



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี
(Durability of fly ash-based geopolymer concrete under 5-year exposure in marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222653

สัญญาเลขที่ 129/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา

5 ปี

(Durability of fly ash-based geopolymer concrete under 5-year exposure in
marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กุมภาพันธ์ 2560

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มีงบประมาณทั้งโครงการ 661,100 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ : นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน
งบประมาณ : 661,100 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี เปรียบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในอากาศจนมีอายุครบ 28 วัน และนำไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง จากนั้นเก็บตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมาเจาะทดสอบกำลังอัด หาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) ปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) และการกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการวิจัยพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน, การแทรกซึมคลอไรด์, กำลังอัด, การกัดกร่อนเหล็กเสริม, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research studied the effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength, chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concretes under 5-year exposure in marine environment. 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, 14, 16 and 18 molar. The 200-mm geopolymer concrete cube specimens were cast. The specimens were cured in air for 28 days then were exposed to tidal zone of marine environment. Subsequently, the specimens were tested to determine the compressive strength, total chloride content (acid soluble chloride), free chloride content (water soluble chloride) and steel corrosion in geopolymer concrete after 5- year exposure in marine site. The results showed that chloride penetration and steel corrosion of geopolymer concrete decreased with an increase in NaOH concentration. Besides, the compressive strength of geopolymer concretes at 5-year exposure in sea water increased with an increase of NaOH concentration.

Keywords: Fly ash-based geopolymer concretes, Chloride penetration, Compressive strength, Steel corrosion, NaOH concentration, Marine environment

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 129/2559

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานวัสดุอีพอกซีเพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับสมบัติด้านความคงทนที่มีการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ให้สามารถใช้งานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4
2.2 เถ้าถ่านหิน	8
2.3 การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล	12
2.4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความคงทนของคอนกรีต	20
2.5 จีไอพอลิเมอร์	21
2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์	23
2.7 สารละลายโซเดียมซัลเฟต	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	28
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	28
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ	28

3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	30
3.4 วิธีการทดสอบ	32
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	38
4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	38
4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	39
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี	42
4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์	45
4.5 การกักเก็บคลอไรด์	48
4.6 การเกิดเสริมในเหล็กเสริมคอนกรีต	50
4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล	53
4.8 ดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผล	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	63
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	72
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางเคมีของเก้าอี้ถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618	9
3.1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	30
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ถ่านหิน	39
4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหินหลังแช่ ในสิ่งแวดล้อมทะเลถึง 5 ปี	41
4.3 ร้อยละของพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิม ที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี	52
4.3 ดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหิน	58

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	12
2.2	14
2.3	16
2.4	17
2.5	18
2.6	22
2.7	22
3.1	30
3.2	31
3.3	32
3.4	33
3.5	33
3.6	34
3.7	34
3.8	35
3.9	37
4.1	38
4.2	42
4.3	42
4.4	44
4.5	45
4.6	47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี	47
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดหลังแช่ น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี	49
4.9 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอ พอลิเมอร์คอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี	50
4.10 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี	53
4.11 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ (ก) 8 โมลาร์ (ข) 10 โมลาร์ (ค) 16 โมลาร์ และ (ง) 18 โมลาร์ ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล	55
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเถ้านหินหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาแนวทางการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ในงานคอนกรีตเป็นการส่งเสริมการผลิตวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้ลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น สภาวะโลกร้อน ฝุ่นในอากาศ และการสูญเสียทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ภูเขา เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์จำเป็นต้องใช้หินปูนจากภูเขาเป็นวัตถุดิบ ตลอดจนวัสดุจีโอพอลิเมอร์ใช้วัสดุเหลือทิ้งหรือผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบในการผลิตซึ่งเป็นการลดปัญหาการกำจัดทิ้งและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหล่านั้นด้วย วัสดุจีโอพอลิเมอร์ในประเทศไทยอยู่ในช่วงของการศึกษาสมบัติพื้นฐานเพื่อพัฒนาไปสู่การใช้งานในเชิงพาณิชย์ ซึ่งในการศึกษาที่ผ่านมา ได้มุ่งเน้นไปที่การผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งหรือผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง และชนิดของวัสดุปอลิไซลันที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น (ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ คณะ, 2553 ; Gum Sung Ryu et al., 2013 ; Chindaprasirt et al., 2009) โดยทำการศึกษาในลักษณะที่เป็นเพสต์ หรือ มอร์ตาร์ และศึกษาคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่แข็งตัว ซึ่งพบว่าคุณสมบัติดังกล่าว เป็นไปในทิศทางที่ดี และสามารถพัฒนาวัสดุนี้อย่างต่อเนื่องได้ การศึกษาที่ผ่านมา (Chindaprasirt and Chalee, 2014 ; Sanawong and Chalee, 2010) ได้มีการเก็บข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทั้งที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเก็บข้อมูลในภาคสนามโดยพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น สามารถลดการทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่ทำให้เกิดสนิมเหล็กได้ โดยการใช้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มเติมจากคุณสมบัติเชิงกล และศึกษาถึงแนวทางที่เป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่สภาพแวดล้อมที่รุนแรง โดยเก็บข้อมูลด้านความคงทนที่อายุแช่น้ำทะเลที่ยาวนานมากขึ้นถึง 5 ปี เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ให้สอดคล้องกับสิ่งแวดล้อมที่มีการใช้งานจริงให้มากที่สุด โดยศึกษา การเกิดสนิมในเหล็กเสริม, การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งเป็นคุณสมบัติ

เชิงกลที่มีความสำคัญ เพื่อที่จะใช้ข้อมูลต่างๆ เหล่านี้เป็นฐานในการพิจารณาออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล ได้แก่ การวิเคราะห์หา การกักเก็บคลอไรด์ (Chloride-binding capacity), ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Concrete covering), สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) และดัชนีด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นข้อมูลที่มีความใกล้เคียงกับความสภาพการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลจริง และสามารถนำไปยืนยันผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการได้ดีขึ้น ตลอดจนข้อมูลที่ศึกษาจะนำไปเป็นฐานข้อมูลที่จะพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่ที่ไม่ใช่คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ เพื่อพัฒนาให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรงได้ อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ ยังไม่มีมาตรฐานที่รองรับการทดสอบเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคูณสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็ก การกักเก็บคลอไรด์ และการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

1.2.2) เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy และ Energy dispersive spectroscopy (SEM – EDS)

1.2.3) เพื่อสร้างดัชนีด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากฐานข้อมูลด้านความคงทนที่เก็บตัวอย่างทดสอบที่อายุ 5 ปี

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลไว้แล้วต่อเนื่องถึงอายุ 5 ปี โดยมุ่งศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล กำหนดส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ คงที่ และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ โดยส่วนผสมนี้ได้พิจารณาจากฐานงานวิจัยที่เป็น จีโอพอลิเมอร์เฟสด์ หรือจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ให้ผลไปในทิศทางที่ดี โดยเตรียมตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ พร้อมทั้งฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำคราบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งจนอายุคอนกรีตแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี จึงเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบคุณสมบัติด้าน

ความคงทน ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็กเสริม, การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) กำล้างอัดของคอนกรีต และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy และ Energy dispersive spectroscopy (SEM – EDS) และสร้างดัชนีด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากฐานข้อมูลด้านความคงทนที่เก็บตัวอย่างทดสอบที่อายุ 5 ปี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) ได้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ้ำหิน ที่ส่งผลให้คุณสมบัติดังกล่าวเป็นไปในทิศทางที่ดี ซึ่งข้อมูลด้านความคงทนสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูงต่อไป

1.4.2) เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการส่งเสริมให้ใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์มากขึ้น โดยให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมคือ แข็งแรง ทนทาน ปลอดภัย และประหยัด ตลอดจนเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดขึ้นจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวผสมกันจนสุกพอดี โดยมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียม ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ปูนซีเมนต์ที่จะกล่าวถึงนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่สามารถแข็งตัวได้ในน้ำ โดยเมื่อผสมน้ำตามส่วนผสมแล้ว สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลักและสารประกอบออกไซด์รอง ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

สารประกอบออกไซด์หลัก

สารประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ซิลิกอนออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

สารประกอบออกไซด์รอง

สารประกอบออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ ออกไซด์ของอัลคา โปแทสเซียมออกไซด์ และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)

2.1.2 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การเผา และการเย็นตัวของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaOSiO_2 หรือ C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมด้านขนาน คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีร้อยละประมาณ 45 ถึง 55

2. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (2CaOSiO_2 หรือ C_2S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูป โดยที่อุณหภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไตรแคลเซียมซิลิเกต ($\beta\text{C}_2\text{S}$) ไตรแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวให้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีร้อยละประมาณ 15 ถึง 35

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยมด้านขนาน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังค่อนข้างต่ำ เมื่อปริมาณเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีร้อยละประมาณ 7 ถึง 15

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ C_3AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 5 ถึง 10

2.1.3 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในงานก่อสร้างปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือที่ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตราย

2. ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ความร้อนสูงไม่มากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับการใช้งานคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนซัลเฟตปานกลาง

3. ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High-early strength Portland cement) หรือเรียกว่า ซุปเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผงละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วน โดยการเติมสารอื่นและบดให้ละเอียด

ยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดียิ่งขึ้น มีประโยชน์ต่อคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็ว หรือรีบแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น

4. ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low-heat Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำสุด เพราะมีปริมาณของ C_3S ต่ำ คือโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมี C_2S ก่อนข้างสูง คือโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จึงเหมาะใช้งานก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน หรือตอม่อขนาดใหญ่ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์อื่นในขณะแข็งตัว

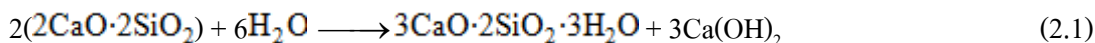
5. ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณ C_3A ต่ำมาก เพราะว่า C_3A จะรวมตัวทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้นถ้ามีปริมาณ C_3A น้อยจะเกิดการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลยจึงช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ เหมาะใช้งานโครงสร้างที่มีเกลือหรือซัลเฟต และดินเค็ม

2.1.4 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพเหลวและแข็งตัวแล้ว

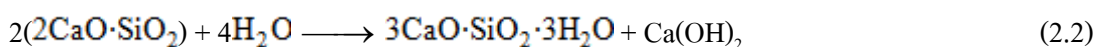
1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ C-S-H) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$ หรือ C-H) ดังสมการที่ 2.1



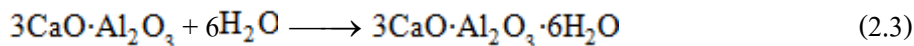
2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ C-S-H และ C-H ดังสมการที่ 2.2

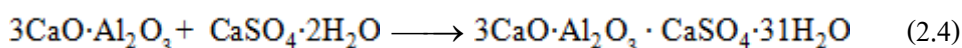


3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เฟสตั้งก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

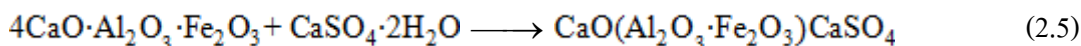


เพื่อเป็นการหน่วงปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไประหว่างการบดเม็ดปูน โดยยิปซัม (Gypsum, $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของเอตริงไจท์ (Ettringite, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) บนผิวอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4



4. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของเอตริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเฟสที่มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ C-H จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด C-S-H เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้เอตริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และขยายเข้าไปในโพรง เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อม โยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.2 ถ้ำถ่านหิน (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2553)

ถ้ำถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ้ำที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดได้แก่ ถ้ำถ่านหิน ซึ่งเป็นถ้ำถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน ถ้ำถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และถ้ำถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกตะกอนลงยังก้นเตา เรียกว่า ถ้ำก้นเตา มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอน หรือใหญ่กว่า ถ้ำถ่านหินประมาณ 16 เท่า ถ้ำถ่านหินที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ 4 ชนิดได้แก่ แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite)

2.2.1 ชนิดของถ้ำถ่านหิน

1. ชนิด F (Class F) เป็นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอริกออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปถ้ำถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ถ้ำถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์มาจากแร่ดินเหนียวและออร์ตซ์ ส่วนหินแอนทราไซต์และบิทูมินามีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้มีถ้ำถ่านหินที่มีซิลิกาออกไซด์สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของซิลิกา อลูมินา และเฟอริกออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ถ้ำถ่านหินชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ถ้ำถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมินาออกไซด์จากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมินาออกไซด์ต่ำทำให้ถ้ำถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ต่ำแล้วยังมีอลูมินาออกไซด์ต่ำด้วย

2.2.2 สมบัติทางกายภาพของถ้ำถ่านหิน

ถ้ำถ่านหินประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่า ถ้ำถ่านหินกลวง ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ้ำถ่านหินถูกกักไว้ภายในถ้ำถ่านหินและยังมีถ้ำถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคถ้ำถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายใน เรียกว่า ฟริโรสเฟีย อนุภาคถ้ำถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน ถ้ำถ่านหินแม้จะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของถ้ำถ่านหินนิยมคำนวณโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยถ้ำถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 – 5,000 ซม²/ก

เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9-2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้าถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระ เป็นรูโพรงและยังมีเถ้าถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้าถ่านหินละเอียด ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินแม่เมาะอยู่ที่ 2.0-2.2 แต่เมื่ออบค้ำให้ละเอียดขึ้นอาจมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 ได้

2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักและ MgO , Na_2O , K_2O และ SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) มาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2135-2545 ได้กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้ 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618

ส่วนประกอบทางเคมี	ข้อกำหนด	ว.ส.ท. 1014		ASTM C168	
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	Class F	Class C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	ไม่ต่ำกว่า (ร้อยละ)	70	50	70	50
SO_3	ไม่เกิน (ร้อยละ)	5	5	5.0	5.0
MgO	ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	5	ไม่ กำหนด*	ไม่ กำหนด*
Na_2O	ไม่เกิน (ร้อยละ)	1.5**	1.5**	1.5**	1.5**
ความชื้น	ไม่เกิน (ร้อยละ)	3	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)	ไม่เกิน (ร้อยละ)	6	5	6***	6

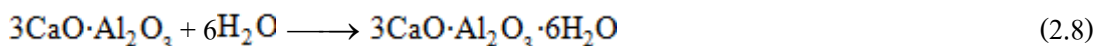
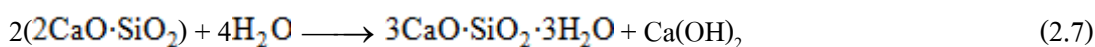
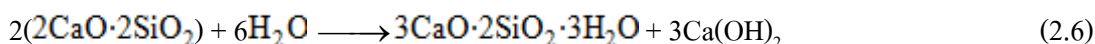
* ASTM C 618 ไม่กำหนด MgO แต่ได้กำหนดในรูปของค่าเทียบเท่าแทน โดยที่ค่าเทียบเท่า = $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$

** ว.ส.ท. 1014 และ ASTM C 618 กำหนดให้ทดสอบเป็นกรณีพิเศษ หากต้องการข้อมูลนี้

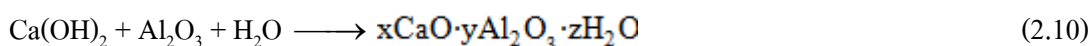
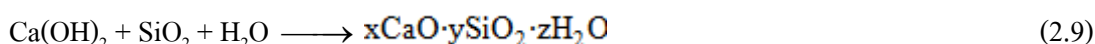
*** ASTM C 618 กำหนดว่าหากเป็นเถ้าถ่านหิน class F สามารถยอมให้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ได้ถึงร้อยละ 12 แต่ต้องมีผลการทดสอบด้านอื่นจากห้องทดลองประกอบ เพื่อแสดงว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวสามารถใช้ได้

2.2.4 ปฏิกริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกต (C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ถึง 2.8



ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีความสามารถในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุ 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ



นอกจากนี้ความสามารถของเถ้าถ่านหินในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่มีสถานะซึ่งไม่เป็นผลึก อยู่ประมาณร้อยละ 70-80 โดยเถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีความเป็นผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินหยาบ เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจึงทำปฏิกิริยาได้ไวกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ และให้กำลังที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจสูงกว่ามอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าถ่านหิน

2.2.5 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน

1. ความต้องการน้ำ

เถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้นและต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2. ระยะเวลาการก่อตัว

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและในทางกลับกันเถ้าถ่านหินที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

3. การแยกตัวและการเข้มน้ำ

โดยทั่วไปการใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตสามารถลดการเข้มน้ำได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ค่อนข้างสูง เมื่อทำแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าถ่านหิน โดยน้ำหนักทำให้ปริมาตรของเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่ามากกว่าปริมาตรของเพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งปริมาณเพสต์ที่เพิ่มขึ้นช่วยลดการเข้มน้ำและมีการยึดเกาะตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้การแยกตัวเนื่องจากมวลรวมลดลง สำหรับรูปร่างและขนาดของเถ้าถ่านหินส่งผลให้ลดการแยกตัวและการเข้มน้ำได้ เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีรูปร่างกลมสามารถลดน้ำในส่วนผสมโดยยังคงมีค่าสามารถเทเท่ากัน ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เมื่อทำการปรับปรุงโดยคัดแยกขนาดหรือการบดให้ละเอียดเพิ่มขึ้น พบว่าสามารถลดน้ำในส่วนผสมคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน จึงทำให้ลดการแยกตัวและลดปริมาณน้ำที่เกิดจากการเข้มน้ำได้ นอกจากนี้ส่วนที่ละเอียดของเถ้าถ่านหินยังช่วยทดแทนมวลรวมละเอียดในกรณีที่มวลรวมละเอียดมีขนาดเล็กไม่พอและช่วยอุดช่องทางเดินน้ำที่เข้มน้ำได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

4. โพรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้เถ้าถ่านหิน

การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ขนาดและโครงสร้างของโพรงเปลี่ยนไป ปฏิกิริยาในช่วงต้นขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใช้เถ้าถ่านหินทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง เป็นผลให้โพรงของเพสต์มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ทั้งนี้การกระจายตัวของโพรงจะดีขึ้นเพราะเถ้าถ่านหินมีลักษณะอนุภาคกลม

ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในซีเมนต์เพสต์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) เมื่ออายุมากขึ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซ ลานของเพสต์ยังคงมีต่อไป ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซ ลานเข้าไปแทรกตามโพรงทำให้ปริมาตรลดลง สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้านหินพอเหมาะประมาณร้อยละ 20 การลดลงของโพรงจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าส่วนผสมที่มีเถ้านหินมาก ปริมาตรโพรงของเพสต์ผสมเถ้านหินลดลงต่ำกว่าของเพสต์ธรรมดาได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

5. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในคอนกรีต โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ C_3S และ C_3A ซึ่งเป็นสารประกอบของปูนซีเมนต์ที่คายความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ (Neville, 1996) การใช้เถ้านหินในส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไปสามารถลดความร้อนที่เกิดได้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้านหินในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง แต่อย่างไรก็ตามเถ้านหินบางประเภทอาจไม่สามารถลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินในแต่ละแหล่งผลิตที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.3 การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล

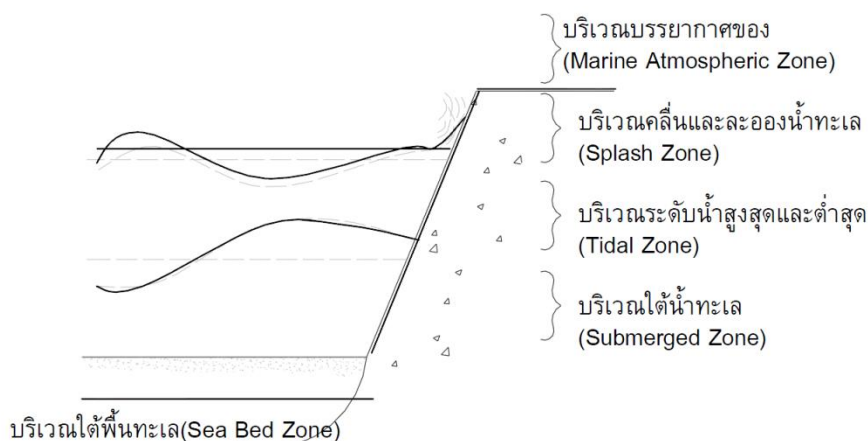
2.3.1 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยส่วนใหญ่จะมีการทำลายเกิดขึ้นค่อนข้างสูงในคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็ก ทั้งนี้เพราะการทำลายจะเกิดจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่มีเกลือคลอไรด์เป็นตัวเร่งให้เกิดการทำลายที่เร็วขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล

โครงสร้างดังกล่าวเหล่านี้ต้องเสี่ยงต่อการกัดกร่อนไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระแทกและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้น และเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็ก ๆ ทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราบ ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีตโดยเกลือของสารประกอบต่าง ๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีที่ช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่น ประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูง แต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง



รูปที่ 2.2 ชนิดของสิ่งแวดล้อมทะเล (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

2.3.2 การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ (Tangtermsirikul, 2003 ; Neville, 1996 ; Broomfield, 1996)

คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล (และในน้ำกร่อย) ซึ่งมีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีตได้ ถ้าหากว่าอยู่ในสภาพหรือมีปัจจัยที่เหมาะสม โดยคลอไรด์ที่มีบทบาทสำคัญในการทำลายจะเป็นในส่วนของคลอไรด์อิสระ ซึ่งการทำลายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมคอนกรีต

การซึมผ่านของคลอไรด์อิสระจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ มีน้ำอยู่ในระบบโพรงที่อยู่หนึ่งในคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งน้ำจะเป็นตัวพาคลอไรด์อิสระเข้าไปในคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำจะเป็นตัวกลางให้คลอไรด์อิสระผ่านเข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์อิสระจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

การซึมผ่านของคลอไรด์อิสระ ขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตในหลายๆด้าน เช่น ด้านความพรุนของเนื้อคอนกรีตเอง ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพของการบ่ม สภาพของอุณหภูมิทั้ง ในขณะผสม เท และบ่ม ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์โดยรอบ เป็นต้น ซึ่งหากคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่เพียงพอแล้ว จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการซึมผ่านของคลอไรด์อิสระนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้

1. โดยการแพร่กระจาย (Diffusion) จะเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต
2. โดยการเคลื่อนย้าย (Migration) จะเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของอิสระ) ในคอนกรีต

3. โดยการพา (Convection) จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปือกตลิ่งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเกิด Capillary Suction นั้นเอง

4. โดยการซึมผ่าน (Permeability) จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้าน hydraulic pressure ในคอนกรีต

การหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่เนื้อของคอนกรีตเนื่องจากการแพร่โดยใช้กฎข้อสองของฟิค (Fick's 2nd Law) ดังสมการที่ 2.11

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_t t}} \right) \right] \quad (2.11)$$

โดยที่ $C(x,t)$ คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ระยะ x และเวลา t ใดๆ

C_s คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ผิวสัมผัส

t คือ ระยะเวลาที่ผิวสัมผัส

x คือ ระยะที่คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีต

erf คือ ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

D_t คือ สัมประสิทธิ์การแพร่

ปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

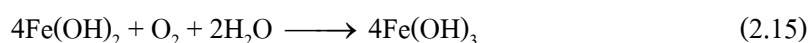
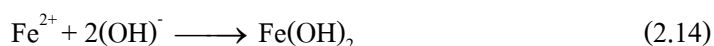
ปริมาณของคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม และถ้าหากว่ามีปริมาณมากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจมีผลทำให้ฟิล์มบาง (Passivity Film) ไม่เกิดขึ้นได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ “ปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี” โดยมีคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน ซึ่งปกติแล้วเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริมเรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) แต่เมื่อใดก็ตาม หากคลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชั้นของฟิล์มออกไซด์ของดังกล่าวจะถูกทำลายจนกระทั่งเมื่อใดที่ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ และในขณะเดียวกัน หากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะกระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีก็จะเกิดขึ้น กล่าวคือบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบเราเรียกว่า “ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



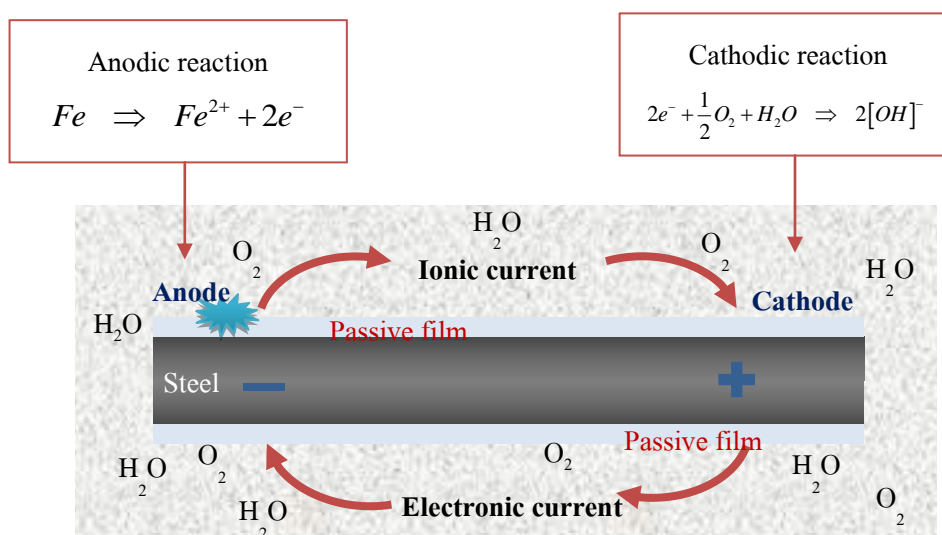
อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นนี้จะวิ่งผ่านไปยังบริเวณที่ฟิล์มไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็น ขั้วบวก (Cathodic) หากมันสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนได้ก็จะเกิดเป็น “ไฮดรอกซิลอิออน (OH^-)” ดังสมการที่ 2.13



และในขณะเดียวกัน ที่เกิดที่ขั้วลบส่วนหนึ่ง ก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนกลายเป็น “เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide)” ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15



ยังไม่พอ Fe^{2+} ที่เกิดอีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบก็จะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็น “เฟอร์ริกคลอไรด์” และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็กเพิ่มเติมดังสมการที่ 2.16 และ 2.17

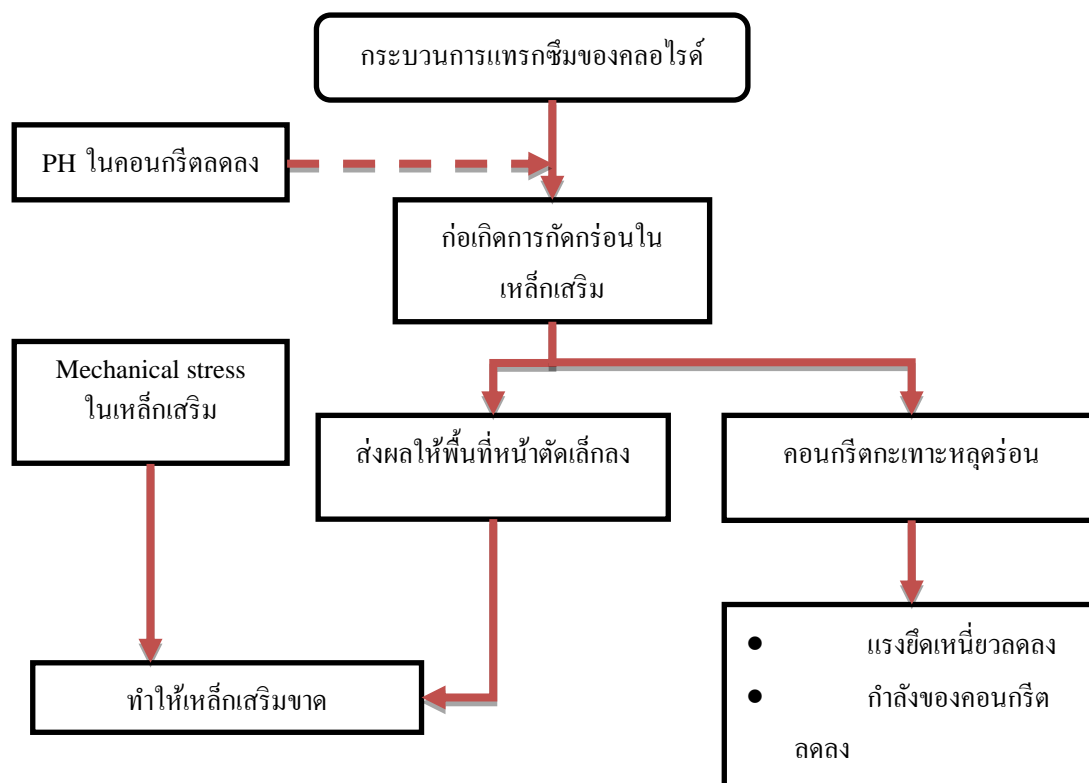


รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

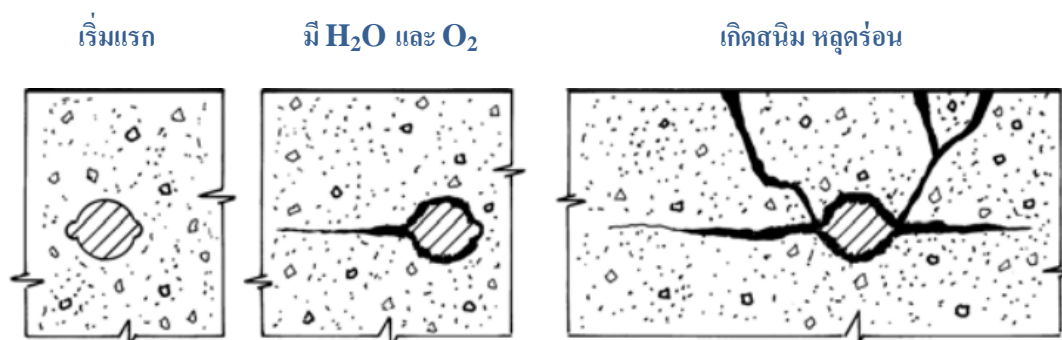
กลไกการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ (ดังรูปที่ 2.4)

โดยหลักการแล้วการโจมตีด้วยคลอไรด์ไอออนก็มีส่วนทำให้ค่า pH ลดลงด้วยเช่นกัน มุ่งหวังผลไปที่การทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นสำคัญ ส่วนการเกาะหรือหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตนั้นเป็นเพียงผลกระทบข้างเคียง

เมื่อคลอไรด์ไอออนอิสระซึมผ่านลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตถึงระดับใดจะทำให้ความเป็นด่าง (pH) ของคอนกรีตในส่วนนั้นลดลงเรื่อยๆ จากระดับปกติคือ 12.5-13.5 ลงไปสู่ระดับ 11 10 และ 9 สารละลายที่มีความเป็นด่างนี้ จะเป็นฟิล์มบางๆ ช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะทำให้เนื้อเหล็กถูกกัดกร่อนอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเป็นด่างลดลงถึงระดับวิกฤต คือ มีค่า pH ต่ำกว่า 9.0 แต่การทำลายจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วน molar ratio ระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกไซด์ไอออน (Cl^- / OH^-) เป็นสำคัญ ดังนั้นถึงแม้ค่า pH ในคอนกรีตจะสูงกว่า 11.5 เหล็กเสริมก็ยังมีโอกาสเกิดเป็นสนิมได้ ถ้าค่าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.6



รูปที่ 2.4 กระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย

2.3.3 การเกิดสนิมเหล็ก

โดยปกติเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างสูงของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสถานะของความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) ได้ นั่นคือเหล็กจะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e^-$) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วง 12.5 จนถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

กลไกการเกิดสนิมเหล็ก

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมเหล็กได้ก็ต่อเมื่อเข้าเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังนี้

1. ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิกสามารถเกิดขึ้นได้ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นนั้นมีค่า pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักเรียกว่าระดับวิกฤติของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยหลายสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนेशन การซึมผ่านคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้กระทั่งการชะล้างน้ำฝนในกรณีคอนกรีตมีความพรุนมาก
2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สถานะสารละลายและพอเพียงที่จะทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว
3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริม โดยผ่านช่องว่างที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำ

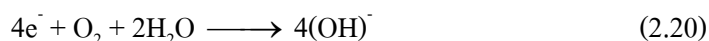
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นด่างของคอนกรีตบริเวณที่หุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริมอยู่ มีค่าความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤติ และบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ขึ้นดังสมการที่ 2.18



โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลายและอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) ต่อจากนั้น 2e^{-} ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนดังสมการที่ 2.19



ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการที่ 2.20



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือเฟอริกออกไซด์หรือสนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยาข้างต้นอาจจะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ซึ่งหมายความว่าสนิมอาจจะไม่เกิดขึ้นที่บริเวณสูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้

เมื่อสนิมได้เกิดขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีตตามกลไกที่กล่าวมาแล้ว ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วลบลดลง ส่วนเหล็กเสริมบริเวณที่รับอิเล็กตรอน (2e^{-}) มีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก สนิมจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กอาจจะมีปริมาณมากกว่า 6 เท่าของเหล็กเดิม ถ้ามีปริมาณน้ำและออกซิเจนมาก ปริมาณของสนิมเหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมและเกิดการแตกร้าว ผลกระทบโดยรวมจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคือ กำลังรับแรงต่าง ๆ ของคอนกรีตลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านความต้านทานล้าและความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างรวมถึงความยืดหยุ่นจะลดลง ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลาย คือการแตกร้าวของคอนกรีต สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตกำลังรับแรงของคอนกรีตลดลงและขาดความสวยงาม

แนวทางการป้องกันผลของคลอไรด์ที่มีต่อเหล็กเสริมของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถกระทำด้วยการเพิ่มความหนาแน่นของคอนกรีต การเลือกใช้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการหุ้มเหล็กเสริมด้วยสารเคลือบผิวป้องกันสนิม โดยองค์ประกอบสำคัญที่มีผลกระทบต่อปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม คือคุณสมบัติของคอนกรีต คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีสามารถช่วยลดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตทั้งการรับแรงและความคงทน จากการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินในด้านกำลังและความคงทนที่ผ่านมา พบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต และส่วนในด้านความคงทนพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีผลทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าลดลง ช่วยลด

การแตกตัวของคอนกรีตได้ และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูง

2.4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความคงทนของคอนกรีต (Tangtermsirikul, 2003; Neville, 1996 ; ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2553 ; ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

1. การทำลายโดยสารซัลเฟต

เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเป็นเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุดในประเทศไทยทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วย โดยยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้อย่างดี กล่าวคือ เถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนจากซัลเฟต เนื่องจากการปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของ Ca(OH)_2 ให้เป็น C-S-H ซึ่งเป็นสารประกอบที่นอกจากเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตแล้วยังทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้สูงกว่า Ca(OH)_2 อย่างมาก การลดการทำลายของซัลเฟตยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสูงยังสามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและเข้าไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้เพสต์แน่นขึ้นส่งผลให้สารซัลเฟตซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น จึงมีความทนทานมากขึ้น

2. การทำลายโดยกรด

การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก แต่คอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถ้าถ่านหินยังคงเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกค่อนข้างสูง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินหยาบทำให้ปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลงเพราะเถ้าถ่านหินหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าถ่านหินละเอียดและปูนซีเมนต์ และจากการที่เถ้าถ่านหินหยาบสามารถยึดเกาะกับเพสต์ได้ดีขึ้น จึงช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินละเอียด อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ทำขึ้นโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมไม่สามารถทนการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกความเข้มข้นสูง ๆ ได้ ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงในการใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นสูง แต่ควรใช้วิธีอื่นแทน เช่น การเคลือบผิวหน้าคอนกรีตด้วยวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด เป็นต้น

3. การซึมผ่านของคลอไรด์

การใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และการใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้น ซึ่งอาจเนื่องจากการใช้เถ้าถ่านหินแทนปูนซีเมนต์สามารถลดอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้ และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแหล่งเดียวกันที่มีความละเอียดสูงกว่าพบว่าสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาที่ชัดเจนว่า การใช้เถ้าถ่านหินสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล และลดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ลงได้

4. การเกิดคาร์บอนชั้น

การเพิ่มเถ้านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงและทำให้เกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้น เนื่องจากคาร์บอนชั้นเกิดจากที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงและทำให้ชั้นฟิล์มบางที่เคลือบเหล็กเสริมถูกทำลาย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้านหินแม้ว่าจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลง ซึ่งทำให้เกิดคาร์บอนชั้นเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้านหินทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดคาร์บอนชั้นลดลง ดังนั้นการใช้เถ้านหินจึงมีทั้งผลดีและผลเสียต่อการเกิดคาร์บอนชั้นในคอนกรีต

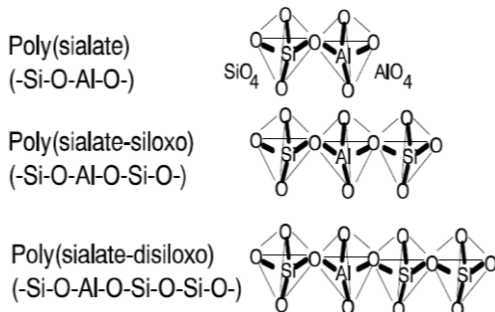
2.5 จีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2550 ; Davidovits, 1991)

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอพอลิเมอร์อนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsk ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอพอลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอพอลิเมอร์ ดังนี้

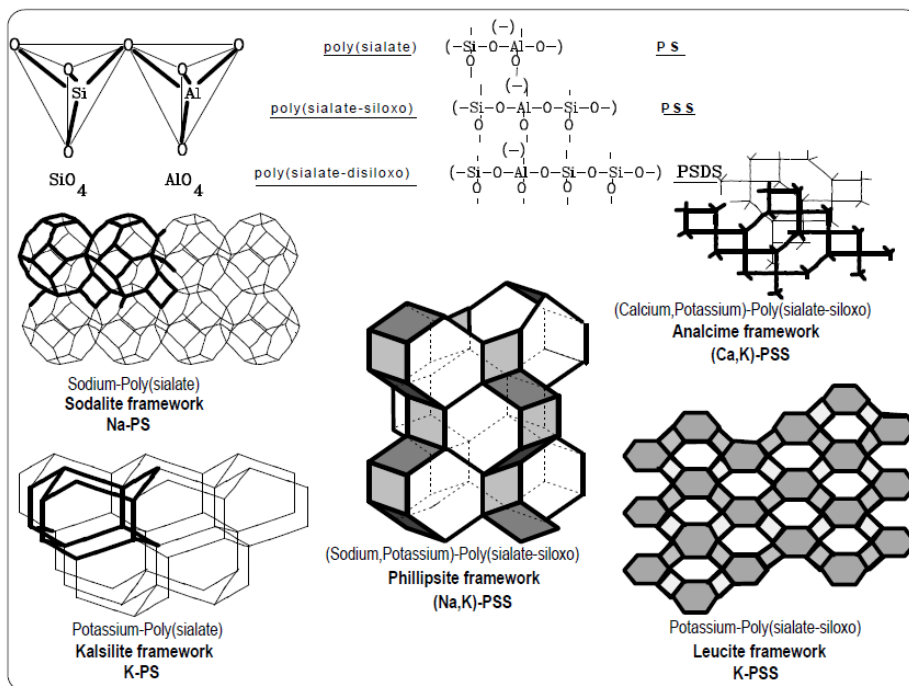
จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง

จีโอพอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาของวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบ โดยกลไกของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันนั้น เริ่มต้นด้วยการชะละลายสารหรือวัสดุที่มีสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตไปเป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์อลูมิโนซิลิเกต โดยใช้สารละลายด่างที่มีอิออนไฮดรอกไซด์จะเกิดเป็นสารอลูมิเนตและซิลิเกต ซึ่งเป็นการชะละลายที่ผิวของอนุภาคของแข็ง ทำให้อลูมิเนตและซิลิเกตถูกปลดปล่อยเป็นอิออนและอยู่ในรูปของสาร โมโนเมอร์ร่วมอยู่ในสารละลายทำให้ส่วนผสมมีสารซิลิเกต สารอลูมิเนตและสารอลูมิโนซิลิเกตเกิดขึ้น สารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิมพัลสูงในรูปของเจล จากนั้นจะเกิดเป็นสารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิมพัลสูงที่สุดในรูปของเจล แล้วควบแน่นเป็นโครงข่ายใหญ่ มีการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นโครงข่ายใหม่ มีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้นและแข็งตัว เกิดเป็นโครงข่ายอลูมิโนซิลิเกต 3 มิติ ซึ่งเรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ โดยในกระบวนการนี้จะมีน้ำเกิดขึ้นและปลดปล่อยออกมาขณะเกิดการทำปฏิกิริยาจนกระทั่งจีโอพอลิเมอร์แข็งตัว ทั้งนี้การรวมตัวในลักษณะของโครงข่ายแบบสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อเกิดซิลิกาต่ออลูมินา 1 ต่อ 1 จะเรียกโครงข่ายเป็น Poly(sialate) เมื่อ

เกิดซิลิกาต่ออลูมินา 2 ต่อ 1 จะเรียกโครงสร้างเป็น Poly(sialate-siloxo) ซึ่งจะให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังที่ดีอยู่ในอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 2 ต่อ 1 (Davidovits, 1994)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1994)



รูปที่ 2.7 โครงสารของสารจีโอพอลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (Davidovits, 1994)

2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ถือเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญมากในภาคอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารละลายและชนิดแข็ง โดยแต่ละชนิดจะแบ่งเป็น 2 ชั้นคุณภาพ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.150-2549 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารละลายแบ่งเป็น 2 ความเข้มข้น คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารละลาย 50 และ 32 โดยปกติแล้วโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีสถานะอยู่ในรูปของแข็ง มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีขาว มีคุณสมบัติในการ

ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะให้ฤทธิ์เป็นด่างแก่ ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปของเหลวที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย (น้ำ) จะมีฤทธิ์เป็นด่าง ไม่มีกลิ่น แต่สามารถระเหยเป็นไอได้ การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะผลิตจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ด้วยหลักการอิเล็กโทรไลซิสของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ เมมเบรนเซลล์ และไดอะแฟรมเซลล์ โดยการนำเกลือแกงมาแยกด้วยกระแสไฟฟ้า กระแสตรงทำให้เกิดก๊าซคลอรีน และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำในเซลล์จนเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคลอรีน

2.7 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n(\text{SiO}_2)$) เป็นสารที่ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และซิลิกาผสมกันอยู่โดยมีสัดส่วนต่าง ๆ กัน แล้วแต่ชนิดและการนำไปใช้งาน ได้แก่ โซเดียมออร์โทซิลิเกต (Na_4SiO_4) โซเดียมเมตาซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมพอลิซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{SiO}_3)_n$ โซเดียมไพโรซิลิเกต ($\text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$) และอื่นๆ โซเดียมซิลิเกตมีลักษณะคล้ายแก้วใส ไม่มีสี สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเกิดจากการหลอมส่วนผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนต หรือ โซดาแอช (Na_2CO_3) กับทรายแก้ว เมื่อหลอมเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วจะได้โซเดียมซิลิเกต และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่กล่าวมาแล้วว่าโซเดียมซิลิเกตมีอัตราส่วนระหว่าง Na_2O และ SiO_2 ได้หลายอัตราส่วนซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการนำไปใช้งานต่างกันด้วย โดยทั่วไปโซเดียมซิลิเกตสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้มากมาย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมฟอกสี อุตสาหกรรมผลิตสารทำความสะอาด เป็นต้น อันเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัว

สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) ตามมาตรฐาน มอก. 433-2539 ที่เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ มีฤทธิ์เป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน ซึ่งมีอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 30 ที่อุณหภูมิ 30

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาที่เกี่ยวกับความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่มีการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ที่มุ่งประเด็นไปที่ความคงทนต่อสารเคมีที่ทำอันตรายต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหรือมอร์ตาร์ เช่น เกลือซัลเฟต กรด และคลอไรด์ เป็นต้น โดยวิเชียร ชาติ และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำกั้นเตา โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำกั้นเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาสมบัติด้าน

ความคงทนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบกำลังอัดหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษามุมฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (stretching) โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ที่ช่วงความถี่ $1200-950\text{ cm}^{-1}$ และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 350 กก./ซม^2 และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุตา สมณา และ วิเชียร ชาลี (2553) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยทำการเตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ และกำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 หลังจากหล่อตัวอย่างทดสอบและแกะแบบแล้ว ได้ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มขึ้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิ-คอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี (2554) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ได้เตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่ หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200\text{ มม}^3$ และบ่มคอนกรีตในอากาศจนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 180 วัน แล้วเก็บตัวอย่างมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทาละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทาละลาย) ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พร้อมทั้งคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) โดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) ตลอดจนหาปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการวิจัยพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์

คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมากกว่าสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น และแนวโน้มกำลังอัดที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 กลุ่มที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, และ 2.8 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

การศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่า เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน แล้วทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น โดยการศึกษาในภาคสนามในประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตทะเลร้อนชื้น Chalee และคณะ (2010) ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี ซึ่งพบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลด้านความคงทนที่ศึกษาในสิ่งแวดล้อมทะเลที่เป็นเขตอบอุ่น โดยการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนเนื่องจากน้ำทะเลมากขึ้น นอกจากนั้นคอนกรีตที่ต้องใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลควรจะมีการกักเก็บคลอไรด์ที่ดี ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลง และทำให้การเกิดสนิมเหล็กน้อยลงด้วย โดย Cheewaket และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในคอนกรีต ส่งผลให้ค่าร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่มีผลชัดเจนกับการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต

ในส่วนของการวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในภาคสนามมีค่อนข้างน้อย โดย W. Chalee and P. Chindaprasirt (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็ก และกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินภายใต้สภาพแวดล้อมทะเล โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออลูมินาของที่หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ และฝังเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีตที่ 20, 50 และ 75 มม. บ่มที่อุณหภูมิเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำไปแช่ทะเลเป็นระยะเวลา 3 ปี หลังจากนั้นนำมาเจาะเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝัง จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้งที่อายุ 28 วัน และ 3 ปี มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงช่วยเพิ่มความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหิน ส่งผลให้เกิดผลผลิตที่ให้กำลังต่อคอนกรีตได้มากขึ้นและเกิดการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ในระยะยาวที่สูงขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กลดลง เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงจะมีกำลังรับแรงอัดสูง จึงส่งผลให้คอนกรีตแน่นและทึบน้ำมากขึ้น คลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตน้อยลง เมื่อการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง เหล็กเสริมจึงเกิดสนิมเนื่องจากการกัดกร่อนจากคลอไรด์ลดลงด้วย ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ต้องการที่จะเก็บข้อมูลต่อเนื่องจากการศึกษาดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนและมีจำนวนมากพอในการสร้างดัชนีด้านความคงทนของการใช้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน เพื่อเป็นโครงสร้างที่ใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลต่อไป

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. แก้วถ่านหิน ใช้แก้วถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ร้อยละ 325 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23
2. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61
3. มวลรวมหยาบ ใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72
4. สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์
5. น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาด
6. เหล็กเสริม ใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ชั้นคุณภาพ SR24 ผึงไว้ในก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต
7. กำมะถัน สำหรับแคปหัวลูกปูนเพื่อทดสอบกำลังอัด

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ

1. ครกหิน ใช้ครกหินสำหรับบดตัวอย่างคอนกรีตให้ละเอียด เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหรือจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (รูปที่ 3.1(ก))
2. เตาไฟฟ้า (รูปที่ 3.1(ข))
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ที่มีความละเอียด 0.001 (รูปที่ 3.1(ค))
4. เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (รูปที่ 3.1(ง))
5. เครื่องทดสอบกำลังอัดขนาด 300 ตัน (รูปที่ 3.1(จ))
6. เครื่องตัดคอนกรีต (รูปที่ 3.1(ฉ))
7. เครื่องเจาะคอนกรีต (รูปที่ 3.1(ช))
8. อุปกรณ์ปรับระดับ (รูปที่ 3.1(ซ))
9. ตะแกรงเบอร์ 20
10. อุปกรณ์ทดสอบทางวิทยาศาสตร์อื่น ๆ ได้แก่ ขวดชมพู, บีกเกอร์, กระจกบดวง, แ่งแก้ว, ช้อนตักสาร, กรวยบุนเนอร์, กระจาดกรอง และ ขวดฉีดน้ำ

11. สารละลายที่ใช้ในการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ได้แก่ ซิลเวอร์ไนเตรต($\text{Ag}(\text{NO}_3)_3$), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), กรดไนตริก (HNO_3) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

12. น้ำกลั่น



(ก) ครกหิน



(ข) เตาไฟฟ้า



(ค) เครื่องชั่งน้ำหนัก



(ง) เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ



(จ) เครื่องทดสอบกำลังอัด UTM



(ฉ) เครื่องตัดคอนกรีต



(ข) เครื่องเจาะคอนกรีต



(ค) อุปกรณ์ปรับระดับ

รูปที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.3.1 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

การศึกษานี้ได้ออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยมีการเตรียมเมื่อ 5 ปีที่แล้ว ซึ่งใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al คงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (กก/ม ³)				
		เถ้าถ่านหิน	หิน	ทราย	NaOH	Na ₂ O:SiO ₃
1	8M	390	1092	585	67	167
2	10M	390	1092	585	67	167
3	12M	390	1092	585	67	167
4	14M	390	1092	585	67	167
5	16M	390	1092	585	67	167
6	18M	390	1092	585	67	167

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีความหมายดังนี้

8, 10, 12, 14, 16 และ 18 หมายถึง จำนวนโมลาร์ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

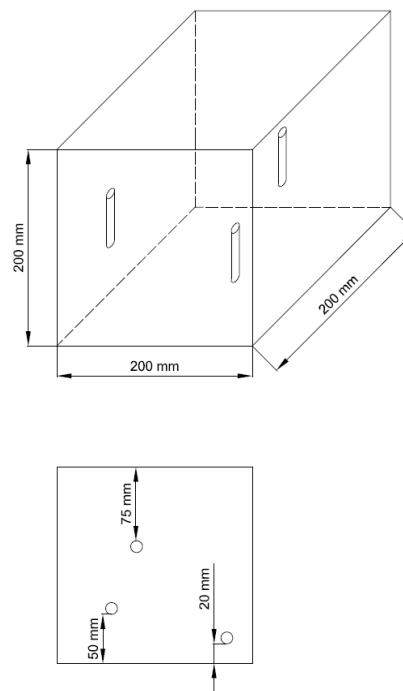
M หมายถึง โมลาร์

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“8M” หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์

3.3.2 การหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อ 5 ปีที่แล้ว

เมื่อ 5 ปีที่แล้วได้หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม³ ตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 3.1 และได้ฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 20, 50 และ 75 มม. แสดงดังรูปที่ 3.2 หลังจากหล่อคอนกรีต และบ่มคอนกรีตจนครบอายุ 28 วัน จึงได้นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลัง โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลใน สภาพเปียกและแห้งตามน้ำขึ้น-ลง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งระยะหุ้มคอนกรีตที่ฝังเหล็กเสริมใน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน



รูปที่ 3.3 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

3.4 วิธีการทดสอบ

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 5 ปี เข้ามาในห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา เพื่อนำมาเจาะทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้น้ำและกรดเป็นตัวทำลาย การกัดกร่อนเหล็กเสริม และ โครงสร้างจุลภาค

3.4.1 การทดสอบกำลังอัด

1. เมื่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำทะเลจนครบอายุตามกำหนดแล้ว เก็บตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากน้ำทะเลดังรูปที่ 3.4 จากนั้นเจาะตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม. ดังรูปที่ 3.5(ก) โดยตัวอย่างที่เจาะได้จากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. มีความสูง 200 มม.

2. ตัดตัวอย่างทรงกระบอกที่ได้จากการเจาะให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ยาว 100 มม. ดังรูปที่ 3.5(ข)

3. ทำการตัดแต่งผิวหน้าทั้งสองหน้าของตัวอย่างให้เรียบ

4. นำตัวอย่างที่ตัดแต่งดีแล้วทำการเคลือบผิว โดยใช้กัมมะถันเคลือบผิวทั้งสองด้านพร้อมทั้งใช้ลูกน้ำตั้งระดับ ดังรูปที่ 3.5(ค)

5. เมื่อกัมมะถันแห้งดีแล้ว นำตัวอย่างที่ได้เข้าไปทดสอบกำลังอัดในเครื่องทดสอบ UTM ดังรูปที่ 3.5(ง)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน หลังแช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง



(ก) การเจาะตัวอย่างคอนกรีต



(ข) ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 50x100 มม.



(ค) การเคลบตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้กัมมะถัน (ง) การทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบ UTM

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัด

3.4.2 การทดสอบปริมาณคลอไรด์

การศึกษานี้ได้ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีต เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218 และใช้กรดเป็นตัวทำละลาย เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ตามมาตรฐาน ASTM C1152

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

1. นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เก็บขึ้นจากน้ำทะเลบริเวณชายฝั่ง นำมาเจาะที่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง โดยเจาะทะลุผ่านตัวอย่าง ซึ่งจะไดตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเจาะตัวอย่างคอนกรีตให้เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม.

2. นำตัวอย่างทรงกระบอกที่ได้จากการเจาะมาตัดแบ่งเป็นชั้น ชั้นละ 10 มม. วัดจากผิวหน้าคอนกรีตถึงกึ่งกลางของทรงกระบอก ประมาณ 10 ชั้น แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การตัดตัวอย่างทรงกระบอกเป็นชั้นๆ ละ 10 มม.

3. นำตัวอย่างที่ได้จากการตัดแบ่งแต่ละชั้นมาบดให้ละเอียดด้วยครกหิน และนำผงคอนกรีตที่บดละเอียดแล้วไปร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อที่จะนำผงคอนกรีตส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทำการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้น้ำและกรดเป็นตัวทำละลายตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

3.4.3 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (*Water-soluble Chloride*) ตามมาตรฐาน *ASTM C1218*

1. นำผงคอนกรีตที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 ก. โดยชั่งละเอียด 0.01 ก. แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล.
2. เติมน้ำปริมาณ 50 มล. ลงในบีกเกอร์
3. นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
4. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
5. เติม H_2O_2 และ HNO_3 อย่างละ 3 มล. แล้วคนให้เข้ากัน
6. นำตัวอย่างใส่ในแก้วไทเทรตจำนวน 2 แก้ว แก้วละ 10 มล.
7. เติมน้ำลงไปในแต่ละแก้ว แก้วละ 30 มล.
8. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณปริมาณคลอไรด์อิสระ

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (*Acid-soluble Chloride*) ตามมาตรฐาน *ASTM C1152*

1. นำผงคอนกรีตที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 ก. โดยชั่งละเอียด 0.01 ก. แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล.
2. นำกรดไนตริก (1:1) จำนวน 75 มล. และน้ำกลั่นจำนวน 25 มล. ผสมลงในตัวอย่าง
3. ปิดฝาบีกเกอร์ด้วยกระจกแล้วนำไปต้มเป็นเวลา 3 นาที
4. ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศด้วยอุณหภูมิต่ำ
5. นำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
6. เติม $NaCl$ 2 มล. ลงในตัวอย่างที่กรองแล้ว

7. นำตัวอย่างใส่ในแก้วไทเทรตจำนวน 2 แก้ว แก้วละ 10 มล.

8. เติมน้ำลงไปในแต่ละแก้ว แก้วละ 30 มล.

9. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

3.4.4 การทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริม

หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตไปเจาะเพื่อทดสอบกำลังอัดและทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ แล้วนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการเจาะมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ UTM เพื่อเก็บเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมด้วยแผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1×1 มม.² ซึ่งทำได้โดยนำแผ่นกราฟนี้มาทาครอบแท่งเหล็กแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.9 จากนั้นนับพื้นที่ที่มีสนิมเหล็กเกิดขึ้น และนำพื้นที่ที่นับได้มาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด ค่าที่คำนวณได้คือ พื้นที่การกัดกร่อนของเหล็ก โดยคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเหล็ก ดังสมการที่ 3.1 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายรูปสนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในคอนกรีต

$$C, (\%) = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ C คือร้อยละของพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กที่เกิดสนิมเหล็ก

RA คือ พื้นที่ผิวของแท่งเหล็กที่เกิดสนิม (ตร.มม.)

SA คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็ก (ตร.มม.)



รูปที่ 3.9 การวัดพื้นที่ผิวของเหล็กที่เกิดสนิมด้วยแผ่นกราฟพลาสติกใส

3.4.5 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ โดยทำการบดคอนกรีตให้ละเอียดและส่งตัวอย่างทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ energy dispersive spectroscopy (EDX)

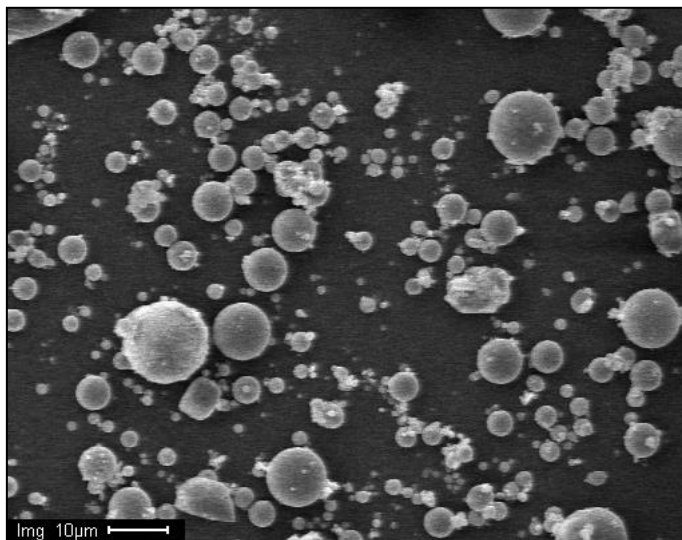
บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน

เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าถ่านหินจากภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ตามรูปที่ 4.1 พบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีลักษณะทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่คละกัน เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส ในการเผาไหม้ ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน



รูปที่ 4.1 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

เถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคกว้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 4.1

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน ที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้า

ถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 70.91 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO_2 (%)	34.10
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

4.1.3 สมบัติของมวลรวมและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

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

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่มากที่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72

4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ่านหินหลังแช่ในน้ำทะเลถึงอายุ 5 ปี ดังตารางที่ 4.2 และการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตดังรูปที่ 4.2 พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอายุที่แช่ในน้ำทะเล โดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 3 ปีแรกสูง

กว่าในช่วง 3 ถึง 5 ปี เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่น้ำทะเลดังรูปที่ 4.3 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล มีแนวโน้มสูงขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เท่ากับ 283, 298, 313, 396, 401 และ 414 กก./ซม.² ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 ปี ทั้งนี้เป็นผลจากความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น สามารถชะซึลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย (Chindaprasirt and Chalee, 2014 ; Rattanasak and Chindaprasirt , 2009) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 18 โมลาร์ อาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้การยึดเกาะของจีโอพอลิเมอร์เจดกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้ (ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ คณะ, 2553)

การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14 ถึง 18 โมลาร์ ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตไม่แตกต่างกันมาก โดยให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในช่วง 303 ถึง 322 กก./ซม.² และเมื่อแช่น้ำทะเลถึง อายุ 5 ปี จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มดังกล่าวให้กำลังอัดในช่วง 396 ถึง 414 กก./ซม.² ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นจาก 14 โมลาร์ เป็น 18 โมลาร์ ไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ น่าจะมีความเหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน เพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง เนื่องจากมีความประหยัดและให้กำลังอัดที่ดี

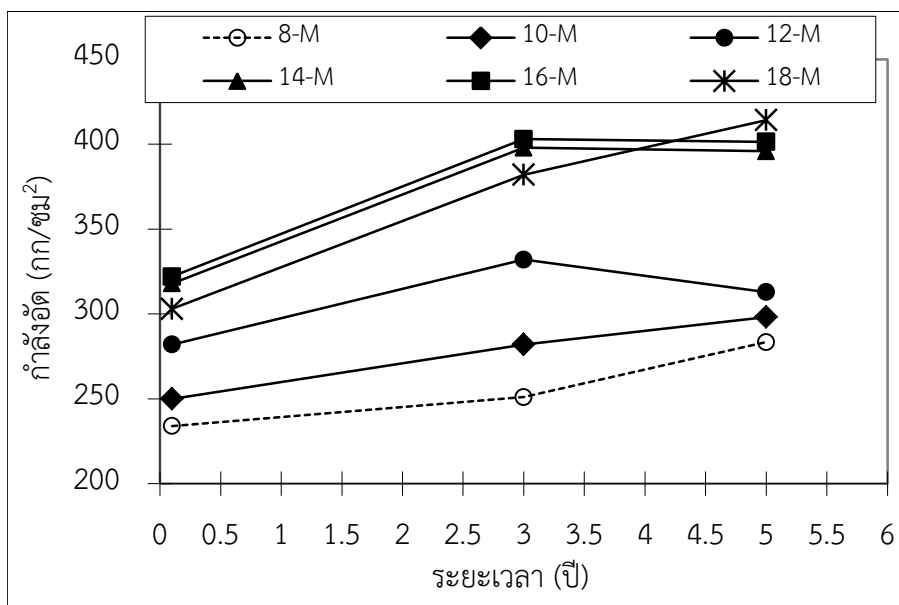
อย่างไรก็ตามจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลควรพิจารณาสมบัติด้านความคงทนควบคู่ไปด้วย เมื่อพิจารณาผลของสิ่งแวดล้อมทะเลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินในรูปของร้อยละของกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เทียบกับก่อนแช่น้ำทะเล (บ่มในอากาศ 28 วัน) พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 14-18 โมลาร์ ให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน สูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 8-12 โมลาร์ เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเลในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง น้อยกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตจะมีผลจากลักษณะทางกายภาพ เช่น การสึกกร่อนเนื่องจากการขัดสีที่เกิดจากการกระแทกของคลื่น ทรายน

การทำลายทางชีวภาพ และ อุณหภูมิ เป็นต้น ตลอดจนการทำลายเนื่องจากสารเคมีที่อยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ กลีโกลอไรด์และซัลเฟต โดยในคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ซัลเฟตในน้ำทะเลจะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวและสูญเสียกำลังอัด จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น (วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555) ซึ่งอาจเป็นผลจากสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกา และอลูมินาได้มาก และส่งผลให้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้มากขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$) ที่มีความแข็งแรงต่ำและทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น (Bakharev, 2005)

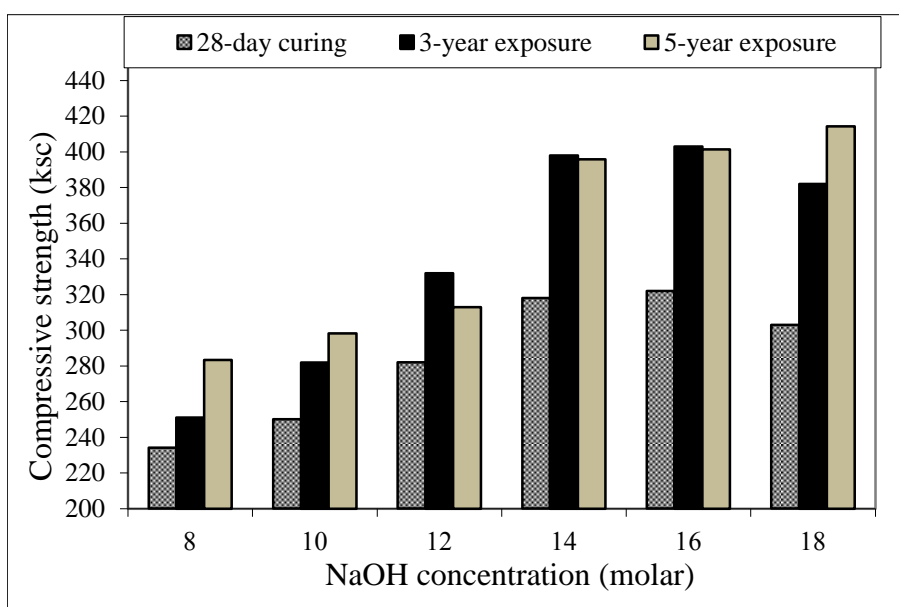
อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้กลับพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเลน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากกำลังอัดที่สูงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง สามารถลดการแทรกซึมของเกลือซัลเฟตเข้าไปในคอนกรีตได้ ตลอดจนการแช่ตัวอย่างทดสอบในบริเวณชายฝั่งทะเลที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งจะมีความเข้มข้นของเกลือซัลเฟตลดลง นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงสามารถต้านทานการทำลายทางกายภาพบริเวณชายฝั่งทะเลได้ดี ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Chalee et al., 2013)

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลถึง 5 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)			ร้อยละกำลังอัด 5 ปี เทียบ 28 วัน
	บ่มในอากาศ 28 วัน	แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล		
		3 ปี	5 ปี	
8-M	234	251	283	121.1
10-M	250	282	298	119.3
12-M	282	332	313	111.0
14-M	318	398	396	124.5
16-M	322	403	401	124.7
18-M	303	382	414	136.7



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุแช่น้ำทะเลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน



รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

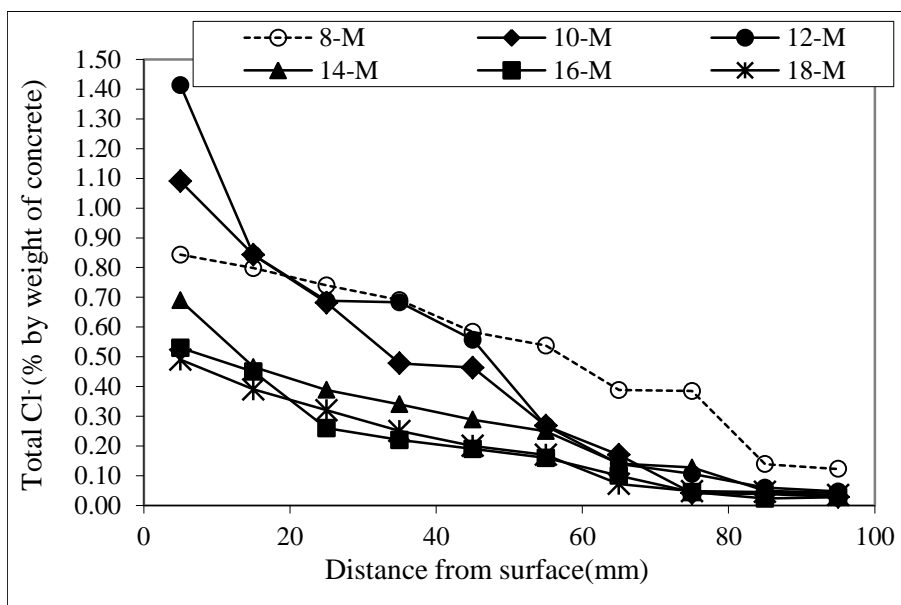
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

เมื่อพิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) ตามลำดับ พบว่า ที่ระดับความลึกบริเวณใกล้ผิวคอนกรีต มีปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์

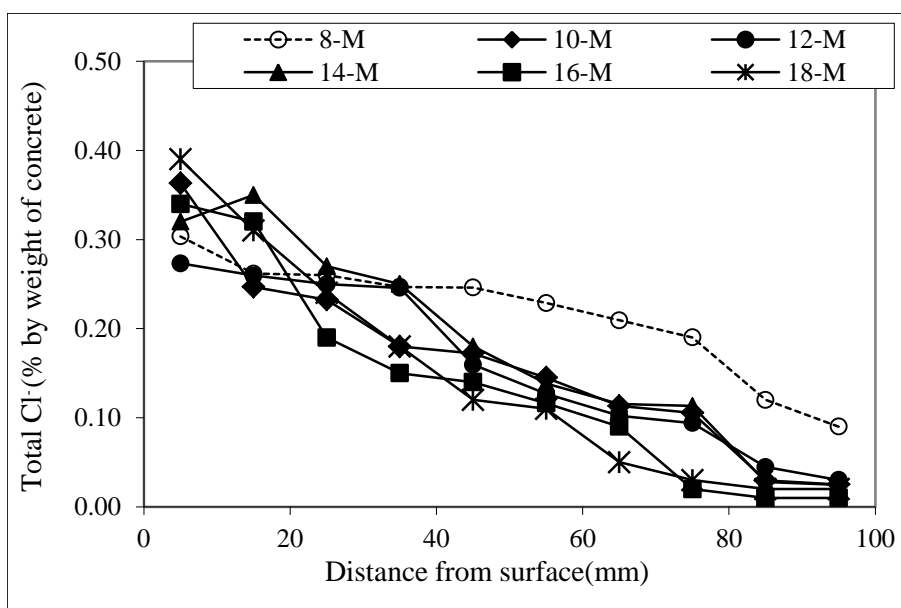
แนวโน้มน้ำที่ชัดเจนได้ เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกมากขึ้น (มากกว่า 15 มม.) พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง มีแนวโน้มให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระลดลง โดยเฉพาะที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีตที่มากขึ้น (รูปที่ 4.5) เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถา ถ่านหินที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ ที่ระดับความลึก 45 มม. เท่ากับร้อยละ 0.58, 0.46, 0.56, 0.29, 0.19, 0.20 และ 0.25, 0.17, 0.16, 0.18, 0.14, 0.12 โดยน้ำหนักของคอนกรีต ตามลำดับ

การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลงตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH อาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและ อะลูมินาจากเถาถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน มีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ (Chindaprasirt and Chalee, 2014 ; Sanawong and Chalee, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ อาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซ ลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถาถ่านหินและด่างที่ ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมาจากเถาถ่านหิน ส่งผล ให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกด้วย (Neville, 1996 ; ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2553 ; ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) การศึกษาครั้งนี้ พบว่า ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้ สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 16 ถึง 18 โมลาร์ ใกล้เคียงกัน โดยความเข้มข้นของ สารละลาย NaOH ที่สูงถึง 18 โมลาร์ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดีที่สุด

อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับก่อสร้างในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ต้องพิจารณาทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนควบคู่กันไป ประกอบกับต้นทุนการผลิตที่ต่ำ โดยการศึกษานี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 14-18 โมลาร์ ให้กำลังอัดไปในทิศทางที่ดี และไม่แตกต่างกันมาก ส่วนสมบัติด้านความคงทนพบว่า การใช้ สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 16-18 โมลาร์ สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ จากน้ำทะเลได้ดีและใกล้เคียงกัน ดังนั้นการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 16 โมลาร์ จึง มีความเหมาะสมทั้งทางด้านความคงทน ความแข็งแรง และความประหยัดตามหลักวิศวกรรม ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน เพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล

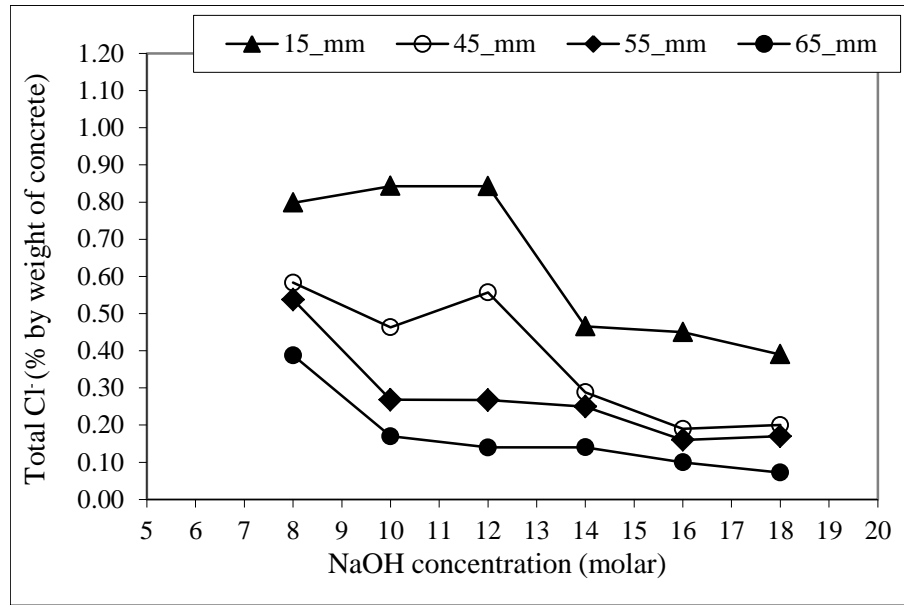


ก) คลอไรด์ทั้งหมด

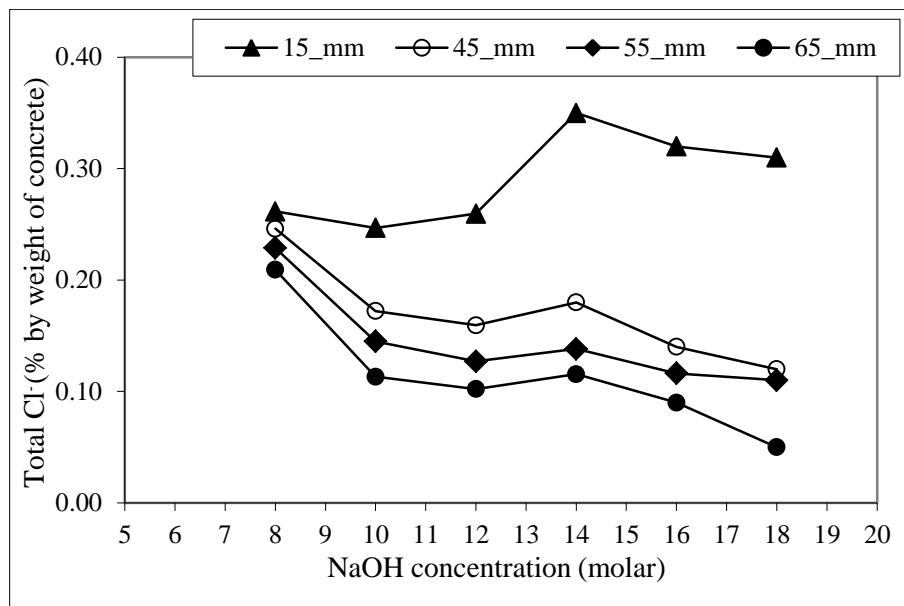


ข) คลอไรด์อิสระ

รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านานหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี



ก) คลอรได์ทั้งหมด



ข) คลอรได์อิสระ

รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

ในการศึกษาครั้งนี้ หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ (4.1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (4.1) แสดงดังสมการที่ (4.2)

$$C_{x,t} = C_o [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad (4.2)$$

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

x = ระยะจากผิวหน้าของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

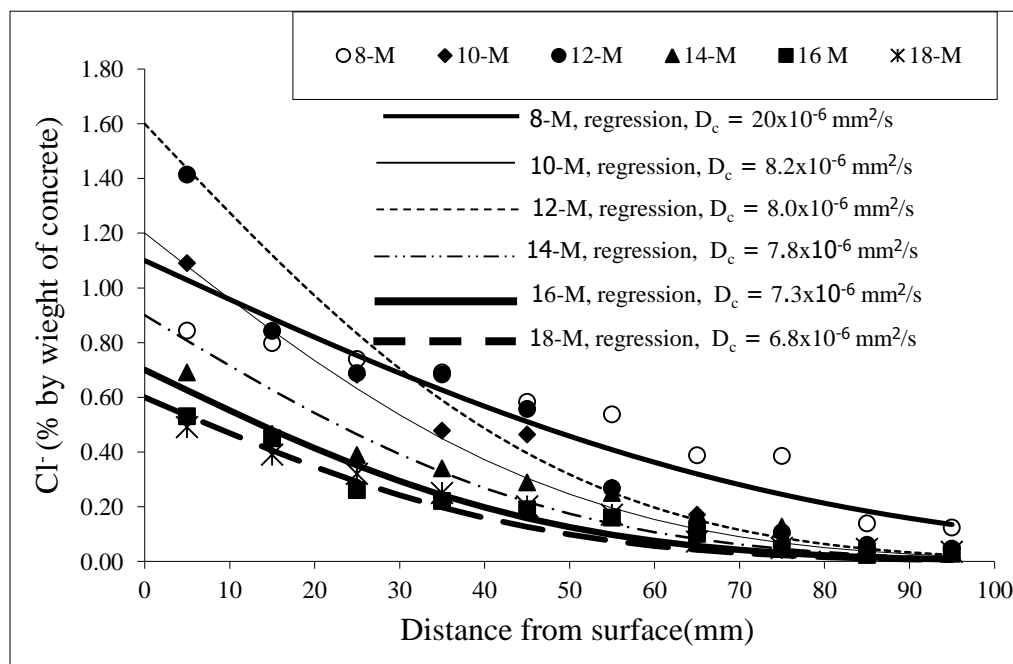
C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีต (ที่ $x=0$) ที่ระยะเวลาแช่ t

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลา แช่ t (มม²/วินาที)

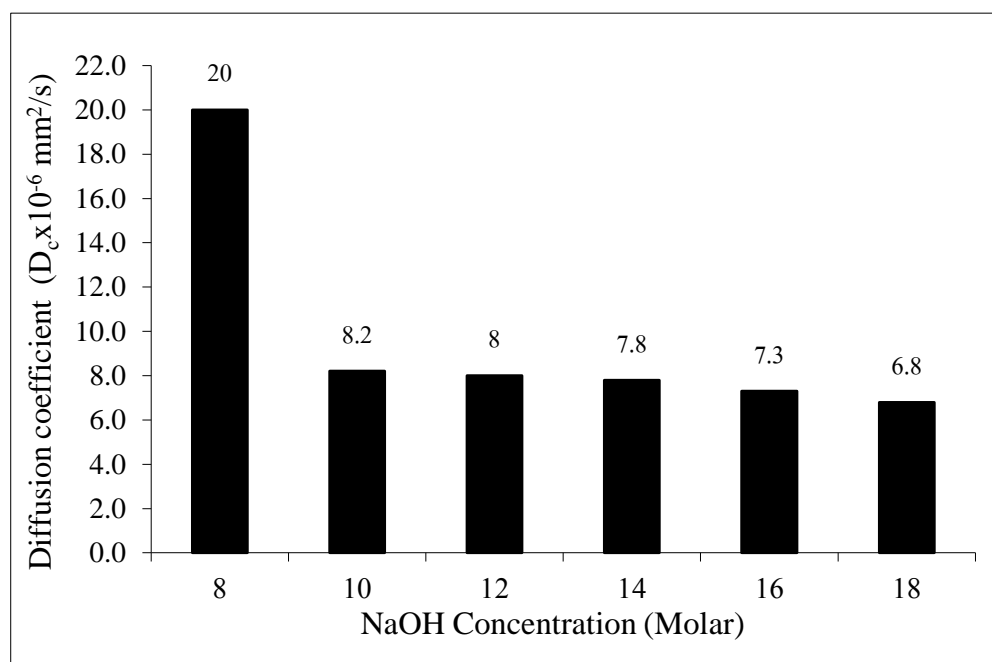
erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (4.2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.6 ที่แสดงการหาค่า D_c โดยใช้สมการที่ (4.2) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ค่า D_c มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระดังที่กล่าวมาข้างต้น โดย D_c มีค่าต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สูงขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีค่า D_c เท่ากับ 20×10^{-6} , 8.2×10^{-6} , 8.0×10^{-6} , 7.8×10^{-6} , 7.3×10^{-6} และ 6.8×10^{-6} มม²/วินาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดที่สูงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ และมีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงผลในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee et al., 2009)



รูปที่ 4.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี

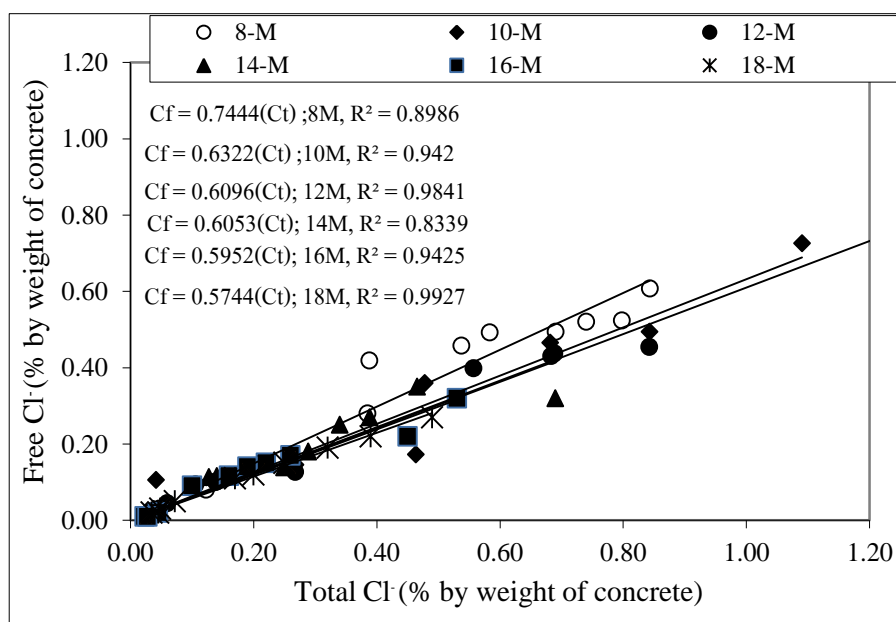
4.5 การกักเก็บคลอไรด์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ในรูปของร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_{cb}) โดยหาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังสมการที่ 4.3 (Cheewaket et al., 2010)

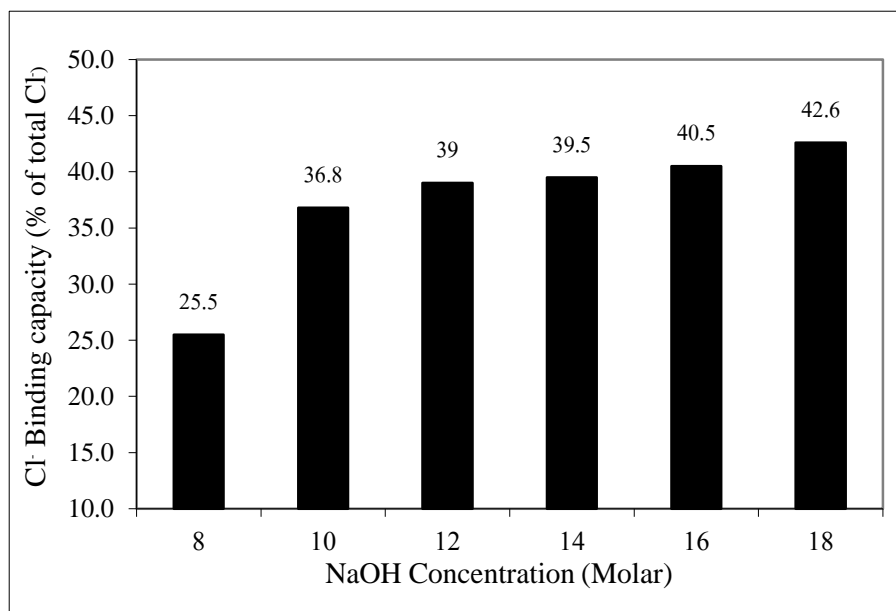
$$P_{cb} = \frac{[(C_t - C_f) \times 100]}{C_t} \quad (4.3)$$

เมื่อแทนค่าปริมาณคลอไรด์อิสระ (C_f) ในรูปของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (C_t) ในสมการที่ (4.3) ได้ ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_{cb}) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ เท่ากับร้อยละ 25.6, 36.8, 39.0, 39.5, 40.5 และ 42.6, ตามลำดับ ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_{cb}) ดังรูปที่ 4.9 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_{cb}) มีค่าสูงขึ้น โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt and Chalee, 2014) ที่มีการเก็บข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ที่พบว่า การกักเก็บคลอไรด์มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลงและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย และการดักจับคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดิล (Friedel's salt) อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อีกส่วนหนึ่งที่เป็นไปได้คือการดักจับทางกายภาพ โดยคลอไรด์ไอออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลึกภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น (Cheewaket et al., 2010) การศึกษาครั้งนี้ กลไกการให้กำลังและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ดังนั้นการดักจับคลอไรด์ไอออนจึงน่าจะเป็นการดักจับทางกายภาพ โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น กำลังคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมาก และการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็น

ของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูงในเต้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบซิลิเกตได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นเจลแข็งที่มีสมบัติเหมือนกับซีเมนต์เจลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และสามารถดักจับคลอไรด์ทางกายภาพได้อีกด้วย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี

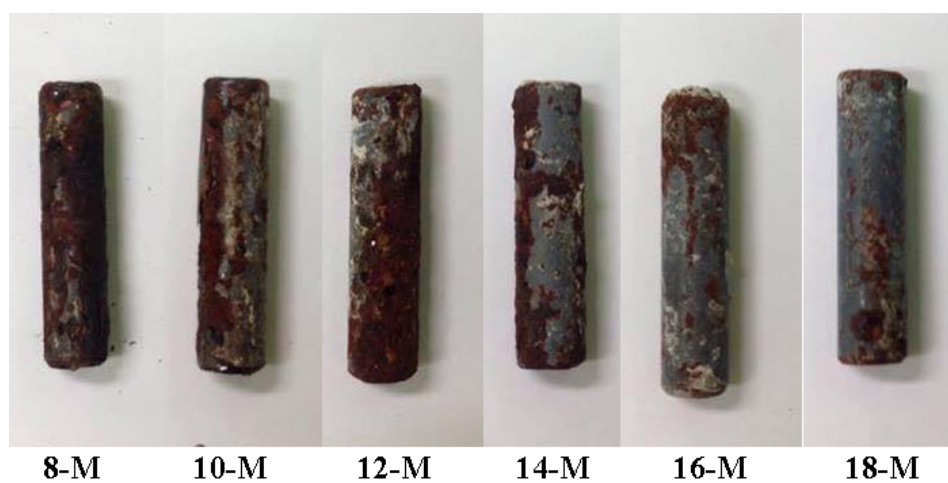
4.6 การเกิดเสริมในเหล็กเสริมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ฝังที่ระยะความลึก 20, 50 และ 75 มม. หลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี โดยวัดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในรูปของร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมทั้งหมด และวัดปริมาณร้อยละของน้ำหนักที่สูญหายเมื่อเทียบกับน้ำหนักเหล็กก่อนขัดสนิม ลักษณะการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 20, 50 และ 75 มม. แสดงดังรูปที่ 4.9(ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ลดลง และกำลังอัดที่สูงขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละของพื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิมและร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหายที่ระยะฝังเหล็กเท่ากับ 50 มม. เท่ากับ 63.1, 47.9, 18.7, 19.8, 3.5, 1.3 และ 2.96, 2.43, 0.75, 0.83, 0.23, 0.16 ตามลำดับ และให้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกันในทุกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ผลการศึกษาค้นคว้าพบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 16 และ 18 โมลาร์ สามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน โดยมีการเกิดสนิมเล็กน้อยที่ระยะฝังเหล็ก 50 มม. เมื่อพิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ซึ่งเป็นระยะที่แนะนำให้ใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการ

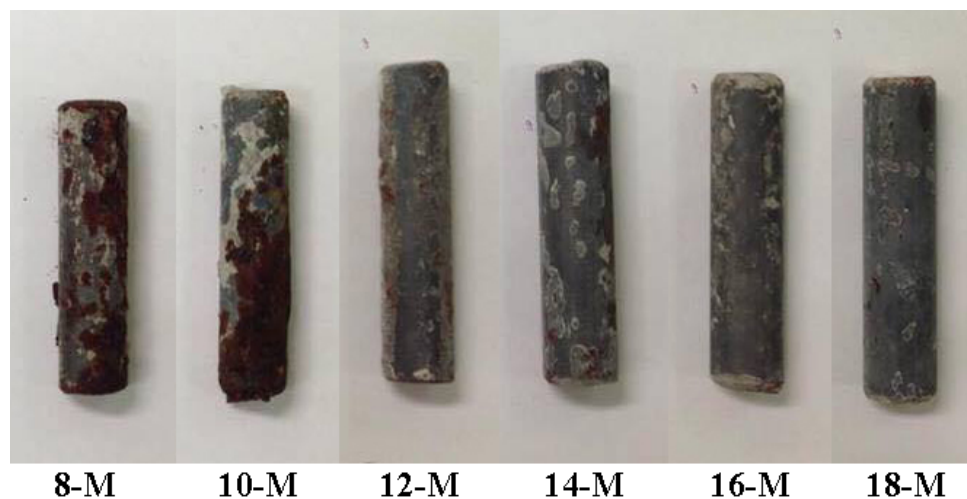
ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลพบว่า สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละของพื้นผิวเหล็กที่เกิดสนิมและร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหายที่ระยะฝังเหล็กเท่ากับ 75 มม. เท่ากับ 32.7, 19.6, 13.1, 14.2, 2.1, 1.9 และ 1.15, 0.86, 0.29, 0.33, 0.11, 0.09 ตามลำดับ โดยการเกิดสนิมที่ระดับความลึกดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่เป็นสนิมที่ผิวเหล็ก ยังไม่มีการเกิดลึกลงเข้าไปในเนื้อเหล็กมากนัก โดยสังเกตได้จากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเกิดสนิมค่อนข้างต่ำ นอกจากนั้นพบว่าการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 16 ถึง 18 โมลาร์ เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 และ 75 มม. และมีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กตั้งแต่ 50 มม. ขึ้นไป ความเสียหายที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งยังไม่เกิดขึ้นชัดเจน ส่วนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำกว่า 16 โมลาร์ พบว่าปริมาณการเกิดสนิมเหล็กเกิดขึ้นค่อนข้างชัดเจน กลไกการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เป็นผลจากกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น มีลักษณะทางกายภาพที่ดี เช่น การกระจายของโพรง, ขนาดโพรง, ความต่อเนื่องของโพรง, และรอยแตกร้าว เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้มีค่าสูง และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ น้ำและออกซิเจน ทำให้การเกิดสนิมเหล็กลดลง นอกจากนั้นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ที่ดีกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ จึงมีผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมเหล็กลดลงได้ (Broomfield, 1996) ตลอดจนความเป็นต่างของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จะส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กลดลง โดยผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมที่ฝัง
ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี

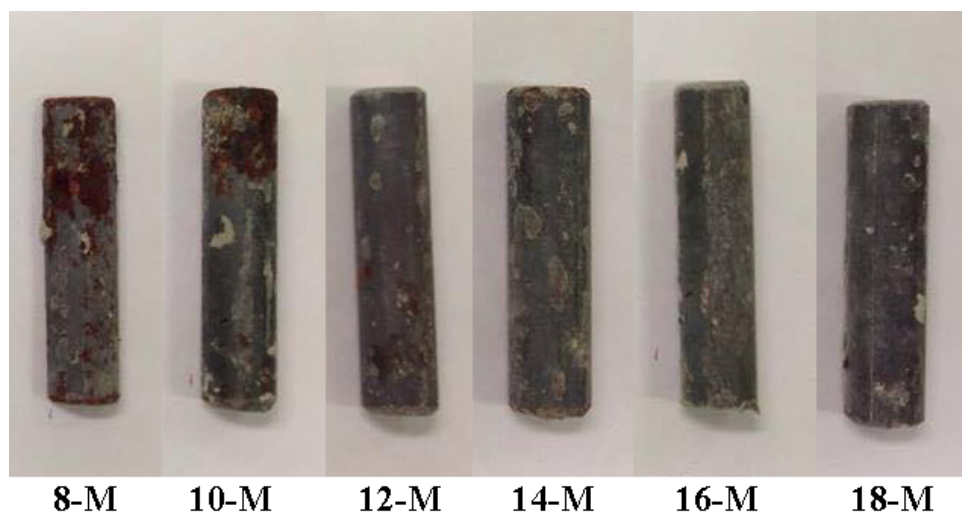
ส่วนผสม	ร้อยละของพื้นที่สนิมเหล็ก			ร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหาย		
	20 มม.	50 มม.	75 มม.	20 มม.	50 มม.	75 มม.
8M	91.7	63.1	32.7	5.51	2.96	1.15
10M	89.1	47.9	19.6	3.65	2.43	0.86
12M	83.2	18.7	13.1	3.34	0.75	0.29
14M	71.7	19.8	14.2	1.14	0.83	0.33
16M	39.5	3.5	2.1	0.83	0.23	0.11
18M	32.3	1.3	1.9	0.78	0.16	0.09



ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.



ข) ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.



ค) ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

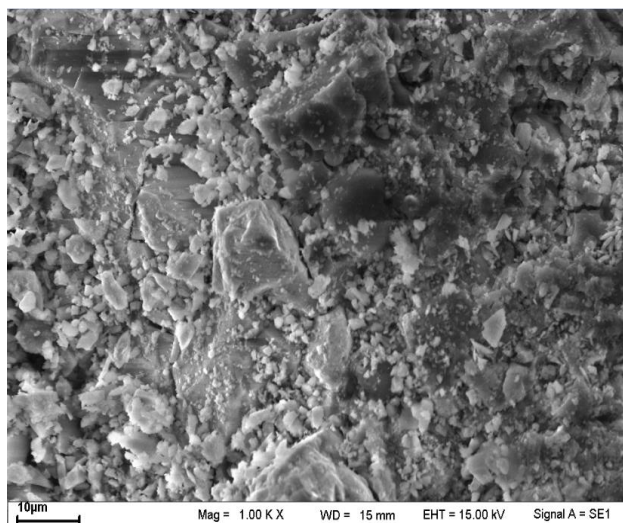
รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี

4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

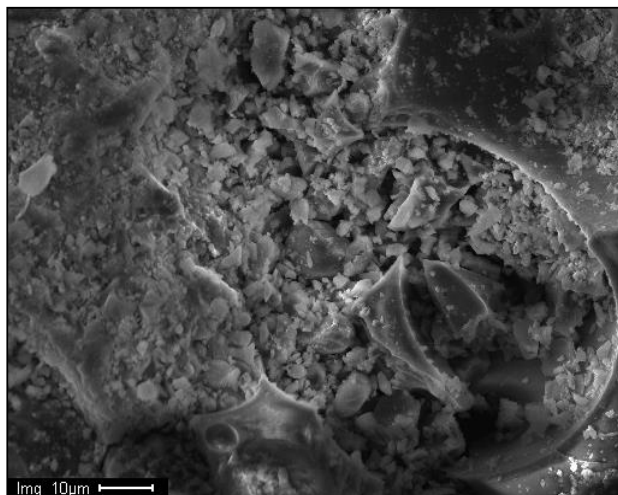
เมื่อพิจารณาภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8, 10, 16 และ 18 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.11(ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ชัดว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ (NaOH

เข้มข้น 8 และ 10 โมลาร์) มีความพรุนของพสต์ค่อนข้างสูง เป็นผลึกที่ไม่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ มีกำลังอัดต่ำ การแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กที่สูง ส่วนกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงถึง 16 และ 18 โมลาร์ พบว่า เนื้อของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นผลึกที่แน่นขึ้น มีความต่อเนื่อง โพรคาปีลารีที่เป็นโพรขนาคใหญ่ลดลง ความพรุนในเนื้อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้เพิ่มขึ้น การเกิดสนิมเหล็กและการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน

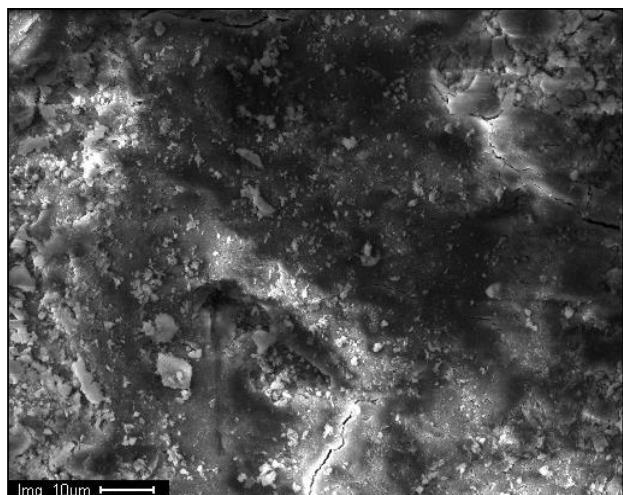
การที่โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง (16 ถึง 18 โมลาร์) มีเนื้อที่แน่นขึ้น และมีลักษณะเป็นผลึกที่ต่อเนื่อง ความพรุนต่ำ เป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้สมบูรณ์ (Chindaprasirt and Chalee, 2014 ; Sanawong and Chalee, 2010) นอกจากนี้ อาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถ้าถ่านหินและค่าที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมาจากเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน และเป็นผลึกที่แน่นอีกด้วย (Neville, 1996 ; ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2553 ; ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)



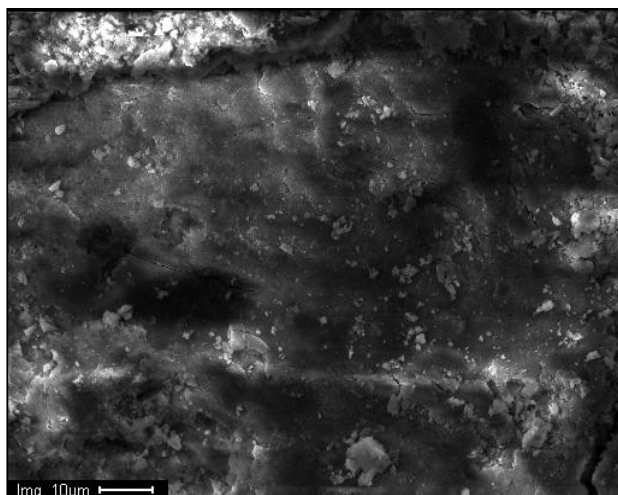
ก) NaOH เข้มข้น 8 โมลาร์



ข) NaOH เข้มข้น 10 โมลาร์



ค) NaOH เข้มข้น 16 โมลาร์



ง) NaOH เข้มข้น 18 โมลาร์

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ (ก) 8 โมลาร์ (ข) 10 โมลาร์ (ค) 16 โมลาร์ และ (ง) 18 โมลาร์ ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

4.8 ดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลจะต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดีควบคู่กับสมบัติด้านความคงทน กล่าวคือ ต้องมีกำลังอัดที่สูงควบคู่กับการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริม ที่ทำให้การรับแรงเชิงกลของโครงสร้างคอนกรีตลดลง และส่งผลต่อการวิบัติและอายุการใช้งานที่สั้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริม

เหล็ก ดังนั้นการพิจารณาดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ ได้พิจารณาการรับแรงเชิงกล (กำลังอัด) ความคู่กับสมบัติด้านความคงทน (การแทรกซึมของคลอไรด์ และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์) โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล จะต้องมิกำลังอัดที่สูง การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำ และการกักเก็บคลอไรด์ที่สูง ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้อัตราส่วนระหว่าง ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (P_b/D_c) และเทียบกับคอนกรีตเทียบกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่มีฐานข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยคอนกรีตดังกล่าวมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 3.1×10^{-6} มม.²/วินาที (Chalee et al., 2009) และมีร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อายุ 5 ปี เท่ากับร้อยละ 16.6 (Cheewaket et al., 2010) โดยคอนกรีตดังกล่าวเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติอย่างต่ำที่ ACI 201 กำหนดให้สามารถใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ ดังสมการที่ 4.3

$$DI_{Geo} = \frac{(P_b / D_c)_{Geo}}{(P_b / D_c)_{I45}} \times 100 \quad (4.3)$$

เมื่อ

DI_{Geo} = ดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน

$(P_b / D_c)_{Geo}$ = อัตราส่วนระหว่างร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

$(P_b / D_c)_{I45}$ = อัตราส่วนระหว่างร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

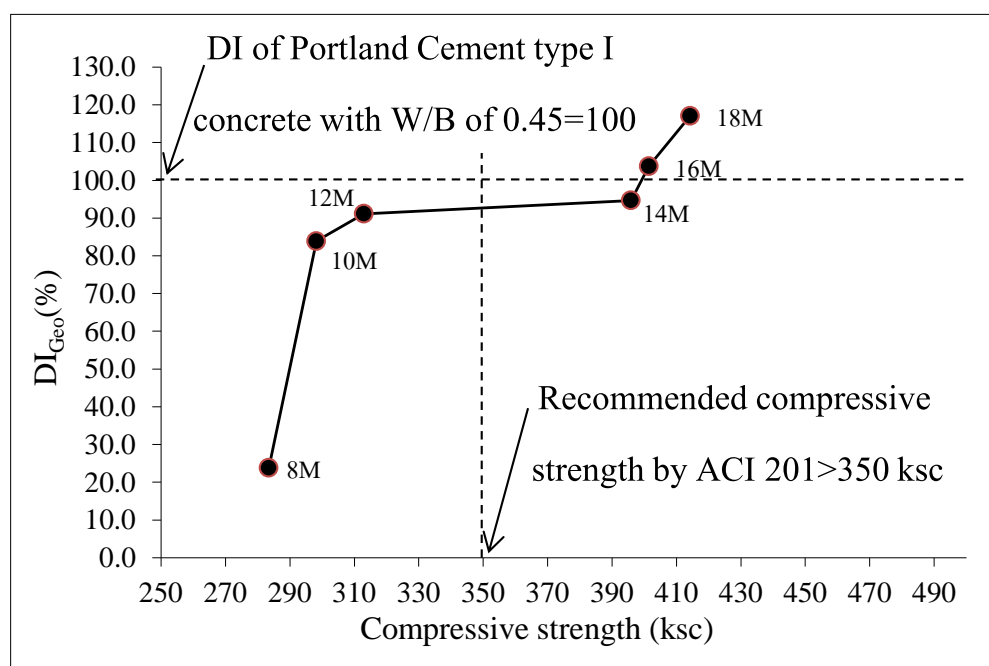
ตารางที่ 4.4 แสดงดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 โดยรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ซึ่งพบว่า สมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่วัดในรูปของดัชนีความคงทน (Durability Index, DI) มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น นั่นแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การใช้สารละลาย NaOH ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจาก

เถาถ่านหินที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดี โดย จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 16 และ 18 โมลาร์ ให้ค่าดัชนีความคงทน ($DI_{G_{co}}$) สูงกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นดังกล่าวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน สามารถเพิ่มสมบัติด้านความคงทนและต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดที่ ACI 201 แนะนำให้ใช้ในคอนกรีตธรรมดา ที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 16 และ 18 โมลาร์ให้ค่าดัชนีความคงทนเท่ากับร้อยละ 103.7 และ 117.1 ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 16 โมลาร์ พบว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีค่าดัชนีความคงทนต่ำกว่า 100 เกือบทุกส่วนผสม เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มีค่าดัชนีความคงทน เท่ากับร้อยละ 23.8, 83.9, 91.1 และ 94.7 ตามลำดับ โดยเห็นได้ว่าการการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำถึง 8 โมลาร์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีดัชนีความคงทนที่ต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มอื่นๆ ก่อนข้างชัดเจน และต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ($DI=100\%$) อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลดังที่กล่าวมาข้างต้น ได้พิจารณาเฉพาะผลของการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ ซึ่งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ แต่นอกเหนือจากปัจจัยดังกล่าว การเลือกใช้คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตควบคู่ไปด้วย เพราะถึงแม้ว่าคอนกรีตจะมีการต้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่ถ้าเป็นคอนกรีตที่มีกำลังต่ำเกินไป ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 16 และ 18 โมลาร์ ให้กำลังอัดสูงกว่า 350 กก./ซม.² ซึ่งเป็นกำลังอัดอย่างต่ำที่ ACI 201 แนะนำให้ใช้เป็นคอนกรีตสำหรับก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยให้สมบัติด้านความคงทนสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 อีกด้วย

ตารางที่ 4.4 คำนีความคงทนของจีโอฟลิมเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน

ส่วนผสม	กำลังอัดที่อายุ แช่น้ำทะเล 5 ปี (กก/ซม ²)	$D_c \times 10^{-6}$ มม ² / วินาที	P_b	$A=(P_b/D_c)_{Geo}$	$B=(P_b/D_c)_{145}$	$DI_{Geo}(\%) =$ $(A/B) \times 100$
8-M	283	20	25.5	1.28	5.35	23.8
10-M	298	8.2	36.8	4.49		83.9
12-M	313	8	39	4.88		91.1
14-M	396	7.8	39.5	5.06		94.7
16-M	401	7.3	40.5	5.55		103.7
18-M	414	6.8	42.6	6.26		117.1



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่านีความคงทนของจีโอฟลิมเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน

หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอายุที่แช่ในน้ำทะเล โดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 3 ปีแรกสูงกว่าในช่วง 3 ถึง 5 ปี

5.1.2 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14 ถึง 18 โมลาร์ ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีกำลังอัดในช่วง 396 ถึง 414 กก./ซม²

5.1.3 การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีแนวโน้มให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและการกัดกร่อนเหล็กเสริมลดลง โดยเฉพาะที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีตที่มากขึ้น

5.1.4 การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้ ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น

5.1.5 การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 16 ถึง 18 โมลาร์ มีความเหมาะสมทั้งทางด้านความคงทน ความแข็งแรง และความประหยัดตามหลักวิศวกรรม ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน เพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากให้ค่าดัชนีความคงทน (DI_{Geo}) สูงกว่าร้อยละ 100 และกำลังอัดสูงกว่า 350 กก./ซม.²

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลสิ่งแวดล้อมทะเลต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น เช่น เถ้าถ่านหินจากแหล่งอื่นๆที่เผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์ม น้ำมัน เถ้าชานอ้อย และ ดินเหนียวขาว เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายในการใช้วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). *ความคงทนของคอนกรีตพิมพ์ครั้งที่ 1*, บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-72.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553. กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 15(1): 13-22.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554. การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(2) : 187-195
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2553. การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. *เอกสารประกอบการบรรยายวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 71-79.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555. *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต*. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547. *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน, *Burapha Sci.*, J.14 (1) หน้า 47-55
- วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555. การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน, *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35(2), หน้า 157-170
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2550. วัสดุจีโอพอลิเมอร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- ACI 211.1-91. (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- ACI 201.2R-01. (2003). Guide to durable concrete.
- ASTM C1152. (1997). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, *Annual Books of ASTM Standards V. 04.01* Philadelphia 627-629.
- ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.

- ASTM C1218. (1997). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01.*
- ASTM C192/C 192M-06. (2006). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. *Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01.*
- ASTM C39/C 39M-05. (2006). Standard test method for compressive strength of cylindrical Concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01.*
- Bakharev, 2005. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cem Concr Res, 35* : 1233-1246.
- Broomfield, J.P., 1996, Corrosion of Steel in Concrete, England, Taylor & Francis Ltd
- Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C. 2010. Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Mater Design*, Vol. 3, pp.1242-1249.
- Chalee W., Sasakul T., Suwanmaneechot P., Jaturapitakkul C., 2013. Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cem Concr Compos, 37* : 47-53.
- Chalee W. and Jaturapitakkul C., 2009. Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures 42* : pp. 505-514
- Cheewaket T., Jaturapitakkul C. and Chalee W., 2010. Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Materials 24* : 1352–1357
- Chindaprasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., Rattanasak U., 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage; 29*: 539-543.
- Chindaprasirt P., Chalee, W., 2014. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials, 63* : 303–310.
- Davidovits, J. 1991, *Geopolymer inorganic polymeric new materials*. J Therm Anal 37, pp. 1633-1659.
- Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, and Young Soo Chung, 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials, 47* : 409-418.
- Neville A.M., (1996), Properties of concrete, 4th Edition. Longman, Malasia, pp. 563-575

Rattanasak U., Chindaprasirt P., 2009. Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng* ;22:1073-1078.

Sanawong C., Chalee W., 2010. Water permeability in fly ash based geopolymer concrete. *J. of Civil engineering and architecture*, 4 : 15-19.

Tangtermsirikul S, (2003), Durability and mix design of concrete, 1st Edition. Printing house of Thammasat university, Thailand, pp. 61-136

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 1) ทศิคุ้มพร หวานจันทร์ และ วิเชิษร ชาลี. (2560). กำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินหลังแช่สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12*, เพชรบุรี หน้า MAT115-122.

ภาคผนวก ค
ประวัตินักวิจัย

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายวิเชียร ชาลี

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Wichian Chalee

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

โทรศัพท์ 038-102-222 ต่อ 3356

โทรสาร 038-102-222 ต่อ 3355

E-mail wichian@buu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2541

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2546

ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี พ.ศ. 2550

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุก่อสร้าง, คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานและเถ้าชีวมวล, ความคงทนของคอนกรีต

ผลงานวิชาการ

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติ

- 1) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site”, *Materials and Structures* (2014) 47:1501–1511
- 2) P. Chindapasirt and W. Chalee, “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials* 63, 2014, pp. 303–310
- 3) W. Chalee¹, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment”, *Cement and concrete composites* 37, 2013, pp. 47–53
- 4) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials* 37, 2012, pp. 693–698
- 5) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Pokpong Rattanachu, Wichian Chalee, “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete”, *Materials and Design* 36, 2012, pp. 597–603
- 6) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Wichian Chalee, Pokpong Rattanachu, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate”, *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 2012, pp. 16-22
- 7) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, 2010, “Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment”, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1352–1357
- 8) W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis”, *Materials and Design* (2010) 31 : pp. 1242-1249
- 9) C. Sanawong and W. Chalee, 2010, “Water permeability in fly ash based geopolymer concrete”, *J. of Civil engineering and architecture* 4 (2010) 15-19

- 10) W. Chalee and C. Jaturapitakkul*, 2009, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", *Materials and Structures* (2009) 42 : pp. 505-514
- 11) W. Chalee, C. Jaturapitakkul*, and P. Chindaprasirt' 2009 "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater" *Marine Structures*, 22, 2009, pp.341-353
- 12) Prinya Chindaprasirt, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, and Ubolluk Rattanasak*, 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers ," *Waste Management*, Vol.29, No. 2, pp 539-543. (Impact factor = 1.338)
- 13) Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C.*, 2007, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment," *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.5, pp. 965-971 (Impact factor = 2.293)

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ

- 14) W. Chalee, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul (2011). CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING RICE HUSK-BARK ASH UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE SITE. *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction ISEC-6*, Zurich, June 21-26, 21-28.
- 15) Koonthong, S., Chawkitchareon, P., and Chalee, W. (2010). Compressive strength and thermal conductivity of concrete masonry block containing plastic label waste. *The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference, TISD 2010*, Thailand, pp.801-804
- 16) Yimsiri, S. and Chalee, W. (2010). Damage of reinforced concrete building due to adjacent deep excavation. *3rd ASEAN Civil Engineering Conference, 3ACEC*, Manila, Philippine
- 17) Suwanmaneechot, P., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W. (2009). Chloride penetration of concrete containing rice husk-bark ash in marine exposure site. *4th International Conference in Construction Materials: Performance, Innovstions and Structural Implications*, Nagoya, Japan, pp. 725-730, 725-730.
- 18) Chalee, W. and Jaturapitakkul, C. (2008). Long Term Performance of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *The 8th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Bangkok, Thailand, 11th-14th November 2008, pp. 178-182

- 19) T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt and S. Songpiriyakij (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, November 11-13, 2008, pp 151-157

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับชาติ

- 20) มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2
- 21) วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “ผลกระทบ1 ถ่านหินที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี” วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.
- 22) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, “การศึกษาการชะเถ้าถ่านหิน ลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- 23) ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ, ธวัชชัย สาสกุล, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของน้ำทะเล ต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 357-370.
- 24) วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, “การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้า ถ่านหิน”, Burapha Sci., J.14 (1) หน้า 47-55
- 25) ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci., J.15 (1) หน้า 13-22
- 26) ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่าน หินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (2) : 187-195
- 27) กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, 2554, “ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน สิ่งแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (3) : 257-266
- 28) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้า แกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”,วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี 34 (3) : 203-213

- 29) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2554 หน้า 21-28
- 30) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน”, *Burapha Sci. J.* 16 (2) : 51-62
- 31) ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติและ วิเชียร ชาลี, 2555, “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 22 (3), 2555: 1-13
- 32) วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555, “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 35(2), หน้า 157-170
- 33) ณัฐกร แนบทอง, วิเชียร ชาลี, 2555, “การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต”, *Burapha Sci. J.* 17(2) : 38-49
- 34) วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ, 2556, “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี -36(2), หน้า 197-213
- 35) วิเชียร ชาลี, 2556, “ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 18(2), หน้า 132-143
- 36) กิรติกร เจริญพร้อม, วิเชียร ชาลี, 2556 “ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 23 (1),: 107-119
- 37) กนกเนตร จั่นนุกุ่ม วิศรา โกรระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, 2557 “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24(1)
- 38) ปุณยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุทธิธาทา และ วิเชียร ชาลี, 2558 “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 20(1), หน้า 35-50

- 39) ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1), หน้า 1-12
- 40) Panha Huy Soklam Mov และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การผลิตคอนกรีตบล็อก ชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 21(2), หน้า 31-46
- 41) Reaksmeay Soeurt และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(3)
- 42) นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2560 “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ตอบรับตีพิมพ์)

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 43) Reaksmeay Soeurt รัฐพล สมนา และ วิเชียร ชาลี “ผลของด่างเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 นครราชสีมา หน้า 1-8.
- 44) Ponhsampatea Ly นิชา สุระกิจ และ วิเชียร ชาลี “จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 นครราชสีมา หน้า 1-8.
- 45) เอกรัตน์ ตัชชานนท์ รัฐพล สมนา และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัด การซึมของน้ำ และระยะคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสม”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 นครราชสีมา หน้า 1-8.
- 46) PONHSAMPATEA LY กิรติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 47) REAKSMEY SOEURT PONHSAMPATEA LY และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัดและการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 48) ณัฐวุฒิ ธารเนตร ชรรมชาติ มูลสาร และ วิเชียร ชาลี “วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.

- 49) ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และ วิเชียร ชาลี “ระยะเวลาจำกัดก่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบลเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม 2557 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น หน้า 831-836.
- 450) นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT113-MAT118.
- 51) วิชย พรหมรักษ์, อภิชาติ ทুমสุต และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT107-MAT112
- 52) กิรติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ วิเชียร ชาลี, 2556, “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT234-MAT238
- 53) กิรติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี , 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7, 19-21 ตุลาคม 2554 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100.
- 54) วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย สาสกุล 2553, “ผลของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล”,การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, 20-22 ตุลาคม 2553 อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี หน้า 40-48.
- 55) ชรินทร์ เสนาวงษ์ อธิพิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552, “การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเอ็นกั้นเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592
- 56) ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุภา สมณา ปริญญา จินดาประเสริฐ และ วิเชียร ชาลี, “คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552
- 57) ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ขนาดของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 1, 22-23 กันยายน 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 39-44

- 58) ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ปริมาณของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทาคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35, 15-17 ตุลาคม 2552, เดอะไฮทรีสปอร์ต ชลบุรี
- 59) P. Suwanmaneechot , C. Jaturapitakkul and W. Chalee , 2551, “Water permeability of fly ash concrete in marine environment”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 49-55.
- 60) รัฐพล สมณา วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของเถาถ่านหิน 3 แห่่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 107-112.
- 61) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.
- 62) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมลองบีช การ์เด้น โฮเทล แอนด์ สปา, พัทยา ชลบุรี หน้า 103-109
- 63) ชวัลชัย สาสกุล , ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและ เอกชัย ภัทรวงศ์ ไพบูรย์, 2550, “กำลังอัดและการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในสภาพแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ. พิษณุโลก หน้า 41-46
- 64) Wichian Chalee, Prasit Ausapanit and Chai Jaturapitakkul, “A model for predicting the required cover depth of fly ash concrete in marine environment, Annual Concrete Conference 2, Udon Thani, 2006.
- 65) Chalee, W., Teekavanit, M., and Jaturapitakkul, C., “Compressive Strength and Chloride Penetration Profile of Fly Ash Concrete under 4-Year Exposure in Sea Water”, International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, May 24-25, 2006, Khon Kaen, Thailand, pp. 180-188.
- 66) Smith Songpiriyakij, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, “Model for Predicting Compressive Strength of Fly Ash Concrete from Fly Ash Fineness,” Proceeding of 8th National Convention on Civil Engineering, Khon Kean, 2003.

- 67) ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2546, "ผลกระทบของความละเอียดถี่ถ้วนต่อกำลังอัดและโครงสร้างโพรงในเพสต์", การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, 14-16 พฤษภาคม, กาญจนบุรี, หน้า 225-232.
- 68) วิเชียร ชาลี, มณฑิธร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, "ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มเหล็กต่อการกักกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะแวดล้อมทะเล", การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, 25-26 มกราคม 2549, ขอนแก่น, หน้า 527-532.
- 69) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548, "การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีไอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน", การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี