

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

รหัสโครงการ 170297

สัญญาเลขที่ 97/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

โครงสร้างทางจุลภาคและการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่

ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

(Microstructure and steel corrosion behavior of concrete containing palm oil fuel
ash under 3-year exposure in marine environment)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

๒๐๑ 83524

- 2 พ.ย. 2559

366116

๔๐ ๐๑๕๖๕๖

เริ่มบริการ

๕-๕ ก.ย. 25๖๐

ธันวาคม 2558

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาติ พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “โครงสร้างทางจุลภาคและการกักคร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มีงบประมาณทั้งโครงการ 641,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาติ
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	641,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อการแทรกซึมคลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็ก กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน หลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี โดยหล่อคอนกรีตควบคุมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 0.45 และ 0.50 และใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 20 และ 50 มม. นอกจากนั้น ทำการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ทำการบ่มคอนกรีตในน้ำจืดอายุครบ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่สภาวะเปียกสลัดแห้ง หลังจากแช่น้ำทะเลครบ 3 ปี ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรดและน้ำเป็นตัวทำละลาย และการกัดกร่อนของเหล็ก ผลการศึกษา พบว่า ในช่วงของการแช่น้ำทะเล 3 ปี คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีอัตราค่าการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริม ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความคงทนสูงขึ้น

คำสำคัญ : การแทรกซึมของคลอไรด์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, การกัดกร่อนเหล็ก, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research aims to study the effect of ground palm oil fuel ash (POF) on chloride penetration, steel corrosion, compressive strength, and microstructure of concrete exposed to a marine site for 3 years. Control concretes were designed using Portland cement type I with W/B ratios of 0.40, 0.45 and 0.50. The POF was used as a pozzolanic material to replace Portland cement type I at 0, 15, 25, 35, and 50% by weight of the binder at the same W/B ratios of the control concretes. Concrete cube specimens of 200x200x200 mm³ were cast, and the steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at covering depths of 10, 20 and 50 mm. In addition, concrete cylinder of 100- mm in diameter and 200-mm in height were prepared for compressive strength test. The concrete specimens were cured in water for 28 days, and then placed to the tidal zone of marine environment. After 3-year exposure, the specimens were tested for compressive strength, acid and water soluble chlorides and corrosion of embedded steel bar. The results showed that during 3-year exposure, concrete containing ground palm oil fuel ash gained strength faster than Portland cement type I concretes. The findings indicated that the use of POF as high as 25% by weight of binder tend to reduce the chloride penetration, steel corrosion and increased the chloride binding capacity in concrete, achieving a high durable concrete.

Keywords: Chloride penetration; Palm oil fuel ash; Steel corrosion; Marine environment.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ ทู่นสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 97/2558

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งาน ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีมากในประเทศ ให้สามารถใช้ในงานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น โดยเฉพาะการนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ถ้ำป่าลัมน้ำมัน	4
2.2 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และถ้ำป่าลัมน้ำมัน	6
2.3 วัสดุปอชโซลาน	8
2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอชโซลาน	8
2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	9
2.6 ความเสียหายของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล	12
2.7 ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมถ้ำป่าลัมน้ำมัน	13
2.8 กลไกของการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	14
2.9 โครงสร้างจุลภาค	18
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	25
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	25
3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	28
3.4 การทดสอบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่สถานะแวดล้อมทะเล	30
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	36
4.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ และเถ้าปลาล่มน้ำมัน	36
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	39
4.3 สมบัติของน้ำทะเล	40
4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล	41
4.5 กำลังอัดของคอนกรีต	42
4.6 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าปลาล่มน้ำมัน	46
4.7 สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	63
4.8 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล่มน้ำมันที่แช่ใน สถานะแวดล้อมทะเล	73
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผล	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	85
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	92
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	6
2.2 สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน	7
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปลาล้มน้ำมัน	8
3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมัน	28
3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	29
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน	39
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	40
4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาที่อายุ 28 วัน และแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี	43
4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ กันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี	47
4.5 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Pb) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าปลาล้มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี	59
4.6 พื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี	64
4.7 น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี	66
4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปีด้วยวิธี EDS	74

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงการแบ่งส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสคลอไรด์ในทะเล	12
2.2 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	14
2.3 Scanning Electron Microscope	19
2.4 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จาก EDX ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว	20
3.1 อุปกรณ์บดคอนกรีต	26
3.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก	26
3.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 200x200x200 มม.	26
3.4 แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต	26
3.5 เครื่องตัดคอนกรีต	27
3.6 เครื่องดูดสูญญากาศ	27
3.7 เครื่องเจาะคอนกรีต	27
3.8 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ	27
3.9 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	27
3.10 เครื่องทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดย (SEM - EDX)	27
3.11 ตำแหน่งที่ฝังเหล็กในคอนกรีตที่ทดสอบที่อายุ 3 ปี	29
3.12 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา จ. ชลบุรี	30
3.13 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์	31
3.14 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์	32
3.15 ตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี	33
3.16 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	33
3.17 การวัดปริมาณสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต	34
3.18 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง X-Ray detector	35
4.1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าปาล์มน้ำมัน ก่อนบดและหลังบดละเอียด	37
4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	38
4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน	38

4.4	สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา (ก) 18 เดือน และ (ข) 3 ปี	41
4.5	ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน	44
4.6	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เมื่อเทียบกับบ่มน้ำประปาที่อายุ 28 วัน	46
4.7	ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี	49
4.8	การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเล ในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 18 เดือน	51
4.9	การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเล ในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี	52
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 18 เดือน	56
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี	58
4.12	ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบ กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Pb) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน	62
4.13	ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบ กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Pb) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี	63
4.14	สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.40 หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 18 เดือน	67
4.15	สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 18 เดือน	68
4.16	สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.50 หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 18 เดือน	69
4.17	สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.40 หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี	70
4.18	สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี	71
4.19	สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.50 หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี	72

- 4.20 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตควบคุม
ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 74
- 4.21 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อ
วัสดุประสานเท่ากับ 0.40 75
- 4.22 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อ
วัสดุประสานเท่ากับ 0.40 75
- 4.23 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อ
วัสดุประสานเท่ากับ 0.40 76
- 4.24 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อ
วัสดุประสานเท่ากับ 0.40 76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ้ำปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน 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 และหลังจากการเผาพบว่าถ้ำปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ถ้ำปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ถ้ำปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น นอกจากนี้นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น เป็นไบโอดีเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าจะอาจจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10 ล้านไร่ จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในไบโอดีเซลได้ ซึ่งหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดถ้ำปาล์มน้ำมันจำนวนมากเกินกว่าปัจจุบันถึง 6 เท่าต่อปี และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งให้มากยิ่งขึ้น

การใช้ถ้ำปาล์มน้ำมันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต Tangchirapat et al. (2009) พบว่า การใช้ถ้ำปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตหลังแช่ในสารละลายซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้ถ้ำปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนถ้ำปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีตเนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้ และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำมาก นอกจากนี้ กิรติกร และคณะ (2554) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมถ้ำปาล์มน้ำมัน โดยใช้กรดเป็นตัวทำลายหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่า

ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมาก (ร้อยละ 50) ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

การศึกษาด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ผ่านมาได้มุ่งประเด็นไปที่ความคงทนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่เกิดขึ้น ตลอดจนโครงสร้างทางจุลภาคที่อธิบายถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากที่คอนกรีตสัมผัสกับชายฝั่งทะเลยังไม่มีข้อมูล ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงได้มุ่งประเด็นที่การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด หลังเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี เพื่อเป็นฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุพอชโซลานจากเถ้าชีวมวลให้มากขึ้น และสามารถยืนยันการนำไปใช้งานจริงให้ชัดเจน และน่าเชื่อถือมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน ที่มีต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3 ปี

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ส่งผลต่อการเริ่มเกิดสนิมเหล็ก ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นเวลา 3 ปี

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 3 ปี

1.2.4 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลที่มีผลต่อการเกิดสนิมเหล็กและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ซึ่งมีสภาวะเปียกและแห้งสลับกัน ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำวิจัยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 0.45 และ 0.50 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ และฝังเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 20 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมเหล็กโดยควบคุมค่ายูบัตวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์คอนเดนเซต (Supper P.)

ช่วยในการเพิ่มความสามารถให้ได้ เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 3 ปี เพื่อทดสอบหาการเกิดสนิมเหล็กและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ตลอดจนเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) นำเสนอฐานข้อมูลที่ใช้ประกอบในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยการประยุกต์ใช้ถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นวัสดุที่มีในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์ และมีประสิทธิภาพสูง ภายใต้อายุการใช้งานตามหลักวิศวกรรม

1.4.2) นำเสนอดัชนีประกอบในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่พัฒนามาจากการศึกษาในสภาวะแวดล้อมจริงในประเทศไทยและวัสดุที่มีในประเทศ ซึ่งจะได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริง ที่มีความชัดเจนและครอบคลุมมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงเถ้าปาล์มน้ำมัน สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์ม น้ำมัน วัสดุพอลิโพรพิลีน ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอลิโพรพิลีน การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ความเสียหายของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน กลไกของการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ การซึมผ่านของคลอไรด์ ประเภทของ คลอไรด์ (Chloride) ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

2.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) ในที่นี้หมายถึงเถ้าที่ได้จากการเผาจากของผลปาล์ม น้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และ ทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อ กำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศา เซลเซียส

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเฉพาะประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันเป็นอุตสาหกรรม เช่น ประเทศมาเลเซีย ประเทศอินโดนีเซีย และ ประเทศไทย (มีปริมาณการผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจาก มาเลเซียและอินโดนีเซีย) เพราะต้นปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตในประเทศ เหล่านี้ที่เป็นเขตร้อนชื้น ดังนั้นข้อมูลในเรื่องการใช้เถ้าปาล์มในงานคอนกรีตจึงแทบไม่สามารถหา ได้จากนักวิจัยที่อาศัยอยู่ในทวีปยุโรปหรือสหรัฐอเมริกา เพราะไม่ใช่ปัญหาของประเทศเหล่านั้น ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเถ้าปาล์มน้ำมันจึงเป็นหน้าที่ของประเทศที่ผลิตน้ำมันปาล์มทั้งสิ้น

ปีพ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1.45 ล้านไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4.08 ล้านตันต่อปี ทำให้เกิดกากของผลปาล์มน้ำมันประมาณ 2.14 ล้านตันต่อปี หลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ผ่านไปประมาณ 10 ปีในคือในพ.ศ. 2556-2557 พบว่าพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็นกว่า 4.4 ล้านไร่ มีผลผลิตเพิ่มขึ้น ประมาณ 3 เท่าเป็น 12.37 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.), 2555) และกลายเป็นผู้ผลิตใหญ่ลำดับที่ 3 ของโลกและมีเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น ประมาณ 300,000 ตันต่อปี แต่ที่สำคัญคือมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์น้อยมาก

ถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น นอกจากนี้นโยบายของรัฐบาลไทยในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในรถยนต์ เช่น เป็นไบโอดีเซล ทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay (1990) ได้ศึกษาการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทาคอนกรีต พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่ถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมด้วย (Tay and Show, 1995)

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal (1996) นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน โดยบดถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วันมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาที่ดีขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

สุรพันธ์ สุคันปรีย์ และคณะ (2545) ได้ทาการศึกษาการนำถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ SiO_2 มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอชโซลาน และมีศักยภาพเพียงพอสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้ หากมีความละเอียดสูง และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 ยังมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วันขึ้นไป

นอกจากนี้ วันชัย และคณะ (2546) ยังได้ศึกษาการนำถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทาคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88–91 เมกะปาสกาลเมื่อใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10–30 จาก

การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเถ้าปล้มน้ำมันเป็นวัสดุพอชโซลานที่ดีอีกชนิดหนึ่งและมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต

2.2 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าปล้มน้ำมัน

2.2.1 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก (major oxides) และออกไซด์รอง (minor oxides) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หนักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O และ K₂O) และสารซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) แลฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P₂O₅) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ การเผา และการเย็นลงของปูนเม็ด ขนาดและรูปร่างของสารประกอบสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาส่องดูได้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ปริญญา และชัย, 2547)

องค์ประกอบทางเคมี	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	
	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าเฉลี่ย
Calcium Oxide (CaO)	60 – 67	64.4
Silicon Dioxide (SiO ₂)	17 – 25	20.0
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	3 – 8	5.8
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.5 – 6.0	5.8
Magnesium Oxide (MgO)	0.5 – 6.0	5.8
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.1 – 1.3	0.5
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.1 – 1.3	0.5
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.5 – 3	2.6
สารประกอบอื่น	3 – 8	5.0
Loss On Ignition (LOI)	0.1 – 3.0	5.0
Insoluble Residue	0.5 – 0.8	5.8

C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ C_3S มีอยู่มากที่สุด มีรูปร่างเหลี่ยมสี่เท่าแก่เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) และเกิดความร้อนเรียกว่าความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเกิดการก่อตัวและแข็งตัวของ C_3S ให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน (ปริญา และ ชัย, 2547)

ชื่อสารประกอบหลักทางเคมี	สูตรเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)	$3CaO-SiO_2$	45-55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	$3CaO-SiO_2$	15-35
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)	$3CaO-Al_2O_3$	7-15
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)	$4CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$	5-10

2.2.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าปล้มน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปล้มน้ำมันมี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และเถ้าปล้มน้ำมันแต่ละแหล่งมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาแตกต่างกัน โดยที่เถ้าปล้มน้ำมันก่อนการบดจะมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคค่อนข้างหยาบ ความพรุนสูง จับกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดที่ค่าคงที่แองเงอร์ 325 ร้อยละ 90 ขึ้นไป เถ้าปล้มน้ำมันหลังจากการบดจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดอนุภาคและความพรุนลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าปล้มน้ำมันก่อนบด (ชัย และ ไกรวุฒิ, 2549)

เมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปล้มน้ำมันจากจังหวัดกระบี่ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถจัดให้อยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ เถ้าปล้มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน (ชัย และไกรวุฒิ, 2549)

สารประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Calcium Oxide (CaO)	6.4
Silicon Dioxide (SiO ₂)	65.3
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	2.5
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	6.4
Magnesium Oxide (MgO)	6.4
Sodium Oxide (Na ₂ O)	6.4
Potassium Oxide (K ₂ O)	65.3
Sulfer Trioxide (SO ₃)	6.4
Loss On Ignition (LOI)	10.0

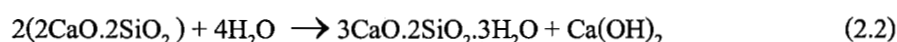
2.3 วัสดุปอซโซลาน (ปริญา, 2547)

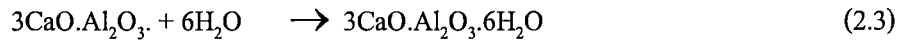
ตามนิยามของ ASTM C 618 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) อยู่ปริมาณสูง เมื่อบดเป็นผงละเอียด จะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ในอุณหภูมิปกติ และเมื่อมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ ทำให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction)

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้

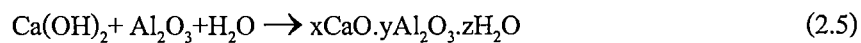
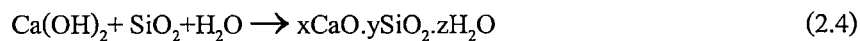
2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญา และชัย, 2547; ปริญา, 2547)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาประเภทคายความร้อน มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (3CaO.Al₂O₃.6H₂O หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)





ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน มีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5) โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม (Hansen, 1990)



ค่า x , y และ z ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และอุดรูพรุน ช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (ปริญา และชัย, 2547; ปริญา, 2547)

การทดสอบกำลังอัดเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะเป็นสมบัติหลักสำคัญ เนื่องจากคอนกรีตต้องมีการใช้งานในส่วนของการรับแรงอัดของโครงสร้างเป็นหลัก แม้ในบางกรณีคุณสมบัติอื่น เช่น ความคงทนต่อการกัดกร่อนหรือความตึงน้ำ อาจมีความสำคัญกว่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนต่อคอนกรีตรุนแรง แต่ในทางปฏิบัติพบว่าคอนกรีตที่รับกำลังอัดดีจะมีคุณสมบัติด้านอื่นดีด้วย ดังนั้นการศึกษาถึงกำลังของคอนกรีตจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในเรื่องของคอนกรีตเทคโนโลยี

รูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อหาลำดับของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก การใช้คอนกรีตรูปลูกบาศก์ในการหาลำดับอัดเป็นนิยมในอังกฤษ เยอรมัน และประเทศในกลุ่มยุโรปเป็นส่วนใหญ่ ส่วนรูปทรงกระบอกนั้นนิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส แคนาดา ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ สำหรับประเทศไทยนั้นในช่วงแรกนิยมใช้รูปลูกบาศก์ แต่ปัจจุบันใช้ทั้ง 2 แบบ เนื่องจากการที่คนไทยได้ไปศึกษาเล่าเรียนการทดสอบทั้ง 2 แบบจากประเทศดังกล่าว

2.5.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์

แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 15 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ผิวเรียบ และสามารถป้องกันไม่ให้ น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างที่เทหรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบ ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบางๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น การทาน้ำมันมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่อง การแข็งตัวและลดกำลังของคอนกรีตการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้มาตรฐาน BS 1881 Part 108 โดยใส่คอนกรีตลงในแบบมาตรฐานขนาด 15x15x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นให้เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบโต๊ะหรือกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กกระทุ้งมีน้ำหนัก 1.8 กิโลกรัม ยาว 38 เซนติเมตร หน้าที่ดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 เซนติเมตร กระทุ้งคอนกรีตอย่างเต็มที่เพื่อให้เป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อในอาคารต่างๆ ซึ่งได้รับการกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่เช่นเดียวกัน แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ภายหลังจากกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทั้งคอนกรีตไว้ 24 ± 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 จากนั้นถอดแบบออกและนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส การทดสอบนิยมทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วันซึ่งมักเป็นอายุที่ใช้ในการออกแบบ แต่ทั้งนี้ยังสามารถทำการทดสอบที่อายุอื่นเช่นที่ 3, 7, 14 และ 90 วัน ก็ได้ หากทำการออกแบบกำลังของคอนกรีตที่ใช้งานตามอายุดังกล่าว

2.5.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

แบบหล่อมาตรฐานสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูป ทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ทำจากเหล็กมีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบสามารถจรรูปทรงกระบอก และสามารถป้องกันน้ำปูนหรือคอนกรีตไม่ให้รั่วออกมาจากแบบหล่อได้

มาตรฐาน ASTM C192 ได้กำหนดให้หล่อคอนกรีตลงแบบมาตรฐานเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรคอนกรีตเท่าๆกัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้งด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 61 เซนติเมตร โดยชั้นที่ 2 และ 3 ต้องกระทุ้งให้ทะลุลงไปยังชั้นที่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง เมื่อครบทั้ง 3 ชั้นแล้วจึงทำการปาดผิวหน้าของคอนกรีตให้เรียบ และทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิระหว่าง 16 ถึง 27 องศาเซลเซียส โดยไม่รบกวนจนคอนกรีตแข็งตัว การถอดแบบจะทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ± 8 ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบกำลังตามอายุที่กำหนด

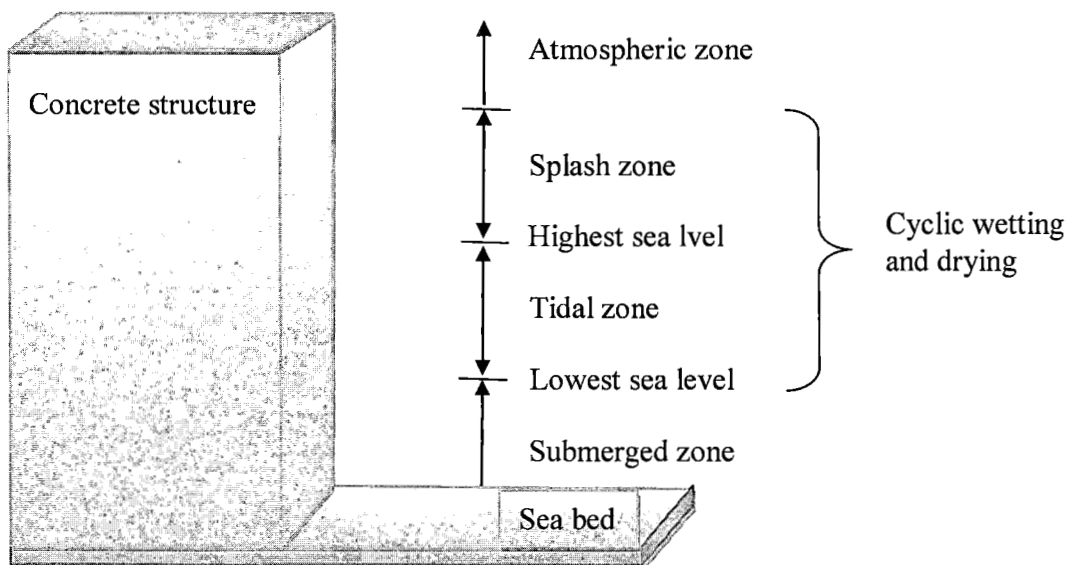
เนื่องจากการหล่อคอนกรีตแบบนี้ผิว ด้านบนของคอนกรีตจะไม่เรียบพอ ASTM C617 ระบุให้ผิวหน้าของคอนกรีตที่นำมาทดสอบต้องเรียบและแตกต่างกันไม่เกิน 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งอาจทำได้โดยการขัดผิวให้เรียบแต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองและใช้เวลานาน ดังนั้นจึงนิยมใช้การเคลือบหัว (capping) คอนกรีต ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ การใช้ซีเมนต์โพสต์ชั้นเทพีบนหัวคอนกรีตตอนเทเสร็จใหม่ๆ การใช้กัมมะถัน และ ปูนปลาสเตอร์กำลังสูงเคลือบหัวคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การทดสอบคอนกรีตโดยไม่ทำให้ผิวหน้าเรียบจะทำให้กำลังที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่า ที่ควรจะเป็น ผิวหน้าของคอนกรีตที่ไม่เรียบหรือเอียงเพียง 0.25 มิลลิเมตร อาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 33 และจะลดลงมากกว่านี้เมื่อเป็นคอนกรีตกำลังสูง กำลังของวัสดุที่ใช้เคลือบหัวคอนกรีตควรเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกำลังอัดของ คอนกรีตที่ทดสอบ ผิวเคลือบหัวคอนกรีตควรบางประมาณ 1.5 ถึง 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีตภายใต้การทดสอบกำลังอัด นอกจากนี้ภายหลังการเคลือบหัวคอนกรีตแล้วต้องทิ้งให้วัสดุที่เคลือบคอนกรีต แข็งตัว เช่น ถ้าวัสดุเคลือบผิวเป็นกัมมะถันควรทิ้งให้แห้งตัวอย่างต่ำ 2 ชั่วโมง มิฉะนั้นเมื่อทดสอบการรับกำลังอัดคอนกรีตผิวเคลือบที่ยังไม่แข็งตัวเต็มที่ จะแตกเสียหายก่อนทำให้กำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริงโดยทั่วไป นิยมใช้กัมมะถันเคลือบหัวคอนกรีตสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังไม่สูงมาก กรณีที่คอนกรีตมีกำลังสูงมากจะใช้การขัดผิวหน้าให้เรียบ กัมมะถันที่ใช้เคลือบผิวหน้าไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่หลายครั้ง เพราะจะมีเศษคอนกรีต ผุ่น และทรายปนกลับมาทำให้คุณภาพของกัมมะถันลดลง นอกจากนี้กัมมะถันที่นำกลับมาใช้อีกหรือที่เหลืออยู่ในหม้อต้มและผ่านการต้มหลายครั้งจะมีกำลังต่ำลง ดังนั้นจึงควรตรวจสอบว่ากัมมะถันที่ใช้ไม่มีปัญหาดังกล่าว

รายละเอียดของ การเคลือบหัวคอนกรีตมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C617 ในการเคลือบด้วยกัมมะถันจะใช้แบบเหล็กผิวเรียบและแทนสำหรับตั้งคอนกรีตให้ การเคลือบหัวทำโดยการเทกัมมะถันเหลวซึ่งต้มที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส ลงบนแบบเหล็กที่ทำน้ำมันเครื่องบางๆ เพื่อป้องกันกัมมะถันติดผิวหน้าแบบเหล็ก จากนั้นจึงคว่ำหัวคอนกรีตที่ต้องการเคลือบลงบนกัมมะถันเหลวและให้ตั้งฉากกับ ผิวหน้าของแบบเหล็ก หลังจากนั้นรอให้กัมมะถันแข็งตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ถึง 2 นาที สามารถดึงคอนกรีตที่มีกัมมะถันเคลือบหัวอยู่ออกมาจากแบบ ส่วนการเคลือบโดยใช้ปูนปลาสเตอร์กำลังสูงจะใช้แผ่นแก้วทาด้วยน้ำมันบางๆกด ปูนปลาสเตอร์ลงให้เรียบบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการเคลือบหัว และเมื่อปูนปลาสเตอร์แข็งตัวจะสามารถเอาแผ่นแก้วออกได้

2.6 ความเสียหายของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล

ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ต่อ โครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล มีอยู่หลายประการ เช่น การกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การแข็งตัวและหลอมเหลวของน้ำ การสึกกร่อนจากการขัดสี การตกผลึกของเกลือ หรือแม้แต่การเสื่อมสภาพที่เกิดจากสาเหตุทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งความเสียหายจากสาเหตุต่างๆ เหล่านี้ จะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันในบริเวณที่ต่างกัน เช่น บริเวณที่อยู่ใต้น้ำตลอดเวลา หรือบริเวณที่อยู่เหนือน้ำตลอดเวลา หรือบริเวณที่เปียกแห้งสลับกันไป รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี

โดยทั่วไปลักษณะของ โครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ (แสดงดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการแบ่งส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสคลอไรด์ในทะเล

2.6.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของ

คอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2.6.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้นประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น

2.6.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

2.6.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

2.6.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Sea bed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

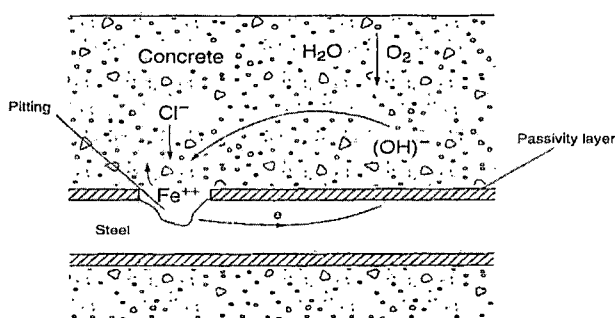
2.7 ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมแถ้าปาล์มน้ำมัน

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ทึบน้ำ แต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างช้า ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงหมายถึงความสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ในรูปของเหลวและอากาศที่เข้าสู่คอนกรีตเพื่อทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ภายในคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะน้ำและอากาศที่ซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับเหล็ก ทำให้เหล็กเกิดสนิม ส่งผลให้การรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงความทนทานของคอนกรีต

ได้ดี เพราะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันสารละลายต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต ไม่ใช่ซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงย่อมทำให้สารเคมีต่าง ๆ และอากาศซึมผ่านได้ช้า ส่งผลให้ความเสียหายต่อคอนกรีตน้อยลง (ชัย และวีรชาติ, 2552)

2.8 กลไกของการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดสนิมลดลง โดยปกติ pH ของคอนกรีตมีค่าประมาณ 12.5 – 13.5 เมื่อมีการทำลายจากอิออนของคลอไรด์จนความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น โดยไปทำลายชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น เมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม (แสดงดังรูปที่ 2.2)

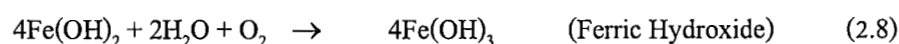
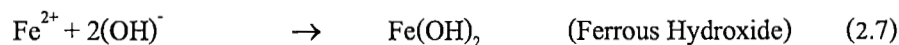
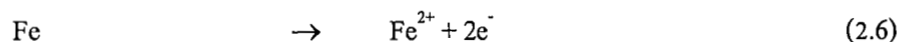


รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต (Neville, 1996)

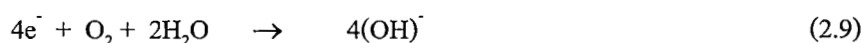
กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ดังสมการ 2.5 ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็น ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) ดังสมการ 2.9

และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ $(\text{OH})^-$ จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการ 2.6 และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ 2.8 (Broomfield, 1997)

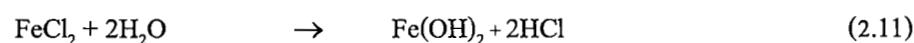
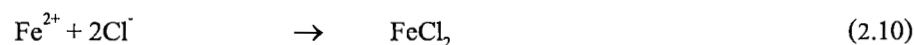
Anodic Reaction:



Cathodic Reaction:



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ 2.10 และ 2.11



Neville (1996) กล่าวว่านอกจากนี้คลอไรด์ยังเข้ารวมกับ C_4AF กลายเป็นแคลเซียมคลอไรด์เฟสไฮดรอกไซด์ ($3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) และปฏิกิริยาเหล่านี้จะเป็นจริงเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีตขณะผสมเพราะสามารถทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้อย่างรวดเร็ว

ทั้งส่วนประกอบและปริมาณของปูนซีเมนต์ต่างมีผลต่อปริมาณของคลอไรด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา เมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณมาก ก็ย่อมสามารถกักกันคลอไรด์ในปริมาณมาก จึงทำให้อัตราการแทรกซึมลดลง Bakker (1988) กล่าวว่าความสามารถในการกักกันคลอไรด์จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณปูนซีเมนต์ โดยปกติที่ใช้คือ 250–450 กก./ม.³ ปริมาณของไอออนของคลอไรด์ที่จะแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตใน 1 หน่วยเวลา ขึ้นอยู่กับความซึมผ่านได้ของคอนกรีต

2.8.1 การซึมผ่านของคลอไรด์

คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล และในน้ำกร่อย ซึ่งมีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีตได้ แหล่งที่มาของคลอไรด์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ คลอไรด์ที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตจากมวลรวม น้ำ หรือสารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ อีกอันหนึ่งเป็นคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตจากสภาพแวดล้อมของโครงสร้าง เช่น น้ำทะเล น้ำใต้ดิน คลอไรด์ในอากาศ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

1. โดยการแพร่กระจาย (Diffusion): เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต คลอไรด์จะแพร่กระจายจากบริเวณที่มีคลอไรด์มากไปสู่บริเวณที่มีคลอไรด์น้อยเสมอ
2. โดยการเคลื่อนย้าย (Migration): เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของไอออน) ในคอนกรีต
3. โดยการพา (Convection): เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่กระบวนการ Capillary Suction นั้นเอง
4. โดยการซึมผ่าน (Permeability) : เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้าน Hydraulic pressure ในคอนกรีต คลอไรด์จะซึมผ่านจากบริเวณที่มีแรงดันสูงไปยังบริเวณที่มีแรงดันต่ำเสมอ

การหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่เนื้อของคอนกรีตโดยทั่วไปใช้กฎการแพร่ข้อสองของฟิค (Fick'2nd law) ดังสมการที่ (2.12)

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_t}} \right] \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ

$C(x,t)$ = ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ระยะ x และเวลา t ใดๆ

C_s = ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ผิวสัมผัส

t = ระยะเวลาที่สัมผัส

x = ระยะที่ คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีต

erf = ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

D_t = สัมประสิทธิ์การแพร่

2.8.2 ประเภทของคลอไรด์ (Chloride)

คลอไรด์ เป็นสารที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คลอไรด์นั้นแปรผันตามปริมาณเกลือแร่ที่เพิ่มขึ้น น้ำธรรมชาติตามภูเขา หรือ ในพื้นที่สูงจะมีคลอไรด์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูง และน้ำในทะเลจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ใน

ปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมของน้ำจากที่ต่าง ๆ และมีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมาก

โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตและเกิดการสะสมในเนื้อคอนกรีต โดยคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 ชนิด (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) ได้แก่

- คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์อิสระ ซึ่งอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเป็นคลอไรด์ที่พร้อมทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดสนิมในเหล็กและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

- คลอไรด์ที่ถูกยึดจับหรือถูกกักเก็บ (Fixed chloride) คือ เป็นคลอไรด์ซึ่งถูกจับหรือกักเก็บไว้ที่ไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ คลอไรด์ชนิดนี้จะถูกจับหรือกักเก็บได้ 2 แบบด้วยกัน คือ การกักเก็บด้วยการดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) จากวัสดุที่ทำปฏิกิริยา เช่น ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ และการกักเก็บด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical absorption) จากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เช่น มวลรวม เป็นต้น การดูดซับทางกายภาพนี้คลอไรด์จะถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่ผิว (Surface force) ส่วนการดูดซับทางเคมี คลอไรด์จะถูกจับเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์กับคลอไรด์อิสระก่อให้เกิดเป็นเกลือฟรีเดล (Fridel's salt, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) และนอกจากนั้นคลอไรด์ยังสามารถถูกกักเก็บในโครงสร้าง C-S-H ได้ด้วย คลอไรด์อิสระที่ละลายน้ำได้เท่านั้นที่จะทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม (ACI 201.2R-92)

2.8.3 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้ ไอออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณไอออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloro-Aluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์

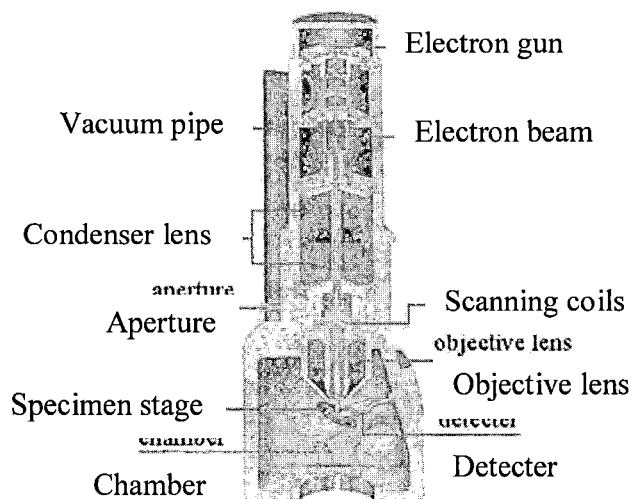
อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ยอมรับกันว่า การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะกับงานคอนกรีตหยาบ และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลายซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2.9 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาค เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลลักษณะของวัสดุ ที่มุ่งศึกษาไปในด้านขนาดเม็ดเกรนของวัสดุ ระยะห่างหรือการจับกลุ่มเรียงตัวของเม็ดเกรน หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์พิเศษในการศึกษา เช่นกล้องไมโครสโคป (Microstructure) เพื่อส่องดูโครงสร้างของวัสดุแต่ละชนิด ที่ตัดมาเป็นชิ้นเล็กๆ ขัดผิวจนมันเป็นเงา และนำไปทำการกัดกรด (etching) ให้ผิวหน้าเป็นหลุมๆ เล็กๆ เพื่อให้แสงกระทบกับหลุมเล็กๆ และสะท้อนกลับให้เห็นโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

2.9.1 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค Scanning Electron Microscope: (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่ กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 1000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Scanning Electron Microscope (Scientific and Technological Instrument Center, 2556)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสงโดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า เลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

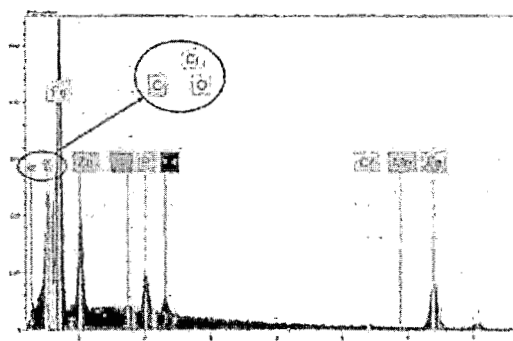
อิเล็กตรอน แบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็น องค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และ

ความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้ว อิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดย ค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

2.9.2 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy: (EDX)

ชุดเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS, EDX หรือEDXRF) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างการใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จาก EDX ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว (Scientific and Technological Instrument Center, 2556)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่า เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน แล้วทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น เช่น ป้องกันการร้าวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี คอนกรีตมีความชื้นน้ำสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำความเสียหายให้กับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่อง

และลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ Thomas และคณะ (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ 10°C ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนขึ้นอย่างประเทศ ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิกิริยาส่วนผสม ส่วนการศึกษาความคงทนของคอนกรีตในเขตทะเลที่อยู่ในประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น Chalee และคณะ (2010) ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี ซึ่งพบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลด้านความคงทนที่ศึกษาในสิ่งแวดล้อมทะเลที่เป็นเขตอบอุ่น โดยการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนเนื่องจากน้ำทะเลมากขึ้น นอกจากนั้นคอนกรีตที่ต้องใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลควรมีการกักเก็บคลอไรด์ที่ดี ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลงและทำให้การเกิดสนิมเหล็กน้อยลงด้วย โดย Cheewaket และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในคอนกรีต ส่งผลให้ค่าร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่มีผลชัดเจนกับการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต นอกจากนั้น การเลือกใช้คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องคำนึงถึงระดับคลอไรด์วิกฤติ ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของการกัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่เสริมในคอนกรีต กับปริมาณของคลอไรด์อิสระรอบผิวของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในการพิจารณาความเสี่ยงของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเมื่อทราบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดย วิเชียร และ ชัย (2554) พบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นและชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ถึงแม้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน แต่

การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดากลับมีมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีความทึบน้ำ และมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงสามารถลดปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินได้อย่างชัดเจน วิเชียร และคณะ (2553) ได้ศึกษาผลของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินชนิด F ที่ได้จากโรงงานโดยตรง (รูปร่างกลมตัน) จากแม่เมาะให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดชนิด C (รูปร่างไม่แน่นอน) จาก เอ็น พี เอส และ กาญจนบุรี อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 3 แหล่งในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลง และต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน

วิเชียร และ ชัย (2554) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ทำการหล่อคอนกรีตควบคุมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ในคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นำคอนกรีตไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ที่ จ.ชลบุรี และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และวัดการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่อายุ 3 ปี ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

ในส่วนของเถ้าชีวมวลพบว่า เถ้าชีวมวลที่มีมากในประเทศยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรงต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดก่อน ซึ่งพบว่าหลังจากบดแล้วให้ผลการศึกษามบัตติเชิงกลไปในทิศทางที่ดี และส่งผลสืบเนื่องให้สมบัติความคงทนดีด้วย โดย วิเชียร และ ชัย (2554) ได้ศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าเคลือบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. และบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล และเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าเคลือบเปลือกไม้หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าเคลือบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าเคลือบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

ในส่วนของ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นเถ้าชีวมวลอีกชนิดหนึ่ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต Tangchirapat et al. (2009) พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตหลังแช่ในสารละลายซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีตเนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้ และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำมาก นอกจากนี้ กิรติกร และคณะ (2554) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมาก (ร้อยละ 50) ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

วชิรกรรม และคณะ (2554) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อกำลังอัดอัตราซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีต และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ + เถ้าปาล์มน้ำมัน) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และใช้สารลดน้ำพิเศษ เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 5-10 ซม. ทดสอบกำลังอัดค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่ง

ด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าปล้มน้ำมันบดละเอียดเป็นส่วนผสม สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น และมีค่าการซึมผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมยังมีการแทนที่เถ้าปล้มน้ำมันมากขึ้นการแทรกซึมคลอไรด์ยังมีค่าลดลง

วันโชค และธีรวัฒน์ (2555) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน โดยนำเถ้าปล้มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาดคือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์และขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ได้ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปล้มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทดสอบความไม่เป็นผลึกของเถ้าปล้มน้ำมันโดยวิธีรีเทิลด์ กำลังอัดของเพสต์ การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน การทดสอบกระจายขนาดโพรงของเพสต์ ผลการทดสอบพบว่าเถ้าปล้มน้ำมันเป็นวัสดุซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปล้มน้ำมันขนาดหยาบมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ขณะที่เพสต์ผสม เถ้าปล้มน้ำมันที่มีความละเอียดร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงทั้งหมดต่ำที่สุด ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของเถ้าปล้มน้ำมันและมีปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC นอกจากนี้ขนาดโพรงวิกฤตของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC เพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่มีความละเอียดช่วยลดโพรงวิกฤตมากกว่าเพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่มีขนาดหยาบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทำเลขของประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นยังมีน้อย ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดสร้างงานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาปัญหาความเสียหายของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการนำวัสดุปอซโซลานที่มีมากในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต ซึ่งเถ้าปล้มน้ำมันเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในวงการวิศวกรรม ดังนั้นการศึกษาถึงผลของแหล่งผลิต ความละเอียดประมาณเถ้าปล้มน้ำมัน ระยะหุ้มคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีต ประมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงตัวแปรดังกล่าวเพื่อใช้ในการกำหนดปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและระยะหุ้มที่เหมาะสม ตลอดจนเป็นแนวทางการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพและมีความทนทานยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการศึกษา ประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา วิธีการศึกษา วิธีการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ แต่ละขั้นตอน โดยแยกเป็นรายละเอียด ดังนี้

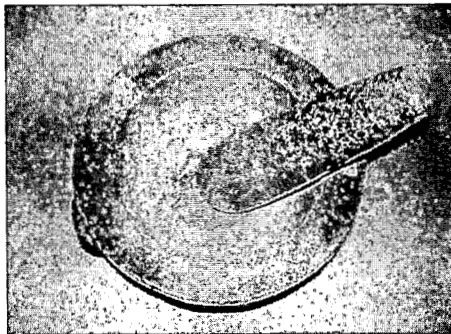
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150
- ถ้ำปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด โดยค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33
- หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.
- ทรายแม่น้ำหยาบ ร่อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62
- น้ำประปา
- สารเคมีผสมเพิ่ม ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทสารลดน้ำพิเศษชนิดซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มมาดีไฮด์คอนเดนเซต
 - เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.
 - สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มี ซิลเวอร์ไนเตรต ($\text{AgNO}_3 = 0.05 \text{ N}$) กรดไนตริก (HNO_3) และ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}_2 = 30\% \text{ solution}$)

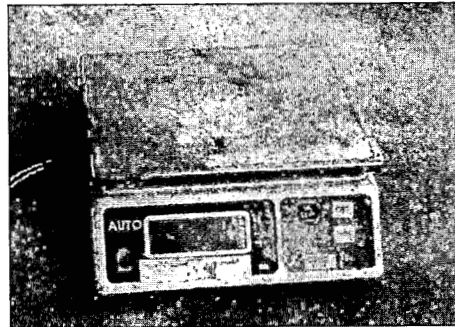
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- อุปกรณ์บดคอนกรีต (รูปที่ 3.1)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.2)
- แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³. (รูปที่ 3.3)
- แบบฝักเหล็กเสริมลงในคอนกรีต (รูปที่ 3.4)
- เครื่องตัดคอนกรีต (รูปที่ 3.5)
- เครื่องดูดสูญญากาศ (รูปที่ 3.6)
- เครื่องเจาะคอนกรีต (รูปที่ 3.7)

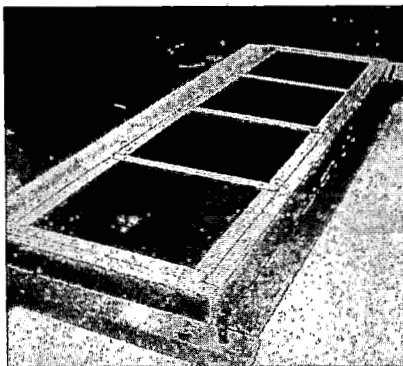
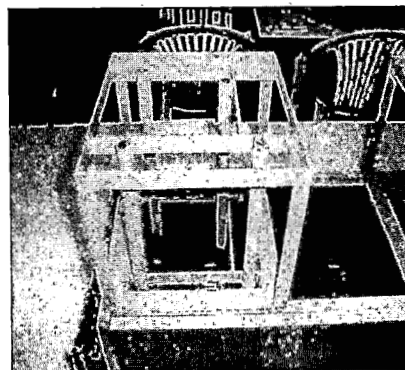
- เครื่องโม่เทรตอัตโนมัติ (Auto Tritation Equipment) (รูปที่ 3.8)
- เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) (รูปที่ 3.9)
- เครื่องทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดย (SEM - EDX) (รูปที่ 3.10)
- ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
- กราฟและปากกาเขียนพลาสติก
- บีกเกอร์ (Beaker) และ ขวดชมพู ขนาดต่างๆ
- บิวเรตต์
- กรวยกรอง



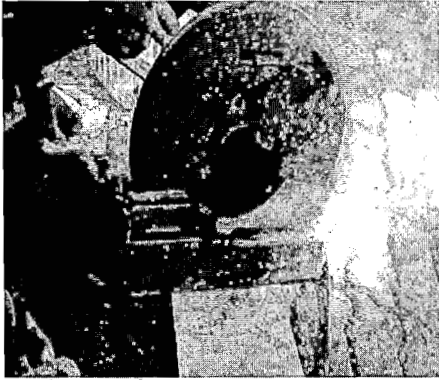
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์บดคอนกรีต



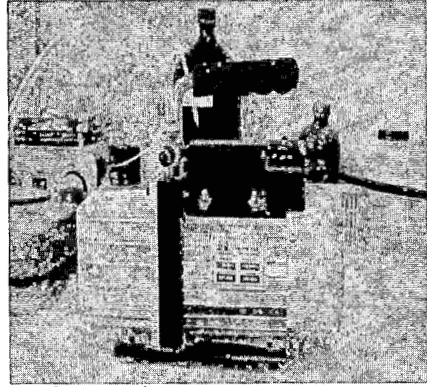
รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก

รูปที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรง
ลูกบาศก์ ขนาด 200x200x200 มม.

รูปที่ 3.4 แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต



รูปที่ 3.5 เครื่องตัดคอนกรีต



รูปที่ 3.6 เครื่องดูดฝุ่นสุญญากาศ



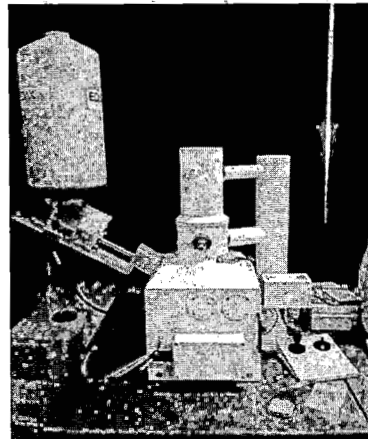
รูปที่ 3.7 เครื่องเจาะคอนกรีต



รูปที่ 3.8 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดย (SEM - EDX)

3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เสาปาล์มน้ำมัน

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เสาปาล์มน้ำมันบดละเอียดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเสาปาล์มน้ำมัน

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	
	วัสดุประสาน			ทราย	หิน		น้ำ
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เสาปาล์มน้ำมันบดละเอียด					
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	0.5	
I50P15	327	58	767	990	190	0.5	
I50P25	289	96	767	978	190	0.5	
I50P35	250	135	767	964	190	0.5	
I50P50	193	193	767	944	190	0.5	

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
I	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน
P	เถ้าปลั่มน้ำมันที่บดละเอียด
40,45,50	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ

สัญลักษณ์	ความหมาย
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปลั่มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

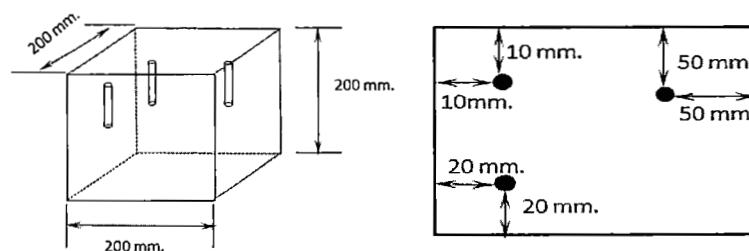
รูปแบบสัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ I/A/P/B โดย A เป็นส่วนที่ใช้บอกถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ B เป็นส่วนที่แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปลั่มน้ำมัน ยกตัวอย่างเช่น

สัญลักษณ์ I40 หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

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

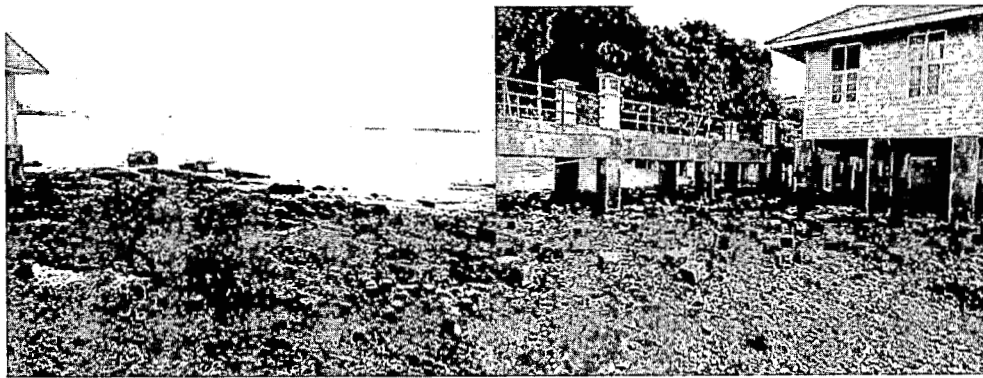
3.3.2 ตัวอย่างคอนกรีต (ที่เตรียมเมื่อ 3 ปีที่แล้ว)

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม.³ ในแต่ละส่วนผสม ผึงเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 10, 20 และ 50 มม. สำหรับการทดสอบที่อายุ 3 ปี (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ผึงเหล็กในคอนกรีตที่ทดสอบที่อายุ 3 ปี

หลังจากหล่อคอนกรีตและบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนอายุคอนกรีตครบ 28 วัน จึงนำไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล ด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง (รูปที่ 3.12) และทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุการแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ, การเกิดสนิมเหล็ก, กำล้างอัด และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 3 ปี



รูปที่ 3.12 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา จ.ชลบุรี

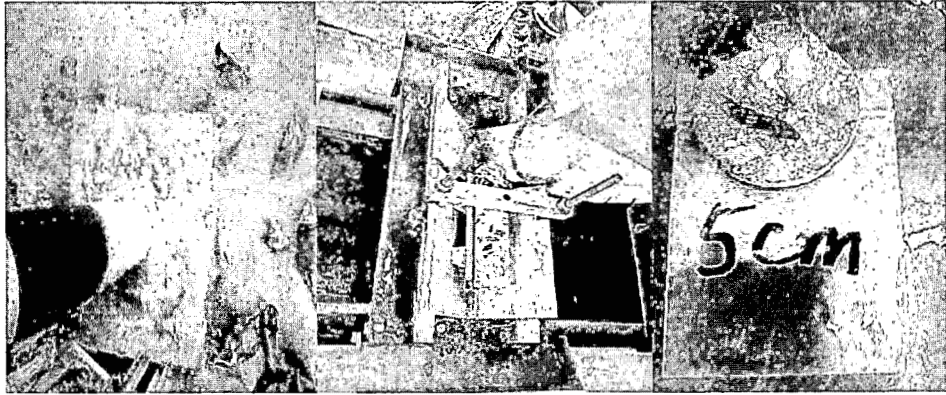
3.4 การทดสอบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่สภาวะแวดล้อมทะเล

3.4.1 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

- การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 3 ปี

(1) ทำการเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เพื่อทดสอบหาการแทรกซึมคลอไรด์โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 200 มม. (รูปที่ 3.13 (ก))

(2) ตัดตัวอย่างทรงกระบอกหนาชั้นละ 10 มม. (รูปที่ 3.13 (ก)) และบดคอนกรีตแต่ละชั้นให้ละเอียดโดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20. (รูปที่ 3.13 (ข)) ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีต



(ก) การเจาะและตัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อใช้ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์



(ข) การบดและเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

รูปที่ 3.13 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์



รูปที่ 3.14 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

3.4.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152

- (1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยชั่งใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- (2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
- (3) เติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
- (4) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว
- (5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- (6) เติม H_2O_2 (สารละลาย 30%) ปริมาณ 3 มิลลิลิตร
- (7) ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่มีสารละลาย 0.05
- (8) บีเปตต์ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่ เอาไปไทเทรตด้วย เครื่องไทเทรต ด้ร้อยละของคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ที่ระดับความลึกต่างๆ

3.4.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำลายตาม ASTM C 1218

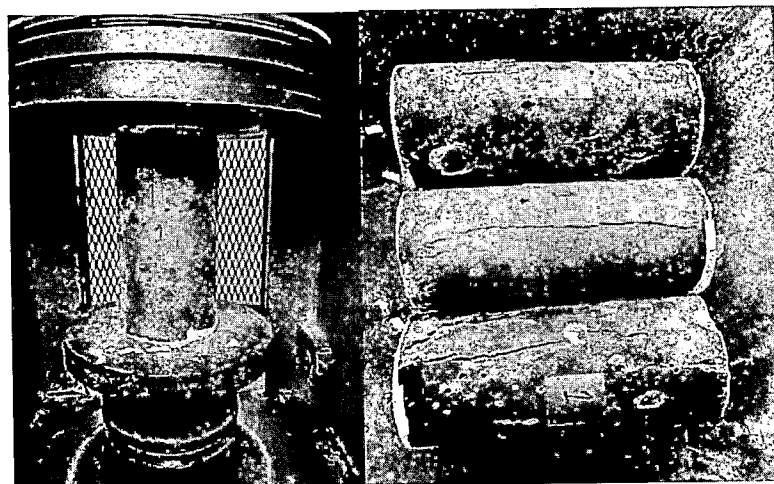
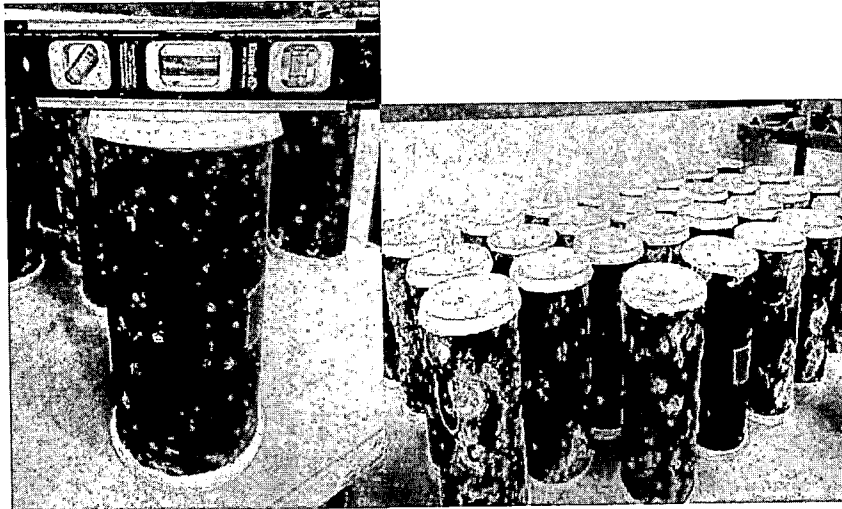
- (1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- (2) เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- (3) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- (4) เติม กรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร รวมกับ H_2O_2 (สารละลาย 30%) ปริมาณ 3 มิลลิลิตร
- (5) ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่มีสารละลาย 0.05
- (6) บีเปตต์ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่ เอาไปไทเทรตด้วย เครื่องไทเทรตมี ด้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ

3.4.4 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี (รูปที่ 3.15) มาทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่อง (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 (รูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี



รูปที่ 3.16 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.4.4 วัดพื้นที่สนิมเหล็กและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมของเหล็กที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ โดยการวัดร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวเหล็กและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเกิดสนิมประกอบกับรูปภาพของเหล็กที่เกิดสนิม โดยมีขั้นตอนดังนี้

(1) นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³. ที่ผ่านการเจาะเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์มากคให้แตกด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 10 20 50 มม. มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต

(2) ทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กด้วยการทาบบนพื้นที่ผิวเหล็กที่เป็นสนิมลงบนกระดาษกราฟใสซึ่งทำเป็นช่อง 1×1 มม.². แล้วนับจำนวนช่องเพื่อหาพื้นที่ของสนิมเหล็ก

(รูปที่ 3.17)

(3) ถ่ายรูปการเกิดสนิมในแต่ละระยะหุ้มของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

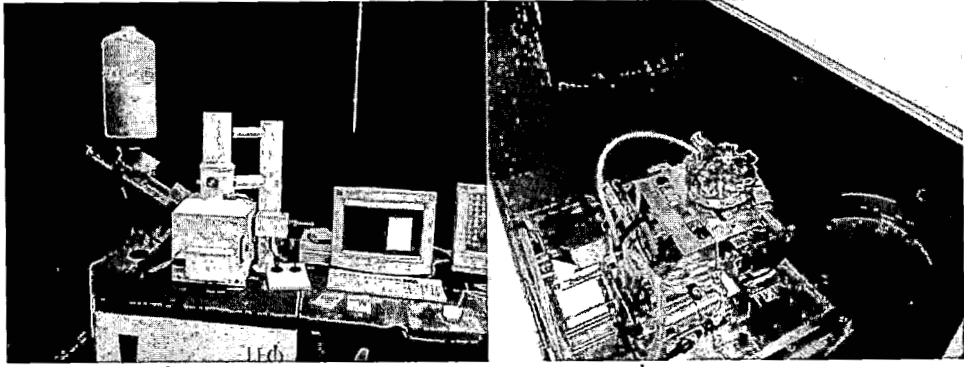
(4) ทำการชั่งน้ำหนักก่อนขัดและหลังขัดสนิมที่ผิวเหล็กเพื่อวัดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมเหล็ก



รูปที่ 3.17 การวัดปริมาณสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

3.4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและถ่ายภาพขยายกำลังสูงเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแร่และลักษณะรูปร่างของคอนกรีตด้วยเครื่อง X-Ray detector ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS) (รูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.18 การทดสอบโครงสร้างจุดภาคด้วยเครื่อง X-Ray detector

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต คุณสมบัติของน้ำทะเลที่นำตัวอย่างคอนกรีต ไปแช่ ตลอดจนวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และผลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียด ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์, การเกิดสนิมเหล็ก และการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 18 และ 3 ปี กำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDX) ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

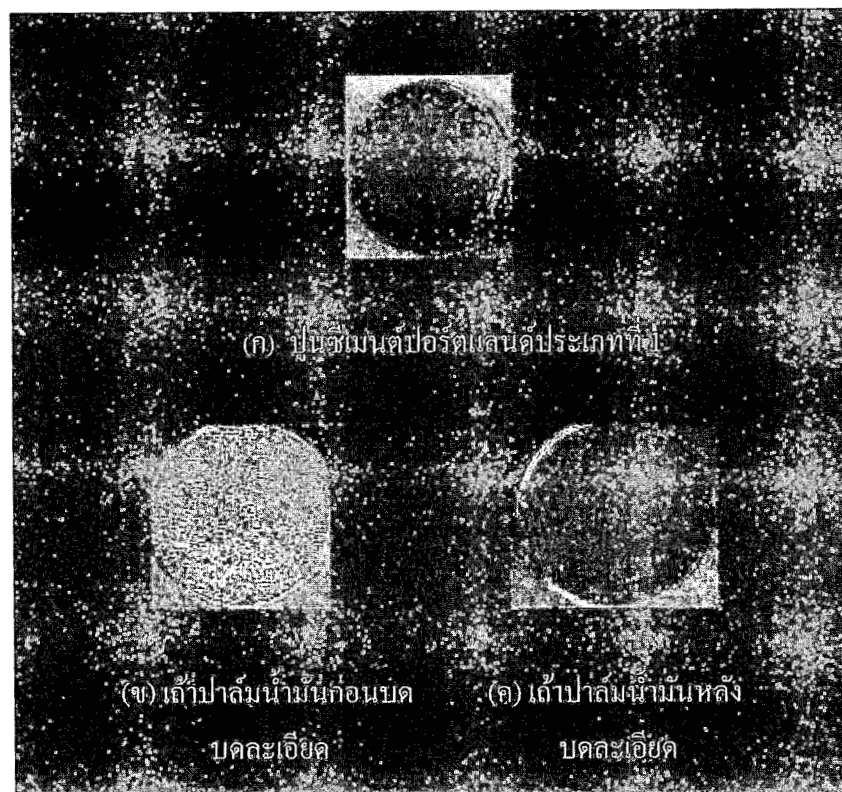
4.1 สมบัติของปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตโดยตรง เช่น ความสามารถในการเท ความต้องการน้ำ กำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตเป็นต้น

4.1.2 ลักษณะทั่วไป และสีของวัสดุ

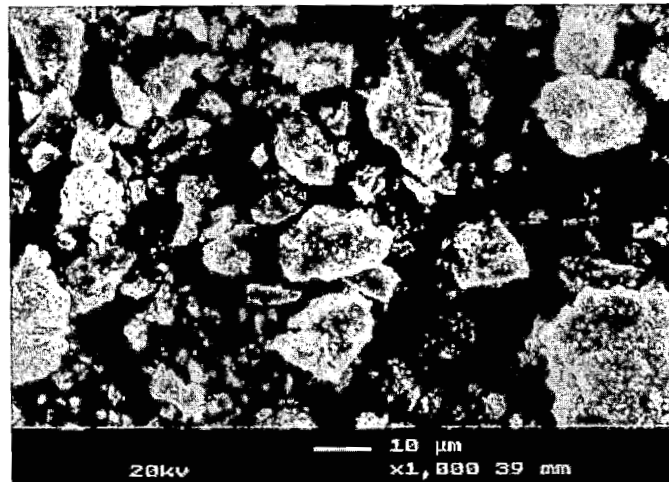
ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งฝุ่นและมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก (Lea, 1970) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดจะมีลักษณะค่อนข้างหยาบและมีบางส่วนที่ยังไม่ได้ถูกเผาปะปนโดยสีของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดจะมีสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่วนที่เป็นสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอนซึ่งเกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์แต่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดนั้นจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและมีสีเทาเข้มขึ้นเนื่องจากส่วนที่เป็นคาร์บอนนั้นได้ถูกบดไปพร้อมกับเนื้อของเถ้าปาล์มน้ำมัน (แสดงดังรูปที่ 4.1)



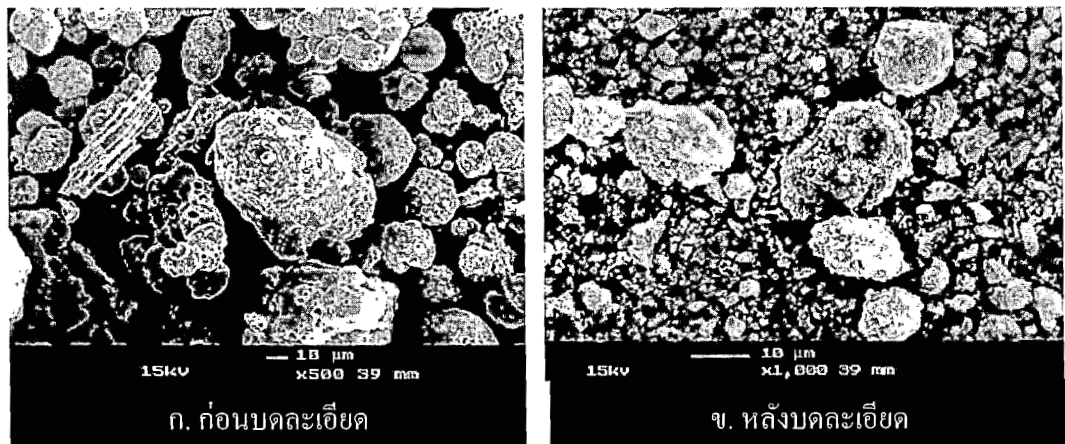
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เด้าปาล์มน้ำมันก่อนบดและหลังบดละเอียด

4.1.3 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สังเกตได้ว่ามีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ส่วนเด้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดละเอียด (รูปที่ 4.3 ก.) มีลักษณะค่อนข้างหยาบรูปร่างกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน พื้นที่ผิวขรุขระและขนาดไม่สม่ำเสมอและมีความพรุนค่อนข้างมาก สำหรับเด้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอนมีความพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเด้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดละเอียดและมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเด้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการบดละเอียด (รูปที่ 4.3 ข.)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์คือมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0 ถึง 3.20 (Lea, 1970) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านสรรพ ก้านบัวแก้ว (2552) พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงทั้งนี้เนื่องจาก เถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงมีความพรุนและมีโพรงอากาศภายในอนุภาคสูง แต่เมื่อผ่านการบดละเอียดแล้วทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันในรูปที่ 4.3

4.1.5 ความละเอียด

เก้าอี้ปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้มีน้ำหนักข้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 1.5 แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยมีอนุภาคเท่ากับ 10.1 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้คือ ไม่เกิน ร้อยละ 34

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เก้าอี้ปาล์มน้ำมันบดละเอียด (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

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี Cao เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 64.97 และมี MgO เท่ากับ 1.06 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 2.89 เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษามีค่าอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 150/C 150M สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาล์มน้ำมันจะมีปริมาณ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีประมาณร้อยละ 65.3 มีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ประมาณร้อยละ 69.7 มีค่า LOI ร้อยละ 10 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Tay (1990) ที่พบว่ามีปริมาณ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 34.3, 24.6, และ 14.9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเก้าอี้ปาล์มน้ำมันแต่ละแหล่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาต่างกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาล์มน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถจัดให้อยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ได้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (P)
Silicon dioxide	20.80	65.3
Aluminum oxide	5.50	2.5
Iron oxide	3.16	1.9
Calcium oxide	64.97	6.4
Magnesium oxide	1.06	3.0
Sodium oxide	0.08	0.3
Potassium oxide	0.55	5.7
Sulfur trioxide	2.96	0.4
Loss On Ignition	2.89	10.0

4.3 สมบัติของน้ำทะเล

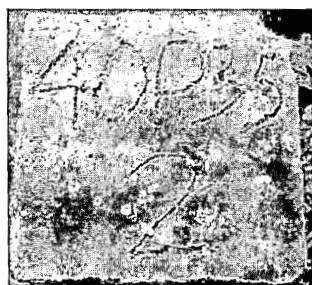
จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ในแต่ละช่วงเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสีมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อน ๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานว่า บริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.86-8.63 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป Thomas and Matthews (2004) นั้นคือปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,600 มก./ล. โดยพบว่า ปริมาณคลอไรด์จะมากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนด ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง นั่นคือ น้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา มีผลกระทบต่อคอนกรีตชั้นรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 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

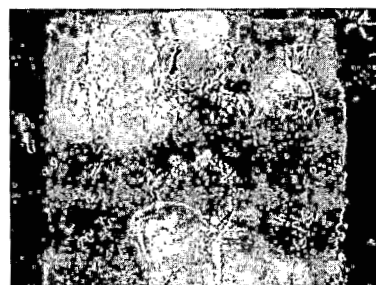
โดยปกติระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ชั้นลง 2 รอบภายใน 1 วัน คือ มีค่าระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้งและลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวลานั้นขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่นช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติและลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่บนสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมากหรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล

สภาพตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตหลังแช่สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน ส่งผลให้ผิวของคอนกรีตเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำออกเหลืองเขียวเล็กน้อยเท่านั้นดังรูปที่ 4.4 (ก) แต่เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปีดังรูปที่ 4.4 (ข) พบว่า สีของคอนกรีต มีสีดำออกเขียวเข้มขึ้นจาก 18 เดือน และพบว่า ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเริ่มเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น และมี หอย เปรียง และตะไคร่น้ำติดอยู่ตามผิวเท่านั้น อย่างไรก็ตามยังไม่พบคราบสนิมและรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีต



(ก) 18 เดือน



(ข) 3 ปี

รูปที่ 4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา (ก) 18 เดือน และ (ข) 3 ปี

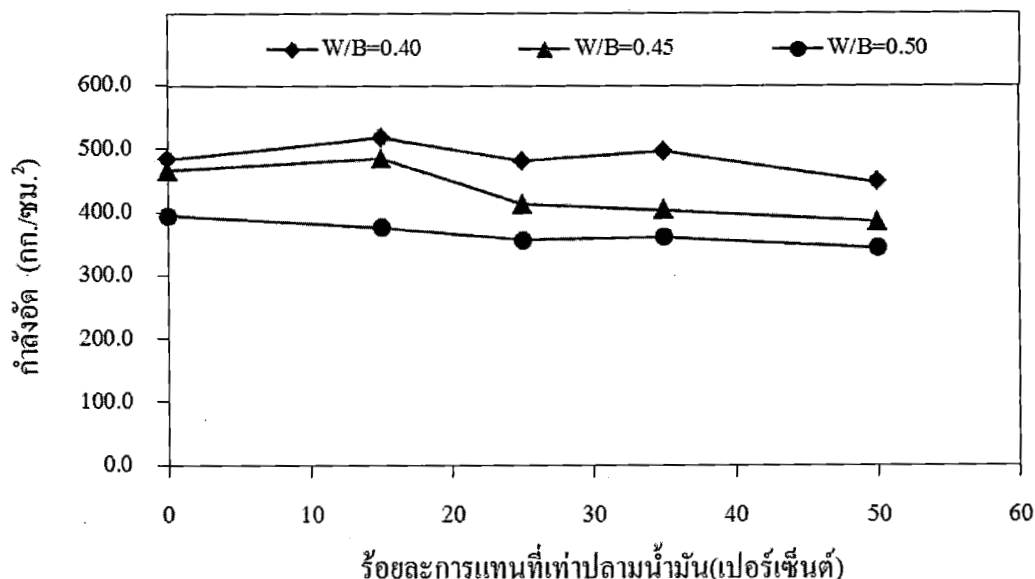
4.5 กำลังอัดของคอนกรีต

4.5.1 กำลังอัดคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.5 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน ไม่เกินร้อยละ 35 มีแนวโน้มกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 25 มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ (517 กก./ cm^2) ซึ่งเป็นผลจากเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าปลาล์มน้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ ของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง อาจเกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมาก ปริมาณ Ca(OH)_2 จึงเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ได้ ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง ส่วนกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่า การใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.50 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดทุกอัตราส่วนการแทนที่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยสังเกตจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 15 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา สรภพ ก้านบัวแก้ว (2552) ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันในปริมาณสูงจะมีค่าต่ำในระยะต้น โดยเฉพาะกลุ่มที่ใช้ปริมาณที่มากและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นเป็นต้น อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดทุกอัตราส่วนการแทนที่ ถึงแม้จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ถือได้ว่ามีค่าค่อนข้างสูงและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานน่าจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะยาวมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตทุกกลุ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามหลักของคอนกรีตเทคโนโลยีทั่วไป

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาที่อายุ 28 วัน และแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี

ส่วนผสมคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม ²)			
	บ่มน้ำประปา	แช่ในน้ำทะเล		ร้อยละกำลังอัดที่ 3 ปี
	28 วัน	18 เดือน	3 ปี	เทียบกับที่ 28 วัน
I40	483	491	495	102.5
I40P15	517	556	572	102.5
I40P15	480	494	510	102.5
I40P15	483	509	506	102.5
I40P50	480	461	466	102.5
I40	480	475	488	102.5
I40P15	480	497	519	102.5
I45P25	517	443	452	102.5
I45P25	483	419	421	102.5
I40P50	384	423	422	109.9
I40	384	404	366	92.9
I40P15	376	433	441	102.5
I40P15	517	383	392	102.5
I40P15	480	372	377	102.5
I40P50	342	368	366	102.5



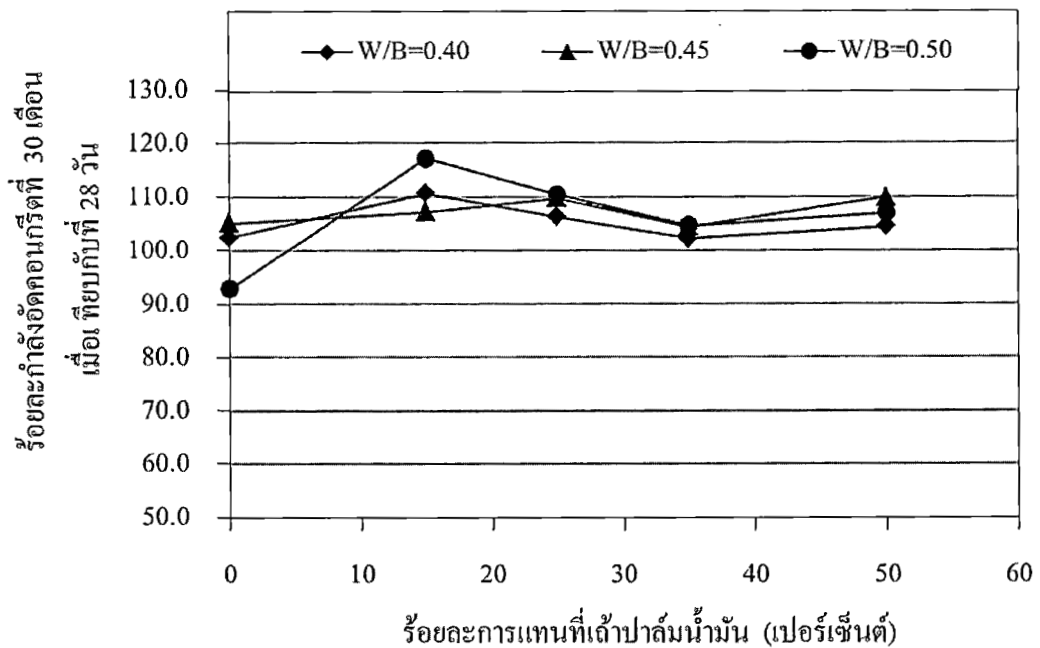
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนน้ำม้นต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน

4.5.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมอัตราส่วนน้ำม้นบดละเอียด

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือนดังตารางที่ 4.3 พบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ทั้งคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมอัตราส่วนน้ำม้น โดยคอนกรีตที่ผสมอัตราส่วนน้ำม้นร้อยละ 15 ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของควบคุมอย่างชัดเจน ซึ่งคอนกรีตที่ผสมอัตราส่วนน้ำม้นร้อยละ 15 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 18 เดือนเท่ากับ 556, 497 และ 433 กก./ซม² ตามลำดับ และคิดเป็นร้อยละกำลังอัดเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 101.7, 102.7, 115.2 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 18 เดือนเท่ากับ 491, 475 และ 404 กก./ซม². ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของอัตราส่วนน้ำม้นดังตารางที่ 4.2 พบว่า มีปริมาณ SiO₂ สูงถึงร้อยละ 65.3 ประกอบกับขนาดอนุภาคของอัตราส่วนน้ำม้นที่ผ่านการบดละเอียดจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น (Sata et. al, 2004) และ (Tangchirapat and Jaturapitakul, 2010) อีกทั้งยังพบว่า คอนกรีตที่ผสมอัตราส่วนน้ำม้นในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 มีกำลังอัดคอนกรีตต่ำที่สุดและมีแนวโน้มเดียวกันทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยที่อายุแช่น้ำทะเลที่ 18 เดือนผลของน้ำทะเลยังไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดคอนกรีตแต่อย่างใด เนื่องจากทุกส่วนผสมยังมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มจากที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณากำลั่งอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ดังตารางที่ 4.3 พบว่าคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45 มีกำลั่งอัดเท่ากับ 495 และ 488 กก./ซม². คิดเป็นร้อยละ 102.5 และ 105.2 เมื่อเทียบกับกำลั่งอัดที่ 28 วัน ซึ่งมีการพัฒนากำลั่งเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ขณะที่น้ำทะเลเริ่มส่งผลต่อกำลั่งอัดของคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ซึ่งพบว่ากำลั่งอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปีลดลง จากกำลั่งอัดที่ 28 วัน โดยคิดเป็นร้อยละ 92.9 ของกำลั่งอัดที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าน้ำทะเลส่งผลต่อคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ซึ่งเป็นผลจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีกำลั่งอัดสูงสามารถต้านทานการทำลายทางกายภาพได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีกำลั่งอัดที่ต่ำกว่าหรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า ตลอดจนการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเลทำให้เกิดการแตกร้าวและสูญเสียกำลั่งอัดอีกด้วย

เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลั่งอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ทุกส่วนผสมมีกำลั่งอัดเพิ่มสูงขึ้นจาก 28 วัน โดยการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นมีแนวโน้มให้การพัฒนากำลั่งอัดที่พิจารณาในรูปของร้อยละกำลั่งอัดที่แช่น้ำทะเล 3 ปีเทียบกับ 28 วันเพิ่มขึ้นและให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 มีร้อยละกำลั่งอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 3 ปีเทียบกับกำลั่งอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 105.2, 107.2, 109.7, 104.5, 109.9 ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่สามารถพัฒนากำลั่งอัดในระยะยาวให้มีค่าสูงขึ้นและการศึกษานี้ยังพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ถึงแม้จะมีกำลั่งอัดที่อายุ 28 วันต่ำ ที่สุดในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกันแต่การพัฒนากำลั่งอัดเมื่อเทียบกับกำลั่งอัดที่ 28 วัน มีค่าค่อนข้างสูงและสามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 ซึ่งมีค่าร้อยละอัดกำลั่งอัดหลังแช่น้ำทะเล 3 ปีเทียบกับ 28 วันเท่ากับ 107.0 ในขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่าร้อยละอัดกำลั่งอัดลดลง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 92.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำทะเลยังไม่ส่งผลกระทบต่อกำลั่งอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแต่อย่างใดถึงแม้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงถึง 0.50 ก็ตาม



รูปที่ 4.6 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปีเมื่อเทียบกับบ่มน้ำประปาที่อายุ 28 วัน

4.6 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด

ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4

4.6.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

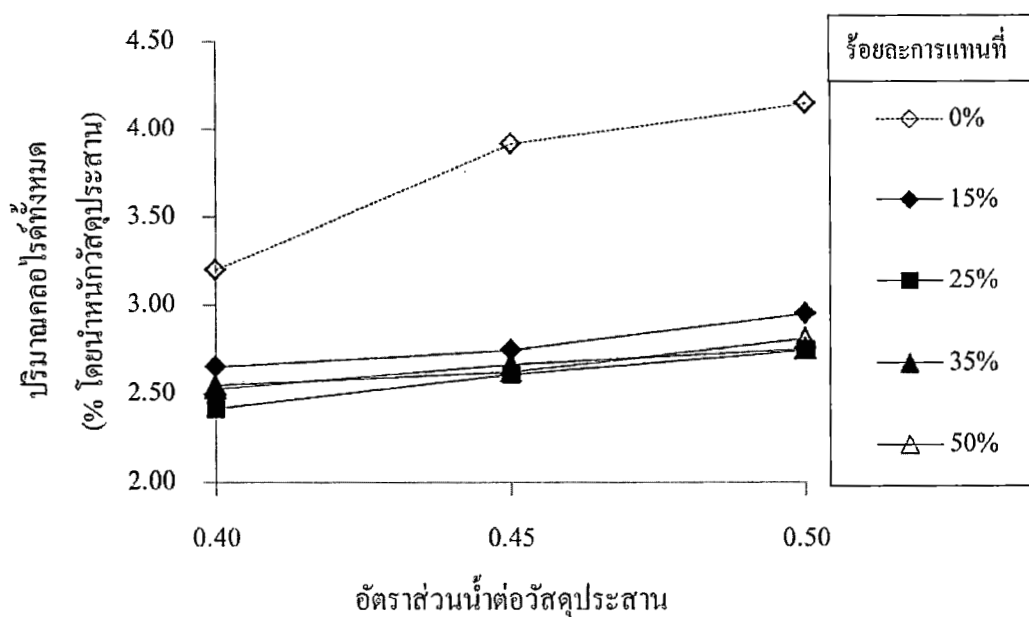
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 (ก), (ข), (ค) ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปีที่ความลึกต่างๆ กัน พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจนและให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทุกระดับความลึกและพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลให้ลดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.45 เป็น 0.40 ส่งผลให้ลดปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 15 มม. เท่ากับร้อยละ 0.71 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (โดยลดลงจากร้อยละ 3.91 ในคอนกรีต I45 เป็นร้อยละ 3.20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีต I40 ขณะที่คอนกรีตที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 โดย

น้ำหนักของวัสดุประสาน มีการลดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกดังกล่าว เพียงร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น โดยลดลงจากร้อยละ 2.62 ในคอนกรีต I45P50 เป็นร้อยละ 2.55 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีต I40P50 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากความที่บ้น้ำในคอนกรีตธรรมดาจะขึ้นกับกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าขนาดโพรงในคอนกรีตไม่ได้ขึ้นกับกำลังอัดเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผสมในคอนกรีตด้วย โดยขนาดโพรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลจากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับด่างในคอนกรีตและการดูดตัวทางกายภาพในช่องว่างคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา วิเชียรชาติ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ที่พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีความที่บ้น้ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง อีกทั้งในคอนกรีตธรรมดาความที่บ้น้ำในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน นอกจากคุณสมบัติด้านกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้ว คุณสมบัติด้านความที่บ้น้ำของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย (Chalee et. al, 2009)

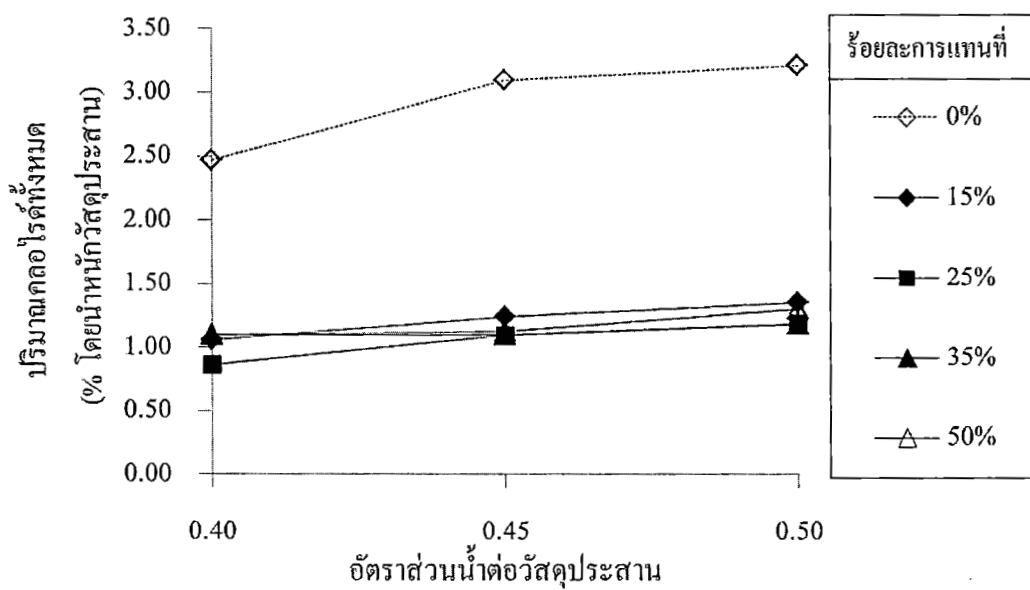
ตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี

ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)									
	แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน					แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี				
	5 มม.	15 มม.	25 มม.	35 มม.	45 มม.	5 มม.	15 มม.	25 มม.	35 มม.	45 มม.
I40	1.20	0.38	0.30	0.13	0.07	5.13	3.20	2.47	1.30	1.12
I40P15	1.00	0.18	0.14	0.10	0.05	4.62	2.65	1.06	0.60	0.51
I40P25	1.05	0.20	0.24	0.16	0.21	4.04	2.41	0.87	0.42	0.25
I40P35	0.23	0.08	0.04	0.04	0.02	4.50	2.53	1.09	0.51	0.59
I40P50	0.98	0.35	0.30	0.17	0.19	4.58	2.55	1.10	1.02	0.80

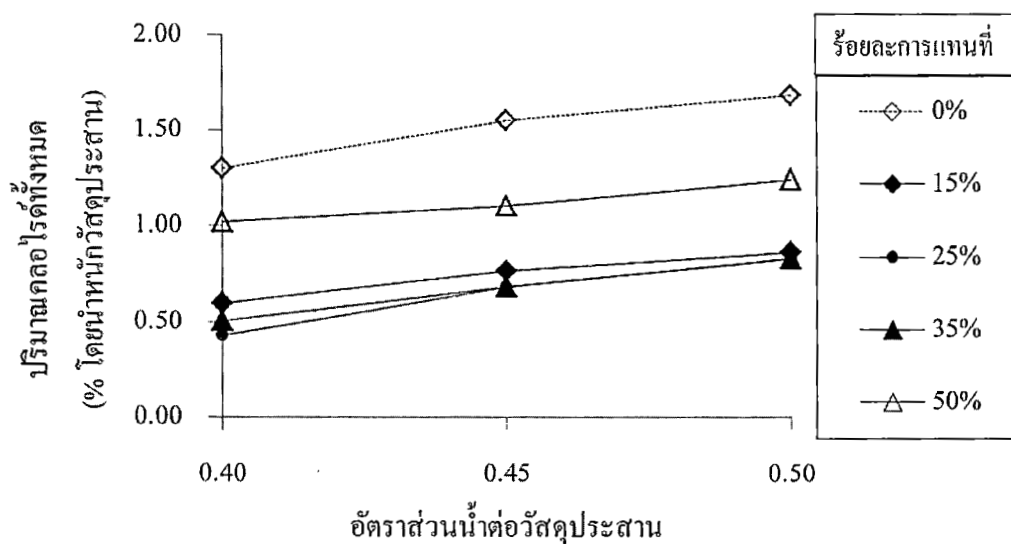
I45	1.51	0.70	0.55	0.13	0.05	5.11	3.91	3.10	1.55	1.37
I45P15	1.43	0.45	0.24	0.12	0.15	4.70	2.74	1.25	0.77	0.79
I45P25	1.01	0.37	0.13	0.10	0.06	4.22	2.61	0.86	0.59	0.65
I45P35	0.94	0.25	0.21	0.22	0.06	4.37	2.67	1.10	0.68	0.68
I45P50	1.52	0.50	0.31	0.11	0.16	4.44	2.62	1.12	1.10	0.82
I50	2.04	1.43	1.10	0.90	0.11	5.76	4.15	3.21	1.68	1.38
I50P15	1.73	0.65	0.42	0.10	0.05	4.93	2.95	1.35	0.86	0.84
I50P25	1.70	0.45	0.32	0.19	0.18	4.63	2.75	1.15	0.75	0.73
I50P35	1.85	0.53	0.39	0.13	0.10	4.65	2.75	1.19	0.83	0.69
I50P50	2.25	0.53	0.40	0.20	0.11	4.90	2.81	1.30	1.24	0.99



(ก) ความถี่จากผิวหน้าคอนกรีต 15 มม.



(ข) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 25 มม.

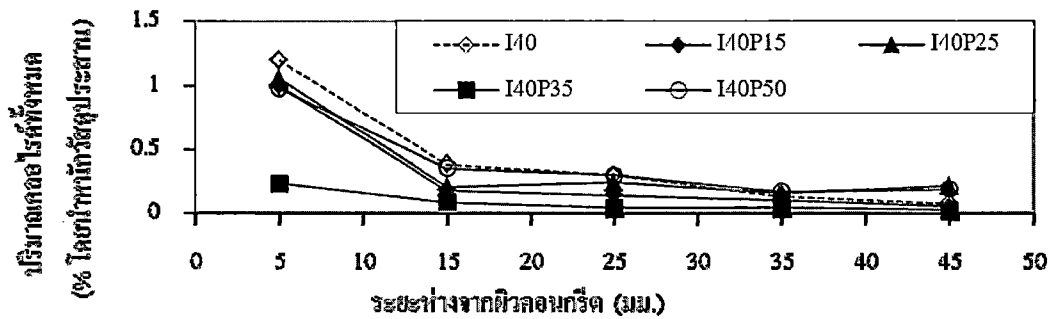


(ค) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 35 มม.

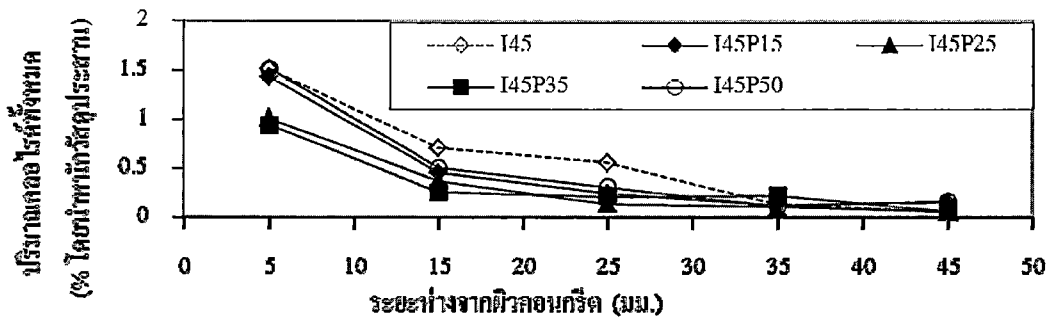
รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

4.6.2 ผลของการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

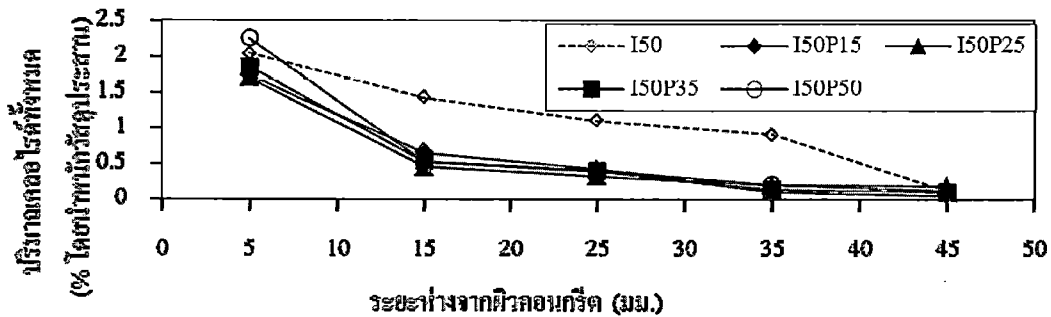
เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปลาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ พบว่าการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 15 มม. เท่ากับ ร้อยละ 3.20, 2.65, 2.41, 2.53, 2.55 และ 3.91, 2.74, 2.61, 2.67, 2.62 และ 4.15, 2.95, 2.75, 2.75, 2.81 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ สังเกตได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณค่อนข้างสูงในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 35 มีการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่เข้ามาอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีต ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ (Chindaprasirt et. al, 2007; Neville, 1996) โดยคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 18 ก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน เช่นที่ระดับความลึก 25 มม. จากผิวคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีการแทรกซึมของคลอไรด์เท่ากับ ร้อยละ 1.10, 0.42, 0.32, 0.39 และ 0.40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt et. al, 2007) ที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน พบว่าการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงมากๆ จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น นั่นหมายถึงความคงทนต่อสารเคมีที่เข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตน้อยลง แต่การแทนที่ในปริมาณ ที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลดีต่อคอนกรีต โดยลดการซึมผ่านของน้ำลง และดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกันโดยการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของน้ำหนัวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันจะให้ผลดีต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วย



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสมเท่ากับ 0.40

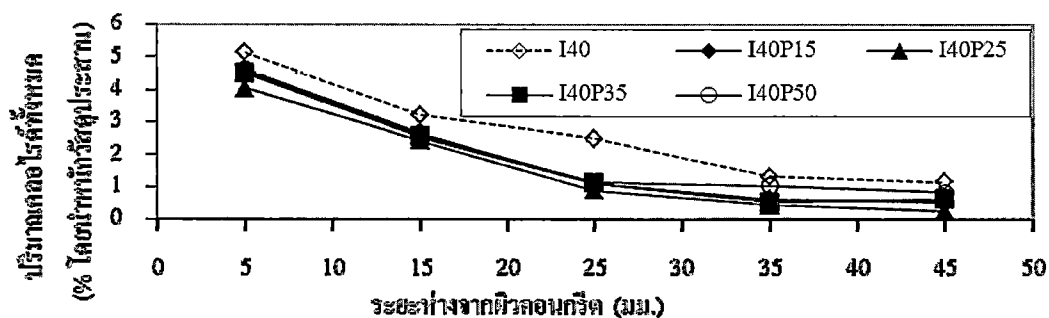


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสมเท่ากับ 0.45

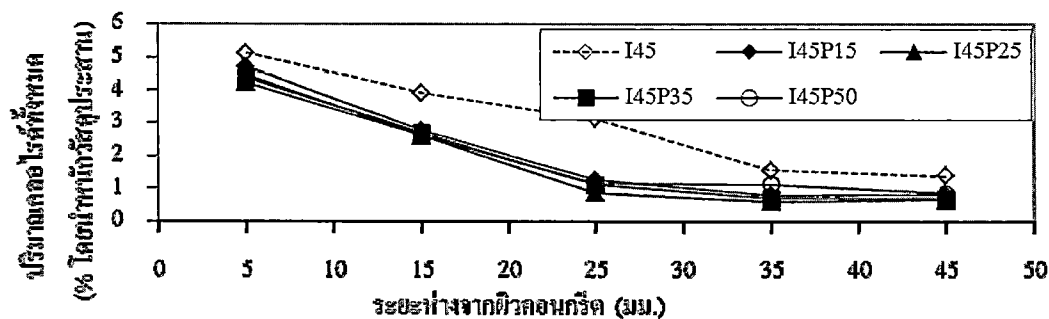


(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสมเท่ากับ 0.50

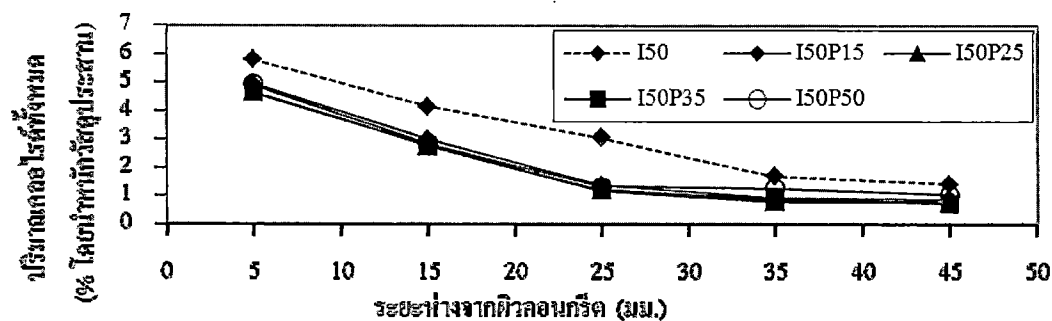
รูปที่ 4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 18 เดือน



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสมเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสมเท่ากับ 0.45



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสมเท่ากับ 0.50

รูปที่ 4.9 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

หลังจากทำการไทเทรตตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดด้วยกรด และคลอไรด์อิสระด้วยน้ำ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดได้ดังรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.11 ยกตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.10 (ก), (ข) และ (ค) ที่แสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 จะเห็นได้ว่า ปริมาณคลอไรด์อิสระเพิ่มขึ้นตามปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่มากขึ้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยสำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน แสดงดังสมการที่ 4.1 ถึง สมการที่ 4.5

$$\text{Free(Cl)} = [0.7133]\text{Total (Cl)}, \text{I40} \quad (4.1)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.6157]\text{Total (Cl)}, \text{I40P15} \quad (4.2)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.5778]\text{Total (Cl)}, \text{I40P25} \quad (4.3)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.6363]\text{Total (Cl)}, \text{I40P35} \quad (4.4)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.751]\text{Total (Cl)}, \text{I40P50} \quad (4.5)$$

สมการที่ 4.6 ถึง สมการที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

$$\text{Free(Cl)} = [0.7567]\text{Total (Cl)}, \text{I45} \quad (4.6)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.6797]\text{Total (Cl)}, \text{I45P15} \quad (4.7)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.6786]\text{Total (Cl)}, \text{I45P25} \quad (4.8)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.719]\text{Total (Cl)}, \text{I45P35} \quad (4.9)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.8177]\text{Total (Cl)}, \text{I45P50} \quad (4.10)$$

สมการที่ 4.11 ถึง สมการที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

$$\text{Free(Cl)} = [0.7916]\text{Total (Cl)}, \text{I50} \quad (4.11)$$

$$\text{Free(Cl)} = [0.7391]\text{Total (Cl)}, \text{I50P15} \quad (4.12)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.7166]\text{Total (CI)}, \text{I50P25} \quad (4.13)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.9796]\text{Total (CI)}, \text{I50P35} \quad (4.14)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.8273]\text{Total (CI)}, \text{I50P50} \quad (4.15)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ดังรูปที่ 4.11 (ก), (ข) และ (ค) ก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับ 18 เดือน ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยแสดงดังสมการที่ 4.16 ถึง สมการที่ 4.20 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40,

$$\text{Free(CI)} = [0.814]\text{Total (CI)}, \text{I40} \quad (4.16)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.709]\text{Total (CI)}, \text{I40P15} \quad (4.17)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.6664]\text{Total (CI)}, \text{I40P25} \quad (4.18)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.7315]\text{Total (CI)}, \text{I40P35} \quad (4.19)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.7664]\text{Total (CI)}, \text{I40P50} \quad (4.20)$$

สมการที่ 4.21 ถึง สมการที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

$$\text{Free(CI)} = [0.851]\text{Total (CI)}, \text{I45} \quad (4.21)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.7221]\text{Total (CI)}, \text{I45P15} \quad (4.22)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.657]\text{Total (CI)}, \text{I45P25} \quad (4.23)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.7156]\text{Total (CI)}, \text{I45P35} \quad (4.24)$$

$$\text{Free(CI)} = [0.8578]\text{Total (CI)}, \text{I45P50} \quad (4.25)$$

สมการที่ 4.26 ถึง สมการที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.8926]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{I50} \quad (4.26)$$

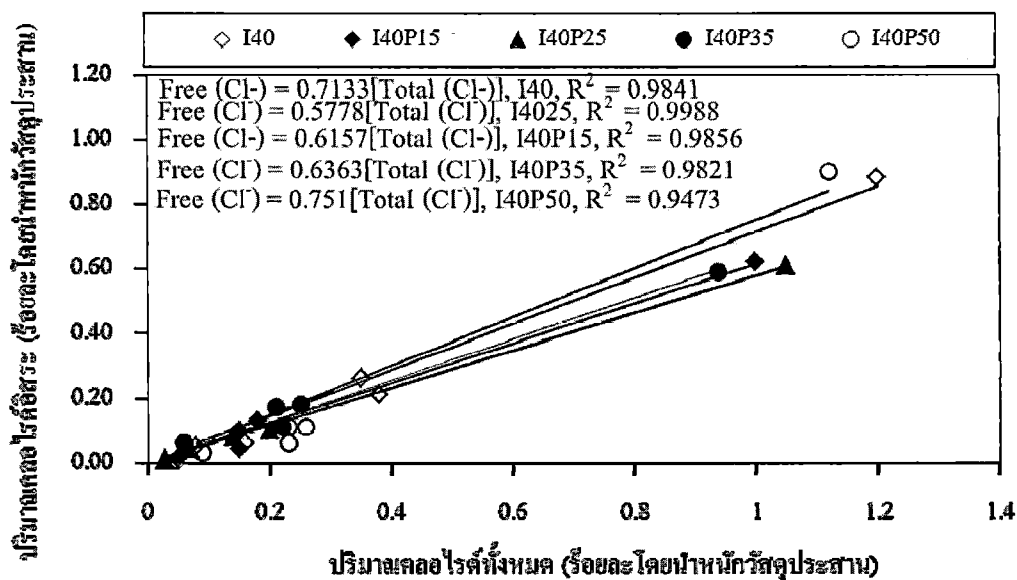
$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.8011]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{I50P15} \quad (4.27)$$

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.7486]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{I50P25} \quad (4.28)$$

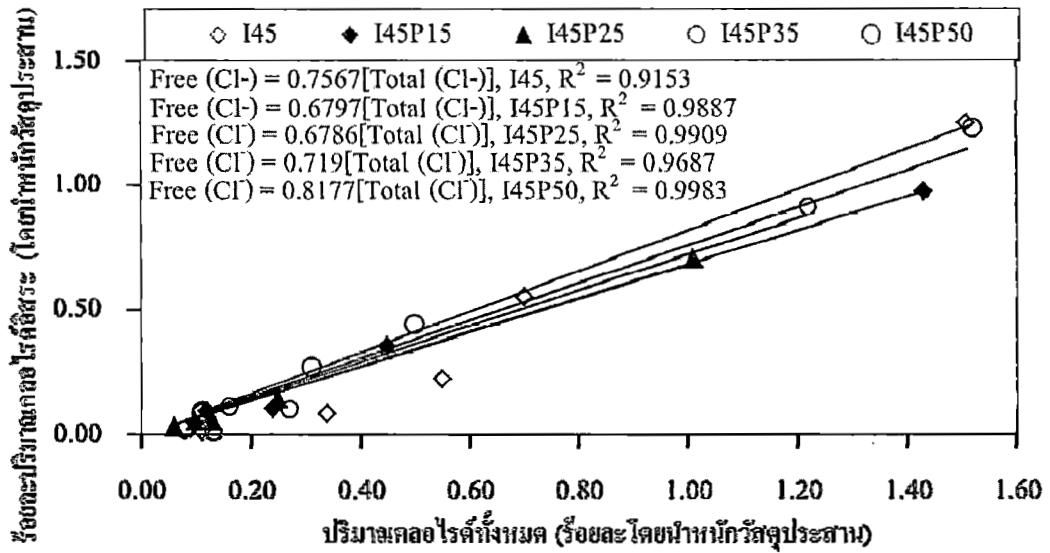
$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.8308]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{I50P35} \quad (4.29)$$

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.8830]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{I50P50} \quad (4.30)$$

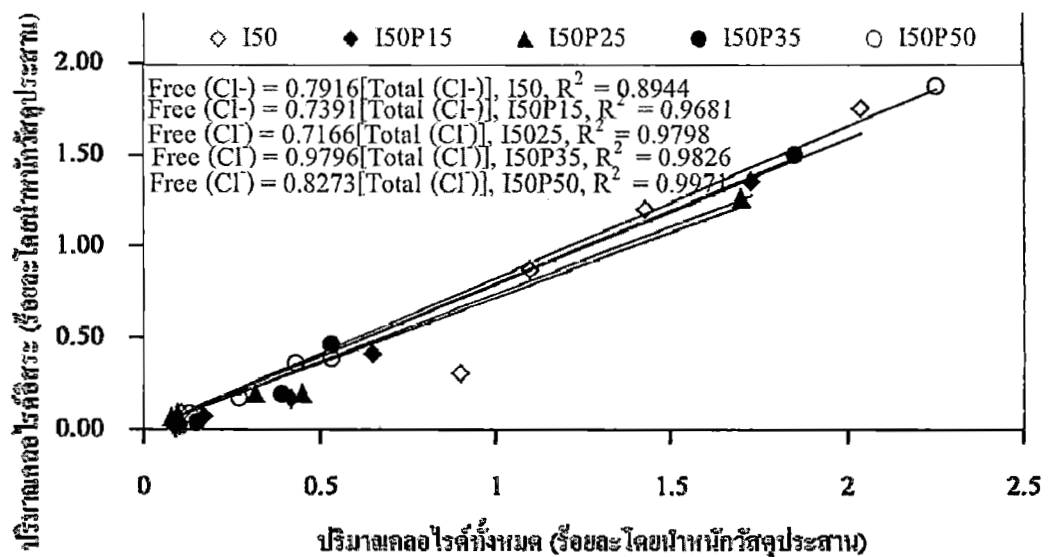
ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ จะสามารถช่วยให้หาปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตได้ง่ายขึ้นเนื่องจาก การทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำ ต้องใช้เวลาเพื่อให้คลอไรด์ละลายน้ำได้สมบูรณ์อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ทำให้เสียเวลาในการทดสอบ ดังนั้นการใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต จะสามารถทำได้ง่าย และเป็นประโยชน์ในการหาคลอไรด์อิสระ เพื่อทำนายสถานะการกัดกร่อนของคอนกรีตในระยะยาวได้ โดยไม่ต้องทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์อิสระให้เสียเวลานาน



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

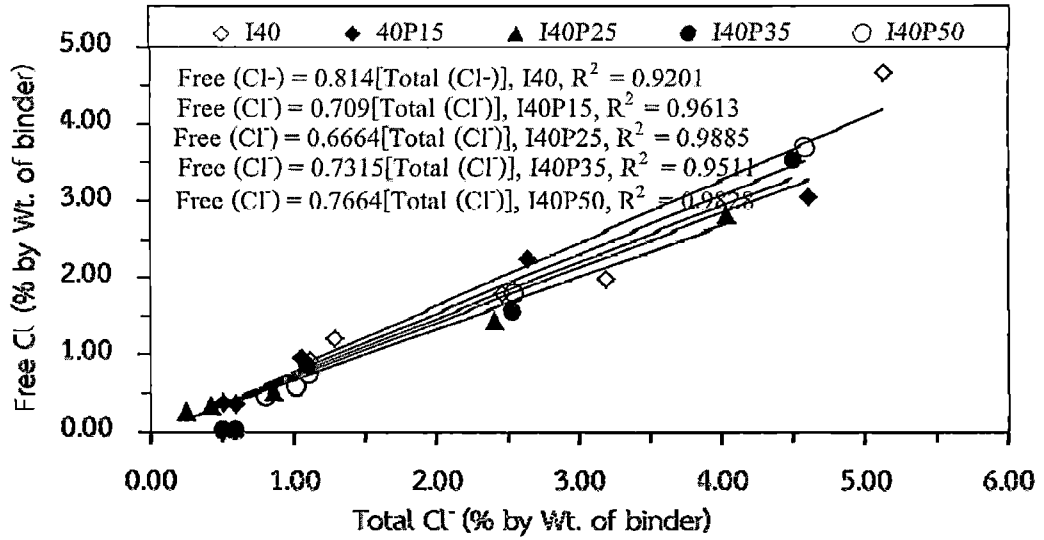


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

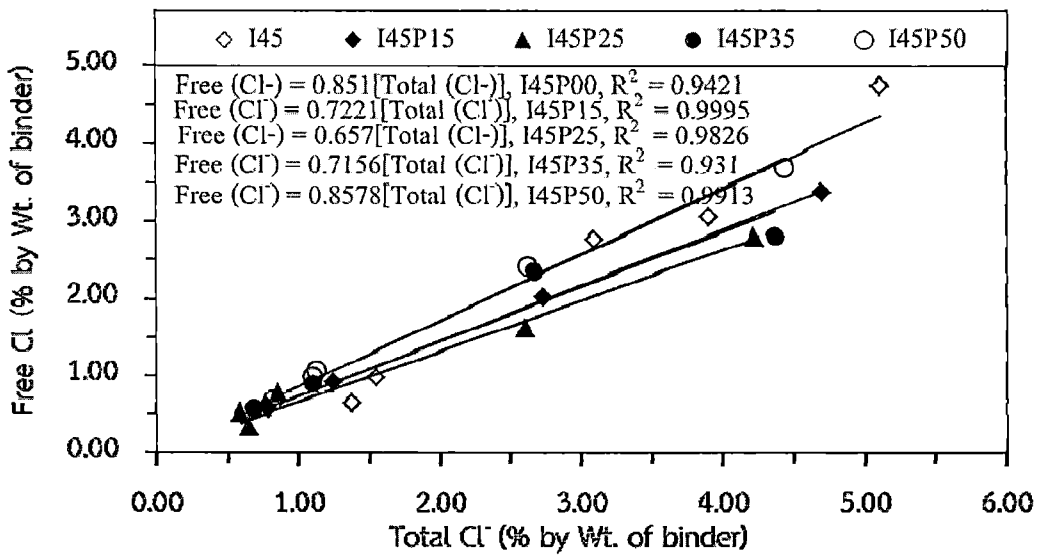


(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

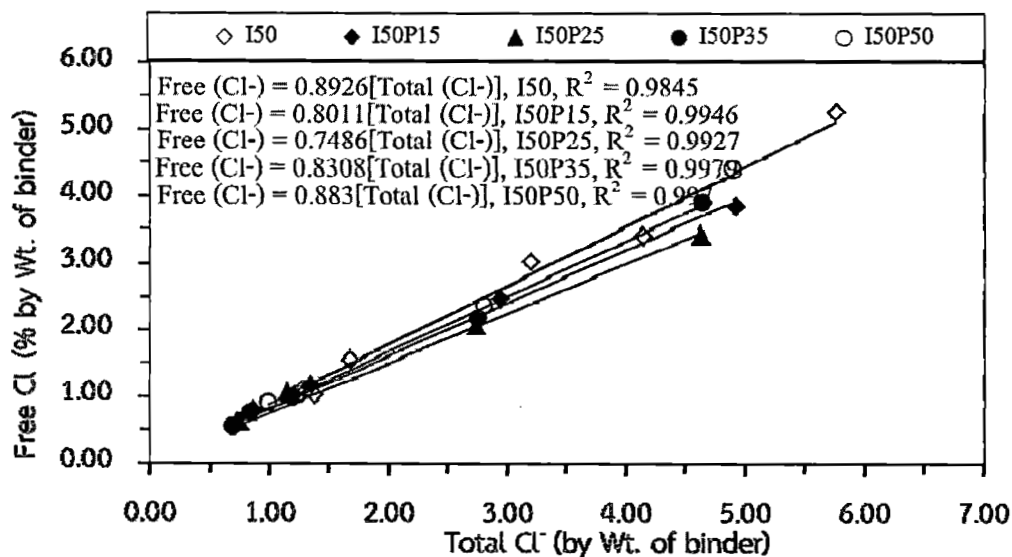
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระและปริมาณคลอรีนทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 18 เดือน



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

4.6.4 การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้ว การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต คำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในงานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในรูปแบบของร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ซึ่งเมื่อพิจารณา รูปที่ 4.10 ถึง 4.11 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์คิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ได้ ตัวอย่างเช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ [Free (Cl)] กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด [Total (Cl)] ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย คือ $Free(Cl) = [0.6664]Total (Cl)$, I40P25 สามารถคำนวณร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) หาได้จากสมการที่ 4.22

$$P_b = \frac{[Total(Cl^-) - Free(Cl^-)] \times 100}{Total(Cl^-)} \quad (4.31)$$

เมื่อแทนค่า Free (Cl) ในรูปฟังก์ชันของ Total (Cl) ในสมการที่ 4.22 จะสามารถคำนวณค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน ได้เท่ากับร้อยละ 42.22 ซึ่งการคำนวณร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมอื่นๆ ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี ก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน โดยผลการคำนวณดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี

ส่วนผสม	การกักเก็บคลอไรด์ ที่อายุ 18 เดือน (ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)	การกักเก็บคลอไรด์ ที่อายุ 3 ปี (ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)
I40	28.67	18.6
I40P15	38.43	29.1
I40P25	42.22	33.36
I40P35	36.37	26.85
I40P50	24.90	23.56
I45	24.33	14.90
I45P15	32.03	27.79

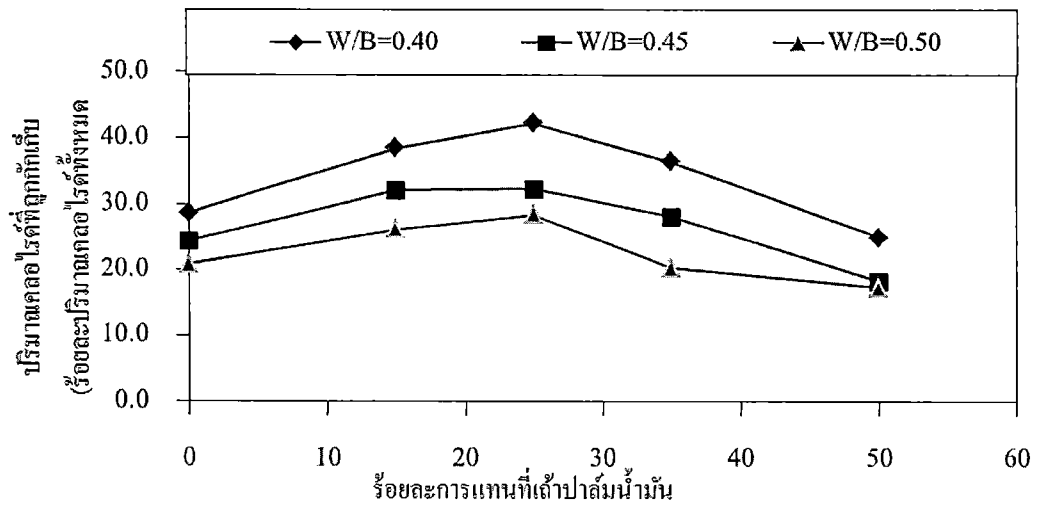
ตารางที่ 4.5(ต่อ) ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_c) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี

ส่วนผสม	การกักเก็บคลอไรด์ ที่อายุ 18 เดือน (ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)	การกักเก็บคลอไรด์ ที่อายุ 3 ปี (ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)
I45P25	32.24	34.00
I45P35	28.10	28.44
I45P50	18.23	14.22
I50	20.84	11.29
I50P15	26.09	19.89
I50P25	28.34	25.14
I50P35	20.24	16.92
I50P50	17.27	11.70

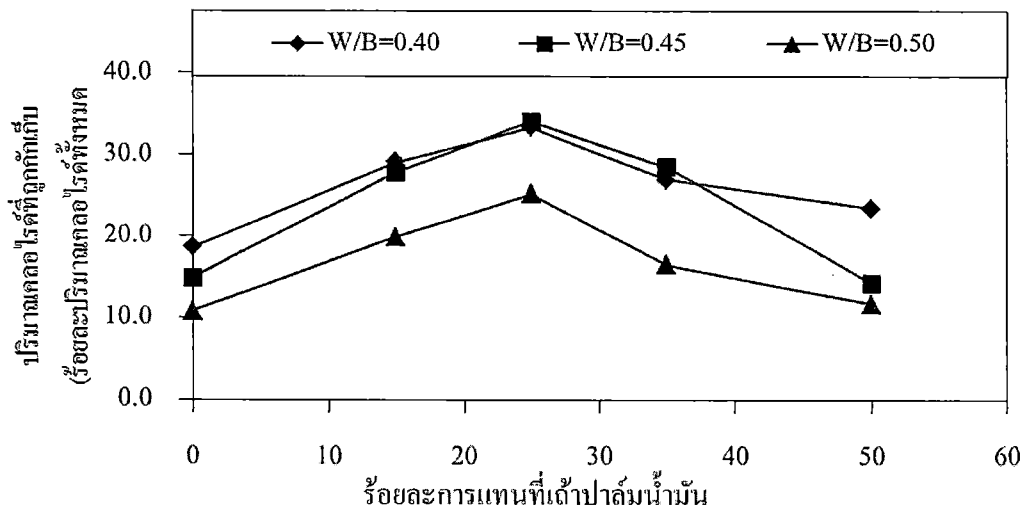
รูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 แสดงร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_c) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี ตามลำดับ พบว่า ค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_c) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากปริมาณของ SiO_2 ที่มีอยู่มากในเถ้าปาล์มน้ำมันและความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณเพิ่มมากขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ได้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตซึ่งเป็นการกักเก็บคลอไรด์

ทางกายภาพ (Physical binding) เพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลให้กำลังอัดและการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตลดลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำน้อย ทำให้ได้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้มีปริมาณ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ต่ำทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ลดลงและยังส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงด้วย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554) ที่พบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต และยังพบว่า การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) ส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง และยิ่งพบอีกว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

โดยทั่วไปแล้วการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต มีกลไกการกักเก็บใน 2 ลักษณะคือ การกักเก็บด้วยกลไกทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Products) เช่น การทำปฏิกิริยาเคมีกับ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเป็นแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) หรือเรียกว่า Friedel's salt และทำปฏิกิริยากับ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) เกิดเป็น แคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ ($3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งในเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ผสมในคอนกรีตมีปริมาณ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และ แคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ดังนั้น การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีต จึงไม่ส่งผลต่อการดักจับคลอไรด์ไอออน ที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้มากนัก อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์ไอออนอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ (Physical binding) โดยคลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราซ หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)



รูปที่ 4.12 ผลของเถ้าปล้มน้ำมันบดละเอียดต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_r) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 18 เดือน



รูปที่ 4.13 ของเถ้าปล้มน้ำมันบดละเอียดต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_r) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

4.7 สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตมาทำการกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดจนวิบัติ จากนั้นจึงเก็บแท่งเหล็กที่ฝังตามตำแหน่งระยะห่างจากผิวคอนกรีตต่างๆ มาทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิม และถ่ายรูปของแท่งเหล็กประกอบในการวิเคราะห์ผล จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักก่อนขัดสนิมและหลังขัดสนิมเพื่อทำการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมประกอบการพิจารณา

4.7.1 พื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมหลังแช่น้ำทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.14 ถึง 4.19 ที่แสดงสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน พบว่า พื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นเช่น คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10 มม. ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 19.64, 68.2 และ 100 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมดตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุต่ำจะมีความทึบน้ำมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนและเกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์และออกซิเจนสามารถซึมผ่านเข้าไปทำลายเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตได้ง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานยังผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีตและการจับตัวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าว มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดลดลงและปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเห็นผลได้อย่างชัดเจนในคอนกรีตควบคุมมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตธรรมดา ความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและกำลังอัดเป็นหลัก แต่ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นพบว่า ความทึบน้ำและขนาดโพรงในคอนกรีตไม่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรือกำลังอัดเท่านั้น แต่จะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผสมในคอนกรีตด้วย อีกทั้งยังพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมลดลง โดยให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทุกอัตราส่วนผสม

เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตพบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตที่สูงขึ้นส่งผลให้พื้นที่สนิมเหล็กที่ผิวเหล็กเสริมลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ยกตัวอย่างเช่น ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10 มม. พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำ

ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 68.2, 39.41, 8.2, 71.3 และ 78 ของพื้นที่ผิวเหล็กเสริมตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อแทนที่เข้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 มีพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจนถึงเหล็กเสริมและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ซึ่งจากผลการทดสอบปริมาณของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตนั้น มีค่าลดลงเมื่อแทนที่เข้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตเพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 ดังนั้นการใช้คอนกรีตที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 สามารถลดการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตลงได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

จากการศึกษานี้พบว่า คอนกรีตที่สามารถต้านทานการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมได้ดีคือ คอนกรีตที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เนื่องจากมีพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมน้อยที่สุดและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามที่ระยะแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ยังไม่สามารถเห็นผลการกัดกร่อนได้ชัดเจนมากนัก ซึ่งคงต้องมีการเก็บข้อมูลในระยะยาวต่อไปเพื่อดูแนวโน้มของการเกิดสนิมเหล็กที่ระดับความลึกที่มากขึ้น (20, 50 มม.) ให้สามารถยืนยันการนำไปใช้งานได้อย่างมั่นใจต่อไป

ตารางที่ 4.6 พื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี

ส่วนผสม	พื้นที่สนิมที่ผิวเหล็ก (ร้อยละ)					
	ระยะคอนกรีต		ระยะคอนกรีต		ระยะคอนกรีต	
	หุ้มเหล็ก 10 มม.	หุ้มเหล็ก 20 มม.	หุ้มเหล็ก 20 มม.	หุ้มเหล็ก 20 มม.	หุ้มเหล็ก 50 มม.	หุ้มเหล็ก 50 มม.
	18 เดือน.	36 เดือน.	18 เดือน.	36 เดือน.	18 เดือน.	36 เดือน.
I40	15	19.64	10.5	21.80	-	-
I40P15	-	-	-	-	-	-
I40P25	-	-	-	-	-	-
I40P35	2	24.60	-	-	-	-
I40P50	5	45.4	-	-	-	-
I45	43.55	68.2	22.77	27.9	-	-
I45P15	33.1	39.40	-	-	-	-

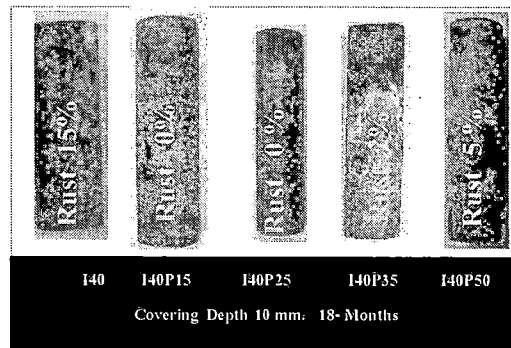
I45P25	7.25	8.2	-	-	-	-
I45P35	10.45	71.3	-	-	-	-
I45P50	30.22	78	-	-	-	-
I50	60.35	100	25.75	38	-	-
I50P15	45.72	53.1	-	-	-	-
I50P25	8	26	-	-	-	-
I50P35	37.64	100	-	2.3	-	-
I50P50	58.2	100	-	4.10	-	-

4.7.2 น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากสนิมเหล็ก

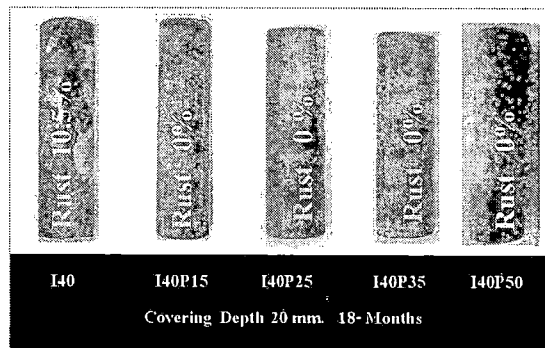
ตารางที่ 4.8 ที่แสดงน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี โดยเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักสนิมที่ผิวเหล็กเสริมพบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการเกิดพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมกล่าวคือ เมื่อพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเท่ากับร้อยละ 2.32, 1.72, 0.11, 2.38, และ 2.40 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งมีพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 68.2, 39.4, 8.2, 71.3, และ 78 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงถึงความสอดคล้องของปริมาณการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กและการกัดกร่อนและการกัดกร่อนผิวเหล็กที่สึกลงไป ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันและเป็นการยืนยันผลการทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริมได้ชัดเจนมากขึ้นว่า การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดสนิมที่ผิวเหล็กและการเกิดสนิมสึกลงไปจากผิว (Pitting corrosion) เป็นไปในทิศทางเดียวกัน จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Thomas, Matthews and Haynes กล่าวว่า น้ำหนักเหล็กที่สูญหายลดลงได้ด้วยการเพิ่มระยะหุ้มคอนกรีตที่มากขึ้นและบริเวณใกล้เคียงกับผิวหน้าคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนรอบการเปียกสลับแห้งของคอนกรีต ซึ่งจากผลการทดสอบที่อายุแช่พบว่า ที่ระยะห่างจากผิวคอนกรีตที่ระยะ 50 มม. ทุกอัตราส่วนผสม ยังไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากไม่มีการเกิดสนิมขึ้นที่บริเวณผิวเหล็กเสริม โดยจากการเก็บข้อมูลที่อายุแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี นั้นเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 35 สามารถต้านทานการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

ตาราง 4.7 น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 18 เดือน และ 3 ปี

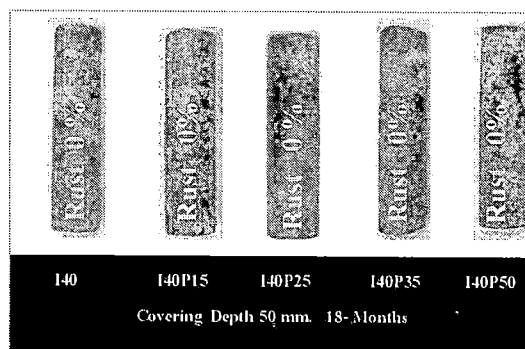
ส่วนผสม	น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากสนิมเหล็ก (%)					
	ระยะห่างจากผิว 10 มม.		ระยะห่างจากผิว 20 มม.		ระยะห่างจากผิว 50 มม.	
	18 เดือน.	36 เดือน.	18 เดือน.	36 month.	18 เดือน.	36 month.
I40	0.14	0.22	0.13	0.45	-	-
I40P15	-	-	-	-	-	-
I40P25	-	-	-	-	-	-
I40P35	0.03	0.46	-	-	-	-
I40P50	0.06	1.80	-	-	-	-
I45	1.84	2.32	0.35	0.51	-	-
I45P15	1.66	1.72	-	-	-	-
I45P25	0.98	0.11	-	-	-	-
I45P35	0.12	2.38	-	-	-	-
I45P50	1.57	2.40	-	-	-	-
I50	2.05	2.55	0.12	1.92	-	-
I50P15	1.87	1.96	-	0.06	-	-
I50P25	0.11	0.46	-	-	-	-
I50P35	1.72	2.47	-	0.03	-	-
I50P50	2.02	2.63	-	0.08	-	-



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.

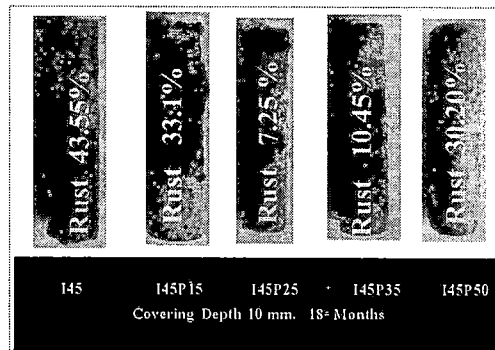


(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

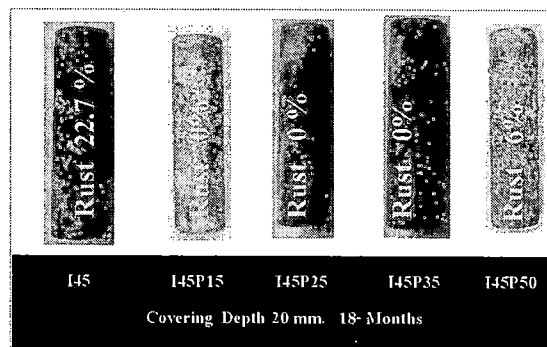


(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

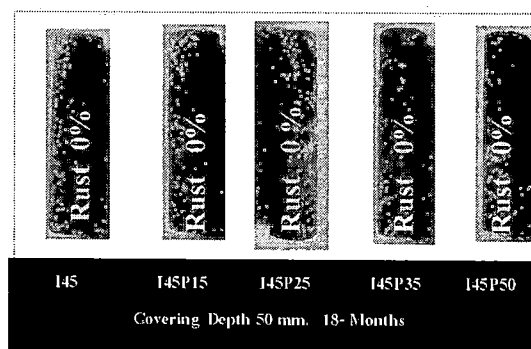
รูปที่ 4.14 สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.40 หลังจาก
แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 18 เดือน



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.

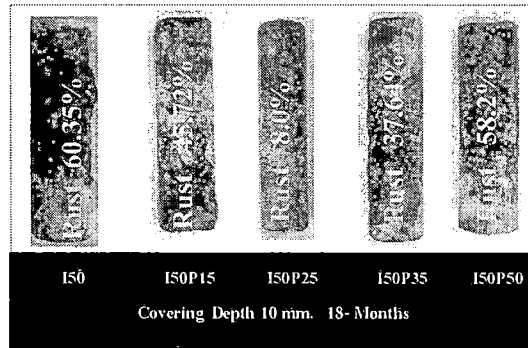


(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

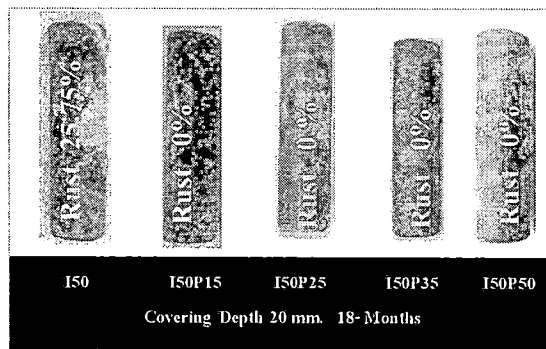


(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

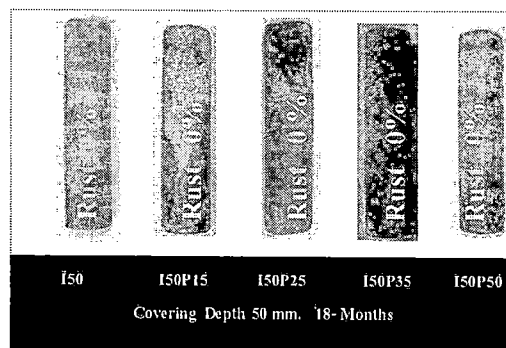
รูปที่ 4.15 สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังจาก
 แฉ่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 18 เดือน



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.

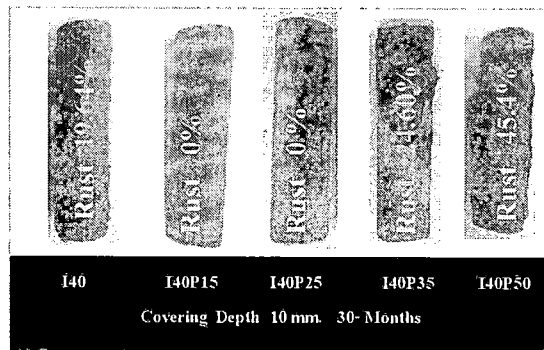


(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

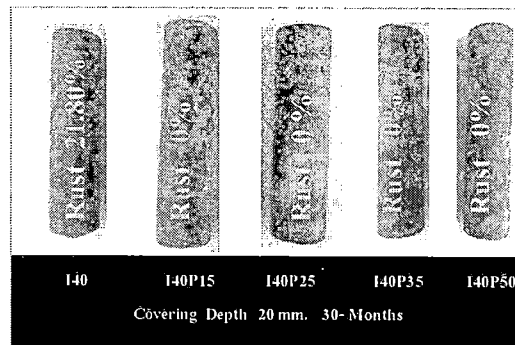


(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

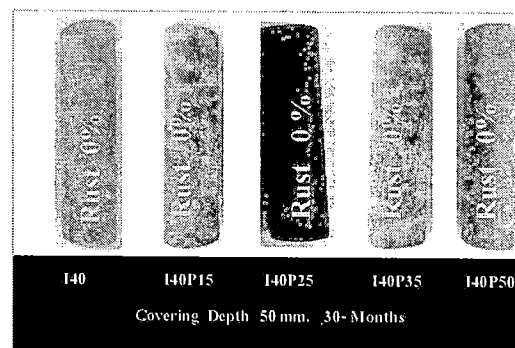
รูปที่ 4.16 สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.50 หลังจาก
 แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 18 เดือน



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.

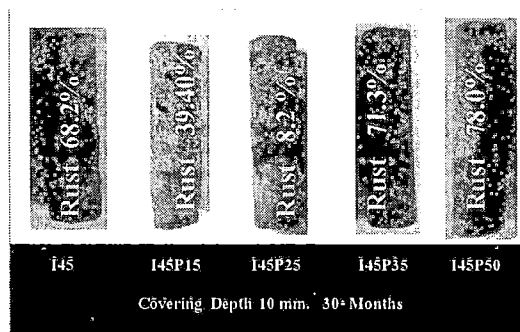


(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

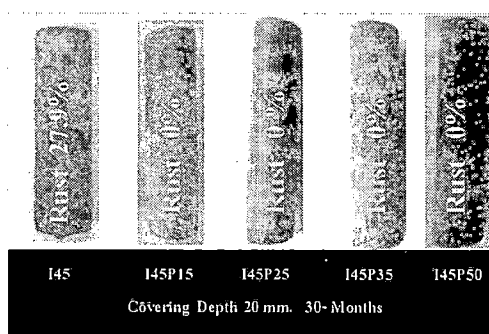


(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

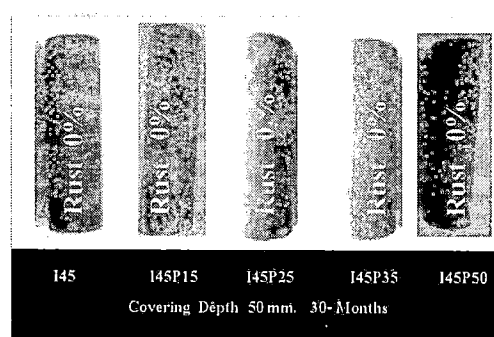
รูปที่ 4.17 สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.40 หลังจาก
แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.

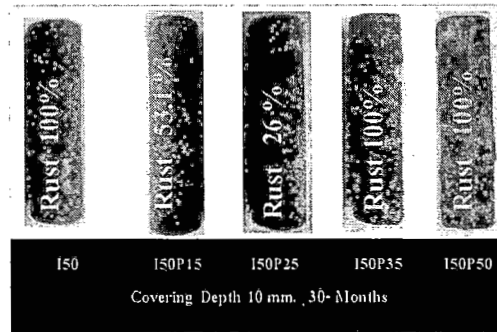


(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

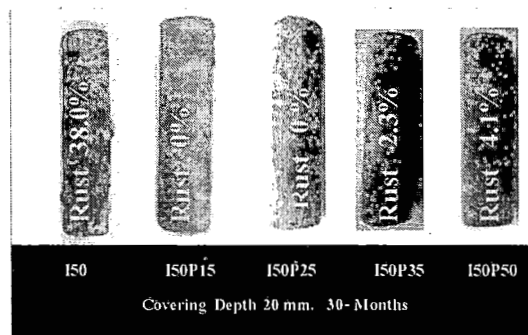


(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

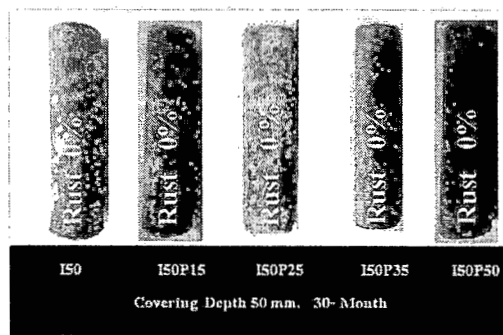
รูปที่ 4.18 สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังจาก
แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.



(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.



(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

รูปที่ 4.19 สนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มี W/B เท่ากับ 0.50 หลังจาก
 แฉ่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

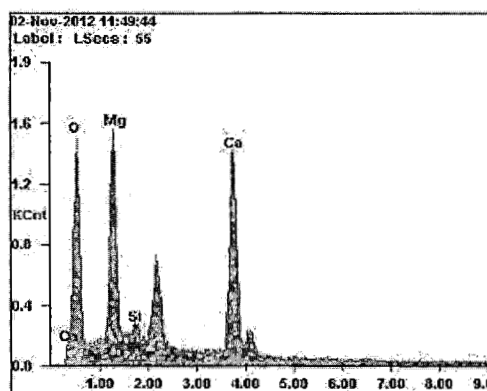
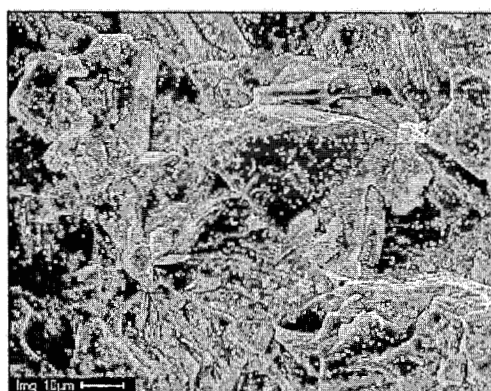
4.8 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปีพบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมี ซิลิกา, แคลเซียม และ ออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสังเกตได้ว่า เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านมา (วันโชค เครือหงส์ และคณะ, 2555) ที่พบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วยการแทนที่วัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 มีปริมาณแคลเซียมเท่ากับร้อยละ 26.5, 7.35, 2.18, 2.25 และ 25.94 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่า มีปริมาณ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 65.3 ซึ่งเมื่อซิลิกาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปฏิกิริยาปอซโซลาน) ทำให้ได้สารประกอบหลักที่ทำให้กำลังแก่คอนกรีตคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกจากความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ส่งผลให้กำลังอัดของเพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานแล้ว ผลของ Nucleation effect และการอัดแน่นของอนุภาค (Filler effect) ก็ช่วยให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นด้วย โดยผลของ Nucleation เกิดจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้เกิดการกระจายของเม็ดปูนซีเมนต์และทำให้เม็ดปูนซีเมนต์สัมผัสกันอย่างทั่วถึง และยังส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย (Gopalan, 1993) และ (Montgomery, Hughes, & Williams, 1981) การที่ปริมาณของแคลเซียมลดลง เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 35 เป็นผลจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาหรืออลูมินา จากเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น โดยที่การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานพบว่า ปริมาณแคลเซียมมีปริมาณมากขึ้นซึ่งอาจเป็นเพราะการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่การแทนที่ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตดังที่กล่าวมาข้างต้น และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 ถึง 4.24 ที่แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจะสังเกตได้ว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระละเอียดกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวและเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งอาจเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือเอทริงไคต์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน

จากผลการทดสอบ โครงสร้างจุลภาคและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งว่าให้แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัด, การแทรกซึมคลอไรด์ในและการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีต

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปล้ำมน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปีด้วยวิธี EDS

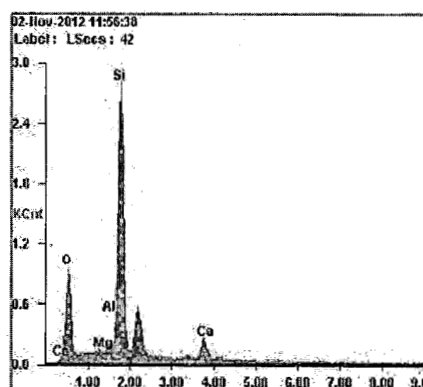
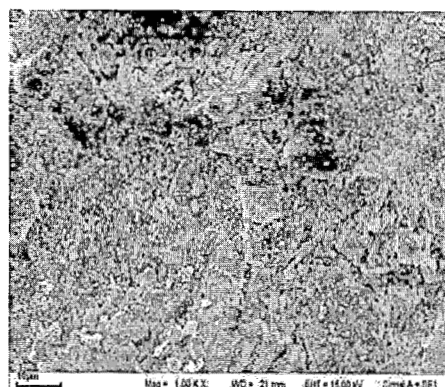
ส่วนผสม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)						Total
	O	Mg	Al	K	Si	Ca	
I40	52.67	18.8	-	-	2.03	26.5	100
I40P15	42.32	0.74	1.54	-	48.06	7.35	100
I40P25	43.97	0.7	1.15	-	52	2.18	100
I40P35	45.61	0.7	1.39	-	50.05	2.25	100
I40P50	48.18	14.4	2.1	1.39	7.99	25.94	100



(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

(ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS)

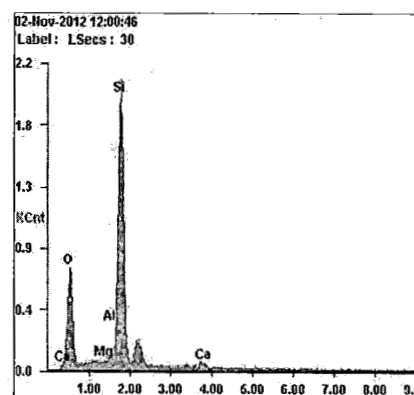
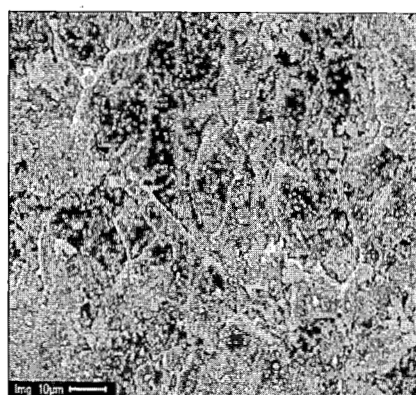
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

(ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS)

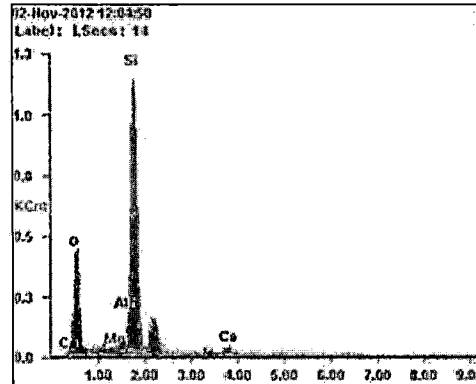
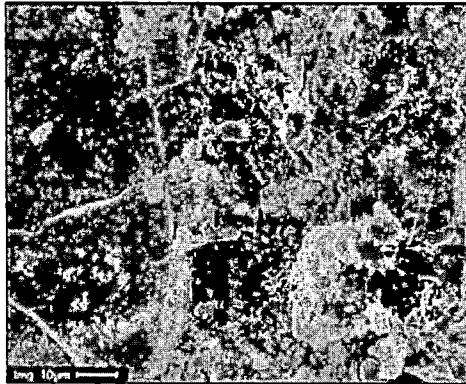
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

(ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS)

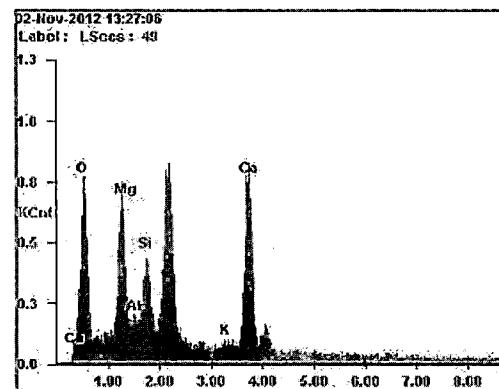
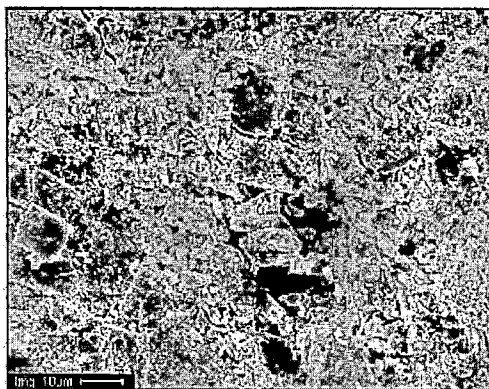
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

(ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้า
ปาล์มน้ำมันร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ
0.40



(ค) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

(ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS)

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้า
ปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ
0.40

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผล

5.1.1 การใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำสามารถเพิ่มกำลังอัดได้ โดยเห็นผลได้อย่างชัดเจนในคอนกรีตควบคุมมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยให้กำลังอัดสูงสุดในคอนกรีต I40P15 และกำลังอัดจะลดต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุ

5.1.2 การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ถึงแม้จะมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันต่ำ แต่สังเกตได้ว่าการพัฒนากำลังอัดเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน มีค่าค่อนข้างสูง

5.1.3 การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด

5.1.4 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์เมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 35 และ 50

5.1.5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 35 สามารถป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดีกว่า คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

5.1.6 การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น และเป็นแนวโน้มเดียวกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่มากขึ้น

5.1.7 จากการศึกษาที่สามารถสรุปได้ว่า ส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล คือคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เนื่องจากมีกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดสูงและยังสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี อีกทั้งยังส่งผลให้ลดการเกิดพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมได้ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการเก็บข้อมูลความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในระยะเวลาที่นานขึ้น เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ชัดเจนมากขึ้น ตลอดจนควรใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง มาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายสถานะการกัดกร่อน และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล

เอกสารอ้างอิง

- กิตติกร เจริญพร้อม เทียง ชิวเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี. (2554). การแทรกซึมของ
คลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล. *การ
ประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7*, จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคม
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทนของคอนกรีต
, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-72.
- จักพล กลั่นมันคง ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร. (2543). การศึกษาศักยภาพของเถ้า
ปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี*
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547). การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซ
โซลานในงานคอนกรีต. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2,*
เชียงใหม่, 17-22.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2549). ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของ
คลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและ
พัฒนา* 17(2), 19-25.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2552). การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต.
เอกสารประกอบการบรรยายวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 71-
79.
- ไชนันท์ รัตนโชตินันท์. (2548). การศึกษากำลั่งอัดและการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้า
ปาล์มน้ำมัน. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 5 - 6.
- ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง. (2547). การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน. *วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 37.
- ประเสริฐ วัฒนาเรืองสกุล. (2545). วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตการกักกรอง
เนื่องจากน้ำทะเลต่อกำลั่งอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ, *ปริญญา*

วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 12-13.

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

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

วชิรกรณ์ เสนาวัง และคณะ. (2554). ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อกำลังอัด อัตราซึมผ่าน
ของน้ำผ่านคอนกรีต และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต. *เอกสารการ
ประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7*, 19- 21 ตุลาคม 2554, MAT-144

วันโชค เครือหงส์ ชีรวัดน์ สิ้นศิริ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). การศึกษา
โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35 (2)

วันชัย สะตะ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2546). การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้า
แกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา* 4(2), 27-
32.

วิเชียร ชาลี และคณะ. (2007). ผลกระทบของน้ำทะเล ต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการ
กัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็น
เวลา 4 ปี. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 153-166

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสม
เถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 34 (3), 203-213

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* 7(1), 21-28.

วิเชียร ชาลี ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย สาสกุล. (2553). ผลของเถ้า
ถ่านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล.
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, จังหวัดเพชรบุรี, 40-48.

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะ
แวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน. *Burapha Sci. J.* 16 (2), 51-62

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา. (2537). การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเล
ตะวันออก, หน้า 55

- สรภพ ก้านบัวแก้ว. (2552). ผลกระทบของเถ้าแกลบ – เปลือกไม้และเถ้าปลาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
- สุรพันธ์ สุคันปรีย์, ชรินทร์ นมรักษ์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2545). การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปลาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต. *การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2545, กรุงเทพฯ, 191-199*
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.). (2550). แผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มปี 2551-2555, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.). (2555). เศรษฐกิจการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, หน้า 47.
- ศักดิ์ประยูทธ สินธุภิญโญ และ วุฒ จินตนาวัน. (2541). ความทนทานของคอนกรีต. *วารสารซีเมนต์สาร 2(1), 3-10.*
- 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.
- Biricik H., Akoz F., Berkay I., Tulgar A.N. (1999). Study of Pozzolanic Properties of Wheat Straw Ash. *Cement and Concrete Research* 29, 219-222.
- Broomfield J.P., (1997), Corrosion of Steel in Concrete : Understanding, Investigation and Repair, E&FN Spon, 1-238.
- Chandra S. and Ohama Y. (1994). Polymers in Concrete, CRC Press, 49-150
- 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., Chindaprasirt P. (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures* 22, 341-353.
- 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.
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C. and Sinsiri T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27, 425 -428.

- Chindaprasirt P., Rukzon S. and Sirivivatnanon V. (2008). Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash. *Construction and Building Materials* 22(5), 932-938.
- El-Hawary M., Al-Khaiat H. and Fereig S. (1998). Effect of Sea Water on Epoxy-repaired Concrete. *Cement and Concrete Composites* 20, 41-52.
- Elinwa A.U. and Mahmood Y.A. (2002). Ash from Timber Waste as Cement Replacement Material. *Cement and Concrete Composites* 24, 219-222.
- Fraay A.L.A., Bijen J.M. and Haan Y.M.D. (1989). The Reaction of Fly Ash in Concrete. A Critical Examination. *Cement and Concrete Research* 19(2), 235-246.
- Gopalan M.K. (1993). Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Materials Journal* 90(2), 591-603.
- Hansen T.C. (1990). Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes. *Cement and Concrete Research* 20(2), 193-196.
- 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.
- Jaturapitakkul C. and Cheerarot R. (2003). Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* 15, 48-54.
- Lea F.M. (1970). *The Chemistry of Cement and Concrete*. Edward Arnold Publishers. pp. 361, 414-423.
- Mather B. (1966). Effect of Seawater on Concrete, Highway Research Record, No. 113, pp. 33-42.
- Mehta P.K. (1977). Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash. *Journal of the American Concrete Institute* 74, 440-442.
- Montgomery D.G., Hughes D.C., and Williams R.I.T. (1981). Fly ash in concrete - a microstructure study. *Cement and Concrete Research* 11(4), 591-603.
- Neville A.M., (1996), *Properties of concrete*, 4th Edition. Longman, Malasia, pp. 563-575
- Paya J., Monzo J., Borrachero M.V. and Mora P.E. (1995). Mechanical Treatment of fly Ashes Part I : Physical-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes. *Cement and Concrete Research* 25, 1469-1479.

- 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.
- Suwanvitaya, P., Chindaprasirt, P. and Trinh Cao, H. (2000). Strategy for Protection of Marine Concrete Structures Against Corrosion of Steel Reinforcement. *Proceeding of The Second Asia/Pacific Conference on Durability of building Systems Harmonised Standards and Evaluation 2*, (1-1)-(1-15).
- 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 Engineering, 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.
- Thomas M.D.A. and Matthews J.D. (2004). Performance of PFA Concrete in a Marine Environment 10-year Results. *Cement and Concrete Composites* 26 (1), 5-20.
- Thomas T. (1989). Durable Concrete Structures. *Design Guide*, 2nd Edition. Comit Euro-International Du Beton. London, 79-83.
- Tangchirapat W, Khamklai S., Jaturapitakkul C. (2012). Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates. *Materials and Design* 41, 152 -157.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 1) PONHSAMPATEA LY กীরติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี. (2558). ผลของเก้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, ชลบุรี, 1-6.



ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์
ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล
Effect of palm oil fuel ash on chloride binding capacity
of concrete under marine environment

PONHSAMPATEA LY¹ กิรติกร เจริญพร้อม² เทียง ชีวะเกตุ³ และ วิเชียร ชาลี^{4*}

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (PF) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยคอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 0.45 และ 0.50 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ และบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 3 ปี ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ผลการวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 50 นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

คำสำคัญ: การกักเก็บคลอไรด์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, สภาวะแวดล้อมทะเล

Abstract

In this research, the effect of ground palm oil fuel ash (PF) and W/B ratios on chloride binding capacity of concrete under marine environment were studied. Control concretes were designed using Portland cement type I with

W/B ratios of 0.40, 0.45 and 0.50. Concretes containing PF were cast using PF to replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35, and 50% by weight of binder at the same W/B ratios of the control concretes. The 200x200x200-mm³ concrete cube specimens were cast. The specimens were cured in water for 28 days then were exposed to tidal zone of marine environment. After 3-year exposure in marine site, the specimens were tested for free chloride (acid soluble) and total chloride (water soluble) contents in the concrete. The results showed that the percentage of chloride binding capacity compared to total chloride content (P_b) increased with the increase of PF in the concrete as high as 25%. However, chloride binding capacity tends to decrease in concrete containing PF up to 50% cement replacements. Also, it was found that the decrease of W/B ratio resulted in the increase of P_b of concrete.

Keywords: chloride binding, palm oil fuel ash, W/B ratios, marine environment.

1. คำนำ

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากการเผาปาล์มเป็นเชื้อเพลิง มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีความพรุนสูง มีร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มากกว่าร้อยละ 34 ซึ่งไม่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานของ ASTM C618 [1] อย่างไรก็ตาม เถ้าปาล์มน้ำมันมีผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก ออกไซด์ (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) ประมาณร้อยละ 70 ซึ่งถือว่ามีความสูง และสามารถพัฒนาเป็นวัสดุปอซโซลานได้โดยการบดให้ละเอียด จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2, 3] พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดให้มี

อนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 ส่งผลดีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต การบดเจ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดสูงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สมบูรณ์มากขึ้น โดย Tangchirapat et al. (2009) [3] พบว่า การใช้เจ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตหลังแช่ในสารละลายซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้เจ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนเจ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีตเนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้ และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำมาก นอกจากนี้ กิรติกร และคณะ (2554) [4] ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้กรดเป็นตัวทำลายหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา แต่การแทนที่เจ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมาก (ร้อยละ 50) ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

การศึกษาด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านมา ได้มุ่งประเด็นไปที่ความคงทนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน หลังจากคอนกรีตสัมผัสกับชายฝั่งทะเลยังไม่พบข้อมูลการศึกษา ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้มุ่งประเด็นที่ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันหลังเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี เพื่อเป็นฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจากเจ้าชีวมวลให้มากขึ้น และสามารถยืนยันการนำไปใช้งานจริงให้ชัดเจน และน่าเชื่อถือมากขึ้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 [5] ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 และขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 25 ไมโครเมตร โดยแทนที่บางส่วนด้วยเจ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.1 ไมโครเมตร สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเจ้าปาล์มน้ำมัน พบว่า เจ้าปาล์มน้ำมันมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 69.7 โดยมีปริมาณของ SiO_2 ค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 65.3 ซึ่งส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีต ส่วนค่า LOI เท่ากับร้อยละ 10 ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 และมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม.

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (PF)
Silicon dioxide	20.80	65.3
Aluminum oxide	5.50	2.5
Iron oxide	3.16	1.9
Calcium oxide	64.97	6.4
Magnesium oxide	1.06	3.0
Sodium oxide	0.08	0.3
Potassium oxide	0.55	5.7
Sulfur trioxide	2.96	6.4
Loss On Ignition	2.89	10.0

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

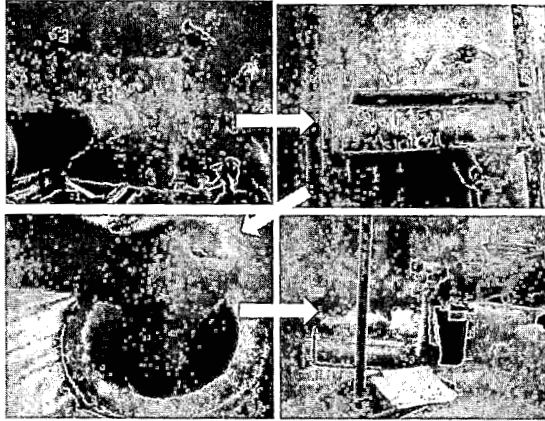
ตัวอย่างคอนกรีตที่ศึกษามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เจ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพนเตมลามีนฟอรามาติไฮด์คอนเดนเซต (Supper P.) ช่วยในการเพิ่มความสามารถได้ ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง (น้ำขึ้น-ลง วันละสองรอบ) สมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส [6]

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix	Mixture Proportion of Concrete (kg/m ³)					W/B	28-day compressive strength (ksc)
	Cement Type I	PF	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water		
I40	480	0	767	935	190	0.40	483
I40P15	405	70	767	910	190	0.40	480
I40P25	358	11	767	894	190	0.40	517
I40P35	310	16	767	875	190	0.40	495
I40P50	239	23	767	850	190	0.40	446
I45	425	0	767	979	190	0.45	464
I45P15	360	64	767	957	190	0.45	480
I45P25	318	10	767	938	190	0.45	412
I45P35	276	14	767	925	190	0.45	403
I45P50	212	21	767	903	190	0.45	384
I50	385	0	767	1012	190	0.50	394
I50P15	327	58	767	990	190	0.50	376
I50P25	289	96	767	978	190	0.50	355
I50P35	250	13	767	964	190	0.50	360
I50P50	193	19	767	944	190	0.50	342

2.3 การทดสอบ

หลังจากแช่ในน้ำทะเลครบ 3 ปี นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันทรงลูกบาทกึ่งมาเจาะบริเวณกึ่งกลาง และนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้ววัดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ตาม ASTM C 1152 [7] เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด นอกจากนั้นทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 [8] รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันที่อายุหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 2 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันไม่เกินร้อยละ 35 มีแนวโน้มกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 25 มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ (517 กก./ซม.²) ซึ่งเป็นผลจากเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้ดีและอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าปาล์ม น้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ ของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ [2] อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์ม น้ำมันในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง อาจเกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากปริมาณ Ca(OH)_2 จึงเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ได้ ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 483, 480, 517, 495 และ 446 กก./ซม.² ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่าการใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันผสมในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้

กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.50 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดทุกอัตราส่วน การแทนที่ที่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยสังเกตจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้สูงถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด (W/B=0.50) พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

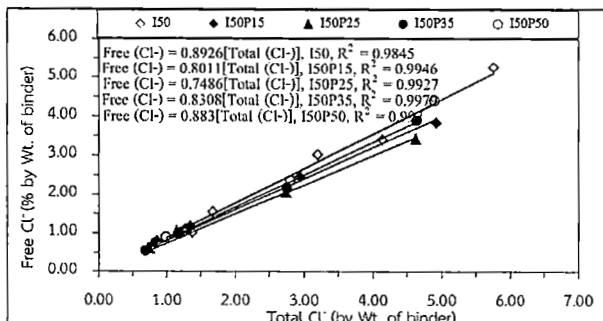
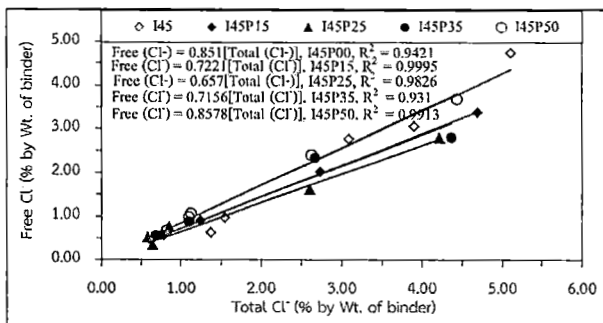
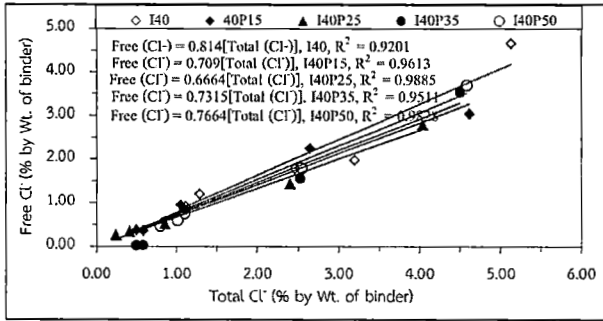
3.2 การหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมัน

โดยทั่วไปแล้ว การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต คำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในงานวิจัยนี้ได้หาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เหมือนกับวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [9] ซึ่งอยู่ในรูปแบบของร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) เมื่อพิจารณารูปที่ 2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ คิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ได้จากสมการที่ 1 เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Cl^-) กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Cl^-) ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย คือ $\text{Free}(\text{Cl}^-) = (0.6664)\text{Total}(\text{Cl}^-)$ สามารถคำนวณร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) หาได้จากสมการที่ 1

$$P_b = \frac{[\text{Total}(\text{Cl}^-) - \text{Free}(\text{Cl}^-)] \times 100}{\text{Total}(\text{Cl}^-)} \quad (1)$$

เมื่อแทนค่า Free Cl^- ในรูปฟังก์ชันของ Total Cl^- ในสมการที่ 1 จะสามารถคำนวณค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 หลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ได้เท่ากับร้อยละ 33.36 ซึ่งการคำนวณร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของ

คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมอื่นๆ ที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน



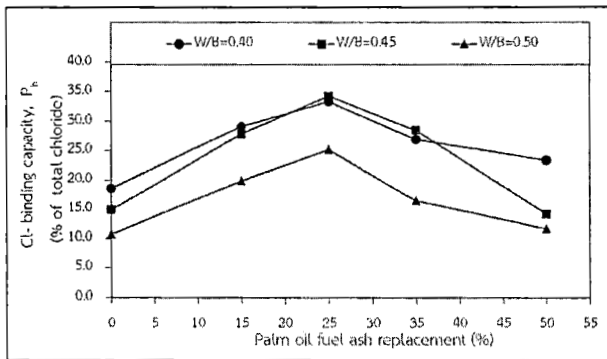
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

3.3 การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

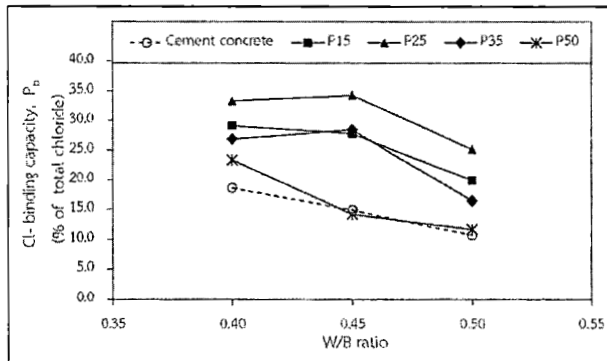
เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี ดังรูปที่ 3 พบว่า ค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับ ร้อยละ 18.60, 29.10, 33.36,

26.85 และ 23.36 ตามลำดับ ซึ่งในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอื่นก็ให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยทั่วไปแล้วการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต มีกลไกการกักเก็บใน 2 ลักษณะคือ การกักเก็บด้วยกลไกทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Products) เช่น การทำปฏิกิริยาเคมีกับ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) เกิดเป็นแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต (3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O) หรือเรียกว่า Friedel's salt และทำปฏิกิริยากับ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF) เกิดเป็น แคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ (3CaO·Fe₂O₃·CaCl₂·10H₂O) [10] ซึ่งในเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ผสมในคอนกรีตมีสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์เพียงร้อยละ 2.5 ซึ่งค่อนข้างต่ำ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีต จึงไม่ส่งผลต่อการดักจับคลอไรด์ไอออน ที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้มากนัก อย่างไรก็ตาม การดักจับคลอไรด์ไอออนอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ (Physical binding) โดยคลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม [10, 11] ดังนั้นการดักจับคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในครั้งนี้น่าจะเป็นผลจากการดักจับทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่ โดยปริมาณของ SiO₂ ที่มีอยู่มากในเถ้าปาล์มน้ำมันและความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่สามารถเข้าปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี จะได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นเจลแข็ง ทำให้สามารถดักจับคลอไรด์ทางกายภาพได้ดี ส่วนการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย ส่งผลให้ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ในเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เพียงพอ จึงมีผลให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ลดลงและการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตดังกล่าวลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำลง ดังที่กล่าวมาข้างต้น

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี ดังรูปที่ 4 พบว่า การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลของการดักจับคลอไรด์ทางกายภาพที่เกิดจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น มีเจลแข็งที่สามารถดักจับคลอไรด์ได้ดีขึ้น โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9, 11-13]



รูปที่ 3 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี

4. สรุปผล

- 1) ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์เมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 35 และ 50
- 2) การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น และเป็นแนวโน้มเดียวกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่มากขึ้น
- 3) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-25 ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นคอนกรีตก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากให้กำลังอัดที่สูงและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ที่สูงด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

[1] ASTM C618 - 12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02 2012.

[2] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, W. Tangchirapat and T. Saeting "Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash". *Construction and Building Materials*, 21, 2007, pp. 1399-1405.

[3] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasit "Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete". *Construction and Building Materials*, 23, 2009, pp. 2641-2646.

[4] กิรติกร เจริญพร้อม, เทียง ชิวเกตุ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ซาลี "การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล" *การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปีครั้งที่ 7*, 19-21 ตุลาคม 2554 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100.

[5] ASTM C150 / C150M - 12. Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01 2012.

[6] W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis". *Mater Design*, 3, 2010, pp. 1242-1249.

[7] ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02 2008.

[8] ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02 2008.

[9] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment". *Construction and Building Materials*, 24, 2010, pp. 1352-1357.

[10] A.M. Neville. *Properties of Concrete*. 4th ed., England, Addison Wesley, 1996.

[11] วิเชียร ซาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, "ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบเปลี่ยนไม่ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล", *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, พ.ศ.2554, หน้า 203-213

[12] Rui Luo, Yuebo Cai, Changyi Wang, and Xiaoming Huang "Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete". *Cement Concrete Research*, 33, 2003, pp. 1-7.

- [13] Hiroshi Hirao, Kazuo, Yamada, Haruka Takahashi, and Hassan Zibara "Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates". *J Adv Concrete Tech*, 3, 2005, pp. 77–84.

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2558A10802327 สัญญาเลขที่ 97/2558
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...วัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

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

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2558

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

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...320,500.....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2557...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...256,400.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2558.....

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

รวม ...576900.....บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	90,000	90,000	0
3. ค่าวัสดุ	121,000	121,000	0
4. ค่าใช้สอย	365,900	365,900	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	64,100	64,100	0
รวม	641,000	641,000	0

(ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน