

การต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้เถ้าแกลบดำ
เป็นวัสดุประสานภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การต้านทานการกีดกันของคนกิริตเสริมเหล็กที่มีการใช้เถ้าแกลบดำ
เป็นวัสดุประสานภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANTI-CORROSIVE BLACK RICE HUSK ASH ENHANCED
REINFORCED CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENT



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กการใช้เถ้าแกลบดำ เป็นวัสดุประสานภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

โดย นางสาวชญาณิช รสจันทร์ รหัสนักศึกษา 57010233

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้เถ้าแกลบดำเป็นวัสดุประสานภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล	
โดย	นางสาวชญาณิช รสจันทร์	รหัสประจำตัว 57010233
ปริญญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ภัทธานิชช์ วงศ์พร้อมรัตน์	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการนำเถ้าแกลบดำมาใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีต เนื่องจากคลอไรด์ด้วยวิธี Accelerated short-term techniques ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำถูกวิเคราะห์เป็นอันดับแรกและพบว่าเถ้าแกลบดำมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานได้เนื่องจากมีปริมาณของซิลิกา (SiO_2) มากถึง 95 % และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ย 45.95 ตร.ม./กรัม หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ ลบ.มม. ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ถูกหล่อและบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 7 วัน แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตและการต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธี Accelerated Corrosion test by Impressed Voltage (ACTIV) เพื่อหาปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบดำที่ทำให้คุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุด ในขณะที่การรับแรงอัดยังเป็นไปตามมาตรฐานการก่อสร้าง โดยพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วันมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตควบคุมมากที่สุด อย่างไรก็ตามกำลังอัดคอนกรีตสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามเวลา ดังนั้นปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบดำด้วยอัตราส่วนที่สูงขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อได้รับระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การกัดกร่อน, โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, ปอซโซลาน, เถ้าแกลบดำ

Report Title Anti-Corrosive Black Rice Husk Ash Enhanced Reinforced
Concrete under Marine Environment
By Miss Chayanit Rotchan
Student ID. 57010233
Degree Bachelor of Engineering
Program Chemical Engineering
Academic Year 2017
Advisor Dr. Patthranit Wongpromrat

ABSTRACT

In this study, the utilization of black rice husk ash (BRHA) as an additive for improving the corrosion resistance of steel in concrete due to chloride ions was studied by accelerated short-term techniques. The physical and chemical characteristics of BRHA were firstly analyzed. This particular BRHA consisted of 95% of silica and had an average specific surface area of 45.95 m²/g, complying with ASTM C 618 requirements for a natural pozzolan. Subsequently, concrete specimens with the dimensions of 100x100x100 mm³ were casted and cured in fresh water. The portland cement in the concrete was partly replaced by BRHA in the amount of 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of cement. The compressive strengths and corrosion resistances of concrete specimens were investigated by Accelerated Corrosion Test by Impressed Voltage (ACTIV) in order to attain the optimum level of BRHA replacement with the best corrosion resistance properties while the compressive strength of the concrete specimen still follows the construction standard. The results show that the optimum amount of BRHA was 10% by weight for the curing time of 28 days. However, the compressive strength of concrete normally increases with time, so the higher amounts of BRHA can be used if the longer curing time is available.

Keywords: Corrosion, Reinforced concrete, Pozzolan, Black rice husk ash

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน

ขอขอบพระคุณ ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ และแนวคิดในการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินโครงการวิจัยให้ลุล่วง ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ตลอดการทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง อาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้ทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษา เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอน้อมรับ และขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ชญาธิศ รสจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คอนกรีต.....	4
2.1.1 วัสดุในการผลิตคอนกรีต.....	4
2.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก.....	5
2.2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมแรง.....	5
2.3 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต.....	6
2.3.1 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical deterioration).....	6
2.3.2 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical deterioration).....	6
2.3.3 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical deterioration).....	6
2.4 คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล.....	6
2.5 เกลือคโลไรด์.....	8
2.5.1 เกลือคโลไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล.....	8
2.5.2 เกลือคโลไรด์ในคอนกรีต.....	8

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6 การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต.....	10
2.6.1 การแพร่ (Diffusion).....	10
2.6.2 การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี (Capillary suction).....	10
2.6.3 การซึมผ่าน (Permeability).....	10
2.6.4 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption).....	10
2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล.....	11
2.8 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์.....	11
2.9 วัสดุปอซโซลาน.....	14
2.10 ปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	15
2.11 เถ้าแกลบดำ.....	16
2.11.1 คุณสมบัติของเถ้าแกลบดำ.....	17
2.12 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต.....	18
2.13 วิธีการวัดการแทรกซึมของคลอไรด์.....	19
2.14 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการไทเทรตตามวิธีของเมอร์.....	19
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี.....	20
3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	22
3.2.1 การเตรียมเถ้าแกลบดำ.....	22
3.2.2 การเตรียมส่วนผสมคอนกรีต.....	22
3.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	23
3.4 การเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี Accelerated corrosion test by impressed voltage (ACTIV).....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต.....	23
3.5.2. การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C 1218.....	24
3.5.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C 1152.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	25
4.1 คุณสมบัติแก้วเคลือบดำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตัวอย่าง.....	25
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของแก้วเคลือบดำ.....	25
4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของแก้วเคลือบดำ.....	26
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต.....	27
4.3 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี Impressed voltage (ACTIV).....	28
4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก.....	35
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	38
ภาคผนวก ข ผลจากการศึกษาปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วเคลือบดำ.....	40

สารบัญตาราง

ชื่อตาราง	หน้า
2.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) สูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐาน และข้อกำหนดต่างๆ.....	9
2.2 ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) สูงสุดในคอนกรีตจากข้อกำหนด.....	10
2.3 กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 คุณภาพ.....	15
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ.....	17
2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ.....	18
3.1 แสดงปริมาณส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์เมตร.....	22
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Fluorescence.....	26
4.2 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี Impressed voltage (ACTIV).....	28
ข.1 แรงกดสูงสุดที่คอนกรีตรับได้และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน.....	40
ข.2 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV ของคอนกรีตควบคุม (CPC).....	42
ข.3 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-10).....	42
ข.3 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-20).....	43
ข.3 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-30).....	44
ข.3 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-40).....	45
ข.3 ผลจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-50).....	45
ข.8 อัตราการกักกร่อนของเหล็กจากการเร่งการกักกร่อนด้วยวิธี ACTIV.....	46
ข.9 ปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด.....	47

สารบัญรูปภาพ

ชื่อรูปภาพ	หน้า
2.1 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ (จากสภาวะแวดล้อมทะเล) โดยเหล็กเสริมเกิดสนิมต้นคอนกรีตให้แตก.....	12
2.2 การแตกร้าวหลุดร่อนของคอนกรีต เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็ก.....	14
3.1 แผนภาพอุปกรณ์ในการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV.....	23
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเก้าแกลบดำ.....	25
4.2 ผลตรวจโครงสร้างเก้าแกลบดำด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	25
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุคอนกรีต.....	27
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเริ่มต้นกับตัวอย่างคอนกรีต.....	28
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะเวลาของตัวอย่างคอนกรีต.....	29
4.6 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในตัวอย่างคอนกรีต.....	30
4.7 ผลของเก้าแกลบดำต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ความลึก 2 เซนติเมตร (จากผิวคอนกรีต).....	32
4.8 ผลของเก้าแกลบดำต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ความลึก 4 เซนติเมตร (จากผิวคอนกรีต).....	32
ก.1 เก้าแกลบดำที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น.....	38
ก.2 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และ Ball mill.....	38
ก.3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต.....	39
ก.4 ตัวอย่างคอนกรีต.....	39
ข.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	40
ข.2 อุปกรณ์ในการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV.....	41
ข.3 ลักษณะรอยแตกของคอนกรีตและสนิมที่เกิดจากการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV.....	41
ข.4 การแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ %3.5 w/v ในวัฏจักรเปียกสลับแห้ง.....	46
ข.5 สีของสารละลายเมื่อถึงจุดยุติ และเกิดตะกอนสีแดงอิฐ.....	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนของโครงสร้างและทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งาน (Service lifetime) ที่สั้นลง โดยเฉพาะโครงสร้างในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง ส่วนใหญ่จะพบในโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล รวมไปถึงสภาวะแวดล้อมที่อยู่ในทะเลด้วย โดยเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมแล้วดันให้เนื้อคอนกรีตที่หุ้มอยู่ เกิดการแตกร้าวเสียหาย ทั้งนี้ในน้ำทะเลประกอบด้วยเกลือชนิดต่างๆมากถึงร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก โดยเกลือหลักๆมีอยู่ 2 ชนิดคือ เกลือคลอไรด์ (Cl^-) และเกลือซัลเฟต (SO_4^-) [1] โดยทั่วไปนั้นโครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจะนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot C_3A$) เหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่มีคุณสมบัติต้านทานซัลเฟตเท่านั้น โดยแท้จริงแล้วน้ำทะเลมีปริมาณเกลือซัลเฟตอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แต่มีปริมาณเกลือคลอไรด์ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคลอไรด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีความชัดเจนและรุนแรงมากขึ้น โดยส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนของโครงสร้าง ทั้งในด้านการรับแรงเชิงกลของโครงสร้าง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานความล้าและความสามารถในการแอ่นตัวของโครงสร้างก็ลดลงด้วย [5] และเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจะดันให้เนื้อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายจนไม่สามารถรับกำลังได้อีก จนโครงสร้างเกิดการวิบัติหรือเกิดการชำรุดเสียหายนั่นเอง ซึ่งการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นจึงมีแนวทางในการปรับปรุงหรือพัฒนาคุณสมบัติของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและโครงสร้างให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการเลือกใช้วัสดุประสานหรือวัสดุพอลิเมอร์ที่ต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ เถ้าแกลบดำซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในอัตราที่เหมาะสม เพื่อทำให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ ทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เป็นไปได้ยากขึ้น นอกจากนี้การใช้เถ้าแกลบดำเป็นวัสดุประสานยังสามารถช่วยลดต้นทุนและลดปริมาณในการใช้ปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย [1]

คลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของโครงสร้างของคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนใหญ่มาจากสภาวะแวดล้อมภายนอก โดยแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาจากน้ำทะเล [4] โดยบริเวณที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุดคือ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) บริเวณที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นวัฏจักร โดยเฉพาะถ้าช่วงที่แห้งยาวนานกว่าช่วงที่เปียก การเกิดสนิมจะยิ่งรุนแรงมากขึ้น [6] ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนน้อยมากจากคลอไรด์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เถ้าแกลบที่นำมาศึกษาคือเถ้าแกลบดำ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายภายในประเทศจากโรงสีข้าวที่ได้จากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงต้มน้ำเพื่อใช้แรงดันไอน้ำเดินเครื่องสีข้าว ที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส [5,6] เถ้าแกลบดำมีสมบัติที่สามารถใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้ คือ มีซิลิกาออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 70-90% มีความพรุนและพื้นที่ผิวมาก โดยทั่วไปจะไม่มีสมบัติการยึดประสาน แต่ถ้ามีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติการยึดประสาน [7]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าแกลบผสมในคอนกรีตทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง และกำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ [8] แต่การใช้งานในสภาวะดังกล่าวจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนให้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น การต้านทานการเกิดสนิมของเหล็ก การแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะนำเถ้าแกลบดำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กและแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ศึกษาสมบัติของคอนกรีตตัวอย่าง ได้แก่ กำลังอัด การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการแทรกซึมของคลอไรด์ เพื่อเป็นแนวทางในการลดผลกระทบจากคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และพัฒนาให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมทะเลจริง หรืออาจใช้เป็นข้อมูลในการประเมินการกัดกร่อนของโครงสร้างในระหว่างการใช้งาน ตลอดจนเป็นการส่งเสริมการนำเถ้าแกลบซึ่งหาได้ง่ายในประเทศมาเพิ่มมูลค่า โดยการใช้งานคอนกรีตอย่างเป็นรูปธรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %w/v
2. เพื่อประเมินความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %w/v
3. เพื่อศึกษาผลของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %w/v
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมกับปริมาณของเถ้าแกลบที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้จะคำนึงถึงปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องมาจาก คลอไรด์ซึ่งพบมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยศึกษาผลของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีและลดแนวโน้มในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ละตัวอย่างแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 0,10,20,30,40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบ 7 วัน

2. นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %w/v ในสภาวะแห้งสลับเปียก อย่างละ 2 วัน จนครบ 4 เดือน

3. นำตัวอย่างคอนกรีตมาเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี Accelerated corrosion test by impressed voltage

4. เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีต เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการไทเทรต (Titration test) ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 เพื่อหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) และใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152 เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มมูลค่าเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต และเป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้าง

2. เพิ่มความคงทนและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล

3. ใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการความคงทนในสิ่งแวดล้อมทะเลหรือมีคลอไรด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีต [9]

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพราะมีความเหมาะสมกว่าวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ทั้งด้านราคา ความทนทาน การบำรุงรักษาและการตกแต่งผิว โดยแยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นตัวประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำหรือน้ำยาผสมคอนกรีต และส่วนที่เป็นมวลรวม ได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำวัสดุต่างๆมาผสมกัน จะได้คอนกรีตที่เป็นของเหลว มีความหนืด ซึ่งสามารถนำไปเทลงแบบหล่อตามต้องการได้ เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็ง และในเวลาต่อมาจะเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลาหนึ่งความสามารถรับกำลังอัดก็จะเริ่มคงที่โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน

2.1.1 วัสดุในการผลิตคอนกรีต

1. ปูนซีเมนต์(Cement) จะทำหน้าที่ให้กำลังของคอนกรีต โดยการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)กับน้ำกลายเป็นของเหลวหนืด ซึ่งสามารถเทลงแบบหล่อที่ต้องการได้และยึดประสานมวลรวมทั้งหมดเข้าด้วยกันได้ สมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 5 ประเภทดังนี้

1.) ประเภท 1 Normal portland cement เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะกับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วๆ ไปที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น คาน เสา พื้น ถนน ค.ส.ล. เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับการที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์

2.) ประเภท 2 Modified portland cement เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง เพื่อให้สามารถต้านทานเกลือซัลเฟตได้ปานกลาง และจะเกิดความร้อนปานกลางในช่วงหล่อ เหมาะกับการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อ สะพาน ท่าเทียบเรือ เขื่อน เป็นต้น

3.) ประเภท 3 High-early strength portland cement เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สามารถให้กำลังได้รวดเร็วในเวลาอันสั้น หลังจากเทแล้วสามารถใช้งานได้ภายใน 3-7 วัน เหมาะกับการที่เร่งด่วน เช่น คอนกรีตอัดแรง เสาเข็ม พื้นถนนที่จราจรคับคั่ง เป็นต้น

4.) ประเภท 4 Low-heat portland cement เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งส่งผลดีทำให้การขยายตัวน้อย ช่วยลดการแตกร้าว เหมาะกับการสร้างเขื่อนขนาดใหญ่ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตจำหน่าย

5.) ประเภท 5 Sulfate-resistant portland cement เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทนต่อเกลือซัลเฟตได้สูง เหมาะกับการก่อสร้างบริเวณดินเค็ม หรือใกล้กับทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุผสม (Aggregate)

1.) ทราย เป็นตัวแทรกประสานที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ) ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทนและปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงมาก ทรายที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติที่สะอาดแข็งแรง ทนทาน ไม่มีสารเคมีหรืออินทรีย์วัตถุเจือปน เพราะจะทำให้การยึดเหนี่ยวของปูนซีเมนต์เสียกำลัง ก่อนที่จะนำทรายมาใช้ต้องร่อนให้สะอาดก่อน

2.) หิน ต้องไม่ใหญ่เกินไปเพราะทำให้ไม่สามารถเทเข้าไปในระหว่งแบบหล่อกับเหล็กเสริมของคานหรือเสาได้ ในกรณีที่ทำคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับหินที่ใช้ผสมควรมีขนาดที่คละกัน เช่น หินเบอร์ 2 และหินเบอร์ 1 เพื่อลดช่องว่างระหว่างหินให้น้อยลงทำให้คอนกรีตแข็งแรง แน่น และทนทาน

3. น้ำ (Water) จะทำให้น้ำที่ผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและยังช่วยหล่อลื่นให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทลงในแบบหล่อได้ น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องเป็นน้ำที่สะอาด ซึ่งในสวนมากมักกระบูว่าต้องเป็นน้ำสะอาดที่ใช้ดื่ม เช่น น้ำประปา เพราะน้ำที่มีสารปนเปื้อนหรือไม่สะอาดอาจจะทำให้วัสดุผสมในคอนกรีตผุกร่อน คอนกรีตแข็งตัวช้าหรือกำลังลดลง

4. น้ำยาผสมคอนกรีต (Concrete Admixture) จะทำหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เช่น เวลาการก่อตัว ความสามารถในการเทได้ กำลังอัด เป็นต้น

2.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก [9]

คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างแบ่งได้ 5 ประเภท ได้แก่ คอนกรีตล้วน (Plain concrete) คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce concrete) คอนกรีตอัดแรง (Pre-stress concrete) คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) คอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete)

คอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตเสริมแรง (reinforced concrete หรือ ferro concrete) คือ คอนกรีตที่มีการเพิ่มสมรรถภาพการรับน้ำหนัก โดยการใช้วัสดุอื่นเข้ามาช่วย เช่น เหล็ก ไฟเบอร์ หรือบางครั้งใช้วัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ไผ่ เพื่อเพิ่มความสามารถที่ขาดไปของคอนกรีต คือ ความเปราะ คอนกรีตเสริมแรงนิยมเรียกว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมแรง [10]

2.2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมแรง

เนื่องจากคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูง ขณะที่ความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ เมื่อถูกแรงดึงจะทำให้คอนกรีตเปราะแตกได้ง่าย ด้วยสาเหตุนี้ระบบคอนกรีตเสริมแรงจึงถูกนำมาใช้ โดยการนำวัสดุอื่นที่สามารถรับแรงดึงได้ เช่น เหล็ก มาใส่ไว้ภายในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรง โดยอาจกล่าวได้ว่า คอนกรีตรับแรงอัด และเหล็กรับแรงดึง ถึงแม้ว่าในช่วงแรกหลังจากที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัว คอนกรีตและเหล็กจะร่วมกันรับแรงดึงจนถึงสภาวะที่คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้

คุณสมบัติทางกายภาพ 3 อย่างที่ทำให้ คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยม มีดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตและเหล็กมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทำให้คอนกรีตและเหล็กขยายตัวหรือหดตัวได้พร้อมกัน
2. เมื่อคอนกรีตแข็งตัว คอนกรีตจะจับเหล็กเสริมได้แน่น ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทแรงภายในระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม เหล็กข้ออ้อยนิยมถูกนำมาใช้ในโครงสร้างหลัก เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่ามาก เมื่อเทียบกับเหล็กกลม
3. ค่าพีเอช (pH) ของสารเคมีที่เกิดจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะมีสารเคมีออกมาเคลือบเหล็กเส้นเป็นฟิล์มบางๆ ไว้ป้องกันไม่ให้เหล็กเส้นถูกกัดกร่อนหรือเป็นสนิม

2.3 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

คอนกรีตที่ดีควรมีกำลังอัดตามต้องการและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถรูปร่างและคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความเสียหายของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกหรือจากปัจจัยภายในคอนกรีตเอง โดยทั่วไปสาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

2.3.1 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical deterioration)

เช่น การหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic shrinkage)

2.3.2 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical deterioration)

เช่น คาร์บอนเนชั่น (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-aggregate reaction) การเป็นสนิมของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (Chloride attack)

2.3.3 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical deterioration)

เช่น การขัดสี (Abrasion) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

2.4 คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล [1]

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทะเลหรือในสภาพแวดล้อมทะเล เช่น บริเวณชายฝั่งทะเลหรือห่างจากทะเลไม่มากนัก มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเร็วกว่าที่ควรจะเป็นทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งาน (Service lifetime) ที่สั้นลง ทั้งนี้โดยมากเกิดเนื่องจากเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมแล้วดันให้เนื้อคอนกรีตที่หุ้มอยู่เกิดการแตกร้าวหลุดร่อนเสียหาย ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาจำนวนมาก โดยสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานสั้น เนื่องจากผู้ที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างยังขาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาพการทำลายที่รุนแรงของน้ำทะเล ทั้งนี้ในน้ำทะเลมีเกลือหลักๆ อยู่สองชนิดคือ เกลือคลอไรด์ (Cl^-) และเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งแต่เดิมมีความเข้าใจว่าคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องใช้น้ำซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Sulfate resisting portland cement) เป็นส่วนผสมจึงจะป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้ แต่ความจริงแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 เหมาะกับการใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องเผชิญเกลือซัลเฟตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จะเห็นได้จากในปูนจะมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$: C_3A) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดสาร Ettringite ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีตและสูญเสียความสามารถในการยึดประสานของคอนกรีต เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$: C-S-H) ให้เป็นสารแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$: M-S-H) ที่ไม่มีความสามารถในการยึดประสาน แต่เราสามารถใช้อุณหภูมิสูงเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียในชุมชน หรือในโครงสร้างบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานซึ่งมีเกลือซัลเฟต แต่ไม่มีเกลือคลอไรด์ละลายอยู่ หรืออาจใช้ในงานคอนกรีตล้นที่ต้องเผชิญทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ก็ได้ แต่ไม่มีเหล็กเสริมอยู่ภายในคอนกรีต เช่น พื้นคอนกรีตล้นที่ไม่มีเหล็กเสริมแต่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้น [1]

ในส่วนนี้จึงเกิดคำถามว่าควรจะใช้คอนกรีตแบบใดกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีทั้งเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟต คำตอบของคำถามนี้มีได้หลายแนวทาง ทั้งปรับปรุงที่รายละเอียดของแบบก่อสร้าง หรือปรับปรุงที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ หรืออาจใช้หลายๆแนวทางประกอบกัน เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานยาวนานตามที่ต้องการ แนวทางเหล่านี้ ได้แก่ การเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) ของคอนกรีตในแบบก่อสร้างให้มากขึ้น เพื่อให้ระยะทางที่เกลือคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปถึงผิวเหล็กมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้มากขึ้น หรือการลดอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน (Water to binder ratio) ในคอนกรีตให้ต่ำลงหลายๆ เพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ซึ่งจะทำให้ทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการเลือกใช้วัสดุประสานที่ต้านทานทั้งการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากเกลือซัลเฟตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ด้วย ซึ่งวัสดุประสานดังกล่าวคงไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ดังเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น แต่เราอาจใช้อุณหภูมิสูงเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Normal portland cement) ผสมกับเถ้าลอย (Fly ash) โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้ได้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยไปเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต และเพิ่มความสามารถยึดจับเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ให้เคลื่อนที่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เถ้าลอยในบ้านเราก็มีหลายชั้นคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) วิศวกรจึงต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสม สรุปได้ว่า การก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล ต้องพิจารณาป้องกันทั้งปัญหาการทำลายคอนกรีตโดยเกลือซัลเฟตและปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยเกลือคลอไรด์ควบคู่กันไป

2.5 เกลือคอลลอยด์

2.5.1 เกลือคอลลอยด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล [11]

คอลลอยด์สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ในน้ำทะเลจะมีปริมาณคอลลอยด์อยู่ในปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมน้ำจากที่ต่างๆ มีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมาก น้ำทะเลประกอบด้วย สารละลายของเกลือหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มีผลต่อความทนทานของคอนกรีต เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) ซึ่งความเข้มข้นของเกลือเหล่านี้จะมีค่าไม่เท่ากันในน้ำทะเลแต่ละบริเวณ เนื่องจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศ และภูมิอากาศ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วผลรวมของปริมาณเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 3.5 % โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปน้ำทะเลมีปริมาณเกลือคอลลอยด์มีมากในน้ำทะเลถึง 90% อยู่ในรูปสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) ประมาณ 3,200 ppm และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ประมาณ 500 ppm ส่วนเกลือซัลเฟตอยู่ในรูปของสารประกอบ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ประมาณ 2,200 ppm และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ประมาณ 1,100 ppm

2.5.2 เกลือคอลลอยด์ในคอนกรีต [4]

คอลลอยด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือปนเปื้อนมากับหิน ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่พบในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาคอลลอยด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น มาจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงการใช้งาน เช่น น้ำทะเล น้ำกร่อย หรือเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้แหล่งคอลลอยด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้นมาจากน้ำทะเล ซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคอลลอยด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นได้น้อยมาก

การที่คอลลอยด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต ความเข้มข้นของเกลือคอลลอยด์ เป็นต้น ปริมาณคอลลอยด์ที่อยู่ภายในคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคอลลอยด์ 2 ประเภท ได้แก่

1. คอลลอยด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คอลลอยด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้

- 1.1) การดักจับทางเคมี (Chemical binding) คอลลอยด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF) ในรูปของ 3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O (Friedel's salt) หรือ 3CaO·Fe₂O₃·CaCl₂·10H₂O (Calcium chloroferrite)

1.2) การดักจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$: C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$: C-A-H) เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราช หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กออกไปได้

อย่างไรก็ตาม มีการกำหนดปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ยอมรับในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) สูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ [12]

ประเภทโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด (ร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)			
	BS 8110	ACI 201	ACI 357	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.10	-	0.06	0.08
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะ เผชิญกับเกลือคลอไรด์	0.20	0.10	0.10	0.20
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้ง หรือไม่มีความชื้น	0.40	-	-	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	-	0.15	-	-

หมายเหตุ	BS 8110 :	British Standard for the design and construction of reinforced and pre-stressed concrete structures
	ACI 201 :	American Concrete Institute for guide for durable concrete
	ACI 357 :	American Concrete Institute for guide for design and construction of fixed concrete offshore structures
	ACI 222 :	American Concrete Institute for corrosion of metals concrete

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) สูงสุดในคอนกรีตจากข้อกำหนดต่างๆ [12]

ประเภทโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุด (ร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)	
	ACI 318	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.06	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญกับเกลือคลอไรด์	0.15	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือไม่มีความชื้น	1.00	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30	-

หมายเหตุ ACI 318 : American Concrete Institute for building code requirements for structural concrete and commentary
ACI 222 : American Concrete Institute for corrosion of metals concrete

2.6 การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต [13]

กลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ขึ้นกับสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตสัมผัส และโพรงภายในเนื้อคอนกรีต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.6.1 การแพร่ (Diffusion)

เป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยผ่านโพรงคาпилลารี (Capillary pore) ที่อิมตัวด้วยน้ำ ดังนั้นลักษณะของการแพร่จะเกิดกับส่วนของโครงสร้างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลและเป็นส่วนของคอนกรีตที่อิมตัวด้วยน้ำเป็นหลัก

2.6.2 การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี (Capillary suction)

การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี เกิดขึ้นโดยน้ำเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในส่วนของโพรงคาпилลารี (Capillary pore) ในคอนกรีต ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณใกล้ผิวคอนกรีต และเกิดขึ้นในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ทำให้เกลือคลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้เร็ว

2.6.3 การซึมผ่าน (Permeability)

การซึมผ่านของคลอไรด์ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำ (Hydrostatic pressure) ซึ่งส่งผลให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนใหญ่เกิดในบริเวณที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลภายใต้แรงดันน้ำ

2.6.4 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption)

จากการศึกษาโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้ น้ำทะเลตลอดเวลาของทวีชัย สำราญวานิช [6] พบว่า ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายโดยการแพร่ได้ เพราะการแพร่จะหยุดเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดูดไอออนจะเกิดสูงขึ้น เนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล [13]

คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต และตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นกระแสม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ทำให้คอนกรีตมีสภาพเปียกชื้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล คลอไรด์ต้องอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา โดยการแพร่จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต หรือการแทรกซึมเข้าไปโดยแรงดันของน้ำ สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น การแทรกซึมของคลอไรด์ย่อมเกิดขึ้นได้ดี แต่ใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยมาก การเกิดสนิมของเหล็กมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นได้น้อยมาก จึงไม่เป็นปัญหานัก

ในกรณีที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งพบมากตามโครงสร้างที่อยู่ชายฝั่ง ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น โดยคอนกรีตจะดูดซับน้ำ (Capillary suction) จนคอนกรีตอิ่มตัว และเมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือคราบเกลือทิ้งไว้ เมื่อคอนกรีตเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูง คลอไรด์ก็จะเกิดการแพร่เข้าสู่ภายในคอนกรีตที่ความเข้มข้นน้อยกว่า ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยิ่งแพร่เข้าไปในคอนกรีต และเข้าสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น

โดยทั่วไปคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ามาก ทำให้ภายในคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำตลอดเวลาจึงเกิดขึ้นช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้ง สภาพเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงผลกระทบเนื่องจากทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสม อุณหภูมิ ความชื้น และลักษณะการใช้งาน โดยทั่วไปการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก มักจะเร่งให้คลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้น คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเมื่อปริมาณคลอไรด์มีมากพอที่ผิวเหล็กเสริม ทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.8 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ [2,3]

โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์ไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้น้ำที่มีคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น เพราะเป็นสารเร่งการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไป จำเป็นอย่างยิ่งต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อรับแรงดึง เพราะคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่คอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เอง จึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก

ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนจากสารเคมีอื่น ตรงที่คลอไรด์สามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ซึ่งดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนทำให้ความสามารถในการรับ

แรงแยัดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและคอนกรีตต่ำลง และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กด้านการค้าไม่ผ่านการใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ (จากสภาวะแวดล้อมทะเล)
โดยเหล็กเสริมเกิดสนิมดันคอนกรีตให้แตก [14]

หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ จะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้น คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือมีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างนี้จะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบางๆ ของ $\text{Y-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามไอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม

ความเป็นด่างของคอนกรีตอาจลดลงได้จากหลายสาเหตุ การแทรกซึมของคลอไรด์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง และหากค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น เมื่อคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริมและทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and anode) เกิดการไหลของอิเล็กตรอน โดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่าน

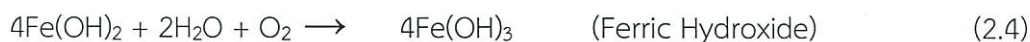
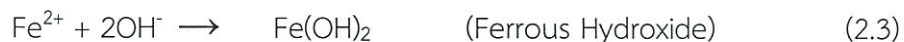
กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Cathode) โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Anode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจน จนเกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนต่อ (Oxidation reaction) เกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังรูปที่ 2.2

ปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4

Anodic Reaction:



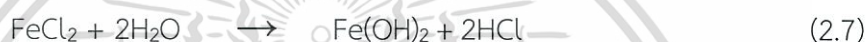
Cathodic Reaction:



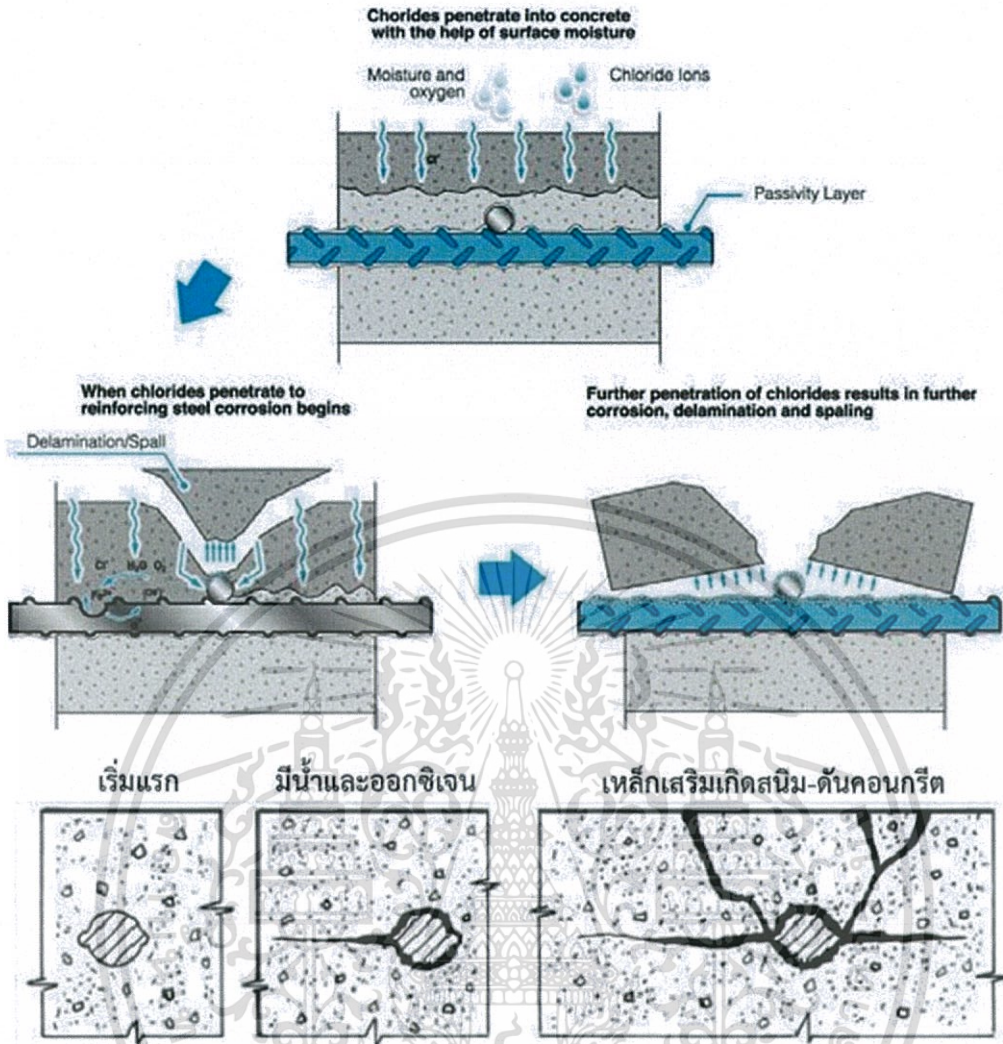
Redox reaction:



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะกลายเป็นสนิมเหล็ก ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) เช่นกัน ดังสมการ (2.6) และ (2.7)



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาตรมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 4-6 เท่าและดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย (แสดงดังรูปที่ 2.2) โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อยๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting crack) จนในที่สุดก็จะหลุดร่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรง คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง อย่างเช่น น้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting ส่งผลอันตรายต่อการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2.2 การแตกร้าวหลุดร่อนของคอนกรีต เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็ก [6]

2.9 วัสดุปอซโซลาน [15]

ASTM C 618 ได้นิยามว่า วัสดุปอซโซลานหมายถึงวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลาน เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีลักษณะเป็นฝุ่นและไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นเพียงพอภายใต้อุณหภูมิปกติ จะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้ดีคล้ายปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

การแบ่งวัสดุปอซโซลานเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากวัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้แล้ว ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นด้วย ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และสิ่งที่สำคัญคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ รวมทั้งต้องการต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามในการใช้วัสดุปอซโซลานนั้น ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะด้วย จึงได้มีการวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง

ตาม ASTM C 618 ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ
2. ชั้นคุณภาพ F เป็นถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) ถ่านล้อยในชั้นคุณภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน
3. ชั้นคุณภาพ C เป็นถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) ถ่านล้อยในชั้นคุณภาพนี้นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์อีกด้วยคือสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้เลย ซึ่งถ่านล้อยในชั้นคุณภาพนี้อาจมีปูนขาวปนอยู่มากกว่า 10 %

เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ เป็นไปตามตารางที่ 2.3 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ

คุณสมบัติ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอร์รอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ ไม่เกิน	4.0	5.0	5.0
ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละ ไม่เกิน	10.0	6.0	6.0

2.10 ปฏิกิริยาปอซโซลาน [15]

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ 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)

ปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H)

เอกสารที่ 2.8 และ 2.9 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง สำหรับการทดสอบหาค่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นหาได้จากอัตราส่วนร้อยละระหว่างกำลังของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบกับตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งค่าดังกล่าวเรียกว่า “ดัชนีกำลัง” โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม

ความสามารถของเถ้าแกลบในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ขึ้นอยู่กับความละเอียดและสมบัติของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่มีโครงสร้างไม่เป็นผลึก (Amorphous) อยู่ประมาณร้อยละ 70-80 โดยเถ้าแกลบที่ละเอียดมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าแกลบที่หยาบ เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำ และให้กำลังที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าแกลบ นอกจากนี้เถ้าแกลบที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ สามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน

2.11 เถ้าแกลบดำ [16]

แกลบ (Rice Husk) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือกซึ่งทำให้เกิดเศษของเปลือกข้าวออกมา มีลักษณะสีเหลืองทอง สีเหลืองอ่อน สีน้ำตาลแดงขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ข้าว แกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกจะมีประมาณร้อยละ 22-25 โดยน้ำหนักจากเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้การสีข้าวเปลือกแต่ละครั้งจะเกิดแกลบจำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันมีการนำแกลบมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายด้านด้วยกัน การเผาไหม้ของแกลบจะได้ซีเถ้าแกลบที่มีสีต่างกัน ขึ้นกับกระบวนการเผา โดยแบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. เถ้าแกลบเทา เป็นซีเถ้าแกลบที่มีลักษณะสีเทา เนื้อแข็ง และคงรูปมากกว่าแกลบชนิดอื่น แต่จะแตกละเอียดหากได้รับแรงกดบีบ เป็นแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ขณะเผาไหม้จะไม่เกิดเปลวไฟ

2. เถ้าแกลบดำ เป็นซีเถ้าแกลบที่มีลักษณะสีดำ เนื้อซีเถ้ามีการคงรูปของแกลบบางส่วน เนื้อแกลบแข็งและเปราะง่ายกว่าแกลบสีเทา แต่จะแตกละเอียดหากได้รับแรงกดบีบ เป็นแกลบที่ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,200 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยไม่เกิดเปลวไฟขณะเผาไหม้

3. เถ้าแกลบขาว เป็นซีเถ้าแกลบที่มีลักษณะสีขาว เนื้อซีเถ้าแกลบแตกหักเป็นผงขนาดเล็ก เป็นแกลบที่ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่มีเกินพอทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยส่วนมากมักจะเกิดเปลวไฟขณะเผาไหม้หากเผาในที่โล่งที่มีอากาศกระจายสู่พื้นผิวขณะเผาไหม้ที่เพียงพอ นอกจากการเผาที่อุณหภูมิสูงแล้วยังสามารถเผาได้จากแกลบดำที่อุณหภูมิต่ำอย่างต่อเนื่องได้อีกวิธี แกลบชนิดนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรมเนื่องจากองค์ประกอบส่วนมากจะเป็นซิลิกา

2.11.1 คุณสมบัติของเถ้าแกลบดำ [17,18]

ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมี SiO_2 มากกว่าร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเถ้าแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุกำมะถัน น้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ โดยองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวสามารถวิเคราะห์จาก X-Ray fluorescence analysis (XRF)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ (Black rice hush ash : BRHA) [17]

Materials	Chemical compositions (%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	LOI
Portland cement	20.84	5.22	3.20	66.28	1.24	0.22	0.10	2.41	0.96
Ground BRHA	78.12	0.31	0.23	0.08	0.34	0.82	0.17	0.09	8.31

หมายเหตุ : Ground BRHA คือ เถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดด้วย jar mill

เถ้าแกลบดำ ส่วนมากได้จากการเผาเถ้าเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำในโรงสี อุณหภูมิในการเผาเถ้าเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการบดเถ้า ช่วงเวลาการเผาและขนาดของเตาเผา อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 800-1200 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของเถ้าแกลบที่ได้จึงมีความแตกต่างกันมาก แต่การที่จะควบคุมอุณหภูมิในการเผาให้คงที่นั้น จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายการผลิตขึ้นไปด้วย

จากงานวิจัยของ B. Chatveera และ P. Lertwattanaruk [17] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบนั้น แสดงในตารางที่ 2.5 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบจะขึ้นอยู่กับวิธีการเผา เถ้าแกลบดำซึ่งเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะมีคาร์บอนอยู่มาก และมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ซึ่งมีค่าระหว่าง 1.9-2.3 และยิ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาอีกด้วย แกลบที่เผาแล้วมีขนาดค่อนข้างใหญ่เกินไปสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุอุปโภคบริโภค จึงต้องบดเถ้าแกลบให้ละเอียดและมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของผงปูนซีเมนต์ ความละเอียดของเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับเวลาและวิธีการบด โดยความละเอียดที่วัดโดย Surface area analyzer โดยใช้ The Brunauer-Emmett-Teller (BET) จะอยู่ระหว่าง 20-150 ตร.ม./กรัม โดยการวัดความละเอียด นิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อน (Sieve) ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยเถ้าแกลบค้ำบนตะแกรงมาตรฐานไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ (BRHA) [17]

Physical properties	Portland cement	Ground BRHA
Moisture content (%)	0.19	2.35
Blaine specific surface area (cm ² /g)	3,248	6,200
BET specific surface area (m ² /g)	-	110
Specific gravity	3.11	2.02
% Retained on sieve No.325	9.35	14.77

จากงานวิจัยที่ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำ พบว่า การใช้ X-ray diffraction analysis (XRD) พบว่า เถ้าแกลบนั้นอยู่รูปของผลึก (Crystalline phase) เป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่พบว่า เถ้าแกลบที่อยู่ในรูปของ Amorphous จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สูง แต่ต้องถูกควบคุมอุณหภูมิการเผาอยู่ระหว่าง 500-700 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยส่วนมากเถ้าแกลบดำที่ได้มาจากการเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำภายในโรงสีซึ่งไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ แต่สามารถเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ โดยการบด (Grinding process) และการร่อน (Sieving) ให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเถ้าแกลบลดลง เพื่อช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ [17]

2.12 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength test) [21]

กำลังอัดของคอนกรีต เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต ซึ่งจะแสดงความสามารถในการรับแรงกดของคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ อายุคอนกรีต การบ่มและอื่นๆ โดยสามารถทดสอบได้ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด

ถึงแม้ในทางปฏิบัติคอนกรีตจะได้รับทั้งแรงกด แรงดึงและแรงเฉือนใน 2 ทิศทางหรือมากกว่านั้น แต่การทดสอบที่สะดวกที่สุดที่กระทำในห้องทดสอบคือ การทดสอบกำลังอัดด้วยวิธี Uniaxial Compression Test ซึ่งกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายให้เป็นดัชนีทั่วไปในการวัดกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการทดสอบโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรงคือ รูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก การทดสอบกำลังอัดจะกดตัวอย่างจนแตก และบันทึกค่าแรงที่ใช้ในการกด และคำนวณค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้จากสมการต่อไปนี้

$$fc' = P_u/A$$

โดย fc' คือ ความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ (กก./ตร.ซม.,ksc)

P_u คือ แรงกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบรับได้ (กก.)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ (ตร.ซม)

โดยค่ากำลังอัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ ค่ากำลังอัดแต่ละครั้งต่ำกว่ากำลังอัดที่ต้องการได้ไม่เกิน 30 กก./ตร.ซม. (ksc)

2.13 วิธีการวัดการแทรกซึมของคลอไรด์

วิธีการวัดคลอไรด์จะใช้การไทเทรตเป็นการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะเวลาความลึกต่างๆ โดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียดและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ ในการแทรกซึมของคลอไรด์มี 2 ลักษณะคือ

1. วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152 เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) [19]

2. วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 เพื่อหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) [20]

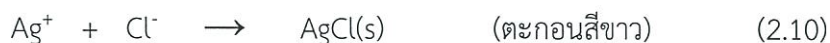
สามารถไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือเครื่อง Potentiometer titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

2.14 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการไทเทรตตามวิธีของมอร์

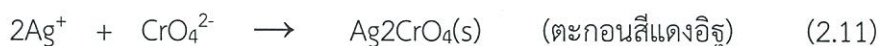
(Mor' method)[22]

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงอิฐของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จะเกิดตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ ($AgCl$) ก่อน ดังสมการ 2.10 เมื่อซิลเวอร์คลอไรด์ตกตะกอนจนถึงจุดสมมูลแล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงอิฐของ Ag_2CrO_4 ซึ่งถือว่าถึงจุดยุติ ดังสมการ 2.11

ปฏิกิริยาจากการไทเทรต :



ปฏิกิริยาที่จุดยุติ :



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B. Chatveera and P.Lertwattanaruk [17] นำเถ้าแกลบดำจากโรงสีภายในประเทศไทย ที่ถูกบดแล้วมาใช้แทนซีเมนต์ในบางส่วน และทดสอบความคงทนภายใต้สภาวะกรด โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ความแตกต่างของการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบที่ 20% และ 40% ที่อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์ 0.6, 0.7 และ 0.8 จากการทดลองพบว่า ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ คุณสมบัติเชิงกลลดลง แต่เถ้าแกลบดำสามารถช่วยต้านทานการกัดกร่อนจากกรด โดยขึ้นอยู่กับ ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต่อ CaO แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบดำสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุ ปอซโซลานและช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีต

J.Hadipramana และคณะ [18] ได้ทำการตรวจสอบเถ้าแกลบที่ถูกเผา ในอุณหภูมิที่ไม่ถูก ควบคุมจากโรงสีข้าวในประเทศมาเลเซีย โดยใช้เทคนิค X-Ray fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), Particle Size Analysis and Specific Area Surface, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron microscope (SEM) เพื่อทดสอบ คุณสมบัติของเถ้าแกลบ ผลลัพธ์แสดงว่า เถ้าแกลบประกอบด้วยซิลิกาประมาณ 89.90% และเถ้า แกลบมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) เด่นกว่าแบบเป็นผลึก (Crystalline) พิสูจน์ได้ว่า เถ้า แกลบสามารถเป็นวัสดุปอซโซลานได้เป็นอย่างดี เนื่องด้วยปริมาณของ ซิลิกาและโครงสร้างความเป็นรูพรุน นอกจากนี้การเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการนำเถ้าแกลบไปบด

K. Ganesan และคณะ [23] ได้ทำการทดลองโดยใช้เถ้าแกลบดำที่ได้จากการเผาเป็น เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ โดยนำไปแทนบางส่วนของซีเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทาง กายภาพ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ มีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ปริมาณ ไอออนคลอไรด์ที่ผ่าน โดยใช้ Rapid chloride permeability test (RCPT) และอัตราการซึมผ่านใน เเทอมของสัมประสิทธิ์การแพร่ เถ้าแกลบประกอบด้วยซิลิกา 87% และอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) โดยพบว่า การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 30% ไม่มีผลต่อความแข็งแรงและอัตรา การซึมผ่านของคอนกรีต

พิทยา สุขจินดาและคณะ [24] ได้ทำการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่ เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 15 และ 20 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอายุเวลาที่บ่มเพิ่มขึ้น แต่การ แทนที่ด้วยเถ้าแกลบมากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง การแทนที่ที่ร้อยละ 5 ทำให้ กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนสาร
2. เครื่องแก้วต่างๆ
3. โถดูดความชื้น
4. กระดาษกรอง
5. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต
6. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1
7. ไม้แกลบดำ
8. ทราย
9. หิน
10. น้ำประปา
11. ครกหิน
12. สว่านเจาะคอนกรีต
13. ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 20
14. ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 325
15. เครื่องชั่งน้ำหนัก
16. เครื่อง Ball mill
17. เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)
18. เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)
19. เครื่อง Surface area analyzer (BET)
20. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
21. แผ่นสแตนเลส

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
3. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3)
4. สารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4)
5. สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)
6. สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

3.2.1 การเตรียมเถ้าแกลบดำ

1. นำเถ้าแกลบไปอบเพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำเถ้าแกลบไปบดด้วย Ball mill
3. นำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 โดยค้ำตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34

(ASTM C 136)

4. นำตัวอย่างเถ้าแกลบดำไปวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF) และ Surface area and porosity analyzer (BET)

3.2.2 การเตรียมส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังอัด 175 กก./ cm^2 โดยออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เป็นคอนกรีตควบคุม และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยกำหนดค่ายุบตัวอยู่ในช่วง 10 ± 2.5 ซม. วิธีการคำนวณปริมาณส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐาน American Concrete Institute (ACI) อัตราส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสม	วัสดุ (กิโลกรัม)				
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เถ้าแกลบ	ทราย	หิน	น้ำ
CPC	292	0	971	880	175
CB-10	292	27	971	880	175
CB-20	292	55	971	880	175
CB-30	292	82	971	880	175
CB-40	292	110	971	880	175
CB-50	292	138	971	880	175

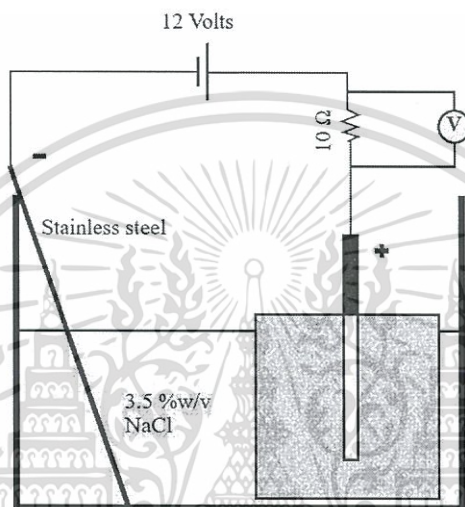
หมายเหตุ CPC : คอนกรีตควบคุม ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัสดุประสาน
CB-10, CB-20, CB-30, CB-40 และ CB-50: คอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำประปา 7 วัน แล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 3.5 %w/v ในสภาวะเปียกสลับแห้งอย่างละ 7 วัน จนครบ 28 วัน

3.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

หลังจากบ่มน้ำที่ 7 วัน ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกนำไปวัดความต้านทานแรงอัด (Compressive strength) ที่อายุ 14 และ 28 วัน ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (แบบดิจิตอล) และนำไปคำนวณกำลังอัดของคอนกรีต (f_c')

3.4 การเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี Accelerated corrosion test by impressed voltage (ACTIV) [25]



รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ในการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV

นำตัวอย่างคอนกรีตไปทำการเร่งการกัดกร่อนดังรูปที่ 3.1 โดยแช่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 %w/v ขั้วบวก (Anode) ของแหล่งจ่ายไฟต่ออยู่กับเหล็กเสริมที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีตและ ขั้วลบ (Cathode) ต่อกับแผ่นสแตนเลส และจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ และบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าวันละครั้งจนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตเกิดรอยแตก

3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มจนอายุ 28 วัน จะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %w/v ในวัฏจักรเปียกสลับแห้ง คือแช่เป็นเวลา 2 วันและนำออกมาตากให้แห้งอีก 2 วัน สลับกันไปจนครบ 4 เดือนแล้วนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ภายในคอนกรีต

3.5.1. การเก็บตัวอย่างคอนกรีต

1. นำตัวอย่างคอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ เจาะผิวคอนกรีตด้วยสว่าน ให้ได้เนื้อคอนกรีต 30 กรัม (เก็บที่ความลึก 2 และ 4 ซม.)
2. บดด้วยครกหิน และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 ($825 \mu\text{m}$)
3. เก็บใส่ภาชนะป้องกันความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2. การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน

ASTM C 1218

1. นำผงคอนกรีตของแต่ละค่าความลึก 10 กรัม ผสมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
2. นำไปต้มจนเดือด และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. กรองผ่านกระดาษกรอง 2 แผ่น
3. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่
4. เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 1 มิลลิลิตร
5. นำไปไทเทรตกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีแดงอิฐ
6. บันทึกปริมาณ $AgNO_3$ ที่ใช้และคำนวณปริมาณคลอไรด์อิสระ

3.5.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน

ASTM C 1152

1. นำผงคอนกรีตของแต่ละค่าความลึก 10 กรัม ผสมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริก (HNO_3) 25 มิลลิลิตร (ปิดด้วยกระจกนาฬิกา) แล้วคนให้เข้ากัน 1-2 นาที
3. ต้มประมาณ 3 นาที ทิ้งให้เย็น
4. กรองผ่านกระดาษกรอง 2 แผ่น
5. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า
6. ปิเปตสารละลายที่เจือจางมา 10 mL ใส่ขวดรูปชมพู่
7. เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 1 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 10 มิลลิลิตร
8. นำไปไทเทรตกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีแดงอิฐ
9. บันทึกปริมาณ $AgNO_3$ ที่ใช้และคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

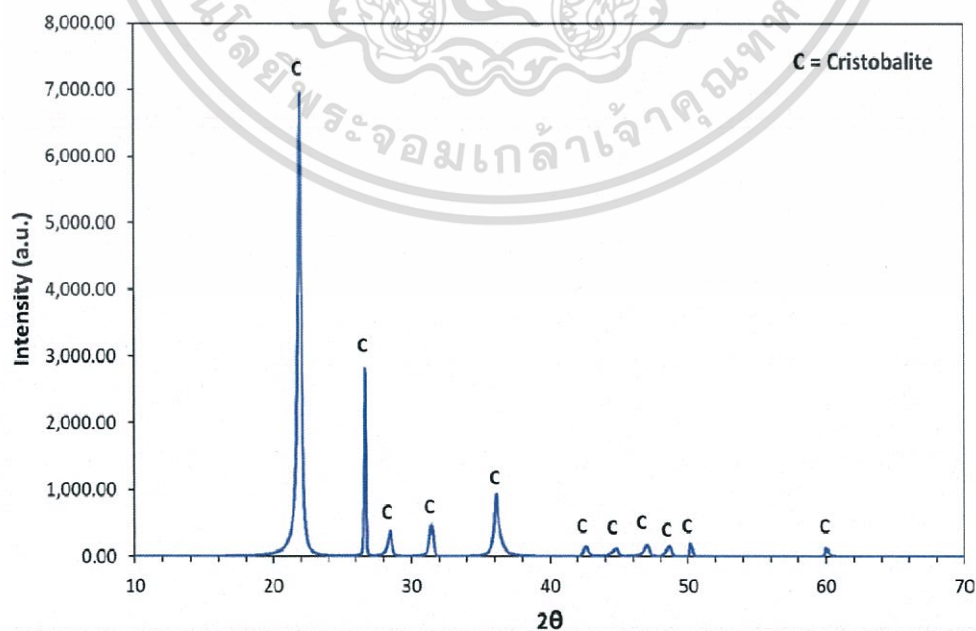
4.1 คุณสมบัติเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตัวอย่าง

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำ

เถ้าแกลบดำมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีดําละเอียดดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำไปตัวอย่างไปตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer พบว่าเกิดพีคหลักที่ตำแหน่ง 2 เซต่า (2θ) เท่ากับ 22.0 26.7 28.5 31.4 36.1 42.6 44.8 47.0 48.7 50.2 และ 60 องศา ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก (Cristobalite) ดังรูปที่ 4.2 และจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบดำด้วยเทคนิค BET ได้ค่าเท่ากับ $45.95 \text{ m}^2/\text{g}$



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบดำ



รูปที่ 4.2 ผลตรวจวัดโครงสร้างเถ้าแกลบดำด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการแยกขนาด เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่าเถ้าแกลบดำ มีปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 10 ซึ่งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้คือ ไม่เกินร้อยละ 34 [17] จึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย X-Ray Diffractometer พบว่า เถ้าแกลบดำมีโครงสร้างเป็นผลึก (Cristobalite) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่ดีเท่ากับโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิการเผา การบด (Grinding process) และการคัดขนาด (Sieving) สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ โดยเถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดมากจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น [17]

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าแกลบดำ

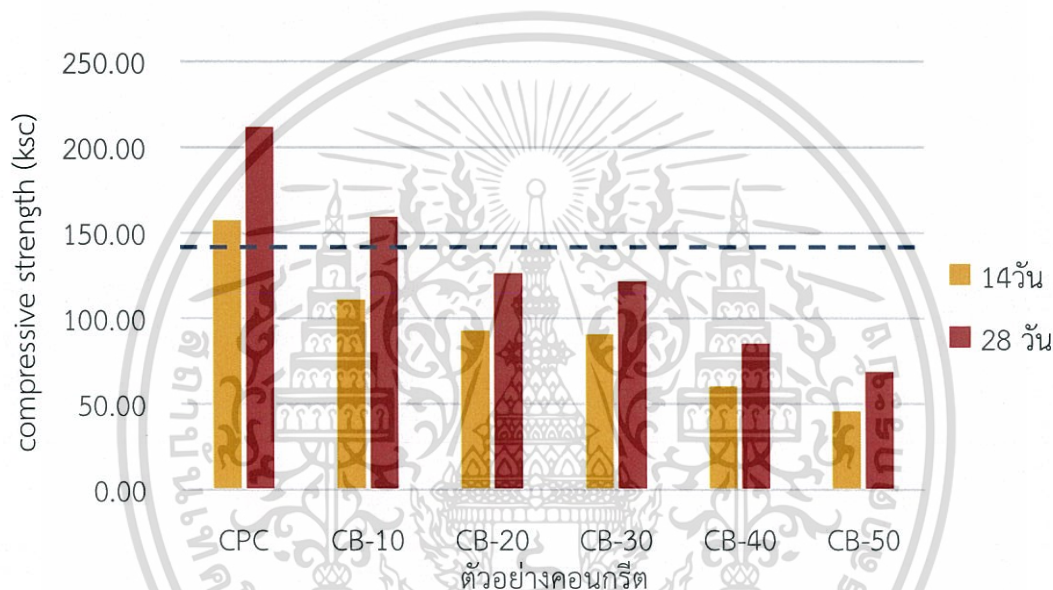
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectroscopy แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของเถ้าแกลบดำ ได้แก่ ซิลิกา ไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 96.721 จัดเป็นเถ้าชนิด N (Class N) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 เป็นปอซโซลานธรรมชาติที่สามารถใช้ทดแทนซีเมนต์ได้ [17]

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Fluorescence

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าแกลบดำ (ร้อยละ)
Silicon dioxide, SiO_2	95.0
Aluminum oxide, Al_2O_3	0.827
Iron oxide, Fe_2O_3	0.894
Calcium oxide, CaO	0.857
Magnesium oxide, MgO	0.557
Potassium Oxide, K_2O	1.160
อื่นๆ	0.705

4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4.3 แสดงกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบดำผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าแกลบดำจะลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (CPC) ที่อายุ 14 และ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบดำผสม แต่ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีกำลังอัดเท่ากับ 156.27 กก./ซม.^2 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำลังอัดที่ทดสอบได้ต้องมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดที่ต้องการได้ไม่เกิน 30 กก./ซม.^2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ กำลังจะอัดจะต้องไม่ต่ำกว่า 145 กก./ซม.^2 ซึ่งแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุคอนกรีต

จากกราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอายุของคอนกรีตพบว่า ค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในปริมาณคงที่ มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบดำ เนื่องจากเถ้าแกลบมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูง อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเถ้าแกลบเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ อาจมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) สูง จะส่งผลให้เป็นธาตุถ่าน เกิดการดูดน้ำสูงเกินความเหมาะสม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ อาจเกิดไม่สมบูรณ์ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาบอซโซลานไปด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นดัชนีกำลังที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดังกล่าว เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เถ้าแกลบดำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

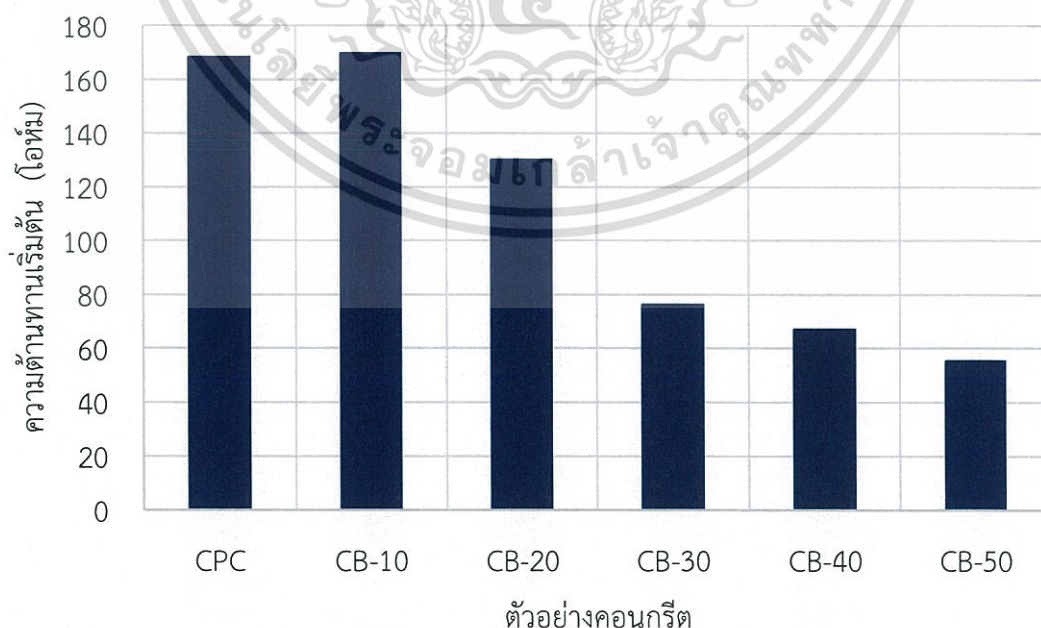
การเปรียบเทียบกำลังคอนกรีตในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนผสมต่างกันในช่วงอายุเดียวกัน จะเห็นได้ว่า อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่ารับกำลังอัดที่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 28 วัน ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นกับระยะเวลาในการบ่มด้วย ดังนั้นตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 20 ขึ้นไป อาจจะต้องใช้เวลาบ่มคอนกรีตนานขึ้น เพื่อให้กำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐานและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.3 ผลจากการเร่งการกักร้อนด้วยวิธี Impressed voltage (ACTIV)

จากการเร่งการกักร้อนของตัวอย่างคอนกรีตด้วยวิธี Impressed voltage โดยแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %w/v และจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ โดยบันทึกค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าวันละครั้ง จนกระทั่งเกิดรอยแตกของตัวอย่างคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4.2

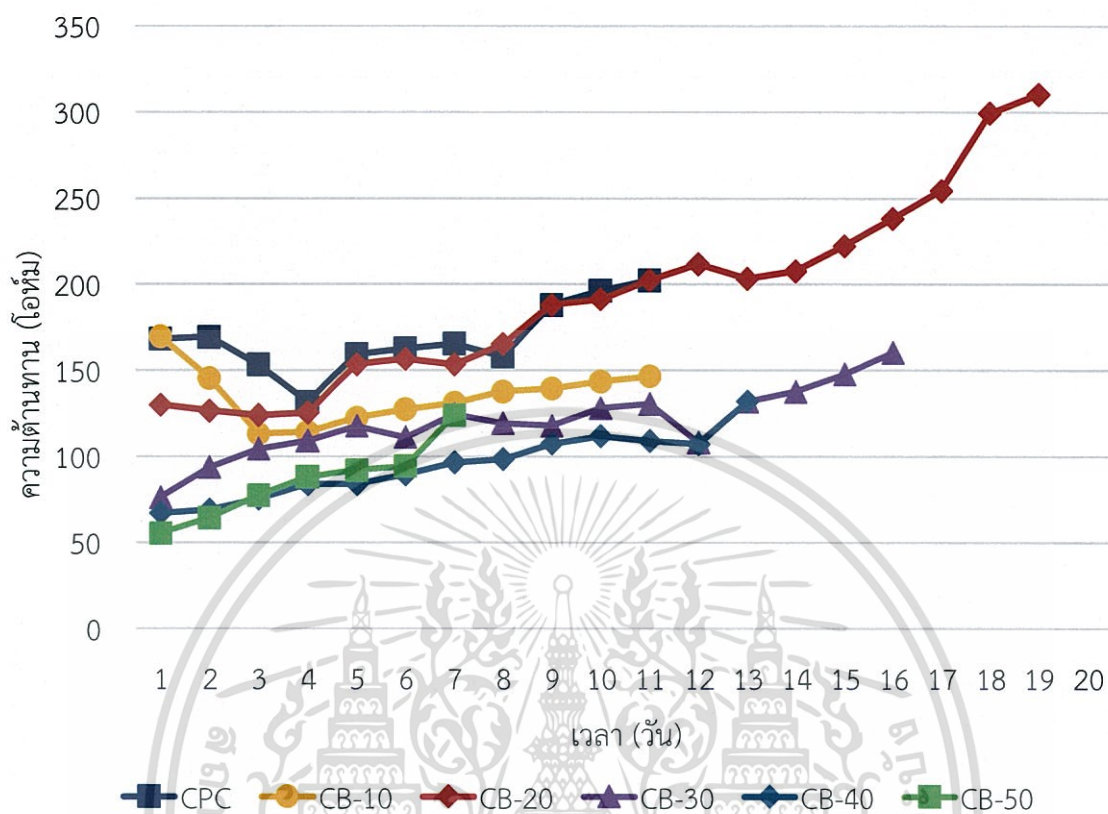
ตารางที่ 4.2 ผลจากการเร่งการกักร้อนด้วยวิธี Impressed voltage (ACTIV)

ชนิดของคอนกรีต	ความต้านทานเริ่มต้น (โอห์ม)	เวลาที่เกิดรอยแตกครั้งแรก (วัน)	เหล็กหัก
CPC	168.30	2	✗
CB-10	169.73	4	✗
CB-20	130.01	ไม่เกิดรอยแตกหลังผ่านไป 19 วัน	✗
CB-30	76.14	ไม่เกิดรอยแตกหลังผ่านไป 17 วัน	✓
CB-40	67.08	ไม่เกิดรอยแตกหลังผ่านไป 14 วัน	✓
CB-50	55.30	ไม่เกิดรอยแตกหลังผ่านไป 7 วัน	✓



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเริ่มต้นกับตัวอย่างคอนกรีต

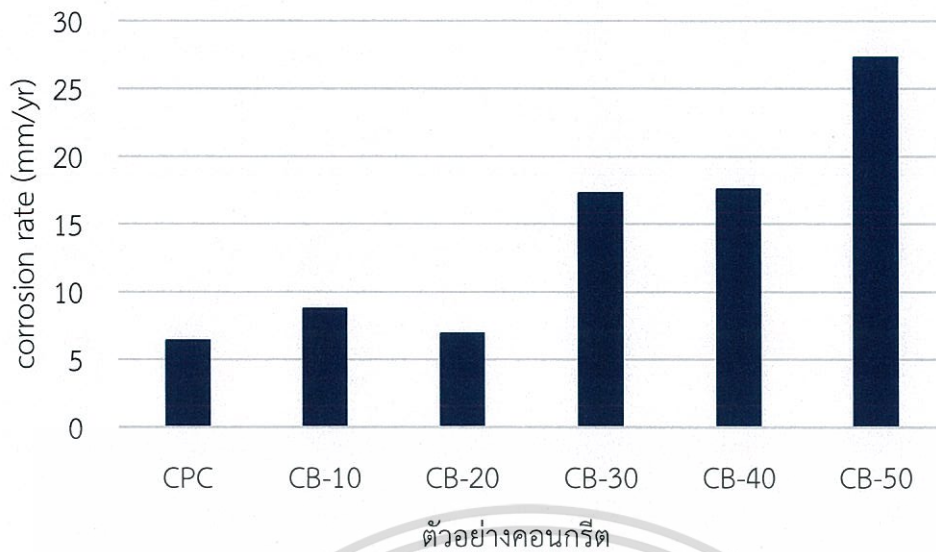
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะเวลาของตัวอย่างคอนกรีต

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานเริ่มต้นกับตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ พบว่า ตัวอย่างคอนกรีต CB-10 มีค่าความต้านทาน 169.73 โอห์ม ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านทานของคอนกรีตควบคุม (CPC) ที่เท่ากับ 168.30 โอห์ม การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเริ่มต้นเนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยการลดขนาดช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยากขึ้น แต่ค่าความต้านทานเริ่มต้นมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำสูงขึ้น โดยอาจเกิดการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซิลระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ที่ไม่สมบูรณ์ จึงเกิดช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้ความต้านทานกระแสไฟฟ้าลดลง [26]

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานกับระยะเวลาในการเร่งการกัดกร่อน พบว่า ค่าความต้านทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กหรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) โดยขั้ว Anode หรือเหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และขั้ว Cathode อิเล็กตรอนจะรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) โดยมีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Ferrous Hydroxide: $Fe(OH)_2$) และทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนต่อได้ผลิตภัณฑ์คือ สนิมเหล็ก (Ferric Hydroxide: $4Fe(OH)_3$) ซึ่งเกาะอยู่ที่ผิวเหล็กจึงทำให้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในตัวอย่างคอนกรีต

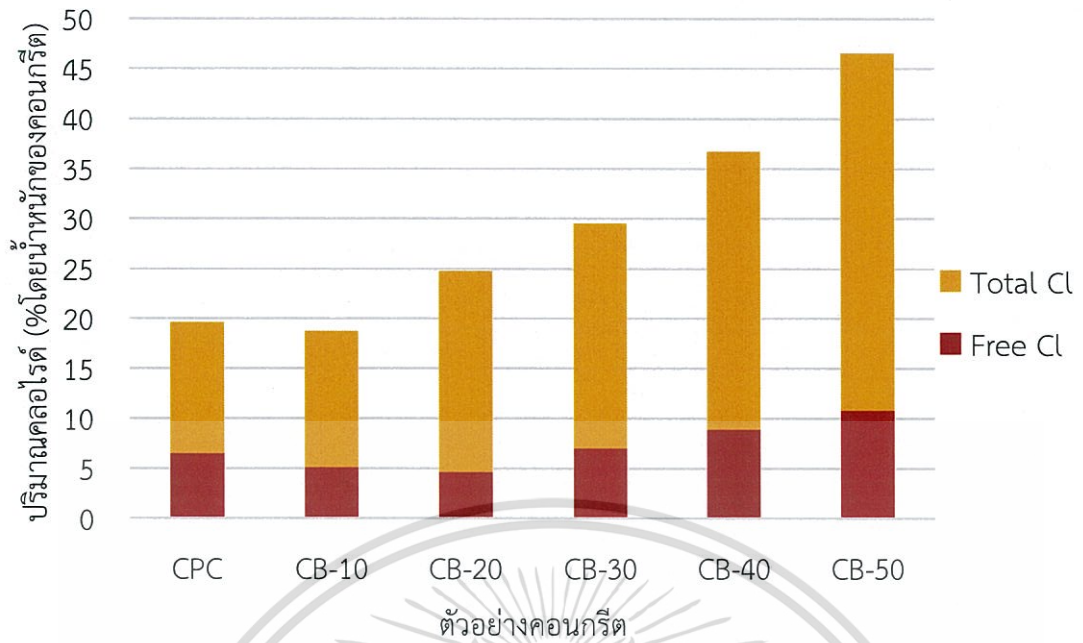
จากรูปที่ 4.6 แสดงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กในตัวอย่างคอนกรีต พบว่า เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบดำในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยเกิดจากความแตกต่างของคอนกรีตที่ลดลง เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ ซึ่งได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นด่าง ซึ่งความแตกต่างคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยเกิดขึ้นฟิล์มบางๆ ของ $\text{Y-Fe}_2\text{O}_3$ ป้องกันน้ำและออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็ก โดยการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความแตกต่างของคอนกรีตมีค่าลดลง [2,27]

4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

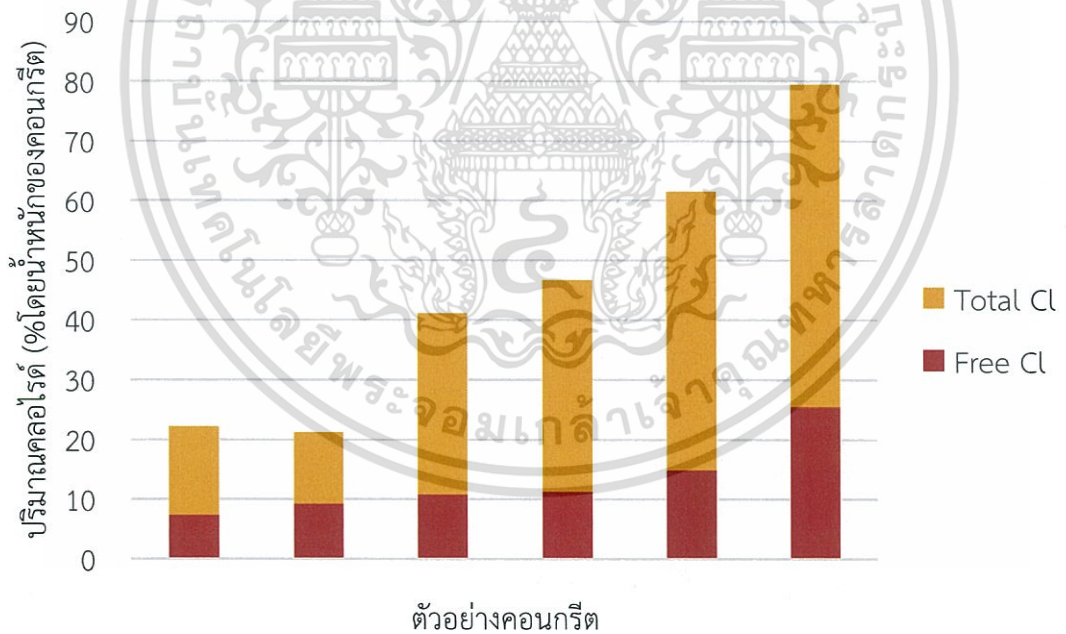
4.4.1 ผลของถ้าเกลือดำต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าเกลือดำในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์มาวิเคราะห์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่า การแทนที่ด้วยถ้าเกลือดำด้วยอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นไปด้วย

โดยปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) โดยบางส่วนจะถูกดักจับทางเคมีด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ของปูนซีเมนต์และการดักจับทางกายภาพ โดยถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) เป็นต้น หรือพื้นผิวของถ้าเกลือดำ รวมถึงทรายหรือหินที่เป็นส่วนผสมด้วย [4] และประเภทที่ 2 คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คลอไรด์ที่ไม่ได้มีอันตรกิริยา (Interaction) กับซีเมนต์หรือถ้าเกลือดำ จะอยู่ในรูปของคลอไรด์อิสระที่ละลายอยู่ในน้ำในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งคลอไรด์อิสระนี้สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นตัวการสำคัญในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพบว่าในคอนกรีตควบคุม (CPC) มีคลอไรด์อิสระอยู่ในคอนกรีตคิดเป็นเกือบทั้งหมดของปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต และพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ด้วยถ้าเกลือดำที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าแนวโน้มลดลง โดยจะอยู่ในรูปของคลอไรด์ที่ถูกดักจับทางเคมีด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันและการดักจับทางกายภาพด้วยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและถ้าเกลือดำ



รูปที่ 4.7 ผลของเถ้าแกลบต่อการแทรกซึมของคลอรีนที่ความลึก 2 เซนติเมตร (จากผิวคอนกรีต)



รูปที่ 4.8 ผลของเถ้าแกลบต่อการแทรกซึมของคลอรีนที่ความลึก 4 เซนติเมตร (จากผิวคอนกรีต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการนำเถ้าแกลบดำซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวเปลือก โดยผ่านการบดและคัดขนาดก่อนนำไปใช้งาน โดยเถ้าแกลบดำมีโครงสร้างเป็นผลึก (Cristobalite) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $45.95 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีผลรวมของออกไซด์หลัก (SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 96.721 จัดเป็นเถ้าธรรมชาติ ชนิด N ซึ่งสามารถใช้ทดแทนซีเมนต์ได้ โดยตัวอย่างคอนกรีตถูกหล่อขึ้นด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในอัตราส่วน ร้อยละ 10, 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต พบว่า อัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากความเป็นธาตุถ่วงของเถ้าแกลบดำ เกิดการดูดน้ำเกินความเหมาะสม ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์จึงน้อยลงและส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย โดย CB-10 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และยังเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ขณะเดียวกันการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำในปริมาณที่สูงขึ้น พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปมากกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งเกิดจากการดักจับทางเคมีของปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมถึงการดูดซับบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันหรือบนพื้นผิวของเถ้าแกลบดำเอง จากการทดสอบการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี Impressed voltage (ACTIV) พบว่า ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบที่สูงขึ้นสามารถช่วยยืดระยะเวลาในการเกิดรอยแตกของคอนกรีตได้ แต่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของคอนกรีตที่ลดลง จากผลการทดลอง สามารถคาดการณ์ได้ว่า ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำที่เหมาะสมทั้งด้านการรับกำลังอัดของคอนกรีตและคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ อยู่ในช่วง 0 – 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการกัดกร่อน เช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เป็นต้น
2. ศึกษาสมบัติการดูดซับ (Adsorption) ของเถ้าแกลบดำ เพื่อพัฒนาใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรืองานวิจัยอื่นๆต่อไป
3. ศึกษาวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ เพื่อพัฒนาคุณภาพคอนกรีตและคุณสมบัติด้านการต้านทานกัดกร่อนของเหล็ก ให้สามารถนำไปใช้ได้จริงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. 2008. “คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine concrete)”, วารสารคอนกรีต. ฉบับที่ 4, ประจำเดือนสิงหาคม
- [2] นันทรัตน์ โยคะวัฒน์ และอภิเดช รัตนดิลก ณ ภูเก็ต. 2556. “การกักเก็บคลอไรด์และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 15 ปี”. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [3] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. “ความคงทนของคอนกรีต”, พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท จุดทอง จำกัด. กรุงเทพมหานคร: หน้า 24-73
- [4] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสันต์ คงทรัพย์. 2545. “ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25. ฉบับที่ 4. ประจำเดือนตุลาคม-ธันวาคม หน้า 373-389.
- [5] บุญรักษ์ กาญจนาวรรณิชย์. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, “เถ้าแกลบของเหลือสารพัดประโยชน์”,
Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/865->
- [6] ทวีชัย สำราญวานิช. 2552. “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [7] ปุณณมาน นรรัตน์ และอรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์. 2555. “คุณสมบัติของเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต”, ในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [8] มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต. 2554. “พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 2. ประจำเดือนกันยายน-ธันวาคม
- [9] สภาวิศวกร. “งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก”
Available : <http://www.coe.or.th/coe-2/Download/Articles/CE/concrete.pdf>
- [10] Wikipedia. “คอนกรีตเสริมแรง”
Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/คอนกรีตเสริมแรง>
- [11] ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ, ผศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจและนายวิศิษ แซ่ลิ่ม. 2556. “ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปอซโซลานิคคอนกรีต”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- [12] ทวีชัย สำราญวานิช. 2555. “ความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและความคงทนของวัสดุซ่อมแซม”. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

[13] วิเชียร ชาลี. 2557. “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจาก ผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test”. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[14] ศาสตราจารย์ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “สร้างบ้านให้อยู่ได้นาน 500 ปีโดยนายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย”. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

[15] อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. “ปอซโซลาน (Pozzolan)”

Available : www.dss.go.th/images/st-article/pep_11_2545_pozzolan.pdf

[16] พีชเกษตร “แกลบ/แกลบดำ/ซีเถ้าแกลบ วิธีทำแกลบดำ และประโยชน์แกลบดำ”

Available : <http://puechkaset.com/แกลบ/>

[17] B. Chatveera and P.Lertwattanakul “Durability of conventional concretes containing black rice husk ash” Journal of Environmental Management, 2011, Vol.92, pp. 59-66

[18] J Hadipramana, F V Riza, J A Rahman, L Y Loon, S H Adnan, and A M A Zaidi “Pozzolanic characterization of waste rice husk ash (RHA) from Muar, Malaysia” , IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 160 (2016)

[19] ASTM International “Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete ASTM C 1152”

[20] ASTM International “Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete ASTM C 1218”

[21] CPAC Academy. “บทที่ 16 การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต (Compressive strength and tensile strength of concrete)”

[22] Dr.Deniz Korkmaz. “Precipitation Titration : Determination of Chloride by the Mohr Method by Dr. Deniz Korkmaz”

[23] K. Ganesan, K. Rajagopal and K. Thangavel “Rice hush ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete” Journal of Construction and Building Materials, 2008, Vol. 22, pp. 1675-1683

[24] พิทยา สุขจินดา, กฤตธี น้ำกลั่น, ธนาคาร พรหมมณี และณัทพงษ์ ชัยวิจิต. “ปริมาณเถ้าแกลบดำที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] Nordtest method NT Build 356 “Concrete, repairing materials and protective coating: embedded steel method, chloride permeability”

[26] Veera Horasakulthai and Kittichat Paopongpaiboon. “Strength, chloride permeability and corrosion of coarse fly ash concrete with bagasse-rice husk-wood ash additive”, American journal of applied sciences, 2013, 10(3): 239-246

[27] Tae-Hyun Ha, Srinivasan Muralidharan and Dae-Kyeong Kim. “Accelerated short-term techniques to evaluate the corrosion performance of steel in fly ash blended concrete”, Building and environment, 2007, 42: 78-85

[28] M.F. Serra, M.S. Conconi and N.M. Rendtorff. “Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \bullet \text{SiO}_2$) ceramics obtained by reaction sintering of rice husk ash and alumina, phase evolution, sintering and microstructure” Journal of Asian ceramic societies, 2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

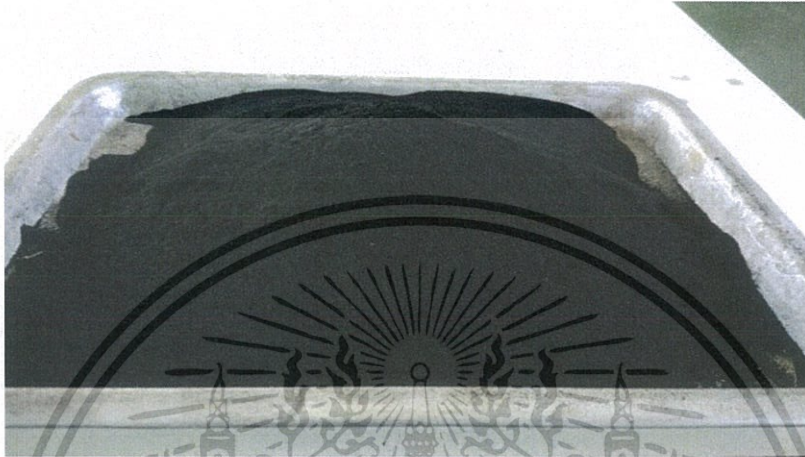


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

1. การเตรียมเถ้าแกลบดำ



รูปที่ ก.1 เถ้าแกลบดำที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น



รูปที่ ก.2 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และ Ball mill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการทำตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ก.3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ก.4 ตัวอย่างคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลจากการศึกษาปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำ

1. การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต



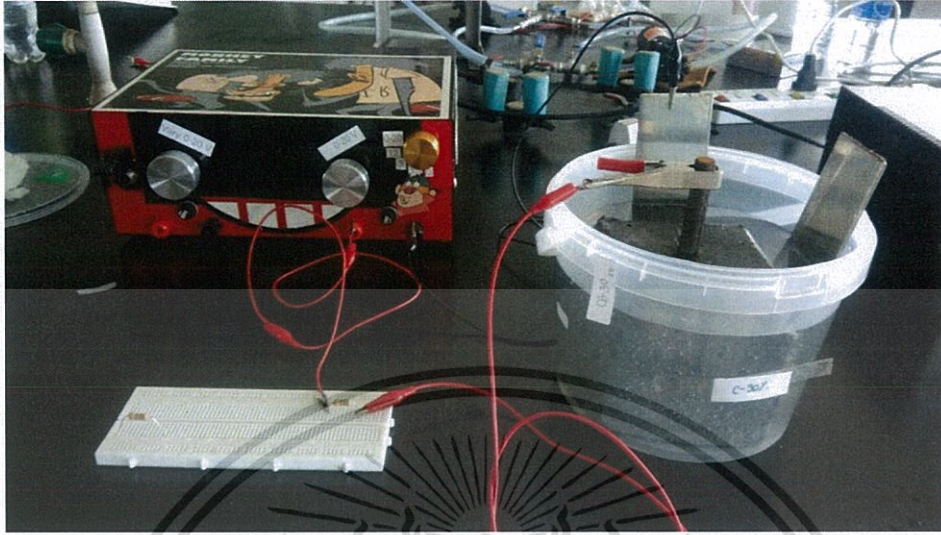
รูปที่ ข.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 แรงกดสูงสุดที่คอนกรีตรับได้และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุคอนกรีต 14 วัน		อายุคอนกรีต 28 วัน	
	แรงกดสูงสุด(kN)	กำลังอัด (ksc)	แรงกดสูงสุด(kN)	กำลังอัด (ksc)
CPC	154.07	157.05	207.68	211.70
CB-10	108.93	111.04	156.27	159.30
CB-20	91.12	92.88	123.98	126.38
CB-30	89.05	90.77	119.21	121.52
CB-40	59.37	60.5199	83.73	85.35
CB-50	44.94	45.8104	67.51	68.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี Impressed voltage (ACTIV)



รูปที่ ข.2 อุปกรณ์ในการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV



รูปที่ ข.3 ลักษณะรอยแตกของคอนกรีตและสนิมที่เกิดจากการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลจากการเร่งการกักตรอนด้วยวิธี ACTIV ของคอนกรีตควบคุม (CPC)

CPC			
วัน/เดือน/ปี	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความต้านทาน (Ω)
1/3/2018	713	0.0713	168.3029
2/3/2018	708	0.0708	169.4915
3/3/2018	782	0.0782	153.4527
4/3/2018	910	0.0910	131.8681
5/3/2018	753	0.0753	159.3625
6/3/2018	737	0.0737	162.8223
7/3/2018	725	0.0725	165.5172
8/3/2018	759	0.0759	158.1028
9/3/2018	638	0.0638	188.0878
10/3/2018	611	0.0611	196.3993
11/3/2018	593	0.0593	202.3609

ตารางที่ ข.3 ผลจากการเร่งการกักตรอนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-10)

CB - 10			
วัน/เดือน/ปี	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความต้านทาน (Ω)
17/2/2018	707	0.0707	169.7313
18/2/2018	825	0.0825	145.4545
19/2/2018	1060	0.106	113.2075
20/2/2018	979	0.1052	114.0684
21/2/2018	943	0.0979	122.5741
22/2/2018	916	0.0943	127.2534
23/2/2018	871	0.0916	131.0044
24/2/2018	861	0.0871	137.7727
25/2/2018	832	0.0861	139.3728
26/2/2018	819	0.0835	143.7126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลจากการเร่งการกักคร่อนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-20)

CB – 20			
วัน/เดือน/ปี	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความต้านทาน (Ω)
1/3/2018	923	0.0923	130.0108
2/3/2018	948	0.0948	126.5823
3/3/2018	968	0.0968	123.9669
4/3/2018	956	0.0956	125.523
5/3/2018	781	0.0781	153.6492
6/3/2018	766	0.0766	156.658
7/3/2018	782	0.0782	153.4527
8/3/2018	726	0.0726	165.2893
9/3/2018	638	0.0638	188.0878
10/3/2018	627	0.0627	191.3876
11/3/2018	593	0.0593	202.3609
12/3/2018	567	0.0567	211.6402
13/3/2018	590	0.0590	203.3898
14/3/2018	578	0.0578	207.6125
15/3/2018	540	0.0540	222.2222
16/3/2018	504	0.0504	238.0952
17/3/2018	472	0.0472	254.2373
18/3/2018	401	0.0401	299.2519
19/3/2018	387	0.0387	310.0775

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลจากการเร่งการกักกรองด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-30)

CB - 30			
วัน/เดือน/ปี	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความต้านทาน (Ω)
25/3/2018	1.576	0.1576	76.14
26/3/2018	1.28	0.128	93.75
27/3/2018	1.15	0.115	104.35
28/3/2018	1.1	0.110	109.09
29/3/2018	1.02	0.102	117.65
30/3/2018	1.08	0.108	111.11
31/3/2018	0.964	0.096	124.48
1/4/2018	1.006	0.101	119.28
2/4/2018	1.019	0.102	117.76
3/4/2018	0.937	0.094	128.07
4/4/2018	0.919	0.092	130.58
5/4/2018	1.1101	0.111	108.10
6/4/2018	0.909	0.091	132.01
7/4/2018	0.871	0.087	137.77
8/4/2018	0.812	0.081	147.78
9/4/2018	0.748	0.075	160.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลจากการเร่งการกักตรอนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-40)

CB - 40			
วัน/เดือน/ปี	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความต้านทาน (Ω)
25/3/2018	1.789	0.1789	67.08
26/3/2018	1.74	0.174	68.97
27/3/2018	1.59	0.159	75.47
28/3/2018	1.43	0.143	83.92
29/3/2018	1.43	0.143	83.92
30/3/2018	1.34	0.134	89.55
31/3/2018	1.243	0.124	96.54
1/4/2018	1.219	0.122	98.44
2/4/2018	1.117	0.112	107.43
3/4/2018	1.074	0.107	111.73
4/4/2018	1.1011	0.110	108.98
5/4/2018	1.1184	0.112	107.30
6/4/2018	0.909	0.091	132.01

ตารางที่ ข.7 ผลจากการเร่งการกักตรอนด้วยวิธี ACTIV ของตัวอย่างคอนกรีต (CB-50)

CB - 50			
วัน/เดือน/ปี	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความต้านทาน (Ω)
10/4/2018	2.17	0.2170	55.30
11/4/2018	1.865	0.187	64.34
12/4/2018	1.549	0.155	77.47
13/4/2018	1.362	0.136	88.11
14/4/2018	1.303	0.130	92.10
15/4/2018	1.272	0.127	94.34
16/4/2018	0.967	0.097	124.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กจากการเร่งการกัดกร่อนด้วยวิธี ACTIV

ชนิดของคอนกรีต	น้ำหนักที่หายไป (g)	เวลาที่ใช้ทดสอบ (h)	Corrosion rate (mm/yr)
CPC	9.3476	288	6.4050
CB-10	11.6489	264	8.7075
CB-20	15.9261	456	6.8922
CB-30	35.6620	408	17.2487
CB-40	29.8923	336	17.5562
CB-50	23.2357	168	27.2934

3. ผลการแทรกซึมของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ข.4 การแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ %3.5 w/v ในวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์



รูปที่ ข.5 สีของสารละลายเมื่อถึงจุดยุติ และเกิดตะกอนสีแดงอิฐ

ตารางที่ ข.9 แสดงปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ตัวอย่างคอนกรีต	Free Cl ⁻ (ร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต)		Total Cl ⁻ (ร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต)	
	2 เซนติเมตร	4 เซนติเมตร	2 เซนติเมตร	4 เซนติเมตร
CPC	6.512	7.308	13.122	14.915
CB-10	5.099	9.191	13.682	17.651
CB-20	4.625	9.825	20.118	30.401
CB-30	6.986	11.241	22.557	35.425
CB-40	8.874	14.862	27.853	46.670
CB-50	10.765	25.421	35.805	54.021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้