

ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

PONHSAMPATEA LY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2559

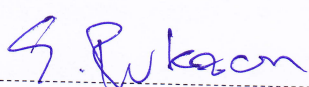
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

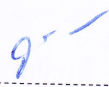
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ PONHSAMPATEA LY ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

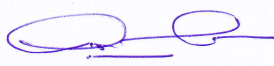
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. สำเริง รักซ้อน)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)


..... กรรมการ
(ดร. อมรชัช ใจยงค์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 30 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สำเริง รักซ้อน อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่เป็นประธานกรรมการของวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และวิจารณ์ผลงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ และ ดร. อมรชัย ใจยงค์ ที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบรวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ นอกจากนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากวิศวกรประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบต่าง ๆ เพื่อให้สำเร็จเป็นอย่างดี

เนื่องจกงานวิจัยและนิสิตได้ทุนการศึกษาจาก กองทุนของสมเด็จพระเทพแต่อาณาจักรกัมพูชา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จึงขอขอบพระคุณ ณ ตอนนีด้วยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ LENGSOVANNARA LY คุณแม่ THA RIN และพี่ ๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ Mr. LYNA PRAK รุ่นพี่นิสิตปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำปรึกษาในการเขียน แก้ไข ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการตลอดมา คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บุพการี บुरพอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

PONHSAMPATEA LY

57910052: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: เถ้าปาล์มน้ำมัน/ กำลังอัด/ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์/ การกัดกร่อนของเหล็กเสริม/ สิ่งแวดล้อมทะเล

PONHSAMPATEA LY: ความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (DURABILITY OF PALM OIL FUEL ASH CONCRETE UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วิเชียร ชาลี, พร.ด., 166 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดต่อกำลังอัด สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) และการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (ล้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5) เท่ากับ ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม. ที่มุมของตัวอย่างทดสอบ ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20 และ 50 มม. และได้หล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100×200 มม³ สำหรับทดสอบกำลังอัด หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง และเก็บตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี นอกจากนั้นได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี เพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในระยะยาว ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงขึ้นไปเกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าสูงขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดาว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนของแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์พบว่า ปริมาณคลอไรด์จากการทำนายมีค่าคลาดเคลื่อนในช่วงร้อยละ

57910052: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: CHLORIDE PENETRATION/ STEEL CORROSION/ PALM OIL FUEL ASH/
MARINE ENVIRONMENT/ COMPRESSIVE STRENGTH/
MICROSTRUCTURE

PONHSAMPATEA LY: DURABILITY OF PALM OIL FUEL ASH CONCRETE
UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT. ADVISORY COMMITTEE:
WICHIAN CHALEE, Ph.D., 166 P. 2016.

The objective of research is to investigate the effects of Palm Oil Fuel Ash on compressive strength, Chloride Diffusion Coefficient (D_c), and steel corrosion of concrete after being exposed to the marine environment for 5 years. Water-to-binder ratios (W/B) were carried at 0.40, 0.45 and 0.50. Palm oil fuel ash (the particles retained on a sieve #325 \leq 1.5%) to partially replace portland cement type I at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by the weight of binder. The 200-mm concrete cube specimens were cast and steel bars with 12-mm diameter and 50 mm in length, were inserted with the covering depth of 10, 20 and 50 mm. Besides, the cylindrical specimens of 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for compressive strength test and then cured in fresh water for 28 days. Subsequently, the specimens were tested to determine the compressive strength, the total chloride contents, and the surface loss of steel corrosion after being exposed to tidal zone for 5 years. The results showed that chloride diffusion coefficient (D_c) and steel corrosion were clearly decreased with replacing palm oil fuel ash \leq 25% by weight of binder including the increased compressive strength. However, high volume of palm oil fuel ash replacement (up to 50% by weight of binder) did not well prevent the chloride resistance and steel corrosion. Moreover, high volume of water-to-binder ratio increased the chloride diffusion coefficient (D_c) and this was shown clearer in normal concrete than palm oil fuel ash replacement concrete. Besides, the model for predicting chloride penetration showed that the predicted chloride concentration had margin of error within \pm 30%.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ปัญหาและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตการศึกษา.....	4
แนวทางการศึกษา.....	4
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	6
เจ้าปาล์มน้ำมัน	6
สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเจ้าปาล์มน้ำมัน	9
วัสดุปอซโซลาน.....	11
ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน	11
ความเสียหายของน้ำทะเลต่อคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล.....	12
ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน.....	14
กลไกของการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์.....	15
การซึมผ่านของคลอไรด์	17
ประเภทของคลอไรด์ (Chloride)	18
ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	19
โครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	29
วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	29
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	32
การทดสอบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล.....	34
สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	39
4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	
สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์ม น้ำมันที่บดละเอียด.....	40
คุณสมบัติของน้ำทะเล.....	45
สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล.....	46
กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 5 ปี.....	47
การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสภาวะ แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	50
สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D _c).....	63
สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต.....	70
โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 5 ปี.....	76
การสร้างแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล.....	79
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	93
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	95
สรุปผลการทดลอง.....	95
ข้อเสนอแนะ.....	96

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก.....	105
ภาคผนวก ข.....	118
ภาคผนวก ค.....	121
ภาคผนวก ง.....	145
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	166

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	9
2-2 สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน.....	10
2-3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	11
3-1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	32
3-2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	33
4-1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน.....	43
4-2 คุณสมบัติของมวลรวม.....	43
4-3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	44
4-4 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณด้านหลัง โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา.....	46
4-5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และที่ แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	48
4-6 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	51
4-7 ร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ใน ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	61
4-8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ใน ทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	67
4-9 พื้นที่สนิมเหล็ก (A) ที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	70
4-10 น้ำหนักที่สูญหาย (WL) เนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำ ทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	71
4-11 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ใน สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ด้วยวิธี EDS.....	79
4-12 สัมประสิทธิ์ β	89
4-13 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต.....	90

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ภาพปาล์มน้ำมันและเก้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผา.....	6
2-2 แผนภาพแสดงการแบ่งส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสคลอไรด์ในทะเล.....	13
2-3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต.....	15
2-4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณของปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ปล่อยทิ้งไว้ในบริเวณน้ำขึ้นลงในทะเล.....	17
2-5 Scanning Electron Microscope.....	21
2-6 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จาก EDX ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว.....	22
3-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3-2 ตำแหน่งที่ฝังเหล็กในคอนกรีตที่ทดสอบที่อายุ 5 ปี.....	33
3-3 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี.....	34
3-4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต.....	35
3-5 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต.....	35
3-6 ตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	37
3-7 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	37
3-8 การวัดปริมาณสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต.....	38
3-9 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง (X-Ray-detector).....	39
4-1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เก้าปาล์มน้ำมันก่อนบดและหลังบดละเอียด.....	41
4-2 ภาพถ่ายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	42
4-3 ภาพถ่ายกำลังสูงของเก้าปาล์มน้ำมัน.....	42
4-4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่ผสมเก้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	47
4-5 ผลของเก้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	50
4-6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี.....	52
4-7 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเก้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี.....	56

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต ที่ผสมเจ้าปลาล์มน้ำมันที่แช่ในน้ำทะเลสถานะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี.....	59
4-9 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ผสมเจ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	62
4-10 ผลของเจ้าปลาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสม เจ้าปลาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	63
4-11 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D _c) ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปลาล์ม น้ำมันบดละเอียด เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	65
4-12 ผลของเจ้าปลาล์มน้ำมันต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D _c) ของคอนกรีต ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	68
4-13 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D _c) ของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	69
4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	70
4-15 ผลของเจ้าปลาล์มน้ำมันและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี.....	74
4-16 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	77
4-17 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเจ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	78
4-18 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเจ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	78
4-19 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเจ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	79
4-20 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเจ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-21 การหาค่า β และ C_0 ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี $W/B=0.40$, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0,15,25,35 และ 50 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน.....	82
4-22 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการแช่คอนกรีตใน สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 1, 1.5, 3 และ 5 ปี.....	93

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการออกแบบปฏิภาค ส่วนผสมคอนกรีตนอกเหนือจากคุณสมบัติเชิงกล เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือใกล้ชายฝั่งทะเล มักประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมี และปัญหาเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิม สาเหตุเหล่านี้เกิดเนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือต่าง ๆ ละลายอยู่ซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ คลอไรด์ และซัลเฟต ความทนทานคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมคอนกรีต คุณภาพงาน การบ่ม และระยะหุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น เนื่องจากเกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาอัตราการเคลื่อนตัวของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต จึงมีความสำคัญเพื่อให้สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้และเป็นประโยชน์ในการทำนายสถานะการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ในคอนกรีต

การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากโครงสร้างเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำทะเล มักมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีความทนทาน และสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตตลอดจนป้องกันการทำลายเนื้อคอนกรีต เนื่องจากเกลือซัลเฟตได้เป็นแนวทางที่ดีและก่อให้เกิดความประหยัดในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในอนาคต จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า (Chalee, Ausapanit, & Jaturapitakkul, 2010) การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลให้ผลดีและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กได้ยาวนานขึ้น ซึ่งถ้ามีการนำเอาปอชโซลานชนิดอื่น ๆ ที่มีมากในประเทศ โดยเฉพาะเถ้าชีวมวลที่เป็นผลมาจากการเผาเศษวัสดุทางเกษตรกรรมในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งมีสมบัติทางเคมีที่มีศักยภาพเป็นวัสดุปอชโซลานได้มาผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลน่าจะเป็นแนวทางที่ดี ที่ทำให้เกิดความประหยัดทั้งต้นทุน และค่าบำรุงรักษาโครงสร้าง ดังนั้นการนำเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นเถ้าชีวมวลชนิดหนึ่งมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้มีกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตในระยะยาวดีขึ้น การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (สรภพ ก้านบัวแก้ว, วิรัชชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดอัตราการ

แทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต นอกจากนี้ประเทศไทยมีปริมาณเถาปลาล์มน้ำมันเป็นปริมาณมาก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการประกอบการตัดสินใจเพื่อใช้คอนกรีตผสมเถาปลาล์มน้ำมัน ได้ดียิ่งขึ้น

ประเทศไทยมีการปลูกปลาล์มน้ำมัน เพื่อการพาณิชย์เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย จากข้อมูลแหล่งพัฒนาอุตสาหกรรมน้ำมันปี 2551-2555 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) พบว่าในประเทศไทย มีการปลูกปลาล์มน้ำมัน เพื่อการพาณิชย์ประมาณ 4 ล้านไร่ ซึ่งคิดเป็นปริมาณผลผลิต 9 ล้านตันต่อปี ส่วนเถาปลาล์มน้ำมัน เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปลาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปลาล์มเปล่าของผลปลาล์ม เขาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า “เชื้อเพลิงชีวมวล” มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ปลาล์มน้ำมันประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส เถาปลาล์มน้ำมันมีลักษณะ เป็นผลฝู่น้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย เถาปลาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้น มีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหา ในเรื่องการจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสถานะแวดล้อม เป็นต้น

ในปี 2555 ปลาล์มน้ำมันที่ผลิตได้ จำนวน 12.3 ล้านตัน และเป็นเถาปลาล์มน้ำมัน ที่ได้จากการบวนการผลิตกระแสไฟฟ้ามีประมาณ 320,000 ตันต่อปี (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2549; Tangchirapat, Saeting, Jaturapitakkul, Kiattikomol, & Siripanichgorn, 2007; จักพล กลั่นนันท, ดนัย สีนา และธนวัฒน์ โชคสว่างเนต, 2543) อย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าเถาปลาล์มน้ำมันสามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีได้ ซึ่งปัจจุบันวัสดุปอชโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย นั่นคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอชโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งกำลังอัด ความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เพราะวัสดุปอชโซลานมีราคาถูกกว่า

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นที่การศึกษาผลของการใช้เถาปลาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียด เอี่ยมมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสถานะแวดล้อมทะเล โดยทดสอบข้อมูลทางด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่สถานะเปียกสลับแห้ง ได้แก่ กำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 การเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเกิดสนิมที่ผิวเหล็ก การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และ ASTM C1218 ตามลำดับ การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝัง และการศึกษาโครงสร้างทาง

จุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy และ Energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS) เพื่อที่จะนำผลการทดสอบที่ได้มาศึกษากลไกการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันในระดับจุลภาคตลอดจนได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้เก็บที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี
2. เพื่อศึกษาผลของเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี
3. เพื่อศึกษาผลของเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี
4. เพื่อศึกษาผลของเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันหลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี
5. เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS)
6. เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของน้ำทะเลที่มีผลต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยมุ่งประเด็นไปที่คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ซึ่งอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยมีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกันกับคอนกรีตควบคุม ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ พร้อมทั้งฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20 และ 50 มม. และบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้ง หลังจากแช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี เก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 ทำการทดสอบการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ระยะหุ้มต่าง ๆ โดยทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมและวัดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็ก และปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมในคอนกรีต นอกจากนี้ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS) และใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 1, 1.5, 3 และ 5 ปี มาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาว

แนวทางการศึกษา

บทที่ 1 กล่าวถึง บทนำ วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

บทที่ 2 กล่าวถึง เถ้าปาล์มน้ำมัน สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมัน วัสดุปอชโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอชโซลาน ความเสียหายของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ การซึมผ่านของคลอไรด์ ประเภทของคลอไรด์ (Chloride) ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

บทที่ 3 กล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในการศึกษา เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา การทดสอบข้อมูลด้าน

ความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในคอนกรีต และวิธีการทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต วิธีการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM – EDS และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่ได้เก็บที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี ไปประกอบในการสร้างแบบจำลองบทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากการศึกษาในเรื่องคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด คุณสมบัติของน้ำทะเล สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 5 ปี การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี และการสร้างแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล ใช้ฐานข้อมูลของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้เก็บที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี ไปประกอบในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปและข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ ต่อการพัฒนาแนวทางในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้กับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

บทนี้กล่าวถึงเถ้าปาล์มน้ำมัน สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์ม น้ำมัน วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน การทดสอบกำลังอัดของ คอนกรีต ความเสียหายของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ความต้านทานการซึมของน้ำผ่าน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน กลไกของการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ การซึมผ่านของคลอไรด์ ประเภทของคลอไรด์ (Chloride) ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก และ โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) คือ เถ้าที่ได้จากการเผาของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และ ทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 2-1) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับ หม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส (สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2545)



(ก) กากปาล์มน้ำมันก่อนเผา



(ข) เถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผา

ภาพที่ 2-1 กากปาล์มก่อนเผาและหลังเผาเป็นเชื้อเพลิง (สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2545)

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเฉพาะประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันเป็นอุตสาหกรรม เช่น ประเทศมาเลเซีย ประเทศอินโดนีเซีย และประเทศไทย (มีปริมาณการผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจาก มาเลเซีย และอินโดนีเซีย) เพราะต้นปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตใน

ประเทศเหล่านี้ที่เป็นเขตร้อนชื้น ดังนั้นข้อมูลในเรื่องการใช้เถ้าปาล์มในงานคอนกรีตจึงแทบไม่สามารถหาได้จากนักวิจัยที่อาศัยอยู่ในทวีปยุโรปหรือสหรัฐอเมริกา 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 ปี คือ ในพ.ศ. 2556-2557 พบว่าพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็นกว่า 4.4 ล้านไร่ มีผลผลิตเพิ่มขึ้น ประมาณ 3 เท่าเป็น 12.37 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) และกลายเป็นผู้ผลิตใหญ่ลำดับที่ 3 ของโลกและมีเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 300,000 ตันต่อปี แต่ที่สำคัญ คือ มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์น้อยมาก

เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น นอกจากนี้นโยบายของรัฐบาลไทยในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในรถยนต์ เช่น เป็นไบโอดีเซล ทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้น โดย Tay (1990) ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (Tay & Show, 1995)

ต่อมา Hussin and Awal (1996) นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่น ๆ และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาที่ดีขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติด้าน

ทานการกักร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

การศึกษาเก่าปาล์มน้ำมันในประเทศไทย โดย วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม และชัยจาตุร พิทักษ์กุล (2546) พบว่าเก่าปาล์มน้ำมันก่อนบดไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้เก่าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ

สุรพันธ์ สุดันปริย์, ชรินทร์ นมรัักษ์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2545) ได้ทำการศึกษาการนำเก่าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน พบว่าเก่าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ SiO_2 มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอชโซลาน และมีศักยภาพเพียงพอสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้หากมีความละเอียดสูง และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 ยังมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน ขึ้นไป การศึกษาของ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล (2547) พบว่าดัชนีกำลังอัดของเก่าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากมีค่าสูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน และแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเก่าปาล์มน้ำมันมีการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตต่ำกว่าแท่งมอร์ตาร์ที่ไม่มีเก่าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมด้วย การใช้เก่าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าเก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคประมาณ 7.3 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 สามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีเก่าปาล์มน้ำมัน ที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยที่การแทนที่ร้อยละ 30 ยังสามารถให้กำลังอัดได้ถึงร้อยละ 99 ที่ อายุ 90 วัน (ศิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547)

นอกจากนี้ วินชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล (2546) ยังได้ศึกษาการนำเก่าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่าเก่าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ผสมเก่าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88-91 เมกะปาสกาลเมื่อใช้เก่าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-30

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเก่าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีอีกชนิดหนึ่ง และมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต

สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

1. สมบัติเคมีทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก (Major oxides) และออกไซด์รอง (Minor oxides) ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O และ K₂O) และสารซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และยังมี ส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P₂O₅) นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่ไม่ละลายและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรด และด่าง (Insoluble residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของ สารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ การเผา และการเย็นลงของปูนเม็ด ขนาดและรูปร่างของสารประกอบสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาส่องดูได้ Campbell (1990)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548)

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	3.2
Magnesium Oxide (MgO)	0.1 – 4.0	0.5
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	1 – 3	1.0
Loss On Ignition (LOI)	0.1 – 3.0	1.0
Insoluble Residue	0.2 – 0.8	0.5

สารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ C_3S มีอยู่มากที่สุด มีรูปร่างเหลี่ยมสี่เทาแก่ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) และเกิดความร้อน เรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration) และเกิดการก่อตัวและแข็งตัว C_3S ให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน (ปริญา จินตาประเสริฐ, 2548)

สารประกอบหลักทางเคมี	สูตรเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)	$3CaO-SiO_2$	45-55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	$2CaO-SiO_2$	15-35
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)	$3CaO-Al_2O_3$	7-15
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)	$4CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$	5-10

2. สมบัติทางเคมีของเถ้าปล้มน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปล้มน้ำมันมี ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และเถ้าปล้มน้ำมันแต่ละแหล่งมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาแตกต่างกัน โดยที่เถ้าปล้มน้ำมันก่อนการบดจะมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคค่อนข้างหยาบ ความพรุนสูง จับกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดที่กว้างกระจายเบอร์ 325 ร้อยละ 90 ขึ้นไป เถ้าปล้มน้ำมัน หลังจากการบดจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดอนุภาคและความพรุนลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าปล้มน้ำมันก่อนบด (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549) เมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปล้มน้ำมันจากจังหวัดกระบี่ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถจัดให้อยู่ในวัสดุปอซ์โซลาน Class N ได้ เถ้าปล้มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549)

สารประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Calcium Oxide (CaO)	6.40
Silicon Dioxide (SiO ₂)	65.30
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	2.50
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	1.90
Magnesium Oxide (MgO)	3.00
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.30
Potassium Oxide (K ₂ O)	5.70
Sulfer Trioxide (SO ₃)	0.40
Loss On Ignition (LOI)	10.00

วัสดุปอซโซลาน

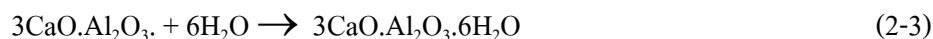
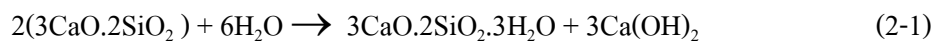
ตามนิยามของ ASTM C 618 (2001) วัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) อยู่ปริมาณสูง เมื่อบดเป็นผงละเอียด จะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่ได้จาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันในอุณหภูมิต่ำ และเมื่อมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ ทำให้เกิดสารประกอบตัว ใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยา ปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้าน เศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุน ในการผลิตคอนกรีตได้

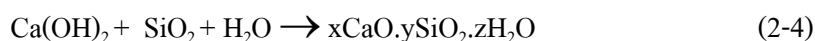
ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาประเภท

คายความร้อน มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2-1) ถึง (2-3)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2-1) และ (2-2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน มีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2-4) และ (2-5) โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fraay, Bijen, & Hann, 1989) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม (Hansen, 1990)

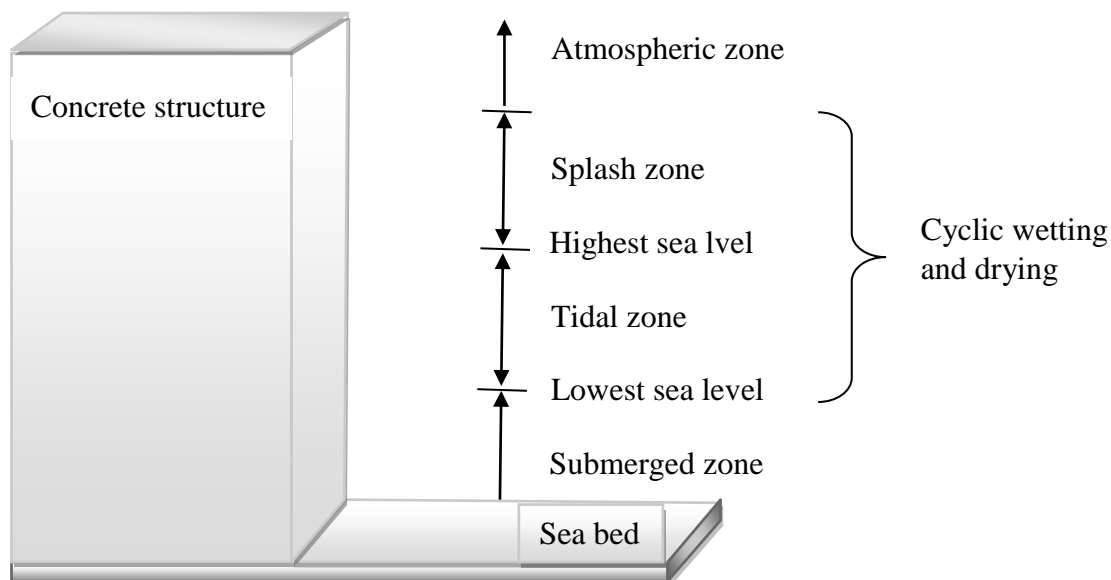


ค่า x , y และ z ในสมการที่ (2-4) และ (2-5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และอุดรูพรุนช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

ความเสียหายของน้ำทะเลต่อคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล (ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแพค, 2548)

ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ต่อโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล มีอยู่หลายประการ เช่น การกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การแข็งตัวและหลอมเหลวของน้ำ การสึกกร่อนจากการขัดสี การตกผลึกของเกลือ หรือแม้แต่การเสื่อมสภาพที่เกิดจากสาเหตุทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งความเสียหายจากสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้ จะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันในบริเวณที่ต่างกัน เช่น บริเวณที่อยู่ใต้น้ำตลอดเวลา หรือบริเวณที่อยู่เหนือน้ำตลอดเวลา หรือบริเวณที่เปียกแห้งสลับกันไป รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี โดยทั่วไป

ลักษณะของ โครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเลสามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ (แสดงผังภาพที่ 2-2)



ภาพที่ 2-2 แผนภาพแสดงการแบ่งส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสคลอไรด์ในทะเล

1. บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การฟุ้งกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2. บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้นประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้

อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น

3. บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลง คอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

4. บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเนาเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

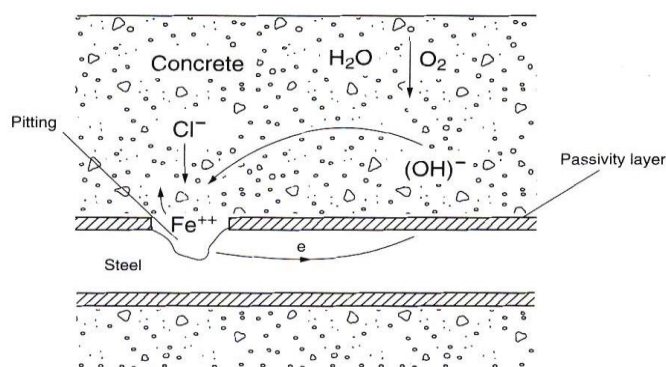
5. บริเวณใต้พื้นทะเล (Sea bed zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเนาเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ทึบน้ำ แต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างช้า ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตจึงหมายถึงความสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ในรูปของเหลวและอากาศที่เข้าสู่คอนกรีตเพื่อทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ภายในคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะน้ำและอากาศที่ซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับเหล็ก ทำให้เหล็กเกิดสนิม ส่งผลให้การรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงความทนทานของคอนกรีตได้ดี เพราะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันสารละลายต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต ไม่ให้ซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตสูงย่อมทำให้สารเคมีต่าง ๆ และอากาศซึมผ่านได้ช้า ส่งผลให้ความเสียหายต่อคอนกรีตน้อยลง (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งวิรัช, 2552)

กลไกของการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดสนิมลดลง โดยปกติ pH ของคอนกรีตมีค่าประมาณ 12.5-13.5 เมื่อมีการทำลายจากอิออนของคลอไรด์ จนความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น (Thomas, Bozec, Elkalay, & Baar, 2004) โดยไปทำลายชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น เมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม (แสดงดังภาพที่ 2-3)

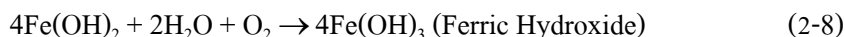


ภาพที่ 2-3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต (Neville, 1995)

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ดังสมการ 2-6 ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) ดังสมการ 2-9 และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการ 2-7 และเมื่อทำ

ปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ 2-8 (Broomfield, 1997)

Anodic Reaction:



Cathodic Reaction:

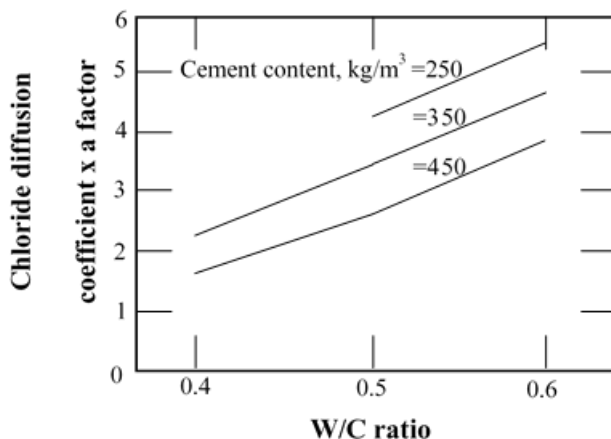


Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ 2-10 และ 2-11



Neville (1995b) กล่าวว่านอกจากนี้คลอไรด์ยังเข้าร่วมกับ C_4AF กลายเป็นแคลเซียมคลอโรเฟอไรต์ ($3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) และปฏิกิริยาเหล่านี้จะเป็นจริงเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีตขณะผสมเพราะสามารถทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้อย่างรวดเร็ว

ทั้งส่วนประกอบและปริมาณของปูนซีเมนต์ต่างมีผลต่อปริมาณของคลอไรด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา (Soroka, 1993) ซึ่งแจ้งว่าเมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณมาก ก็ย่อมสามารถกักกันคลอไรด์ในปริมาณมาก จึงทำให้อัตราแทรกซึมลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2-4 และสัมพันธ์กับปริมาณวิกฤตต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (Bakker, 1988) กล่าวว่าความสามารถในการกักกันคลอไรด์จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณปูนซีเมนต์ โดยปกติที่ใช้คือ 250 – 450 กก/ม³ ปริมาณของไอออนของคลอไรด์ที่จะแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตใน 1 หน่วยเวลา ขึ้นอยู่กับความซึมผ่านได้ของคอนกรีต



ภาพที่ 2-4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณของปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ปล่อยทิ้งไว้ในบริเวณน้ำขุ่นลงในทะเล (Soroka, 1993)

การซึมผ่านของคลอไรด์

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

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการซึมผ่านของคลอไรด์นี้ออนนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

1. การแพร่กระจาย (Diffusion): เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต คลอไรด์จะแพร่กระจายจากบริเวณที่มีคลอไรด์มากไปสู่บริเวณที่มีคลอไรด์น้อยเสมอ
2. การเคลื่อนย้าย (Migration): เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของอิออน) ในคอนกรีต
3. การพา (Convection): เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่กระบวนการ Capillary suction นั้นเอง
4. การซึมผ่าน (Permeability) : เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้านแรงดันน้ำ ในคอนกรีต คลอไรด์จะซึมผ่านจากบริเวณที่มีแรงดันสูงไปยังบริเวณที่มีแรงดันต่ำเสมอ

การหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่เนื้อของคอนกรีต โดยทั่วไปใช้กฎการแพร่ข้อสองของฟิค (Fick'2nd law) (Crank, 1975) 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 ใด ๆ

C_s = ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ผิวสัมผัส

t = ระยะเวลาที่สัมผัส

x = ระยะที่ คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีต

erf = ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

D_t = สัมประสิทธิ์การแพร่

ประเภทของคลอไรด์ (Chloride)

คลอไรด์ เป็นสารประกอบที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คลอไรด์นั้นแปรผันตามปริมาณเกลือแร่ที่เพิ่มขึ้น น้ำธรรมชาติตามภูเขา หรือ ในพื้นที่สูงจะมีคลอไรด์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูง และน้ำในทะเลจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมของน้ำจากที่ต่าง ๆ และมีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมาก

โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตและเกิดการสะสมในเนื้อคอนกรีต โดยคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 ชนิด (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) ได้แก่

1. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ไอออน ซึ่งอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเป็นคลอไรด์ที่พร้อมทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดสนิมในเหล็กและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับหรือถูกกักเก็บ (Fixed chloride) เป็นคลอไรด์ซึ่งถูกจับหรือกักเก็บไว้ที่ไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ คลอไรด์ชนิดนี้จะถูกจับหรือกักเก็บได้ 2 แบบด้วยกัน คือ การกักเก็บด้วยการดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) จากวัสดุที่ทำปฏิกิริยา เช่น ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ และการกักเก็บด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical absorption) จากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เช่น มวลรวม เป็นต้น การดูดซับ

ทางกายภาพนี้คลอไรด์จะถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่ผิว (Surface force) ส่วนการดูดซับทางเคมี คลอไรด์จะถูกจับเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ กับคลอไรด์ไอออนก่อให้เกิดเป็นเกลือฟรีเดิล (Friedel's salt, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) และนอกจากนั้น คลอไรด์ยังสามารถถูกกักเก็บในโครงสร้าง C-S-H ได้ด้วย คลอไรด์อิสระที่ละลายน้ำได้เท่านั้น ที่จะทาปฏิกิริยากับเหล็กเสริม (ACI 201.2R-01, 2003)

ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (Neville, 1996)

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียก สลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ส่วน อาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่า สภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเล เป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอิออนของคลอไรด์มี มากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

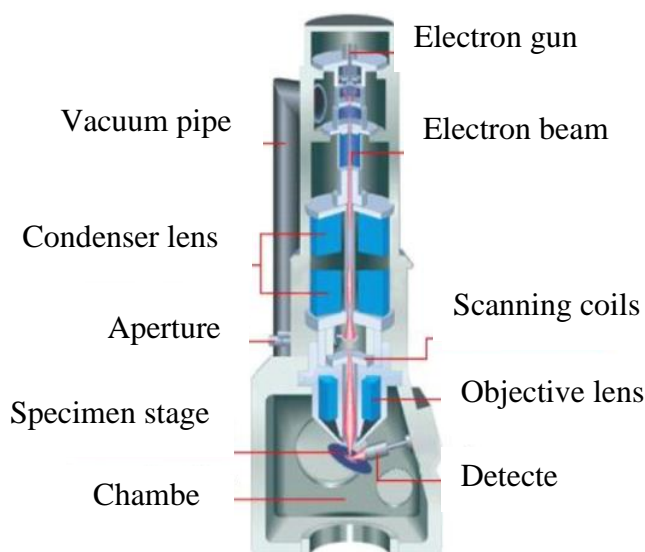
คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloro-Aluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้น ถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ออกไปได้ และเป็นที่น่าทึ่งที่ทราบว่า การใส่ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทาน การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใส่ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่ เหมาะกับงานคอนกรีตหยาบ และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมี สารละลายซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใส่ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

โครงสร้างจุลภาค เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลลักษณะของวัสดุ ที่มุ่งศึกษาไปในด้านขนาดเม็ดเกรนของวัสดุ ระยะห่างหรือการจับกลุ่มเรียงตัวของเม็ดเกรน หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์พิเศษในการศึกษา เช่น กล้องไมโครสโคป (Microstructure) เพื่อส่องดูโครงสร้างของวัสดุแต่ละชนิด ที่ตัดมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขัดผิวจนมันเป็นเงา และนำไปทำการกัดกรดให้ผิวหน้าเป็นหลุม ๆ เล็ก ๆ เพื่อให้แสงกระทบกับหลุมเล็ก ๆ และสะท้อนกลับให้เห็นโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2558)

1. การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค Scanning Electron Microscope: SEM

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่ กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 1,000,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่าง ได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันแสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 Scanning Electron Microscope (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า เลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

1.1 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอน โวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้ใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

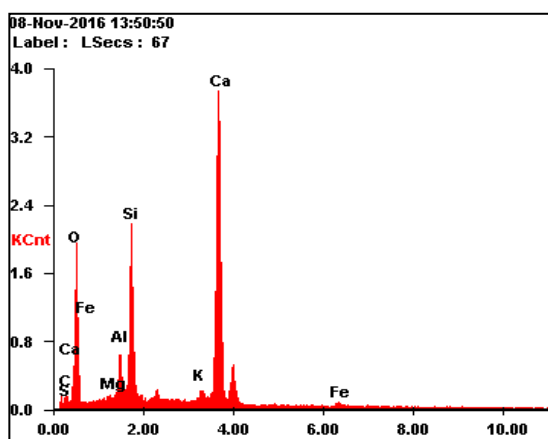
1.2 อิเล็กตรอน แบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่าง ๆ ที่กระเจิง

กลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็น องค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

1.3 รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K, L, M, ...) ได้รับความเร่งจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดย ค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM)

2. การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy: EDX

ชุดเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS, EDX หรือ EDXRF) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างการใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จาก EDX ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

การศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่า เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน แล้วทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น เช่น ป้องกันการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี คอนกรีตมีความทึบน้ำสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำความเสียหายให้กับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่อง และลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ Thomas et al. (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ 10°C ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศ ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิกิริยาส่วนผสม ส่วนการศึกษาความคงทนของคอนกรีตในเขตทะเลที่อยู่ในประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น Chalee, Ausapanit and Jaturapitakkul (2010) ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี พบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลด้านความคงทนที่ศึกษาในสิ่งแวดล้อมทะเลที่เป็นเขตอบอุ่น โดยการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนเนื่องจากน้ำทะเลมากขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ต้องใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลควรจะมีการกักเก็บคลอไรด์ที่ดี ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลงและทำให้การเกิดสนิมเหล็กน้อยลงด้วย โดย Cheewaket, Jaturapitakkul and Chalee (2010) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในคอนกรีต ส่งผลให้ค่าร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่มีผลชัดเจนกับการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต นอกจากนี้ การเลือกใช้คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องคำนึงถึงระดับคลอไรด์วิกฤติซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์ในการศึกษาถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของการกักคร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่เสริมในคอนกรีต กับปริมาณของคลอไรด์อิสระรอบผิวของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในการพิจารณาความเสี่ยงของการกักคร่อนในเหล็กเสริมเมื่อทราบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดย วิเชียร ชาลี และชัย จาคูพิทักษ์กุล (2554) พบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นและชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ถึงแม้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน แต่การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดากลับมีมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีความทึบน้ำ และมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงสามารถลดปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินได้อย่างชัดเจน วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณมณี ไซติ, ชัย จาคูพิทักษ์กุล และรัชชัช สาสกุล (2553) ได้ศึกษาผลของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินชนิด F ที่ได้จากโรงงานโดยตรง (รูปร่างกลมตัน) จากแม่เมาะให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดชนิด C (รูปร่างไม่แน่นอน) จาก เอ็น พี เอส และ กาญจนบุรี อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 3 แหล่งในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลง และต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน

วิเชียร ชาลี และชัย จาคูพิทักษ์กุล (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 จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลัดแห้ง ที่ จ.ชลบุรี และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และวัดการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่อายุ 3 ปี ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการกักคร่อนในเหล็ก

เสริมได้ดีขึ้น นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

ในส่วนของเถ้าชีวมวลพบว่า เถ้าชีวมวลที่มีมากในประเทศยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรงต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดก่อน ซึ่งพบว่าหลังจากบดแล้วให้ผลการศึกษามสมบัติเชิงกลไปในทิศทางที่ดี และส่งผลสืบเนื่องให้สมบัติความคงทนดีด้วย โดย Chalee, Sasakul, Jaturapitakkul and Chindapasirt, 2013 ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้เพื่อปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปีโดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ และบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล และเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการวิจัยพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 สามารถปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตที่พิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริม หลังจากคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลเป็นเวลา 5 ปีได้ โดยร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง นอกจากนั้นพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

ประจักษ์ ฑุกตสิกร, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2557) ได้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เถ้าแกลบที่ใช้จะทำการบดละเอียดให้มีปริมาณอนุภาคต่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับทรายธรรมชาติ และกลุ่มที่สองคือ คอนกรีตที่

ใช้มวลรวมหยาบละมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต คอนกรีตทั้งสองกลุ่มใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 และใช้สารลดน้ำพิเศษควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้มีค่าระหว่าง 1015 ซม. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทำที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดได้ที่อายุ 60 วันขึ้นไป แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เพิ่มความต้านทานคลอไรด์และความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

พลฉัตร ต้นเสถียร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2556) ได้ศึกษาสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันจากหลายแหล่งเพื่อใช้ในงานคอนกรีต โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 แหล่งมาบดให้มีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 1 , 15 ± 1 , 25 ± 1 , 35 ± 1 โดยน้ำหนักใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 หลอมอร์ต้าร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม³ เพื่อทดสอบกำลังอัด หล่อแท่งมอร์ต้าร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ซม³ เพื่อทดสอบการหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) และทดสอบการคงตัวของแท่งซีเมนต์เพสต์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ซม³ โดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำความดันสูง (Autoclave) ผลการทดสอบพบว่า มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 แหล่ง ให้ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันต่ำกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมและมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 1 แหล่ง สามารถมีค่าดัชนีกำลังสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุ 91 วัน ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงร้อยละ 5 ± 1 ให้ค่าดัชนีกำลังมากที่สุด รองลงมาเป็นเถ้าที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงร้อยละ 15 ± 1 , 25 ± 1 และ 35 ± 1 ตามลำดับ ค่าการหดตัวแห้งของแท่งมอร์ต้าร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วันเมื่อเทียบกับแท่งมอร์ต้าร์ควบคุมไม่เกินร้อยละ 0.03 นอกจากนี้การขยายตัวโดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำความดันสูงของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 0.8 มาก ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่กำหนดโดย มอก. 2135-2545

ในส่วนของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นเถ้าชีวมวลอีกชนิดหนึ่ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต Tangchirapat et al. (2007) พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตหลังแช่ในสารละลาย

ซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนเถ้าปลาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีตเนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้ และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำมาก นอกจากนี้ กิรติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาติ (2554) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน โดยใช้กรดเป็นตัวทำลายหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมาก (ร้อยละ 50) ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

วชิรกรณ์ เสนาวัง, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2554) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่มีผลต่อกำลังอัด อัตราซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีต และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยนำเถ้าปลาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ + เถ้าปลาล์มน้ำมัน) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และใช้สารลดน้ำพิเศษ เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 5-10 ซม. ทดสอบกำลังอัด ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นส่วนผสม สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น และมีค่าการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมยังมีการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันมากขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์ยังมีค่าลดลง

วันโชค เครือหงษ์, ชีรวัดน์ สตินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ (2555) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน โดยนำเถ้าปลาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์และขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทดสอบความไม่เป็นผลึกของเถ้าปลาล์มน้ำมันโดยวิธีเรทเวลด์ กำลังอัดของเพสต์ การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน การทดสอบกระจายขนาดโพรงของเพสต์ ผลการทดสอบพบว่า เถ้าปลาล์มน้ำมันเป็นวัสดุซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันขนาดหยาบมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ขณะที่เพสต์ผสม เถ้าปลาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงทั้งหมดต่ำที่สุด ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันลดลง

ด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของเถาปลาล์มน้ำมันและมีปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC นอกจากนี้ขนาดโพรงวิกฤตของซีเมนต์เพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC เพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดช่วยลดโพรงวิกฤตมากกว่าเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันที่มีขนาดหยาบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมท่าเลของประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นยังมีน้อย ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดสร้างงานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาปัญหาความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการนำวัสดุปอชโซลานที่มีมากในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต ซึ่งเถาปลาล์มน้ำมันเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในวงการวิศวกรรม ดังนั้นการศึกษาถึงผลของแหล่งผลิต ความละเอียด ปริมาณเถาปลาล์มน้ำมัน ระยะหุ้มคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีต ประสิทธิภาพคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงตัวแปรดังกล่าวเพื่อใช้ในการกำหนดปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและระยะหุ้มที่เหมาะสม ตลอดจนเป็นแนวทางการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพและมีความทนทานยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการศึกษา ประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา วิธีการศึกษา วิธีการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ แต่ละขั้นตอน โดยแยกเป็นรายละเอียด ดังนี้

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150
2. ถ้ำปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด โดยค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33
3. หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.
4. ทราชม้วนน้ำหยาบ ร่อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62
5. น้ำประปา
6. สารเคมีผสมเพิ่ม ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทสารลดน้ำพิเศษชนิดซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มมาดีไฮด์คอนเดนเซต
7. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.
8. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มี ซิลเวอร์ไนเตรต ($\text{AgNO}_3 = 0.05 \text{ N}$) กรดไนตริก (HNO_3) และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}_2 = 30\% \text{ solution}$)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. อุปกรณ์บดคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (ก))
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ภาพที่ 3-1 (ข))
3. แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $200 \times 200 \times 200 \text{ มม}^3$ (ภาพที่ 3-1 (ค))
4. แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (ง))
5. เครื่องตัดคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (จ))
6. เครื่องดูดสูญญากาศ (ภาพที่ 3-1 (ฉ))
7. เครื่องเจาะคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (ช))

8. เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (Auto titration equipment) (ภาพที่ 3-1 (ซ))
9. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) (ภาพที่ 3-1 (ณ))
10. เครื่องทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดย (SEM-EDX) (ภาพที่ 3-1 (ญ))
11. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
12. กราฟและปากกาเขียนพลาสติก
13. บีกเกอร์ (Beaker) และขวดชมพู ขนาดต่าง ๆ
14. บิวเรตต์
15. กรวยกรอง



(ก) ครกหิน



(ข) เครื่องชั่ง

(ค) แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด
200 x 200 x 200 มม³

(ง) แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต

ภาพที่ 3-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



(จ) เครื่องตัดคอนกรีต



(ข) เครื่องดูดสูญญากาศ



(ข) เครื่องเจาะคอนกรีต



(ข) เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ



(ณ) เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



(ณ) เครื่องทดสอบ โครงสร้างจุลภาค โดย (SEM - EDX)

ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

1. ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
	วัสดุประสาน		ทราย	หิน	น้ำ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด				
I40P00	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
I45P00	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
I50P00	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	เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด
40,45,50	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

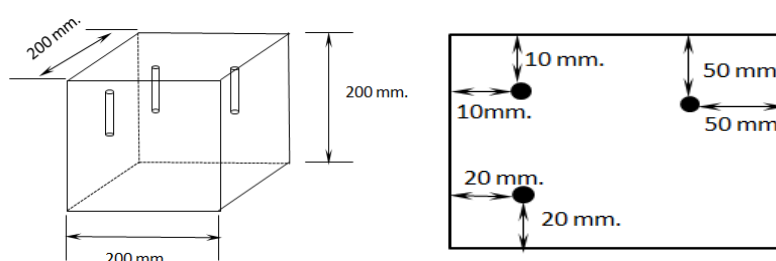
รูปแบบสัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ **I/A/P/B** โดย **A** เป็นส่วนที่ใช้บอกถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ **B** เป็นส่วนที่แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ยกตัวอย่างเช่น

สัญลักษณ์ I40 หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

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

2. ตัวอย่างคอนกรีต (ที่เตรียมเมื่อ 5 ปีที่แล้ว)

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม³ ในแต่ละส่วนผสมฟุ้งเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 10, 20 และ 50 มม. สำหรับการทดสอบที่อายุ 5 ปี (ภาพที่ 3-2)



ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งที่ฝังเหล็กในคอนกรีตที่ทดสอบที่อายุ 5 ปี

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



ภาพที่ 3-3 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี

การทดสอบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่สถานะแวดล้อมทะเล

1. การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 5 ปี 1) ทำการเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เพื่อทดสอบหาการแทรกซึม คลอไรด์โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 200 มม. (ภาพที่ 3-4 (ก)) 2) ตัดตัวอย่างทรงกระบอกหนาชั้นละ 10 มม. (ภาพที่ 3-4 (ก)) และบดคอนกรีต แต่ละชั้นให้ละเอียดโดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (ภาพที่ 3-4 (ข)) ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีต (ภาพที่ 3-5)



(ก) การเจาะและตัดตัวอย่างคอนกรีต เพื่อใช้ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์



(ข) การบดและเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

ภาพที่ 3-4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต



ภาพที่ 3-5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์คลอไรด์ในคอนกรีต

1.1 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152

1.1.1 นำตัวอย่างที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยชั่งใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

1.1.2 เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

1.1.3 เติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

1.1.4 นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว และเติมน้ำกลั่นประมาณ 75 มิลลิลิตร

1.1.5 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

1.1.6 เติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.05 โมล จำนวน 2 มิลลิลิตร

1.1.7 บีเปตต์ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่ เอาไปไทเทรตด้วยเครื่องไทเทรตที่ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่มีสารละลาย 0.05 โมล จะได้อ้อยละของคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ที่ระดับความลึกต่าง ๆ

1.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตาม ASTM C 1218

1.2.1 นำตัวอย่างที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

1.2.2 เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

1.2.3 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

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

1.2.5 บีเปตต์ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่ เอาไปไทเทรตด้วยเครื่องไทเทรตที่ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่มีสารละลาย 0.05 ได้อ้อยละของปริมาณคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ

2. การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (ภาพที่ 3-6) มาทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่อง (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 (ภาพที่ 3-7)



ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี



ภาพที่ 3-7 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3. วัดพื้นที่สนิมเหล็กและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมของเหล็กที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีต

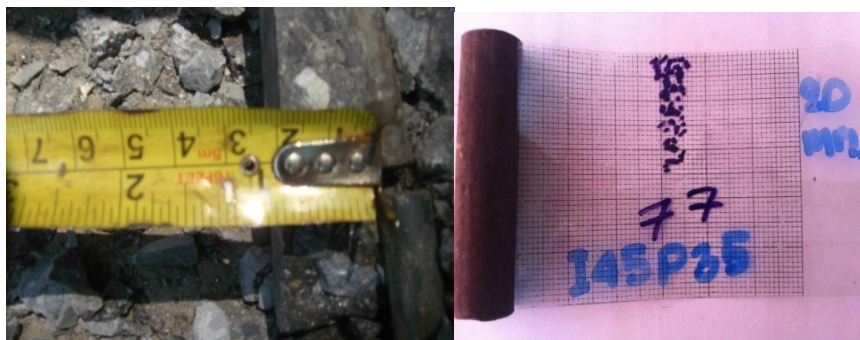
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ โดยการวัดร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวเหล็ก ดังสมการที่ 3-1 และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ดังสมการ 3-2 เนื่องจากการเกิดสนิมประกอบกับรูปภาพของเหล็กที่เกิดสนิม โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1 นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 x 200 x 200 มม³ ที่ผ่านการเจาะเพื่อทดสอบการแทรกซึมของโคลไรด์มากคไอให้แตกด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 10, 20, 50 มม. มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต

3.2 ทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กด้วยการทาพื้นที่ผิวเหล็กที่เป็นสนิมลงบนกระดาษกราฟใสซึ่งทำเป็นช่อง 1 x 1 มม² แล้วนับจำนวนช่องเพื่อหาพื้นที่ของสนิมเหล็ก (ภาพที่ 3-8)

3.3 ถ่ายรูปการเกิดสนิมในแต่ละระยะหุ้มของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

3.4 ทำการชั่งน้ำหนักก่อนขัดและหลังขัดสนิมที่ผิวเหล็กเพื่อวัดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมเหล็ก



ภาพที่ 3-8 การวัดปริมาณสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

สมการร้อยละของพื้นที่ผิวเหล็กเกิดสนิม

$$A(\%) = \frac{RA}{SA} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ A = ร้อยละของพื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิม

RA = พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิม (มม²)

SA = พื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. เท่ากับ 2,110 มม².

สมการร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหาย

$$WL (\%) = \frac{WB - WA}{WB} \times 100 \quad (3-2)$$

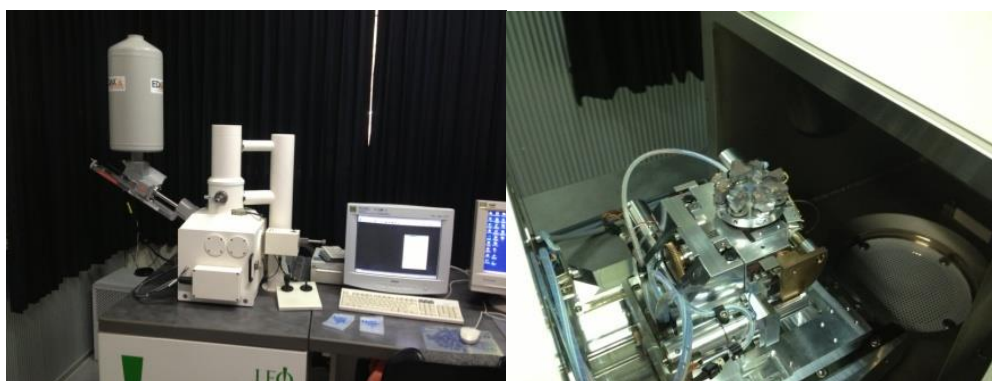
เมื่อ WL = ร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหาย

WB = น้ำหนักเหล็กก่อนขัดสนิม (กรัม)

WA = น้ำหนักเหล็กหลังขัดสนิม (กรัม)

4. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

วิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีและถ่ายภาพขยายกำลังสูงเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแร่และลักษณะรูปร่างของคอนกรีตด้วยเครื่อง X-Ray detector ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS) (ภาพที่ 3-9)



ภาพที่ 3-9 การทดสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง (X-Ray detector)

สร้างแบบจำลอง เพื่อทำนายการแทรกซึมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

การศึกษาครั้งนี้จะสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยหลายตัวแปร (Multi regression analysis) กับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำมันที่บดละเอียด คุณสมบัติของน้ำทะเล สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล กำลังอัดของคอนกรีต การแทรกซึมคอลไรด์ของคอนกรีตผสมน้ำมันที่บดละเอียด สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคอลไรด์ (D_c) สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมน้ำมัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDX) ของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็ยกสลับแห่ง เป็นเวลา 5 ปี และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการแทรกซึมของคอลไรด์ในคอนกรีตที่ผสมน้ำมัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่ได้เก็บที่อายุ 1, 1.5 และ 3 ปีที่มีอยู่แล้วประกอบในการสร้างแบบจำลองนี้

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำมันที่บดละเอียด

1. คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำมันที่บดละเอียด ประกอบด้วย สีและลักษณะรูปร่างของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ การกระจายอนุภาค และความละเอียด ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อ ความสามารถในการเท กำลังอัด และความคงทนของคอนกรีต เป็นต้น

1.1 ลักษณะทั่วไป และสีของวัสดุ

ภาพที่ 4-1 แสดงลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งฝุ่นและมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก (Lea, 1970) ส่วนน้ำมันที่นำมาจากโรงงาน โดยตรงมีลักษณะค่อนข้างหยาบ และมีบางส่วนของผิวใหม่ไม่หมดปะปน จึงนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ก่อนนำไปปรับปรุงความละเอียดโดยการบด สีของน้ำมันก่อนบดจะออกสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่วนที่เป็นสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์ แต่น้ำมันที่ผ่าน

การบดละเอียด สีของเถ้าปาล์มน้ำมันมีสีดำและดำมากยิ่งขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ทำให้เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดเป็นเนื้อเดียวกัน และมีสีเข้มขึ้น



(ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด

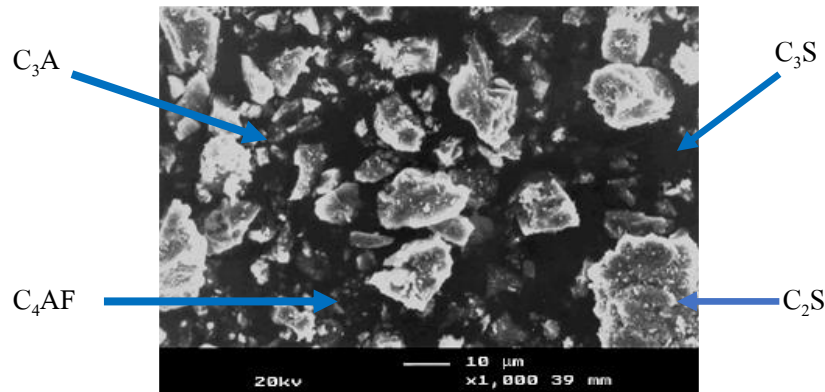


(ค) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด

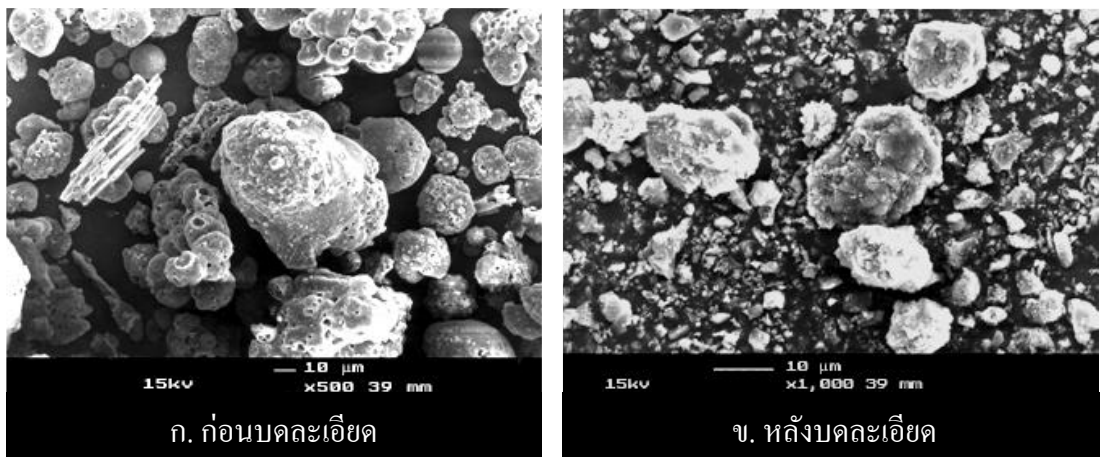
ภาพที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด และหลังบดละเอียด (กิตติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาลี, 2557)

1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

จากภาพที่ 4-2 และ 4-3 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอนุภาคปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ กัน ด้วยภาพที่ 4-2 แสดงให้เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีลักษณะผิวขรุขระ เนื้อแน่น เป็นเหลี่ยมมุม และมีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนภาพที่ 4-3 (ก) เป็นเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดละเอียด ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 62 ไมครอน) บางส่วนมีรูปร่างกลมมน เป็นโพรงอากาศ ความพรุนสูง และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ อีกอันหนึ่งภาพที่ 4-3 (ข) ลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอนมีความพรุนน้อยกว่า (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.2 ไมครอน) เมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดละเอียดและมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการบดละเอียด



ภาพที่ 4-2 ภาพถ่ายกำลังสูงของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 4-3 ภาพถ่ายกำลังสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน

1.3 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์คือมีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 เห็นได้ว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูง (ภาพที่ 4-3 (ก)) เมื่อผ่านการบดละเอียดทำให้ขนาดใหญ่และมีความพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ความพรุนจึงลดลง ความถ่วงจำเพาะจึงมีค่าเพิ่มขึ้น Paya et al., (1995) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul et al., (2007) ที่พบว่าการบดไม่เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ แต่ยังสามารถลดความพรุนได้ด้วย

1.4 ความละเอียด

เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้มีน้ำหนักข้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 1.5 แสดงดังตารางที่ 4-1 โดยมีอนุภาคเท่ากับ 10.1 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ คือ ไม่เกิน ร้อยละ 34

ตารางที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POFA)
Specific Gravity	3.15	2.33
Retained on a Sieve No.325	N/A	1.50
Mean Particle Size (mm)	25	10.1

1.5 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงผลดังตารางที่ 4-2 ซึ่งมวลรวมดังกล่าวอยู่ในช่วงของข้อกำหนดมวลรวมปกติ ตาม ASTM C33 ที่ใช้ในคอนกรีตโดยทั่วไป

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวม	
	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk specific gravity (SSD)	2.77	2.57
Apparent specific Gravity	2.80	2.61
Absorption (%)	0.64	0.96
Fineness modulus	6.66	2.63
Normal maximum size (mm)	19	-

2. องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด โดยพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 64.97 และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เท่ากับ 1.06 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 2.89 เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษามีค่าอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 150/C 150M สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีประมาณร้อยละ 65.3 มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 69.7 มีค่า LOI ร้อยละ 10 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Tay (1990) ที่พบว่ามีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 34.3, 24.6, และ 14.9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละแหล่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาต่างกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาต้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1997) สามารถจัดให้อยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ได้

ตารางที่ 4-3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POF)
Silicon dioxide, (SiO_2)	20.80	65.3
Aluminum oxide, (Al_2O_3)	5.50	2.5
Iron oxide, (Fe_2O_3)	3.16	1.9
Calcium oxide, (CaO)	64.97	6.4
Magnesium oxide, (MgO)	1.06	3.0
Sodium oxide, (Na_2O)	0.08	0.3
Potassium oxide, (K_2O)	0.55	5.7
Sulfur trioxide, (SO_3)	2.96	0.4
Loss On Ignition, (LOI)	2.89	10.0

คุณสมบัติของน้ำทะเล

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ในแต่ละช่วงเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อน ๆ ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป (Thomas et al., 2004) นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก/ล และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,600 มก/ล จากการสังเกตจะพบว่าปริมาณคลอไรด์จะมากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟต

ละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก/ล ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสถานะที่อาจเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง นั่นคือ น้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา มีผลกระทบต่อคอนกรีตในชั้นรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก/ซม² ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน

โดยทั่วไป ระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ขึ้นและลง 2 รอบภายใน 1 วัน คือ มีระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวลานั้นขึ้นลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่น ช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติ และลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมาก

ตารางที่ 4-4 สมบัติของน้ำทะเลบริเวณด้านหลัง โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา

Time	Parameters			
	Sample Condition	pH	Chloride, Cl ⁻ (mg/l)	Sulphat, SO ₄ ²⁻ (mg/l)
January 2001	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
October 2001	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
May 2002	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
September 2002	Clear, No Color	7.8	18,000	2,500
August 2003	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
December 2003	Clear, No Color	8.2	19,000	2,700
April 2004	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
Feb 2005	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
May 2008	Clear, No Color	8.1	17,500	2,300
September 2009	Clear, No Color	8.2	18,120	2,250
April 2010	Clear, No Color	8.1	18,910	2,610

สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

ภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นสภาพตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ด้วยผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยสังเกตเห็นว่า คอนกรีตเหล่านี้ มีลักษณะผิวนอกมีความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนของสารเคมีหรือเกิดการขจัดสี พบหอย เพรียง และตะไคร่น้ำติดอยู่ตามผิวคอนกรีต มีคราบเกลือติดอยู่ที่ผิวของคอนกรีตเกือบทั้งก้อน นอกจากนี้ยังเกิดความเสียหายเนื่องจากการสึกกร่อนจากแรงกระแทกของคลื่น กรวด ทราบ โดยเห็นขอบและมุมของคอนกรีตเกิดการแตกเล็กน้อย สีคอนกรีตมีสีเหลืองคล้ำอมน้ำตาล อย่างไรก็ตามสภาพผิวหน้าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ไม่มีความแตกต่างกันถึงแม้จะแช่ในน้ำทะเลนานถึง 5 ปี



ภาพที่ 4-4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 5 ปี

1. กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 5 ปีที่แช่น้ำทะเล เทียบกับคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน

กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี แสดงดังตารางที่ 4-5 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลมีแนวโน้มลดลง เมื่อแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น และเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย โดยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปลาล์มน้ำมันในคอนกรีต ไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ (Jaturapitakkul et al., 2007) โดยเห็นผลชัดเจนเมื่อใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันผสมในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงสุดในกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน และสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เท่ากับ 622, 673, 555, 535 และ 488 กก/ซม² ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการปรับปรุงกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ โดยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถชดเชยกำลังอัดที่หายไป เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงได้ อีกทั้งยังส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เป็นผล

จากเต้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่ละเอียดของเต้าปาล์มน้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ (Sata et al., 2010) ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับ ซิลิกาหรืออลูมินาในคอนกรีตที่ผสมเต้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้สามารถป้องกันการทำลายจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเล ทำให้การสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตกลุ่มนี้ หลังแช่น้ำทะเลเกิดขึ้นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมวัสดุปอซโซลาน (Chindaprasirt et al., 2000)

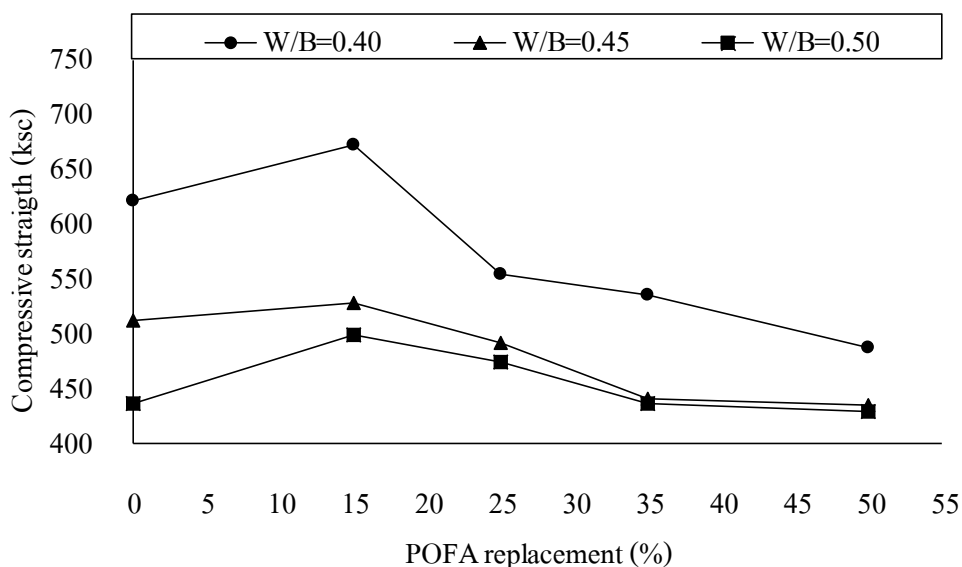
ตารางที่ 4-5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเต้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)		ร้อยละกำลังอัดที่ 5 ปี เทียบกับ 28 วัน
	28 วัน	5 ปี	
I40P00	483	622	129
I40P15	517	673	130
I40P25	480	555	116
I40P35	495	535	108
I40P50	446	488	109
I45P00	464	513	110
I45P15	484	528	109
I45P25	412	492	119
I45P35	403	441	109
I45P50	384	435	113
I50P00	394	436	110
I50P15	376	500	133
I50P25	355	474	134
I50P35	360	436	121
I50P50	342	430	126

2. กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังแสดงในภาพที่ 4-5 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 5 ปี ลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน) เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เท่ากับ 622, 673, 555, 535 และ 488 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งการที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 ให้กำลังอัดสูงสุด เป็นผลจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ (Sanjuan et al., 1996) อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 15 ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง อาจเกิดมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมาก ปริมาณ Ca(OH)_2 จึงเกิดขึ้นน้อยส่งผลให้การเกิด C-S-H น้อยลงไปด้วย ดังนั้นกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ได้ ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ทุกส่วนผสมของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 มีร้อยละกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทุกส่วนผสมคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ก่อนข้างชัดเจน โดยภาพรวมแล้วพบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และเห็นได้ชัดเจนที่อัตราการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 ส่งผลให้กำลังอัดสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมในการพัฒนากำลังอัดที่ดี โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่สภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี ที่น้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราร้อยละ 15 มีกำลังอัดเท่ากับ 673, 528 และ 500 กก/ซม² ตามลำดับ



ภาพที่ 4-5 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

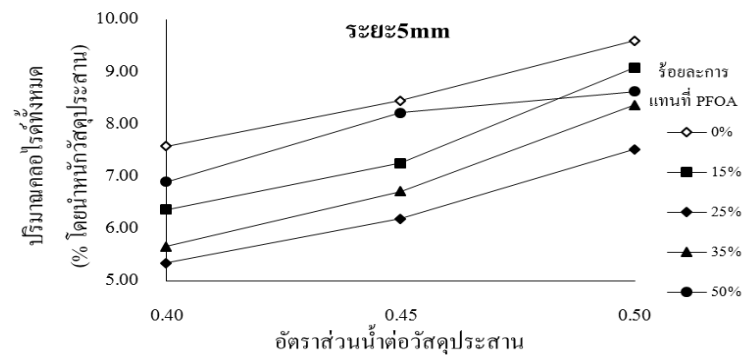
1. ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

ตารางที่ 4-6 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ รวมทั้งพิจารณาภาพที่ 4-6 ที่แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลง ซึ่งเป็นหลักของคอนกรีตเทคโนโลยีโดยทั่วไป โดยปริมาณน้ำลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและกำลังอัดสูงขึ้น ช่วยต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน กล่าวคือ การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลเพิ่มปริมาณคลอไรด์อ่อนในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้สังเกตได้จากความชันของกราฟระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ภาพที่ 4-6) ของกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีความชันมากกว่ากลุ่มที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เป็นผลจากสมบัติด้านความทึบน้ำของคอนกรีตธรรมดา ขึ้นกับปริมาณน้ำในคอนกรีตเป็นหลัก โดยปริมาณน้ำที่มากขึ้นทำให้เหลือปริมาณน้ำอิสระที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน เหลือในโพรงคาปิลารีมากขึ้น เมื่อน้ำดังกล่าวระเหยออกมาทำให้เกิดโพรง

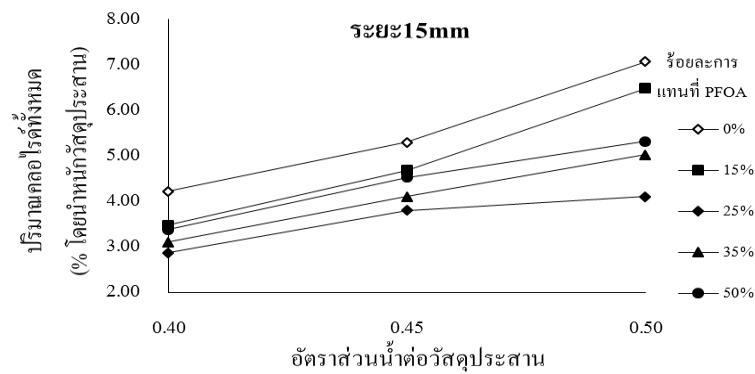
ในคอนกรีต และส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปได้ง่ายขึ้น ส่วนกลุ่มที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันความทึบน้ำของคอนกรีต จะขึ้นกับสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน ด้วย เช่น ความละเอียด ลักษณะอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับ ผลการศึกษาในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในน้ำทะเล (Chalee & Jaturpitakkul, 2009)

ตารางที่ 4-6 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

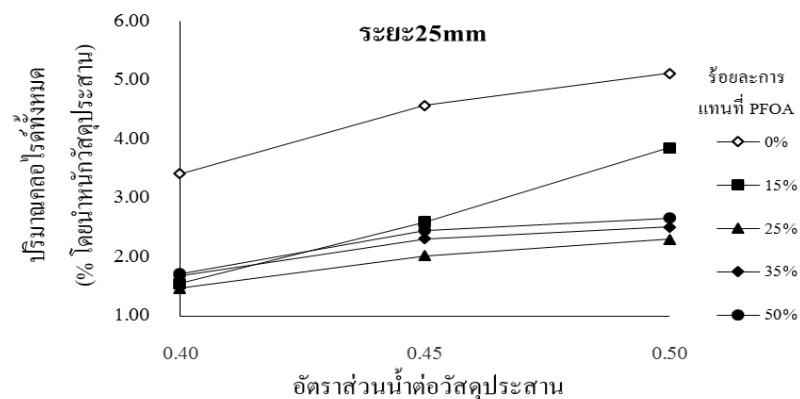
ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี									
	5 มม.	15 มม.	25 มม.	35 มม.	45 มม.	55 มม.	65 มม.	75 มม.	85 มม.	95 มม.
I40P00	7.58	4.22	3.42	2.11	1.64	0.34	0.31	0.24	0.22	0.18
I40P15	6.37	3.47	1.56	0.91	0.64	0.28	0.23	0.19	0.16	0.15
I40P25	5.34	2.87	1.48	0.77	0.54	0.27	0.19	0.18	0.15	0.10
I40P35	5.66	3.10	1.69	1.12	0.62	0.33	0.21	0.19	0.17	0.12
I40P50	6.17	3.38	1.73	1.27	0.91	0.41	0.24	0.23	0.21	0.17
I45P00	8.45	5.30	4.58	2.75	2.48	0.86	0.40	0.26	0.23	0.20
I45P15	7.26	4.68	2.61	1.51	0.97	0.47	0.27	0.23	0.17	0.16
I45P25	6.20	3.80	2.03	0.97	0.80	0.40	0.22	0.18	0.15	0.10
I45P35	6.72	4.10	2.32	1.20	0.81	0.43	0.29	0.20	0.18	0.13
I45P50	6.90	4.53	2.46	1.32	0.92	0.51	0.32	0.24	0.22	0.18
I50P00	9.60	7.07	5.13	3.85	3.02	1.49	0.45	0.26	0.25	0.23
I50P15	9.08	6.48	3.84	2.07	1.98	1.10	0.31	0.25	0.22	0.20
I50P25	7.52	4.10	2.31	1.13	1.01	0.76	0.29	0.22	0.15	0.10
I50P35	8.37	5.02	2.51	1.29	1.12	0.78	0.32	0.23	0.19	0.14
I50P50	8.62	5.32	2.66	1.59	1.16	0.81	0.34	0.24	0.23	0.20



(ก) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 5 มม

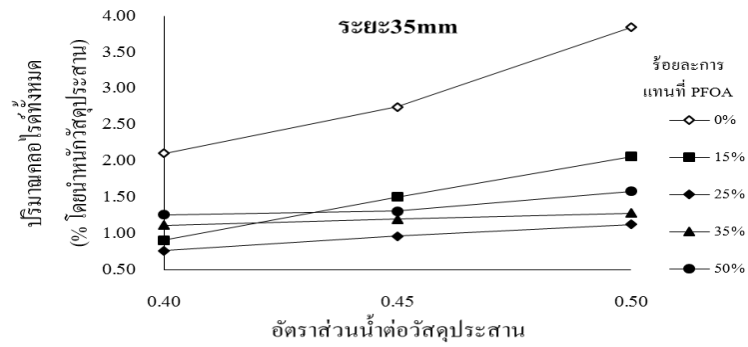


(ข) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 15 มม

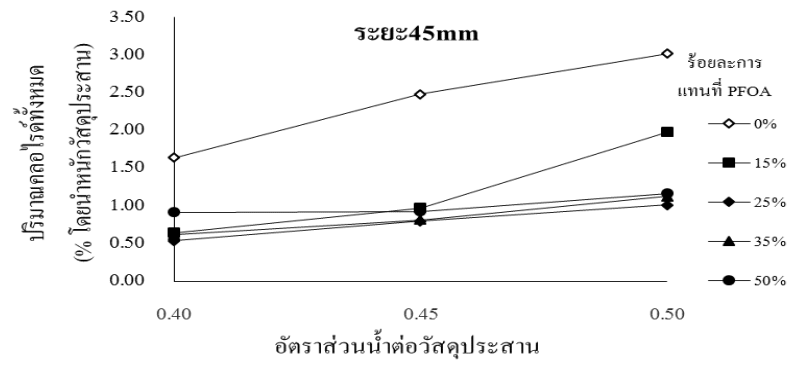


(ค) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 25 มม

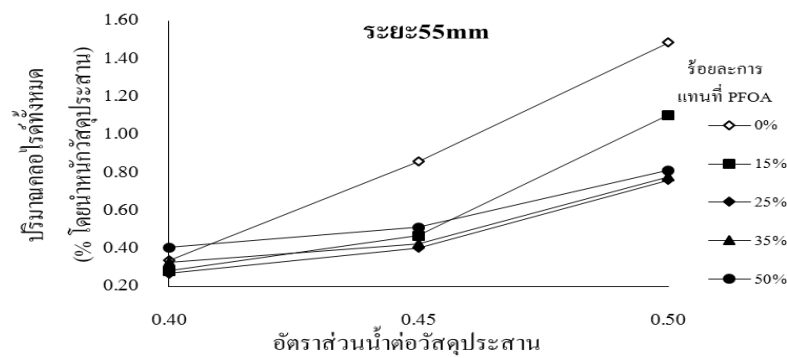
ภาพที่ 4-6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอรีนในคอนกรีตที่ผสม
 เถ้าปลาลมน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



(ง) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 35 มม

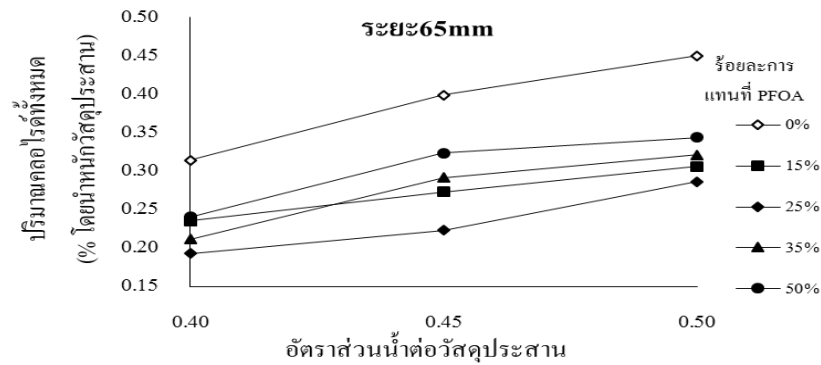


(จ) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 45 มม

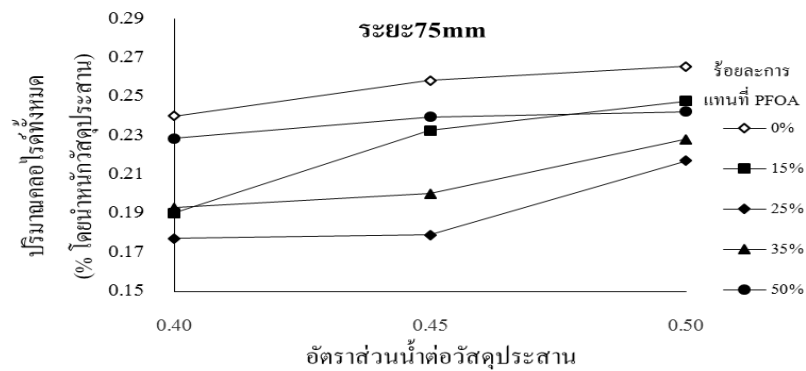


(ฉ) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 55 มม

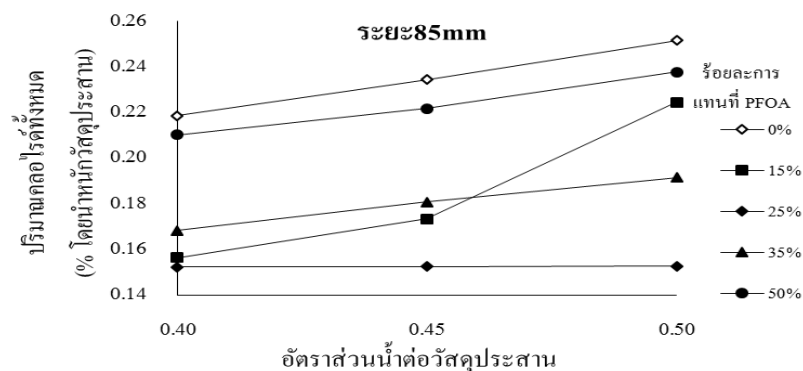
ภาพที่ 4-6 (ต่อ)



(ข) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 65 มม

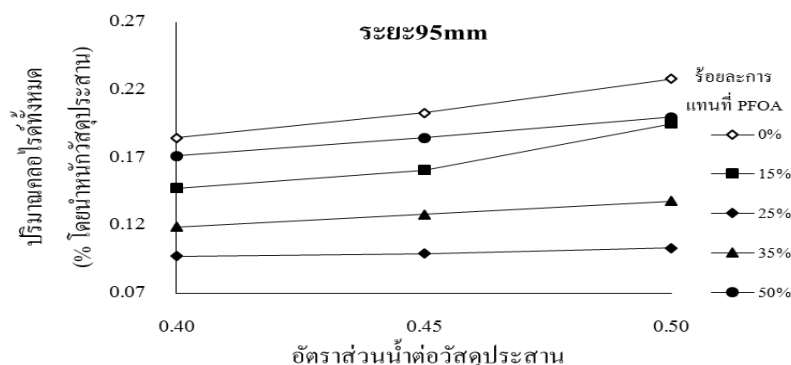


(ค) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 75 มม



(ง) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 85 มม

ภาพที่ 4-6 (ต่อ)



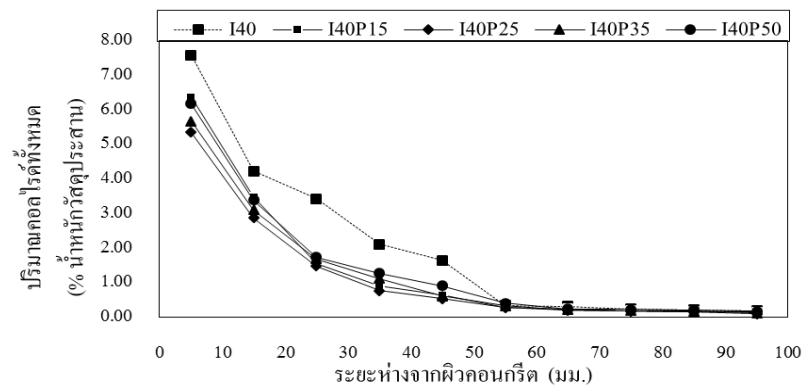
(ญ) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 95 มม

ภาพที่ 4-6 (ต่อ)

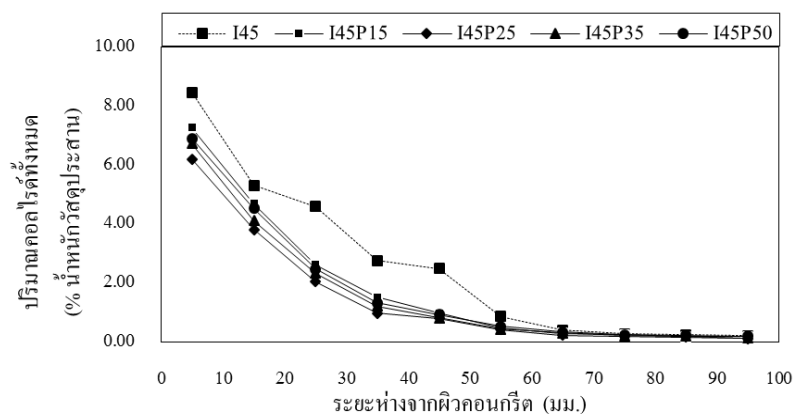
2. ผลของการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

ตามภาพที่ 4-7 แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมัน เช่น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในระดับ ความลึก 25 มม. เท่ากับร้อยละ 3.42, 1.56, 1.48, 1.69 และ 1.73 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ โดยสังเกตเห็นว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตลดลงตาม ปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 35 และ 50 ทั้งนี้ เนื่องจากผลของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่ ละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ทำให้คอนกรีต เกิดการอัดแน่น จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ (Jaturapitakkul et al., 2003) นอกจากนี้ ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีในเถ้าปาล์มน้ำมัน สามารถเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เป็นผลผลิตจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ผลิตภัณฑ์ เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็น เจลแข็ง ทำให้ความพรุนในคอนกรีตลดลงและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ ส่วนการเพิ่ม

ถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย ส่งผลให้ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในถ้าปาล์มน้ำมันไม่เพียงพอ จึงมีผลทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ลดลงและส่งผลให้กำลังอัดและความทึบน้ำในคอนกรีตต่ำลง นอกจากนี้การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงนั้น จะเหลือถ้าปาล์มน้ำมันบางส่วนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังอัด และความทึบน้ำของคอนกรีตลดลง ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมที่เข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ไม่ควรเกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



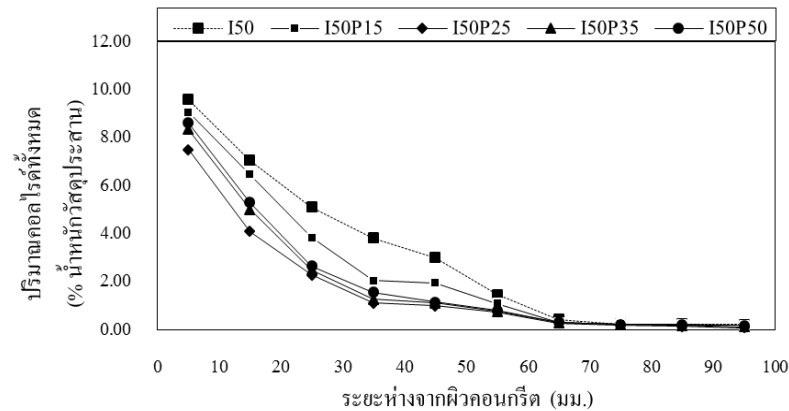
(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ภาพที่ 4-7 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลใน

สภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4-7 (ต่อ)

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดที่อายุ 5 ปี

หลังจากนำตัวอย่างของคอนกรีตมาทดสอบโดยการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ด้วยกรด (Acid soluble) ตามมาตรฐาน ASTM 1152 และปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยน้ำ (Water soluble) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45 และ 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปลาส์มน้ำมันที่บดละเอียดในอัตราร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หลังนำไปแช่ในน้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ดังภาพที่ 4-8 (ก), 4-8 (ข) และ 4-8 (ค) ตามลำดับ โดยสมการสัมพันธ์ของคลอไรด์อิสระ และคลอไรด์ทั้งหมดแสดงสมการที่ 4-1 ถึง 4-15

สมการ 4-1 ถึง 4-5 สำหรับคอนกรีตที่มี W/B = 0.40

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.8071]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{ ของคอนกรีต I40P00} \quad (4-1)$$

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.7681]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{ ของคอนกรีต I40P15} \quad (4-2)$$

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.7382]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{ ของคอนกรีต I40P25} \quad (4-3)$$

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.7535]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{ ของคอนกรีต I40P35} \quad (4-4)$$

$$\text{Free}(\text{Cl}^-) = [0.7608]\text{Total}(\text{Cl}^-), \text{ ของคอนกรีต I40P50} \quad (4-5)$$

สมการ 4-1 ถึง 4-5 สำหรับคอนกรีตที่มี W/B = 0.45

$$\text{Free}(CI) = [0.8289]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I45P00} \quad (4-6)$$

$$\text{Free}(CI) = [0.8113]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I45P15} \quad (4-7)$$

$$\text{Free}(CI) = [0.7609]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I45P25} \quad (4-8)$$

$$\text{Free}(CI) = [0.7928]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I45P35} \quad (4-9)$$

$$\text{Free}(CI) = [0.7990]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I45P50} \quad (4-10)$$

สมการ 4-1 ถึง 4-5 สำหรับคอนกรีตที่มี W/B = 0.50

$$\text{Free}(CI) = [0.8395]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I50P00} \quad (4-11)$$

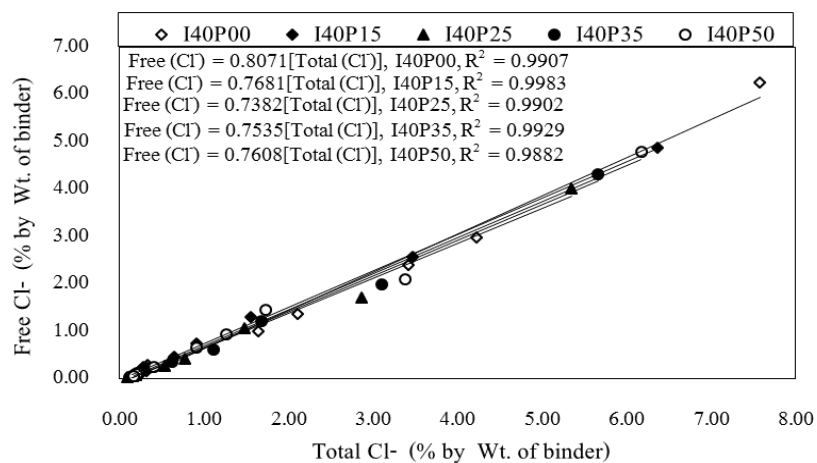
$$\text{Free}(CI) = [0.8255]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I50P15} \quad (4-12)$$

$$\text{Free}(CI) = [0.7809]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I50P25} \quad (4-13)$$

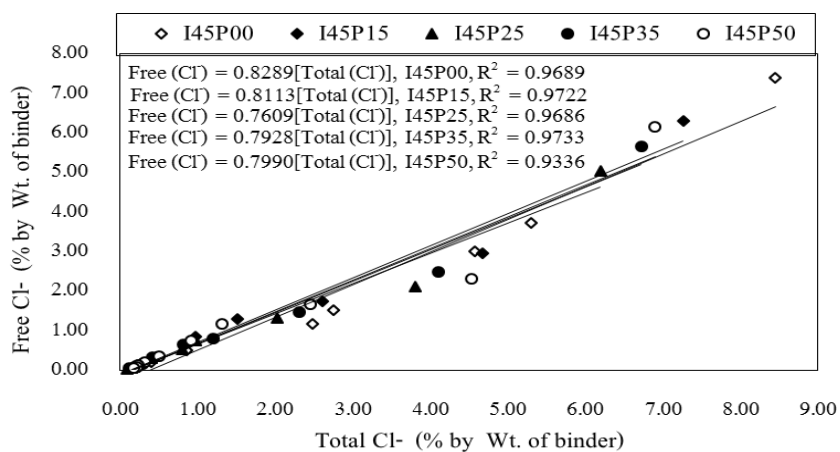
$$\text{Free}(CI) = [0.8028]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I50P35} \quad (4-14)$$

$$\text{Free}(CI) = [0.8192]\text{Total}(CI), \text{ ของคอนกรีต I50P50} \quad (4-15)$$

จากสมการที่ 4-1 ถึงสมการ 4-15 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเข้าปาล์มันบดละเอียดในร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ด้วยมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ จะช่วยให้หาปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น โดยการทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระที่ใช้น้ำต้องใช้เวลาในการทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมง หลังการต้ม ที่ทำให้เสียเวลาในการไทเทรตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์อิสระ ดังนั้นจึงนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต เพื่อเอาไปทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระที่สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยตรง และก็เป็นประโยชน์ในการทำนายสภาวะการกัดกร่อนของคอนกรีตในระยะยาวได้โดยไม่ต้องทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระให้เสียเวลานาน

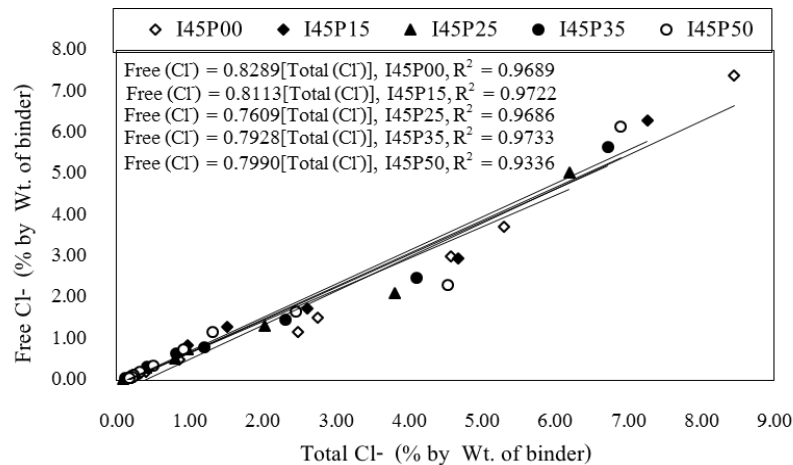


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต
 ที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในน้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4-8 (ต่อ)

4. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถหาได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ดังสมการ (4-16) (Chalee et al., 2010)

$$P_b = \frac{[Total (Cl^-) - Free (Cl^-)] \times 100}{Total (Cl^-)} \quad (4-16)$$

ที่ P_b คือ ร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

Total (Cl) คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

Free (Cl) คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระ

ยกตัวอย่างคำนวณความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (P_b) ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราร้อยละ 15 (I40P15) โดยตัวอย่างนี้มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเป็น $Free(Cl) = [0.7681]Total (Cl)$ เอาไปแทนในสมการ (4-16) ทำการคำนวณค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ได้เท่ากับร้อยละ 23.19 ซึ่งการคำนวณร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในส่วนอื่น ๆ ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ได้ในลักษณะเดียวกันและแสดงค่าดังตารางที่ 4-7

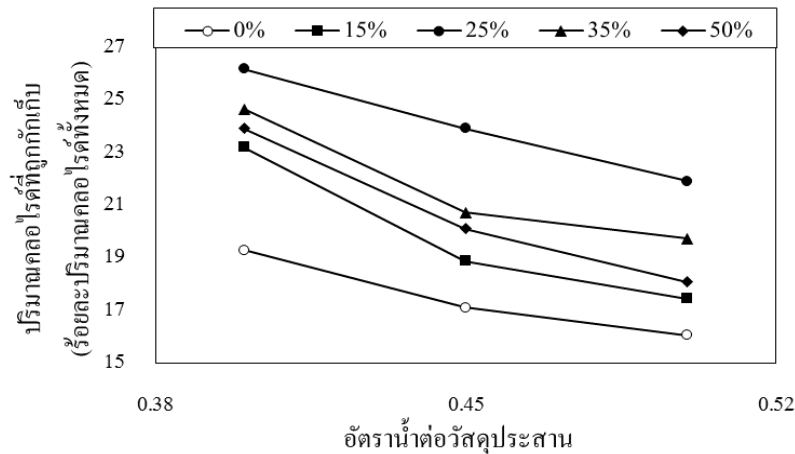
ตารางที่ 4-7 ร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	ค่าเฉลี่ย (Total Cl ⁻ - Free Cl ⁻) (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน)	ค่าเฉลี่ย Total Cl ⁻ (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน)	ร้อยละการกักเก็บ คลอไรด์, P _b
I40P00	0.39	2.03	19.29
I40P15	0.32	1.40	23.19
I40P25	0.31	1.19	26.18
I40P35	0.32	1.32	24.64
I40P50	0.35	1.47	23.92
I45P00	0.43	2.55	17.11
I45P15	0.35	1.83	18.87
I45P25	0.36	1.48	23.91
I45P35	0.34	1.64	20.72
I45P50	0.35	1.76	20.10
I50P00	0.50	3.14	16.05
I50P15	0.44	2.56	17.45
I50P25	0.38	1.76	21.91
I50P35	0.39	2.00	19.72
I50P50	0.38	2.12	18.08

4.1 ผลของอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

พบว่า เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บ เมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ดังภาพที่ 4-9) พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า P_b ลดลง เช่น คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มบดละเอียดที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 พบว่ามีร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) เท่ากับ 19.29, 17.11 และ 16.05 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง

ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง (วิเชียร ชาลี, 2552)

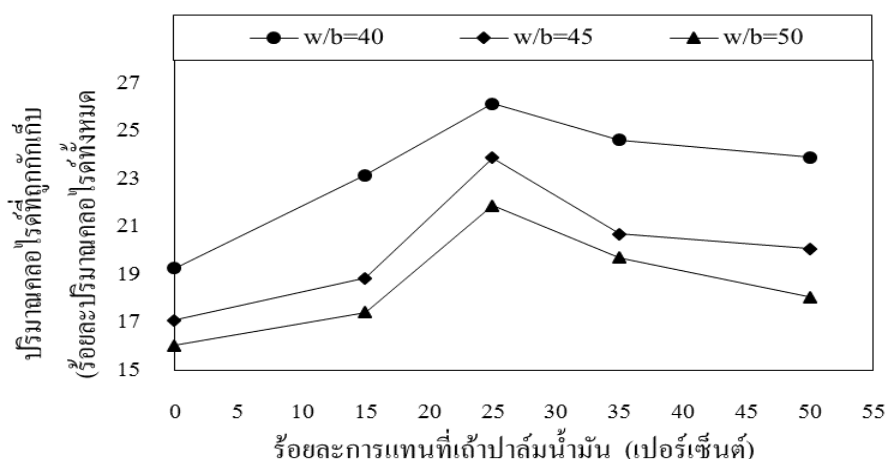


ภาพที่ 4-9 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.2 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

ภาพที่ 4-10 แสดงผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า ค่าร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้ร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง โดยทั่วไปแล้ว วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลง และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย การดักจับคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมี C_3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่าเกลือของฟรีเดิล (Friedel's salt) Tangtermsirikul et al., (2003) การศึกษาครั้งนี้พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผสมในคอนกรีตมีปริมาณของสารประกอบประเภทอะลูมินาต่ำมาก (ร้อยละ 2.5) ซึ่งมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในวัสดุประสานจึงไม่น่าจะส่งผลต่อการดักจับ

คลอไรด์ไอออนที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้ อย่างไรก็ตาม การดักจับคลอไรด์ไอออนอีกส่วนหนึ่ง เป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ โดยคลอไรด์ไอออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น (Tangtermsirikul, 2003) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว นั้นหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณที่สูงมากกว่าร้อยละ 25 ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีค่า P_c เท่ากับ 19.29, 23.19, 26.18, 24.65 และ 23.92 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-10 ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดยหลักที่ถูกต้องแล้ว การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตต้องเป็นลักษณะของการแพร่ที่เป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งในกรณีของการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน

สิ่งแวดล้อมทะเล การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาпилลารี (Capillary suction) ของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น การประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าว จะเรียกว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) การศึกษาครั้งนี้ ได้หาค่า D_c ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (4-17)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4-17)$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ (4-17) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (4-17) แสดงดังสมการที่ (4-18)

$$C_{x,t} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (4-18)$$

เมื่อ

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

x = ระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

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

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลา แช่ t (มม²/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

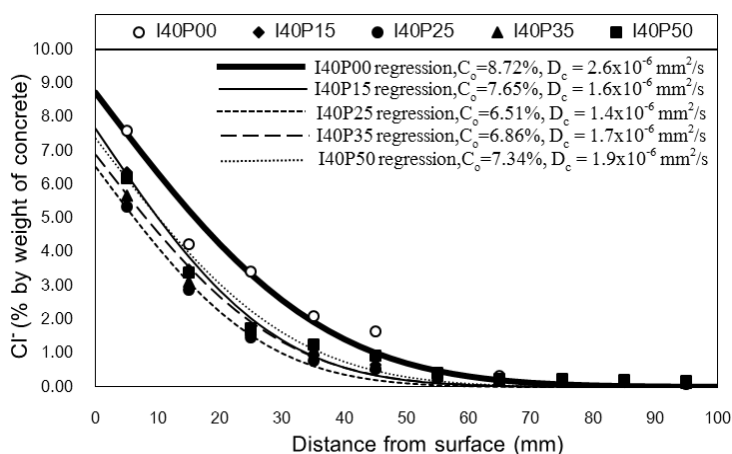
ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (erf)

$$\text{โดย } \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-n^2} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + \dots \right)$$

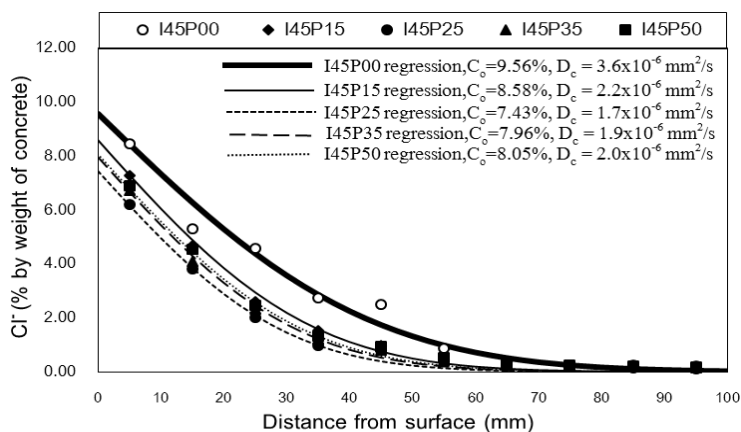
ฟังก์ชันผิดพลาด คือ การหาปริพันธ์ระหว่าง lower_limit และ upper_limit ด้วยใช้ใน

Excel ของ Microsoft เพราะพจน์จากการแก้สมการ บางอย่างได้คำตอบในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการอินทิเกรตหาคำตอบ และจะได้คำตอบด้วยประมาณที่มีค่าที่ใกล้เคียงกับการอินทิเกรตมากที่สุด โดยใช้เวลาน้อยที่สุด และมีเสถียรภาพในกระบวนการคำตอบ

ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (4-18) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังตัวอย่างในภาพที่ 4-11 (ก), 4-11 (ข) และ 4-11 (ค) ที่แสดงกราฟในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี และแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ดังตารางที่ 4-8

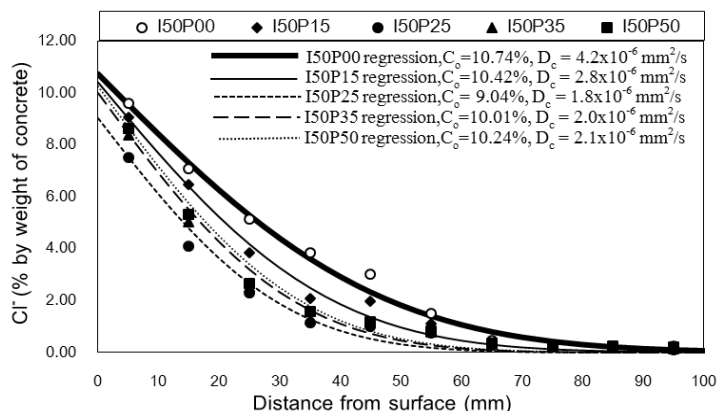


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ภาพที่ 4-11 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



(ค) อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

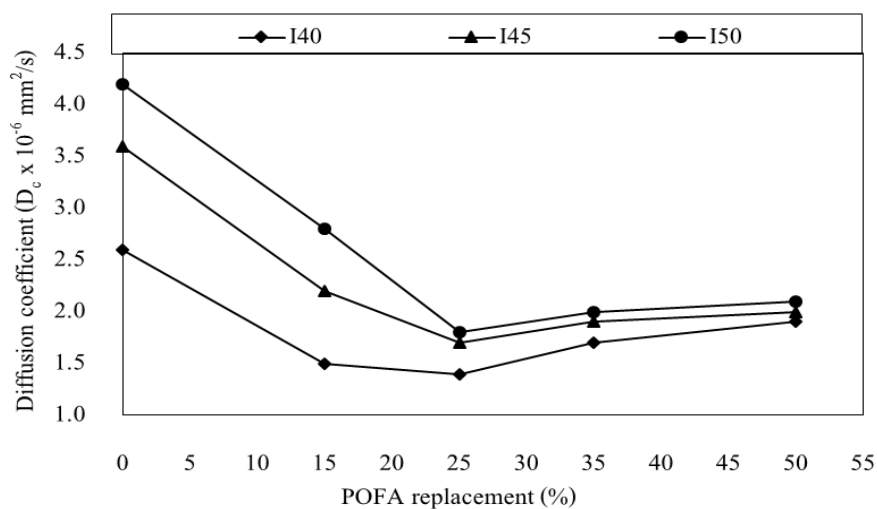
ภาพที่ 4-11 (ต่อ)

ภาพที่ 4-12 แสดงผลของเถ้าปลาล์มน้ำมันต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่าค่า D_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันที่บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 ส่วนการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ (D_c) มีค่าเพิ่มขึ้น เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่า (D_c) เท่ากับ 2.6×10^{-6} , 1.5×10^{-6} , 1.4×10^{-6} , 1.7×10^{-6} , และ 1.9×10^{-6} มม²/วินาที ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันในปริมาณสูงขึ้นไป (มากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) เริ่มส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในทุกอัตราส่วนผสม ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าปลาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และส่งผลให้คอนกรีตคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ (Chalee et al., 2013) การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปลาล์มน้ำมัน ที่ส่งผลดีต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO_2) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 65.3 ในขณะที่ Al_2O_3 มีแค่ร้อยละ 2.5 เท่านั้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Chalee et al., 2013) ที่ใช้เถ้ากลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมใน

คอนกรีต เพื่อดำเนินการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยพบว่า การใช้เจ้า แกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ที่มีผลการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น โดยสมบัติทาง เคมีของเจ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่ามีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าลูมินาค่อนข้างมาก เหมือนกับเจ้า ปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ การแทนที่เจ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นเริ่มส่งผลให้การ ดำเนินงานของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลลดลง อาจเป็นผลจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดลง ส่งผล ให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ มีไม่ มากพอในเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่มีในเจ้าปาล์มน้ำมัน ประกอบกับปริมาณเจ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก็สามารถที่จะละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้ คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น (Charoenprom & Chalee, 2013)

ตารางที่ 4-8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันหลังแช่น้ำ ทะเลเป็นเวลา 5 ปี

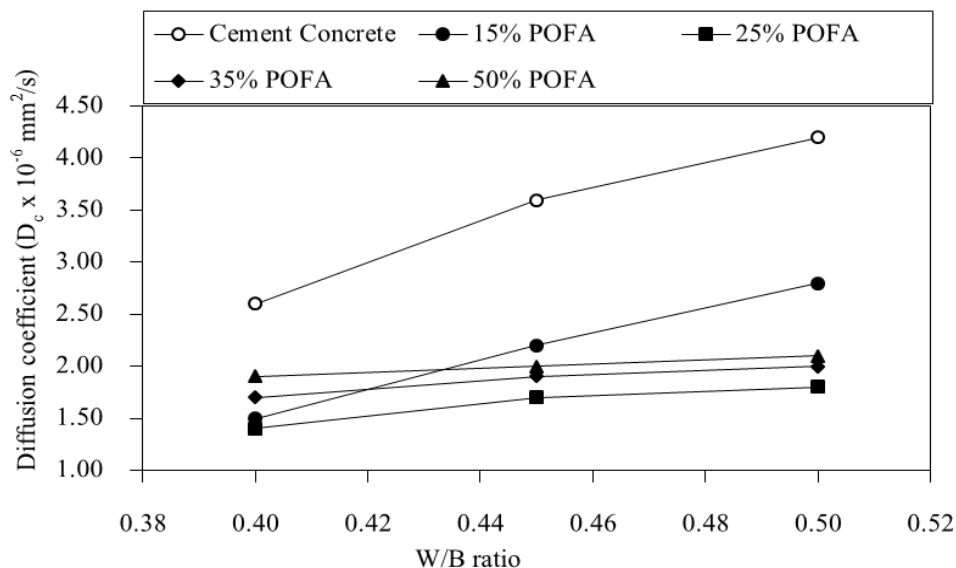
ส่วนผสม	$D_c \times 10^{-6}$ (มม ² /วินาที)
I40P00	2.6
I40P15	1.5
I40P25	1.4
I40P35	1.7
I40P50	1.9
I45P00	3.6
I45P15	2.2
I45P25	1.7
I45P35	1.9
I45P50	2.0
I50P00	4.2
I50P15	2.8
I50P25	1.8
I50P35	2.0
I50P50	2.1



ภาพที่ 4-12 ผลของเถ้าปลาล้มน้ำมันต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

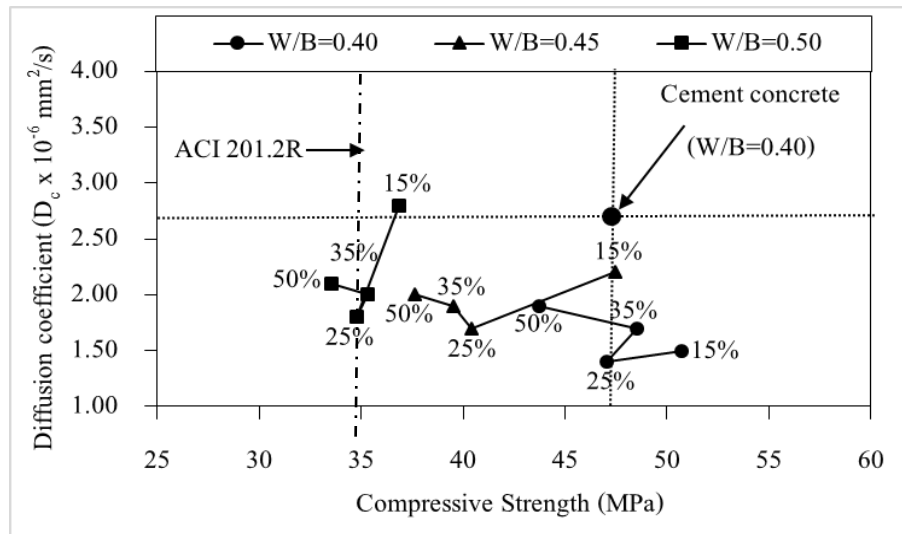
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ตามภาพที่ 4-13 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง เช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าปลาล้มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50, 0.45 และ 0.40 ให้ค่า D_c เท่ากับ 4.2×10^{-6} , 3.6×10^{-6} และ 2.6×10^{-6} มม²/วินาที ตามลำดับ นอกจากนั้นการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมันมากกว่ากลุ่มที่ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมัน (สังเกตได้จากความชันของกราฟในภาพที่ 4-13) ทั้งนี้เป็นผลจากน้ำเป็นปัจจัยหลักของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตธรรมดา และการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและกำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน (Chindaprasirt & Jaturapitakkul, 2008) จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่ลดลงมีผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมันบดละเอียดความทึบน้ำของคอนกรีตที่ส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ นอกจากจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันบางส่วนยังเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งความทึบน้ำในคอนกรีตกลุ่มนี้จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของเถ้าปลาล้มน้ำมันด้วย โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตจะเป็นผลหลักที่ทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้นในช่วงต้น แต่หลังจากนั้นความแน่นของคอนกรีตจะเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นหลัก ทำให้โพรงในคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น โดย

ความแน่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในระยะยาวไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน



ภาพที่ 4-13 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ตามภาพที่ 4-14 แสดงให้เห็นว่า กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 15-25 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และ ค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม ตามมาตรฐาน ACI 201.2R สำหรับคอนกรีตที่บริเวณชายฝั่งทะเล การแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ($W/B=0.40$) และกำลังอัดของคอนกรีตควรจะสูงกว่า 35 เมกะปาสกาล ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อัตราร้อยละ 15 และ 25 มีค่า D_c ใกล้เคียงกันคือ 1.50×10^{-6} มม²/วินาที และ 1.40×10^{-6} มม²/วินาที ตามลำดับ ดังนั้นการศึกษานี้ พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 15 มีความเหมาะสมต่อความคงทนของคอนกรีต เนื่องจากให้กำลังอัดสูง และ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำลง (Jensen & Pratt, 1989)



ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่วัดในรูปของร้อยละของพื้นที่ที่เกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึก 10, 20 และ 50 มม. ดังตารางที่ 4-9 และแสดงร้อยละน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเกิดสนิม ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-9 พื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	พื้นที่ที่เกิดสนิมที่ผิวเหล็ก (%)		
	ระยะห่างจากผิว 10 มม.	ระยะห่างจากผิว 20 มม.	ระยะห่างจากผิว 50 มม.
I40P00	92.87	74.52	-
I40P15	89.36	57.26	-
I40P25	80.19	52.87	-
I40P35	92.55	58.09	-
I40P50	95.86	63.82	-
I45P00	97.39	82.36	-

ตารางที่ 4-9 (ต่อ)

ส่วนผสม	พื้นที่ที่เกิดสนิมที่ผิวเหล็ก (%)		
	ระยะห่างจากผิว 10 มม.	ระยะห่างจากผิว 20 มม.	ระยะห่างจากผิว 50 มม.
I45P15	95.10	65.73	-
I45P25	87.58	63.31	-
I45P35	90.70	79.62	-
I45P50	97.58	86.11	-
I50P00	98.98	90.45	-
I50P15	91.34	82.42	-
I50P25	88.79	65.16	-
I50P35	92.36	71.91	-
I50P50	97.45	76.62	-

ตารางที่ 4-10 ร้อยละน้ำหนักเหล็กที่สูญหาย เนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	น้ำหนักที่สูญหายที่เกิดสนิมที่ผิวเหล็ก (%)		
	ระยะห่างจากผิว 10 มม.	ระยะห่างจากผิว 20 มม.	ระยะห่างจากผิว 50 มม.
I40P00	6.58	5.12	0
I40P15	3.85	3.50	0
I40P25	3.17	3.04	0
I40P35	3.63	3.64	0
I40P50	3.96	4.47	0
I45P00	9.30	8.30	0
I45P15	6.13	7.57	0
I45P25	4.21	6.20	0
I45P35	5.89	7.48	0
I45P50	7.97	8.07	0

ตารางที่ 4-10 (ต่อ)

ส่วนผสม	น้ำหนักที่สูญหายที่เกิดสนิมที่ผิวเหล็ก (%)		
	ระยะห่างจากผิว 10 มม.	ระยะห่างจากผิว 20 มม.	ระยะห่างจากผิว 50 มม.
I50P00	11.01	9.48	0
I50P15	8.79	8.49	0
I50P25	8.05	7.53	0
I50P35	8.18	7.82	0
I50P50	8.28	8.16	0

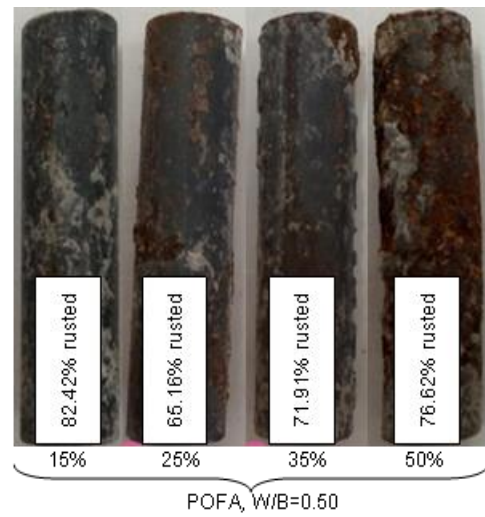
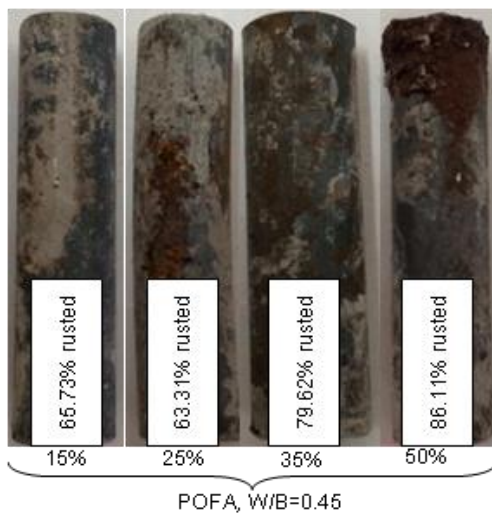
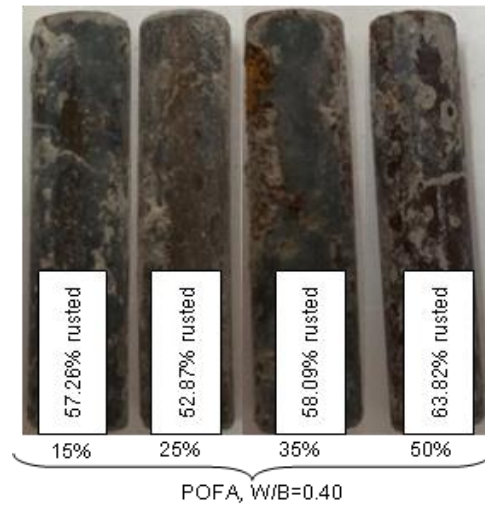
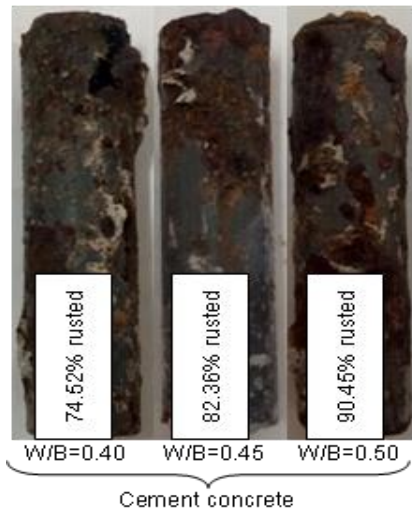
เมื่อพิจารณาการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่แสดงในรูปของร้อยละพื้นที่ที่เกิดสนิมเหล็ก กับ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเกิดสนิมพบว่า ค่าทั้งสองให้ความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อพิจารณารวมกับภาพการเกิดสนิมเหล็กในภาพที่ 4-15 ที่แสดงผลของเจ้าปาล์ม น้ำมันและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นพบในระยะหุ้มคอนกรีตเท่ากับ 10 และ 20 มม. เท่านั้น ส่วนที่ระยะหุ้ม 50 มม. ไม่ปรากฏการเกิดสนิมแม้แต่ตัวอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี การทำลายเหล็กเสริมเกิดขึ้นที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กน้อย ๆ ส่วนที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ยังไม่ปรากฏการเกิดสนิม โดยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 มีผลให้การกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีการแนวโน้มลดลง ส่วนการแทนที่เจ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมมากขึ้น เช่น คอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีร้อยละในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ระยะหุ้มเหล็ก 20 มม. เท่ากับ 74, 57, 53, 58, 64 ตามลำดับ และเป็นแนวโน้มเดียวกันในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.50 การกัดกร่อนเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเกิดจากน้ำและออกซิเจนเป็นหลัก และมีเกลือคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดสนิมเหล็กเร็วขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้ง โดย การดูดซึมจนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนแปลง น้ำที่อยู่ในคอนกรีตจะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวสูงขึ้น ดังนั้น ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของ

การเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และจะเข้าไปสู่บริเวณคอนกรีตและบริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถ ทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล โดยคลอไรด์ เป็นตัวกลางที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกัน เหล็กเสริม ไม่ให้เกิดสนิมลดลงและหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ อีกอย่างคลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด (Jensen & Pratt, 1989) แต่ความที่บดน้ำและความแน่นของคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ น้ำ และออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตที่ทำให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมลดลงไปด้วย (Leng et al., 2000) ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงเห็นได้ว่า แนวโน้มของการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตจึงมีทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาในข้างต้น นอกจากนี้ปริมาณของ SiO_2 ที่สูงในเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี จะได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นเจลแข็ง ทำให้สามารถดักจับคลอไรด์ทางกายภาพดีขึ้น และมีผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมเหล็กลดลงอีกด้วย (Chindaprasirt et al., 2007) ส่วนการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ส่งผลให้ได้ Ca(OH)_2 ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ในเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เพียงพอ จึงมีผลให้ได้ C-S-H ลดลง และการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงด้วย (Chaipanich et al., 2010) ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำลง จึงมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ น้ำ และออกซิเจน เข้าไปทำให้เกิดสนิมในคอนกรีตได้มากขึ้น



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม.

ภาพที่ 4-15 ผลของเก่าปาล์มน้ำมันและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.

ภาพที่ 4-15 (ต่อ)



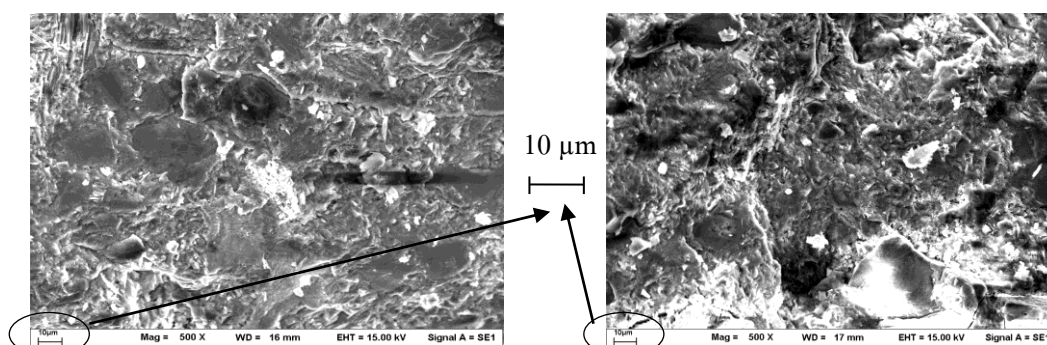
(ค) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

ภาพที่ 4-15 (ต่อ)

โครงสร้างจูลภาคของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่เซในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

การบดเถ้าปล้มน้ำมันเป็นการเพิ่มความละเอียดของเถ้าปล้มน้ำมันและเป็นการเพิ่มการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปล้มน้ำมัน การบดไม่เพียงแต่เพิ่มความละเอียดของเถ้าปล้มน้ำมัน แต่ยังเป็นการลดความพรุนของเถ้าปล้มน้ำมันด้วย ซึ่งสังเกตได้จากค่าความถ่วงจำเพาะที่มีค่าเพิ่มขึ้นสูงจาก 1.97 (ก่อนบด) เป็น 2.33 (หลังการบด)

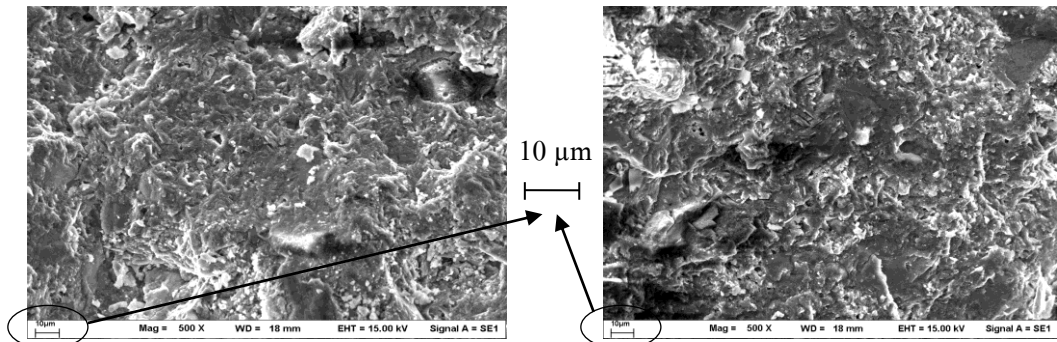
จากภาพที่ 4-16 (ก) และ 4-16 (ข) เป็นรูปถ่ายขยายด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 10 ไมครอน ของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดและมีน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับที่อายุ 5 ปี จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและความทึบน้ำในคอนกรีต เมื่อพิจารณาตามภาพที่ 4-16 (ข) พบว่า ปริมาณน้ำที่มากขึ้น มีผลให้เนื้อของซีเมนต์เพสต์มีความพรุนเป็นผลึกที่ไม่แน่นอน และสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปได้มาก ส่วนการใช้ปริมาณน้ำที่ลดลงดังภาพที่ 4-16 (ก) พบว่า เนื้อซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น เมื่อเทียบกับภาพที่ 4-16 (ข) โดยเป็นผลจากผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์เจด ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ที่มีความต่อเนื่อง และทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ประกอบกับโพรงคาปิลารีที่เกิดจากน้ำอิสระในซีเมนต์เพสต์ลดลง จึงทำให้ความพรุนในเนื้อคอนกรีตลดลง และเนื้อแน่นขึ้น เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน ดังภาพที่ 4-17 ถึง 4-20 พบว่า การใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 (ภาพที่ 4-20) จะพบผลึกที่มีความพรุนสูง และไม่แน่นอน ซึ่งเห็นชัดเจนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ภาพที่ 4-17 และ 4-18) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ดังที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้อาจเกิดจากใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น จึงทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นสารที่ให้กำลังกับคอนกรีต แต่เมื่อมีการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้เกิด Ca(OH)_2 น้อยลงที่ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไม่มาก ช่องว่างมีมากขึ้น กำลังอัดคอนกรีตลดลง และมีความพรุนมากขึ้น (Chaipanich & Nochaiya, 2010)



(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของ I40P00

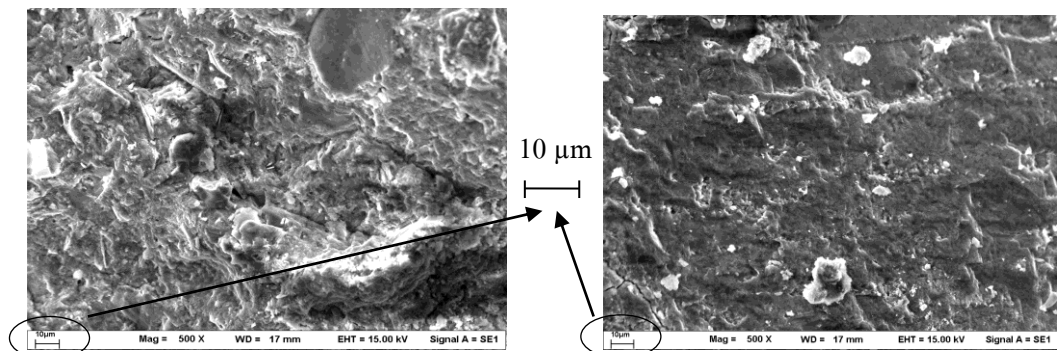
(ข) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของ I50P00

ภาพที่ 4-16 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.50



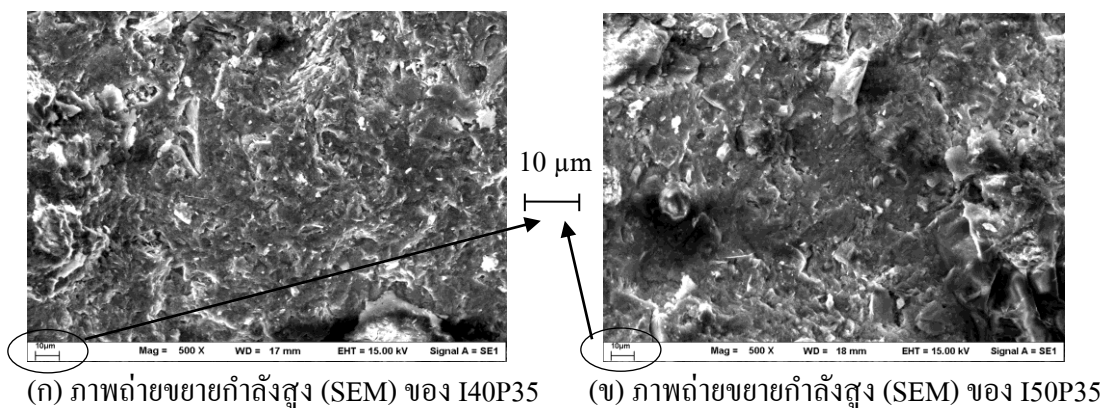
(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของ I40P15 (ข) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของ I50P15

ภาพที่ 4-17 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดย
 น้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50

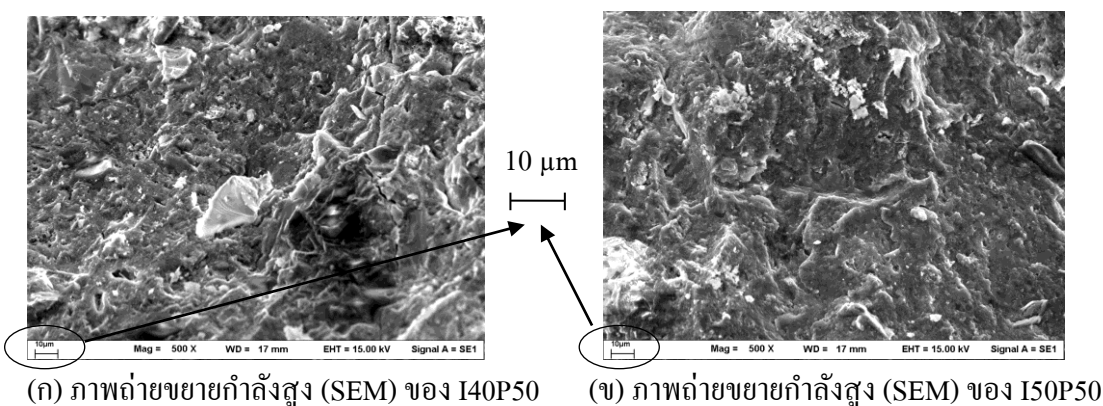


(ก) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของ I40P25 (ข) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของ I50P25

ภาพที่ 4-18 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดย
 น้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50



ภาพที่ 4-19 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 35 โดย
 น้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50



ภาพที่ 4-20 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 โดย
 น้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50

การสร้างแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อในการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ ในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's Second Law) ดังสมการที่ (4-21)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4-21)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตจากสมการที่ (4-21) เป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถใช้ได้ดีกับข้อมูลการทดสอบในภาคสนามที่มีการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล (Thomas et al., 2004) และในการศึกษาที่ผ่านมา (Chalee & Jaturpitakkul, 2009) พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์นานขึ้น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาว จึงควรมีการแปรเปลี่ยนค่าที่ D_c ในสมการที่ (4-21) ตามระยะเวลาที่นานขึ้น โดยการศึกษาที่ผ่านมาของ Mangat and Limbachiya (1999) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) กับระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นตามสมการที่ (4-22)

$$D_c = (t)^{-\beta} \quad (4-22)$$

แทนค่า (D_c) จากสมการที่ (4-22) ในสมการที่ (4-21) ได้ดังสมการที่ (4-23)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = t^{-\beta} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4-23)$$

คำตอบทั่วไป (General Solution) ของสมการที่ (4-23) เป็นตามสมการที่ (4-24)

$$C_{x,t} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{t^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right) \right] \quad (4-24)$$

สมการที่ (4-24) สามารถใช้หาปริมาณคลอไรด์ ($C_{x,t}$) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x (มม) และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t (วินาที) ซึ่งในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้เปลี่ยนหน่วยเวลา t จากวินาทีเป็น ปี เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น เปลี่ยนหน่วยเวลาจากวินาทีเป็นปีในสมการที่ (4-24) ได้เป็นดังสมการที่ (4-25)

$$C_{x,t} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{31536000 t^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right) \right] \quad (4-25)$$

เมื่อ

$C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t

t = ระยะเวลาแช่ (ปี)

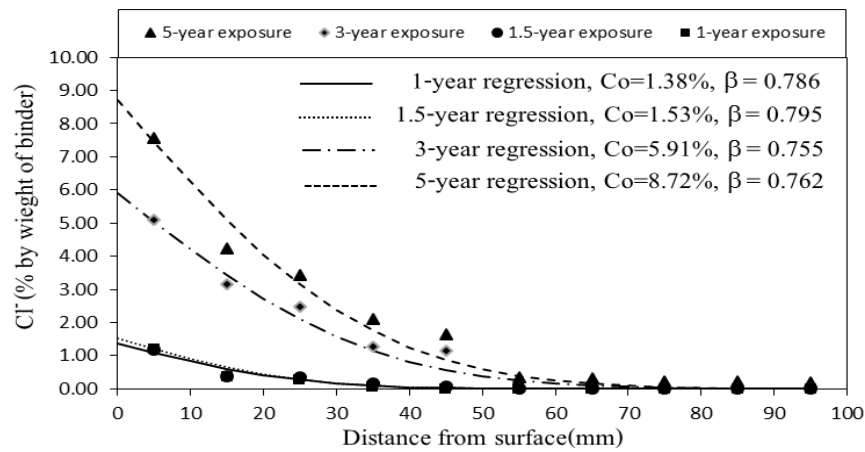
x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

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

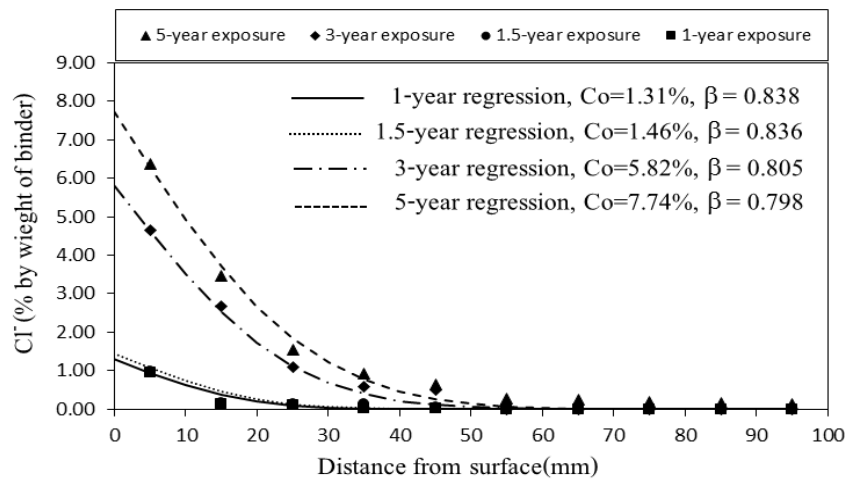
β = ค่าสัมประสิทธิ์

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

การหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตามสมการที่ (4-25) จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ β และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_o) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ ได้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยของสมการที่ (4-25) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลระยะเวลา 5 ปี ดังตัวอย่างในภาพที่ 4-20 ที่แสดงการหาค่า β และ C_o โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยที่ปรับค่า β และ C_o ในสมการที่ (4-25) ให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังภาพที่ 4-21

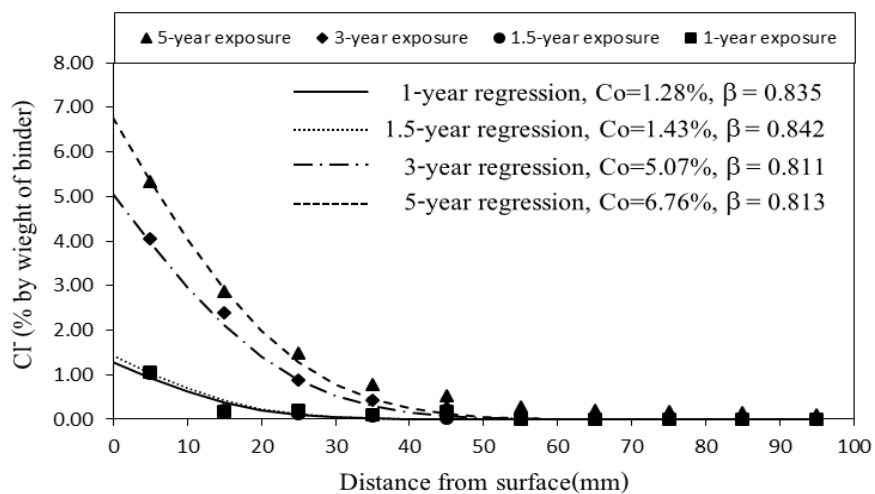


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (I40P00)

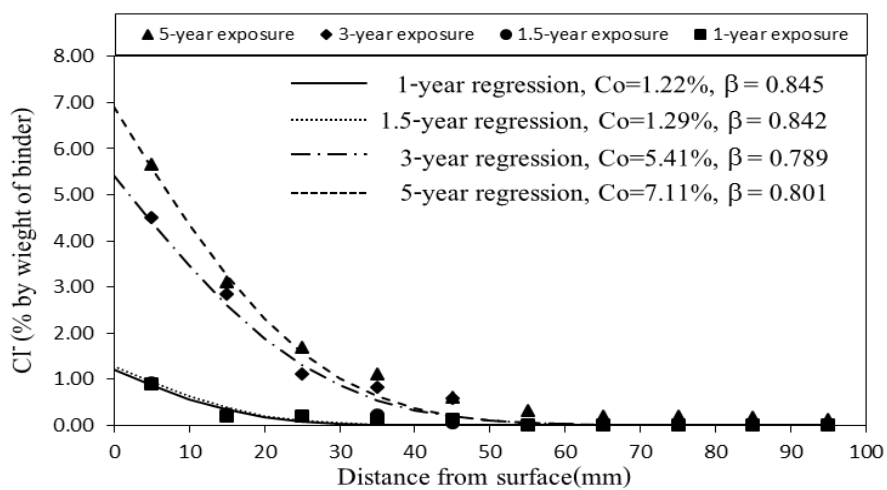


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 (I40P15)

ภาพที่ 4-21 การหาค่า β และ C_0 ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี W/B= 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

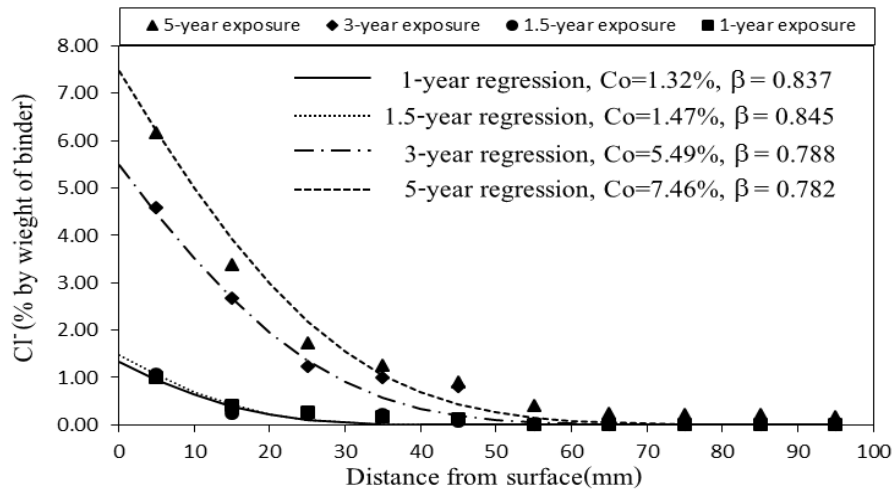


(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปลั่มน้ำมันร้อยละ 25 (I40P25)

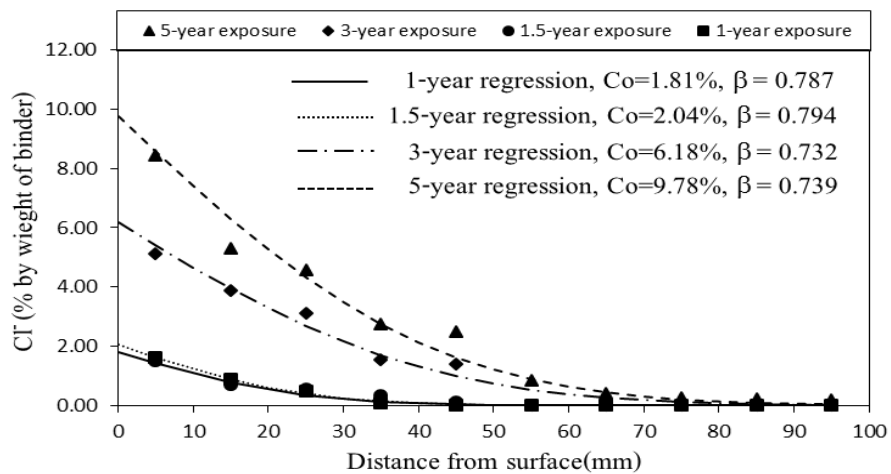


(ง) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปลั่มน้ำมันร้อยละ 35 (I40P35)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)

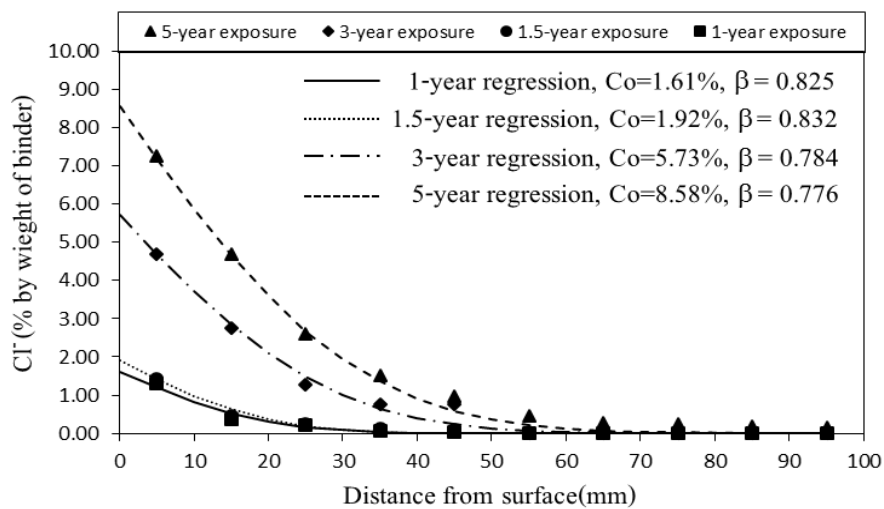


(จ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 (I40P50)

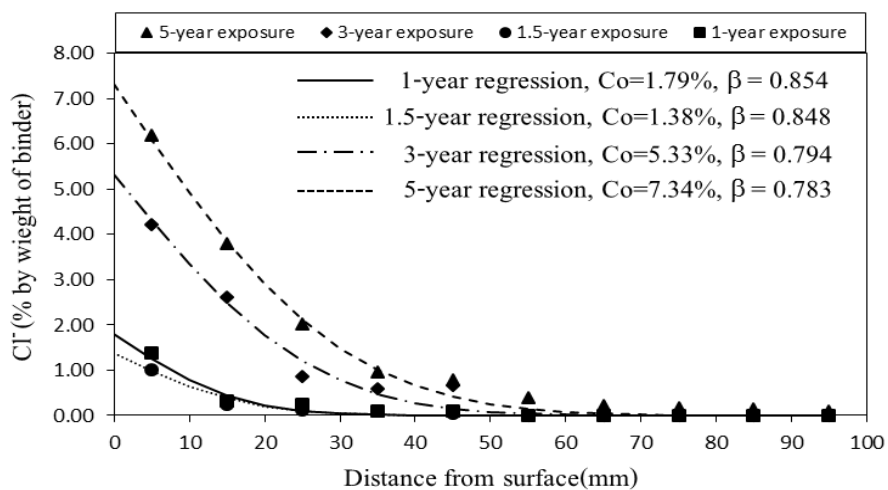


(ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (I45P00)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)

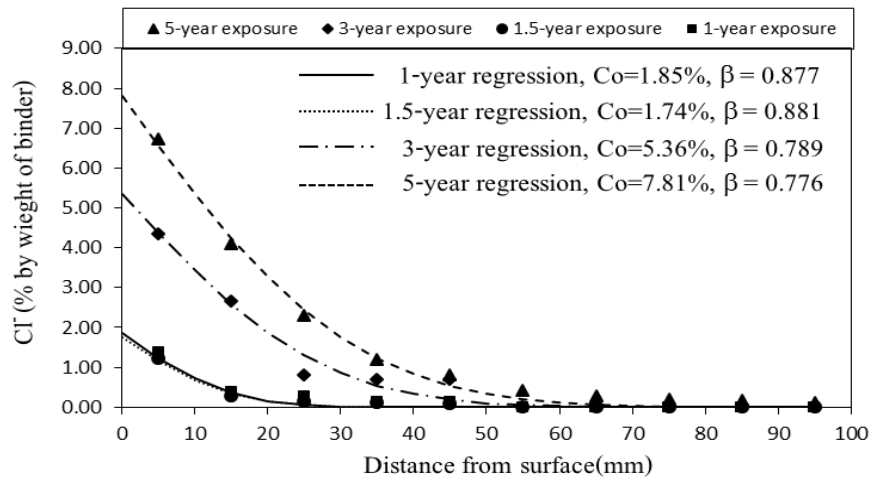


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 (I45P15)

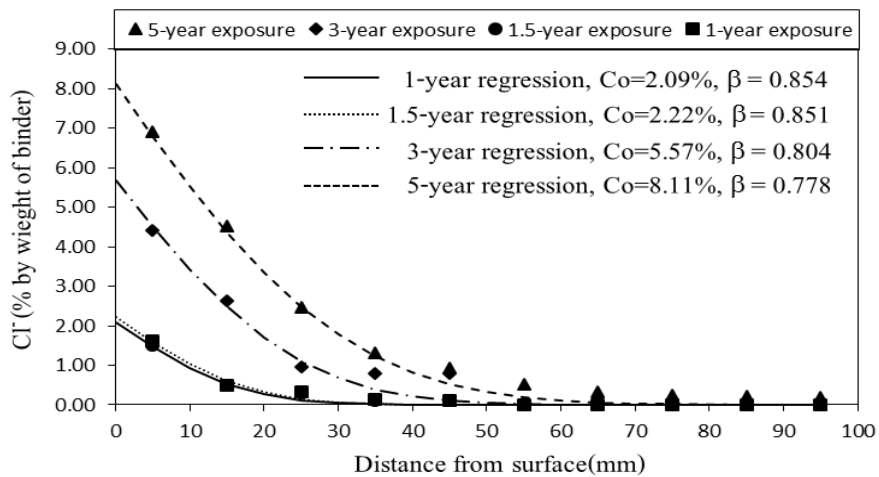


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 (I45P25)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)

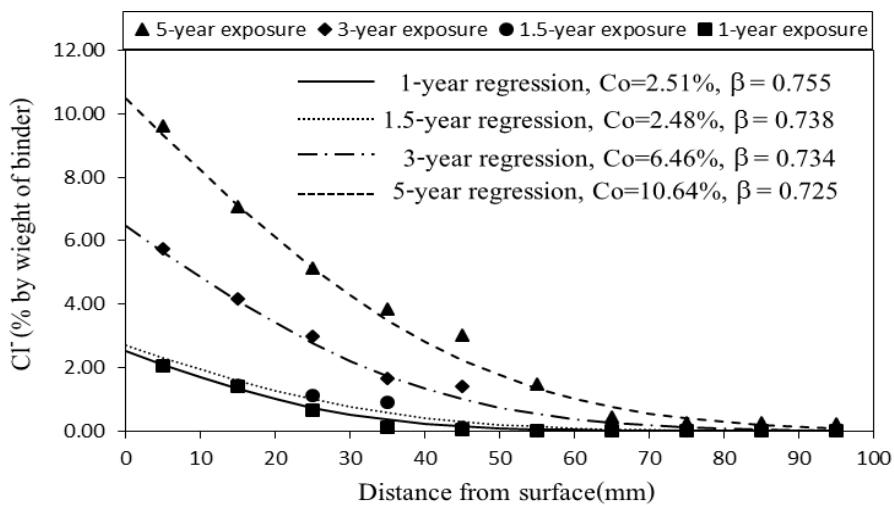


(ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 35 (I45P35)

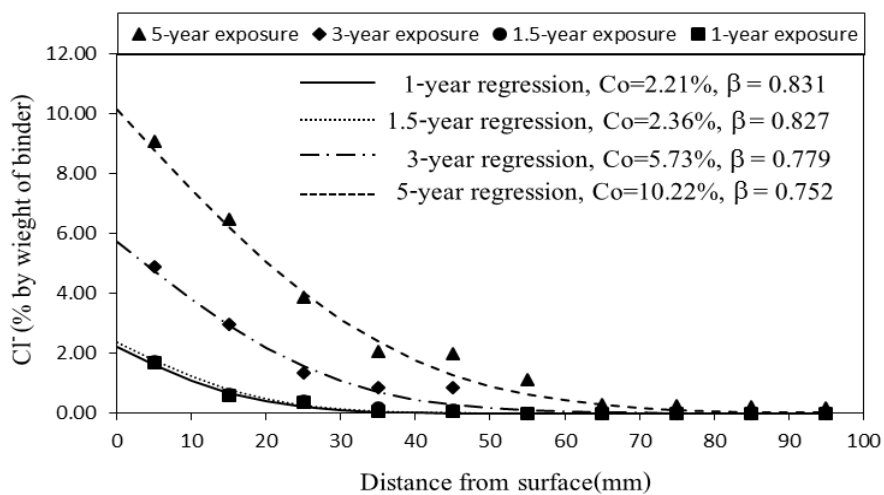


(ญ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 (I45P50)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)

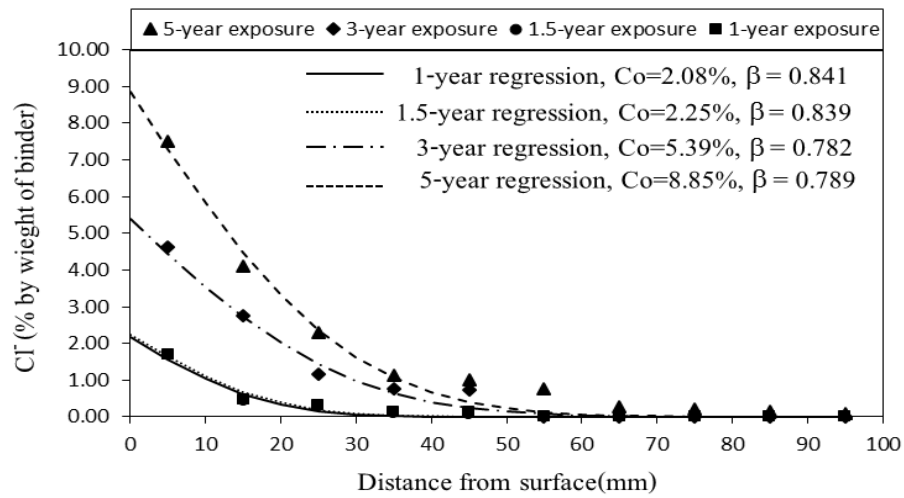


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (I50P00)

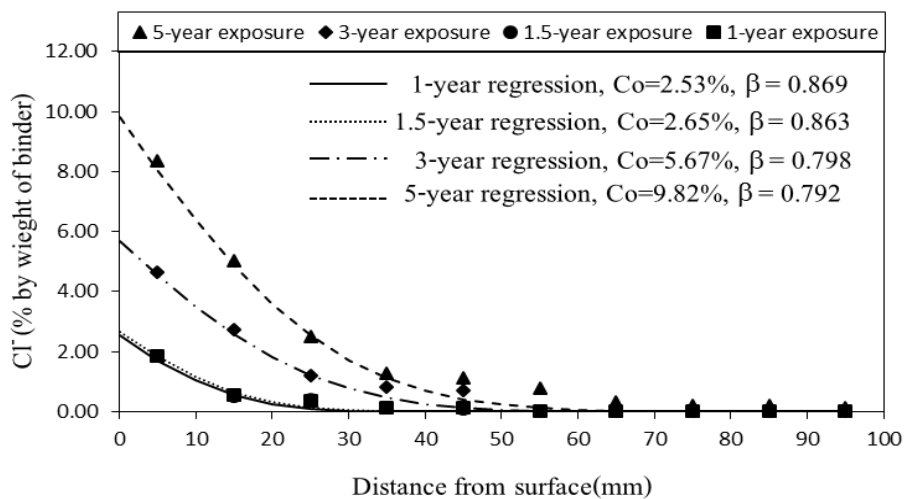


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 (I50P15)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)

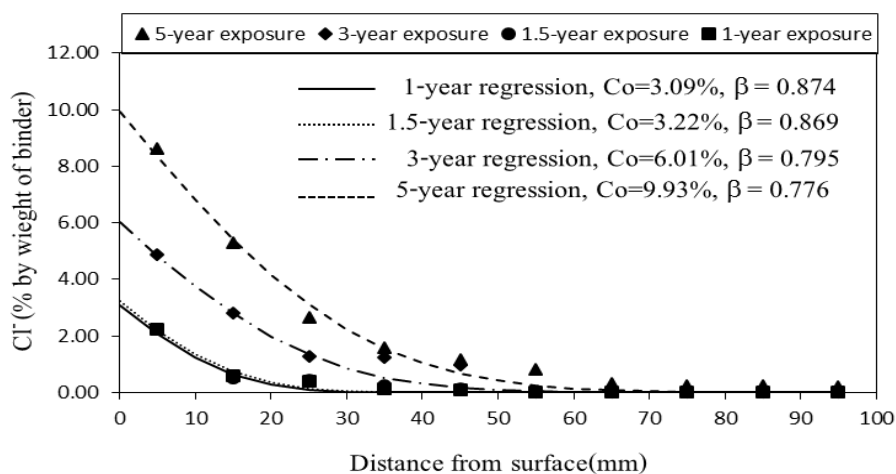


(จ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 (I50P25)



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 35 (I50P35)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)



(ต) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 (I50P50)

ภาพที่ 4-21 (ต่อ)

ตารางที่ 4-12 สัมประสิทธิ์ β

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ β				เฉลี่ย β
	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี	
I40P00	0.786	0.795	0.755	0.762	0.775
I40P15	0.838	0.836	0.805	0.798	0.819
I40P25	0.835	0.842	0.811	0.813	0.825
I40P35	0.845	0.842	0.789	0.801	0.819
I40P50	0.837	0.845	0.788	0.782	0.813
I45P00	0.787	0.794	0.732	0.739	0.763
I45P15	0.825	0.832	0.784	0.776	0.804
I45P25	0.854	0.848	0.794	0.783	0.820
I45P35	0.877	0.881	0.789	0.776	0.831
I45P50	0.854	0.851	0.804	0.778	0.822
I50P00	0.755	0.738	0.734	0.725	0.738
I50P15	0.831	0.827	0.779	0.752	0.797
I50P25	0.841	0.839	0.782	0.789	0.813

ตารางที่ 4-12 (ต่อ)

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ β				เฉลี่ย β
	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี	
I50P35	0.869	0.863	0.798	0.792	0.831
I50P50	0.874	0.869	0.795	0.776	0.829

ตารางที่ 4-13 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต

ส่วนผสม	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต				เฉลี่ย C_o			
	C_o (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)							
	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี
I40P00	1.4	1.53	5.91	8.72				
I40P15	1.31	1.46	5.82	7.74				
I40P25	1.28	1.43	5.07	6.76	1.3	1.4	5.5	7.5
I40P35	1.22	1.29	5.41	6.91				
I40P50	1.32	1.47	5.49	7.46				
I45P00	1.81	2.04	6.18	9.78				
I45P15	1.61	1.92	5.73	8.58	1.8	1.9	5.7	8.3
I45P25	1.79	1.38	5.33	7.34				
I45P35	1.85	1.74	5.36	7.81				
I45P50	2.09	2.22	5.67	8.11				
I50P00	2.51	2.68	6.46	10.49				
I50P15	2.21	2.36	5.73	10.15				
I50P25	2.18	2.25	5.39	8.85	2.5	2.6	5.9	9.8
I50P35	2.53	2.65	5.67	9.82				
I50P50	3.09	3.22	6.01	9.93				

พิจารณาค่า β ตามตารางที่ 4-12 พบว่าไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเปลี่ยนตามปริมาณการแทนที่เอ้าปาล์มน้ำมัน และ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ β ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณเทียบกับปริมาณการแทนที่เอ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POFA) กับ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง β กับปริมาณการแทนที่เอ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POFA) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการที่ (4-26)

$$\beta = \alpha_1 (POFA)^2 + \alpha_2 (POFA) + \alpha_3 \quad (4-26)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง α_1 , α_2 และ α_3 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (4-27) ถึง (4-29) ตามลำดับ

$$\alpha_1 = -5 \times 10^{-5} \quad (4-27)$$

$$\alpha_2 = 0.013 (W / B) - 0.0022 \quad (4-28)$$

$$\alpha_3 = -0.382 (W / B) + 0.9314 \quad (4-29)$$

เมื่อแทนค่า α_1 , α_2 และ α_3 ในสมการที่ (4-26) คำนวณค่า β ในรูปของปริมาณการแทนที่ เอ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังสมการที่ (4-30)

$$\beta = -5 \times 10^{-5} (POFA)^2 + [0.013 (W / B) - 0.0022] (POFA) - 0.382 (W / B) + 0.9314 \quad (4-30)$$

เมื่อ

$$\beta = \text{ค่าสัมประสิทธิ์}$$

POFA = ร้อยละการแทนที่เอ้าปาล์มน้ำมันบดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

W/B = อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน

พิจารณาค่า C_0 ตามตารางที่ 4-13 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของเอ้าปาล์มน้ำมันที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเล ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ C_0 ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับระยะเวลา

แฉ่คอนกรีตในน้ำทะเล โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง C_o กับระยะเวลาแช่ (t) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ (4-31)

$$C_o = \gamma_1 \ln(t) + \gamma_2 \quad (4-31)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง γ_1 และ γ_2 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (4-32) และ (4-33) ตามลำดับ

$$\gamma_1 = 4.278 (W / B) + 2.4507 \quad (4-32)$$

$$\gamma_2 = 9.42 (W / B) - 3.1284 \quad (4-33)$$

แทนค่า γ_1 และ γ_2 ในสมการที่ (4-31) คำนวณหา C_o ได้ดังสมการที่ (4-34)

$$C_o = 4.278 (W / B) + 2.4507 \ln(t) + 9.42 (W / B) - 3.1284 \quad (4-34)$$

เมื่อ

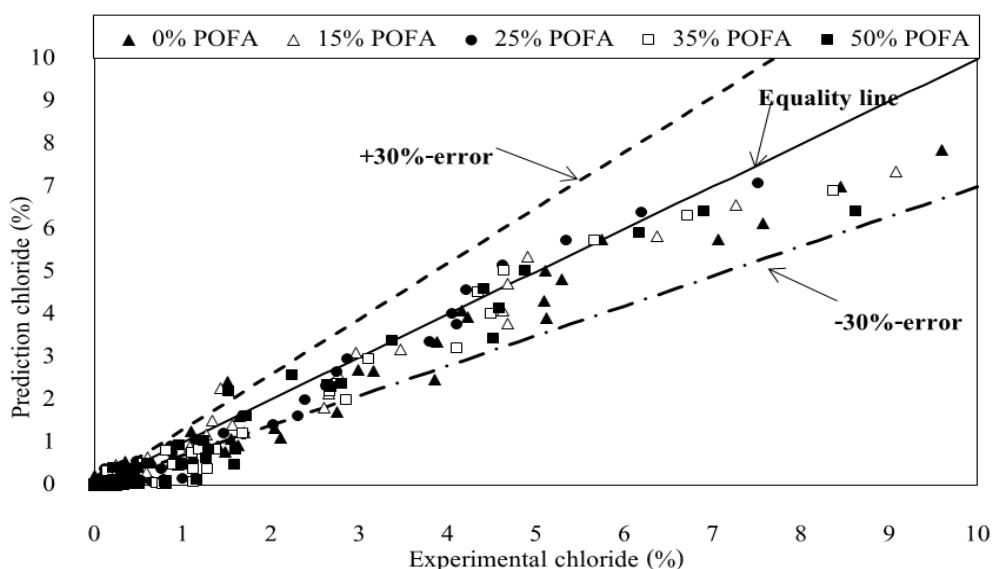
C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) (ที่ $x=0$)
ที่ระยะเวลาแช่ t

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่ตำแหน่งใด ๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 1 ปี ขึ้นไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.40, 0.45 และ 0.50 อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยแตกและมีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหาได้จากตัวอย่างที่เจาะตรงตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200 x 200 x 200 มม³ ซึ่งสมมุติให้เป็นการซึมผ่านในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์ลงไปในแนวตั้งของตัวอย่างคอนกรีต โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้ ได้แก่ พื้นฐานราก หรือโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีลักษณะการซึมเข้าของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตในลักษณะทิศทางเดียว

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดที่ได้จากแบบจำลอง กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1, 1.5, 3 และ 5 ปี โดยเปรียบเทียบในคอนกรีตที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตเท่ากับ 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, และ 95 มม. ดังแสดงในภาพที่ 4-22



ภาพที่ 4-22 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการแช่คอนกรีตในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 1, 1.5, 3 และ 5 ปี

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากโมเดลและการทดลอง ซึ่งแสดงในภาพที่ 4-21 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่าคลาดเคลื่อนในร้อยละ ± 30 โดยทุกส่วนผสมของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดมีความคลาดเคลื่อนอยู่ช่วงความลึก 7 มม. ถึง 10 มม. เพราะว่ามีปริมาณคลอไรด์มีค่าน้อยมาก คือ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 บางส่วนผสมในความลึกนี้ ไม่มีปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปด้วยซ้ำ จากการเปรียบเทียบจากค่าตัวเลขระหว่างข้อมูลจากโมเดลและการทดลองจริงให้เห็นว่า มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้าเปรียบเทียบอยู่ในรูปของอัตราร้อยละ (Percent error) ให้เห็น

ได้ว่ามีค่าร้อยละคลาดเคลื่อนต่างกันค่อนข้างเยอะ ซึ่งทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูงสำหรับข้อมูลที่อยู่ในความลึก 7 มม. ถึง 10 มม.

อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการทดสอบกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่าสามารถทำนายได้สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้เป็นฐานในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งควรมีการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยแบบจำลอง กับข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ของนักวิจัยอื่น ๆ ด้วยอย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่พบข้อมูลการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมทะเล ตลอดจนข้อมูลที่ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการค่อนข้างน้อยและมีอายุการแช่ไม่นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้เปรียบเทียบผลการทำนายกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองเท่านั้น และอีกอย่างแบบจำลองนี้สามารถใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น แต่การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงที่สุดในกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน และสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
2. การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี
3. การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50
4. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) และการเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มลดลง โดยการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
5. ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมในการใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ คือ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ไม่เกินร้อยละ 25 เนื่องจากทำให้กำลังอัด การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กเป็นไปในทิศทางที่ดี
6. ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_c) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณสูงถึงร้อยละ 50

7. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ตำแหน่งใด ๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 1 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.40, 0.45 และ 0.50 แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีลักษณะการซึมผ่านของคอนกรีตในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยการใชแบบจำลองในการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 30

8. จากการศึกษาี้สามารถสรุปได้ว่า ส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล คือ คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เนื่องจากมีกำลังอัด และการพัฒนากำลังอัดสูง และยังสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี อีกทั้งยังส่งผลให้ลดการเกิดพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมที่ผิวเหล็กเสริมได้ดีที่สุด เมื่อมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพียงพอ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเก็บข้อมูลด้านความคงทนในระยะเวลาที่นานมากขึ้น เพื่อให้ได้ทราบกลไกการทำลายคอนกรีต เนื่องจากน้ำทะเลที่ชัดเจน ตลอดจนได้ข้อมูล ในการสร้างแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

2. ควรมีการศึกษาการป้องกันการทำลาย เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าชีวมวลอื่น ๆ

บรรณานุกรม

- กิริติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาลี. (2557). *ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล*. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21(3) 522-529.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). *ความคงทนของคอนกรีต*. กรุงเทพฯ จุฑาทอง, 24-73.
- จักพล กลิ่นมันคง, ดนัย สีนา และชนวัฒน์ โชคสว่างเนตร. (2543). *การศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 59.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547). *การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2, 26-27 ตุลาคม, โรงแรมเชียงใหม่พลาซ่า จ.เชียงใหม่, หน้า 17-22.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2549). *ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน*. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, 17(2), หน้า 19-25.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2549). *การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต*. เอกสารประกอบการบรรยาย, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 71-79.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2552). *การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต*. เอกสารประกอบการบรรยาย, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 102-103.
- ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547). *การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต*. เอกสารประกอบประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, จ.เชียงใหม่, หน้า 17-22.
- ปริญญา จิตาประเสริฐ. (2548). *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*. สมาคมคอนกรีตไทย.

- ประจักษ์ ทุลกสิกร, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2557). *การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม 2557, โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ.ขอนแก่น, 624-629.
- พลฉัตร ต้นเสถียร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2556). *สมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันจากหลายแหล่งเพื่อใช้งานคอนกรีต*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วชิรกรณ์ เสนาวัง, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2554). *ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัด การซึมของน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วลัยลักษณ์ สาระจันร์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเอกชัย ภัทรวงษ์ไพบูลย์. (2550). *ผลกระทบของความละเอียดและอัตราทดแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ.พิษณุโลก, หน้า MAT55-MAT60.
- วัน โชค เครือหงษ์, ชีรวัฒน์ สินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). *การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน*. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 35(2), 187-200.
- วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม และชัยจาตุร พิทักษ์กุล. (2546). *วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน*. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 26(4), 459-474.
- วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2547). *การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ผสมน้ำมัน*. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 15(3), 32-39.
- วิเชียร ชาลี. (2552). *เอกสารประกอบการสอนความคงทนคอนกรีต*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และธวัชชัย ศาสกุล. (2553). *ผลของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล*. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6.

- วิเชียร ชาลี และชัย จาคูพิทักษ์กุล. (2554). *ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสม
เถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล*. วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 34(3), 203-213.
- วินชัย สะตะ, ชัย จาคูพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2546). *การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้า
แกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง*. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 4(2),
27-32.
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. (2558). เข้าถึงได้จาก
<http://www.mfu.ac.th/center/stic/>
- ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแพค (CPAC Academy). (2548). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. หนังสือวิชาการของ
ซีแพค.
- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2545). *มาตรฐานสำหรับอาคาร
คอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง*. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38, พิมพ์ครั้งที่ 4, หน้า 15.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.). (2556). *แผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมัน
ปาล์มปี 2556-2558*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.). (2555). *เศรษฐกิจการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555*.
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, หน้า 47.
- สุรพันธ์ สุดนปรีย์, ชรินทร์ นมรัักษ์ และชัย จาคูพิทักษ์กุล. (2545). *การใช้กากเคลือบคาร์บอนและ
เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต*. การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545, 20-23
มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.
- สรภพ ก้านข้าวแก้ว, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาคูพิทักษ์กุล. (2551). *ผลกระทบของเถ้าปาล์ม
น้ำมันต่อกำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต*. การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา,
หน้า 167-172.
- ACI 201.2R-01, Guide to durable concrete. ACI Committee 201, American Concrete Institute,
Farmington Hills, MI 48333-9094, 2003.
- ASTM C33, Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C192/C192 M-00: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in
the Laboratory. Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia,
120-127.

- ASTM C617-98, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 305-309.
- ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 1997, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, 294-296.
- Bakker, RFM. (Initiation period), & Schiessi, P. (Editor). (1998). *Corrosion of steel in concrete*. New York: Chapman and Hall, 22-55.
- BS 1881, Part 108, British Standard Institute. (1983). *Method of Making Test Cube from Fresh Concrete*, London.
- Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete*. Understanding investigation and repair, London, E&FN SPON AmImprint of Chapman & Hall, 5-15.
- Campbell D.H. (1990). *Microscopic examination and interpretation of Portland cement and clinker*. Portland Cement Association, SP030, Second Edition, USA.
- 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.
- Chalee W., & Jaturpitakkul C. (2009). *Effect of W/B ratios and fly ash fineness on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment*. Materials and Structures 42, 505-514.
- Chalee W., Sasakul T., Jaturapitakkul C., & Chindaprasirt P. (2013). *Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment*. Cement & Concrete Composite 37, 47-53.
- Chalee W. (2013). *Threshold Chloride Level of Concrete Contained with Rice Husk-Bark Ash under Marine Environment*. Burapha Sci. J. 18(2), 132-143, (In Thai).
- Chaipanich A., & Nochaiya T. (2010) *Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes*. J Therm Anal Calorim, 99(2), 487-93.
- Charoenprom K., & Chalee W. (2013). *Relation between Water Pemeability and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete under 10-year Exposure in Marine Environment*. The Journal of KMUTNB 23(1), 29-41. (In Thai)

- Cheewaket T., 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., & Jaturapitakkul C. (2008). *Cement Pozzolan and Concrete*. 5th Thailand Concrete Association, 11-13 & 238-240. (In Thai).
- Chindaprasirt P., Cao P., & Suwanvitaya P. (2000). *Influence of Binder Type on Quality of Concrete for Durable Structures*. The second Asia/Pacific Conference on Durability of Building Systems Harmonised Standards and Evaluation, AusAid, ITB, CSIRO. Indonesia, 10-12 July, 2000.
- Chindaprasirt P., Homwuttiwong S., & Jaturapitakkul C. (2007). *Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash*. Constr Build Mater 21, 1492-1499.
- Crank J. (1975). *The mathematic of diffusion 2nd*. London: Oxford Press.
- Jaturapitakkul C., & Cheerarot R. (2003). *Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE 15, 48-54.
- Fraay A.L.A., Bijen J.M., & Hann Y.M.D. (1989). *The Reaction of Fly Ash in Concrete*. A Critical Examination. Cement and Concrete Research 19(2), 235-246.
- Gjory O.E., & Vennesland O. (1976). *Sea salt and alkalinity of concrete*. Journal of the American Concrete Institute, 73(9), 512-516.
- Hansen T.C. (1990). *Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes*. Cement and Concrete Research 20(2), 193-196.
- Hussin M.W., & 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, 20-23 November, Bangkok, Thailand, D361-D366.
- Ishida T., Hussin M.W., & Awal A.S.M.A. (1999). *A Study on Shrinkage of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash*. Proceeding of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction 2, 27-29 August 1999, Kochi, Japan, 1378-1383.

- Jaturapitakkul C., Kiattikomol K., Tangchirapat W., & Saeting T. (2007). *Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash*. Construction and Building Materials 21, 1399-1405. (In Thai)
- Jensen H.U., & Pratt P.L. (1989). *The binding of chloride ions by pozzolanic product in fly ash cement blends*. Adv Cem Res 7, 121-129.
- Kayali O., Khan M.S.H, & Sharfuddin Ahmed M. (2012). *The role of hydrotalcite in chloride binding and corrosion protection in concrete with ground granulated blast furnace slag*. Cem Concr Compos 34, 936-945.
- Lea F.M. (1970). *The Chemistry of Cement and Concrete*. Edward Arnold Publishers. 361 & 414-423.
- Leng F., Feng N., & Lu X. (2000). *An Experimental Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete*. Cement and Concrete Research 30, 989-992.
- Marin-Perez B., Zibara H., Hooton RD., & Thomas M.D.A. (2000). *A study of the effect of chloride binding on service life predictions*. Cem Concr Compos 30, 1215-1223.
- Neville A.M. (1995a). *Properties of Concrete 4th ed*. Addison Wesley Longman, Malaysia.
- Neville A.M. (1995b). *Chloride attack of reinforced concret*. Materials and Structure. 63-70.
- Neville A.M. (1996). *Properties of Concrete. 4th ed.*, Addison Wesley, England, 571-572.
- Paya J., Monzo J., Borrachero M.V. & Mora P.E. (1995). *Mechanical Treatment of fly Ashes Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes*. Cement and Concrete Research 25, 1469-1479.
- Mangat P.S., & Limbachiya M.C. (1999). *Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials*. Cement and Concrete Research 29, 1475-1485.
- Sanjuan M.A., & Mufioz-Martialay R. (1996). *Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test*. Mater Left 27, 263-268.
- Sata V., Jaturapitakkul C., & Rattanashotinunt C. (2010). *Compressive strength and heat evolution of concrete containing palm oil fuel ash*. Mater Civ Eng, 22.
- Soroka. (1993). *Concrete in hot environment*. Great Britain, Alden Press.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., & Siripanichgorn, A. (2007). *Use of waste ash from palm oil industry in concrete*. Waste Management 27, 81-88.

- Tangtermsirikul S. (2003). *Durability and Mix Design of Concrete 1st ed.* Printing House of Thammasat University.
- 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. & Show K.Y. (1995). *Use of Ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material*. Resource, Conservation and Recycling 13, 27-36.
- Thomas H., Bozec Y., Elkalay K., & Baar, H.J.W. (2004). *Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping*. Science 304, 1005-1008.
- Thomas M.D.A., & Matthews J.D. (2004). *Performance of pfa concrete in a marine environment- 10-year results*. Cement and Concrete Research 26, 5-20.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่าง ๆ

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 5 ปี

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I40P00	1	10	2.998	1.5333	7.5770
	2	10	1.671	0.8546	4.2232
	3	10	1.354	0.6922	3.4208
	4	10	0.836	0.4273	2.1116
	5	10	0.649	0.3317	1.6390
	6	10	0.134	0.0685	0.3387
	7	10	0.125	0.0637	0.3147
	8	10	0.095	0.0486	0.2401
	9	10	0.087	0.0442	0.2186
	10	10	0.073	0.0373	0.1845
I40P15	1	10	2.526	1.2916	6.3684
	2	10	1.378	0.7045	3.4736
	3	10	0.619	0.3163	1.5596
	4	10	0.362	0.1851	0.9128
	5	10	0.255	0.1304	0.6430
	6	10	0.113	0.0575	0.2837
	7	10	0.094	0.0478	0.2358
	8	10	0.076	0.0386	0.1904
	9	10	0.062	0.0317	0.1563
	10	10	0.059	0.0299	0.1475
I40P25	1	10	2.141	1.0950	5.3441
	2	10	1.150	0.5879	2.8692
	3	10	0.592	0.3025	1.4764
	4	10	0.308	0.1573	0.7675
	5	10	0.215	0.1097	0.5354

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I40P25	6	10	0.109	0.0555	0.2708
	7	10	0.078	0.0396	0.1934
	8	10	0.071	0.0363	0.1772
	9	10	0.061	0.0312	0.1523
	10	10	0.039	0.0199	0.0973
I40P35	1	10	2.288	1.1702	5.6644
	2	10	1.254	0.6411	3.1033
	3	10	0.681	0.3483	1.6860
	4	10	0.452	0.2312	1.1190
	5	10	0.249	0.1273	0.6164
	6	10	0.133	0.0680	0.3293
	7	10	0.086	0.0437	0.2117
	8	10	0.078	0.0399	0.1931
	9	10	0.068	0.0348	0.1683
	10	10	0.048	0.0245	0.1188
I40P50	1	10	2.526	1.2916	6.1744
	2	10	1.384	0.7076	3.3824
	3	10	0.707	0.3616	1.7285
	4	10	0.518	0.2649	1.2664
	5	10	0.374	0.1910	0.9131
	6	10	0.167	0.0854	0.4083
	7	10	0.099	0.0504	0.2408
	8	10	0.094	0.0478	0.2286
	9	10	0.086	0.0440	0.2103
	10	10	0.070	0.0358	0.1711

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I45P00	1	10	2.975	1.5213	8.4511
	2	10	1.865	0.9538	5.2988
	3	10	1.611	0.8237	4.5757
	4	10	0.969	0.4956	2.7531
	5	10	0.874	0.4470	2.4832
	6	10	0.303	0.1550	0.8609
	7	10	0.141	0.0719	0.3992
	8	10	0.091	0.0465	0.2585
	9	10	0.083	0.0422	0.2344
	10	10	0.072	0.0366	0.2031
I45P15	1	10	2.575	1.3167	7.2605
	2	10	1.660	0.8490	4.6814
	3	10	0.925	0.4728	2.6072
	4	10	0.536	0.2741	1.5116
	5	10	0.345	0.1762	0.9715
	6	10	0.166	0.0849	0.4681
	7	10	0.097	0.0496	0.2736
	8	10	0.083	0.0422	0.2327
	9	10	0.062	0.0315	0.1734
	10	10	0.057	0.0292	0.1607
I45P25	1	10	2.215	1.1328	6.1959
	2	10	1.359	0.6948	3.8000
	3	10	0.725	0.3705	2.0266
	4	10	0.347	0.1775	0.9706
	5	10	0.285	0.1458	0.7972

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I45P25	6	10	0.145	0.0742	0.4056
	7	10	0.080	0.0409	0.2238
	8	10	0.064	0.0327	0.1790
	9	10	0.055	0.0279	0.1524
	10	10	0.036	0.0182	0.0993
I45P35	1	10	2.415	1.2351	6.7174
	2	10	1.475	0.7544	4.1028
	3	10	0.833	0.4258	2.3156
	4	10	0.434	0.2217	1.2058
	5	10	0.293	0.1496	0.8136
	6	10	0.154	0.0785	0.4270
	7	10	0.105	0.0537	0.2921
	8	10	0.072	0.0368	0.2003
	9	10	0.065	0.0332	0.1808
	10	10	0.046	0.0235	0.1280
I45P50	1	10	2.505	1.2812	6.9013
	2	10	1.643	0.8403	4.5265
	3	10	0.892	0.4562	2.4575
	4	10	0.478	0.2442	1.3155
	5	10	0.336	0.1716	0.9243
	6	10	0.186	0.0951	0.5124
	7	10	0.118	0.0601	0.3237
	8	10	0.087	0.0445	0.2397
	9	10	0.081	0.0412	0.2218
	10	10	0.067	0.0343	0.1846

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I50P00	1	10	3.070	1.5701	9.6001
	2	10	2.262	1.1566	7.0719
	3	10	1.640	0.8385	5.1268
	4	10	1.231	0.6296	3.8494
	5	10	0.967	0.4943	3.0223
	6	10	0.476	0.2432	1.4869
	7	10	0.144	0.0736	0.4503
	8	10	0.085	0.0435	0.2658
	9	10	0.081	0.0412	0.2517
	10	10	0.073	0.0373	0.2283
I50P15	1	10	2.932	1.4993	9.0813
	2	10	2.093	1.0702	6.4823
	3	10	1.246	0.6373	3.8599
	4	10	0.668	0.3414	2.0678
	5	10	0.639	0.3268	1.9795
	6	10	0.357	0.1823	1.1044
	7	10	0.099	0.0506	0.3067
	8	10	0.080	0.0409	0.2478
	9	10	0.073	0.0371	0.2246
	10	10	0.063	0.0322	0.1952
I50P25	1	10	2.440	1.2479	7.5199
	2	10	1.332	0.6810	4.1036
	3	10	0.749	0.3828	2.3068
	4	10	0.367	0.1877	1.1311
	5	10	0.328	0.1678	1.0109

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I50P25	6	10	0.248	0.1266	0.7628
	7	10	0.093	0.0476	0.2866
	8	10	0.071	0.0361	0.2173
	9	10	0.050	0.0253	0.1526
	10	10	0.034	0.0171	0.1032
I50P35	1	10	2.732	1.3970	8.3674
	2	10	1.640	0.8385	5.0223
	3	10	0.821	0.4199	2.5150
	4	10	0.421	0.2151	1.2881
	5	10	0.368	0.1880	1.1258
	6	10	0.255	0.1302	0.7796
	7	10	0.105	0.0537	0.3216
	8	10	0.075	0.0381	0.2282
	9	10	0.063	0.0320	0.1915
	10	10	0.045	0.0230	0.1378
I50P50	1	10	2.847	1.4558	8.6255
	2	10	1.754	0.8971	5.3150
	3	10	0.880	0.4498	2.6651
	4	10	0.525	0.2682	1.5893
	5	10	0.384	0.1964	1.1636
	6	10	0.269	0.1373	0.8136
	7	10	0.114	0.0580	0.3439
	8	10	0.080	0.0409	0.2424
	9	10	0.079	0.0401	0.2379
	10	10	0.066	0.0338	0.2000

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่แช่ในน้ำมทะเล 5 ปี

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I40P00	1	10	8.666	1.2663	6.2577
	2	10	4.112	0.6008	2.9689
	3	10	3.303	0.4826	2.3847
	4	10	1.879	0.2746	1.3568
	5	10	1.387	0.2027	1.0016
	6	10	0.382	0.0558	0.2758
	7	10	0.227	0.0332	0.1639
	8	10	0.198	0.0289	0.1430
	9	10	0.106	0.0154	0.0762
	10	10	0.067	0.0098	0.0484
I40P15	1	10	6.766	0.9887	4.8747
	2	10	3.550	0.5187	2.5573
	3	10	1.808	0.2642	1.3026
	4	10	1.015	0.1482	0.7309
	5	10	0.630	0.0920	0.4535
	6	10	0.336	0.0491	0.2421
	7	10	0.184	0.0269	0.1326
	8	10	0.104	0.0151	0.0746
	9	10	0.084	0.0122	0.0602
	10	10	0.055	0.0080	0.0396
I40P25	1	10	5.624	0.8217	4.0105
	2	10	2.406	0.3516	1.7159
	3	10	1.473	0.2152	1.0505
	4	10	0.589	0.0861	0.4201
	5	10	0.364	0.0532	0.2596

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I40P25	6	10	0.269	0.0392	0.1915
	7	10	0.112	0.0164	0.0799
	8	10	0.086	0.0125	0.0610
	9	10	0.058	0.0085	0.0414
	10	10	0.037	0.0053	0.0260
I40P35	1	10	6.107	0.8923	4.3194
	2	10	2.814	0.4111	1.9901
	3	10	1.713	0.2502	1.2113
	4	10	0.854	0.1248	0.6041
	5	10	0.497	0.0726	0.3515
	6	10	0.303	0.0442	0.2140
	7	10	0.172	0.0251	0.1213
	8	10	0.117	0.0170	0.0824
	9	10	0.086	0.0125	0.0605
	10	10	0.046	0.0067	0.0325
I40P50	1	10	6.851	1.0010	4.7853
	2	10	3.010	0.4398	2.1026
	3	10	2.078	0.3036	1.4515
	4	10	1.340	0.1958	0.9360
	5	10	0.943	0.1378	0.6587
	6	10	0.335	0.0489	0.2337
	7	10	0.205	0.0300	0.1432
	8	10	0.154	0.0224	0.1072
	9	10	0.118	0.0172	0.0821
	10	10	0.062	0.0090	0.0430

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I45P00	1	10	9.099	1.3295	7.3859
	2	10	4.595	0.6714	3.7297
	3	10	3.697	0.5402	3.0007
	4	10	1.875	0.2740	1.5221
	5	10	1.447	0.2114	1.1746
	6	10	0.629	0.0918	0.5102
	7	10	0.240	0.0351	0.1948
	8	10	0.187	0.0273	0.1518
	9	10	0.101	0.0148	0.0820
	10	10	0.089	0.0129	0.0718
I45P15	1	10	7.829	1.1439	6.3079
	2	10	3.664	0.5353	2.9519
	3	10	2.150	0.3142	1.7324
	4	10	1.624	0.2372	1.3081
	5	10	1.044	0.1525	0.8408
	6	10	0.416	0.0608	0.3352
	7	10	0.206	0.0301	0.1660
	8	10	0.140	0.0204	0.1124
	9	10	0.089	0.0130	0.0717
	10	10	0.066	0.0096	0.0532
I45P25	1	10	6.322	0.9237	5.0522
	2	10	2.649	0.3870	2.1167
	3	10	1.668	0.2437	1.3327
	4	10	0.926	0.1353	0.7401
	5	10	0.655	0.0957	0.5235

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I45P25	6	10	0.374	0.0546	0.2985
	7	10	0.158	0.0230	0.1259
	8	10	0.099	0.0145	0.0791
	9	10	0.074	0.0107	0.0587
	10	10	0.057	0.0083	0.0452
I45P35	1	10	7.096	1.0369	5.6394
	2	10	3.117	0.4555	2.4772
	3	10	1.842	0.2692	1.4639
	4	10	1.016	0.1485	0.8074
	5	10	0.807	0.1179	0.6413
	6	10	0.405	0.0592	0.3219
	7	10	0.204	0.0298	0.1621
	8	10	0.129	0.0189	0.1025
	9	10	0.081	0.0118	0.0640
	10	10	0.068	0.0099	0.0536
I45P50	1	10	7.828	1.1439	6.1618
	2	10	2.940	0.4296	2.3142
	3	10	2.125	0.3105	1.6727
	4	10	1.479	0.2160	1.1638
	5	10	0.950	0.1387	0.7474
	6	10	0.453	0.0662	0.3566
	7	10	0.251	0.0367	0.1976
	8	10	0.156	0.0228	0.1228
	9	10	0.114	0.0166	0.0893
	10	10	0.073	0.0107	0.0575

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I50P00	1	10	10.299	1.5049	9.2012
	2	10	4.885	0.7137	4.3641
	3	10	3.609	0.5274	3.2245
	4	10	2.152	0.3144	1.9223
	5	10	1.497	0.2187	1.3375
	6	10	0.968	0.1414	0.8644
	7	10	0.251	0.0366	0.2238
	8	10	0.195	0.0284	0.1738
	9	10	0.125	0.0182	0.1112
	10	10	0.105	0.0153	0.0938
I50P15	1	10	9.393	1.3725	8.3133
	2	10	4.312	0.6300	3.8161
	3	10	3.126	0.4568	2.7668
	4	10	1.909	0.2790	1.6897
	5	10	1.316	0.1923	1.1648
	6	10	0.846	0.1236	0.7488
	7	10	0.201	0.0294	0.1779
	8	10	0.155	0.0226	0.1372
	9	10	0.110	0.0160	0.0969
	10	10	0.085	0.0124	0.0752
I50P25	1	10	6.839	0.9993	6.0216
	2	10	3.218	0.4702	2.8332
	3	10	1.832	0.2677	1.6132
	4	10	1.187	0.1734	1.0448
	5	10	1.040	0.1519	0.9153

Sample	Layer	Weight of Sample, W (g)	AgNO ₃ , ΔV (ml)	Chloride Content, Cl (% by Weight of Concrete)	Chloride Content (% by Weight of Binder)
I50P25	6	10	0.681	0.0994	0.5992
	7	10	0.159	0.0232	0.1400
	8	10	0.120	0.0175	0.1052
	9	10	0.094	0.0137	0.0828
	10	10	0.069	0.0100	0.0603
I50P35	1	10	7.975	1.1653	6.9800
	2	10	3.928	0.5740	3.4379
	3	10	2.356	0.3443	2.0620
	4	10	1.340	0.1958	1.1728
	5	10	1.213	0.1772	1.0612
	6	10	0.752	0.1099	0.6582
	7	10	0.220	0.0321	0.1926
	8	10	0.144	0.0210	0.1256
	9	10	0.110	0.0160	0.0958
	10	10	0.089	0.0130	0.0779
I50P50	1	10	8.506	1.2429	7.3638
	2	10	4.122	0.6023	3.5683
	3	10	2.464	0.3600	2.1328
	4	10	1.393	0.2035	1.2056
	5	10	1.075	0.1570	0.9303
	6	10	0.811	0.1184	0.7017
	7	10	0.244	0.0357	0.2112
	8	10	0.158	0.0231	0.1368
	9	10	0.120	0.0175	0.1039
	10	10	0.094	0.0137	0.0814

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมและน้ำหนักรีดที่สูญหายเนื่องจากสนิมที่ระยะคอนกรีต
หุ้มเหล็กต่าง ๆ

ตารางภาคผนวกที่ ข-1 ผลการทดสอบพื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Type of Concrete	Rusted area of embedded steel								
	Covering Depth : 10			Covering Depth : 20			Covering Depth : 50		
	RA (mm ²)	SA (mm ²)	C (%)	RA (mm ²)	SA (mm)	C (%)	RA (mm ²)	SA (mm ²)	C (%)
I40P00	1857	2000	92.87	1490	2000	74.52	-	-	-
I40P15	1787	2000	89.36	1145	2000	57.26	-	-	-
I40P25	1604	2000	80.19	1057	2000	52.87	-	-	-
I40P35	1851	2000	92.55	1162	2000	58.09	-	-	-
I40P50	1917	2000	95.86	1276	2000	63.82	-	-	-
I45P00	1948	2000	97.39	1647	2000	82.36	-	-	-
I45P15	1902	2000	95.10	1315	2000	65.73	-	-	-
I45P25	1752	2000	87.58	1266	2000	63.31	-	-	-
I45P35	1814	2000	90.70	1592	2000	79.62	-	-	-
I45P50	1952	2000	97.58	1722	2000	86.11	-	-	-
I50P00	1980	2000	98.98	1809	2000	90.45	-	-	-
I50P15	1827	2000	91.34	1648	2000	82.42	-	-	-
I50P25	1776	2000	88.79	1303	2000	65.16	-	-	-
I50P35	1847	2000	92.36	1438	2000	71.91	-	-	-
I50P50	1949	2000	97.45	1532	2000	76.62	-	-	-

ตารางภาคผนวกที่ ข-2 ผลการทดสอบพื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Type of Concrete	Weight Loss of steel (%)								
	Covering Depth : 10			Covering Depth : 20			Covering Depth : 50		
	Before (g)	After (g)	Loss (%)	Before (g)	After (g)	Loss (%)	Before (g)	After (g)	Loss (%)
I40P00	44.99	42.03	6.58	45.70	43.36	5.12	43.83	43.83	-
I40P15	43.84	42.15	3.85	41.96	40.49	3.50	44.58	44.58	-
I40P25	41.60	40.28	3.17	44.02	42.68	3.04	42.89	42.89	-
I40P35	40.75	39.27	3.63	43.73	42.14	3.64	43.52	43.52	-
I40P50	45.00	43.22	3.96	44.33	42.35	4.47	44.40	44.40	-
I45P00	40.63	36.85	9.30	41.82	38.35	8.30	40.28	40.28	-
I45P15	43.71	41.03	6.13	44.26	40.91	7.57	40.42	40.42	-
I45P25	44.62	42.74	4.21	43.90	41.18	6.20	43.19	43.19	-
I45P35	41.62	39.17	5.89	44.78	41.43	7.48	44.17	44.17	-
I45P50	42.39	39.01	7.97	43.47	39.96	8.07	44.02	44.02	-
I50P00	42.67	37.97	11.01	45.36	41.06	9.48	49.09	49.09	-
I50P15	43.89	40.03	8.79	43.91	40.18	8.49	44.27	44.27	-
I50P25	43.33	39.84	8.05	43.82	40.52	7.53	43.72	43.72	-
I50P35	42.68	39.19	8.18	44.64	41.15	7.82	46.72	46.72	-
I50P50	42.40	38.89	8.28	45.23	41.54	8.16	43.00	43.00	-

ภาคผนวก ค

การสร้างแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลั่มน้ำมัน
บดละเอียดภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็น 1, 1.5, 3 และ 5 ปี

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล
เป็นเวลา 1, 1.5, 3 และ 5 ปี

Sample	Layer	Total Cl at 1 year (Wt. of binder)	Total Cl at 1.5 years (Wt. of binder)	Total Cl at 3 years (Wt. of binder)	Total Cl at 5 years (Wt. of binder)
I40P00	1	1.2076	1.1959	5.0899	7.5770
	2	0.3552	0.3805	3.1627	4.2232
	3	0.2841	0.3459	2.4708	3.4208
	4	0.0710	0.1581	1.2848	2.1116
	5	0.0000	0.0791	1.1366	1.6390
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.3387
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.3147
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2401
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2186
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1845
I40P15	1	0.9488	0.9910	4.6347	6.3684
	2	0.1406	0.1775	2.6625	3.4736
	3	0.1054	0.1479	1.0847	1.5596
	4	0.0351	0.1479	0.5917	0.9128
	5	0.0351	0.0493	0.4931	0.6430
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.2837
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2358
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.1904
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1563
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1475
I40P25	1	1.0471	1.0298	4.0508	5.3441
	2	0.1745	0.1952	2.3914	2.8692
	3	0.2094	0.1367	0.8785	1.4764
	4	0.1047	0.0683	0.4392	0.7675

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

Sample	Layer	Total Cl at 1 year (Wt. of binder)	Total Cl at 1.5 years (Wt. of binder)	Total Cl at 3 years (Wt. of binder)	Total Cl at 5 years (Wt. of binder)
I40P25	5	0.1745	0.0293	0.2440	0.5354
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.2708
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.1934
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.1772
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1523
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0973
I40P35	1	0.9001	0.9149	4.5018	5.6644
	2	0.2077	0.2420	2.8560	3.1033
	3	0.2077	0.2033	1.1134	1.6860
	4	0.1385	0.2130	0.8229	1.1190
	5	0.1385	0.0581	0.5809	0.6164
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.3293
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2117
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.1931
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1683
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1188
I40P50	1	0.9930	1.0804	4.5891	6.1744
	2	0.4200	0.2486	2.6770	3.3824
	3	0.2739	0.2199	1.2429	1.7285
	4	0.1712	0.2199	1.0039	1.2664
	5	0.1370	0.0860	0.8127	0.9131
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.4083
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2408
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2286
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2103
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1711

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

Sample	Layer	Total Cl at 1 year (Wt. of binder)	Total Cl at 1.5 years (Wt. of binder)	Total Cl at 3 years (Wt. of binder)	Total Cl at 5 years (Wt. of binder)
I45P00	1	1.6300	1.5055	5.1109	8.4511
	2	0.8800	0.7000	3.8887	5.2988
	3	0.4700	0.5500	3.1110	4.5757
	4	0.0900	0.3389	1.5555	2.7531
	5	0.0200	0.1111	1.3888	2.4832
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.8609
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.3992
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2585
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2344
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.2031
I45P15	1	1.3100	1.4282	4.6870	7.2605
	2	0.3700	0.4522	2.7571	4.6814
	3	0.2200	0.2426	1.2683	2.6072
	4	0.0500	0.1213	0.7720	1.5116
	5	0.0400	0.0993	0.7720	0.9715
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.4681
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2736
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2327
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1734
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1607
I45P25	1	1.3700	1.0118	4.2114	6.1959
	2	0.3300	0.2516	2.6253	3.8000
	3	0.2500	0.1313	0.8751	2.0266
	4	0.1100	0.0984	0.6016	0.9706
	5	0.1000	0.0602	0.6563	0.7972

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

Sample	Layer	Total Cl at 1 year (Wt. of binder)	Total Cl at 1.5 years (Wt. of binder)	Total Cl at 3 years (Wt. of binder)	Total Cl at 5 years (Wt. of binder)
I45P25	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.4056
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2238
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.1790
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1524
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0993
I45P35	1	1.3800	1.2183	4.3509	6.7174
	2	0.3900	0.2719	2.6650	4.1028
	3	0.2700	0.1577	0.8158	2.3156
	4	0.1300	0.1305	0.7070	1.2058
	5	0.1200	0.0816	0.7070	0.8136
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.4270
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2921
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2003
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1808
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1280
I45P50	1	1.6100	1.5191	4.4172	6.9013
	2	0.5000	0.5010	2.6395	4.5265
	3	0.3300	0.3124	0.9696	2.4575
	4	0.1400	0.1077	0.8080	1.3155
	5	0.1100	0.1077	0.8080	0.9243
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.5124
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.3237
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2397
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2218
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1846

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

Sample	Layer	Total CI at 1 year (Wt. of binder)	Total CI at 1.5 years (Wt. of binder)	Total CI at 3 years (Wt. of binder)	Total CI at 5 years (Wt. of binder)
I50P00	1	2.0470	2.0422	5.7474	9.6001
	2	1.3919	1.4307	4.1577	7.0719
	3	0.6550	1.1006	2.9960	5.1268
	4	0.1228	0.8988	1.6509	3.8494
	5	0.0409	0.1101	1.4063	3.0223
	6	0.0000	0.0000	0.0000	1.4869
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.4503
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2658
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2517
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.2283
I50P15	1	1.7034	1.7323	4.9063	9.0813
	2	0.6083	0.6481	2.9680	6.4823
	3	0.3650	0.4179	1.3326	3.8599
	4	0.0811	0.1696	0.8480	2.0678
	5	0.0811	0.0909	0.8480	1.9795
	6	0.0000	0.0000	0.0000	1.1044
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.3067
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2478
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2246
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1952
I50P25	1	1.6946	1.6993	4.6340	7.5199
	2	0.4842	0.4519	2.7478	4.1036
	3	0.3228	0.3194	1.1510	2.3068
	4	0.1210	0.1024	0.7532	1.1311
	5	0.1210	0.0783	0.7352	1.0109

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

Sample	Layer	Total CI at 1 year (Wt. of binder)	Total CI at 1.5 years (Wt. of binder)	Total CI at 3 years (Wt. of binder)	Total CI at 5 years (Wt. of binder)
I50P25	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.7628
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.2866
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2173
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1526
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1032
I50P35	1	1.8448	1.8508	4.6479	8.3674
	2	0.5615	0.5271	2.7492	5.0223
	3	0.3609	0.3893	1.1859	2.5150
	4	0.1203	0.1497	0.8326	1.2881
	5	0.1203	0.1018	0.6888	1.1258
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.7796
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.3216
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2282
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.1915
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.1378
I50P50	1	2.2264	2.2455	4.8880	8.6255
	2	0.6000	0.5273	2.8025	5.3150
	3	0.3976	0.4266	1.2975	2.6651
	4	0.1193	0.2666	1.2383	1.5893
	5	0.0795	0.1303	0.9895	1.1636
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.8136
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.3439
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.2424
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.2379
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.2000

การสร้างแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อในการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 1, 1.5, 3 และ 5 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ ในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's Second Law) ดังสมการที่ (ค-1)

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

ในการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตจากสมการที่ (ค-1) เป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถใช้ได้ดีกับข้อมูลการทดสอบในภาคสนามที่มีการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล (Thomas & Matthews, 2004) และในการศึกษาที่ผ่านมา (Chalee & Jaturapitakkul, 2009) พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์นานขึ้น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาว จึงควรมีการแปรเปลี่ยนค่าที่ D_c ในสมการที่ (1) ตามระยะเวลาที่นานขึ้น โดยการศึกษาที่ผ่านมาของ Mangat และ Limbachiya, 1999 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) กับระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นตามสมการที่ (ค-2)

$$D_c = (t)^{-\beta} \quad (\text{ค-2})$$

แทนค่า (D_c) จากสมการที่ (2) ในสมการที่ (1) ได้ดังสมการที่ (3)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = t^{-\beta} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{ค-3})$$

คำตอบทั่วไป (General Solution) ของสมการที่ (3) เป็นตามสมการที่ (4)

$$C_{x,t} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{t^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right) \right] \quad (\text{ค-4})$$

สมการที่ (ค-4) สามารถใช้หาปริมาณคลอไรด์ ($C_{x,t}$) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x (มม.) และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t (วินาที) ซึ่งในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะเวลาได้เปลี่ยนหน่วยเวลา t จากวินาทีเป็น ปี เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น เปลี่ยนหน่วยเวลาจากวินาทีเป็นปีในสมการที่ (ค-4) ได้เป็นดังสมการที่ (ค-5)

$$C_{x,t} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{31536000 t^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right) \right] \quad (\text{ค-5})$$

เมื่อ

$C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t

t = ระยะเวลาแช่ (ปี)

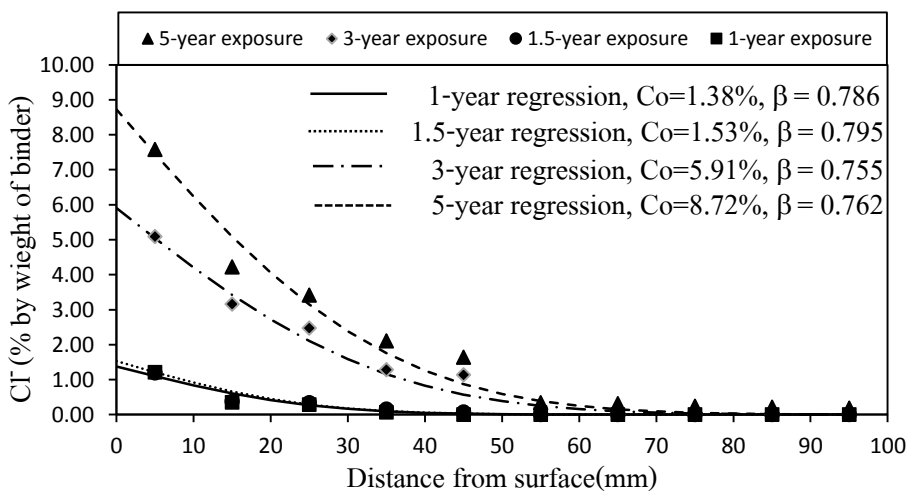
x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

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

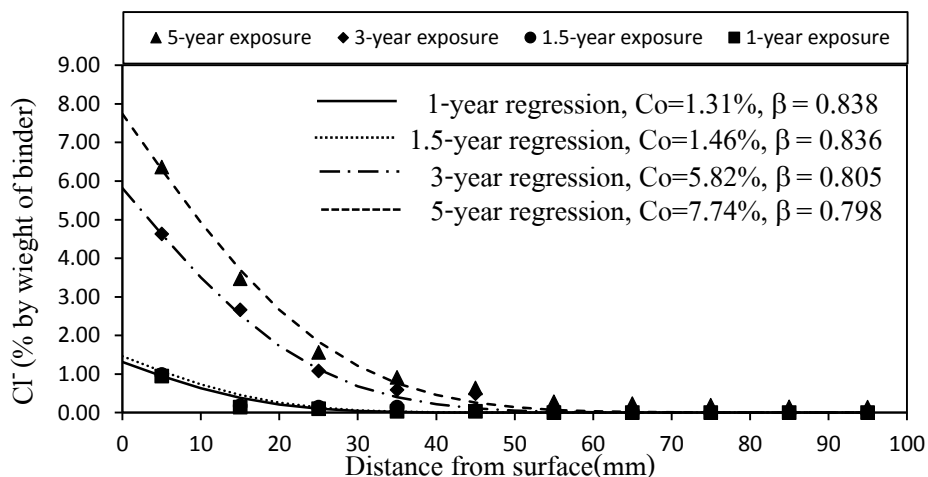
β = ค่าสัมประสิทธิ์

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

การหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตามสมการที่ ค-5) จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ β และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_o) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ ได้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยของสมการที่ (ค-5) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลระยะเวลา 5 ปี ดังตัวอย่าง ในตารางที่ ค-2 และ ค-3 ที่แสดงการหาค่า β และ C_o โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยที่ปรับค่า β และ C_o ในสมการที่ (ค-5) ให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมเก้ปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังภาพที่ ค-1



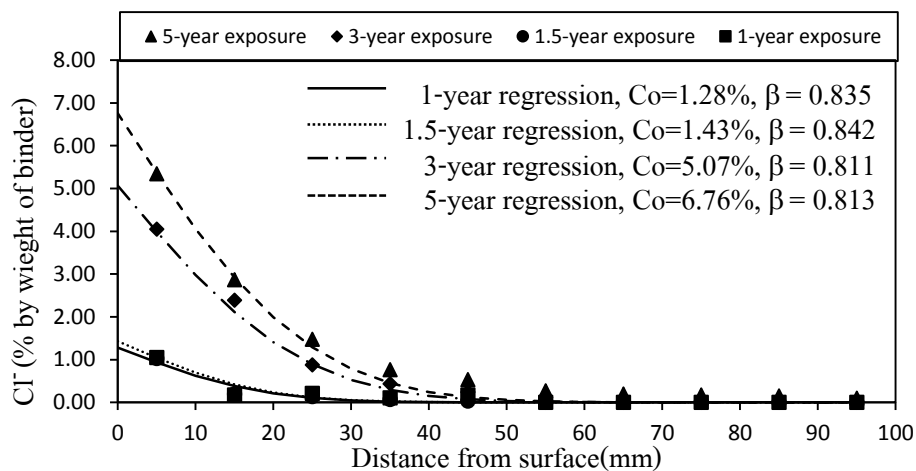
(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (I40P00)



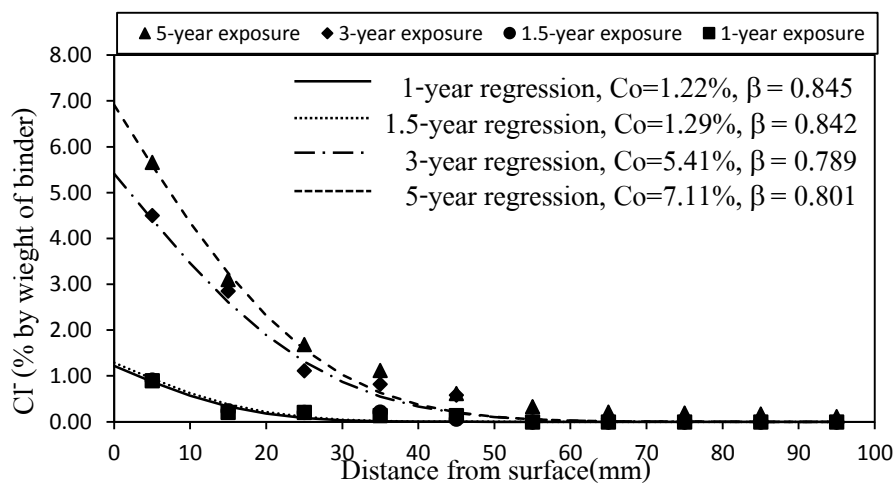
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 15 (I40P15)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 การหาค่า β และ C_0 ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี

W/B= 0.40, 0.45 และ 0.50 และผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

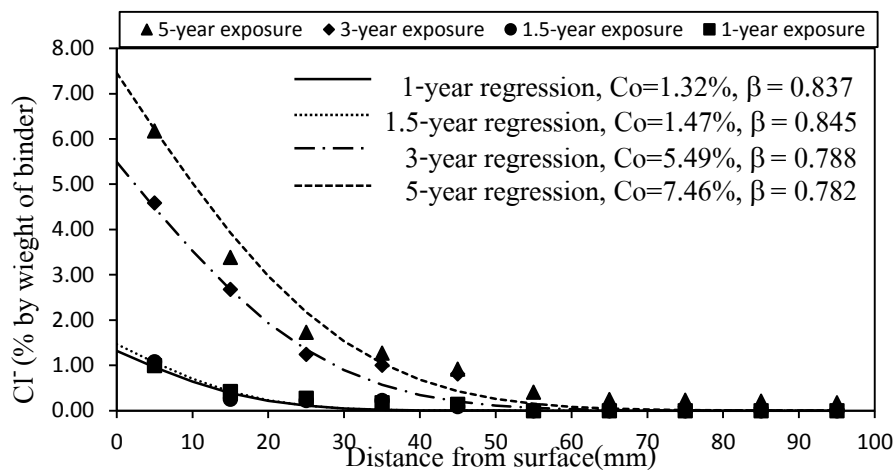


(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 (I40P25)

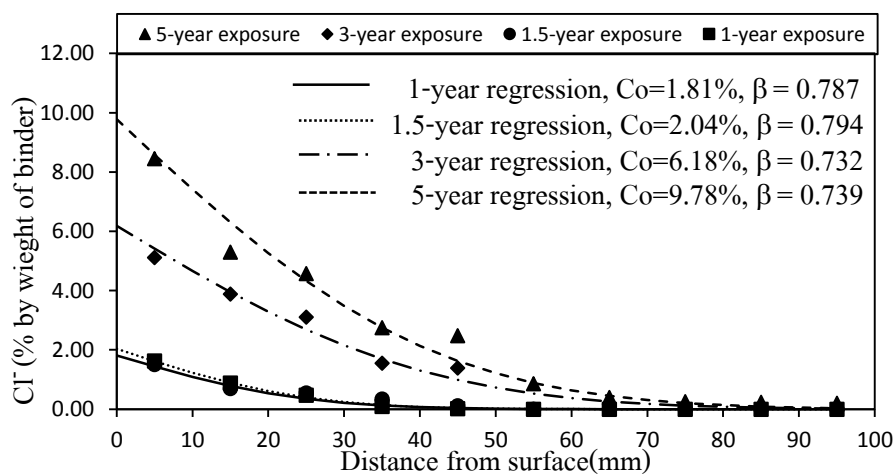


(ง) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 35 (I40P35)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

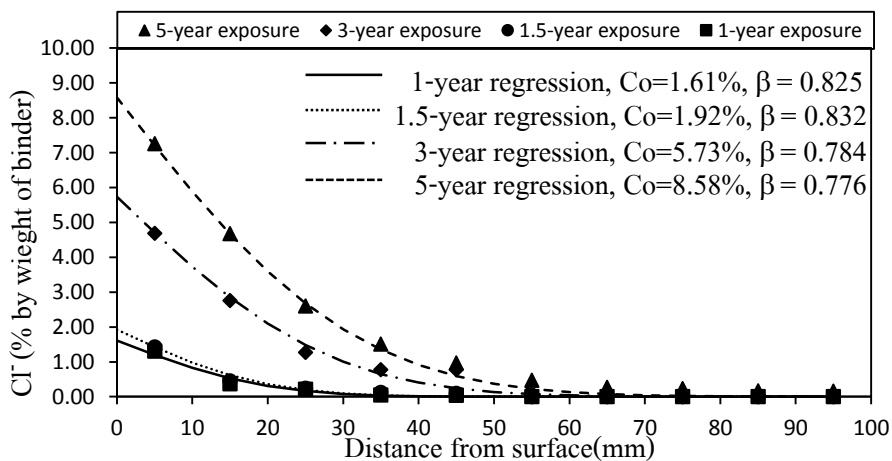


(จ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผสมเถ้าปลั่มน้ำมันร้อยละ 50 (I40P50)

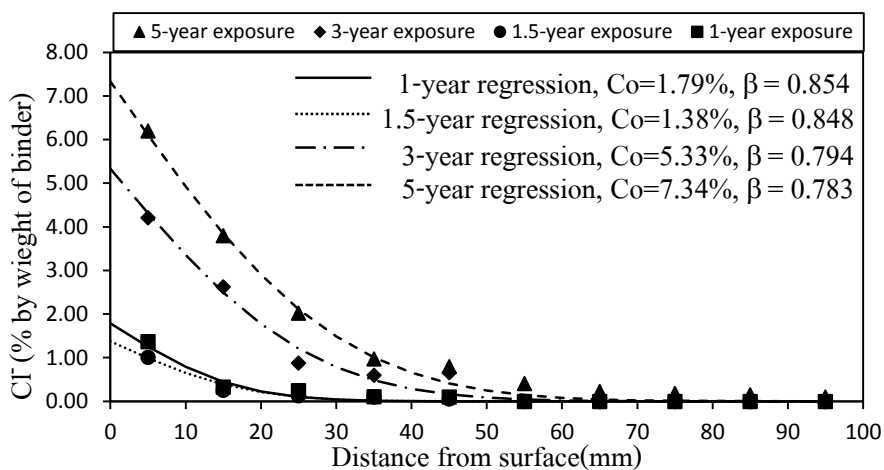


(ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปลั่มน้ำมันร้อยละ 0 (I45P00)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

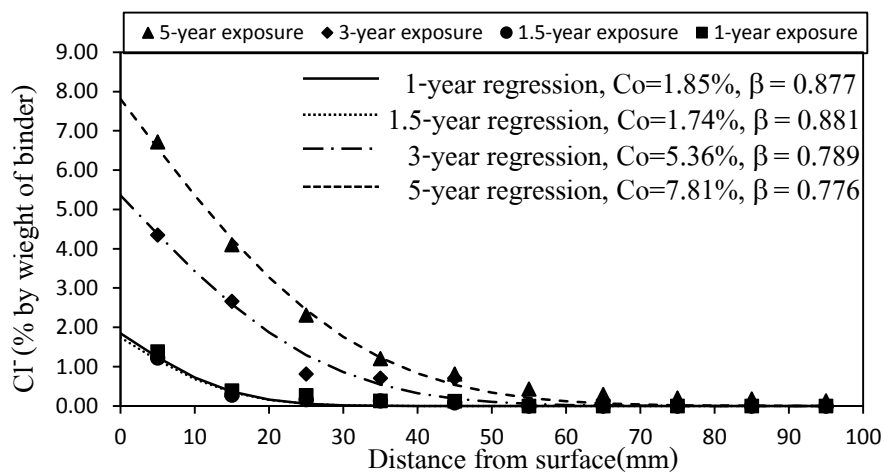


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมันร้อยละ 15 (I45P15)

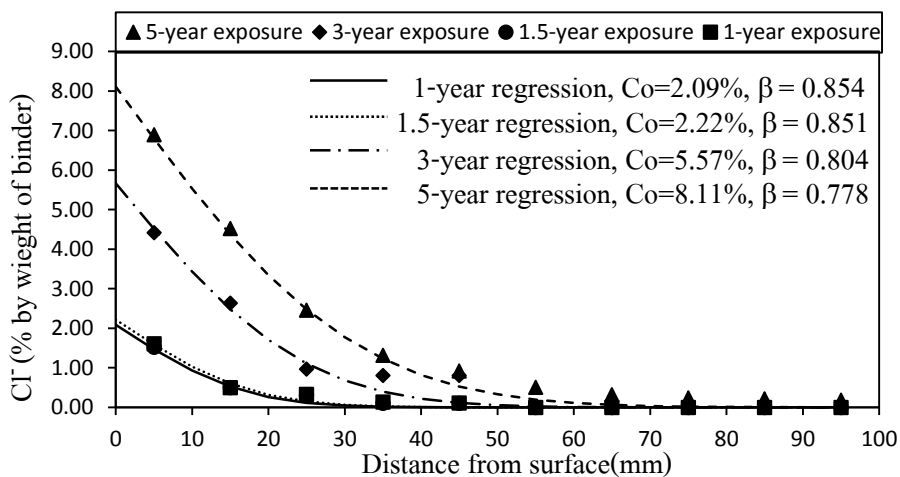


(ช) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมันร้อยละ 25 (I45P25)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

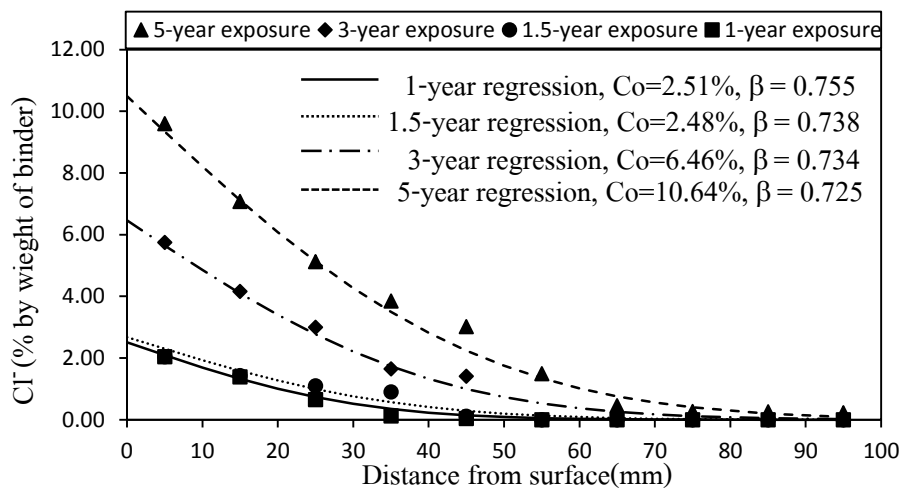


(ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 35 (I45P35)

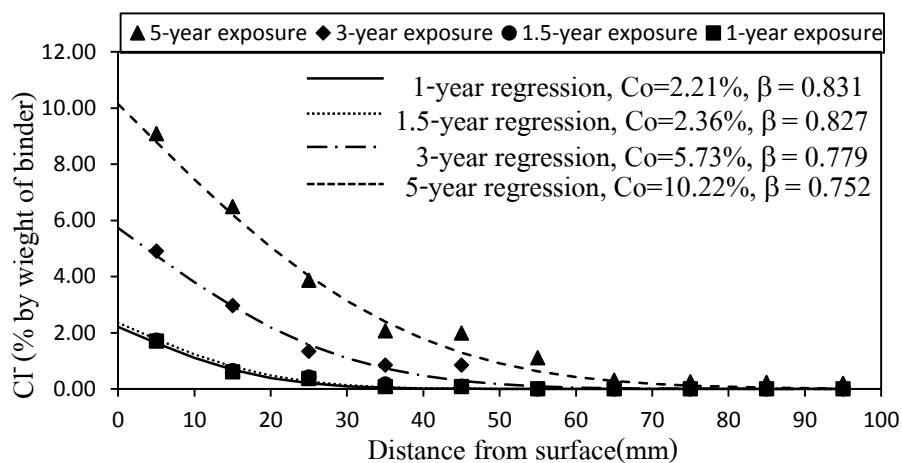


(ญ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 50 (I45P50)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

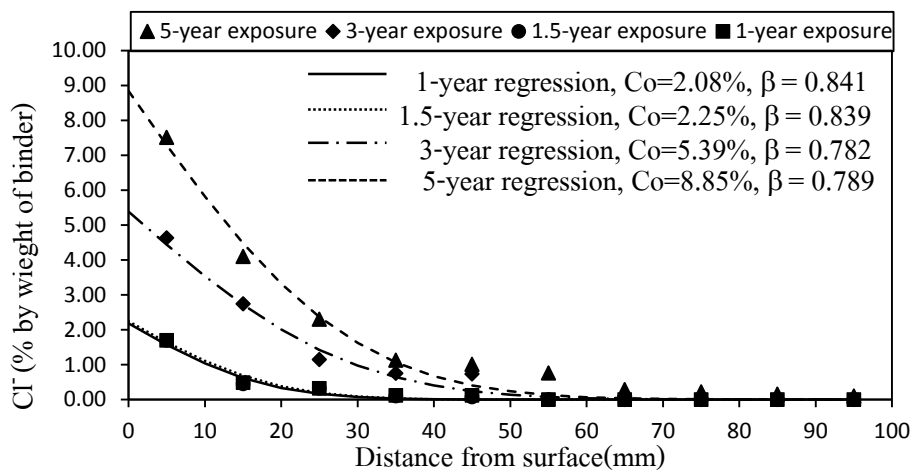


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (I50P00)

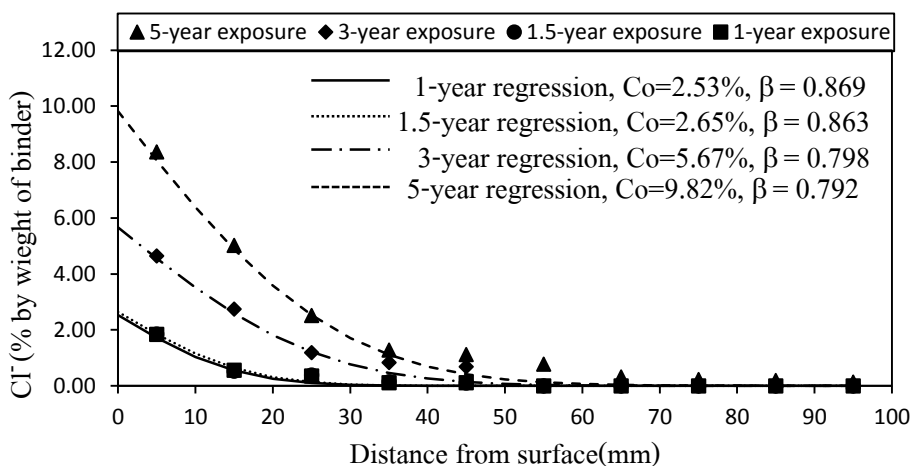


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 (I50P15)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

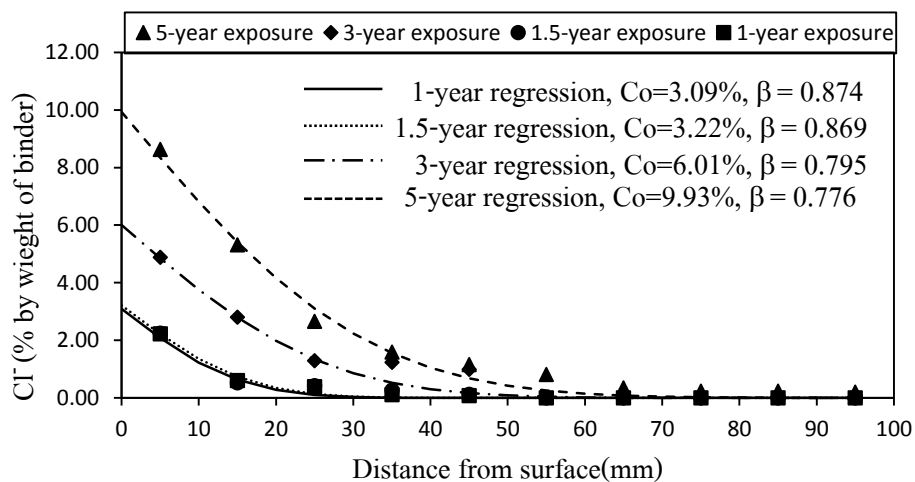


(จ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 (I50P25)



(จ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 35 (I50P35)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)



(ต) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 (I50P50)

ภาพภาคผนวกที่ ค-1 (ต่อ)

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 สัมประสิทธิ์ β

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ β				เฉลี่ย β
	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี	
I40P00	0.786	0.795	0.755	0.762	0.775
I40P15	0.838	0.836	0.805	0.798	0.819
I40P25	0.835	0.842	0.811	0.813	0.825
I40P35	0.845	0.842	0.789	0.801	0.819
I40P50	0.837	0.845	0.788	0.782	0.813
I45P00	0.787	0.794	0.732	0.739	0.763
I45P15	0.825	0.832	0.784	0.776	0.804
I45P25	0.854	0.848	0.794	0.783	0.820
I45P35	0.877	0.881	0.789	0.776	0.831
I45P50	0.854	0.851	0.804	0.778	0.822
I50P00	0.755	0.738	0.734	0.725	0.738
I50P15	0.831	0.827	0.779	0.752	0.797

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 (ต่อ)

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ β				เฉลี่ย β
	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี	
I50P25	0.841	0.839	0.782	0.789	0.813
I50P35	0.869	0.863	0.798	0.792	0.831
I50P50	0.874	0.869	0.795	0.776	0.829

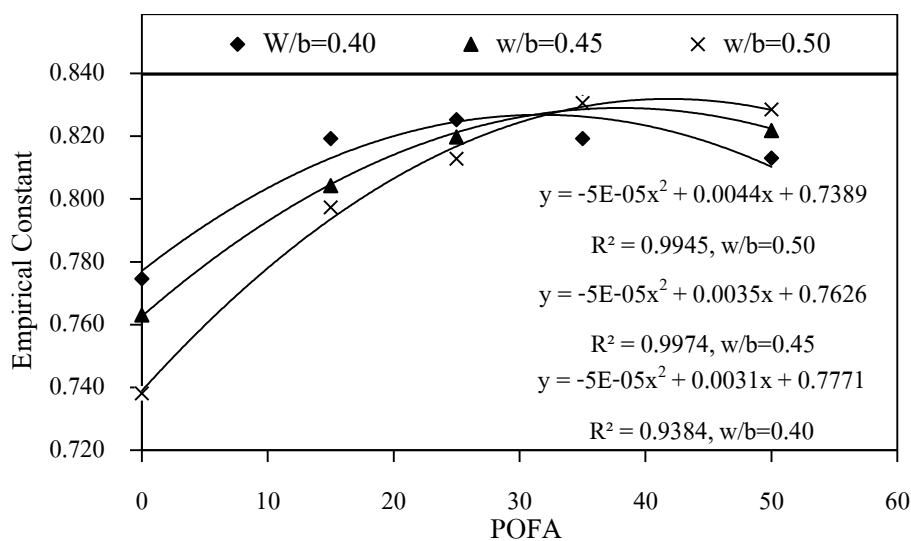
ตารางภาคผนวกที่ ค-3 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต

ส่วนผสม	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต				เฉลี่ย C_o			
	C_o (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)							
	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี	1 ปี	1.5 ปี	3 ปี	5 ปี
I40P00	1.4	1.53	5.91	8.72				
I40P15	1.31	1.46	5.82	7.74				
I40P25	1.28	1.43	5.07	6.76	1.3	1.4	5.5	7.5
I40P35	1.22	1.29	5.41	6.91				
I40P50	1.32	1.47	5.49	7.46				
I45P00	1.81	2.04	6.18	9.78				
I45P15	1.61	1.92	5.73	8.58				
I45P25	1.79	1.38	5.33	7.34	1.8	1.9	5.7	8.3
I45P35	1.85	1.74	5.36	7.81				
I45P50	2.09	2.22	5.67	8.11				
I50P00	2.51	2.68	6.46	10.49				
I50P15	2.21	2.36	5.73	10.15				
I50P25	2.18	2.25	5.39	8.85	2.5	2.6	5.9	9.8
I50P35	2.53	2.65	5.67	9.82				
I50P50	3.09	3.22	6.01	9.93				

วิธีการหาสมการ (β)

พิจารณาค่า β ตามตารางที่ ค-2 พบว่าไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเปลี่ยนตามปริมาณการแทนที่เก่าปาล์มน้ำมัน และ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ β ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณเทียบกับปริมาณการแทนที่เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POFA) กับ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง β กับปริมาณการแทนที่เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POFA) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการที่ (ค-6)

$$\beta = \alpha_1(POFA)^2 + \alpha_2(POFA) + \alpha_3 \quad (\text{ค-6})$$



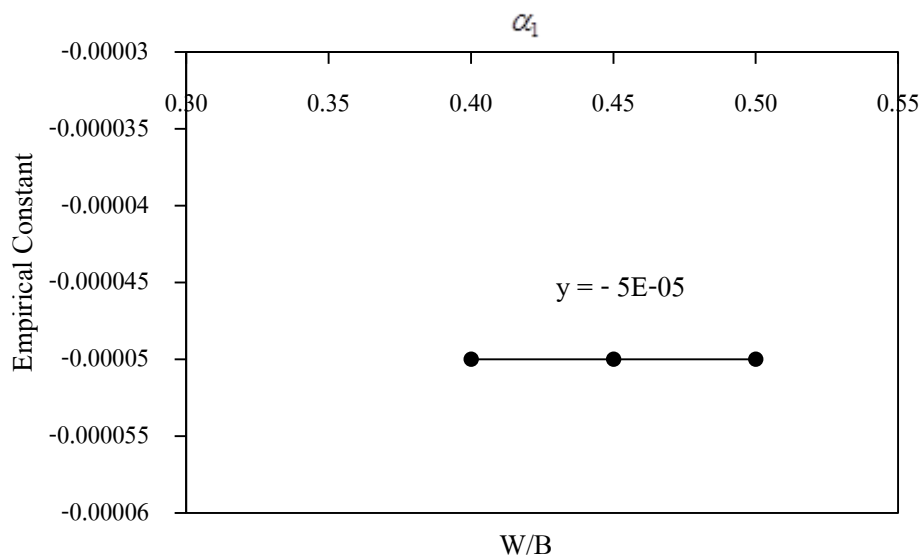
ภาพภาคผนวก ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Empirical Constant (β) กับ ร้อยละเก่าปาล์มน้ำมัน (POFA) อยู่ในรูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลดีกรีสอง

ตามภาพภาคผนวกที่ ค-2 เราจะได้ค่า α_1 , α_2 และ α_3 แสดงในตารางที่ ค-4

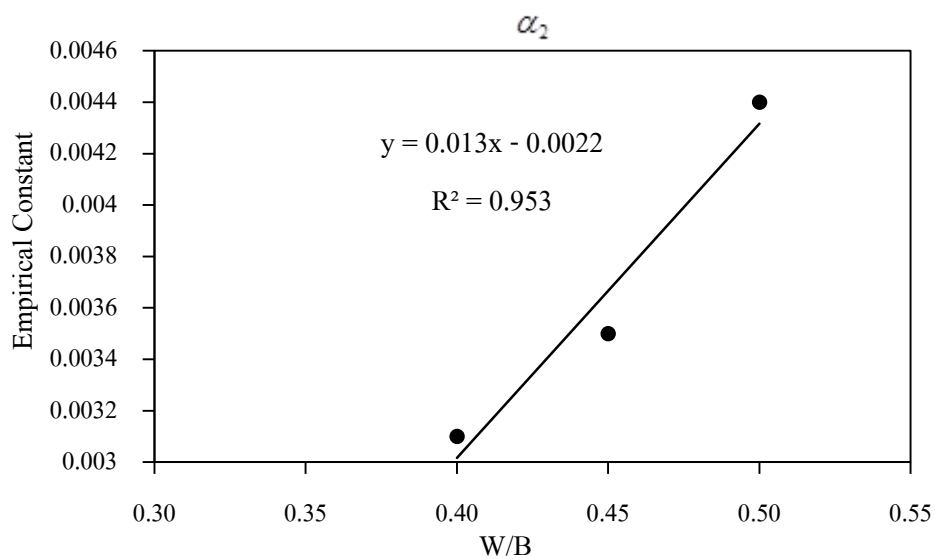
ตารางภาคผนวกที่ ค-4 ค่า α_1 , α_2 และ α_3

อัตราน้ำต่อวัสดุ (W/B)	α_1	α_2	α_3
0.40	-0.00005	0.0031	0.7771
0.45	-0.00005	0.0035	0.7626
0.50	-0.00005	0.0044	0.7389

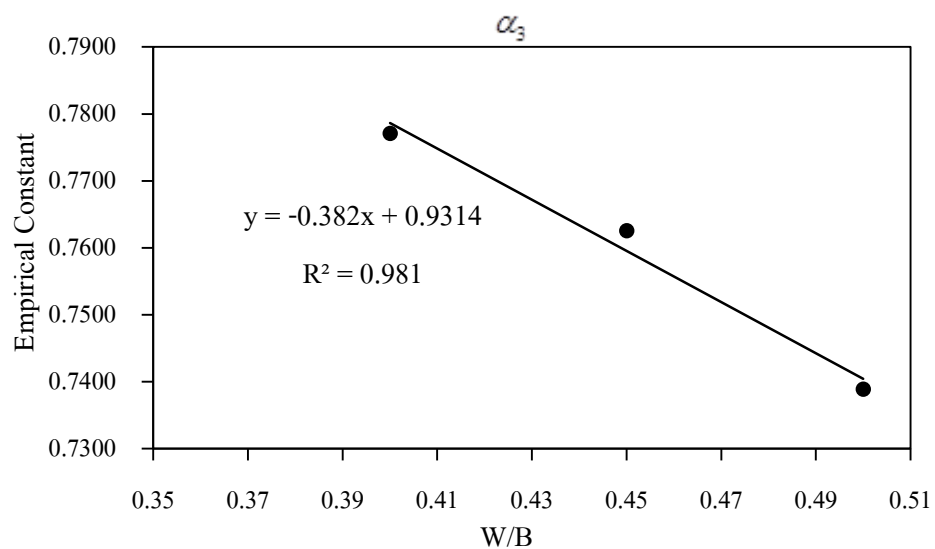
หลังจากนั้นวัด ความสัมพันธ์ระหว่าง α_1 , α_2 และ α_3 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน (W/B) อยู่ในความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงในภาพภาคผนวกที่ ค-3, ค-4 และ ค-5



ภาพภาคผนวกที่ ค-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Empirical Constant (α_1) กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น



ภาพภาคผนวกที่ ค-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Empirical Constant (α_2) กับ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น



ภาพภาคผนวกที่ ค-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Empirical Constant (α_3) กับ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น

จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง α_1 , α_2 และ α_3 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (ค-7) ถึง (ค-9) ตามลำดับ

$$\alpha_1 = -5 \times 10^{-5} \quad (\text{ค-7})$$

$$\alpha_2 = 0.013 (W / B) - 0.0022 \quad (\text{ค-8})$$

$$\alpha_3 = -0.382 (W / B) + 0.9314 \quad (\text{ค-9})$$

เมื่อแทนค่า α_1 , α_2 และ α_3 ในสมการที่ (ค-6) กำหนดค่า β ในรูปของปริมาณการแทนที่ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังสมการที่ (ค-10)

$$\beta = -5 \times 10^{-5} (POFA)^2 + [0.013 (W / B) - 0.0022] (POFA) - 0.382 (W / B) + 0.9314 \quad (\text{ค-10})$$

เมื่อ

$$\beta = \text{ค่าสัมประสิทธิ์}$$

POFA = ร้อยละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท

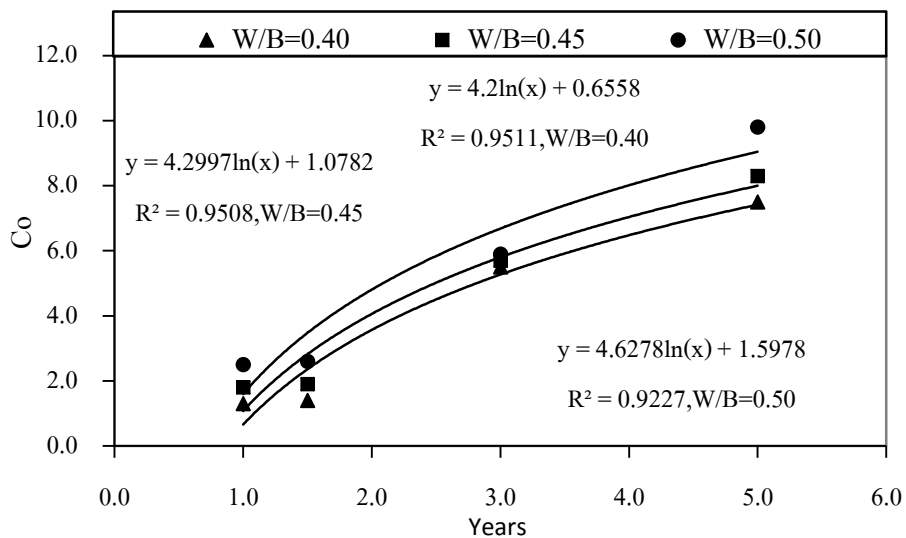
ที่ 1

$$W/B = \text{อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน}$$

วิธีการหาสมการ (C_0)

พิจารณาค่า C_0 ตามตารางภาคผนวกที่ ค-3 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเล ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ C_0 ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับระยะเวลาแช่คอนกรีตในน้ำทะเล โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับระยะเวลาแช่ (t) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ (ค-11)

$$C_0 = \gamma_1 \ln(t) + \gamma_2 \quad (\text{ค-11})$$



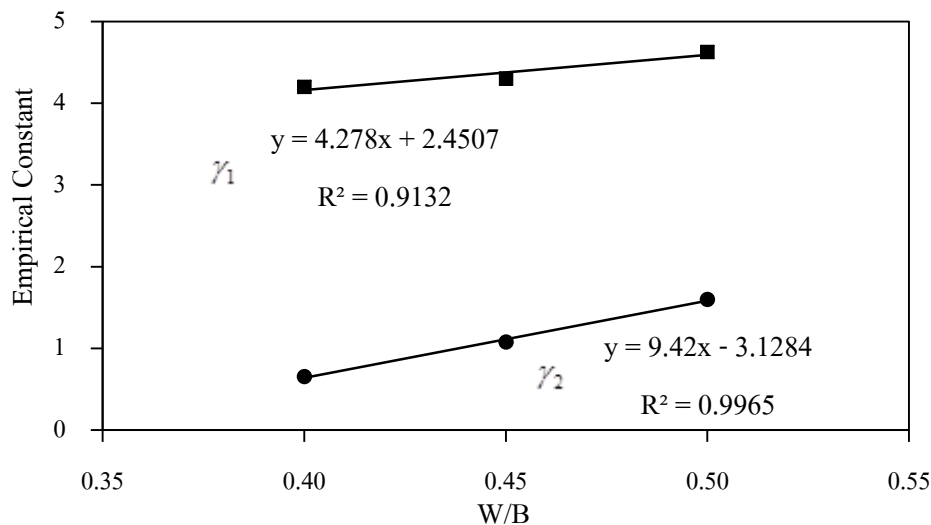
ภาพภาคผนวกที่ ค-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_0) กับ ระยะเวลาแช่ในน้ำทะเล (Years) อยู่ในรูปแบบของสมการของฟังก์ชัน ลอการิทึม

ตามภาพภาคผนวกที่ ค-6 ได้ค่า γ_1 และ γ_2 แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค-5

ตารางภาคผนวกที่ ค-5 ค่า γ_1 และ γ_2

อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	γ_1	γ_2
0.40	4.2000	0.6558
0.45	4.2997	1.0782
0.50	4.6278	1.5978

หลังจากนั้นวาด ความสัมพันธ์ระหว่าง γ_1 และ γ_2 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) อยู่ในความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงในภาพภาคผนวกที่ ค-7



ภาพภาคผนวกที่ ค-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Empirical Constant (γ) กับ อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง γ_1 และ γ_2 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (ค-12) และ (ค-13) ตามลำดับ

$$\gamma_1 = 4.278 (W / B) + 2.4507 \quad (\text{ค-12})$$

$$\gamma_2 = 9.42 (W / B) - 3.1284 \quad (\text{ค-13})$$

แทนค่า γ_1 และ γ_2 ในสมการที่ (ค-11) คำนวณหา C_o ได้ดังสมการที่ (ค-14)

$$C_o = 4.278 (W / B) + 2.4507 \ln(t) + 9.42 (W / B) - 3.1284 \quad (\text{ค-14})$$

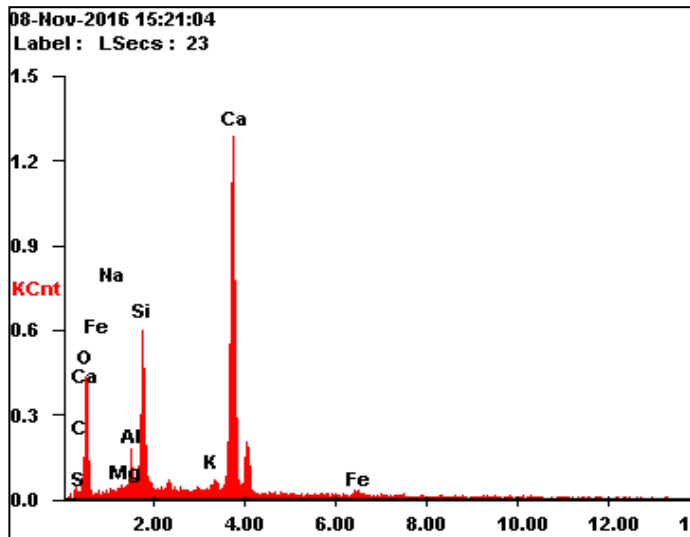
เมื่อ

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

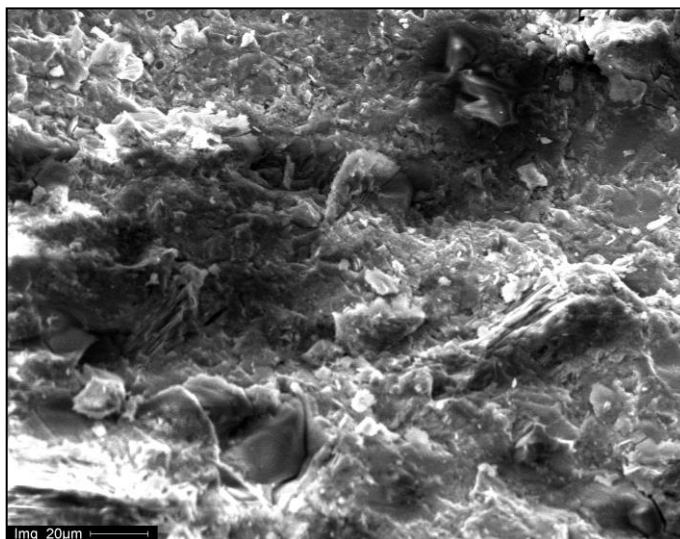
W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ภาคผนวก ง

ผลการส่องโครงสร้างจุลภาค (SEM) และ (EDS) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่แช่ในสภาวะ
แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

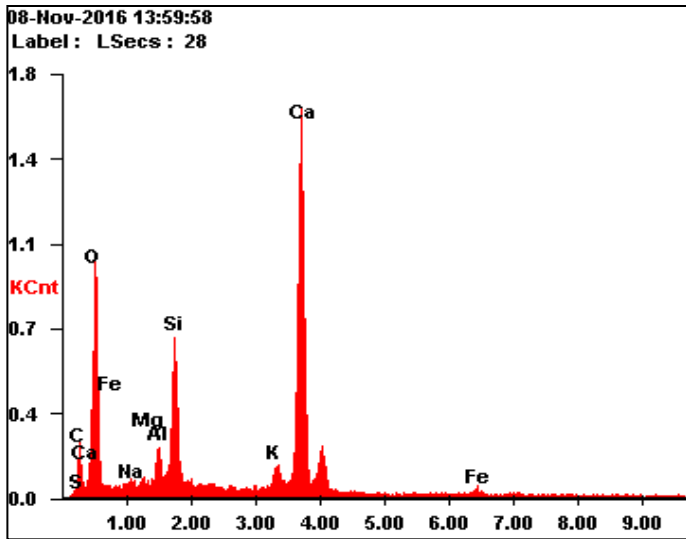


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	05.13	10.02
<i>O</i>	35.15	51.50
<i>Na</i>	00.81	00.82
<i>Mg</i>	00.88	00.85
<i>Al</i>	02.65	02.30
<i>Si</i>	09.84	08.22
<i>S</i>	00.94	00.69
<i>K</i>	01.61	00.97
<i>Ca</i>	39.89	23.34
<i>Fe</i>	03.09	01.30

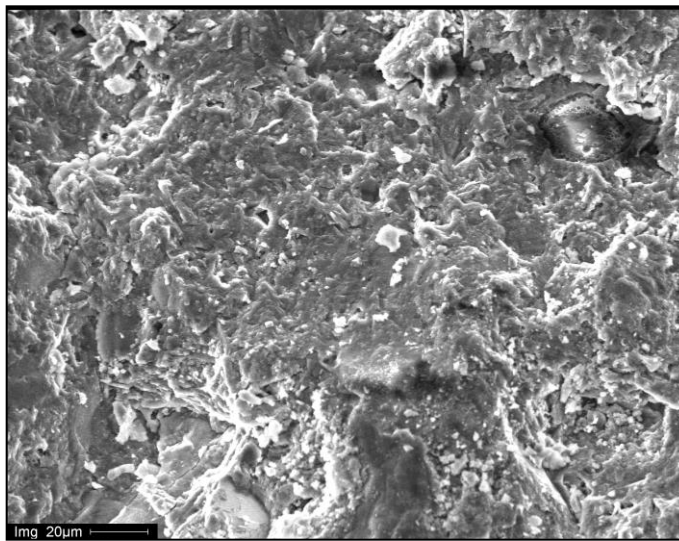


DXSTEAM
POS(001,001)Ú! ÚX 2 XŸŸŸŸŸÚ! ÈÚ! ÍÁ ÍÁ Ú! Á9 |T:

1. I40P00

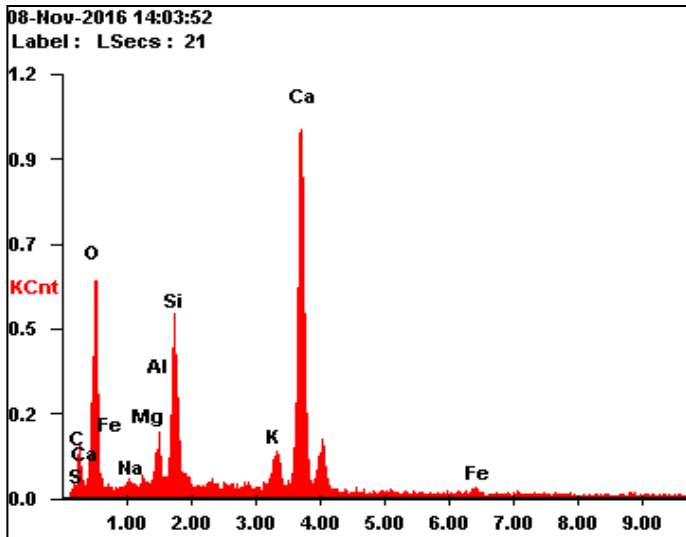


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	11.39	19.44
<i>O</i>	42.80	54.83
<i>Na</i>	00.67	00.60
<i>Mg</i>	00.58	00.49
<i>Al</i>	02.00	01.52
<i>Si</i>	07.21	05.26
<i>S</i>	00.34	00.22
<i>K</i>	02.05	01.08
<i>Ca</i>	31.07	15.89
<i>Fe</i>	01.88	00.69

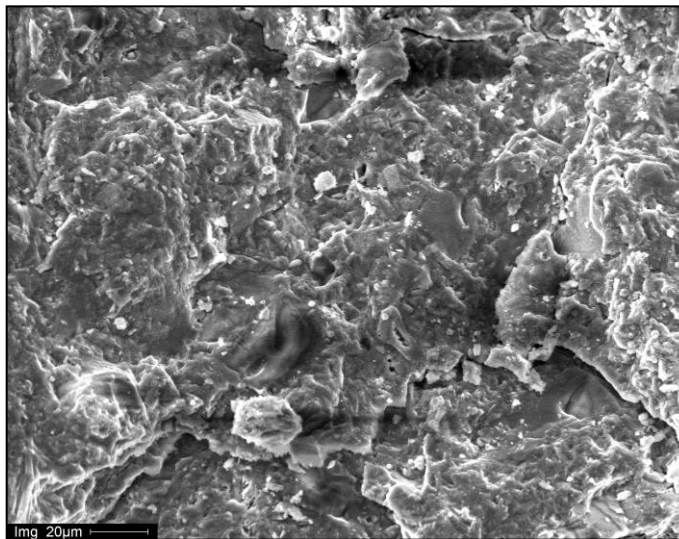


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ű!A9□|T:

2. I40P15

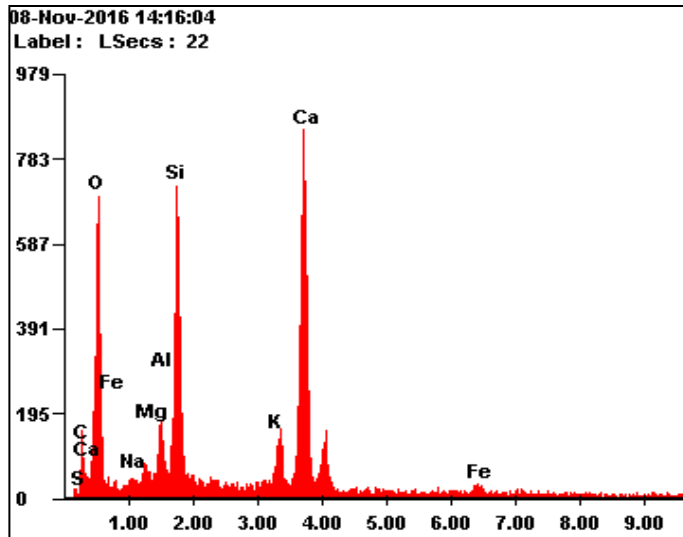


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	12.40	21.29
<i>O</i>	39.54	50.96
<i>Na</i>	01.29	01.15
<i>Mg</i>	00.96	00.81
<i>Al</i>	02.55	01.95
<i>Si</i>	08.16	05.99
<i>S</i>	00.47	00.30
<i>K</i>	02.82	01.49
<i>Ca</i>	29.68	15.27
<i>Fe</i>	02.14	00.79

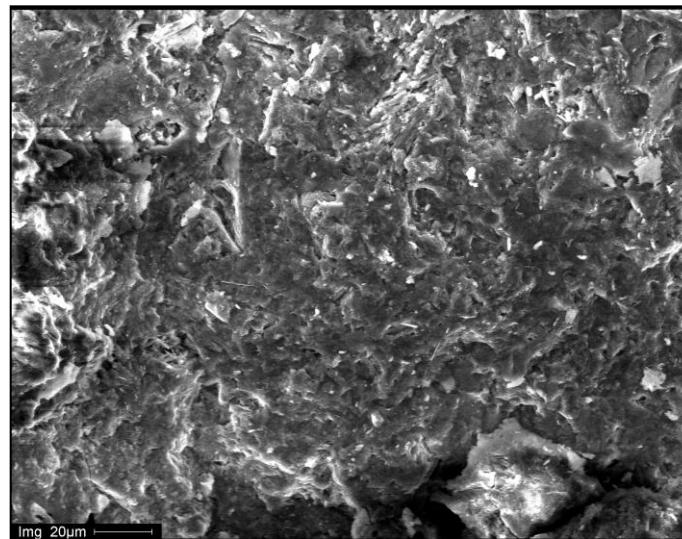


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎÁ□□ÎÁ□°Ű!A9□|T:

2. I40P15

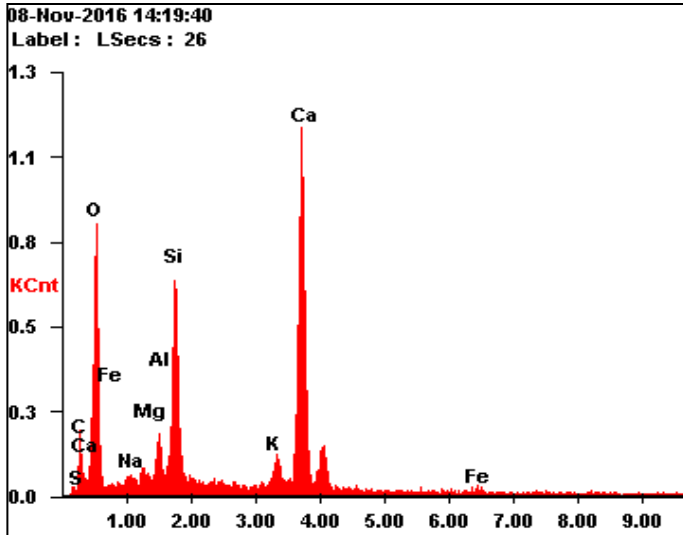


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	12.24	20.77
<i>O</i>	40.38	51.41
<i>Na</i>	01.25	01.10
<i>Mg</i>	01.24	01.04
<i>Al</i>	02.98	02.25
<i>Si</i>	11.01	07.99
<i>S</i>	00.45	00.28
<i>K</i>	03.50	01.82
<i>Ca</i>	24.38	12.39
<i>Fe</i>	02.58	00.94

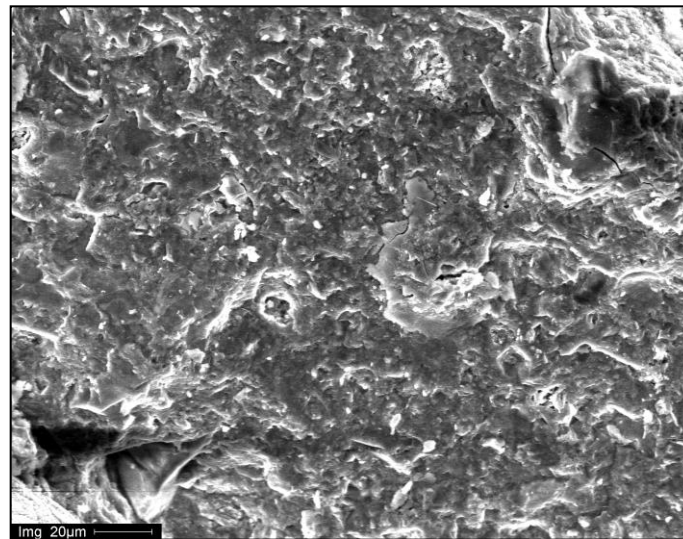


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XŸŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎÁ□□ÎÁ□°Ű!A9□|T:

4.I40P35

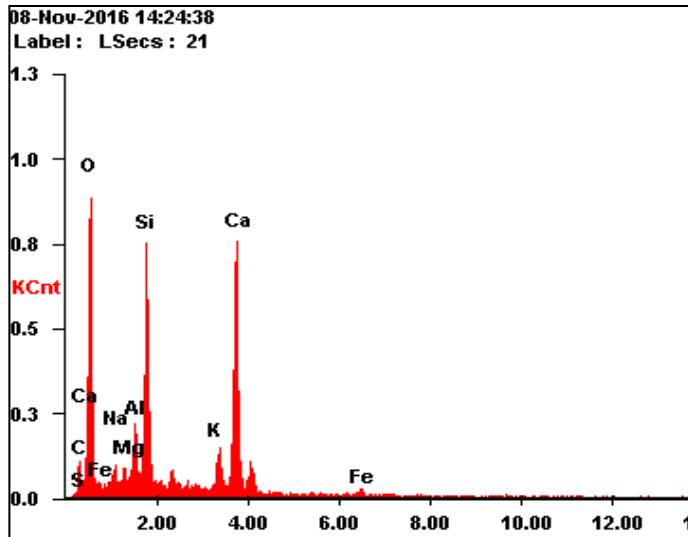


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	13.20	22.01
<i>O</i>	41.86	52.37
<i>Na</i>	01.26	01.10
<i>Mg</i>	01.16	00.96
<i>Al</i>	02.44	01.81
<i>Si</i>	09.18	06.55
<i>S</i>	00.26	00.16
<i>K</i>	02.32	01.19
<i>Ca</i>	26.31	13.14
<i>Fe</i>	02.00	00.72

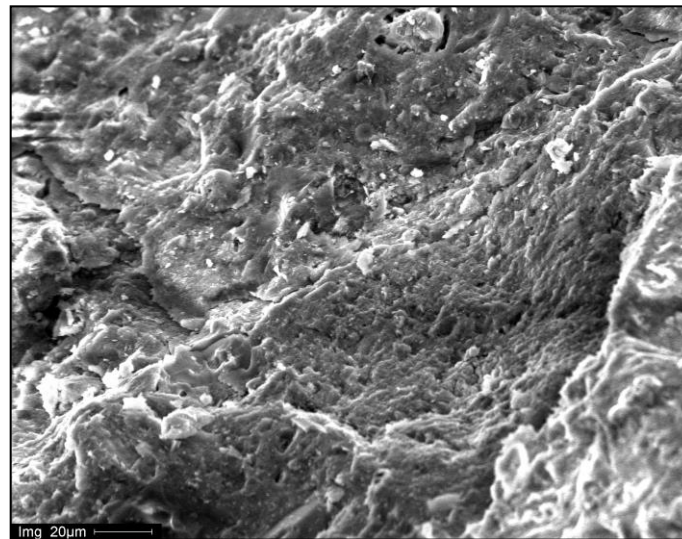


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ű!A9□|T:

4.I40P35

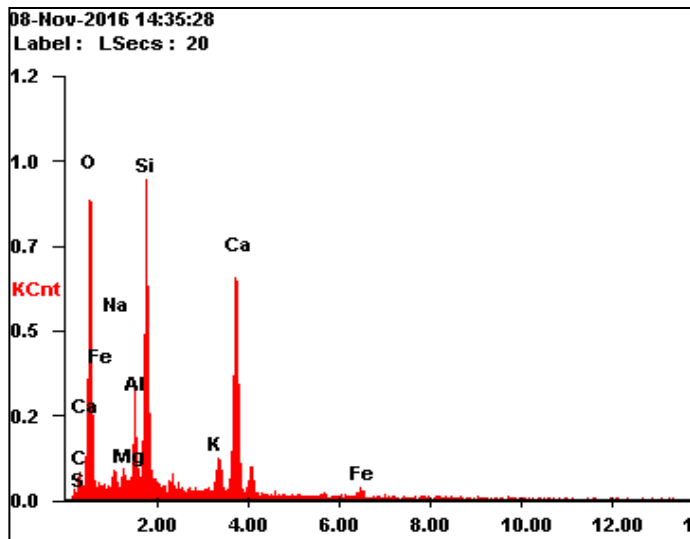


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	10.47	17.27
<i>O</i>	46.65	57.78
<i>Na</i>	01.28	01.11
<i>Mg</i>	01.11	00.90
<i>Al</i>	02.91	02.14
<i>Si</i>	10.86	07.66
<i>S</i>	00.90	00.56
<i>K</i>	03.31	01.68
<i>Ca</i>	20.86	10.31
<i>Fe</i>	01.65	00.59

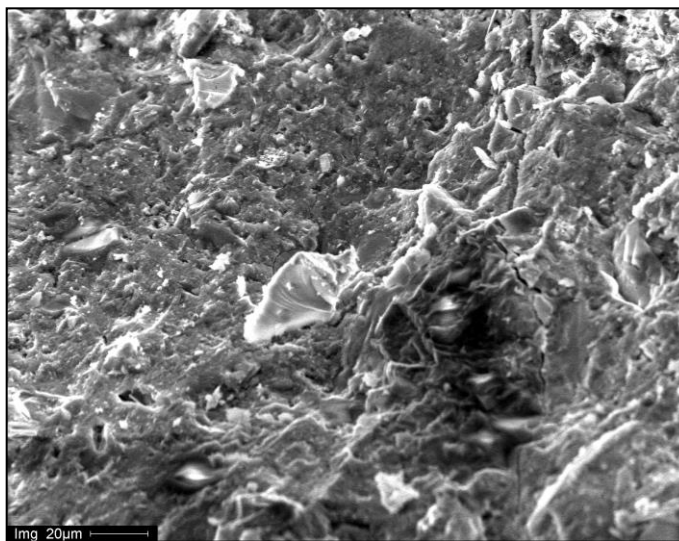


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ű!A9□|T:

5.I40P50

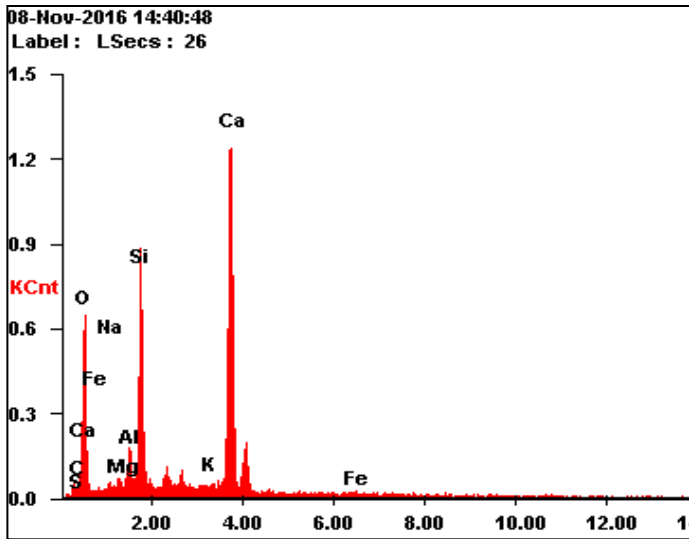


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	10.03	16.69
<i>O</i>	44.83	56.02
<i>Na</i>	02.19	01.90
<i>Mg</i>	01.57	01.29
<i>Al</i>	03.82	02.83
<i>Si</i>	12.77	09.09
<i>S</i>	00.79	00.49
<i>K</i>	02.88	01.47
<i>Ca</i>	18.83	09.39
<i>Fe</i>	02.30	00.82

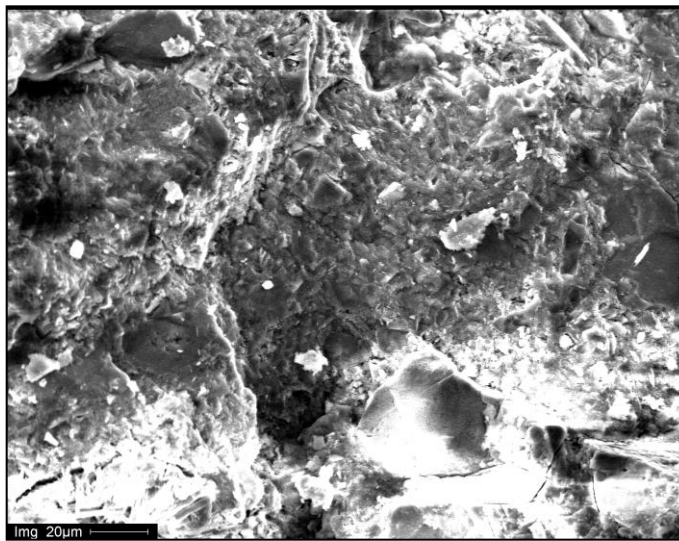


DXSTEAM
PO₄(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸÚ!□ÈÙ!□ÎÁ□□ÎÁ□°Ù!A9□|T:

5.I40P50

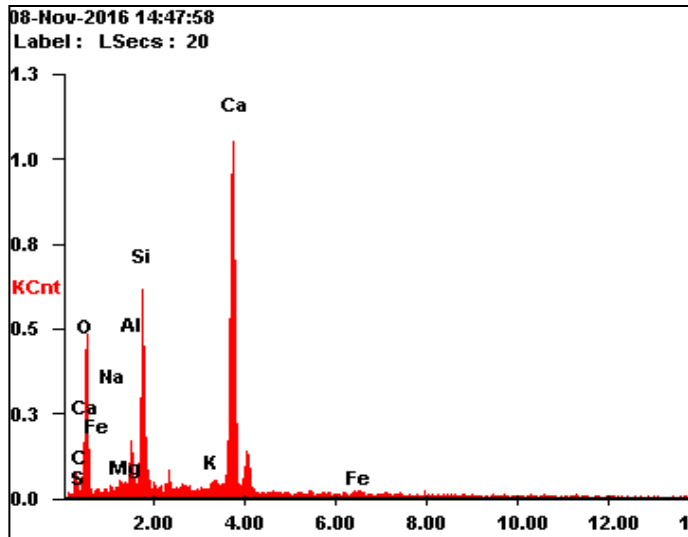


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	05.36	09.99
<i>O</i>	39.08	54.66
<i>Na</i>	01.17	01.14
<i>Mg</i>	01.14	01.05
<i>Al</i>	02.48	02.06
<i>Si</i>	12.24	09.75
<i>S</i>	01.48	01.03
<i>K</i>	00.97	00.55
<i>Ca</i>	33.76	18.85
<i>Fe</i>	02.33	00.93

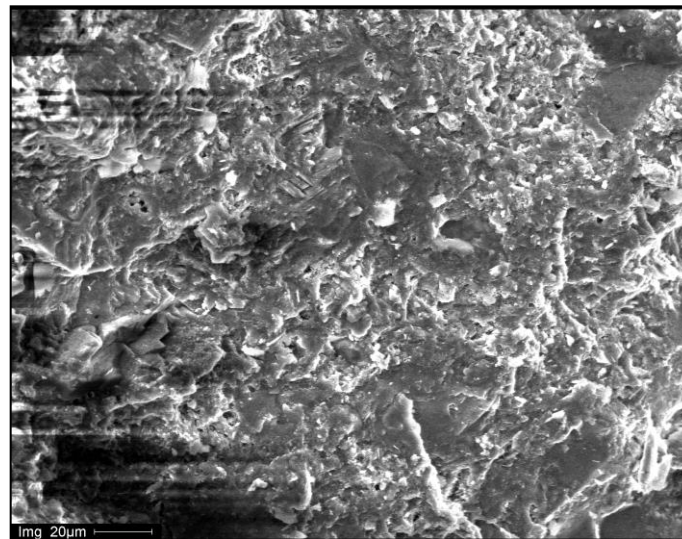


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ”Ű!□ÈŰ!□ÎÁ□□ÎÁ□°Ű!A9□|T:

6.I50P00

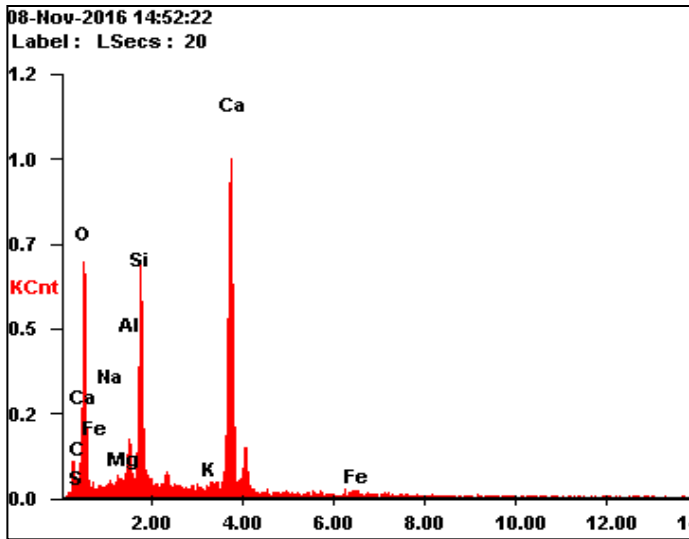


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	09.90	17.90
<i>O</i>	36.34	49.33
<i>Na</i>	00.89	00.84
<i>Mg</i>	00.89	00.80
<i>Al</i>	02.54	02.04
<i>Si</i>	10.80	08.35
<i>S</i>	00.74	00.50
<i>K</i>	01.12	00.62
<i>Ca</i>	34.72	18.81
<i>Fe</i>	02.06	00.80

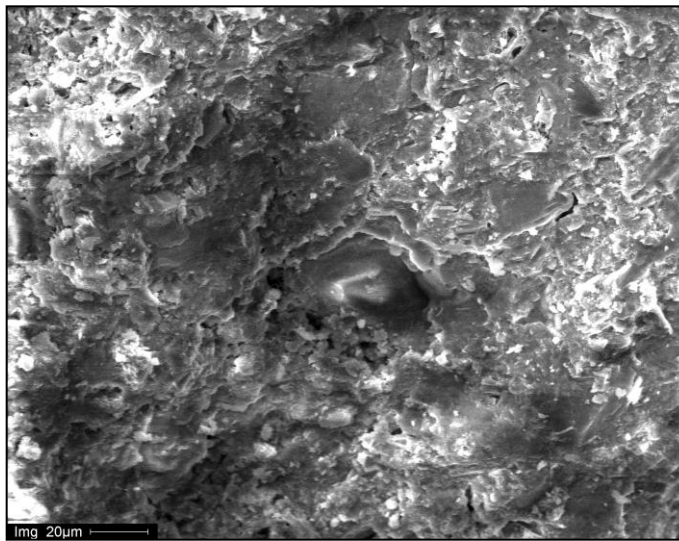


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ű!A9□|T:

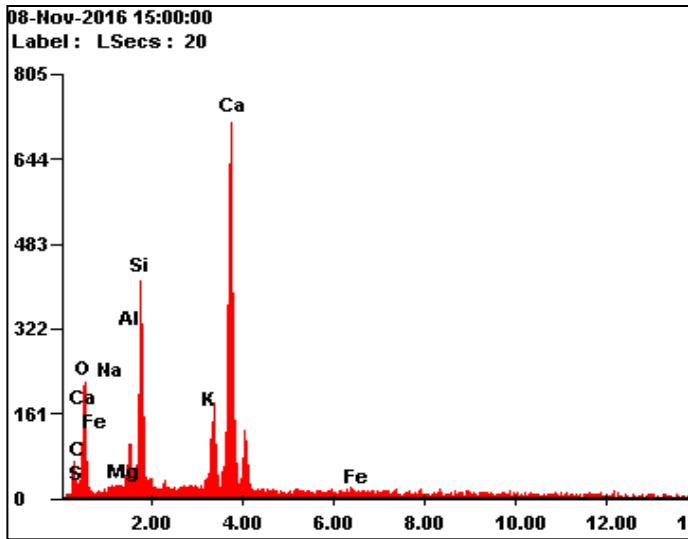
7.I50P15



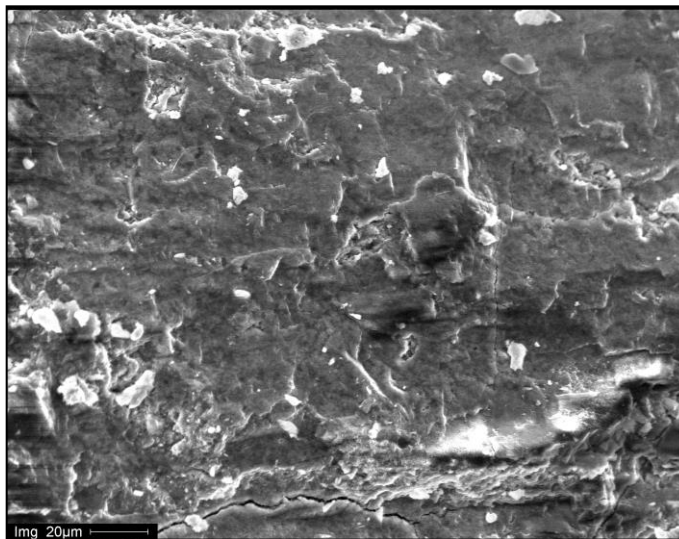
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	12.22	20.62
<i>O</i>	41.75	52.89
<i>Na</i>	00.84	00.74
<i>Mg</i>	01.10	00.92
<i>Al</i>	02.42	01.82
<i>Si</i>	09.64	06.95
<i>S</i>	00.79	00.50
<i>K</i>	00.80	00.41
<i>Ca</i>	28.66	14.49
<i>Fe</i>	01.78	00.65



DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŪX 2□XYŸŸŸ"Ū!□ÈŪ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ū!A9□|T:

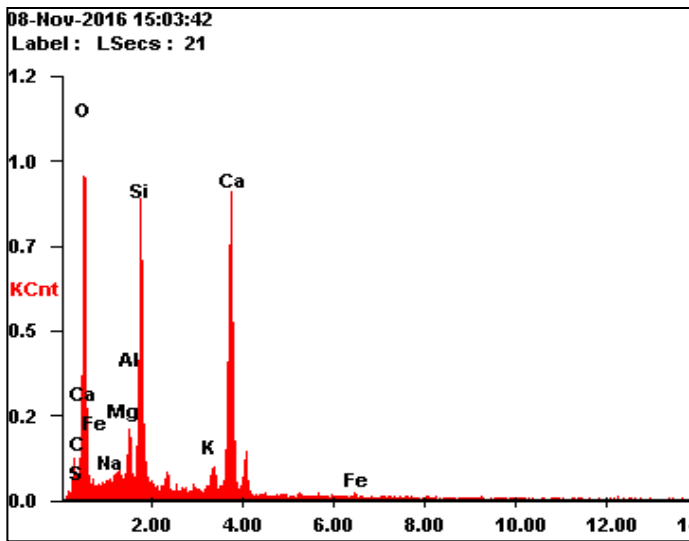


Element	Wt%	At%
<i>C</i>	10.64	20.09
<i>O</i>	30.06	42.59
<i>Na</i>	01.00	00.98
<i>Mg</i>	00.61	00.57
<i>Al</i>	03.15	02.64
<i>Si</i>	10.64	08.59
<i>S</i>	00.31	00.22
<i>K</i>	06.70	03.89
<i>Ca</i>	34.17	19.33
<i>Fe</i>	02.73	01.11

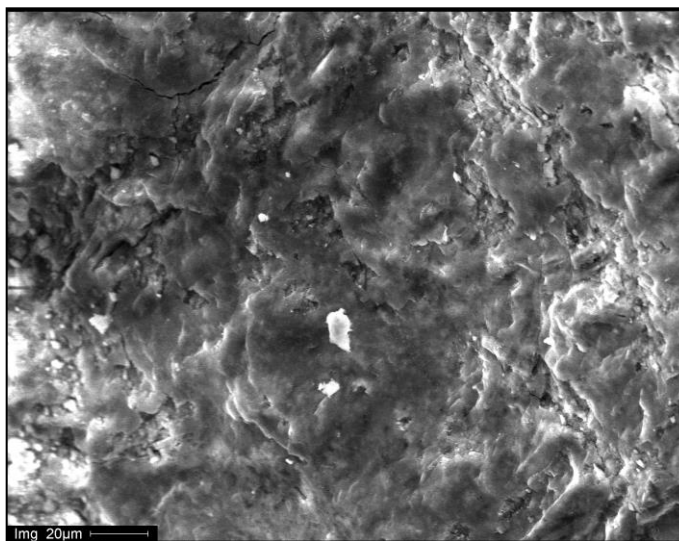


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎÁ□□ÎÁ□°Ű!A9□|T:

8.I50P25

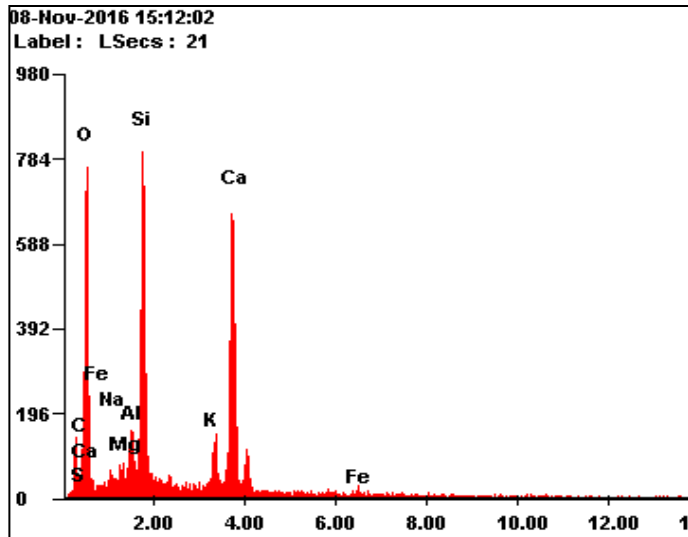


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	10.39	17.02
<i>O</i>	47.40	58.33
<i>Na</i>	01.60	01.37
<i>Mg</i>	01.34	01.08
<i>Al</i>	02.71	01.98
<i>Si</i>	11.04	07.74
<i>S</i>	00.75	00.46
<i>K</i>	01.94	00.98
<i>Ca</i>	21.60	10.61
<i>Fe</i>	01.23	00.43

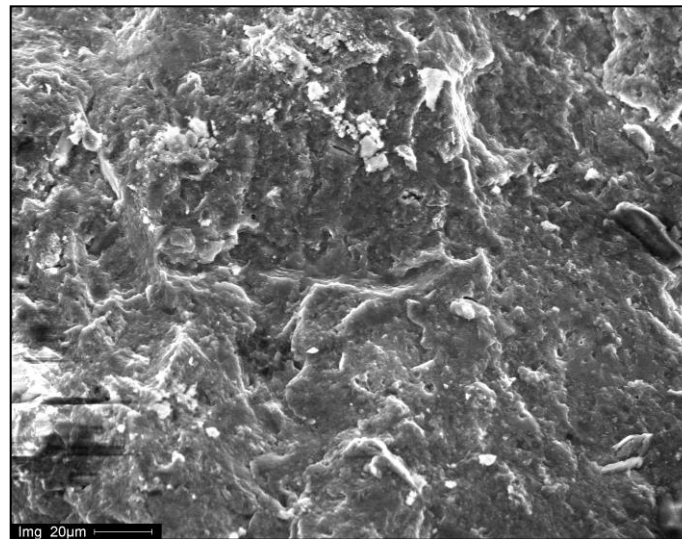


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ű!A9□|T:

9.I50P35

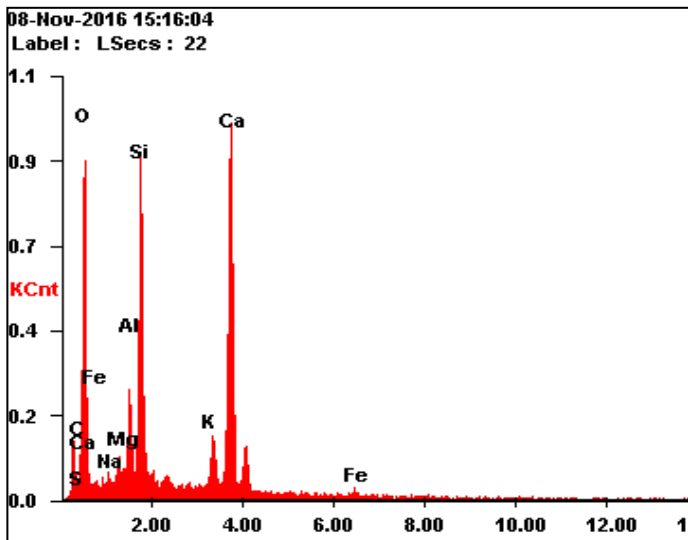


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	12.31	20.18
<i>O</i>	44.36	54.61
<i>Na</i>	01.24	01.06
<i>Mg</i>	01.16	00.94
<i>Al</i>	02.30	01.68
<i>Si</i>	12.91	09.05
<i>S</i>	00.28	00.17
<i>K</i>	03.17	01.60
<i>Ca</i>	20.54	10.09
<i>Fe</i>	01.75	00.62

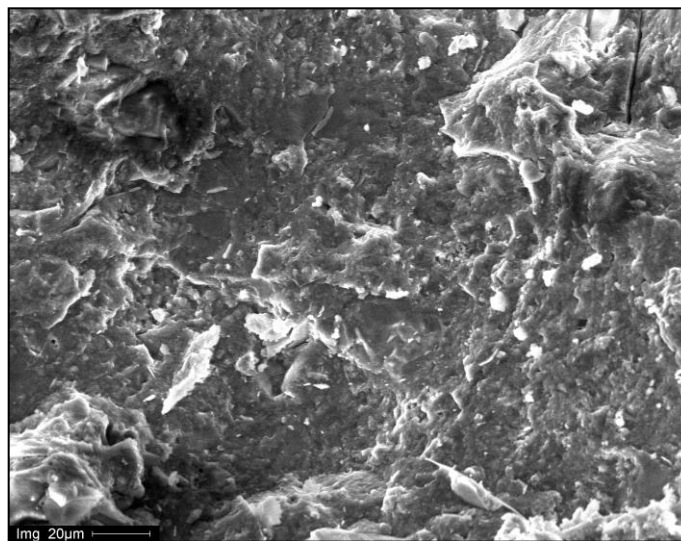


DXSTEAM
POŞ(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ű!□ÈŰ!□ÎĀ□□ÎĀ□°Ű!A9□|T:

10.I50P50



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	13.16	21.70
<i>O</i>	41.99	52.00
<i>Na</i>	01.35	01.17
<i>Mg</i>	01.68	01.37
<i>Al</i>	03.52	02.58
<i>Si</i>	11.17	07.88
<i>S</i>	00.61	00.38
<i>K</i>	02.99	01.51
<i>Ca</i>	21.86	10.81
<i>Fe</i>	01.66	00.59



DXSTEAM
POS(001,001)Ú! ŰX 2□XYŸŸŸ"Ú!□ÈÙ!□ÎÁ□□ÎÁ□°Ù!A9□|T:

10.I50P50