การศึกษาผลกระทบของเถ้าก้นเตาแม่เมาะต่อกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

ณรงค์ฤทธิ์ รัตนสัจธรรม
ณัฏฐา ร่มพุทธศาสนา

โครงงานวิศวกรรมโยธานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2561

A STUDY OF EFFECT OF MAE MOH BOTTOM ASH ON CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENT

NARONGRIT RATTANASADJATHAM
NATTHA ROMPUTTHASATSANA

THIS CIVIL ENGINEERING PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIRMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2019

หัวข้อโครงงาน	การศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล
โดย	นายณรงค์ฤทธิ์ รัตนสัจธรรม
	นางสาวณัฏฐา ร่มพุทธศาสนา
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงงานวิศวกรรมโยธานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

(อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์)

คณะกรรมการสอบโครงงาน

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนที่ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานบางส่วนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด และ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณสูงขึ้น (ร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้นและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลง ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 30 ซึ่งความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลงและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมสูงขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 แต่ต่ำลงเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30

Abstract

This research aims to investigate the chloride penetration resistance, corrosion of embedded steel and compressive strength of concrete exposed to marine environment at 2 years. Portland cement type I was used as the main binder. Fly ash (FA) was used as partial binder replacement at the amount of 20% and 30% by weight of binder. While, limestone powder (LP) was used to replace binder at the amount of 10% by weight of binder. Bottom ash (BA) was used as partial replacement of fine aggregate at 10% and 30% by volume of fine aggregate. The water to binder ratio (w/b) was kept at 0.45.

From the experimental result, it was found that the increase of the replacement of fine aggregate by bottom ash (form 10% to 30%) resulted in higher chloride penetration resistance of concrete and lower weight loss of the embedded steel. Except, concrete with 30% of fly ash had lower chloride penetration resistance and higher weight loss of the embedded steel. The compressive strength of concrete with 10% of bottom ash replacement was higher than concrete without bottom ash, but compressive strength of concrete with 30% of bottom ash replacement was lower.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิศกรรมโยธานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ อาจารย์ ดร.ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนวทางการศึกษาวิจัยซึ่งจำเป็นต้องใช้หลักวิชาการด้านเทคโนโลยีคอนกรีต การใช้อุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตในด้านต่าง ๆ ทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมี ตลอดจนความเอาใจใส่ต่อนิสิตในทุก ๆ ด้าน ด้วยความปรารถนาดีเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ปริญญาเอก Mr. Lyna Prak ที่คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ และคอยให้คำแนะนำในการทำโครงงานวิศกรรมโยธาฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณพี่ปริญญโท นายศิระ อาทมาท ที่ได้เตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับเผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี เพื่อนำมาทำการศึกษาครั้งนี้ และคอยให้คำแนะนำในการหาค่าความเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัย และพัฒนาเพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก ในส่วนของการศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด และให้การอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ ตลอดจนสถานที่ที่ใช้ในการทำงานโครงงานวิศกรรมโยธาฉบับนี้

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (Burapha Construction & Maintenance Technology Research Unit, BCONTEC) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

สำหรับคุณค่าและประโยชน์ของโครงงานวิศวกรรมโยธาครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทีแด้บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีอุปการคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่มีส่วนสนับสนุนให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอมอบให้เป็นประโยชน์ต่อสาธารณะต่อไป

ณรงค์ฤทธิ์ รัตนสัจธรรม

ณัฏฐา ร่มพุทธศาสนา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ..... ก
ABSTRACT ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูปภาพ ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 ปูนซีเมนต์ 3
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ 4
2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) 4
2.2 เถ้าลอย 5
2.2.1 การกำหนดมาตรฐานเถ้าลอยจากถ่านหิน ตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 6
2.2.2 ชนิดของเถ้าลอย มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 6
2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย 7
2.2.4 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย 7
2.3 ผงหินปูน 7
2.3.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี 8
2.3.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี 8
2.4 เถ้าก้นเตา 9
2.4.1 องค์ประกอบทางเคมี 9
2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan reaction) 9
2.5 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก 10
2.6 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยเกลือคลอไรด์ 11
2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1 การแพร่ (Diffusion) 12
2.7.2 การดึงดูดอิออน (Ion adsorption) 14
2.7.3 การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) 14
2.7.4 ความดันน้ำ (Hydraulic pressure) 15
2.8 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต 16
2.8.1 คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) 16
2.8.2 คลอไรด์อิสระ (Free chloride) 16
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
บทที่ 3 วิธีการทดลอง 27
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 27
3.1.1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 27
3.1.2. เถ้าลอย (Fly ash, FA) 28
3.1.3. ผงหินปูน (Limestone powder, L) 28
3.1.4. เถ้าก้นเตา (Bottom ash) 30
3.1.5. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) 31
3.1.6. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) 32
3.1.7. น้ำ (Water) 32
3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต 33
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง 33
3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง 35
3.3 สถานที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อม 37
3.4 วิธีการทดสอบ 38
3.4.1 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 38
3.4.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 51
3.4.3 การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 53
3.4.4 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม 58
บทที่ 4 61
4.1 ผลกระทบต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 61
4.1.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 65
4.1.1.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต 70
4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต 72
4.1.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด..... 72
4.1.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน..... 75
4.1.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 76
4.1.2.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต 77
4.2 ผลกระทบต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต..... 78
4.2.1 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 78
4.2.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน..... 83
4.2.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 85
4.2.2.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต 88
4.3 ผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต 90
4.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต..... 90
4.3.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละอียด..... 91
4.3.1.2 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 94
4.3.1.3 ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน..... 96
4.3.1.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต 99
4.4 การเปรียบเทียบผลการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี กับงานวิจัยของ
.....101 ศักดิ์จุฬา นามจันทร์ (2559)
4.4.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต..... 101
4.4.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด..... 101
4.4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต 103
4.4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด 103
4.4.3 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 104
4.4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด 104
4.4.4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต 106
4.4.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด 106
4.4.5 กำลังอัดของคอนกรีต..... 108
4.4.5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด 108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผล....110
5.1 สรุปผล....110
5.2 ข้อเสนอแนะ....111
บรรณานุกรม....112
ภาคผนวก....114
ภาคผนวก ก....115
ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต....115
ภาคผนวก ข....118
สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต....118
ภาคผนวก ค....127
พื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่เกิดสนิม....127
และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิม....127
ภาคผนวก ง....130
กำลังอัดของคอนกรีต....130

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบของ [ที่มา; SINGH AND SIDDIQUE (2014)] 20
ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบของ..... 21
ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบของ..... 22
ตารางที่ 2.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ..... 22
ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ 24
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....29
ประเภทที่1 ผงหินปูน เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตา..... 31
ตารางท 3.3 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด 31
ตารางที่ 3.4 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ..... 32
ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล..... 36

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 เถ้าลอย 5
ภาพที่ 2.2 ผงหินปูน 7
ภาพที่ 2.3 รูปร่างอนุภาคของเถ้าก้นเตา 9
ภาพที่ 2.4 กระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ 12
ภาพที่ 2.5 การแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่โพรงช่องว่างของคอนกรีต 12
ภาพที่ 2.6 การดึงดูดอิออน 14
ภาพที่ 2.7 การดึงดูดแบบคาพิลลารี 15
ภาพที่ 2.8 ซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู้คอนกรีตโดยความดันน้ำ 15
ภาพที่ 2.9 แผนผังประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550) 17
ภาพที่ 2.10 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา 18
ภาพที่ 2.11 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด 19
ภาพที่ 2. 12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด 20
ภาพที่ 2.13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นแทนที่มวลรวมละเอียด 21
ภาพที่ 2.14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด 23
ภาพที่ 2.15 ค่ากำลังของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด 23
ภาพที่ 2.16 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา 24
ภาพที่ 2.17 WATER RETAINABILITY ของเถ้าก้นเตา 25
ภาพที่ 2.18 การทดสอบหา WATER RETAINABILITY โดย PROPOSED METHOD 26
และการทดสอบหาABSORPTION โดย ASTM C 128
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง MOISTURE CONTENT และ TRIAL MOISTURE โดยวิธี STATICS 26
ระยะเวลา 6 ชั่วโมง (A) ส่วนบน และ (B) ส่วนล่าง
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง MOISTURE CONTENT และ TRIAL MOISTURE 26
โดยวิธี ACCELERATEDระยะเวลา 24 นาที (A) ส่วนบน และ (B) ส่วนล่าง
ภาพที่ 3.1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 27
ภาพที่ 3.2 เถ้าก้นเตาชนิด BA 30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.3 ขนาดคละของเถ้าก้นเตาแต่ละชนิด 30
ภาพที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต 33
ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 33
ภาพที่ 3. 6 เหล็กกลมผิวเรียบ 33
ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.2 กิโลกรัม 34
ภาพที่ 3.8 เครื่องผสมคอนกรีต 34
ภาพที่ 3.9 เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต 34
ภาพที่ 3.10 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการวางเหล็กเสริม 35
ภาพที่ 3.11 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 37
ภาพที่ 3.12 เครื่องเจาะตัวอย่างคอนกรีต 38
ภาพที่ 3.13 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต 38
ภาพที่ 3.14 ครกหินบดตัวอย่าง 39
ภาพที่ 3.15 เครื่อง Auto titration รุ่น tritoline 7000 39
ภาพที่ 3.16 TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar 39
ภาพที่ 3. 17 เครื่องดูด 40
ภาพที่ 3. 18 เครื่องต้ม 40
ภาพที่ 3.19 กระดาษกรองเนื้อหยาบ 40
ภาพที่ 3.20 ช้อนตักสาร 41
ภาพที่ 3.21 บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร 41
ภาพที่ 3. 22 กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร 41
ภาพที่ 3.23 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร 42
ภาพที่ 3.24 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละอียด 0.01 กรัม 42
ภาพที่ 3.25 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละอียด 0.0001 กรัม 42
ภาพที่ 3.26 กรวย 43
ภาพที่ 3.27 ขวดกรองแก้วก้นโปร่ง 43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.28 ตะแกรงเบอร์ 20 43
ภาพที่ 3.29 กรดไนตริก 44
ภาพที่ 3.30 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 44
ภาพที่ 3. 31 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N SODIUM CHLORIDE (NACL) 44
ภาพที่ 3.32 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N Silver nitrate ($AgNo_3$) 45
ภาพที่ 3. 33 การเตรียมผงตัวอย่างคอนกรีตก่อนการไตเตรท 45
ภาพที่ 3.34 การชั่งผงคอนกรีต 5 กรัม 46
ภาพที่ 3.35 การเติมน้ำกลั่น และสารละลายกรดลงในตัวอย่าง 46
ภาพที่ 3.36 การต้มตัวอย่าง 46
ภาพที่ 3. 37 การกรองสารละลาย 47
ภาพที่ 3.38 การใช้เครื่อง AUTO TITRATION 47
ภาพที่ 3.39 ผลที่ได้จากเครื่อง AUTO TITRATION 48
ภาพที่ 4.1 คลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีต 61
ภาพที่ 4.2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 62
ภาพที่ 4.3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 63
ภาพที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวม.....64
ละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10
ภาพที่ 4.5 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 65
ภาพที่ 4.6 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 66
ภาพที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีต 67
ภาพที่ 4.8 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 68
ภาพที่ 4.9 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 69
ภาพที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 70
ภาพที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 71
ภาพที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 72

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน 73
ภาพที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20..... 74
และใช้ผงหินปูนร้อยละ 10
ภาพที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 75
ภาพที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 76
ภาพที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 77
ภาพที่ 4.18 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 78
ภาพที่ 4.19 สูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม 79
ภาพที่ 4.20 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน..... 80
ภาพที่ 4.21 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 81
ภาพที่ 4.22 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ..... 82
ผงหินปูนร้อยละ 10
ภาพที่ 4.23 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10..... 83
ภาพที่ 4.24 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30..... 84
ภาพที่ 4.25 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีต..... 85
ภาพที่ 4.26 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10..... 86
ภาพที่ 4.27 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30..... 87
ภาพที่ 4.28 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10..... 88
ภาพที่ 4.29 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30..... 89
ภาพที่ 4.30 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดบางส่วน..... 90
ภาพที่ 4.31 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน..... 91
ภาพที่ 4.32 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 92
ภาพที่ 4.33 กำลังอัดของคอนกรีตใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 93
ภาพที่ 4.34 กำลังอัดของคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10..... 94
ภาพที่ 4.35 กำลังอัดของคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30..... 95

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.36 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 96
ภาพที่ 4.37 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 97
ภาพที่ 4.38 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 98
ภาพที่ 4.39 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 99
ภาพที่ 4.40 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 100
ภาพที่ 4.41 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 101
ภาพที่ 4.42 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 102
ภาพที่ 4.43 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 103
ภาพที่ 4.44 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 104
ภาพที่ 4.45 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 105
ภาพที่ 4.46 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 106
ภาพที่ 4.47 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 107
ภาพที่ 4.48 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 108
ภาพที่ 4.49 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 109

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากโครงสร้างส่วนมากในปัจจุบันนิยมใช้คอนกรีตเป็นวัสดุโครงสร้างหลักในงานก่อสร้างอาคารเนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่าวัสดุโครงสร้างอื่นๆ เช่น โครงสร้างไม้ และโครงสร้างเหล็ก ซึ่งในงานคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานที่ยังมีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญสภาพแวดล้อมรุนแรงได้ต่ำ เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมทะเลจะเกิดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ ซึ่งเกลือคลอไรด์ทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริม เป็นผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม การเกิดสนิมส่งผลต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมทำให้มีขนาดเล็กลง ทำให้โครงสร้างมีการสูญเสียความสามารถในการรับแรง และคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนเนื่องจากสนิมที่ขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าว ทำให้โครงสร้างมีอายุใช้งานที่ต่ำลง และเนื่องด้วยในปัจจุบันมวลรวมในธรรมชาติมีจำนวนที่น้อยลง และมีราคาที่สูงขึ้น จึงทำให้มีแนวคิดที่จะนำวัสดุอื่นมาทดแทนมวลรวมธรรมชาติ จึงได้ศึกษาหาข้อมูลของเถ้าก้นเตา ซึ่งเถ้าก้นเตาเป็นผลผลิตจากโรงงานไฟฟ้าที่มีจำนวนมากและยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร จึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าก้นเตามาแทนที่มวลรวมธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีการศึกษาแนวทางในการป้องกันการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต และเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานโครงสร้างโดยใช้เถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตามีอนุภาคค่อนข้างใหญ่ จึงนิยมนำไปทิ้งหรือถมที่ดิน ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร เมื่อเทียบกับเถ้าลอยซึ่งเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง มีความสามารถในการเก็บกักน้ำสูง จึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าก้นเตามาใช้แทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีต เพื่อให้เกิดการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตโดยใช้น้ำที่เก็บอยู่ในอนุภาคเถ้าก้นเตา ซึ่งเหมาะกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ๆ ที่มีเนื้อแน่นไม่สามารถใช้น้ำจากการบ่มภายนอกคอนกรีตได้ โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตลดต่ำลงเถ้าก้นเตาสามารถปล่อยน้ำที่เก็บไว้เพื่อใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อการบ่มของคอนกรีตยังมีน้อยดังนั้นการศึกษาในเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการใช้เถ้าก้นเตาที่มีประสิทธิภาพในอนาคตต่อไป

สำหรับการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตในปัจจุบัน ยังขาดการศึกษาคุณสมบัติความคงทนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเฉพาะเถ้าก้นเตาจากแม่เมาะ ดังนั้นดังนั้นโครงงานนี้จะมุ่งศึกษากำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะ เพื่อเปรียบเทียบมวลรวมธรรมชาติ และหาอัตราส่วนการใช้งานที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

2. เพื่อศึกษาความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

3. เพื่อศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษางานวิจัยนี้ ใช้เถ้าก้นเตาที่ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน โดยทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ใช้อัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดที่ 0.10 และ 0.30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่ 0.20 และ 0.30 และอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสานที่ 0.10

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

2. ทำให้ทราบความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

3. ทำให้ทราบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์นั้นเป็นวัสดุประสานที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานก่อสร้างซึ่งจะมีปูนซีเมนต์หลายแบบแตกต่างกันออกไปเพื่อความเหมาะสมในการใช้งานนั้นๆซึ่งประเภทของปูนซีเมนต์นั้นสามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ประเภทคือ

1. ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary portland cement) ปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดใช้ก่อสร้างงานอาคารทั่วไปซึ่งปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในเวลาปานกลางและมีความร้อนปานกลาง

2. ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารซัลเฟตได้ปานกลางปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีใช้ค่อนข้างน้อยในประเทศไทย

3. ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High early strength portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดสูงในระยะแรกให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมีปริมาณ C_3S สูงและมีเนื้อผงที่มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วแต่ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดสูงในช่วงต้น

4. ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทความร้อนต่ำ (Low heat portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ปริมาณและอัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำมากเพราะมีปริมาณของ C_3S ต่ำ คือ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมี C_2S ที่ค่อนข้างสูงคือเฉลี่ยประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น ๆ ซึ่งจะลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน

5. ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟต (Sulfate resistance portland cement) เป็นปูนที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณ C_3A ต่ำมากโดยปกติมีไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ C_3A จะทำให้เกิดการรวมตัวของซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้นเมื่อ C_3A มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยาของซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตลดลงปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับสารละลายซัลเฟตอย่างรุนแรงจากดินหรือน้ำที่มี

ปริมาณซัลเฟตสูง เช่น งานโครงสร้างในทะเล ท่าเรือ งานก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียตลอดเวลา และโครงสร้างใต้ดินเป็นต้น

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการวิจัยเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์จะมีสองกลุ่มใหญ่ที่มีความสำคัญดังนี้

2.1.1.1 สารประกอบหลัก (Major oxides) คือ สารประกอบออกไซด์ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาเคมีและรวมกันอยู่ในรูปสารประกอบต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการเผาและขั้นตอนการผลิต ซึ่งสารประกอบออกไซด์หลักมี 4 ชนิดดังนี้

-ไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S ($3CaO.SiO_2$) มีอยู่ประมานร้อยละ 45-55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวขึ้นโดยการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดความร้อนไม่มากนักประมาณ 500 จูน/กรัม

-ไตแคลเซียมซิลิเกต C_2S ($2CaO.SiO_2$) มีอยู่ประมาณร้อยละ 15-35 มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีดำเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวแต่ช้ากว่า C_3S โดยให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไปและให้ความร้อน 250 จูน/กรัม

-ไตรแคลเซียมอลูมิเนต C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) มีร้อยละประมาณ 7-15 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะมีการก่อตัวทันทีมีความร้อนสูงประมาณ 880 จูน/กรัม

-เตตะแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.FeO_3$) มีประมาณร้อยละ 5-10 ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วจะมีความร้อนอยู่ที่ประมาณ 420 จูน/กรัม

2.1.1.2 สารประกอบออกไซด์รอง (Minor oxides)

ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ SO_3 (Sulphur trioxide) จะมีปริมาณไม่มากนักแต่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเผาซึ่งจะขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิง ข้อดีของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ คือ เมื่อมีการรวมตัวกับออกซิเจน และ Alkaline จะได้เป็น Alkaline sulphate ทำให้กำลังช่วงต้นมีค่าที่สูงขึ้น แต่จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าต่ำลง จึงยอมให้มีค่าได้ร้อยละ 3.5 - 4.5 แมกนีเซียมออกไซด์ MgO โดยทั่วไปแล้วในปูนซีเมนต์จะยอมให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 2 เพราะเมื่อ Free MgO ทำปฏิกิริยากับน้ำนั้นจะเกิดการขยายตัวทำให้คอนกรีตแตกร้าว อัลคาไลด์ออกไซด์ Na_2O, K_2O (Alkaline oxides) โดยสารนี้เมื่อมีสะสมจำนวนมากในเตาเผาปูนซีเมนต์จะเกิดการอุดตัน และเมื่อรวมตัวกับมวลรวมจะทำการขยายและดันให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุดจึงยอมให้มีอัลคาไลด์ออกไซด์ได้ไม่เกิน ร้อยละ 0.6

2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction)

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นซึ่งนั่นคือปฏิกิริยาไฮเดรชั่นซึ่งจากองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์จะสังเกตได้ว่ามี C_3S เป็นหลักทำให้การเกิดปฏิกิริยาจะเหมือนกับ C_3S โดยช่วงแรกจะเรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จากนั้นซีเมนต์เพสจะมีสภาพแบบพลาสติกเมื่อมี

ความเข้มข้นที่สูงพอ CH จะทำการตกผลึกทำให้เกิดปฏิกิริยา C_3S กับ C_2S อีกครั้ง จากนั้นจะเป็น CSH และต่อมาจะมีปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้มีเอททริงไกต์เปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและสารประกอบ $C_4(A,F)H_{13}$และแคบเซียมซิลิเกตยังทำปฏิกิริยาต่อเกิด CSH โดยจะมากขึ้นเรื่อยๆจนสามารถเกาะกันเป็นผลึก

สมการของ C_3S;

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

สมการของ C_2S;

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

สมการของ C_3A;

$$C_3A + 6H_2O \rightarrow C_3AH_6 \quad (2.3)$$

สมการของ C_4AF;

C_4AF + Gypsum + $Ca(OH)_26H_2O \rightarrow$ Sulphoalumilate และ Silphoferrite (2.4)

2.2 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ fuel ash) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานิกสังเคราะห์หรือปอซโซลานิกดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตาจึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

ภาพที่ 2.1 เถ้าลอย

2.2.1 การกำหนดมาตรฐานเถ้าลอยจากถ่านหิน ตามมาตรฐาน มอก.2135-2545

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน มอก. 2135 -2545 เป็นมาตรฐานทั่วไป เพื่อส่งเสริมให้มีการทำผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพโดยมีขอบข่ายเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก เพื่อให้ได้สมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง ดังนี้

1. เพื่อให้เกิดการประสานในเนื้อคอนกรีต (cementation) หรือกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic action) หรือทั้งสองอย่าง

2. เพื่อให้ได้สมบัติอื่นที่อาศัยความละเอียดของเถ้าลอย

2.2.2 ชนิดของเถ้าลอย มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก. เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica: SiO_2) และอลูมินา (Alumina: Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric oxide: Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide: CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ข. เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่าควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือประกอบด้วยซิลิกา ออกไซด์(SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักและมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O, K_2O)และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรองนอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไป ใช้งานได้

2.2.4 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.3 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ภาพที่ 2.2 ผงหินปูน

2.3.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีจึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้นและยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีอย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอและให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีดังสมการต่อไปนี้

$$CaCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \quad (2.5)$$

$$MgCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.6)$$

2.3.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

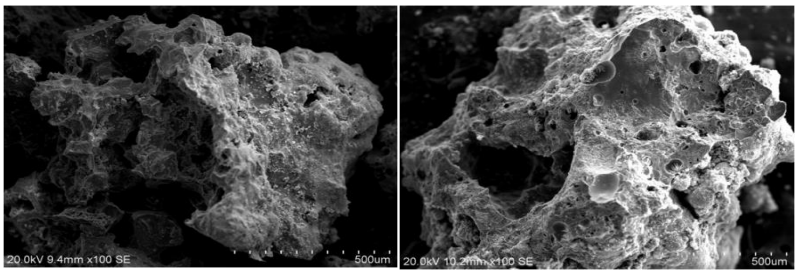
ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำดังสมการ

$$CaO + H_2 \longrightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.7)$$

โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ การนำเอาผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.4 เถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยถ่านหินจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าก้นเตามีขนาดค่อนข้างใหญ่และบางส่วนของถ่านหินขนาดเล็กซึ่งยังไม่ได้ถูกเผาตกลงสะสมรวมตัวกันอยู่ที่ก้นเตาซึ่งมีน้ำหล่อเย็น สำหรับเตาเผาถ่านหินมักอยู่ในสภาพเปียกชื้นโดยทั่วไปมีลักษณะค่อนข้างพรุนรูปร่างไม่แน่นอน พื้นที่ผิวจาเพาะสูงน้ำหนักเบาสีค่อนข้างดำมีการคละค่อนข้างดีใกล้เคียงกับทรายและแตกตัวได้ง่ายเมื่อถูกบดหรือกระแทก มีราคาประมาณ 100 บาทต่อคิว มีราคาถูกกว่าทราย ซึ่งทรายจะมีราคาประมาณ 400 บาทต่อคิว



ภาพที่ 2.3 รูปร่างอนุภาคของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตา BA กำลังขยาย 500 μM เถ้าก้นเตา BB กำลังขยาย 500 μM

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาที่สำคัญคือซิลิกาออกไซด์ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมขณะเผาซึ่งจะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาจะคล้ายกับเถ้าลอยสามารถเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C618 จัดให้เป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral admixture) ชนิดวัสดุปอซโซลานิก

2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าก้นเตาเกิดจากซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์(Al_2O_2) ในเถ้าก้นเตาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลผลิตมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่เพิ่มการยึดประสานระหว่างเพสต์และมวลรวมจึงช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังให้กับคอนกรีตในระยะยาวเช่นเดียวกับเถ้าลอย

2.5 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมโดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึมเข้าไปในคอนกรีต ทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมทำให้แตกร้าวในที่สุด ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตอาจได้รับมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำทะเล ดิน อากาศ หรือมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้นส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งโดยน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของคลอไรด์ อิออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีตหรือ มีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยความดันของน้ำ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้นถึงแม้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จึงไม่เป็นปัญหานัก ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้นน้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการดูดน้ำ (Absorption) หรือ การดึงดูดแบบคาพิวลารี Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้งน้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นอิออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น

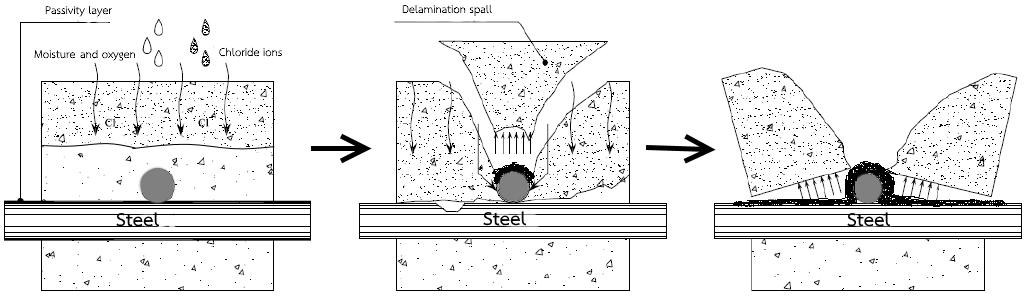
โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามากและภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอิออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล การเคลื่อนตัวของอิออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้งสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลมทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น

ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอิออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริมซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง

จนถึงระดับวิกฤตคลอไรด์ เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium chloroaluminate ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium chloroferrite ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่าและเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงจะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะกับงานคอนกรีตหลาและในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลายซัลเฟตอยู่ด้วยซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2.6 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยเกลือคลอไรด์

สาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมและทำให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อน (Delamination) เนื่องมาจากคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักโดยจะเกิดขยายตัวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวทรุดโทรมและมีอายุการใช้งานที่ต่ำลง โดยปกติเมื่อปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มเคลือบอยู่ที่ผิวเหล็ก (Passive film) จะมีคุณสมบัติเป็นด่างโดยฟิล์มนี้จะทำการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก แต่เมื่อมีคลอไรด์แทรกเข้ามาในเนื้อของคอนกรีตคลอไรด์ที่สะสมที่ผิวเหล็กเสริมจะมีปริมาณมากขึ้น จนเมื่อถึงปริมาณที่มากพอจะเรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Chloride threshold content) ฟิล์มที่เคลือบอยู่ที่ผิวเหล็กเสริมนี้จะถูกทำลาย จากนั้นเมื่อมีออกซิเจนรวมกับความชื้นจะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เนื่องจากชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มผิวเหล็กได้ถูกทำลายไปแล้ว ดังรูป 2.4



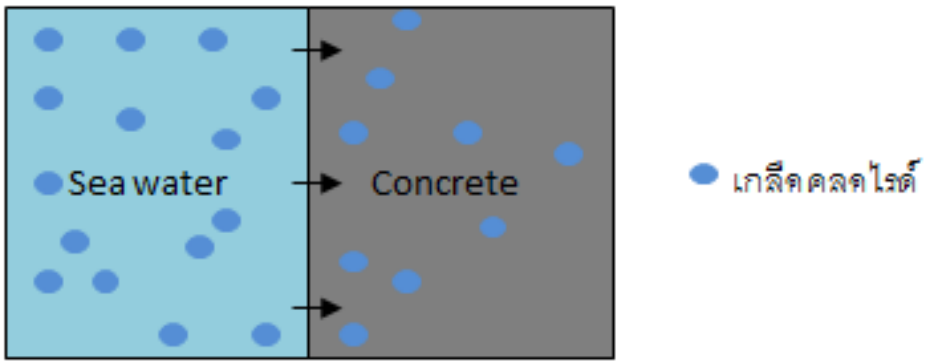
ภาพที่ 2.4 กระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์

คลอไรด์นั้นเป็นองค์ประกอบหลักในสภาพแวดล้อมทางทะเล โดยคลอไรด์นั้นจะทำการแทรกตัวเข้าไปยังเนื้อคอนกรีต จากนั้นเมื่อถึงปริมาณคลอไรด์วิกฤติจะทำให้เหล็กเสริมที่อยู่ภายใน เกิดสนิมขึ้นหากมีความชื้นและออกซิเจนที่เพียงพอ หลังจากที่เหล็กเสริมเกิดสนิมแล้วเนื้อสนิมที่เกิดขึ้นภายในจะทำการดันคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งการแทรกซึมสามารถเกิดได้จาก 4 กลไล คือ การแพร่ การดึงดูดอิออน การดึงดูดแบบคาพิวลารี และแรงดันน้ำ

2.7.1 การแพร่ (Diffusion)

การแพร่เกิดจากความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนภายนอกคอนกรีตกับภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าไม่เท่ากัน ดังภาพที่ 2.5 ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนเข้าไปยังโพรงช่องว่างของคอนกรีต โดยคลอไรด์อิออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการ 2.8



ภาพที่ 2.5 การแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่โพรงช่องว่างของคอนกรีต

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \quad (2.8)$$

โดยที่

$C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมลต่อลิตร)

$C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมลต่อลิตร)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ตารางเซนติเมตรต่อปี)

x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (เซนติเมตร)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ 2.8 สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.9 ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_d = (C_s - C_0)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] + C_0 \quad (2.9)$$

โดยที่ C_d คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (%โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (%โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_0 คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

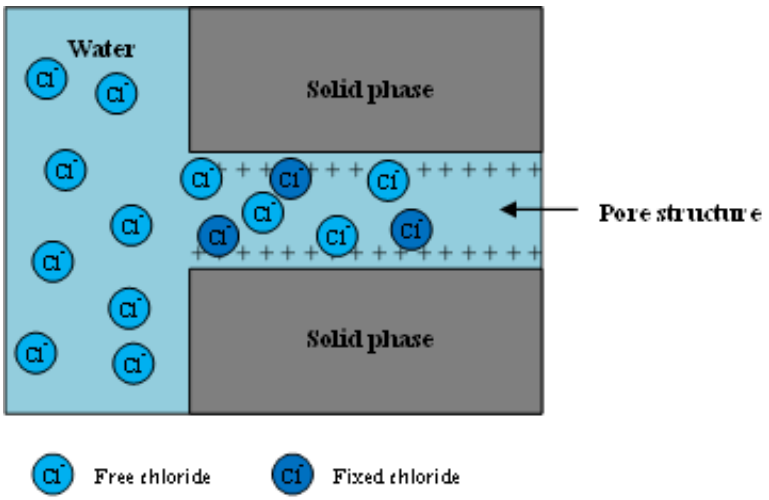
c คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (เซนติเมตร)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ตารางเซนติเมตรต่อปี)

t คือ อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาขอโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)

2.7.2 การดึงดูดอิออน (Ion adsorption)

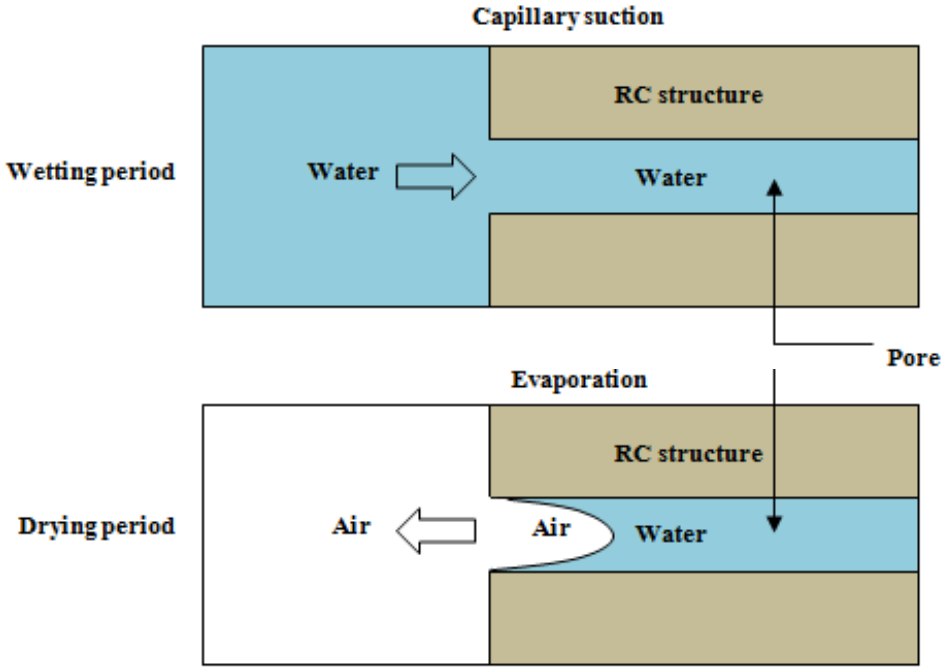
คอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอด จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้ผิวหน้า คอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์โดยรอบของน้ำทะเล โดยการเกิดนี้จะไม่สามารถอาศัยหลักการแพร่ของคลอไรด์ได้ เนื่องจากการแพร่จะหยุดเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ภายนอกเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในคอนกรีต แต่กลไกการดึงดูดอิออนจะเกิดขึ้นได้โดยผิวของโพรงคอนกรีตนั้นมีประจุบวกทำให้เกิดการดึงดูดคลอไรด์คลอไรด์เข้ามาสะสมอยู่ภายในทำให้เหล็กเสริมเกิดการเป็นสนิม ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การดึงดูดอิออน

2.7.3 การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction)

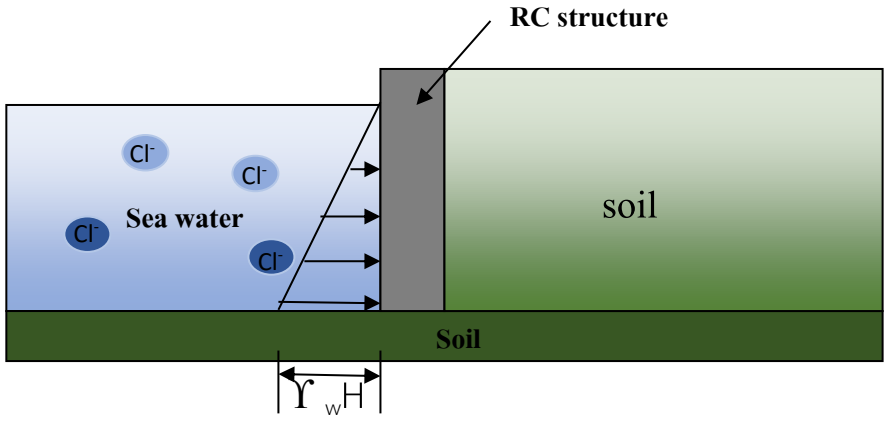
การแทรกซึมโดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีเกิดขึ้นได้จากเกลือคลอไรด์ของน้ำทะเลนั้นแทรกซึมเข้าไปในโพรงของคอนกรีต โดยหลังจากที่ผิวของคอนกรีตแห้งเพราะมีการระเหยของน้ำภายในโพรงช่องว่างคอนกรีตออกไปและจะเกิดขึ้นสลับไปมา เรียกสภาวะเช่นนี้ว่า วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Cycle wetting and drying) ซึ่งกลไกลดูดน้ำทะเลเข้ามาในโพรงช่องว่างของคอนกรีตนี้เรียกว่าการดึงดูดแบบคาปิลลารี เนื่องจากผลของการขึ้น-ลงของน้ำทะเล ซึ่งผลของกลไกนี้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากในระหว่างที่เกิดสภาวะแห้งกับโครงสร้างคอนกรีตในช่วงที่เกิดน้ำลงน้ำจะระเหยเป็นไอจากคอนกรีตเหลือไว้แต่เกลือในโพรงช่องว่างของคอนกรีตจนมีปริมาณคลอไรด์สูงขึ้นเรื่อยๆจึงทำให้เหล็กเกิดสนิม ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การดึงดูดแบบคาพิลลารี

2.7.4 ความดันน้ำ (Hydraulic pressure)

สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดินอุโมงค์เป็นต้นความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์อิออนเกิดจาก Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำโดยที่จะมีน้ำนั้นจะเป็นตัวพาคลอไรด์อิออนไป ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู้คอนกรีตโดยความดันน้ำ

2.8 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เกลือคลอไรด์ที่ยึดจับและเกลือคลอไรด์อิสระ โดยผลรวมของเกลือทั้งสองชนิดนี้เรียกรวมกันว่าเกลือคอลไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ทั้งนี้รายละเอียดของเกลือคลอไรด์ทั้งสองประเภทในคอนกรีตแสดงในภาพที่ 2.9 สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.8.1 คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride)

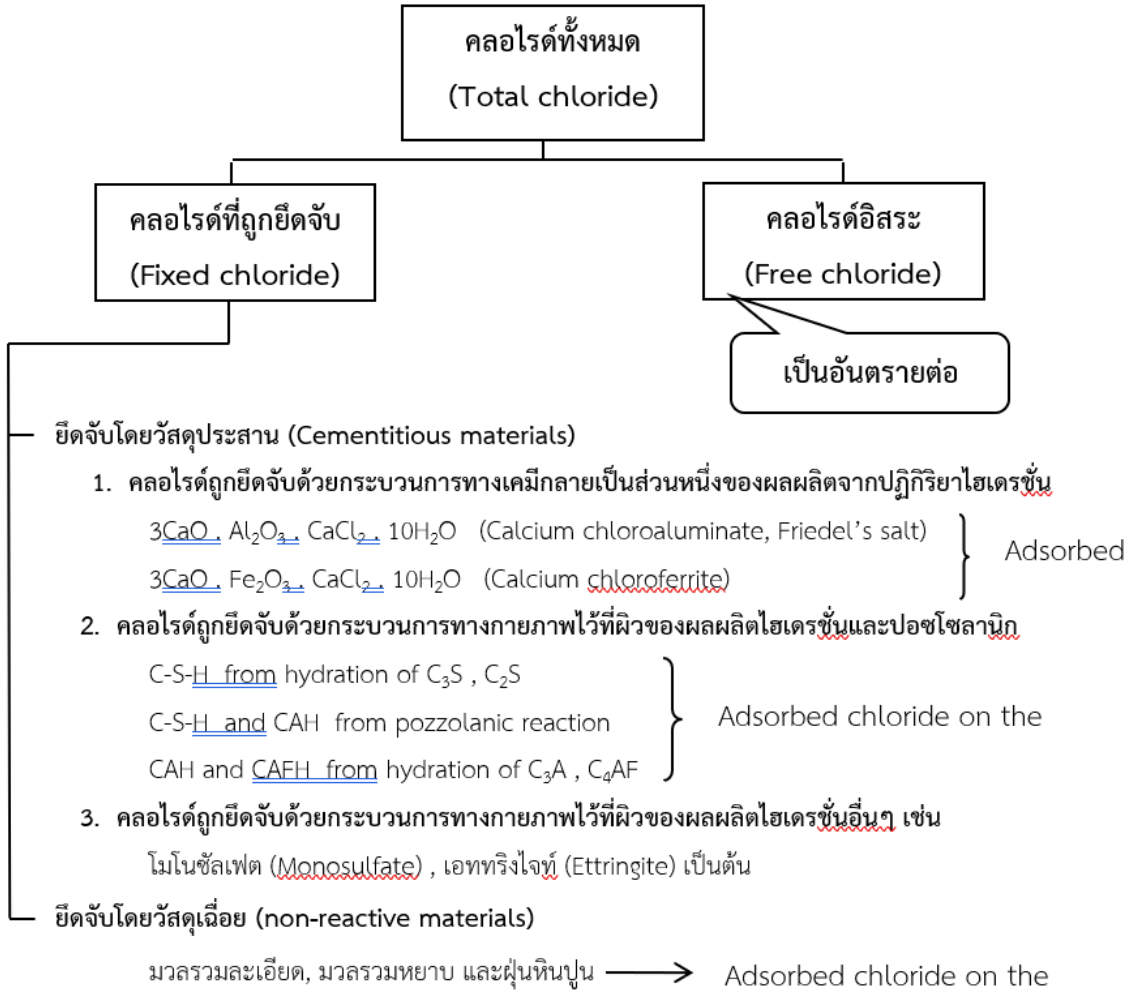
คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ หมายถึง คลอไรด์ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้

ก. การยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกจับยึดด้วยลักษณะทางกายภาพตามผิวของผลผลิตไฮเดรชั่นเช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกจับยึดอยู่บนผิวของวัสดุเฉื่อย เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

ข. การยึดจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับยึดโดยผลผลิตที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และผลผลิตของ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Friedal's salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium Chloroferrite)

2.8.2 คลอไรด์อิสระ (Free chloride)

คลอไรด์อิสระหมาย ถึงคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเริ่มเหล็กออกไปได้



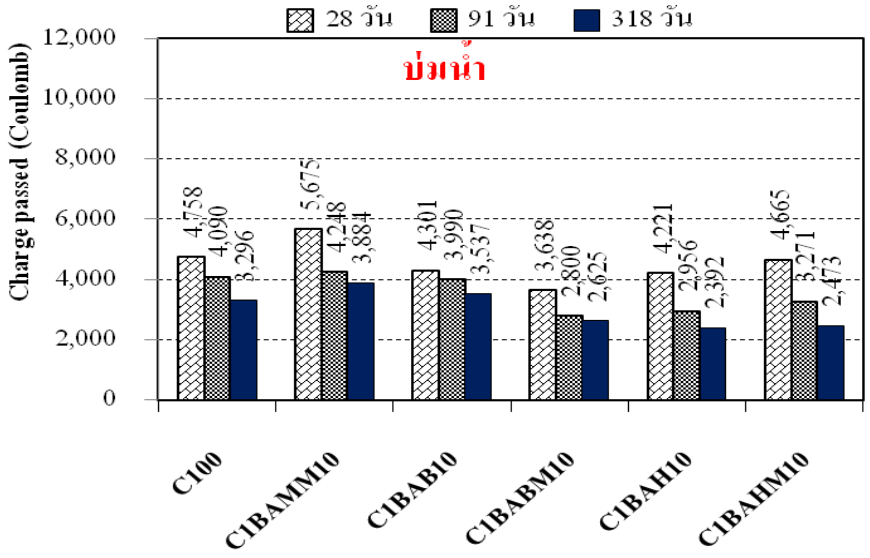
ภาพที่ 2.9 แผนผังประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นพรัตน์ มณีวงศ์วิจิตร (2550) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาและเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าก้นเตาบดและเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด พบว่า คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 และคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ใกล้เคียงหรือด้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน แต่สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีว่าที่อายุ 90 วัน โดยเฉพาะคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 40 คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 มีการพัฒนากำลังอัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาและคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 40 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ต่ำกว่าคอนกรีต

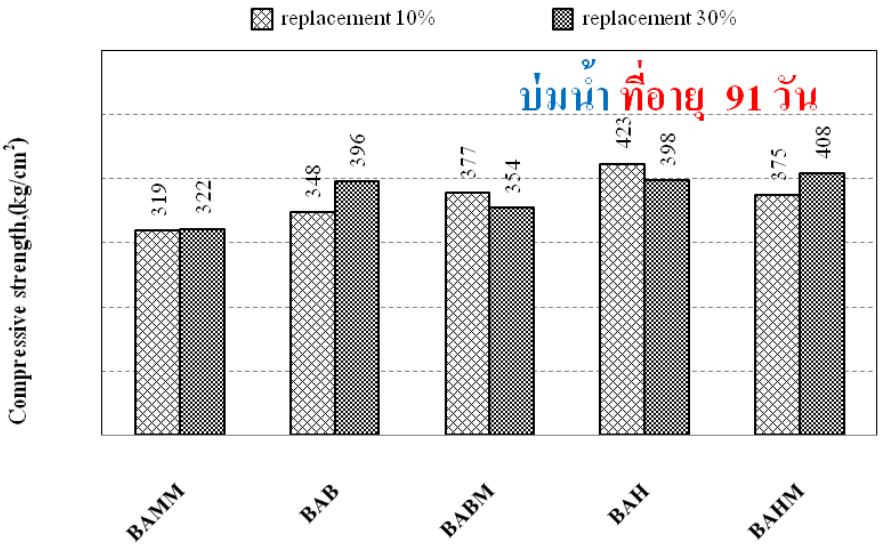
ควบคุม แต่จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น

อุดมพร กุลมงคล (2556) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง จากภาพที่ 2.10 พบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่มากขึ้นด้วย ที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียวโดยที่เถ้าก้นเตา BM มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุด



ภาพที่ 2.10 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง จากภาพที่ 2.11 พบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่มากขึ้นด้วย ที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว โดยที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะ (MM) ที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.64 มีความสามารถกักเก็บน้ำ 29.6% คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา (MM) ร้อยละ 10 มีกำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้ายละ 30 มีกำลังอัดของคอนกรีตที่มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10



ภาพที่ 2.11 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด

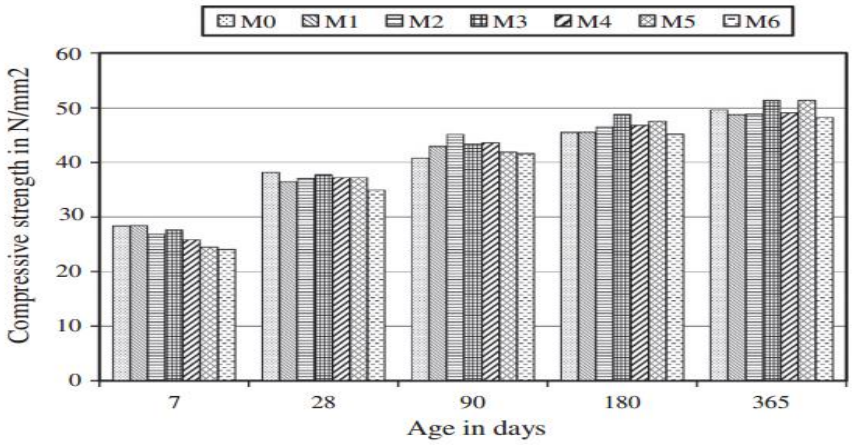
Cheriaf et al. (1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าก้นเตาจากถ่านหินโดยทำการผสมซีเมนต์ล้วนที่ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเถ้าก้นเตาในปริมาณที่เท่า ๆ กัน และทำการวิเคราะห์หาทั้งกำลังอัดและการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า ที่อายุช่วงต้นๆ เถ้าก้นเตาไม่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า ๆ แต่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ละน้อยจนมีค่าที่ชัดเจนหลัง 28 วัน และชัดเจนมากภายหลัง 90 วัน นอกจากนี้พบว่าดัชนีการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ถือเป็นข้อมูลที่สำคัญเพียงพอในการเลือกใช้เถ้าก้นเตาในงานคอนกรีต เมื่อเถ้าก้นเตาถูกบดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงในเครื่องบดด้วยลูกบอลเหล็กในห้องปฏิบัติการแล้ว การพัฒนาดัชนีกำลังอัดที่ 28 วัน ของเถ้าก้นเตามีค่าเท่ากับ 27

Andrade et al. (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าก้นเตาจากถ่านหินแทนที่ทรายธรรมชาติต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด โดยทดสอบการสูญเสียน้ำเนื่องจาก การเยิ้มน้ำ การก่อตัว และการหดตัวในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลวเพื่อจะประเมินคอนกรีตที่มีเถ้าก้นเตาเป็นส่วนผสมโดยได้อธิบายถึงอิทธิพลความพรุนของเถ้าก้นเตาต่อการดูดซับน้ำไว้และการสูญเสียน้ำจากคอนกรีต รวมไปถึงการใช้น้ำของคอนกรีตจากเถ้าก้นเตาด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตในช่วงคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าก้นเตามีความว่องไวต่อการสูญเสียน้ำ เนื่องจากการเยิ้มน้ำ และการใช้เถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลวมีค่าต่ำลง

Singh and Siddique (2014) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28, 90, 180 และ 365 วันโดยใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำ 31.58% ความถ่วงจำเพาะ 1.39 จากภาพที่ 2.12 พบว่าคอนกรีตที่อายุ 7 วัน คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาจะให้กำลังอัดของคอนกรีตมากที่สุด และคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาในทุกอัตราส่วนจะให้กำลังอัดของคอนกรีตที่มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมเถ้าก้นเตา ส่วนด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นค่าการซึมผ่านของประจุไฟฟ้าลดลง ที่อายุคอนกรีต 365 วัน และเมื่อใส่เถ้าก้นเตามากขึ้นทำให้ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบของ [ที่มา; SINGH AND SIDDIQUE (2014)]

Mix	Cement (kg/m^3)	W/C ratio	Sand (kg/m^3)	Bottom ash (kg/m^3)	Coarse aggregate (kg/m^3)	Water (kg/m^3)
M0	479	0.45	479	0	1175	215.55
M1	479	0.45	383.2	51.22	1175	215.55
M2	479	0.45	334.6	76.824	1175	215.55
M3	479	0.45	287.4	102.43	1175	215.55
M4	479	0.45	239.5	128.04	1175	215.55
M5	479	0.45	119.75	192.06	1175	215.55
M6	479	0.45	0	256.08	1175	215.55

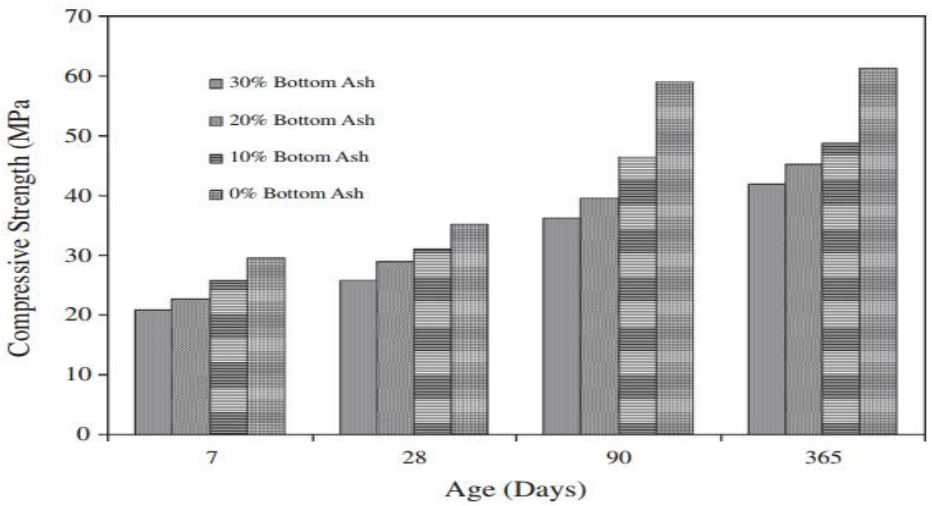


ภาพที่ 2. 12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด

Siddique (2013) ได้ศึกษาคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20 และ 30 ทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 90 และ 365 จากภาพที่ 2.13 พบว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตามีค่ากำลังอัดสูงสุด และเมื่อเพิ่มเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบของ

Mix	Cement (kg/m^3)	Fly ash (kg/m^3)	C.A. (kg/m^3)	F.A. (kg/m^3)	B.A. (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	S.P. (kg/m^3)	S.P. (%)	w/p	w/c	Room temp.	Conc. temp.
SCC1	460	90	589	913	-	228.6	11.01	2.00	0.41	0.52	32	29
SCC2	460	90	589	821	91	260.9	10.19	1.85	0.47	0.57	29.5	27
SCC3	460	90	589	730	183	281.4	10.46	1.90	0.51	0.61	34	28
SCC4	460	90	589	639	274	300.5	10.34	1.88	0.55	0.65	34	28



ภาพที่ 2.13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นแทนที่มวลรวมละเอียด

Jang et al. (2016) ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 25 และ 50 ที่อายุ 3, 28 และ 91 วัน จากตารางที่ 2.4 พบว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตามีค่ากำลังอัดสูงที่สุดทุกอายุของคอนกรีต และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 25 ที่อายุ 3 วัน กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดร้อยละ 50 แต่เมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 50 กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงกว่า

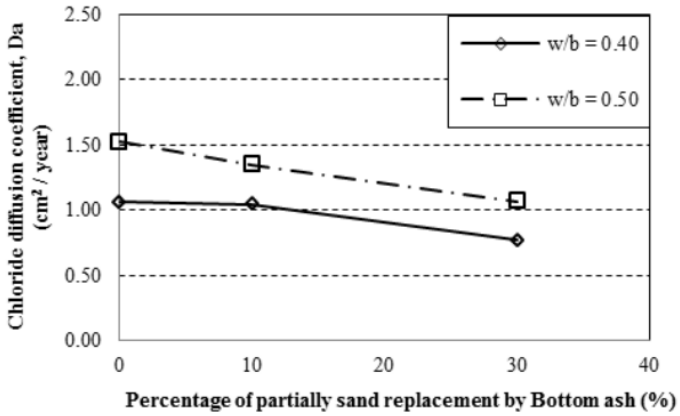
ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบของ

Specimens	Mass proportion						
	Paste				Aggregate		
	Water	OPC	Fly ash	BFS	Sand	BA	ES
REF	0.50	1.00			2.50		
BA25	0.50	1.00			1.88	0.46	
BA50	0.50	1.00			1.25	0.93	
ES25	0.50	1.00			1.88		0.47
ES50	0.50	1.00			1.25		0.93
FC	0.50	0.80	0.13		2.50		
SC	0.50	0.60		0.36	2.50		

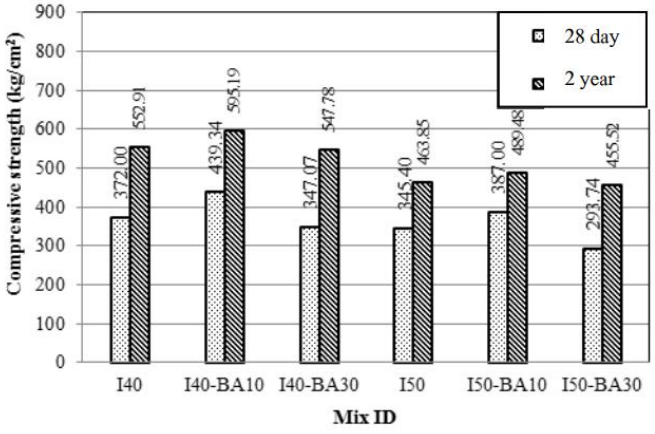
ตารางที่ 2.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ

Specimens	Compressive strength, MPa (Standard deviation)			Relative value		
	3 days	28 days	91 days	3 days	28 days	91 days
REF	13.23 (0.78)	29.56 (3.30)	39.00 (1.22)	1.00	1.00	1.00
BA25	10.78 (1.70)	25.28 (2.35)	34.59 (3.14)	0.81	0.86	0.89
BA50	8.62 (0.61)	26.56 (1.62)	35.87 (2.04)	0.65	0.90	0.92
ES25	12.84 (1.03)	27.64 (2.56)	44.00 (1.19)	0.97	0.93	1.13
ES50	12.74 (0.61)	31.56 (0.29)	45.47 (1.36)	0.96	1.07	1.17
FC	7.74 (0.61)	16.17 (0.29)	27.24 (3.34)	0.59	0.55	0.70
SC	6.76 (0.78)	18.23 (0.78)	33.91 (1.19)	0.51	0.62	0.87

ศักดิ์จุฬา นามจันทร์ (2559) ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 10 และ 30 ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล และใช้เถ้าก้นเตาที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำ 18.4% จากภาพที่ 2.14 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้ากนเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลงเมื่อปริมาณการแทนที่มากขึ้นจนถึงร้อยละ 30 เนื่องจากความสามารถเก็บกักน้ำไว้ของอนุภาคของเถ้าก้นเตาจึงทำให้การดึงดูดแคปพิวลารีเข้าสู่คอนกรีตลดลง จากภาพที่ 2.15 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายร้อยละ 10 มีกำลังอัดมากขึ้น แต่ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด มากจากการปรับปรุงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์บริเวณรอบอนุภาคของเถ้าก้นเตาให้มีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์บริเวณรอบอนุภาคทราย เนื่องจากผลของการบ่มภายในเถ้าก้นเตา และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่แทรกตัวอยู่



ภาพที่ 2.14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด



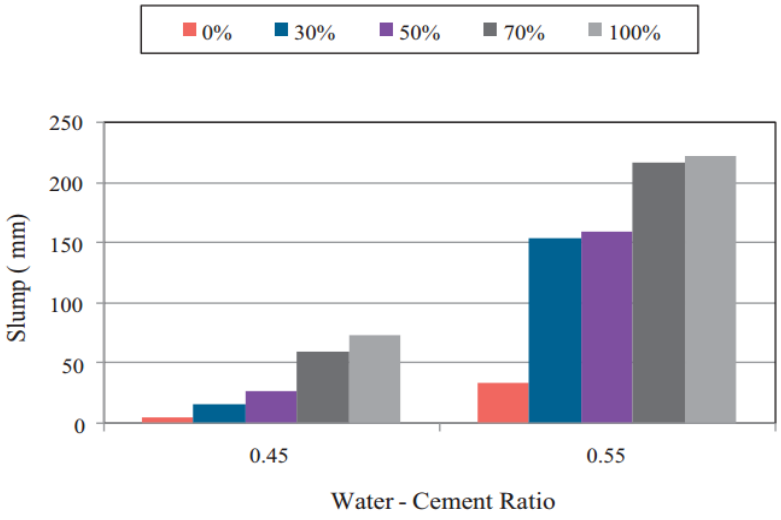
ภาพที่ 2.15 ค่ากำลังของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด

Bai et al. (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด จากภาพที่ 2.16 พบว่า เมื่อใส่เถ้าก้นเตาในอัตราส่วนที่มากขึ้นค่าการยุบตัวของคอนกรีต มีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

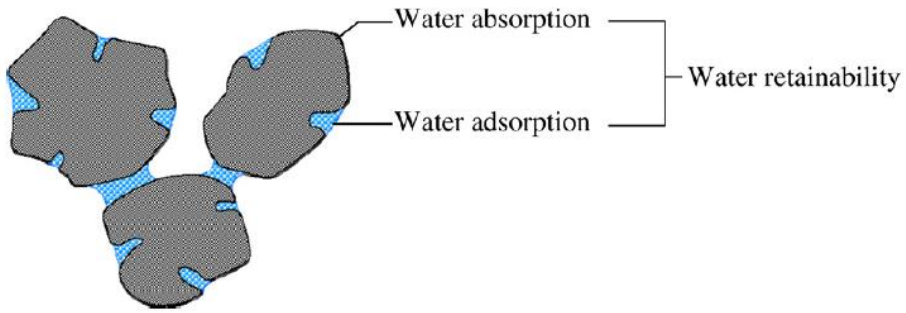
Mix id.	Free	Sand replacement level (%)	Cement (kg/m^3)	Aggregate		
				Nateural sand (kg/m^3)	FBA sand (kg/m^3)	Coarse aggregate (kg/m^3)
0.45-0-0	0.45	0	0.12	0.244	0	0.454
0.45-0-30	0.45	30	0.12	0.138	0.107	0.454
0.45-0-50	0.45	50	0.12	0.087	0.157	0.454
0.45-0-75	0.45	75	0.12	0.047	0.197	0.454
0.45-0-100	0.45	100	0.12	0	0.244	0.454
0.55-0-0	0.55	0	0.12	0.231	0	0.429
0.55-0-30	0.55	30	0.12	0.13	0.101	0.429
0.55-0-50	0.55	50	0.12	0.082	0.149	0.429
0.55-0-75	0.55	75	0.12	0.044	0.187	0.429
0.55-0-100	0.55	100	0.12	0	0.231	0.429

Mix proportion (volume)

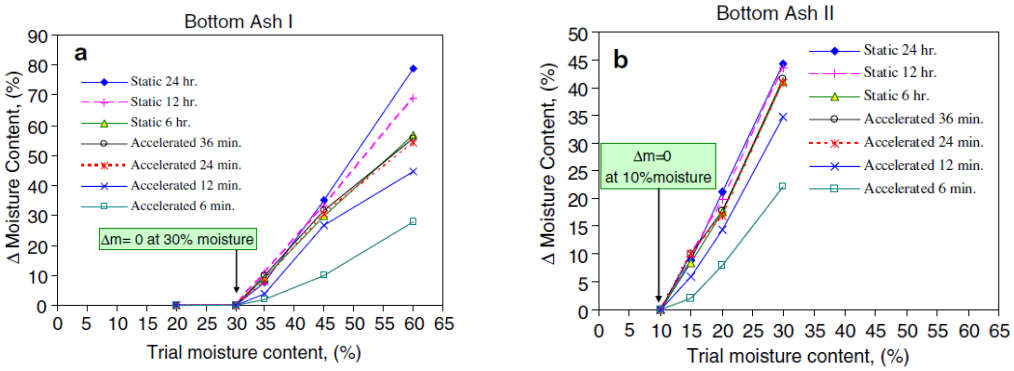


ภาพที่ 2.16 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

Kasemchaisiri and Tangtermsirikul (2007) ได้กล่าวว่าโดยทั่วไปวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด เช่น ทรายไม่สามารถใช้กับเถ้าก้นเตาได้ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีแรงเสียดทานพื้นผิวสูงแม้ในสภาวะที่แห้ง ดังนั้นจึงใช้ค่าความสามารถเก็บกักน้ำ (Water retainability) แทนค่าการดูดซึม โดยความสามารถเก็บกักน้ำหมายถึง ปริมาณน้ำที่เติมเต็มช่องว่างในวัสดุพรุน (Water absorbtion)รวมทั้งน้ำที่ถูกยึดจับไว้ที่ร่องพื้นผิว (water adsorption) ของวัสดุพรุนภายใต้แรงโน้มถ่วง ดังภาพที่ 2.17

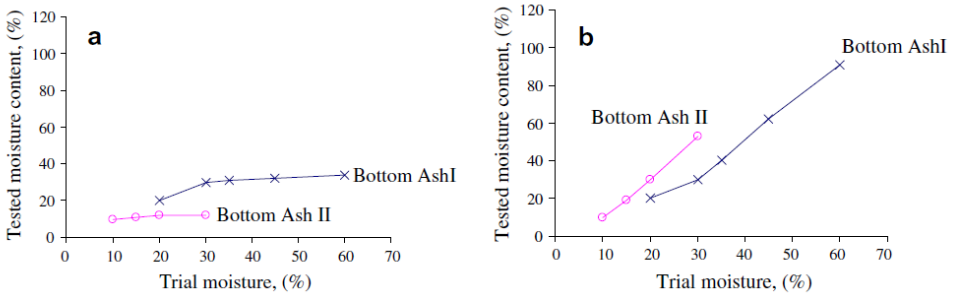


ภาพที่ 2.17 WATER RETAINABILITY ของเถ้าก้นเตา

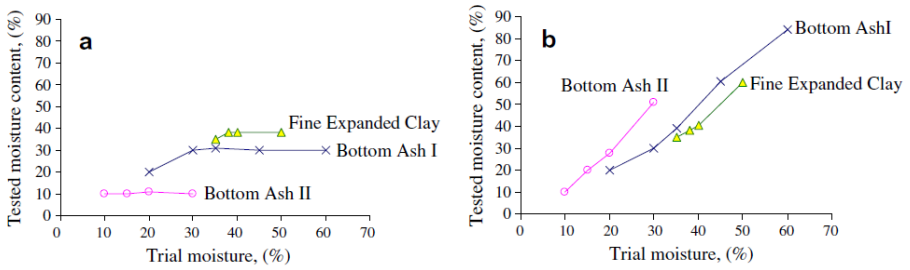


ภาพที่ 2.18 การทดสอบหา water retainability โดย Proposed method และการทดสอบหา absorption โดย ASTM C 128

สังเกตได้ว่าเส้นโค้งของ Accelerated มีแนวโน้มเช่นเดียวกับของ Statics แต่เส้นโค้งการทดสอบระยะเวลา 6 และ 12 นาที มีความแตกต่างความชื้นของค่าความชื้นของทดลองทั้งหมด และสำหรับการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดจึงเป็นข้อเสนอแนะว่าระยะเวลาการทดสอบขั้นต่ำสำหรับ Accelerated ควรใช้เวลา 24 นาที ความสัมพันธ์ระหว่าง Moisture content และ trial moisture จะแสดงในภาพ 2.19 และ 2.20 แสดงให้เห็นว่าหลังจากการทดสอบแบบ Statics ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และการทดสอบแบบ Accelerated ที่ระยะเวลา 24 นาที ตามลำดับ ความชื้นของส่วนบนของ bottom ash เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และมีความคงที่ , ความชื้นของส่วนล่างเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง มีการเพิ่มปริมาณความชื้นในการทดลองเนื่องจากน้ำส่วนเกินสะสมที่ส่วนล่าง ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าโดยวิธีการทดสอบนี้ มีปริมาณน้ำในการทดลองสูงกว่าที่เถ้าก้นเตาสามารถการกักเก็บน้ำ ดังนั้นจึงใช้ส่วนบนในการทดสอบหาความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moisture content และ trial moisture โดยวิธี statics ระยะเวลา 6 ชั่วโมง (a) ส่วนบน และ (b) ส่วนล่าง



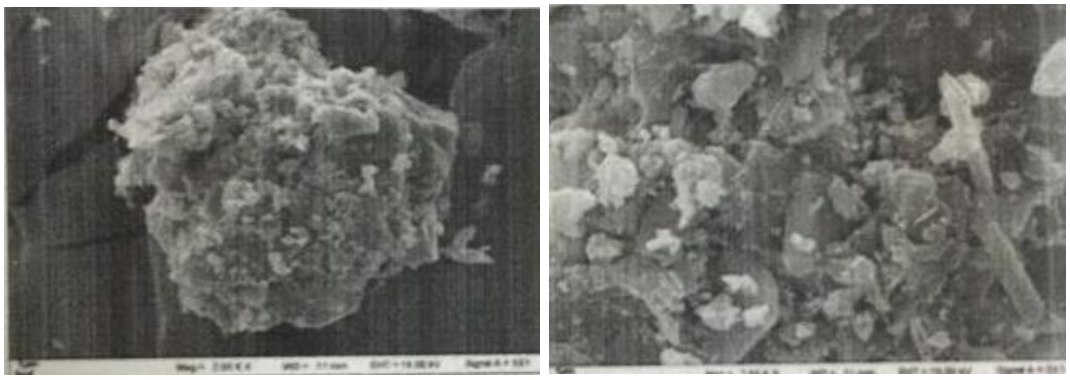
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moisture content และ trial moisture โดยวิธี Acceleratedระยะเวลา 24 นาที (a) ส่วนบน และ (b) ส่วนล่าง

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานและวัสดุผสมชนิดต่างๆ เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลในระยะยาวเพื่อนำมาทำการทดสอบ และส่วนที่ 2 คือการทดสอบ โดยมีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีต งานวิจัยนี้ ได้นำตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลขึ้นมาทำการทดสอบภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 ปี

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีต หรือใช้ในงานก่อสร้างตามปกติ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพดังตาราง 3.1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อถูกถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงดังภาพ 3.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน แต่ใกล้เคียงกับเถ้าลอย



ก) กำลังขยาย 2,500 เท่า ข) กำลังขยาย 7,500 เท่า

ภาพที่ 3.1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2. เถ้าลอย (Fly ash, FA) เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในแต่ละปีมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ซึ่งในประเทศไทยเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากมีซิลิกา หรือ อะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ในงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นเถ้าลอยเกรด มอก.ขั้นคุณภาพ 2 ข. (Cao>10%) ASTM class F (SiO_2+Fe_2O_3+Al_2O_3 >70%)

3.1.3. ผงหินปูน (Limestone powder, L) ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ (Filler) ของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้จะใช้ผงหินปูนของบริษัท Surint Omya จำกัด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ผงหินปูน เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

Chemical compositions (% by weight)	ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ ประเภทที่ 1	ผงหินปูน Limestone powder, LP	เถ้าลอย Fly ash, FA (Mae Moh)	เถ้าก้นเตา Bottom ash, BA (Mae Moh)
Silicon dioxide, SiO_2	19.51	0.46	40.93	36.29
Aluminum oxide, Al_2O_3	4.97	0.06	22.42	19.96
Iron oxide, Fe_2O_3	3.78	0.03	13.64	14.56
Calcium oxide, CaO	65.38	55.25	13.63	20.84
Magnesium oxide, MgO	1.08	0.37	2.93	1.96
Sulfur Trioxide, SO_3	2.16	< 0.01	1.92	0.96
Loss on ignition, LOI	0.01	43.79	0.46	1.36
Sodium oxide, Na_2O	0.44	< 0.01	0.89	0.77
Potassium oxide, K_2O	2.27	0.01	2.39	2.61
Titanium Dioxide, TiO_2	72.9	< 0.01	0.43	0.50
Tricalcium silicate, C_3S	0.9	-	93	-
Phosphorus pentoxide P_2O_5	6.8	0.01	0.15	0.18
Free CaO	11.5	-	0.22	-
Physical properties				
Blaine Fineness (cm^2g)	3,550	8,840	2,460	-
Specific gravity	3.15	2.69	2.20	1.78

3.1.4. เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

เถ้าก้นเตาที่ใช้คือ-BA-MM Unit8-13 April เป็นเถ้าก้นเตาที่เก็บจากโรงไฟฟ้าหน่วยที่ 8 จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังภาพที่ 3.2 (เถ้าก้นเตาชนิด BA)

ภาพที่ 3.2 เถ้าก้นเตาชนิด BA

ภาพที่ 3.3 ขนาดคละของเถ้าก้นเตาแต่ละชนิด

จากภาพที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าขนาดคละของทรายและเถ้าก้นเตา มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตา

คุณสมบัติ	เถ้าก้นเตา
ความถ่วงจำเพาะ	1.78
ความสามารถในการเก็บกักน้ำ(%)	37.7

3.1.5. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายบกจากจังหวัดชลบุรีที่ได้ทำการทดสอบขนาดคละแล้วพบว่าทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นเป็นทรายที่มีขนาดคละที่ดี จึงสามารถนำทรายนี้ไปใช้ในการทดสอบได้ทันที โดยไม่ต้องทำการคัดแยกขนาดของทรายอีก ในงานวิจัยนี้ใช้ทรายบกในทุกส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

ตารางทที่ 3.3 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง
เบอร์ 4	13.4	2.68	2.68	97.32
เบอร์ 8	68.5	13.70	16.38	83.62
เบอร์ 16	162.4	32.48	48.86	51.14
เบอร์ 30	87.8	17.56	66.42	33.58
เบอร์ 50	63.8	12.76	79.18	20.82
เบอร์ 100	50.1	10.02	89.20	10.80
รวม	500.0	100		

3.1.6. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูน (Lime stone) เมื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดคละพบว่ามีขนาดคละที่ดี จึงสามารถนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการแยกขนาด ในงานวิจัยนี้ใช้หินปูนในทุกส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

ตารางทที่ 3.4 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง
1”	-	-	-	100
3/4”	23.10	2.31	2.31	97.69
1/2”	582.0	58.23	60.54	39.46
3/8”	284.2	28.44	88.98	11.02
เบอร์ 4	99.2	9.92	98.9	1.1
เบอร์ 8	0.6	0.06	98.96	1.04
รวม	999.4	100		

3.1.7. น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตใช้น้ำประปาในห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีตและวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

1. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20×20×20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต

2. อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ดังภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

3. เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิมิตร ยาว 50 มิลลิเมตร สำหรับฝังในตัวอย่างคอนกรีต ดังภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3. 6 เหล็กกลมผิวเรียบ

4. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.02 กิโลกรัม ดังภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.2 กิโลกรัม

5. เครื่องผสมคอนกรีต

เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Drum mixer ถูกใช้ในการผสมคอนกรีตในการศึกษานี้ ดังภาพที่ 3.8

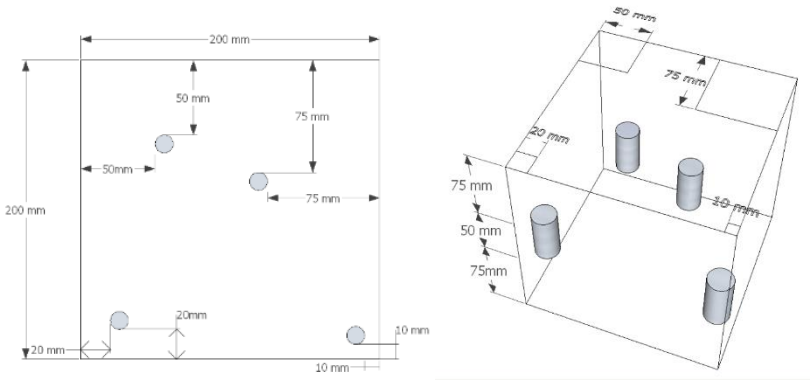
ภาพที่ 3.8 เครื่องผสมคอนกรีต

6. เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต ดังภาพที่ 3.9

ภาพที่ 3.9 เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต

3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 20×20×20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ใช้อัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดที่ 0.10 และ 0.30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่ 0.20 และ 0.30 และอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสานที่ 0.10 โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ซึ่งการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนและเถ้าลอยแทนที่ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่านั้น ทำการฝังเหล็กเสริมโดยใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) เท่ากับ 1 , 2 , 5 และ 7.5 ซม. โดยใช้อุปกรณ์กำหนดระยะฝังเหล็กเสริมโดยมีรายละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 3.10 จากนั้นทำการถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วันจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 3.10 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการวางเหล็กเสริม

ตารางทที่ 3.5 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล

No.	Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m^3)						
			Binder			Water	Bottom ash (SSD)	Sand (SSD)	Rock (SSD)
			Cement	Fly ash	Limestone				
1	I45	0.45	439	-	-	197	-	742	995
2	I45BA10	0.45	439	-	-	197	51	668	995
3	I45BA30	0.45	439	-	-	197	154	519	995
4	I45F30BA10	0.45	307	132	-	197	50	652	971
5	I45F30BA30	0.45	307	132	-	197	150	507	971
6	I45F20L10	0.45	307	88	44	198	-	725	973
7	I45F20L10BA10	0.45	307	88	44	198	50	653	973
8	I45F20L10BA30	0.45	307	88	44	198	150	508	973

I45 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตใช้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

BA10 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ร้อยละ 10

BA30 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ร้อยละ 30

F30 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าเถ้าลอย ร้อยละ 30

F20 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าเถ้าลอย ร้อยละ 20

L10 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10

ตัวอย่างเช่น I45F20L10BA30 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าเถ้าลอย ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 และมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ร้อยละ 30

3.3 สถานที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อม

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อม ใช้พื้นที่บริเวณห่างจากใต้ศาลาวัดโกมุทวัฒนารามลึกลงไปในทะเลประมาณ 10 เมตร ดังภาพที่ 3.11 ซึ่งอยู่ในตำบลอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ในงานวิจัยนี้จะนำตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลระยะเวลา 2 ปี มาใช้ในการศึกษาสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณที่ทิ้งตัวอย่างคอนกรีต พบว่ามีระดับน้ำทะเลขึ้นและลงวันละ 2 รอบ คือตอนเช้าน้ำทะเลมีระดับสูงสุด จากนั้นเวลาบ่ายน้ำทะเลลดลงต่ำสุดจนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้ง และช่วงเย็นน้ำทะเลขึ้นสูงสุดอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ระยะเวลาขึ้นลงของน้ำทะเลเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่นฤดูหนาวน้ำทะเลขึ้นสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียกนานกว่าฤดูอื่น ๆ หรือคอนกรีตไม่ได้อยู่ในสภาวะแห้งสนิท

ภาพที่ 3.11 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

3.4.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้การทดสอบ

1. เครื่องเจาะตัวอย่าง

เครื่องเจาะตัวอย่าง ใช้สำหรับเจาะตัวอย่างคอนกรีต เพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์และทดสอบกำลังอัด ดังภาพที่ 3.12

ภาพที่ 3.12 เครื่องเจาะตัวอย่างคอนกรีต

2. เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต

เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบใช้สำหรับตัดตัวอย่างคอนกรีตออกเป็นแผ่นเพื่อใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 3.13

ภาพที่ 3.13 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต

3. ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ ดังภาพที่ 3.14

ภาพที่ 3.14 ครกหินบดตัวอย่าง

4. เครื่อง Auto titration รุ่น Tritroline 7000 ดังภาพที่ 3.15

ภาพที่ 3.15 เครื่อง Auto titration รุ่น tritoline 7000

5. TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ดังภาพที่ 3.16

ภาพที่ 3.16 TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar

6.เครื่องดูด (Suction apparatus) ดังภาพที่ 3.17

ภาพที่ 3. 17 เครื่องดูด

7. เครื่องต้ม (Hot plate) ดังภาพที่ 3.18

ภาพที่ 3. 18 เครื่องต้ม

8. กระดาษกรองเนื้อหยาบ ดังภาพที่ 3.19

ภาพที่ 3.19 กระดาษกรองเนื้อหยาบ

9. ช้อนตักสาร ดังภาพที่ 3.20

ภาพที่ 3.20 ช้อนตักสาร

10. บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3.21

ภาพที่ 3.21 บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร

11. กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3.22

ภาพที่ 3. 22 กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร

12. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3.23

ภาพที่ 3.23 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร

13. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละอียด 0.01 กรัม ดังภาพที่ 3.24

ภาพที่ 3.24 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละอียด 0.01 กรัม

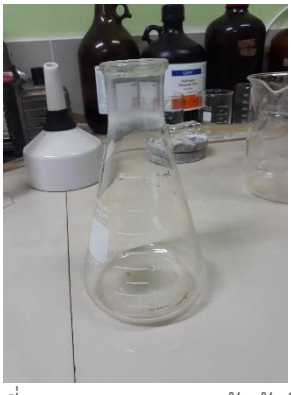
14. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ดังภาพที่ 3.25

ภาพที่ 3.25 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละอียด 0.0001 กรัม

15. กรวย (BUCHNER FUNNEL) ดังภาพที่ 3.26

ภาพที่ 3.26 กรวย

16. ขวดกรองแก้วก้นโปร่ง (Filtration flank) ดังภาพที่ 3.27

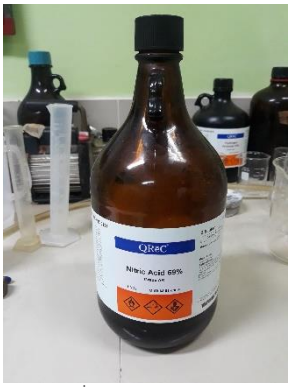


ภาพที่ 3.27 ขวดกรองแก้วก้นโปร่ง

17. ตะแกรงเบอร์ 20 ดังภาพที่ 3.28

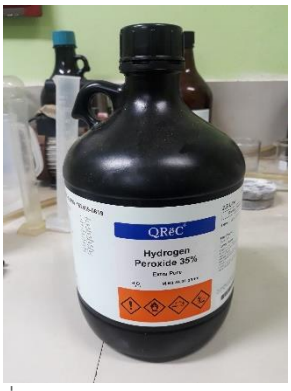
ภาพที่ 3.28 ตะแกรงเบอร์ 20

18. กรดไนตริก (NITRIC ACID) ดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.29 กรดไนตริก

19. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ดังภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.30 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

20. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N Sodium chloride (NaCl) ดังภาพที่ 3.31

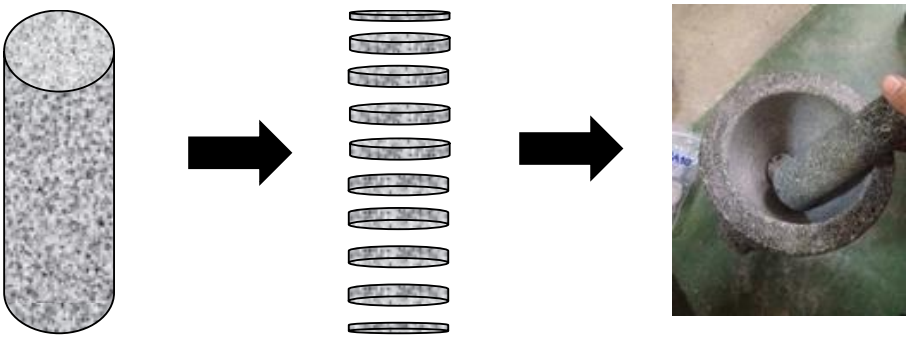
ภาพที่ 3. 31 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N SODIUM CHLORIDE (NACL)

21. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N Silver nitrate ($AgNo_3$) ดังภาพที่ 3.32

ภาพที่ 3.32 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N Silver nitrate ($AgNo_3$)

3.4.1.2 การเตรียมผงตัวอย่างคอนกรีตก่อนการไตเตรท

นำตัวอย่างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลแล้วเป็นระยะเวลา 2 ปี มาทำการเจาะด้วยเครื่องเจาะคอนกรีต โดยทำการเจาะจากผิวหน้าคอนกรีตลึกลงไป และเพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 2 ตัวอย่าง แล้วนำแท่งคอนกรีตที่เจาะมาจากคอนกรีตนั้น ตัดแบ่งเป็นชิ้น ความหนา 10 มิลลิเมตร ลึกลงไปจากผิวหน้าเป็นจำนวน 10 ชิ้น ดังภาพที่ 3.33 นำตัวอย่างผงคอนกรีตที่ได้จากการบดมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แล้วนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method foracid-soluble chloride in mortar and concrete) และปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ทำการไตเตรทโดยการใช้เครื่องไตรเตรทอัตโนมัติ ซึ่งเครื่องทดสอบจะพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า “Potentiometric titration”



ภาพที่ 3. 33 การเตรียมผงตัวอย่างคอนกรีตก่อนการไตเตรท

3.4.1.3 วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride)

1) ชั่งตัวอย่างในลักษณะที่เป็นผงคอนกรีตประมาณ 5 กรัม โดยชั่งแล้ว นำมาใส่ในบีกเกอร์ ดังภาพที่ 3.34

ภาพที่ 3.34 การชั่งผงคอนกรีต 5 กรัม

2) เติมน้ำกลั่นลงไป 75 มิลลิลิตรแล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจางแล้ว 25 มิลลิลิตรตามลงไปทันที โดยค่อย ๆ เติมลงไป ดังภาพที่ 3.35 คอยคนก้อนตัวอย่างที่จับตัวเป็นก้อน (LUMPS) ให้แยกออกจากกัน

ภาพที่ 3.35 การเติมน้ำกลั่น และสารละลายกรดลงในตัวอย่าง

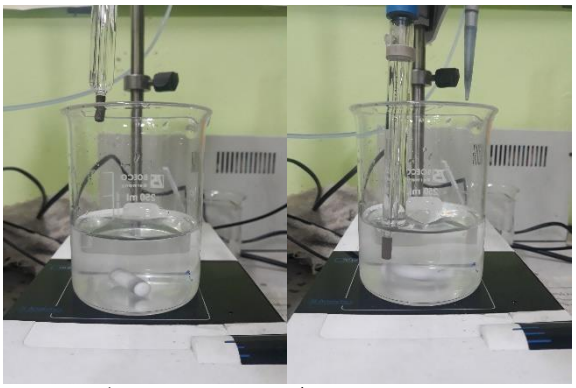
3) ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด ดังภาพที่ 3.36 จากนั้นนำออกจากเตาต้ม (HOT PLATE) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

ภาพที่ 3.36 การต้มตัวอย่าง

4) ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 เซนติเมตรด้วยน้ำกลั่นโดยใช้การกรองดูด (SUCTION FILTERING) ด้วยกรวย (BUCHNER FUNNEL) และขวดกรองแก้วก้นโป่ง (FILTRATION FLASK) ล้างบีกเกอร์ 2 ครั้งด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อยถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรและล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น สารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้องปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3.37

ภาพที่ 3. 37 การกรองสารละลาย

5) สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็ก TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10 มิลลิลิตร Buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 M ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย ดังภาพที่ 3.38

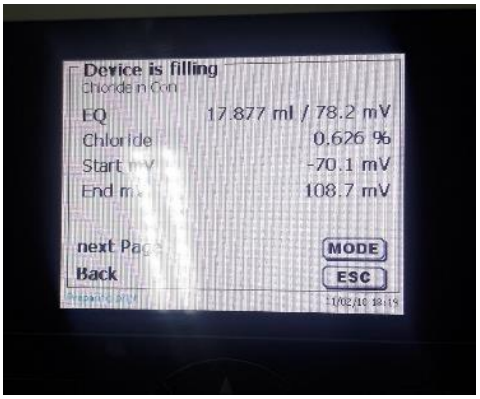


ภาพที่ 3.38 การใช้เครื่อง Auto titration

6) เครื่อง AUTO TITRATION จะทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ ดังภาพที่ 3.39 โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (END POINT) เครื่องAUTO TITRATION จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (SILVER NITRATE) ที่ใช้และประจุ

ภาพที่ 3.1 การไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์

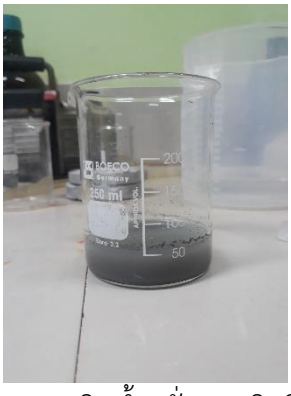
7) อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration ดังภาพที่ 3.40 บันทึกค่าที่ได้เป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride)



ภาพที่ 3.39 ผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration

การทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride)

1) นำตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะโดยชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3.34
2) เติมน้ำกลั่นลงไป 50 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจก ดังภาพที่ 3.41



ภาพที่ 3.2 การเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร

3) นำไปต้มให้เดือด 5 นาที ดังภาพที่ 3.36 ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
4) กรองด้วยแรงโน้มถ่วงหรือการดูดผ่านกระดาษเนื้อละเอียด จากนั้นถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรอง (Filtrate) ลงในบิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3.37
5) เติมสารละลายกรดไนตริกที่ Dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 มิลลิลิตรและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ลงไป 3 มิลลิลิตรลงในสารละลายที่ผ่านการกรองปิดบิกเกอร์ด้วยแผ่นกระจก แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ดังภาพที่ 3.42

ภาพที่ 3.3 การเติมสารละลายกรดไนติกและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในตัวอย่าง

6) ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บิกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเตาต้มสาร (Hot plate) รอจนตัวอย่างมีอุณหภูมิเย็นลง ดังภาพที่ 3.36
7) จากนั้นนำไปทดสอบโดยเครื่อง Auto titration จะทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุ
ดังภาพที่ 3.39
8) อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration บันทึกค่าที่ได้เป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Free chloride) ดังภาพที่ 3.40

3.4.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องเจาะตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.12
2. เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต ดังภาพที่ 3.13
3. กำมะถัน ดังภาพที่ 3.43

ภาพที่ 3.4 กำมะถัน

4. เครื่องปรับผิวหน้า ดังภาพที่ 3.44

ภาพที่ 3.5 เครื่องปรับผิวหน้าคอนกรีต

5. เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 3.45

ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.4.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำแท่งคอนกรีตที่เจาะออกมาจากตัวอย่างคอนกรีตมาตัดให้ได้สัดส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 2:1 นำกำมะถันไปให้ความร้อนจนละลายและเทลงไปในเครื่องปรับผิวหน้า รอให้กำมะถันแห้ง ดังภาพที่ 3.46 จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบเพื่อหากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39

ภาพที่ 3.7 การปรับผิวหน้าตัวอย่างด้วยกำมะถัน

3.4.2.3 วิธีทำการทดสอบ

นำแท่งคอนกรีตที่ทำการปรับผิวหน้าแล้ว มาทดสอบกำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 3.45 จะทำการทดสอบกำลังอัดจนได้ค่า Maximum

ภาพที่ 3.8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง

3.4.3 การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

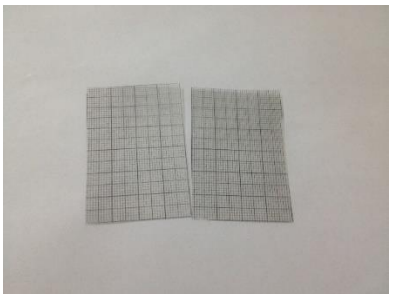
3.4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 3.45

2. ค้อน/ค้อนปอนด์ ดังภาพที่ 3.48

ภาพที่ 3.9 ค้อน/ค้อนปอนด์

3. แผ่นใส ดังภาพที่ 3.49



ภาพที่ 3.10 แผ่นใส

3.4.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการเจาะตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดและทดสอบหาปริมาณคลอไรด์แล้ว นำไปกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตให้เกิดรอย Crack ดังภาพที่ 3.50 จากนั้นนำไปทุบโดยใช้ค้อนปอนด์ ดังภาพที่ 3.51 ซึ่งคอนกรีต 1 ก้อน จะทำการฝังเหล็กเสริมโดยใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(Covering depth) เท่ากับ 1 , 2 , 5 และ 7.5 ซม. เมื่อทุบได้เหล็กเสริมได้ครบแล้ว นำไปหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมต่อไป

ภาพที่ 3.11 การนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปกดให้เกิดรอย CRACK

ภาพที่ 3.12 การทุบตัวอย่างคอนกรีต

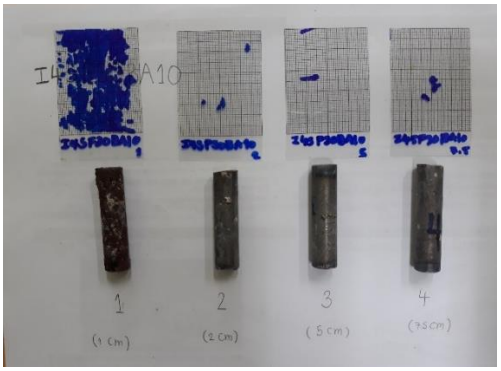
3.4.3.3 การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเกิดสนิมบริเวณรอบๆเหล็กเสริมได้ถูกพิจารณาด้วยการคำนวณพื้นที่การเกิดสนิมโดยการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1×1 ตารางมิลลิเมตร มาทาบรอบๆเหล็กเสริมแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม ดังภาพที่ 3.52 จากนั้นนับพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของเหล็กเสริม และนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด สามารถคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิมดังสมการ

$$\text{Corroded area (\%)} = \frac{\text{Corroded area of leteral surface}}{\text{Lateral surface area}} \times 100$$

โดยที่พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถหาได้ 2 วิธี ดังนี้

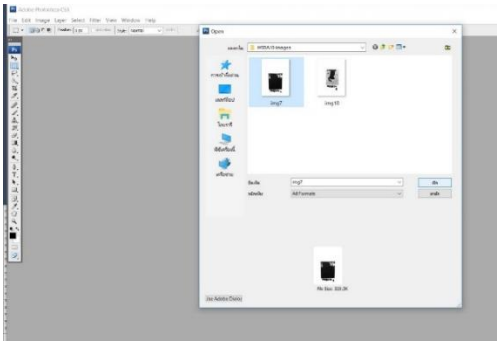
1. หาโดยการใช้การนับช่องตารางกราฟที่ระบายไว้ 1 ช่อง เท่ากับ 1 ตรารางมิลลิเมตร



ภาพที่ 3.13 ตัวอย่างเหล็กเสริมที่เกิดสนิม

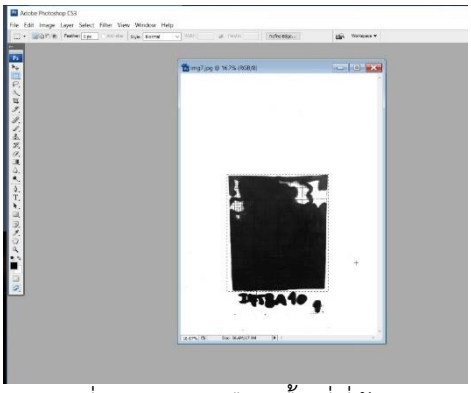
2. หาโดยการคำนวณพื้นที่การเกิดสนิมโดยใช้โปรแกรม Photoshop

2.1 เมื่อแสกนพื้นที่การเกิดสนิมจากเครื่องแสกนลงคอมพิวเตอร์แล้ว ให้ทำการแปลงไฟล์ให้เป็น JPG แล้วจึงเปิดไฟล์ในโปรแกรม Photoshop ดังภาพที่ 3.53



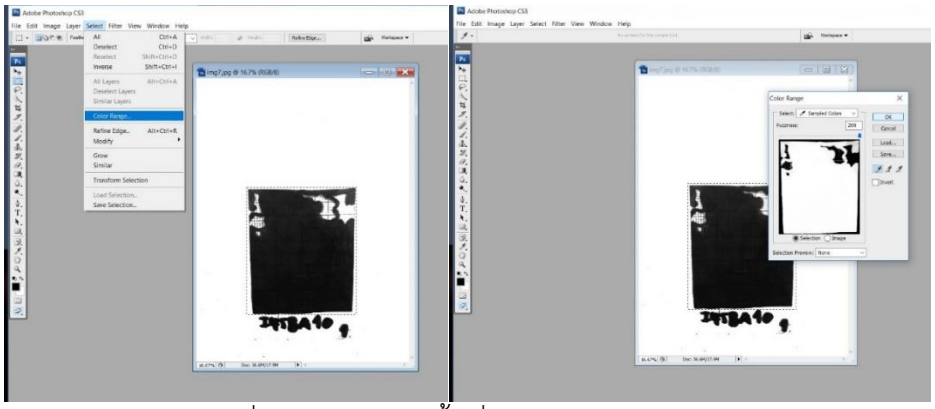
ภาพที่ 3.14 การเปิดไฟล์รูปภาพในโปรแกรม Photoshop

2.2 เลือกใช้เครื่องมือกรอบ เลือกบริเวณที่ต้องการ ดังภาพที่ 3.54



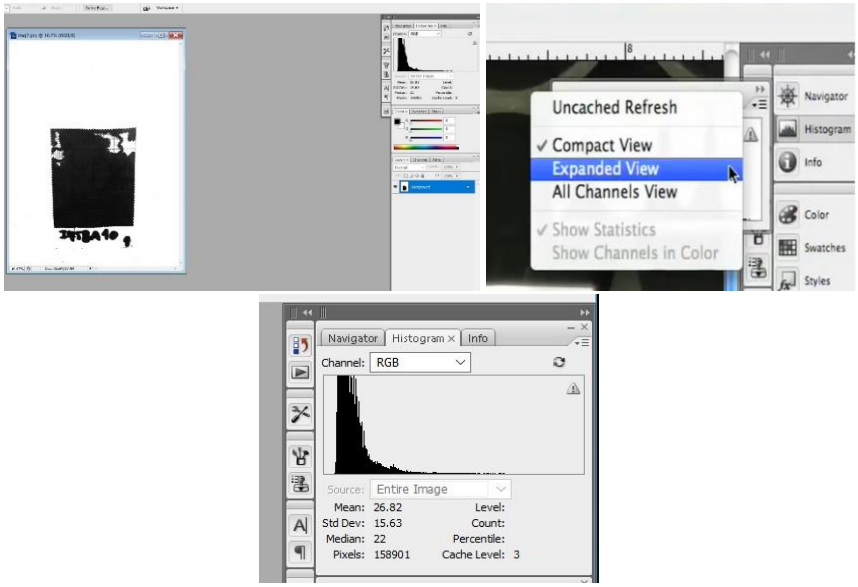
ภาพที่ 3.15 การเลือกพื้นที่ที่ต้องการ

2.3 เลือก Select→Color Range เลือก Selection แล้วปรับ Fuzziness ให้ใกล้เคียงกลับพื้นที่ที่ต้องการ จากนั้นกด OK ดังภาพที่ 3.55



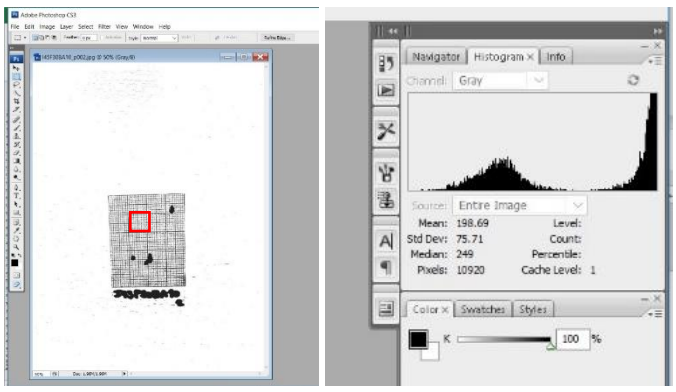
ภาพที่ 3.16 การปรับพื้นที่ให้ใกล้เคียงกับตัวอย่าง

2.4 เลือกแถบเครื่องมือทางด้านขวา ชื่อว่า Histogram จากนั้นเลือก Expanded View อ่านค่า Pixels ดังภาพที่ 3.56



ภาพที่ 3.17 การหาค่า Pixels ของพื้นที่การเกิดสนิม

2.5 เปิดไฟล์รูปใหม่ที่เห็นช่องตาราง เลือกตาราง 1 ช่อง แล้วทำแบบขั้นตอน 2.4 จากนั้นอ่านค่า Pixels ดังภาพที่ 3.57



ภาพที่ 3.18 การหาค่า Pixels ของพื้นที่ตาราง 1 ช่อง

3.4.4 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม

3.4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

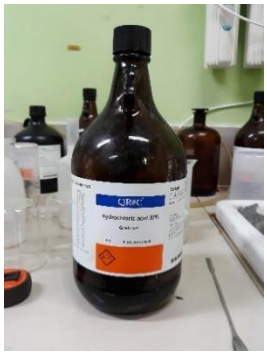
1. อ่างแช่ตัวอย่างเหล็กเสริม ดังภาพที่ 3.58

ภาพที่ 3.19 อ่างแช่ตัวอย่างเหล็กเสริม

2. Hexamethylenetetramine ดังภาพที่ 3.59

ภาพที่ 3.20 Hexamethylenetetramine

3. Hydrochloric Acid 37% ดังภาพที่ 3.60



ภาพที่ 3.21 Hydrochloric Acid 37%

4. น้ำกลั่น ดังภาพที่ 3.61

ภาพที่ 3.22 น้ำกลั่น

5. เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.01 g ดังภาพที่ 3.24

3.4.4.2 การเตรียมตัวอย่าง

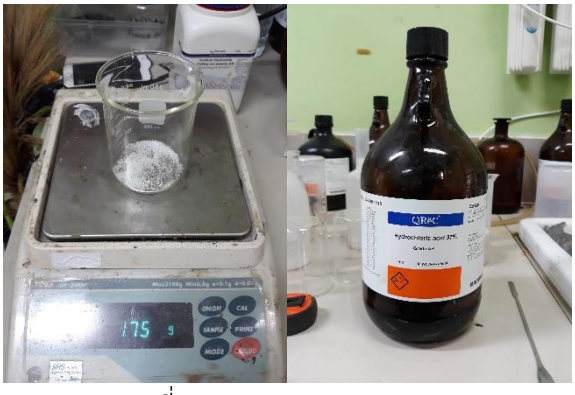
ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล นอกจากจะทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์แล้วในงานวิจัยนี้ยังทำการศึกษาการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล เมื่อทำการทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเสร็จแล้วนำตัวอย่างเหล็กเสริมมาทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเกิดสนิม

3.4.4.3 วิธีการทดสอบ

1. นำเหล็กเสริมมาทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำเหล็กไปแช่สารละลาย โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดในการชั่ง 0.01 กรัม ดังภาพที่ 3.62 เพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาดเนื่องจากการวางสลับตำแหน่งของเหล็กเสริม ในขณะแช่เหล็กเสริมลงในสารละลายกรด

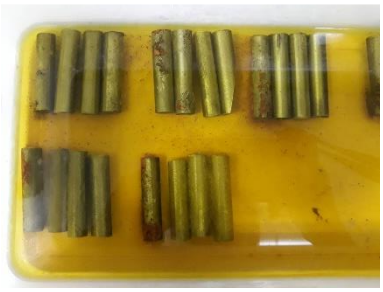
ภาพที่ 3.23 การชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของเหล็กเสริมก่อนนำไปแช่สารละลาย

2. ใส่ Hexamethylenetetramine 1.75 กรัม ลงไปในสารละลายกรด (กรดไฮโดรคลอริก 250 มิลลิลิตร+น้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร) ดังภาพที่ 3.63



ภาพที่ 3.24 การผสมสารละลาย

3. จากนั้นนำเหล็กไปแช่สารละลายกรด ดังภาพที่ 3.64 เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM G1 (Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens) แล้วนำขึ้นมาทำความสะอาด ชั่งน้ำหนักแล้วทำการบันทึกเป็นค่าน้ำหนักสุดท้าย ($\mathbf{w_f}$) โดยทำจนกว่าค้ำหนักสุดท้ายไม่ลดลงจากครั้งแรกที่แช่ในสารละลายกรดจึงจะนำค่าน้ำหนักสุดท้ายมาคำนวณการสูญสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss)



ภาพที่ 3.25 การแช่ตัวอย่างเหล็กเสริมลงในสารละลาย

สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Weight loss}(\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100$$

โดยที่ W_i = น้ำหนักเริ่มต้น (จากการชั่งก่อนนำมาฝังในตัวอย่างคอนกรีต)

W_f = น้ำหนักสุดท้าย

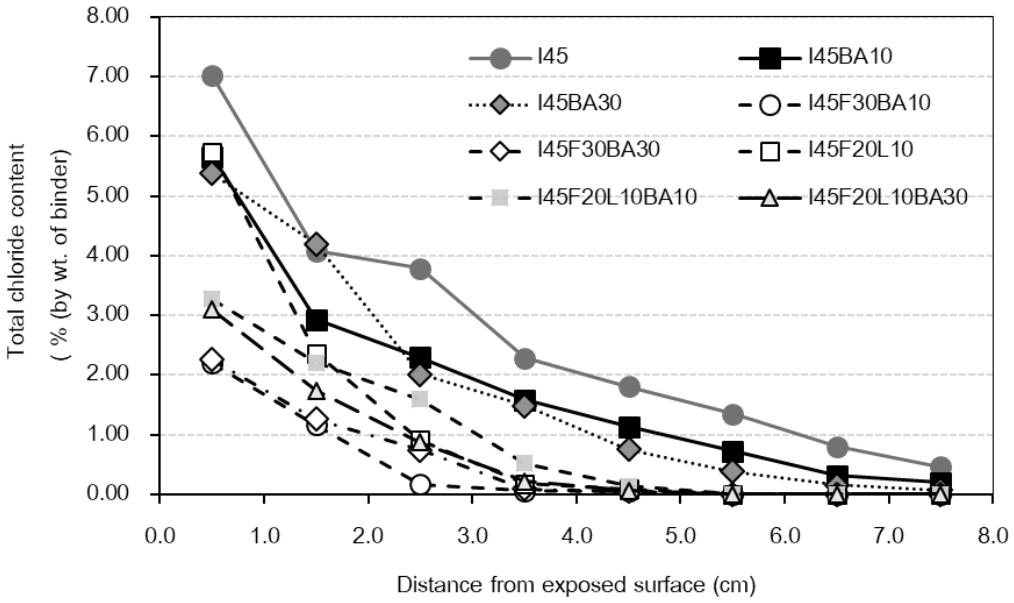
บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลกระทบต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Tatal chloride) ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) กับระยะทางจากผิวหน้าสัมผัสของคอนกรีต (Distance from exposed surface) หากคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในปริมาณน้อย แสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี

4.1.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต

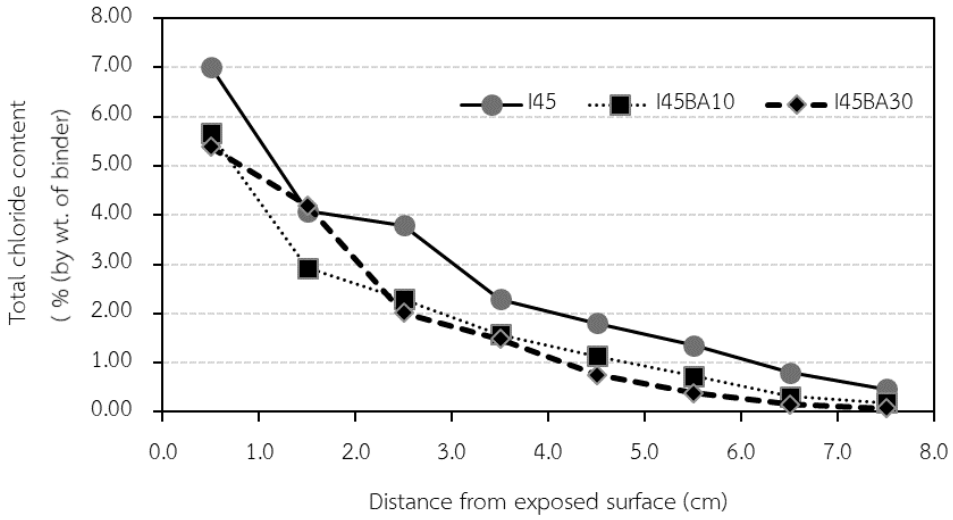
เมื่อพิจารณาส่วนผสมต่างๆของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลมรวมละเอียด, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร่วมกับเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร่วมกับเถ้าลอย และ ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน มีความสามารถในการต้านการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 คลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีต

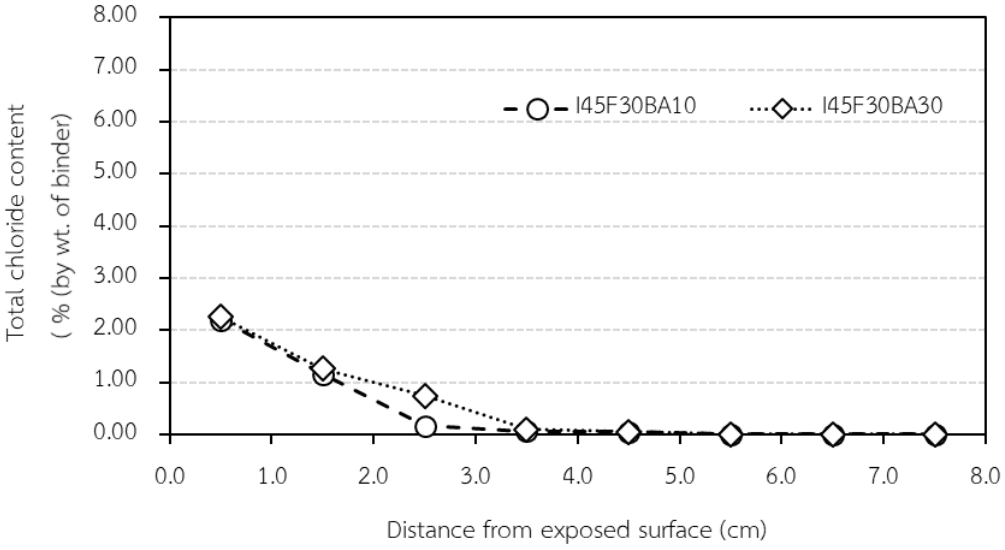
4.1.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้น้อยลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.2 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความสามารถการเก็บกักน้ำได้ดี จึงช่วยในเรื่องการบ่มภายในของเนื้อคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงทำให้คลอไรด์เข้าถึงได้ยาก



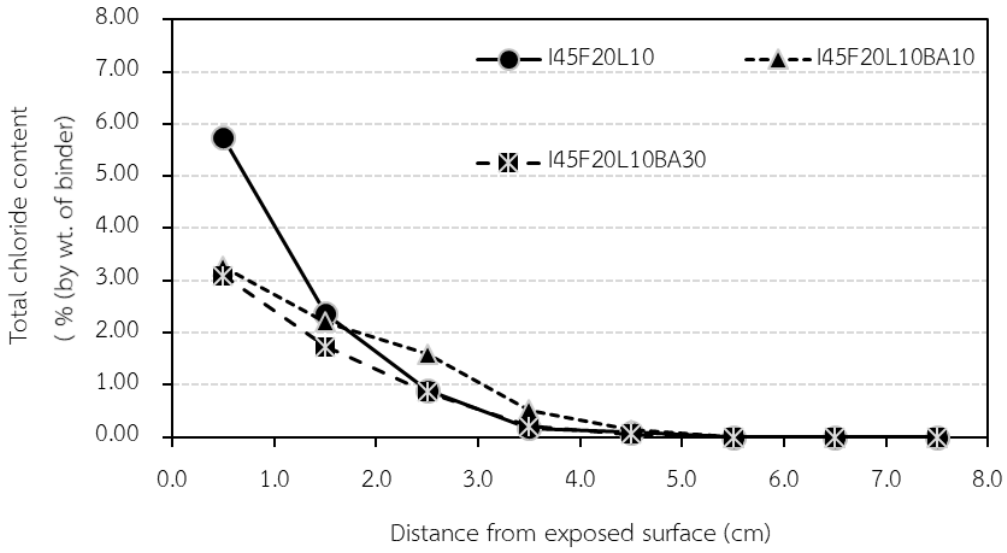
ภาพที่ 4.2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.3 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนมาก และเถ้าลอยจะช่วยอุดโพรงช่องว่างในเถ้าก้นเตา และเมื่อใส่เถ้าก้นเตาไปร้อยละ 10 ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยกว่าร้อยละ 30 จึงทำให้เถ้าลอยอุดโพรงช่องว่างได้ทั่วถึงกว่า



ภาพที่ 4.3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30

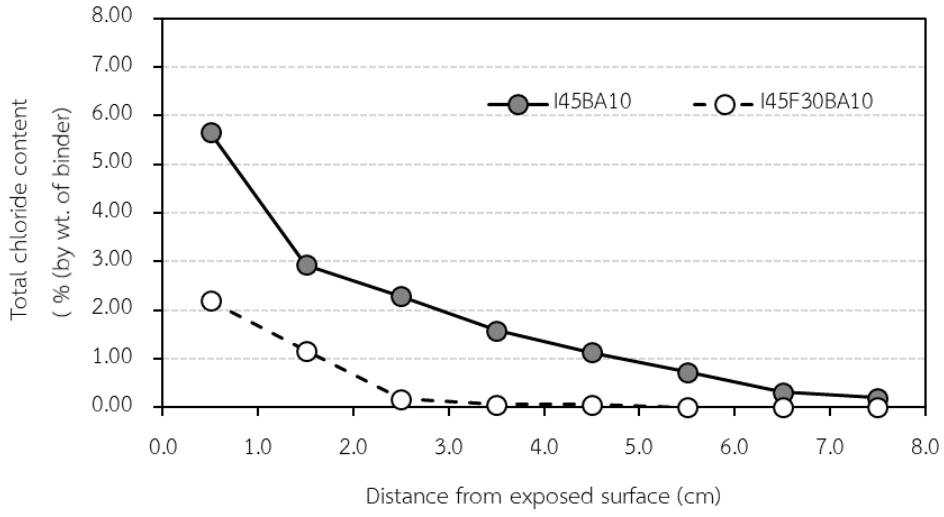
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.4 เนื่องจากไม่มีเถ้าก้นเตาผสมอยู่ด้วย จึงไม่มีความพรุนในคอนกรีต



ภาพที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10

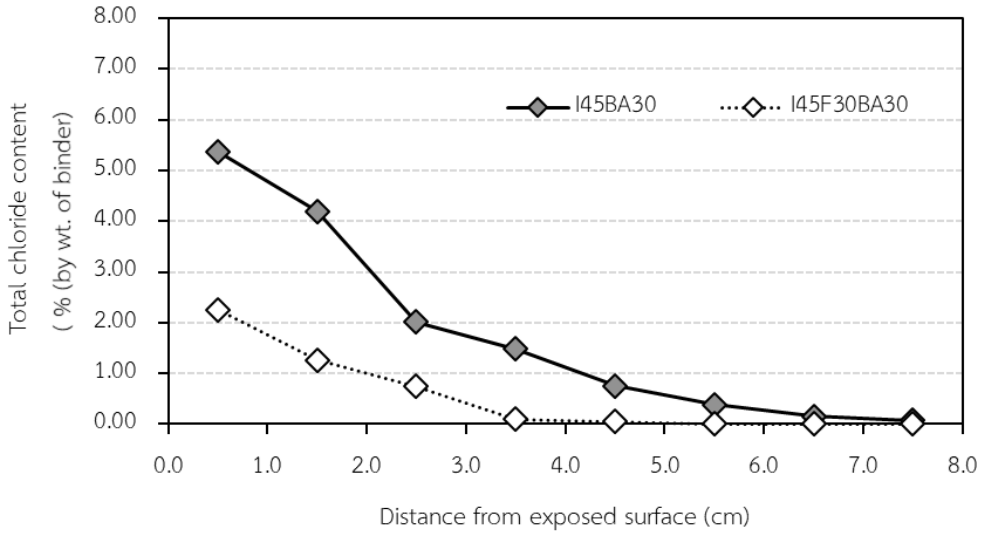
4.1.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.5 เนื่องจากเถ้าลอยจะช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา และเมื่อใส่เถ้าก้นเตาไปร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 จึงช่วยได้ดี เพราะใส่เถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่า



ภาพที่ 4.5 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

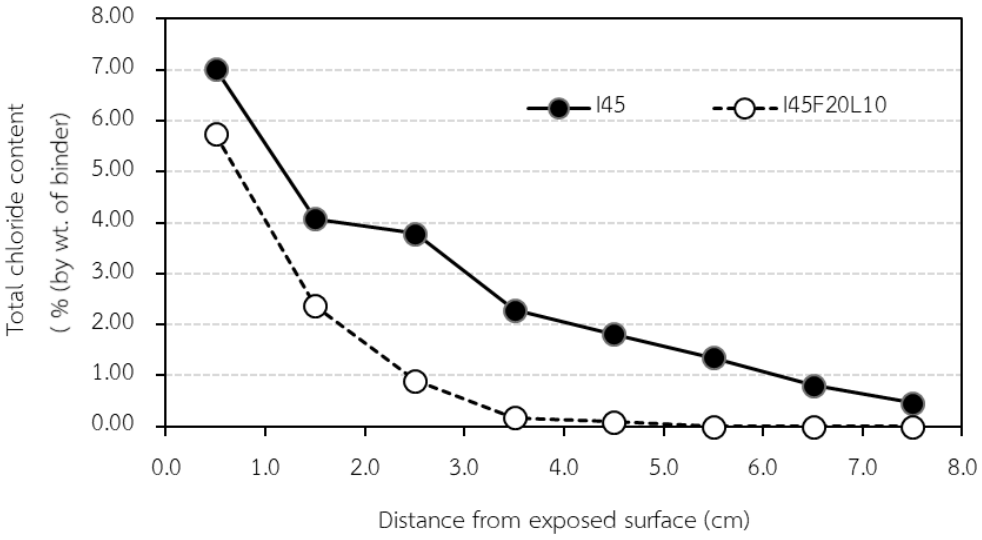
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.6 เนื่องจากเถ้าลอยจะช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา และเมื่อใส่เถ้าก้นเตาไปร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 จึงทำให้เถ้าลอยเข้าไปอุดโพรงช่องว่างของเถ้าก้นเตาได้พอดี



ภาพที่ 4.6 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

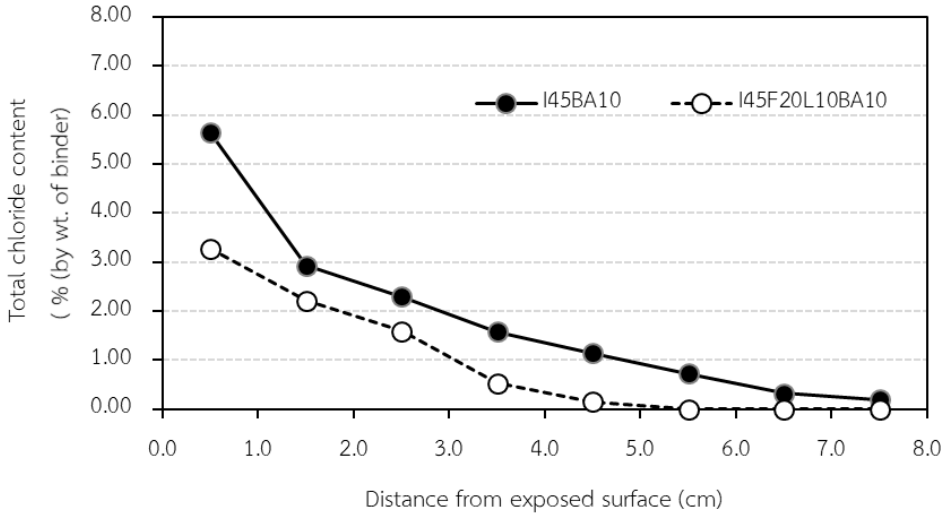
4.1.1.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.7 เนื่องจากเถ้าลอยจะช่วยเพิ่มความแน่นให้กับเนื้อคอนกรีต จึงทำให้คลอไรด์เข้าถึงคอนกรีตได้ยาก และมีความต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม



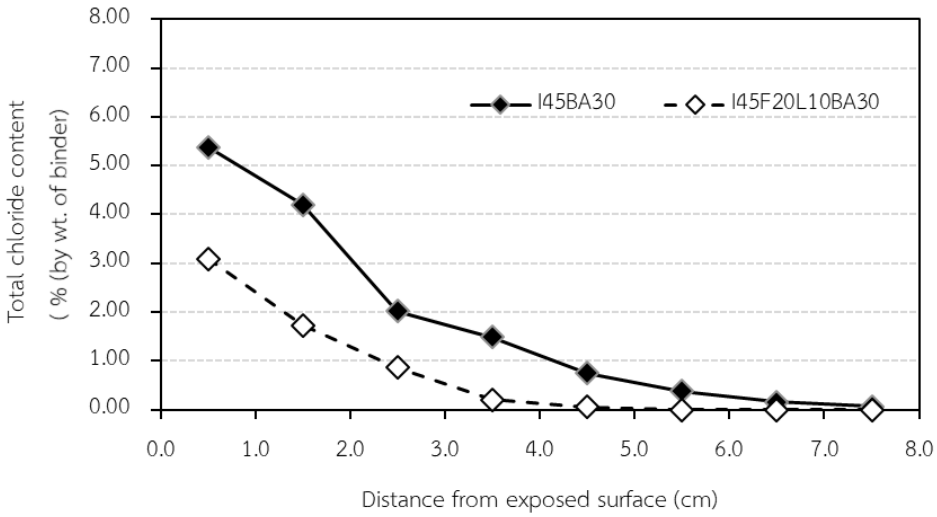
ภาพที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสุประสาน มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.8 เนื่องจากเถ้าลอยและผงหินปูนจะช่วยอุดโพรงช่องว่างของเถ้าก้นเตาในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น คลอไรด์จึงเข้าถึงได้ยาก



ภาพที่ 4.8 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

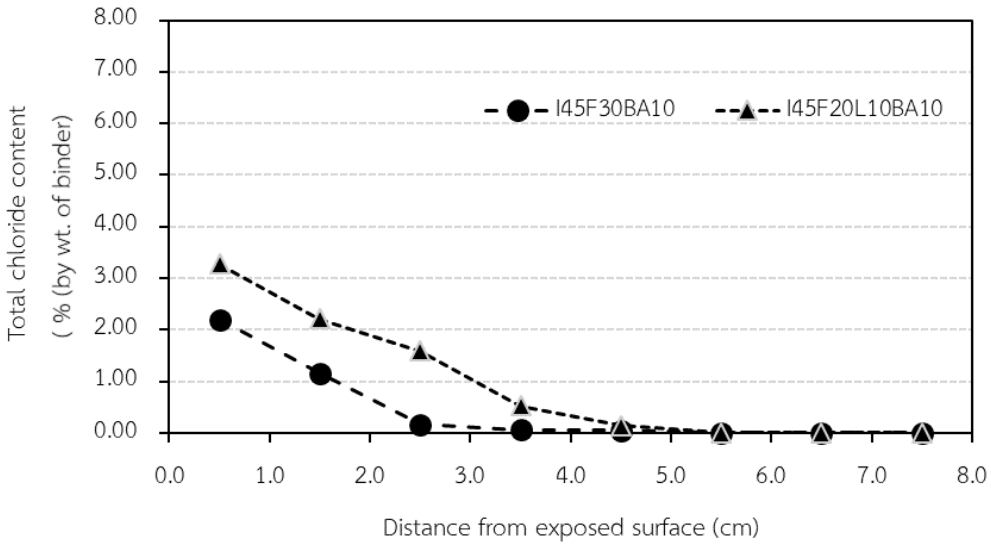
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.9 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และ ผงหินปูนเป็นตัว Filler ช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต จึงทำให้คุณสมบัติในเรื่องการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.9 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

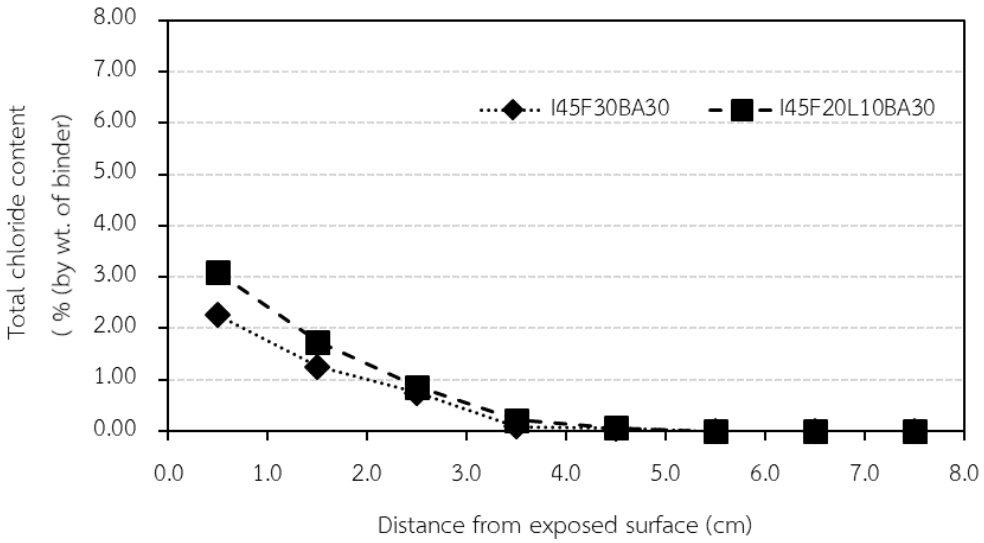
4.1.1.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.10 เนื่องจากเถ้าลอยจะช่วยอุดโพรงช่องว่างได้ดี แต่เมื่อใส่ร่วมกับผงหินปูนด้วย จะทำให้คอนกรีตหลวมขึ้นเพราะผงหินปูนไม่ได้เพิ่มความแน่นให้คอนกรีต เพราะฉะนั้นเมื่อใส่เถ้าลอยร้อยละ 30 จึงต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่า



ภาพที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด ดังภาพที่ 4.11 เนื่องจากเถ้าลอยจะช่วยอุดโพรงช่องว่างได้ดี แต่เมื่อใส่ร่วมกับผงหินปูนด้วย จะทำให้คอนกรีตหลวมขึ้นเพราะผงหินปูนไม่ได้เพิ่มความแน่นให้คอนกรีต เพราะฉะนั้นเมื่อใส่เถ้าลอยร้อยละ 30 จึงต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่า



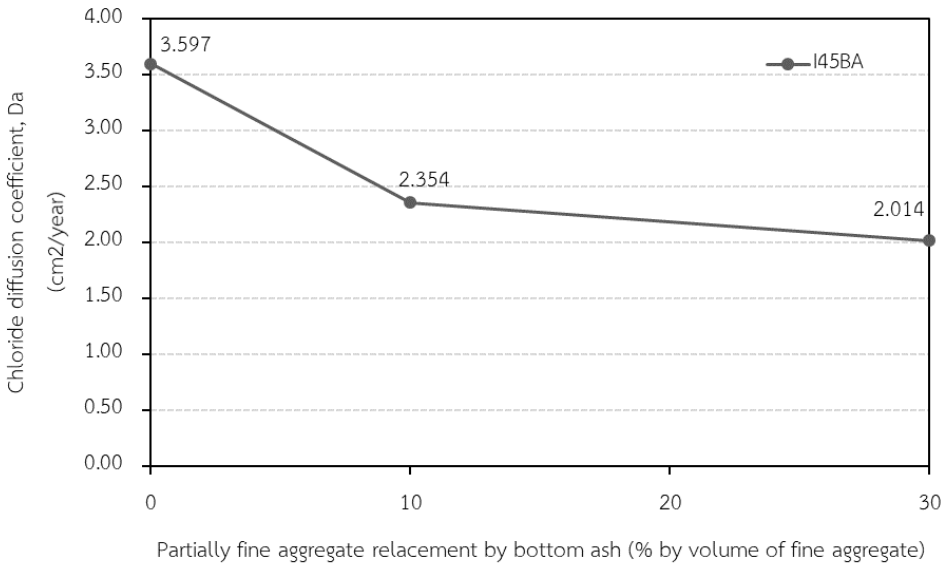
ภาพที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

เมื่อนำปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในแต่ละชั้นความลึกมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ตามสมการคำตอบข้อที่สองของ Fick จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีหน่วยตารางเซนติเมตรต่อปี

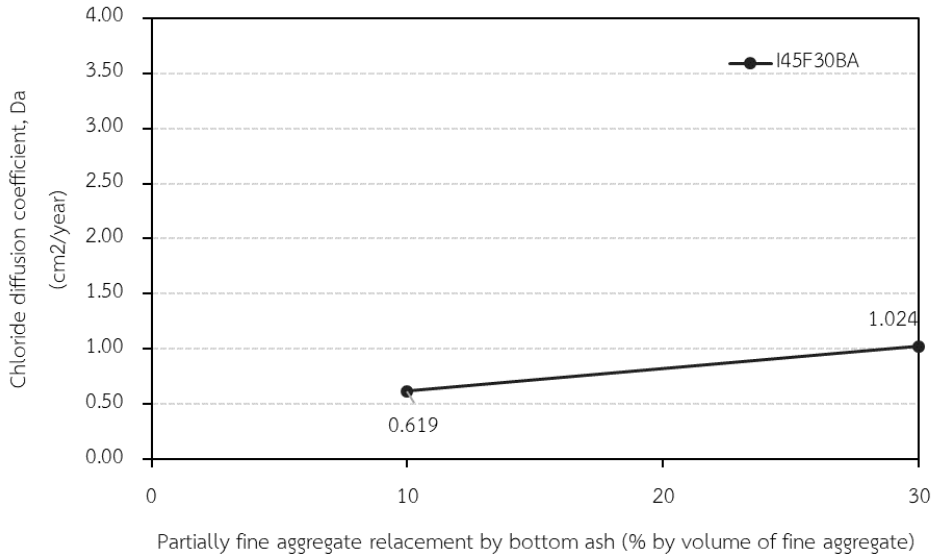
4.1.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลง ดังภาพที่ 4.12



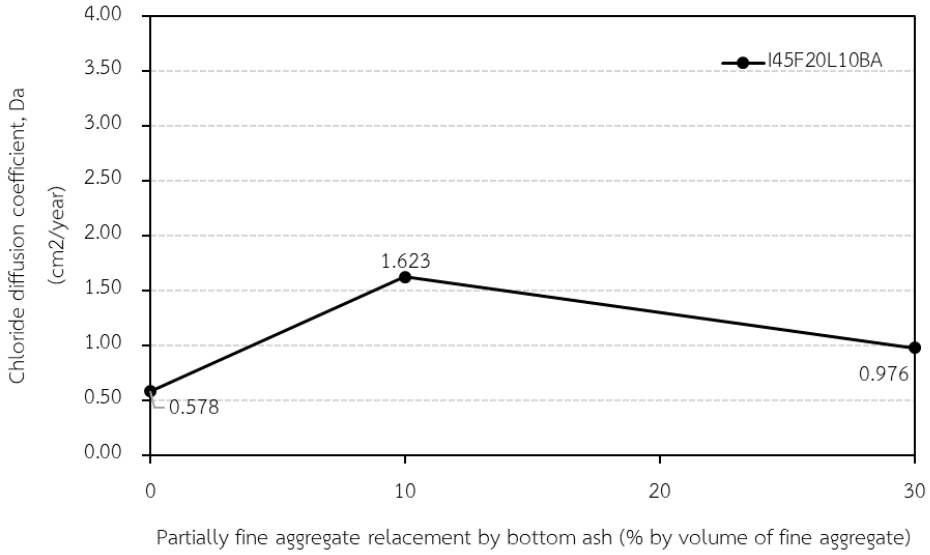
ภาพที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมากขึ้น ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

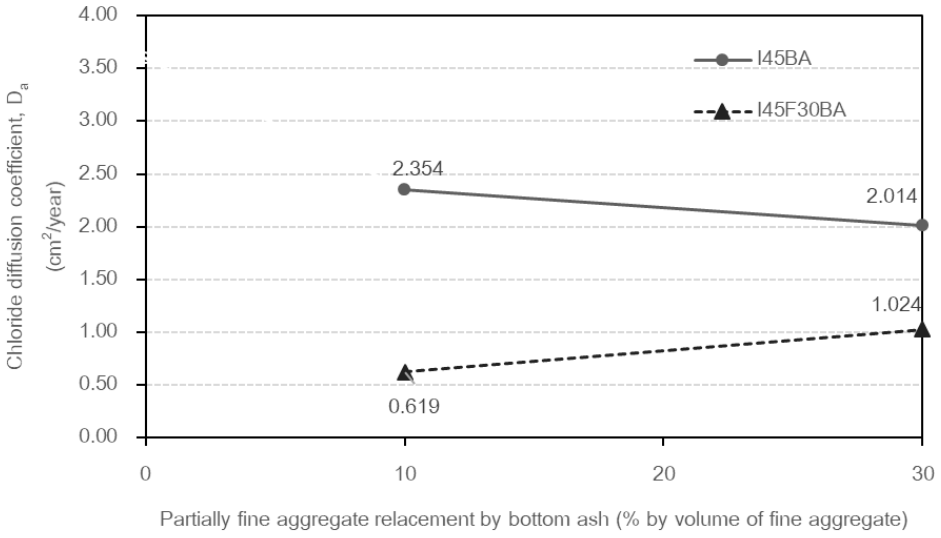
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตน้อยที่สุด เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมากที่สุด ดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และใช้ผงหินปูนร้อยละ 10

4.1.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

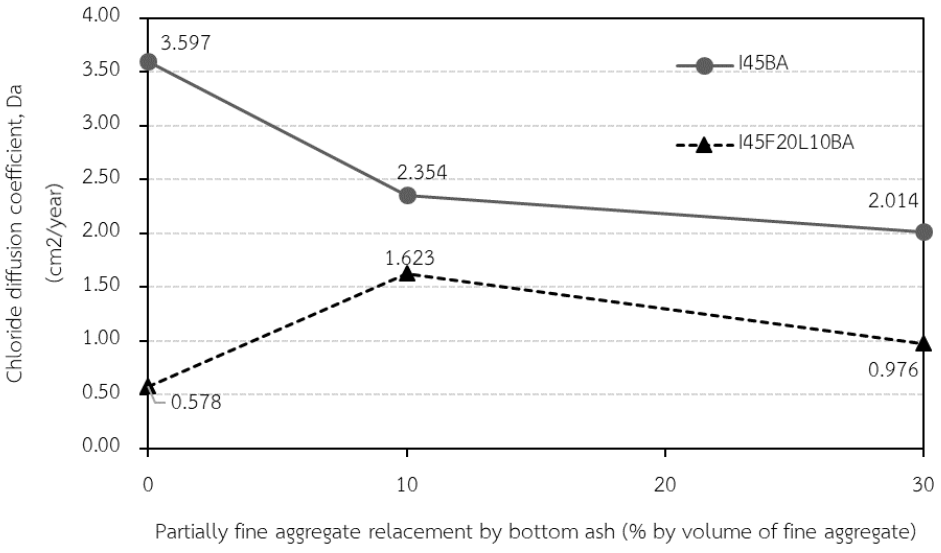
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30

4.1.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

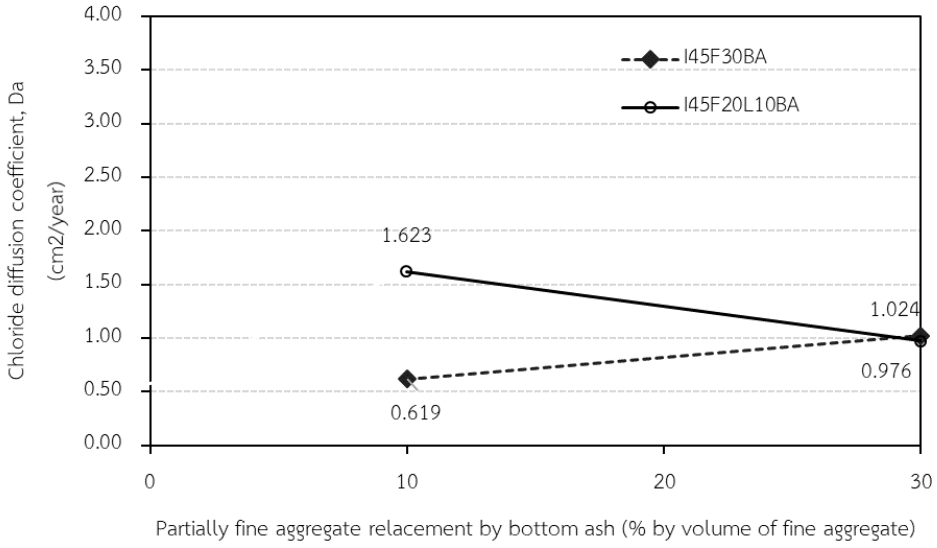
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30

4.1.2.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 จะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น แต่คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 จะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลง ดังภาพที่ 4.17



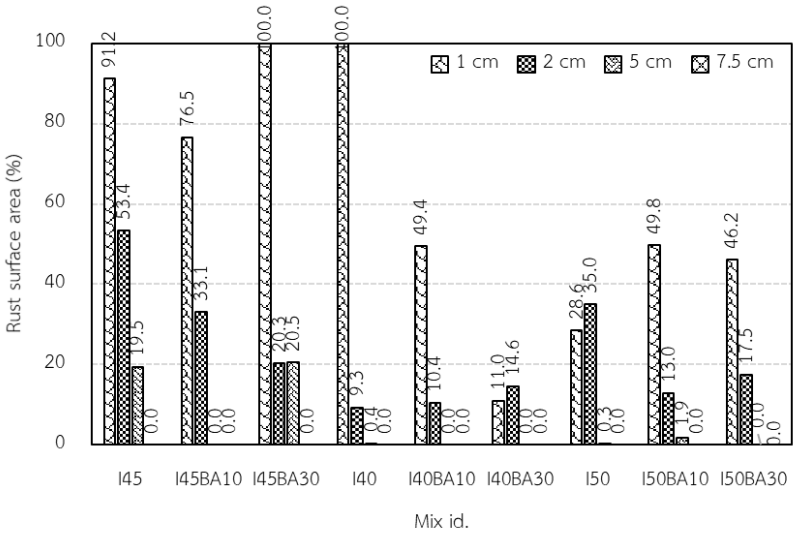
ภาพที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30

4.2 ผลกระทบต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากผลการการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้มีการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น และเพื่อยืนยันผลการทดสอบดังกล่าวว่าสามารถใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงมีการทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมมของผิวเหล็กเสริม และการสูญสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม

4.2.1 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากการทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตทั่วไป, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมไม่สามารถระบุแนวโน้มที่ชัดเจน และพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมอาจเกิดจากความชื้นและอากาศภายในคอนกรีตที่ยังหลงเหลืออยู่ตั้งแต่การผสมคอนกรีต ดังนั้นการพิจารณาพื้นที่ผิวของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นจึงเป็นดัชนีชี้วัดที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุผลนี้การพิจารณาการสูญเสียกำลังของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ควรพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กมากกว่า ดังภาพที่ 4.18



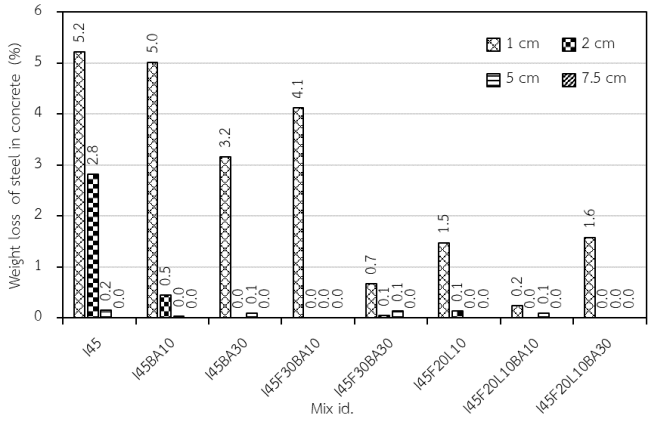
ภาพที่ 4.18 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

4.2.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต

4.2.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

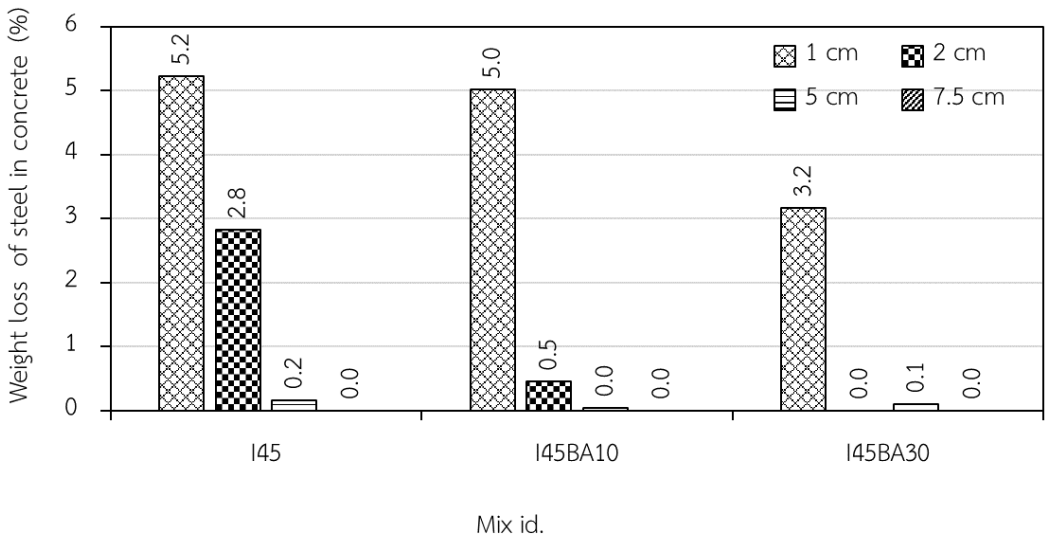
จากผลการทดลอง พบว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตควบคุม ทุกระยะหุ้มเหล็ก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ระยะหุ้มเหล็ก 1 ซม.

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 0 , 10 และ 30 ได้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม 5.22, 5.01 และ 3.16 ตามลำดับ คิดเป็นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมลดลงร้อยละ 0, 4.02 และ 39.46 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 พบว่าที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 และ 30 ได้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม 4.13 และ 0.67 ตามลำดับ คิดเป็นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมลดลงร้อยละ 20.88 และ 87.16ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 0, 10 และ 30 ได้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม 1.47, 0.24 และ 1.58 ตามลำดับ คิดเป็นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมลดลงร้อยละ 71.84, 95.40 และ 69.73 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 4.19



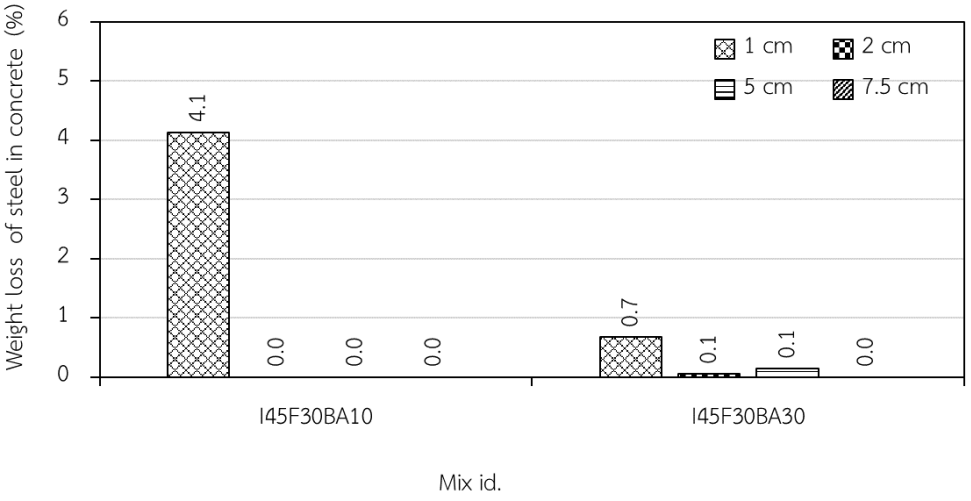
ภาพที่ 4.19 สูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดจะมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยลง เมื่อเทียบกับตอนกรีตซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นทำการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลงตามไปด้วย ดังภาพที่ 4.20 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำช่วยลดการดูดแบบคาพิวลารีจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น



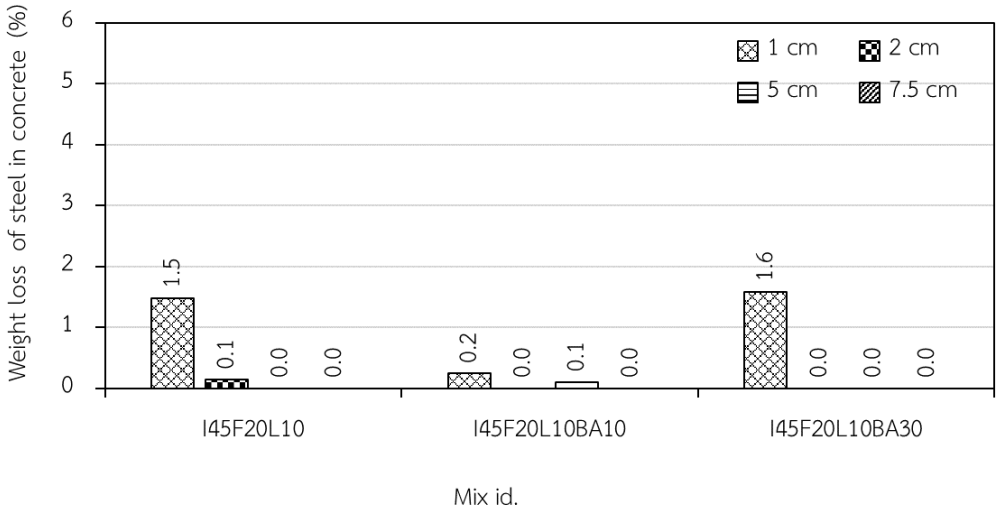
ภาพที่ 4.20 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลง ดังภาพที่ 4.21 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำช่วยลดการดูดแบบคาพิวลารีจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น



ภาพที่ 4.21 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30

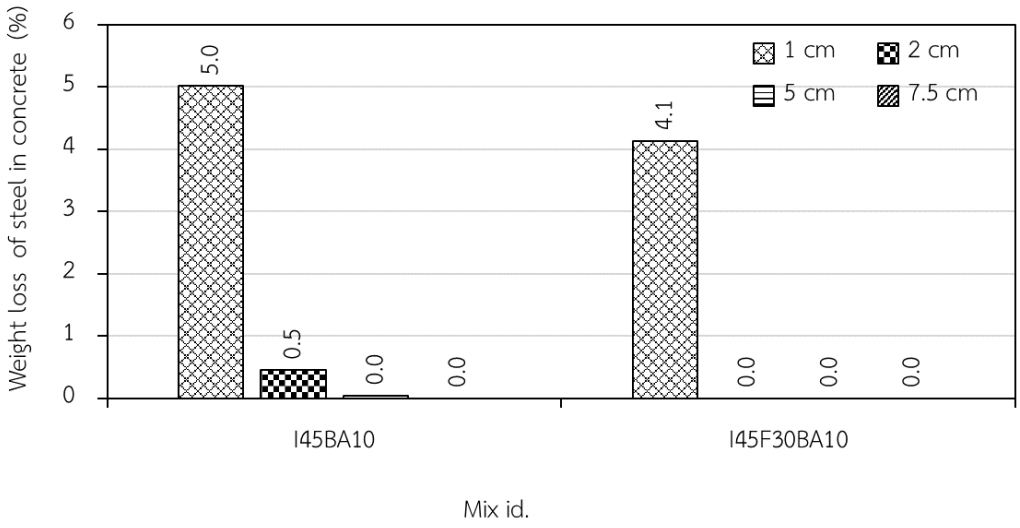
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.22 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำ ช่วยลดการดูดแบบคาพิวลารีจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น



ภาพที่ 4.22 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

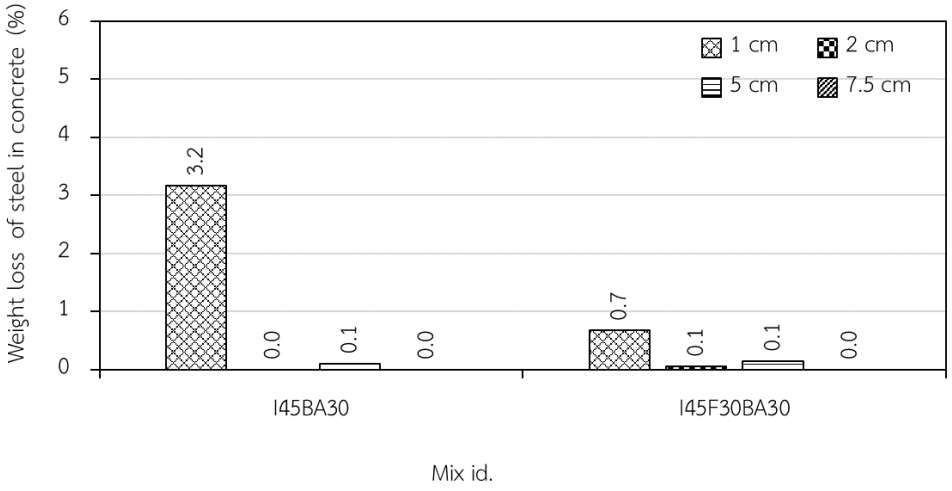
4.2.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.23 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และเถ้าก้นเตาสามารถเก็บกักน้ำช่วยในเรื่องบ่มภายในและคอนกรีตทึบน้ำ เมื่อใช้ควบคู่กันจึงส่งผลทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น



ภาพที่ 4.23 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

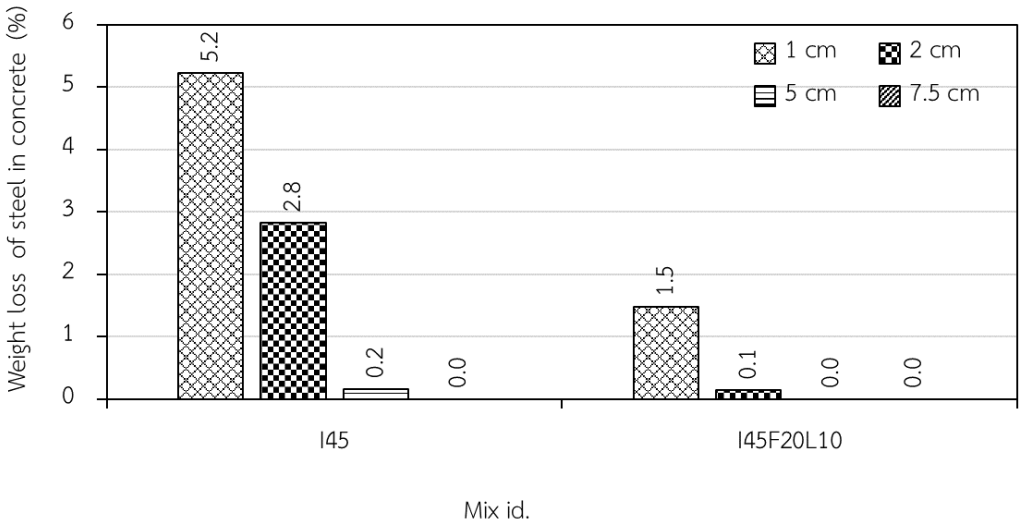
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.24 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และเถ้าก้นเตาสามารถเก็บกักน้ำช่วยในเรื่องบ่มภายในและคอนกรีตทึบน้ำ เมื่อใช้ควบคู่กันจึงส่งผลทำให้คุณสมบัติในเรื่องการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำลง



ภาพที่ 4.24 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

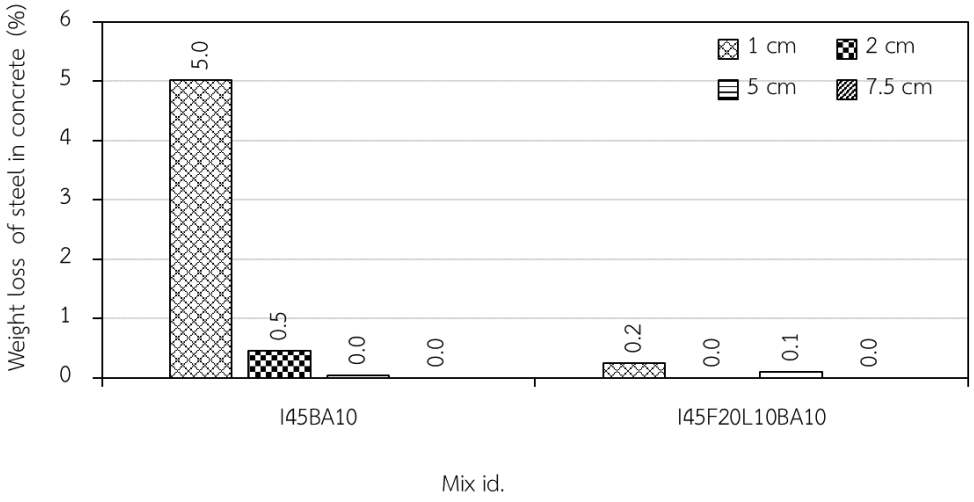
4.2.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ดังภาพที่ 4.25 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และ ผงหินปูนเป็นตัว Filler ช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต จึงทำให้คุณสมบัติในเรื่องการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำลง



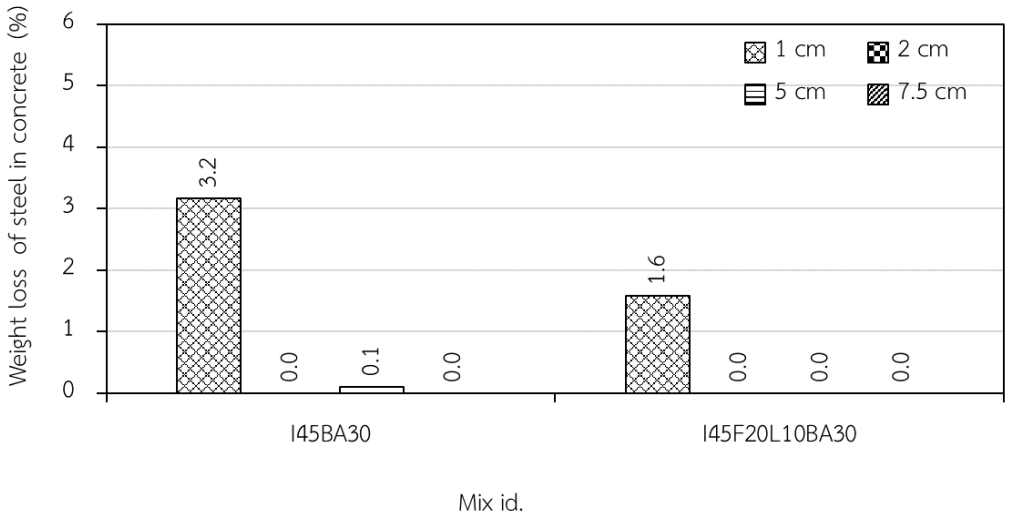
ภาพที่ 4.25 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ดังภาพที่ 4.26 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และ ผงหินปูนเป็นตัว Filler ช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต จึงทำให้คุณสมบัติในเรื่องการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเพียงอย่างเดียว ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำลง



ภาพที่ 4.26 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

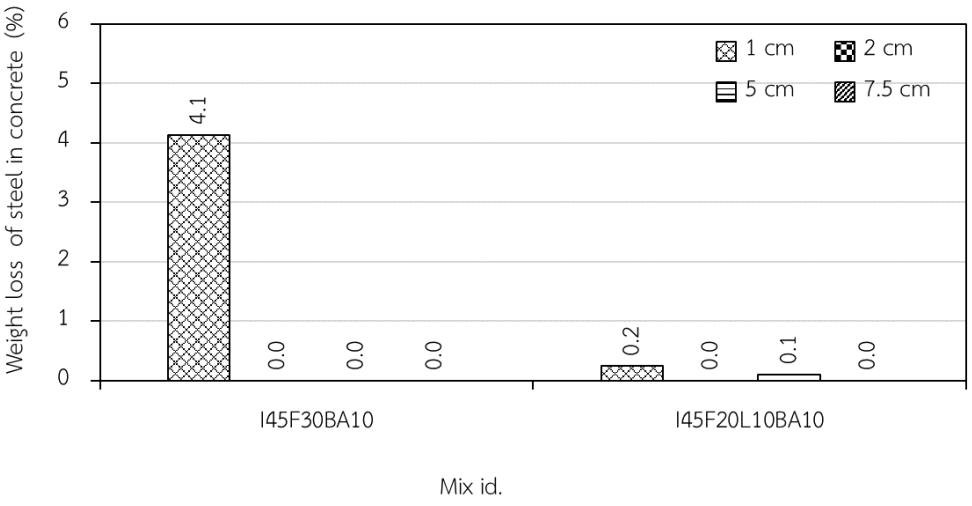
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ดังภาพที่ 4.27 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และ ผงหินปูนเป็นตัว Filler ช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต จึงทำให้คุณสมบัติในเรื่องการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเพียงอย่างเดียว ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำลง



ภาพที่ 4.27 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

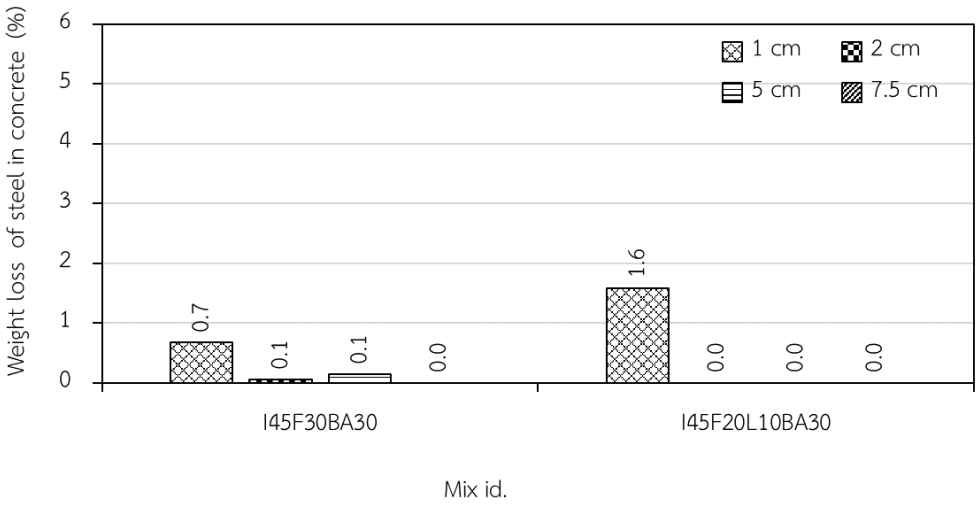
4.2.2.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ดังภาพที่ 4.28 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และ ผงหินปูนเป็นตัว Filler ช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต เป็นวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับเถ้าลอยจึงมีความสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่าส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา ร่วมกับเถ้าลอย และ ผงหินปูน



ภาพที่ 4.28 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ดังภาพที่ 4.29 เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และ ผงหินปูนเป็นตัว Filler ช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ เมื่อใช้เถ้าก้นเตาถึงร้อยละ 30 จะเกิดโพรงช่องว่างในคอนกรีตสูงขึ้นทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้ามาได้ง่าย ดังนั้นเมื่อใช้เถ้าเตา ร่วมกับ เถ้าลอย และ ผงหินปูน จึงมีความสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่าส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา ร่วมกับ เถ้าลอย



ภาพที่ 4.29 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

4.3 ผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

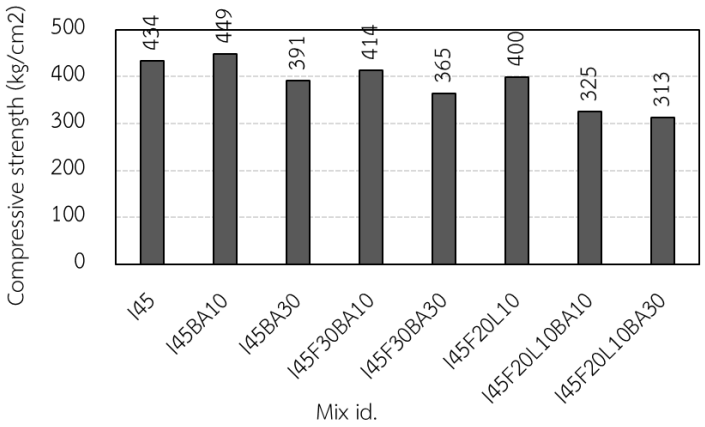
4.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

จะเห็นว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย และส่วนผสมอื่น ๆ มีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสม ดังภาพที่ 4.30

คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 0 , 10 และ 30 ได้ค่ากำลังอัด 434, 449 และ 391 313 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ คิดเป็นกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.46 และคิดเป็นกำลังอัดของคอนกรีตลดลงร้อยละ 9.91 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 พบว่าที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 และ 30 ได้ค่ากำลังอัด 414 และ 365 313 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ คิดเป็นกำลังอัดของคิดเป็นกำลังอัดของคอนกรีตลดลงร้อยละ 4.61 และ 15.90 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

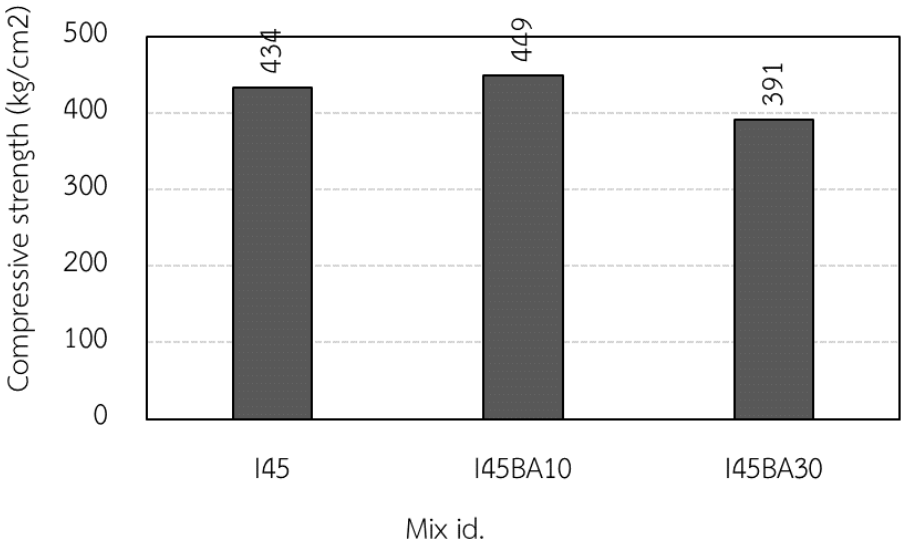
คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 0, 10 และ 30 ได้ค่ากำลังอัด 400, 325 และ 313 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ คิดเป็นกำลังอัดของคิดเป็นกำลังอัดของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7.83, 25.12 และ 27.88 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 4.30 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดบางส่วน

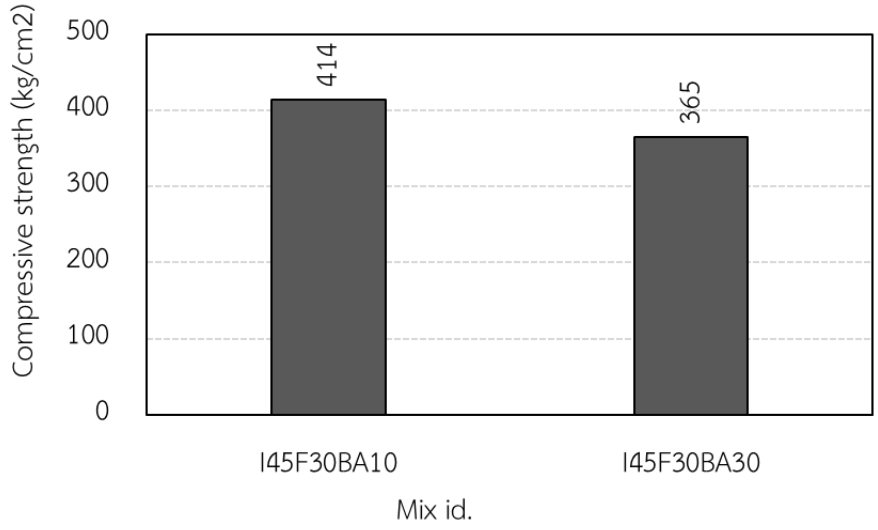
4.3.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละอียด

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 4.31 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนมาจากกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตาเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลมาจากการบ่มภายในของคอนกรีตเนื่องจากความชื้นที่อนุภาคเถ้าก้นเตาเก็บกักไว้และปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าลอยในอนุภาคเถ้าก้นเตา



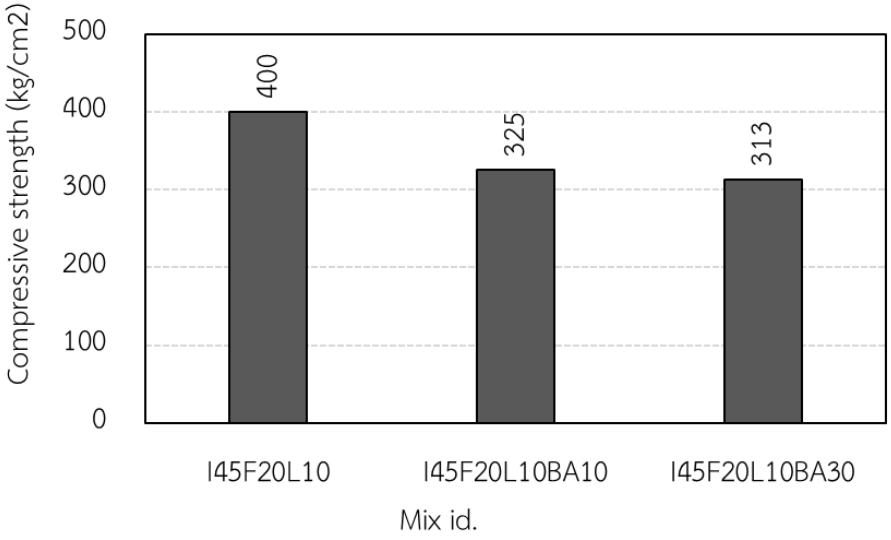
ภาพที่ 4.31 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง ดังภาพที่ 4.32 เนื่องจากขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีลักษณะพรุน จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลทำให้มีกำลังอัดต่ำลง



ภาพที่ 4.32 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

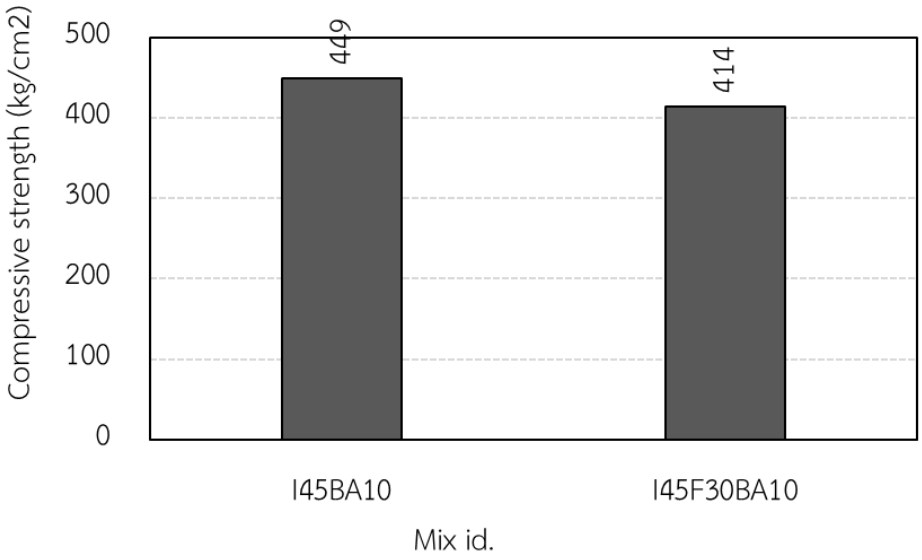
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง, คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตใช้ที่เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ดังภาพที่ 4.33 เนื่องจาก ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีลักษณะพรุน จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลทำให้มีกำลังอัดต่ำลง



ภาพที่ 4.33 กำลังอัดของคอนกรีตใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน

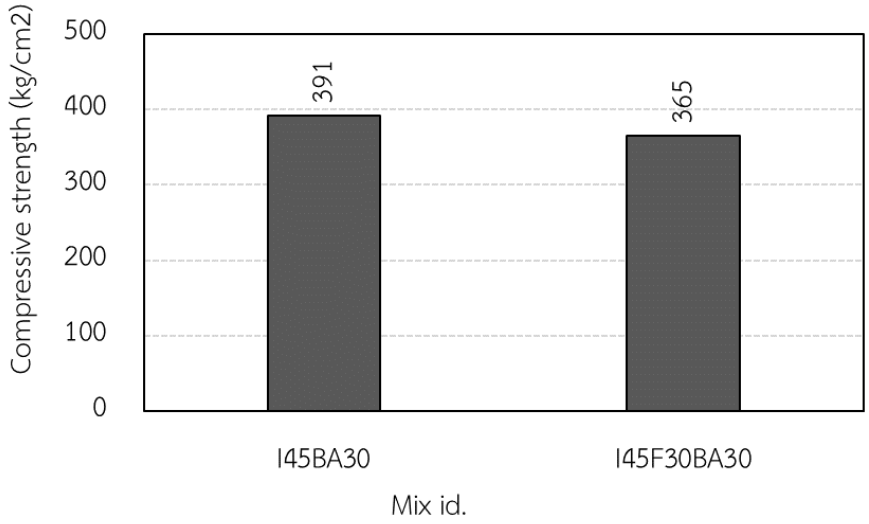
4.3.1.2 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ดังภาพที่ 4.34 เนื่องจาก ปริมาณซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตามีจำนวนลดลง



ภาพที่ 4.34 กำลังอัดของคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

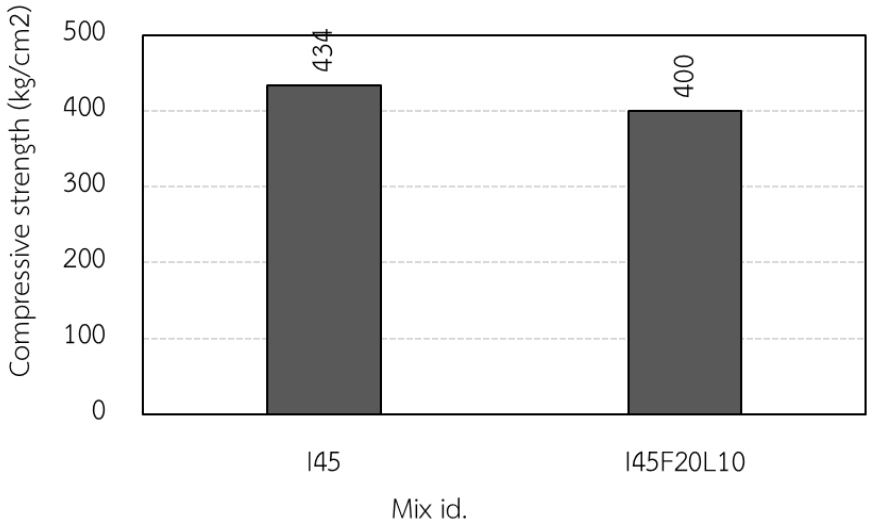
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ดังภาพที่ 4.35 เนื่องจาก ปริมาณซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตามีจำนวนลดลง



ภาพที่ 4.35 กำลังอัดของคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

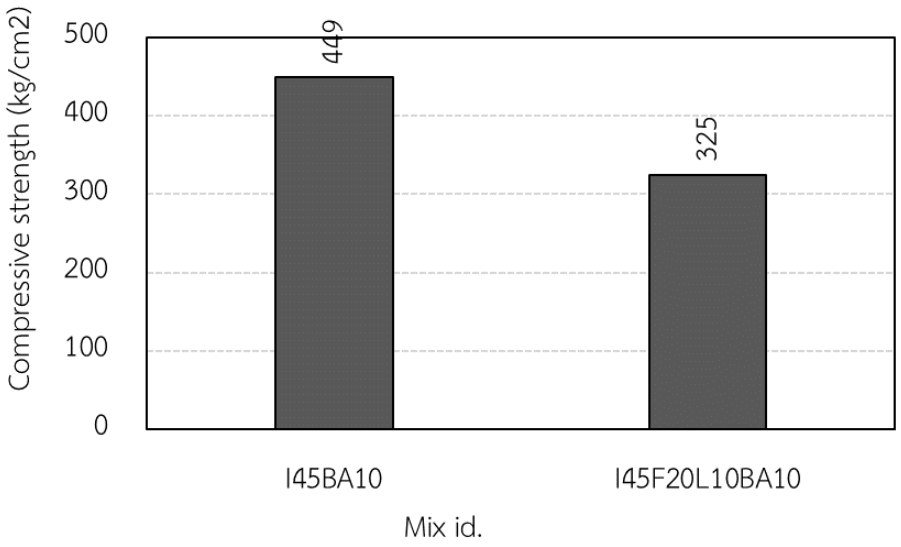
4.3.1.3 ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ดังภาพที่ 4.36 เนื่องจาก ปริมาณซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตามีจำนวนลดลง



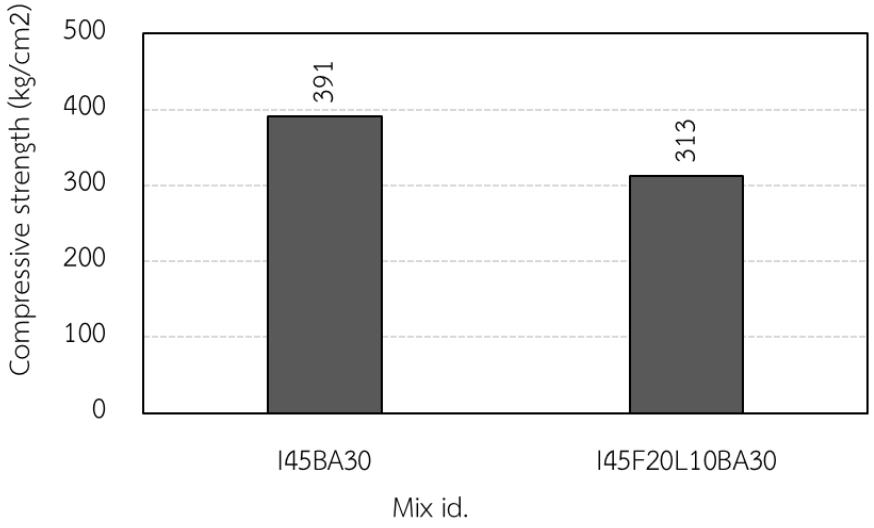
ภาพที่ 4.36 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 เพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 4.37 เนื่องจาก ปริมาณซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตามีจำนวนลดลง



ภาพที่ 4.37 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

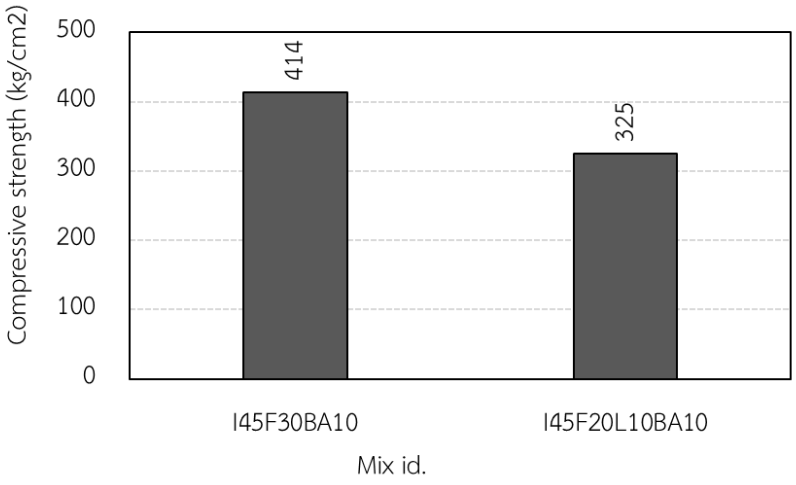
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ10 แทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 เพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 4.38 เนื่องจาก ปริมาณซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตามีจำนวนลดลง



ภาพที่ 4.38 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

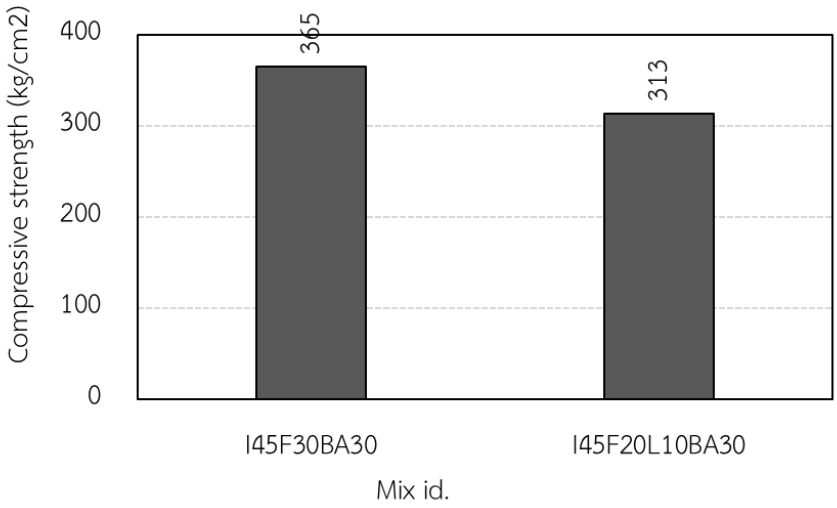
4.3.1.4 ผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ดังภาพที่ 4.39 เนื่องจาก คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา ร่วมกับ เถ้าลอย เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคมากกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา ร่วมกับ เถ้าลอย และ ผงหินปูน ส่งผลทำให้มีกำลังอัดของกรีตสูงกว่า



ภาพที่ 4.39 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ดังภาพที่ 4.40 เนื่องจาก คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา ร่วมกับ เถ้าลอย เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคมากกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา ร่วมกับ เถ้าลอย และ ผงหินปูน ส่งผลทำให้มีกำลังอัดของกรีตสูงกว่า



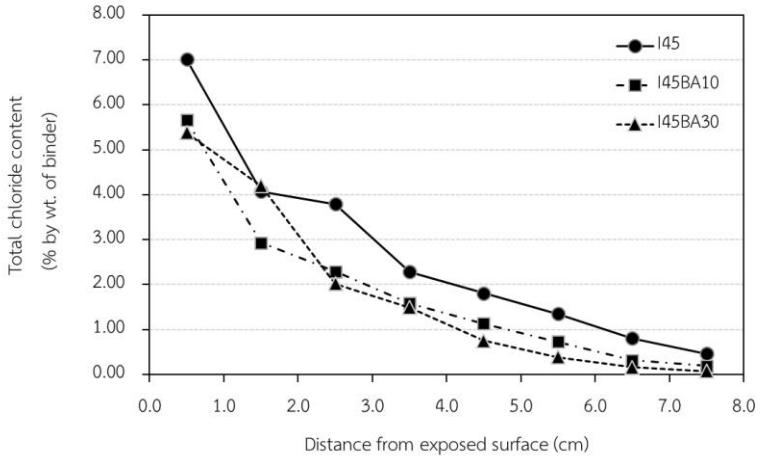
ภาพที่ 4.40 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

4.4 การเปรียบเทียบผลการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี กับงานวิจัยของศักดิ์จุฬา นามจันทร์ (2559)

4.4.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต

4.4.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

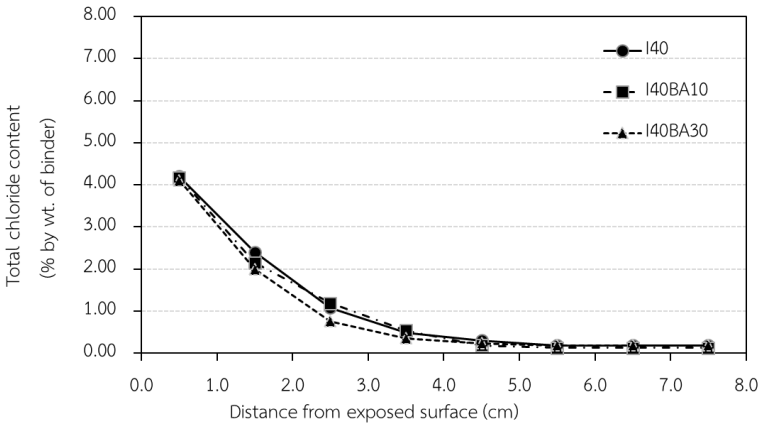
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้น้อยลง เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.41 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำช่วยลดการดูดแบบคาพิวลารี เมื่อใส่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้นจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น



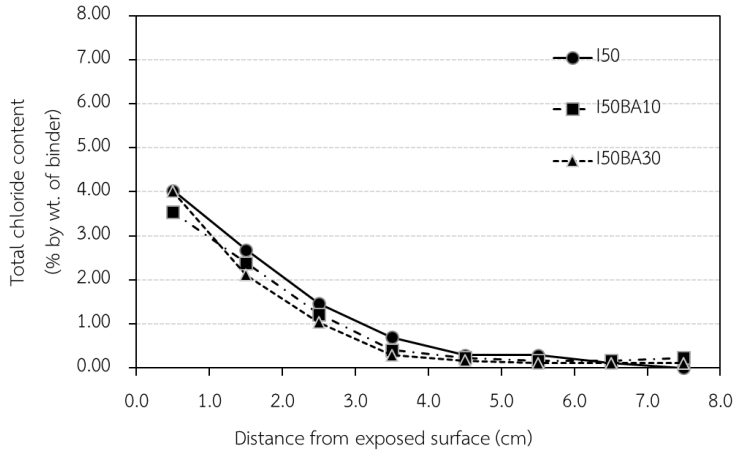
ภาพที่ 4.41 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาBLCP ต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้น้อยลง เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะ และ เถ้าก้นเตาBLCP พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำลง ดังภาพที่ 4.42



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

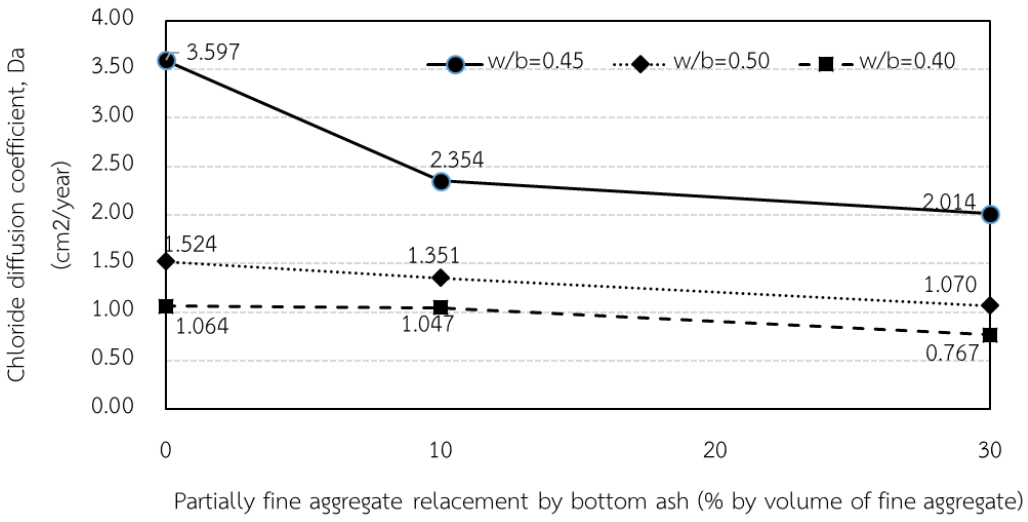
ภาพที่ 4.42 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

4.4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตา BLCP ต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลงเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะและ เถ้าก้นเตาBLCP พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลง ดังภาพที่ 4.43

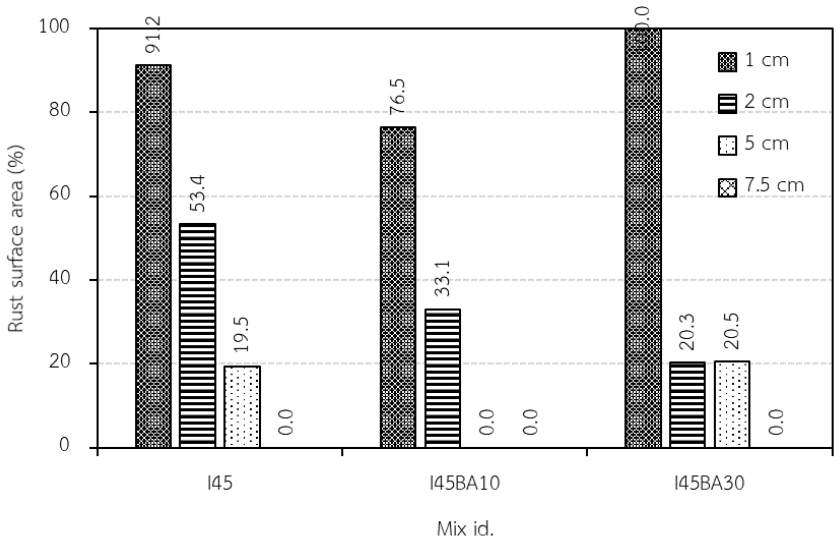


ภาพที่ 4.43 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.4.3 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

4.4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

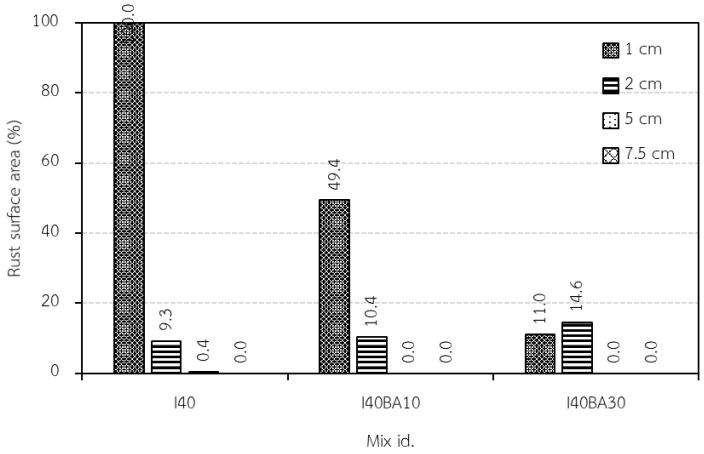
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 พบว่าแนวโน้มของพื้นที่การเกิดสนิมของเสริมในคอนกรีตต่ำลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แต่คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีแนวโน้มของพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ไม่ชัดเจน ดังภาพที่ 4.44 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำช่วยลดการดูดแบบคาพิวลารี เมื่อใส่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้นจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง



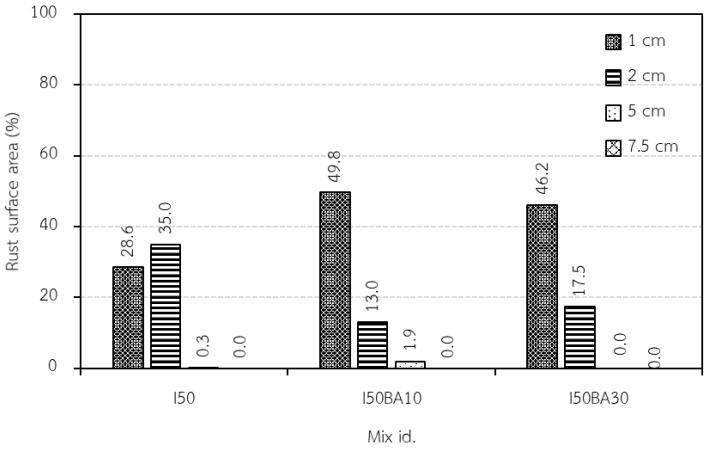
ภาพที่ 4.44 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาBLCP ต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาBLCPแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 พบว่าแนวโน้มของพื้นที่การเกิดสนิมของเสริมในคอนกรีตต่ำลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แต่คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้น BLCP แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีแนวโน้มของพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ไม่ชัดเจน

การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะ และเถ้าก้นเตาBLCP พบว่ามีแนวโน้มเดียวกัน ดังภาพที่ 4.45



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



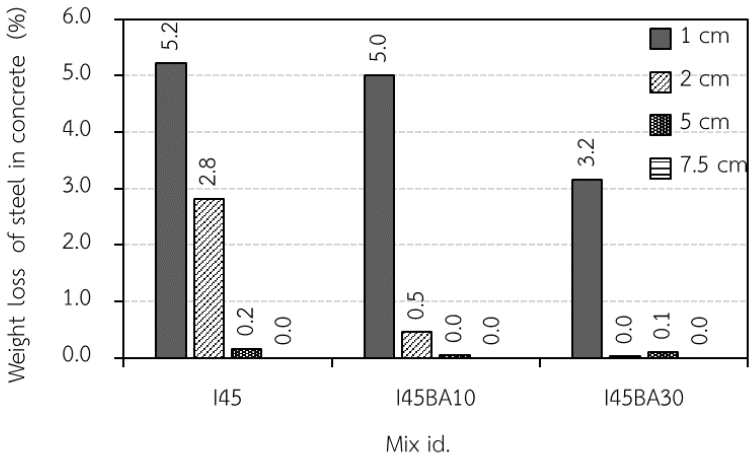
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4.45 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.4.4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต

4.4.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

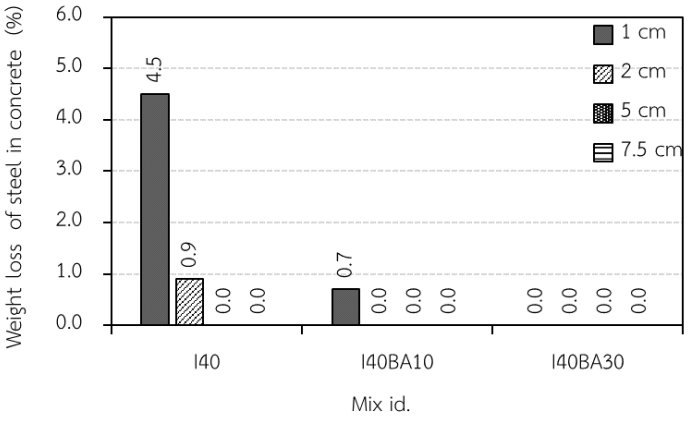
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมต่ำลง เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.46 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำช่วยลดการดูดแบบคาพิวลารี เมื่อใส่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้นจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้แนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำลง เมื่อใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น



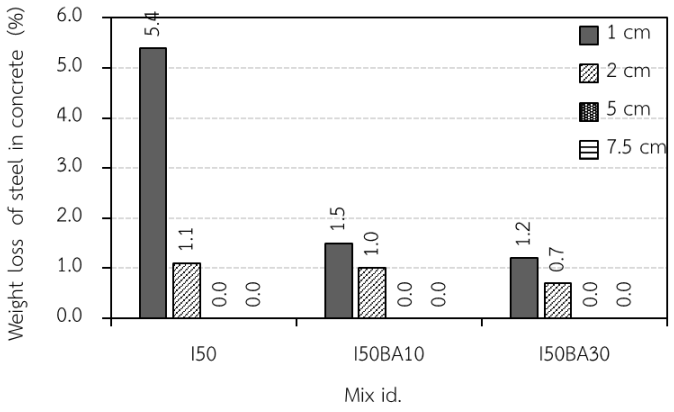
ภาพที่ 4.46 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตา BLCP ต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำลงเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะ และ เถ้าก้นเตาBLCP พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำลง ดังภาพที่ 4.47



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



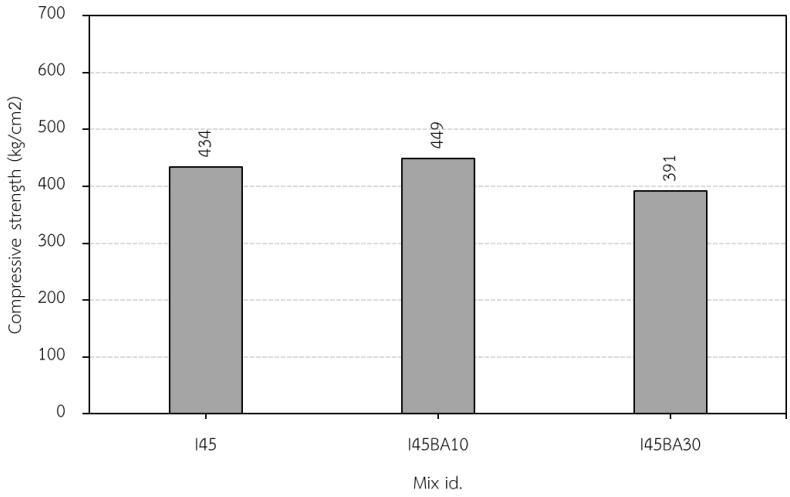
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4.47 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.4.5 กำลังอัดของคอนกรีต

4.4.5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียด

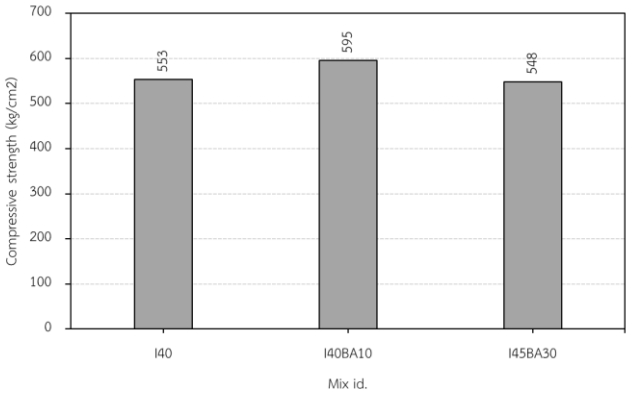
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 4.48 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 มาจากกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตาเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลมาจากการบ่มภายในของคอนกรีตเนื่องจากความชื้นที่อนุภาคเถ้าก้นเตาเก็บกักไว้ และปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าลอยในอนุภาคเถ้าก้นเตา แต่ต่ำลงเมื่อใช้เถ้าก้นเตา ร้อยละ 30 เนื่องจากความพรุนเฉลี่ยในคอนกรีตสูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง



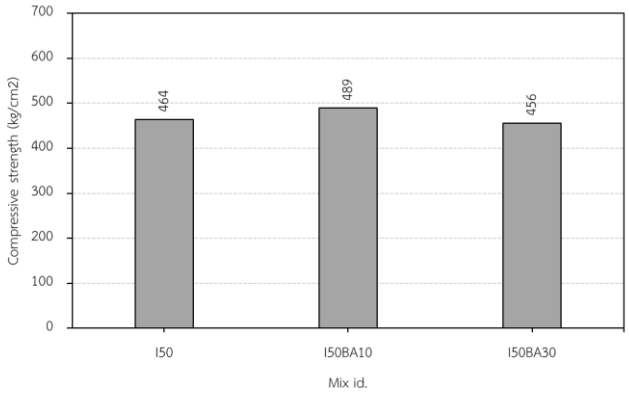
ภาพที่ 4.48 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นตBLCPต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

จากการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะและ เถ้าก้นเตาBLCP พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง และคแนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 4.49



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4.49 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

ผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละอียดบางส่วนภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนของทุกส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดมากขึ้น ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร่วมกับเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีความสามารถในการเก็บกักความชื้นไว้ได้มาก ส่งผลดีต่อการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตได้ทั่วถึง นอกจากนี้การเก็บกักน้ำภายในทำให้การดึงดูดคลอไรด์ด้วยแคปพิวลารีเกิดขึ้นได้น้อยลงเมื่อเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งในสิ่งแวดล้อมทะเลอีกด้วย
2. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนทุกส่วนผสมมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติในการทำให้คอนกรีตทึบน้ำช่วยลดการดูดแบบคาพิวลาลีจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมคอนกรีตได้ยากขึ้น
3. กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร้อยละ 10 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และส่วนผสมอื่นทั้งหมดมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนมาจากกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตาเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลมาจากการบ่มภายในของคอนกรีตเนื่องจากความชื้นที่อนุภาคเถ้าก้นเตาเก็บกักไว้และปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าลอยในอนุภาคเถ้าก้นเตา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการศึกษานี้ได้ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันในคอนกรีตควบคุมที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา และคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตา ที่ทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวตอนเป็นคอนกรีตสดไม่เท่ากัน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตามีการปลดปล่อยน้ำอิสระออกมาภายในเม็ดเถ้าก้นเตา ดังนั้นจึงควรศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาโดยควบคุมค่าการยุบตัวด้วย จึงจะส่งผลต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา

2. เนื่องจากในงานก่อสร้างมีการใช้เหล็กข้ออ้อยเป็นจำนวนมาก จึงควรศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลไปด้วย

บรรณานุกรม

ทยุติ อิสริยฤทธานนท์. (2546). *กำลังอัด ความต้านทานต่อการขัดสีและความทนทานต่อคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียด*. ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต *(วิศวกรรมโยธา)* สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทวีชัย สำราญวานิช. (2553). *การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์* โยธาสาร, 22 (3) (น. 1-7)

นพรัตน์ มณีวงศ์วิจิตร. (2550). *สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์และความต้านทานเชิงไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา*. วารสารวิจัย มข (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 7(3), 52-59

ศักดิ์จุฬา นามจันทร์. (2559). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. การประชุมวิชาการคอนกรีต (ครั้งที่ 11), (น. 17-19) กุมภาพันธ์ 2559 โรงแรมสีมาธานี: จังหวัดนครราชสีมา

ศิระ อาทมาท. (2559). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานไฟฟ้าและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนบางส่วนของมวลรวมละเอียด. การประชุมวิชาการ (ครั้งที่ 1), 26 สิงหาคม 2559. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

อุดมพร กุลมงคล. (2556). *ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา: มหาวิทยาลัยบูรพา

Annual Book of ASTM Standards. (2000). ASTM C1218 Standard Test Method for water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. American Society for Testing and Materials.

Annual Book of ASTM Standards. (2013). ASTM C33/C33M-12, Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International. West Conshohocken, PA.

Annual Book of ASTM Standards. (2000). ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials.

Annual Book of ASTM Standards. (2000). ASTM C1152 Standard Test Method for acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. American Society for Testing and Materials.

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.

Cheriaf, M., Rocha, J.C. & Pera, J. (1999) Pozzolanoic properties of pulverized coal combustion bottom ash. Cement and Concrete Rsearch, 29(9), 1387-1391.

Hussain K. (2011). Development of a Minimum Curing Concrete by Internal Curing Process. Civil Engineering Thesis Sirindhorn Internaltional Institute of Technology Thammasat University.

J.G. Jang, H.J. Kim, H.K. Kim, H.K. Lee (2016) Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration, Materials & Design volume 93, Pages 160-167

Kasemchaisiri R. & Tangtermsirikul S. (2007). A Method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. Construction and Buiding Materials. Volume 21.

L.B. Andrade, J.C. Rocha, M. Cheriaf (2008) Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete, Construction and Building Material, Page 609-614

Malkit Singh and Rafat Siddique (2014) Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete/Resources, Conservation and Recycling, Volume 72, pages 20-32

Rafat Siddique (2013) Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistanceand permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash, construction and building materials, volume 47, Pages 1444-1450

Y. Bai, F. Darcy, P.A.M. Basher (2005) Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. Construction and Building Materials, 19 (05) 691-697

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ตาราง ก ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

ความหนา (cm)	Chloride content (% by wt. of binder)														
	I45			I45BA10			I45BA30			I45F30BA10			I45F30BA30		
	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed
0-1	7.02	6.57	0.44	5.66	4.84	0.82	5.38	5.22	0.16	2.20	1.74	0.46	2.25	1.78	0.47
1-2	4.08	3.75	0.32	2.93	2.45	0.48	4.20	3.46	0.74	1.16	0.90	0.26	1.26	1.10	0.16
2-3	3.79	3.06	0.73	2.29	1.84	0.45	2.02	1.83	0.19	0.17	0.13	0.04	0.74	0.63	0.11
3-4	2.29	2.02	0.26	1.58	1.48	0.10	1.49	1.31	0.18	0.06	0.04	0.02	0.09	0.07	0.03
4-5	1.81	1.31	0.50	1.13	0.91	0.22	0.75	0.81	-0.06	0.05	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03
5-6	1.35	1.06	0.29	0.73	0.66	0.06	0.38	0.34	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7	0.81	0.71	0.10	0.32	0.29	0.03	0.16	0.13	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7-8	0.46	0.37	0.10	0.19	0.13	0.06	0.07	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 (ต่อ)

ความหนา (cm)	Chloride content (% by wt. of binder)											
	I45F30BA30			I45F20L10			I45F20L10BA10			I45F20L10BA30		
	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed
0-1	2.25	1.78	0.47	5.73	5.35	0.38	3.27	2.20	1.07	3.09	2.69	0.40
1-2	1.26	1.10	0.16	2.37	1.97	0.40	2.21	1.49	0.72	1.74	1.58	0.16
2-3	0.74	0.63	0.11	0.90	0.76	0.15	1.59	0.66	0.93	0.87	0.63	0.24
3-4	0.09	0.07	0.03	0.18	0.15	0.02	0.52	0.20	0.32	0.21	0.17	0.04
4-5	0.05	0.03	0.03	0.09	0.04	0.05	0.14	0.05	0.09	0.06	0.05	0.01
5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7-8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ภาคผนวก ข

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input** C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

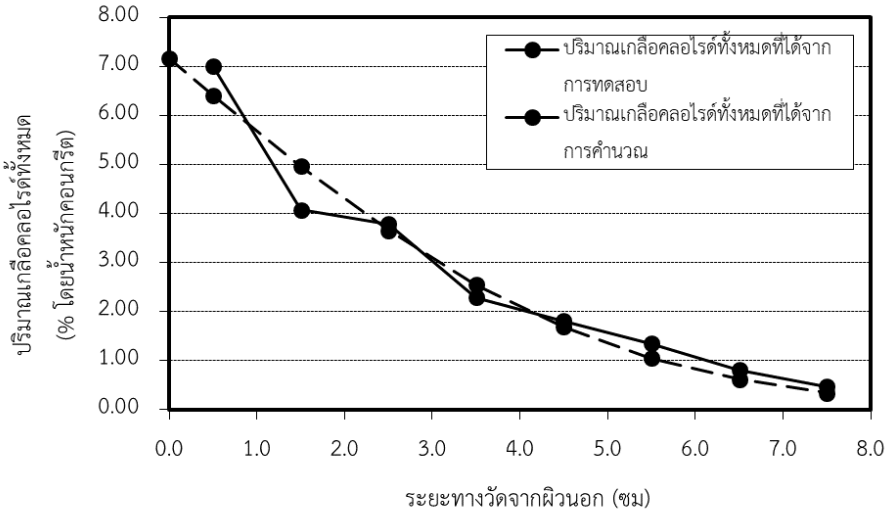
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
				0.0		7.16			
				0.5	7.02	6.41	0.3661		
				1.5	4.08	4.96	0.7820		
				2.5	3.79	3.65	0.0189		
3.60	7.162	0.00	2.00	3.5	2.29	2.55	0.0699		
				4.5	1.81	1.69	0.0154		
				5.5	1.35	1.05	0.0888		
				6.5	0.81	0.62	0.0343		
				7.5	0.46	0.34	0.0146	Cs	7.1624
							1.3901	Da	3.5971



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45BA10** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input**

C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

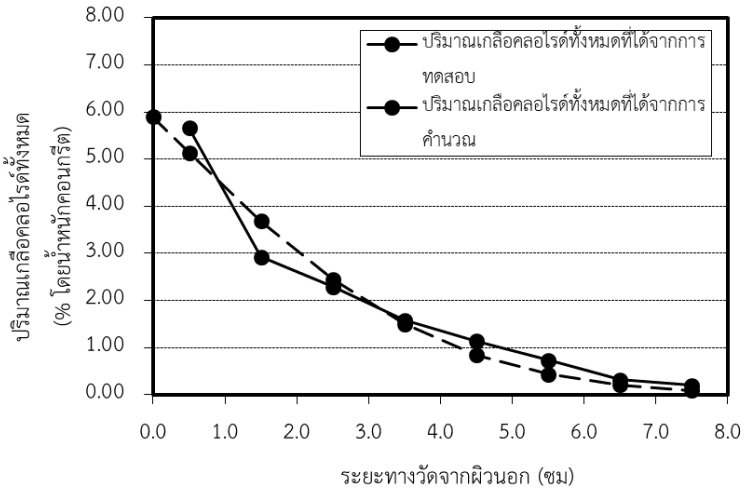
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
2.35	5.902	0.00	2.00	0.0		5.90			
				0.5	5.66	5.14	0.2703		
				1.5	2.93	3.69	0.5786		
				2.5	2.29	2.45	0.0256		
				3.5	1.58	1.50	0.0063		
				4.5	1.13	0.84	0.0862		
				5.5	0.73	0.43	0.0880		
				6.5	0.32	0.20	0.0130		
				7.5	0.19	0.09	0.0114	Cs	5.9023
							1.0794	Da	2.3543



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45BA30** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input**

C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

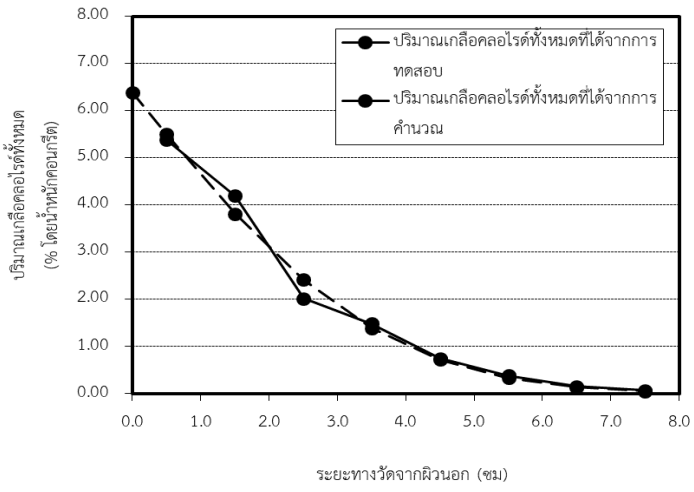
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
2.01	6.392	0.00	2.00	0.0		6.39			
				0.5	5.38	5.50	0.0141		
				1.5	4.20	3.82	0.1456		
				2.5	2.02	2.42	0.1627		
				3.5	1.49	1.39	0.0090		
				4.5	0.75	0.72	0.0009		
				5.5	0.38	0.34	0.0022		
				6.5	0.16	0.14	0.0003		
				7.5	0.07	0.05	0.0004	Cs	6.3922
							0.3352	Da	2.0137



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45F30BA10** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2 ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input**

C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

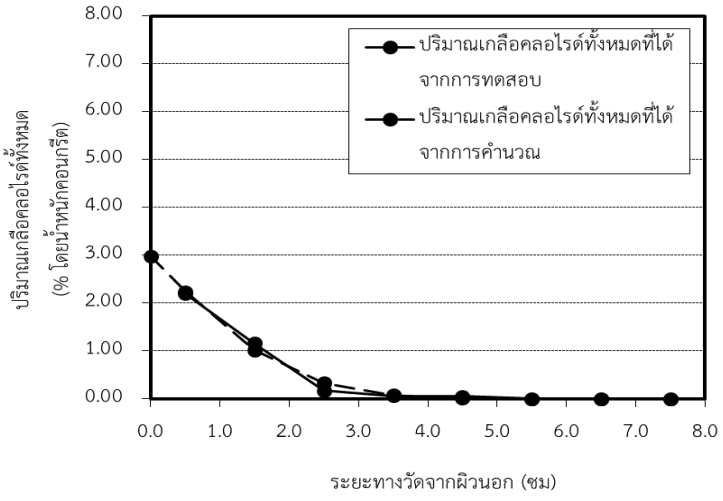
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
0.62	2.984	0.00	2.00	0.0		2.98			
				0.5	2.20	2.24	0.0017		
				1.5	1.16	1.02	0.0216		
				2.5	0.17	0.33	0.0275		
				3.5	0.06	0.08	0.0004		
				4.5	0.05	0.01	0.0016		
				5.5	0.00	0.00	0.0000		
				6.5	0.00	0.00	0.0000		
				7.5	0.00	0.00	0.0000	Cs	2.9842
							0.0528	Da	0.6186



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45F30BA30** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2 ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input** C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

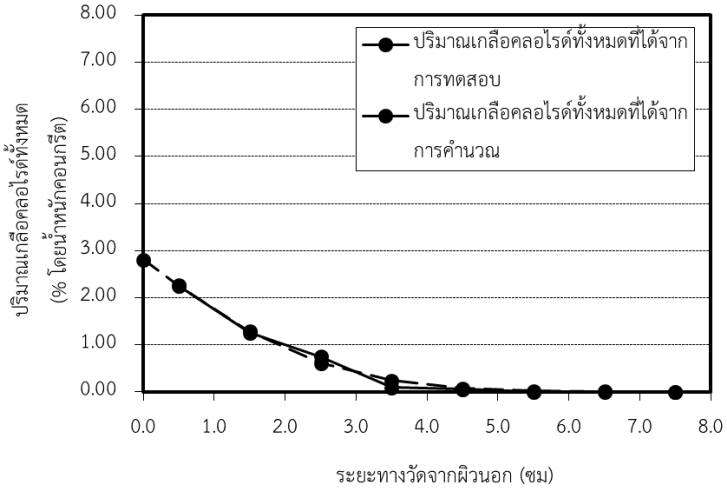
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
1.02	2.806	0.00	2.00	0.0		2.81			
				0.5	2.25	2.26	0.0000		
				1.5	1.26	1.29	0.0008		
				2.5	0.74	0.61	0.0181		
				3.5	0.09	0.23	0.0202		
				4.5	0.05	0.07	0.0005		
				5.5	0.00	0.02	0.0003		
				6.5	0.00	0.00	0.0000		
				7.5	0.00	0.00	0.0000	Cs	2.8056
							0.0400	Da	1.0240



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45F20L10** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2 ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input**

C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

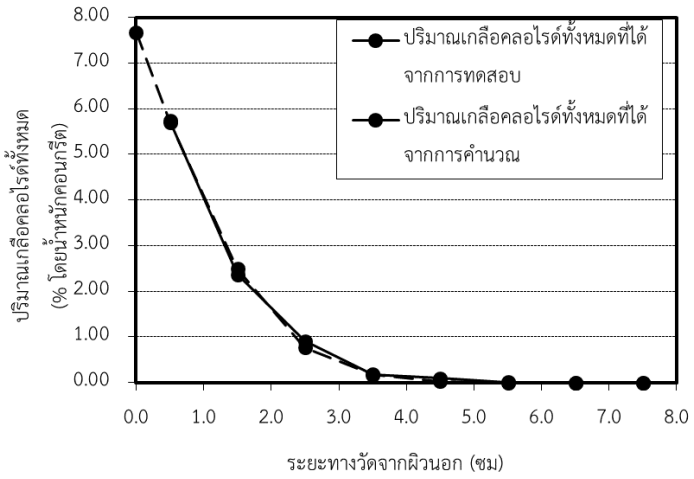
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from xposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder)		$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
					C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$			
0.58	7.681	0.00	2.00	0.0		7.68			
				0.5	5.73	5.70	0.0011		
				1.5	2.37	2.49	0.0143		
				2.5	0.90	0.77	0.0185		
				3.5	0.18	0.16	0.0001		
				4.5	0.09	0.02	0.0045		
				5.5	0.00	0.00	0.0000		
				6.5	0.00	0.00	0.0000		
				7.5	0.00	0.00	0.0000	Cs	7.6805
							0.0385	Da	0.5777



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45F20L10BA10** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2 ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input** C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

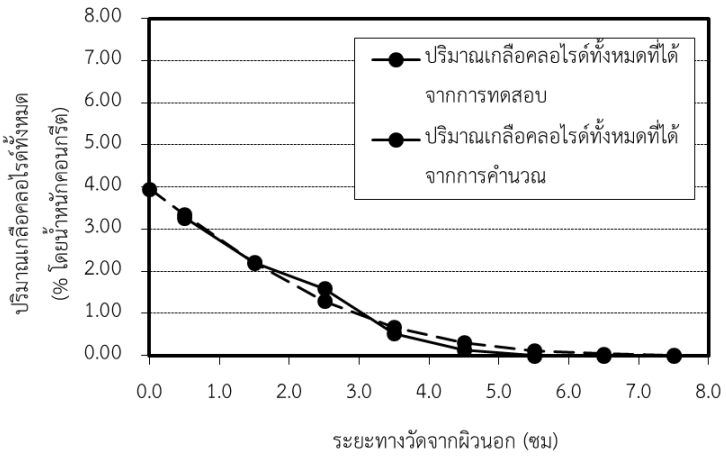
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
1.62	3.958	0.00	2.00	0.0		3.96			
				0.5	3.27	3.34	0.0049		
				1.5	2.21	2.20	0.0000		
				2.5	1.59	1.29	0.0894		
				3.5	0.52	0.67	0.0223		
				4.5	0.14	0.31	0.0269		
				5.5	0.00	0.12	0.0149		
				6.5	0.00	0.04	0.0018		
				7.5	0.00	0.01	0.0002	Cs	3.9576
							0.1605	Da	1.6231



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix **I45F20L10BA30** **บ่ม 28 วัน** **แช่ทะเล 2 ปี**

Fick 's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i$$

Calculatior **Input**

C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of binder)

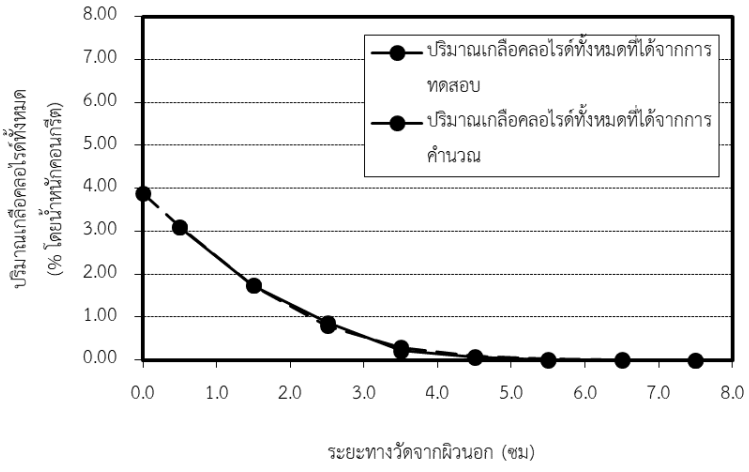
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm^2/year)

D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt.of binder)	C_i (% by wt.of binder)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder) C_{xt}	$C_{xt\ Cal}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		
0.98	3.878	0.00	2.00	0.0		3.88			
				0.5	3.09	3.10	0.0001		
				1.5	1.74	1.74	0.0000		
				2.5	0.87	0.80	0.0049		
				3.5	0.21	0.30	0.0072		
				4.5	0.06	0.09	0.0007		
				5.5	0.00	0.02	0.0004		
				6.5	0.00	0.00	0.0000		
				7.5	0.00	0.00	0.0000	Cs	3.8776
							0.0133	Da	0.9764



ภาคผนวก ค

พื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่เกิดสนิม

และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิม

ตาราง ค-1 พื้นที่ผิวการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

Mix id.	Rust area											
	Covering depth (cm)											
	1			2			5			7.5		
	All area	Rust area	%	All area	Rust area	%	All area	Rust area	%	All area	Rust area	%
I45	218400	187693	85.94	218400	109835	50.29	218400	40044	18.34	218400	0	0.00
I45BA10	218400	157277	72.01	218400	68096	31.18	218400	0	0.00	218400	0	0.00
I45BA30	218400	205732	94.20	218400	41678	19.08	218400	42148	19.30	218400	0	0.00
I45F30BA10	218400	145221	66.49	218400	67300	30.82	218400	22859	10.47	218400	37900	17.35
I45F30BA30	218400	134906	61.77	218400	50193	22.98	218400	0	0.00	218400	0	0.00
I45F20L10	218400	205732	94.20	218400	46620	21.35	218400	0	0.00	218400	0	0.00
I45F20L10BA10	218400	43848	20.08	218400	11056	5.06	218400	16806	7.70	218400	0	0.00
I45F20L10BA30	218400	131797	60.35	218400	53165	24.34	218400	64916	29.72	218400	19752	9.04

ตาราง ค-2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต

Mix id.	Weight loss of steel in concrete (%)			
	Covering depth (cm)			
	1	2	5	7.5
I45	5.22	2.82	0.16	0.00
I45BA10	5.01	0.45	0.04	0.00
I45BA30	3.16	0.02	0.05	0.00
I45F30BA10	4.13	0.00	0.02	0.02
I45F30BA30	0.67	0.05	0.14	0.00
I45F20L10	1.47	0.14	0.00	0.00
I45F20L10BA10	0.24	0.00	0.07	0.00
I45F20L10BA30	1.58	0.00	0.00	0.00

ภาคผนวก ง

กำลังอัดของคอนกรีต

ตาราง ง กำลังอัดคอนกรีต

Mix id.	เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี			
	Load	Area	Compressive strength (kg/cm^2)	
	(kN)	(cm^2)		Average
I45	64.9	15.9	416	434
	70.4		451	
I45BA10	74.8	15.9	480	449
	65.2		418	
I45BA30	61.2	15.9	392	391
	60.8		390	
I45F30BA10	67.4	15.9	432	414
	61.6		395	
I45F30BA30	56.6	15.9	363	365
	57.1		366	
I45F20L10	57.0	15.9	366	400
	67.7		434	
I45F20L10BA10	51.3	15.9	329	325
	50.0		321	
I45F20L10BA30	49.5	15.9	317	313
	48.1		308	

ผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

THE EFFECT OF THE UTILIZATION OF BOTTOM ASH AS PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE ON CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF THE CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENT

ณรงค์ฤทธิ์ รัตนสัจธรรม[1] (Narongrit Rattanasadjatham)[1]

ณัฏฐา ร่มพุทธศาสนา[2] (Nattha Romputthasatsana)[2]

ทวีชัย สำราญวานิช[3] (Taweechai Sumranwanich)[3]

ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์[4] (Thidaporn Chuosavasdi)[4]

[1]นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา Email: Notaiitiy@gmail.com

[2]นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา Email: 58050075@go.buu.ac.th

[3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา Email: twc@buu.ac.th

[4]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา Email: thidaporn@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกใช้เป็นวัสดุประสานหลัก โดยใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนที่อัตราส่วน 0.20 และ 0.30 และใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานบางส่วนที่อัตราส่วน 0.10 ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 จากผลการทดลอง พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วน 0.10 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.30 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีที่สุดและการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด

ABSTRACT : The paper aims to investigate the chloride penetration resistance, corrosion of embedded steel and compressive strength of concrete exposed to marine environment at 2 years. Portland cement type I was used as the main binder. Fly ash (FA) and limestone powder (LP) were used as partial cement replacement. FA was used to replace cement at the ratio of 0.20 and 0.30, while, LP was used to replace cement at the ratio of 0.10. Bottom ash (BA) was used as partial replacement of fine aggregate at the ratio of 0.10 and 0.30. The water to binder ratio (w/b) was kept at 0.45. From the experimental results, it was found that concrete with BA at the replacement ratio of 0.10 has higher chloride penetration resistance and compressive strength than concrete without BA. Concrete with BA at the replacement ratio of 0.10 and FA to binder ratio of 0.30 has the highest chloride penetration resistance and lowest weight loss of the embedded steel.

KEYWORDS: Concrete, Chloride, Bottom ash, Fly ash, Limestone powder

1. บทนำ

โครงสร้างส่วนมากในปัจจุบันนิยมใช้คอนกรีตเป็นวัสดุโครงสร้างหลักในงานก่อสร้างอาคารเนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่าวัสดุโครงสร้างอื่นๆ เช่น โครงสร้างไม้ และโครงสร้างเหล็ก ซึ่งในงานคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานที่ยังมีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญสภาพแวดล้อมรุนแรงได้ต่ำ เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมทะเลจะเกิดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ ซึ่งเกลือคลอไรด์ทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริม เป็นผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม การเกิดสนิมส่งผลต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมทำให้มีขนาดเล็กลง ทำให้โครงสร้างมีการสูญเสียความสามารถในการรับแรง และคอนกรีตเกิดการหลุดร่อน เนื่องจากสนิมที่ขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าว ทำให้โครงสร้างมีอายุใช้งานที่ต่ำลง[6] และเนื่องด้วยในปัจจุบันมวลรวมในธรรมชาติมีจำนวนที่น้อยลง และมีราคาที่สูงขึ้น จึงทำให้มีแนวคิดที่จะนำวัสดุอื่นมาทดแทนมวลรวมธรรมชาติ จึงได้ศึกษาหาข้อมูลของเถ้าก้นเตา ซึ่งเถ้าก้นเตาเป็นผลผลิตจากโรงงานไฟฟ้าที่มีจำนวนมาก และยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร จึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าก้นเตามาแทนที่มวลรวมธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีการศึกษาแนวทางในการป้องกันการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต และเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานโครงสร้างโดยใช้เถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตามีอนุภาคค่อนข้างใหญ่ จึงนิยมนำไปทิ้งหรือถมที่ดิน ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร เมื่อเทียบกับเถ้าลอยซึ่งเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง มีความสามารถในการเก็บกักน้ำสูง จึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าก้นเตามาใช้แทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีต เพื่อให้เกิดการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตโดยใช้น้ำที่เก็บอยู่ในอนุภาคเถ้าก้นเตา[1] ซึ่งเหมาะกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ๆ ที่มีเนื้อแน่นไม่สามารถใช้น้ำจากการบ่มภายนอกคอนกรีตได้ โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตลดต่ำลงเถ้าก้นเตาสามารถปล่อยน้ำที่เก็บไว้เพื่อใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อการบ่มของคอนกรีตยังมีน้อยดังนั้นการศึกษาในเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการใช้เถ้าก้นเตาที่มีประสิทธิภาพในอนาคตต่อไป

สำหรับการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตในปัจจุบัน ยังขาดการศึกษาคุณสมบัติความคงทนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเฉพาะเถ้าก้นเตาจากแม่เมาะ ดังนั้นดังนั้นโครงงานนี้จะมุ่งศึกษากำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแม่เมาะ เพื่อเปรียบเทียบมวลรวมธรรมชาติ และหาอัตราส่วนการใช้งานที่เหมาะสม

2. วิธีการศึกษา

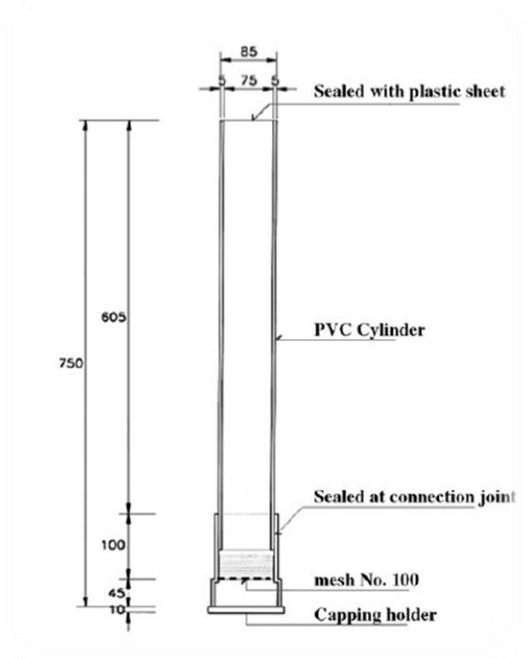
การศึกษานี้ได้ทำการทดลองความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต, การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีต โดยทำการเตรียมตัวอย่างและนำตัวอย่างคอนกรีตไปทิ้งให้เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะชนิดคือ BA ซึ่งมีความสามารถเก็บกักน้ำ 37.9% แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 0,10 และ 30 โดยปริมาตร ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าก้นเตา เถ้าลอยและผงหินปูน และตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 1 วัน หลังจากนั้นนำคอนกรีตบ่มน้ำเป็นระยะเวลาอีก 28 วัน แล้วนำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี

โดยทั่วไปวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ(Absorption) ของมวลรวมละเอียด เช่น ทราย ไม่สามารถใช้กับเถ้าก้นเตาได้ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีแรงเสียดทานพื้นผิวสูง แม้ในสภาวะที่แห้ง ดังนั้นจึงใช้ค่าความสามารถเก็บกักน้ำ (Water retainability) แทนค่าการดูดซึม โดยความสามารถ

เก็บกักน้ำ หมายถึง ปริมาณน้ำที่เติมเต็มช่องว่างในวัสดุพรุนรวมทั้งน้ำที่ถูกยึดจับไว้ที่ร่องพื้นผิวของวัสดุพรุนภายใต้แรงโน้มถ่วง โดยในการทดสอบหาค่าความสามารถเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตาสามารถทำได้โดยแช่เถ้าก้นเตาซึ่งร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ในน้ำเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นพักไว้ 30 นาที จากนั้นนำอุปกรณ์ทดสอบทรงกระบอกตามรูปที่ 1 มาใช้ใส่เถ้าก้นเตา โดยแบ่งใส่เถ้าก้นเตาในอุปกรณ์เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งชั้นละ 25 ที แล้วนำอุปกรณ์ทดสอบขึ้นเครื่องเขย่าเป็นระยะเวลา 24 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างเถ้าก้นเตาจากส่วนบน มาหาความสามารถเก็บกักน้ำต่อไป[2,4]



(ก) แบบแสดงรายละเอียดอุปกรณ์ทดสอบ

รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทาง กายภาพของ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ผงหินปูน และ เถ้าก้นเตา

Chemical compositions (%)	C1	FA	LP	BA
SiO_2	19.51	40.93	0.46	36.29
Al_2O_3	4.97	22.42	0.06	19.96
Fe_2O_3	3.78	13.64	0.03	14.56
CaO	65.38	13.63	55.25	20.84
MgO	1.08	2.93	0.37	1.96
SO_3	2.16	1.92	< 0.01	0.96
LOI	0.01	0.46	43.79	1.36
Physical properties				
Blaine fineness (cm^2/g)	3,550	8,840	2,460	
Specific gravity	3.15	2.20	2.69	1.78
Water retainability (%)	-	-	-	37.9

หมายเหตุ:

C1 คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

FA คือเถ้าลอยแม่เมาะ

LP คือ ผงหินปูน

BA คือ เถ้าก้นเตา

2.2 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด $20 \times 20 \times 20$ เซนติเมตร ไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี แล้วนำตัวอย่างมาทำการเจาะให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.5 เซนติเมตร นำไปตัดให้มีความลึก 10 ชั้น ชั้นละ 1 เซนติเมตร แล้วนำไปอบ จากนั้นนำแต่ละชั้นไปตำให้ละเอียด นำผงคอนกรีตแต่ละชั้นไปไตรเตรทหาปริมาณ คลอไรด์ทั้งหมดด้วยเครื่อง Potentiometric titration ตามมาตรฐาน ASTM C1152

นำค่าที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีต จากสมการที่ 1 ทำได้โดย

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)\right] + C_i \quad (1)$$

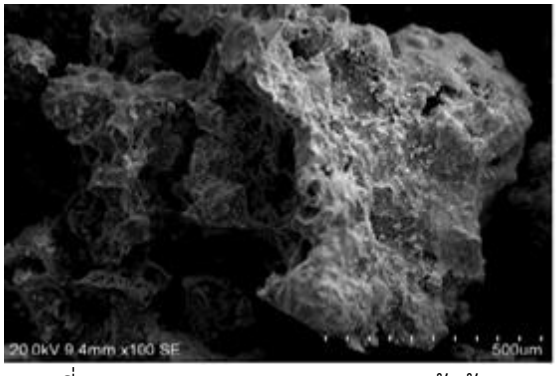
เมื่อ $C_{(x,t)}$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล t (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), C_s คือ ปริมาณ เกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของ คอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), C_i คือ ปริมาณ เกลือคลอไรด์เริ่มต้นของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), D_a คือ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ใน คอนกรีต (ซม.^{2}/ปี), x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซ.ม.), t คือ ระยะเวลาที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล (ปี)

2.3 การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ทำการทุบคอนกรีตนำเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่ระยะหุ้มเหล็ก 1, 2, 5 และ 7.5 เซนติเมตร เพื่อนำมาทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ตามมาตรฐาน ASTM G1

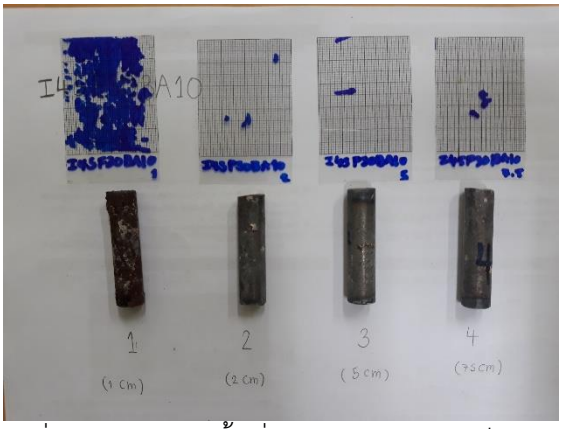
2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

นำตัวอย่างที่ทำการเจาะคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร ไปตัดให้มีความยาวเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง จากนั้นนำไปปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้กำมะถัน รอให้กำมะถันแห้งแล้วนำไปทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจนได้กำลังอัดสูงสุด

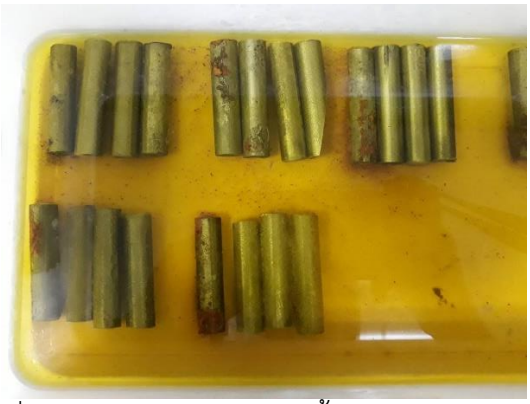


รูปที่ 2 ภาพขยาย SEM อนุภาคของเถ้าก้นเตา

รูปที่ 3 การทดสอบแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 4 การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 5 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

รูปที่ 6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต

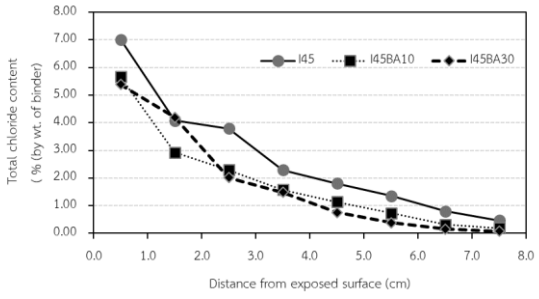
No.	Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m^3)						
			Binder			Water	Fine aggregates		Rock (SSD)
			C	FA	LP		BA (SSD)	Sand (SSD)	
1	I45	0.45	439	-	-	197	-	742	995
2	I45BA10	0.45	439	-	-	197	51	668	995
3	I45BA30	0.45	439	-	-	197	154	519	995
4	I45F30BA10	0.45	307	132	-	197	50	652	971
5	I45F30BA30	0.45	307	132	-	197	150	507	971
6	I45F20L10	0.45	307	88	44	198	-	725	973
7	I45F20L10BA10	0.45	307	88	44	198	50	653	973
8	I45F20L10BA30	0.45	307	88	44	198	150	508	973

หมายเหตุ: ตัวอย่างเช่น I45F20L10BA30 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าเถ้าลอย ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 และมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ร้อยละ 30

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

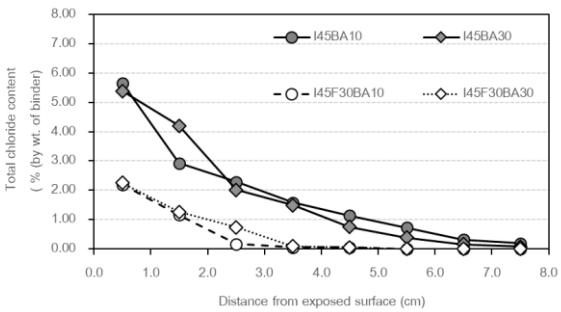
3.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Tatal chloride) ในหน่วยร้อยละโดย
น้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) กับระยะทางจากผิวหน้าสัมผัสของคอนกรีต (Distance from exposed surface)
หากคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในปริมาณน้อย แสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี



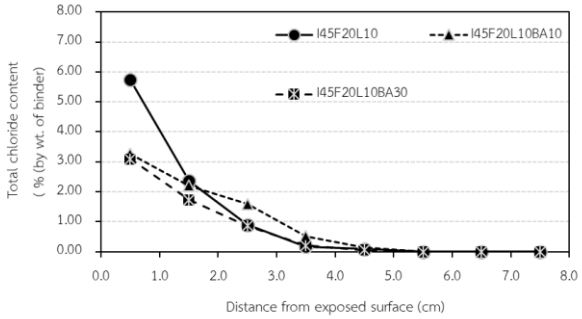
รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

จากรูปที่ 7 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้น้อยลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น



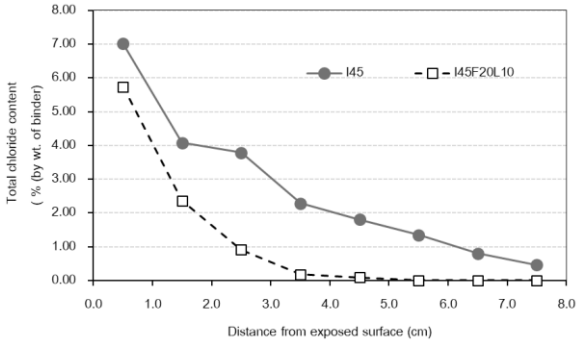
รูปที่ 8 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

จากรูปที่ 8 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด



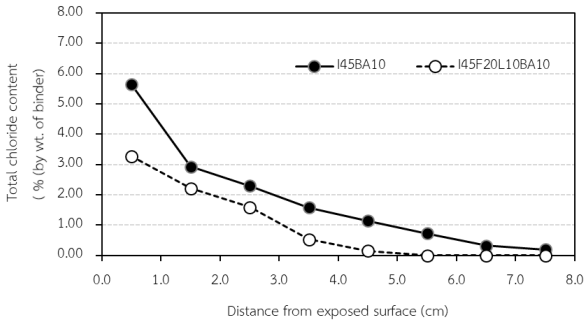
รูปที่ 9 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 9 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด



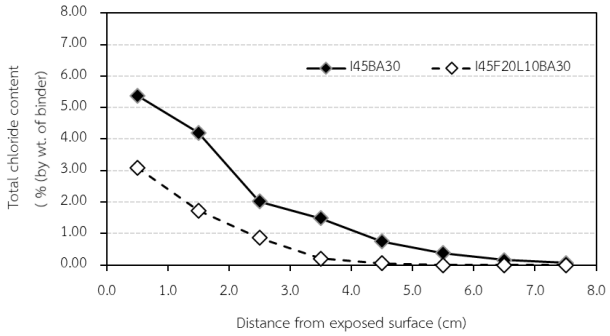
รูปที่ 10 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีต

จากรูปที่ 10 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้ลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด



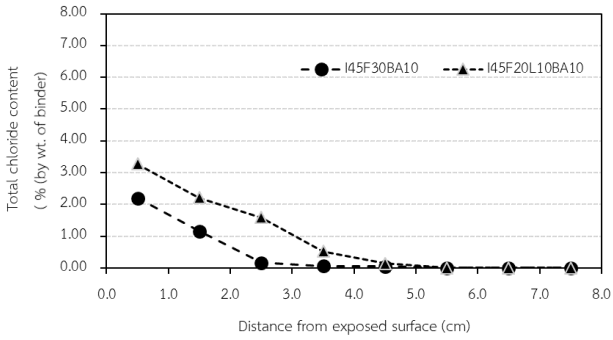
รูปที่ 11 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

จากรูปที่ 11 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อย 10 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด



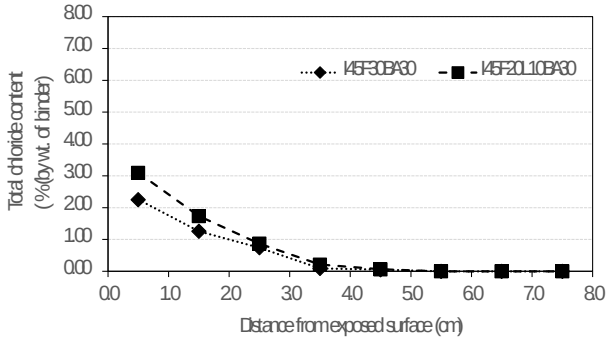
รูปที่ 12 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

จากรูปที่ 12 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อย 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูน ร้อยละ 10 มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด



รูปที่ 13 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 13 พิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการ แทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด

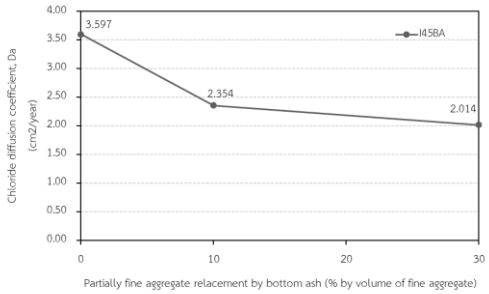


รูปที่ 14 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 14 พิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 มีความสามารถต้านทานการ แทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีที่สุด

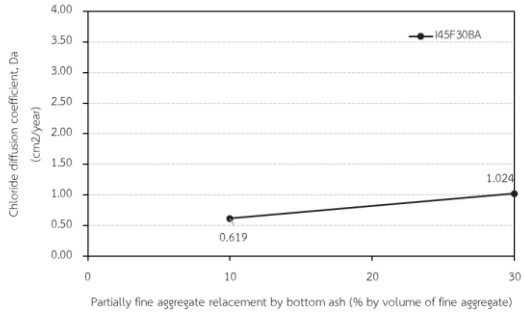
3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

เมื่อนำปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในแต่ละชั้นความลึกมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ตามสมการคำตอบข้อที่สองของ Fick จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีหน่วยตารางเซนติเมตรต่อปี



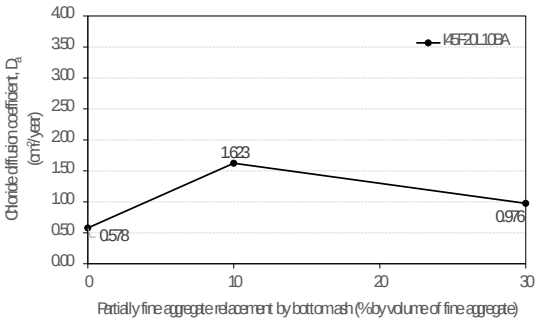
รูปที่ 15 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

จากรูปที่ 15 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลง



รูปที่ 16 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

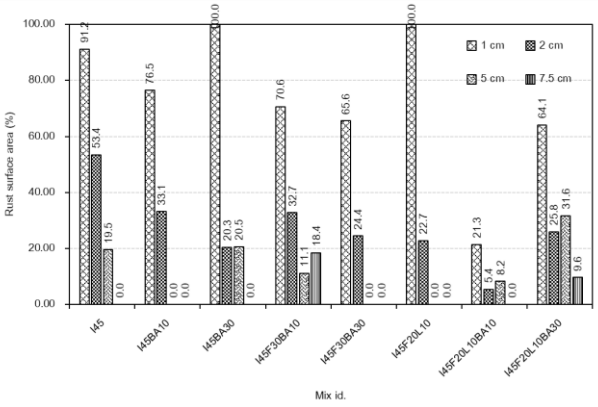
จากรูปที่ 16 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมากขึ้น



รูปที่ 17 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 17 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตน้อยที่สุด เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมากที่สุด

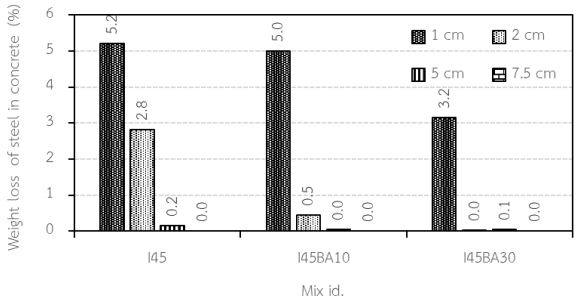
3.3 *การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม*



รูปที่ 18 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

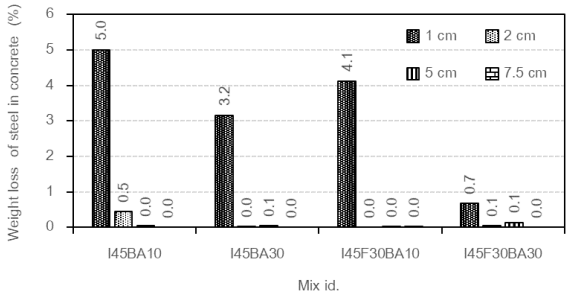
จากรูปที่ 18 จากการทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตทั่วไป , คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด , คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่า พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมไม่สามารถระบุแนวโน้มที่ชัดเจน และพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมอาจเกิดจากความชื้นและอากาศภายในคอนกรีตที่ยังหลงเหลืออยู่ตั้งแต่การผสมคอนกรีต ดังนั้นการพิจารณาพื้นที่ผิวของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นจึงเป็นดัชนี ชี้วัดที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุผลนี้การพิจารณาการสูญเสียกำลังของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ควรพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กมากกว่า

3.4 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม



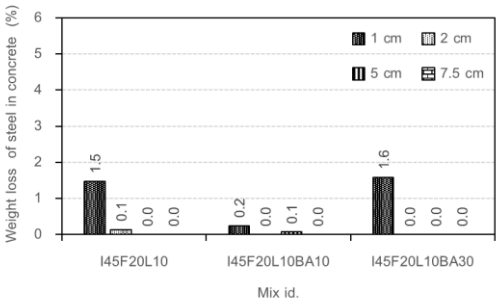
รูปที่ 19 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

จากรูปที่ 19 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด จะมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยลง เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น



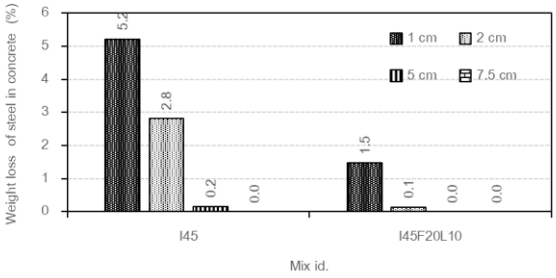
รูปที่ 20 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

จากรูปที่ 20 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลง



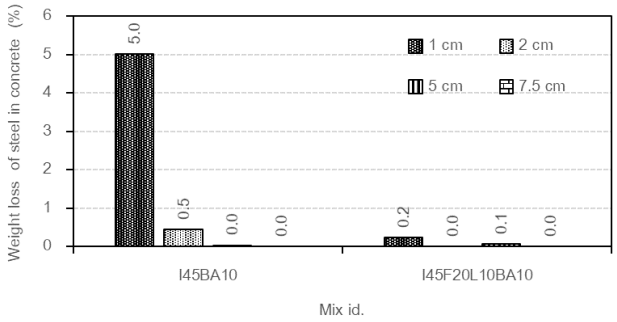
รูปที่ 21 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 21 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ร้อยละ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยที่สุด



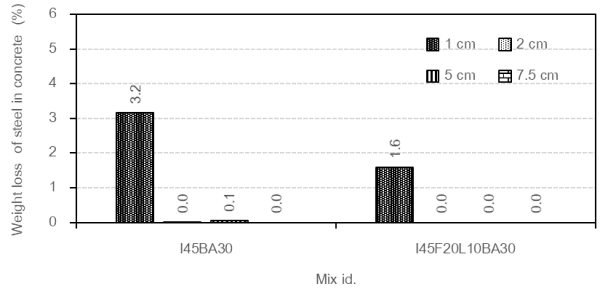
รูปที่ 22 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีต

จากรูปที่ 22 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้ลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



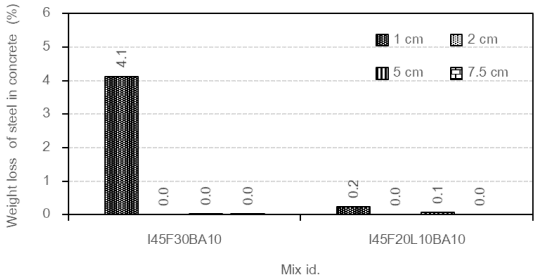
รูปที่ 23 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

จากรูปที่ 23 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อย 10 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อย 10



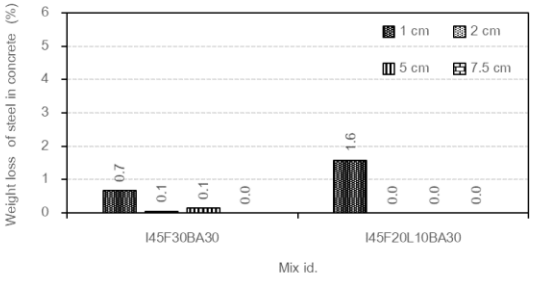
รูปที่ 24 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

จากรูปที่ 24 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อย 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30



รูปที่ 25 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 25 พิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10

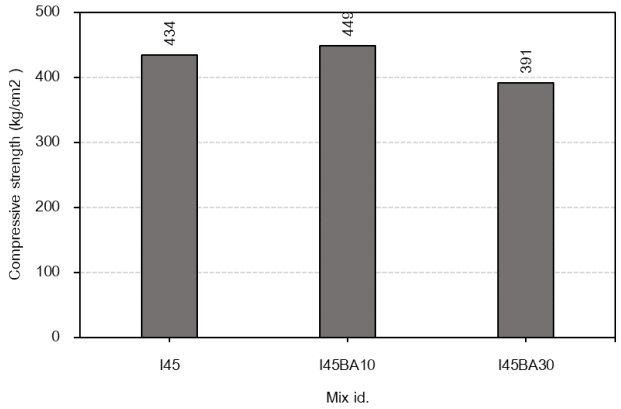


รูปที่ 26 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 26 พิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีการสูญเสียน้ำหนัก

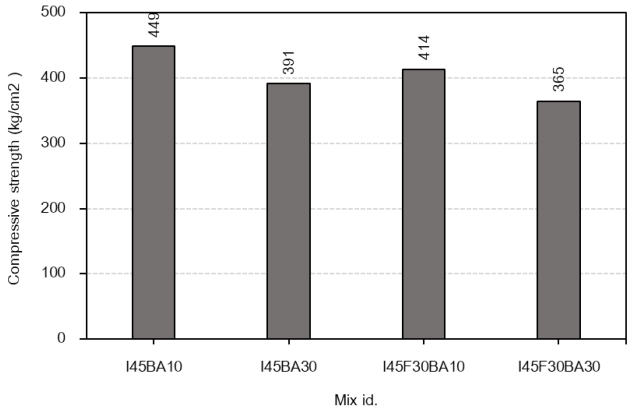
ของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อย 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30

3.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



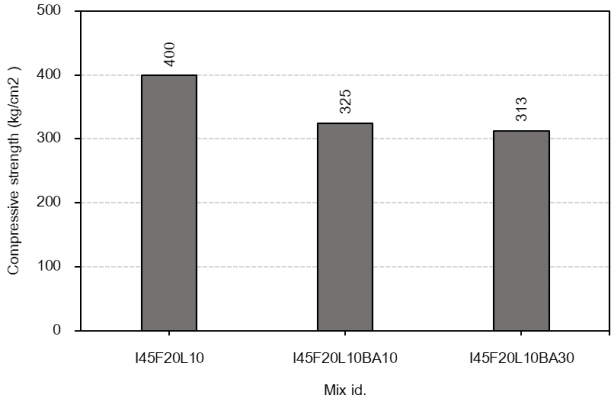
รูปที่ 27 กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

จากรูปที่ 27 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง, คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม



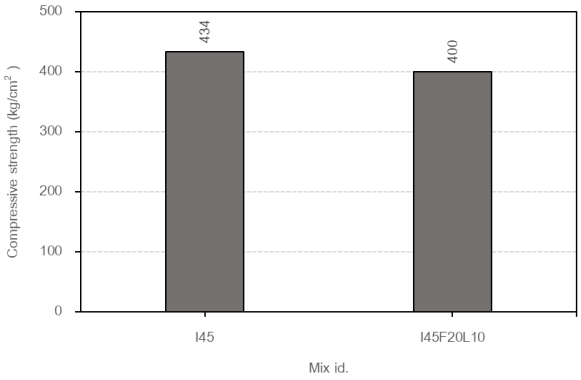
รูปที่ 28 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

จากรูปที่ 28 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับเถ้าลอย มีกำลังอัดน้อยกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเพียงอย่างเดียว



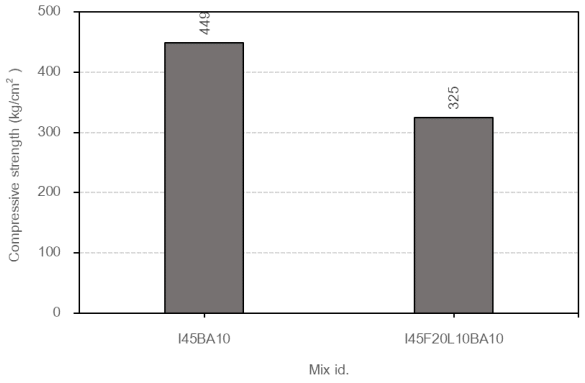
รูปที่ 29 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 29 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อมวลรวมละเอียดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง,คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตใช้ที่เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10



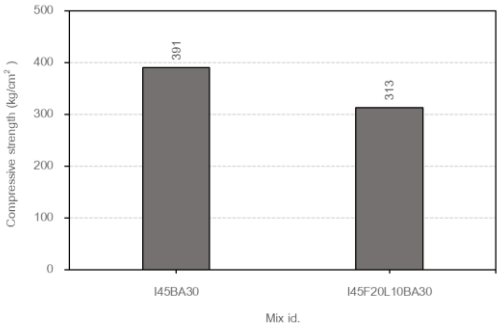
รูปที่ 30 กำลังอัดของคอนกรีต

จากรูปที่ 30 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



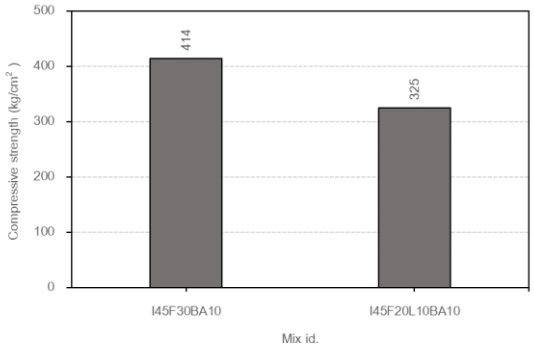
รูปที่ 31 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10

จากรูปที่ 31 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ10 มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 32 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

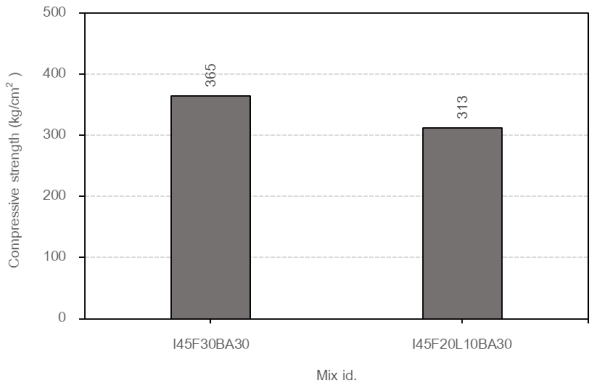
จากรูปที่ 32 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 33 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 33 พิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูน ร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ

เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30



รูปที่ 34 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10

จากรูปที่ 34 พิจารณาผลกระทบของการใช้วัสดุ 2 ชนิด และ 3 ชนิด ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1.คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีความสามารถในการ เก็บกักความชื้นไว้ได้มาก ส่งผลดีต่อการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตได้ทั่วถึง นอกจากนี้การเก็บกักน้ำภายในทำให้การดึงดูดคลอไรด์ด้วยแคปพิวลารีเกิดขึ้นได้น้อยลงเมื่อเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งในสิ่งแวดล้อมทะเลอีกด้วย

2. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

3. กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร้อย 10 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ต่ำกว่าเมื่อแทนที่ ร้อยละ 30 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนมาจากกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตาเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลมาจากการบ่มภายในของคอนกรีตเนื่องจากความชื้นที่อนุภาคเถ้าก้นเตาเก็บกักไว้ และปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าลอยในอนุภาคเถ้าก้นเตา[3,5]

4. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ30 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุดเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีความสามารถในการเก็บกักความชื้นไว้ได้มาก ส่งผลดีต่อการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตได้ทั่วถึง นอกจากนี้การเก็บกักน้ำภายในทำให้การดึงดูดคลอไรด์ด้วยแคปพิวลารีเกิดขึ้นได้น้อยลงเมื่อเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งในสิ่งแวดล้อมทะเล อีกด้วย

5. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

6. กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร้อย 10 และร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

7. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร่วมกับ เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานคลอไรด์

มากที่สุดเมื่อใช้ เถ้าก้นเตา แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ10 แทนที่วัสดุประสาน

8. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร่วมกับเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

9. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ร่วมกับเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] อุดมพร กุลมงคล, 2556. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. วิทยานิพพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] ศิระ อาทมาท, 2559. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานไฟฟ้าและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนบางส่วนของมวลรวมละเอียด การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 1, 26 สิงหาคม 2559 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต ศรีราชา จังหวัดชลบุรี

[3] ศักดิ์จุฬา นามจันทร์, 2559. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล การประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 โรงแรมสีมาธานี จังหวัดนครราชสีมา

[4] Kasemchaisiri R. & Tangtermsirikul S. , 2007. A Method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. Construction and Buiding Materials. Volume 21.

[5] Cheriaf, M., Rocha, J.C. & Pera, J. ,1999 Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. Cement and Concrete Rsearch, 29(9), 1387-1391.

[6] ทวีชัย สำราญวานิช, 2553. การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ โยธาสาร, 22 (3) 1-7

[7] Annual Book of ASTM Standards. (2000). ASTM C1152 Standard Test Method for acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. American Society for Testing and Materials.

[8] Annual Book of ASTM Standards. (2000). ASTM C1218 Standard Test Method for water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. American Society for Testing and Materials.

[9] Annual Book of ASTM Standards. (2000). ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายณรงค์ฤทธิ์ รัตนสัจธรรม
วัน เดือน ปีเกิด 9 เมษายน พ.ศ.2540
สถานที่เกิด โรงพยาบาลพระปกเกล้า อำเภอเมือง จ.จันทบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน 31/6 หมู่ที่ 8 ตำบลคลองพลู อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2551 จบการศึกษาระดับประถมศึกษาโรงเรียนวัดคลองพลู
พ.ศ. 2557 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนคิชฌกูฏวิทยา
พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมโยธา)
อีเมล Notaiitiy@gmail.com
ความสนใจ สนใจเกี่ยวกับงานโครงสร้าง

ชื่อ-สกุล นางสาวณัฏฐา ร่มพุทธศาสนา
วัน เดือน ปีเกิด 30 เมษายน พ.ศ.2540
สถานที่เกิด โรงพยาบาลราชวิถี อำเภอเมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน 33/1 หมู่ 4 ตำบลอ่างศิลา อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20000
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2551 จบการศึกษาระดับประถมศึกษาโรงเรียนแสนสุข
พ.ศ. 2557 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนชลกันยานุกูล
พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมโยธา)
อีเมล inatthabah555@gmail.com
ความสนใจ สนใจเกี่ยวงานสำนักงาน