



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่าน
หินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test
(Evaluation of long term chloride penetration in fly ash- based geopolymer
concrete under marine environment by Bulk diffusion test method)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณ
แผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 692259
สัญญาเลขที่ 149/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยเรื่อง

**การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่าน
หินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test
(Evaluation of long term chloride penetration in fly ash- based geopolymer
concrete under marine environment by Bulk diffusion test method)**

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตุลาคม 2561

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มีงบประมาณทั้งโครงการ 414,400 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	414,400 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ (ส่วนผสมเดียวกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล) หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test นอกจากนั้น ได้เก็บตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงเป็นเวลา 7 ปี มาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย

ผลการศึกษาพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น และเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี การศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

คำสำคัญ : การแทรกซึมของคลอไรด์, จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน, วิธี Bulk diffusion test, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research aimed to evaluate the long term chloride penetration of fly ash-based geopolymer concretes under marine environment from the Bulk diffusion test method. Fly ash-based geopolymer concretes 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 same mix proportions of fly ash-based geopolymer concretes exposed to marine site). The cylindrical specimen of geopolymer concrete with 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for Bulk diffusion test. In addition, acid soluble chlorides in the geopolymer concrete were tested after being exposed to the tidal zone for 7 years.

The results show that the chloride penetration in geopolymer concrete from Bulk diffusion test decreased with an increase in NaOH concentration, which is the same trend of chloride diffusion coefficient of 7-year exposure in marine environment. The results of bulk diffusion test in this study can be used to evaluate the chloride penetration of fly ash-based geopolymer concretes under long term exposure in marine site.

Keywords: Chloride penetration, Fly ash-based geopolymer concrete, Bulk diffusion test method, Marine environment

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 149/2561

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการปรับปรุงสมบัติด้านความคงทน ให้สามารถก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

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	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 จีโอพอลิเมอร์	5
2.2 วัสดุพอลิซัลฟอน	8
2.3 ปฏิกริยาพอลิซัลฟอน	8
2.4 เถ้าถ่านหิน	9
2.5 คลอไรด์ในคอนกรีต	13
2.6 วิธีการวัดปริมาณคลอไรด์โดยการไทเทรต	15
2.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์โดยวิธี Bulk Diffusion Test	15
2.8 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์	16
2.9 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	17
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	26
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	26
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	28
3.3 วิธีการศึกษา	29
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	41
4.1 สมบัติของเก้าอี้ถ่านหินและมวลรวม	41
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหิน	43
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหิน ที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test	44
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึม ของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหิน ที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล	45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหินที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำ ทะเล 7 ปี	49
4.6 การประยุกต์ใช้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผล	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	57
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	64
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	30
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	42
4.2 คุณสมบัติของมวลรวม	43
4.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่อายุ 28 วัน	44
4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (DcB) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (Dc)	47

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	29
3.3 การเตรียมวัสดุในการทดลอง	31
3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	32
3.5 ส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่าง	33
3.6 การเตรียมแบบหล่อ	34
3.7 การผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	35
3.8 การบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในอากาศ	36
3.9 การทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	36
3.10 การเคลื่อนที่ของไอออนที่ขอบของตัวอย่างทดสอบ	37
3.11 แช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์	37
3.12 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM	38
3.13 ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแผ่นหินที่แช่ ในน้ำทะเล 7 ปี	40
4.1 ภาพขยายอนุภาคของแผ่นหินแม่เมาะ	41
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากแผ่นหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test	45
4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test	48
4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 ปี	48
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแผ่นหิน ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี กับที่ทดสอบโดย วิธี Bulk diffusion test	49
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากแผ่นหิน ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี กับที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่พัฒนาขึ้น เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยได้มีการใช้วัสดุปอชโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก ผสมกับค่าอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีความรับแรงได้ (Davidovits, 1991) ปัจจุบันสามารถเกิดปฏิกิริยาและมีสมบัติความเป็นวัสดุประสานได้ในอุณหภูมิห้อง และใช้เป็นวัสดุประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ วัสดุปอชโซลานที่นิยมใช้กันในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้แก่ ถ้ำถ่านหิน และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นค่าสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับค่าได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุปอชโซลานหลายชนิด และพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุปอชโซลาน ชนิดของค่าและความเข้มข้นของค่า อุณหภูมิบ่ม อัตราส่วนของของเหลวต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนของ Si/Al เป็นต้น (Rattanasak, and Chindaprasirt, 2009 ; Chindaprasirt, et al., 2013 ; Gum Sung Ryu, et al., 2013) จากฐานงานวิจัยที่ผ่านมา (Anurag, et al., 2008) พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำถ่านหินมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยให้สมบัติด้านการรับแรงอัดได้สูงเทียบเท่ากับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

อย่างไรก็ตามวัสดุคอนกรีตจำเป็นต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดีควบคู่กับสมบัติด้านความคงทน เนื่องจากในบางครั้งจำเป็นต้องใช้วัสดุคอนกรีตในการก่อสร้างในบริเวณที่มีการกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะโครงสร้างบริเวณชายฝั่งทะเลที่มีการก่อสร้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งพบว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกัดกร่อนสูงและก่อให้เกิดความเสียหายได้เร็วกว่าโครงสร้างปกติทั่วไป การทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล ส่วนใหญ่เกิดจากเกลือคลอไรด์ที่เร่งให้สนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และดินคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวเสียหาย ตลอดจนการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน การศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุปอชโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น วัสดุประสาน เพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล มีข้อมูลที่ชัดเจนที่เก็บจากสิ่งแวดล้อมจริง ภายใต้ระยะเวลาการกัดกร่อนที่ยาวนาน ซึ่งพบว่า วัสดุปอชโซลานสามารถยืดระยะเวลาการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้นานขึ้น และยืดอายุการใช้งานของ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเลได้ยาวนานยิ่งขึ้น (Ashish, et al., 2018 ; Chalee, et al., 2013 ; Chalee, et al., 2010 ; Cheewaket, et al., 2012) โดยแนวทางการศึกษาดังกล่าว ได้ถูกนำมาใช้กับคอนกรีตที่ใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนภายใต้สภาวะธรรมชาติ เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์วัสดุประสานให้มากขึ้น

การวัดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีเงื่อนไขของการทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งด้านระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบ ตลอดจนผลที่ได้จากการทดสอบก็แสดงค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธีการต่างๆ มักแสดงผลในลักษณะของแนวโน้มในการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตของแต่ละส่วนผสม โดยเฉพาะในการทดลองที่ใช้ระยะเวลาสั้นๆ อย่างไรก็ตามข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตจำเป็นที่จะต้องทราบอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่แสดงค่าจริง ที่เกิดจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสอยู่ เพื่อจะได้วิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือ ในการทดลองดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษานานมาก ตลอดจนต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น ดังนั้นถ้ามีการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทำได้ง่ายในระยะเวลาสั้นๆ กับการทดลองที่ต้องใช้ระยะเวลานานๆ ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรมด้านความคงทนที่จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้

ดังนั้นการศึกษาค้างนี้ จึงต้องการเปรียบเทียบผลการทดลองการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถาดนหิน โดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ที่วัดผลการแทรกซึมโดยการไทเทรต (Titration test) ที่ใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152 กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบในภาคสนาม และใช้ระยะเวลาแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานถึง 7 ปี เพื่อใช้ผลดังกล่าวในการประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในระยะยาว เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรมในงานก่อสร้างต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถาดนหินในระยะยาว ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ผลทดสอบระยะสั้นโดยวิธี Bulk diffusion test กับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

1.2.2) เพื่อประเมินความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน หลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี จากเส้นกราฟการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการไทเทรต (Titration test) ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

1.2.3) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบระยะสั้น โดยวิธี Bulk diffusion test ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ในระยะยาว ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ผลทดสอบระยะสั้นโดยวิธี Bulk diffusion test กับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองโดยวิธีโดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ที่วัดในรูปของ Chloride penetration profile กับการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน จากส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้แช่น้ำทะเลถึงอายุ 7 ปี เพื่อทำการทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ที่วัดในรูปของ Chloride penetration profile ในห้องปฏิบัติการ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าจริงที่ได้จากตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเล ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตใช้อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ คงที่ และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ โดยหล่อตัวอย่างทดสอบเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังจากนั้นทำการเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมด โดยเปิดไว้ 1 ด้านเพื่อให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในทิศทางเดียว และบ่มตัวอย่างคอนกรีต เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่วัดในรูปของ Chloride penetration profile ซึ่งจะทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชิ้นๆหนาชั้นละ 10 มม. หลังจากนั้นนำมาบดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และนำผงคอนกรีตไปทำการไทเทรต ตามมาตรฐาน ASTM C1152 ที่อายุหลังแช่ 35 วัน ในการศึกษาจะเก็บตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม³ ที่ได้แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี มาทำการเจาะทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการไทเทรต (Titration test) ที่ใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152 เพื่อใช้ผลเปรียบเทียบกับทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เป็นค่าจริง ตามสภาพแวดล้อมทะเลที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสัมผัสและแช่น้ำทะเลเป็นเวลานาน จากวิธีการทดสอบที่ทำได้ง่าย และรวดเร็ว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว กับค่าที่ได้จากการทดสอบที่ให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกต้อง สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถใช้งานได้จริง โดยมีสมบัติด้านความคงทนควบคู่กับสมบัติเชิงกลที่ใช้งานได้จริง ที่มีความชัดเจนและครอบคลุมมากขึ้น

1.4.2 เป็นการนำวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย ดร. Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางธรณีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมินามากกระตุ้นด้วยด่าง กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหินซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอพอลิเมอร์ใช้หลักการการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ดังสมการ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)



โดย M คือ โลหะอัลคาไล

- คือ การยึดเกาะพันธะ
- Z คือ จำนวนโมเลกุลของ $\text{Si}-\text{O}_2$
- n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
- W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ได้โดยการผสมวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินากับตัวทำปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยาเป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้ห้องประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกัน สารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้ประหยัดกว่า

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยพบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า จีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึก อีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ

จีโอพอลิเมอร์เป็นสารพวกอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology) แน่นอน เป็นส่วนประกอบของอสัณฐาน (Amorphous phase) และสารกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์เรซิน (Geopolymerization) จึงเป็นสารซิลิกาและอลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์เบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงได้ และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อน เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซินแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

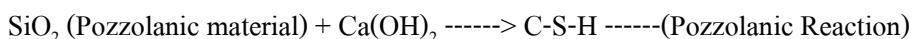
1. การชะละลาย (Dissolution)

ถ้าหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากผิว ซิลิกอนและอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสเกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะของสารตั้งต้น ความเข้มข้นที่มากขึ้นทำให้เกิดการชะของอ็อกไซด์ซิลิกอนและอลูมิเนียมออกมาจากผิวของสารตั้งต้นมาก

2. การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization)

อ็อกไซด์ซิลิกอนและอลูมิเนียมที่จะถูกชะออกมาเกิดการรวมตัวกับอ็อกซิเจนอยู่ในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้สารประกอบออลูมิโนซิลิเกต [Si - O - Al - O] ที่มีสมบัติในการยึดประสานและให้กำลังกับวัสดุพอลิเมอร์

ลักษณะโครงสร้างของไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอพอลิเมอร์ นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่าคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีตซีเมนต์เพสหรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาปอชโซลาน ของวัสดุปอชโซลาน



โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอชโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอชโซลาน ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (C-S-H) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือ ซีเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น

จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิเกต (Si), อะลูมินา (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น พอลิเมอร์แบบเส้น (Polymer Chain) เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย

2.2 วัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

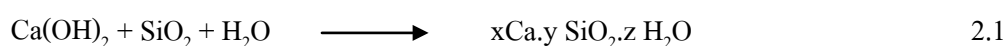
วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับค่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน(Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซ-ลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

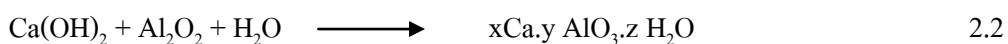
ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านของการรับกำลังอัด ความคงทนต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดส่งผลดีกับคอนกรีตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพโดยเฉพาะความละเอียดเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

นอกจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลจะถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตแล้วยังถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ เช่น คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง และการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร เป็นต้น เนื่องจากดินบางประเภทไม่เหมาะที่จะใช้งานด้านวิศวกรรมจึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสม เช่น ใช้เถ้าถ่านหินในการถมที่แทนดินลูกรังเพราะเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงและยุบตัวน้อยกว่า ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันดินถม ก่อสร้างถนนซึ่งสามารถรับน้ำหนักและกระจายน้ำหนักบรรทุกได้ดี และการก่อสร้างฐานรากอาคารที่ฝังอยู่ใต้ดินช่วยลดการทรุดตัวหรือจะใช้ทำเสาเข็มเจาะเพื่อถ่ายน้ำหนักกดจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรง ฯลฯ

2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มาทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของ ซิลิกาและอลูมินาที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลานดังสมการที่ 2.1 และ 2.2





ค่า x , y และ z จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ซึ่งสมการที่ 2.1 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของซิลิกาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และสมการที่ 2.2 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของอลูมินาทำให้ได้สารประกอบใหม่คือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้กำลังกับคอนกรีตหรือมอร์ต้าเพราะมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

2.4 เถ้าถ่านหิน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

เถ้าถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอนหรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า

2.4.1 การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

1. การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง $1,500-1,700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย เถ้าถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใส ๆ (Vitreous particle)

2. การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง $1,100 - 1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้า-ลอย ที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผาประมาณร้อยละ 70-90

มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

3. การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาก้อนหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ แก่ก้อนหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าก้อนหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ

ก้อนหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควออตซ์ (Quartz) เคาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในก้อนหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

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

2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4)

3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) และ ควอตซ์ (SiO_2) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์

4. ควออตซ์ (SiO_2) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้ว

จะเห็นได้ว่าเถ้าก้อนหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ก้อนหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผา ระบบนี้ถ้าก้อนหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมก้อนหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้เถ้าก้อนหินมีปริมาณ CaO และ CaSO_4 สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ $1,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้เถ้าก้อนหินหลอมละลาย ดังนั้นเถ้าก้อนหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไทต์ แมกเนไทต์ มุลไลต์ และควออตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า $1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ก้อนหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย เถ้าก้อนหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย

ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกลาง

2.4.2 ชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากรังดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีรังดินเหนียวสูงจึงให้ถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 ถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า ถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากรังดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำทำให้ถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

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

รูปร่างและลักษณะของถ่านหิน

เมื่อถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้ถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) ถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้ถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง ถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เถาถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถาถ่านหิน และยังมีเถาถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถาถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าเพลโรสเฟีย (Plerosphere) เถาถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถาถ่านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากเถาถ่านหินกลวงเป็นเถาถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถาถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเถาถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเถาถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 – 30 ไมครอน เถาถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถาถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถาถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 – 5,000 ซม.²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเถาถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 - 89,000 ซม.²/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.²/ก.

การวัดความละเอียดของเถาถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเถาถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เถาถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30

ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถาถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 เถาถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถาถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจาก

ถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด ถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าถ่านหินละเอียด

องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI)

2.5 คลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับในคอนกรีตสด (วสท. 1014 – 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งานซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีดังต่อไปนี้

1. การซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)
2. การแพร่ของไอออนคลอไรด์จากภายนอกที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต
3. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเลสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจนถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ แต่ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ เมื่อเกิดสนิมขึ้นจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริม เนื่องจากการขยายตัวของสนิมเป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดรอยแตกและหลุดแยกออก กระบวนการผุกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีช่องทางให้เกลือ ออกซิเจน และน้ำเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น แล้วเหล็กเสริมในคอนกรีตก็จะเริ่มผุกร่อนต่อไป ค่า pH ของคอนกรีตมีผลต่อความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ก่อให้เกิดการผุกร่อน

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมเช่นอุณหภูมิความชื้นและการไหลของน้ำทะเล

ทิศทางการกระจายตัวของวัสดุประสาน เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต ประกอบไปด้วยคลอไรด์ 2 ประเภทได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 การดักจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium Chloroferrite)

1.2 การดักจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2) คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กออกไปได้ (ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี , 2554)

กลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ขึ้นกับสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตสัมผัส และโพรงภายในเนื้อคอนกรีต (ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี , 2554) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การแพร่ (Diffusion)

การแพร่ เป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จะผ่านโพรงคาпилลารี (Capillary pore) ที่อิมตัวด้วยน้ำ ดังนั้นลักษณะของการแพร่จะเกิดกับส่วนของโครงสร้างคอนกรีตที่แฉ่น้ำทะเล และเป็นส่วนของคอนกรีตที่อิมตัวด้วยน้ำเป็นหลัก

2) การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี (Capillary suction)

การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารีเกิดขึ้นโดยน้ำเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในส่วนที่แห้งของโพรงคาпилลารี (Capillary pore) ในคอนกรีต ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณใกล้ผิวคอนกรีต และเกิดขึ้นในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ทำให้น้ำเกลือคลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาпилลารีในคอนกรีตได้เร็ว และอิมตัวภายในเวลาอันรวดเร็วกลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี

3) การซึมผ่าน (Permeability)

การซึมผ่านของคลอไรด์เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำ (Hydrostatic pressure) ซึ่งส่งผลให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนใหญ่เกิดในบริเวณที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลภายใต้แรงดันน้ำ

4) การดึงดูดไอออน (Ion adsorption)

โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในได้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายโดยรอบของน้ำทะเลปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ประจุบวกบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้น

2.6 วิธีการวัดปริมาณคลอไรด์โดยการไทเทรต

การไทเทรต (Titration test) เป็นการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่างๆ โดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียดและ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในการแทรกซึมของคลอไรด์มี 2 ลักษณะคือ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด (Total chloride content) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 หลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometer titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 2.1 (บุญยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุทธิธาทา และวิเชียร ชาลี, 2557)

2.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์โดยวิธี Bulk Diffusion Test

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) เป็นอีกวิธีที่สามารถทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 35 วัน และ 90 วัน โดยผลการทดสอบจะแสดงในรูปของเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) และสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ การทดสอบโดยวิธีนี้จะวิเคราะห์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการวัดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยการ

ไทเทรต (Titration test) หรือใช้หลักการฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Colorimetric technique) เพื่อวัดระดับความลึกการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตซึ่งสามารถทำได้รวดเร็วได้

วิธีการทดสอบได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อลดข้อบกพร่องจากการทดสอบ Salt Ponding Test เพื่อใช้หาการแพร่ของคลอไรด์ โดย Nord Test เป็นรายแรกที่มีมาตรฐานการทดสอบด้วยวิธีนี้ใช้อย่างเป็นทางการในชื่อของ NTBuild 443 โดยความแตกต่างอย่างแรกของการทดสอบนี้กับ Salt Ponding Test คือ สภาวะของความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำปูนใส แทนการเก็บตัวอย่างในที่แห้ง 28 วัน เพื่อช่วยป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากกลไกการดูดซับเริ่มต้น นอกจากนั้นการเคลือบตัวอย่าง จะทำโดยเว้นเฉพาะผิวด้านที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ทำการแช่ตัวอย่างในสารละลายเกลือเป็นเวลาอย่างน้อย 35 วัน ทำให้ไม่เกิดผลกระทบเนื่องจาก Wick action (ทวิชัย สาราณวนิช, 2555)

หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปตัดในแนวตั้งฉากกับผิวด้านที่สัมผัสกับสารละลายลึกลงไปตามแนวแกนครึ่งละ 0.5 มม. ตัวอย่างในแต่ละชั้นจะถูกบดเป็นผง และนำไปหาค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ตาม AASHTO T260 หลังจากได้ Chloride Profile นำสมการกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's 2nd Law of diffusion) ช่วยในการปรับแนวโน้มของกราฟ (Fit-curve) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิว (Surface Chloride ion Concentration)

2.8 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient, D_c) ในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (บุญยวีร์ นิลรัตน์วัฒนา พุชโรทา และวิเชียร ชาลี, 2557) ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยทั่วไปแล้วการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_c) สามารถทำได้หลายวิธีโดยแต่ละวิธีก็จะให้ค่าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จากเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) นิยมใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's 2nd law) (Chalee, et al., 2009 ; Thomas, et al., 2004) เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายและรวดเร็ว

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's 2nd law) โดยหลักที่ถูกต้องแล้ว การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตต้องเป็นลักษณะของการแพร่ที่เป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งในกรณีของการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไม่ได้อยู่ในลักษณะของการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดขึ้นได้หลาย

ลักษณะควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาпилลารี (Capillary suction) ของคอนกรีตเป็นต้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's 2nd law) เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าว จะไม่นิยม เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) จะเรียกเป็น สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏของคลอไรด์ (Apparent diffusion coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้เส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ เริ่มจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's 2nd law) (Crank, 1975) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad 2.3$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ 2.3 เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ 2.3 แสดงดังสมการที่ 2.4

$$C_{x,t} = C_0 [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad 2.4$$

เมื่อ $C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก x และระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ t

x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ (วินาที)

C_0 = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ที่ระยะเวลา t

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลา t (มม²/วินาที)

erf = ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

ฟังก์ชันค่าคลาดเคลื่อน

โดยที่
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + \dots)$$

2.9 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง โดยในการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่จะมีการทำลายเกิดขึ้นค่อนข้างสูงในคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็ก ทั้งนี้

เพราะการทำลายจะเกิดจากการกัดกร่อนเหล็กเสริม ที่มีเกลือคลอไรด์เป็นตัวเร่งให้เกิดการทำลายที่เร็วขึ้น

2.9.1 กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีต

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต โดยบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระแทกและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราบ ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีตโดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีในช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย

ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ซึ่งการศึกษาถึงกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดจนการศึกษาถึงแนวทางในการป้องกันและต้านทานการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญและพัฒนาข้อมูลให้ชัดเจนมากขึ้น ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่นประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูงแต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง

2.9.2 หลักการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล

การเลือกคอนกรีตเพื่อใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดการทำลายโครงสร้างดังกล่าว จากนั้นจึงพิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลาย โดยทั่วไปแล้วการทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลเกิดจาก 2 สาเหตุใหญ่ๆ ได้แก่ สาเหตุทางกายภาพ และสาเหตุทางเคมี ดังนั้นการป้องกันการทำลายโครงสร้างดังกล่าว สามารถทำได้โดยการเลือกคอนกรีตให้มีความทึบน้ำสูง และทนทานต่อสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ หรือการใช้วิธีการเคลือบผิวของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วพบว่า น้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9 ถึง 8.2 ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,500 มก./ล. โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็น โซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต อย่างรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.² ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน

ในการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทางทะเลนั้น ได้มีการศึกษาถึงแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาในสภาวะแวดล้อมจริงซึ่งพบว่า การใช้ถ้ำถ่านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือ 5 สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมถ้ำถ่านหินอย่าง

ชัดเจน โดยพิจารณาลักษณะของคอนกรีตที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเลในด้านต่างๆดังนี้

1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดของปูนซีเมนต์

การเลือกใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงและเนื้อแน่นขึ้น สามารถที่จะป้องกันการแทรกซึมของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้ดีขึ้น ตลอดจนยังส่งผลดีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการทำคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำก็จะส่งผลให้คอนกรีตเทเข้าแบบได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการเทให้กับคอนกรีตด้วย โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 (ตามข้อแนะนำของ ACI 201.2) หรือในบางมาตรฐานอาจแนะนำให้ต่ำกว่า 0.40 (ตามข้อแนะนำของ SI 456-2000)

2) ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก

การออกแบบคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล นอกจากจะส่งผลต่ออายุการใช้งานที่ยาวนานของโครงสร้างแล้ว ยังมีผลต่อการกำหนดระยะหุ้มเหล็กที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถป้องกันสารเคมีที่เป็นอันตรายเข้าไปทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วย ซึ่งโดยหลักแล้วการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีค่ามากก็จะส่งผลดีต่อการป้องกันการทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีต แต่ถัระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนาเกินไปจะเกิดรอยร้าวได้ง่ายเมื่อรับแรงดัด นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความสอดคล้องกับรูปร่างทางสถาปัตยกรรมและการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล จะพิจารณาจากการซึมเข้าในเนื้อคอนกรีตของปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (ปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเริ่มต้น) การใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตสามารถที่จะลดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นที่ระยะเวลาที่ทำการออกแบบไว้ได้ หรืออีกนัยหนึ่งคือที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เท่ากันก็จะสามารถยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มที่จะมีการกัดกร่อนได้

งานวิจัยที่ผ่านมา คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 ถึง 50 ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 สามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลที่อายุการแช่ 5 ปี ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีค่า W/B เท่ากับ 0.45 เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 และ 50 ที่มีค่า W/B เท่ากับ 0.65 ต้องการระยะหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นที่อายุ 5 ปี เท่ากับ 41 และ 35 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 ต้องการระยะหุ้มเหล็ก 42 มม. และนอกจากนั้นยังพบว่ากำลังอัดที่เท่ากันของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 สามารถลดระยะหุ้มเหล็กจากคอนกรีตธรรมดาดลงได้อย่างชัดเจน โดยคอนกรีตธรรมดาที่มีกำลังอัด

300 กก/ชม² ต้องการระยะหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่ 5 ปี เท่ากับ 60 มม. ขณะที่ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 ที่มีกำลังอัด เท่ากัน ต้องการระยะหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่ 5 ปี เท่ากับ 30 มม. เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ACI 201 และ SI 456-2000 ได้กำหนดให้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลไม่ควรต่ำกว่า 75 มม.

2.9.3 แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล

จากฐานข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งที่ศึกษาในห้องปฏิบัติการ และการเก็บข้อมูลในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลในประเทศไทย ได้ข้อสรุปในทิศทางเดียวกันว่า การทำลายของสารเคมีที่อยู่ในน้ำทะเลที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตจะเกิดจากสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์เป็นหลัก และได้มีการศึกษาถึงการนำเถ้าถ่านหินในประเทศมาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยผลการศึกษาเป็นที่น่าพอใจว่า เถ้าถ่านหินสามารถที่จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เป็นอย่างดี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเล

ในน้ำทะเลพบว่ามีสารประกอบโซเดียมซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่ โดยสารประกอบซัลเฟตสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ได้สารประกอบใหม่ที่ทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีต และความสามารถในการเป็นวัสดุประสานของซีเมนต์เพสต์ลดลง ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถลดการกัดกร่อนลงได้ ซึ่งการวัดความคงทนต่อสารประกอบซัลเฟตของคอนกรีตสามารถวัดได้จากค่าการขยายตัวของคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

2) การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์

เมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตประกอบกับมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม ส่งผลให้หน้าตัดของเหล็กลดลง และการขยายตัวของสนิมทำให้คอนกรีตแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริม ตลอดจนส่งผลให้กำลังอัดของโครงสร้างลดลง นอกจากนี้รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตสามารถที่จะป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน

3) การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

การเกิดสนิมของเหล็กใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดการทำลายที่รุนแรงและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างน้อยลง การเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีผลมาจากปริมาณน้ำและออกซิเจนที่แทรกซึมเข้าไปสัมผัสกับเหล็กเสริม ตลอดจนปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเองก็เร่งให้เกิดสนิมในเหล็กอย่างรุนแรงและรวดเร็วขึ้น โดย

ในงานวิจัยที่เช่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีการฝังเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีตต่างๆ กันพบว่าในบางตัวอย่างเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมเหล็กเล็กน้อยที่อายุแช่น้ำทะเล 4 ปี แต่เมื่อเวลาผ่านไปแค่ 1 ปี เหล็กดังกล่าวเกิดสนิมมากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเริ่มต้นเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเพียงเล็กน้อยก็จะนำไปสู่การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

โดยสรุปแล้ว คอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลจะมีกลไกการทำลายที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับบริเวณที่โครงสร้างสัมผัส เช่น บริเวณระดับน้ำทะเลขึ้น-ลง หรือแถบชายฝั่ง โดยมากจะเกิดการทำลายเนื่องจากสาเหตุทางกายภาพที่ส่งผลเกี่ยวเนื่องให้เกิดการทำลายเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งบริเวณนี้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมก็เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลต่อการทำลายโครงสร้าง หรือบริเวณที่อยู่ใต้น้ำทะเลที่ไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนการทำลายก็จะเกิดจากซัลเฟตเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างย่งที่ต้องเข้าใจถึงกลไกของการทำลายของโครงสร้างในแต่ละบริเวณที่โครงสร้างสัมผัสอยู่ เพื่อจะได้กำหนดวิธีการที่เหมาะสมในการป้องกันโดยคำนึงถึงความประหยัดและปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม การใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินสามารถช่วยลดการทำลายดังกล่าวได้ค่อนข้างชัดเจนและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากถึงแม้จะป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดี แต่จะส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ดังนั้นควรเลือกใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติที่ดี

การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ในคอนกรีตในช่วงร้อยละ 25 ถึง 35 และอัตราส่วนน้ำวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 จะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางด้านความคงทนและคุณสมบัติเชิงกล นอกจากนี้เถ้าถ่านหินจากแหล่งอื่นๆ หรือสารปอซโซลานชนิดอื่น ก็สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีตในน้ำทะเลได้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องทดสอบหรือมีผลการทดสอบที่เชื่อมั่นได้ เพื่อจะได้ทราบถึงปริมาณและชนิดของสารปอซโซลานที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่ดีทั้งทางด้านความคงทนและคุณสมบัติเชิงกลต่อไป

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมีผลการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในคอนกรีตที่ยังใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เช่น การศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานเพื่อให้มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีการกัดกร่อนสูง และมีข้อมูลการศึกษาในภาคสนามมากขึ้น โดย Thomas, et al., 2004 ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness

ประเทศอังกฤษ โดยหล่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเล ผลปรากฏว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเริ่มต้น แต่เมื่อแช่น้ำทะเลนานๆจะมีผลไม่แตกต่างกัน อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และยังลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 และ 50 มีค่าลดต่ำลงในช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 2 ถึง 10 ปี เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Bai, et al., 2003 ได้ทำการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน โดยตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุประสาน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยทำให้ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ซึ่งระยะเวลาการแช่ที่นานขึ้นจะให้ผลที่ชัดเจนขึ้น

ส่วนในประเทศไทย Chalee, et al., 2010 ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างถึงระยะเวลา 7 ปี ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เถ้าถ่านหินมีศักยภาพในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ มีค่าลดลง และชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาข้อมูลถึง 7 ปี คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เมื่อผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-50 เพราะให้ผลในการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Chalee et al., (2013) ได้ศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นแต่ไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง แต่การแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้น

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่มีการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ที่มุ่งประเด็นไปที่ความคงทนต่อสารเคมีที่ทำอันตรายต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหรือมอร์ตาร์ เช่น เกลือซัลเฟต กรด และคลอไรด์ เป็นต้น โดยวิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากเถ่ากันเตา โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ่ากันเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน โดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบกำลังอัดหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษาหุ้มฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (stretching) โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ที่ช่วงความถี่ 1200-950 cm^{-1} และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 350 กก./ cm^2 และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่ากันหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่ากันหินแม่เมาะ 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 ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่ากันหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

ส่วนการศึกษาความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลลึกก่อนข้างน้อย โดย W. Chalee and P. Chindapasirt (2014) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง เป็นเวลา 3 ปี ซึ่งพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ตลอดจนส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงด้วย

ส่วนการศึกษากการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล โดยเชื่อมโยงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นการทดสอบในระยะสั้น ยังไม่มีผลการศึกษาในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แต่มีผลการศึกษาในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน โดย ปุณยวีร์ นิลรัตน์ และ คณะ (2558) ได้ศึกษา การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง และเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี นอกจากนี้ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตรวมคามีค่าลดลงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ผลการศึกษาดังกล่าว สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

ดังนั้นการศึกษาคั้งนี้ จึงต้องการศึกษาเพื่อประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในระยะยาว จากความสัมพันธ์ของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบระยะสั้นในห้องปฏิบัติการกับข้อมูลที่แช่ในน้ำทะเล เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ให้สามารถใช้งานได้จริงในงานก่อสร้างต่อไป

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะประกอบไปด้วย แก้วถ่านหิน หินปูนย่อย ทรายแม่น้ำ น้ำประปา สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แก้วถ่านหิน ใช้แก้วถ่านหินแม่เมาะ มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก)
2. หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข)
3. ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58 ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ค)
4. น้ำประปา
5. สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O คงที่ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C , โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ฉ)
6. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(จ), กรดไนตริก (HNO_3) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ซ) และซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ฉ)



ก) เถ้าถ่านหินแม่เมาะ



ข) มวลรวมหยาบ



ค) มวลรวมละเอียด



ง) อีพอกซี



จ) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)



ฉ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ช) สารละลายโซเดียมซิลิเกต
(Na_2SiO_3)ซ) กรดไนตริก (HNO_3)ฅ) สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต
(AgNO_3)

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้ประกอบไปด้วย



1. บีกเกอร์ (Beaker)



2. ครกหิน



3. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน



4. กระดาษกรอง



5. ถุงมือผ้า



6. หน้ากากอนามัย



7. ถุงมือยาง



8. เครื่องชั่งน้ำหนัก



9. แบบหล่อตัวอย่างรูปทรง
ทรงกระบอก



10. ที่อุดหู (earplug)



11. อ่างผสมปูน



12. เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ



13.เครื่องทดสอบ
เอนกประสงค์ (UTM)



14.ถัง



15.รถเข็น



16. เครื่องตัดคอนกรีต



17.เครื่องดูดสูญญากาศ



18.ขวดชมพู่ กรวยกรอง



19.เครื่องตำสาร



20.กระบอกตวง



21.แก้วสำหรับไตเตรท

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.3 วิธีการศึกษา

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ใน จีไอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ที่วัดในรูปแบบของ การแทรกซึมคลอไรด์และศึกษากำลังอัดของจีไอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหิน

3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ คงที่ และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ (ทั้งหมด 6 ส่วนผสม) โดยส่วนผสมนี้ได้พิจารณาจากฐานงานวิจัยที่เป็น จีโอพอลิเมอร์เพสต์หรือจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ให้ผลไปในทิศทางที่ดี โดยหล่อตัวอย่างทดสอบเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน และนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดจำนวน 3 ตัวอย่าง/ส่วนผสม (รวม 18 ตัวอย่าง) หลังจากนั้นทำการเคลือบอีพอกซี (12 ตัวอย่าง) ที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมดโดยเปิดไว้ 1 ด้าน เพื่อให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในทิศทางเดียว จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่วัดในรูปแบบของ Chloride penetration profile ซึ่งจะทำให้การตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชั้นๆหนาชั้นละ 10 มม. หลังจากนั้นนำมาบดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และนำผงคอนกรีตไปทำการไทเทรตตามมาตรฐาน ASTM C1152 ที่อายุหลังแช่ 35 วัน (ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดจำนวน 2 ตัวอย่าง/ส่วนผสม)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก/ลบ.ม.)				
		เถ้าถ่านหิน	หิน	ทราย	NaOH	Na_2SiO_3
1	8-M	390	1092	585	67	167
2	10-M	390	1092	585	67	167
3	12-M	390	1092	585	67	167
4	14-M	390	1092	585	67	167
5	16-M	390	1092	585	67	167
6	18-M	390	1092	585	67	167

3.3.2 การเตรียมวัสดุ

มวลรวมหยาบ (หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุด เท่ากับ 19 มม.)



ทำความสะอาด

ตากให้แห้ง

ปริมาณหินที่ใช้ทั้งหมด

มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำร้อนแผ่นตะแกรงเบอร์ 4)



ทำความสะอาดทราย

ตากให้แห้ง

ปริมาณทรายที่ใช้

รูปที่ 3.3 การเตรียมวัสดุในการทดลอง

สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ที่ความเข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์)

จากสูตร
$$n = \frac{g}{Mw}$$

โดยที่ g คือ น้ำหนักของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)

n คือ มวลโมเลกุลของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ = 40

Mw คือ ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)

ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากรูป (ก) ถึง (จ)

ตามลำดับ



ก. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามที่
คำนวณไว้



ข. เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์
และน้ำกลั่น



ค. ค่อยๆเทโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำกลั่นแล้วใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน



ง. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นใน



จ. เทเก็บไว้ในภาชนะ

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการจัดเตรียมเถ้าถ่านหิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีปริมาณตามที่ออกแบบไว้ ทำความสะอาดแบบหล่อแล้วใช้น้ำมันทาแบบหล่อเพื่อป้องกันเนื้อคอนกรีตติดกับแบบหล่อ จากนั้นเริ่มผสมส่วนผสมโดยใส่เถ้าถ่านหินลงในภาชนะที่จะทำการผสม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลง

ไปผสมกับเต้า แล้วคนจนเป็นเนื้อเดียวกันทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ลงในภาชนะผสมแล้วทำการผสมจนเข้ากัน โดยทำที่ละส่วนผสม

เทจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้ลงในแบบหล่อ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กันและกระทุ้งเป็นจำนวน 25 ครั้งต่อชั้นด้วยแท่งกระทุ้งใช้ก้อนยางเคาะเพื่อไล่ฟองอากาศหลังจากที่ชั้นบนสุดของตัวอย่างถูกทำให้แน่นแล้วให้ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ หลังจากทำการหล่อตัวอย่างเสร็จให้ทำการบ่มตัวอย่างในแบบหล่อในห้องที่มีความชื้นแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากเริ่มผสมสารละลายในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

บ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบ UTM (ส่วนผสมละ 3 ก้อน รวม 18 ก้อนตัวอย่าง) ให้แรงอัดกับชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในแนวตั้งจนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดการวิบัติ นำผลการทดลองไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน ให้ทำการเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมดโดยเปิดไว้ 1 ด้าน (ส่วนผสมละ 2 ก้อน รวม 12 ก้อนตัวอย่าง) เพื่อให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในทิศทางเดียว นำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่วัดในรูปของ Chloride penetration profile ซึ่งจะทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชั้นๆหนาชั้นละ 10 มม. หลังจากนั้นนำมาบดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และนำผงคอนกรีตไปทำการไทเทรต ตามมาตรฐาน ASTM C1152 ที่อายุ หลังแช่ 35 วัน รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 2 ทำความสะอาดและใช้น้ำมันทาแบบหล่อ (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 การเตรียมแบบหล่อ

ขั้นตอนที่ 3 ผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (รูปที่ 3.7)



ก. เทโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ลงในภาชนะที่เตรียมแล้วผ่านหิน



ข. เติมโซเดียมซิลิเกตที่เตรียมไว้ลงในภาชนะ



ค. เติมทรายที่เตรียมไว้ลงในภาชนะ



ง. เติมหินที่เตรียมไว้ลงในภาชนะ



จ. เทจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในแบบหล่อแบ่ง 3 ชั้น ชั้นละเท่าๆกัน
กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง



ฉ. ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในแบบหล่อ 24 ชั่วโมง
รูปที่ 3.7 การผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ขั้นตอนที่ 4 บ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในอากาศ (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 การบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในอากาศ

ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 การทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ขั้นตอนที่ 6 เคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมดโดยเปิดไว้ 1 ด้าน



รูปที่ 3.10 การเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนที่ 7 แช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 วัน (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 แช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์

ขั้นตอนที่ 8 ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในโพลีเมอร์คอนกรีต (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

1. ทำการบ่มชิ้นตัวอย่างคอนกรีต เป็นเวลา 28 วัน
2. ทำการเคลือบผิวที่ขอบด้วยอีพอกซี โดยเปิดด้านบนทิ้งไว้ 1 ด้าน
3. นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลาอีก 35 วัน

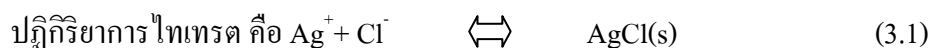
3.3.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในโพลีเมอร์คอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test

- 1) เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ จนมีอายุครบ 35 วัน นำตัวอย่างทรงกระบอกมาตัดเป็นชิ้นจากผิวบนไปยังแนวกึ่งกลางโดยในแต่ละชั้นหนา 10 มม. ทั้งหมด 5 ชั้น
- 2) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดบริเวณกึ่งกลางของแต่ละชั้นมาบดให้ละเอียด
- 3) เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่บดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทำการไทเทรตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1152

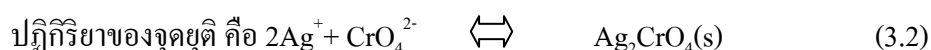
การทดสอบปริมาณคลอไรด์

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุตินิยมใช้การไตเตรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติม โครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ซึ่งเป็น อินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรตจะเกิดตะกอนสีขาวซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ก่อน ดังสมการ 3.1 เมื่อตะกอนซิลเวอร์

คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ Ag_2CrO_4 ดังสมการ 3.2 ซึ่ง ละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



ตะกอนขาว



ตะกอนแดง

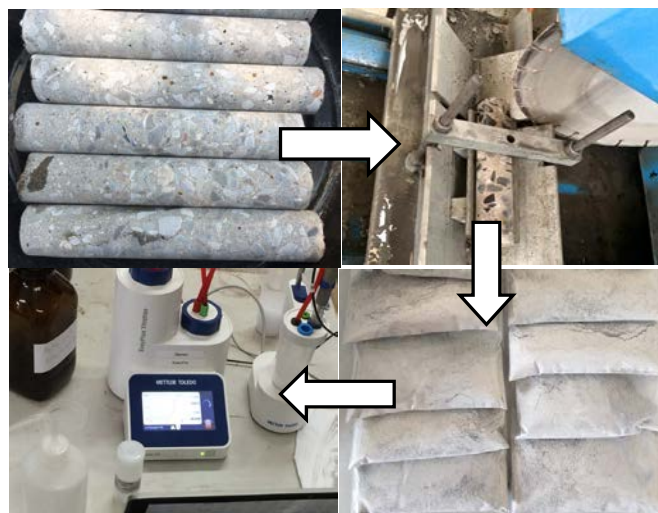
การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

โดยการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

1. นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ม.ล.
2. เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
3. เติมกรดไนตริก (HNO_3) ที่ความเข้มข้น 1:1 (HNO_3 ความเข้มข้น 69 % : น้ำกลั่น) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
4. นำไปต้มให้เดือดเป็นเวลา 3 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องและเติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร
5. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
6. เติมนโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จำนวน 2 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างที่กรองแล้ว
7. นำตัวอย่างใส่ในแก้วไทเทรตจำนวน 2 แก้ว แก้วละ 10 มิลลิลิตร
8. เติมน้ำลงไปในแต่ละแก้ว แก้วละ 30 มิลลิลิตร
9. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ บันทึกร้อยละของคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตและปริมาณของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ใช้ไปที่ระดับความลึกต่างๆ

3.3.6 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลครบ 7 ปี ขนย้ายตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี มาเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง แล้วนำแท่งจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดเป็นชิ้น

ตามระยะความลึกต่างๆ หนาชั้นละ 10 มม. และได้นำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วบดให้ละเอียดโดยนำผงคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ของแต่ละระยะความลึก เพื่อนำมาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152 และได้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเล 7 ปี ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเล 7 ปี

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

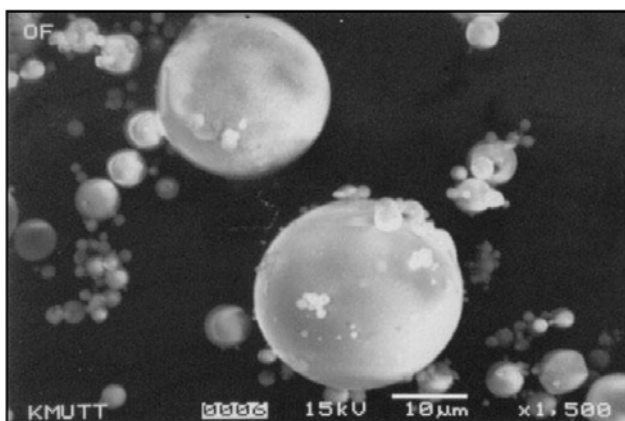
4.1 สมบัติของเถ้าถ่านหินและมวลรวม

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน

ลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียดและมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีสีน้ำตาลปนเทา

4.1.1.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

อนุภาคของเถ้าถ่านหินมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตันดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

4.1.1.2 ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะเก้าถ่านหิน

ความละเอียดของเก้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า เก้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 32 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 2,860 ซม.²/ก. เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเก้าถ่านหินแม่เมาะที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 34 ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งจากผลของความละเอียดที่มากขึ้นส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้นส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของเก้าถ่านหินแม่เมาะพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.22

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 74.34 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจัดเป็นเก้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าถ่านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO ₂ (%)	35.12
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ (%)	21.51
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	17.71
Calcium Oxide, CaO (%)	17.15
Magnesium Oxide, MgO (%)	-
Sodium Oxide, Na ₂ O (%)	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O (%)	1.59
Sulfur Trioxide, SO ₃ (%)	2.13
Loss On Ignition, LOI (%)	0.11

4.1.3 สมบัติของมวลรวม

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
โมดูลัสความละเอียด	2.75	6.89
ความถ่วงจำเพาะ	2.58	2.73
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	1.19	0.40
ความหนาแน่น (กก./ม ³)	1725	1650

4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

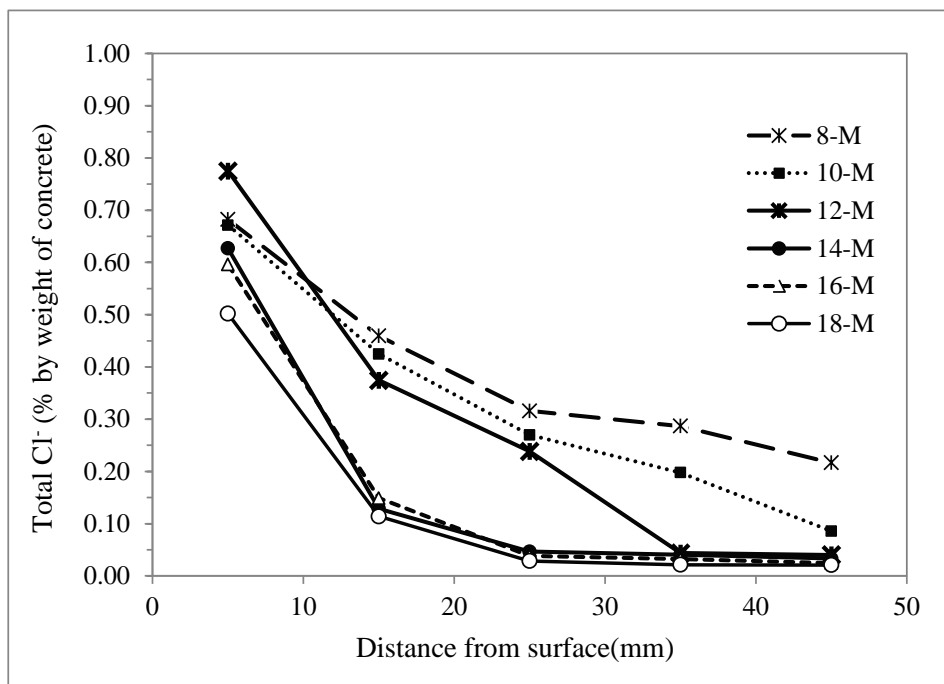
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน พบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ เช่น ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 227, 331, 270, 380, 394 และ 367 กก./ซม.² ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้นเป็นผลจากการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงจะสามารถในการชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงก็ส่งผลถึง 18 โมลาร์ กลับทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง ซึ่งเกิดจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป อาจมีผลให้ปริมาณของสารละลาย NaOH ที่เหลือจากการชะส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ลดลงได้ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชรินทร์ เสนาวงษ์ และคณะ, 2553 ; กนกเนตร ชื่นนุกุ่ม และคณะ, 2557)

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)			เฉลี่ย
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
8-M	271	225	184	227
10-M	305	325	363	331
12-M	263	270	275	270
14-M	389	350	401	380
16-M	380	414	387	394
18-M	375	387	340	367

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังรูปที่ 4.2 พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในช่วงของความเข้มข้น 8-14 โมลาร์ เช่น ที่ระดับความลึก 25 มม. ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.32, 0.27, 0.24, 0.04, 0.04 และ 0.03 โดยน้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ตามลำดับ โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 14-18 โมลาร์ มีค่าใกล้เคียงกัน และลดลงจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 8-14 โมลาร์ อย่างชัดเจน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt, et al., 2013 ; Chindaprasirt, and Chalee, 2014) การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 8 ถึง 14 โมลาร์ น่าจะมีผลต่อการชะเอาซิติกและอลูมินาที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ และเพิ่มความทึบน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH จาก 14 ถึง 18 โมลาร์ อาจมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการชะเอาซิติกและอลูมินาไม่มากนัก ซึ่งส่งผลให้ความทึบน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นไม่ชัดเจน และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ จึงไม่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{cb}) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (D_c) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

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

เมื่อค่า D_{cb} ในสมการที่ (4.1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (4.1) แสดงดังสมการที่ (4.2)

$$C_{x,t} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cb}t}} \right) \right] \quad (4.2)$$

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

x = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่แช่ (วินาที)

C_0 = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวอิโพลีเมอร์คอนกรีต (ที่ $x = 0$) ที่ระยะเวลาแช่ t

D_{CB} = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่ t ที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test (มม²/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

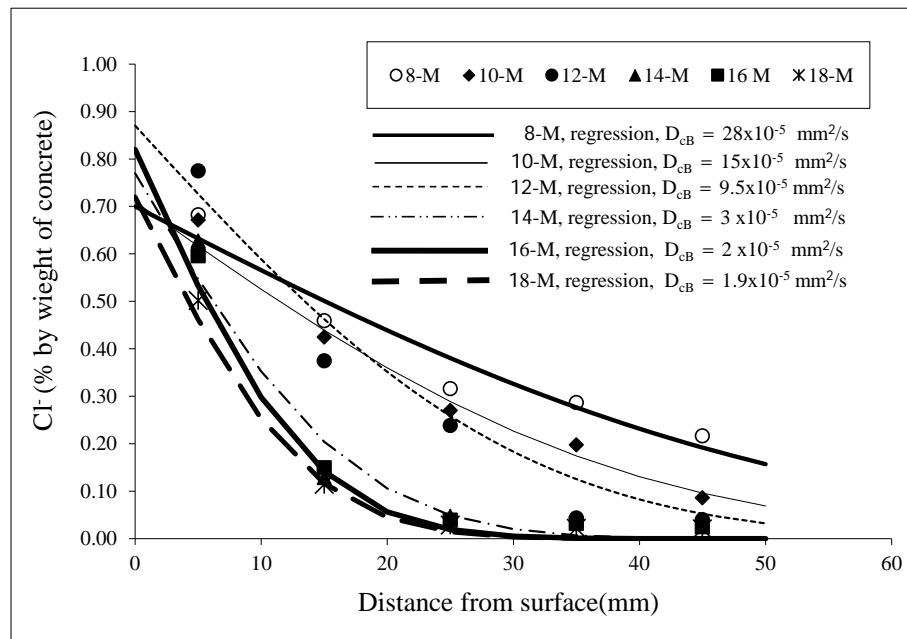
ทำการปรับค่า D_{CB} และ C_0 ในสมการที่ (4.2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ในอิโพลีเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังรูปที่ 4.3 และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในอิโพลีเมอร์คอนกรีต ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี หาได้ในลักษณะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.4 และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในอิโพลีเมอร์คอนกรีตของทั้งสองกลุ่มแสดงดังตารางที่ 4.4

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในอิโพลีเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และได้จากตัวอย่างที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ให้แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลง ซึ่งในกลุ่มที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มชัดเจนมากกว่ากลุ่มที่ได้จากการแช่ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเล ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในอิโพลีเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหินมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเก้าถ่านหินได้มาก ส่งผลให้อิโพลีเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหิน มีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ (Chindaprasirt, et al., 2013 ; Rattanasak, and Chindaprasirt, 2009) อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 14 โมลาร์ ส่งผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาจากเก้าถ่านหินของสารละลาย NaOH อาจน้อยลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) ที่พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 15 โมลาร์ มีผลให้ความสามารถในการชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเก้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลง นอกจากนั้น ความทึบน้ำในอิโพลีเมอร์คอนกรีตอาจมีผล

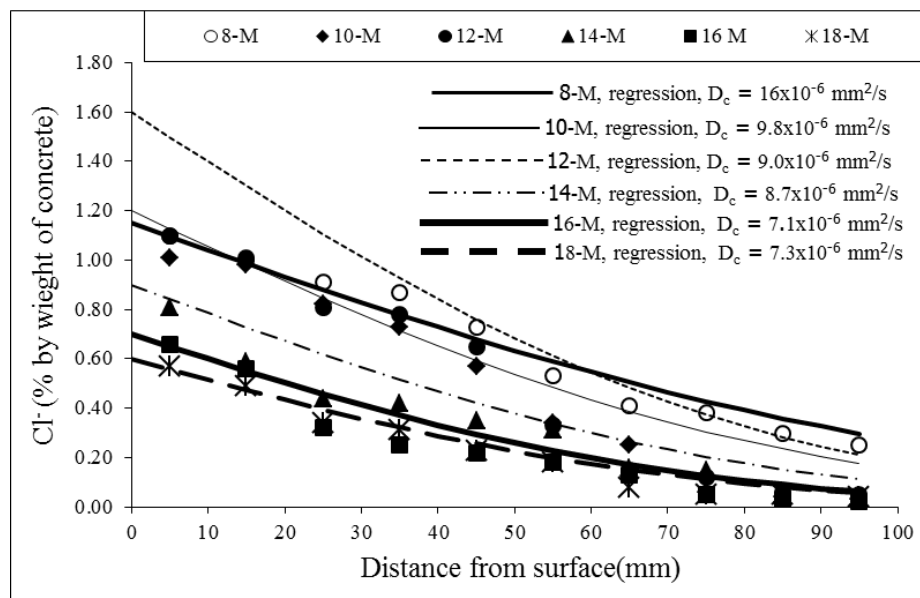
ของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมใน
 ฝ้าถ่านหิน และค่าที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมา
 จากฝ้าถ่านหิน ส่งผลให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน และลดการแทรก
 ซึมของคลอไรด์เข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ (Chindaprasirt, et al., 2013) แต่ผลดังกล่าวอาจ
 ไม่เด่นชัดมากเนื่องจากฝ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีส่วนประกอบของ แคลเซียมออกไซด์
 (CaO) เพียงร้อยละ 17.15 เท่านั้น ผลการศึกษาที่น่าสนใจที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ การผลิตจีโอพอลิ
 เมอร์คอนกรีตเพื่อให้สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ควรใช้ความเข้มข้นของสารละลาย
 NaOH ในช่วง 14-16 โมลาร์ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงกว่านี้ ไม่ได้
 ส่งผลดีต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ชัดเจน ประกอบกับการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความ
 เข้มข้นสูง ส่งผลให้ต้นทุนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงตามด้วย ส่วนความเข้มข้นของ NaOH ที่ต่ำ
 กว่า 14 โมลาร์ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล
 เนื่องจากมีการแทรกซึมคลอไรด์ค่อนข้างสูง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันทั้งการทดสอบในสนามและใน
 ห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากฝ้าถ่านหินที่
 ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{cb}) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (D_c)

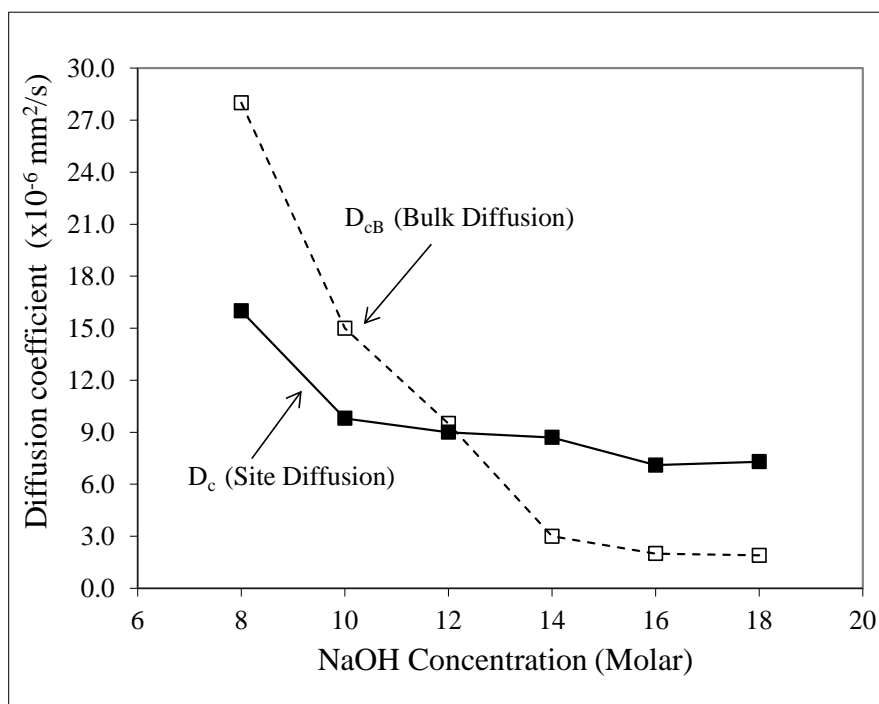
ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (มม ² /วินาที)	
	Bulk Diffusion ($D_{cb} \times 10^{-6}$)	Site Diffusion ($D_c \times 10^{-6}$)
8-M	28.0	16.0
10-M	15.0	9.8
12-M	9.5	9.0
14-M	3.0	8.7
16-M	2.0	7.1
18-M	1.9	7.3



รูปที่ 4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test



รูปที่ 4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 ปี



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี กับที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

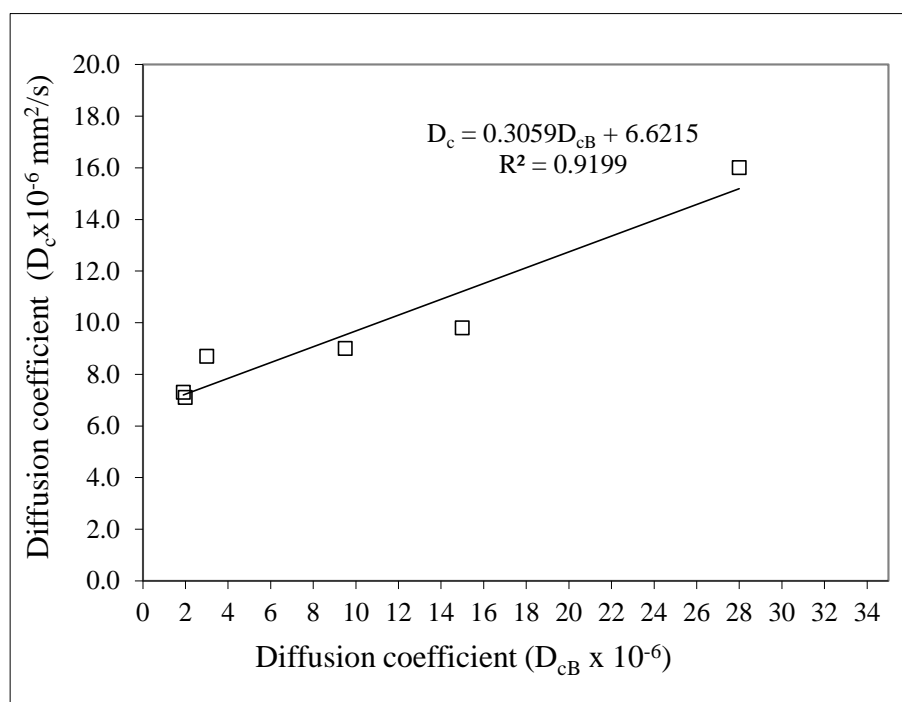
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล 7 ปี

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินในระยะยาว จากผลการทดสอบระยะสั้น ดังรูปที่ 4.6 โดยใช้การวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 4.3 โดยสมการที่ 4.3 สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 8 ถึง 18 โมลาร์ หลังจากแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

$$D_c = 0.3059D_{cB} + 6.6215 \quad (4.3)$$

เมื่อ D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหินหลังแช่ใน
สิ่งแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 7 ปี ($\times 10^{-6}$ มม²/วินาที)

D_{cb} = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหิน ที่ทดสอบ
โดยวิธี Bulk diffusion test ($\times 10^{-6}$ มม²/วินาที)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโพลิเมอร์คอนกรีตจาก
เก้าถ่านหิน ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี กับที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

4.6 การประยุกต์ใช้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของจีโพลิเมอร์คอนกรีต

โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตแสดงถึงอัตราการแทรกซึมของ
คลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต โดยสามารถใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต
เสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ หลักการพื้นฐานของการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้าง
คอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยทั่วไป สามารถคำนวณได้ง่าย เนื่องจากใช้ฐานข้อมูลการ
แทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในการคำนวณเพียงอย่างเดียว สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอ
ไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ที่เหมาะในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้าง
คอนกรีตเสริมเหล็ก ควรได้จากการทดสอบในคอนกรีตที่อายุค่อนข้างนาน และสอดคล้องกับ
สภาพแวดล้อมจริงมากที่สุด การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใน
สภาพแวดล้อมทะเลจากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ส่วนใหญ่ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค

(Fick's second law) โดยคำตอบทั่วไปของกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค สามารถทำนายความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับ ความลึก x และระยะเวลา t ($C_{x,t}$) ได้ดังสมการที่ 4.4

$$C_{x,t} = C_0 [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad (4.4)$$

ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้กำหนด $C_{x,t}$ เป็นปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หาปริมาณคลอไรด์ที่ผิว C_0 โดยจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.60 ถึง 1.60 โดยน้ำหนักซีโพลิเมอร์คอนกรีต และคำนวณหา D_c จากสมการที่ 4.3 ทำให้สามารถคำนวณหาอายุการใช้งาน (t) ของโครงสร้างซีโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต x ใดๆ หลังแช่น้ำทะเลในสถานะเปียกสลับแห้งได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษา การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test สรุปผลได้ดังนี้

1. กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์

2. การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีแนวโน้มให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 8-14 โมลาร์ และมีทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

3. การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อให้สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ควรใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14-16 โมลาร์ เนื่องจากสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี ส่วนความเข้มข้นของ NaOH ที่ต่ำกว่า 14 โมลาร์ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีการแทรกซึมคลอไรด์ค่อนข้างสูง

4. ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 8 ถึง 18 โมลาร์ หลังจากแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี จากผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

5. ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล จากสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาข้อมูลด้านความคงทนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุตั้งต้นในการผลิตอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย ดินขาวเผา เป็นต้น โดยเริ่มการศึกษาจากฐานข้อมูลด้านจีโอพอลิเมอร์ที่ให้สมบัติเชิงกลไปในทิศทางที่ดี เนื่องจากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังอัดที่สูง ก็จะมีสมบัติด้านความคงทนตีควบคู่กันไป นอกจากนี้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่ยังไม่มีมาตรฐานกาทดสอบรองรับ จึงจำเป็นต้องใช้มาตรฐานการทดสอบคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทน

เอกสารอ้างอิง

- ASTM C 128-93 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, in *1995 Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 69-73.
- 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 C127-12. (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*; V. 04.01.
- ASTM C128-12. (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*; V. 04.01.
- ASTM C 33-93 : Standard Specification for Concrete Aggregates, in *1995 Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 10-16.
- ASTM C1152 (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02.
- ACI 201.2R-01. Guide to durable concrete. ACI Committee 201, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2003.
- ACI 318-05. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI Committee 318, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2004.
- ACI 363.2R-98. Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete. ACI Committee 363, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2004.
- Anurag, M., Deepika, C., Namrata, J., Manish, K., Nidhi, S. and Durga D. (2008). Effect of concentration of alkali liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete. *Eng Appl Sci*, 3, pp. 14-18.
- Ashish Kumer Saha, (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, vol. 28, pp. 25-31.
- Chalee, W., Sasakul, T., Suwanmaneechot, P. and Jaturapitakkul, C. (2013). 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, pp. 47-53.

- Chalee, W., Ausapanit, P., and Jaturapitakkul, C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design*, 31, pp. 1242-1249.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials*, 37, pp. 693–698.
- Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C. and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage*, 29, pp. 539-543.
- Chindaprasirt, P. and Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 303–310.
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. and Taebuanhuad, S. (2013). Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Mater Str*, 46, pp. 375-381.
- Crank J. *The Mathematics of Diffusion*, 2nd, ed. 1975. Oxford Press, London.
- 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, pp. 409-418.
- Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng*, 22, pp. 1073-1078.
- กิริติกร เจริญพร้อม, วิเชียร ชาลี (2556). ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 23 ฉบับที่ 1, หน้า 107-119.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). *ความคงทนของคอนกรีตพิมพ์ครั้งที่ 1*, บริษัท จุกทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-72.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี (2553). กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเต้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 หน้า 13-22.

- ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี (2554). การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถา
ถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 21 ฉบับ
ที่ 2 หน้า 187-195.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2553). การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต. *เอกสาร
ประกอบการบรรยายวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, หน้า 71-79.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2555). *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต*. ครั้งที่ 3,
สมาคมคอนกรีตไทย
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2547). *เถาถ่านหินในงานคอนกรีต*, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
- บุญยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุชโชทา และ วิเชียร ชาลี (2558). การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะ
ยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test. *วารสาร
วิทยาศาสตร์บูรพา*, ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 หน้า 35-50.
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552). การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถา
ก้นเตา, *Burapha Sci., J.* ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 หน้า 47-55.
- วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555). การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิ
เมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน, *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี*, ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 หน้า 157-170.
- วิเชียร ชาลี และ ชिरพงษ์ เชื้อพลบ (2556). การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถา
ถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, ปีที่ 36 ฉบับที่ 2 หน้า 197-213.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2549). การศึกษาการชะเถาถ่านหิน
ลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหิน. *วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่
29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2550). วัสดุจีโอพอลิเมอร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความทางวิชาการระดับชาติ

- 1) กมลวรรณ สุริวงษ์, ละมัย พวงไพบวัน, เทียง ชีวะเกตุ, รัฐพล สมณา และ วิเชียร ชาติ (2561). "การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23. นครนายก. หน้า 1-6.



การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินภายใต้ สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

Evaluation of long term chloride penetration in fly ash- based geopolymer concrete under marine environment by Bulk diffusion test method

กมลวรรณ สุริวงษ์¹ ละมัย พวงไพน² เทียง ชีวะเกตุ³ รัฐพล สมหา⁴ และ วิเชียร ชาลี⁵

^{1,2,3,5}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ (ส่วนผสมเดียวกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล) หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test นอกจากนั้น ได้เก็บตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงเป็นเวลา 7 ปี มาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำลาย ผลการศึกษาพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น และเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี การศึกษาครั้งนี้สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

คำสำคัญ: การแทรกซึมของคลอไรด์, จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน, วิธี Bulk diffusion test, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research aimed to evaluate the long term chloride penetration of fly ash-based geopolymer concretes under marine environment from the Bulk diffusion test method. Fly ash-based

geopolymer concretes 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 same mix proportions of fly ash-based geopolymer concretes exposed to marine site). The cylindrical specimen of geopolymer concrete with 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for Bulk diffusion test. In addition, acid soluble chlorides in the geopolymer concrete were tested after being exposed to the tidal zone for 7 years. The results show that the chloride penetration in geopolymer concrete from Bulk diffusion test decreased with an increase in NaOH concentration, which is the same trend of chloride diffusion coefficient of 7-year exposure in marine environment. The results of bulk diffusion test in this study can be used to evaluate the chloride penetration of fly ash-based geopolymer concretes under long term exposure in marine site.

Keywords: Chloride penetration, Fly ash-based geopolymer concrete, Bulk diffusion test method, Marine environment

1. บทนำ

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่พัฒนาขึ้น เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก ผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ปัจจุบันสามารถเกิดปฏิกิริยาและมีสมบัติความเป็นวัสดุประสานได้ในอุณหภูมิห้อง และใช้เป็นวัสดุประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เฟส [1] ปัจจุบันมีการศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุปอซโซลานหลายชนิด และพบว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ชนิดของวัสดุปอซโซลาน ชนิดและความเข้มข้นของด่าง อุณหภูมิอบ อัตราส่วนของ

ของเหลวต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนของ Si/Al เป็นต้น [2, 3] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยให้สมบัติด้านการรับแรงอัดได้สูงเทียบเท่ากับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามคอนกรีตจำเป็นต้องมีสมบัติเชิงกลควบคู่กับสมบัติด้านความคงทนที่ดีเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่อใช้ก่อสร้างในบริเวณที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง ซึ่งได้มีความเสียหายเร็วกว่าโครงสร้างปกติทั่วไป การทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล ส่วนใหญ่เกิดจากเกลือคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต และต้นคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวเสียหาย ตลอดจนการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน การศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุปอซโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน [5, 6] มีข้อมูลที่ศึกษาจากสิ่งแวดล้อมจริง ภายใต้ระยะเวลาการกัดกร่อนที่ยาวนาน โดยพบว่า วัสดุปอซโซลานสามารถยืดระยะเวลาการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้มากขึ้น โดยแนวทางการศึกษาดังกล่าว ได้ถูกนำมาใช้กับคอนกรีตที่ใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนภายใต้สภาวะธรรมชาติ และเพิ่มฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีต ที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานให้มากขึ้น โดยจากการศึกษาที่ผ่านมา [7] พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดีขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น

อย่างไรก็ตามข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นต้องทราบอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่แสดงค่าจริง ที่เกิดจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติ ที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสอยู่ เพื่อจะได้วิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แต่การศึกษาดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลานานและเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นถ้ามีการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ทำได้ง่ายในระยะเวลาสั้นๆ กับการทดลองที่ต้องใช้ระยะเวลานานๆ ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรมด้านความคงทนที่จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้ ดังนั้นการศึกษาดังกล่าวนี้ จึงต้องการเปรียบเทียบผลการทดลองการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน โดยวิธี Bulk diffusion test ที่วัดผลการแทรกซึมโดยการไทเทรตที่ใช้กรดเป็นตัวทำลาย กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบในภาคสนาม และใช้ระยะเวลาแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานถึง 7 ปี เพื่อใช้ผลดังกล่าวในการประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่แช่ในน้ำทะเลในระยะเวลา และเป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ให้สามารถใช้งานได้อย่างจริงอย่างเป็นรูปธรรมในงานก่อสร้างต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเถาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่มีขนาดอนุภาคค้ำบงตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 73.34 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถาถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [8] องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.72 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่อุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ซึ่งอัตราส่วน SiO₂ ต่อ Na₂O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30^oซ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO ₂ (%)	35.12
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ (%)	21.51
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	16.71
Calcium Oxide, CaO (%)	17.15
Magnesium Oxide, MgO (%)	1.12
Sodium Oxide, Na ₂ O (%)	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O (%)	1.59
Sulfur Trioxide, SO ₃ (%)	2.13
Loss On Ignition, LOI (%)	0.11

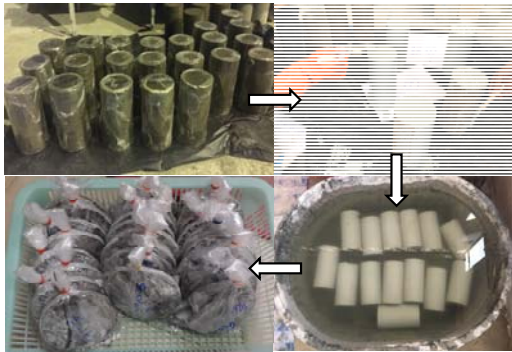
2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test ตามมาตรฐาน ASTM C1556[9] ได้ใช้ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเดียวกับกลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่ง เมื่อ 7 ปี ที่แล้ว ซึ่งเป็นส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ดังตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างทดสอบเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังจากนั้นทำการเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมด โดยเปิดไว้ 1 ด้านเพื่อให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในทิศทางเดียว และบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ หลังแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นเวลา 35 วัน เก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์โดยตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชิ้นๆ หนาชั้นละ 10 มม. และบดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 จากนั้นนำผงคอนกรีตไปไทเทรตหาการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 นอกจากนั้นได้เก็บตัวอย่างจีโอพอลิ

เมอร์คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ ที่ได้แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี มาเจาะทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการไทเทรตที่ใช้กรดเป็นตัวทำลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152 เพื่อใช้ผลเปรียบเทียบกับทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test แสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก./ม. ³)				
	เถ้านหิน	ทราย	หิน	NaOH	Na ₂ SiO ₃
8-M	390	585	1092	67 (8 molar)	167
10-M	390	585	1092	67 (10 molar)	167
12-M	390	585	1092	67 (12 molar)	167
14-M	390	585	1092	67 (14 molar)	167
16-M	390	585	1092	67 (16 molar)	167
18-M	390	585	1092	67 (18 molar)	167



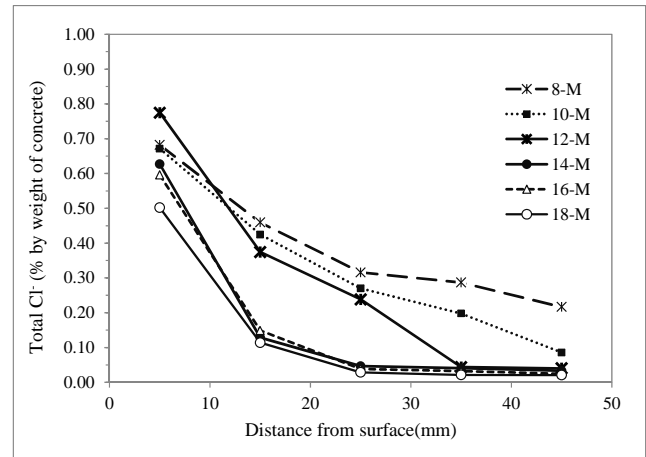
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังรูปที่ 2 พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในช่วงของความเข้มข้น 8-14 โมลาร์ เช่น ที่ระดับความลึก 25 มม. ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.32, 0.27, 0.24, 0.04, 0.04 และ 0.03 โดยน้ำหนักจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ตามลำดับ โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 14-18 โมลาร์ มีค่าใกล้เคียงกัน และลดลงจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย

NaOH เข้มข้น 8-14 โมลาร์ อย่างชัดเจน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษานางานวิจัยที่ผ่านมา [7] การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 8 ถึง 14 โมลาร์ น่าจะมีผลต่อการชะเอาซิลิกาและอลูมินาที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ และเพิ่มความทึบน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH จาก 14 ถึง 18 โมลาร์ อาจมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาไม่มากนัก ซึ่งส่งผลให้ความทึบน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นไม่ชัดเจน และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้ จึงไม่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล 7 ปี

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{cb}) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (D_c) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

เมื่อค่า D_{cb} ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ ค่าตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$C_{x,t} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{CB}t}} \right) \right] \quad (2)$$

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

x = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่แช่ (วินาที)

C_0 = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (ที่ $x = 0$) ที่ระยะเวลาแช่ t

D_{CB} = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่ t ที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test ($\text{mm}^2/\text{วินาที}$)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

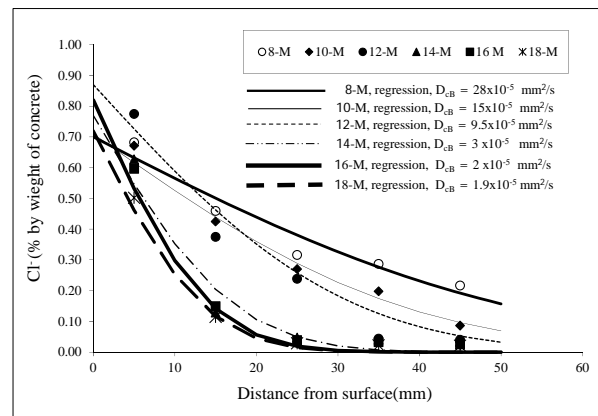
ทำการปรับค่า D_{CB} และ C_0 ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเก้าถาดหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังรูปที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี หาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถาดหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และได้จากตัวอย่างที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4 พบว่า ให้แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งในกลุ่มที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มชัดเจนมากกว่ากลุ่มที่ได้จากการแช่ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเล ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถาดหินมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเก้าถาดหินได้มาก ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถาดหิน มีความทึบหนาและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ [7, 8] อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 14 โมลาร์ ส่งผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตไม่มากนัก ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาจากเก้าถาดหินของสารละลาย NaOH อาจน้อยลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [9] ที่พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 15 โมลาร์ มีผลให้ความสามารถในการชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเก้าถาดหินมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ ความทึบหนาในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตอาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเก้าถาดหิน และต่างที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมาจากเก้าถาดหิน ส่งผลให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน และลดการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ [10] แต่ผลดังกล่าวอาจไม่เด่นชัดมากเนื่องจากเก้าถาดหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีส่วนประกอบของ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพียงร้อยละ 17.15 เท่านั้น ผลการศึกษาที่น่าสนใจที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อให้สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ควรใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14-16 โมลาร์ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงกว่านี้ ไม่ได้ส่งผลดีต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ชัดเจน ประกอบกับการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง ส่งผลให้

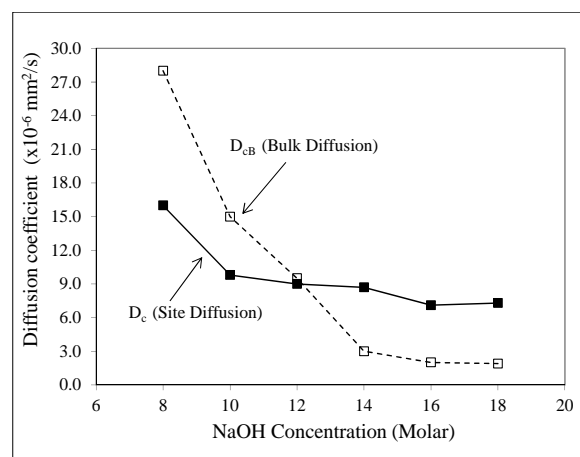
ต้นทุนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงตามด้วย ส่วนความเข้มข้นของ NaOH ที่ต่ำกว่า 14 โมลาร์ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์ค่อนข้างสูง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันทั้งการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเก้าถาดหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB}) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (D_c)

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ($\text{mm}^2/\text{วินาที}$)	
	Bulk Diffusion ($D_{CB} \times 10^{-6}$)	Site Diffusion ($D_c \times 10^{-6}$)
8-M	28	16
10-M	15	9.8
12-M	9.5	9
14-M	3	8.7
16-M	2	7.1
18-M	1.9	7.3



รูปที่ 3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถาดหิน ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

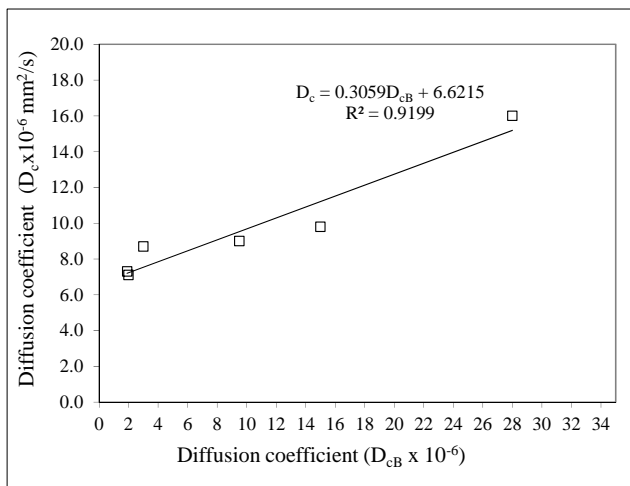
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล 7 ปี

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินในระยะยาว จากผลการทดสอบระยะสั้น ดังรูปที่ 5 โดยใช้การวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 3 โดยสมการที่ 3 สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 8 ถึง 18 โมลาร์ หลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

$$D_c = 0.3059 D_{CB} + 6.6215 \quad (3)$$

เมื่อ D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 7 ปี ($\times 10^{-6}$ มม²/วินาที)

D_{CB} = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ($\times 10^{-6}$ มม²/วินาที)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

4. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษารูปร่างได้ดังนี้

1. การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีแนวโน้มให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความ

เข้มข้นในช่วง 8-14 โมลาร์ และมีทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

2. การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อให้สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ควรใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14-16 โมลาร์ เนื่องจากสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี ส่วนความเข้มข้นของ NaOH ที่ต่ำกว่า 14 โมลาร์ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีการแทรกซึมคลอไรด์ค่อนข้างสูง

3. ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 8 ถึง 18 โมลาร์ หลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี จากผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 149/2561

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits, J. (1991). Geopolymer inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal*, 37, pp. 1633-1659.
- [2] Chindapasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C. and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage*, 29, pp. 539-543.
- [3] 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, pp. 409-418.
- [4] Anurag, M., Deepika, C., Namrata, J., Manish, K., Nidhi, S. and Durga D. (2008). Effect of concentration of alkali liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete. *Eng Appl Sci*, 3, pp. 14-18.
- [5] Chalee, W., Sasakul, T., Suwanmaneechot, P. and Jaturapitakkul, C. (2013). 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, pp. 47-53.
- [6] Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration

of concrete up to 10 year-results under marine site.

Construction and Building Materials, 37, pp. 693–698.

- [7] Chindapasirt, P. and Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 303–310.
- [8] Rattanasak, U. and Chindapasirt, P. (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng*, 22, pp. 1073-1078.
- [9] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2549). การศึกษาการชะละลายผ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากถ้ำถ่านหิน. *วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- [10] Chindapasirt, P., Rattanasak, U. and Taebuanhuad, S. (2013). Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Mater Str*, 46, pp. 375-381.

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2561A10802207 สัญญาเลขที่ 149/2561

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.
2561 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล
จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย (ศ. /รศ. /ผศ. /ดร. /อ.) ...รศ.ดร.วิเชียร ชาลี...

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2560 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2561

ระยะเวลาดำเนินการ จำนวน ..1....ปี...- .เดือน

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...207,200บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2560...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...165,760.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2561.....

งวดที่ 3 (10%) จำนวน ...-.....บาท เมื่อ ...-.....

รวม ...372,960.....บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	40,000	40,000	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	50,000	50,000	0
4. ค่าใช้สอย	153,760	153,760	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าบริการด้านสื่อสารและโทรคมนาคม ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	50,640	50,640	0
รวม	414,400	414,400	0

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน