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

ชรินทร์ เสนาวงษ์[1] และ วิเชียร ชาลี[2]*
Charin Seanawong[1] and Wichian Chalee[2]*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม^3 และบ่มคอนกรีตในอากาศจนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 180 วัน เก็บตัวอย่างมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) โดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) ตลอดจนหาปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ผลการวิจัยพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ตลอดจนร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เถ้าถ่านหิน การแทรกซึมของคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ ความเข้มข้นของ NaOH สภาวะแวดล้อมทะเล

Abstract

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

[1] นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
* Corresponding Author, Tel. 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th

รับเมื่อ 18 พฤศจิกายน 2553 ตอบรับเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2554

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

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

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอันดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก ความเหมาะสมทางด้านราคา การผลิตที่ไม่ยุ่งยาก และสามารถควบคุมคุณสมบัติได้ง่าย อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุคอนกรีตอาจมีข้อจำกัดที่ตามมาทั้งทางด้านคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการมากขึ้น ตลอดจนกระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม กระบวนการผลิตซีเมนต์ทำให้เกิดการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อการเกิดก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านวัสดุที่ผ่านมาจึงได้มีการคิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้น้อยลง

การพัฒนาวัสดุ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตวัสดุใหม่ให้สามารถใช้งานแทนคอนกรีตโครงสร้างได้โดยไม่ต้องใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการนำสารละลายอัลคาไลน์ที่เข้มข้นสูงมากระตุ้น (Activate) สารเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ) ที่อุณหภูมิห้อง จะทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม คอนกรีตดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเด็นเซชัน ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) [1]

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al เป็นต้น โดยทำการศึกษาในลักษณะที่เป็นเพสต์ หรือมอร์ต้าร์ [2]-[5] และนอกจากนั้นได้มีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่แข็งตัว ซึ่งพบว่าคุณสมบัติดังกล่าว เป็นไปในทิศทางที่ดี [6]-[8] และสามารถพัฒนาวัสดุนี้อย่างต่อเนื่องได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มเติมจากคุณสมบัติเชิงกล และศึกษาถึงแนวทางที่เป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลเป็นสาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีต สภาพแวดล้อมทางกายภาพที่คอนกรีตสัมผัส และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่คอนกรีตสัมผัส โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้าง

คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลชัดเจนต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางของการพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่ให้เกิดการใช้งานได้จริง โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่ที่ไม่ใช่คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ ให้สามารถใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ ยังไม่มีมาตรฐานที่รองรับการทดสอบเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นใน การศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

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

รูปที่ 1 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72

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

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสภาพแวดล้อมทะเล โดยหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม^3 (ดังรูปที่ 1) หลังจากบ่มคอนกรีตในอากาศจนอายุครบ 28 วันนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี นอกจากนั้นได้หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม^2 เพื่อทดสอบ

กำลังอัดที่อายุ 28 วัน

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

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก/ลบ.ม.)					ค่ายุบตัว (มม.)
	เถ้าถ่านหิน	NaOH	Na_2SiO_3	ทราย	หิน	
8-M	390	67	167	585	1092	25
10-M	390	67	167	585	1092	25
12-M	390	67	167	585	1092	25
14-M	390	67	167	585	1092	24

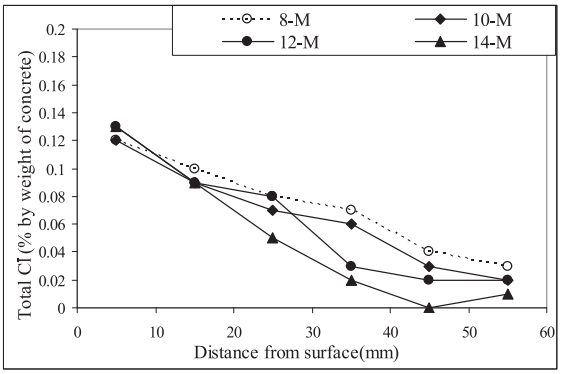
2.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

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

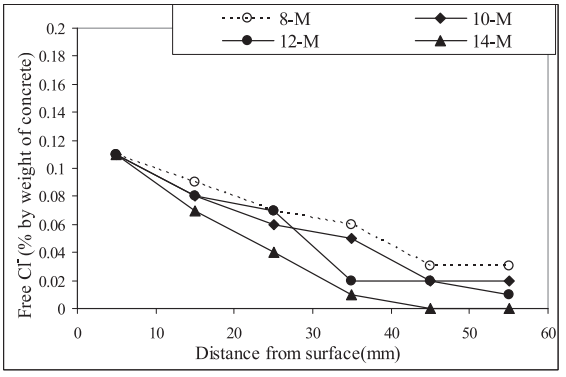
3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การแทรกซึมของคลอไรด์

รูปที่ 2 แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเล



ก) การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด



ข) การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ

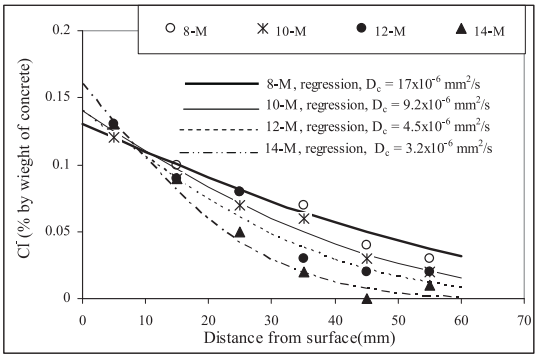
รูปที่ 2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

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

ตามลำดับ การที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เป็นผลจากการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นไปในทิศทางที่ดี [6] นอกจากนั้น อาจมีผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถ้าถ่านหินและด่างที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมา ทำให้ลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่มีกำลังต่ำและละลายน้ำลงได้ และส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ [11] การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะลดสารที่ไม่เป็นประโยชน์ลง อาจได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ได้แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 ถึง 14 โมลาร์ และเก็บข้อมูลที่แช่ในน้ำทะเลถึง 180 วัน เท่านั้น ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงขึ้นให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดีทั้งคุณสมบัติเชิงกลและด้านความคงทน แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงมากกว่านี้ ยังไม่มีข้อมูลการศึกษา ซึ่งอาจจะส่งผลดีหรือผลเสียต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินได้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนต่อไป

3.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_C)

ในการศึกษาครั้งนี้ หาค่า D_C ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) [12] ดังแสดงในสมการที่ (1)



รูปที่ 3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน

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

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

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

เมื่อ

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

x = ระยะจากผิวหน้าของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (มม.)

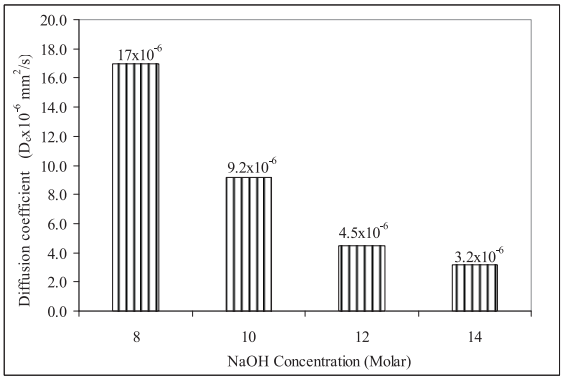
t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

C_o= ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (ที่ x=0) ที่ระยะเวลาแช่ t

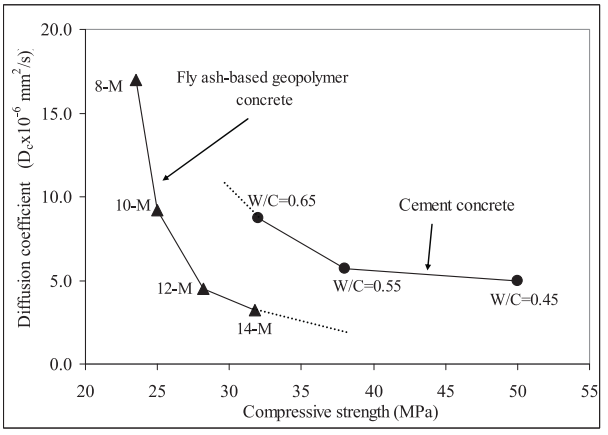
D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลา แช่ t (มม^2/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

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



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 180 วัน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

รูปที่ 4 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่าค่า D_c มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ โดย D_c มีค่าต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สูงขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ มีค่า D_c เท่ากับ $17x10^{-6}$, $9.2x10^{-6}$, $4.5x10^{-6}$ และ $3.2x10^{-6}$ มม^2/วินาที ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 12 เป็น 14 โมลาร์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า D_c ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจาก 8 เป็น 10 โมลาร์ ซึ่งหมายถึง การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมากกว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังรูปที่ 5 พบว่าค่า D_c ลดลงอย่างชัดเจนตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ และมีผลค่อนข้างชัดเจนในกลุ่มของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ โดยการเพิ่มกำลังอัดจาก 23 เป็น 25 เมกกาปาสคาล ส่งผลให้ค่า D_c ลดลงจาก $17x10^{-6}$ เป็น $9.2x10^{-6}$ มม^2/วินาที ในขณะที่กลุ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้น การเพิ่มกำลังอัดจาก 28 เป็น 32 เมกกาปาสคาล ส่งผลให้ค่า D_c มีค่าลดลงน้อยมาก กล่าวคือ ลดจาก $4.5x10^{-6}$ เป็น $3.2x10^{-6}$ มม^2/วินาที เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมา [13] พบว่าแนวโน้มกำลังอัดที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงทิศทางที่ดีในการพัฒนาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษาวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผ่านมา พบว่า มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยเฉพาะคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสด ที่มีผล

ชัดเจนต่อการนำไปใช้งานจริง ตลอดจนคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐาน ซึ่งพบว่ามีข้อมูลงานวิจัยค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะข้อมูลการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้วัสดุที่มีในประเทศ ดังนั้นการพัฒนาฐานข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะต้องมีการศึกษามากขึ้น และมีทิศทางในการพัฒนาเพื่อสนับสนุนให้มีการนำไปใช้งานจริงได้

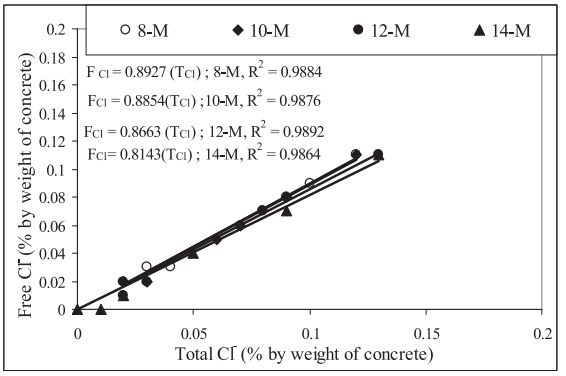
3.3 การกักเก็บคลอไรด์

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตจะบ่งชี้ถึงปริมาณคลอไรด์อิสระ ที่มาทำลายคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่สัมผัสกับคลอไรด์ ถ้าคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตถูกดักจับไว้มาก จะส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่มาทำลายเหล็กเสริมน้อยลง และยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ ดังนั้นแนวทางการพิจารณาวัสดุประสานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากจะพิจารณาในด้านของความทึบน้ำและกำลังอัดที่สูงเพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงการดักจับคลอไรด์อิออนของวัสดุประสานนั้นด้วย

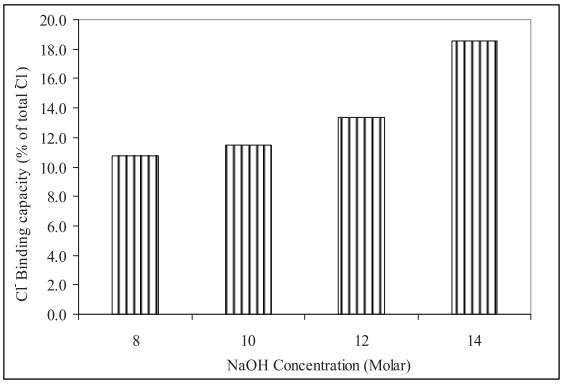
เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน โดยหาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 6 โดยวิเคราะห์ในรูปของ ร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังสมการที่ 3

$$P_b = \frac{(T_{cl} - F_{cl})}{T_{cl}} x100 \qquad (3)$$

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



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินเมื่อแช่น้ำทะเล 180 วัน



รูปที่ 7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 180 วัน

ไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ P_b มีค่ามากขึ้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลงและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย และการดักจับคลอไรด์อิออนในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's Salt) อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อิอนส่วนหนึ่งที่เป็นไปได้คือการดักจับทางกายภาพ

โดยคลอไรด์อิออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น [14] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้กลไกการให้กำลังและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ดังนั้นการดักจับคลอไรด์อิออนจึงน่าจะเป็นการดักจับทางกายภาพ โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น กำลังคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและการดักจับคลอไรด์อิออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเสนอ ค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) เพื่อจะได้ข้อมูลประกอบในการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อใช้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงต่อไป

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น

2. การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง

3. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น

4. แนวโน้มกำลังอัดที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 8/2554

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Davidovits, “Chemistry of geopolymer system, Terminology,” In *Proceeding of Second International Conference Geopolyme*, 1999, France, pp 9–39.

[2] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ วิเชียร ชาลี, “การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ*, ปีที่ 4, หน้า 437-446, 2549.

[3] P. Chindaprasirt, W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and U. Rattanasak, “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers,” *Waste Management,* vol. 29, no. 2, pp 539-543, 2009.

[4] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer,” *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 1073-1078, 2009.

[5] สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ, “จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ,” ใน*การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*, 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836.

[6] ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมนา และ วิเชียร ชาลี, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน,” *Burapha Sci., J.,* vol.15, no.1, หน้า 13-22, 2553.

[7] J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, “Compressive strength, modulus of elasticity and water permeability of inorganic polymer concrete,” *Materials and Design*, vol. 3, pp. 4748-4754, 2010.

[8] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, “Compressive strength

and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol.24, pp.236-240, 2010.

[9] ASTM. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, C1152 M-04E01. Annual Book of ASTM Standards 2008 ; 04.02.

[10] ASTM. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete, C1218 M-99R08. Annual Book of ASTM Standards 2008;04.02.

[11] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, *เถ้าแกลบในงานคอนกรีต*, สำนักพิมพ์ไซน์ แอนด์ เอ็นจีเนียริ่ง, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2552, หน้า 110-111.

[12] J. Crank, *The mathematic of diffusion*, 2nd, edn. London: Oxford Press, 1975.

[13] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 505-514, 2009.

[14] S. Tangtermsirikul, *Durability and mix design of concrete*, 1st ed., Printing house of Thammasat University, 2003.