รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

(Durability of concrete containing palm oil fuel ash under 7-year exposure in marine environment)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

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

รหัสโครงการ 692270
สัญญาเลขที่ 148/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

(Durability of concrete containing palm oil fuel ash under 7-year exposure in marine environment)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มกราคม 2562

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มีงบประมาณทั้งโครงการ 481,300 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	481,300 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนรีตในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด เท่ากับร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม^3 และฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม. ที่มุมของตัวอย่างทดสอบ ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20 และ 50 มม. และได้หล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มม^3 สำหรับทดสอบกำลังอัด หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง และเก็บตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

ผลการศึกษา พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงในคอนกรีตถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.40 ให้ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูง และลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : การแทรกซึมของคลอไรด์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, การกัดกร่อนเหล็กเสริม, กำลังอัดคอนกรีต, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research investigates the effects of palm oil fuel ash on compressive strength, chloride penetration, and steel corrosion of concrete after being exposed to the marine environment for 7 years. Water-to-binder ratios (W/C) were carried at 0.40, 0.45 and 0.50. Palm oil fuel ash 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 chloride penetration, and the steel corrosion after being exposed to tidal zone for 7 years.

The results indicated that chloride penetration 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. This study found that concretes with the palm oil fuel ash replacement of 15 to 35% by weight of binder with a W/B ratio of 0.40 can be efficiently employed to enhance the durability of concrete structures in seawater. Because of they provide the highest compressive strength and lowest chloride penetration and steel corrosion in concrete.

Keywords: Chloride penetration, Palm oil fuel ash, Steel corrosion, Compressive strength, Marine environment

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 148/2561

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการประยุกต์ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวะมวล ในงานคอนกรีตเพื่อใช้ปรับปรุงสมบัติด้านความคงทน 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	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน	4
2.2 วัสดุปอซโซลาน	6
2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลาน	7
2.4 คลอไรด์ในคอนกรีต	8
2.5 วิธีการวัดปริมาณคลอไรด์โดยการไทเทรต	10
2.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์	10
2.7 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	11
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	19
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	24
3.4 การทดสอบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่สภาวะแวดล้อมทะเล	24
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	29
4.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน	29
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	31
4.3 สมบัติของน้ำทะเล	32
4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล	33
4.5 กำลังอัดของคอนกรีต	34
4.6 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี	39
4.7 ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี	51
4.8 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผล	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	65
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	83
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	85

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 6
3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 22
3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา 23
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน 31
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา 32
4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งถึงอายุ 7 ปี 37
4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี 40
4.5 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสภาวะ แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี 49

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 21
3.2 ตำแหน่งที่ฝังเหล็กในคอนกรีตที่ทดสอบที่อายุ 7 ปี 23
3.3 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา 24
3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ 25
3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ 26
3.6 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุหลังแช่น้ำทะเล เป็นเวลา 7 ปี 27
3.7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี 28
4.1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด และหลังบดละเอียด 29
4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 30
4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน 30
4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี 33
4.5 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี 38
4.6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 7 ปี 38
4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี 42
4.8 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน หลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี 44
4.9 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเล เป็นระยะเวลา 7 ปี 46
4.10 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 7 ปี 50
4.11 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี 50
4.12 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี 53
4.13 ผลของอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม 55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี 58

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาเพื่อนำเอาเถ้าชีวมวลที่ผ่านการบดละเอียด มาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตมีมากขึ้น ทั้งการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การเก็บข้อมูลในภาคสนามเป็นการศึกษาสมบัติความคงทนของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากที่สุด โดยในช่วงระยะเวลา 15 ปี ที่ผ่านมา (Chalee, and Jaturapitakkul, 2009 ; Chalee, et al., 2010 ; Cheewaket, et al., 2010 ; Cheewaket, et al., 2012) ได้มีการศึกษาการนำเอาวัสดุปอซโซลานมาใช้ในการปรับปรุงความคงทนของคอนกรีต ที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศ โดยเริ่มที่การใช้เถ้าถ่านหิน เนื่องจากเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมและมีแนวโน้มในการนำไปใช้งานมากที่สุด โดยผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางที่ดีสอดคล้องกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการคือ การผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีต สามารถลดการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน ตลอดจนลดความเสียหายเนื่องจากการทำลายของซัลเฟตและการทำลายทางกายภาพ เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ (Chalee, et al., 2010) ระยะต่อมาเริ่มมีการขยายขอบเขตการศึกษาไปที่วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น โดยเน้นที่เถ้าชีวมวล เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศ และมีปริมาณค่อนข้างมาก โดยมีผลการศึกษาความคงทนในน้ำทะเลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ถึงระยะเวลานานถึง 9 ปี (Chalee, et al., 2013) ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตร้อยละ 15-25 สามารถลดการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน และมีการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล โดยได้มีการเก็บข้อมูลในระยะต้นไปบางส่วนแล้ว

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันนี้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม แยกเป็นทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยก่อนการนำกากปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล จะนำทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปผ่านกระบวนการตีให้เป็นเส้นใย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จากนั้นจึงนำเส้นใยและกะลาปาล์มไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มหรือประมาณ 2,147,000 ตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) และหลังจากการเผาพบว่า เถ้าปาล์ม

น้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น นอกจากนี้นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น เป็นไบโอเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าอาจจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10 ล้านไร่ จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในไบโอดีเซลได้ ซึ่งหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดเถ้าปาล์มน้ำมันจำนวนมากขึ้นกว่าปัจจุบันถึง 6 เท่าต่อปี และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งให้มากยิ่งขึ้น

ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่า การศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง ได้มีการเก็บข้อมูลระยะต้นไปบางส่วน (3 ปี) แล้ว ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีแนวโน้มที่จะป้องการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ โดยเริ่มเห็นผลดีด้านการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความคงทนที่ชัดเจน ตลอดจนได้ทราบถึงกลไกการกัดกร่อนที่ชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้มุ่งประเด็นที่การเก็บข้อมูลได้ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ได้แก่ การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และคลอไรด์อิสระ การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกำลังอัด ตลอดจนศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี เพื่อเป็นฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจากเถ้าชีวมวลให้มากขึ้น และสามารถยืนยันการนำไปใช้งานจริงให้ชัดเจน และน่าเชื่อถือมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 7 ปี

1.2.2) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 7 ปี

1.2.3) เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลที่มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด การเกิดสนิมเหล็กและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 7 ปี ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำวิจัยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดจนมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม^3 และฝังเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก โดยควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์คอนเดนเซต (Supper P.) ช่วยในการเพิ่มความสามารถเทได้ ตลอดจนหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 7 ปี เพื่อทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระ หาการเกิดสนิมเหล็ก ตลอดจนเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบฐานข้อมูลที่ใช้ประกอบในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยการประยุกต์ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นวัสดุที่มีในประเทศให้เกิดประโยชน์ และมีประสิทธิภาพสูง ภายใต้ความคุ้มทุนตามหลักวิศวกรรม

1.4.2 เป็นการนำวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อเสร็จสิ้นจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม ซึ่งกากปาล์มจะประกอบไปด้วยทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม และเปลือกปาล์ม แล้วนำเส้นใยที่ได้จากการตีทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปเผารวมกับกะลาปาล์มเพื่อเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากเถ้าปาล์มน้ำมันจะเกิดขึ้นเฉพาะกับประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันเป็นอุตสาหกรรม ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณการผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจาก มาเลเซียและอินโดนีเซีย (สำนักงานเศรษฐกิจและการเกษตร, 2550) เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนชื้น ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเถ้าปาล์มน้ำมันจึงเป็นหน้าที่ของประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั้งสิ้น ซึ่งไม่สามารถหาข้อมูลและงานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าปาล์มน้ำมันจากประเทศแถบทวีปยุโรปได้เลย เพราะไม่ใช่ปัญหาของประเทศเหล่านั้น

ปีพ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปาล์มประมาณ 1.45 ล้านไร่ โดยประเทศไทยมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4.08 ล้านตันต่อปี ทำให้เกิดกากของผลปาล์มน้ำมันประมาณ 2.14 ล้านตันต่อปี หลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ในปีพ.ศ. 2558-2559 ซึ่งผ่านไปเป็นเวลา 15 ปี พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นกว่า 4.6 ล้านไร่ มีผลผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเป็น 11.02 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจและการเกษตร, 2558) ส่งผลให้เป็นผู้ผลิตรายใหญ่ลำดับ 3 ของโลกและมีเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นประมาณ 300,000 ตันต่อปี

จากข้อมูลสถิติจะเห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นมีการใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการผลิต จึงส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากลักษณะของตัวเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีลักษณะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและก่อเกิดปัญหาด้านการกำจัดทิ้ง ดังนั้นเพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้จึงนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต และทำการตรวจสอบคุณสมบัติในทุกๆด้าน

ปีค.ศ.1990 ได้เริ่มมีการทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับงานคอนกรีตที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม โดย Tay (1990) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำจากการศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำ

คอนกรีต และมากกว่าร้อยละ 10 ของคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมมีการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม แต่คอนกรีตที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal (1996) นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมที่มีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดช่วงอายุก่อน 28 วัน น้อยกว่าคอนกรีตที่ควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดจะพัฒนาดีขึ้นและจะพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง และคณะ (2547) ทำการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยการนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้รับการบดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0,10,20,30 และ 40 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้รับการบดละเอียดให้กำลังอัดที่สูงกว่าและมีค่าสูงสุดที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 เห็นได้ว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลต่อการรับแรงอัดของคอนกรีตเนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้รับการบดละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว ทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่นจึงมีกำลังที่สูง

สุรพันธ์ สุคันปรีย์ และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ SiO_2 มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน และมีศักยภาพเพียงพอสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ หากมีความละเอียดสูง และกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 ยังมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 28 วันขึ้นไป นอกจากนี้ วันชัย และคณะ (2546) ยังได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88 – 91 เมกาปาสกาลเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตรแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 – 30 จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซ

โซลานที่ดีอีกชนิดหนึ่งและมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต

เถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 มีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 70 ปริมาณ SO_3 ต่ำกว่าร้อยละ 4 และเนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่มากจึงมีปริมาณ LOI อยู่ร้อยละ 10 ถือว่าค่อนข้างสูงจึงทำให้มีส่วนที่เผาไม่หมดอยู่จำนวนมาก ซึ่งจะเห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับวัสดุปอซโซลานประเภท N สังเกตได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 (ธิรสิทธิ์ แซ่ตั้ง, 2547)

คุณสมบัติ	ประเภท F	ประเภท C	ประเภท N
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ น้อยที่สุดร้อยละ	70	50	70
SO_3 มากที่สุดร้อยละ	5	5	4
ปริมาณความชื้น มากที่สุดร้อยละ	3	3	3
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ มากที่สุดร้อยละ	6	6	10
ดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน น้อยที่สุดร้อยละ	75	75	75

2.2 วัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) 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 ความคงทน

ต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต 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

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCa.y\,SiO_2.z\,H_2O \qquad 2.1$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_2 + H_2O \longrightarrow xCa.y\,AlO_3.z\,H_2O \qquad 2.2$$

ค่า x, y และ z จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสมการที่ 2.1 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของซิลิกาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสมการที่ 2.2 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของอลูมินาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้กำลังกับคอนกรีตหรือมอร์ต้าเพราะมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

2.4 คลอไรด์ในคอนกรีต

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

1. การซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)

2. การแพร่ของอิออนคลอไรด์จากภายนอกที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต

3. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้นถึงแม้คลอไรด์สามรถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามรถเกิดขึ้นได้ แต่ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ เมื่อเกิดสนิมขึ้นจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริม เนื่องจากการขยายตัวของสนิมเป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดรอยแตกและหลุดแยกออก กระบวนการผุกร่อนจะเกิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีช่องทางให้เกลือ ออกซิเจน และน้ำเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น แล้วเหล็กเสริมในคอนกรีตก็จะเริ่มผุกร่อนต่อไป ค่า pH ของคอนกรีตมีผลต่อความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ก่อให้เกิดการผุกร่อน

การเคลื่อนตัวของอิออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมเช่นอุณหภูมิความชื้นและการไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ การใช้งานของโครงสร้าง และชนิดของวัสดุประสาน เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต ประกอบไปด้วยคลอไรด์ 2 ประเภทได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 การดักจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Friedel's salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (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 โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จะผ่านโพรงคาปิลลารี่ (Capillary pore) ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นลักษณะของการแพร่จะเกิดกับส่วนของโครงสร้างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลและเป็นส่วนของคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นหลัก

2) การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาปิลลารี่ (Capillary suction)

การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาปิลลารี่เกิดขึ้นโดยน้ำเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในส่วนที่แห้งของโพรงคาปิลลารี่ (Capillary pore) ในคอนกรีต ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณใกล้ผิวคอนกรีต และเกิดขึ้นในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ทำให้น้ำเกลือคลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาปิลลารี่ในคอนกรีตได้เร็ว และอิ่มตัวภายในเวลาอันรวดเร็วกลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาปิลลารี่

3) การซึมผ่าน (Permeability)

การซึมผ่านของคลอไรด์เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำ (Hydrostatic pressure) ซึ่งส่งผลให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนใหญ่เกิดในบริเวณที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลภายใต้แรงดันน้ำ

4) การดึงดูดอิออน (Ion adsorption)

โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดอิออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ประจุบวกบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ อิออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้น

2.5 วิธีการวัดปริมาณคลอไรด์โดยการไทเทรต

การไทเทรต (Titration test) เป็นการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่างๆ โดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียด และ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในการแทรกซึมของคลอไรด์มี 2 ลักษณะคือ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด (Total chloride content) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 หลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometer titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ได้ดังสมการที่ 2.1 (ปุณยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุธโธทา และวิเชียร ชาลี, 2557)

2.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient ,D_c) ในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปุณยวีร์ นิลรัตน์วัฒนา พุธโธทา และวิเชียร ชาลี, 2557) ซึ่งส่งผลชัดเจนต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 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 แต่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาปิลลารี (Capillary suction) ของคอนกรีตเป็นต้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's 2nd law) เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าว จะไม่นิยม เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) จะ

เรียกเป็น สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏของคลอไรด์ (Apparent diffusion coefficient)

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad 2.3$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ 2.3 เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ 2.3 แสดงดังสมการที่ 2.4

$$C_{x,t} = C_o\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right)\right] \qquad 2.4$$

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

x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ (วินาที)

C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ที่ระยะเวลาแช่ t

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่ t (มม^2/วินาที)

erf = ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

ฟังก์ชันค่าคลาดเคลื่อน

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

2.7 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง โดยในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่จะมีการทำลายเกิดขึ้นค่อนข้างสูงในคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็ก ทั้งนี้เพราะการทำลายจะเกิดจากการกัดกร่อนเหล็กเสริม ที่มีเกลือคลอไรด์เป็นตัวเร่งให้เกิดการทำลายที่เร็วขึ้น

2.7.1 กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีต

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจาก

สภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราย กรวดโดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต โดยบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระแทกและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของอิออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราย ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีตโดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีที่ช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ซึ่งการศึกษาถึงกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดจนการศึกษาถึงแนวทางในการป้องกันและต้านทานการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญและพัฒนาข้อมูลให้ชัดเจนมากขึ้น ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่นประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของ

คลอไรด์จะมีสูงแต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง

2.7.2 หลักการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล

การเลือกคอนกรีตเพื่อใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดการทำลายโครงสร้างดังกล่าว จากนั้นจึงพิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลาย โดยทั่วไปแล้วการทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลเกิดจาก 2 สาเหตุใหญ่ๆ ได้แก่ สาเหตุทายกายภาพ และสาเหตุทางเคมี ดังนั้นการป้องกันการทำลายโครงสร้างดังกล่าว สามารถทำได้โดยการเลือกคอนกรีตให้มีความทึบน้ำสูง และทนทานต่อสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ หรือการใช้วิธีการเคลือบที่ผิวของคอนกรีต

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. โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่าคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 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 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือ 5 สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน โดยพิจารณาลักษณะของคอนกรีตที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเลในด้านต่างๆดังนี้

1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดของปูนซีเมนต์

การเลือกใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงและเนื้อแน่นขึ้น สามารถที่จะป้องกันการแทรกซึมของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้ดีขึ้น ตลอดจนยังส่งผลดีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการทำคอนกรีตให้มี

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำก็จะส่งผลให้คอนกรีตเทเข้าแบบได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการเทให้กับคอนกรีตด้วย โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 (ตามข้อแนะนำของ ACI 201.2) หรือในบางมาตรฐานอาจแนะนำให้ต่ำกว่า 0.40 (ตามข้อแนะนำของ SI 456-2000)

2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

การออกแบบคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล นอกจากจะส่งผลต่ออายุการใช้งานที่ยาวนานของโครงสร้างแล้ว ยังมีผลต่อการกำหนดระยะหุ้มเหล็กที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถป้องกันสารเคมีที่เป็นอันตรายเข้าไปทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วย ซึ่งโดยหลักแล้วการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีค่ามากก็จะส่งผลดีต่อการป้องกันการทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีต แต่ถ้าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนามากเกินไปจะเกิดรอยร้าวได้ง่ายเมื่อรับแรงดัด 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 สามารถลดระยะหุ้มเหล็กจากคอนกรีตธรรมดาลงได้อย่างชัดเจน โดยคอนกรีตธรรมดาที่มีกำลังอัด 300 กก/ซม^2 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) การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์

เมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตประกอบกับมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม ส่งผลให้หน้าตัดของเหล็กลดลง และการขยายตัวของสนิมทำให้คอนกรีตแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริม ตลอดจนส่งผลให้กำลังอัดของโครงสร้างลดลง นอกจากนี้รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตสามารถที่จะป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน

3) การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

การเกิดสนิมของเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดการทำลายที่รุนแรงและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างน้อยลง การเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีผลมาจากปริมาณน้ำและออกซิเจนที่แทรกซึมเข้าไปสัมผัสกับเหล็กเสริม ตลอดจนปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเองก็เร่งให้เกิดสนิมในเหล็กอย่างรุนแรงและรวดเร็วขึ้น โดยในงานวิจัยที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการฝังเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีตต่างๆ กันพบว่าในบางตัวอย่างเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมเหล็กเล็กน้อยที่อายุแช่น้ำทะเล 4 ปี แต่เมื่อเวลาผ่านไปแค่ 1 ปี เหล็กดังกล่าวเกิดสนิมมากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเริ่มต้นเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเพียงเล็กน้อยก็จะนำไปสู่การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

โดยสรุปแล้ว คอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจะมีกลไกการทำลายที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับบริเวณที่โครงสร้างสัมผัส เช่น บริเวณระดับน้ำทะเลขึ้น-ลง หรือแถบชายฝั่ง โดยมากจะเกิดการทำลายเนื่องจากสาเหตุทางกายภาพที่ส่งผลเกื้อหนุนให้เกิดการทำลายเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งบริเวณนี้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมก็เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลต่อการทำลายโครงสร้าง หรือบริเวณที่อยู่ใต้น้ำทะเลที่ไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนการทำลายก็จะเกิดจากซัลเฟตเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจถึงกลไกของการทำลายของโครงสร้างในแต่ละบริเวณที่โครงสร้างสัมผัสอยู่ เพื่อจะได้กำหนดวิธีการที่เหมาะสมในการป้องกันโดยคำนึงถึงความประหยัดและปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม การใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินสามารถช่วยลดการทำลายดังกล่าวได้ค่อนข้างชัดเจนและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากถึงแม้จะป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดี แต่จะส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ดังนั้นควรเลือกใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติที่ดี

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay (1990) ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Hussin M.W. and Awal A.S.M.A. (1996) ได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ แม้ว่ากำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วันมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้

การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันในประเทศไทยเริ่มจาก วีรชาติ และคณะ (2546) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงคือมีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ของมอร์ต้าร์ควบคุม ตามลำดับ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคประมาณ 7.3 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยที่การแทนที่ร้อยละ 30 ยังสามารถให้กำลังอัดได้ถึงร้อยละ 99 ที่ อายุ 90 วัน

Tangchirapat, et al. 2009 ได้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในแต่ละส่วนผสมคอนกรีต พบว่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าระหว่าง 59.5-64.3 เมกกะปาสคาลและที่ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดสูงสุดถึง 70 เมกกะปาสคาลการหดตัวแบบแห้งและความสามารถซึมผ่านน้ำมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกส่วนผสม และเมื่อตัวอย่างคอนกรีตถูกแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ10 เป็นเวลา 180 วัน สามารถต้านทานการขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีความเป็นปอซโซลานและสามารถนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้

Tangchirapat, et al. 2012 ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมาปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมมวลหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยส่วนผสมคอนกรีตถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าและทรายแม่น้ำขณะที่กลุ่มที่ 2 เป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งสองกลุ่ม จากผลการทดสอบพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถปรับปรุงกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำได้ดีขึ้น โดยเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเพียงร้อยละ 7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 25 ซึ่งสรุปได้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงสามารถลดการขยายตัวในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าได้ นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจน

ในการเก็บข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเล กีรติกรและคณะ (2556) พบว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมาก (ร้อยละ 50) ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ส่วน PONHSAMPATEA LY และคณะ (2558) ได้ศึกษาถึงผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (PF) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 3 ปี ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 นอกจากนั้นพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น จากฐานข้อมูลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่เก็บข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเลในระยะต้น (ไม่เกิน 3 ปี) พบว่า ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่สอดคล้องกันและส่งผลดีต่อการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความคงทนที่ชัดเจน ตลอดจนได้ทราบถึงกลไกการกัดกร่อนที่ชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นการศึกษานี้มุ่งประเด็นไปที่ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันและอัตราส่วน

น้ำต่อวัสดุประสานต่อ การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต กำลังอัด และโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) หลังแช่ในสภาพแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี เพื่อเป็นฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจากเถ้าชีวมวลให้มากขึ้น และสามารถยืนยันการนำไปใช้งานจริงให้ชัดเจนและน่าเชื่อถือมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150
2) เถ้าปาล์มน้ำมันโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่บดละเอียด โดยค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33
3) หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.
4) ทรายแม่น้ำหยาบ ร่อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62
5) น้ำประปา
6) สารเคมีผสมเพิ่ม ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทสารลดน้ำพิเศษชนิดซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์คอนเดนเซต
7) เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12มม.
8) สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มี ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$= 0.05 N) กรดไนตริก (HNO_3) และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2= 30% solution)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) อุปกรณ์บดคอนกรีต (รูปที่ 3.1 (ก))
2) เครื่องชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.1 (ข))
3) แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 200x200x200 มม^3 (รูปที่ 3.1 (ค))
4) แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต (รูปที่ 3.1 (ง))
5) เครื่องตัดคอนกรีต (รูปที่ 3.1 (จ))
6) เครื่องดูดสูญญากาศ (รูปที่ 3.1 (ฉ))
7) เครื่องเจาะคอนกรีต (รูปที่ 3.1 (ช))
8) เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (Auto Tritation Equipment) (รูปที่ 3.1 (ซ))
9) ตะแกรงร่อนมาตรฐาน

10) กราฟและปากกาเขียนพลาสติก

11) บีกเกอร์ (Beaker) และ ขวดชมพู่ ขนาดต่างๆ

12) บิวเรตต์

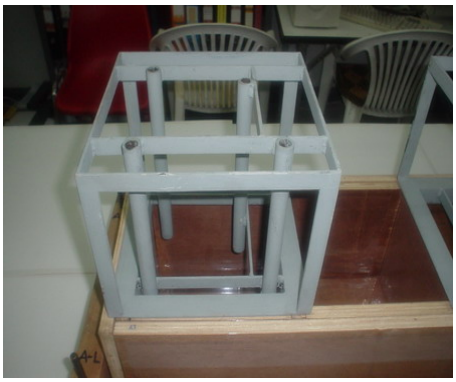
13) กรวยกรอง

14) เครื่องทดสอบกาลังอัดคอนกรีต (รูปที่ 3.1 (ฌ))

(ก) ครกหินและสากหิน

(ข) เครื่องชั่ง

(ค) แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 200x200x200 มม^3



(ง) แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต

(จ) เครื่องตัดคอนกรีต

(ฉ) เครื่องดูดสูญญากาศ

(ช) เครื่องเจาะคอนกรีต

(ซ) เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

(ฌ) เครื่องทดสอบกาลังอัดคอนกรีต

รูปที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ1.5 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม^3)					
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด	ทราย	หิน	น้ำ	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
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

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
I	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 เป็นวัสดุประสาน
P	เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด
40,45,50	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

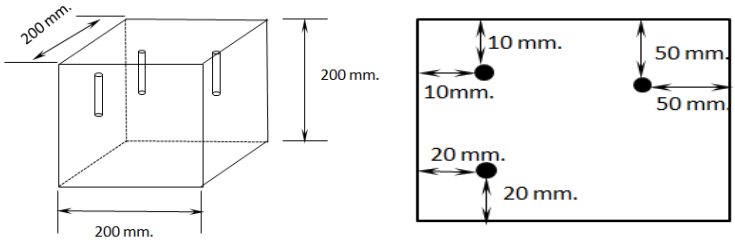
รูปแบบสัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ I /A/P/B โดย A เป็นส่วนที่ใช้บอกถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ B เป็นส่วนที่แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ยกตัวอย่างเช่น

สัญลักษณ์ I40 หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

สัญลักษณ์ I40P15 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

3.3.2 ตัวอย่างคอนกรีต (ที่เตรียมเมื่อ 7 ปีที่แล้ว)

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม^3 ในแต่ละส่วนผสมฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 10, 20 และ 50 มม.สำหรับการทดสอบที่อายุ 7 ปี (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่ฝังเหล็กในคอนกรีตที่ทดสอบที่อายุ 7 ปี

หลังจากหล่อคอนกรีตและบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนอายุคอนกรีตครบ 28 วัน จึงนำไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล ด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง (รูปที่ 3.3) และทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุการแช่น้ำทะเลครบ 7 ปี เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ, การเกิดสนิมเหล็ก, กำลังอัด และ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตหลังจากแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

รูปที่ 3.3 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา

3.4 การทดสอบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่สภาวะแวดล้อมทะเล

3.4.1 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 7 ปี

(1) ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เพื่อทดสอบหาการแทรกซึมคลอไรด์โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 200 มม. ดังรูปที่ 3.4 (ก)

(2) ตัดตัวอย่างทรงกระบอกหนาชั้นละ 10 มม. ดังรูปที่ 3.4 (ก) และบดคอนกรีตแต่ละชั้นให้ละเอียดโดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20. ดังรูปที่ 3.4 (ข)ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวหน้าคอนกรีต

(ก) การเจาะและตัดตัวอย่างคอนกรีต เพื่อใช้ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

(ข) การบดและเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

3.4.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152

(1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

(2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

(3) เติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

(4) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว และเติมน้ำกลั่นประมาณ 75 มิลลิลิตร

(5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

(6) เติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความแข้มข้น 0.05 โมล จำนวน 2 มิลลิลิตร

(7) นำตัวอย่างที่กรองและเติมสารแล้วใส่แก้วไทเทรตปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 แก้ว เอาไปไทเทรตด้วย เครื่องไทเทรตที่ใช้สารละลายซิลเวอร์

ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่มีสารละลาย 0.05โมล จะได้ร้อยละของคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ที่ระดับความลึกต่างๆ ดังรูปที่ 3.5

3.4.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตาม ASTM C 1218

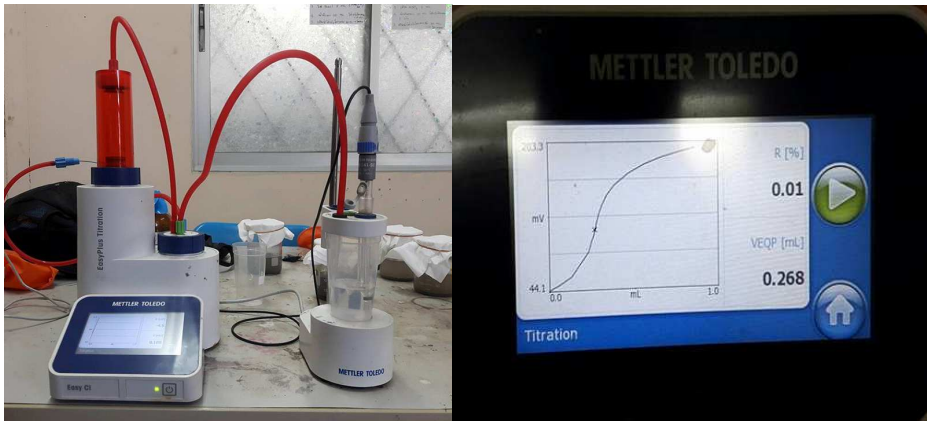
(1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

(2) เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

(3) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

(4) เติม กรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร รวมกับ H_2O_2 (สารละลาย 30%) ปริมาณ 3 มิลลิลิตร

(5) นำตัวอย่างที่กรองและเติมสารแล้วใส่แก้วไทเทรตปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 แก้ว เอาไปไทเทรตด้วยเครื่องไทเทรตที่ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่มีสารละลาย 0.05 ได้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

3.4.3 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก

การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กได้ดำเนินการดังนี้

- นำคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม^3. ที่มีการฝังเหล็กที่มุม มากดดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ 75 มม. โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดกดให้ก้อนคอนกรีตแตกออก

-นำเหล็กออกมาทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กด้วยการทาบพื้นที่ผิวเหล็กที่เป็นสนิม ลงบนกระดาษกราฟใสซึ่งทำเป็นช่องขนาด 2x2 มม. แล้วนับจำนวนช่องเพื่อหาพื้นที่การเกิดสนิม

-วัดร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กโดยการชั่งน้ำหนักเหล็กเริ่มต้นและน้ำหนักเหล็กที่เหลือหลังจากขัดสนิมออก

- ถ่ายรูปการเกิดสนิมในแต่ละระยะหุ้มของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

3.4.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี

นำคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. ที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งที่อายุครบ 7 ปี มาแคบหัวตัวอย่างทั้ง 2 ด้าน ให้เรียบด้วยเครื่องเจียผิวคอนกรีต และทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่อง Compression Machine โดยทำการทดสอบกำลังอัดเรียบร้อยแล้ว (รูปที่ 3.7)

รูปที่ 3.7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อคอนกรีต เช่น ด้านความคงทนของคอนกรีต ความต้องการน้ำ ความสามารถในการเท ความสามารถในการรับกำลังอัด เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

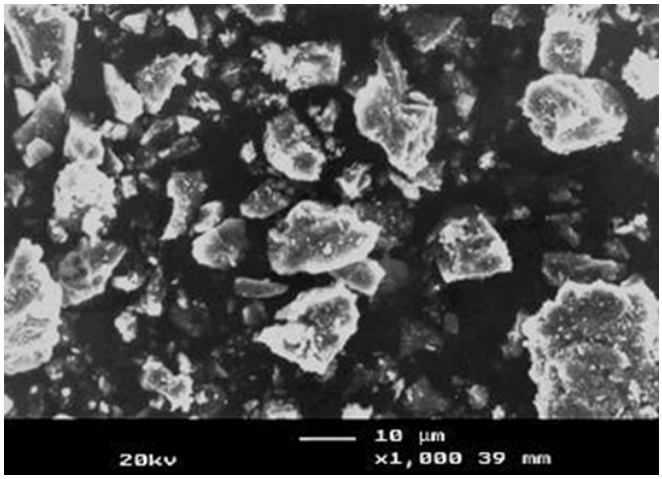
4.1.2 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นสีเทา ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดจากบริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จะมีสีดำสนิทเป็นผงละเอียดมีน้ำหนักเบาและความพรุนสูง (สุรินทร์, 2550) และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ได้รับการบดละเอียดจะมีลักษณะค่อนข้างหยาบมีบางส่วนที่ยังไม่ได้ถูกเผาปะปนโดยจะมีสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่วนที่เป็นสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอนที่เกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

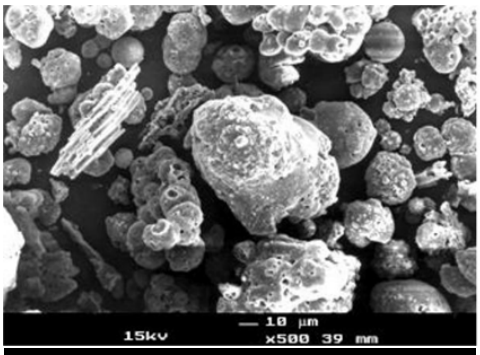
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดและหลังบดละเอียด

4.1.3 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

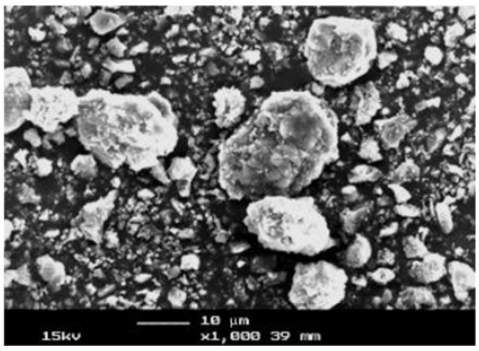
เมื่อพิจารณารูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันจากภาพถ่ายขยายกำลังสูงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีผิวขรุขระ ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้รับการบดละเอียด ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ได้รับการบดละเอียดมีลักษณะรูปร่างกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน พื้นที่ผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีความพรุนมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้รับการบดละเอียด



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข. ก่อนบดละเอียด



ก. หลังบดละเอียด

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

จากการศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 3 ถึง 3.15 (สุรินทร์, 2550) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 ซึ่งมีค่า

ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการศึกษาที่ผ่านมา สุรินทร์ มายูร (2550) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งที่ผลิตที่ต่างกันจะมีค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกัน

4.1.5 ความละเอียด

เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่นำมาใช้ในศึกษาวิจัยมีน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 1.5 แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยมีอนุภาคเท่ากับ 10.1 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้คือ ไม่เกินร้อยละ 34

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

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

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษามีค่าอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 150/C 150M โดยมีออกไซด์หลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักมีสูงถึงร้อยละ 64.97 มีออกไซด์รองคือ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 1.06 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักในการเผา (LOI) เท่ากับ 2.89 ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษามี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีประมาณร้อยละ 65.3 มีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3, และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 69.7 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักในการเผา (LOI) ร้อยละ 10 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 จากการศึกษาอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตต่างๆของภาคใต้ตอนบนต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผ่านมาของ สุรินทร์ มายูร (2550) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละแหล่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันเนื่องจากมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและปริมาณเส้นใยกับกะลาปาล์มที่ใช้แตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน ทำให้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (P)
Silicon dioxide	20.80	65.30
Aluminum oxide	5.50	2.50
Iron oxide	3.16	1.90
Calcium oxide	64.97	6.40
Magnesium oxide	1.06	3.00
Sodium oxide	0.08	0.30
Potassium oxide	0.55	5.70
Sulfur trioxide	2.96	0.40
Loss On Ignition	2.89	10.00

4.3 สมบัติของน้ำทะเล

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ซึ่งเป็นบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ พบว่าคุณสมบัติน้ำทะเลบริเวณดังกล่าวมีลักษณะใสไม่มีสี มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อนๆ และมีปริมาณคลอไรด์อยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 19,000 มก./ล. โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานว่าบริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.86 ถึง 8.63 และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,600 มก./ล. โดยพบว่าปริมาณคลอไรด์จะมากกว่าซัลเฟตประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนด ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรงนั่นคือ น้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา มีผลกระทบต่อคอนกรีตขั้นรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.^{2} ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม^2. ที่อายุ 28 วัน

โดยปกติระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ขึ้นลง 2 รอบภายใน 1 วัน คือ มีค่าระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้งและลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวลาน้ำขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่นช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติและลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมากหรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล

หลังจากเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45, และ 0.50 แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจำนวนทั้งหมด 15 ก้อนขึ้นมา พบว่าสีของคอนกรีตมีสีดำออกเขียวเข้ม และที่ผิวหน้าของคอนกรีตเริ่มเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่นและมี หอย เพรียง และตะไคร่น้ำติดอยู่ตามผิวเท่านั้น อย่างไรก็ตามยังไม่พบคราบสนิมและรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

4.5 กำลังอัดของคอนกรีต

4.5.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน

จากตารางที่ 4.3 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 35 มีแนวโน้มกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ (517 กก./ซม^2.) ซึ่งเป็นผลจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ ของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่นจึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลงอาจเกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากปริมาณ $Ca(OH)_2$ จึงเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ได้ ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง ส่วนกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.50 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดทุกอัตราส่วนการแทนที่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยสังเกตจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 15 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา สรภพ ก้านบัวแก้ว (2552) ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงจะมีค่าต่ำในระยะต้นโดยเฉพาะกลุ่มที่ใช้ปริมาณที่มากและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นเป็นต้น อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดทุกอัตราส่วนการแทนที่ ถึงแม้จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ถือได้ว่ามีค่าค่อนข้างสูงและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานน่าจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะยาวมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนั้น พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตทุกกลุ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามหลักของคอนกรีตเทคโนโลยีทั่วไป

4.5.2 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเล

จากผลการทดสอบกำลังอัดดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า คอนกรีตควบคุมในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีกำลังอัดลดลงหลังแช่ในน้ำทะเล ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด กำลังอัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ในน้ำทะเล โดยจะมีเพียงแค่ ส่วนผสม I45P50 และ I50P50 ที่กำลังอัดมีค่าลดลง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดหลังจากแช่น้ำทะเล 7 ปี พบว่าในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเท่ากับ 15, 25 และ 35 นั้นไม่สูญเสียกำลังอัดหลังจากแช่น้ำทะเล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้ทนต่อสภาพแวดล้อมทะเลได้ดีขึ้น ควรแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งถือว่าเหมาะสม เพราะหากแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 50 มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและอาจส่งผลให้การรับแรงเชิงกลของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลลดลงในระยะยาว และเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างได้ การที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเป็นผลจากปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง และทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ได้ C-S-H ซึ่งทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) และจากงานวิจัยที่ผ่านมา (วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและคณะ, 2547; วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและคณะ, 2547; Tangchirapat, et al. 2009) พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตมีผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยลง ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่เหมาะสม จึงสามารถลดการสูญเสียกำลังอัดลงได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ถึงแม้จะแช่ในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตในระดับที่รุนแรงนานถึง 7 ปี

4.5.3 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตอายุ 7 ปี

เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในน้ำทะเล 7 ปี พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 และคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังอัดสูงกว่า

คอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีกำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี เท่ากับ 543 , 503 และ 384 กก./ซม^2 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี เท่ากับ 468 , 440 และ 354 กก./ซม^2 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 50 มีกำลังอัดต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันกัน อีกทั้งกำลังอัดยังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอีกด้วย

เมื่อพิจารณาร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ซึ่งเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 , 25 และ 35 ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีร้อยละกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ซึ่งกำลังอัดที่เพิ่มนั้นมีค่ามากกว่ากำลังอัดที่สูญเสียไปจากการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเล ส่วนคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.50 นั้นมีร้อยละกำลังอัดต่ำกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดที่พัฒนานั้น มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดที่สูญเสียไปจากการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเล ดังนั้นคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 – 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุมและสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมทางทะเลได้ดีขึ้น โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดนั้นมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้ลดช่องว่างในคอนกรีตจึงทำให้กำลังอัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสูงถึงร้อยละ 35-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากเกินไป ทำให้แคลเซียมไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจึงทำให้กำลังลดลง

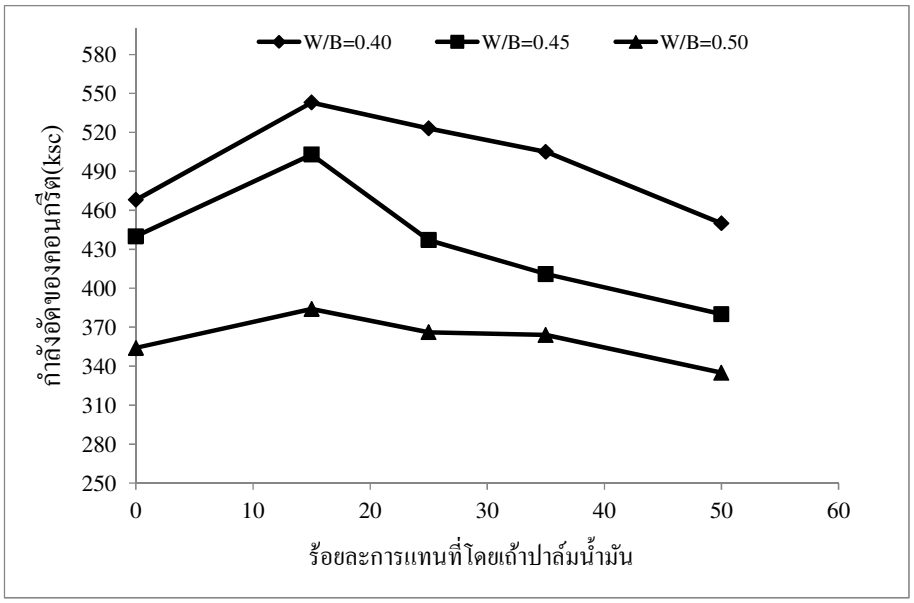
4.5.4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตแช่น้ำทะเลอายุ 7 ปี

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.50 ในร้อยละการแทนที่โดยเถ้าปาล์มน้ำมันที่เท่ากัน และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ

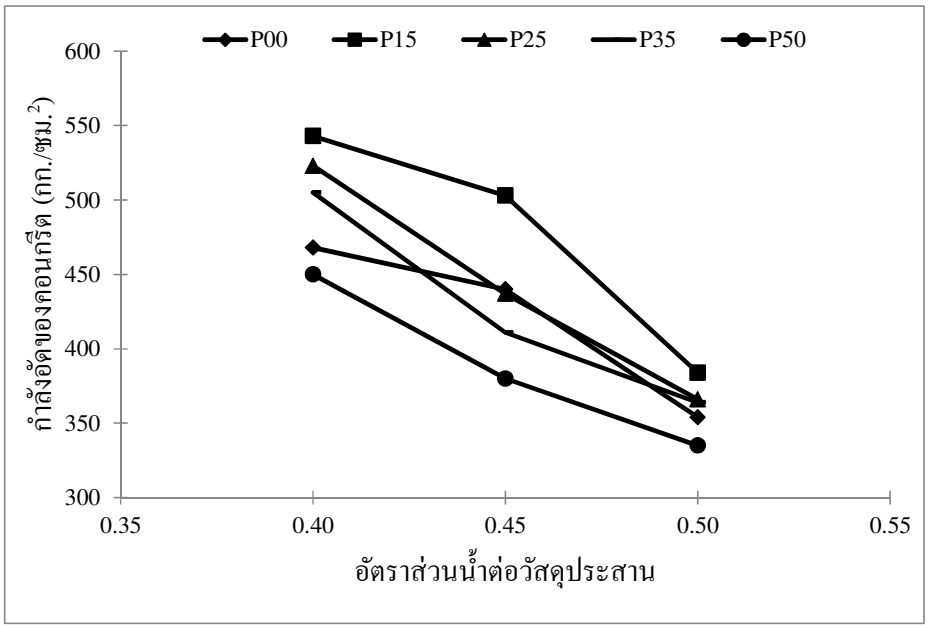
0.40 ยังมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะทนต่อสภาพแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ซึ่งเป็นผลจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีกำลังอัดสูงสามารถต้านทานการทำลายทางกายภาพได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ต่ำกว่า อีกทั้งยังมีความทึบน้ำสูงทำให้ทนต่อการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเลทำให้เกิดการแตกร้าวและสูญเสียกำลังอัดได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งถึงอายุ 7 ปี

ส่วนผสมคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม^2.)				ร้อยละกำลังอัดที่ 7 ปี เทียบกับ 28 วัน
	บ่มน้ำประปา	แช่ในน้ำทะเล			
	28 วัน	18 เดือน	3 ปี	7 ปี	
I40	483	491	495	468	96.9
I40P15	517	556	572	543	105.0
I40P25	480	494	510	523	109.0
I40P35	495	509	506	505	102.0
I40P50	446	461	466	450	100.9
I45	464	475	488	440	94.8
I45P15	484	497	519	503	103.9
I45P25	412	443	452	437	106.1
I45P35	403	419	421	411	102.0
I45P50	384	423	422	380	99.0
I50	394	404	366	354	89.8
I50P15	376	433	441	384	102.1
I50P25	355	383	392	366	103.1
I50P35	360	372	377	364	101.1
I50P50	342	368	366	335	98.0



รูปที่ 4.5 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี



รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

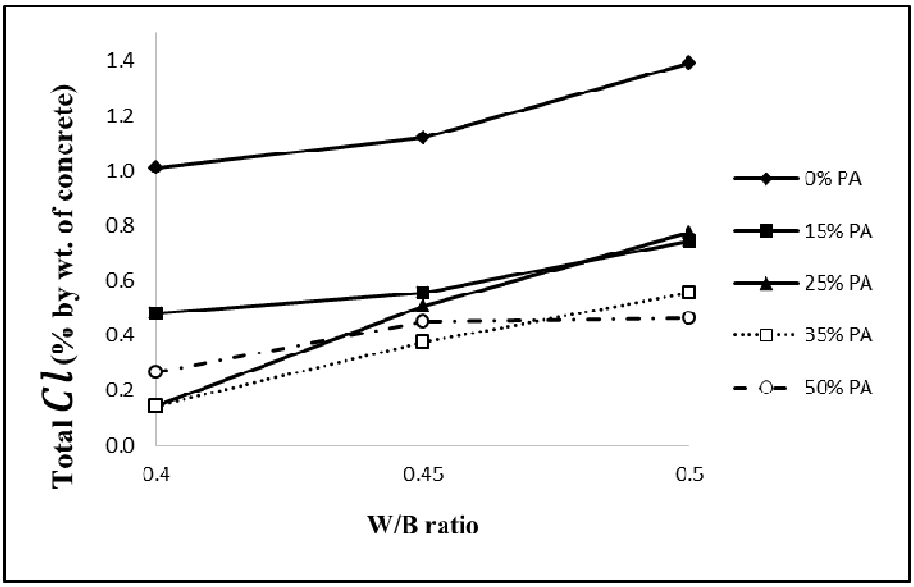
4.6 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

4.6.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต

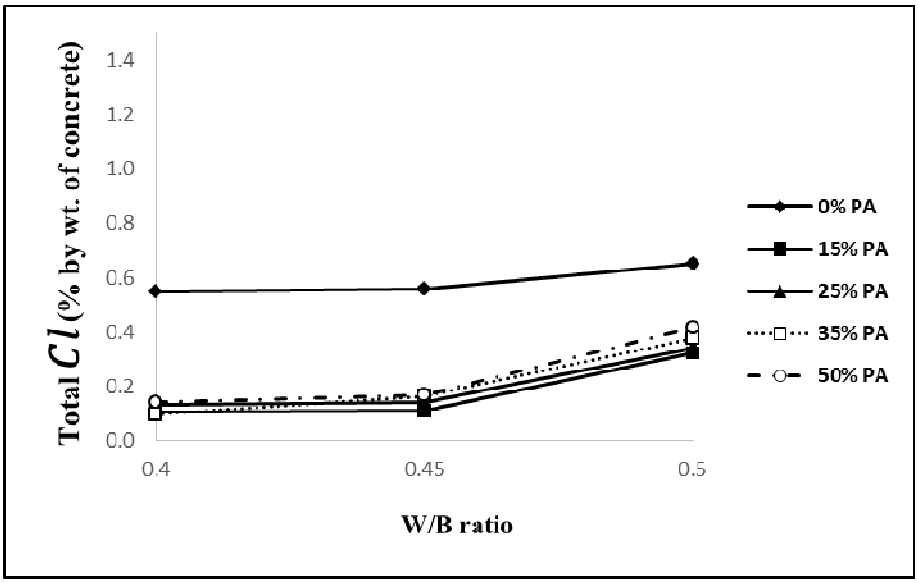
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี ที่ความลึกต่างๆกัน พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างชัดเจน และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทุกระดับความลึก ตัวอย่างเช่น พิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 40, 45 และ 50 โดยไม่มีการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ระดับความลึก 5 มม. มีการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 1.12, 1.54 และ 1.67 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ และที่ระดับความลึก 15 มม. มีคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 1.01, 1.12 และ 1.39 ตามลำดับ โดยพบว่า การแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดยังช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น ที่ระดับความลึก 5 มม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 40, 45 และ 50 และแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 1.04, 1.45 และ 1.54 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 1.12, 1.54 และ 1.67 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น มีผลให้คอนกรีตมีความพรุน กำลังอัดต่ำ ทำให้คลอไรด์ที่มาจากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ค่อนข้างง่าย โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee, et al., 2009) พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ จะมีความทึบน้ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง อีกทั้งในคอนกรีตธรรมดาความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก

ตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี

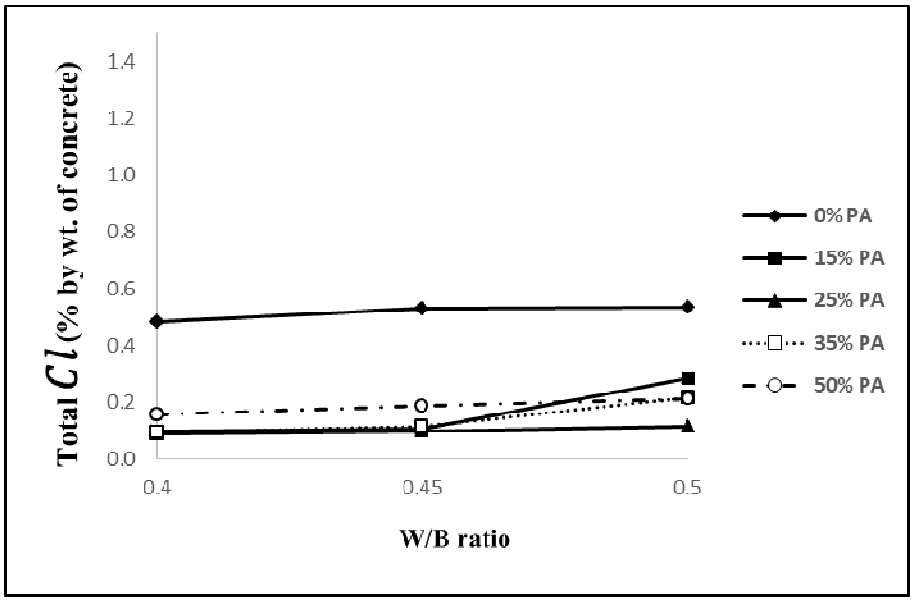
ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักคอนกรีต) แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี									
	5 มม.	15 มม.	25 มม.	35 มม.	45 มม.	55 มม.	65 มม.	75 มม.	85 มม.	95 มม.
I40	1.12	1.01	0.54	0.48	0.28	0.28	0.04	0.02	0.02	0.02
I40P15	1.04	0.479	0.10	0.09	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
I40P25	0.45	0.14	0.13	0.08	0.08	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02
I40P35	0.94	0.14	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.05
I40P50	0.47	0.26	0.14	0.15	0.14	0.14	0.10	0.10	0.08	0.01
I45	1.54	1.12	0.55	0.53	0.36	0.33	0.25	0.22	0.19	0.16
I45P15	1.45	0.55	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
I45P25	1.05	0.50	0.14	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06
I45P35	1.01	0.37	0.16	0.11	0.13	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08
I45P50	1.01	0.44	0.16	0.18	0.15	0.15	0.12	0.11	0.06	0.05
I50	1.67	1.39	0.64	0.53	0.46	0.41	0.25	0.18	0.16	0.10
I50P15	1.54	0.74	0.32	0.28	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.10
I50P25	1.00	0.77	0.34	0.11	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05
I50P35	1.45	0.55	0.37	0.21	0.11	0.12	0.09	0.09	0.08	0.07
I50P50	1.83	0.46	0.41	0.21	0.24	0.25	0.19	0.18	0.17	0.15



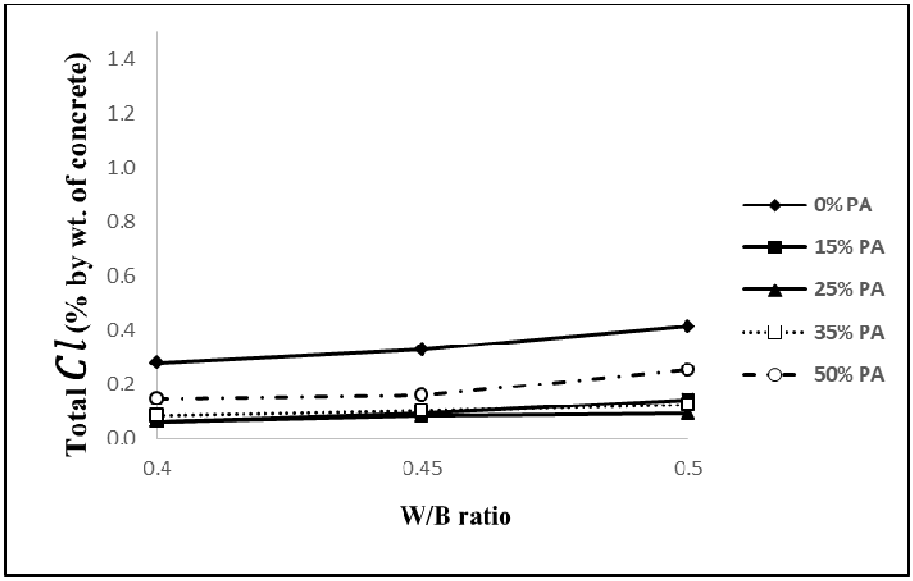
(ก) ความลึก 15 มม.



(ข) ความลึก 25 มม.



(ค) ความลึก 35 มม.



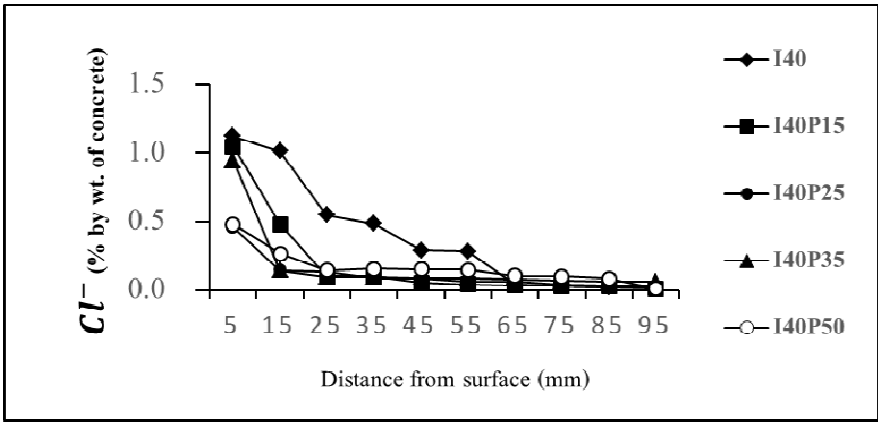
(ง) ความลึก 55 มม.

รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

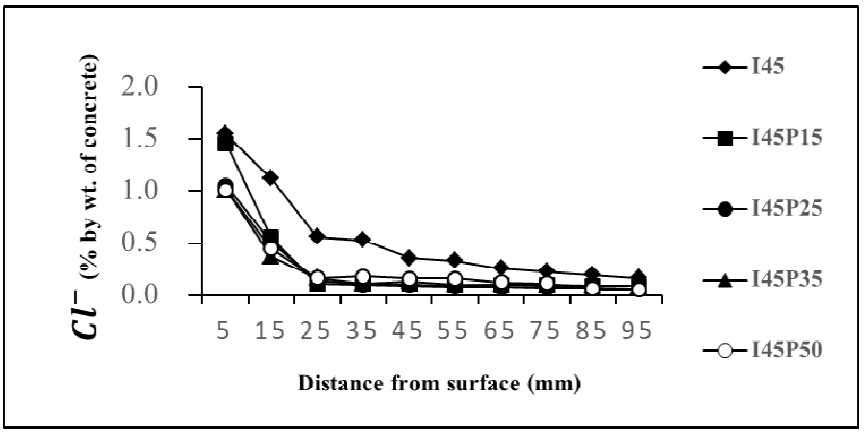
4.6.2 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังตารางที่ 4.4 พบว่า การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆ ลดลง เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังรูปที่ 4.8 และเมื่อพิจารณาที่ความลึกตั้งแต่ 45 มม. ขึ้นไปของทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่า มีการแทรกซึมของคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม เช่น ที่ระดับความลึก 45, 55, 65, 75, 85 และ 95 มม. มีปริมาณคลอไรด์ไรคอนกรีต I40 เท่ากับร้อยละ 0.28, 0.28 , 0.04, 0.02, 0.02, และ 0.02 โดยน้ำหนักของคอนกรีต ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีต I40P15 ที่ระดับความลึกเดียวกันนี้ มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.05, 0.03 ,0.03, 0.02, 0.02, และ 0.01 โดยน้ำหนักของคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงที่ระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

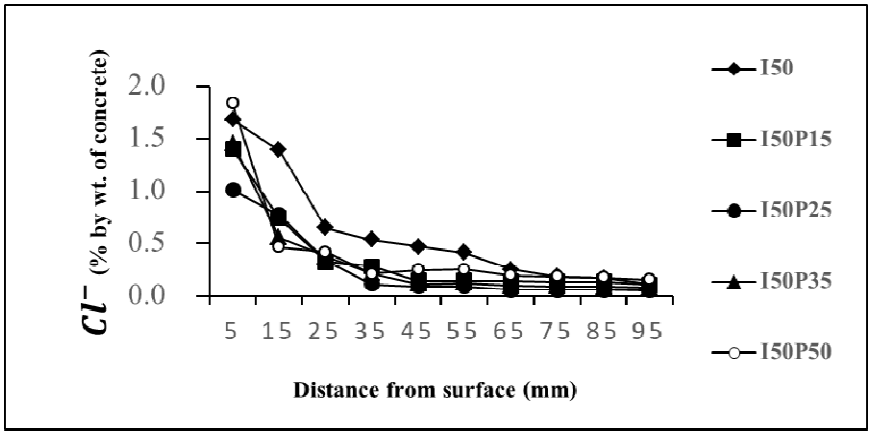
เมื่อพิจารณาในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ความลึก 15, 25, 35, และ 55 ตามรูปที่ 4.9 พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 50 เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. และ 45 มม. เท่ากับ 0.48, 0.09, 0.08, 0.09, 0.15 และ 0.28, 0.05, 0.08, 0.08, 0.14 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านของ กิรติกรและคณะ (2554) ที่พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปริมาณร้อยละ 50 มีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นโดยผลดังกล่าวเกิดจากการที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง และทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์



(ก) W/B = 0.40

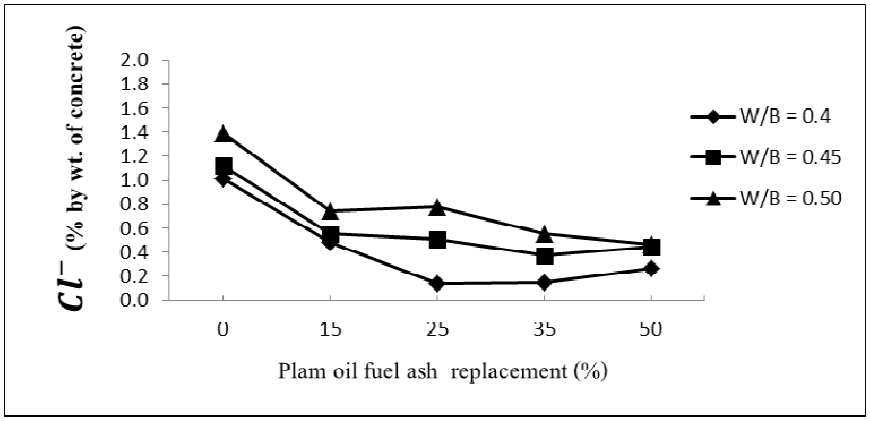


(ข) W/B = 0.45

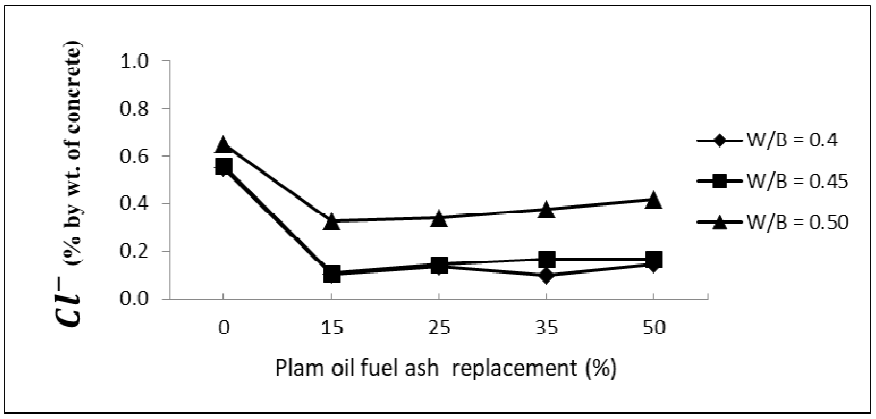


(ค) W/B = 0.50

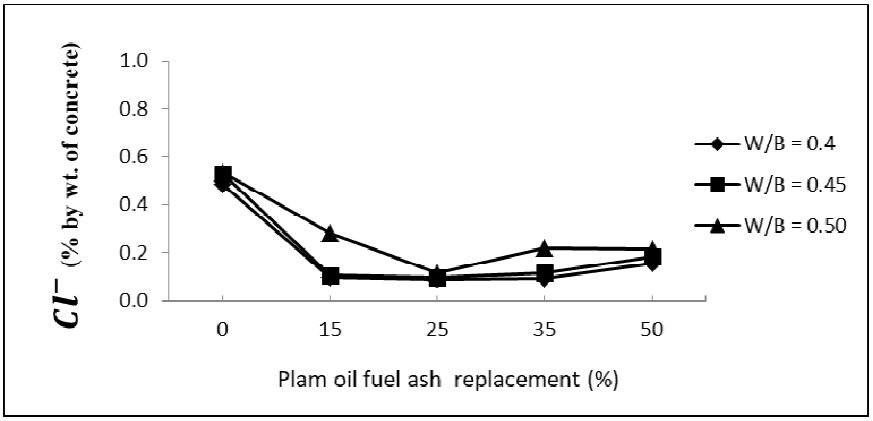
รูปที่ 4.8 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี



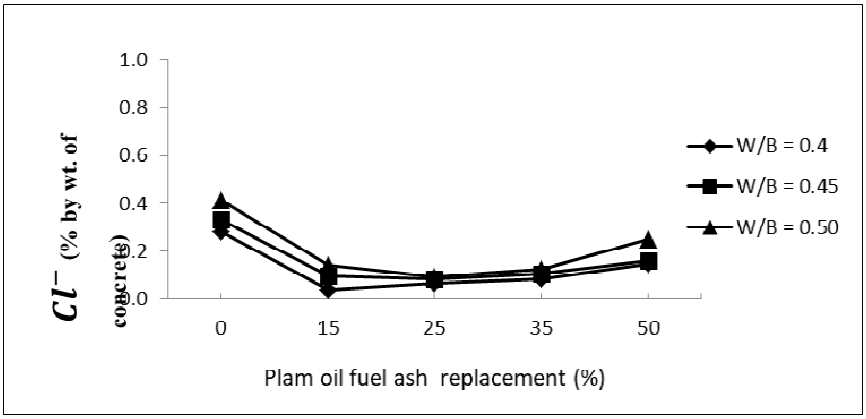
(ก) ความลึก 15 มม.



(ข) ความลึก 25 มม.



(ค) ความลึก 35 มม.



(ง) ความลึก 55 มม.

รูปที่ 4.9 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆในคอนกรีตหลังแช่ น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

4.6.3 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต คำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในรูปแบบของร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b)

จากข้อมูลผลทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะยกตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการกักเก็บของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 ดังนี้

1) หาปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ (ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ) ในแต่ละความลึก เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 ที่ระยะความลึก 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 และ 95 มม.มีปริมาณการกักเก็บคลอไรด์เท่ากับ 0.30, 0.11, 0.00, 0.00, 0.00, 0.01, 0.11, 0.08, 0.05 และ 0.06 โดยน้ำหนักของคอนกรีต ตามลำดับ

2) หาค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บและค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บเท่ากับร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนักของคอนกรีต และค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.53 โดยน้ำหนักของคอนกรีต

3) หาค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดจากสมการที่ 4.1 โดยแทนค่าปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ (ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ) และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลงไป

$$P_b = \frac{[Total(Cl^-) - Free(Cl^-)]x100}{Total(Cl^-)} \qquad \text{สมการที่ 4.1}$$

โดยที่ P_b = ปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

$Total(Cl^-)$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต

$Free(Cl^-)$ = ปริมาณคลอไรด์อิสระร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี พบว่า ร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากปริมาณของ SiO_2 ที่มีอยู่มากในเถ้าปาล์มน้ำมันและความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์(SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณเพิ่มมากขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ได้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตซึ่งเป็นการกักเก็บคลอไรด์ทางกายภาพ (Physical binding) เพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลให้กำลังอัดและการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้ปริมาณแคลเซียมที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตลดลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำน้อย ทำให้ได้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

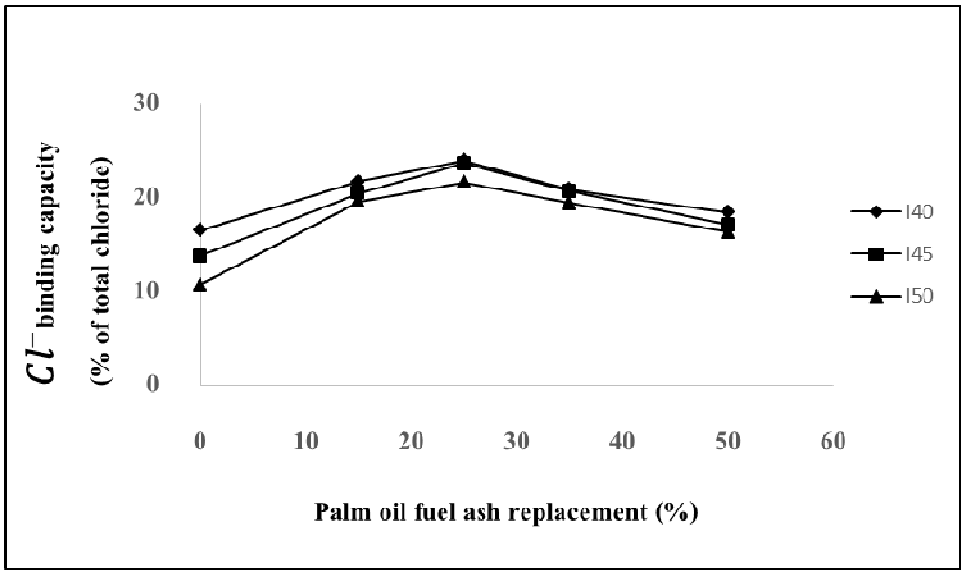
($Ca(OH)_2$) ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้มีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ต่ำทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ลดลง และยังส่งผลให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงด้วย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (เที่ยงและคณะ, 2558) ที่พบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีต และยังพบว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) ส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง และยังพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลให้ร้อยละของคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น โดยทั่วไปแล้วการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีกลไกการกักเก็บใน 2 ลักษณะคือ การกักเก็บด้วยกลไกทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Products) เช่น การทำปฏิกิริยาเคมีกับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเป็นแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) หรือเรียกว่า Friedel's salt และทำปฏิกิริยากับ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์ (C_4AF) เกิดเป็น แคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรด์ ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) ซึ่งในเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ผสมในคอนกรีตมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์ (C_4AF) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีตจึงไม่ส่งผลต่อการดักจับคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้มากนักอย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อิออนอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ (Physical binding) โดยคลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชั่น เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วยถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากับ 0.40 นั้นมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บสูงที่สุด โดยที่ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ก็จะต่ำลงมาตามลำดับ ซึ่งทั้งนี้ก็เป็นผลจากการที่คอนกรีตในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงๆนั้น จะทำให้คอนกรีตมีผิวหน้าที่เกิดโพรงและกำลังอัดต่ำประสิทธิภาพการดักจับคลอไรด์ทางกายภาพนั้นลดลงไปอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งต่างจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลงมา โดยคอนกรีตที่มี

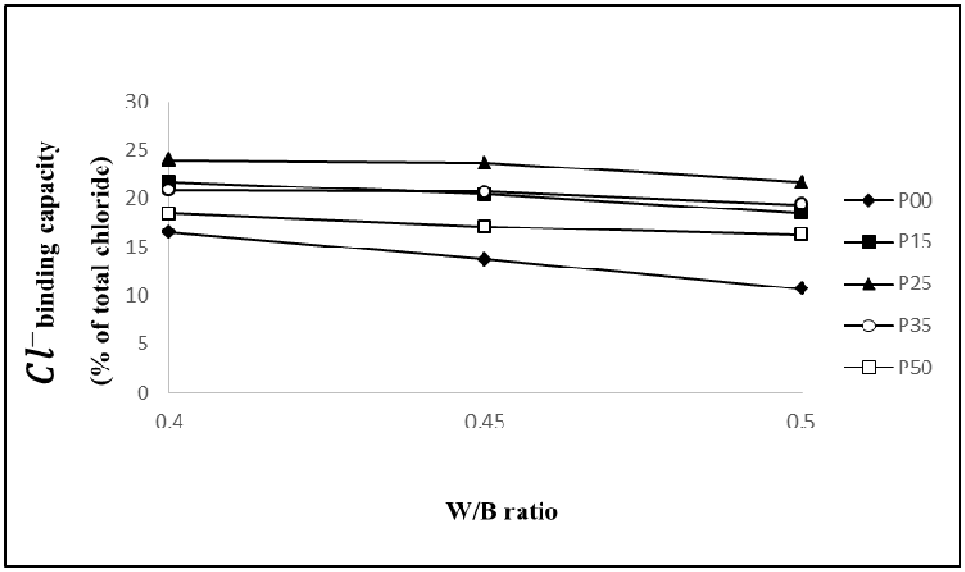
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆนั้น กำลังอัดจะสูง ผิวหน้าเรียบ และมีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ทางกายภาพดีขึ้น โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheewaket, et al., 2010) พบว่า การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลของการดักจับคลอไรด์ทางกายภาพที่เกิดจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น มีเจลแข็งที่สามารถดักจับคลอไรด์ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.5 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี

ส่วนผสม	การกักเก็บคลอไรด์ ที่อายุ 7 ปี (ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)
I40	16.52
I40P15	21.68
I40P25	23.95
I40P35	20.89
I40P50	18.46
I45	13.76
I45P15	20.47
I45P25	23.66
I45P35	20.66
I45P50	17.06
I50	10.68
I50P15	18.51
I50P25	21.66
I50P35	19.37



รูปที่ 4.10 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน
สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน
สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

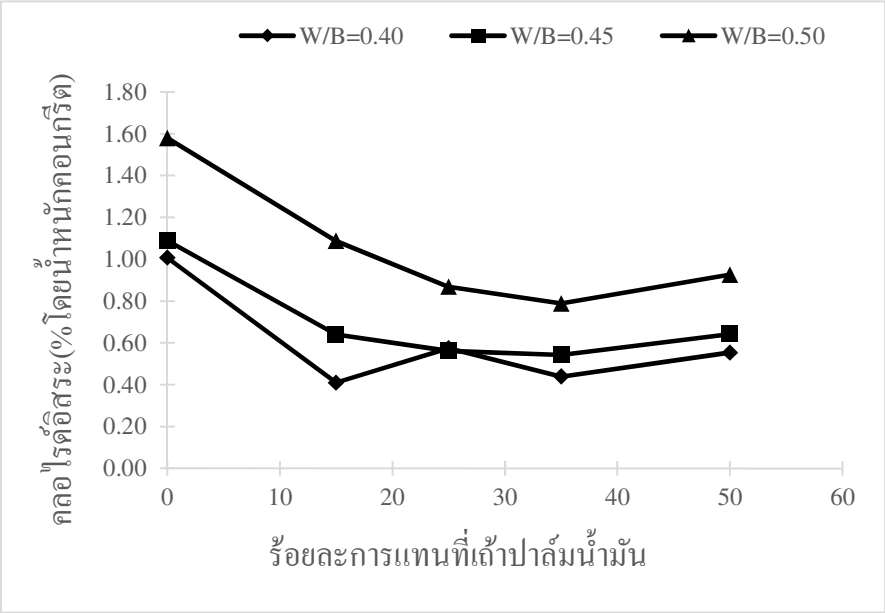
4.7 ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

4.7.1 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

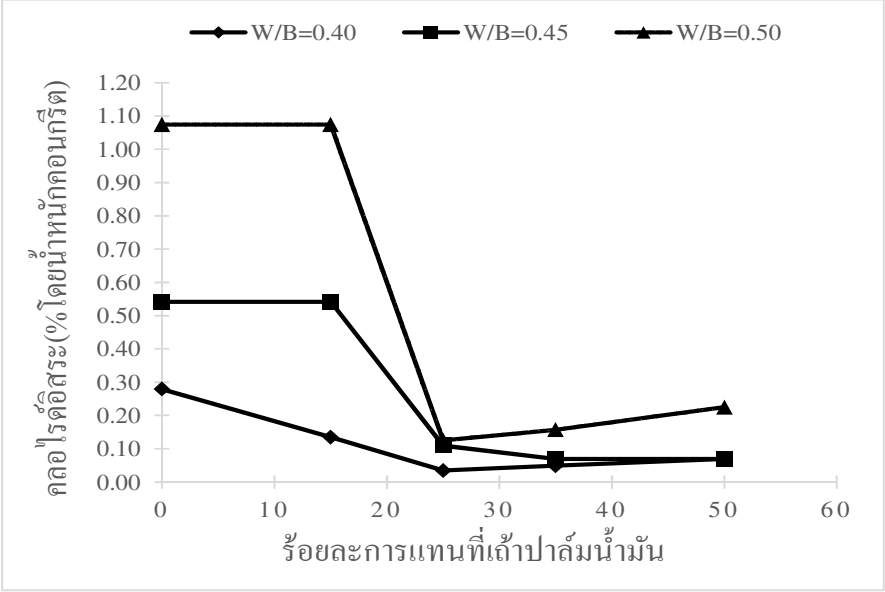
พิจารณาคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยมีระยะหุ้มเหล็ก 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ก) พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงอย่างชัดเจน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่ร้อยละแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 1.00, 0.41, 0.57 และ 0.44 โดยน้ำหนักคอนกรีต ตามลำดับ

พิจารณาคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยมีระยะหุ้มเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ข) พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น แต่ไม่เกินร้อยละ 35 ของน้ำหนักวัสดุประสาน จะทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลง โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ร้อยละแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0, 15, 25, 50 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 0.54, 0.54, 0.11 และ 0.07 โดยน้ำหนักคอนกรีตตามลำดับ ผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กเสริมระยะ 20 มม.

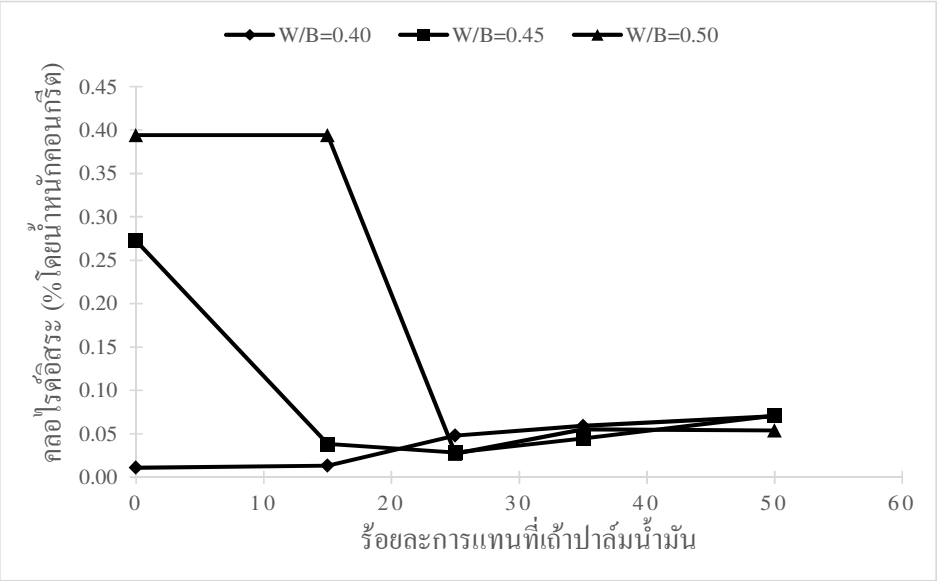
ส่วนปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยมีระยะหุ้มเหล็ก 75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ค) พบว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปนะเภทที่ 1 ในร้อยละที่มากขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะเห็นค่าปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงชัดเจนที่สุด ที่ร้อยละแทนที่เถ้าปาล์มเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 0.39, 0.39, 0.027 และ 0.05 โดยน้ำหนักคอนกรีตตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานผสมลงในคอนกรีต ช่วยลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งเป็นผลจาก SiO_2 และAl_2O_3ที่มีอยู่มากในเถ้าปาล์มน้ำมันและความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น มีความทึบน้ำละสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น (Tangchirapat, et al. 2009; Sata, et al. 2004; Neville, 1996)



ก) ความลึก 20 มม.



ข) ความลึก 50 มม.

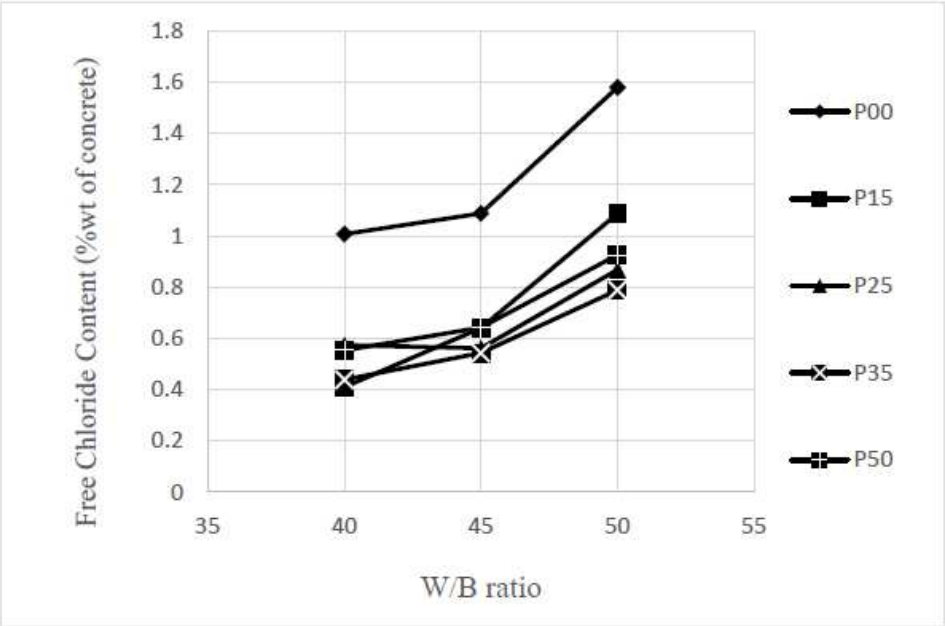


ค) ความลึก 75 มม.

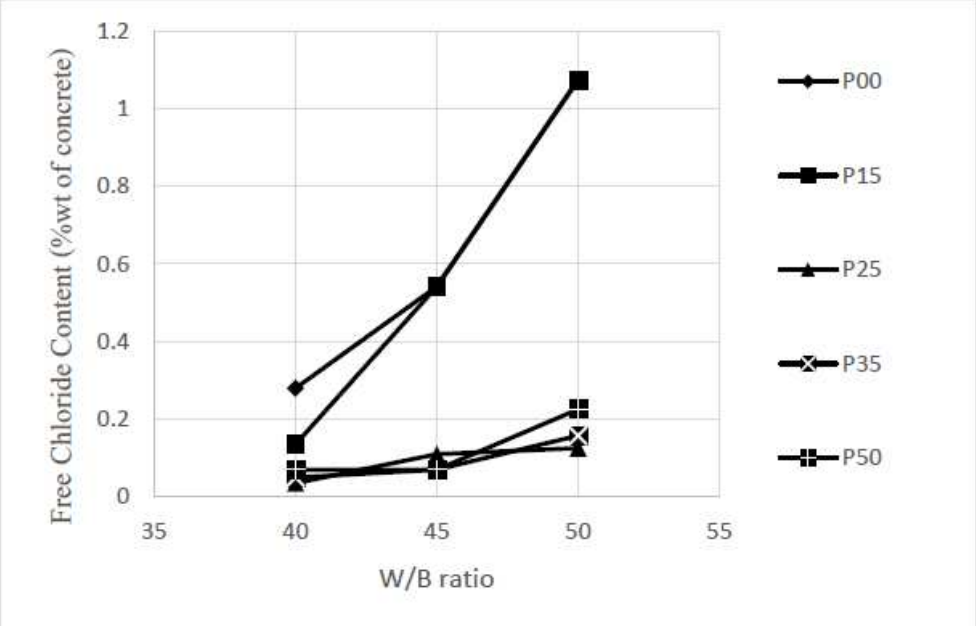
รูปที่ 4.12 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

4.7.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม

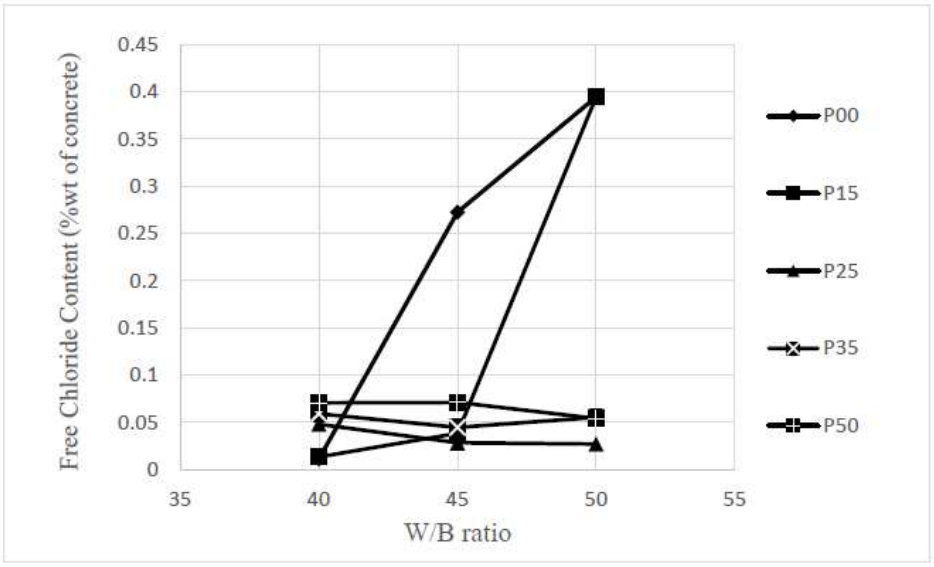
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 ที่แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงอย่างชัดเจน โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตควบคุมมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น คอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระดับความลึก 20 มม. เท่ากับร้อยละ 0.41, 0.64 และ 1.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ โดยให้ผลทดสอบไปในทิศทางเดียวกันในทุกความลึกทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น มีผลให้คอนกรีตมีความพรุน กำลังอัดต่ำ ทำให้คลอไรด์ที่มาจากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ค่อนข้างง่าย โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน (Chalee, and Jaturapitakkul, 2009) ซึ่งเป็นผลจากคอนกรีตธรรมดาความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดและปริมาณน้ำในคอนกรีตเป็นหลัก ส่วนคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน ความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ที่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย



ก) ที่ระยะคอนกรีตหุ้ม 20 มม.



ข) ที่ระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม.



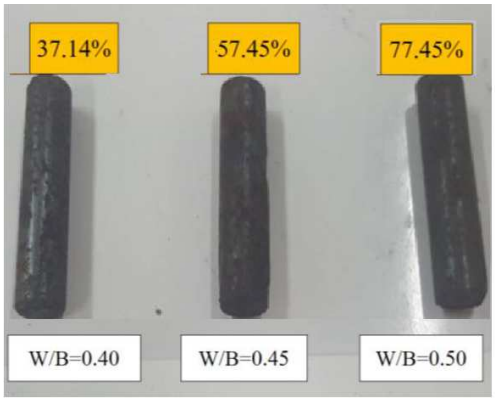
ค) ที่ระยะคอนกรีตหุ้ม 75 มม.

รูปที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม

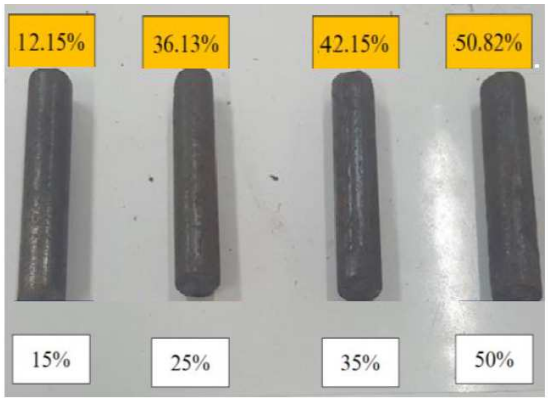
4.8 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ระดับความลึกต่างๆ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4.14 พบว่า ที่ระดับความลึก 20 มม. (รูปที่ 4.14(ก))เกิดสนิมค่อนข้างมาก และมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง แต่โดยภาพรวมยังสามารถสังเกตได้ว่า เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มีการเกิดสนิมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ W/B สูง เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกที่มากขึ้นเป็น 50 มม. (รูปที่ 4.14(ข)) พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กลดลง โดยเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่ากลุ่มควบคุมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม และการแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยในการก่อสร้างโครงสร้างคาน หรือเสา ที่ใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการเกิดสนิมเหล็กน้อยมากหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ถึงแม้จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.50 ก็ตาม นอกจากนั้นพบว่า ที่ระดับความลึก 75 มม.ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับความลึก 50 มม. แต่

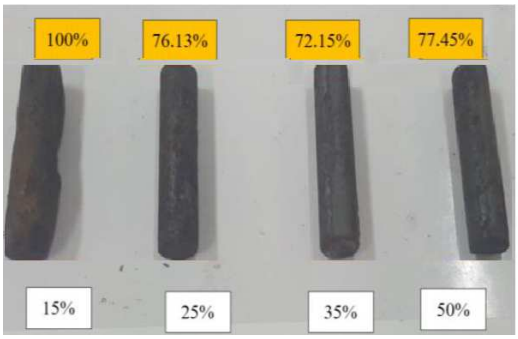
การเกิดสนิมค่อนข้างน้อยหรือเกือบไม่เกิดสนิมเลยในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่เกิน 0.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. มีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต



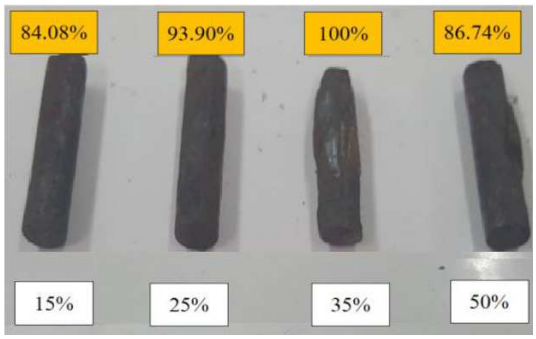
คอนกรีตควบคุม



คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.40)



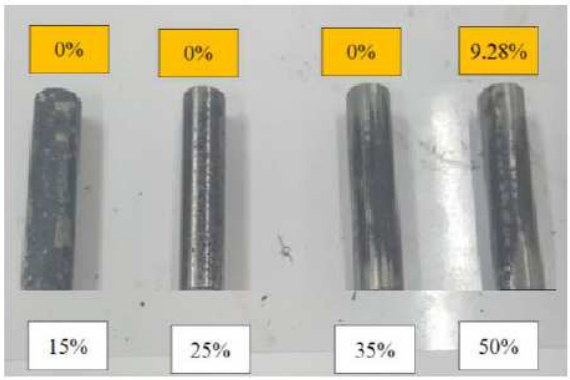
คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.45)



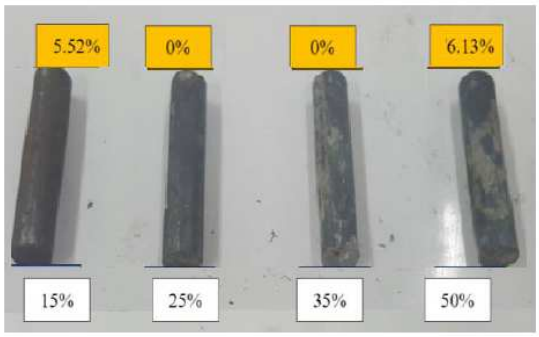
คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.50)

(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

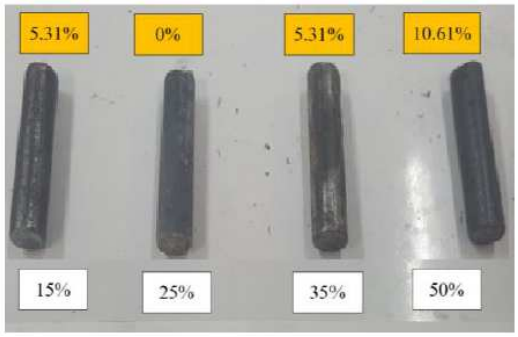
คอนกรีตควบคุม



คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.40)

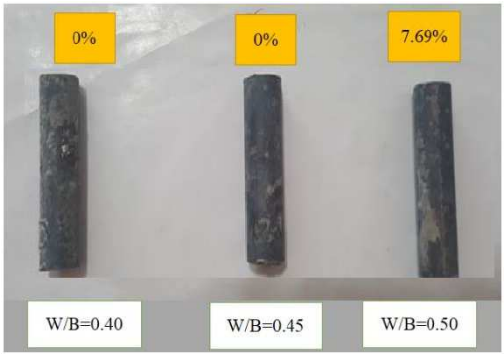


คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.45)

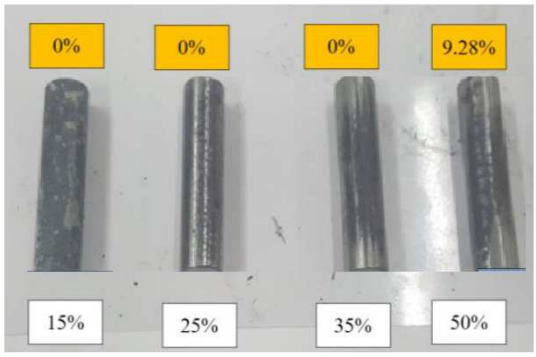


คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.50)

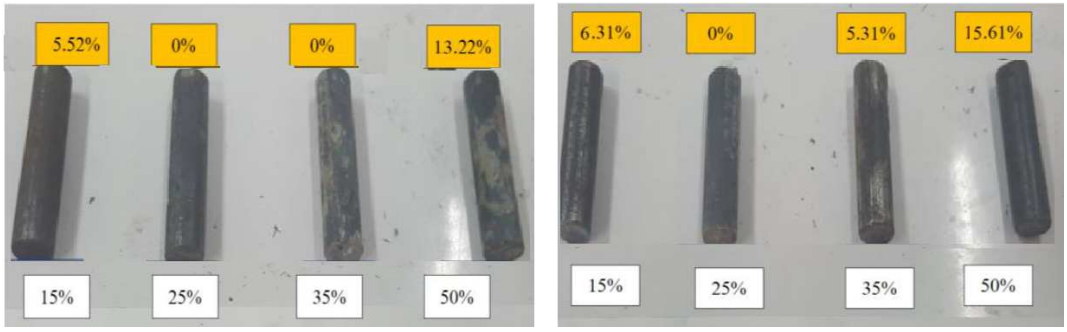
(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.



คอนกรีตควบคุม



คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.40)



คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.45) คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.50)

(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

รูปที่ 4.14 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็น เวลา 7 ปี

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผล

5.1.1 การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี มีแนวโน้มสูงกว่าอายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดลดลงจากอายุ 28 วัน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

5.1.2 การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตทุกส่วนผสมหลังแช่น้ำทะเลเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

5.1.3 การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี สูงสุด

5.1.4 การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 50 นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

5.1.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี สูงขึ้น

5.1.6 การแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี มีแนวโน้มสูงขึ้น และการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง

5.1.7 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กลดลง โดยเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่ากลุ่มควบคุมใน

ทุกละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

5.1.8 จากการศึกษาที่เก็บข้อมูลด้านความคงทนถึงอายุแช่น้ำทะเล 7 ปี พบว่า ส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้ก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมทะเล คือคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เนื่องจากมีกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดสูงและยังสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี อีกทั้งยังส่งผลให้ลดการเกิดพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมได้ดีที่สุด โดยไม่พบการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาข้อมูลด้านความคงทนกับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดอื่นๆ ที่ใช้ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาผสมในคอนกรีต เช่น เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เถ้าถ่านหินที่เผาด้วยความร้อนต่ำ และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นต้น ตลอดจนควรมีการเก็บข้อมูลความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในระยะเวลาที่นานขึ้น เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ชัดเจนมากขึ้น ตลอดจนควรใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง มาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายสถานะการกัดกร่อน และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล

เอกสารอ้างอิง

กิรติกร เจริญพร้อม เที่ยง ชีวเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี. (2554). การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7**, จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100

ชรินทร์ เสนาวงศ์ และวิเชียร ชาลี. (2554). การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21**, หน้า 257.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547. การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2**, เชียงใหม่, 17-22.

ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง. (2547). การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์**ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 37.

ปุณยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุธโธทา และ วิเชียร ชาลี. (2558). การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 20(1), หน้า 35-50

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). เถ้าลอยในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย

PONHSAMPATEA LY กีรติกร เจริญพร้อม เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี. (2558). ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และชัยจาตุร พิทักษ์กุล. (2546). **วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน.** วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., **26**(4), 459-474.

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547). **การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ผสมน้ำมัน.** วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและวัฒนา, **15**(3), 32-39.

วันโชค เครือหงส์ ธีรวัฒน์ สินสิริ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี** 35 (2)

วันชัย สะตะ ชัย จาตุระพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2546). การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 4(2), 27-32.

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา. (2537). การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก, หน้า 55

สรภพ ก้านบัวแก้ว. (2552). ผลกระทบของเถ้าแกลบ – เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สุรพันธ์ สุคันปรีย์, ชรินทร์ นมรักษ์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2545). การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต. **การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2545**, กรุงเทพ, 191-199

สุรินทร์ มายูร. (2550). การศึกษาอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งต่างๆของภาคใต้ตอนบนต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.).(2550). แผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มปี 2551-2555, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร **(*สศก.*)**. (2555). ***เศรษฐกิจการเกษตรของประเทศไทย ปี*** 2555, ***กระทรวงเกษตรและสหกรณ์***, ***หน้า*** 47.

ACI 211.1-91(1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

ACI 201.2R-01 (2003). Guide to durable concrete.

ACI 318-89 (2003). Building Code Requirements for Reinforced Concrete.

ASTM C 39. (2000). Standard Testing Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **Annual Books of ASTM Standards** ; V.04.02, 18-22.

ASTM C 192. (2015). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. **Annual Books of ASTM Standards** ; V.04.02, 18-22.

ASTM C617. (2015). Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens. **Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.**

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 C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. **Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.**

ASTM C1218. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. **Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.**

ASTM C1152. (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, **Annual Books of ASTM Standards V. 04.02**.

Bakker R.F.M. (1988). Corrosion of Steel in Concrete, Chapman and Hall, London, pp. 22-55.

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**, 47–53.

Chalee W., Jaturapitakkul C. (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. **Materials and Structures** 42, 505-514.

Chalee W., Ausapanit P., Jaturapitakkul C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. **Materials and Design** 31, 1242-1249.

Cheewaket C., 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,** 693-698.

Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. **Construction and Building Materials 24**, 1352–1357.

Chindaprasirt P., Homwuttiwong S. and Jaturapitakkul C. (2007). Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk–Bark Ash. **Construction and Building Materials**, 21(7), 1492-1499.

Crank, J. (1975) The mathematic of diffusion, 2nd, edn. Oxford Press, London.

Hussin M.W. and Awal A.S.M.A. (1996). Palm Oil Fuel Ash-A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction. **Proceeding of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century**, Thailand, D361-D366.

Neville A.M., (1996), Properties of concrete, 4th Edition. Longman, Malasia, pp. 563-575

Sata V., Jaturapitakkul C., and Kiattikomol K. (2004). Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE** 16, 623-628.

Tangchirapat W., and Jaturapitakkul C. (2010). Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. **Cement and Concrete Research 32,** 767-774.

Tangchirapat W., Jaturapitakkul C., and Chindaprasirt P. (2009). Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete. **Construction and Building Materials** 23, 2641-2646.

Tay J.H. (1990). Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material. **Journal of Material in civil Enjineering**, ASCE 2, 94-105.

Tay J.H. and Show K.Y. (1995). Use of Ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material. **Resources, Conservation and Recycling** 13, 27-36.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความทางวิชาการระดับชาติ

1) วิเชียร ชาลี เที่ยง ชีวะเกตุ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2562). ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ** (Going on submission)

ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

Durability Performances of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash under 7-year Exposure in Marine Environment

วิเชียร ชาลี[1*] เที่ยง ชีวะเกตุ[2] และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[3]

W. Chalee[1*], T. Cheewaket[2], and C. Jaturapitakkul[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนรีตในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด เท่ากับร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม3 และฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม. ที่มุมของตัวอย่างทดสอบ ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20 และ 50 มม. และได้หล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มม^3 สำหรับทดสอบกำลังอัด หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง และเก็บตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

ผลการศึกษา พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงในคอนกรีตถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.40 ให้ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูง และลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : การแทรกซึมของคลอไรด์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, การกัดกร่อนเหล็กเสริม, กำลังอัดคอนกรีต, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research investigates the effects of palm oil fuel ash on compressive strength, chloride penetration, and steel corrosion of concrete after being exposed to the marine environment for 7 years. Water-to-binder ratios (W/C) were carried at 0.40, 0.45 and 0.50. Palm oil fuel ash 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 chloride penetration, and the steel corrosion after being exposed to tidal zone for 7 years.

The results indicated that chloride penetration 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. This study found that concretes with the palm oil fuel ash replacement of 15 to 35% by weight of binder with a W/B ratio of 0.40 can be efficiently employed to enhance the durability of concrete structures in seawater. Because of they provide the highest compressive strength and lowest chloride penetration and steel corrosion in concrete.

Keywords : Chloride penetration, Palm oil fuel ash, Steel corrosion, Compressive strength, Marine environment

---

[1*]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (wichian@buu.ac.th)

[2]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (tieng@buu.ac.th)

[3]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (chai.jat@kmutt.ac.th)

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

1. บทนำ

การศึกษาเพื่อนำเอาเถ้าชีวมวลที่ผ่านการบดละเอียด มาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตมีมากขึ้น ทั้งการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การเก็บข้อมูลในภาคสนามเป็นการศึกษาสมบัติความคงทนของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากที่สุด โดยในช่วงระยะเวลา 15 ปีที่ผ่านมา [1-4] ได้มีการศึกษาการนำเอาวัสดุปอซโซลานมาใช้ในการปรับปรุงความคงทนของคอนกรีต ที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศ โดยเริ่มที่การใช้เถ้าถ่านหิน เนื่องจากเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมและมีแนวโน้มในการนำไปใช้งานมากที่สุด โดยผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางที่ดีสอดคล้องกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการคือ การผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีต สามารถลดการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน ตลอดจนลดความเสียหายเนื่องจากการทำลายของซัลเฟตและการทำลายทางกายภาพ เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ [2] ระยะต่อมาเริ่มมีการขยายขอบเขตการศึกษาไปที่วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น โดยเน้นที่เถ้าชีวมวล เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศและมีปริมาณค่อนข้างมาก โดยมีผลการศึกษาความคงทนในน้ำทะเลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ถึงระยะเวลานานถึง 9 ปี [5] ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตร้อยละ 15-25 สามารถลดการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน และมีการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล โดยได้มีการเก็บข้อมูลในระยะต้นไปบางส่วนแล้ว

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันนี้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม แยกเป็นทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยก่อนการนำกากปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า [6, 7] เถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นวัสดุปอซโซลานได้ แต่มีอนุภาคหยาบเกินไปจึงไม่สามารถนำมาผสมคอนกรีตได้โดยตรง เมื่อนำมาบดให้ละเอียดพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันให้สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการไปในทิศทางที่ดี ในการการศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง ได้มีการเก็บข้อมูลระยะต้นไปบางส่วน (3 ปี) แล้ว ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีแนวโน้มที่จะป้องการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ โดยเริ่มเห็นผลดีด้านการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความคงทนที่ชัดเจน ตลอดจนได้ทราบถึงกลไกการกัดกร่อนที่ชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้มุ่งประเด็นที่การเก็บข้อมูลได้ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ได้แก่ การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และคลอไรด์อิสระ การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต กำลังอัด ตลอดจนศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด หลังเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี เพื่อเป็นฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจากเถ้าชีวมวลให้มากขึ้น และสามารถยืนยันการนำไปใช้งานจริงให้ชัดเจน และน่าเชื่อถือมากขึ้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.1 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [8] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 จึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเท่ากับ 2.33 สมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 69.7 และ มีค่า LOI ร้อยละ 10 ซึ่งจัดให้อยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 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	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 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

มวลรวมหยาบใช้หินปูนที่มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หิน ¾ นิ้ว) และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.66 ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.63 โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5-8.5 และมวลรวมละเอียดมีค่า

ระหว่าง 2.2-3.1 ตามลำดับ ตารางที่ 3 แสดงความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 127-88 [9] และ ASTM C 128-93 [10] โดยที่ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.77 และ 2.57 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพมวลรวม

สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมหยาย	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	-

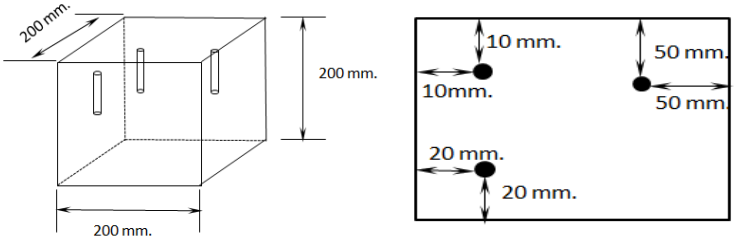
2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

งานวิจัยนี้งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลที่มีผลต่อการเกิดสนิมเหล็ก การแทรกซึมของคลอไรด์และโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ซึ่งมีสภาวะเปียกและแห้งสลับกัน ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำวิจัยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดจนมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนผสมคอนกรีตดังตารางที่ 4 หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม^3 และฝังเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. (ตำแหน่งฝังเหล็กดังรูปที่ 1) โดยควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล (รูปที่ 2) และเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 7 ปี เพื่อทดสอบหาการเกิดสนิมเหล็กและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กรดและน้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต (รูปที่ 3) ตลอดจนทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต (รูปที่ 4)

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

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

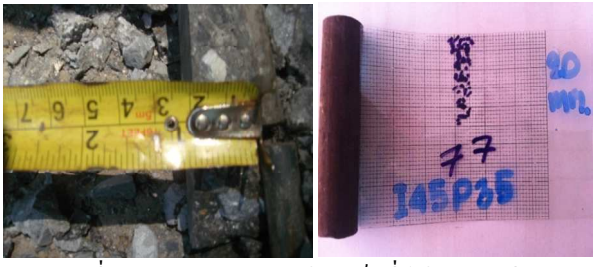
ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					
	วัสดุประสาน		ทราย	หิน	น้ำ	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด				
I40	480	0	767	935	190	0.40
I40P15	405	70	767	910	190	0.40
I40P25	358	119	767	894	190	0.40
I40P35	310	167	767	875	190	0.40
I40P50	239	239	767	850	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



รูปที่ 1 ตำแหน่งของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

รูปที่ 2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 7 ปี

รูปที่ 3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 4 การวัดการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเล

จากผลการทดสอบกำลังอัดดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า คอนกรีตควบคุมในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีกำลังอัดลดลงหลังแช่ในน้ำทะเล ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด กำลังอัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ในน้ำทะเล โดยจะมีเพียงแค่ ส่วนผสม I45P50 และ I50P50 ที่กำลังอัดมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาร้อยละกำลังอัดที่อายุ 7 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน ดังตารางที่ 5 พบว่า คอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเท่ากับ 15, 25 และ 35 ไม่สูญเสียกำลังอัดหลังจากแช่น้ำทะเล (ร้อยละกำลังอัดที่ 7 ปี เทียบกับ 28 วัน

มากกว่า 100) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ทนต่อสภาพแวดล้อมทะเลได้ดีขึ้น ควรแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งถือว่าเหมาะสม เพราะหากแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 50 มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและอาจส่งผลให้การรับแรงเชิงกลของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลลดลงในระยะยาว และเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างได้ การที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเป็นผลจากปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง และทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ได้ C-S-H ซึ่งทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น [11] และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7, 12] พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตมีผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยลง ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่เหมาะสม จึงสามารถลดการสูญเสียกำลังอัดลงได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ถึงแม้จะแช่ในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตในระดับที่รุนแรงนานถึง 7 ปี

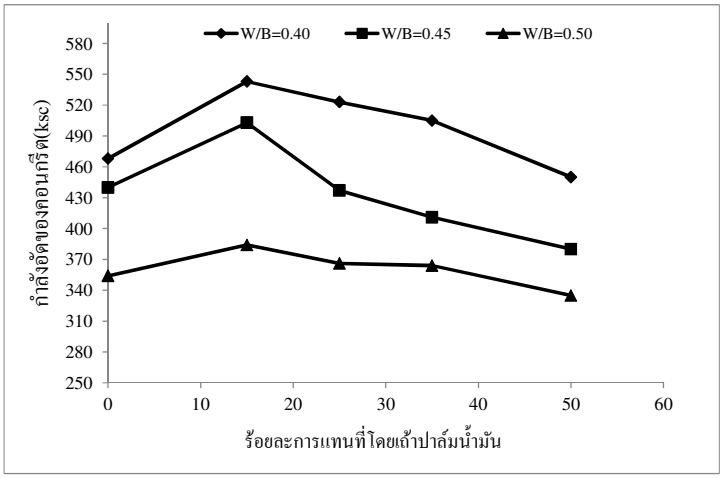
ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งถึงอายุ 7 ปี

ส่วนผสมคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม^2.)				ร้อยละกำลังอัดที่ 7 ปี เทียบกับ 28 วัน
	บ่มน้ำประปา	แช่ในน้ำทะเล			
	28 วัน	18 เดือน	3 ปี	7 ปี	
I40	483	491	495	468	96.9
I40P15	517	556	572	543	105.0
I40P25	480	494	510	523	109.0
I40P35	495	509	506	505	102.0
I40P50	446	461	466	450	100.9
I45	464	475	488	440	94.8
I45P15	484	497	519	503	103.9
I45P25	412	443	452	437	106.1
I45P35	403	419	421	411	102.0
I45P50	384	423	422	380	99.0
I50	394	404	366	354	89.8
I50P15	376	433	441	384	102.1
I50P25	355	383	392	366	103.1
I50P35	360	372	377	364	101.1
I50P50	342	368	366	335	98.0

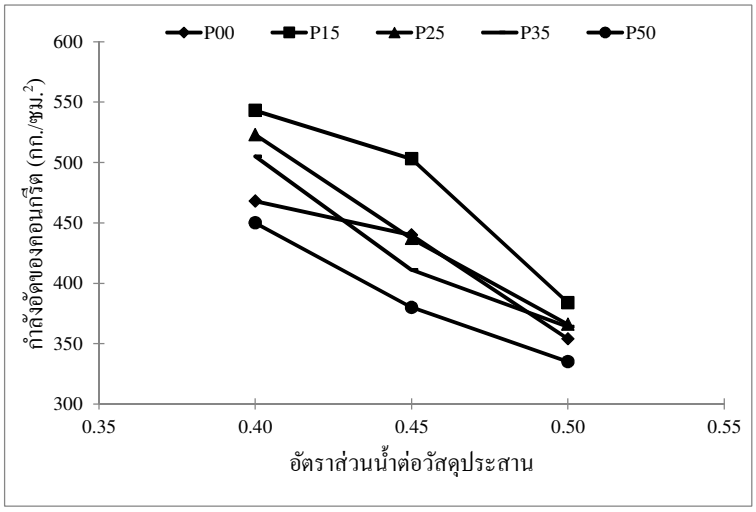
3.2 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตอายุ 7 ปี

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อกำลังอัดคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเล 7 ปี ดังรูปที่ 5 พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 และคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีกำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี เท่ากับ 543 , 503 และ 384 กก./ซม^2 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี เท่ากับ 468 , 440 และ 354 กก./ซม^2 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 50 มีกำลังอัดต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันกัน อีกทั้งกำลังอัดยังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอีกด้วย ดังนั้นคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 – 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม และสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมทางทะเลได้ดีขึ้น โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดนั้นมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้ลดช่องว่างในคอนกรีตจึงทำให้กำลังอัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสูงถึงร้อยละ 35-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากเกินไป ทำให้แคลเซียมไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจึงทำให้กำลังลดลง [6]

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี ดังรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี ลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.50 ในร้อยละการแทนที่โดยเถ้าปาล์มน้ำมันที่เท่ากัน และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ยังมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะทนต่อสภาพแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ซึ่งเป็นผลจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีกำลังอัดสูงสามารถต้านทานการทำลายทางกายภาพได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ต่ำกว่า อีกทั้งยังมีความทึบน้ำสูงทำให้ทนต่อการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเลทำให้เกิดการแตกร้าวและสูญเสียกำลังอัดได้ดีขึ้น [13]



รูปที่ 5 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี



รูปที่ 6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

3.3 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

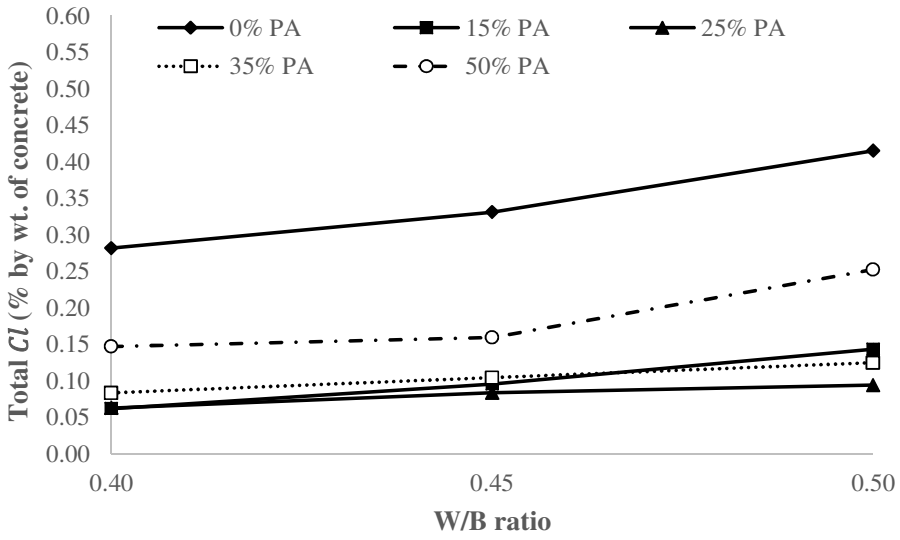
เมื่อพิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี ดังตารางที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับความลึก 55 มม. พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างชัดเจน และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทุกระดับความลึก ตัวอย่างเช่น พิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 40, 45 และ 50 โดยไม่มีการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ระดับความลึก 5 มม. มีการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 1.12, 1.54 และ 1.67 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ และที่ระดับความลึก 15 มม. มีคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 1.01, 1.12 และ 1.39 ตามลำดับ โดยพบว่า การแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดยังช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น ที่ระดับความลึก 5 มม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 40, 45 และ 50 และแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 1.04, 1.45 และ 1.54 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตที่

ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 1.12, 1.54 และ 1.67 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น มีผลให้คอนกรีตมีความพรุน กำลังอัดต่ำ ทำให้คลอไรด์ที่มาจากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ค่อนข้างง่าย โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1] พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ จะมีความทึบน้ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง อีกทั้งในคอนกรีตธรรมดาความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก

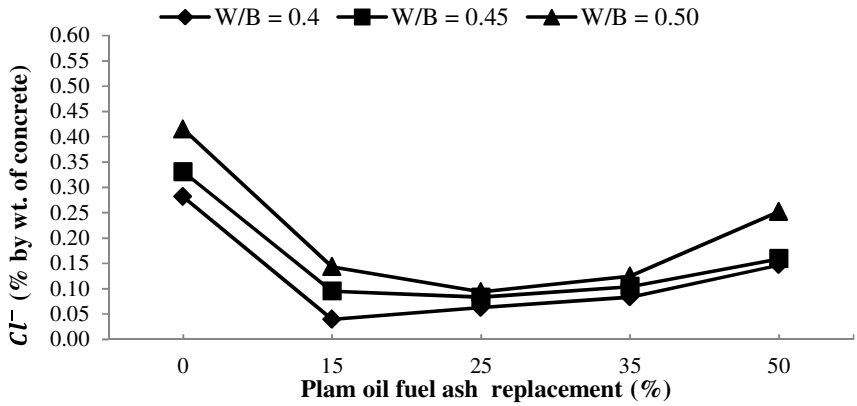
เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี ดังตารางที่ 6 และ รูปที่ 8 พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 50 เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. และ 45 มม. เท่ากับ 0.48, 0.09, 0.08, 0.09, 0.15 และ 0.28, 0.05, 0.08, 0.08, 0.14 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านของ กิรติกรและคณะ (2554) [13] ที่พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปริมาณร้อยละ 50 มีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นโดยผลดังกล่าวเกิดจากการที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง และทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์

ตารางที่ 6 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี

ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักคอนกรีต) แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี									
	5 มม.	15 มม.	25 มม.	35 มม.	45 มม.	55 มม.	65 มม.	75 มม.	85 มม.	95 มม.
I40	1.12	1.01	0.54	0.48	0.28	0.28	0.04	0.02	0.02	0.02
I40P15	1.04	0.479	0.10	0.09	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
I40P25	0.45	0.14	0.13	0.08	0.08	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02
I40P35	0.94	0.14	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.05
I40P50	0.47	0.26	0.14	0.15	0.14	0.14	0.10	0.10	0.08	0.01
I45	1.54	1.12	0.55	0.53	0.36	0.33	0.25	0.22	0.19	0.16
I45P15	1.45	0.55	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
I45P25	1.05	0.50	0.14	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06
I45P35	1.01	0.37	0.16	0.11	0.13	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08
I45P50	1.01	0.44	0.16	0.18	0.15	0.15	0.12	0.11	0.06	0.05
I50	1.67	1.39	0.64	0.53	0.46	0.41	0.25	0.18	0.16	0.10
I50P15	1.54	0.74	0.32	0.28	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.10
I50P25	1.00	0.77	0.34	0.11	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05
I50P35	1.45	0.55	0.37	0.21	0.11	0.12	0.09	0.09	0.08	0.07
I50P50	1.83	0.46	0.41	0.21	0.24	0.25	0.19	0.18	0.17	0.15



รูปที่ 7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ความลึก 55 มม. หลังแช่น้ำทะเล 7 ปี

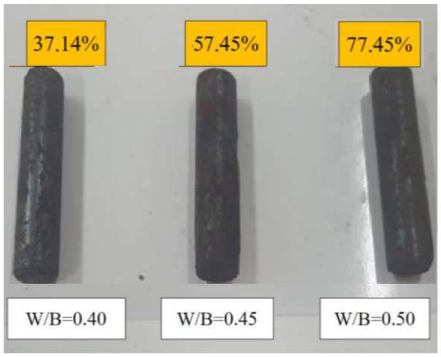


รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ความลึก 55 มม. หลังแช่น้ำทะเล 7 ปี

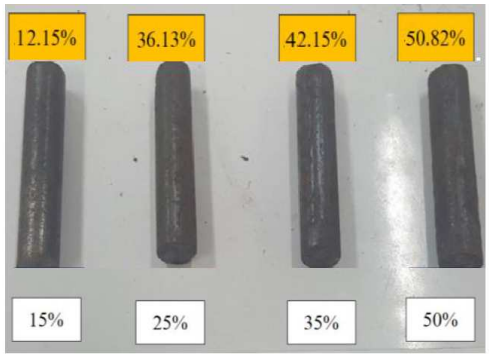
3.4 การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ระดับความลึกต่างๆ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 9 พบว่า ที่ระดับความลึก 20 มม. (รูปที่ 9(ก)) เกิดสนิมค่อนข้างมาก และมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง แต่โดยภาพรวมยังสามารถสังเกตได้ว่า เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มีการเกิดสนิมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ W/B สูง เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกที่มากขึ้นเป็น 50 มม. (รูปที่ 9(ข)) พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กลดลง โดยเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่ากลุ่มควบคุมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม และการแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยในการก่อสร้างโครงสร้างคาน หรือเสา ที่ใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการเกิดสนิมเหล็กน้อยมากหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ถึงแม้จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

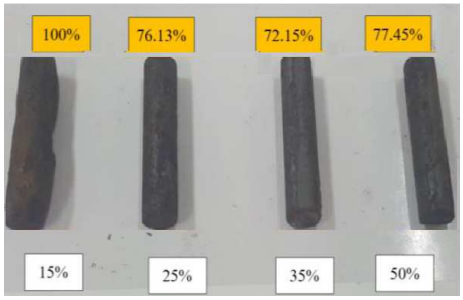
สูงถึง 0.50 ก็ตาม นอกจากนั้นพบว่า ที่ระดับความลึก 75 มม.(รูปที่ 9(ค)) ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับความลึก 50 มม. แต่การเกิดสนิมค่อนข้างน้อยหรือเกือบไม่เกิดสนิมเลยในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่เกิน 0.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. มีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต



คอนกรีตควบคุม



คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.40)

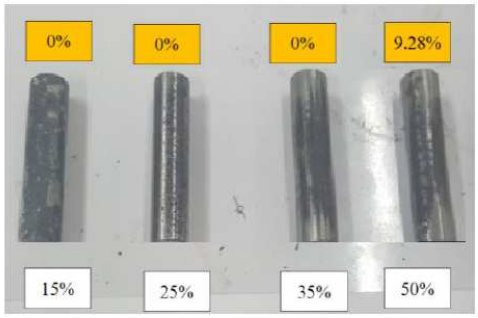


คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.45)

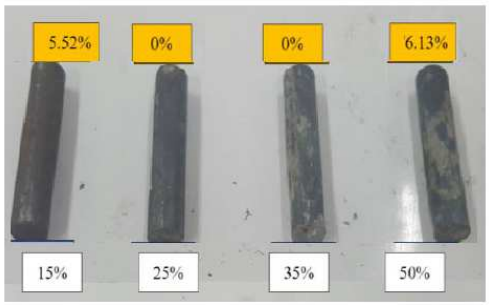
คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.50)

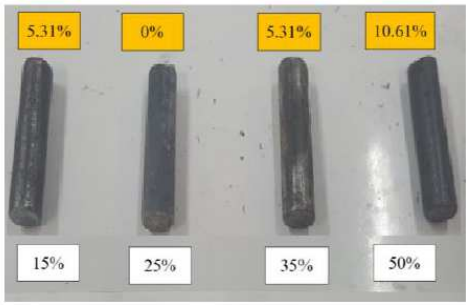
(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

คอนกรีตควบคุม



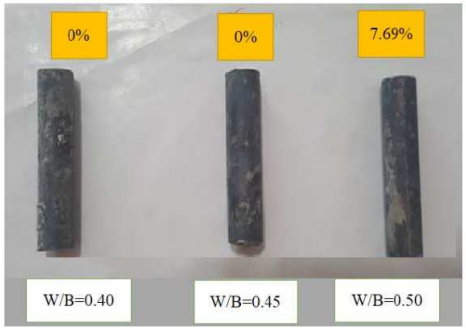
คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.40)

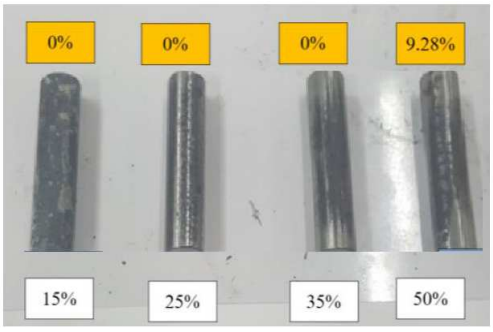




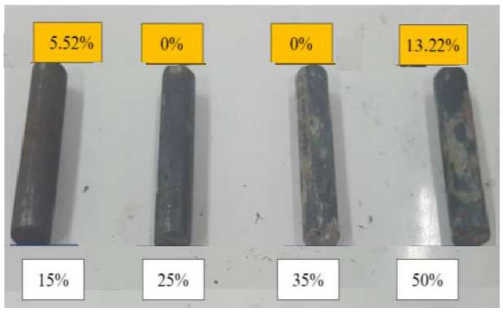
คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.45) คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.50)

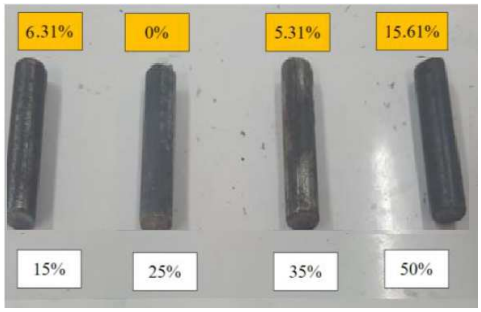
(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.





คอนกรีตควบคุม คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.40)





คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.45) คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (W/B=0.50)

(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

รูปที่ 9 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี มีแนวโน้มสูงกว่าอายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดลดลงจากอายุ 28 วัน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

2) การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี สูงสุด
3) การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 50 นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
4) การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กลดลง โดยเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่ากลุ่มควบคุมในทุกละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
5) จากการศึกษาที่เก็บข้อมูลด้านความคงทนถึงอายุแช่น้ำทะเล 7 ปี พบว่า ส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้ก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมทะเล คือคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เนื่องจากมีกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดสูงและยังสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี อีกทั้งยังส่งผลให้ลดการเกิดพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมได้ดีที่สุด โดยไม่พบการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 148//61

เอกสารอ้างอิง

1. Chalee W., Jaturapitakkul C. (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. Materials and Structures 42, 505-514.
2. Chalee W., Ausapanit P., Jaturapitakkul C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. Materials and Design 31, 1242-1249.
3. Cheewaket C., 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, 693-698.
4. Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. Construction and Building Materials 24, 1352–1357.
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, 47–53.
6. Tangchirapat W., and Jaturapitakkul C. (2010). Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. Cement and Concrete Research 32, 767-774.

7. Tangchirapat W., Jaturapitakkul C., and Chindaprasirt P. (2009). Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete. Construction and Building Materials 23, 2641-2646.
8. ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, C618, Annual Book of ASTM Standards 04.02, 2003.
9. ASTM. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, C127, Annual Book of ASTM Standards 04.02.-2001.
10. ASTM. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, C128, Annual Book of ASTM Standards 04.02,-2001.
11. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
12. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547). การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ผสมน้ำมัน. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและวัตเนา, 15(3), 32-39.
13. กิรติกร เจริญพร้อม เที่ยง ชีวเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี. (2554). การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7, จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 256102A1080004 สัญญาเลขที่ 148/2561

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

ชื่อโครงการ...การความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

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

<u>รายรับ</u>

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...240,650 .....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2560...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...192,520.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2561.....

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

รวม ...433,170.....บาท

<u>รายจ่าย</u>

หมวด	**งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)**	**งบประมาณที่ใช้จริง (บาท)**	**จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน (บาท)**
1. ค่าตอบแทน	45,000	45,000	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	72,000	72,000	0
4. ค่าใช้สอย	186,170	186,170	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าบริการด้านสื่อสารและโทรคมนาคม ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	58,130	58,130	0
รวม	481,300	481,300	0

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน