



การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ในสภาพแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

L.Y. Ponhsampatea เที่ยง ชิวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน: โทรศัพท์ 08-9791-5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.018

รับเมื่อ 19 ตุลาคม 2559 ตอรับเมื่อ 26 ธันวาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 17 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อกำลังอัด สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) และการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (ค่าแรงเบรคเกอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5) เท่ากับ ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม. ที่มุมของตัวอย่างทดสอบ ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20 และ 50 มม. และได้หล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100×200 มม.³ สำหรับทดสอบกำลังอัด หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง และเก็บตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงขึ้นไปเกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงในคอนกรีตถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าสูงขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

คำสำคัญ: เถ้าปาล์มน้ำมัน, กำลังอัด, สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์, การกัดกร่อนของเหล็กเสริม, สิ่งแวดล้อมทะเล

การอ้างอิงบทความ: L.Y. Ponhsampatea เที่ยง ชิวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, "การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในสภาพแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 23-36, ม.ค.-มี.ค. 2561.

Chloride Penetration and Steel Corrosion of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash under 5-year Exposure in Marine Environment

L.Y. Ponhsampatea, Tieng Cheewaket, and Wichian Chalee*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

*Corresponding Author: Tel: 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.018

Received 19 October 2016; Accepted 26 December 2016; Published online: 17 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research investigates the effects of palm oil fuel ash on compressive strength, chloride diffusion coefficient (D_c), and steel corrosion of concrete after being exposed to the marine environment for 5 years. Water-to-binder ratios (W/C) were carried at 0.40, 0.45 and 0.50. Palm oil fuel ash (the particles retained on a sieve #325 were less than 1.5%) to partially replace Portland cement type I at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. The 200-mm concrete cube specimens were cast and steel bars with 12-mm diameter and 50 mm in length were embedded with the covering depth of 10, 20 and 50 mm. Then the cylindrical specimens of 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for testing compressive strength then cured in fresh water for 28 days. Subsequently, the specimens were tested to determine the compressive strength, the total chloride contents, and the surface loss of steel corrosion after being exposed to tidal zone for 5 years. The results indicated that chloride diffusion coefficient (D_c) and steel corrosion clearly decreased with replacing palm oil fuel ash is less than 25% by weight of binder including the increased of compressive strength. However, with a high volume of palm oil fuel ash replacement (up to 50% by weight of binder) did not well prevent the chloride resistance and steel corrosion. Moreover, at high water-to-binder ratio effected to increase the chloride diffusion coefficient (D_c) clearly shown in normal concrete than palm oil fuel ash concrete.

Keywords: Palm Oil Fuel Ash, Compressive Strength, Chloride Diffusion Coefficient, Steel Corrosion, Marine Environment

Please cite this article as: L.Y. Ponhsampatea, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Chloride penetration and steel corrosion of concrete containing palm oil fuel ash under 5-year exposure in marine environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 23–36, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).



1. บทนำ

คอนกรีตเทคโนโลยีในปัจจุบันได้ศึกษาการนำเอาวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม มาเป็นส่วนผสมในวัสดุประสานเพื่อผลิตคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความประหยัดและปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ช่วยลดความร้อนในคอนกรีต และเพิ่มความคงทนต่อการทำลายจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เป็นต้น วัสดุที่นำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีปริมาณ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) สูง เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ทำให้มีการยึดเกาะกันแน่น ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดและความหนาแน่นมากขึ้น รวมทั้งป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ตลอดจนช่วยเพิ่มความคงทนของคอนกรีตอีกด้วย

ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน โดยเหลือทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล โดยการเผาากปาล์มเป็นเชื้อเพลิงดังกล่าว ได้ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีสมบัติทางเคมีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน และมีศักยภาพในการใช้งานทางวิศวกรรมได้ ทั้งนี้ถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้ในการผสมคอนกรีต ต้องผ่านการบดให้ละเอียดก่อนจึงจะสามารถใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุประสานได้

การศึกษาที่ผ่านมา [1] พบว่าการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตหลังแช่ในสารละลายซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานสามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีต เนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้ และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการนำถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในการงานคอนกรีตกำลังสูง [2]

ซึ่งพบว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88–91 เมกะปาสกาล เมื่อใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10–30 การศึกษาศมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านมา ได้มุ่งประเด็นไปที่ความคงทนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในน้ำทะเลถึงอายุ 3 ปี ส่วนการกัดกร่อนเหล็กเสริม ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมัน หลังจากที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลยังไม่มีความชัดเจน ตลอดจนการศึกษาข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานที่สุดเท่าที่จะสามารถเก็บข้อมูลได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงมากขึ้น ดังนั้นการศึกษานี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็ก ควบคู่กับการรับแรงเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด หลังเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 5 ปี เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานจากถ้าชีวมวลที่ชัดเจน และสามารถยืนยันการนำไปใช้งานจริงได้อย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.1 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [3] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 จึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ความถ่วงจำเพาะของ

เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเท่ากับ 2.33 สมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 69.7 และมีค่า LOI ร้อยละ 10 ซึ่งจัดให้อยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (P)
Specific Gravity	3.15	2.33
Retained on a Sieve No.325 (%)	N/A	1.5
Mean Particle Size (μm)	25	10.1

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (P)
Silicon Dioxide	20.8	65.3
Aluminum Oxide	5.5	2.5
Iron Oxide	3.2	1.9
Calcium Oxide	64.9	6.4
Magnesium Oxide	1.1	3.0
Sodium Oxide	0.1	0.3
Potassium Oxide	0.5	5.7
Sulfur Trioxide	2.9	0.4
Loss on Ignition	2.9	10.0

มวลรวมหยาบใช้หินปูนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หิน $\frac{3}{4}$ นิ้ว) และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.66 ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.63 โดยค่าโมดูลัส

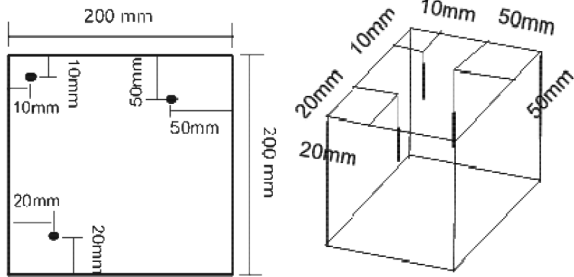
ความละเอียดของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5–8.5 และมวลรวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.2–3.1 [4] ตามลำดับ ตารางที่ 3 แสดงความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 127–88 [5] และ ASTM C 128–93 [6] โดยที่ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.77 และ 2.57 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่มีค่าระหว่าง 1.6–3.2 [7]

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพมวลรวม

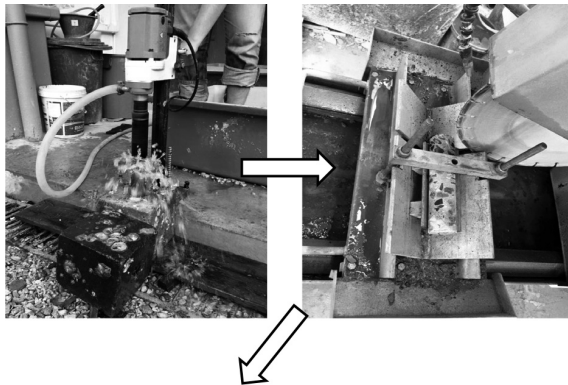
สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.77	2.57
Apparent Specific Gravity	2.80	2.61
Absorption (%)	0.64	0.96
Fineness Modulus	6.66	2.63
Normal Maximum Size (mm)	19	-

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 4 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ เพื่อใช้ในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ พร้อมได้ฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20 และ 50 มม. (รูปที่ 1) เพื่อทดสอบการเกิดสนิมที่ผิวเหล็ก อีกทั้งได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัด หลังจากบ่มคอนกรีตจนครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี (รูปที่ 2) เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 5 ปี ได้นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์มาเจาะเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

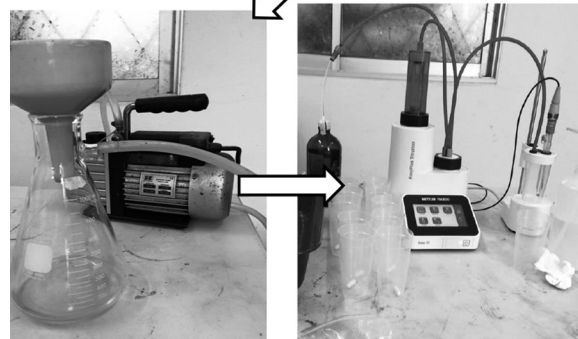


รูปที่ 1 ตำแหน่งของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

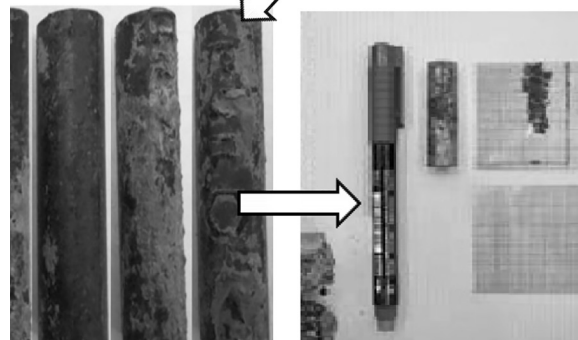
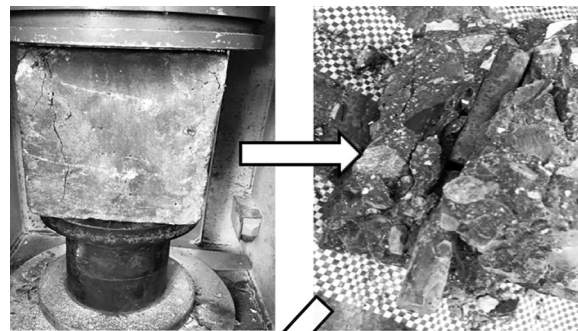


รูปที่ 2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ทั้งหมด โดยใช้กรดเป็นตัวทำลาย ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [8] (รูปที่ 3) ตลอดจนนำตัวอย่างคอนกรีตมากัดให้แตก เพื่อนำเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ มาวัดพื้นที่การเกิดสนิมโดยใช้กระดาษกราฟใสพันรอบ (รูปที่ 4) นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 4 การวัดการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					
	วัสดุประสาน		ทราย	หิน	น้ำ	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด				
I40	480	0	767	935	190	0.40
I40P15	405	70	767	910	190	0.40
I40P25	358	119	767	894	190	0.40
I40P35	310	167	767	875	190	0.40
I40P50	239	239	767	850	190	0.40
I45	425	0	767	979	190	0.45
I45P15	360	64	767	957	190	0.45
I45P25	318	106	767	938	190	0.45
I45P35	276	148	767	925	190	0.45
I45P50	212	212	767	903	190	0.45
I50	385	0	767	1012	190	0.50
I50P15	327	58	767	990	190	0.50
I50P25	289	96	767	978	190	0.50
I50P35	250	135	767	964	190	0.50
I50P50	193	193	767	944	190	0.50

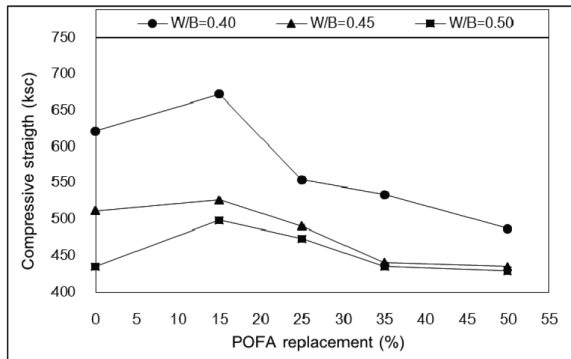
สมบัติของน้ำทะเล มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9–8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000–19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200–2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25–35 องศาเซลเซียส

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 5 ปี

กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี แสดงดังตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลมีแนวโน้มลดลง เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น

และเป็นแนวโน้มเดียวกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยผลดังกล่าวเกิดจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย โดยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีต ไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ [9] และเห็นผลชัดเจนเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงที่สุดในกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน และสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดย



รูปที่ 5 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

น้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เท่ากับ 623, 673, 555, 535 และ 488 กก./ชม.² ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการปรับปรุงกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ โดยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถชดเชยกำลังอัดที่หายไป เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงได้อีกทั้งยังส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เป็นผลจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ [10] ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาหรืออะลูมินาในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้สามารถป้องกันการทำลายจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเล ทำให้การสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตกลุ่มนี้หลังแช่น้ำทะเลเกิดขึ้นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมวัสดุปอซโซลาน [11]

การศึกษาครั้งนี้พบว่า ทุกส่วนผสมของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50

มีร้อยละกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน และน้ำทะเลไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของคอนกรีต ถึงแม้จะแช่ในสิ่งแวดล้อมดังกล่าวเป็นระยะเวลา นานถึง 5 ปี ก็ตาม

ตารางที่ 5 กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ชม. ²)		ร้อยละกำลังอัดที่ 5 ปีเทียบกับ 28 วัน
	28 วัน	5 ปี	
I40P00	483	623	129
I40P15	517	673	130
I40P25	480	555	116
I40P35	495	535	108
I40P50	446	488	109
I45P00	464	513	110
I45P15	484	528	109
I45P25	412	492	119
I45P35	403	441	109
I45P50	384	435	113
I50P00	394	436	110
I50P15	376	500	133
I50P25	355	474	133
I50P35	360	436	121
I50P50	342	430	126

3.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c)

การศึกษาครั้งนี้ ได้หาค่า D_c ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) [12] ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

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

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

เมื่อ

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

x = ระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

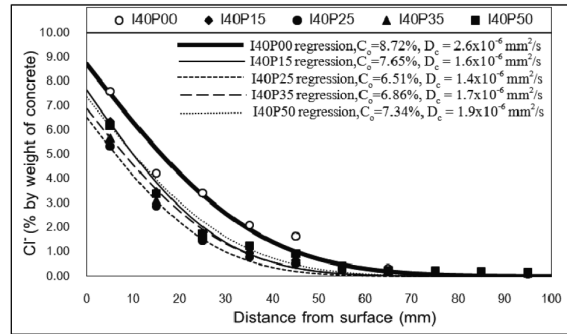
C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่ $x=0$) ที่ระยะเวลาแช่ t

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลาแช่ t (มม.²/วินาที)

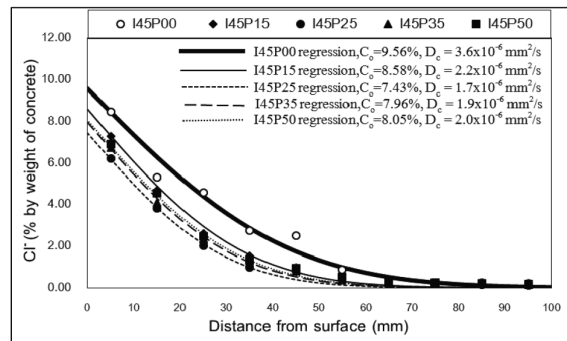
erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังตัวอย่างในรูปที่ 6 (ก), 6 (ข) และ 6 (ค) ที่แสดงกราฟในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี และแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ดังตารางที่ 6

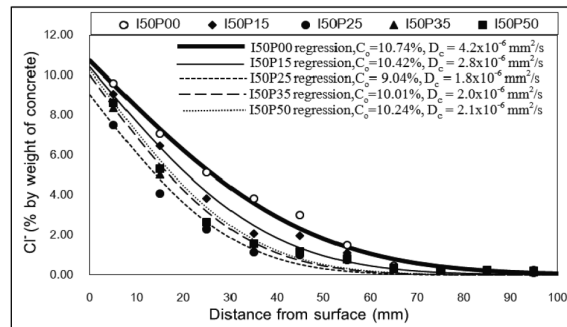
รูปที่ 7 แสดงผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า D_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 ส่วนการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้ D_c มีค่าเพิ่มขึ้น เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ค่า D_c เท่ากับ 2.6×10^{-6} , 1.6×10^{-6} , 1.4×10^{-6} , 1.7×10^{-6} และ 1.9×10^{-6} มม.²/วินาที



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



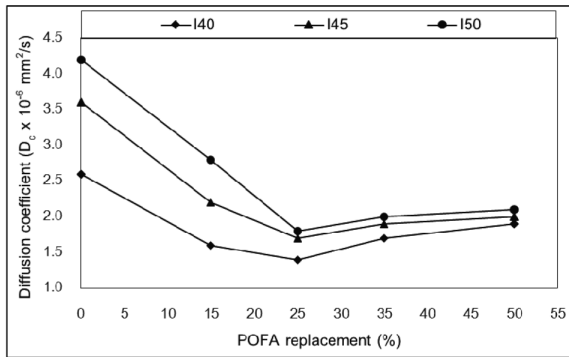
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

รูปที่ 6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมาก (มากกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) เริ่มส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 7 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

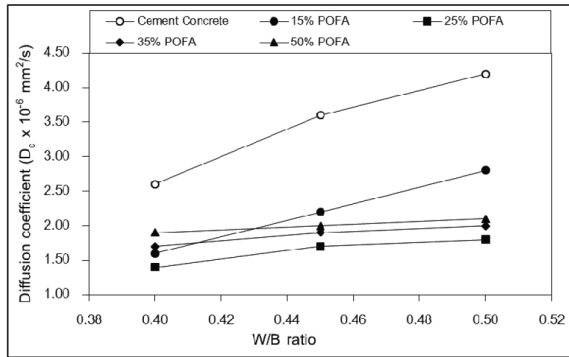
ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	$D_c \times 10^{-6}$ (มม. ² /วินาที)
I40P00	2.6
I40P15	1.6
I40P25	1.4
I40P35	1.7
I40P50	1.9
I45P00	3.6
I45P15	2.2
I45P25	1.7
I45P35	1.9
I45P50	2.0
I50P00	4.2
I50P15	2.8
I50P25	1.8
I50P35	2.0
I50P50	2.1

อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ในทุกอัตราส่วนผสม ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ [13] การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ส่งผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้มีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 65.3 ในขณะที่ Al_2O_3 มีแค่ร้อยละ 2.5 เท่านั้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [14] ที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตเพื่อต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ที่มีผลการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น โดยสมบัติทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่ามีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าอะลูมินาค่อนข้างมาก เหมือนกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นเริ่มส่งผลให้การต้านทานของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลลดลง อาจเป็นผลจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดลง ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ มีไม่มากพอในเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่มีในเถ้าปาล์มน้ำมัน ประกอบกับปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก็สามารถที่จะละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น [15]

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ตามรูปที่ 8 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง เช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50,



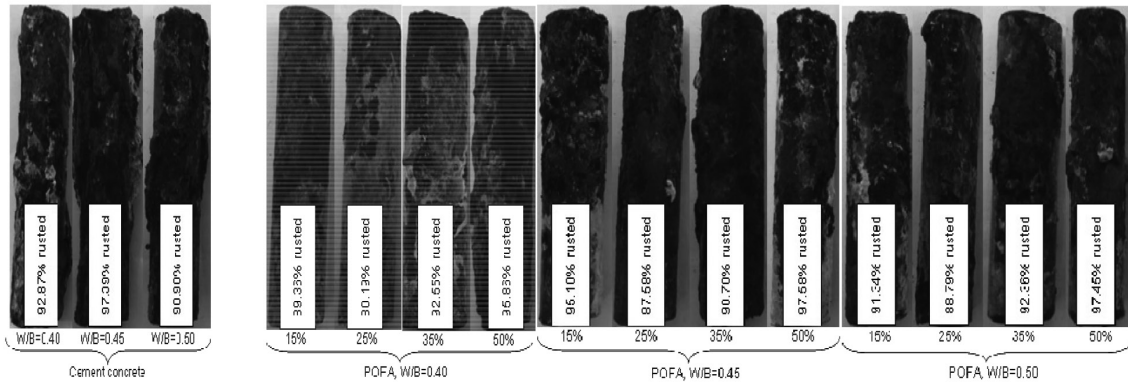
รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

0.45 และ 0.40 ให้ค่า D_c เท่ากับ 4.2×10^{-6} , 3.6×10^{-6} และ 2.6×10^{-6} มม.²/วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้การลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่ากลุ่มที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (สังเกตได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 8) ทั้งนี้เป็นผลจากน้ำเป็นปัจจัยหลักของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตธรรมดา และการลดปริมาณน้ำลงในส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาทำให้คอนกรีตมีความที่บวมและกำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน [16] จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่ลดลงมีผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ความที่บวมของคอนกรีตที่ส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ นอกจากจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันบางส่วนยังเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งความที่บวมในคอนกรีตกลุ่มนี้จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันด้วย โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตจะเป็นผลหลักที่ทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้นในช่วงต้น แต่หลังจากนั้นความแน่นของคอนกรีตจะเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นหลัก ทำให้โพรงในคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น โดยความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในระยะยาวไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

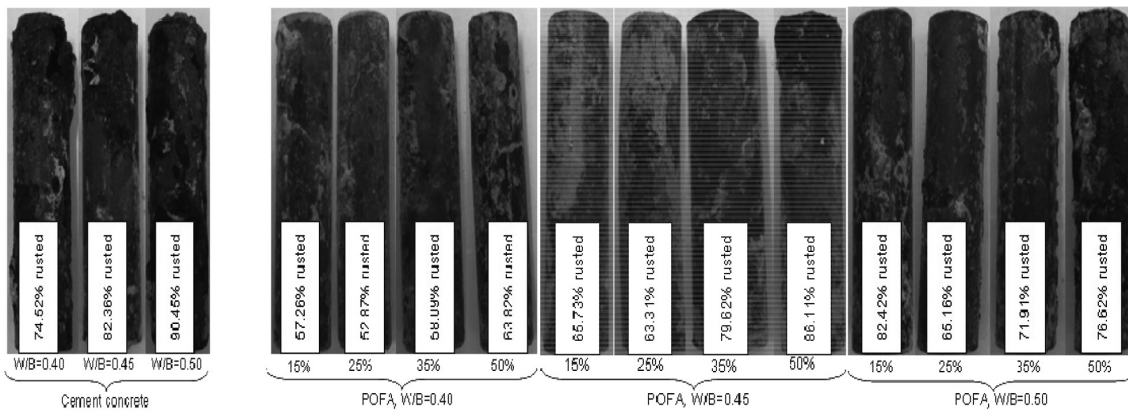
3.3 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

รูปที่ 9 แสดงผลของเถ้าปาล์มน้ำมันและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นพบในระยะหุ้มคอนกรีตเท่ากับ 10 และ 20 มม. เท่านั้น ส่วนที่ระยะหุ้ม 50 มม. ไม่ปรากฏการเกิดสนิมแม้แต่ตัวอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี การทำลายเหล็กเสริมเกิดขึ้นที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กน้อยๆ ส่วนที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ยังไม่ปรากฏการเกิดสนิม โดยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 มีผลให้การกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีการแนวโน้มลดลง ส่วนการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมมากขึ้น และเป็นแนวโน้มเดียวกันในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.50 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

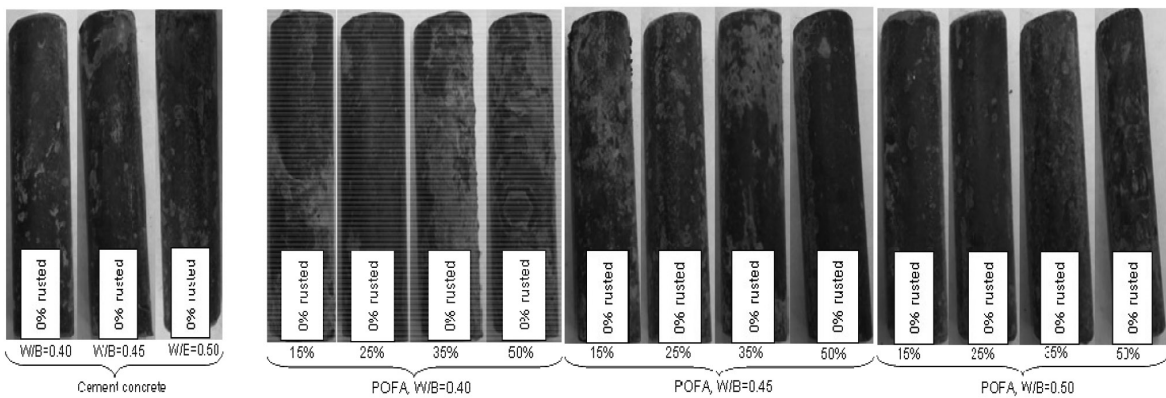
การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเกิดจากน้ำและออกซิเจนเป็นหลัก และมีเกลือคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดสนิมเหล็กเร็วขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการดูดซึม (Absorption) จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่อยู่ในคอนกรีตจะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่บริเวณคอนกรีตและบริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์ในสภาพเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล ซึ่งคลอไรด์เป็นตัวกลางที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริม



(ก) ระยะฝังเหล็ก 10 มม.



(ข) ระยะฝังเหล็ก 20 มม.



(ค) ระยะฝังเหล็ก 50 มม.

รูปที่ 9 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราน้ำต่อวัสดุประสานของการกักกรองของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ไม่ให้เกิดสนิมลดลง และเมื่อถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ อีกอย่างคลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด [17]–[20] แต่ความชื้นน้ำและความแน่นของคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ น้ำ และออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตที่ทำให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมลดลงไปด้วย [21] ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงเห็นได้ว่า แนวโน้มของการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตจึงมีทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาในข้างต้น นอกจากนั้นปริมาณของ SiO_2 ที่สูงในเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี จะได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นเจลแข็ง ทำให้สามารถกักจับคลอไรด์ทางกายภาพดีขึ้น และมีผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมเหล็กลดลงอีกด้วย [22] ส่วนการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ส่งผลให้ได้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ในเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เพียงพอ จึงมีผลให้ได้ C-S-H ลดลง และการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงด้วย [23] ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำลง จึงมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์น้ำ และออกซิเจน เข้าไปทำให้เกิดสนิมในคอนกรีตได้มากขึ้น

4. สรุป

จากผลการศึกษานี้สรุปได้ดังนี้

1. กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่ในสภาพแวดล้อมทะเลมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น แต่การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงที่สุดในกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน และสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

2. การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกิน

ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50

3. การลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่ากลุ่มคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

4. ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมในการใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ คือคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ไม่เกินร้อยละ 25 เนื่องจากทำให้กำลังอัด การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กเป็นไปในทิศทางที่ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนุอุตุนนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ วจพ. 24/2556

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasit, “Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2641–2646, 2009.
- [2] V. Sata, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, “Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 623–628, 2004 (in Thai).
- [3] *ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, C618, 2003.
- [4] *ACI Guide for Use of Normal Weight Aggregates*



- in Concrete, ACI 221R, 1992.
- [5] ASTM Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, C127, 2001.
- [6] ASTM Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, C128, 2001.
- [7] ACI Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete, ACI 221R, 1992.
- [8] ASTM Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, C1152 M-04E01, 2008.
- [9] C. Jaturapitakkul, K.Kiattikomol, W. Tangchirapat, and T. Saeting, "Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1399–1405, 2007.
- [10] V.Sata, C. Jaturapitakkul, and C. Rattanashotinunt. "Compressive strength and heat evolution of concrete containing palm oil fuel ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, no.10, pp. 1033–1038, 2010.
- [11] P. Chindaprasirt, P. Cao, and P. Suwanvitaya, "Influence of binder type on quality of concrete for durable structures," presented at The Second Asia/Pacific Conference on Durability of Building Systems Harmonised Standards and Evaluation, AusAid, ITB, CSIRO. Indonesia, July 10–12, 2000.
- [12] J. Crank, *The Mathematic of Diffusion*, 2nd ed. London: Oxford Press, 1975.
- [13] W. Chalee, T. Sasakul, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment," *Cement & Concrete Composite*, vol. 37, pp. 47–53, 2013.
- [14] W. Chalee, "Threshold chloride level of concrete contained with rice husk-bark ash under marine environment," *Burapha Science Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 132–143, 2013 (in Thai).
- [15] K. Charoenprom and W. Chalee, "Relation between water permeability and chloride diffusion coefficient of concrete under 10-year exposure in marine environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 23, no. 1, pp. 29–41, 2013 (in Thai).
- [16] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, Pozzolan and Concrete," *Thailand Concrete Association*, pp. 11–13, and pp. 238–240, 2008 (in Thai).
- [17] MA. Sanjuan and R. Mufioz-Martialay, "Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test," *Mater Lett*, vol. 27, no. 4–5, pp. 263–268, 1996.
- [18] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1145–1151, 2005.
- [19] HU. Jensen and PL. Pratt, "The binding of chloride ions by pozzolanic product in fly ash cement blends," *Advances in Cement Research*, vol. 2, no. 7, pp. 121–129, 1989.
- [20] JP Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete*. England: Taylor & Francis Ltd., 1996, pp. 1–10.
- [21] F. Leng, N. Feng, and X. Lu, "An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 989–992, 2000.
- [22] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, and

C. Jaturapitakkul, “Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1492–1499, 2007.

[23] A. Chaipanich and T. Nochaiya, “Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 99, no. 2, pp. 487–493, 2010.