงได้ ส่วนกลุ่มที่แปรเปลี่ยน Si/ Al กลับพบว่ากำลังอัดที่สูงขึ้น มีแนวโน้มให้การซึมผ่านน้ำที่สูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งขัดแย้ง กับกรณีของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของซิลิกาที่มากขึ้นอาจทำให้เกิดซิลิกาเจลที่สามารถอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ดี แต่โดยคุณสมบัติของซิลิกาเจลมีความแข็งแรงต่ำ อาจมีผลให้ไม่สามารถต้านทานการรับแรงอัดได้ดี



ภาพที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

ผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

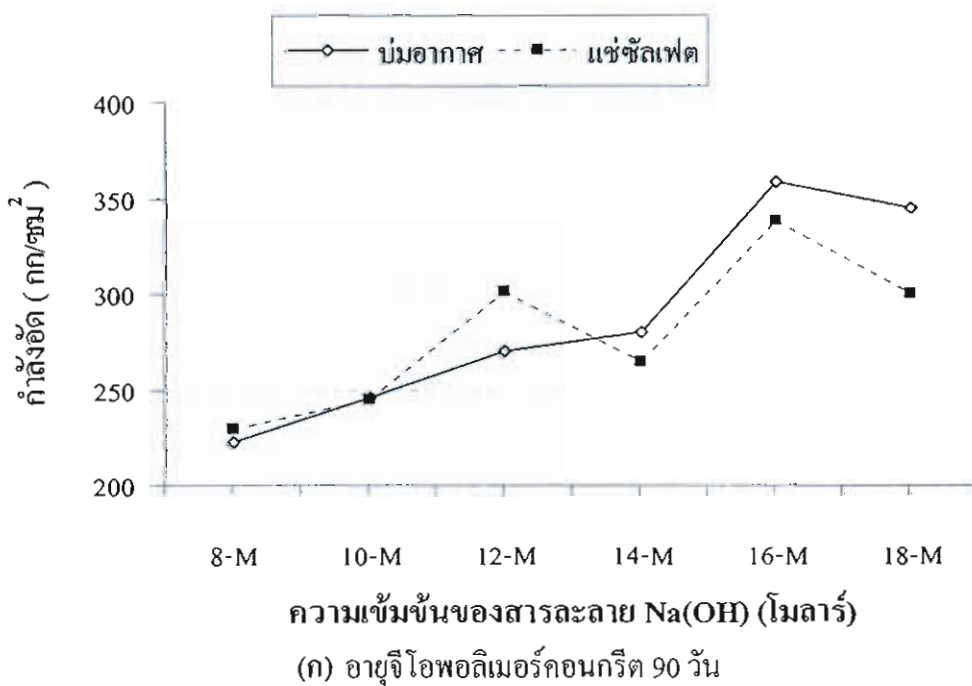
พิจารณาผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เข้มข้นร้อยละ 5 ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 90 และ 180 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีแนวโน้มเกิดการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น โดยพิจารณาจากภาพที่ 4-20(ก) ซึ่งแสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และบ่มในอากาศ 90 วัน พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 14 โมลาร์ ขึ้นไป มีผลให้กำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศ โดยชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ และที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ ถึงแม้จะแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ถึง 90 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 222, 246, 270, 280, 356 และ 345 กก/ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 229, 245, 301, 264, 338 และ 300 กก/ซม² ตามลำดับ การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) นานขึ้นถึง 180 วัน (4-20(ข)) โดยกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำก็เริ่มได้รับผลกระทบจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 14 โมลาร์ เริ่มมีกำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกัน ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 14 โมลาร์ ก็ยังมีผลการทำลายที่ชัดเจนมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 180 วัน เท่ากับ 245, 249, 275, 291, 356 และ 348 กก/ซม² ตามลำดับ

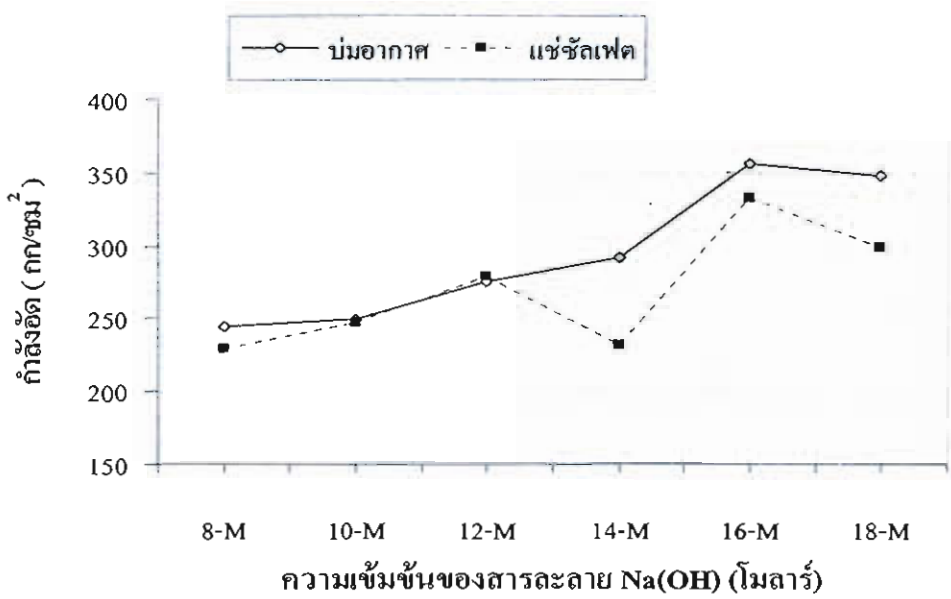
และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้มีกำลังอัดเท่ากับ 230, 247, 232, 332, 298 กก/ ซม² ตามลำดับ

การทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่มีความเข้มข้นต่ำ น่าจะเป็นผลจากปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเส้นผ่านหินได้มาก และส่งผลให้แมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้มากขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความแข็งแรงต่ำ และทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น (วิเชียร ชาติ และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552) จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีกำลังอัดหลังสัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำลงอย่างชัดเจน ผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความชัดเจนมากขึ้น เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ดังภาพที่ 4-21 พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 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 จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ มีการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน เท่ากับ 111 และ 101 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-13 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

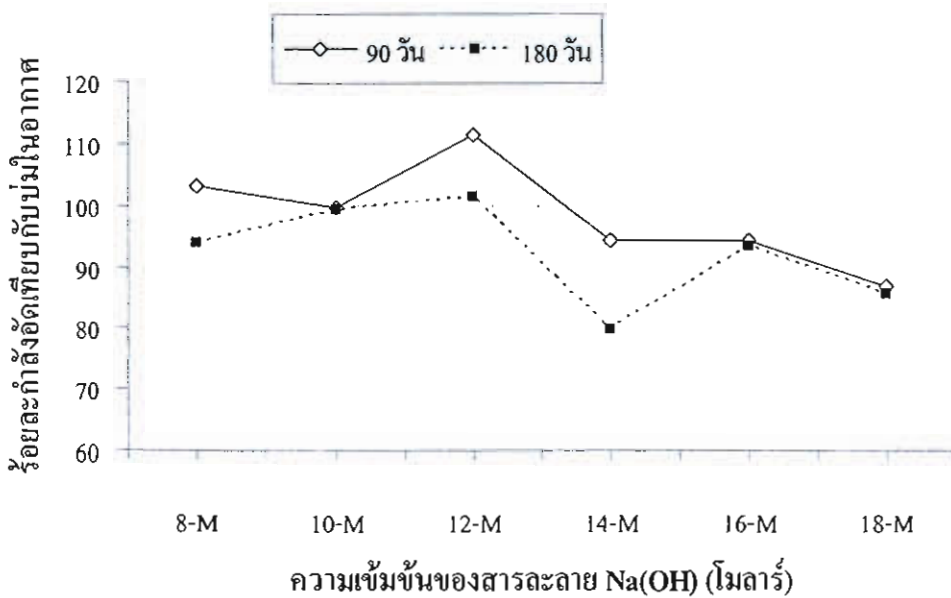
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)				ร้อยละกำลังอัดที่แช่ในซัลเฟต	
	อากาศ		ซัลเฟต		เทียบกับบ่มในอากาศ	
	90 วัน	180 วัน	90 วัน	180 วัน	90 วัน	180 วัน
8-M	222	254	229	230	103	94
10-M	246	249	245	247	100	99
12-M	270	275	301	279	111	101
14-M	280	291	264	232	94	80
16-M	358	356	338	332	94	93
18-M	345	348	300	298	87	86





(ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

ภาพที่ 4-20 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน



ภาพที่ 4-21 ร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

2. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังอัดและการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

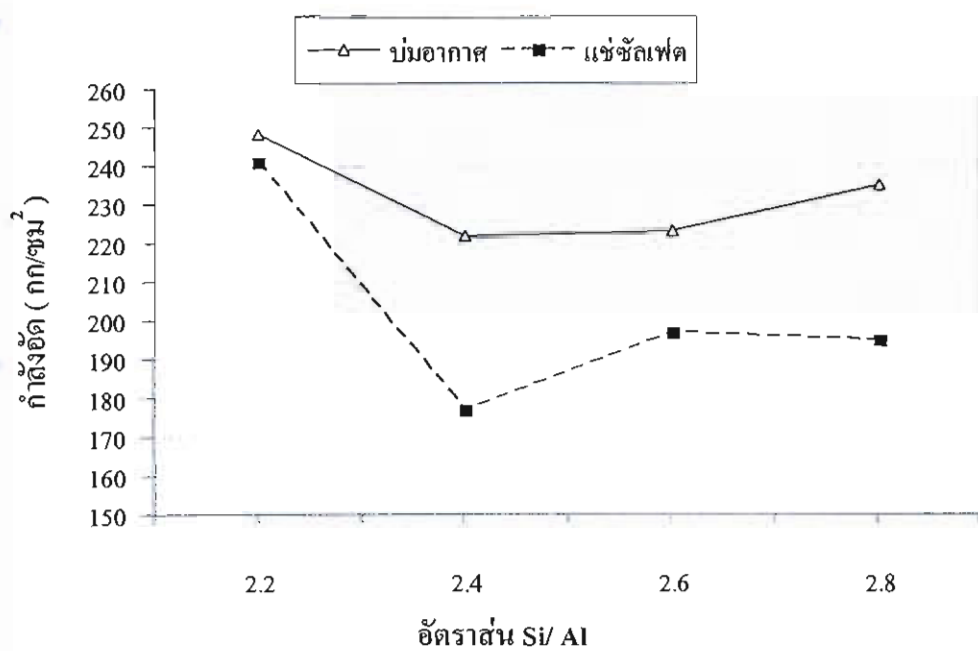
พิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/ Al หลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 90 และ 180 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4-14 พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/ Al มากขึ้น ทำให้การต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ลดน้อยลง โดยพิจารณาจากภาพที่ 4-22(ก) จะเห็นว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เพียง 90 วัน มีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันอย่างชัดเจน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248, 222, 223 และ 235 กก/ ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้กำลังอัดลดลงเป็น 241, 177, 197 และ 195 กก/ ซม² ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al ที่ต่ำ กับอัตราส่วน Si/ Al ที่สูงถึง 2.8 ที่อายุการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน พบว่า กลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2 มีกำลังอัดที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ 248 กก/ ซม² และหลังจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากัน ทำให้กำลังอัดลดลงเป็น 241 กก/ ซม² โดยคิดเป็นร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศเท่ากับ 97 แสดงให้เห็นว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Si/ Al สูงขึ้นเป็น 2.8 พบว่า สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลังอัด โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 83 ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2 ก่อนข้างชัดเจน การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ อัตราส่วน Si/ Al สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al ต่ำ อาจเป็นผลมาจากปริมาณซิลิกาที่มีมากขึ้น ได้เข้าทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้เป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($Mg_3Si_2O_8 \cdot 8H_2O$) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ (วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552) ทำให้เกิดความพรุนและช่องว่างในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดต่ำลงนอกจากนั้น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลงอาจเป็นผลจากแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือเอททริงไกท์อีกด้วย โดยกลไกการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเหมือนกลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH ดังที่กล่าวมาข้างต้น

การทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้นถึง 180 วัน (ภาพที่ 4-22(ข)) โดยกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศค่อนข้างชัดเจน และไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดระหว่างกลุ่มที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ที่ต่างกัน ได้ชัดเจน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 87, 68, 81 และ 77 ตามลำดับ

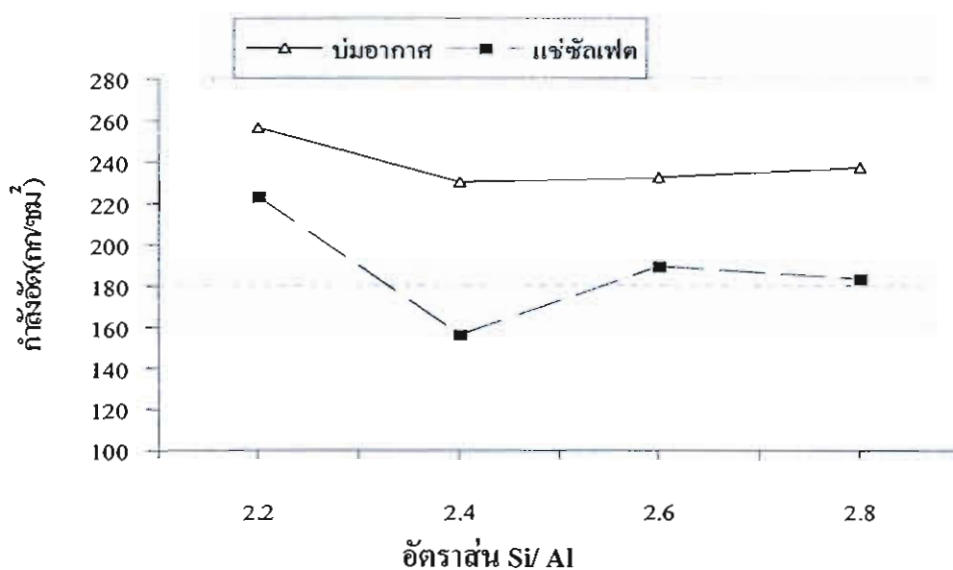
การศึกษานี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/Al ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 ไม่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อต้านทานการทำลายจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากมีผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตค่อนข้างชัดเจน ภายใต้เวลาที่สัมผัสกับสารละลายดังกล่าวเพียง 180 วัน เท่านั้น นอกจากนั้นการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก็ไม่ส่งผลชัดเจนต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสังเกตได้จากภาพที่ 4-23 ที่พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกกลุ่มมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตค่อนข้างมากและใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละกำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุเดียวกันต่ำกว่า 100 ค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตามแนวทางในการเลือกอัตราส่วน Si/Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ควรพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วน Si/Al ที่มีค่าต่ำ เพื่อลดการเกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ซึ่งอาจส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความพรุนและการสูญเสียกำลังอัดมีมากขึ้น

ตารางที่ 4-14 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ระหว่างกลุ่มที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในสารละลายซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ ซม ²)				ร้อยละกำลังอัดที่แช่ในซัลเฟตเทียบกับบ่มในอากาศ	
	อากาศ		ซัลเฟต		90 วัน	180 วัน
	90 วัน	180 วัน	90 วัน	180 วัน		
2.2	248	256	241	223	97	87
2.4	222	230	177	156	80	68
2.6	223	232	197	189	88	81
2.8	235	237	195	183	83	77

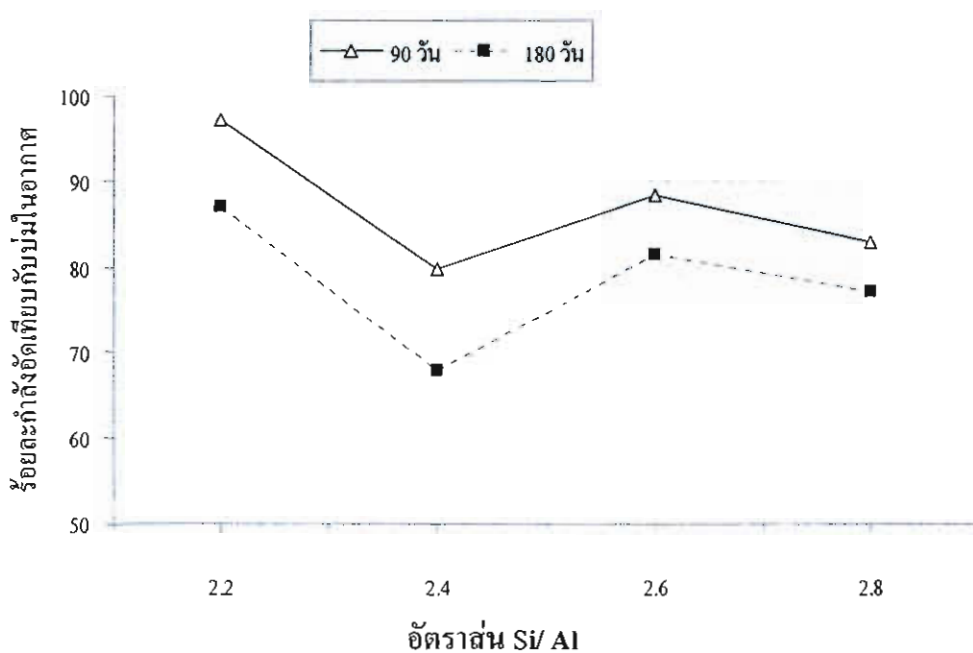


(ก) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 90 วัน



(ข) อายุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 180 วัน

ภาพที่ 4-22 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา (ก) 90 วัน (ข) 180 วัน



ภาพที่ 4-23 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 90 และ 180 วัน

การกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการสูญเสีย น้ำหนักจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริก

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยพิจารณาในรูปของการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ร่วมกับสภาพความเสียหายของ ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ภายหลังจากแช่ในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4-15 และ ภาพที่ 4-24(ก) ซึ่งผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หลังจากแช่ ตัวอย่างในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน (บ่มใน อากาศ 28 วันก่อนนำไปแช่กรดซัลฟิวริก) พบว่า การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความ เข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ออกมาได้มาก เมื่อทำปฏิกิริยากับ สารละลายเบสทำให้ได้โซเดียมซิลิเกตซึ่งสามารถถูกชะได้ด้วยกรดซัลฟิวริก ได้เป็นสารประกอบ ของกรดซิลิซิก (Silicic acid, H_4SiO_4) ออกมาในสารละลายทำให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552) เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความ เข้มข้นของสารละลาย 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 ตามลำดับ

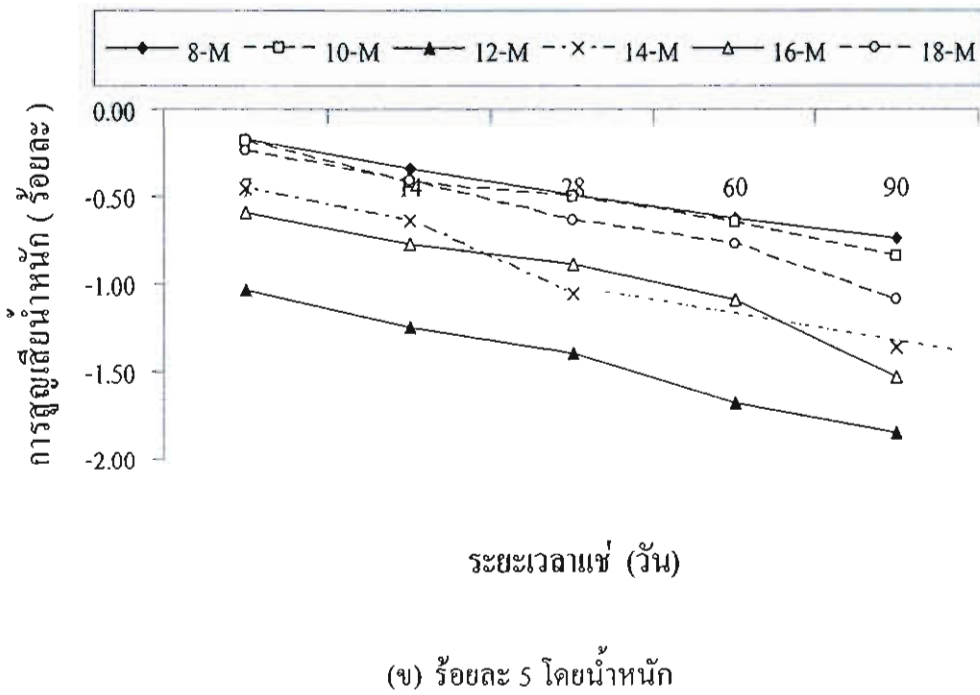
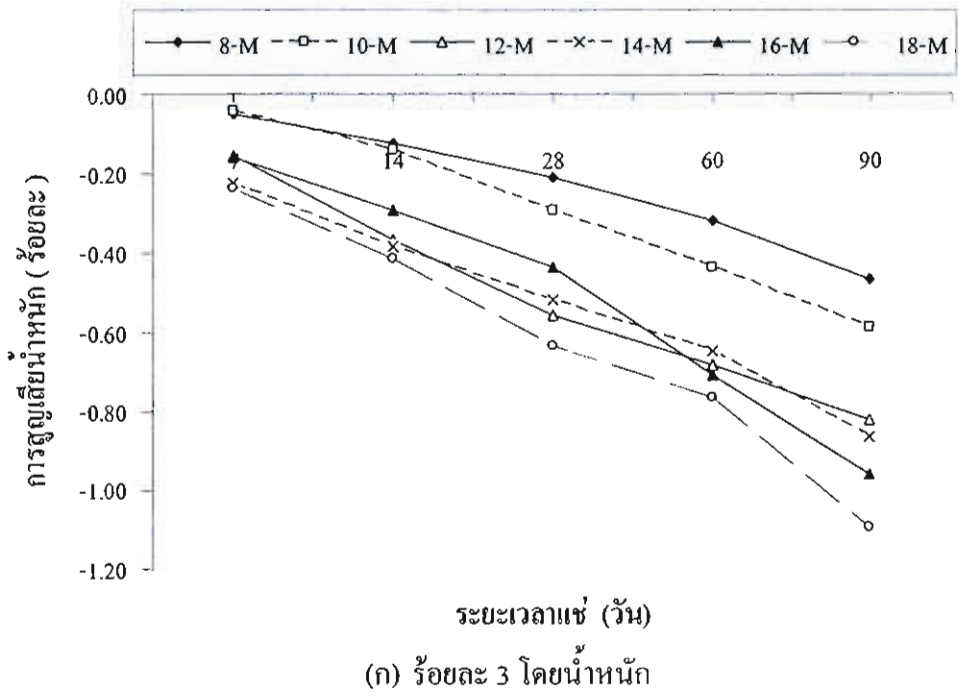
โดยทั่วไปการกัดกร่อนเนื่องจากกรดในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดจากการ ทำปฏิกิริยา ระหว่างกรดกับสารประกอบประเภทแคลเซียมที่มีอยู่ในคอนกรีต เช่น CSH, CAH และ $Ca(OH)_2$ เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) โดยกรดจะเปลี่ยน สารประกอบเหล่านี้ให้เป็นเกลือ และคุณสมบัติของเกลือสามารถละลายน้ำได้ จึงส่งผลให้เกิด ความพรุน และสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนได้ โดยคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (มีปริมาณ ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสูง) จะมีการกัดกร่อนมากกว่ากลุ่มคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ (มีปริมาณ ปูนซีเมนต์ต่ำ) ทั้งนี้เนื่องจาก คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีสารประกอบประเภทแคลเซียมมาก และ ถูกชะออกมาก่อนข้างมาก แนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต กล่าวคือ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูง) มีผลทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากกรดเกิดขึ้น ได้ชัดเจนมากกว่ากลุ่ม ที่มีกำลังอัดต่ำ แนวโน้มการกัดกร่อนเนื่องจากกรดที่มีความเข้มข้นมากเป็นร้อยละ 5

ดั่งภาพที่ 4-24(ข) ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันในกลุ่มที่แช่ในกรดเข้มข้นร้อยละ 3 โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นมากขึ้นการกัดกร่อนเนื่องจากกรดจะมากขึ้น และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดมากกว่ากลุ่มที่แช่ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 และสามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนมากขึ้น ดั่งภาพที่ 4-25 ที่แสดงลักษณะการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 16 และ 18 โมลาร์ พบว่า บริเวณผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีการกัดกร่อนและส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักดังที่กล่าวมาข้างต้น

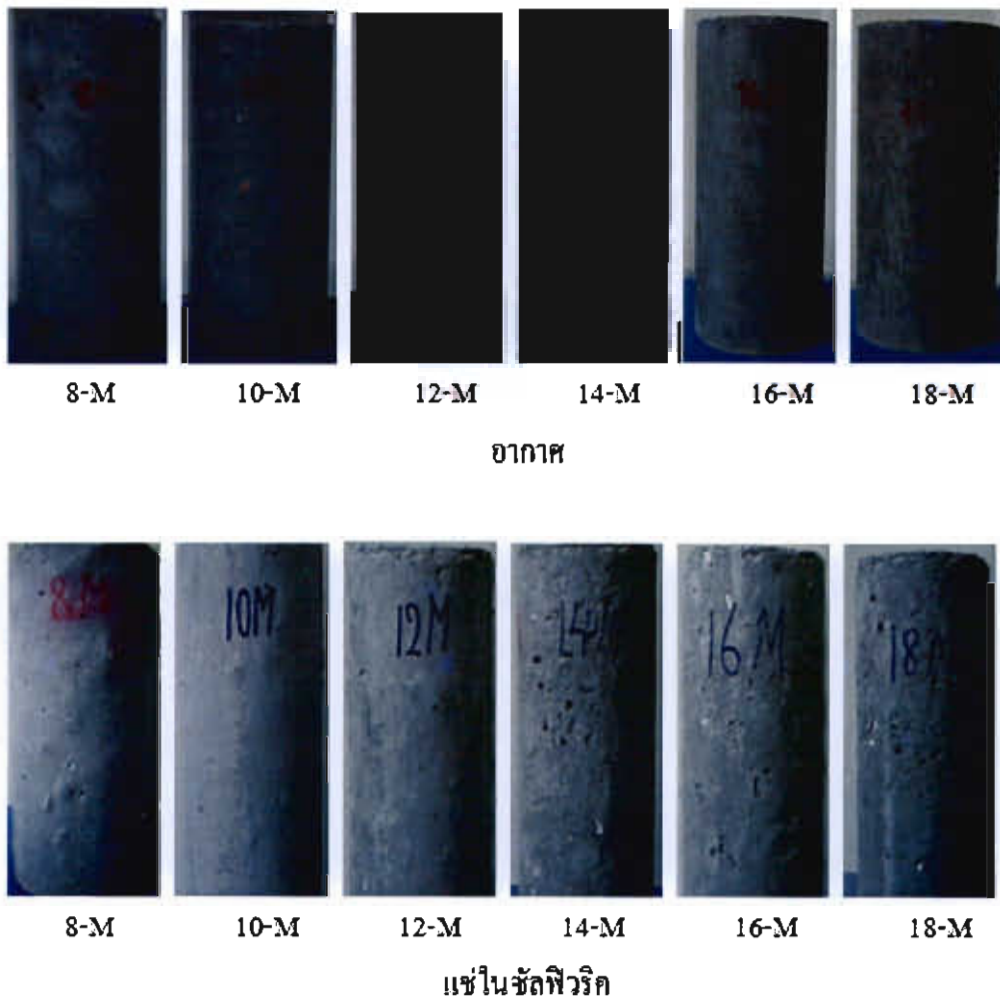
ตารางที่ 4-15 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

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	-0.34	-0.49	-0.63	-0.74
10-M	-0.04	-0.14	-0.29	-0.44	-0.59	-0.19	-0.43	-0.51	-0.65	-0.84
12-M	-0.16	-0.37	-0.56	-0.68	-0.82	-1.03	-1.25	-1.40	-1.68	-1.86
14-M	-0.22	-0.38	-0.52	-0.65	-0.87	-0.45	-0.64	-1.06	N/A	-1.36
16-M	-0.16	-0.29	-0.44	-0.71	-0.96	-0.59	-0.78	-0.88	-1.10	-1.54
18-M	-0.24	-0.41	-0.64	-0.77	-1.09	-0.24	-0.41	-0.64	-0.77	-1.09

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่ามากกว่าที่
บ่มในอากาศ
เครื่องหมาย - หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่าน้อยกว่าที่
บ่มในอากาศ



ภาพที่ 4-24 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ (ก) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (ข) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4-25 ตัวอย่างอีพอกซีเรซินคอนกรีตที่บ่มในอากาศเทียบกับที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วัน ของอีพอกซีเรซินคอนกรีตที่แปรเปลี่ยน NaOH

2. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริก

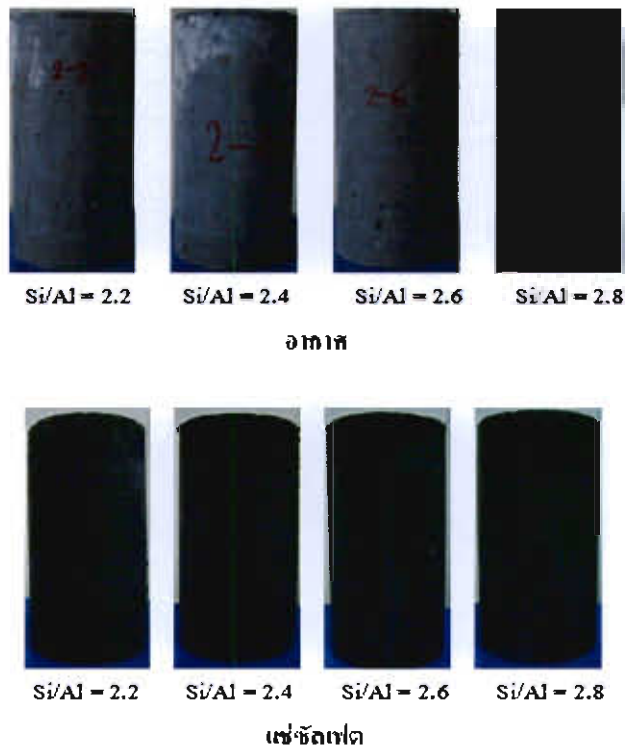
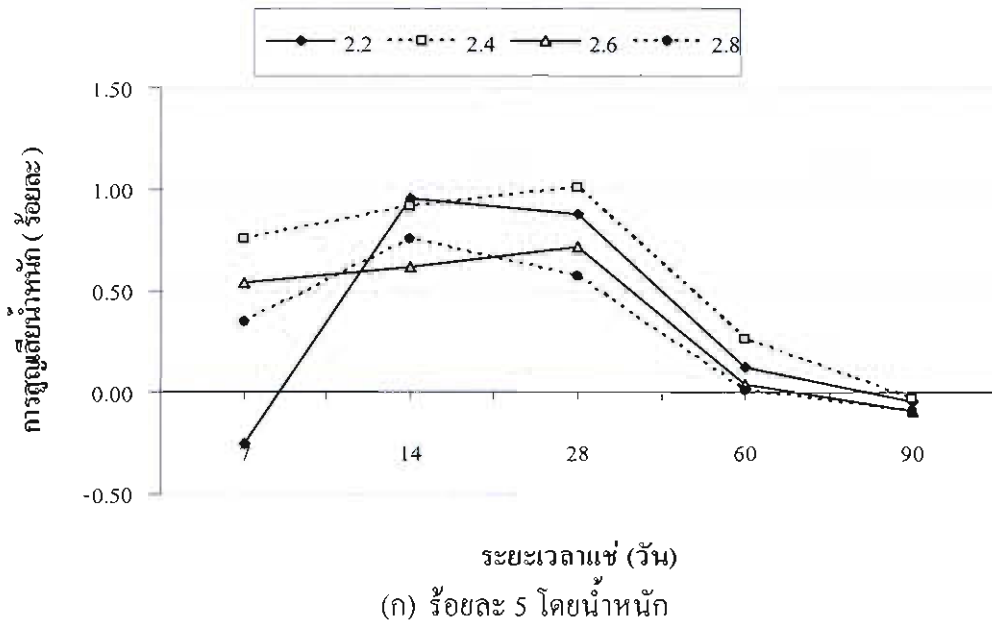
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ต่อการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 7, 10, 28, 60 และ 90 วัน ดังตารางที่ 4-16 และภาพที่ 4-26 พบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักแปรปรวนและไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน เช่น อีพอกซีเรซินคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 90 วัน เท่ากับ -0.04, -0.03, -0.09, และ -0.09 ตามลำดับ กลไกการทำลายจากกรดซัลฟิวริกเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถถูกชะด้วยกรดซัลฟิวริกได้ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่เนื่องด้วย

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ได้เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al คงที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายเบสอาจจะมีค่าเข้มข้นไม่สูงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่มีมากขึ้นตามอัตราส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่เกิดโซเดียมซิลิเกตที่สามารถถูกชะด้วยกรดซัลฟิวริกได้ ซึ่งผลการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ก็มีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน และมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของการทำลายที่ชัดเจนได้

ตารางที่ 4-16 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ส่วนผสม Si/ Al	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 %				
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
2.2	-0.26	0.95	0.88	0.12	-0.04
2.4	0.76	0.92	1.01	0.26	-0.03
2.6	0.54	0.61	0.71	0.04	-0.09
2.8	0.35	0.75	0.57	0.01	-0.09

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่ามากกว่าที่บ่มในอากาศ
 เครื่องหมาย - หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่าน้อยกว่าที่บ่มในอากาศ



(ข) ตัวอย่างอีโพลีเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 4-26 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของอีโพลีเมอร์คอนกรีตที่แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ (ก) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ข) ตัวอย่างอีโพลีเมอร์คอนกรีต

ความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล

1. คุณสมบัติของน้ำทะเล

คุณสมบัติของน้ำทะเลที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ แสดงดังตารางที่ 4-17 พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 8.1 ถึง 8.2 ซึ่งเป็นด่างอ่อน ๆ และผลการทดสอบพบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 19,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200 ถึง 2,600 มก./ล. พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ (Cl⁻) มากกว่าซัลเฟต (SO₄²⁻) ประมาณ 8 เท่า โดยคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 10

สภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณชายหาดริมทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ระดับน้ำทะเลขึ้นและลง วันละ 2 รอบ คือตอนเช้า น้ำทะเลมีระดับสูงสุดจากนั้นเวลาบ่าย น้ำทะเลจะลดลงต่ำสุดจนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้ง และช่วงเย็น น้ำทะเลจะขึ้นสูงสุดอีกครั้ง และลดระดับในเวลากลางคืน ระยะเวลาขึ้นลงของน้ำทะเลจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

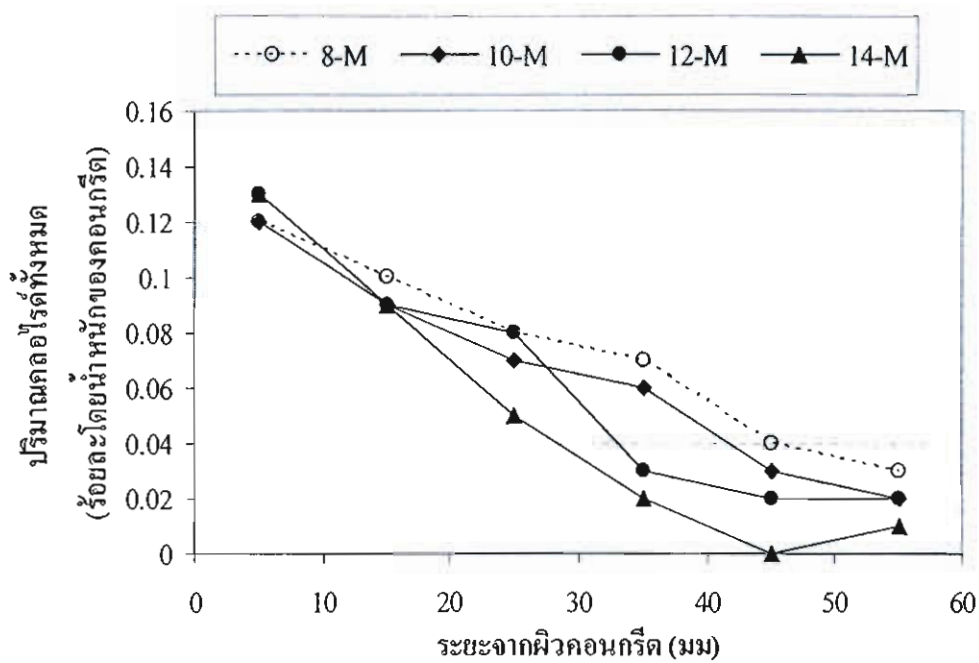
ตารางที่ 4-17 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

เวลาทดสอบ	รายการทดสอบ		
	ความเป็นกรด/ด่าง pH	คลอไรด์, Cl ⁻ (มก/ล)	ซัลเฟต, SO ₄ ²⁻ (มก/ล)
2004 เมษายน	8.2	16,000	2,500
2005 กุมภาพันธ์	8.2	18,000	2,200
2008 พฤษภาคม	8.1	17,500	2,300
2009 กันยายน	8.2	18,120	2,250
2010 เมษายน	8.1	18,910	2,610

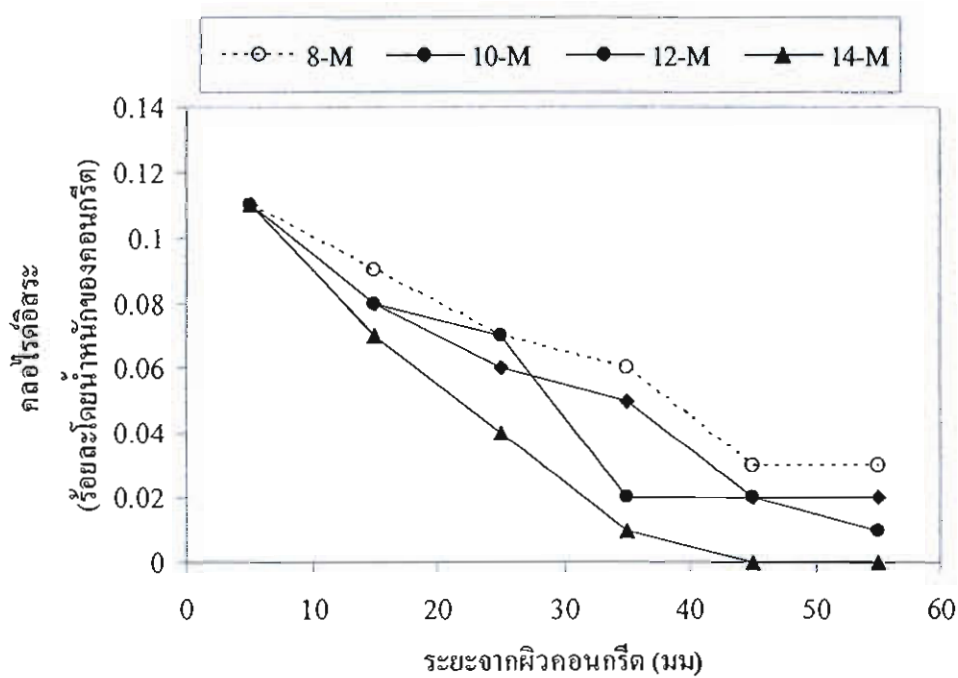
2. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 4-27 แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับใกล้ผิวคอนกรีตมีความแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มที่ชัดเจนได้ เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกมากขึ้น

พบว่า ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านานหินลดลงตาม ส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มากขึ้น และมีแนวโน้ม เหมือนกันทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ภาพที่ 4-27(ก)) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ภาพที่ 4-27(ข)) เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านานหินจากเถ้านานหินที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 0.07, 0.06, 0.03 และ 0.02 โดยน้ำหนักของคอนกรีตตามลำดับ การที่จีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเถ้านานหินสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เป็นผลมาจากการใช้ค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอา ซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านานหินได้มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านานหินมีความทึบน้ำ มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) พบว่า ความ เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น มีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเถ้านานหินเป็นไปในทิศทางที่ดี นอกจากนั้นอาจมีผลจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็น ผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถ้านานหิน และค่าที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านาน หิน เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมา ทำให้ลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสาร ที่มีกำลังค่าและละลายน้ำลงได้ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นสามารถ ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) การทำปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะลดสารที่ไม่เป็นประโยชน์ลง อาจได้สารแคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ได้แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 ถึง 14 โมลาร์ และเก็บข้อมูลที่แช่ในน้ำทะเลถึง 180 วันเท่านั้น ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงขึ้นให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดีทั้งคุณสมบัติเชิงกล และ ด้านความคงทน



ก) การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด



ข) การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ

ภาพที่ 4-27 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถั่วดำนหิมหลังจากแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

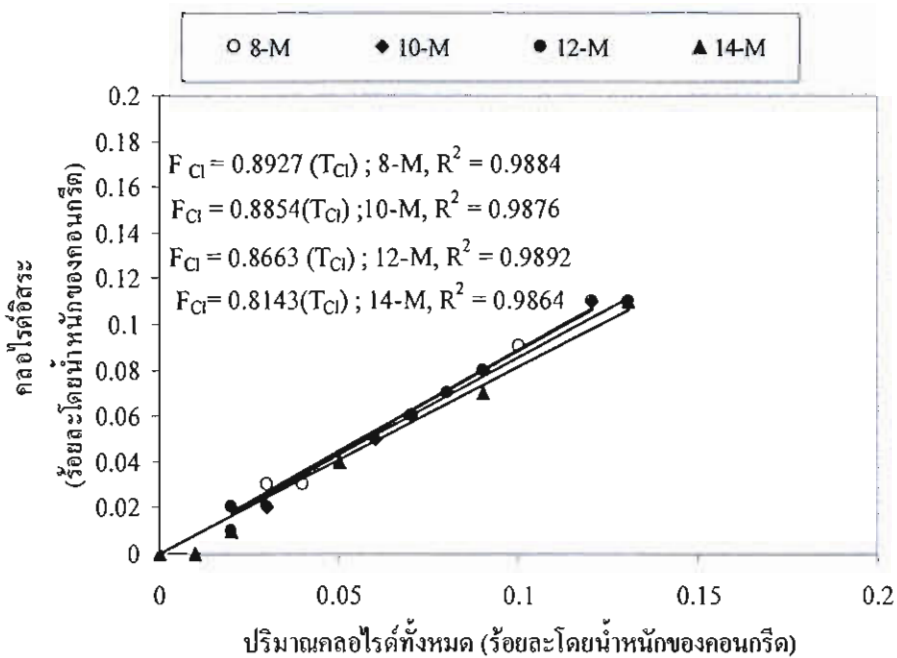
3. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการกักเก็บคลอไรด์ใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคลอไรด์อิสระ
ที่มาทำลายคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่สัมผัสกับคลอไรด์ ถ้าคลอไรด์ทั้งหมดที่
แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตถูกดักจับไว้มาก จะส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่มาทำลายเหล็ก
เสริมน้อยลง และยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ ดังนั้นแนวทางการพิจารณาวัสดุ
ประสานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากจะพิจารณาใน
ด้านของความหนาแน่นและกำลังอัดที่สูงเพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลแล้ว ยังต้อง
พิจารณาถึงการดักจับคลอไรด์อิสระของวัสดุประสานนั้นด้วย เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านการกัก
เก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน โดยหาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ
คลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4-28 โดยวิเคราะห์ในรูปของ ร้อยละ
ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีตดังสมการที่ 4.1

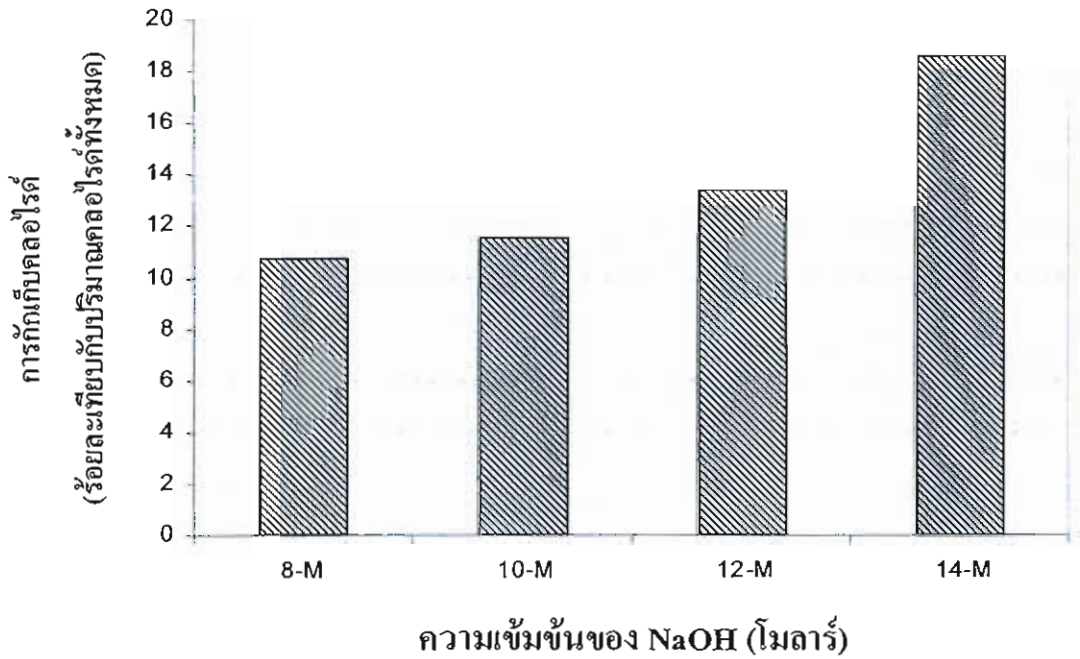
$$P_b = \frac{(T_{cl} - F_{cl})}{T_{cl}} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ P_b คือร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด
 T_{cl} คือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และ F_{cl} คือปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยภาพที่ 4-29 แสดงผลของ
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต
พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ P_b มีค่ามากขึ้น
โดยทั่วไปแล้ววัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่
อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลง และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย
โดยทั่วไปการดักจับคลอไรด์อิสระในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาคมี
กับ C_3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ (3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O) บางครั้งเรียกว่า เกลือ
ของฟรีเดล (Friedel's Salt) อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อิสระส่วนหนึ่งที่เป็นไปได้คือการดักจับ
ทางกายภาพโดยคลอไรด์อิสระสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง
เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ เป็นต้น (คณะอนุกรรมการคอนกรีต
และวัสดุ, 2543) ซึ่งในการศึกษานี้ก็กลไกการให้กำลังและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของ

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ดังนั้นการดักจับคลอไรด์ไอออนจึงน่าจะเป็นการดักจับทางกายภาพ โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งกำลังคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมาก และการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเสนอค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_c) เพื่อจะได้ข้อมูลประกอบในการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อใช้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงต่อไป



ภาพที่ 4-28 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 180 วัน



ภาพที่ 4-29 การกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 180 วัน

4. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

หลังจากเจาะตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์แล้วจึงนำคอนกรีตทรงลูกบาศก์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดจนคอนกรีตวิบัติ หลังจากนั้น จึงเก็บแท่งเหล็กที่ฝังไว้ตามระยะหุ้มต่าง ๆ (20, 50 และ 75 มม) มาหาพื้นที่ผิวของการเกิดสนิม โดยใช้วิธีการวัดพื้นที่ผิวของการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และคิดเป็นร้อยละของพื้นที่สนิมเหล็กเทียบกับพื้นที่ผิวของเหล็กทั้งหมด โดยแสดงผลดังตารางที่ 4-18 พร้อมกับใช้ภาพถ่ายของแท่งเหล็กประกอบในการวิเคราะห์ผลการกัดกร่อนเหล็กเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล

ตารางที่ 4-18 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อร้อยละของพื้นที่ผิวแห้งเหล็กที่เกิดสนิมใน
 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

ส่วนผสม	ร้อยละของพื้นที่สนิม		
	20 มม.	50 มม.	75 มม.
8-M	72.4	61.4	49.4
10-M	78.1	54.5	44.4
12-M	55.6	31.4	19.8
14-M	41.2	30.2	0.7

ตารางที่ 4-18 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยภาพที่ 4.30(ก), (ข), (ค) และ (ง) แสดงลักษณะของการเกิดสนิมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจน ในระดับความลึกเท่ากับ 75 มม. โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มีปริมาณการเกิดสนิมเหล็กเท่ากับร้อยละ 49.4, 44.4, 19.8 และ 0.7 ตามลำดับซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับกำลังอัด และการแทรกซึมของคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al คงที่ เมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มากขึ้น สามารถต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ได้ดีขึ้นซึ่งน่าจะเกิดจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นตลอดจนการซึมผ่านน้ำ และการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนั้นการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นมีมากขึ้นทำให้ปล่อยคลอไรด์อิสระมากระตุ้นเหล็กเสริมได้น้อยลง จึงทำให้สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นต่ำลงด้วย



(ก) NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์

(ข) NaOH เข้มข้น 12 โมลาร์



(ค) NaOH เข้มข้น 10 โมลาร์

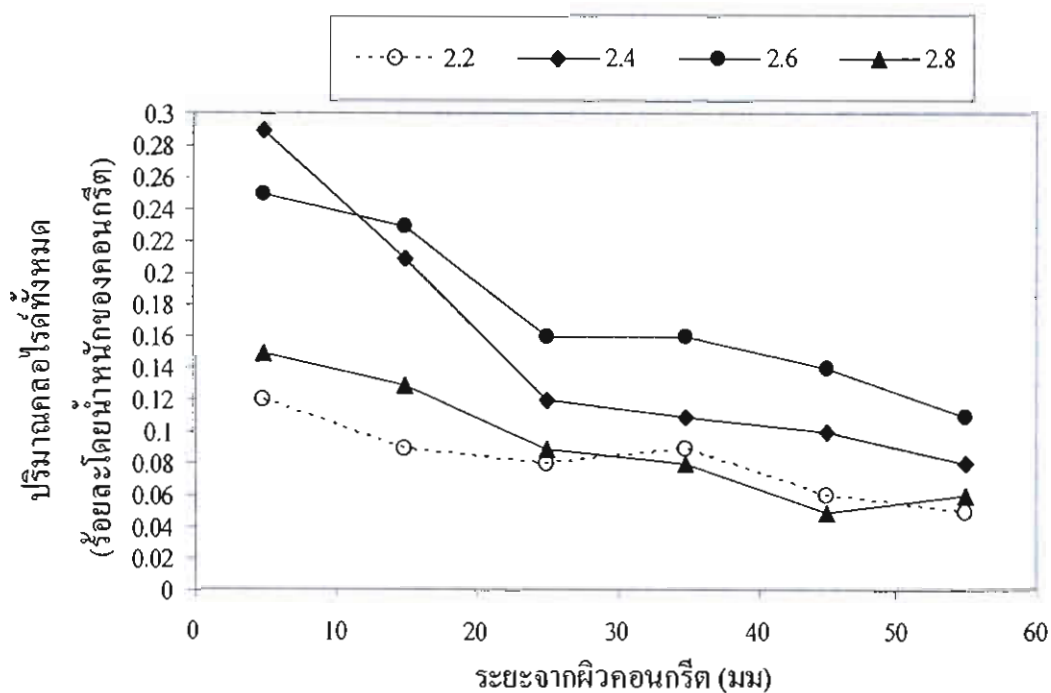
(ง) NaOH เข้มข้น 8 โมลาร์

ภาพที่ 4-30 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

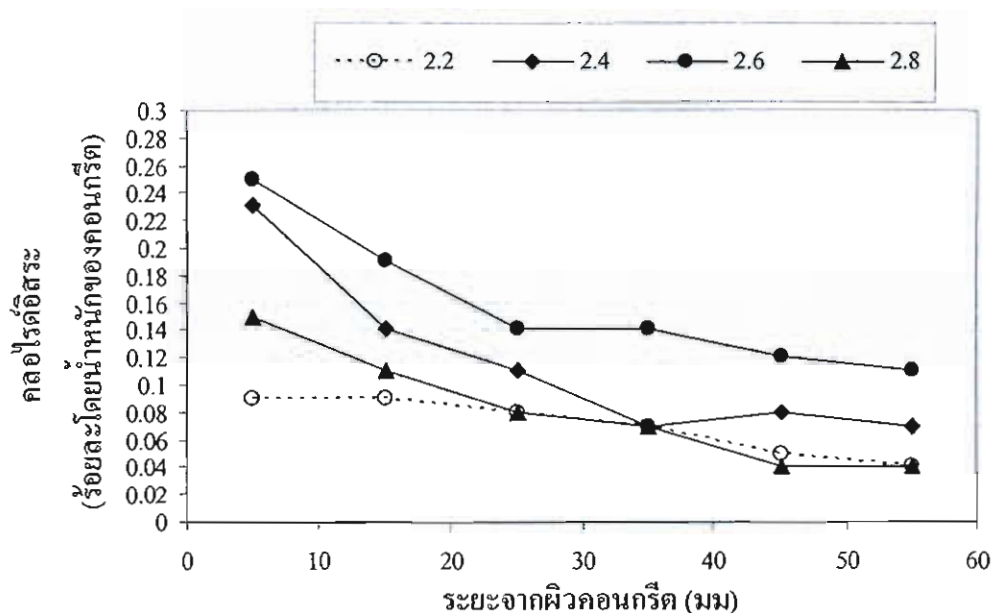
5. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 4-31 แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินในกลุ่มที่แปรเปลี่ยน Si/ Al เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์มีความแปรปรวน และไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มที่ชัดเจนได้ทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ภาพที่ 4-31(ก)) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ภาพที่ 4-31(ข)) เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจาก

เถาถ่านหินที่ใช้ที่อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 0.9, 0.11, 0.16 และ 0.08 โดยน้ำหนักของคอนกรีตตามลำดับ การที่อัตราส่วน Si/ Al มีผลค่อนข้างน้อยต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต อาจเกิดจากการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/ Al มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตค่อนข้างน้อยตลอดจนการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มนี้มีค่อนข้างสูงมากถึงแม้อัตราส่วน Si/ Al ที่มากขึ้นจะทำให้การซึมผ่านน้ำลดลงก็ตาม แต่ทุกกลุ่มที่แปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/ Al พบว่ามีการซึมผ่านน้ำที่สูงกว่ากลุ่มที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน ดังที่กล่าวมาข้างต้น การที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความพรุนสูงจึงส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้เร็วขึ้น และปริมาณเกลือคลอไรด์มากขึ้นในทุกอัตราส่วน Si/ Al ที่แปรเปลี่ยน จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของ Si/ Al ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้อย่างชัดเจน



(ก) การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด

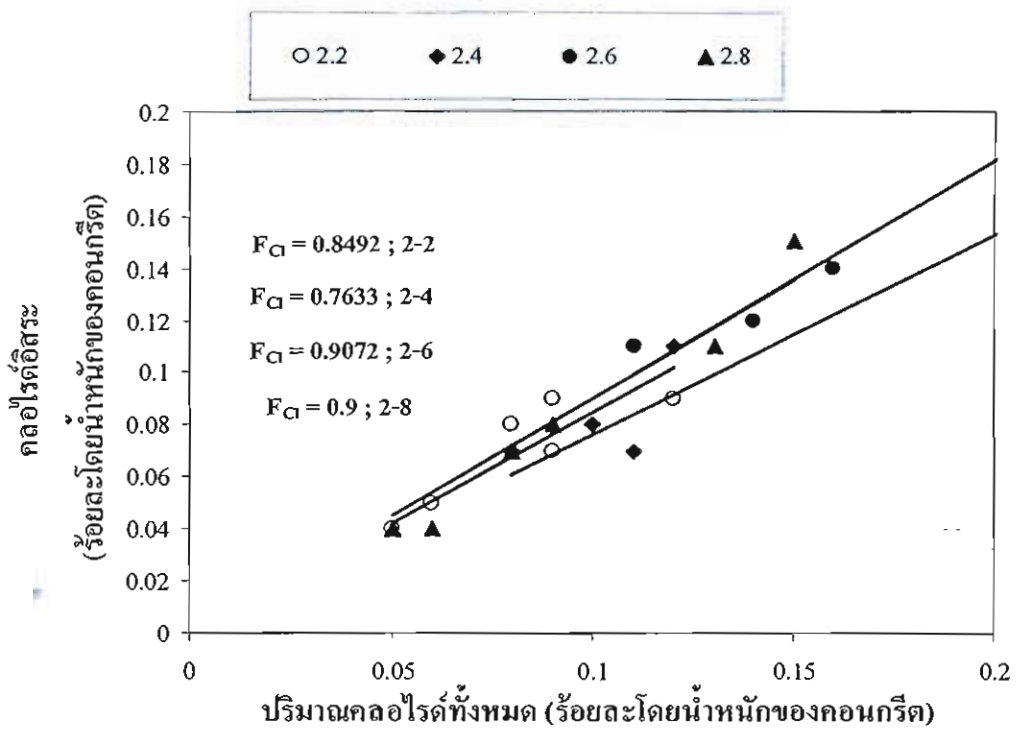


(ค) การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ

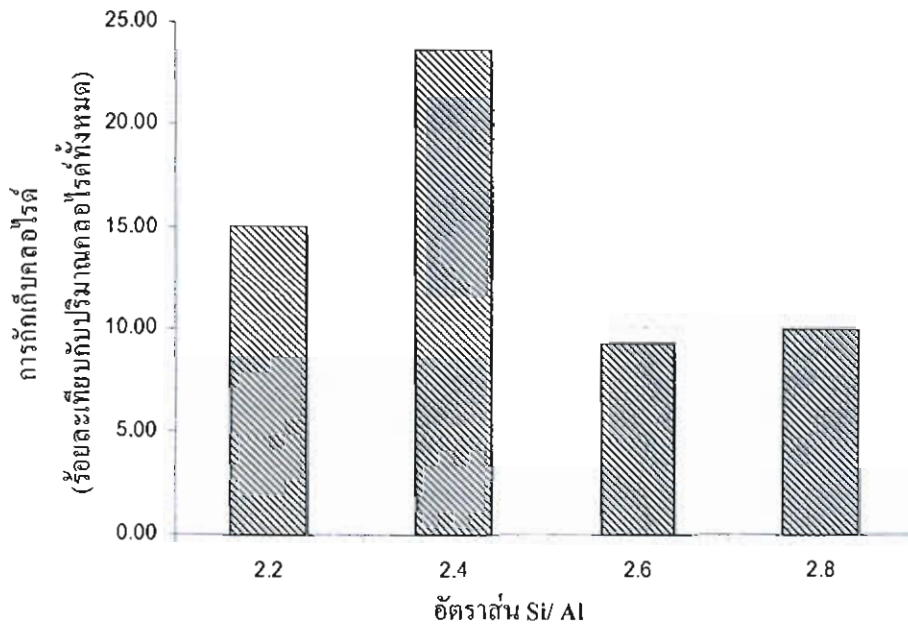
ภาพที่ 4-31 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่อัตราส่วน Si/ Al แปรเปลี่ยน 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 แซ่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

6. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด ดังภาพที่ 4-32 และภาพที่ 4-33 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน พบว่า การกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่แปรเปลี่ยน Si/ Al มีค่า P_0 ที่แปรปรวน และไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่ชัดเจนได้ อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al มีผลค่อนข้างน้อยต่อกำลังอัด ส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตาม แนวโน้มโดยภาพรวมแล้วพบว่าเมื่อใช้ Si/ Al ในคอนกรีตที่ลดลงส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ทั้งนี้จะเป็นผลจากการกักเก็บคลอไรด์ทางเคมี (chemical binding) โดย Si/ Al ที่ลดลง ทำให้ปริมาณสัดส่วนของ Al มากขึ้นซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารประกอบประเภทอลูมิเนียมเกิดกักเก็บคลอไรด์มากขึ้น โดยสารดังกล่าวนี้จะทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ได้เป็นเกลือของฟรีเดิล (Friedel's Salt) และทำให้มีคลอไรด์ส่วนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาหายไปได้ ดังนั้นการที่ Si/ Al สูงขึ้นจึงมีผลให้ปริมาณของสารประกอบอลูมิเนียมมากขึ้นการกักเก็บคลอไรด์จึงเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 4-32 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรต์อิสระกับปริมาณคลอไรต์ทั้งหมดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเล 180 วัน



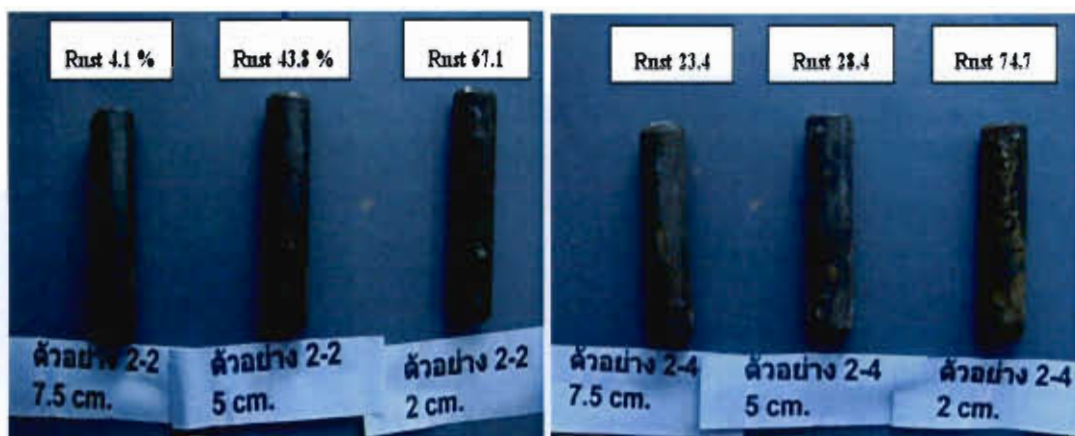
ภาพที่ 4-33 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการกักเก็บคลอไรต์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 180 วัน

7. ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 4-19 แสดงผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยภาพที่ 4.34(ก), (ข), (ค) และ (ง) แสดงการเกิดสนิมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 ตามลำดับ จากผลการศึกษพบว่า การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ส่งผลให้การเกิดสนิมมีค่าแปรปรวน และไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่ชัดเจนได้ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเด้าผ่านหินจากเด้าผ่านหินที่ใช้ที่อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 พบปริมาณสนิมเหล็กที่ระดับความลึก 7.5 มม. เท่ากับร้อยละ 4.1, 23.4, 9.2 และ 7.1 ตามลำดับ การที่การเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความแปรปรวนและมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราส่วน Si/ Al อาจเกิดจากการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al มีผลค่อนข้างน้อยต่อการแทรกซึมคลอไรด์ซึ่งที่กล่าวมาข้างต้น และความพรุนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้สูงมากทำให้ความชื้น และออกซิเจนแทรกซึมเข้ามาในเนื้อคอนกรีตได้มากและส่งผลให้เกิดสนิมอย่างชัดเจนไม่สามารถวิเคราะห์ผลของ Si/ Al ต่อปริมาณเหล็กเสริมได้

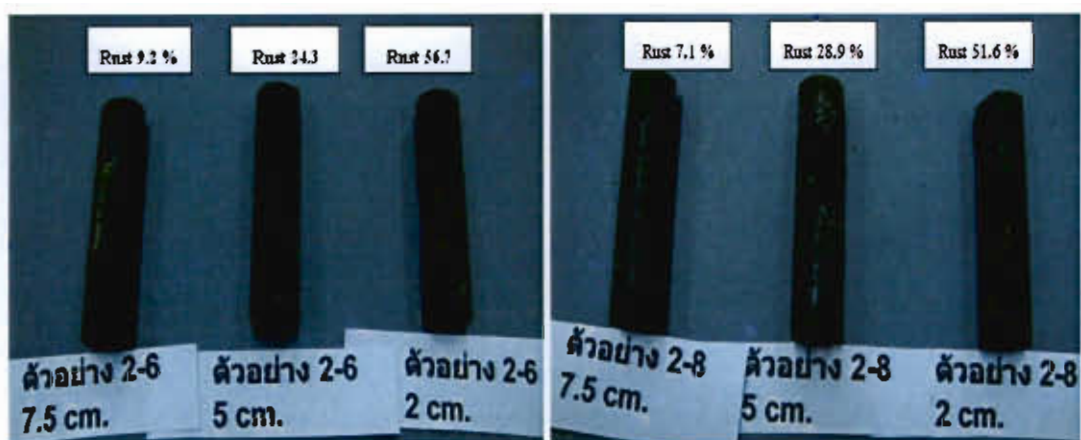
ตารางที่ 4-19 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อร้อยละของพื้นที่ผิวแห่งเหล็กที่เกิดสนิมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ร้อยละของพื้นที่สนิม		
	20 มม.	50 มม.	75 มม.
Si/Al=2.2	67.1	43.8	4.1
Si/Al=2.4	74.7	28.4	23.4
Si/Al=2.6	56.7	24.3	9.2
Si/Al=2.8	51.6	28.9	7.1



(ก) อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.2

(ข) อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.4



(ค) อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.6

(ง) อัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.8

ภาพที่ 4-34 ผลของอัตราส่วน Si/ Al ต่อการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

1. จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน สามารถสรุปได้ดังนี้

1.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นถึง 16 โมลาร์ และกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 18 โมลาร์ โดยกลุ่มที่ใช้ NaOH เข้มข้นเท่ากับ 16 โมลาร์ ให้กำลังอัดสูงสุด

1.2 อัตราส่วน Si/ Al ที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกำลังอัดมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนระหว่าง Si/ Al เท่ากับ 2.2

1.3 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลา โดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันแรก สูงกว่าอัตราการเพิ่มในช่วง 28 ถึง 180 วัน อย่างชัดเจน

1.4 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดึงและแรงตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 โมลาร์

1.5 เมื่อใช้อัตราส่วน Si/ Al ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงและแรงตัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการใช้ Si/ Al เท่ากับ 2.8 ให้กำลังดึงสูงสุด เท่ากับ 15.1 กก/ ซม² และกำลังตัดสูงสุด เท่ากับ 35.29 กก/ ซม²

1.6 แรงยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH แต่กลับมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ และมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

1.7 เมื่อใช้อัตราส่วน Si/ Al ที่มากขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าลดลงเล็กน้อยที่ Si/ Al เท่ากับ 2.8

2. จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนระหว่าง Si/ Al ที่มีต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ สามารถสรุปได้ ดังนี้

2.1 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น

2.2 การเพิ่มอัตราส่วน Si/ Al ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง โดยการใส่ Si/ Al เท่ากับ 2.8 ส่งผลให้การซึมผ่านน้ำที่อายุการบ่มที่ 60 วัน ต่ำสุด เท่ากับ 1.88×10^{-10} เมตร/ วินาที

2.3 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีขึ้น

2.4 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/ Al ต่ำ สามารถต้านทานการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้ดีกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน Si/ Al สูง

2.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ลดต่ำลงส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกได้ดีขึ้น

2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สูงขึ้น

2.7 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สูงขึ้น

2.8 การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทนของคอนกรีต. บริษัท จุฑทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร. หน้า 24-73.
- ธวัชชัย สาสกุล, ปิยะพงษ์ สุวรรณณณิโชติ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวิเชียร ชาลี. ผลกระทบของน้ำทะเลต้อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไคซ์เบด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2551.
- นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัวทัศนานนท์. (2552). แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ. ครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 1685-1691.
- ประมวล โสมละคร. (2550). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ผสมแร่ดินเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีตไทย : หน้า 197-199.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่ 3. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชาริรัตน์, วราภรณ์ คุณาวานากิจ และอนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ. (2548). การศึกษาเบื้องต้น การผลิตจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ระยอง : หน้า 13-18
- พร้อมพงษ์ ผุงเพิ่มตระกูล และคณะ. (2551). กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอโพลีเมอร์เพสต์เป็นตัวประสาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. พัทยาชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551.
- พิชญา ธีระมิตร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2544). การขายตัวของเถ้าถ่านหินมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 13-18 พฤษภาคม 2544.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- ภูมิภัทร สามหมอ, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, กัษราภรณ์ สุวรรณวิทยา และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์จากถั่วลอซ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15. 12 - 14 พฤษภาคม 2553.
- มาตรฐาน ว.ส.ท.1007-34. (2537). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- รัฐพล สมนา, จิรพงษ์ เอกพานิช, วันชัย สะตะ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ผลกระทบจากความละเอียดของเม็ดหินต่อความคงทนของมอร์ตาร์จากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกและซัลเฟต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 (NCCE9), 19-21 พฤษภาคม, โรงแรมริเจนท์ ชะอำ, จ.เพชรบุรี, หน้า MAT-137 ถึง MAT 142.
- เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2543). การพัฒนาเม็ดหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วสท.ปีที่ 11 ฉบับที่ 4, หน้า 10 – 21
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2552). การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลิสง. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 14 (1) : 47-55
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิน. (2552). จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถั่วลิสง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา. 13-15 พฤษภาคม 2552: 1831-1836.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี. (2548). การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลิสง. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10. 2-4 พฤษภาคม 2548. โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ วิเชียร ชาลี. (2549). การศึกษาการชะถั่วลิสงหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลิสง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร (4) หน้า 437-446
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลิสง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 31 (2):371-381.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552). ถั่วลิสงในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ไอชน แอนด์ เอ็นจิเนียริง
- ASTM C 33-03. (2000). Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02, 10-17.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- ASTM C 39. (2000). Standard Testing Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02, 18-22.
- ASTM C 127-04. (2000). Standard Asbortion for Concrete Aggregates, Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02,
- ASTM C234-91a. (2000). Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel. Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02
- ASTM C293-94. (2000). Standard testing Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02, 161-163.
- ASTM C311. (2000). Standard Test Methods for Sampingling and Fly Ash or Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02, 184-192.
- ASTM C496. (2000). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02, 268-271
- ASTM C78-08. (2000). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Books of ASTM Standards 2000 V. 04.02.
- ASTM C618. (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mincral Admixture in Concrete. Annual Books of ASTM Standards 2000 Volume 04.02, 305-308.
- ASTM C1152 M-04E01. (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards 2008 ; 04.02.
- ASTM C1218 M-99R08. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards 2008;04.02.
- Sathonsaowaphak, A., Chindapasirt P., Pimraksa K., (2009). "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar" Journal of Hazardous Materials 168, pp. 44-50.
- Bakharev, T., (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfete solutions. Cement and concreter Research. 35:1233-1246.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Chindapasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, *Cement & Concrete Composites* 29, pp.224-229.
- Chindapasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C. & Rattanasak, U., (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, *Waste Management* 29, No. 2, pp 539-543.
- Rattanasak, U., Chindapasirt, P., (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering* 22 pp. 1073-1078.
- Skalny, J., Marchand, J. & Older, I. (2002). Sulfate attack on concrete, 1st Edition. Spon Press. New York.
- Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., (2010). Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based Geopolymer. *Construction and Building Materials* 24, pp.236-240.
- Temuujin, J., van Riessen, A., 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* 24, pp. 1906-1910.
- Temuujin, J., Williams R.P., van Riessen A., (2010). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes, *Journal of Materials Processing Technology* 209, pp. 5276-5280.
- Temuujin, J., van Riessen, A., Williams, R., (2010). Preparation and characterization of fly ash based geopolymer mortars, *Journal of Hazardous Materials* 167, 82-88.
- Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., (2010). Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete, *Materials and Design* 3, pp. 4748-4754.
- Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Warren A. Dick, (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites* 32, pp. 142-147.
- Zuhua Zhang, Xiao Yao, Huajun Zhu, 2010 "Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete" *Applied Clay Science* 49, pp. 7-12.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโพลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ ก-1. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

8 M

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
7	1	3944	10	20	78.5	57	5810.4	74.1	
7	2	3753	10	20	78.5	58	5912.3	75.4	75.0
7	3	3751	10	20	78.5	58	5912.3	75.4	
14	1	3951	10	20	78.5	53	5402.7	68.9	
14	2	3746	10	20	78.5	55	5606.5	71.5	69.3
14	3	3755	10	20	78.5	52	5300.7	67.6	
28	1	3948	10	20	78.5	138	14067.3	179.4	
28	2	3754	10	20	78.5	141	14373.1	183.3	180.3
28	3	3744	10	20	78.5	137	13965.3	178.1	
60	1	3944	10	20	78.5	169	17227.3	219.7	
60	2	3750	10	20	78.5	169	17227.3	219.7	220.6
60	3	3757	10	20	78.5	171	17431.2	222.3	
90	1	3948	10	20	78.5	172	17533.1	223.6	
90	2	3753	10	20	78.5	172	17533.1	223.6	222.8
90	3	3746	10	20	78.5	170	17329.3	221.0	
180	1	3948	10	20	78.5	188	19164.1	244.4	
180	2	3746	10	20	78.5	187	19062.2	243.1	244.9
180	3	3748	10	20	78.5	190	19368.0	247.0	

ตารางที่ ก-2. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ
10 M

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
7	1	3944	10	20	78.5	60	6116.2	78.0	
7	2	3753	10	20	78.5	62	6320.1	80.6	79.7
7	3	3751	10	20	78.5	62	6320.1	80.6	
14	1	3951	10	20	78.5	66	6727.8	85.8	
14	2	3746	10	20	78.5	69	7033.6	89.7	
14	3	3755	10	20	78.5	62	6320.1	80.6	85.4
28	1	3948	10	20	78.5	149	15188.6	193.7	
28	2	3754	10	20	78.5	146	14882.8	189.8	191.1
28	3	3744	10	20	78.5	147	14984.7	191.1	
60	1	3944	10	20	78.5	175	17838.9	227.5	
60	2	3750	10	20	78.5	173	17635.1	224.9	227.1
60	3	3757	10	20	78.5	176	17940.9	228.8	
90	1	3948	10	20	78.5	187	19062.2	243.1	
90	2	3753	10	20	78.5	192	19571.9	249.6	246.6
90	3	3746	10	20	78.5	190	19368.0	247.0	
180	1	3948	10	20	78.5	192	19571.9	249.6	
180	2	3746	10	20	78.5	192	19571.9	249.6	248.8
180	3	3748	10	20	78.5	190	19368.0	247.0	

ตารางที่ ก-3. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

12 M

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
7	1	3944	10	20	78.5	98	9989.8	127.4	
7	2	3753	10	20	78.5	100	10193.7	130.0	127.4
7	3	3751	10	20	78.5	96	9785.9	124.8	
14	1	3951	10	20	78.5	116	11824.7	150.8	
14	2	3746	10	20	78.5	119	12130.5	154.7	150.8
14	3	3755	10	20	78.5	113	11518.9	146.9	
28	1	3948	10	20	78.5	167	17023.4	217.1	
28	2	3754	10	20	78.5	166	16921.5	215.8	216.3
28	3	3744	10	20	78.5	166	16921.5	215.8	
60	1	3944	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	
60	2	3750	10	20	78.5	179	18246.7	232.7	
60	3	3757	10	20	78.5	180	18348.6	234.0	232.7
90	1	3948	10	20	78.5	205	20897.0	266.6	
90	2	3753	10	20	78.5	207	21100.9	269.2	270.0
90	3	3746	10	20	78.5	211	21508.7	274.4	
180	1	3948	10	20	78.5	210	21406.7	273.1	
180	2	3746	10	20	78.5	214	21814.5	278.3	275.2
180	3	3748	10	20	78.5	211	21508.7	274.4	

ตารางที่ ก-4. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

14 M

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
7	1	3944	10	20	78.5	107	10907.2	139.1	
7	2	3753	10	20	78.5	106	10805.3	137.8	136.5
7	3	3751	10	20	78.5	102	10397.6	132.6	
14	1	3951	10	20	78.5	140	14271.2	182.0	
14	2	3746	10	20	78.5	138	14067.3	179.4	183.3
14	3	3755	10	20	78.5	145	14780.8	188.5	
28	1	3948	10	20	78.5	186	18960.2	241.8	
28	2	3754	10	20	78.5	188	19164.1	244.4	244.4
28	3	3744	10	20	78.5	190	19368.0	247.0	
60	1	3944	10	20	78.5	218	22222.2	283.5	
60	2	3750	10	20	78.5	214	21814.5	278.3	279.6
60	3	3757	10	20	78.5	213	21712.5	277.0	
90	1	3948	10	20	78.5	219	22324.2	284.8	
90	2	3753	10	20	78.5	212	21610.6	275.7	280.4
90	3	3746	10	20	78.5	216	22018.3	280.9	
180	1	3948	10	20	78.5	225	22935.8	292.6	
180	2	3746	10	20	78.5	227	23139.7	295.2	291.3
180	3	3748	10	20	78.5	220	22426.1	286.1	

ตารางที่ ก-5. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

16 M

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
7	1	3944	10	20	78.5	129	13149.8	167.7	
7	2	3753	10	20	78.5	129	13149.8	167.7	166.0
7	3	3751	10	20	78.5	125	12742.1	162.5	
14	1	3951	10	20	78.5	155	15800.2	201.5	
14	2	3746	10	20	78.5	160	16309.9	208.0	206.3
14	3	3755	10	20	78.5	161	16411.8	209.3	
28	1	3948	10	20	78.5	250	25484.2	325.1	
28	2	3754	10	20	78.5	248	25280.3	322.5	322.5
28	3	3744	10	20	78.5	246	25076.5	319.9	
60	1	3944	10	20	78.5	263	26809.4	342.0	
60	2	3750	10	20	78.5	266	27115.2	345.9	342.4
60	3	3757	10	20	78.5	261	26605.5	339.4	
90	1	3948	10	20	78.5	275	28032.6	357.6	
90	2	3753	10	20	78.5	278	28338.4	361.5	358.4
90	3	3746	10	20	78.5	274	27930.7	356.3	
180	1	3948	10	20	78.5	275	28032.6	357.6	
180	2	3746	10	20	78.5	275	28032.6	357.6	356.3
180	3	3748	10	20	78.5	272	27726.8	353.7	

ตารางที่ ก-6. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

18 M

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
7	1	3944	10	20	78.5	125	12742.1	162.5	
7	2	3753	10	20	78.5	120	12232.4	156.0	160.8
7	3	3751	10	20	78.5	126	12844.0	163.8	
14	1	3951	10	20	78.5	154	15698.3	200.2	
14	2	3746	10	20	78.5	155	15800.2	201.5	199.4
14	3	3755	10	20	78.5	151	15392.5	196.3	
28	1	3948	10	20	78.5	220	22426.1	286.1	
28	2	3754	10	20	78.5	220	22426.1	286.1	288.2
28	3	3744	10	20	78.5	225	22935.8	292.6	
60	1	3944	10	20	78.5	263	26809.4	342.0	
60	2	3750	10	20	78.5	260	26503.6	338.1	339.4
60	3	3757	10	20	78.5	260	26503.6	338.1	
90	1	3948	10	20	78.5	269	27421.0	349.8	
90	2	3753	10	20	78.5	267	27217.1	347.2	345.4
90	3	3746	10	20	78.5	261	26605.5	339.4	
180	1	3948	10	20	78.5	266	27115.2	345.9	
180	2	3746	10	20	78.5	269	27421.0	349.8	348.5
180	3	3748	10	20	78.5	269	27421.0	349.8	

ตารางที่ ก-7. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

Si/ Al = 2.2

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
28	1	3790	10	20	78.5	123	12538.2	159.9	
28	2	3801	10	20	78.5	122	12436.3	158.6	160.4
28	3	3877	10	20	78.5	125	12742.1	162.5	
60	1	3989	10	20	78.5	129	13149.8	167.7	
60	2	3892	10	20	78.5	131	13353.7	170.3	168.2
60	3	3900	10	20	78.5	128	13047.9	166.4	
90	1	3790	10	20	78.5	139	14169.2	180.7	
90	2	3740	10	20	78.5	137	13965.3	178.1	179.0
90	3	3931	10	20	78.5	137	13965.3	178.1	
180	1	3839	10	20	78.5	144	14678.9	187.2	
180	2	3861	10	20	78.5	147	14984.7	191.1	188.1
180	3	3964	10	20	78.5	143	14577.0	185.9	

ตารางที่ ก-8. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

Si/ Al = 2.4

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
28	1	3778	10	20	78.5	139	14169.2	180.7	
28	2	3824	10	20	78.5	137	13965.3	178.1	179.0
28	3	3791	10	20	78.5	137	13965.3	178.1	
60	1	3874	10	20	78.5	164	16717.6	213.2	
60	2	3838	10	20	78.5	167	17023.4	217.1	215.0
60	3	3778	10	20	78.5	165	16819.6	214.5	
90	1	3725	10	20	78.5	171	17431.2	222.3	
90	2	3738	10	20	78.5	172	17533.1	223.6	222.3
90	3	3778	10	20	78.5	170	17329.3	221.0	
180	1	4107	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	
180	2	3764	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	230.1
180	3	3833	10	20	78.5	175	17838.9	227.5	

ตารางที่ ก-9. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟอติเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศ

$$S_i / A_i = 2.6$$

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
28	1	3798	10	20	78.5	151	15392.5	196.3	
28	2	3851	10	20	78.5	149	15188.6	193.7	195.0
28	3	3888	10	20	78.5	150	15290.5	195.0	
60	1	3821	10	20	78.5	173	17635.1	224.9	
60	2	3844	10	20	78.5	172	17533.1	223.6	225.4
60	3	3759	10	20	78.5	175	17838.9	227.5	
90	1	3707	10	20	78.5	172	17533.1	223.6	
90	2	3739	10	20	78.5	173	17635.1	224.9	223.6
90	3	3888	10	20	78.5	171	17431.2	222.3	
180	1	3724	10	20	78.5	179	18246.7	232.7	
180	2	3754	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	231.9
180	3	3707	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	

ตารางที่ ก-10. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มใน
อากาศ Si/ Al = 2.8

AGE	SAMP	WEIGHT	DIMENTION (cm)		AREA	LOAD		STRENGTH	AVG
(Days)	No.	(g)	DIAMETER	HEIGHT	(cm ²)	KN	Kg	(ksc)	(ksc)
28	1	3745	10	20	78.5	152	15494	197.6	
28	2	3691	10	20	78.5	151	15393	196.3	197.2
28	3	3764	10	20	78.5	152	15494	197.6	
60	1	3735	10	20	78.5	175	17839	227.5	
60	2	3691	10	20	78.5	177	18043	230.1	230.1
60	3	3759	10	20	78.5	179	18247	232.7	
90	1	3735	10	20	78.5	180	18349	234	
90	2	3691	10	20	78.5	183	18654	237.9	235.3
90	3	3774	10	20	78.5	180	18349	234	
180	1	3649	10	20	78.5	182	18553	236.6	
180	2	3654	10	20	78.5	184	18756	239.2	237
180	3	3698	10	20	78.5	181	18451	235.3	

ตารางที่ ก-11. สรุปผลทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7 วัน

ลำดับ ที่	ส่วน ผสม	Area (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	5810	5912	5912	74.1	75.4	75.4	75.0
2	10-M	78.5	78.5	78.5	6116	6320	6320	78.0	80.6	80.6	79.7
3	12-M	78.5	78.5	78.5	9989	10193	9785	127.4	130.0	124.8	127.4
4	14-M	78.5	78.5	78.5	10907	10805	10397	139.1	137.8	132.6	136.5
5	16-M	78.5	78.5	78.5	13149	13149	12742	167.7	167.7	162.5	166.0
6	18-M	78.5	78.5	78.5	12742	12232	12844	162.5	156.0	163.8	160.8

ตารางที่ ก-12. สรุปผลทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 14 วัน

ลำดับ ที่	ส่วน ผสม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	5402	5606	5300	68.9	71.5	67.6	69.3
2	10-M	78.5	78.5	78.5	6727	7033	6320	85.8	89.7	80.6	85.4
3	12-M	78.5	78.5	78.5	6727	11824	12130	150.8	154.7	146.9	150.8
4	14-M	78.5	78.5	78.5	14271	14067	14780	182.0	179.4	188.5	183.3
5	16-M	78.5	78.5	78.5	15800	16309	16411	201.5	208.0	209.3	206.3
6	18-M	78.5	78.5	78.5	15698	15800	15392	200.2	201.5	196.3	199.4

ตารางที่ ก-13. สรุปผลทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่
อายุ 28 วัน

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	14067	14373	13965	179.4	183.3	178.1	180.3
2	10-M	78.5	78.5	78.5	17023	16921	16921	217.1	215.8	215.8	216.3
3	12-M	78.5	78.5	78.5	18960	19164	19368	241.8	244.4	247.0	244.4
4	14-M	78.5	78.5	78.5	25484	25280	25076	325.1	322.5	319.9	322.5
5	16-M	78.5	78.5	78.5	25484	25280	25076	325.1	322.5	319.9	322.5
6	18-M	78.5	78.5	78.5	22426	22426	22935	286.1	286.1	292.6	288.2
7	Si/Al=2.2	78.5	78.5	78.5	12538	12436	12742	159.9	158.6	162.5	160.4
8	Si/Al=2.4	78.5	78.5	78.5	14169	13965	13965	180.7	178.1	178.1	179.0
7	Si/Al=2.6	78.5	78.5	78.5	15392	15188	15290	196.3	193.7	195.0	195.0
8	Si/Al=2.8	78.5	78.5	78.5	15494	15392	15494	197.6	196.3	197.6	197.2

ตารางที่ ก-14. สรุปผลทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่
อายุ 60 วัน

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	17227	17227	17431.2	219.7	219.7	222.3	220.6
2	10-M	78.5	78.5	78.5	17838	17635	17940.9	227.5	224.9	228.8	227.1
3	12-M	78.5	78.5	78.5	18144	18246	18348.6	231.4	232.7	234.0	232.7
4	14-M	78.5	78.5	78.5	22222	21814	21712.5	283.5	278.3	277.0	279.6
5	16-M	78.5	78.5	78.5	26809	27115	26605.5	342.0	345.9	339.4	342.4
6	18-M	78.5	78.5	78.5	26809	26503	26503.6	342.0	338.1	338.1	339.4
5	Si/Al=2.2	78.5	78.5	78.5	13149	13353	13047.9	167.7	170.3	166.4	168.2
6	Si/Al=2.4	78.5	78.5	78.5	16717	17023	16819.6	213.2	217.1	214.5	215.0
7	Si/Al=2.6	78.5	78.5	78.5	17635	17533	17838.9	224.9	223.6	227.5	225.4
8	Si/Al=2.8	78.5	78.5	78.5	17838	18042	18246.7	227.5	230.1	232.7	230.1

ตารางที่ ก-15. สรุปผลทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของจีโอฟอติเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่
อายุ 90 วัน

ลำดับ ที่	ส่วน ผสม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	17533	17533	17329	223.6	223.6	221.0	222.8
2	10-M	78.5	78.5	78.5	19062	19571	19368	243.1	249.6	247.0	246.6
3	12-M	78.5	78.5	78.5	20897	21100	21508	266.6	269.2	274.4	270.0
4	14-M	78.5	78.5	78.5	22324	21610	22018	284.8	275.7	280.9	280.4
5	16-M	78.5	78.5	78.5	28032	28338	27930	357.6	361.5	356.3	358.4
6	18-M	78.5	78.5	78.5	27421	27217	26605	349.8	347.2	339.4	345.4
5	Si/Al=2.2	78.5	78.5	78.5	14169	13965	13965	180.7	178.1	178.1	179.0
6	Si/Al=2.4	78.5	78.5	78.5	17431	17533	17329	222.3	223.6	221.0	222.3
7	Si/Al=2.6	78.5	78.5	78.5	17533	17635	17431	223.6	224.9	222.3	223.6
8	Si/Al=2.8	78.5	78.5	78.5	18348	18654	18348	234	237.9	234	235.3

ตารางที่ ก-16. สรุปผลทดสอบกำลังอัดทรงกระบอกของซี โอปอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่
อายุ 180 วัน

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	พื้นที่หน้าตัด (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	19164	19164	19368	244.4	244.4	247.0	245.3
2	10-M	78.5	78.5	78.5	19571	19571	19368	249.6	249.6	247.0	248.8
3	12-M	78.5	78.5	78.5	21406	21814	21508	273.1	278.3	274.4	275.2
4	14-M	78.5	78.5	78.5	22935	23139	22426	292.6	295.2	286.1	291.3
5	16-M	78.5	78.5	78.5	28032	28032	27726	357.6	357.6	353.7	356.3
6	18-M	78.5	78.5	78.5	27115	27421	27421	345.9	349.8	349.8	348.5
7	Si/Al=2.2	78.5	78.5	78.5	14678	14984	14577	187.2	191.1	185.9	188.1
8	Si/Al=2.4	78.5	78.5	78.5	18144	18144	17838	231.4	231.4	227.5	230.1
7	Si/Al=2.6	78.5	78.5	78.5	18246	18144	18144	232.7	231.4	231.4	231.9
8	Si/Al=2.8	78.5	78.5	78.5	18552	18756	18450	236.6	239.2	235.3	237.0

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ ข-1. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีต 8 M

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: 8 M

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.407	116.80
2	28	10	10	50.0	40	12.049	113.87
3	28	10	10	50.0	40	12.236	111.90

Result Determination: 8 M

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	ค่าที่คูณจากเครื่อง	ค่าที่ได้จริง Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ²)
1	5,000	12.407	0.00248	116.8	4.608	538.21	32.29
2	5,000	12.049	0.00241	113.8	4.608	524.71	31.48
3	5,000	12.236	0.00245	111.9	4.608	515.64	30.94
Average Modulus of Rupture							31.57

ตารางที่ ข-2. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีต 10 M

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: 10 M

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.197	128.87
2	28	10	10	50.0	40	12.076	125.91
3	28	10	10	50.0	40	12.125	127.96

Result Determination: 10 M

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	ค่าที่คูณจากเครื่อง	ค่าที่ได้จริง Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ²)
1	5,000	12.197	0.00244	128.8	4.608	593.83	35.63
2	5,000	12.076	0.00242	125.9	4.608	580.19	34.81
3	5,000	12.125	0.00243	127.9	4.608	589.64	35.38
Average Modulus of Rupture							35.27

ตารางที่ ข-3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีต 12 M

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: 12 M

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.013	129.87
2	28	10	10	50.0	40	11.862	123.80
3	28	10	10	50.0	40	11.894	123.95

Result Determination: 12 M

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	ค่าที่คูณจากเครื่อง	ค่าที่ได้จริง Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ²)
1	5,000	12.013	0.00240	129.8	4.608	598.44	35.91
2	5,000	11.862	0.00237	123.8	4.608	570.47	34.23
3	5,000	11.894	0.00238	123.9	4.608	571.16	34.27
Average Modulus of Rupture							34.80

ตารางที่ ข-4. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีต 14 M

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: 14 M

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.342	91.23
2	28	10	10	50.0	40	12.171	87.62
3	28	10	10	50.0	40	12.173	88.94

Result Determination: 14 M

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	ค่าที่คูณจากเครื่อง	ค่าที่ได้จริง Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ²)
1	5,000	12.342	0.00247	91.2	4.608	420.39	25.22
2	5,000	12.171	0.00243	87.6	4.608	403.75	24.23
3	5,000	12.173	0.00243	88.9	4.608	409.84	24.59
Average Modulus of Rupture							24.68

ตารางที่ ข-5. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 16 M

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: 16 M

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.342	95.13
2	28	10	10	50.0	40	12.171	93.82
3	28	10	10	50.0	40	12.173	89.94

Result Determination: 16 M

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	ค่าที่คูณจากเครื่อง	ค่าที่ได้จริง Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ²)
1	5,000	12.342	0.00247	95.1	4.608	438.36	26.30
2	5,000	12.171	0.00243	93.8	4.608	432.32	25.94
3	5,000	12.173	0.00243	89.9	4.608	414.44	24.87
Average Modulus of Rupture							25.70

ตารางที่ ข-6. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 18 M

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: 18 M

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.342	80.93
2	28	10	10	50.0	40	12.171	81.42
3	28	10	10	50.0	40	12.173	82.04

Result Determination: 18 M

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	ค่าที่คูณจากเครื่อง	ค่าที่ได้จริง Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ³)
1	5,000	12.342	0.00247	80.9	4.608	372.93	22.38
2	5,000	12.171	0.00243	81.4	4.608	375.18	22.51
3	5,000	12.173	0.00243	82.0	4.608	378.04	22.68
Average Modulus of Rupture							22.52

ตารางที่ ข-7. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต Si/ Al = 2.2

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน Spen length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: Si/ Al = 2.2

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	11.763	311.93
2	28	10	10	50.0	40	12.499	312.94
3	28	10	10	50.0	40	12.335	300.71

Result Determination: Si/ Al = 2.2

Specimen No.	Volume (ซม ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม ³)	Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม ²)
1	5,000	11.763	0.00235	311.93	18.72
2	5,000	12.499	0.00250	312.94	18.78
3	5,000	12.335	0.00247	300.71	18.04
Average Modulus of Rupture					18.51

ตารางที่ ข-8. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต Si/ Al = 2.4

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: Si/ Al = 2.4

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	11.655	423.04
2	28	10	10	50.0	40	11.841	349.64
3	28	10	10	50.0	40	11.501	306.83

Result Determination: Si/ Al = 2.4

Specimen No.	Volume (ซม ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม ³)	Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม ²)
1	5,000	11.655	0.00233	423.04	25.38
2	5,000	11.841	0.00237	349.64	20.98
3	5,000	11.501	0.00230	306.83	18.41
Average Modulus of Rupture					21.59

ตารางที่ ข-9. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต Si/ Al = 2.6

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน Spen length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: Si/ Al = 2.6

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	11.397	433.23
2	28	10	10	50.0	40	11.649	481.14
3	28	10	10	50.0	40	12.008	501.53

Result Determination: Si/ Al = 2.6

Specimen No.	Volume (ซม ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม ³)	Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม ²)
1	5,000	11.397	0.00228	433.23	25.99
2	5,000	11.649	0.00233	481.14	28.87
3	5,000	12.008	0.00240	501.53	30.09
Average Modulus of Rupture					28.32

ตารางที่ ข-10. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต Si/ Al = 2.8

$$\sigma_f = \frac{M_c}{I} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Age of concrete = 28 วัน

Span length, L = 40 ซม

Data Monitor Determination: Si/ Al = 2.8

Specimen No.	Dimension of Specimen (ซม.)				Span Length (L) (ซม.)	Weight (กก.)	Maximum Load (กก.)
	Age (วัน)	Width(b) (ซม.)	Depth(d) (ซม.)	Length (ซม.)			
1	28	10	10	50.0	40	12.246	574.92
2	28	10	10	50.0	40	11.840	604.48
3	28	10	10	50.0	40	12.291	585.12

Result Determination: Si/ Al = 2.8

Specimen No.	Volume (ซม. ³)	Weight (กก.)	Density (กก./ซม. ³)	Maximum Load (กก.)	Modulus of Rupture (กก./ซม. ²)
1	5,000	12.246	0.00245	574.92	34.50
2	5,000	11.84	0.00237	604.48	36.27
3	5,000	12.291	0.00246	585.12	35.11
Average Modulus of Rupture					35.29

ตารางที่ ข-11. สรุปผลทดสอบกำลังรับแรงค้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	น้ำหนัก (กก.)			ปริมาตร (ซม. ³)			ความหนาแน่น (กก/ซม. ³)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	8-M	12.41	12.05	12.24	5000	5000	5000	0.00248	0.00241	0.00245
2	10-M	12.2	12.08	12.13	5000	5000	5000	0.00244	0.00242	0.00243
3	12-M	12.01	11.86	11.89	5000	5000	5000	0.00240	0.00237	0.00238
4	14-M	12.34	12.17	12.17	5000	5000	5000	0.00247	0.00243	0.00243
5	Si/Al=2.2	11.76	12.5	12.34	5000	5000	5000	0.00235	0.00250	0.00247
6	Si/Al=2.4	11.66	11.84	11.5	5000	5000	5000	0.00233	0.00237	0.00230
7	Si/Al=2.6	11.4	11.65	12.01	5000	5000	5000	0.00228	0.00233	0.00240
8	Si/Al=2.8	12.25	11.840	12.29	5000	5000	5000	0.00245	0.00237	0.00246
ลำดับ ที่	ส่วนผสม	Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก/ซม. ²)		
		1	2	3	1	2	3			
1	8-M	538.21	524.71	515.64	32.29	31.48	30.94	31.57		
2	10-M	593.83	580.19	589.64	35.63	34.81	35.38	35.27		
3	12-M	598.44	571.16	571.16	35.91	34.23	34.27	34.80		
4	14-M	420.39	403.75	409.84	25.22	24.23	24.59	24.68		
5	Si/Al=2.2	311.93	312.94	300.71	18.72	18.78	18.04	18.51		
6	Si/Al=2.4	423.04	349.64	306.83	25.38	20.98	18.41	21.59		
7	Si/Al=2.6	433.23	481.14	501.53	25.99	28.87	30.09	28.32		
8	Si/Al=2.8	574.92	604.48	585.12	34.50	36.27	35.11	35.29		

ตารางที่ ข-12. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต 8 Molar ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	33.8	3445.5	11	13.6
2	10	20	45.3	4617.7	14.7	
3	10	20	46.8	4770.6	15.2	

ตารางที่ ข-13. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต 10 Molar ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	45.9	4678.9	14.9	14.6
2	10	20	44.2	4505.6	14.3	
3	10	20	35.6	3629	11.6	

ตารางที่ ข-14. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต 12 Molar ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	55.2	5626.9	17.9	18.2
2	10	20	63.2	6442.4	20.5	
3	10	20	49.9	5086.6	16.2	

ตารางที่ ข-15. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต 14 Molar ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	46.2	4709.5	15	16.6
2	10	20	49.6	5056.1	16.1	
3	10	20	57.7	5881.8	18.7	

ตารางที่ ข-16. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต 16 Molar ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	51.2	5219.2	16.6	16.8
2	10	20	49.4	5035.7	16	
3	10	20	54.7	5575.9	17.7	

ตารางที่ ข-17. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต 18 Molar ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	46.9	4780.8	15.2	15.2
2	10	20	48.2	4913.4	15.6	
3	10	20	45.6	4648.3	14.8	

ตารางที่ ข-18. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต Si/ Al = 2.2 ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	34.6	3527	11.2	11.0
2	10	20	33.4	3404.7	10.8	
3	10	20	34.1	3476	11.1	

ตารางที่ ข-19. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต Si/ Al = 2.4 ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	37.8	3853.2	12.3	12.3
2	10	20	38	3873.6	12.3	
3	10	20	36.8	3751.3	11.9	

ตารางที่ ข-20. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต Si/ Al = 2.6 ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	40.1	4087.7	13	13
2	10	20	39.1	3985.7	12.7	
3	10	20	41.2	4199.8	13.4	

ตารางที่ ข-21. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของทรงกระบอกจีโอพอลิเมอร์
คอนกรีต Si/ Al = 2.8 ที่อายุ 28 วัน

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dl}$$

Specimen No.	d (cm)	L (cm)	P (kN)	P (kg)	σ_t (ksc)	$\sigma_{t,av}$ (ksc)
1	10	20	47	4791	15.3	15.1
2	10	20	46.2	4709.5	15	
3	10	20	46.3	4719.7	15	

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบแรงบีบเหนียวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

ตารางที่ ก-1. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม 8 M

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.633	52.8	1.2	5914.37	29.71	28.92
	2	28	8.698	52.5	1.2	6134.56	31.00	
	3	28	8.901	53.2	1.2	5222.22	26.04	
DB16	1	28	9.359	53.5	1.6	5859.33	21.79	21.34
	2	28	9.157	52.7	1.6	5289.50	19.97	
	3	28	9.260	53.2	1.6	5955.15	22.27	
DB20	1	28	10.043	53.3	2.0	4767.58	14.24	13.91
	2	28	9.775	52.7	2.0	4361.88	13.17	
	3	28	10.024	53.6	2.0	4819.57	14.31	

ตารางที่ ก-2. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม 10 M

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.877	52.4	1.2	8680.94	43.94	40.84
	2	28	8.923	53.7	1.2	7870.54	38.88	
	3	28	8.779	53.2	1.2	7960.25	39.69	
DB16	1	28	9.264	53.6	1.6	6371.05	23.65	23.78
	2	28	9.206	53.8	1.6	5598.37	20.70	
	3	28	9.114	52.6	1.6	7135.58	26.99	
DB20	1	28	9.815	53.8	2.0	6014.27	17.79	17.92
	2	28	9.959	54.2	2.0	5924.57	17.40	
	3	28	9.675	53.5	2.0	6242.61	18.57	

ตารางที่ ค-3. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม 12 M

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.763	52.3	1.2	8651.38	43.88	42.33
	2	28	8.660	52.7	1.2	8657.49	43.58	
	3	28	8.778	53.0	1.2	7902.14	39.55	
DB16	1	28	9.409	53.1	1.6	8038.74	30.12	28.81
	2	28	9.422	53.5	1.6	7122.32	26.48	
	3	28	9.298	52.6	1.6	7888.89	29.84	
DB20	1	28	9.978	53.7	2.0	5920.49	17.55	17.39
	2	28	9.999	54.2	2.0	5747.20	16.88	
	3	28	9.974	53.5	2.0	5965.34	17.75	

ตารางที่ ค-4. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม 14 M

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.732	54.2	1.2	7110.09	34.80	37.43
	2	28	9.020	53.7	1.2	8167.18	40.34	
	3	28	8.715	53.3	1.2	7461.77	37.14	
DB16	1	28	9.571	52.7	1.6	7896.02	29.81	27.19
	2	28	9.291	53.4	1.6	6738.02	25.10	
	3	28	9.385	53.2	1.6	7131.50	26.67	
DB20	1	28	9.765	52.7	2.0	6153.93	18.58	17.66
	2	28	9.878	53.8	2.0	5979.61	17.69	
	3	28	10.090	53.7	2.0	5632.01	16.69	

ตารางที่ ก-5. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม 16 M

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.732	54.2	1.2	7260.09	35.53	36.23
	2	28	9.020	53.7	1.2	7396.40	36.54	
	3	28	8.715	53.3	1.2	7358.02	36.62	
DB16	1	28	9.571	52.7	1.6	6806.02	25.69	25.51
	2	28	9.291	53.4	1.6	6768.02	25.21	
	3	28	9.385	53.2	1.6	6850.45	25.62	
DB20	1	28	9.765	52.7	2.0	5239.60	15.82	15.81
	2	28	9.878	53.8	2.0	5349.60	15.83	
	3	28	10.090	53.7	2.0	5322.20	15.77	

ตารางที่ ค-6. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม 18 M

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.732	54.2	1.2	7306.09	35.76	35.82
	2	28	9.020	53.7	1.2	7200.60	35.57	
	3	28	8.715	53.3	1.2	7260.70	36.13	
DB16	1	28	9.571	52.7	1.6	5846.02	22.07	22.41
	2	28	9.291	53.4	1.6	6108.02	22.76	
	3	28	9.385	53.2	1.6	5988.80	22.40	
DB20	1	28	9.765	52.7	2.0	4453.93	13.45	13.52
	2	28	9.878	53.8	2.0	4549.60	13.46	
	3	28	10.090	53.7	2.0	4602.00	13.64	

ตารางที่ ค-7. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

Si/ Al = 2.2

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.818	53.1	1.2	3846.08	19.21	20.56
	2	28	8.844	52.8	1.2	3793.99	19.06	
	3	28	8.958	53.3	1.2	4700.31	23.39	
DB16	1	28	9.367	52.5	1.6	3663.91	13.88	16.16
	2	28	9.346	53.2	1.6	4793.07	17.92	
	3	28	9.385	52.9	1.6	4435.27	16.68	
DB20	1	28	10.122	53.0	2.0	4605.10	13.83	14.17
	2	28	10.023	52.8	2.0	5184.51	15.63	
	3	28	9.734	53.4	2.0	4378.39	13.05	

ตารางที่ ก-8. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

Si/ Al = 2.4

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.849	53.2	1.2	5259.02	26.22	25.84
	2	28	8.739	52.9	1.2	4603.57	23.08	
	3	28	8.916	52.5	1.2	5585.93	28.22	
DB16	1	28	9.281	53.5	1.6	4758.92	17.70	19.81
	2	28	9.453	52.7	1.6	5102.96	19.26	
	3	28	9.392	53.2	1.6	6011.72	22.48	
DB20	1	28	9.94	53.4	2.0	4972.78	14.82	16.96
	2	28	10.07	52.8	2.0	6050.05	18.24	
	3	28	10.03	53.3	2.0	5971.89	17.83	

ตารางที่ ก-9. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

Si/ Al = 2.6

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)	Average Maximum Bond Strength (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.925	53.3	1.2	5517.42	27.46	27.05
	2	28	8.772	52.8	1.2	5759.63	28.94	
	3	28	8.817	53.5	1.2	4993.78	24.76	
DB16	1	28	9.357	53.5	1.6	5917.60	22.01	22.32
	2	28	9.517	53.2	1.6	6493.66	24.28	
	3	28	9.283	52.7	1.6	5479.61	20.69	
DB20	1	28	9.842	53.0	2.0	5595.21	16.80	17.66
	2	28	9.968	52.7	2.0	5897.86	17.81	
	3	28	9.998	53.3	2.0	6154.33	18.38	

ตารางที่ ก-10. แสดงผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

Si/ AI = 2.8

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL}$$

Deformed Bar	Specimen No.	Age (วัน)	Weight (กก.)	Develop Length (ซม.)	Nominal Diameter (ซม.)	Maximum Load (กก.)	Maixmum Bond Stregth (กก./ซม. ²)	Average Maixmum Bond Stregth (กก./ซม. ²)
DB12	1	28	8.759	52.6	1.2	4844.34	24.43	26.81
	2	28	8.787	53.1	1.2	5527.12	27.61	
	3	28	8.899	53.3	1.2	5706.42	28.40	
DB16	1	28	9.494	53.2	1.6	5917.13	22.13	21.45
	2	28	9.391	52.9	1.6	5875.43	22.10	
	3	28	9.168	53.3	1.6	5389.70	20.12	
DB20	1	28	10.101	53.1	2.0	5975.74	17.91	16.91
	2	28	9.915	52.9	2.0	5578.08	16.78	
	3	28	9.883	53.4	2.0	5376.35	16.02	

ตารางที่ ค-11. แสดงสรุปผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

DB12

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	
1	8-M	5914.37	6134.56	5222.22	29.71	31.00	26.04	28.92
2	10-M	8680.94	7870.54	7960.25	43.94	38.88	39.69	40.84
3	12-M	8651.38	8657.49	7902.14	43.88	43.58	39.55	42.33
4	14-M	7110.09	8167.18	7461.77	34.80	40.34	37.14	37.43
5	16-M	7260.09	7396.40	7358.20	35.53	36.54	36.62	36.23
6	18-M	7306.09	7200.60	7260.70	35.76	35.57	36.13	35.82
7	Si/Al=2.2	3846.08	3793.99	4700.31	19.21	19.06	23.39	20.56
8	Si/Al=2.4	5259.02	4603.57	5585.93	26.22	23.08	28.22	25.84
9	Si/Al=2.6	5517.42	5759.63	4993.78	27.46	28.94	24.76	27.05
10	Si/Al=2.8	4844.34	5527.12	5706.42	24.43	27.61	28.40	26.81

ตารางที่ ก-12. แสดงสรุปผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

DB16

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ²)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		1	2	3	1	2	3	
1	8-M	5859.33	5289.50	5955.15	21.79	19.97	22.27	21.34
2	10-M	6371.05	5598.37	7135.58	23.65	20.70	26.99	23.78
3	12-M	8038.74	7122.32	7888.89	30.12	26.48	29.84	28.81
4	14-M	7896.02	6738.02	7131.50	29.81	25.10	26.67	27.19
5	16-M	6806.02	6768.02	6850.45	25.69	25.21	25.62	25.51
6	18-M	5846.02	6108.02	5988.80	22.07	22.76	22.40	22.41
7	Si/Al=2.2	3663.91	4793.07	4435.27	13.88	17.92	16.68	16.16
8	Si/Al=2.4	4758.92	5102.96	6011.72	17.70	19.26	22.48	19.81
9	Si/Al=2.6	5917.60	6493.66	5479.61	22.01	24.28	20.69	22.32
10	Si/Al=2.8	5917.13	5875.43	5389.70	22.13	22.10	20.12	21.45

ตารางที่ ก-13. แสดงสรุปผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

DB20

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	Maximum Load (กก.)			Stress (กก./ซม. ^๒)			ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ^๒)
		1	2	3	1	2	3	
1	8-M	4767.58	4361.88	4819.57	14.24	13.17	14.31	13.91
2	10-M	6014.27	5924.57	6242.61	17.79	17.40	18.57	17.92
3	12-M	5920.49	5747.20	5965.34	17.55	16.88	17.75	17.39
4	14-M	6153.93	5979.61	5632.01	18.58	17.69	16.69	17.66
5	16-M	5239.60	5349.60	5322.20	15.82	15.83	15.77	15.81
6	18-M	4453.93	4549.60	4602.00	13.45	13.46	13.64	13.52
7	Si/Al=2.2	4605.10	5184.51	4378.39	13.83	15.63	13.05	14.17
8	Si/Al=2.4	4972.78	6050.05	5971.89	14.82	18.24	17.83	16.96
9	Si/Al=2.6	5917.60	6493.66	5479.61	16.80	17.81	18.38	17.66
10	Si/Al=2.8	5975.74	5578.08	5376.35	17.91	16.78	16.02	16.91

ตารางที่ ก-14. แสดงสรุปผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	กำลังอัด (ksc) 28-day	แรงยึดเหนี่ยว (ksc) 28-day			$\sqrt{f_c}/D$		
		DB12	DB16	DB20	DB12	DB16	DB20
8-M	180	28.92	21.34	13.91	11.19	8.39	6.71
10-M	192	40.84	23.78	17.92	11.53	8.65	6.92
12-M	216	42.33	28.81	17.39	12.26	9.19	7.35
14-M	244	37.43	27.19	17.66	13.03	9.77	7.82
16-M	322	36.23	25.51	15.81	14.96	11.22	8.98
18-M	288	35.82	22.41	13.52	14.15	10.61	8.49
Si/Al=2.2	160	20.56	16.16	14.17	10.54	7.91	6.32
Si/Al=2.4	179	25.84	19.81	16.96	11.15	8.36	6.69
Si/Al=2.6	195	27.05	22.32	17.66	11.64	8.73	6.98
Si/Al=2.8	197	26.81	21.45	16.91	11.70	8.77	7.02

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดสอบการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ข้อกำหนดการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

$$K = \frac{\rho L g Q}{PA}$$

- เมื่อ
- K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เมตร/วินาที)
 - ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
 - g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที²)
 - Q = อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)
 - L = ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (เมตร)
 - P = ความดันน้ำสมบูรณ์ (ปาสคาล)
 - A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเมตร)

ตารางที่ ง-1. ค่าข้อกำหนดการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

P	=	1000	kg/m ³
L	=	0.0406	m.
g	=	9.81	m/sec ²
D	=	0.1000	m
P	=	500,000	N/m ²
A	=	0.0079	m ²
1 cm of tube	=	1.5394	cc

ตารางที่ ง-2. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				34.2			
2	1	60	60	60	25.3	8.9	1.37E-05	1.37E-05
3	2	120	120	180	20.8	4.5	6.93E-06	2.06E-05
4	3	180	180	360	16.5	4.3	6.62E-06	2.72E-05
5	4	240	240	600	12.5	4.0	6.16E-06	3.34E-05
6	5	300	300	900	8.5	4.0	6.16E-06	3.96E-05
7	6	360	360	1,260	4.5	4.0	6.16E-06	4.57E-05
8	7	420	420	1,680		4.5	6.93E-06	5.26E-05
9	8	480	480	2,160		0.0	0.00E+00	5.26E-05

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				32.4			
2	1	60	60	60	24.6	7.8	1.20E-05	1.20E-05
3	2	120	120	180	20.4	4.2	6.47E-06	1.85E-05
4	3	180	180	360	16.4	4.0	6.16E-06	2.46E-05
5	4	240	240	600	12.1	4.3	6.62E-06	3.12E-05
6	5	300	300	900	8	4.1	6.31E-06	3.76E-05
7	6	360	360	1,260	4.2	3.8	5.85E-06	4.34E-05
8	7	420	420	1,680		4.2	6.47E-06	4.99E-05

ตารางที่ ง-4. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 โมลาร์ 28 วันตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				33			
2	1	60	60	60	25.8	7.2	1.11E-05	1.11E-05
3	2	120	120	180	21.7	4.1	6.31E-06	1.74E-05
4	3	180	180	360	18.1	3.6	5.54E-06	2.29E-05
5	4	240	240	600	14.6	3.5	5.39E-06	2.83E-05
6	5	300	300	900	11.3	3.3	5.08E-06	3.34E-05
7	6	360	360	1,260	8	3.3	5.08E-06	3.85E-05
8	7	420	420	1,680	4.8	3.2	4.93E-06	4.34E-05
9	8	480	480	2,160	1.6	3.2	4.93E-06	4.83E-05
10	9	540	540	2,700		1.6	2.46E-06	5.08E-05
11	10	600	600	3,300		0.0	0.00E+00	5.08E-05

ตารางที่ ๓-5. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 โมลาร์ 28 วันตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				36			
2	1	60	60	60	29.2	6.8	1.05E-05	1.05E-05
3	2	120	120	180	24.9	4.3	6.62E-06	1.71E-05
4	3	180	180	360	21.6	3.3	5.08E-06	2.22E-05
5	4	240	240	600	17.6	4.0	6.16E-06	2.83E-05
6	5	300	300	900	14.7	2.9	4.46E-06	3.28E-05
7	6	360	360	1,260	11.1	3.6	5.54E-06	3.83E-05
8	7	420	420	1,680	7.2	3.9	6.00E-06	4.43E-05
9	8	480	480	2,160	4.4	2.8	4.31E-06	4.86E-05
10	9	540	540	2,700	3.2	1.2	1.85E-06	5.05E-05
11	10	600	600	3,300		3.2	4.93E-06	5.54E-05
12	11	660	660	3,960		0.0	0.00E+00	5.54E-05

ตารางที่ ง-6. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 12 โมลาร์ 28 วันตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				35.8			
2	1	60	60	60	30	5.8	8.93E-06	8.93E-06
3	2	120	120	180	26.4	3.6	5.54E-06	1.45E-05
4	3	180	180	360	22.7	3.7	5.70E-06	2.02E-05
5	4	240	240	600	19.1	3.6	5.54E-06	2.57E-05
6	5	300	300	900	15.4	3.7	5.70E-06	3.14E-05
7	6	360	360	1,260	12	3.4	5.23E-06	3.66E-05
8	7	420	420	1,680	8.4	3.6	5.54E-06	4.22E-05
9	8	480	480	2,160	4.8	3.6	5.54E-06	4.77E-05
10	9	540	540	2,700	1.2	3.6	5.54E-06	5.33E-05
11	10	600	600	3,300		1.2	1.85E-06	5.51E-05
12	11	660	660	3,960		0.0	0.00E+00	5.51E-05

ตารางที่ ง-7. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 12 โมลาร์ 28 วันตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				38.8			
2	1	60	60	60	31.4	7.4	1.14E-05	1.14E-05
3	2	120	120	180	27.5	3.9	6.00E-06	1.74E-05
4	3	180	180	360	23.2	4.3	6.62E-06	2.40E-05
5	4	240	240	600	19.7	3.5	5.39E-06	2.94E-05
6	5	300	300	900	15.3	4.4	6.77E-06	3.62E-05
7	6	360	360	1,260	11.9	3.4	5.23E-06	4.14E-05
8	7	420	420	1,680	8	3.9	6.00E-06	4.74E-05
9	8	480	480	2,160	4.1	3.9	6.00E-06	5.34E-05
10	9	540	540	2,700	0.8	3.3	5.08E-06	5.85E-05
11	10	600	600	3,300		0.8	1.23E-06	5.97E-05
12	11	660	660	3,960		0.0	0.00E+00	5.97E-05

ตารางที่ ง-8. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 14 โมลาร์ 28 วันตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				35.5			
2	1	60	60	60	31.9	3.6	5.54E-06	5.54E-06
3	2	120	120	180	29.5	2.4	3.69E-06	9.24E-06
4	3	180	180	360	27.9	1.6	2.46E-06	1.17E-05
5	4	240	240	600	26.4	1.5	2.31E-06	1.40E-05
6	5	300	300	900	24.9	1.5	2.31E-06	1.63E-05
7	6	360	360	1,260	23.4	1.5	2.31E-06	1.86E-05
8	7	420	420	1,680	21.9	1.5	2.31E-06	2.09E-05
9	8	480	480	2,160	20.4	1.5	2.31E-06	2.32E-05
10	9	540	540	2,700	18.9	1.5	2.31E-06	2.56E-05
11	10	600	600	3,300	17.4	1.5	2.31E-06	2.79E-05
12	11	660	660	3,960	15.9	1.5	2.31E-06	3.02E-05
13	12	720	720	4,680	14.4	1.5	2.31E-06	3.25E-05
14	13	780	780	5,460	12.9	1.5	2.31E-06	3.48E-05
15	14	840	840	6,300	11.4	1.5	2.31E-06	3.71E-05
16	15	900	900	7,200	9.9	1.5	2.31E-06	3.94E-05
17	16	960	960	8,160	8.4	1.5	2.31E-06	4.17E-05
18	17	1020	1,020	9,180	6.9	1.5	2.31E-06	4.40E-05
19	18	1080	1,080	10,260	5.4	1.5	2.31E-06	4.63E-05
20	19	1140	1,140	11,400	3.9	1.5	2.31E-06	4.86E-05
21	20	1200	1,200	12,600		3.9	6.00E-06	5.46E-05
22	21	1260	1,260	13,860		0.0	0.00E+00	5.46E-05

ตารางที่ ง-9. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 14 โมลาร์ 28 วันตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				29.5			
2	1	60	60	60	21.5	8.0	1.23E-05	1.23E-05
3	2	120	120	180	19.8	1.7	2.62E-06	1.49E-05
4	3	180	180	360	18.4	1.4	2.16E-06	1.71E-05
5	4	240	240	600	16.7	1.7	2.62E-06	1.97E-05
6	5	300	300	900	15.3	1.4	2.16E-06	2.19E-05
7	6	360	360	1,260	13.5	1.8	2.77E-06	2.46E-05
8	7	420	420	1,680	11.9	1.6	2.46E-06	2.71E-05
9	8	480	480	2,160	10	1.9	2.92E-06	3.00E-05
10	9	540	540	2,700	8.7	1.3	2.00E-06	3.20E-05
11	10	600	600	3,300	7.1	1.6	2.46E-06	3.45E-05
12	11	660	660	3,960	5.5	1.6	2.46E-06	3.69E-05
13	12	720	720	4,680	3.9	1.6	2.46E-06	3.94E-05
14	13	780	780	5,460	2.3	1.6	2.46E-06	4.19E-05
15	14	840	840	6,300	0.7	1.6	2.46E-06	4.43E-05
16	15	900	900	7,200		0.7	1.08E-06	4.54E-05
17	16	960	960	8,160		0.0	0.00E+00	4.54E-05

ตารางที่ ง-10. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al
เท่ากับ 2.2 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				38.2			
2	1	60	60	60	25.8	12.4	1.91E-05	1.91E-05
3	2	120	120	180	19.1	6.7	1.03E-05	2.94E-05
4	3	180	180	360	12.9	6.2	9.54E-06	3.89E-05
5	4	240	240	600	7	5.9	9.08E-06	4.80E-05
6	5	300	300	900	1.2	5.8	8.93E-06	5.70E-05
7	6	360	360	1,260	0	1.2	1.85E-06	5.88E-05
8	7	420	420	1,680		0.0	0.00E+00	5.88E-05

ตารางที่ ง-11. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al
เท่ากับ 2.2 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				39.8			
2	1	60	60	60	27.6	12.2	1.88E-05	1.88E-05
3	2	120	120	180	20.9	6.7	1.03E-05	2.91E-05
4	3	180	180	360	14.4	6.5	1.00E-05	3.91E-05
5	4	240	240	600	8.1	6.3	9.70E-06	4.88E-05
6	5	300	300	900	2.1	6.0	9.24E-06	5.80E-05
7	6	360	360	1,260	0	2.1	3.23E-06	6.13E-05
8	7	420	420	1,680		0.0	0.00E+00	6.13E-05

ตารางที่ ง-12. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.4 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				38.2			
2	1	60	60	60	25.7	12.5	1.92E-05	1.92E-05
3	2	120	120	180	18.7	7.0	1.08E-05	3.00E-05
4	3	180	180	360	12.5	6.2	9.54E-06	3.96E-05
5	4	240	240	600	6.9	5.6	8.62E-06	4.82E-05
6	5	300	300	900	1.5	5.4	8.31E-06	5.65E-05
7	6	360	360	1,260	0	1.5	2.31E-06	5.88E-05
8	7	420	420	1,680		0.0	0.00E+00	5.88E-05

ตารางที่ ง-13. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.4 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				42			
2	1	60	60	60	28.6	13.4	2.06E-05	2.06E-05
3	2	120	120	180	21.7	6.9	1.06E-05	3.12E-05
4	3	180	180	360	15.6	6.1	9.39E-06	4.06E-05
5	4	240	240	600	9.9	5.7	8.77E-06	4.94E-05
6	5	300	300	900	4.5	5.4	8.31E-06	5.77E-05
7	6	360	360	1,260	0	4.5	6.93E-06	6.47E-05
8	7	420	420	1,680		0.0	0.00E+00	6.47E-05

ตารางที่ ง-14 ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al
เท่ากับ 2.6 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				43			
2	1	60	60	60	33	10.0	1.54E-05	1.54E-05
3	2	120	120	180	28.2	4.8	7.39E-06	2.28E-05
4	3	180	180	360	24.1	4.1	6.31E-06	2.91E-05
5	4	240	240	600	20.2	3.9	6.00E-06	3.51E-05
6	5	300	300	900	16.6	3.6	5.54E-06	4.06E-05
7	6	360	360	1,260	13.2	3.4	5.23E-06	4.59E-05
8	7	420	420	1,680	9.8	3.4	5.23E-06	5.11E-05
9	8	480	480	2,160	6.6	3.2	4.93E-06	5.60E-05
10	9	540	540	2,700	3.3	3.3	5.08E-06	6.11E-05
11	10	600	600	3,300	0.2	3.1	4.77E-06	6.59E-05
12	11	660	660	3,960	0	0.2	3.08E-07	6.62E-05
13	12	720	720	4,680		0.0	0.00E+00	6.62E-05

ตารางที่ ง-15. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al
เท่ากับ 2.6 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				42.1			
2	1	60	60	60	32.9	9.2	1.42E-05	1.42E-05
3	2	120	120	180	28	4.9	7.54E-06	2.17E-05
4	3	180	180	360	23.8	4.2	6.47E-06	2.82E-05
5	4	240	240	600	19.7	4.1	6.31E-06	3.45E-05
6	5	300	300	900	16	3.7	5.70E-06	4.02E-05
7	6	360	360	1,260	12.3	3.7	5.70E-06	4.59E-05
8	7	420	420	1,680	8.9	3.4	5.23E-06	5.11E-05
9	8	480	480	2,160	5.2	3.7	5.70E-06	5.68E-05
10	9	540	540	2,700	1.6	3.6	5.54E-06	6.23E-05
11	10	600	600	3,300	0	1.6	2.46E-06	6.48E-05
12	11	660	660	3,960	0	0.0	0.00E+00	6.48E-05

ตารางที่ ง-16. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในซีโพลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.8 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				40			
2	1	60	60	60	32.5	7.5	1.15E-05	1.15E-05
3	2	120	120	180	28.5	4.0	6.16E-06	1.77E-05
4	3	180	180	360	25	3.5	5.39E-06	2.31E-05
5	4	240	240	600	21.8	3.2	4.93E-06	2.80E-05
6	5	300	300	900	18.8	3.0	4.62E-06	3.26E-05
7	6	360	360	1,260	15.7	3.1	4.77E-06	3.74E-05
8	7	420	420	1,680	12.9	2.8	4.31E-06	4.17E-05
9	8	480	480	2,160	10.1	2.8	4.31E-06	4.60E-05
10	9	540	540	2,700	7.3	2.8	4.31E-06	5.03E-05
11	10	600	600	3,300	4.5	2.8	4.31E-06	5.46E-05
12	11	660	660	3,960	1.9	2.6	4.00E-06	5.87E-05
13	12	720	720	4,680	0	1.9	2.92E-06	6.16E-05
14	13	780	780	5,460		0.0	0.00E+00	6.16E-05

ตารางที่ ง-17. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.8 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				39.5			
2	1	60	60	60	31	8.5	1.31E-05	1.31E-05
3	2	120	120	180	27	4.0	6.16E-06	1.92E-05
4	3	180	180	360	23.5	3.5	5.39E-06	2.46E-05
5	4	240	240	600	20.2	3.3	5.08E-06	2.97E-05
6	5	300	300	900	17.1	3.1	4.77E-06	3.45E-05
7	6	360	360	1,260	14	3.1	4.77E-06	3.93E-05
8	7	420	420	1,680	11	3.0	4.62E-06	4.39E-05
9	8	480	480	2,160	8.1	2.9	4.46E-06	4.83E-05
10	9	540	540	2,700	5.2	2.9	4.46E-06	5.28E-05
11	10	600	600	3,300	2.3	2.9	4.46E-06	5.73E-05
12	11	660	660	3,960	0	2.3	3.54E-06	6.08E-05
13	12	720	720	4,680		0.0	0.00E+00	6.08E-05

ตารางที่ ง-18. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ 60 วันด้วยอยู่ที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0		60	60	37.7			
2	1	60	120	180	34.9	2.8	4.31E-06	4.31E-06
3	2	120	180	360	33.8	1.1	1.69E-06	6.00E-06
4	3	180	240	600	32.8	1.0	1.54E-06	7.54E-06
5	4	240	300	900	31.5	1.3	2.00E-06	9.54E-06
6	5	300	360	1,260	30.5	1.0	1.54E-06	1.11E-05
7	6	360	420	1,680	29.6	0.9	1.39E-06	1.25E-05
8	7	420	480	2,160	28.8	0.8	1.23E-06	1.37E-05
9	8	480	540	2,700	27.9	0.9	1.39E-06	1.51E-05
10	9	540	600	3,300	27.1	0.8	1.23E-06	1.63E-05
11	10	600	660	3,960	26.3	0.8	1.23E-06	1.75E-05
12	11	660	720	4,680	25.6	0.7	1.08E-06	1.86E-05
13	12	720	780	5,460	24.8	0.8	1.23E-06	1.99E-05
14	13	780	840	6,300	24.1	0.7	1.08E-06	2.09E-05
15	14	840	900	7,200	23.5	0.6	9.24E-07	2.19E-05
16	15	900	960	8,160	22.8	0.7	1.08E-06	2.29E-05
17	16	960	1,020	9,180	22.1	0.7	1.08E-06	2.40E-05
18	17	1020	1,080	10,260	21.5	0.6	9.24E-07	2.49E-05
19	18	1080	1,140	11,400	20.8	0.7	1.08E-06	2.60E-05
20	19	1140	1,200	12,600	20.2	0.6	9.24E-07	2.69E-05
21	20	1200	1,260	13,860	19.6	0.6	9.24E-07	2.79E-05
22	21	1260	1,320	15,180	19	0.6	9.24E-07	2.88E-05
23	22	1320	1,380	16,560	18.4	0.6	9.24E-07	2.97E-05

ตารางที่ ง-18. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ 60 วันตัวอย่างที่ 1 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	Level (cm)	d_level (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
24	23	1380	1,440	18,000	17.8	0.6	9.24E-07	3.06E-05
25	24	1440	1,500	19,500	17.2	0.6	9.24E-07	3.16E-05
26	25	1500	1,560	21,060	16.6	0.6	9.24E-07	3.25E-05
27	26	1560	1,620	22,680	16.1	0.5	7.70E-07	3.33E-05
28	27	1620			15.6	0.5	7.70E-07	3.40E-05

ตารางที่ ง-19. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ 60 วันตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				29.2			
2	1	60	60	60	27.4	1.8	2.77E-06	2.77E-06
3	2	120	120	180	26.6	0.8	1.23E-06	4.00E-06
4	3	180	180	360	26	0.6	9.24E-07	4.93E-06
5	4	240	240	600	25.6	0.4	6.16E-07	5.54E-06
6	5	300	300	900	25.1	0.5	7.70E-07	6.31E-06
7	6	360	360	1,260	24.7	0.4	6.16E-07	6.93E-06
8	7	420	420	1,680	24.4	0.3	4.62E-07	7.39E-06
9	8	480	480	2,160	24	0.4	6.16E-07	8.00E-06
10	9	540	540	2,700	23.7	0.3	4.62E-07	8.47E-06
11	10	600	600	3,300	23.4	0.3	4.62E-07	8.93E-06
12	11	660	660	3,960	22.8	0.6	9.24E-07	9.85E-06

ตารางที่ ง-19. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
13	12	720	720	4,680	22.5	0.3	4.62E-07	1.03E-05
14	13	780	780	5,460	22.2	0.3	4.62E-07	1.08E-05
15	14	840	840	6,300	21.9	0.3	4.62E-07	1.12E-05
16	15	900	900	7,200	21.6	0.3	4.62E-07	1.17E-05
17	16	960	960	8,160	21.4	0.2	3.08E-07	1.20E-05
18	17	1020	1,020	9,180	21.1	0.3	4.62E-07	1.25E-05
19	18	1080	1,080	10,260	20.9	0.2	3.08E-07	1.28E-05
20	19	1140	1,140	11,400	20.6	0.3	4.62E-07	1.32E-05
21	20	1200	1,200	12,600	20.4	0.2	3.08E-07	1.35E-05
22	21	1260	1,260	13,860	20.1	0.3	4.62E-07	1.40E-05
23	22	1320	1,320	15,180	19.9	0.2	3.08E-07	1.43E-05
24	23	1380	1,380	16,560	19.7	0.2	3.08E-07	1.46E-05
25	24	1440	1,440	18,000	19.5	0.2	3.08E-07	1.49E-05
26	25	1500	1,500	19,500	19.2	0.3	4.62E-07	1.54E-05
27	26	1560	1,560	21,060	19	0.2	3.08E-07	1.57E-05
28	27	1620	1,620	22,680	18.7	0.3	4.62E-07	1.62E-05

ตารางที่ ง-20. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				37			
2	1	60	60	60	35.2	1.8	2.77E-06	2.77E-06
3	2	120	120	180	33.8	1.4	2.16E-06	4.93E-06
4	3	180	180	360	32.4	1.4	2.16E-06	7.08E-06
5	4	240	240	600	31.3	1.1	1.69E-06	8.77E-06
6	5	300	300	900	30.2	1.1	1.69E-06	1.05E-05
7	6	360	360	1,260	29.3	0.9	1.39E-06	1.19E-05
8	7	420	420	1,680	28.3	1.0	1.54E-06	1.34E-05
9	8	480	480	2,160	27.4	0.9	1.39E-06	1.48E-05
10	9	540	540	2,700	26.6	0.8	1.23E-06	1.60E-05
11	10	600	600	3,300	26.1	0.5	7.70E-07	1.68E-05
12	11	660	660	3,960	25.6	0.5	7.70E-07	1.75E-05
13	12	720	720	4,680	24.7	0.9	1.39E-06	1.89E-05
14	13	780	780	5,460	23.9	0.8	1.23E-06	2.02E-05
15	14	840	840	6,300	23.1	0.8	1.23E-06	2.14E-05
16	15	900	900	7,200	22.2	0.9	1.39E-06	2.28E-05
17	16	960	960	8,160	21.5	0.7	1.08E-06	2.39E-05
18	17	1020	1,020	9,180	20.6	0.9	1.39E-06	2.52E-05
19	18	1080	1,080	10,260	19.9	0.7	1.08E-06	2.63E-05
20	19	1140	1,140	11,400	19.1	0.8	1.23E-06	2.76E-05
21	20	1200	1,200	12,600	18.4	0.7	1.08E-06	2.86E-05
22	21	1260	1,260	13,860	17.6	0.8	1.23E-06	2.99E-05

ตารางที่ ง-20. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
23	22	1320	1,320	15,180	16.8	0.8	1.23E-06	3.11E-05
24	23	1380	1,380	16,560	16	0.8	1.23E-06	3.23E-05
25	24	1440	1,440	18,000	15.2	0.8	1.23E-06	3.36E-05
26	25	1500	1,500	19,500	14.6	0.6	9.24E-07	3.45E-05
27	26	1560	1,560	21,060	13.8	0.8	1.23E-06	3.57E-05
28	27	1620	1,620	22,680	13	0.8	1.23E-06	3.69E-05

ตารางที่ ง-21. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				35.2			
2	1	60	60	60	31.4	3.8	5.85E-06	5.85E-06
3	2	120	120	180	30.2	1.2	1.85E-06	7.70E-06
4	3	180	180	360	29.4	0.8	1.23E-06	8.93E-06
5	4	240	240	600	28.9	0.5	7.70E-07	9.70E-06
6	5	300	300	900	28.1	0.8	1.23E-06	1.09E-05
7	6	360	360	1,260	27.5	0.6	9.24E-07	1.19E-05
8	7	420	420	1,680	26.6	0.9	1.39E-06	1.32E-05
9	8	480	480	2,160	25.8	0.8	1.23E-06	1.45E-05
10	9	540	540	2,700	25	0.8	1.23E-06	1.57E-05

ตารางที่ ง-21. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
11	10	600	600	3,300	24.3	0.7	1.08E-06	1.68E-05
12	11	660	660	3,960	23.5	0.8	1.23E-06	1.80E-05
13	12	720	720	4,680	22.7	0.8	1.23E-06	1.92E-05
14	13	780	780	5,460	21.9	0.8	1.23E-06	2.05E-05
15	14	840	840	6,300	21.1	0.8	1.23E-06	2.17E-05
16	15	900	900	7,200	20.3	0.8	1.23E-06	2.29E-05
17	16	960	960	8,160	19.6	0.7	1.08E-06	2.40E-05
18	17	1020	1,020	9,180	18.9	0.7	1.08E-06	2.51E-05
19	18	1080	1,080	10,260	18.2	0.7	1.08E-06	2.62E-05
20	19	1140	1,140	11,400	17.5	0.7	1.08E-06	2.72E-05
21	20	1200	1,200	12,600	16.8	0.7	1.08E-06	2.83E-05
22	21	1260	1,260	13,860	16.1	0.7	1.08E-06	2.94E-05
23	22	1320	1,320	15,180	15.4	0.7	1.08E-06	3.05E-05
24	23	1380	1,380	16,560	14.7	0.7	1.08E-06	3.16E-05
25	24	1440	1,440	18,000	14	0.7	1.08E-06	3.26E-05
26	25	1500	1,500	19,500	13.3	0.7	1.08E-06	3.37E-05

ตารางที่ ง-22. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 12 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				42.9			
2	1	60	60	60	36.9	6.0	9.24E-06	9.24E-06
3	2	120	120	180	34.7	2.2	3.39E-06	1.26E-05
4	3	180	180	360	32.4	2.3	3.54E-06	1.62E-05
5	4	240	240	600	29.9	2.5	3.85E-06	2.00E-05
6	5	300	300	900	28.6	1.3	2.00E-06	2.20E-05
7	6	360	360	1,260	27.3	1.3	2.00E-06	2.40E-05
8	7	420	420	1,680	27	0.3	4.62E-07	2.45E-05
9	8	480	480	2,160	26.5	0.5	7.70E-07	2.52E-05
10	9	540	540	2,700	26.2	0.3	4.62E-07	2.57E-05
11	10	600	600	3,300	25	1.2	1.85E-06	2.76E-05
12	11	660	660	3,960	24	1.0	1.54E-06	2.91E-05
13	12	720	720	4,680	23.5	0.5	7.70E-07	2.99E-05
14	13	780	780	5,460	23	0.5	7.70E-07	3.06E-05
15	14	840	840	6,300	22.7	0.3	4.62E-07	3.11E-05
16	15	900	900	7,200	22	0.7	1.08E-06	3.22E-05
17	16	960	960	8,160	21.2	0.8	1.23E-06	3.34E-05
18	17	1020	1,020	9,180	21	0.2	3.08E-07	3.37E-05
19	18	1080	1,080	10,260	20	1.0	1.54E-06	3.53E-05
20	19	1140	1,140	11,400	19	1.0	1.54E-06	3.68E-05
21	20	1200	1,200	12,600	18.2	0.8	1.23E-06	3.80E-05
22	21	1260	1,260	13,860	17.3	0.9	1.39E-06	3.94E-05

ตารางที่ ง-22. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำไนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 12 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
23	22	1320	1,320	15,180	17	0.3	4.62E-07	3.99E-05
24	23	1380	1,380	16,560	16.5	0.5	7.70E-07	4.06E-05
25	24	1440	1,440	18,000	16	0.5	7.70E-07	4.14E-05
26	25	1500	1,500	19,500	15.2	0.8	1.23E-06	4.26E-05
27	26	1560	1,560	21,060	14.8	0.4	6.16E-07	4.33E-05
28	27	1620	1,620	22,680	14	0.8	1.23E-06	4.45E-05

ตารางที่ ง-23. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำไนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 12 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				45.7			
2	1	60	60	60	44.4	1.3	2.00E-06	2.00E-06
3	2	120	120	180	42.2	2.2	3.39E-06	5.39E-06
4	3	180	180	360	41.5	0.7	1.08E-06	6.47E-06
5	4	240	240	600	40	1.5	2.31E-06	8.77E-06
6	5	300	300	900	39	1.0	1.54E-06	1.03E-05
7	6	360	360	1,260	38.1	0.9	1.39E-06	1.17E-05
8	7	420	420	1,680	37.1	1.0	1.54E-06	1.32E-05
9	8	480	480	2,160	36.2	0.9	1.39E-06	1.46E-05
10	9	540	540	2,700	35.2	1.0	1.54E-06	1.62E-05

ตารางที่ ง-23. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 12 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
11	10	600	600	3,300	34.6	0.6	9.24E-07	1.71E-05
12	11	660	660	3,960	33.6	1.0	1.54E-06	1.86E-05
13	12	720	720	4,680	33	0.6	9.24E-07	1.96E-05
14	13	780	780	5,460	32	1.0	1.54E-06	2.11E-05
15	14	840	840	6,300	31.1	0.9	1.39E-06	2.25E-05
16	15	900	900	7,200	30.5	0.6	9.24E-07	2.34E-05
17	16	960	960	8,160	29.8	0.7	1.08E-06	2.45E-05
18	17	1020	1,020	9,180	28.8	1.0	1.54E-06	2.60E-05
19	18	1080	1,080	10,260	28.2	0.6	9.24E-07	2.69E-05
20	19	1140	1,140	11,400	27.3	0.9	1.39E-06	2.83E-05
21	20	1200	1,200	12,600	26.6	0.7	1.08E-06	2.94E-05
22	21	1260	1,260	13,860	26	0.6	9.24E-07	3.03E-05
23	22	1320	1,320	15,180	25	1.0	1.54E-06	3.19E-05
24	23	1380	1,380	16,560	24.4	0.6	9.24E-07	3.28E-05
25	24	1440	1,440	18,000	23.8	0.6	9.24E-07	3.37E-05
26	25	1500	1,500	19,500	23.1	0.7	1.08E-06	3.48E-05
27	26	1560	1,560	21,060	22.5	0.6	9.24E-07	3.57E-05
28	27	1620	1,620	22,680	21.5	1.0	1.54E-06	3.73E-05

ตารางที่ ง-24. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 14 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				33			
2	1	60	60	60	31	2.0	3.08E-06	3.08E-06
3	2	120	120	180	29.5	1.5	2.31E-06	5.39E-06
4	3	180	180	360	28.5	1.0	1.54E-06	6.93E-06
5	4	240	240	600	27	1.5	2.31E-06	9.24E-06
6	5	300	300	900	26	1.0	1.54E-06	1.08E-05
7	6	360	360	1,260	25	1.0	1.54E-06	1.23E-05
8	7	420	420	1,680	24.5	0.5	7.70E-07	1.31E-05
9	8	480	480	2,160	24	0.5	7.70E-07	1.39E-05
10	9	540	540	2,700	23.7	0.3	4.62E-07	1.43E-05
11	10	600	600	3,300	23.2	0.5	7.70E-07	1.51E-05
12	11	660	660	3,960	22.6	0.6	9.24E-07	1.60E-05
13	12	720	720	4,680	21.8	0.8	1.23E-06	1.72E-05
14	13	780	780	5,460	21.5	0.3	4.62E-07	1.77E-05
15	14	840	840	6,300	21	0.5	7.70E-07	1.85E-05
16	15	900	900	7,200	20.6	0.4	6.16E-07	1.91E-05
17	16	960	960	8,160	20	0.6	9.24E-07	2.00E-05
18	17	1020	1,020	9,180	19.5	0.5	7.70E-07	2.08E-05
19	18	1080	1,080	10,260	19.2	0.3	4.62E-07	2.12E-05
20	19	1140	1,140	11,400	18.5	0.7	1.08E-06	2.23E-05
21	20	1200	1,200	12,600	18	0.5	7.70E-07	2.31E-05
22	21	1260	1,260	13,860	17.6	0.4	6.16E-07	2.37E-05

ตารางที่ ง-24. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่อความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 14 โมลาร์ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1 (ต่อ)

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
23	22	1320	1,320	15,180	17	0.6	9.24E-07	2.46E-05
24	23	1380	1,380	16,560	16.9	0.1	1.54E-07	2.48E-05
25	24	1440	1,440	18,000	16.5	0.4	6.16E-07	2.54E-05
26	25	1500	1,500	19,500	16	0.5	7.70E-07	2.62E-05
27	26	1560	1,560	21,060	15	1.0	1.54E-06	2.77E-05
28	27	1620	1,620	22,680	14.4	0.6	9.24E-07	2.86E-05

ตารางที่ ง-25. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.4 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				30			
2	1	60	60	60	24.8	5.2	8.00E-06	8.00E-06
3	2	120	120	180	21.8	3.0	4.62E-06	1.26E-05
4	3	180	180	360	17.6	4.2	6.47E-06	1.91E-05
5	4	240	240	600	14.5	3.1	4.77E-06	2.39E-05
6	5	300	300	900	12.8	1.7	2.62E-06	2.65E-05
7	6	360	360	1,260	8.9	3.9	6.00E-06	3.25E-05
8	7	420	420	1,680	6.3	2.6	4.00E-06	3.65E-05
9	8	480	480	2,160	3.7	2.6	4.00E-06	4.05E-05

ตารางที่ ง-26. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.4 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				31			
2	1	60	60	60	25.7	5.3	8.16E-06	8.16E-06
3	2	120	120	180	22.3	3.4	5.23E-06	1.34E-05
4	3	180	180	360	19.4	2.9	4.46E-06	1.79E-05
5	4	240	240	600	15.9	3.5	5.39E-06	2.32E-05
6	5	300	300	900	12.1	3.8	5.85E-06	2.91E-05
7	6	360	360	1,260	9.8	2.3	3.54E-06	3.26E-05
8	7	420	420	1,680	7.6	2.2	3.39E-06	3.60E-05
9	8	480	480	2,160	5.3	2.3	3.54E-06	3.96E-05
10	9	540	540	2,700	3.1	2.2	3.39E-06	4.29E-05
11	10	600	600	3,300		3.1	4.77E-06	4.77E-05
12	11	660	660	3,960		0.0	0.00E+00	4.77E-05

ตารางที่ ง-27. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al
เท่ากับ 2.6 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				41.5			
2	1	60	60	60	37.5	4.0	6.16E-06	6.16E-06
3	2	120	120	180	35.3	2.2	3.39E-06	9.54E-06
4	3	180	180	360	33.2	2.1	3.23E-06	1.28E-05
5	4	240	240	600	31.4	1.8	2.77E-06	1.55E-05
6	5	300	300	900	29.6	1.8	2.77E-06	1.83E-05
7	6	360	360	1,260	28	1.6	2.46E-06	2.08E-05
8	7	420	420	1,680	26.3	1.7	2.62E-06	2.34E-05
9	8	480	480	2,160	24.7	1.6	2.46E-06	2.59E-05
10	9	540	540	2,700	23.1	1.6	2.46E-06	2.83E-05
11	10	600	600	3,300	21.6	1.5	2.31E-06	3.06E-05
12	11	660	660	3,960	20	1.6	2.46E-06	3.31E-05
13	12	720	720	4,680	18.6	1.4	2.16E-06	3.53E-05
14	13	780	780	5,460	17	1.6	2.46E-06	3.77E-05
15	14	840	840	6,300	15.7	1.3	2.00E-06	3.97E-05
16	15	900	900	7,200	14.1	1.6	2.46E-06	4.22E-05
17	16	960	960	8,160	12.8	1.3	2.00E-06	4.42E-05
18	17	1020	1,020	9,180	11.4	1.4	2.16E-06	4.63E-05
19	18	1080	1,080	10,260		11.4	1.75E-05	6.39E-05
20	19	1140	1,140	11,400		0.0	0.00E+00	6.39E-05

ตารางที่ ง-28. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al
เท่ากับ 2.6 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				37.2			
2	1	60	60	60	33.1	4.1	6.31E-06	6.31E-06
3	2	120	120	180	31.3	1.8	2.77E-06	9.08E-06
4	3	180	180	360	29.5	1.8	2.77E-06	1.19E-05
5	4	240	240	600	27.8	1.7	2.62E-06	1.45E-05
6	5	300	300	900	26.1	1.7	2.62E-06	1.71E-05
7	6	360	360	1,260	24.4	1.7	2.62E-06	1.97E-05
8	7	420	420	1,680	22.8	1.6	2.46E-06	2.22E-05
9	8	480	480	2,160	21.3	1.5	2.31E-06	2.45E-05
10	9	540	540	2,700	19.7	1.6	2.46E-06	2.69E-05
11	10	600	600	3,300	18	1.7	2.62E-06	2.96E-05
12	11	660	660	3,960	16.5	1.5	2.31E-06	3.19E-05
13	12	720	720	4,680	14.8	1.7	2.62E-06	3.45E-05
14	13	780	780	5,460	13.5	1.3	2.00E-06	3.65E-05
15	14	840	840	6,300	12.3	1.2	1.85E-06	3.83E-05
16	15	900	900	7,200	11.1	1.2	1.85E-06	4.02E-05
17	16	960	960	8,160	9.9	1.2	1.85E-06	4.20E-05
18	17	1020	1,020	9,180	8.8	1.1	1.69E-06	4.37E-05
19	18	1080	1,080	10,260	7.7	1.1	1.69E-06	4.54E-05
20	19	1140	1,140	11,400	6.7	1.0	1.54E-06	4.70E-05
21	20	1200	1,200	12,600	5.7	1.0	1.54E-06	4.85E-05
22	21	1260	1,260	13,860		5.7	8.77E-06	5.73E-05

ตารางที่ ๒๙-29. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.8 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ 1

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm)	d_level(cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				41.5			
2	1	60	60	60	37.5	4.0	6.16E-06	6.16E-06
3	2	120	120	180	35.6	1.9	2.92E-06	9.08E-06
4	3	180	180	360	34	1.6	2.46E-06	1.15E-05
5	4	240	240	600	32.5	1.5	2.31E-06	1.39E-05
6	5	300	300	900	31	1.5	2.31E-06	1.62E-05
7	6	360	360	1,260	29.6	1.4	2.16E-06	1.83E-05
8	7	420	420	1,680	28.2	1.4	2.16E-06	2.05E-05
9	8	480	480	2,160	26.8	1.4	2.16E-06	2.26E-05
10	9	540	540	2,700	25.5	1.3	2.00E-06	2.46E-05
11	10	600	600	3,300	24.2	1.3	2.00E-06	2.66E-05
12	11	660	660	3,960	23	1.2	1.85E-06	2.85E-05
13	12	720	720	4,680	21.7	1.3	2.00E-06	3.05E-05
14	13	780	780	5,460	20.4	1.3	2.00E-06	3.25E-05
15	14	840	840	6,300	19.2	1.2	1.85E-06	3.43E-05
16	15	900	900	7,200	18	1.2	1.85E-06	3.62E-05
17	16	960	960	8,160	16.7	1.3	2.00E-06	3.82E-05
18	17	1020	1,020	9,180	15.5	1.2	1.85E-06	4.00E-05
19	18	1080	1,080	10,260	14.3	1.2	1.85E-06	4.19E-05
20	19	1140	1,140	11,400	13.1	1.2	1.85E-06	4.37E-05
21	20	1200	1,200	12,600	12	1.1	1.69E-06	4.54E-05
22	21	1260	1,260	13,860	10.9	1.1	1.69E-06	4.71E-05

ตารางที่ ง-30. ผลการทดลองการซึมผ่านของน้ำในซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตต่ออัตราส่วน Si/ Al เท่ากับ 2.8 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ 2

No.	Time (min)	Time (sec)	d_time (sec)	Cum_time (sec)	level (cm) (cm)	d_level(cm) (cm)	v (m ³)	Cum_v (m ³)
1	0				35.2			
2	1	60	60	60	31.2	4.0	6.16E-06	6.16E-06
3	2	120	120	180	29.3	1.9	2.92E-06	9.08E-06
4	3	180	180	360	28	1.3	2.00E-06	1.11E-05
5	4	240	240	600	26.1	1.9	2.92E-06	1.40E-05
6	5	300	300	900	24.1	2.0	3.08E-06	1.71E-05
7	6	360	360	1,260	22.3	1.8	2.77E-06	1.99E-05
8	7	420	420	1,680	20.5	1.8	2.77E-06	2.26E-05
9	8	480	480	2,160	18.9	1.6	2.46E-06	2.51E-05
10	9	540	540	2,700	17.3	1.6	2.46E-06	2.76E-05
11	10	600	600	3,300	15.7	1.6	2.46E-06	3.00E-05
12	11	660	660	3,960	14.2	1.5	2.31E-06	3.23E-05
13	12	720	720	4,680	12.8	1.4	2.16E-06	3.45E-05
14	13	780	780	5,460	11.8	1.0	1.54E-06	3.60E-05
15	14	840	840	6,300	10.2	1.6	2.46E-06	3.85E-05
16	15	900	900	7,200	8.6	1.6	2.46E-06	4.09E-05
17	16	960	960	8,160	7.1	1.5	2.31E-06	4.33E-05
18	17	1020	1,020	9,180	5.7	1.4	2.16E-06	4.54E-05
19	18	1080	1,080	10,260	4.3	1.4	2.16E-06	4.76E-05
20	19	1140	1,140	11,400	3.1	1.2	1.85E-06	4.94E-05
21	20	1200	1,200	12,600		3.1	4.77E-06	5.42E-05
22	21	1260	1,260	13,860		0.0	0.00E+00	5.42E-05

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดสอบกำลังอัดของการกักกรองน้ำเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ จ-1. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3989	10	20	78.5	173	17635	224.9	229.3
90	2	3892	10	20	78.5	177	18042	230.1	
90	3	3888	10	20	78.5	179	18246	232.7	
180	1	3892	10	20	78.5	175	17838	227.5	230.1
180	2	3897	10	20	78.5	177	18042	230.1	
180	3	3967	10	20	78.5	179	18246	232.7	

ตารางที่ จ-2. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3891	10	20	78.5	187	19062	243.1	245.7
90	2	3820	10	20	78.5	191	19469	248.3	
90	3	3999	10	20	78.5	189	19266	245.7	
180	1	3874	10	20	78.5	188	19164	244.4	247.0
180	2	3799	10	20	78.5	191	19469	248.3	
180	3	3915	10	20	78.5	191	19469	248.3	

ตารางที่ จ-3. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่
ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3820	10	20	78.5	230	23445.5	299.1	301
90	2	3998	10	20	78.5	231	23547.4	300.4	
90	3	3822	10	20	78.5	234	23853.2	304.3	
180	1	4063	10	20	78.5	213	21712.5	277.0	279
180	2	4027	10	20	78.5	214	21814.5	278.3	
180	3	3857	10	20	78.5	217	22120.3	282.2	

ตารางที่ จ-4. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่
ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3891	10	20	78.5	205	20897.0	266.6	264.4
90	2	3856	10	20	78.5	203	20693.2	264.0	
90	3	3812	10	20	78.5	202	20591.2	262.6	
180	1	3986	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	232.3
180	2	3813	10	20	78.5	180	18348.6	234.0	
180	3	3810	10	20	78.5	178	18144.8	231.4	

ตารางที่ จ-5. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 16 โมลาร์

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3736	10	20	78.5	261	26605.5	339.4	338.1
90	2	3661	10	20	78.5	260	26503.6	338.1	
90	3	3842	10	20	78.5	259	26401.6	336.8	
180	1	3736	10	20	78.5	253	25790.0	329.0	332.0
180	2	3701	10	20	78.5	259	26401.6	336.8	
180	3	3842	10	20	78.5	254	25891.9	330.3	

ตารางที่ จ-6. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 โมลาร์

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3785	10	20	78.5	230	23445.5	299.1	300.4
90	2	3775	10	20	78.5	229	23343.5	297.8	
90	3	3789	10	20	78.5	234	23853.2	304.3	
180	1	3785	10	20	78.5	231	23547.4	300.4	298.2
180	2	3713	10	20	78.5	227	23139.7	295.2	
180	3	3789	10	20	78.5	230	23445.5	299.1	

ตารางที่ จ-7. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต
อัตราส่วน Si/Al = 2.2

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3829	10	20	78.5	135	13761	175.5	176.4
90	2	3845	10	20	78.5	136	13863	176.8	
90	3	3888	10	20	78.5	136	13863	176.8	
180	1	3790	10	20	78.5	115	11722	149.5	151.3
180	2	3721	10	20	78.5	118	12028	153.4	
180	3	3931	10	20	78.5	116	11824	150.8	

ตารางที่ จ-8. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต
อัตราส่วน Si/Al = 2.4

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3779	10	20	78.5	136	13863	176.8	177.7
90	2	3757	10	20	78.5	137	13965	178.1	
90	3	3730	10	20	78.5	137	13965	178.1	
180	1	3955	10	20	78.5	120	12232	156.0	156.0
180	2	3738	10	20	78.5	122	12436	158.6	
180	3	3778	10	20	78.5	118	12028	153.4	

ตารางที่ จ-9. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต
อัตราส่วน Si/ Al = 2.6

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3652	10	20	78.5	150	15290	195.0	197.2
90	2	3672	10	20	78.5	151	15392	196.3	
90	3	3927	10	20	78.5	154	15698	200.2	
180	1	3707	10	20	78.5	147	14984	191.1	189.0
180	2	3739	10	20	78.5	144	14678	187.2	
180	3	3788	10	20	78.5	145	14780	188.5	

ตารางที่ จ-10. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต
อัตราส่วน Si/ Al = 2.8

AGE (Days)	SAMP No.	WEIGHT (g)	DIMENTION (cm)		AREA (cm ²)	LOAD		STRENGTH (ksc)	AVG (ksc)
			DIAMETER	HEIGHT		KN	Kg		
90	1	3676	10	20	78.5	153	15596	198.9	195.5
90	2	3744	10	20	78.5	149	15188	193.7	
90	3	3654	10	20	78.5	149	15188	193.7	
180	1	3735	10	20	78.5	144	14678	187.2	183.3
180	2	3691	10	20	78.5	142	14475	184.6	
180	3	3774	10	20	78.5	137	13965	178.1	

ตารางที่ จ-11. สรุปผลทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในซัลเฟตที่อายุ 90 วัน

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	Area (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก/ซม ²)			ค่าเฉลี่ย (กก/ซม ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	17635	18042	18246	224	230	232	229
2	10-M	78.5	78.5	78.5	19062	19469	19266	243	248	245	246
3	12-M	78.5	78.5	78.5	23445	23547	23853	299	300	304	301
4	14-M	78.5	78.5	78.5	20897	20693	20591	266	264	262	264
5	16-M	78.5	78.5	78.5	26605	26503	26401	339	338	336	338
6	18-M	78.5	78.5	78.5	23445	23343	23853	299	297	304	300
7	Si/Al=2.2	78.5	78.5	78.5	13761	13863	13863	175	176	176	176
8	Si/Al=2.4	78.5	78.5	78.5	13863	13965	13965	176	178	178	178
9	Si/Al=2.6	78.5	78.5	78.5	15290	15392	15698	195	196	200	197
10	Si/Al=2.8	78.5	78.5	78.5	15596	15188	15188	198	193	193	195

ตารางที่ จ-12. สรุปผลทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในซัลเฟตที่อายุ 180 วัน

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	Area (ซม ²)			Maximum Load (กก.)			Stress (กก/ซม ²)			ค่าเฉลี่ย (กก/ซม ²)
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	8-M	78.5	78.5	78.5	17838	18042	18246	227	230	232	230
2	10-M	78.5	78.5	78.5	19164	19469	19469	244	248	248	247
3	12-M	78.5	78.5	78.5	21712	21814	22120	277	278	282	279
4	14-M	78.5	78.5	78.5	18144	18348	18144	231	234	231	232
5	16-M	78.5	78.5	78.5	25790	26401	25891	329	336	330	332
6	18-M	78.5	78.5	78.5	23547	23139	23445	300	295	299	298
7	Si/Al=2.2	78.5	78.5	78.5	11722	12028	11824	149	153	150	151
8	Si/Al=2.4	78.5	78.5	78.5	12232	12436	12028	156	158	153	156
9	Si/Al=2.6	78.5	78.5	78.5	14984	14678	14780	191	187	188	189
10	Si/Al=2.8	78.5	78.5	78.5	14678	14475	13965	187	184	178	183

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักกรองของกรดซัลฟิวริกต่อ
จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ ฉ-1. แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก
เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ของกลุ่มที่แปรเปลี่ยน NaOH

Sample	No.	Weight of Concrete in Sulfuric Acid 3 % by weight					
		Initial	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
8M	1	3759	3757	3756	3754	3750	3739
	2	3736	3736	3730	3727	3720	3718
	3	3785	3781	3780	3775	3774	3770
Average		3760	3758	3755	3752	3748	3742
Loss (%)			-0.05	-0.12	-0.21	-0.32	-0.47
10M	1	3757	3757	3751	3744	3740	3738
	2	3687	3685	3684	3677	3669	3660
	3	3769	3766	3762	3759	3755	3749
Average		3738	3736	3732	3727	3721	3716
Loss (%)			-0.04	-0.14	-0.29	-0.44	-0.59
12M	1	3753	3748	3740	3737	3735	3727
	2	3701	3695	3681	3674	3670	3666
	3	3957	3950	3948	3936	3928	3924
Average		3804	3798	3790	3782	3778	3772
Loss (%)			-0.16	-0.37	-0.56	-0.68	-0.82
14M	1	3711	3705	3698	3694	3684	3674
	2	3778	3771	3764	3758	3755	3746
	3	3711	3699	3695	3690	3688	3683
Average		3733	3725	3719	3714	3709	3701
Loss (%)			-0.22	-0.38	-0.52	-0.65	-0.87

ตารางที่ ฉ-1. แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก
เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ของกลุ่มที่แปรเปลี่ยน NaOH (ต่อ)

Sample	No.	Weight of Concrete in Sulfuric Acid 3 % by weight					
		Initial	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
16M	1	3745	3740	3735	3728	3720	3715
	2	3786	3782	3780	3774	3756	3738
	3	3707	3698	3690	3687	3682	3677
Average		3746	3740	3735	3730	3719	3710
Loss (%)			-0.16	-0.29	-0.44	-0.71	-0.96
18M	1	3729	3720	3707	3696	3692	3689
	2	3752	3741	3738	3729	3728	3702
	3	3854	3847	3843	3838	3828	3820
Average		3778	3769	3763	3754	3749	3737
Loss (%)			-0.24	-0.41	-0.64	-0.77	-1.09

ตารางที่ ฉ-2. แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก
เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของกลุ่มที่แปรเปลี่ยน NaOH

Sample	No.	Weight of Concrete in Sulfuric Acid 5 % by weight					
		Initial	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
8M	1	3944	3937	3930	3923	3919	3917
	2	3753	3745	3741	3737	3729	3726
	3	3751	3746	3738	3732	3728	3720
Average		3816	3809	3803	3797	3792	3788
Loss (%)			-0.17	-0.34	-0.49	-0.63	-0.74
10M	1	3783	3775	3763	3661	3660	3657
	2	3677	3670	3659	3765	3759	3748
	3	3825	3819	3815	3802	3793	3785

ตารางที่ ฉ-2. แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก
เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของกลุ่มที่แปรเปลี่ยน NaOH (ต่อ)

Sample	No.	Weight of Concrete in Sulfuric Acid 3 % by weight					
		Initial	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
Average		3762	3755	3746	3743	3737	3730
Loss (%)			-0.19	-0.43	-0.51	-0.65	-0.84
12M	1	3753	3780	3776	3769	3757	3748
	2	3701	3799	3788	3785	3771	3763
	3	3957	3714	3704	3697	3691	3688
Average		3804	3764	3756	3750	3740	3733
Loss (%)			-1.03	-1.25	-1.40	-1.68	-1.86
14M	1	3753	3743	3736	3719	3684	3705
	2	3687	3658	3652	3637	3755	3630
	3	3698	3687	3679	3664	3688	3651
Average		3713	3696	3689	3673	3709	3662
Loss (%)			-0.45	-0.64	-1.06	-0.10	-1.36
16M	1	3676	3661	3658	3650	3644	3626
	2	3825	3815	3800	3799	3787	3768
	3	3808	3766	3763	3760	3754	3741
Average		3770	3747	3740	3736	3728	3712
Loss (%)			-0.59	-0.78	-0.88	-1.10	-1.54
18M	1	3729	3720	3707	3696	3692	3689
	2	3752	3741	3738	3729	3728	3702
	3	3854	3847	3843	3838	3828	3820
Average		3778	3769	3763	3754	3749	3737
Loss (%)			-0.24	-0.41	-0.64	-0.77	-1.09

ตารางที่ จ-3. แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก
เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ของกลุ่มที่แปรเปลี่ยน Si/Al

Sample	No.	Weight of Concrete in Sulfuric Acid 3 % by weight					
		Initial	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
Si/Al = 2.2	1	3683	3675	3671	3639	3604	3679
	2	3771	3760	3754	3776	3769	3760
	3	3836	3828	3825	3846	3853	3828
Average		3763	3754	3750	3754	3742	3756
Loss (%)			-0.239	-0.354	-0.257	-0.567	-0.204
Si/Al = 2.4	1	3715	3718	3715	3739	3747	3722
	2	3617	3623	3618	3641	3647	3625
	3	3662	3664	3662	3682	3689	3668
Average		3665	3668	3665	3687	3694	3672
Loss (%)			0.10	0.01	0.62	0.81	0.191
Si/Al = 2.6	1	3755	3753	3752	3768	3775	3753
	2	3656	3655	3651	3668	3676	3657
	3	3697	3696	3693	3710	3719	3699
Average		3703	3701	3699	3715	3723	3703
Loss (%)			-0.04	-0.11	0.34	0.56	0.009
Si/Al = 2.8	1	3730	3527	3522	3536	3543	3530
	2	3551	3540	3537	3552	3560	3543
	3	3827	3820	3819	3834	3843	3828
Average		3703	3629	3626	3641	3649	3634
Loss (%)			-1.99	-2.07	-1.67	-1.46	-1.864

ตารางที่ จ-4. แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก
เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของกลุ่มที่แปรเปลี่ยน Si/Al

Sample	No.	Weight of Concrete in Sulfuric Acid 5 % by weight					
		Initial	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
Si/Al = 2.2	1	3707	3733	3745	3745	3716	3809
	2	3834	3858	3874	3868	3840	3836
	3	3817	3738	3847	3845	3816	3708
Average		3786	3776	3822	3819	3791	3784
Loss(%)			-0.26	0.95	0.88	0.12	-0.04
Si/Al = 2.4	1	3676	3699	3703	3710	3686	3645
	2	3790	3826	3832	3834	3804	3793
	3	3651	3676	3684	3685	3656	3676
Average		3706	3734	3740	3743	3715	3705
Loss(%)			0.76	0.92	1.01	0.26	-0.03
Si/Al = 2.6	1	3795	3812	3811	3817	3794	3789
	2	3625	3645	3651	3650	3627	3618
	3	3652	3675	3678	3684	3655	3655
Average		3691	3711	3713	3717	3692	3687
Loss(%)			0.54	0.61	0.71	0.04	-0.09
Si/Al = 2.8	1	3665	3675	3675	3681	3663	3659
	2	3575	3587	3590	3596	3577	3639
	3	3641	3657	3698	3666	3642	3573
Average		3627	3640	3654	3648	3627	3624
Loss(%)			0.35	0.75	0.57	0.01	-0.09

ตารางที่ จ-5. สรุปผลทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3
โดยน้ำหนัก

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก						
ลำดับที่	ส่วนผสม	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
1	8-M	-0.05	-0.12	-0.21	-0.32	-0.47
2	10-M	-0.04	-0.14	-0.29	-0.44	-0.59
3	12-M	-0.16	-0.37	-0.56	-0.68	-0.82
4	14-M	-0.22	-0.38	-0.52	-0.65	-0.87
5	16-M	-0.16	-0.29	-0.44	-0.71	-0.96
6	18-M	-0.24	-0.41	-0.64	-0.77	-1.09
7	Si/Al=2.2	-0.24	-0.35	-0.26	-0.57	-0.20
8	Si/Al=2.4	0.10	0.01	0.62	0.81	0.19
9	Si/Al=2.6	-0.04	-0.11	0.34	0.56	0.01
10	Si/Al=2.8	-1.99	-2.07	-1.67	-1.46	-1.86

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่าน้ำหนักที่
บ่มในอากาศ
เครื่องหมาย - หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่าน้ำหนักที่
บ่มในอากาศ

ตารางที่ จ-6. สรุปผลทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5
โดยน้ำหนัก

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก						
ลำดับที่	ส่วนผสม	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
1	8-M	-0.17	-0.34	-0.49	-0.63	-0.74
2	10-M	-0.19	-0.43	-0.51	-0.65	-0.84
3	12-M	-1.03	-1.25	-1.40	-1.68	-1.86
4	14-M	-0.45	-0.64	-1.06	-0.10	-1.36
5	16-M	-0.59	-0.78	-0.88	-1.10	-1.54
6	18-M	-0.24	-0.41	-0.64	-0.77	-1.09
7	Si/Al=2.2	-0.26	0.95	0.88	0.12	-0.04
8	Si/Al=2.4	0.76	0.92	1.01	0.26	-0.03
9	Si/Al=2.6	0.54	0.61	0.71	0.04	-0.09
10	Si/Al=2.8	0.35	0.75	0.57	0.01	-0.09

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่ามากกว่าที่
บ่มในอากาศ
เครื่องหมาย - หมายถึง น้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในกรดมีค่าน้อยกว่าที่
บ่มในอากาศ

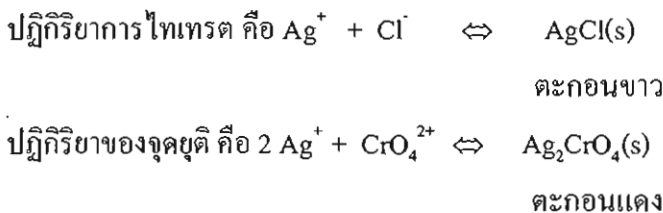
ภาคผนวก ข

**ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา
6 เดือน**

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method)

วิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติม โครเมต ไอออน (CrO_4^{2-}) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ก่อน เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ Ag_2CrO_4 ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

สารละลาย AgNO_3 0.05 m

เนื่อง AgNO_3 เป็นสารที่ไม่เสถียร ดังนั้นต้องทำการเตรียมสารละลาย โดยใช้ beaker

$$\text{จากสมการ ความเข้มข้น } \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right) = \frac{\text{g}}{\text{Mw}} \times \frac{1000}{V}$$

$$V = \text{ml ที่ต้องการเตรียม, Mw ของ } \text{AgNO}_3 = 169.87 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

จากสมการจะได้ค่า g ซึ่งก็คือปริมาณ AgNO_3 ที่ต้องใช้

วิธีเตรียม ใช้ beaker เติมน้ำกลั่น ตามค่า V ที่ใช้ จากนั้นเติม AgNO_3 ที่หามา คนจนละลายแล้วเก็บใส่ขวดสีชา

สารละลาย NaCl 0.05 M (500ml)

สารละลาย NaCl 0.05 m เอาไว้เทียบมาตรฐานหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย AgNO_3 (ใช้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

$$\text{NaCl มีมวล โมเลกุล (Mw)} = 58.5 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

ชั่ง NaCl ประมาณ 1.46 กรัม (บันทึกทศนิยม 3 ตำแหน่ง)

คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย NaCl

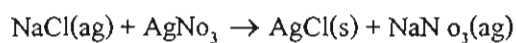
$$M_{\text{NaCl}} = \frac{g}{Mw} \times \frac{1000}{500}$$

$$= ? \frac{\text{mol}}{l}$$

เอาไปไทเทรตกับ AgNO_3 เพื่อหาความเข้มข้นของ AgNO_3 ที่แน่นอน

การเทียบมาตรฐานสารละลาย AgNO_3

การคำนวณหา AgNO_3 ที่แน่นอน จากสมการ



$$\text{จากสมการ} \quad \frac{\text{mol NaCl}}{\text{mol AgNO}_3} = \frac{1}{1}$$

$$\text{mol NaCl} = \text{mol AgNO}_3$$

$$(\text{MV})_{\text{NaCl}} = (\text{MV})_{\text{AgNO}_3}$$

$$M_{\text{NaCl}} \cdot V_{\text{NaCl}} = M_{\text{AgNO}_3} \cdot V_{\text{AgNO}_3}$$

M_{NaCl} จากการคำนวณ, V_{NaCl} จาก pipet 10 ml

$$\therefore M_{\text{AgNO}_3} = ? \frac{\text{mol}}{l}$$

ตารางที่ ข-1. แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาด 4.5×9 cm. ที่ทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 6 เดือน

NaOH	Area(cm ²)	Load(KN)	Stress(ksc)	avgStress(ksc)
8M	15.9	18.9	121	120
8M	15.9	19.8	127	
8M	15.9	17.6	113	
10M	15.9	25.1	161	162
10M	15.9	26.2	168	
10M	15.9	24.7	158	
12M	15.9	41.1	263	241
12M	15.9	38.5	247	
12M	15.9	33.4	214	
14M	15.9	32.1	206	246
14M	15.9	36.8	236	
14M	15.9	46.2	296	
Si/Al	Area(cm ²)	Load(KN)	Stress(ksc)	avgStress(ksc)
2.2	15.9	19.9	128	131
2.2	15.9	12.1	78	
2.2	15.9	29.2	187	
2.4	15.9	16.5	106	143
2.4	15.9	24	154	
2.4	15.9	26.2	168	
2.6	15.9	31.8	204	144
2.6	15.9	18	115	
2.6	15.9	17.7	113	
2.8	15.9	26.4	169	171
2.8	15.9	20.3	130	
2.8	15.9	33.5	215	

ตารางที่ ช-2. แสดงผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีต ที่ทิ้งไว้ในสภาวะ
แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 6 เดือน

Mixture	Cl at 180-วัน						
	% by weight of concrete				Cl binding		
	Acid		Water		Total	free	(t-f/l)x100
dis.	%el	dis.	%cl				
8-M	5	0.12	5	0.11	1	0.89	10.73
	15	0.1	15	0.09			
	25	0.08	25	0.07			
	35	0.07	35	0.06			
	45	0.04	45	0.03			
	55	0.03	60	0.03			
	10-M	5	0.12	5			
15		0.09	15	0.08			
25		0.07	25	0.06			
35		0.06	35	0.05			
45		0.03	45	0.02			
55		0.02	60	0.02			
12-M	5	0.13	5	0.11	1	0.87	13.37
	15	0.09	15	0.08			
	25	0.08	25	0.07			
	35	0.03	35	0.02			
	45	0.02	45	0.02			
	55	0.02	60	0.01			
14-M	5	0.13	5	0.11	1	0.81	18.57
	15	0.09	15	0.07			
	25	0.05	25	0.04			
	35	0.02	35	0.01			
	45	0.00	45	0			
	55	0.01	60	0			

ตารางที่ ข-2. แสดงผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ของจีโอฟิลิเมอร์คอนกรีต ที่ทิ้งไว้ในสภาวะ
แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 6 เดือน (ต่อ)

Mixture	Cl at 180-วัน					
	% by weight of concrete				Cl binding	
	Acid		Water			
2.2	5	0.12	5	0.09		
	15	0.09	15	0.09		
	25	0.08	25	0.08		
	35	0.09	35	0.07		
	45	0.06	45	0.05		
	55	0.05	60	0.04		
2.4	5	0.29	5	0.23		
	15	0.21	15	0.14		
	25	0.12	25	0.11		
	35	0.11	35	0.07		
	45	0.10	45	0.08		
	55	0.08	60	0.07		
2.6	5	0.25	5	0.25		
	15	0.23	15	0.19		
	25	0.16	25	0.14		
	35	0.16	35	0.14		
	45	0.14	45	0.12		
	55	0.11	60	0.11		
2.8	5	0.15	5	0.15		
	15	0.13	15	0.11		
	25	0.09	25	0.08		
	35	0.08	35	0.07		
	45	0.05	45	0.04		
	55	0.06	60	0.04		

เอกสารแสดงเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

ชื่อ ชรินทร์ เสนาวงษ์ นิสิต ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธา

จำนวน 4 บทความ ได้แก่

1. คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน
(the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete)
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5
2. กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน
(Compressive and Bond Strengths of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete)
วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ฉบับที่ 15, (2010), 13-22
3. Water Permeability in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete
Journal of Civil Engineering and Architecture Volume 4, Number 3, March 2010
(Serial Number 28)
4. การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะ
แวดล้อมทะเล (Chloride Penetration of Fly Ash-based Geopolymer Concrete under
Marine Environment) วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2
พ.ศ. - ศ.ศ. 2554

คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

ชรินทร์ เสนาวงษ์ (Charin Sanawong)¹เกียรติสุดา สมณา (Kaitsuda Somna)²ปริญญา จินดาประเสริฐ (Prinya Chindaprasirt)³วิเชียร ชาลี (Wichian Chalee)⁴¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น⁴อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (wichian@buu.ac.th)

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงคด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ทำการเตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ และอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศในห้องทดลอง ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 7 14 และ 28 วัน ทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงคด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงคดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นถึง 14 โมลาร์

Abstract: This research investigated the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. The effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, and modulus of elasticity of geopolymer concretes were studied. The geopolymer concrete were prepared from Mac Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, and 14 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. The concrete specimens were air-cured in laboratory. The compressive strength was tested at the ages of 7, 14 and 28 days. In addition, splitting tensile strength, flexural strength, and elasticity modulus of geopolymer concrete at 28-day were investigated. The results showed that compressive strength and elastic modulus of geopolymer concrete significantly increased with the increase in concentration of NaOH. Besides, splitting tensile strength and modulus of rupture also increase with NaOH concentration but they found to decrease when the NaOH concentration up to 14 molar.

KEYWORDS : Geopolymer concrete, Compressive strength, Modulus of rupture, Tensile strength, Modulus of elasticity

1. บทนำ

การพัฒนาวัสดุ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตวัสดุใหม่ให้สามารถใช้งานแทนคอนกรีตได้โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ โดยการนำสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นสูงมากระตุ้นสารเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม การยึดประสานดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันและได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในประเทศไทยเพิ่งจะเริ่มขึ้นและมีผลงานวิจัยค่อนข้างน้อย นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ [1-4] เช่น การบ่มวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al เป็นต้น โดยทำการศึกษาในลักษณะที่เป็นเพสต์ หรือ มอร์ตาร์ ทั้งนี้เพื่อจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการกำหนดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถใช้งานได้ดี ทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนภายใต้ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ ยังไม่มีมาตรฐานที่รองรับการใช้งานเหมือนกับคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจึงได้อ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์แทนคอนกรีตในประเทศไทยยังไม่มีเท่าที่ควร ทั้งที่เรามีวัสดุตั้งต้นเหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามกระบวนการศึกษาก็จำเป็นต้องมีแนวทางเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐาน หรือแม้แต่คุณสมบัติด้านความคงทนซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากเราได้คำนึงถึงการใช้งานที่ยาวนานและคุ้มค่าน่ามากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะมาเป็นวัสดุดิบ เนื่องจากเป็นเถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติทางปฏิกิริยาที่ต่ำ สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์หรือผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์ได้ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งประเด็นไปที่คุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง และ โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการใช้งานจริงต่อไป

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความด่างจำเพาะเท่ากับ 2.23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความด่างจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความด่างจำเพาะเท่ากับ 2.72

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความด่างจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

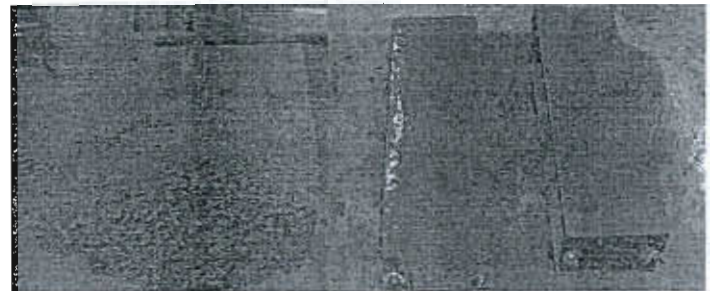
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO ₂ (%)	32.10
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ (%)	19.90
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	16.91
Calcium Oxide, CaO (%)	18.75
Magnesium Oxide, MgO (%)	3.47
Sodium Oxide, Na ₂ O (%)	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O (%)	2.38
Sulfur Trioxide, SO ₃ (%)	2.24
Loss On Ignition,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

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

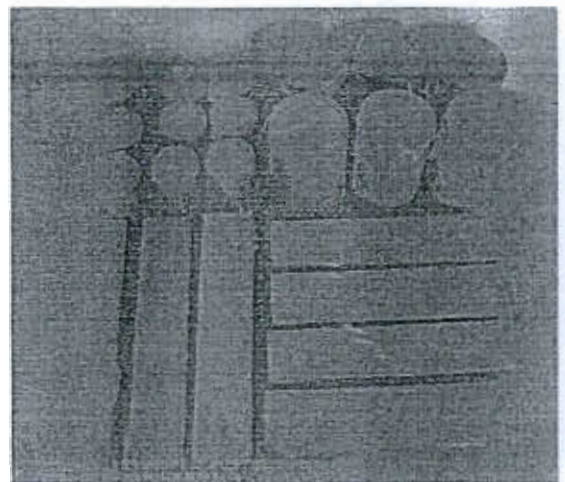
การศึกษาค้นคว้านี้ได้เตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ แสดงดังตารางที่ 2 ทำการหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มม.³ เพื่อทดสอบกำลังอัด ตัวอย่างรูปทรงกระบอก 150x300 มม. เพื่อทดสอบกำลังดึงแยกแบบผ่าซีก (splitting test) ตาม ASTM C 496 [5] ตัวอย่างแท่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 150x150x500 มม. เพื่อทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) ตาม ASTM C 78[6] และเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 150x300 มม. เพื่อใช้สำหรับทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น ตาม ASTM C469-94 [7] ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบทั้งหมดในอากาศในห้องทดลอง หลังจากนั้นทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 7 14 และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังรับแรงดัด กำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน รูปที่ 1 (ก) และ 1(ข) แสดงลักษณะของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสด และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความล้าดับ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (กก/ลบ.ม.)					ค่า ยุบตัว (มม.)
	เถ้าถ่าน หิน	NaOH	Na ₂ SiO ₃	ทราย	หิน	
8-M	390	67	167	585	1092	25
10-M	390	67	167	585	1092	25
12-M	390	67	167	585	1092	25
14-M	390	67	167	585	1092	24



ก) ลักษณะของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสด



ข) ลักษณะของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัว

รูปที่ 1 ลักษณะของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสดและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัว

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

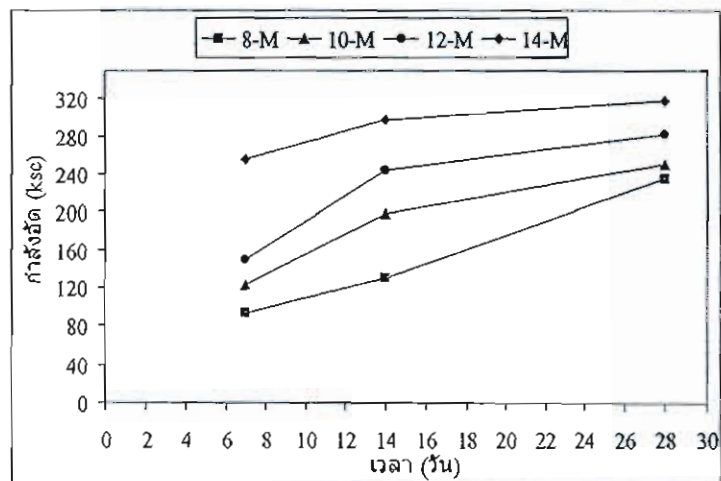
4.1 กำลั้งอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3 จากรูปที่ 2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลั้งอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและระยะเวลาที่บ่มในอากาศ พบว่า จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์มีการพัฒนากำลั้งอัดตามระยะเวลา โดยกำลั้งอัดมีค่าอัตราการเพิ่มสูงในช่วง 7 วันแรก ส่วนในช่วง 14 ถึง 28 วันกำลั้งอัดมีอัตราการเพิ่มที่น้อยลง โดยเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่ากำลั้งอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้น ซึ่งผลการวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4, 8] ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ค่าที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ได้มากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์และส่งผลให้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีกำลั้งอัดสูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณากำลั้งอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์พบว่า ที่อายุ 7 วัน มีกำลั้งอัดต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆค่อนข้างชัดเจน แต่เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น กำลั้งอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้มีการพัฒนากำลั้งอัดอย่างต่อเนื่องและเกือบเท่ากับกลุ่มที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ โดยจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ มีกำลั้งอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 235, 250, 282 และ 318 กก/ซม² ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึงแม้จะให้กำลั้งอัดที่สูงแต่ค่าใช้จ่ายในการทำจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตก็จะสูงด้วย ดังนั้นแนวทางในการศึกษาจะพิจารณาถึงความเหมาะสมของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อกำลั้งอัดที่ยอมรับและเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ ตลอดจนต้องมีความชื้นเหลวที่สามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่เกิดการแยกตัว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลั้งอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของสารละลาย

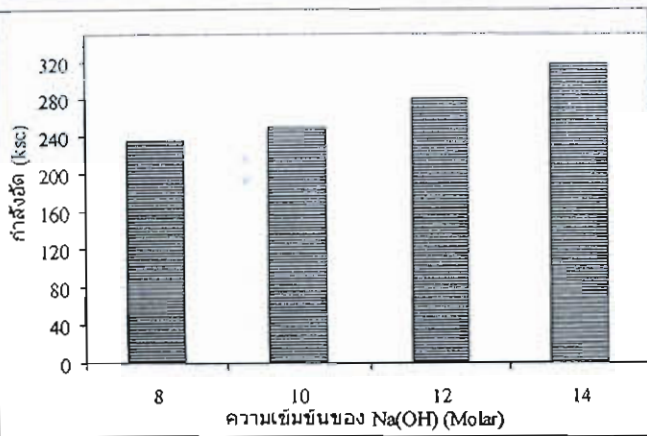
โซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์ มีกำลั้งอัดที่อายุช่วงต้น (7-14 วัน) ค่อนข้างต่ำถึงแม้จะมีค่ายุบตัวสูง (25 มม) ก็ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต ส่วนกลุ่มคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 8 โมลาร์ ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดีทั้งทางด้านกำลั้งอัด และความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด โดยจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีค่าประมาณ 25 มม. (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการรับแรงเชิงกลของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	กำลั้งรับแรงอัด (กก/ซม ²)			กำลั้งรับแรงดึง (กก/ซม ²)	
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	Modulus of rupture	Splitting tensile strength
8-M	93	130	235	31.6	13.6
10-M	123	199	250	35.3	14.6
12-M	150	245	282	35.9	18.2
14-M	256	297	318	24.7	16.6



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลั้งอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตกับระยะเวลาที่บ่มตัวอย่างในอากาศ

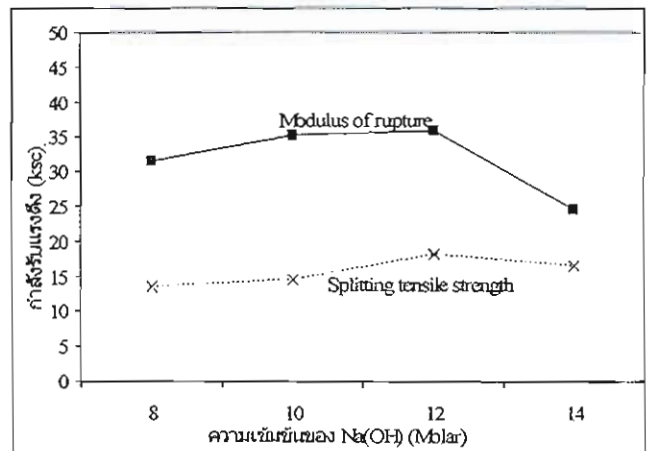


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

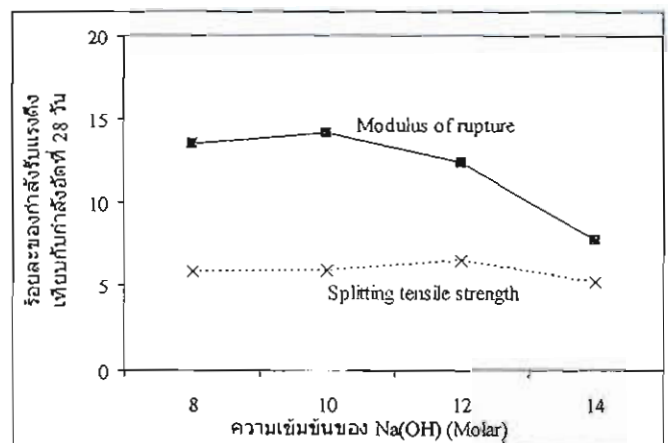
4.2 กำลังดึงของและกำลังคดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบกำลังดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยได้ทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile test) และทดสอบกำลังคดแบบ 3 จุด (3-point bending) จากผลการศึกษาในตารางที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่า กำลังรับแรงดึงและแรงคดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น กำลังรับแรงดึงและแรงคด มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ทั้งนี้พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงและแรงคดมีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ โดยมีกำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสแตกร้าว เท่ากับ 18.2 และ 35.9 กก/ซม² ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามกำลังอัดเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง 8 ถึง 12 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้นสูงถึง 14 โมลาร์ กลับพบว่า กำลังรับแรงดึงที่ทดสอบตามทั้งสองวิธี มีค่าลดลงถึงแม้ว่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นชัดในรูปที่ 5 ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของโมดูลัสแตกร้าว เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุทดสอบเดียวกันมีค่าลดลง นอกจากนี้ ร้อยละของกำลังรับแรงดึงเมื่อเทียบกับกำลังอัดก็มีค่าเกือบคงที่และลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซลด์เข้มข้นถึง 14 โมลาร์ การที่กำลังรับแรงดึงและแรงคดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกมาได้มาก และทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ได้ผลิตภัณฑ์ลักษณะแข็งและเปราะ จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังสูง มีร้อยละของการรับแรงดึงเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดต่ำลง นอกจากนั้นเป็นที่น่าสังเกตว่า ในการศึกษาครั้งนี้กำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับแรงอัด มีค่าประมาณร้อยละ 5-6 ซึ่งจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีกำลังรับแรงดึงประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด [9]



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



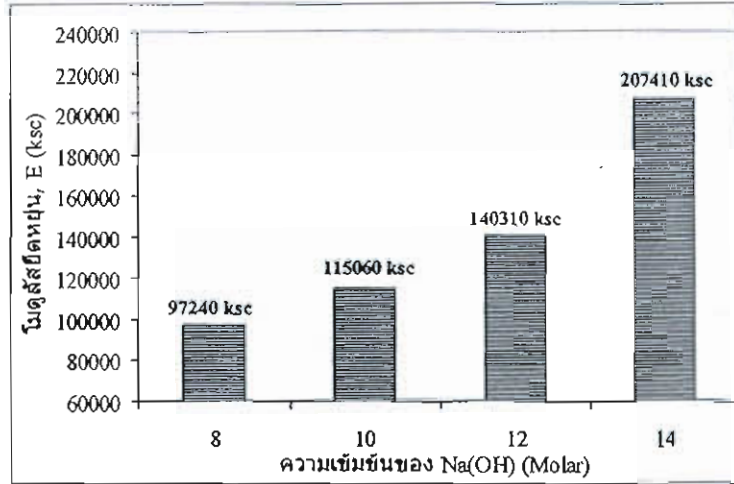
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังรับแรงดึงเทียบกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

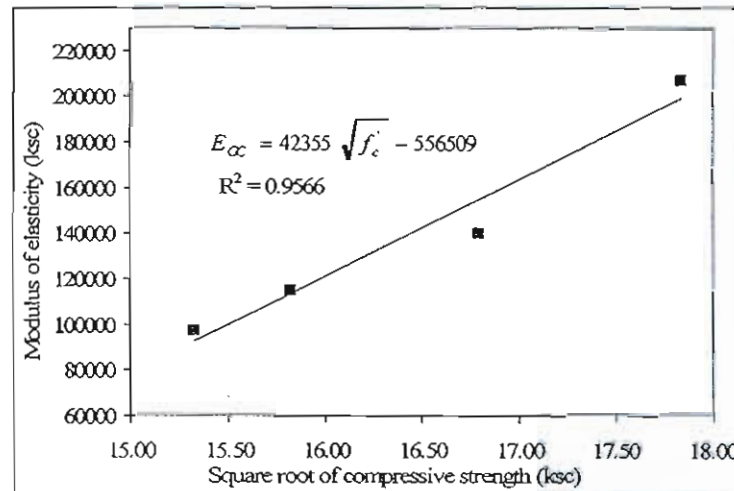
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งหมายถึงมีค่ามากขึ้นตามกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วย เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ ACI 318 ได้แนะนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไว้ตามสมการ $E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}$ MPa และจากสมการดังกล่าว พบว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีกำลังอัดเท่ากับ 235, 250, 280 และ 318 กก/ซม² มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 2.27×10^5 , 2.35×10^5 , 2.49×10^5 และ 2.65×10^5 กก/ซม² ตามลำดับ ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่กำลังอัดเดียวกันนี้ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 0.97×10^5 , 1.15×10^5 , 1.40×10^5 และ 2.07×10^5 กก/ซม² ตามลำดับ และต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 50% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายใต้การกระทำของแรงอัดที่เท่ากัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีการเสียรูปมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณารูปที่ 7 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในสมการที่ 1

$$E_{oc} = 42355 \sqrt{f'_c} - 556509 ; 220 \text{ ksc} < f'_c < 320 \text{ ksc} \quad (1)$$

เมื่อ E_{oc} และ f'_c คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและ กำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามสมการที่นำเสนอในครั้งนี้ได้จากจำนวนของฐานข้อมูลทดสอบที่มีจำนวนค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับรากที่ 2 ของกำลังอัดคอนกรีต

5 สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลา และมีค่าอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงในช่วง 7 วันแรก แต่อัตราการเพิ่มน้อยลงในช่วง 14 ถึง 28 วัน

- 2) กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของซีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น
- 3) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดึงและแรงค้ำมีค่าสูงขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 14 โมลาร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนุคุณ การวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 51 /2552

เอกสารอ้างอิง

- [1] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของซีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 31 (2):371-381.
- [2] สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ, 2552. ซีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552: 1831-1836.
- [3] วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุซีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 14 (1) : 47-55
- [4] Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., and Rattanasak, U., 'Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers', Waste Management 29, (2) (2009) 539-543.
- [5] ASTM C496, 'Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,' Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia (1997).
- [6] ASTM C78-08, 'Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading),' Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia (1997).
- [7] ASTM C469-94 'Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression),' Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia (1997).
- [8] Rattanasak, U., and Chindaprasirt, P., 'Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer', Minerals Engineering, (2009) Article in Press.
- [9] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีตไทย.

กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน
Compressive and Bond Strengths of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete

ชรินทร์ เสนาวงษ์¹, เกียรติสุดา สมณา² และ วิเชียร ชาลี^{3*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Charin Sanawong¹, Kaitsuda Somna² and Wichian Chalee^{3*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

²Department of Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isaan, Nakhonratchasima.

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ S/Va คงที่เท่ากับ 1.98 หลังจากหล่อตัวอย่างทดสอบแกะแบบและ บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน นอกจากนั้นได้ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว (ใช้เหล็กข้ออ้อยเส้นผ่าศูนย์กลาง 12, 16 และ 20 มม. เกรด SD 30) ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ ในการศึกษาครั้งนี้สามารถหาสมการเพื่อคำนวณกำลังยึดเหนี่ยวเมื่อใช้เหล็กข้ออ้อยคือ $\mu_{cc} = 2.50\sqrt{f_c} / D$ โดยค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากสมการนี้มีค่าสูงกว่าสมการของ ว.ส.ท. ประมาณร้อยละ 10

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เถ้าถ่านหิน กำลังอัด กำลังยึดเหนี่ยว ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สมการคำนวณแรงยึดเหนี่ยว

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

This research, the effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive and bond strengths of geopolymer concretes were studied. The geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, and 14 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. The concrete specimens were air-cured at room temperature and the compressive strength was tested at the ages of 7, 14, 28 and 60 days. In addition, the bond strength of geopolymer concrete (using deformed bar of 12, 16, and 20-mm in diameter, grade SD 30) was investigated at 28-day. The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete significantly increased with the increase in concentration of NaOH. In the first 14-day curing, a dramatically increasing of compressive strength was found and then it showed gradually increased after 14 days. However, the geopolymer concrete with a high concentration of NaOH (14 molar) continuously gained strength (up to 60 days) faster than those of low concentration of NaOH. Besides, bond strength of geopolymer concrete also increase with NaOH concentration but they were found to decrease when the NaOH concentration was up to 14 molar. The equation of bond strength of deformed bar in geopolymer concrete, $u_{G\infty} = 2.50\sqrt{f_c'} / D$ was used to calculate the results which higher than that of EIT recommendation about 10%.

Keywords : Geopolymer concrete, Fly ash, Compressive strength, Bond strength, NaOH concentration, Equation of bond strength

วัสดุ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ได้จากการนำสารละลาย แอลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงมากกระตุ้นสารเหลือทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เถ้าถ่านหินหรือเถ้าชีวมวลที่ อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม การยึดประสานดังกล่าว ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) เป็นส่วนประกอบ กับสารละลายไฮดรอกไซด์และ สารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดน- เซชัน (Polycondensation) และได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ (Davidovits, 1999)

ในงานวิจัยที่ผ่านมา (เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, 2549: ปริญา จินดาประเสริฐ 2548 ; วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552 ; อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2551) ได้ทำการศึกษา ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์, ความเข้มข้นของไฮดรอก- ซิดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al เป็นต้น โดยทำ การศึกษาในลักษณะที่เป็นเพสต์ หรือ มอร์ตาร์ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในงานโครงสร้างคอนกรีต จำเป็นที่ จะต้องมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัว ทั้งนี้ต้องพิจารณาควบคู่กับความคุ้มทุน ทางเศรษฐศาสตร์ด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการ กำหนดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถใช้งานจริง ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยัง ไม่มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อทดสอบการใช้งานเหมือนคอนกรีต จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐาน ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปการออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงดัด จำเป็นต้องคำนึงถึง ความต้านทานต่อการลื่นไถลของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีต แรงต้านทานนี้ เกิดจากการยึดติดกันระหว่างเหล็กเสริมกับซีเมนต์ เพสต์ที่แข็งตัว และมีความสำคัญในการกำหนดระยะฝังเพิ่มของ เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยกำลังยึดเหนี่ยว ในคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของการยึดติดดังกล่าว กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะขึ้นอยู่กับแรง เสียทาน และการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสำคัญ นอกจากนี้อาจมีผลจากการหดตัวของคอนกรีตเมื่อ

เทียบกับการหดตัวของเหล็ก แรงยึดเหนี่ยวดังกล่าว นอกจาก จะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตแล้ว ยังขึ้นกับคุณภาพของ เหล็กเสริมตลอดจนตำแหน่งของเหล็กเสริมด้วย

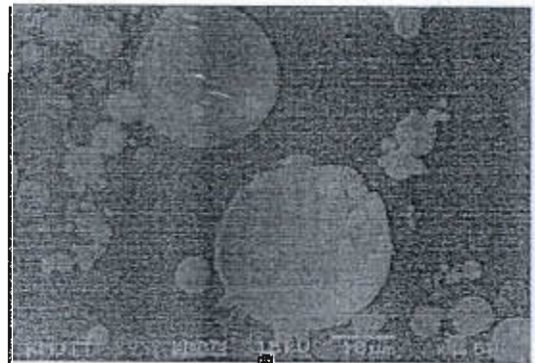
ในการศึกษาที่ผ่านมา (วีระพงษ์ พิภพประยงค์ และวันชัย ยอดสุดใจ, 2552) พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความเหนียวและ สามารถที่จะยึดเกาะกับวัสดุอื่นได้ดี ไม่ว่าจะเป็นการยึดเกาะกับ เหล็ก หรือเนื้อคอนกรีต และมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาวัสดุ จีโอพอลิเมอร์สำหรับใช้ในงานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต เสริมเหล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเคราะห์วัสดุ จีโอพอลิเมอร์ที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้เถ้าถ่านหิน แม่เมาะมาเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากเป็นเถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติทาง ปอซโซลาน (pozzolan) ที่ดี สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์หรือ ผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์ได้ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้น ของสารละลายไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยว ระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม เพื่อใช้เป็นข้อมูล พื้นฐานในการใช้งานจริงต่อไป

วิธีการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย เถ้าถ่านหินจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วง จำเพาะเท่ากับ 2.23 ลักษณะของเถ้าถ่านหินแม่เมาะจากโรงงาน โดยตรง มีสีน้ำตาลปนเทา เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ได้รับจาก โรงงานโดยตรง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหิน	
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

เห็นได้ว่ารูปร่างของ แก้วด้านหินแม่เมาะมี ลักษณะเป็นทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน ส่วนองค์ประกอบหลักทางเคมีของแก้วด้านหินที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer พบว่า มี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสารต่างๆ เหล่านี้รวมกันถึงร้อยละ 88 และมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 68.9 จึงจัดเป็นแก้วด้านหิน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ซึ่งมีอัตราส่วน SiO₂ ต่อ Na₂O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30 °C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์

1.2 มวลรวม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ

2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่มากที่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 ร้อยละการช่องดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.52 และ 1.01 ตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 2 ทำการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28, และ 60 วัน และหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 150x150x150 มม.³ พร้อมใส่เหล็กข้ออ้อยขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 12, 16, และ 20 มม. เกรด SD 30 ในแนวตั้ง เพื่อทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน โดยภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

2.2 วิธีการทดสอบ

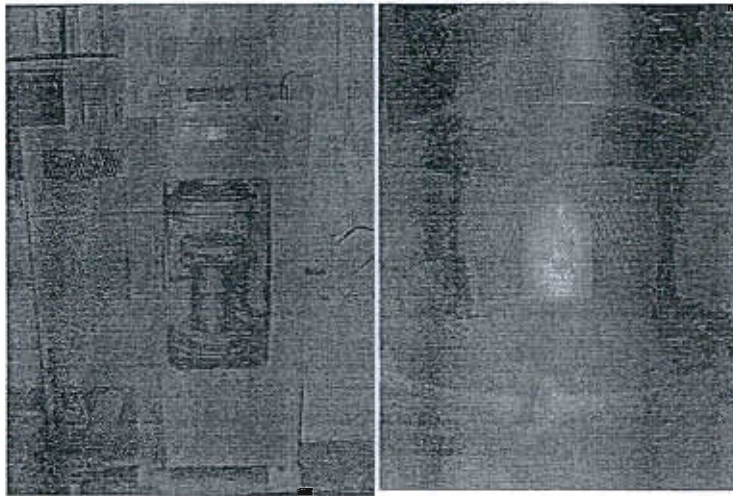
ทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7, 14, 28, และ 60 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 และทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C234-91a โดยภาพที่ 3 แสดงการทดสอบกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เครื่อง Compression machine และ Universal testing machine ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

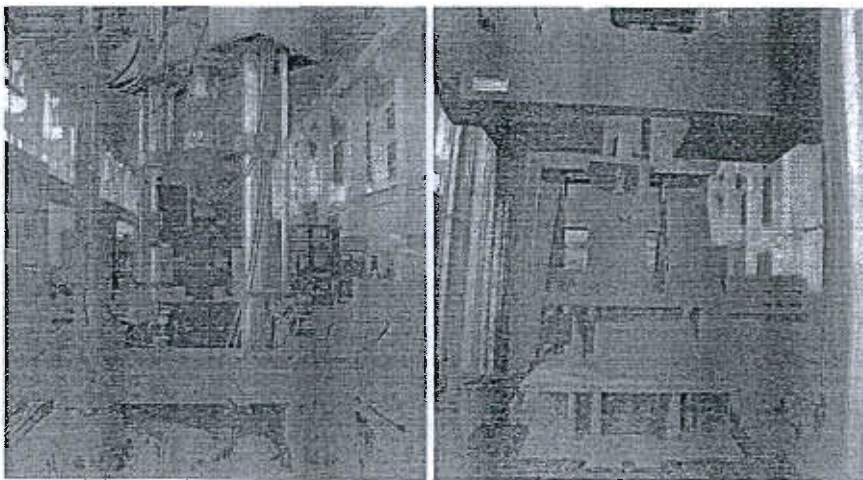
ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก./ลบ.ม.)					ค่ายุบตัว (มม.)
	แก้วด้านหิน	NaOH	Na ₂ SiO ₃	ทราย	หิน	
8-M	390	67	167	585	1092	25
10-M	390	67	167	585	1092	25
12-M	390	67	167	585	1092	25
14-M	390	67	167	585	1092	25



ภาพที่ 2 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

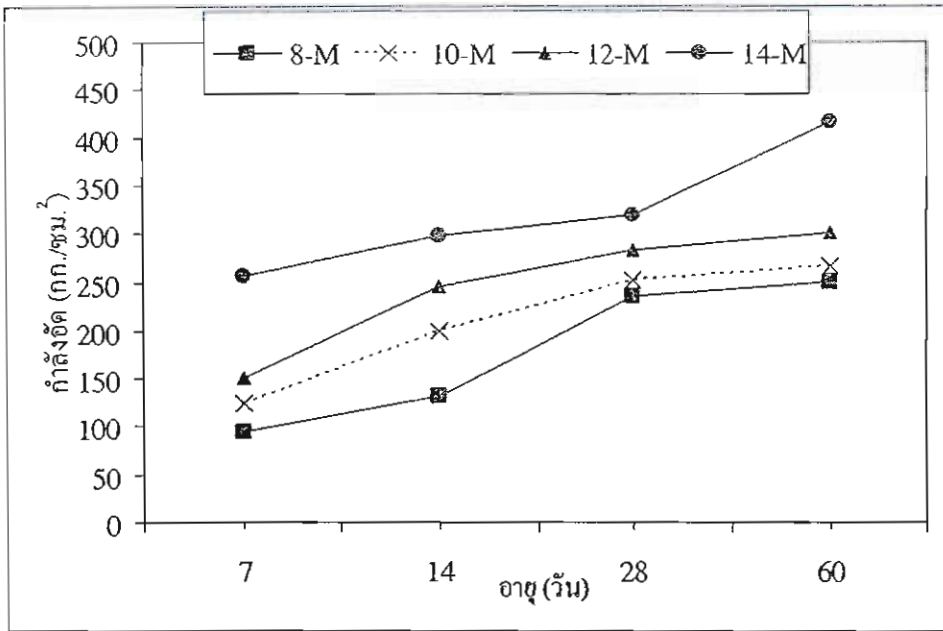


(ก) การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบ Compression Machine ขนาด 30 ตัน



(ข) การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด 150 ตัน

ภาพที่ 3 การทดสอบกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



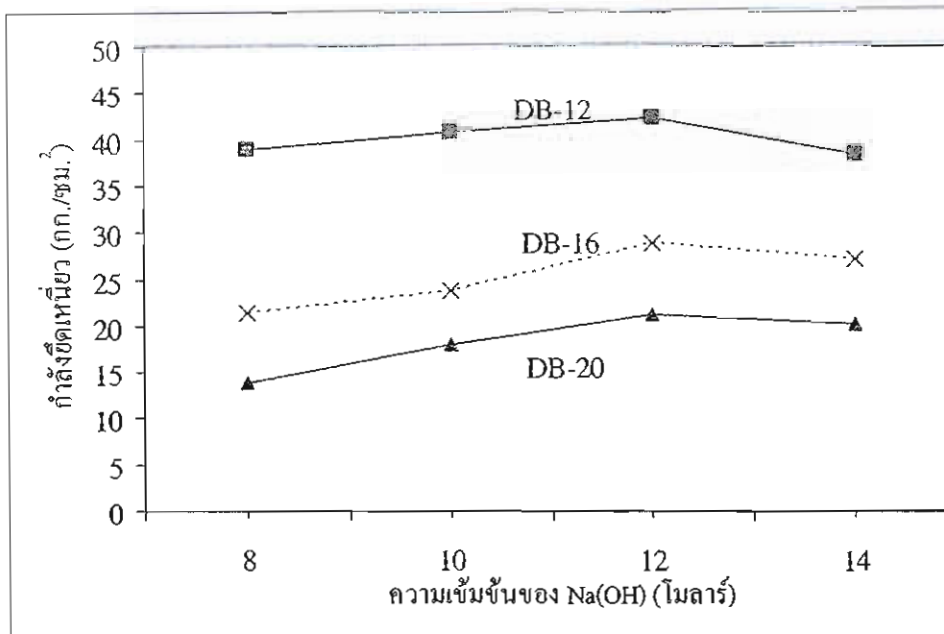
ภาพที่ 4 การพัฒนาค่าล้งอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตตามระยะเวลาที่บ่มในอากาศ

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

1. ค่าล้งอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าล้งอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตและระยะเวลาที่บ่มในอากาศ พบว่า อีโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้านานหินแม่เมาะมีการพัฒนาค่าล้งอัดตามระยะเวลาการบ่ม โดยค่าล้งอัดมีอัตราการเพิ่มสูงในช่วง 14 วันแรก ส่วนในช่วง 14 ถึง 60 วันค่าล้งอัดมีอัตราการเพิ่มที่ลดลง อย่างไรก็ตามการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย (NaOH) สูงถึง 14 โมลาร์ ส่งผลให้การพัฒนาค่าล้งอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตจาก 28 ถึง 60 วัน เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก โดยอีโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าล้งอัด เพิ่มจาก 318 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน เป็น 416 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ในขณะที่อีโพลีเมอร์คอนกรีตกลุ่มอื่นๆ ที่มีความเข้มข้นของ (NaOH) ที่ต่ำกว่า มีการพัฒนาค่าล้งอัดที่ระยะเวลาดังกล่าว ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ (NaOH) 14 โมลาร์ อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แสดงในภาพที่ 4 พบว่า ค่าล้งอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้น ซึ่งผลการวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt, 2009 ; Klabprasit, 2008) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ค่าที่มีความเข้มข้นสูง สามารถระเหาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้านานหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้

อีโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าล้งอัดสูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณา ค่าล้งอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์พบว่า ที่อายุ 7 วัน มีค่าล้งอัดต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ ค่อนข้างชัดเจน แต่เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ค่าล้งอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้มีการพัฒนาค่าล้งอัดอย่างต่อเนื่องและเกือบเท่ากับกลุ่มที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 โมลาร์ที่อายุ 60 วัน โดยอีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ มีค่าล้งอัดที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 249, 266, 300 และ 416 กก./ซม.² ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูงถึงแม้จะให้ค่าล้งอัดที่สูง แต่ค่าใช้จ่ายในการผลิตอีโพลีเมอร์คอนกรีตก็จะสูงด้วย ดังนั้นแนวทางในการศึกษา จะพิจารณาถึงความเข้มข้นเหมาะสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ส่งผลต่อค่าล้งอัดเพื่อนำไปใช้งานได้ดี ตลอดจนต้องมีความชื้นเหลือที่สามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่เกิดการแยกตัว ซึ่งตามภาพที่ 4 พบว่า อีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8 โมลาร์ มีค่าล้งอัดที่อายุ 14 วัน ค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต โดยเฉพาะคอนกรีตที่ต้องการค่าล้งอัดสูงในช่วงแรก ส่วนกลุ่มคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 8 โมลาร์ ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดีทั้งทางด้านค่าล้งอัด และความสามารถ



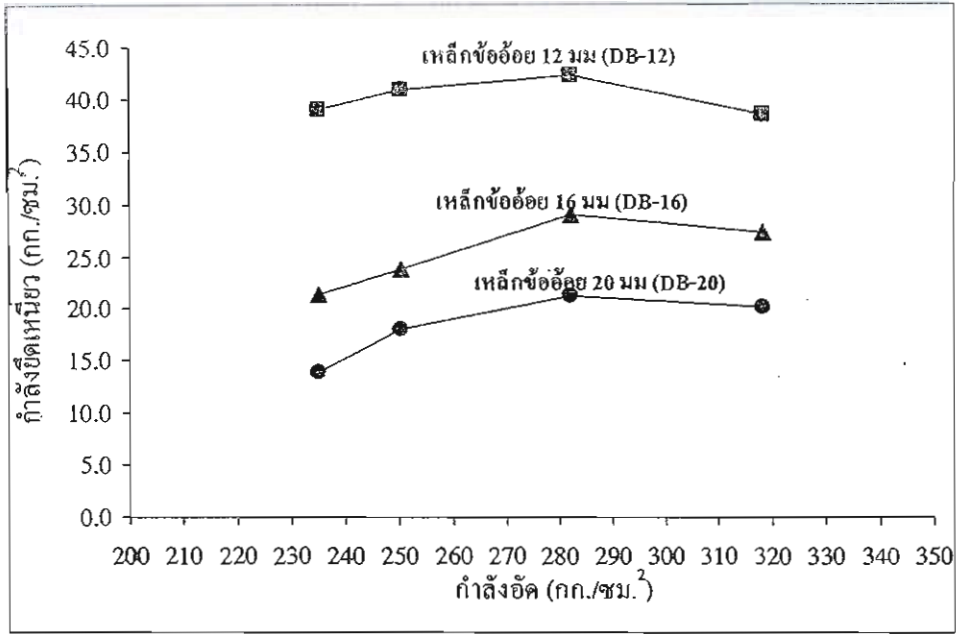
ภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ในการทำงานได้ของคอนกรีตสด โดยไม่เกิดการแยกตัว โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีค่าประมาณ 25 มม.

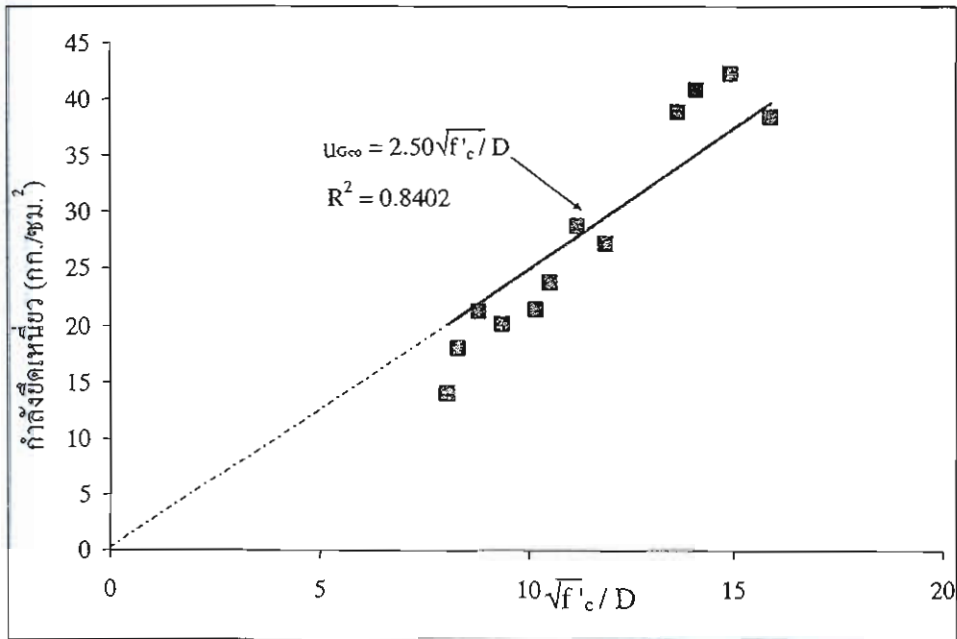
2. กำลังอัดเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า กำลังอัดเหนียวสูงสุดระหว่างเหล็กเสริมและจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหาได้จากการวิบัติที่มีการครูดหรือลื่นไถลโดยที่เหล็กเสริมไม่ขาด หรือวิบัติ ซึ่งหน่วยแรงอัดเหนียวที่คำนวณได้ในเหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเล็กกว่า พบว่ามีค่าสูงกว่าเหล็กที่มีขนาดใหญ่ และให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาในคอนกรีตธรรมดาที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (นัฐวุฒิทิพย์โยธา, 2552) เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อยตามภาพที่ 5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพิ่มขึ้น กำลังอัดเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ เช่น กำลังอัดเหนียวระหว่างเหล็ก DB-12 กับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มีกำลังอัดเหนียวเท่ากับ 38.9, 40.8, 42.3 และ 38.4 กก./ซม.² ตามลำดับ และมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังอัดเหนียวในเหล็ก DB-16 และ DB-20 กำลังอัดเหนียวในเหล็กข้ออ้อยทุกขนาด

ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ โดยมีกำลังอัดเหนียวสูงสุดในเหล็ก DB-12, DB-16 และ DB-20 เท่ากับ 42.3, 28.8 และ 20.1 กก./ซม.² ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามกำลังอัด เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อยู่ในช่วง 8 ถึง 12 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้นสูงถึง 14 โมลาร์ กลับพบว่า กำลังอัดเหนียว มีค่าลดลง ถึงแม้ว่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยทั่วไปแรงอัดเหนียวในคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ จะมีค่าแปรผันตรงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 200 กก./ซม.² เมื่อกำลังของคอนกรีตสูงชันกว่านี้ กำลังอัดเหนียวจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงหรือเกือบคงที่ (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ซึ่งแนวโน้มดังกล่าว สอดคล้องกับผลของการศึกษาในครั้งนี้ที่ กำลังอัดเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามกำลังอัดที่สูงขึ้น จนกำลังอัดมีค่าประมาณ 300 กก./ซม.² กำลังอัดเหนียวจึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย การที่ กำลังอัดเหนียวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงในคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง อาจเป็นผลมาจากปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง มีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ และไปเกาะที่ผิวเหล็กซึ่งเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนชื้น จะเกิดการยึดตัวและส่งผลให้เหล็กลื่นไถลได้ ซึ่งสังเกต



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับกำลังยึดเหนี่ยวของซีโอฟอลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวของซีโอฟอลิเมอร์คอนกรีตและค่า $\sqrt{f'_c}/D$

ได้จากเมื่อพรมน้ำที่ผิวเหล็กในส่วนที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีลักษณะเส้น โดยแนวโน้มดังกล่าวแสดงชัดเจนในภาพที่ 6 ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย

ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (u_{geo}) กับ $\sqrt{f'_c} / D$ และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ คือ $u_{geo} = 2.50\sqrt{f'_c} / D$ เมื่อ f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน (อยู่ในช่วง 230 ถึง 320 กก./ซม.²) และ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย (ซม.) ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการที่แสดงค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) คือ $u_{su} = 2.29\sqrt{f'_c} / D$ (ว.ส.ท.1007-34, 2537) พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ได้จากสมการของ ว.ส.ท. เพียงร้อยละ 10 เท่านั้น

สรุปผลการทดลอง จากผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน มีการพัฒนา กำลังอัดตามระยะเวลาและมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงในช่วง 14 วันแรก แต่อัตราการเพิ่มลดลงในช่วง 14 ถึง 60 วัน ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีค่าสูงในช่วงแรก จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) สูงด้วย และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 14 วันแรก

2) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง (14 โมลาร์) มีการพัฒนา กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (ต่ำกว่า 12 โมลาร์)

3) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเถ้านหินมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้น เนื่องจากการใช้ค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น

4) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวมีค่าสูงขึ้น แต่มีค่าลดลง

เล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพิ่มขึ้นเป็น 14 โมลาร์

5) กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ มีสมการ คือ $u_{geo} = 2.50\sqrt{f'_c} / D$ และมีค่าสูงกว่าสมการของ ว.ส.ท. ประมาณร้อยละ 10

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนอดทนทุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 6/2553

เอกสารอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ, ทัศนกิจ ชารีรัตน์, วรภรณ์ คุณวานากิจ และอนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ. (2548). การศึกษาเบื้องต้น การผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านลอยแม่เมาะ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ระยอง : หน้า 13-18.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีตไทย : หน้า 197-199.
- เอียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, สมิตร ส่งพิริยะกิจ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2549). การศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้านเกลบเปลือกไม้ผสมเถ้านหิน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, อุตรธานี : หน้า MAT 53-58.
- นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัทธศานนท์. (2552). แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์สุล่า. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : หน้า 1685-1691.
- มาตรฐาน ว.ส.ท.1007-34. (2537). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- วิเชียร ซาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2552). การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านเตา. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 14(1), 47-55
- วีระพงษ์ พิกุลประยงค์ และวันชัย ยอดสุดใจ. (2552). คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : หน้า 1801-1805.

- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 31(2) . 371-381.
- ASTM C234-91a. (2000). Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel. Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia.
- ASTM C618. (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia.
- Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management* 29, (2) : pp 539-543.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymer system. Terminology. In Proceeding of Second International Conference Geopolymer'99. France. : pp 9-39.
- 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.

Water Permeability in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete

Charin Sanawong and Wichian Chalee

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

Abstract: This research investigated the water permeability coefficient of fly ash-based geopolymer concrete. The effect of sodium hydroxide (Na(OH)) concentrations and Si/Al ratios on water permeability and compressive strength of geopolymer concretes were studied. The geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (Na(OH)) solutions. In the first group, concentration of Na(OH) was varied at 8, 10, 12, and 14 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. In the second group, a concentration of Na(OH) was kept constant at 14 molar and the Si/Al ratio was varied at 2.2, 2.4, 2.6, and 2.8. The hardened concretes were air-cured in laboratory. The compressive strength and water permeability were tested at the age of 28 and 60 days. The results showed that compressive strengths of geopolymer concrete significantly increased with the increase of a concentration of Na(OH) and Si/Al ratio. The water permeability coefficients increase with the decrease of compressive strength. In addition, the high reduction of water permeability coefficients with time was found in geopolymer concrete with lower Na(OH) concentration than that higher Na(OH) concentration.

Key words: Fly ash-based geopolymer concrete, water permeability, Na(OH) concentration, Si/Al ratio.

1. Introduction

The availability of low cost material with good durability and high mechanical strength needed to be achieved in the new constructional materials. It is well known that fly ash is an industrial waste normally used as partial replacement of Portland cement for making of concrete achieving a good mechanical and durability properties. However, it can not totally replace Portland cement since SiO_2 and Al_2O_3 in fly ash still need Ca(OH)_2 from cement hydration for its pozzolanic reaction to produce calcium silicate hydrate and calcium aluminate hydrate which possess cementitious properties. Recently, it was found that fly ash could be activated with alkaline solution at room temperature to produce a cementitious material called geopolymer [1, 2]. The utilization of fly ash in making geopolymer offers an alternative in new cementitious materials. Previous research had studied the effect of many factors (such as Si/Al ratio, alkalinity concentrations,

curing condition and so on) on microstructure and mechanical properties of geopolymer paste or mortar [3-5]. However, most researches were investigated in mechanical properties of paste or mortar. There are only a few reports concerning the durability properties of geopolymer concrete which is significant for practical used. Thus, the proposed study develops the fly ash-based geopolymer concrete to achieve the good mechanical and durability properties. The effect of sodium hydroxide (Na(OH)) concentrations and Si/Al ratios on water permeability and compressive strength of geopolymer concretes were studied.

2. Materials and Experimental Program

2.1 Materials and Specimens

The geopolymer concrete mixtures were composed of fly ash with a 30- μm median particle size, sodium silicate (Na_2SiO_3), sodium hydroxide (Na(OH)) solutions, graded sand, and crushed limestone with a maximum size of 19 mm. The chemical properties of fly ash are presented in Table 1. The geopolymer

Corresponding author: Wichian Chalce, PhD, research fields: durability of concrete, geopolymer concrete. E-mail: wichian@buu.ac.th.

concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide ($\text{Na}(\text{OH})$) solutions. The first group, $\text{Na}(\text{OH})$ concentration was varied at 8, 10, 12, and 14 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. The second group, a concentration of $\text{Na}(\text{OH})$ was kept constant at 14 molar and the Si/Al ratio was varied at 2.2, 2.4, 2.6, and 2.8. Concrete cylinder having 100 mm in diameter and 200 mm in height were prepared for compressive strength and water permeability tests. The mix proportions of geopolymer concrete are shown in Table 2.

Table 1 Chemical composition of fly ash.

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

Table 2 Mixture proportions of fly ash-based geopolymer concretes.

Mix	Mixture proportion (kg/m^3)					
	FlyAsh	Fine Agg.	Coarse Agg.	Na (OH)	Na_2O . SiO_3	SiO_2
8-M	390	585	1092	67	167	-
10-M	390	585	1092	67	167	-
12-M	390	585	1092	67	167	-
14-M	390	585	1092	67	167	-
Si/Al=2.2	394	591	1103	28	212	5.9
Si/Al=2.4	390	585	1092	29	218	21.5
Si/Al=2.6	384	576	1075	30	222	35.5
Si/Al=2.8	378	567	1058	30	226	49.3

2.2 Tested Program

After 28-day air curing, the geopolymer concrete cylinders with 100 mm in diameter and 200 mm in height were cut from surface to have 40 mm thickness samples (the same cutting position for all samples). The specimens were prepared for water permeability test as shown in Fig. 1. For determination of water per-

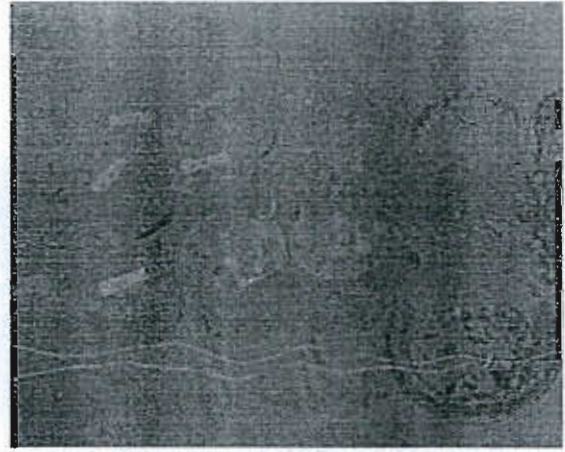


Fig. 1 Specimen preparation for water permeability test.

meability in this study, the steady flow method was used. The coefficient of water permeability was determined by measuring the amount of water passing through concrete specimens. The water permeability was calculated by using Darcy's law and equation of continuity as follow:

$$k = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (1)$$

where, k = Coefficient of water permeability (m/sec); ρ = Density of water (kg/m^3); g = Acceleration due to gravity, $9.81 \text{ (m/sec}^2\text{)}$; Q = Flow rate ($\text{m}^3\text{/sec}$); L = Thickness of concrete sample (m); P = Absolute water pressure (Pascal), in this study used 5 bars; A = Cross sectional area of concrete sample (m^2).

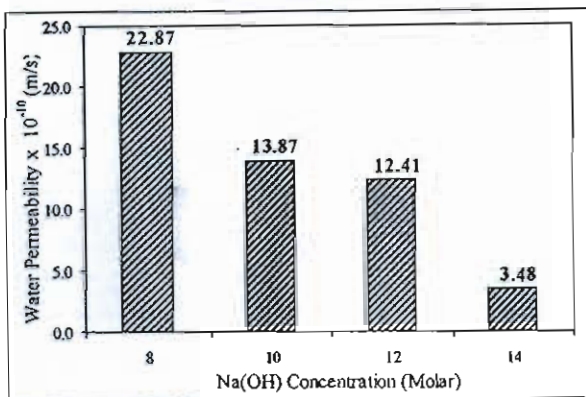
3. Results and Discussion

3.1 Effect of Sodium Hydroxide ($\text{Na}(\text{OH})$) Concentrations on the Water Permeability

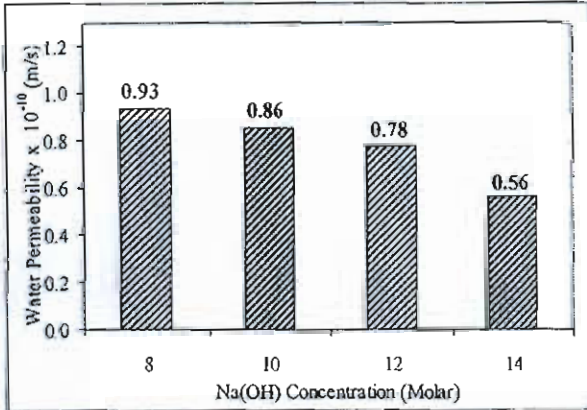
In this study, water permeability of fly ash-based geopolymer concrete with different concentrations of $\text{Na}(\text{OH})$ was investigated. The coefficients of water permeability in geopolymer concretes are shown in Table 3. In Fig. 2, the result indicated that the water permeability coefficients of geopolymer concretes decrease with the increasing of $\text{Na}(\text{OH})$ concentration. The reduction in water permeability found in a high concentration of $\text{Na}(\text{OH})$ is probably attributed to the refinement of the pore structures as a result of polycondensation reaction and filler effect. This result

Table 3 Water permeability coefficient and compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete.

Mix	Coefficient of Water Permeability (m/s)		Compressive Strength at 28 days (MPa)
	28-day curing	60-day curing	
8-M	22.9×10^{-10}	0.93×10^{-10}	23.5
10-M	13.9×10^{-10}	0.86×10^{-10}	25.0
12-M	12.4×10^{-10}	0.78×10^{-10}	28.2
14-M	3.48×10^{-10}	0.56×10^{-10}	31.8
Si/Al=2.2	28.9×10^{-10}	9.88×10^{-10}	19.2
Si/Al=2.4	21.7×10^{-10}	9.46×10^{-10}	20.4
Si/Al=2.6	11.4×10^{-10}	2.45×10^{-10}	21.0
Si/Al=2.8	9.18×10^{-10}	1.88×10^{-10}	22.5



(a) 28-day curing



(b) 60-day curing

Fig. 2 Effect of sodium hydroxide (Na(OH)) concentrations on the water permeability in fly ash-based geopolymer concrete.

may be due to the fact that the relatively high concentration of Na(OH) can leach more Si and Al concentration from fly ash, produce a better degree of polycondensation and result in a decrease of geopolymer concrete porosity. For instance, geopolymer concretes with Na(OH) concentration of 8, 10, 12, and 14 molar, the water permeability coefficients at 28

days were 22.9×10^{-10} , 13.9×10^{-10} , 12.4×10^{-10} and 3.48×10^{-10} m/s, respectively. Previous research [6] studied the effect of temperature curing and Na(OH) concentration on compressive strength development in class F fly ash-base geopolymer. The results found that there was an increase in compressive strength with the increase in Na(OH) concentration. It is shown the same trend with the proposed results in this study that the higher Na(OH) concentration produces a lower water permeability coefficients and a higher in compressive strength of geopolymer concrete.

3.2 Effect of Si/Al Ratios on Water Permeability

Fig. 3 shows the effect of Si/Al ratios on water permeability in fly ash-based geopolymer concrete at 28-day curing. The geopolymer concrete with higher Si/Al ratio has lower water permeability coefficient than that lower Si/Al ratio. This result has confirmed the similar trend of compressive strength in concrete (Table 3), i.e., the use of high Si/Al ratio gave a high compressive strength and decrease porosity of geopolymer concrete. For example, the geopolymer concretes with Si/Al ratios of 2.2, 2.4, 2.6 and 2.8 had water permeability coefficients at 28 days of 28.9×10^{-10} , 21.7×10^{-10} , 11.4×10^{-10} , and 9.18×10^{-10} m/s, respectively. Generally, Si-O-Si linkage in geopolymer is stronger than Si-O-Al or Al-O-Al bonds which may result in a high compressive strength and low water permeability in geopolymer concrete with a high Si/Al ratio [7]. Moreover, previous research studied the geopolymer microstructure and focused on SEM

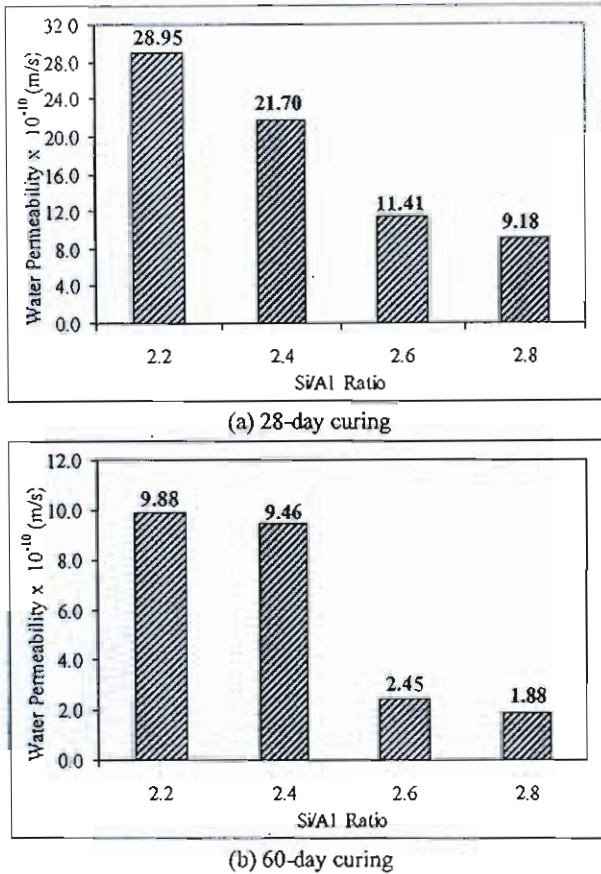


Fig. 3 Effect of Si/Al ratios on the water permeability in fly ash-based geopolymer concrete.

micrograph of metakaolin-based geopolymer paste [7]. The results reported that geopolymer paste with lower Si/Al ratio showed a microstructure containing large pores, loosely structured and high porosity more than that of a high Si/Al ratio.

3.3 Effect of Curing Time on Water Permeability

Fig. 4 shows the effect of curing time on water permeability coefficients of fly ash-based geopolymer with Na(OH) concentration of 8, 10, 12, 14 molar. The result showed the similar trend in all concrete mixtures that the water permeability coefficients decreased with curing time. This result was similar to the common trend in normal concrete with Portland cement [8]. In addition, the decrease of water permeability coefficients in fly ash-based geopolymer with curing time was the same trend of water absorption which was investigated by other research [5]. It was found in this

research that the high reduction of water permeability coefficients with time was found in geopolymer concrete with the lower Na(OH) concentration than the higher Na(OH) concentration. Typically, water permeability coefficients in fly ash-based geopolymer concrete with Na(OH) concentration of 8 molar decreased from 22.9×10^{-10} to 0.93×10^{-10} m/s during the curing period of 28 to 60 days while that geopolymer concrete with 14 molar of Na(OH) concentration decreased from 3.48×10^{-10} to 0.56×10^{-10} m/s. The decrease of water permeability coefficients with curing time is conceivable because the increase of polycondensation reaction time results in the pore size distribution and the average pore diameter decrease in geopolymer concrete. Fig. 5 shows the relationship between compressive strength and water permeability coefficients of fly ash-based geopolymer concrete at 28 days. This result confirmed

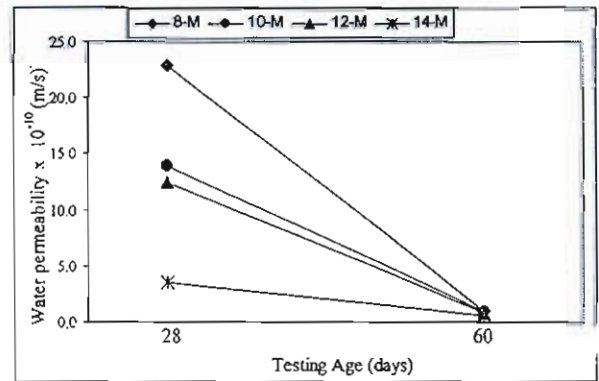


Fig. 4 Effect of curing time on water permeability in fly ash-based geopolymer concrete.

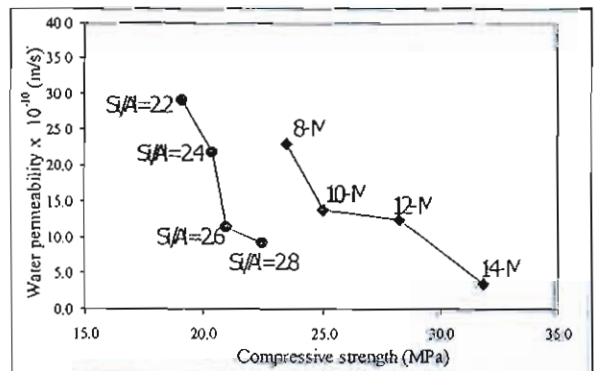


Fig. 5 Relationship between compressive strength and water permeability coefficient of geopolymer concrete at 28-day curing.

that the higher is the compressive strength of geopolymer concrete, the lower water permeability coefficient is found.

4. Conclusions

(1) The increase of Na(OH) concentration in fly ash-based geopolymer concrete results in reducing water permeability coefficient of concrete.

(2) When the Si/Al ratio of fly ash-based geopolymer concrete increases, the water permeability coefficient of concrete has been found to decrease.

(3) The fly ash-based geopolymer concrete with higher compressive strength has lower water permeability coefficient than the one with lower compressive strength.

(4) The high reduction of water permeability coefficients with time was found in geopolymer concrete with lower Na(OH) concentration than that higher Na(OH) concentration.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial supports from the Research and Development Funds, Faculty of Engineering, Burapha University, Thailand, contract No. 30/2553. Thanks also extend to the Department of Civil Engineering, Burapha University, Thailand, for providing facilities and equipments.

References

- [1] J. Davidovits, Geopolymer: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis* 1991 (37) 1633-1659.
- [2] P. Chindapasirt, W. Chalee, C. Jaturapitakkul and U. Rattanasak, Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, *Waste Management* 2009 (29) 539-543.
- [3] U. Rattanasak and P. Chindapasirt, Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering* 2009 (22) 1073-1078.
- [4] J.G.S van Jaarsveld and J.S.L. van Deventer, Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymer, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 1999 (88) 3932-3941.
- [5] M. Anurag, C. Deepika, J. Namrata, K. Manish, S. Nidhi and D. Durga, Effect of concentration of alkali liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete, *Engineering and Applied Sciences* 2008 (3) 14-18.
- [6] T. Bakharev, Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research* 2005 (35) 1224-1232.
- [7] D. Peter, John L. Provis, Grant C. Lukey, Seth W. Mallicoat, Waltraud M. Kriven and Jannie S. J. van Deventer, Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids and Surfaces A and Physicochem Engineering Aspects* 2005 (269) 47-58.
- [8] S. Homwuttivong, Study of strength and water permeability of concrete containing various pozzolanic materials, A Dissertation of the Doctor of Philosophy, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2006, p.121.



การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล Chloride Penetration of Fly Ash-based Geopolymer Concrete under Marine Environment

ชรินทร์ เสนาวงษ์¹ และ วิเชียร ชาลี^{2*}
Charin Seanawong¹ and Wichian Chalee^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ และบ่มคอนกรีตในอากาศจนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 180 วัน เก็บตัวอย่างมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) โดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) ตลอดจนหาปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ผลการวิจัยพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอ

พอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ตลอดจนร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เถ้าถ่านหิน การแทรกซึมของคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ ความเข้มข้นของ NaOH สภาวะแวดล้อมทะเล

Abstract

This research studied the effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations on chloride penetration and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concretes. The geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, and 14 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. The 200-mm geopolymer concrete cube specimens were cast. The specimens were

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* Corresponding Author, Tel. 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th

cured in air for 28 days then were exposed to tidal zone of marine environment for 180 days. Subsequently, the specimens were tested to determine the total (acid soluble chloride) and free (water soluble chloride) chloride contents in geopolymer concrete. A regression analysis of investigated data was carried out and Fick's second law of diffusion was applied to calculate the chloride diffusion coefficient (D_c). In addition, the chloride binding capacity was analysed in term of percentage chloride binding capacity compared to the total chloride content. The results showed that chloride penetration and chloride diffusion coefficients of geopolymer concrete significantly decreased with an increase in concentration of NaOH. It was also found that the percentage of chloride binding capacity compared to total chloride content increased with an increase of NaOH concentration in the fly ash-based geopolymer concrete.

Keywords: Geopolymer Concrete, Fly Ash, Chloride Penetration, Chloride Binding, NaOH Concentration, Marine Environment

I. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอันดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก ความเหมาะสมทางด้านราคา การผลิตที่ไม่ยุ่งยาก และสามารถควบคุมคุณสมบัติได้ง่าย อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุคอนกรีตอาจมีข้อจำกัดที่ตามมาทั้งทางด้านคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการมากขึ้น ตลอดจนกระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม กระบวนการผลิตซีเมนต์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อการเกิดก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านวัสดุที่ผ่านมาจึงได้มีการคิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้น้อยลง

การพัฒนาวัสดุ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตวัสดุใหม่ให้สามารถใช้งานแทนคอนกรีตโครงสร้างได้โดยไม่ต้องใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการนำสารละลายอัลคาไลน์ที่เข้มข้นสูงมากระตุ้น (Activate) สารเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (เช่น ถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่าน) ที่อุณหภูมิห้อง จะทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม คอนกรีตดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) [1]

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษามูลค่าของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al เป็นต้น โดยทำการศึกษาในลักษณะที่เป็นเพลสต์ หรือมอร์ตาร์ [2]-[5] และนอกจากนั้นได้มีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้น ทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่แข็งตัว ซึ่งพบว่าคุณสมบัติดังกล่าว เป็นไปในทิศทางที่ดี [6]-[8] และสามารถพัฒนาวัสดุนี้ได้อย่างต่อเนื่องได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มเติมจากคุณสมบัติเชิงกล และศึกษาถึงแนวทางที่เป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลเป็นสาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีต สภาพแวดล้อมทางกายภาพที่คอนกรีตสัมผัส และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่คอนกรีตสัมผัส โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้าง

คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางของการพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่เกิดการใช้งานได้จริง โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่ที่ไม่ใช่คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ ให้สามารถใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ ยังไม่มีมาตรฐานที่รองรับการทดสอบเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ประกอบด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	
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



รูปที่ 1 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่มากที่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ซึ่งอัตราส่วน SiO₂ ต่อ Na₂O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาค้างนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ (ดังรูปที่ 1) หลังจากบ่มคอนกรีตในอากาศจนอายุครบ 28 วันนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี นอกจากนั้นได้หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม² เพื่อทดสอบ

กำลังอัดที่อายุ 28 วัน

เมื่อแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในน้ำทะเลเค็ม 180 วัน นำตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลาง และนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วบดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตาม ASTM C 1152 [9] เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride Content) นอกจากนี้ทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride Content) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 [10]

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กบ/ลบ.ม.)					ค่ายุบตัว (มม.)
	เถ้าถ่านหิน	NaOH	Na ₂ SiO ₃	ทราย	หิน	
8-M	390	67	167	585	1092	25
10-M	390	67	167	585	1092	25
12-M	390	67	167	585	1092	25
14-M	390	67	167	585	1092	24

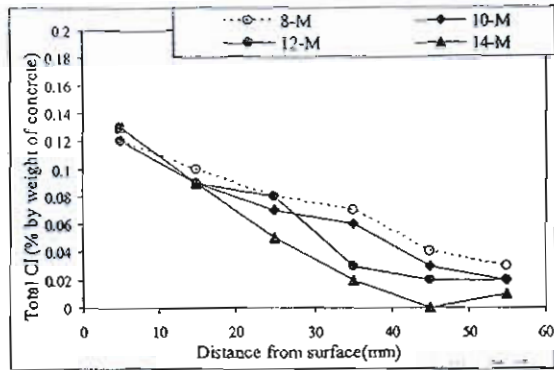
2.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ ซึ่งอยู่ที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา พบว่าน้ำทะเลนี้มีสีใส แต่มีสีขุ่นในช่วงเดือนสิงหาคม โดยปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,200-18,800 มก./ล. และซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2

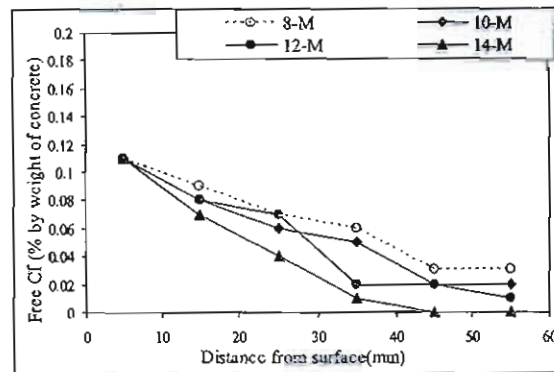
3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การแทรกซึมของคลอไรด์

รูปที่ 2 แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเล



ก) การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด



ข) การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ

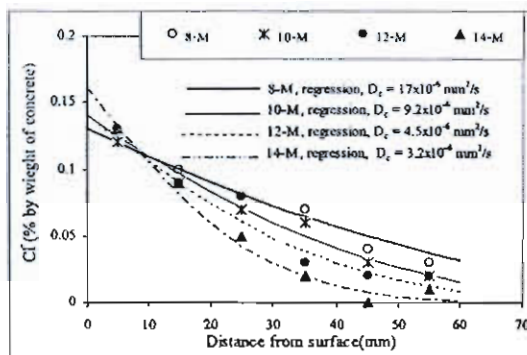
รูปที่ 2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

เป็นเวลา 180 วัน โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับใกล้ผิวคอนกรีตมีความแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มที่ชัดเจนได้ เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกมากขึ้นพบว่า ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงตามส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (รูปที่ 2(ก)) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (รูปที่ 2(ข)) เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 0.07, 0.06, 0.03 และ 0.02 โดยน้ำหนักของคอนกรีต

ตามลำดับ การที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านั้นสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เป็นผลจากการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้านั้นได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นไปในทิศทางที่ดี [6] นอกจากนี้ อาจมีผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถ้านั้นและด่างที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมา ทำให้ลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่มีกำลังต่ำและละลายน้ำลงได้ และส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ [11] การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะลดสารที่ไม่เป็นประโยชน์ลง อาจได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ได้แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 ถึง 14 โมลาร์ และเก็บข้อมูลที่แช่ในน้ำทะเลถึง 180 วัน เท่านั้น ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงขึ้นให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดีทั้งคุณสมบัติเชิงกลและด้านความคงทน แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงมากกว่านี้ ยังไม่มีข้อมูลการศึกษา ซึ่งอาจจะส่งผลดีหรือผลเสียต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านั้นได้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนต่อไป

3.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c)

ในการศึกษาครั้งนี้ หากค่า D_c ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) [12] ดังแสดงในสมการที่ (1)



รูปที่ 3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านั้นเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ ค่าตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$C_{x,t} = C_o [1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad (2)$$

เมื่อ

$C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระดับความลึก x และระยะเวลาในการแช่ t

x = ระยะจากผิวหน้าของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (มม.)

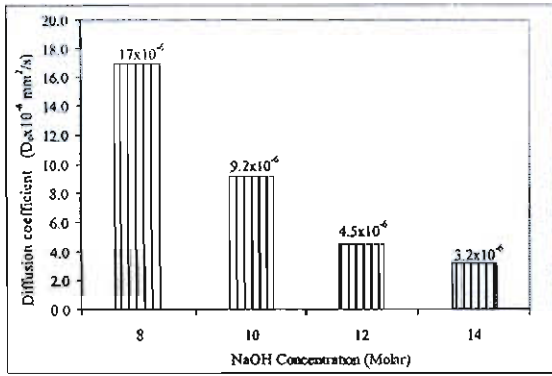
t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (ที่ $x=0$) ที่ระยะเวลาแช่ t

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลาแช่ t ($\text{mm}^2/\text{วินาที}$)

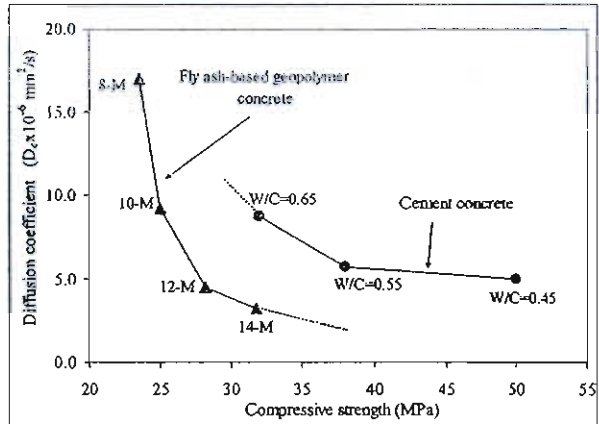
erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 ที่แสดงการหาค่า D_c โดยใช้สมการที่ (2) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 180 วัน

รูปที่ 4 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่าค่า D_c มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ โดย D_c มีค่าต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สูงขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ มีค่า D_c เท่ากับ 17×10^{-6} , 9.2×10^{-6} , 4.5×10^{-6} และ 3.2×10^{-6} มม²/วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 12 เป็น 14 โมลาร์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า D_c ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจาก 8 เป็น 10 โมลาร์ ซึ่งหมายถึง การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้ต่างเห็นมากกว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังรูปที่ 5 พบว่าค่า D_c ลดลงอย่างชัดเจนตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็น



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ และมีผลค่อนข้างชัดเจนในกลุ่มของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ โดยการเพิ่มกำลังอัดจาก 23 เป็น 25 เมกกะปาสกาล ส่งผลให้ค่า D_c ลดลงจาก 17×10^{-6} เป็น 9.2×10^{-6} มม²/วินาที ในขณะที่กลุ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้น การเพิ่มกำลังอัดจาก 28 เป็น 32 เมกกะปาสกาล ส่งผลให้ค่า D_c มีค่าลดลงน้อยมาก กล่าวคือ ลดจาก 4.5×10^{-6} เป็น 3.2×10^{-6} มม²/วินาที เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้ต่างเห็น และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมา [13] พบว่าแนวโน้มกำลังอัดที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงทิศทางที่ดีในการพัฒนาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษาวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผ่านมา พบว่า มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยเฉพาะคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสด ที่มีผล

ชัดเจนต่อการนำไปใช้งานจริง ตลอดจนคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐาน ซึ่งพบว่ามีข้อมูลงานวิจัยค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะข้อมูลการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้วัสดุที่มีในประเทศ ดังนั้นการพัฒนาฐานข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะต้องมีการศึกษามากขึ้น และมีทิศทางในการพัฒนาเพื่อสนับสนุนให้มีการนำไปใช้งานจริงได้

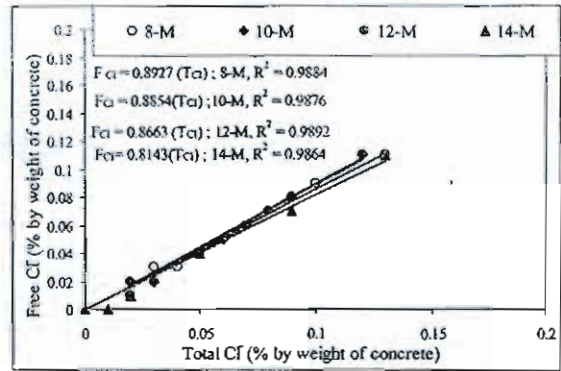
3.3 การกักเก็บคลอไรด์

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตจะบ่งชี้ถึงปริมาณคลอไรด์อิสระ ที่มาทำลายคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่สัมผัสกับคลอไรด์ ถ้าคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตถูกดักจับไว้มาก จะส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่มาทำลายเหล็กเสริมน้อยลง และยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ ดังนั้นแนวทางการพิจารณาวัสดุประสานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากจะพิจารณาในด้านของความทึบน้ำ และกำลังอัดที่สูงเพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงการดักจับคลอไรด์อิสระของวัสดุประสานนั้นด้วย

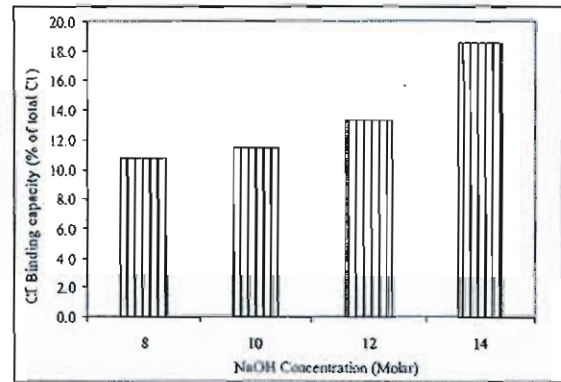
เมื่อพิจารณาคูสมบัติด้านการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้ถ่านหิน โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 6 โดยวิเคราะห์ในรูปของ ร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังสมการที่ 3

$$P_b = \frac{(T_{cl} - F_{cl})}{T_{cl}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ P_b คือร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด T_{cl} คือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และ F_{cl} คือปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยรูปที่ 7 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่า การใช้สารละลายโซเดียม



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้ถ่านหินเมื่อแช่น้ำทะเล 180 วัน



รูปที่ 7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

ไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ P_b มีค่ามากขึ้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลงและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย และการดักจับคลอไรด์อิสระในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดิล (Friedel's Salt) อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อิสระส่วนหนึ่งที่เป็นไปได้คือการดักจับทางกายภาพ



โดยคลอไรด์ไอออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น [14] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้การให้กำลังและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ดังนั้นการดักจับคลอไรด์ไอออนจึงน่าจะเป็นการดักจับทางกายภาพ โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งกำลังคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย

ในการศึกษานี้ได้นำเสนอ ค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) เพื่อจะได้ข้อมูลประกอบในการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อใช้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงต่อไป

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหิน มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น
2. การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหินมากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง
3. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหินมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น
4. แนวโน้มกำลังอัดที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนุอดหนุนการวิจัยและพัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 8/2554

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Davidovits, "Chemistry of geopolymer system, Terminology," In *Proceeding of Second International Conference Geopolyme*, 1999, France, pp 9–39.
- [2] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ วิเชียร ชาลี, "การศึกษาการชะงักผ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากแก้วด้านหิน," *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, ปีที่ 4, หน้า 437-446, 2549.
- [3] P. Chindaprasirt, W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Management*, vol. 29, no. 2, pp 539-543, 2009.
- [4] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer," *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 1073-1078, 2009.
- [5] สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และวราเชษฐ์ ป้อมเชียงพิน, "จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหินแม่เมาะ," ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*, 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836.
- [6] ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, "กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วด้านหิน," *Burapha Sci., J.*, vol.15, no.1, หน้า 13-22, 2553.
- [7] J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Compressive strength, modulus of elasticity and water permeability of inorganic polymer concrete," *Materials and Design*, vol. 3, pp. 4748-4754, 2010.
- [8] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Compressive strength



365504

- and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol.24, pp.236-240, 2010.
- [9] ASTM. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, C1152 M-04E01. Annual Book of ASTM Standards 2008 ; 04.02.
- [10] ASTM. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete, C1218 M-99R08. Annual Book of ASTM Standards 2008;04.02.
- [11] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, *แก้วกลบในงานคอนกรีต*, สำนักพิมพ์ไชน่า แอนด์ เอ็นจิเนียริง, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2552, หน้า 110-111.
- [12] J. Crank, *The mathematic of diffusion*, 2nd, edn. London: Oxford Press, 1975.
- [13] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 505-514, 2009.
- [14] S. Tangtermsirikul, *Durability and mix design of concrete*, 1st ed., Printing house of Thammasat University, 2003.