

ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน
และคอนกรีตที่ใช้ถ้ำกั้นตาแทนที่บางส่วนของทรายภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

ศักดิ์จุฬา นามจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

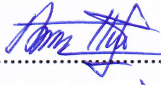
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์
ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ ศักดิ์จุฬา นามจันทร์ เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

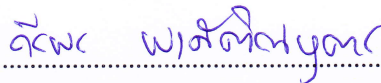
คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์



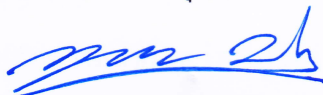
..... ประธาน
(ดร. กตติยา แก้วมณี)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)



..... กรรมการ
(ดร. วีรพร พงศ์ดิณบุตร)



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

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



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

วันที่ 26 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

กิจกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำทางการศึกษา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งจำเป็นต้องใช้หลักวิชาการด้านเทคโนโลยีคอนกรีต การใช้อุปกรณ์ ในการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตในด้านต่าง ๆ ทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมี ตลอดจน ความเอาใจใส่ต่อนิสิตในทุก ๆ ด้านด้วยความปรารถนาดีเสมอมา

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัย และพัฒนาเพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก เลขที่ วจร.4/2558 ในส่วนของการศึกษา คอนกรีตที่ใช้ถ้ำกันเตาแทนที่ทราย และให้การอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ ตลอดจนสถานที่ที่ใช้ใน การทำงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธรในการอนุเคราะห์เครื่องมือ ทดสอบ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต และเครื่องมือทดสอบ Micro hardness คอนกรีตเพื่อทดสอบ ความแข็งแรงเฉพาะจุดในคอนกรีต และอำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาตลอดการทดสอบ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่และเจ้าหน้าที่ ในการศึกษาโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ คำปรึกษา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตวกเวที แด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีอุปการคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่มีส่วนสนับสนุนให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอมอบให้เป็นประโยชน์ ต่อสาธารณชนต่อไป

ศักดิ์จุฬา นามจันทร์

56910171: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: กำลังอัดคอนกรีต/ ความต้านทานคลอไรด์/ การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม/
ซิลิกาฟุ่ม/ เถ้าก้นเตา/ โครงสร้างโพรงภายในคอนกรีต

ศักดิ์จุฬา นามจันทร์: ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุ
ประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

(CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF CONCRETE WITH SILICA FUME AS
BINDER REPLACEMENT AND CONCRETE WITH BOTTOM ASH AS PARTIAL SAND
REPLACEMENT UNDER MARINE ENVIRONMENT) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์:
ทวีชัย สำราญวานิช, Ph.D., 137 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน
และคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วน ต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ระยะเวลา
การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม กำลังอัด ความพรุน และขนาดโพรงช่องว่าง
ภายในเนื้อของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี ศึกษาตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 5, 10
และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 และ 30 โดย
ปริมาตรของทราย

จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีความต้านทาน
การแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิมน้อยลง
ความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตลดลง กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น
และมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากผล
ของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟุ่มและการเติมเต็มช่องว่าง โดยอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม
นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่
สูงขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิมลดลงเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย
ร้อยละ 30 กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 แต่ลดลงเมื่อใช้
เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 30 การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูงขึ้น
และมีขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อใหญ่ขึ้น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่มากขึ้น
และกำลังอัดที่มากขึ้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นผลจากความแข็งแรงที่สูงขึ้นของเพสต์รอบ ๆ
อนุภาคเถ้าก้นเตาอันเนื่องมาจากการบ่มภายในคอนกรีต

56910171: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: COMPRESSIVE STRENGTH/ CHLORIDE RESISTANCE/ WEIGHT LOSS
OF REINFORCEMENT/ SILICA FUME/ BOTTOM ASH AND PORE
STRUCTURES OF CONCRETE

SAKCHULA NAMJAN: CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF
CONCRETE WITH SILICA FUME AS BINDER REPLACEMENT AND CONCRETE WITH
BOTTOM ASH AS PARTIAL SAND REPLACEMENT UNDER MARINE ENVIRONMENT.
ADVISORY COMMITTEE: TAWEECHAI SUMRANWANICH, Ph.D., 137 P. 2016.

The research aims to study the effect of concrete with silica fume as partial replacement of binder and concrete with bottom ash as partial replacement of sand on the chloride penetration resistance, compressive strength, porosity and average pore diameter of the concrete specimens that were exposed to marine environment for 2 years. The concrete in this study used the ratios of water to binder as 0.40 and 0.50. The binder replacement of silica fume at 5% 10% and 15% by weight, and partial sand replacement of bottom ash at 10% and 30% by volume.

From the study result, it was found that concrete with higher silica fume replacement has higher chloride penetration resistance and lower weight loss of steel corrosion. The porosity and average pore diameter of concrete with silica fume decrease. The compressive strength of concrete with silica fume increases and has the highest at 5% replacement of silica fume. There are effects results from the Pozzolanic reaction of silica fume and the filler effect of silica fume particle. Moreover, it was found that concrete with bottom ash replacement has higher chloride penetration resistance and lower weight loss of steel corrosion. The compressive strength of concrete with 10% bottom ash replacement is higher than controlled concrete, but become lower than 30% replacement. Concrete with bottom ash as partial sand replacement has higher porosity and larger average pore diameter. The higher chloride penetration resistance and compressive strength of concrete with bottom ash are from the higher strength of paste surrounding the bottom ash particles, due to the effect of internal curing concrete.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
ขอบเขตการศึกษา	3
ประโยชน์ที่ได้รับ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
วัสดุพอลิโซลัน	5
ประเภทของวัสดุพอลิโซลัน	5
ปฏิกิริยาของวัสดุพอลิโซลัน	5
ปูนซีเมนต์.....	6
องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	6
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	8
ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	10
ซัลโฟกาฟูม	11
องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ.....	11
การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยซัลโฟกาฟูม.....	12
งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ซัลโฟกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีต.....	12
เถ้าก้นเตา	15
องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ	15
การปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตด้วยเถ้าก้นเตา	15
งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในคอนกรีต	16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์.....	17
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	21
ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	26
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	27
การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล...	29
3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	31
วัสดุที่ใช้.....	31
สารเคมีที่ใช้.....	38
อุปกรณ์ที่ใช้	39
วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	46
ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้	46
การหล่อตัวอย่างคอนกรีต	48
สถานที่ทดสอบคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล.....	48
การทดสอบคอนกรีต	49
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	49
สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต.....	54
กำลังอัดคอนกรีต	55
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	55
ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตด้วยวิธี MIP	57
ความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642	58
การเก็บกักความชื้นของคอนกรีตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง.....	60
Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์.....	61
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	65
คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน	65
ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของ	
คอนกรีต.....	65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลกระทบของซิลิกาฟุ้งต่อความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีต.....	69
ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสาน.....	73
ผลกระทบของซิลิกาฟุ้งต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	74
ผลกระทบของซิลิกาฟุ้งต่อกำลังอัดของคอนกรีต.....	76
ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสาน	77
คอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่บางส่วนของทราย.....	79
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	79
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	83
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อกำลังอัดคอนกรีต	84
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีต.....	85
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อ Micro hardness ของซีเมนต์ในคอนกรีต...	89
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อการเก็บกักความชื้นของคอนกรีตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง.....	92
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายบางส่วน	97
5 สรุปผล	99
สรุปผล.....	99
ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต.....	107
ภาคผนวก ข สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต.....	110

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ค พื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่เกิดสนิม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม จากสนิม	123
ภาคผนวก ง กำลังอัดคอนกรีต.....	125
ภาคผนวก จ Mercury Intrusion Porosimeter test (MIP)	128
ภาคผนวก ฉ ความพรุนตาม ASTM C642.....	130
ภาคผนวก ช ความชื้นภายในคอนกรีตที่เผชิญสภาวะเปียกสลับแห้ง	132
ภาคผนวก ซ Micro hardness ของมอร์ตาร์	134
ประวัติผู้วิจัย	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณสารประกอบออกไซด์โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานวิจัยนี้	8
2-2 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ	28
3-1 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมที่ใช้ในงานวิจัย	33
3-2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม	33
3-3 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับถ้ำกั้นเตาที่ใช้ในงานวิจัย	35
3-4 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายและถ้ำกั้นเตา	35
3-5 ขนาดคละของมวลหยาบ	36
3-6 ขนาดคละของมวลละเอียด	37
3-7 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	47

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	รูปร่างของ C_3S และ C_2S 6
2-2	การพัฒนากำลังของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF 7
2-3	รูปร่างอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม..... 11
2-4	รูปร่างอนุภาคของเถ้าก้นเตา..... 15
2-5	การเสื่อมสภาพของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากคลอไรด์..... 18
2-6	ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็ก 20
2-7	การเกิดการขยายตัวปริมาตรเหล็กเสริมทำให้เกิดรอยแตก และการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีต..... 21
2-8	การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการแพร่..... 22
2-9	การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการดึงดูดออสโมซิส..... 23
2-10	การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการดึงดูดแคปพิลลารี 24
2-11	การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยความดันของน้ำ 25
2-12	แผนผังประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต 27
3-1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 31
3-2	ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 32
3-3	ซิลิกาฟุ่ม..... 32
3-4	เถ้าก้นเตา..... 34
3-5	มวลรวมหยาบ 36
3-6	มวลรวมละเอียด..... 37
3-7	กรดไนตริก 38
3-8	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 38
3-9	ซิลเวอร์ไนเตรท 39
3-10	โม้ผสมคอนกรีต..... 39
3-11	แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ 40
3-12	อุปกรณ์กำหนดระยะฝังเหล็กเสริมเหล็กเสริม..... 40
3-13	เหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม. 41
3-14	เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต..... 41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-15 เครื่องชั่งดิจิตอล	42
3-16 เครื่องตัดคอนกรีต	42
3-17 เครื่องจีเขย่าคอนกรีต.....	43
3-18 เครื่อง Potentiometric titration	43
3-19 เครื่องต้ม	44
3-20 เครื่องดูดอากาศ.....	44
3-21 ชุดเครื่องแก้ว เซรามิก และกระดาษกรอง	45
3-22 ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างคอนกรีต	45
3-23 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่ายุบตัว	46
3-24 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการฝังเหล็ก	48
3-25 สถานที่ทดสอบคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล.....	48
3-26 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตและตำแหน่งการเจาะ.....	49
3-27 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะจากก้อนตัวอย่างและการตัดแบ่งแท่งตัวอย่าง	50
3-28 ครกใช้บดตัวอย่าง และผงตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว.....	51
3-29 การประกอบเครื่องดูดเข้ากับกรวยเซรามิกและขวดแก้วทรงชมพู.....	51
3-30 การไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration.....	52
3-31 ผลปริมาณคลอไรด์จากการไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration.....	52
3-32 การเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากผลการทดลองกับค่าจากแบบจำลอง	55
3-33 แท่งเหล็กที่เกิดสนิม และแผนกราฟที่ทำการระบายพื้นที่เกิดสนิม	56
3-34 ขนาดของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตในการศึกษา	56
3-35 แบบจำลองการแทรกตัวของปรอทเข้าไปในช่องว่างในคอนกรีต.....	58
3-36 แซ่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชม.....	59
3-37 อบตัวอย่างในตู้อบควบคุมอุณหภูมิ	59
3-38 ต้มตัวอย่างในน้ำเดือด	60
3-39 การชั่งน้ำหนักแบบต่าง ๆ ในการทดสอบความพรุนคอนกรีต.....	60
3-40 การทดสอบการสะสมความชื้นของคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้ง.....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-41 การตัดตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ Micro hardness	62
3-42 การหล่อเรซินเพื่อยึดตัวอย่างเข้าด้วยกัน	62
3-43 การขัดผิวหน้าก่อนคอนกรีตที่หล่อเรซินแล้ว.....	63
3-44 ตัวอย่างคอนกรีตที่พร้อมทดสอบ.....	63
3-45 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ Micro hardness	64
3-46 ร่องรอยจากการกดตัวอย่างด้วยหัวเพชรอบอนุภาคเล็กเกินเตาและอนุภาคทราย.....	64
4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่แทนที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	65
4-2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่แทนที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	66
4-3 ผลกระทบจากอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5	67
4-4 ผลกระทบจากอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10	67
4-5 ผลกระทบจากอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15	68
4-6 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูม	68
4-7 ผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP.....	69
4-8 ผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP.....	70
4-9 ความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน	72
4-10 ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน.....	72
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยกับสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-12 ร้อยละของการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ ซีลีกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน	74
4-13 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ ซีลีกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน	75
4-14 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซีลีกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่อายุ 28 วัน และ 2 ปี.....	77
4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ ซีลีกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	78
4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ ซีลีกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	78
4-17 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	80
4-18 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	80
4-19 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึก ต่าง ๆ ของคอนกรีตทั่วไป	81
4-20 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึก ต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10	81
4-21 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึก ต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 30	82
4-22 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย	82
4-23 ร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย	83
4-24 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย	84
4-25 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายที่อายุ 28 วัน และ 2 ปี	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-26 ความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทรายในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP	86
4-27 ความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทรายในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP	86
4-28 ร้อยละของความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทราย	88
4-29 ขนาดโพรงช่องว่างเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทราย.....	88
4-30 ค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคทรายในคอนกรีต I40	89
4-31 ค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคทรายในคอนกรีต I40BA10.....	90
4-32 ค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคเหล็กเส้นในคอนกรีตส่วนผสม I40BA10	90
4-33 แนวโน้มของค่า Micro Hardness ของซีเมนต์เพสต์บริเวณรอบอนุภาคมวลรวมละเอียด ที่เป็นทรายและเหล็กเส้นในคอนกรีต I40 และ I40BA10	91
4-34 ความชื้นที่ถูกกักเก็บสะสมในคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทรายภายใต้สภาวะเปียก สลับแห้ง.....	92
4-35 กลไกการดึงดูดคลอไรด์ด้วยวิธีแคปพิวลารีของคอนกรีตทั่วไป	95
4-36 กลไกการดึงดูดคลอไรด์ด้วยวิธีแคปพิวลารีของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทราย	96
4-37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทรายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	97
4-38 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นแทนที่ทรายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	97

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างอาคารเนื่องจากมีต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดีกว่าวัสดุโครงสร้างอื่น เช่น โครงสร้างเหล็ก และ โครงสร้างไม้ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตไม่สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญสารเคมีรุนแรงได้ดีเท่าที่ควร อาทิเช่น สภาพสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) ที่มีปริมาณคลอไรด์สูง ส่งผลให้อายุการใช้งาน (Service life) ของโครงสร้างคอนกรีตสั้นลง

สาเหตุของปัญหาที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีต (Concrete structures) มีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติเมื่อต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเล คือ

1. การออกแบบ

ในการออกแบบโครงสร้างที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมรุนแรง ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงการออกแบบที่เหมาะสม เพื่อให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีอายุมากขึ้น อาทิเช่น การใช้ระยะหุ้มเหล็กที่มากขึ้น การใช้กระแสไฟฟ้าช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการเลือกใช้วัสดุที่สามารถต้านทานการเสื่อมสภาพภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลได้ เป็นต้น

2. การก่อสร้าง

การก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจริงมักประสบปัญหาการควบคุมการก่อสร้างให้เป็นไปตามแบบ เนื่องจากต้องมีการควบคุมและตรวจสอบโดยละเอียดและทั่วถึง ซึ่งสำหรับในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลแล้ว หากการเทคอนกรีตไม่ได้ควบคุมตรวจสอบอย่างดีอาจก่อให้เกิดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตมาก ทำให้คลอไรด์และความชื้นในน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานลดลง

3. การเลือกใช้วัสดุ

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ต้องมีคุณลักษณะพิเศษ กล่าวคือ ต้องต้านทานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ได้โดยเฉพาะ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสภาวะเปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying)

จะมีความเสี่ยงมากที่สุด โดยปกติการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลส่วนมากต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตสำหรับโครงสร้างทั่วไป

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เป็นวัสดุที่ดีและถูกใช้ในการแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตโดยมีช่วยเพิ่มด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride resistance) และกำลังอัด (Compressive strength) ของคอนกรีต ซิลิกาฟุ้งเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเปลี่ยนแร่ Quartz บริสุทธิ์ให้เป็น Silicon ที่อุณหภูมิ 2,000 องศาเซลเซียส ซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ผงประมาณ 150 เท่า และมีปริมาณของ SiO_2 ร้อยละ 85-95 โดยน้ำหนัก ทำให้เมื่อใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ได้ดีและรวดเร็ว อีกทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กของซิลิกาฟุ้งสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต (Filler effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นอีกด้วย จากงานวิจัยของกรรภิรมย์ ศรีสุธรรม และ พนิดา ปรีชานุพันธ์ (2556) พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตกำลังอัด และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้น

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตที่โครงสร้างที่เผชิญสภาพแวดล้อมทะเล (Marine concrete) อย่างแพร่หลาย คือ เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า นิยมนำมาผสมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต เนื่องจากเถ้าลอยนั้นมีองค์ประกอบของ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และ อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) กับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ของปูนซีเมนต์ เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) มากขึ้น ทำให้คอนกรีตทึบน้ำมากขึ้น ลดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ ส่วนเถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้อีกส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาถ่านหินและมีจำนวนมาก เถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้บางส่วนจากอนุภาคเถ้าลอยที่แทรกตัวอยู่ภายในอนุภาคของเถ้าก้นเตา แต่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร แต่ในปัจจุบันทรายที่เป็นมวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีตมีการขาดแคลนและมีราคาสูงมากขึ้น จึงเกิดแนวคิดการประยุกต์ใช้เถ้าก้นเตาซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ใกล้เคียงทรายนำมาใช้แทนที่บางส่วนของทรายเพื่อช่วยลดปัญหาการขาดแคลนวัสดุทรายในการผลิตคอนกรีต จุดเด่นอีกประการของเถ้าก้นเตา คือ มีความพรุนสูง ทำให้มีความสามารถในการเก็บกักน้ำได้ดี (Water retain ability) จากงานวิจัยของอุดมพร กุลมงคล (2556) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนมีความสามารถ

ในการบ่มตัวเองได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียว และช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตให้ดีขึ้นอีกด้วย

อย่างไรก็ตามยังไม่มียานวิจัยที่ศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าก้นเตาในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศไทย ซึ่งการศึกษาภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการยังไม่สามารถคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีในสิ่งแวดล้อมจริงได้ อาทิเช่น ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิ การไหลของกระแสน้ำ สารเคมีอื่น ๆ ในน้ำทะเล เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทราย โดยเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นระยะเวลา 2 ปี เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าก้นเตาในงานคอนกรีต ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล และเป็นแนวทางในการประยุกต์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทรายได้ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
2. เพื่อศึกษาการเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมในคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
3. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
4. เพื่อศึกษาขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ย และความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ทำการหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ซม.³ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และ 0.50 สำหรับคอนกรีตที่แทนที่ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรทราย ผึ่งเหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. (RB12) ชั้นคุณภาพ SR 24 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

เสริม 1, 2, 5 และ 7.5 ซม. แล้วนำก้อนตัวอย่างไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ณ ชายฝั่งทะเลของจังหวัดชลบุรีเป็นระยะเวลา 2 ปี

เมื่อครบกำหนดระยะเวลา 2 ปี จึงนำตัวอย่างมาทดสอบ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัดของคอนกรีต พื้นที่ผิวการเกิดสนิม การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อ , ความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) และด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM C642 Standard test method for density absorption and voids in hardened concrete Micro hardness และความสามารถในการกักเก็บน้ำสำหรับคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
2. ทำให้ทราบถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
3. ทำให้ทราบถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
4. ทำให้ทราบถึงขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อและความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดว่าวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) เป็นวัสดุจำพวกสารซิลิกาหรืออลูมินา ซึ่งอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้หรือไม่ก็ได้ แต่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติแล้วเกิดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน

ประเภทของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน เศษเถ้าภูเขาไฟ หินชั้น หินปูน เป็นต้น เมื่อต้องการใช้ต้องนำมาเผาและบดเพื่อให้มีสภาพเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา

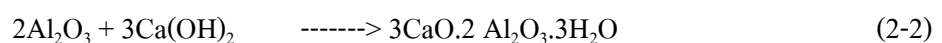
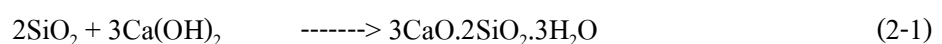
2. วัสดุปอซโซลานที่เกิดจากการสังเคราะห์ (Modified pozzolan) เกิดจาก ขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม อาจเป็นของเสียที่เหลือจากกระบวนการผลิต หรือเป็นวัสดุที่ถูกผลิตเพื่อนำมาเป็นวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ตะกรันถลุงเหล็ก ซีโอไลท์ สังเคราะห์ เป็นต้น

ปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นแบ่งได้จากคุณสมบัติ 2 ประการดังนี้

1. ทางด้านเคมี

เมื่อวัสดุปอซโซลานถูกผสมในคอนกรีต ซิลิกาหรืออลูมินาที่มีอยู่จำนวนมากจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Pozzolan reaction เกิดเป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นวัสดุประสานให้กำลังสูงและมีมวลมากส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้น โดยปฏิกิริยาเคมีแสดงดังสมการที่ 2-1 และ 2-2



2. ทางด้านกายภาพ

วัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างภายในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น และกำลังสูงขึ้น นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคเป็นทรงกลมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเทของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

ปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

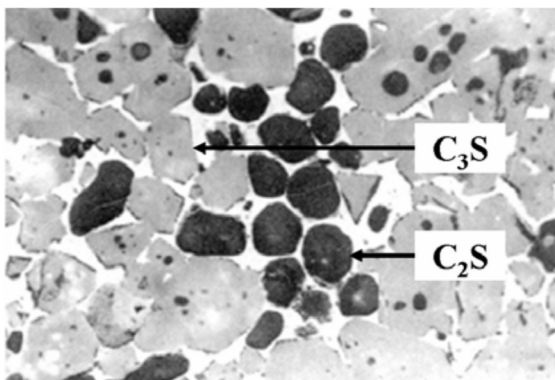
องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประกอบออกไซด์ต่าง ๆ โดยมีปริมาณตามตารางที่ 2-1 สามารถแบ่งได้ออก 2 กลุ่มหลัก ดังนี้

1. สารประกอบออกไซด์หลัก (Major oxides)

สารประกอบออกไซด์ในปูนซีเมนต์รวมตัวอยู่ในรูปของสารประกอบรูปต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และขั้นตอนการผลิต ซึ่งสารประกอบออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

1.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) มีอยู่ประมาณร้อยละ 45-55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เตาดังภาพที่ 2-1 เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและให้กำลังในช่วงสัปดาห์แรก โดยการทำปฏิกิริยาทำให้ความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูล/กรัม

1.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) มีอยู่ประมาณร้อยละ 15-35 มีลักษณะเป็นเม็ดกลมค้ำดังภาพที่ 2-1 เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวแต่จะช้ากว่า C_3S โดยจะให้กำลังประมาณ 4 สัปดาห์ขึ้นไป และจะเกิดความร้อนจากการทำปฏิกิริยาประมาณ 250 จูล/กรัม

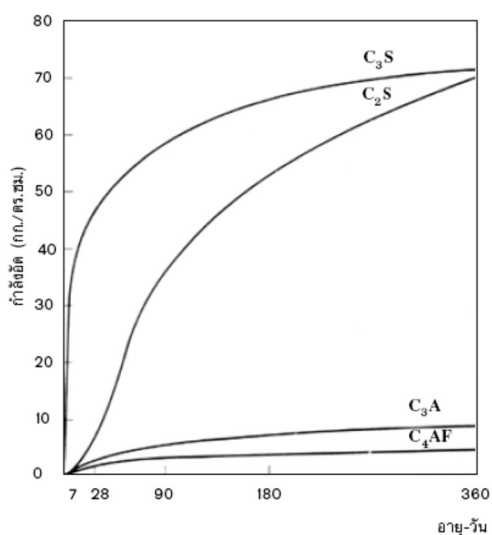


ภาพที่ 2-1 รูปร่างของ C_3S และ C_2S (ชัชวาล เศรษฐบุตร์, 2540)

1.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) มีอยู่ประมาณร้อยละ 7-15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสี่เท่าอ่อน เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงมาก และเกิดการก่อตัวทันที มีพลังงานปลดปล่อยออกมาขณะทำปฏิกิริยา ประมาณ 880 จูล/กรัม

1.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) มีอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 อยู่ในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็ว ปลดปล่อยความร้อนขณะทำปฏิกิริยาประมาณ 420 จูล/กรัม

การพัฒนากำลังของสารประกอบออกไซด์ต่าง ๆ ในปูนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังดังภาพที่ 2-2 โดยสารประกอบ C_3S มีการพัฒนากำลังที่สูงและเร็วที่สุด



ภาพที่ 2-2 การพัฒนากำลังของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2540)

2. สารประกอบออกไซด์รอง (Minor oxides)

2.1 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulphur Trioxide, SO_3) มีปริมาณไม่มากในวัตถุดิบ แต่จะเพิ่มสูงขึ้นในขั้นตอนการเผาขึ้นอยู่กับการเผา ข้อดีของ SO_3 คือ เมื่อรวมตัวกับ alkaline และ O_2 เป็น alkaline sulfate ทำให้กำลังในช่วงต้นสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง ดังนั้นการใช้งานจริงจึงต้องมีการใช้ปชัม เพื่อหน่วงเวลาการก่อตัว ดังนั้นจึงยอมให้มี SO_3 อยู่ประมาณ 3.5-4.5% แล้วแต่ชนิดและมาตรฐานของปูนซีเมนต์

2.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ปกติในปูนซีเมนต์จะยอมให้มีไม่เกินร้อยละ 2 เพราะเมื่อ Free MgO เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็น $Mg(OH)_2$ ทำให้เกิดการขยายตัว ทำให้เกิด

การแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัว ซึ่ง MgO ที่มีอยู่ในซีเมนต์เรียกว่า Dolomite ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) ดังนั้นจึงไม่ใช่หินปูนที่มี MgO สูงมาเป็นส่วนผสมคอนกรีต

2.3 อัดคาไลด์ออกไซด์ (Alkali oxide) ได้แก่ Na_2O และ K_2O พบในวัสดุที่นำมาผลิตปูนซีเมนต์ เช่น Clay และ Marl สารนี้เมื่อสะสมจำนวนมากในเตาเผาปูนซีเมนต์ทำให้เกิดการอุดตัน และเมื่อรวมตัวกับมวลรวมที่ Active จะทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นในปูนซีเมนต์จึงยอมให้มีอัดคาไลด์ออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 0.6

2.4 ปูนขาวอิสระ (Free lime, CaO) พบได้น้อยมากใน Raw mix มีอยู่ประมาณร้อยละ 0.002-0.003 แล้วแต่แหล่งของวัตถุดิบ

2.5 ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5) พบในวัตถุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์บางแห่ง ส่วนมากพบไม่เกินร้อยละ 0.1-0.2 ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์จะทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้าลง เนื่องจาก P_2O_5 จะทำให้ C_3S กลายเป็น C_2S กับ CaO

ตารางที่ 2-1 ปริมาณสารประกอบออกไซด์โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานวิจัยนี้

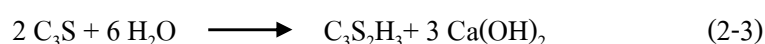
สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	60.0	CaO
ซิลิกอนออกไซด์ (Silicon Oxide)	20	SiO_2
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide)	5	Al_2O_3
ไอออนออกไซด์ (Ferric Oxide)	3	Fe_2O
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	1.1	MgO
ไททานเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide)	2.4	K_2O
ออกไซด์ของธาตุอื่น ๆ	1.5	-
LOI	2	-

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

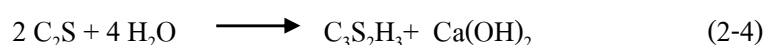
หลักการการเกิดปฏิกิริยาเมื่อปูนซีเมนต์รวมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมี C_3S เป็นสารประกอบหลักที่ทำปฏิกิริยา ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยในช่วงแรก เรียกว่า ปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จากนั้นซีเมนต์เพสต์จะมีสภาพแบบพลาสติก และเมื่อความเข้มข้นมากพอทำให้ CH ตกผลึก ทำให้เกิดปฏิกิริยาของ C_2S และ C_3S อีกครั้งทำให้เกิด CSH จากนั้นก็จะเกิดการทำปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้เอทพริงไกด์

เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต และสารประกอบของ $C_4(A,F)H_{13}$ และแคลเซียมซิลิเกต ยังทำปฏิกิริยาต่อทำให้เกิด CSH มากขึ้นจนสามารถยึดเกาะกันเป็นผลึก และปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์แสดงในสมการที่ 2-3 ถึง 2-6

สมการของ C_3S ;



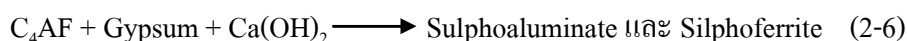
สมการของ C_2S ;



สมการของ C_3A ;



สมการของ C_4AF ;



การเกิดปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์เมื่อรวมกับน้ำในงานคอนกรีตมีขั้นตอนการทำปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

1. เมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่จะลดลงและหยุดปฏิกิริยาภายในระยะเวลา 15 นาทีแรก

2. ระยะดอร์แมนต์ (Dormant period) หรือระยะสงบ จะไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา ซีเมนต์เฟสจะอยู่ในสภาพพลาสติกเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ทำให้สามารถเทเข้าแบบหล่อได้ก่อนที่คอนกรีตจะจับตัวเป็นผลึกแข็ง ซึ่งหลังจากนี้ C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอีกครั้ง

3. ระยะคายความร้อนอย่างต่อเนื่อง มีระยะเวลา 4-8 ชั่วโมง จะเกิดการก่อตัวครั้งสุดท้าย และเริ่มพัฒนาความสามารถในการรับกำลัง และเมื่อเวลานานขึ้นปฏิกิริยาก็ลดน้อยลงแต่ยังไม่สิ้นสุดการทำปฏิกิริยา

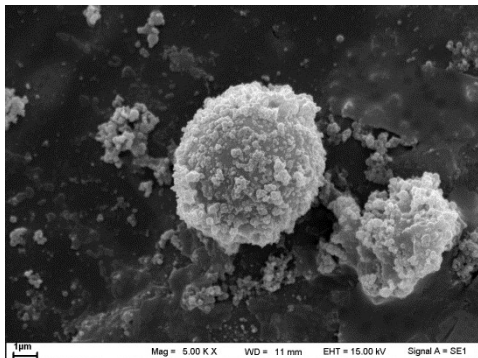
ปริมาตรของผลึกภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา และผลึกภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์และมวลรวม ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์จนอยู่ในรูปของแข็งในที่สุด

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

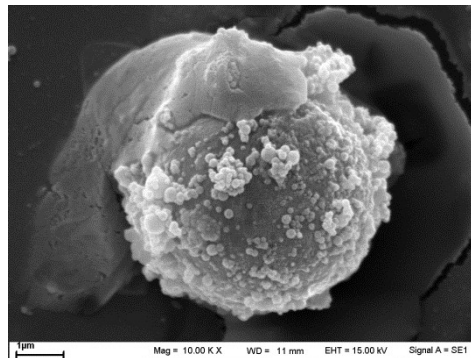
การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีด้วยกันหลายปัจจัย ซึ่งปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยปัจจัยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีดังต่อไปนี้

1. อายุของซีเมนต์เพสต์ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงพบมีมากในช่วงอายุต้นและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป
2. องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ ในปูนซีเมนต์จะมีสารไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S ประมาณร้อยละ 45-55 ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ในระดับดี และมีสารไตรแคลเซียมอลูมิเนต C_3A อยู่ประมาณร้อยละ 7-15 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ในระดับที่ดีมาก
3. ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์มีความละเอียดสูงทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้น
4. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตให้มากขึ้น เนื่องจากไม่มีน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากเกินไป ซึ่งน้ำส่วนนี้ทำให้เกิดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง แต่หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ต้องมีการเติมน้ำให้กับคอนกรีตเพื่อให้มีน้ำเพียงพอให้อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ดังนั้นต้องอาศัยการบ่มคอนกรีตเพื่อช่วยรักษาความชื้นในคอนกรีตและเติมน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
5. อุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากและรวดเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิโดยรอบสูงขึ้น

ซิลิกาฟุ้ง



ก. อนุภาคที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



ข. อนุภาคที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

ภาพที่ 2-3 รูปร่างอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2550) กล่าวว่า ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Micro silica) เป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการผลิตซิลิกอนจากแร่ Quartz ด้วยวิธี Electric arc ที่อุณหภูมิ 2,000 องศาเซลเซียส จากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดไอของ SiO_2 ระเหย และเกิดการควบแน่นเกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็กมาก แต่ไม่จับตัวกับเป็นผลึก มีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงกลมดังภาพที่ 2-3 โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ประมาณ 100 เท่า กรรภิรมย์ ศรีสุธรรม และ พนิดา ปรีชานุพันธ์ (2556) กล่าวว่า ซิลิกาฟุ้งมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ SiO_2 ที่มีมากถึงร้อยละ 85-95 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสารที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกในคอนกรีตได้ดี ดังนั้นซิลิกาฟุ้งจึงเป็นที่ยอมรับในงานคอนกรีตในการนำมาใช้ในเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีต

องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

สารประกอบที่มีมากที่สุดในซิลิกาฟุ้ง คือ SiO_2 และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก (Non-crystalline solid) มากถึงร้อยละ 85-95 โดยน้ำหนักทั้งหมด และสารประกอบอื่น เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , และออกไซด์ของธาตุอื่น ๆ อยู่ในปริมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ SiO_2

การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยซิลิกาฟุ่ม

1. คุณสมบัติด้านกำลังอัด

ซิลิกาฟุ่มมีสารประกอบ SiO_2 อยู่มากถึงร้อยละ 92 และมีขนาดอนุภาคเล็กมากเมื่อเทียบกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ซิลิกาฟุ่มมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เพิ่มการยึดประสานระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกดังที่กล่าวมาในข้างต้น และด้วยอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่มีขนาดเล็ก จึงสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในของคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

2. คุณสมบัติด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มพบว่ามีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้เกิดผลึก CSH มาก และซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคเล็กจึงสามารถเติมเต็มในช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มจึงมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป

งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีต

ซิลิกาฟุ่มได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานคอนกรีตทั้งในและต่างประเทศ ด้วยความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในด้านกำลังอัด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และคาร์บอนเนชั่น และยังช่วยลดการเยิ้มของคอนกรีตได้อีกด้วย จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีนักวิจัยพยายามวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มในด้านต่าง ๆ มากมายดังนี้

1. กำลังอัด

ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์, ทวิช พูลเงิน และสมชาย ชูชีพสกุล (2554) ได้ศึกษาการใช้นาโนซิลิกา และไมโครซิลิกาแทนที่วัสดุประสาน ที่ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิการ้อยละ 5, 8, 10, และ 12 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่ไมโครซิลิกาในนาโนซิลิการ้อยละ 0, 30, 50, 70 และ 100 โดยน้ำหนักนาโนซิลิกา จากผลการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมในการใช้ในงานคอนกรีต คือ 40 นาโนเมตร ทำให้คอนกรีตมีเนื้อที่หนาแน่นและสม่ำเสมอมากที่สุด และการใช้ปริมาณการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 8 ทำให้มอร์ต้ารมีกำลังอัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น และกำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่นาโนซิลิกาในวัสดุประสานมากกว่าร้อยละ 10 และการใช้ไมโครซิลิกาแทนที่นาโนซิลิกาช่วยทำให้มอร์ต้ารมีกำลังอัดที่สูงขึ้นอีกด้วย

Mustafa (2013) ได้ศึกษากำลังอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังอัดสูง (High strength concrete) ที่ใช้ซิลิกาฟุ่ม เถ้าภูเขาไฟทดแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าภูเขาไฟทดแทนที่วัสดุประสานร่วมกัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.25 ปูนซีเมนต์ 450 กก./ม.³ จากผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน และการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 15 และเถ้าภูเขาไฟบดที่ร้อยละ 5 ทำให้กำลังอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

Vili, Ivan, Ognyan, Yana and Plamen (2014) ศึกษาการกำลังของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในระยะเวลา 4 ปี พบว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่ม หรือเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป และการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยผสมในคอนกรีตยังมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

Zemei, Caijun and Khayat (2016) ได้ศึกษาความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานและเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) พบว่า เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 15-25 จะทำให้คอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็ก สามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 170 และ 250 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน โดยคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มมี Interfacial transition zone รอบเส้นใยเหล็ก แข็งแรงกว่า Interfacial transition zone รอบเส้นใยเหล็ก ของคอนกรีตทั่วไป

2. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

Manrea, Vannesland and Bertolini (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Critical chloride content) ที่ทำให้เกิดสนิมในห้วงปฏิบัติการด้วยการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และผสมเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อที่ตรวจสอบอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังไว้ โดยใช้เหล็กเสริมแบบแข็ง และแบบอ่อน จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้เหล็กแบบแข็ง (Strengthened steel) และแบบอ่อน (Mild steel) มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่พบผลความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในกรณีของลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน (แบบเรียบ-แบบมีสันครึ่ง)

Navneet, Rafat and Anita (2012) ได้ศึกษาผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมแบคทีเรียร่วมกับซิลิกาฟุ่ม ในด้านกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ จากการศึกษาพบว่า การใช้แบคทีเรีย *Sporosarcina pasteurii* สามารถย่อยสลาย CO₂ ได้ ช่วยในการป้องกันการเสื่อมสภาพคอนกรีตจากคาร์บอนชั่นได้ แต่การใช้แบคทีเรียที่มากเกินไปจะทำให้

กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และการใช้เบคทีเรีย 10^7 cells/ml ทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัด การป้องกันการดูดซึมน้ำ และต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด

Ali, Reza, Babak and Mohammad (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม และซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่วัสดุประสาน กำหนดอุณหภูมิ 22-50 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้มากขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามทฤษฎีของ Arrhenius แต่การใช้ซิลิกาฟูมหรือซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีต ช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้โดยไม่แปรผันตามอุณหภูมิ และที่ปริมาณการแทนที่วัสดุประสานที่เท่ากัน คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมจะมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ

Mahdi, Farhad, Mohammad, Sara and Masoud (2013) ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 เปรียบเทียบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์กับคอนกรีตทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณอ่าวเปอร์เซียเป็นระยะเวลา 9 เดือน โดยวางตัวอย่างในบริเวณใต้ชั้นทรายบนชายหาด บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง บริเวณที่โดนคลื่นสาด และบริเวณที่สัมผัสกับอากาศใกล้ทะเล จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไปอย่างมาก และคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง มีการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด

3. ความสามารถในการทำงาน

Leung, Kim, Jayaprakash and Anwar (2016) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตไหลเข้าแบบเองได้ (Self-compacting concrete) ที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง และคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมคือใช้เถ้าลอยร้อยละ 25 และใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15

Konstantinos, Trezos, Ioannis, Sfikas and Konstantinos (2014) ได้ศึกษาความสามารถในการไหลเข้าแบบของคอนกรีตไหลเข้าแบบเองได้ (Self-compacting concrete) ที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในปริมาณต่าง ๆ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานมีความเหลวของคอนกรีตสดมากกว่าคอนกรีตปกติ โดยปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุด และไม่สูญเสียปริมาตรคอนกรีตเมื่อหล่อเข้าแบบหล่อความลึก 1.6 เมตร อยู่ที่ร้อยละ 8.9-10.6 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

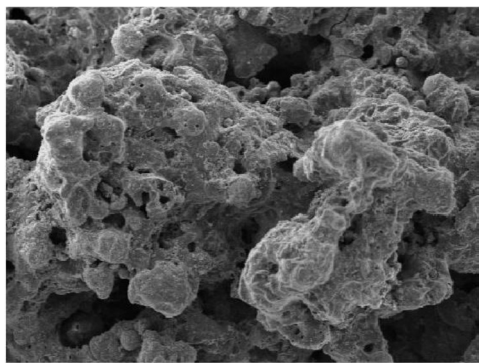
เถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าก้นเตามีอนุภาคขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคทราย โดยทั่วไปมีลักษณะค่อนข้างพรุน รูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวผิวจำเพาะสูง น้ำหนักเบา สีเทาหรือดำ และแตกตัวได้ง่ายเมื่อถูกบด หรือกระแทก ดังภาพที่ 2-4

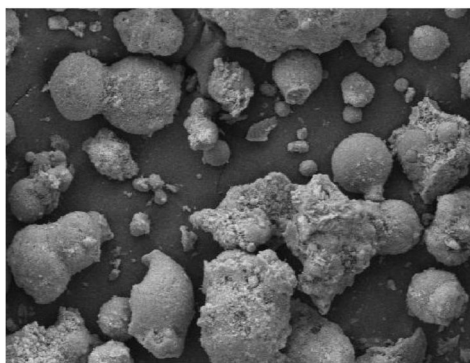
องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาที่สำคัญ คือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ปริมาณของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา โดยมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับเถ้าลอย

เถ้าก้นเตามีอนุภาคขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงดังภาพที่ 2-5 ทำให้เถ้าก้นเตามีความสามารถในการเก็บกักความชื้นได้ดี เมื่อคอนกรีตมีการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการบ่มตัวเองจากภายในได้ (อุดมพร กุลมงคล, 2556)



ก. อนุภาคเถ้าหยาบ



ข. อนุภาคเถ้าละเอียด

ภาพที่ 2-4 รูปร่างอนุภาคของเถ้าก้นเตา

การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคผลึกเถ้าลอยจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้เกิดโพรงช่องว่างระหว่างอนุภาค ซึ่งโพรงเหล่านี้ทำให้เถ้าก้นเตามีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้นอกจากนี้เถ้าก้นเตายังมีเถ้าลอยที่จัดเป็นวัสดุปอซโซลานอยู่ภายในอนุภาคของเถ้าก้นเตา ดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

และแคลเซียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (C-A-H) ที่สามารถเชื่อมประสานเนื้อคอนกรีตที่มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น ความทับน้ำมากขึ้น

งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายในคอนกรีต

1. ด้านกำลังอัด

Cherief, Rocha and Pera (1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าก้นเตาจากถ่านหินในด้านกำลังอัดและการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุต่าง ๆ จากผลการศึกษาพบว่า ที่อายุช่วงต้นเถ้าก้นเตาไม่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดช้า แต่เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนมีค่าที่ชัดเจนหลัง 28 วัน และชัดเจนมากภายหลัง 90 วัน นอกจากนี้พบว่า เมื่อมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาถูกบดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงแทนที่ทราย การพัฒนาความแข็งแรงที่ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 27 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดแทนที่ทราย

2. ด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ทฤษฎี อิศริยฤทธานนท์ (2546) ได้ศึกษากำลังอัด ความทนทานต่อการขัดสีและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ทราย จากการศึกษาพบว่าเถ้าก้นเตามีรูปร่างไม่แน่นอน พรุณมาก เปราะ ความชื้นสูง ดูดซึมน้ำมาก ละเอียดมากกว่าทราย เชื้อต่อปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ และทำให้คอนกรีตต้องใช้น้ำมากขึ้นเพื่อให้มีค่ายุบตัวที่เท่ากับคอนกรีตทั่วไปในส่วนผสมเดียวกัน ค่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายอยู่ในช่วงร้อยละ 40-30 ของคอนกรีตทั่วไป ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทุกส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป

นพรัตน์ มณีวงศ์จิตร และวีระ หอสกุลไทย (2550) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาและเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่วัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปที่อายุ 28 วัน แต่สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าที่อายุ 90 วัน โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 และใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 มีการพัฒนาความแข็งแรงได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่วไป แต่คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาและคอนกรีตเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 มีการพัฒนาความแข็งแรงอัดได้ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป แต่มีการพัฒนาความแข็งแรงอัดได้สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่สูงขึ้น

Aramraks (2006) ได้เสนอว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาหยาบแทนที่ทรายร้อยละ 50 และร้อยละ 100 โดยปริมาตรทราย มีกำลังอัดร้อยละ 80 และร้อยละ 60 ของคอนกรีตปกติตามลำดับ

และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตโดยการทดสอบ การขัดสี (Abrasion) มีค่าร้อยละ 53 และ ร้อยละ 30 ของการสูญเสียน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

อุดมพร กุลมงคล (2556) ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานและเถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และปริมาณการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม อีกทั้งพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายมีประสิทธิภาพในการบ่มภายในดีกว่าคอนกรีตทั่วไปอีกด้วย

3. ด้านอื่น ๆ

Andrade, Rocha and Cheruiaf. (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด โดยทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากการแช่น้ำ การก่อตัว และการหดตัว ในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว จากผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตสดที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายมีความว่องไวต่อการสูญเสียน้ำหนักจากการแช่น้ำ และการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลวมีค่าต่ำลงอีกทั้งเถ้ากั้นเตามีอนุภาคค่อนข้างใหญ่ จึงนิยมนำไปทิ้งหรือถมที่ดินยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร เมื่อเทียบกับเถ้าลอยซึ่งเถ้ากั้นเตาเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงมีความสามารถในการเก็บกักน้ำสูง จึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้ากั้นเตามาใช้แทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีต เพื่อให้เกิดการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตโดยใช้น้ำที่เก็บอยู่ในอนุภาคเถ้ากั้นเตา

Hussain, Choktaweekarn and Tangtermsirikul (2011) กล่าวว่าเถ้ากั้นเตาเหมาะสำหรับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ที่มีความหนาแน่นสูงไม่สามารถใช้น้ำจากการบ่มภายนอกคอนกรีตได้ โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตลดต่ำลงเถ้ากั้นเตาสามารถปล่อยน้ำที่เก็บไว้เพื่อใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป โดยมีความเข้มข้นต่างกันตามสภาพแวดล้อมในสถานที่ โดยจะพบมากในสิ่งแวดล้อมที่ใกล้กับทะเล โดยทั่วไปคลอไรด์ไม่ส่งผลหรือทำปฏิกิริยากับคอนกรีตทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพโดยตรง แต่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากคลอไรด์เกิดจากคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตและทำให้เหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นสนิมและเกิดเสื่อมสภาพ เมื่อเหล็กเสริมในโครงสร้าง

เป็นสนิมหรือถูกทำให้สูญเสียพื้นที่หน้าตัด จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดึงของโครงสร้างลดลง ความเสียหายจึงเกิดขึ้นกับ โครงสร้าง

คลอไรด์อาจพบได้ในคอนกรีตที่ไม่ได้เผชิญสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ โดยการปนเปื้อนในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือหิน ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงน้ำยาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตส่วนมากมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล หรือน้ำกร่อย ดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว



ก. สภาพของเสาตอม่อสะพานที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล และเกิดการเสื่อมสภาพจากสนิมเหล็กเสริมจนค้ำให้คอนกรีตแตกและหลุดร่อน



ข. สภาพของเสาและคานสะพานที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล และเกิดการเสื่อมสภาพจากสนิมเหล็กเสริมจนค้ำให้คอนกรีตแตกและหลุดร่อน

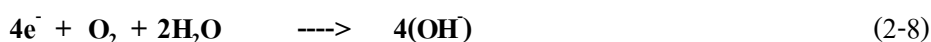
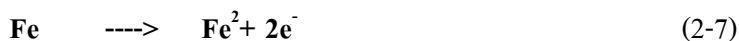
ภาพที่ 2-5 การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากคลอไรด์

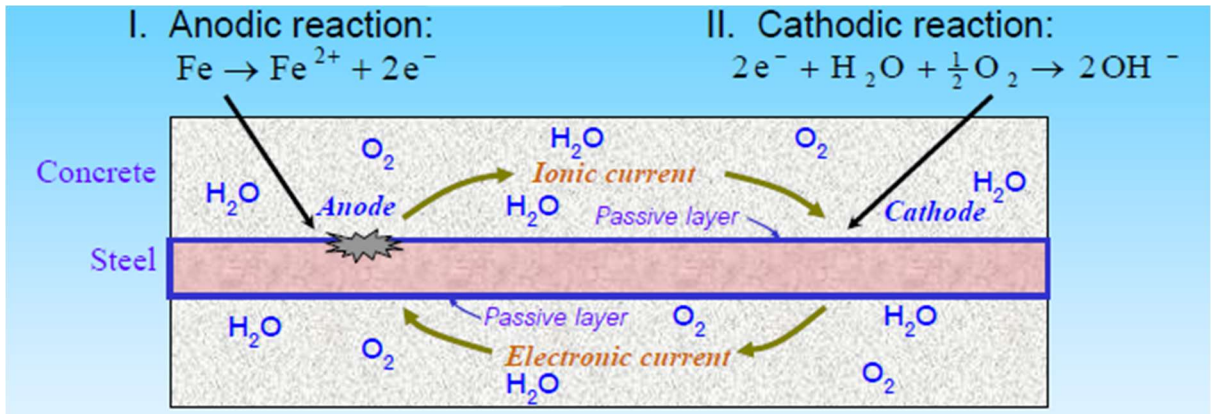
ทั้งนี้โดยทั่วไปแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่เกิดขึ้น (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ในส่วนผสมคอนกรีต การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีที่สัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา

โดยทั่วไปปริมาณของคลอไรด์ในน้ำทะเลมีประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารประกอบต่าง ๆ ของคลอไรด์ในน้ำทะเลประกอบด้วยเกลือของคลอไรด์ในรูปของ สารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) ประมาณ 3,200 ppm. และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ประมาณ 500 ppm.

การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1) Initial period จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่าน เข้าไปสะสมในคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ โดยมีค่าปริมาณของคลอไรด์อยู่ในช่วง ตั้งแต่ 0.2 – 1.33 กก/ม³ หรือตั้งแต่ 75 – 1175 ppm. ของคอนกรีต หลังจากนั้นคือ 2) Propagation period ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กขึ้นอย่างต่อเนื่อง

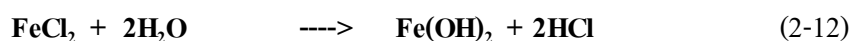
การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเกิดจากคลอไรด์ไอออนแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต และเกิดการสะสมบริเวณผิวของเหล็กเสริมจนมีปริมาณมากพอจนถึงปริมาณคลอไรด์วิกฤติทำให้ชั้น Passive Film ที่หุ้มอยู่บริเวณผิวเหล็กเสริมถูกทำลาย ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของเหล็กเสริมกับสื่ออิเล็กโทรไลต์ โดยประจุไฟฟ้าบวก คือ เฟอร์รัสไอออน Fe²⁺ จะวิ่งสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ และอิเล็กตรอน e⁻ วิ่งตามเหล็กเสริมไปยังขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจน ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน OH⁻ ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe²⁺ ทำให้เกิด Fe(OH)₂ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการ 2-7 – 2-10





ภาพที่ 2-6 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็ก (ทวีชัย สํารานวนิช, 2550)

จากปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กจะเห็นว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิม คือ น้ำและออกซิเจน ด้วยเหตุนี้โครงสร้างคอนกรีตที่มีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงมีความเสี่ยงในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้น้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม คือ มีความชื้นสัมพัทธ์ในคอนกรีตร้อยละ 70 ถึง 80 สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น คลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขี้บวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขี้บวบดังสมการที่ 2-11 และ 2-12



เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้นสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอรัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีความจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขี้บวกและขี้บวบในโพรงช่องว่างภายในของคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่ผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยแตกร้าว (Cracking) การหลุดร่อน (Spalling) และทำให้คอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) ในขณะที่การเกิดสนิมทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้าทำให้เกิดรูขนาดเล็กภายในเหล็กเสริม



ภาพที่ 2-7 การเกิดการขยายตัวปริมาตรเหล็กเสริมทำให้เกิดรอยแตก และการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีต

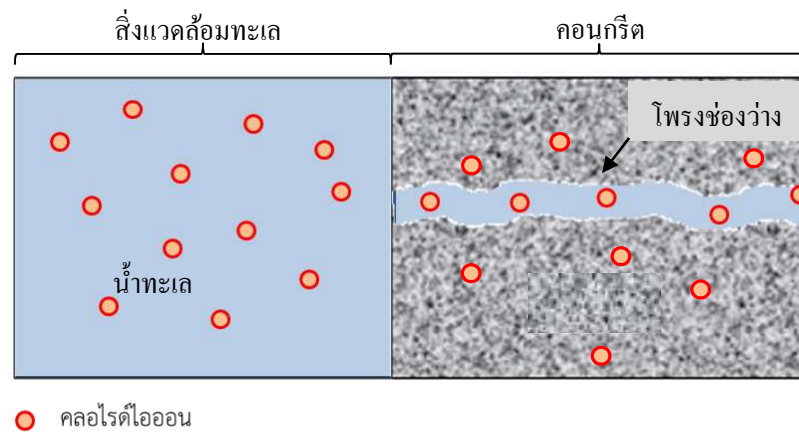
นอกจากนี้คอนกรีตอาจมีคลอไรด์ปะปนมากับวัสดุในการผสมคอนกรีต เช่น น้ำ ทราย หิน ปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่ม ดังนั้นปริมาณคลอไรด์อิสระที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต เพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

กระบวนการในการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็นทั้งหมด 4 ลักษณะดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion)

กลไกนี้เกิดขึ้นโดยเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปยังโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ การแพร่กระจายของคลอไรด์ในกลไกจะเกิดเมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ โดยคลอไรด์จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นมากไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นน้อยเสมอ แสดงดังภาพที่ 2-8 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎข้อที่หนึ่งและสองของฟิคส์ Fick ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด



ภาพที่ 2-8 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการแพร่

คลอไรด์อิสระ (Free chloride) เคลื่อนที่ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ (Concentration gradient) ตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick (Fick's 1st law of diffusion)

$$F_c(x) = -D_a \frac{\partial C_{\text{free}}(x)}{\partial x} \quad (2-13)$$

ใช้หลักการ mass conservation จะได้

$$\frac{\partial C_{\text{total}}}{\partial t} = \frac{\partial F_c}{\partial x} \quad (2-14)$$

แทนสมการที่ 2-13 ลงในสมการที่ 2-14 จะได้ Fick's 2nd law of diffusion ดังสมการที่ 2-15

$$\frac{\partial C_{\text{total}}(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_{\text{free}}(x,t)}{\partial x^2} \quad (2-15)$$

โดยที่

$\partial C_{\text{total}}(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

$\partial C_{\text{free}}(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะ x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

X คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ 2-15 สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2-16 ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_d = \frac{(C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0}{B} \times 100 \quad (2-16)$$

โดยที่

C_d คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (%โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม³)

c คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)

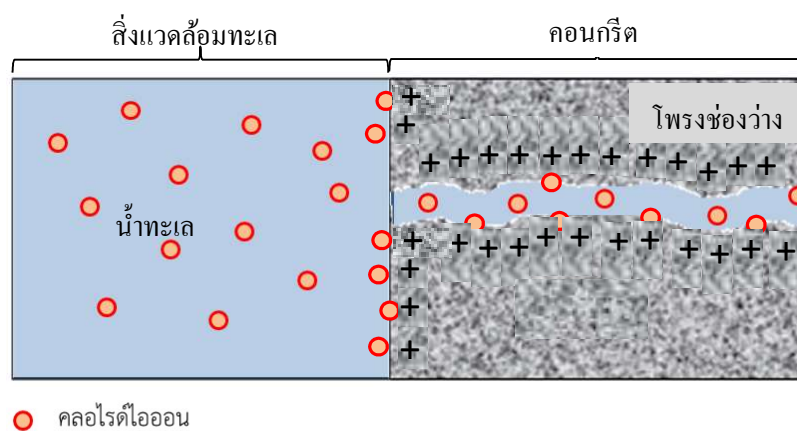
D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (ซม.²/ปี)

t คือ อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)

B คือ น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม.³)

2. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption)

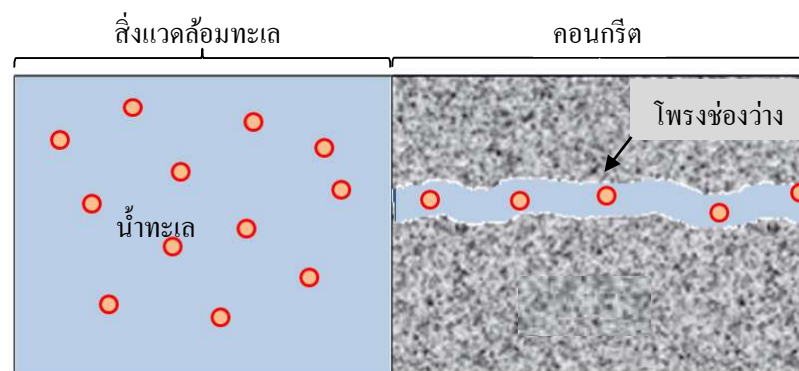
เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของไอออน) ในคอนกรีตกับคลอไรด์ไอออนหรือเรียกว่า การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) เนื่องจากคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกจะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น แสดงดังภาพที่ 2-9



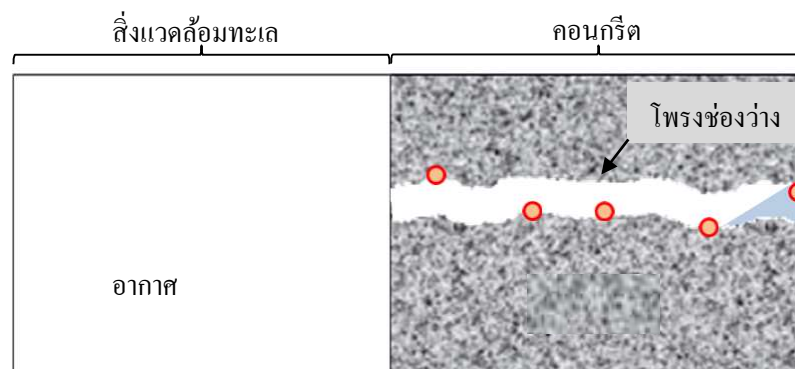
ภาพที่ 2-9 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการดึงดูดไอออน

3. การดึงดูดแคปพิลารี (Capillary suction)

ในคอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง การดึงดูดแบบคาพิลารีนี้สามารถดึงดูดน้ำทะเลผ่านเข้าไปยังโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตที่แห้งเมื่อน้ำขึ้น เมื่อน้ำลงน้ำทะเลจะไหลออกจากโพรง และบางส่วนก็จะระเหยออกจากโพรงทำให้เกิดผลึกของเกลือคลอไรด์ตกค้างอยู่ในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และเมื่อน้ำขึ้นอีกครั้งน้ำทะเลก็จะไหลเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และดันเกลือคลอไรด์ที่หลงเหลืออยู่ในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตให้เข้าไปในคอนกรีตลึกขึ้นกว่าเดิม ด้วยเหตุนี้การแทรกซึมคลอไรด์ด้วยการดึงดูดแคปพิลารี จึงเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการแทรกซึมด้วยวิธีอื่นแสดงดังภาพที่ 2-10

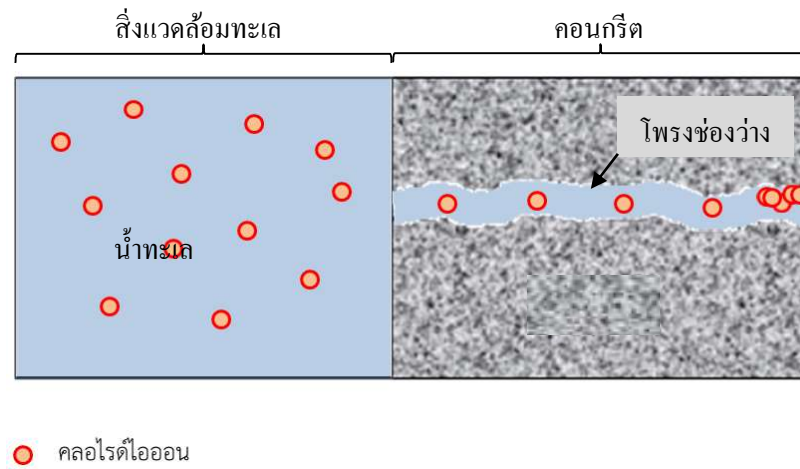


ก. น้ำทะเลถูกดึงดูดเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีต



ข. เมื่อน้ำลง น้ำทะเลไหลและระเหยออกจากโพรงช่องว่างและเกิดการตกตะกอนของเกลือคลอไรด์ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต

ภาพที่ 2-10 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการดึงดูดแคปพิลารี

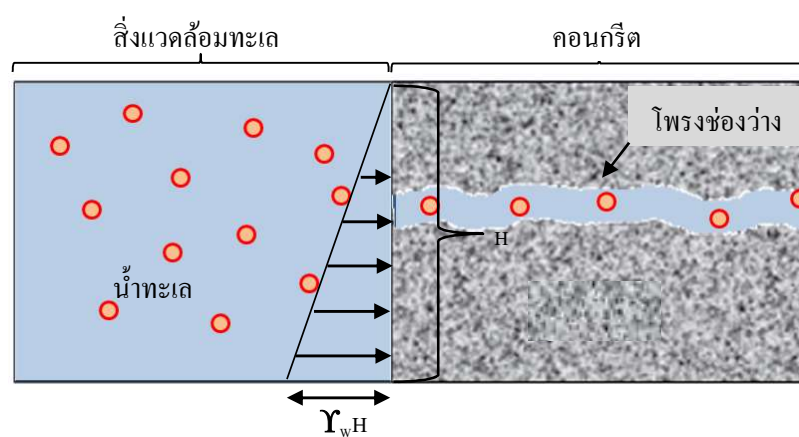


- ก. เมื่อน้ำขึ้นน้ำทะเลจะดันเกลือคลอไรด์เข้าไปในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และพาคลอไรด์ไอออนเข้ามาเพิ่มเติม

ภาพที่ 2-10 (ต่อ)

4. การซึมผ่าน (Permeability)

พบมากในโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่าง Hydraulic head ซึ่ง Hydraulic head มีระดับความลึกมาก ทำให้มี Hydraulic pressure สูง ทำให้สามารถดันคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้มาก ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยความดันของน้ำ

ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตและเกิดการสะสมในคอนกรีต โดยคลอไรด์ที่สะสมในคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

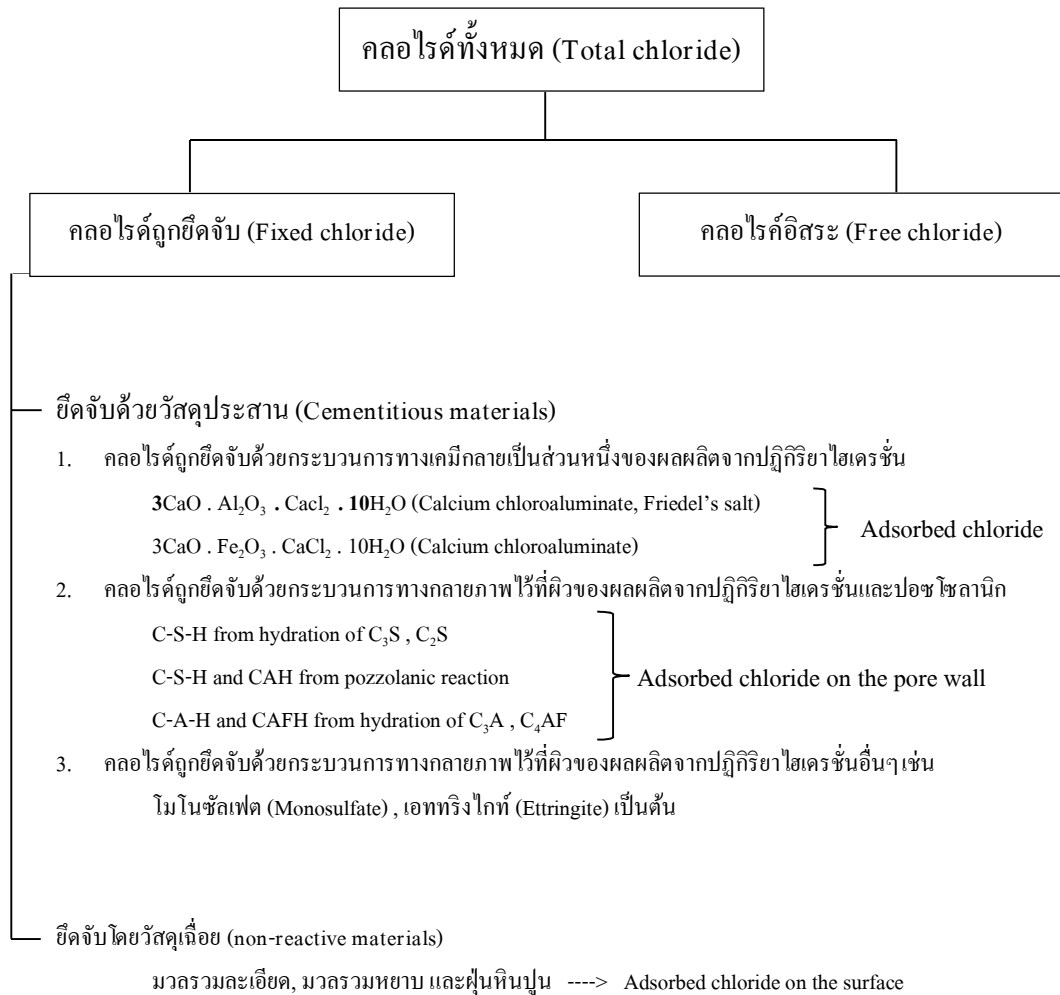
1. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์อิสระละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเป็นคลอไรด์ที่พร้อมทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสนิมในเหล็กและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คือ คลอไรด์ซึ่งถูกยึดจับหรือกักเก็บไว้จึงไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้คลอไรด์ชนิดนี้จะถูกยึดจับหรือกักเก็บได้ 2 วิธี คือ

2.1 การกักเก็บด้วยการดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) จากวัสดุที่ทำปฏิกิริยา เช่น ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ

2.2 การกักเก็บด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) จากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เช่น มวลรวม เป็นต้น

การดูดซับทางกายภาพคลอไรด์จะถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่ผิว (Surface force) ส่วนการดูดซับทางเคมี คลอไรด์จะถูกจับเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์กับคลอไรด์อิสระก่อให้เกิดเป็นเกลือฟริเดล ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) และนอกจากนั้นคลอไรด์ยังสามารถถูกกักเก็บในโครงสร้าง C-S-H ได้



ภาพที่ 2-12 แผนผังประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สาราญวานิช, 2550)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แบ่งได้เป็น 5 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1. ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์

ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) คือ ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่แพร่เข้าสู่คอนกรีต ซึ่งความสามารถนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของ C_3A และ C_4AF ของปูนซีเมนต์ที่ใช้ เนื่องจาก C_3A และ C_4AF มีความสามารถในการดักจับคลอไรด์และเปลี่ยนเป็นสารประกอบ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Friedel's salt) และ $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ตามลำดับ

2. ค่าความเป็นกรดต่างของเนื้อคอนกรีต (pH)

เมื่อคอนกรีตบริเวณที่ใกล้กับเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูง ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้คอนกรีตเกิดสนิมสูงขึ้นดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมภายในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (ฟิล์มที่ผิวยังไม่หาย)
8.0	ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กหายไป
ต่ำกว่า 7.0	เกิดสนิมอย่างรุนแรงที่ตัวของเหล็กเสริม

3. โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตและรอยต่อระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต (Pores

between steel and concrete interface)

ในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และรอยต่อระหว่างเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีตนั้น ไม่ได้แนบสนิทกันดีทั้งพื้นผิวทั้งหมด และยังพบเป็นช่องโพรงอากาศ (Entrapped air void) ที่เกิดจากการเข้มน้ำ (Bleeding) ของคอนกรีต และการทรุดตัวของเนื้อคอนกรีตสด (Concrete settlement) หลังจากการเทคอนกรีตแล้ว ซึ่งช่องว่างเหล่านี้จะมีการอิมตัวของน้ำ ทำให้มีสภาพที่เหมาะสมต่อการแทรกซึมผ่านและการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าเคมีระหว่างขั้วอานอดและคาโธดดีกว่าคอนกรีตที่เนื้อแน่นและแนบสนิทกับเหล็กเสริม ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้เร็วขึ้น

4. การแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุปอซโซลาน (Cement replacement with pozzolan)

ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ขึ้นอยู่กับปริมาณของอลูมินาในปูนซีเมนต์ แต่การที่จะทำให้ปูนซีเมนต์มีอลูมินาสูงเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากปูนซีเมนต์ต้องมีแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในปริมาณมากพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เพียงพอ ฉะนั้นการเพิ่มอลูมินาให้แก่ปูนซีเมนต์คือการเพิ่มวัสดุปอซโซลานที่มีส่วนประกอบของอลูมินา และซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากอลูมินาช่วยเพิ่มความสามารถในการดักจับคลอไรด์แล้ว อลูมินาและซิลิกายังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น และมีความทึบน้ำมากขึ้น และสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากขึ้น

5. ปัจจัยอื่น ๆ

ในสภาพแวดล้อมจริงคอนกรีตต้องเผชิญกับสิ่งเร้าต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต อาทิเช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูงทำให้ความต้านทานคลอไรด์ ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ และปริมาณคลอไรด์วิกฤตลดลง

การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล

ในการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตนอกจากการทดลองในห้องปฏิบัติการทั้งแบบเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า และการแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์แล้ว ยังมีการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมทะเลจริง การทดสอบในสภาพแวดล้อมทะเลจริงนั้นทำให้ทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตจริง เนื่องจากในการเผชิญสภาพแวดล้อมในทะเลจริงจะมีผลกระทบของปรากฏการณ์น้ำขึ้นน้ำลง อุณหภูมิ ความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำทะเลจริง เป็นต้น ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้ไม่สามารถจำลองในห้องปฏิบัติการได้ รวมถึงระยะเวลาในการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงสามารถทำได้นาน ทำให้เห็นผลความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ชัดเจนขึ้น

Thomas (1996) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เกลือเป็นวัสดุแทนที่วัสดุประสาน ภายใต้สภาพแวดล้อมทะเลจริงในช่วงน้ำขึ้นน้ำลง เป็นระยะเวลา 1-4 ปี โดยเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ในตำแหน่งต่าง ๆ และปริมาณการแทนที่เกลือในวัสดุประสาน ในการทดลองได้ทำการแทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือในอัตราที่ร้อยละ 1, 15, 30 และ 50 จากการศึกษาพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะมีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือในปริมาณที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้เกลือเป็นวัสดุแทนที่วัสดุประสานจะสามารถช่วยให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพในการต้านทานคลอไรด์ได้ดีขึ้น

Cheewaket, Jaturapitakkul and Chalee (2010) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดักจับคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเกลือในสภาพทะเลจริง เป็นระยะเวลา 3, 4, 5 และ 7 ปี ใช้การแทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งพิจารณาตัวแปรต่างจาก อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลา และปริมาณของเกลือ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับคลอไรด์ของคอนกรีต ในการศึกษาจะให้คอนกรีตเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณอ่าวไทย จากผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือจะมีความสามารถในการดักจับคลอไรด์ที่สูงขึ้น แต่เมื่อคอนกรีตเผชิญสภาพแวดล้อม

ทะเลเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นความสามารถในการดักจับคลอไรด์จะลดลง และอัตราน้ำต่อวัสดุประสานไม่มีผลมากนักกับความสามารถในการดักจับคลอไรด์ของคอนกรีต ทั้งนี้ผลวิเคราะห์อ้างอิงจากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระที่พบในเนื้อคอนกรีต

ณัฐพล วงษ์วาร (2557) ได้ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตปูนซีเมนต์สแลคที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี ในการทดลองได้มีการฝังเหล็กเส้นกลมที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 1, 2, 5 และ 7.5 ซม. ในการผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4, 0.5 และ 0.6 สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.2, 0.4 และ 0.6 จากการศึกษาวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว คอนกรีตปูนซีเมนต์สแลคมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้นและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมลดลง

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

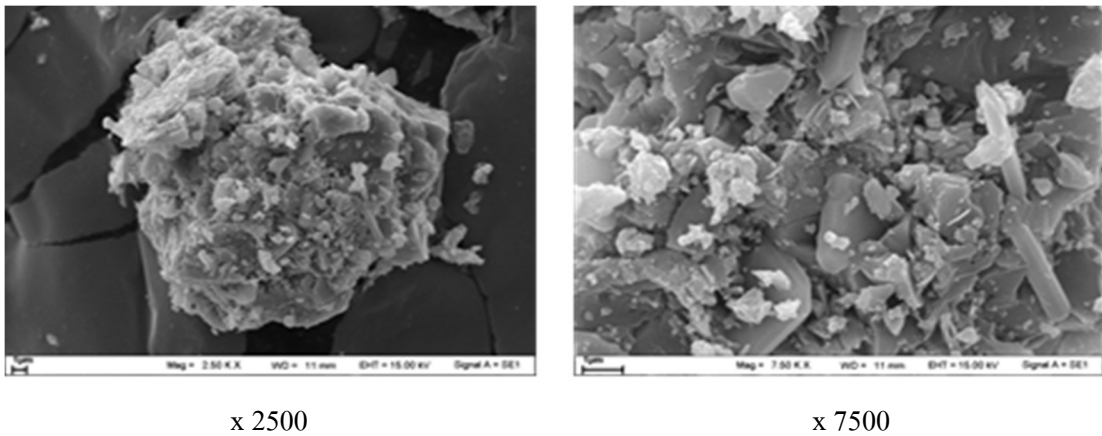
วัสดุที่ใช้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ในการศึกษาวิจัยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย มอก. 15-2547 ดังภาพที่ 3-1 แสดงลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และภาพที่ 3-2 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 3-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x 2500

x 7500

ภาพที่ 3-2 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ซิลิกาฟูม (Silica fume)

ซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นทรงกลม สามารถแตกตัวเมื่อละลายน้ำ ดังภาพที่ 3-3 แสดงลักษณะทางกายภาพของซิลิกาฟูม



ภาพที่ 3-3 ซิลิกาฟูม (Silica fume)

ซิลิกาฟูมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3-1 และคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-1 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับซีลิกาฟูมที่ใช้ในงานวิจัย

สารประกอบ (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ซีลิกาฟูม
SiO ₂	20	92
Al ₂ O ₃	5	0.7
Fe ₂ O ₃	3	1.2
CaO	60	0.2
MgO	1.1	0.2
K ₂ O	2.4	-
ออกไซด์ของธาตุอื่นๆ	1.5	2.6
LOI	2	-

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับซีลิกาฟูม

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ซีลิกาฟูม
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.2
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ชม. ² /ก.)	3,400	150,000
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	15	0.1

3. เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

ลักษณะทางกายภาพของเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง มีลักษณะเป็นผงหยาบ สีเทา-ดำ ใช้ในการแทนที่บางส่วนของทรายในการวิจัย ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

สำหรับวิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่ทำให้เถ้าก้นเตาให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) อ้างอิงวิธีคำนวณความสามารถในการกักเก็บความชื้นของวัสดุพูนของ Kasemchaisiri and Tangtermsirikul (2007) โดยการผสมน้ำกับเถ้าก้นเตาในปริมาณความชื้นต่าง ๆ จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์แล้วคำนวณปริมาณความชื้นที่ทำให้เถ้าก้นเตาอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3-3 และคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตาเปรียบเทียบกับทรายแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-3 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับเถ้าก้นเตาที่ใช้งานวิจัย

สารประกอบ (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตา
SiO ₂	20	47.45
Al ₂ O ₃	5	20.32
Fe ₂ O ₃	3	10.92
CaO	60	13.16
MgO	1.1	2.60
K ₂ O	2.4	2.70
ออกไซด์ของธาตุอื่นๆ	1.5	2.19
LOI	2	3.11

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายและเถ้าก้นเตา

คุณสมบัติ	ทราย	เถ้าก้นเตา
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	2.04
ความสามารถในการเก็บน้ำ (%)	1.00	18.4

3. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการวิจัย คือ หินปูนดังภาพที่ 3-5 มีขนาดคละดังตารางที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 มวลรวมหยาบ

ตารางที่ 3-5 ขนาดคละของมวลหยาบ

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้าง บนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบน ตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ผ่านตะแกรง
1"	-	-	-	100
3/4"	23.10	2.3.1	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
<u>รวม</u>	<u>999.4</u>	<u>100</u>		

4. มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการวิจัย คือ ทรายน้ำจืดดังภาพที่ 3-6 ขนาดคละดังตารางที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 มวลรวมละเอียด

ตารางที่ 3-6 ขนาดคละของมวลละเอียด

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้ำ บนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้ำบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่าน ตะแกรง
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	87.86	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	<u>500.0</u>	<u>100</u>		

5. น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต และบ่มคอนกรีต ใช้น้ำประปาสะอาดจากห้องปฏิบัติการ
คอนกรีตและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. น้ำกลั่น (Distilled water)

น้ำกลั่นสำหรับผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ และทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากเหล็กเสริม

สารเคมีที่ใช้

สารเคมีที่ใช้ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

1. กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้นร้อยละ 100 แสดงดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 กรดไนตริก

2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้นร้อยละ 30 แสดงดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3. ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ละลายน้ำให้ได้ความเข้มข้น 0.05 N แสดงดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 ซิลเวอร์ไนเตรท

อุปกรณ์ที่ใช้

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. โม่ผสมคอนกรีต

ใช้สำหรับผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองดังภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 โม่ผสมคอนกรีต

2. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ซม.³

ใช้สำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่จะนำไปแช่ในน้ำทะเลดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $20 \times 20 \times 20$ ซม.³

3. อุปกรณ์กำหนดระยะฝังเหล็กเสริมในก้อนตัวอย่างคอนกรีตดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 อุปกรณ์กำหนดระยะฝังเหล็กเสริมเหล็กเสริม

4. เหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม. สำหรับฝังในก้อนคอนกรีตเพื่อทดสอบระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 เหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ยาว 50 มม.

5. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตดังภาพที่

3-14



ภาพที่ 3-14 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

6. เครื่องซังคิติดอล

เครื่องซังคิติดอลใช้สำหรับซังดวงสารเคมีดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 เครื่องชั่งดิจิทัล

7. เครื่องตัดคอนกรีต

เครื่องตัดคอนกรีตใช้ตัดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ที่เก็บตัวอย่างจากก้อนคอนกรีต
ที่นำไปเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลเพื่อนำไปทำสอบการแทรกซึมคลอไรด์แสดงดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 เครื่องตัดคอนกรีต

9. เครื่องจีเขย่าคอนกรีต

ใช้สำหรับจีเขย่าคอนกรีตให้เข้าแบบในขั้นตอนการหล่อตัวอย่างคอนกรีตดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 เครื่องจีเขย่าคอนกรีต

9. เครื่อง Potentiometric titration

เครื่อง Potentiometric titration ใช้สำหรับวัดปริมาณเกลือคลอไรด์ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งคลอไรด์ทั้งหมด และคลอไรด์อิสระ ดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 เครื่อง Potentiometric titration

10. เครื่องต้ม (Hot plate) ดังภาพที่ 3-19

เครื่องต้ม (Hot plate) ใช้สำหรับต้มสารเคมีเพื่อกระตุ้นการทำปฏิกิริยาเคมี



ภาพที่ 3-19 เครื่องต้ม (Hot plate)

11. เครื่องดูด (Suction apparatus)

เครื่องดูด (Suction apparatus) ใช้สำหรับดูดสารละลายออกจากฟองคอนกรีตดังภาพที่

3-20



ภาพที่ 3-20 เครื่องดูดอากาศ (Suction apparatus)

12. ชุดเครื่องแก้ว เซรามิก และกระดาศกรอง

ชุดเครื่องแก้ว เซรามิก และกระดาศกรอง ใช้สำหรับวัดปริมาณน้ำและสารเคมีต่าง ๆ

ดังภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 ชุดเครื่องแก้ว เซรามิก และกระดาษกรอง

13. ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างคอนกรีต

ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างคอนกรีตใช้สำหรับเจาะนำก้อนตัวอย่างออกจากก้อนคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ดังภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-22 ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างคอนกรีต

14. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด

อุปกรณ์ทดสอบค่ายุบตัว ประกอบไปด้วย โคน (Slump Mold) รูปกรวยทรงตัด เส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 10 ซม. และด้านล่าง 20 ซม. สูง 30 ซม. มีหูจับ และมีแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้ทำเหยียบได้ทั้ง 2 ข้าง เหล็กดำกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 60 ซม. ปลายกลมมน 2 ข้าง แผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมรองโคน 60 x 60 ซม. ช้อนตัก (Scoop) เกรียงเหล็ก ตลับเมตร หรือไม้วัด ดังภาพที่ 3-23



ภาพที่ 3-23 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าขุดตัว

วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3-7 เนื่องด้วยตาม มยผ. 1332-50 และ มยผ.1332-55 กำหนดให้คอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลสามารถใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.45 ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตามเกณฑ์และมากกว่าเกณฑ์ของ มยผ.จึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 สำหรับปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูม จากงานวิจัยอื่นที่ศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานพบว่าที่ร้อยละ 15 ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทั้งด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดดีที่สุด อีกทั้งซิลิกาฟูมมีราคาแพงการใช้ในปริมาณมากทำให้คอนกรีตมีราคาแพงขึ้นไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักวัสดุประสาน และสำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จากงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าปริมาณที่เหมาะสมทำให้กำลังอัดดีขึ้น คือ ที่ร้อยละ 10 แต่สำหรับการแทนที่ร้อยละ 30 ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น ดังนั้นจึงกำหนดให้แทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรของทราย เพื่อให้ทราบถึงปริมาณที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

ตารางที่ 3-7 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

No	Mix id.	Slump (cm)	Mix proportion of concrete (kg/m ³)						Super plasticizer
			Binder		Water	Fine aggregate		Rock (SSD)	
			Portland cement type 1	Silica fume		Sand (SSD)	Bottom ash (SSD)		
1	I40	1.0	400	-	160	793	-	1,048	-
2	I40-BA10	1.0	400	-	160	713	62	1,048	-
3	I40-BA30	1.0	400	-	160	555	187	1,048	-
4	I40-SF5	1.5	380	20	157	790	-	1044	4
5	I40-SF10	0.0	360	40	155	787	-	1,040	6
6	I40-SF15	0.0	340	60	153	784	-	1,036	8
7	I50	1.5	400	-	200	756	-	988	-
8	I50-BA10	1.5	400	-	200	673	59	988	-
9	I50-BA30	1.5	400	-	200	523	176	988	-
10	I50-SF5	1.2	380	20	200	744	-	983	-
11	I50-SF10	1.0	360	40	200	741	-	980	-
12	I50-SF15	0.0	340	60	200	737	-	975	-

หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

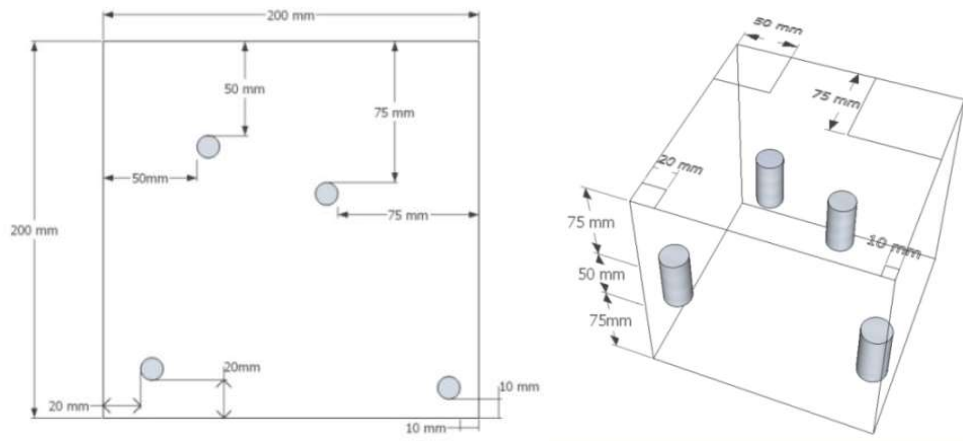
I xx หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนักที่มีค่าเท่ากับ xx

SF xx หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม อัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่มีค่าเท่ากับ xx

BA xx หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา อัตราส่วนร้อยละ โดยปริมาตรของทรายที่มีค่าเท่ากับ xx

การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ซม.³ ทำการฝังเหล็กกลมผิวเรียบ RB12 ชั้นคุณภาพ SR24 ยาว 5 ซม. ที่ระยะหุ้มเหล็ก 1, 2, 5 และ 7.5 ซม. ดังภาพที่ 3-24 ถอดแบบเมื่อครบอายุ 1 วัน หลังจากนั้นบ่มน้ำประปาจนคอนกรีตอายุครบ 28 วัน



ภาพที่ 3-24 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการฝังเหล็ก

สถานที่ทดสอบคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลใช้พื้นที่บริเวณริมทะเลวัด โคมุทรรัตนาราม ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี มีระยะเวลาศึกษาทั้งหมด 2 ปี สภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณได้ศาลาวัดโคมุทรรัตนาราม ระดับน้ำทะเลขึ้นและลงวันละ 1 รอบ ดังภาพที่ 3-25



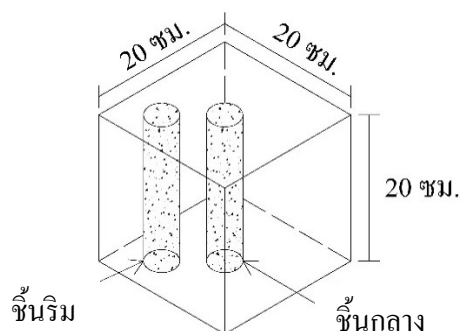
ภาพที่ 3-25 สถานที่ทดสอบคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

การทดสอบคอนกรีต

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลครบ 2 ปี จึงนำมาทำการเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. บริเวณกลางตัวอย่าง 1 ชั้น และบริเวณริมตัวอย่าง 1 ชั้น ดังภาพที่ 3-26 โดยชั้นกลางใช้สำหรับการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต และชั้นริมใช้ทดสอบกำลังอัด



ก. การเจาะตัวอย่าง



ข. ตำแหน่งการเจาะ

ภาพที่ 3-26 การเจาะตัวอย่างคอนกรีตและตำแหน่งการเจาะ

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

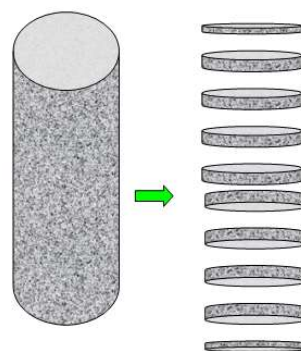
ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ทำโดยการหาปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต 2 ประเภท คือ คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามระดับความลึกจากผิวหน้าชั้นตัวอย่าง

โดยการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) โดยการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดก้อนตัวอย่างที่เจาะมาจากก้อนตัวอย่างตรงกลาง เป็นชั้นจากผิวหน้าของก้อนลงไป ให้มีความหนาชั้นละ 1 ซม. จำนวน 10 ชั้น แล้วนำก้อนตัวอย่างที่ตัดออกมาไปบดให้ละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 3-27 และ 3-28



ก. แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะจากก้อนตัวอย่าง



ข. การตัดแบ่งแท่งตัวอย่าง

ภาพที่ 3-27 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะจากก้อนตัวอย่างและการตัดแบ่งแท่งตัวอย่าง

2. ชั่งตัวอย่างที่บดแล้ว 5 กรัม โดยใช้ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.01 กรัม แล้วพักไว้ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล.
3. เติมน้ำกลั่น 100 มล. จากนั้นเติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 100 ที่เจือจางในน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 : 1 ลงไป 25 มล.
4. นำไปให้ความร้อนจนเดือดเป็นระยะเวลา 2-3 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) เข้ากับกรวย (Buchner funnel) ด้วยสายยาง และนำปลายกรวยเสียบเข้ากับขวดแก้วทรงชมพู (Filtration flask) ดังแสดงในภาพที่ 3-29 จากนั้นทำการเปิดเครื่องดูด วางกระดาษกรองไว้บนกรวย 2 แผ่น ใช้น้ำกลั่นลงไปเล็กน้อยเพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวย เทสารละลายและผงคอนกรีตในบีกเกอร์ที่เย็นแล้วลงในกรวยเพื่อทำการกรอง และฉีดน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์เพื่อล้างผงคอนกรีตที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้ออกให้หมด โดยต้องควบคุมไม่ให้น้ำกลั่นที่ใช้ล้างผงคอนกรีตต้องมีปริมาตรไม่เกิน 175 มล. เมื่อสารละลายถูกดูดลงในขวดแก้วทรงชมพูหมดแล้ว ทำการถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วทรงชมพูไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มล. และล้างขวดแก้วทรงชมพูที่ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นพักสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้อง



ก. ครกสำหรับบดตัวอย่าง



ข. ผงตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว

ภาพที่ 3-28 ครกใช้บดตัวอย่าง และผงตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว



ภาพที่ 3-29 การประกอบเครื่องวัดเข้ากับกรวยเซรามิกและขวดแก้วทรงชมพู

6. นำบีกเกอร์ที่เขียนแล้ววางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แช่ electrode และบิวเรตสำหรับปล่อยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ความเข้มข้น 0.05 N ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode และเริ่มการกวนช้า ๆ

7. เครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรตให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ไตเตรตตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา



ภาพที่ 3-30 การไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration

8. จดบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ จะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% chloride by weight of concrete)

ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ทำตามมาตรฐาน ASTM C1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) โดยการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3-31 ผลปริมาณคลอไรด์จากการไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration

1. ชั่งตัวอย่างคอนกรีตที่บดแล้วมาจำนวน 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม พักไว้ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล.
2. เติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ 50 มล. จากนั้นให้ความร้อนด้วยการต้มให้เดือดเป็นระยะเวลา 5 นาที แล้วพักไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
3. ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) เข้ากับกรวย (Buchner funnel) ด้วยสายยาง และนำปลายกรวยเสียบเข้ากับขวดแก้วทรงชมพู (Filtration flask) ดังแสดงในภาพที่ 3.28 จากนั้นทำการเปิดเครื่องดูด วางกระดาษกรองไว้บนกรวย 2 แผ่น ฉีดน้ำกลั่นลงไปเล็กน้อยเพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวย เทสารละลายและผงคอนกรีตในบีกเกอร์ที่เย็นแล้วลงในกรวยเพื่อทำการกรอง และฉีดน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์เพื่อล้างผงคอนกรีตที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้หมด โดยต้องควบคุมไม่ให้น้ำกลั่นที่ใช้ล้างผงคอนกรีตต้องมีปริมาตรไม่เกิน 175 มล. เมื่อสารละลายถูกดูดลงในขวดแก้วทรงชมพูหมดแล้ว ทำการถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วทรงชมพูไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มล. และล้างขวดแก้วทรงชมพูที่ใช้น้ำกลั่น จากนั้นพักสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้อง
4. เติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 : 1 ลงไป 3 มล. และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ความเข้มข้นร้อยละ 30 ลงไป 3 มล. ลงในสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วพักไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที จากนั้นให้ความร้อนแก่บีกเกอร์จนเดือดประมาณ 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้มแล้วพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. นำบีกเกอร์ที่เย็นแล้ววางในเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แชน electrode และบิวเรตสำหรับปล่อยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ความเข้มข้น 0.05 N ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้า ๆ
6. โดยเครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา
7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% chloride by weight of concrete)

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของคอนกรีต

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีต คือค่าที่บ่งบอกความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต หากมีค่าน้อยแสดงว่าคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้น้อย บ่งบอกว่าคอนกรีตส่วนผสมนั้นสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นั้นหาได้จากสมการคำตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของ Fick ดังสมการที่ 3-1

$$C(x, t) = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right) \right] + C_i \quad (3-1)$$

โดยที่

$C(x, t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้า ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล t (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

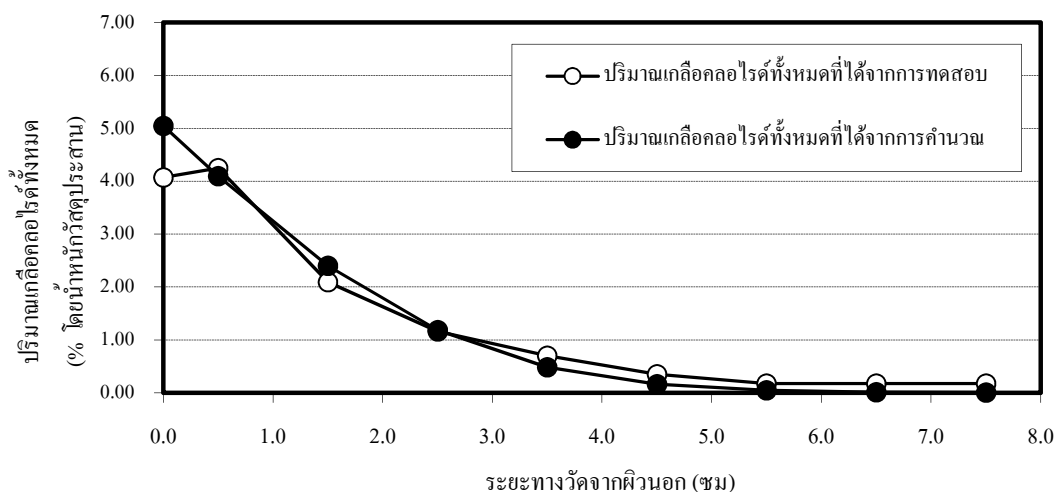
C_i คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่มีอยู่เดิมในคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล (ปี)

จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ของตัวอย่างที่นำไปเผชิญในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี จะได้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s), ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในแต่ละชั้นความลึกต่าง ๆ ($C(x, t)$) ตามระยะความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตที่ระยะต่าง ๆ (x) นำค่าปริมาณคลอไรด์จากการทดลองมาแสดงเปรียบเทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์จากแบบจำลองที่คำนวณจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต



ภาพที่ 3-32 การเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากผลการทดลองกับค่าจากแบบจำลอง

ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองนี้หาจากการสมมติค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสมการที่ 3-1 เพื่อให้ได้ค่า $C(x, t)$ ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด และเมื่อค่าจากการทดลองและกราฟจากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกันที่สุดแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สมมติไปนั้นถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่จริงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตตัวอย่าง

กำลังอัดคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทำได้โดยนำแท่งคอนกรีตแท่งริมที่เจาะมาจากก้อนตัวอย่าง มาตัดให้มีความสูงชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 1 : 2 และทำการปรับผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตตัวอย่างด้วยกัมมะถัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบเพื่อหาลำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39 (Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens)

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

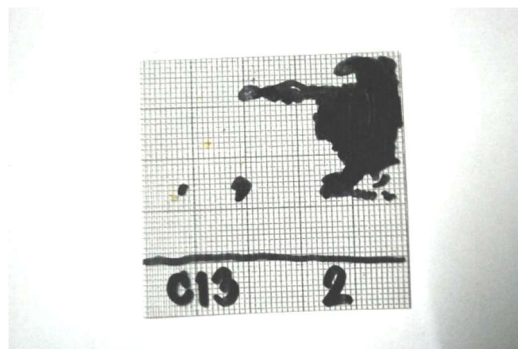
การศึกษาระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย ได้แก่

1. การทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การทดสอบการหาพื้นที่ของการเกิดสนิมทำได้โดยการวัดพื้นที่ผิวเหล็กโดยรอบ เพื่อวัดพื้นที่ของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1×1 มม.² มาทาขอบเหล็กเสริมแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิมดังภาพที่ 3-33



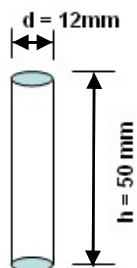
ก. แท่งเหล็กที่เกิดสนิม



ข. แผ่นกราฟที่ทำการระบายพื้นที่เกิดสนิม

ภาพที่ 3-33 แท่งเหล็กที่เกิดสนิม และแผ่นกราฟที่ทำการระบายพื้นที่เกิดสนิม

จากนั้นนับพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของเหล็กเสริม (Area of lateral surface corrosion) และนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมดดังภาพที่ 3-34 จากนั้นคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิม (Corrosion of lateral surface area) ดังสมการ 3-2



ภาพที่ 3-34 ขนาดของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตในการศึกษา

$$\text{Corrosion of lateral surface area (\%)} = \frac{\text{Area of lateral surface corrosion}}{\text{Lateral surface area}} \times 100 \quad (3-2)$$

2. การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss) นั้นทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักของเหล็กเสริมก่อนที่ทำการฝังไปในก้อนตัวอย่าง และเมื่อนำก้อนตัวอย่างไปเผชิญสภาพแวดล้อมครบ 2 ปีแล้ว จึงนำก้อนตัวอย่างมากลับเพื่อนำเหล็กเสริมมาทำการชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดในการชั่ง 0.001 g บันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น (W) จากนั้นนำ

เหล็กไปแช่ในสารละลายกรด เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM G1 (Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens) แล้วนำขึ้นมาทำความสะอาด แล้วชั่งน้ำหนักทำการบันทึกเป็นค่าน้ำหนักสุดท้าย (W_f) โดยทำจนกว่าค่าน้ำหนักสุดท้ายไม่ลดลงจากครั้งแรกที่แช่ในสารละลายกรดจึงจะนำค่าน้ำหนักสุดท้ายมาคำนวณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3-3

$$\text{Weight loss(\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (3-3)$$

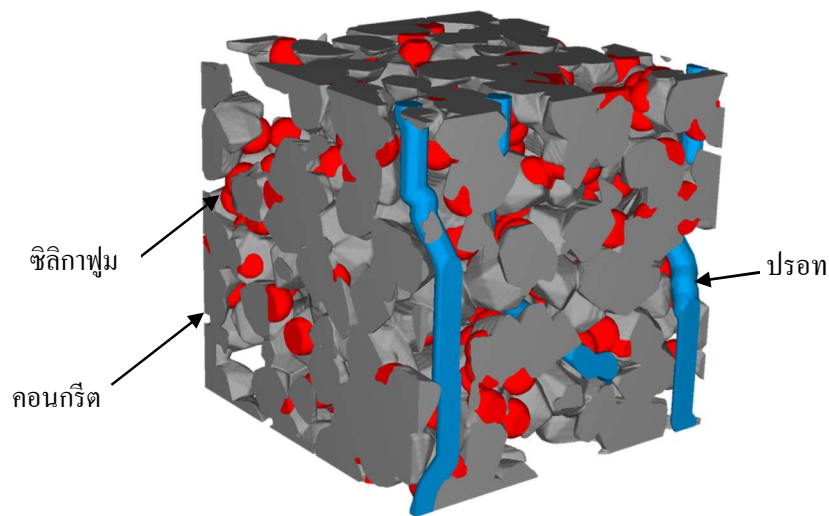
โดยที่ W_i = น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)

W_f = น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)

ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตด้วยวิธี MIP

การทดสอบเพื่อหาขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย ทำการทดสอบด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) โดยใช้เครื่อง Pore sizer distribution ใช้หลักการวิเคราะห์ขนาดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตโดยใช้ปรอทอัดเข้าไปในโพรงช่องว่างภายในของคอนกรีตโดยใช้ความดัน 30,000 psi ซึ่งจะสามารถวัดโพรงช่องว่างภายในขนาด 6 ไมครอนขึ้นไปได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตัดตัวอย่างมอร์ตาร์จากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่อายุ 2 ปี และทำการตัดแต่งให้มีขนาด 0.5 x 0.5 x 1.5 ซม.³ จำนวน 2 ก้อนต่อ 1 ตัวอย่าง
2. อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างจนหมด
3. นำตัวอย่างใส่ในกระเปาะแก้วอัดความดันแล้วติดตั้งในเครื่อง Pore sizer distribution และทำการอัดปรอทจากความดันบรรยากาศ จนถึง 30,000 psi
4. บันทึกค่าแรงดันและปริมาตรปรอทที่แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างเพื่อนำมาคำนวณขนาดของโพรงช่องว่างภายในเนื้อ



ภาพที่ 3-35 แบบจำลองการแทรกตัวของพรอทเข้าไปในช่องว่างในคอนกรีต

ความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642

การทดสอบเพื่อหาความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642 สามารถคำนวณได้
ดังสมการที่ 3-3

$$\text{Volume of permeable pore space (voids), \%} = \frac{A - B}{B - C} \times 100 \quad (3-3)$$

โดยมีชั้นคอนกรีตหาคำนวณหน้าของคอนกรีตในสภาพต่าง ๆ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ให้มีปริมาตรมาตรฐานไม่ต่ำกว่า 350 ลบ.ซม. หรือประมาณ 800 กรัม
2. นำตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชม.



ภาพที่ 3-36 แซ่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชม.

3. อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 – 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วทิ้งให้เย็นในอุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 20 – 25 องศาเซลเซียส จากนั้นจดบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง

4. นำตัวอย่างไปอบอีกครั้งเป็นระยะเวลา 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วทิ้งให้เย็นในอุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 20 – 25 องศาเซลเซียส จากนั้นจดบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเป็นน้ำหนัก (A) โดยค่าน้ำหนักที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 ต้องต่างจากขั้นตอนที่ 2 ไม่เกินร้อยละ 0.5 หากเกินให้ทำขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะต่างกัน ไม่เกินร้อยละ 0.5

5. นำตัวอย่างมาต้มด้วยน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 6 ชม. และปล่อยให้เย็นเป็นระยะเวลา 14 ชม. หลังจากนั้นนำมาเช็ดผิวให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักอ้อมตัวผิวแห้ง (B)



ภาพที่ 3-37 อบตัวอย่างในตู้อบควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 3-38 ต้มตัวอย่างในน้ำเดือด

6. นำตัวอย่างชั่งน้ำหนักในน้ำได้น้ำหนัก (C)



ภาพที่ 3-39 การชั่งน้ำหนักแบบต่าง ๆ ในการทดสอบความพรุนคอนกรีต

7. นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ 3-3

การเก็บกักความชื้นของคอนกรีตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

ในการทดสอบการสะสมความชื้นภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบความสามารถในการเก็บกักความชื้นของคอนกรีตที่ใช้แฉักันเตาแทนที่ทราย ในการทดสอบจะใช้กระบะจำลองสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยจะจำลองให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียกเป็นระยะเวลา 12 ชม. และแห้งระยะเวลา 12 ชม. นับเป็น 1 รอบการทำงาน โดยวิธีการทดสอบมีดังนี้

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 ซม.
2. บ่มคอนกรีตในน้ำจนมีอายุครบ 91 วัน
3. อบคอนกรีตให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักได้เป็นน้ำหนัก X
4. นำตัวอย่างวางในกระบะจำลองสภาวะเปียกสลับแห้ง



ภาพที่ 3-40 การทดสอบการสะสมความชื้นของคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้ง

5. จดบันทึกค่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างเมื่อเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งครบทุก ๆ 1 รอบได้เป็นน้ำหนัก Y เป็นระยะเวลา 14 วัน แล้วคำนวณปริมาณความชื้นดังสมการที่ 3-4

$$\text{ร้อยละของความชื้น} = \frac{Y-X}{X} \times 100 \quad (3-4)$$

Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบ Micro hardness เป็นการทดสอบความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์แบบเฉพาะจุดใช้การศึกษาความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์บริเวณ Transition zone ในคอนกรีต ในการวัดใช้การวัดความแข็งจุดภาคโดยวิธีวิเคราะห์ภาพ (Computerized measuring system for Micro hardness test: an image analysis approach) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบมีดังนี้

1. ตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า มีขนาด $1 \times 1 \times 1$ ซม.³

ดังภาพที่ 3-41



ภาพที่ 3-41 การตัดตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ Micro hardness

2. นำตัวอย่างไปอบให้แห้งในตู้อบเป็นระยะเวลา 24 ชม.
3. นำตัวอย่างเรียงในแบบหล่อเรซิน และหล่อเรซิน หลังจากนั้นปล่อยให้เรซินแข็งตัวเป็นระยะเวลา 24 ชม. ดังภาพที่ 3-42
4. ขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 400, 600, 1200 และ 1400 ตามลำดับ หลังจากนั้นขัดผิวหน้าต่อด้วยกระดาษเพชรเบอร์ 3 μ และ 1 μ ดังภาพที่ 3-43



ภาพที่ 3-42 การหล่อเรซินเพื่อยึดตัวอย่างเข้าด้วยกัน



ภาพที่ 3-43 การขัดผิวหน้าก้อนคอนกรีตที่หล่อเรซินแล้ว

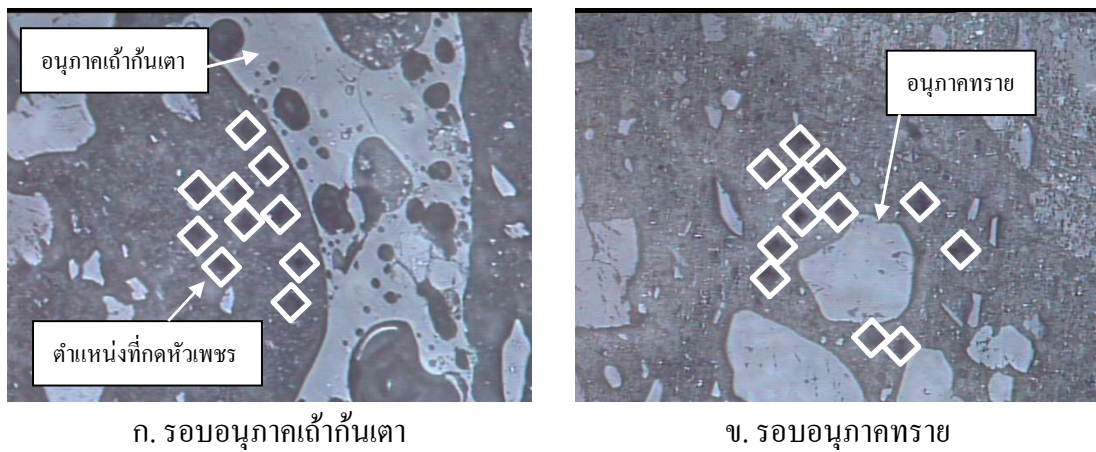


ภาพที่ 3-44 ตัวอย่างคอนกรีตที่พร้อมทดสอบ

ในการทดสอบ Micro hardness อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1326 และ ASTM C1327 ใช้วิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส์ (Vickers hardness test method) ทำได้โดยใช้หัวกดเพชรแบบสี่เหลี่ยมกดลงไปบนชิ้นตัวอย่างด้วยแรงขนาด 100 กรัม และค้างไว้ 10 วินาที หลังจากนั้นวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวอย่าง และสามารถคำนวณค่าความแข็งได้จากขนาดของรอยที่เกิดขึ้นจากการกด



ภาพที่ 3-45 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ Micro hardness



ภาพที่ 3-46 ร่องรอยจากการกดตัวอย่างด้วยหัวเพชรรอบอนุภาคแก้วกันตาและอนุภาคทราย

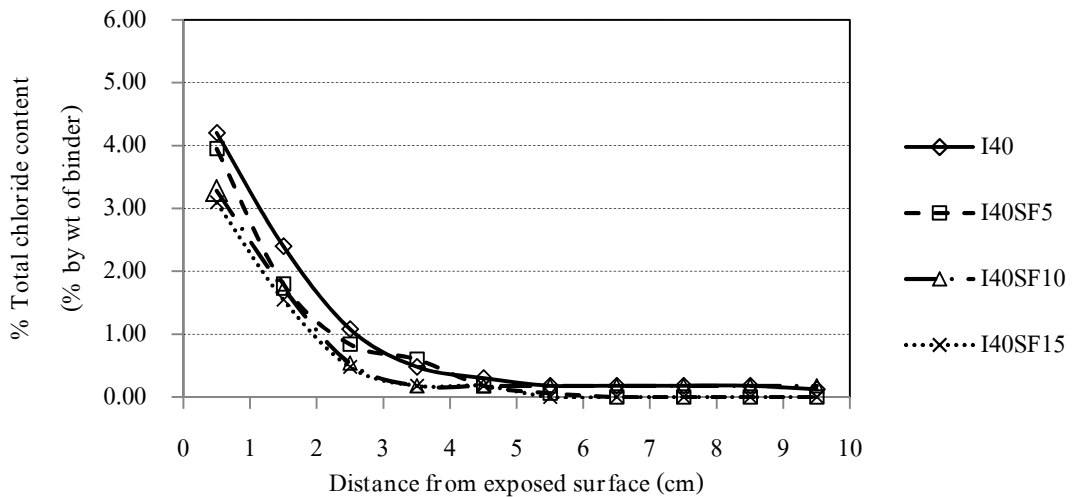
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

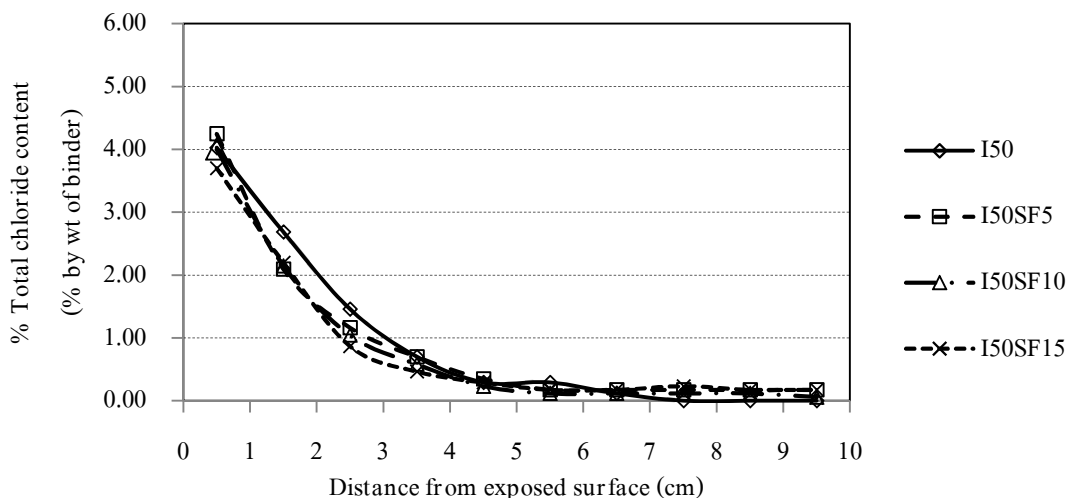
คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในหน่วยร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) กับระยะทางจากผิวหน้าสัมผัสของคอนกรีต (Distance from exposed surface) หากคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตในปริมาณน้อย แสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี



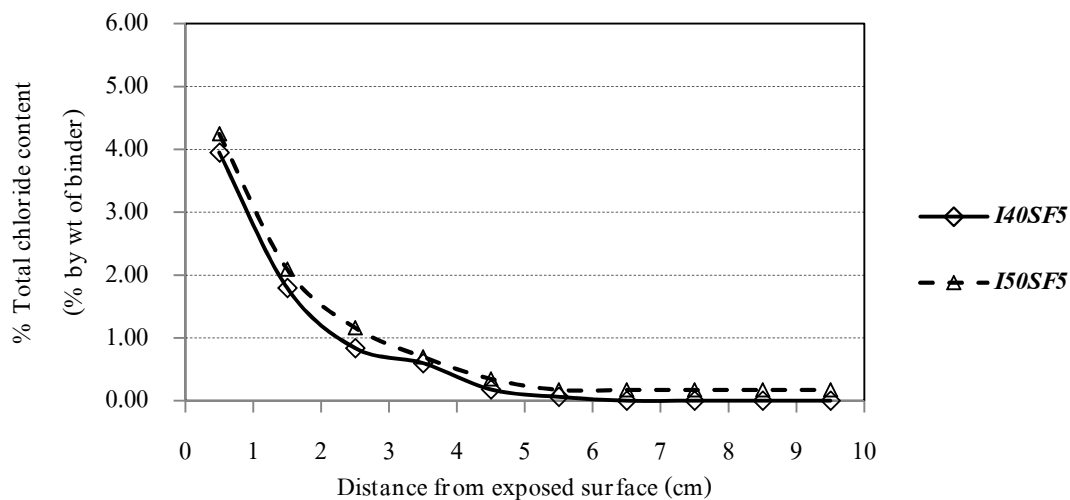
ภาพที่ 4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



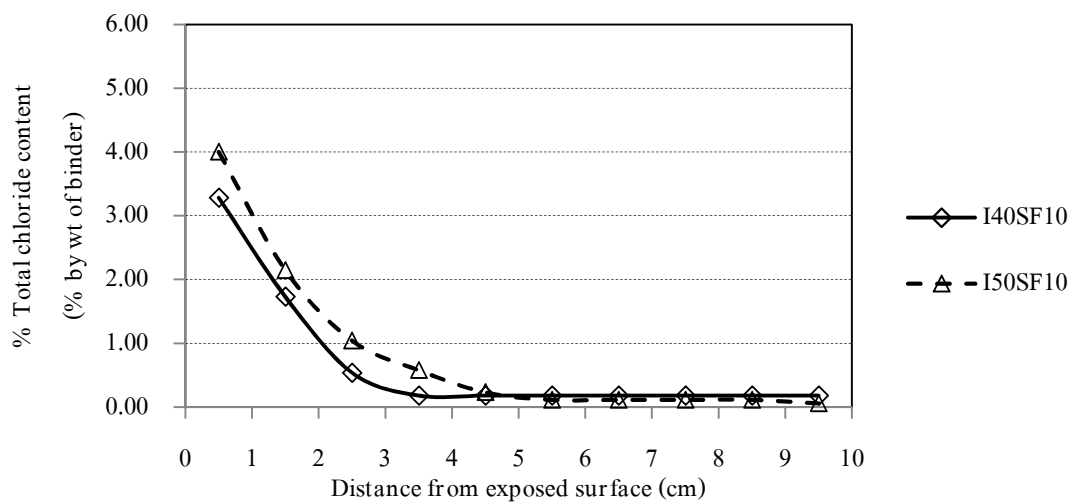
ภาพที่ 4-2 ปริมาณคลอไรด์ในระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่แทนที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

จากภาพที่ 4-1 และ 4-2 พิจารณาจากคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากผลปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่แทนที่ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้น้อยลงเมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และ 0.50

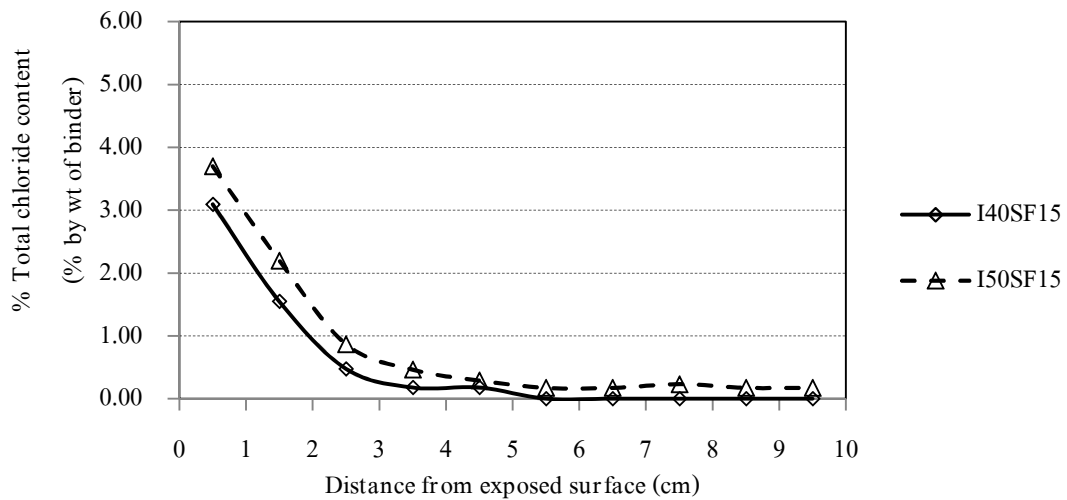
ในด้านความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะเห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน คือ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง เนื่องด้วยการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากทำให้มีน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเหลือมากขึ้น จึงทำให้คอนกรีตเกิดโพรงช่องว่างภายในมากขึ้น คลอไรด์จึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-3, 4-4 และ 4-5



ภาพที่ 4-3 ผลกระทบจากอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5

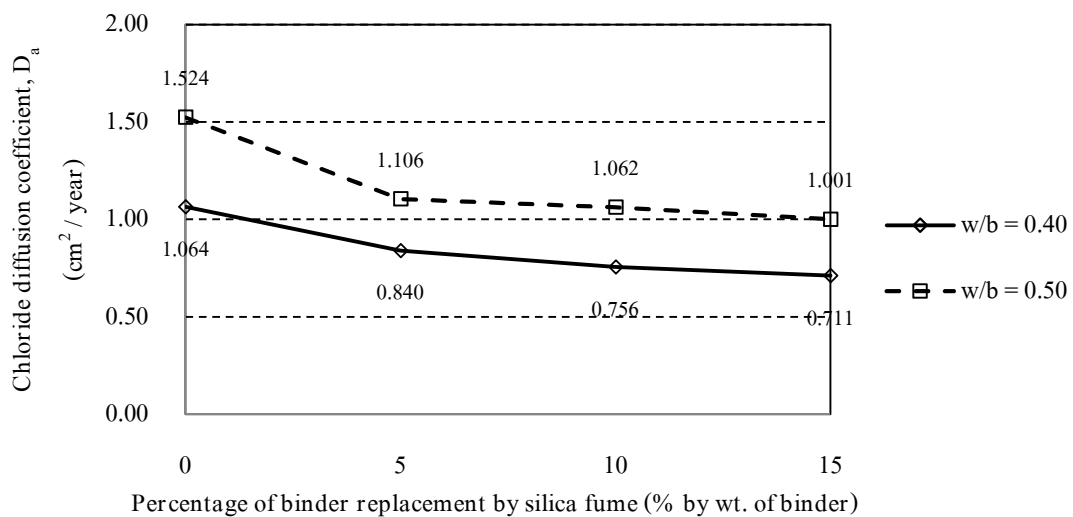


ภาพที่ 4-4 ผลกระทบจากอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10



ภาพที่ 4-5 ผลกระทบจากอัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15

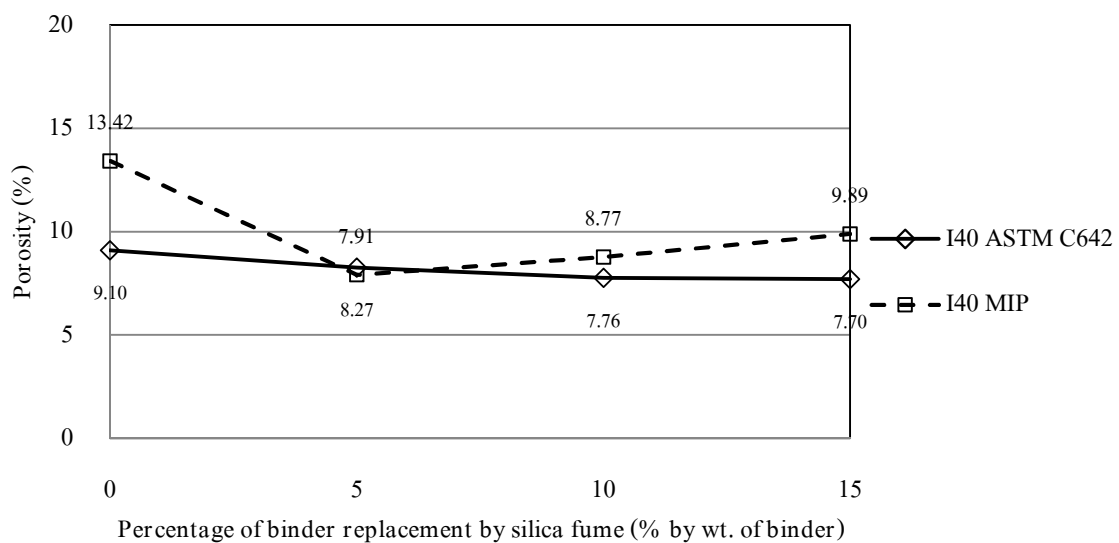
เมื่อนำปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในแต่ละชั้นความลึกมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ตามสมการคำตอบข้อที่สองของ Fick จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต มีหน่วยตารางเซนติเมตรต่อปี ดังภาพที่ 4-6



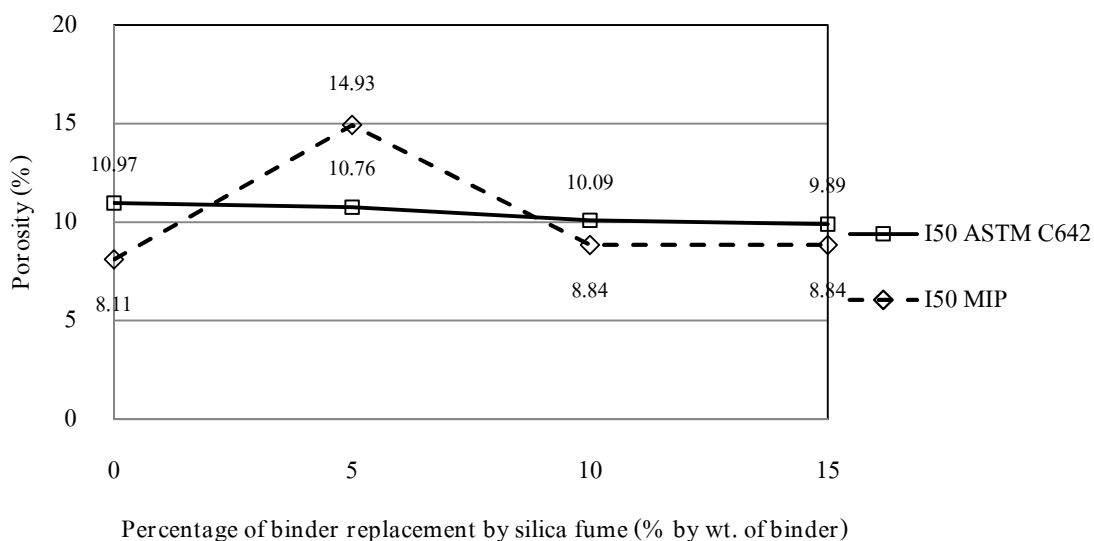
ภาพที่ 4-6 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม

จากภาพที่ 4-6 เมื่อพิจารณาจากปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ้ง พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ 1.064, 0.840, 0.756 และ 0.711 ซม.²/ปี ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งคิดเป็นการลดจลร้อยละ 21.1, 28.9 และ 33.2 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ 1.524, 1.106, 1.062 และ 1.001 ซม.²/ปี ตามลำดับคิดเป็นร้อยละ 27.4, 30.3 และ 34.3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

ผลกระทบของซิลิกาฟุ้งต่อความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีต การทดสอบหาความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการทดสอบทั้งหมด 2 การทดลอง ได้แก่ การทดสอบความพรุนด้วยวิธี ASTM C 642 และทดสอบความพรุนด้วยวิธี MIP ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4-7 และ 4-8



ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP



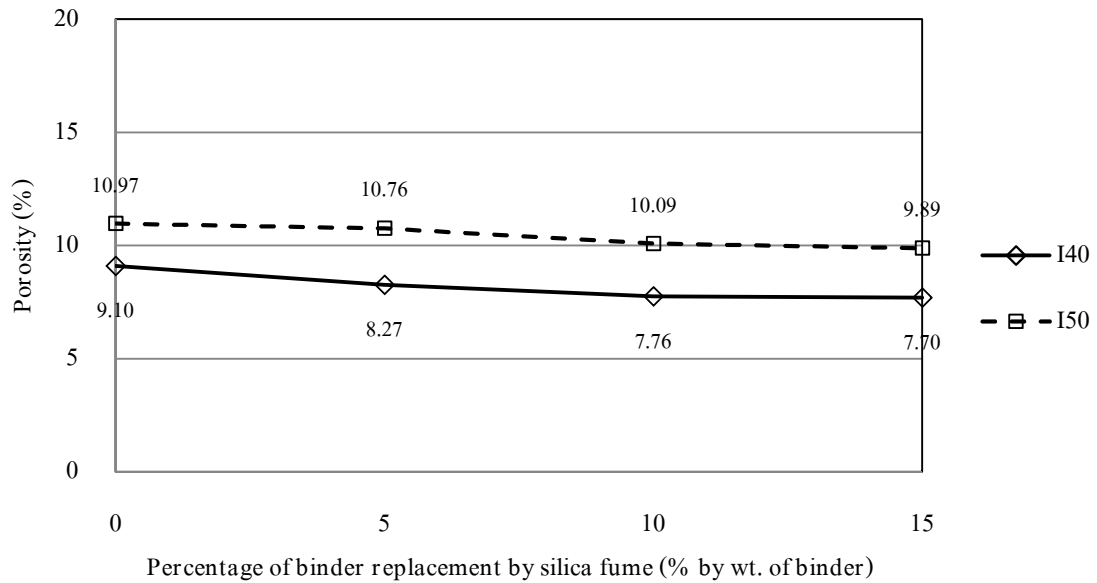
ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานในอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP

จากผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานทั้ง 2 วิธีพบว่า การทดสอบด้วยวิธี ASTM C 642 เมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมากในปริมาณที่มากขึ้นพบว่า คอนกรีตมีความพรุนที่ลดลง และแนวโน้มดังกล่าวก็สอดคล้องกันทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และ 0.50 แต่ผลการทดสอบความพรุนด้วยวิธี MIP พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 5 จะมีค่าความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 10 และ ร้อยละ 15 ตามลำดับ ผลทดสอบความพรุนของคอนกรีต กลับเพิ่มมากขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 พบว่าเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 5 ทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่เมื่อแทนที่วัสดุ ประสานที่ร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ ความพรุนของคอนกรีตกลับลดลง ซึ่งแนวโน้มดังกล่าว ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 ทั้งนี้เกิดจากการทดสอบ ความพรุนด้วยวิธี MIP ต้องเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเล็กเพียง 1 x 1 x 1.5 ซม. การเตรียมตัวอย่างที่มี ขนาดเล็กเช่นนี้ จึงไม่สามารถเป็นตัวแทนคอนกรีตได้ทั้งหมด เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีการ กระจายตัวของเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อมีการตัดคอนกรีตเพื่อเก็บตัวอย่างไปทดสอบ MIP อาจจะมี การตัด โดมนมวลรวมหยาบมาในก้อนตัวอย่างด้วย จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของความพรุนของก้อนตัวอย่างใน การทดสอบลดลง ดังนั้นสรุปได้ว่าในการวิเคราะห์ค่าความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642 ให้ผล การทดสอบที่เป็นตัวแทนของคอนกรีตได้ดีและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการทดสอบแบบ MIP

และการวิเคราะห์ผลความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานนี้ จะยึดผลการทดสอบความพรุนด้วยวิธี ASTM C 642 เป็นหลัก แต่ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตจะยึดผลการทดสอบ MIP ในการวิเคราะห์ผล

จากผลการทดสอบค่าความพรุนของเนื้อคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานด้วยวิธี ASTM C642 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความพรุนลดลง โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 10 และ 15 ได้ค่าความพรุนของคอนกรีต 9.10, 8.27, 7.76 และ 7.70 ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละ 8.7, 14.2 และ 15.3 ตามลำดับ และที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 10 และ 15 ได้ค่าความพรุนของคอนกรีต 10.97, 10.76, 10.09 และ 9.89 ตามลำดับ ลดลงร้อยละ 1.9, 8.0 และ 9.8 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 4-9

จากการทดสอบขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตด้วยวิธี MIP พบว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน มีขนาดโพรงภายในเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ในปริมาณมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีต 0.057, 0.051, 0.047 และ 0.042 คิดเป็นร้อยละ 10.5, 17.5 และ 26.3 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อนี้มีค่า 0.064, 0.07, 0.057 และ 0.058 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.3 แต่ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 15 ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลงร้อยละ 10.9 และ 10.9 ตามลำดับดังภาพที่ 4-10 ทั้งนี้จะเห็นว่าการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อเล็กลงชัดเจนกว่าในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ภาพที่ 4-9 ความพรุนของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสาน



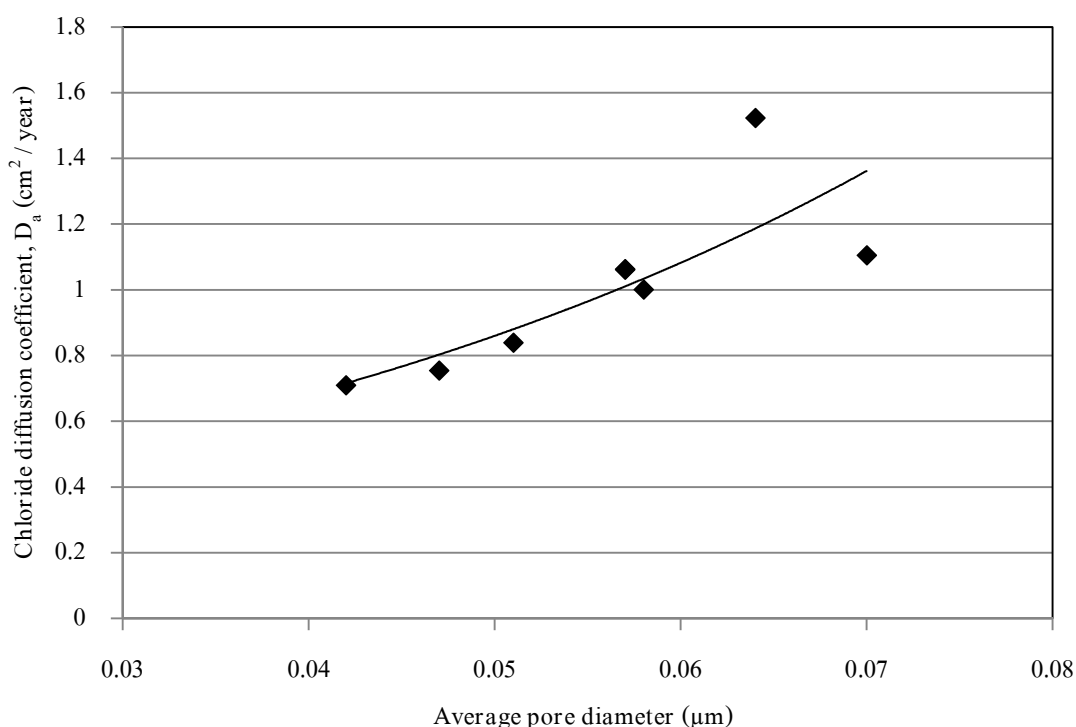
ภาพที่ 4-10 ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสาน

เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีส่วนประกอบของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึกมากถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก อีกทั้งยังมีอนุภาคเล็กมากทำให้ไวต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซนาติกเกิดเป็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจึงมีเพิ่มมากขึ้น และด้วยขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่มีขนาดเล็กจึงสามารถ

เข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่บ่มน้ำมากขึ้น ผลการทดสอบความพรุน และขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยจึงมีค่าลดลงเมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ซึ่งผลการทดลองนั้นก็สอดคล้องกับการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน ในห้องปฏิบัติการของ กรรภิรมย์ ศรีสุวรรณ และ พนิดา ปริษานุพันธ์ (2556) ซึ่งการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่วัสดุประสานมากขึ้น ทำให้คุณสมบัติการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน จะเห็นว่าขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตมีผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์โดยตรงดังภาพที่ 4-11

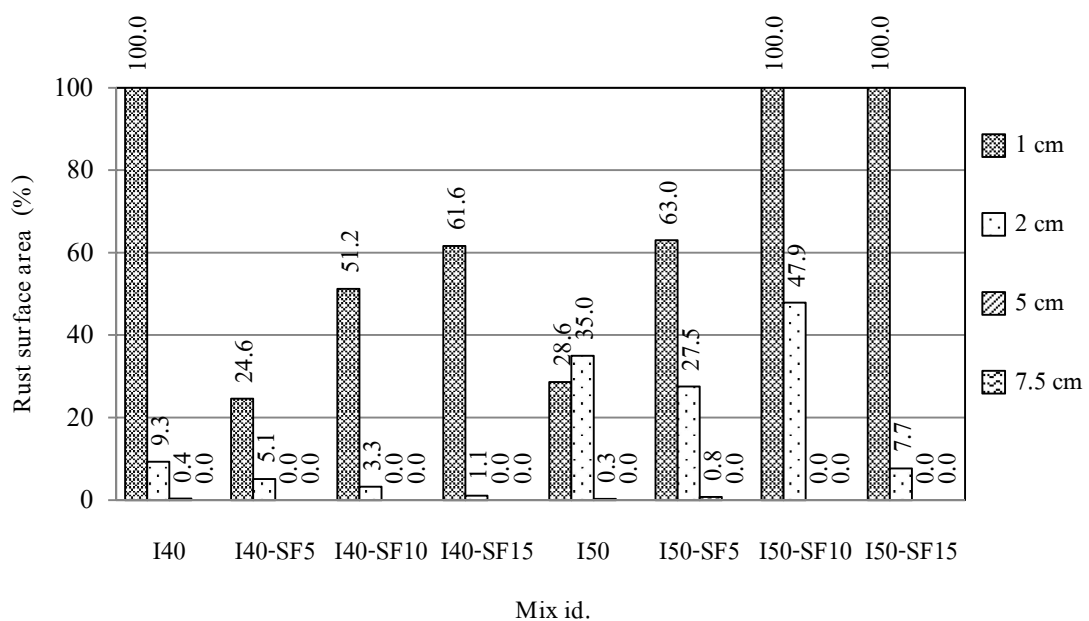


ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยกับสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะเห็นว่า เมื่อคอนกรีตมีความพรุนน้อยลงและขนาดโพรงช่องว่างภายในเล็กลงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ลดลงด้วย เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ทำให้เกิดผลึก CSH มากขึ้น และการเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในของอนุภาคซิลิกาฟุ่มทำให้โพรงช่องว่างภายในที่คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านได้มีน้อยลง

ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

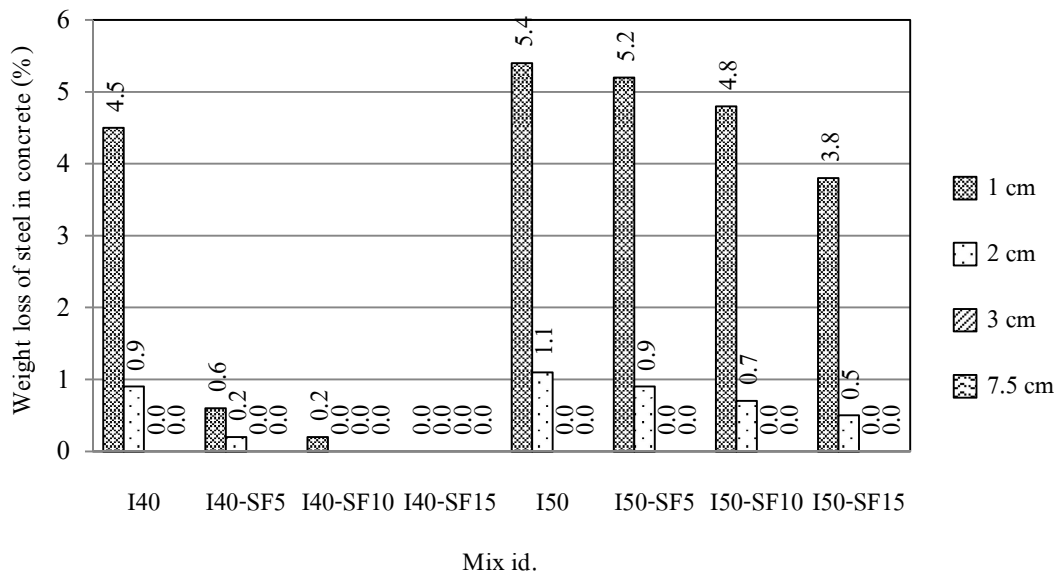
จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้มีการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น และเพื่อยืนยันผลการทดสอบดังกล่าวว่าสามารถใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงมีการทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของผิวเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมเหล็ก



ภาพที่ 4-12 ร้อยละของการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่างๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน

จากการทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานดังภาพที่ 4-12 พบว่าพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมของเหล็กเสริมไม่สามารถระบุแนวโน้มที่ชัดเจน และพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมอาจเกิดจากความชื้น

และอากาศภายในคอนกรีตที่ยังหลงเหลืออยู่ตั้งแต่การผสมคอนกรีต ดังนั้นการพิจารณาพื้นที่ผิวของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นจึงเป็นดัชนีชี้วัดที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้การพิจารณาการสูญเสียกำลังของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ควรพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากกว่า



ภาพที่ 4-13 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน

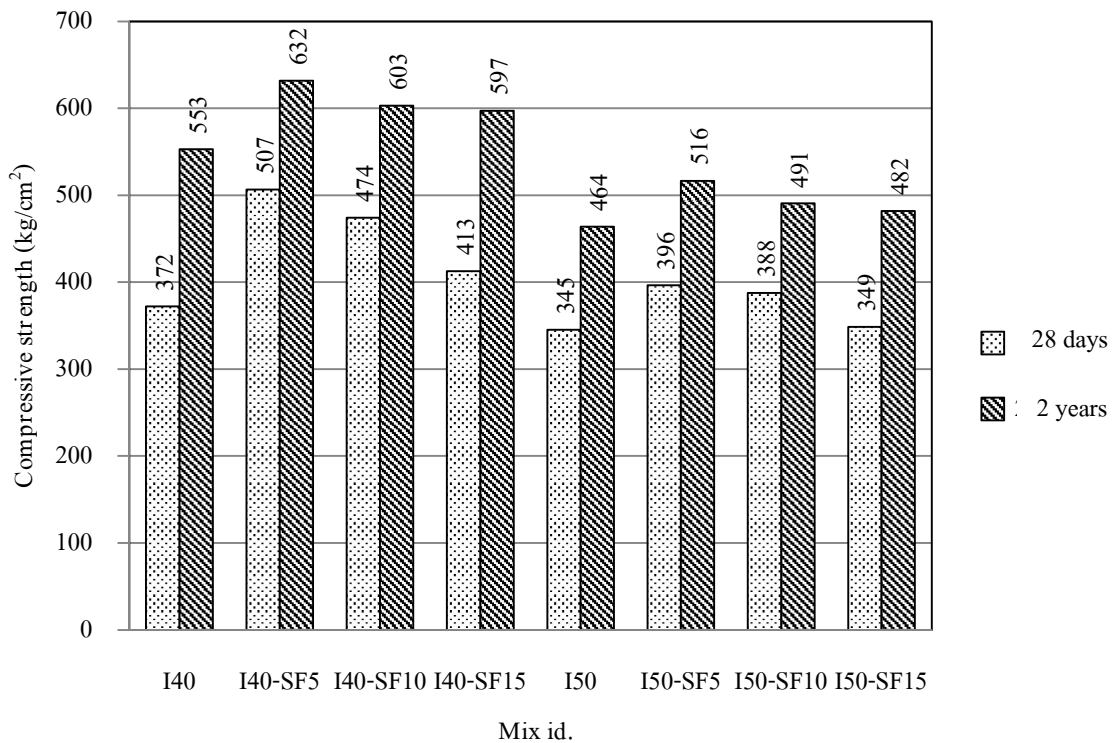
จากผลการทดลองดังภาพที่ 4-13 พบว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีการสูญเสียน้ำหนักจากสนิมน้อยกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตทั่วไปทุกระยะหุ้มเหล็ก และทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะหุ้มเหล็ก 1 ซม. เมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 10 และ 15 ได้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม 4.5, 0.6, 0.2 และ 0.0 ตามลำดับ คิดเป็นสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมลดลงร้อยละ 84.9, 93.5 และ 100.0 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะหุ้มเหล็ก 1 ซม. เมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 10 และ 15 ได้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม 5.4, 5.2, 4.8 และ 3.8 ตามลำดับ ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมลดลงร้อยละ 3.7, 11.1 และ 29.6 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานเพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิม จะเห็นผลที่ชัดเจนเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งผลการทดสอบก็สอดคล้องกับผลการทดสอบขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตที่เมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่

วัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยเล็กลงได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และส่วนผสมที่มีการสูญเสีย น้ำหนักน้อยที่สุดคือคอนกรีตที่ใช้ปริมาณการแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15 ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ได้ได้กล่าวมาในข้างต้น

ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีต

จากภาพที่ 4-14 จะเห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตทั่วไป และสูงที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 10 และ 15 กำลังอัดลดลงเล็กน้อยตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวพบทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ได้ค่ากำลังอัด 553, 632, 603 และ 597 ตามลำดับ คิดเป็นกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.3, 9.0 และ 8.0 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ได้ค่ากำลังอัด 646, 516, 491 และ 482 ตามลำดับ คิดเป็นกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.2, 5.8 และ 3.9 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป

คอนกรีตที่แทนที่ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซิลิกาฟูมที่มีองค์ประกอบของซิลิกาที่พร้อมทำปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 90 เข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นผลึกที่ให้กำลังมากขึ้น กำลังอัดคอนกรีตจึงเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมมากขึ้นทำให้กำลังอัดลดลง

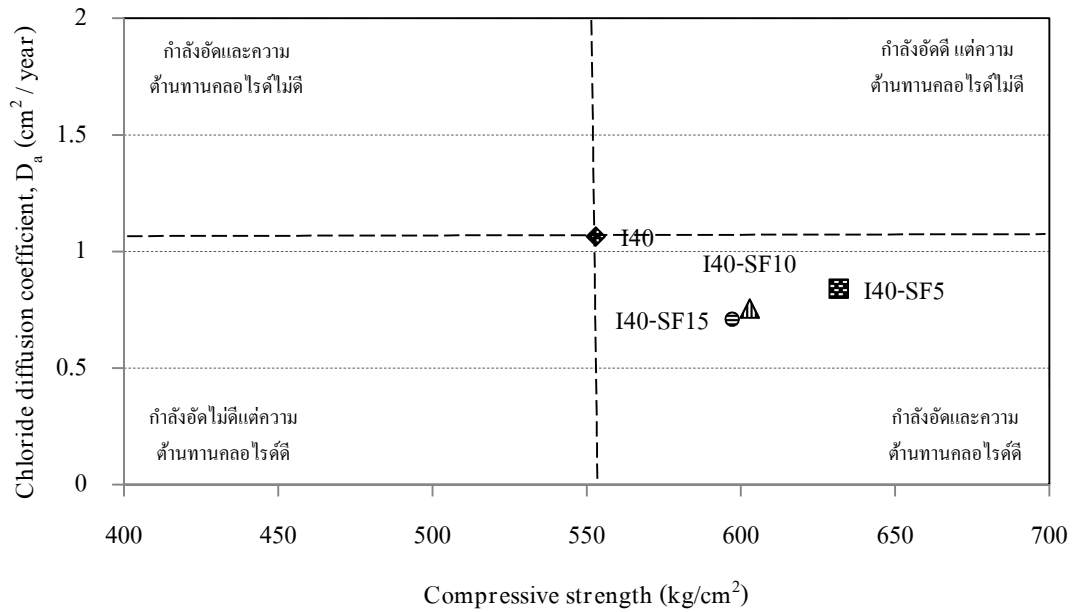


ภาพที่ 4-14 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่อายุ 28 วัน และ 2 ปี

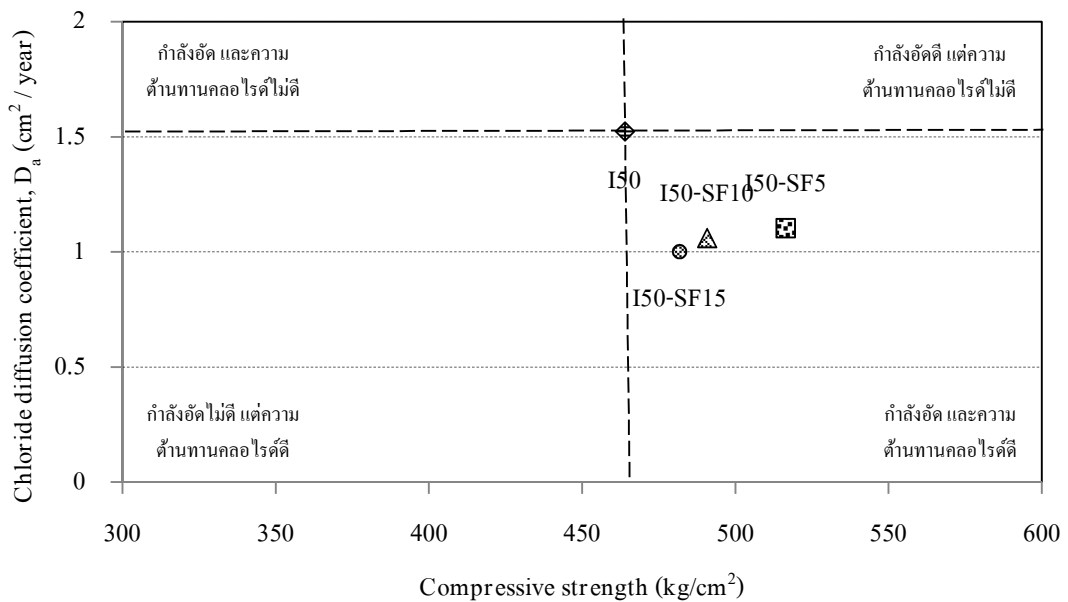
เนื่องจากซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสานหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและได้สารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลง ผลึกของ CSH จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลานิกจึงลดลง กำลังอัดคอนกรีตจึงลดลง และการใช้คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานในปริมาณมากทำให้คอนกรีตนั้นมีค่าการยุบตัวลดลง เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากพื้นที่ผิวของอนุภาคโดยรวมทั้งหมดจึงมีมากกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณน้ำเท่ากันในการผสมคอนกรีต จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีค่าการยุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปจากการดูดซึมน้ำของพื้นที่ผิวของซิลิกาฟุ่ม

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน

จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ดังภาพที่ 4-15 และ 4-16 จะเห็นว่าส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม ที่มีทั้งความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นและกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อ คือ คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

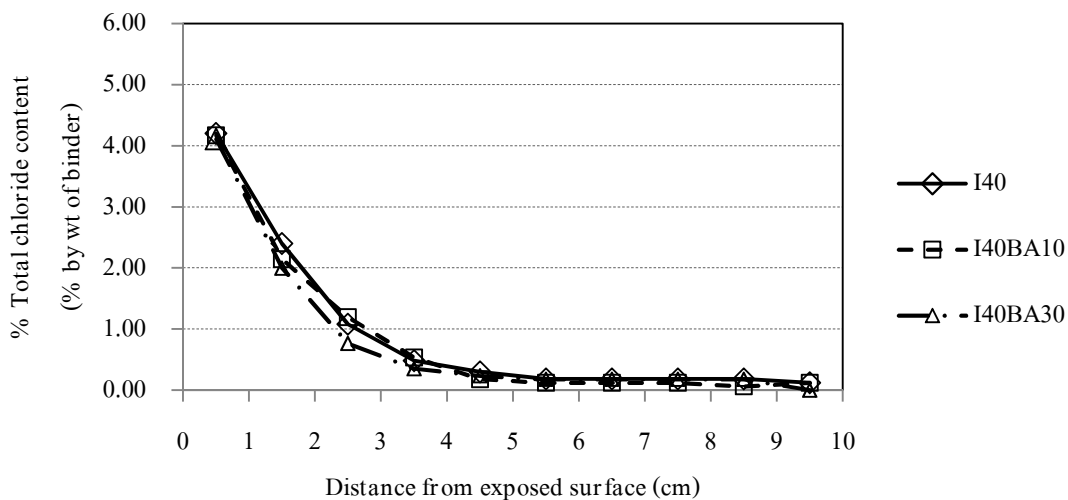
จากผลการทดลองเกี่ยวกับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิม ความพรุน และขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ย พบว่าในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีน้ำอิสระในคอนกรีตสดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทำให้เกิดโพรงช่องว่างภายในมากกว่า แต่เมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ในปริมาณที่เท่ากัน จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ยังมีโพรงช่องว่างภายในที่ไม่ได้ถูกเติมเต็มด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานิก และการเติมเต็มโพรงช่องว่างด้วยอนุภาคซิลิกาฟูมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตจึงไม่ชัดเจนเท่ากับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แต่ทั้งนี้ตาม มยผ.1332-50 และ มยผ. 1332 – 55 กำหนดไว้ว่าคอนกรีตที่ใช้สำหรับโครงสร้างที่เผชิญสภาพแวดล้อมทะเลควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.45 ดังนั้นซิลิกาฟูมจึงยังเป็นวัสดุที่ยังมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

คอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่บางส่วนของทราย

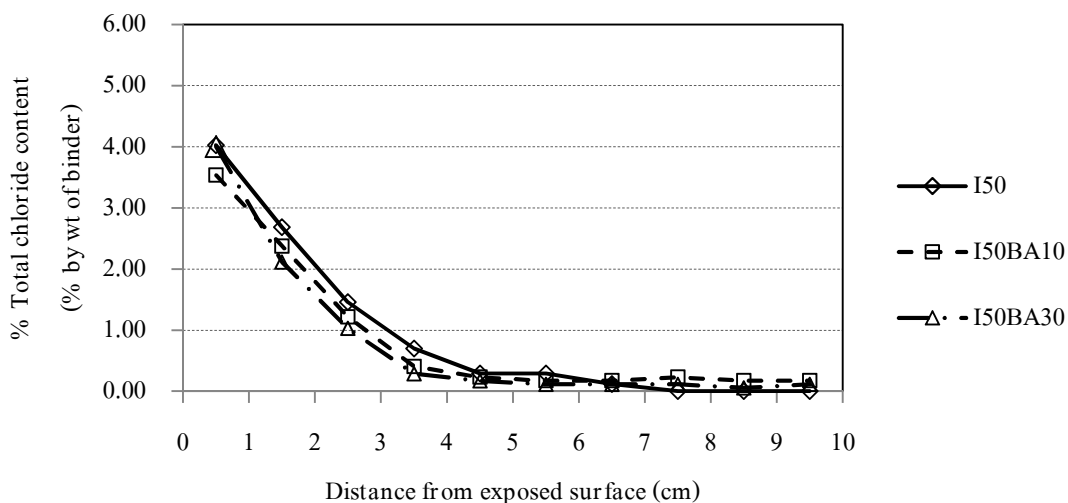
ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) กับระยะทางจากผิวของคอนกรีต (Distance from exposed surface) ซึ่งหากคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตในปริมาณน้อย แสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

จากภาพที่ 4-17 และ 4-18 พิจารณาจากคอนกรีตที่แทนที่เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 0, 10 และ 30 โดยปริมาตรของทราย พบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้น้อยลงเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้ากั้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น



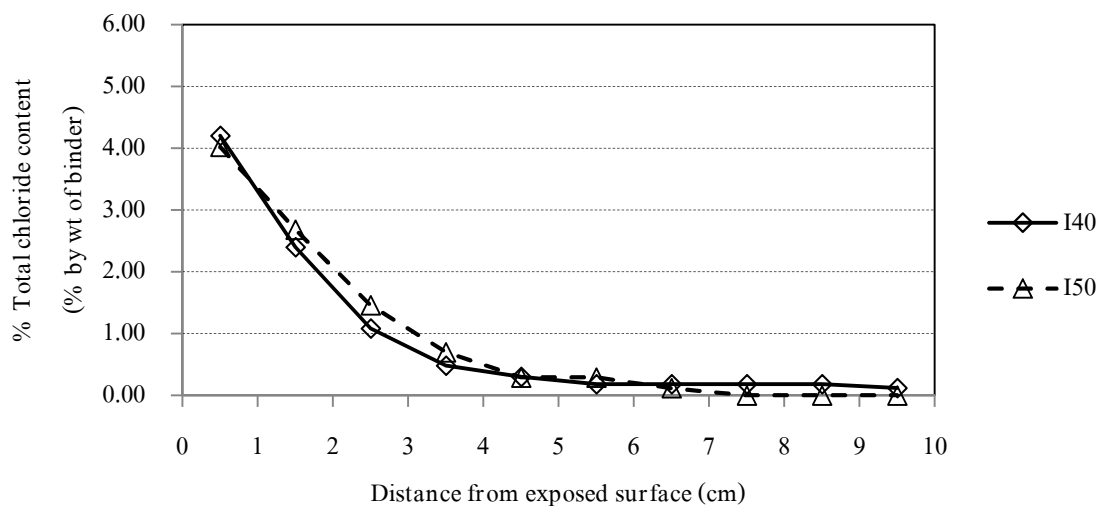
ภาพที่ 4-17 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



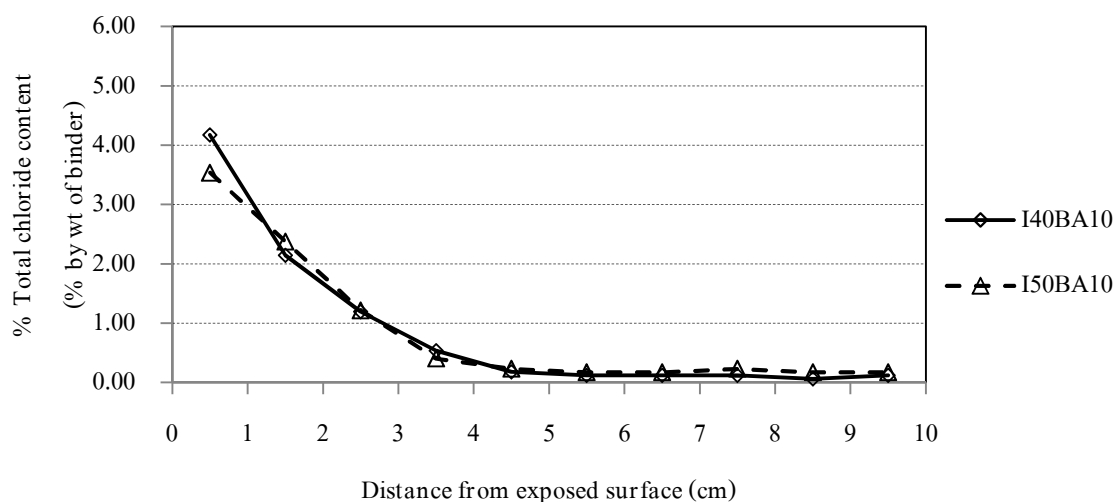
ภาพที่ 4-18 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

จากภาพที่ 4-19 4-20 และ 4-21 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสานเพิ่มสูง ทำให้มีน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเหลือมาก คอนกรีตเกิดโพรงช่องว่างภายในจำนวนมาก คลอไรด์จึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้มากขึ้น

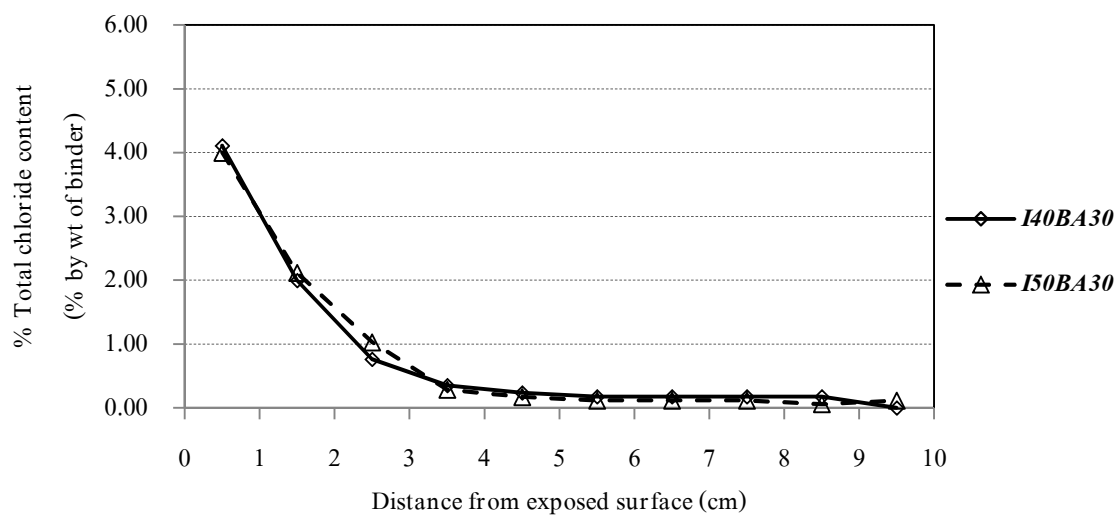


ภาพที่ 4-19 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตทั่วไป

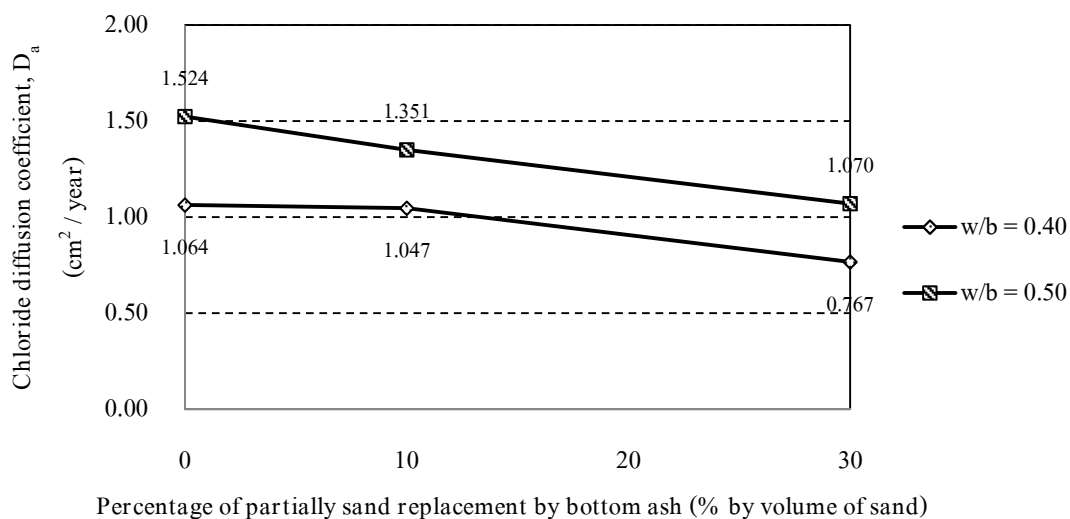


ภาพที่ 4-20 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10

เมื่อนำปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในแต่ละชั้นความลึกมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตตามสมการคำตอบข้อที่สองของฟิคส์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตในหน่วย $\text{cm}^2/\text{ปี}$ ดังภาพที่ 4-22



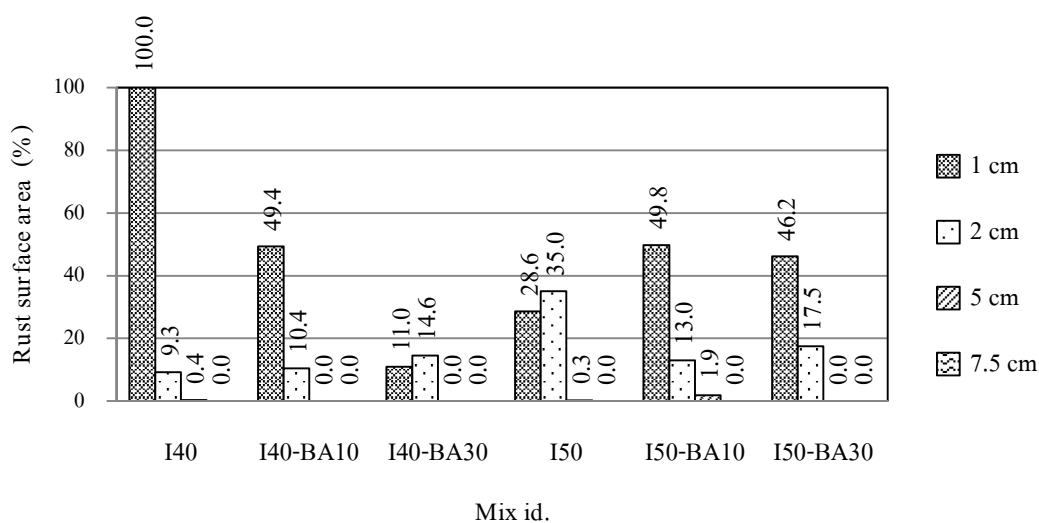
ภาพที่ 4-21 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในชั้นความลึกต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 30



ภาพที่ 4-22 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้
 ใ้ก้านเตาแทนที่ทราย พบว่าเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยใ้ก้านเตาในปริมาณมากขึ้นทำให้คอนกรีต
 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากขึ้น โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้
 ใ้ก้านเตาแทนที่ทรายร้อยละ 0, 10 และ 30 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต 1.064,
 1.047 และ 0.767 ตามลำดับ คิดเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลงร้อยละ 1.6 และ
 27.9 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อใช้
 ใ้ก้านเตาแทนที่ทรายร้อยละ 0, 10 และ 30 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ 1.524, 1.351 และ 1.070
 ตามลำดับ คิดเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลงร้อยละ 11.4 และ 29.8 ตามลำดับ
 ผลกระทบของใ้ก้านเตาต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

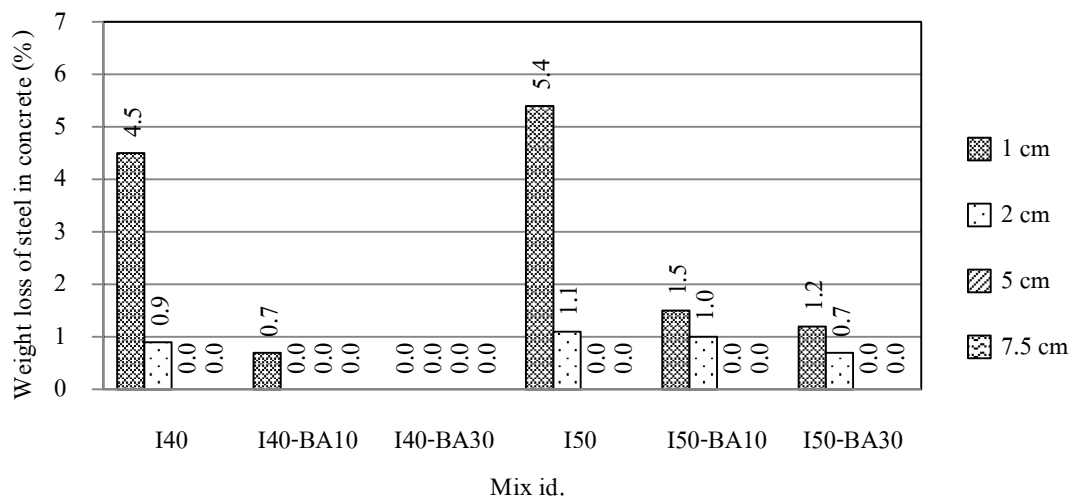
จากผลการทดลองหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์พบว่า คอนกรีตที่ใช้ใ้ก้านเตา
 แทนที่ทรายในปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-23 ร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้
 ใ้ก้านเตาแทนที่ทราย

จากการทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตทั่วไป และคอนกรีตที่ใช้
 ใ้ก้านเตาแทนที่ทรายดังภาพที่ 4-23 พบว่าการเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมไม่สามารถหาแนวโน้มที่
 ชัดเจนได้ และการเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมก็ไม่สอดคล้องกับผลการแทรกซึมคลอไรด์ ดังนั้นการ
 พิจารณาพื้นที่ผิวของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นจึงเป็นดัชนีชี้วัดที่ยังไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้การ

พิจารณาการสูญเสียกำลังของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ควรพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากกว่า

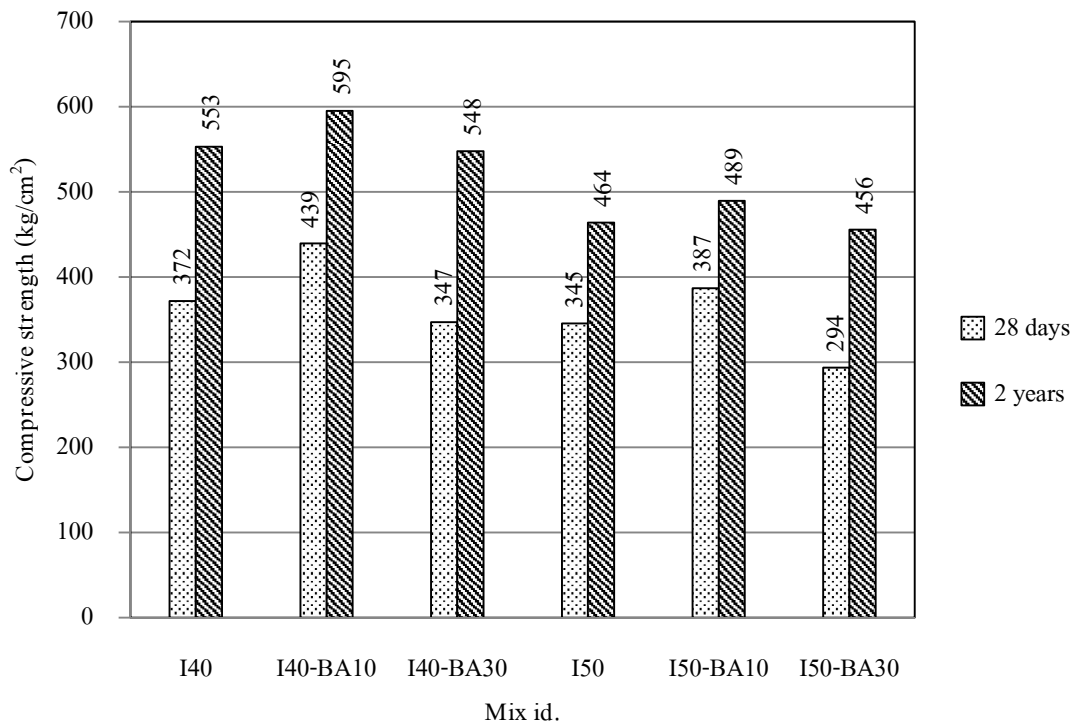


ภาพที่ 4-24 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในระยะหุ้มเหล็กต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

จากผลการทดสอบดังภาพที่ 4-24 พบว่า เหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วน of ทราย ต่ำกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตทั่วไปทุกระยะหุ้มเหล็ก และทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยเหล็กเสริมที่มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด คือ เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตที่ใช้ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้ได้กล่าวมาข้างต้น

ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัดคอนกรีต

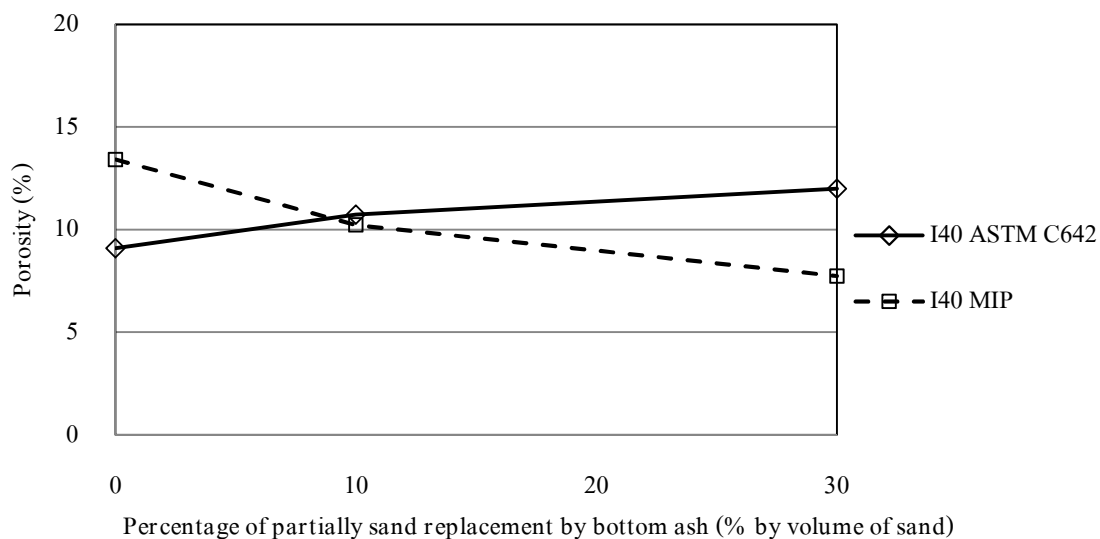
จากภาพที่ 4-25 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย มีกำลังอัดเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50



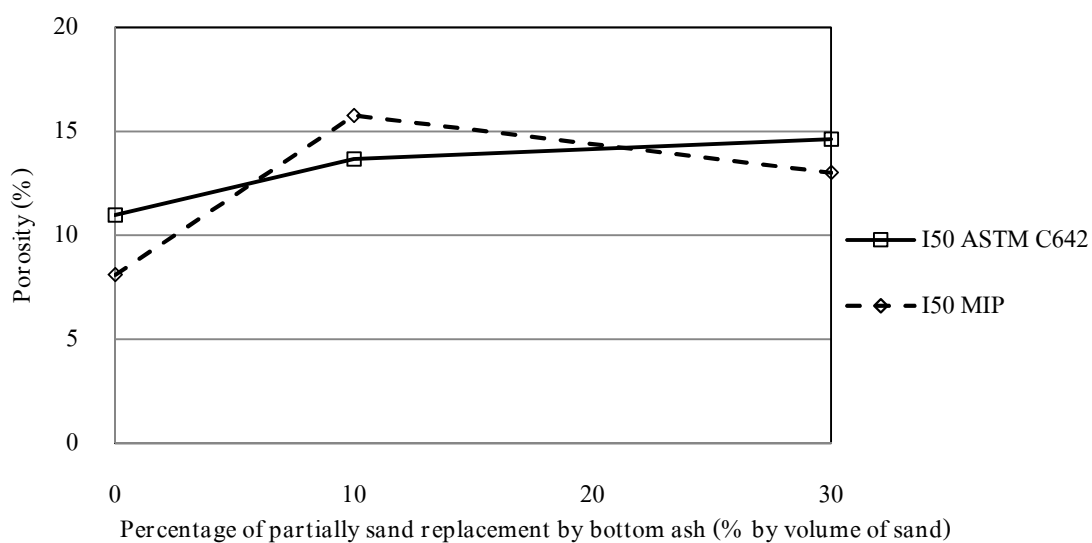
ภาพที่ 4-25 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายที่อายุ 28 วัน และ 2 ปี

จากผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีกำลังสูงขึ้นที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่กำลังอัดคอนกรีตลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30 โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.6 และ 5.4 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงร้อยละ 0.9 และ 1.7 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีต การทดสอบความพรุนของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบทั้งหมด 2 การทดลอง ได้แก่ การทดสอบความพรุนด้วยวิธี ASTM C 642 และทดสอบความพรุนด้วยวิธี MIP ซึ่งผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4-26 และ 4-27



ภาพที่ 4-26 ความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP



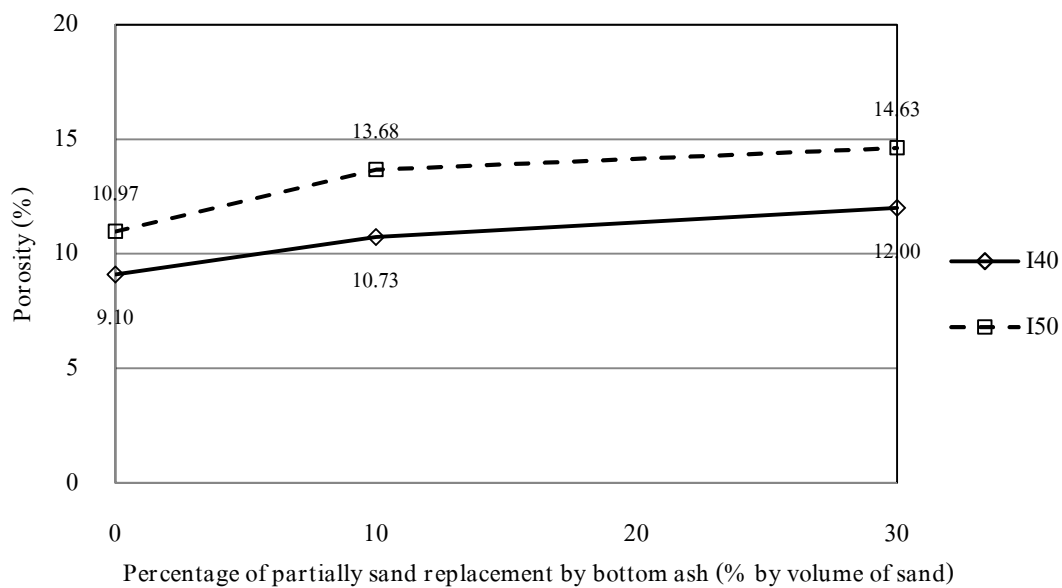
ภาพที่ 4-27 ความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ด้วยวิธี ASTM C 642 และ MIP

จากผลการทดสอบความพรุนทั้ง 2 วิธีพบว่ามีความแตกต่างกันเมื่อพิจารณาความพรุนที่ทดสอบด้วยวิธี ASTM C 642 คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้า

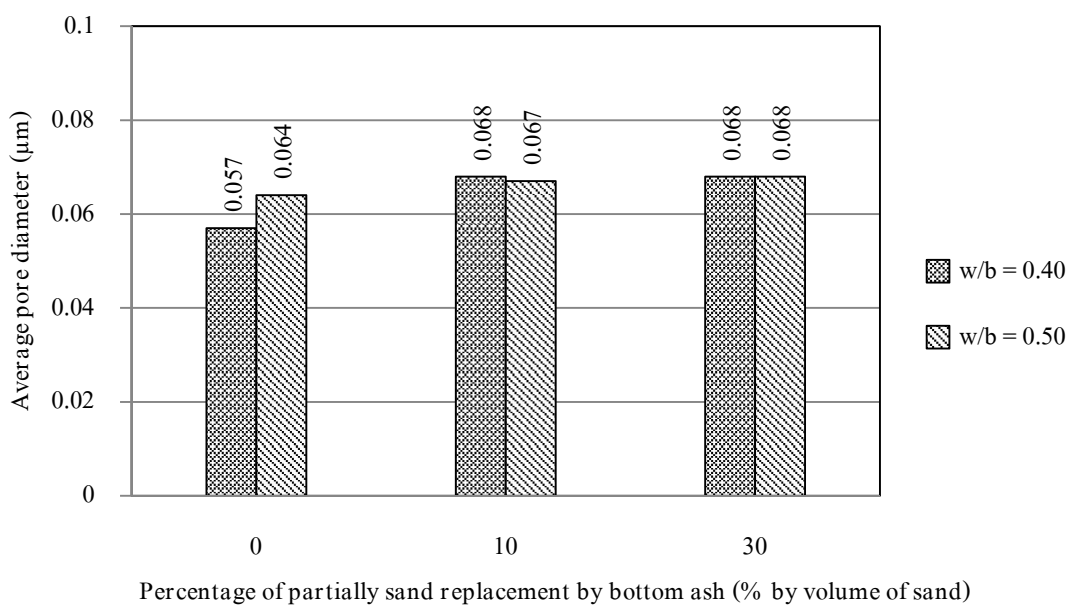
กันเตาในปริมาณที่มากขึ้น และสอดคล้องกันทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 แต่สำหรับการทดสอบความพรุนด้วยวิธี MIP จะเห็นว่าในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตมีความพรุนลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น แต่คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตมีความพรุนมากกว่าคอนกรีตทั่วไปเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 30 พบว่าคอนกรีตมีแนวโน้มของความพรุนลดลง ซึ่งจากการทดสอบความพรุนด้วยวิธี MIP แนวโน้มระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และ 0.50 ไม่สอดคล้องกัน และการที่ใช้วัสดุที่มีความพรุนสูงเป็นมวลรวมในคอนกรีตควรจะทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น แต่การทดสอบ MIP กลับพบว่าคอนกรีตมีความพรุนลดลงเมื่อแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากการทดสอบความพรุนด้วยวิธี MIP ต้องเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเล็กเพียง 1 x 1 x 1.5 ซม. เท่านั้น การเตรียมตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงไม่สามารถเป็นตัวแทนคอนกรีตได้ทั้งหมด เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีการกระจายตัวของเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อมีการตัดคอนกรีตเพื่อทดสอบ MIP อาจจะทำให้มีการตัดโดนมวลรวมหยาบมาในก้อนตัวอย่างด้วย จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของความพรุนของก้อนตัวอย่างในการทดสอบลดลง สรุปได้ว่าการวิเคราะห์ความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642 ให้ผลการทดสอบที่เป็นตัวแทนของคอนกรีตได้ดีกว่าการทดสอบแบบ MIP และการวิเคราะห์ผลในการงานวิจัยคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายครั้งนี้ จะยึดผลการทดสอบความพรุนด้วยวิธี ASTM C 642 เป็นหลัก แต่ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยจะใช้ผลการทดสอบ MIP ในการวิเคราะห์ผล

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเป็นภาพที่ 4-28 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตจะมีความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา เนื่องจากเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงเมื่อถูกใช้แทนที่ทรายในคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเป็นร้อยละ 10 และ 30 ทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.0 และ 31.9 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเป็นร้อยละ 10 และ 30 ทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 24.7 และ 33.4 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

จากการทดสอบขนาดโพรงภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเป็นภาพที่ 4-29 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา ทำให้ขนาดโพรงภายในเฉลี่ยใหญ่ขึ้น โดยที่ขนาดของโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเป็นร้อยละ 10 และ 30 มีขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เนื่องจากเถ้าก้นเตาที่มีความพรุนสูง ขนาดโพรงช่องว่างภายในอนุภาคใหญ่ เมื่อถูกนำมาแทนที่ทรายที่มีความหยาบสูงและขนาดโพรงภายในอนุภาคเล็ก จึงทำให้คอนกรีตมีขนาดโพรงภายในเฉลี่ยใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4-28 ร้อยละของความพรุนของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย



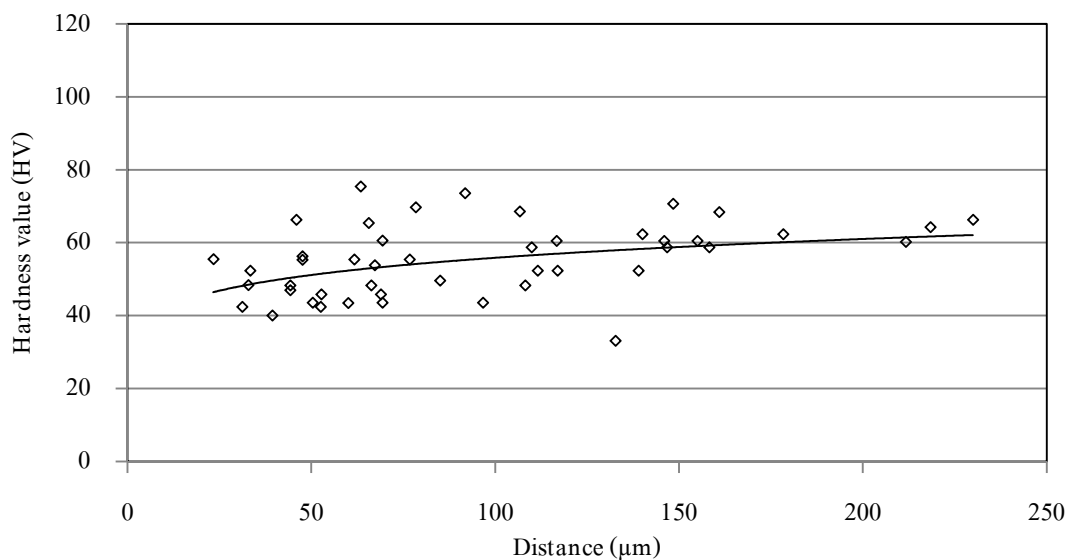
ภาพที่ 4-29 ขนาดโพรงช่องว่างเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

จากผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม กำลังอัด ความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างภายในของคอนกรีตจะเห็นว่าไม่มีความสอดคล้องกัน

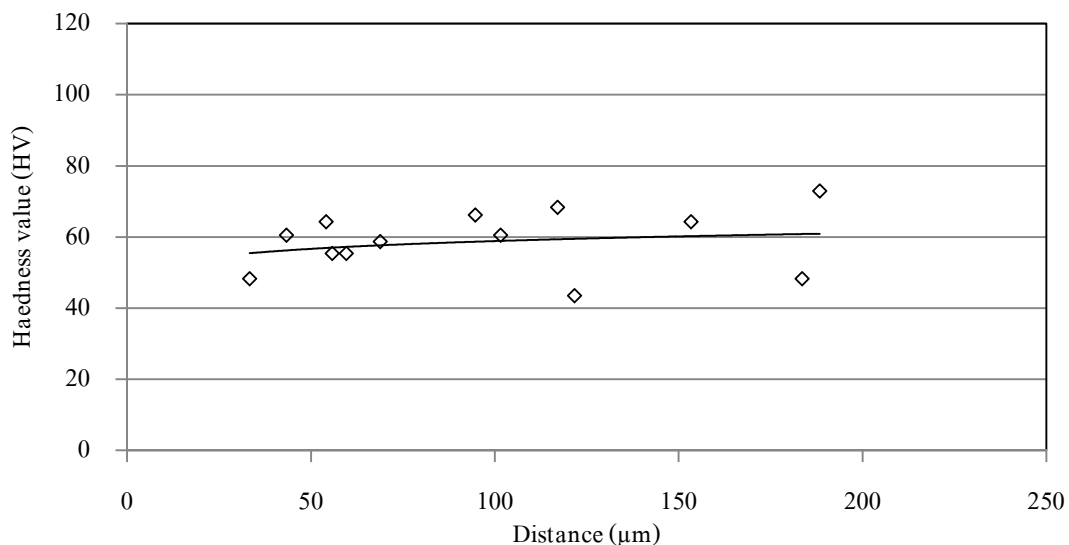
กล่าวคือ โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่ดี ควรจะมีกำลังอัดสูง ความพรุนต่ำ และขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยเล็ก แต่สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายบางส่วน คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยใหญ่ขึ้น เมื่อแทนที่ทรายด้วยเถ้ากั้นเตาในปริมาณมากขึ้น แต่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์กลับดีขึ้น และกำลังอัดคอนกรีตก็มากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 แต่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30

ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อ Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต

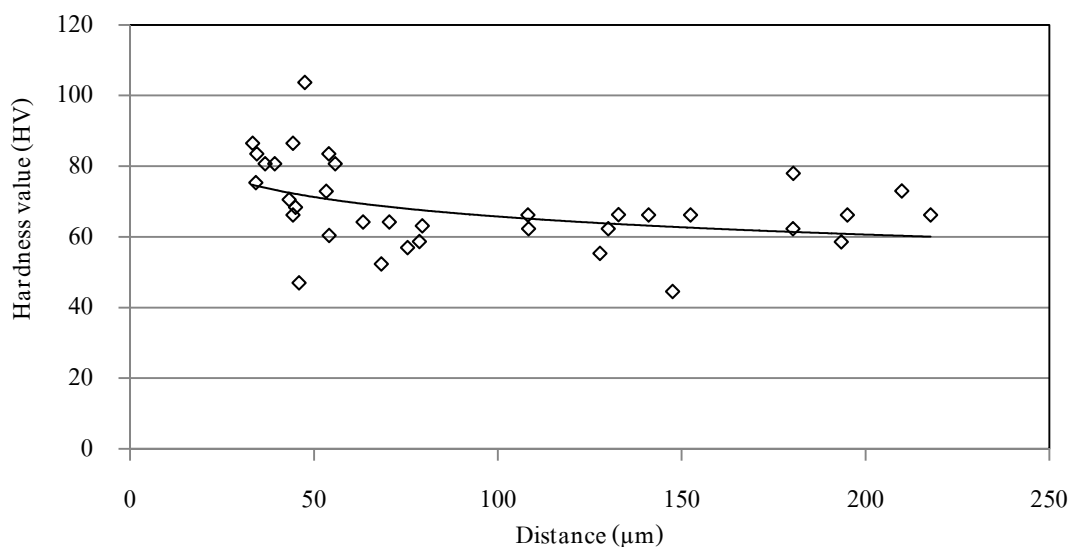
จากผลการทดสอบ Micro hardness ของเพสต์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีต I40 และ I40BA10 พบว่าซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคทรายมีความแข็งแรงน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ไกลออกไป แต่ซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคเถ้ากั้นเตามีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ดังภาพที่ 4-30, 4-31 และ 4-32



ภาพที่ 4-30 ค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคทรายในคอนกรีต I40



ภาพที่ 4-31 ค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพชรอบอนุภาคทรายในคอนกรีต I40BA10

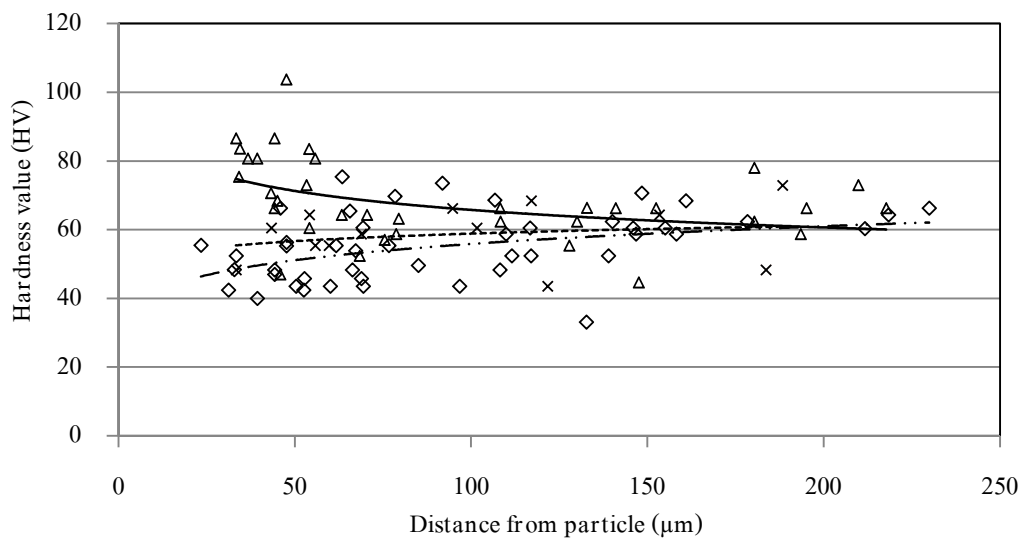


ภาพที่ 4-32 ค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพชรอบอนุภาคเถ้าก้นเตาในคอนกรีตส่วนผสม I40BA10

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของซีเมนต์เพชรอบอนุภาคเถ้าก้นเตากับความแข็งแรงของซีเมนต์เพชรอบอนุภาคทรายพบว่า ซีเมนต์เพชรอบอนุภาคเถ้าก้นเตามีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพชรอบอนุภาคทรายดังภาพที่ 4-33 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussain (2011) เนื่องจากเถ้าก้นเตามีอนุภาคของเถ้าลอยอยู่ภายในจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และความสามารถใน

การกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาทำให้มีความชื้นอยู่ภายในช่วยในการบ่มคอนกรีตจากภายใน อีกทั้งอนุภาคเถ้าก้นเตามีความขรุขระมากกว่าอนุภาคทรายทำให้เกิดการยึดเกาะได้ดี ดังนั้นจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์บริเวณที่รอบอนุภาคเถ้าก้นเตานั้นมีความแข็งแรงกว่าบริเวณอื่น

ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์บริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคของเถ้าก้นเตาจึงมีความทึบน้ำและแข็งแรง โพรงของ Transition zone ที่เป็นช่องทางให้คลอไรด์แทรกซึมผ่านเข้าสู่ภายในคอนกรีตจึงมีน้อยลง ทำให้ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตมีปริมาณน้อยลง เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น



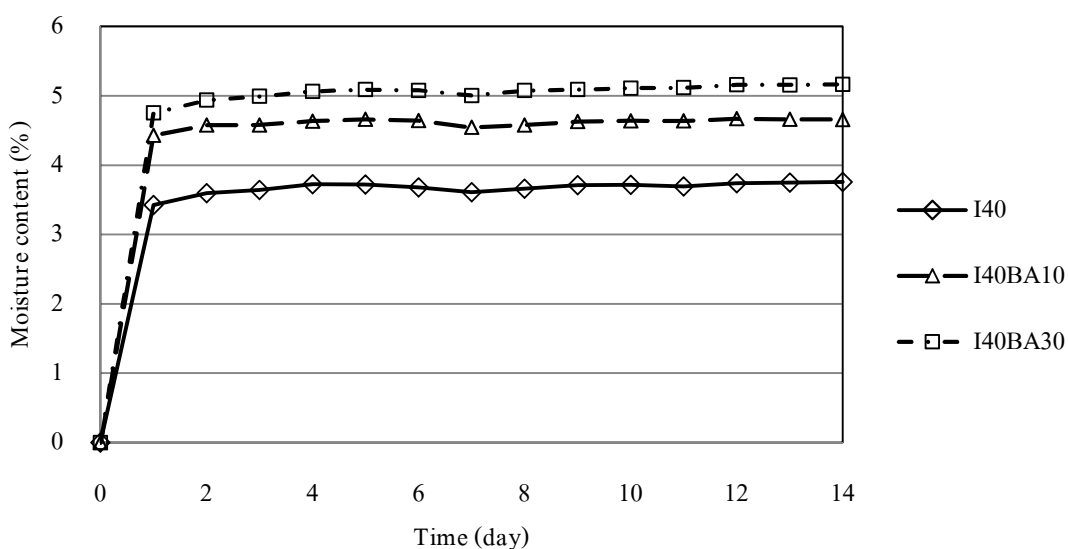
- △ Cement paste around bottom ash particle in I40BA10
- ◇ Cement paste around sand particle in I40
- × Cement paste around sand particle in I40BA10
- Cement paste around bottom ash particle in I40BA10
- . . . Cement paste around sand particle in I40
- - - - - Cement paste around sand particle in I40BA10

ภาพที่ 4-33 แนวโน้มของค่า Micro hardness ของซีเมนต์เพสต์บริเวณรอบอนุภาคมวลรวมละเอียดที่เป็นทรายและเถ้าก้นเตาในคอนกรีต I40 และ I40BA10

และด้วยเถ้าก้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และช่วยในการบ่มภายในคอนกรีตได้ เมื่อมีอนุภาคของเถ้าก้นเตากระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีต จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น

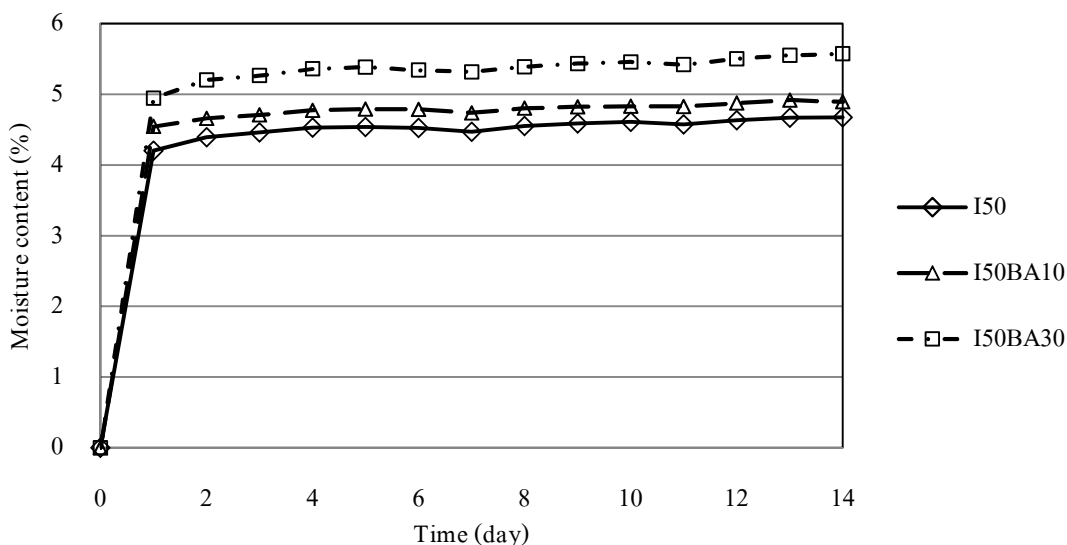
จากความแข็งแรงซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคเถ้ากั้นเตา แต่เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-28 และขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ดังภาพที่ 4-29 จนเกินกว่าที่ซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคเถ้ากั้นเตาที่ถูกปรับปรุงให้มีความแข็งแรงมาก จะสร้างความแข็งแรงให้คอนกรีตได้มากพอ ดังนั้นคอนกรีตจึงมีกำลังอัดที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่มากกว่าร้อยละ 30

ผลกระทบของเถ้ากั้นเตาต่อการเก็บกักความชื้นของคอนกรีตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ผลการทดสอบการกักเก็บความชื้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งในห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 4-34



ก. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

ภาพที่ 4-34 ความชื้นที่ถูกกักเก็บสะสมในคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

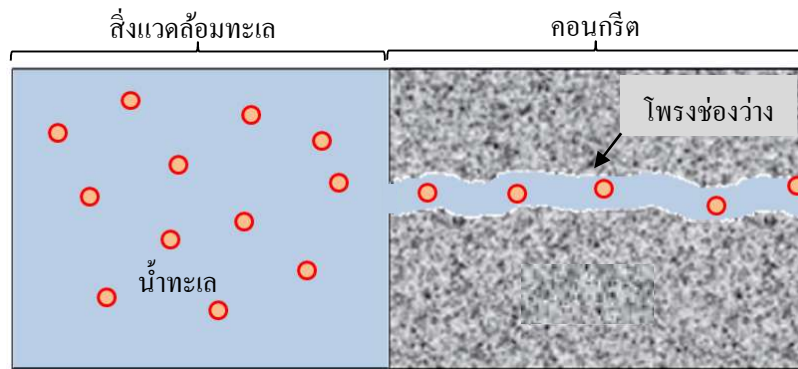


ข. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

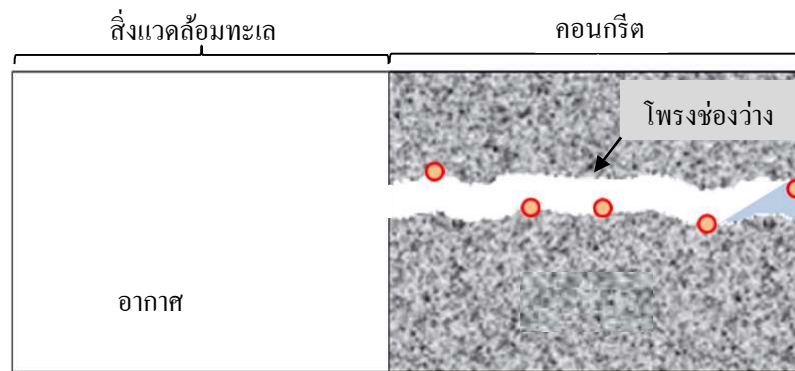
ภาพที่ 4-34 (ต่อ)

จากผลการทดสอบการเก็บกักความชื้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จะเห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายสามารถเก็บกักความชื้นไว้ในคอนกรีตได้มากขึ้น เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่มากขึ้น และแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 และ 1 ตามลำดับ และด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เมื่อคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้ง คอนกรีตสามารถเก็บกักความชื้นไว้ในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่สภาวะแห้ง โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตก็ยังมีน้ำอยู่ภายใน ดังนั้นการแทรกซึมคลอไรด์ด้วยการดึงดูดแคปพิลลารี (Capillary suction) จึงเกิดขึ้นได้น้อย กล่าวคือ การดึงดูดคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการดึงดูดแคปพิลลารี เกิดขึ้นจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งโดยกระบวนการดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำขึ้น น้ำทะเลจะแทรกซึมเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตจนเต็ม และเมื่อน้ำลงน้ำทะเลในโพรงจะไหลออกและมีบางส่วนระเหยออกจากโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้เกิดการตกลึกเกลือคลอไรด์ทิ้งไว้ในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และเมื่อน้ำขึ้นอีกครั้งน้ำทะเลก็จะแทรกซึมเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตอีกครั้ง และดันผลึกเกลือคลอไรด์ในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตเข้าไปลึกกว่าเดิม ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะที่มีความรุนแรงมาก ดังภาพที่ 4-35

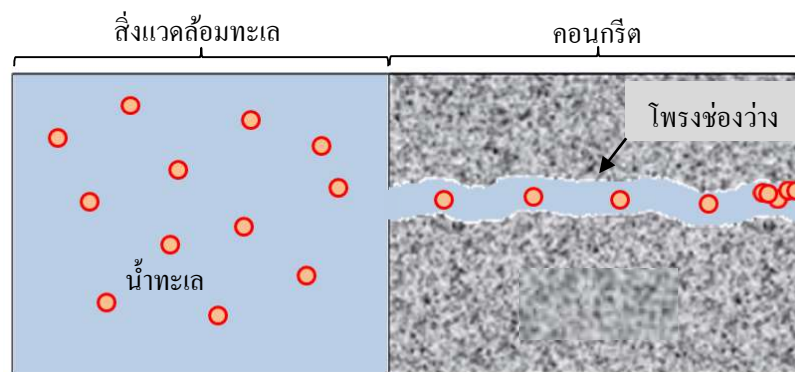
แต่เมื่อคอนกรีตที่ใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทรายเผชิญสภาพแวดล้อมน้ำขึ้นน้ำลง เมื่อน้ำขึ้นน้ำทะเลจะแทรกซึมเข้าไปในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และอนุภาคเถ้ากันเตาจะเก็บกักความชื้นไว้ภายในโพรงช่องว่างของอนุภาคเถ้ากันเตา และเมื่อน้ำลงน้ำในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตจะไหลหรือระเหยออกไม่มากนักจากความสามารถกักเก็บความชื้นของเถ้ากันเตา ทำให้โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตยังมีความชื้นอยู่การเกิดผลึกเกลือคลอไรด์จึงเกิดขึ้นได้น้อย และเมื่อน้ำขึ้นอีกครั้งน้ำทะเลจากภายนอกก็ไม่สามารถไหลเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ เพราะโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตยังเต็มไปด้วยน้ำค้างภาพที่ 4-36 ดังนั้นการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีดึงดูดแคปพิลลารีจึงเกิดช้าลง และด้วยตัวอย่างเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงเป็นระยะเวลาถึง 2 ปี จึงทำให้เห็นความแตกต่างของความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทรายได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป



ก. น้ำทะเลแทรกซึมเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีต



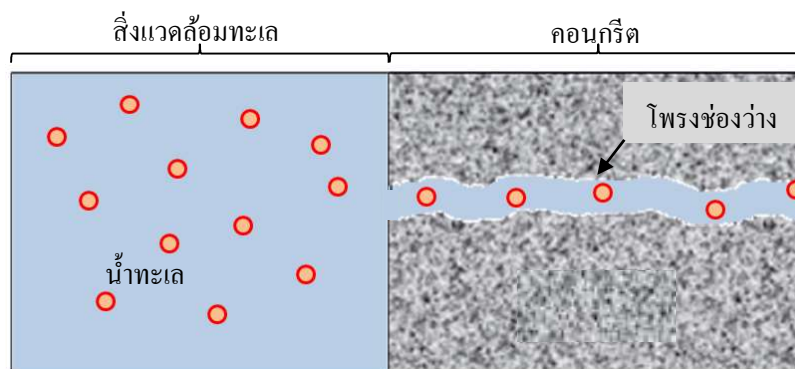
ข. น้ำทะเลไหลและระเหยออกจากโพรงช่องว่างและเกิดการตกตะกอนของเกลือคลอไรด์ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต



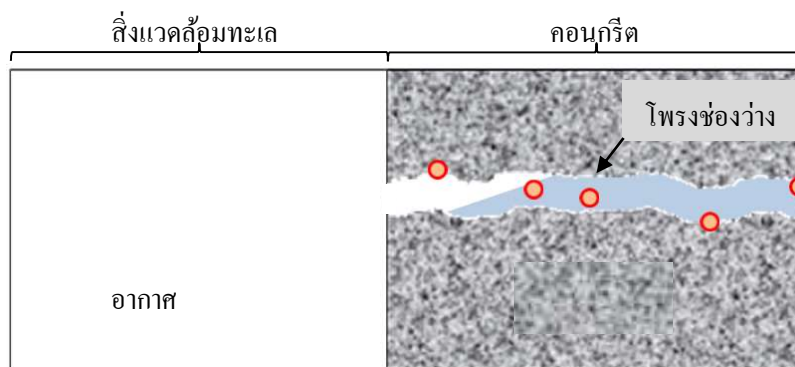
● คลอไรด์ไอออน

ค. เมื่อน้ำขึ้นน้ำทะเลจะดันเกลือคลอไรด์เข้าไปในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต และพาคลอไรด์ไอออนเข้ามาเพิ่มเติม

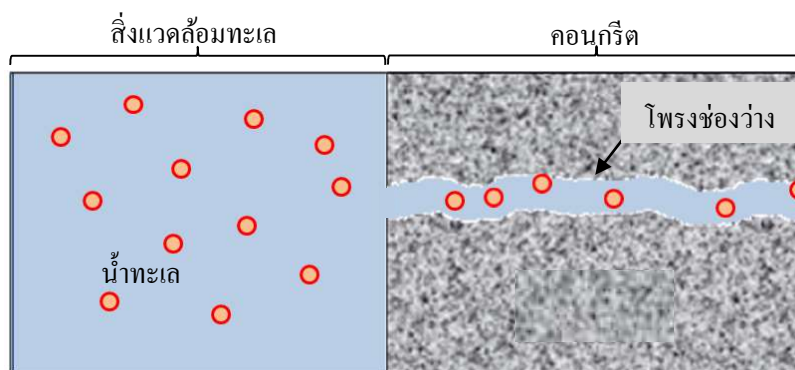
ภาพที่ 4-35 กลไกการดึงดูดคลอไรด์ด้วยวิธีแคปพิลารีของคอนกรีตทั่วไป



ก. เมื่อน้ำขึ้นน้ำทะเลแทรกซึมเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีต



ข. เมื่อน้ำลงน้ำในโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตไหลและระเหยออกจากโพรงได้น้อย



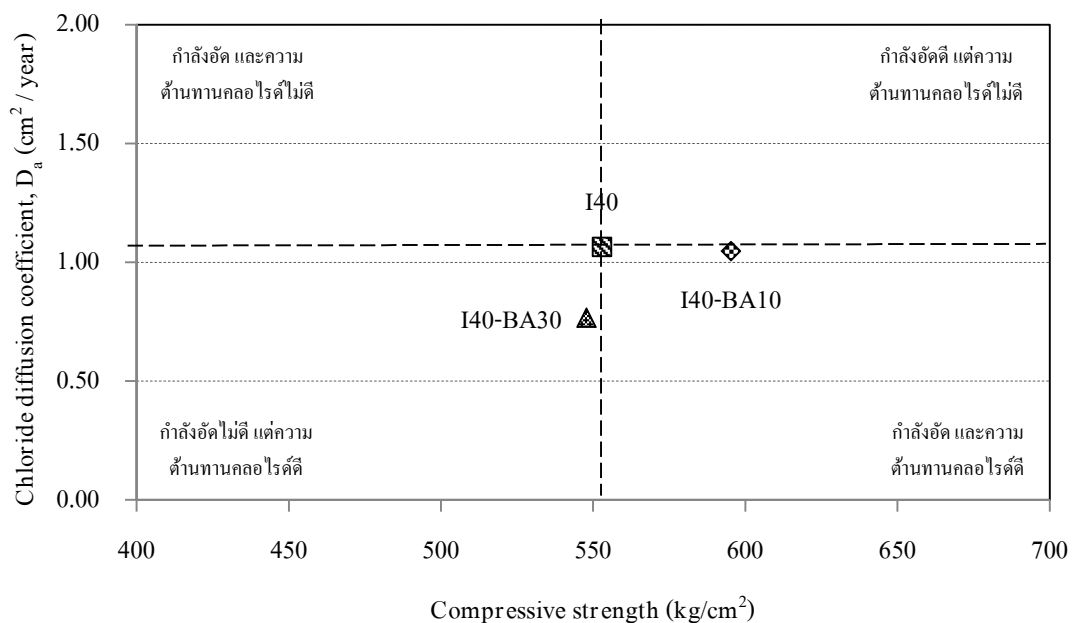
● คลอไรด์ไอออน

ค. เมื่อน้ำขึ้นอีกครั้งน้ำทะเลสามารถไหลเข้าสู่โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้น้อย

ภาพที่ 4-36 กลไกการดึงดูดคลอไรด์ด้วยวิธีแคปพิลลารีของคอนกรีตที่ใช้แฉกกันแทนแทนที่ทราย

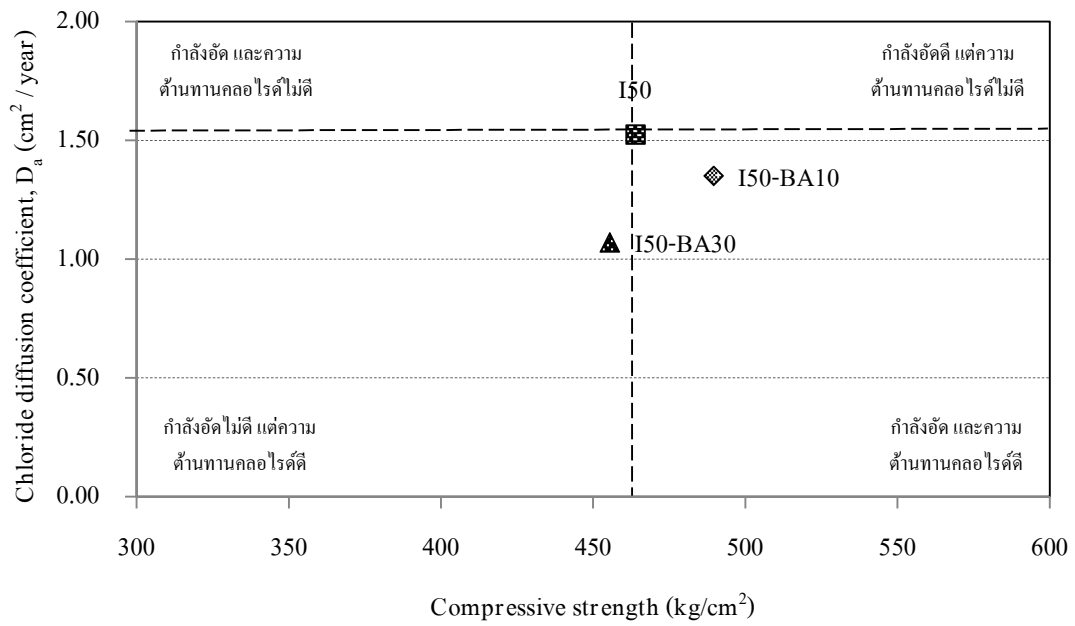
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้
 ใ้แก่กันเตาแทนที่ทรายบางส่วน

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้
 ใ้แก่กันเตาแทนที่ทรายทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ดังภาพที่ 4-37 และ 4-38
 จะเห็นได้ว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมในการนำไปใช้ที่สุด ที่มีทั้งคุณสมบัติด้านกำลังอัด
 และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี คือ คอนกรีตที่แทนที่ใ้แก่กันเตาแทนที่ทรายในปริมาณ
 การแทนที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรทราย



ก.

ภาพที่ 4-37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้
 ใ้แก่กันเตาแทนที่ทรายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ภาพที่ 4-38 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้
 ใ้กั้นเตาแทนที่ทรายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

บทที่ 5

สรุปผล

สรุปผล

ผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต กำลังอัด ความพรุน และขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้แก้วแทนที่บางส่วน of ทนภายใต้งดแวดล้อมทะเลจริงเป็นระยะเวลา 2 ปี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุดเมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

2. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

3. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสูงที่สุดเมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และต่ำเล็กน้อยเมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

4. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมีขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อเหล็กกล้าและความพรุนของน้อยลง เมื่อใช้ปริมาณซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานมากขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟุ่ม และการเติมเต็มโพรงช่องว่างของอนุภาคซิลิกาฟุ่ม นอกจากนี้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน ขึ้นกับขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อและความพรุนของคอนกรีต เมื่อขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อเหล็กกล้าและความพรุนน้อยลงส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

5. คุณสมบัติความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มากกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องมาจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงทำให้มีน้ำอิสระเหลือในคอนกรีตมากส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างภายในมากขึ้น ทั้งนี้ตาม มยพ.1332-50

และ มยพ. 1332 – 55 กำหนดไว้ว่าคอนกรีตที่ใช้สำหรับ โครงสร้างที่เผชิญสภาพแวดล้อมทะเลควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.45

6. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานจนถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลได้ เมื่อพิจารณาในด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลัั้งอัด

7. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตามากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีความสามารถในการกักเก็บความชื้นไว้ได้มาก ส่งผลดีต่อการบ่มภายในเนื้อคอนกรีตได้ทั่วถึง นอกจากนี้การเก็บกักน้ำภายในทำให้เกิดการดึงดูดคลอไรด์ด้วยแคปพิลลารีเกิดขึ้นได้น้อยลงเมื่อเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งในสิ่งแวดล้อมทะเลอีกด้วย

8. คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

9. กำลัั้งอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรทรายเป็นค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ต่ำกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตรทราย การเพิ่มขึ้นของกำลัั้งอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายนี้อาจมาจากกำลัั้งของซีเมนต์เพสต์รอบอนุภาคของเถ้าก้นเตาเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลจากการบ่มภายในของคอนกรีตเนื่องจากความชื้นที่อนุภาคเถ้าก้นเตากักไว้ และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยในอนุภาคเถ้าก้นเตา

10. ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตามากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเถ้าก้นเตามีลักษณะพรุน จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น และมีขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยใหญ่ขึ้น

11. ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลมากที่สุด คือ ร้อยละ 10 โดยปริมาตรทรายเมื่อพิจารณาทั้งความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลัั้งอัดที่ดี

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อในอนาคตได้มีดังนี้

1. ควรทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดรวมกัน เนื่องจากผลการศึกษาพบว่าทั้งซิลิกาฟูมและเถ้าก้นเตาสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตในด้านความต้านทานการแทรกซึม

คลอไรด์และกำถั่งอัคให้ดีขึ้น แต่ต้องมีการตรวจสอบผลกระทบทหากมีการใช้ร่วมกับในส่วนผสมคอนกรีตด้วย

2. ควรทำการศึกษาในระยะเวลาการเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลมากขึ้น เนื่องจากการศึกษาในระยะเวลาที่นานจะทำให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ถูกปรับเปลี่ยนด้วยวัสดุที่ผสมเพิ่มในคอนกรีตได้ชัดเจนขึ้น และควรทำการศึกษาการเกิดสนิมเหล็กโดยใช้เหล็กเสริมแบบข้ออ้อย (DB) เนื่องจากเป็นเหล็กที่ใช้ในงานก่อสร้างมากกว่าเหล็กกลม (RB)

3. ควรศึกษาถึงพฤติกรรมของการเก็บกักความชื้นของอนุภาคเถ้ากั้นเตาที่ช่วยลดการคั้งคุดคลอไรด์ด้วยโพรงแคปพิลลารีให้สามารถอธิบายผลชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อคอนกรีตเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งในสิ่งแวดล้อมทะเล

4. ควรมีการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสามารถจำลองปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน และใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายที่เผชิญสภาพแวดล้อมทะเลจริง

บรรณานุกรม

- กรรกริรมย์ ศรีสุธรรม และพินดา ปรีชานุพันธ์. (2556). **ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสม
ซิลิกาฟูม**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). **มยผ.1332-50 มาตรฐานงานคอนกรีตและเมื่อพิจารณา
ความคงทนและอายุการใช้งาน**. กระทรวงมหาดไทย.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. (2543).
ความคงทนคอนกรีต. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2540). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: คอนกรีตผสมซีแพค.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2550). **ซิลิกาฟูม**. วารสารคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
ณัฐพล วงษ์वार, ทวีชัย สำราญวานิช, สนธยา ทองอรุณศรี และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2557).
**การแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าลอย
และคอนกรีตปูนซีเมนต์สแลคที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี**. การประชุม
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19: ขอนแก่น.
- ทฤษฎี อีสริยฤทธานนท์. (2546). **กำลังอัด ความต้านทานการขัดสี และความทนทานต่อคลอไรด์
ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียด**. วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2550). **เอกสารประกอบการสอนวิชาคอนกรีตเทคโนโลยี**. ชลบุรี: ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- นพรัตน์ มณีวงศ์จิตร และวีระ หอสกุลไทย. (2550). **ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์
และความต้านทานเชิงไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา**. วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา.) 7(3), 52-59.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจาตุรพิทักษ์กุล. (2547). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**.
สมาคมคอนกรีตไทย.
- ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์, ทวีช พูลเงิน และสมชาย ชูชีพสกุล. (2554). **กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาค
ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา**. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า
ธนบุรี ฉบับที่ 3 ปีที่ 34. 231-244.

อุดมพร กุลมงคล. (2556). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

Ali, D., Reza, R., Babak A. & Mohammad, S. (2013). Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite.

Construction and Building Materials 49, 393-399.

Andrade, L.B., Rocha, J.C. & Cheruif, M. (2008). Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. **Construction and Building Materials** 23, 609–614

Andraso, C., Andrade, C., Castillote, M., & Castro, P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, 30(7), 1047-1055.

Ann, K. Y., & Song, H. W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete.

Corrosion Science, 49(11), 4113-4133

Aramraks, T. (2006). Experimental study of concrete mix with bottom ash as fine aggregate in Thailand. In Symposium on Infrastructure Development and the Environment, **Cement and Concrete Research**, 23(2), 609-614.

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.

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. (2000). **ASTM C1327 Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics**. American Society for Testing and Materials.

Annual Book of ASTM Standards. (2013). **ASTM C33 / C33M-13, 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. (2008). **ASTM C618-08a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Annual Book of ASTM Standards. (2000). **ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. American Society for Testing and Materials.
- Berkely KGC & Pathmanaban S. (1990). **Cathodic protection of reinforcement steel in concrete**. London: Butterworths & Co. Ltd.
- 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.
- Cherief, M., Rocha, J.C. & Pera, J. (1999). Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. **Cement and Concrete Research, 29(9)**, 1387-1391.
- Hussain K., Choktaweekarn, P. & Tangtermsirikul S. (2011). Effect of bottom ash on curing sensitivity of concrete. **Annual Concrete Conference 7** (p.MAT151-MAT156), Rayong: Thailand.
- Hussain K. (2011). **Development of a Minimum Curing Concrete by Internal Curing Process**. Civil Engineering Thesis Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University.
- 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 Building Materials**. Volume 21.
- Konstantinos G. Trezos, Ioannis P. Sfikas & Konstantinos O. (2014). Bond of self-compacting concrete incorporating silica fume: Top-bar effect, effects of rebar distance from casting point and of rebar-to-concrete relative displacements during setting. **Construction and Building Materials 73**, 378-390.
- Leung H. Y., Kim J., Jayaprakash J. & Anwar M.P. (2016). Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials 113**, 369-375.

- Mahdi V., Farhad P., Mohammad S., Sara K. & Masoud M. (2013). In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. **Construction and Building Materials** **46**, 63-70.
- Manrea M., Vannesland, Q. & Bertolini, L. (2007). Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. **Corrosion Science**, **50**(2), 554-560.
- Mustafa S. (2013). Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. **Construction and Building Materials** **49**, 484-489.
- Navneet C., Rafat S. & Anita R. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume. **Construction and Building Materials** **37**, 645-651.
- Ping D., Shui Z., Wei C. & Chunhua S. (2013). Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials** **44**, 1-6.
- Poulsen, E. & Mejlbro, L. (2006). **Diffusion of chloride in concrete**. 1st Edition, Taylor & Francis, England.
- Shehata, M. H., Thomas, M. D. A. & Bleszynski, R. E. (1999). The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrate cement paste. **Cement and Concrete Research** **29**, 1915-1920.
- Tanaka K. & Kurumisawa K. (2002). Development of technique for observing pores in hardened cement paste. **Cem Concr Res**; **32**(9):1435-41.
- Thomas M. (1996). Chloride threshold in marine concrete. **Cement and Concrete Research** **26**(4), 513-519.
- Vili L., Ivan R., Ognyan P., Yana T. & Plamen S. (2014). Long term study of hardened cement pastes containing silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials** **60**, 48-56.
- Zemei W., Caijun S. & Khayat K. H. (2016). Effect of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). **Cement and Concrete Composites**.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ปริมาณคลอรีนในคอนกรีต

ตารางภาพผนวก ก-1 ผลการทดสอบปริมาณคลอรีนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

ชนิด ปูนที่	Chloride content (% by wt. of binder)																	
	I40			I40-BA10			I40-BA30			I40-SF5			I40-SF10			I40-SF15		
	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed
0	4.26	3.96	0.30	3.70	2.56	1.13	4.35	4.11	0.23	4.19	2.93	1.26	4.24	4.00	0.24	4.17	4.05	0.12
0-1	4.20	2.22	1.98	4.17	4.05	0.12	4.11	3.93	0.18	3.95	3.77	0.18	3.28	2.75	0.54	3.10	2.92	0.18
1-2	2.40	0.78	1.62	2.15	1.79	0.36	2.00	1.47	0.53	1.80	1.56	0.24	1.73	1.37	0.36	1.55	1.31	0.24
2-3	1.08	0.30	0.78	1.19	0.89	0.30	0.76	0.70	0.06	0.84	0.60	0.24	0.54	0.42	0.12	0.48	0.42	0.06
3-4	0.48	0.00	0.48	0.54	0.36	0.18	0.35	0.23	0.12	0.60	0.24	0.36	0.18	0.60	0.42	0.18	0.18	0.00
4-5	0.30	0.00	0.30	0.18	0.12	0.06	0.23	0.23	0.00	0.18	0.06	0.12	0.18	0.06	0.12	0.18	0.06	0.12
5-6	0.18	0.00	0.18	0.12	0.06	0.06	0.18	0.06	0.12	0.06	0.00	0.06	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00
6-7	0.18	0.00	0.18	0.12	0.00	0.12	0.18	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00
7-8	0.18	0.00	0.18	0.12	0.00	0.12	0.18	0.06	0.12	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00
8-9	0.18	0.00	0.18	0.06	0.00	0.06	0.18	0.06	0.12	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00
9-10	0.12	0.00	0.12	0.12	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลการทดสอบปริมาณคลอรีนในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

ชั้นที่ (ซม.)	Chloride content (% by wt. of binder)																	
	I50		I50-BA10		I50-BA30		I50-SF5		I50-SF10		I50-SF15							
	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed	Total	Free	Fixed						
0	4.08	2.45	1.63	4.29	2.90	1.39	3.14	2.57	0.57	4.07	3.26	0.81	4.00	3.37	0.64	3.06	2.08	0.98
0-1	4.03	2.92	1.11	3.54	2.49	1.04	4.00	3.43	0.57	4.25	2.91	1.34	4.00	3.60	0.41	3.70	2.83	0.87
1-2	2.68	1.40	1.28	2.38	1.22	1.16	2.11	1.71	0.40	2.09	1.11	0.99	2.15	1.74	0.41	2.20	1.73	0.46
2-3	1.46	0.64	0.82	1.22	0.70	0.52	1.03	1.03	0.00	1.16	0.76	0.41	1.04	0.87	0.17	0.87	0.75	0.12
3-4	0.70	0.47	0.23	0.41	0.23	0.17	0.29	0.17	0.11	0.70	0.41	0.29	0.58	0.35	0.23	0.46	0.40	0.06
4-5	0.29	0.18	0.12	0.23	0.06	0.17	0.17	0.11	0.06	0.35	0.17	0.17	0.23	0.12	0.12	0.29	0.12	0.17
5-6	0.29	0.06	0.23	0.17	0.00	0.17	0.11	0.06	0.06	0.17	0.06	0.12	0.12	0.06	0.06	0.17	0.06	0.12
6-7	0.12	0.00	0.12	0.17	0.00	0.17	0.11	0.00	0.11	0.17	0.06	0.12	0.12	0.00	0.12	0.17	0.06	0.12
7-8	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.23	0.11	0.00	0.11	0.17	0.00	0.17	0.12	0.00	0.12	0.23	0.00	0.23
8-9	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.17	0.06	0.00	0.06	0.17	0.00	0.17	0.12	0.00	0.12	0.17	0.00	0.17
9-10	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.17	0.11	0.00	0.11	0.17	0.00	0.17	0.06	0.00	0.06	0.17	0.00	0.17

ภาคผนวก ข
สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

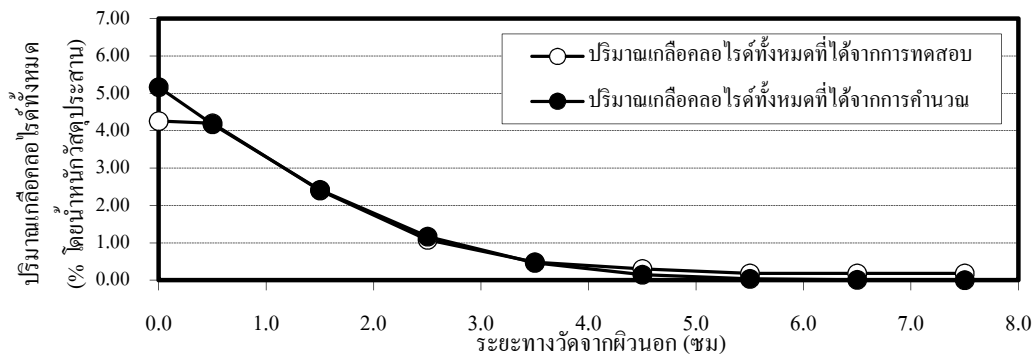
Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix 140 อายุ 2 ปี ใช้น้ำทะเล Total chloride

Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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)		$\sum(C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
					C_{xt}	$C_{xt,Cal}$	
1.06	5.169	0.00	2.00	0.0	4.262	5.169	
				0.5	4.202	4.179	0.00052
				1.5	2.401	2.415	0.00019
				2.5	1.080	1.166	0.00732
				3.5	0.480	0.464	0.00026
				4.5	0.300	0.151	0.02231
				5.5	0.180	0.040	0.01971
				6.5	0.180	0.008	0.02947
				7.5	0.180	0.001	0.03191
							C_s 5.1686
							D_a 1.0641



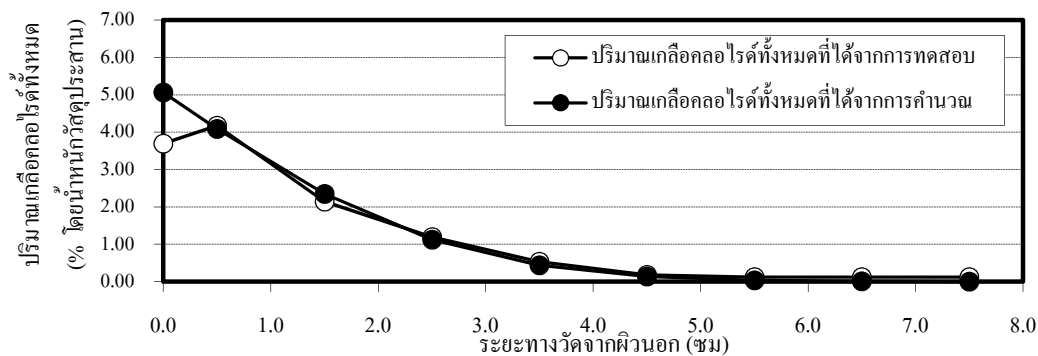
Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix 140BA10 อายุ 2 ปี แฉะในน้ำทะเล Total chloride

Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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)		$\sum(C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
					C_{xt}	$C_{xt,cal}$	
1.05	5.065	0.00	2.00	0.0	3.695	5.065	
				0.5	4.172	4.087	0.00722
				1.5	2.146	2.348	0.04094
				2.5	1.192	1.124	0.00466
				3.5	0.536	0.442	0.00895
				4.5	0.179	0.141	0.00141
				5.5	0.119	0.036	0.00684
				6.5	0.119	0.008	0.01246
				7.5	0.119	0.001	0.01391
							C_s 5.0645
							D_a 1.0471



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

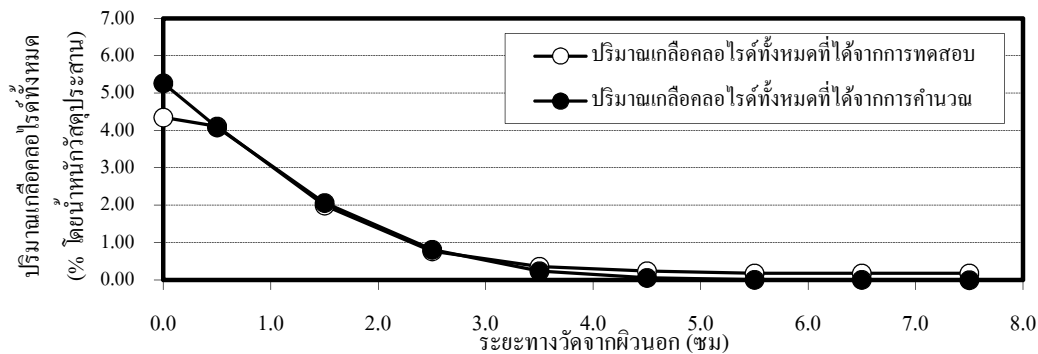
Mix I40BA30 อายุ 2 ปี แข็งหน้าทะเล Total chloride

Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/year)

D_a	C_s	C_i	Exposure time, t	Depth from exposure surface, X	Chloride concentration at depth X		
					(% by wt. of binder)	C_{xt}	$C_{xt,cal}$
(cm ² /year)	(% by wt. of binder)	(% by wt. of binder)	(years)	(cm)	C_{xt}	$C_{xt,Cal}$	$\sum(C_{xt}-C_{xt,cal})^2$
0.77	5.261	0.00	2.00	0.0	4.346	5.261	
				0.5	4.111	4.079	0.00101
				1.5	1.997	2.061	0.00414
				2.5	0.763	0.807	0.00193
				3.5	0.352	0.240	0.01256
				4.5	0.235	0.054	0.03287
				5.5	0.176	0.009	0.02799
				6.5	0.176	0.001	0.03066
				7.5	0.176	0.000	0.03100
							0.14217

C_s 5.2613
 D_a 0.7668



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix 140SF5 อายุ 2 ปี แฉ่น้ำทะเล Total Chloride

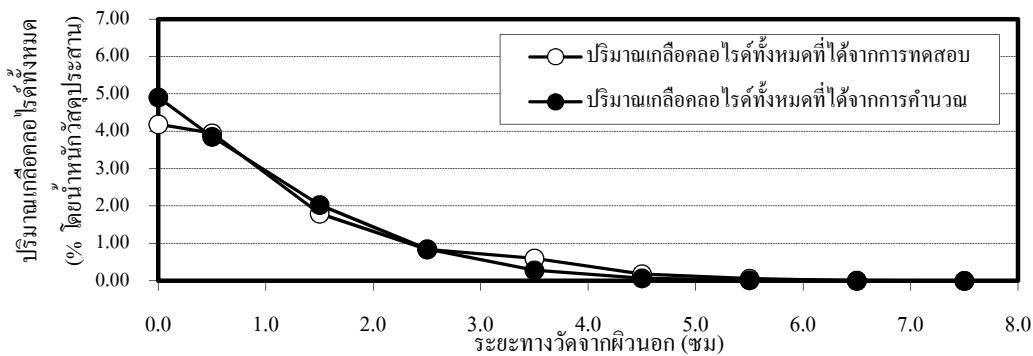
Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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}	$C_{xt \text{ cal}}$	$\sum(C_{xt} - C_{xt \text{ cal}})^2$
				0.0	4.190	4.906	
				0.5	3.950	3.851	0.00974
				1.5	1.796	2.027	0.05367
				2.5	0.838	0.847	0.00008
0.84	4.906	0.00	2.00	3.5	0.599	0.276	0.10412
				4.5	0.180	0.069	0.01219
				5.5	0.060	0.013	0.00217
				6.5	0.000	0.002	0.00000
				7.5	0.000	0.000	0.00000
							C_s 4.9060
							0.18197 D_a 0.8401



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

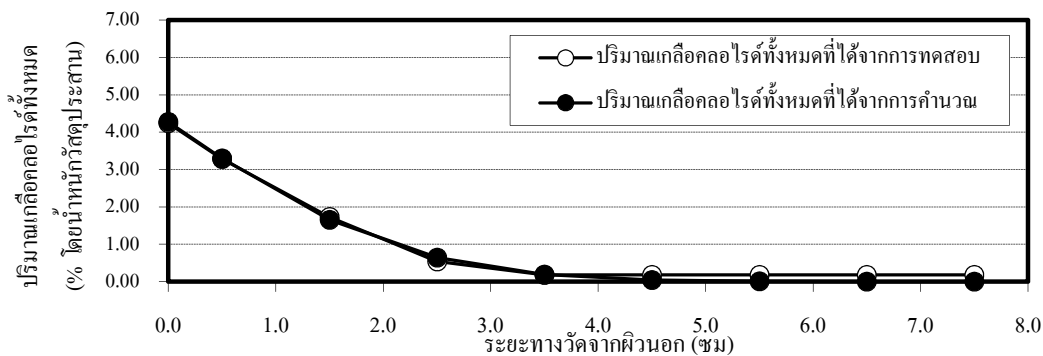
Mix 140SF10 อายุ 2 ปี แข็งในน้ำทะเล Total chloride

Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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)		$\sum(C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
					C_{xt}	$C_{xt, Cal}$	
0.76	4.273	0.01	2.00	0.0	4.239	4.273	
				0.5	3.284	3.302	0.00034
				1.5	1.731	1.657	0.00552
				2.5	0.537	0.642	0.01096
				3.5	0.179	0.188	0.00008
				4.5	0.179	0.041	0.01903
				5.5	0.179	0.007	0.02974
				6.5	0.179	0.001	0.03179
				7.5	0.179	0.000	0.03205

C_s 4.2731
 D_a 0.7556



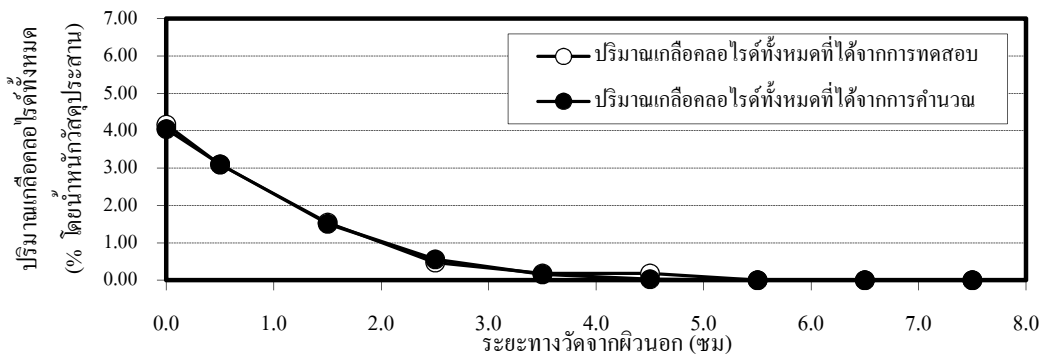
Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix I40SF15 อายุ 2 ปี ใช้งานน้ำทะเล Total chloride

Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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)		$\sum(C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
					C_{xt}	$C_{xt,Cal}$	
0.71	4.044	0.00	2.00	0.0	4.167	4.044	
				0.5	3.095	3.101	0.00004
				1.5	1.548	1.511	0.00134
				2.5	0.476	0.559	0.00679
				3.5	0.179	0.153	0.00064
				4.5	0.179	0.031	0.02185
				5.5	0.000	0.004	0.00002
				6.5	0.000	0.000	0.00000
				7.5	0.000	0.000	0.00000
							C_s 4.0444
							D_a 0.7106



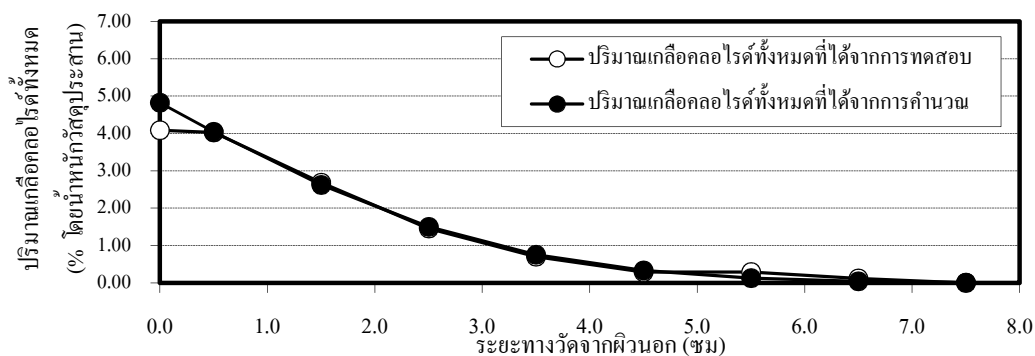
Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix 150 อายุ 2 ปี เชน้ำน้าทะเล Total chloride

Fick's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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)		$\sum(C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
					C_{xt}	$C_{xt,cal}$	
1.52	4.819	0.00	2.00	0.0	4.085	4.819	
				0.5	4.026	4.046	0.00038
				1.5	2.684	2.619	0.00421
				2.5	1.459	1.500	0.00172
				3.5	0.700	0.753	0.00284
				4.5	0.292	0.330	0.00143
				5.5	0.292	0.125	0.02784
				6.5	0.117	0.041	0.00575
				7.5	0.000	0.012	0.00013
							C_s 4.8189
							D_a 1.5243



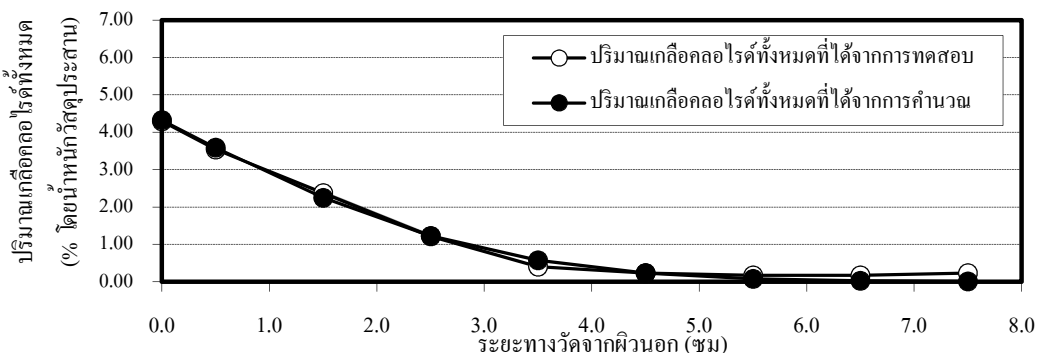
Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix I50BA10 อายุ 2 ปี แข็งน้ำทะเล Total chloride

Fick 's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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)		$\sum(C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
					C_{xt}	$C_{xt,Cal}$	
1.35	4.331	0.00	2.00	0.0	4.290	4.331	
				0.5	3.536	3.593	0.00324
				1.5	2.377	2.247	0.01697
				2.5	1.217	1.222	0.00002
				3.5	0.406	0.572	0.02774
				4.5	0.232	0.229	0.00001
				5.5	0.174	0.078	0.00923
				6.5	0.174	0.022	0.02296
			7.5	0.232	0.005	0.05129	C_s 4.3310
						0.13146	D_a 1.3509



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix I50BA30 อายุ 2 ปี เชื้อในน้ำทะเล Total chloride

Fick 's Second Law :

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

Calculation Input

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

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

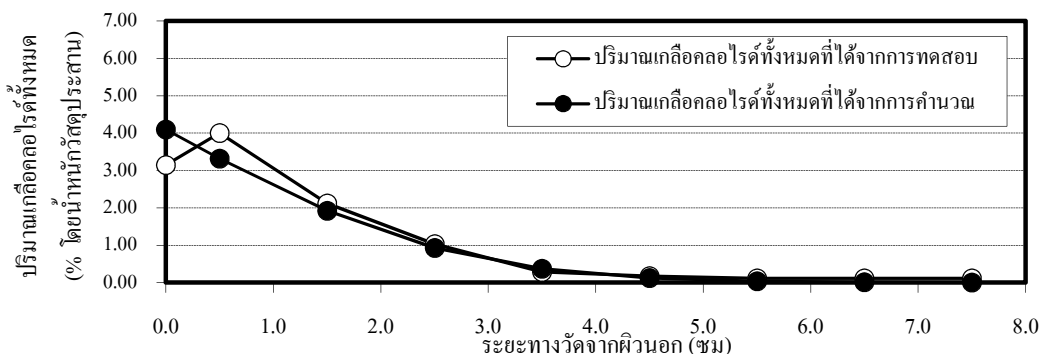
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/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}	$C_{xt \text{ Cal}}$	$\sum(C_{xt} - C_{xt, cal})^2$
1.07	4.100	0.00	2.00	0.0	3.143	4.100	
				0.5	4.001	3.317	0.46717
				1.5	2.115	1.921	0.03765
				2.5	1.029	0.930	0.00970
				3.5	0.286	0.372	0.00741
				4.5	0.171	0.121	0.00250
				5.5	0.114	0.032	0.00674
				6.5	0.114	0.007	0.01154
				7.5	0.114	0.001	0.01280
							C_s 4.1000
							D_a 1.0700
							0.55550



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix I50SF5 อายุ 2 ปี เชื้อในน้ำทะเล Total chloride

Fick 's Second Law :

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

Calculation Input

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

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

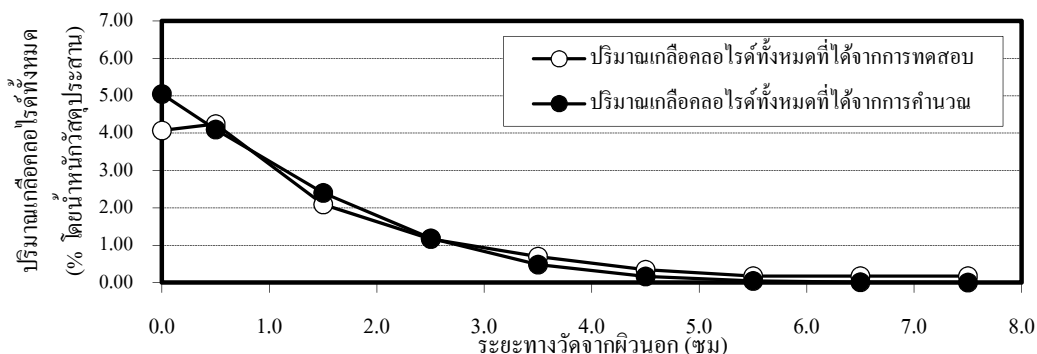
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of binder)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/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}	$C_{xt \text{ Cal}}$	$\sum(C_{xt} - C_{xt, cal})^2$
1.11	5.045	0.00	2.00	0.0	4.072	5.045	
				0.5	4.247	4.097	0.02248
				1.5	2.094	2.400	0.09325
				2.5	1.164	1.183	0.00038
				3.5	0.698	0.484	0.04563
				4.5	0.349	0.163	0.03452
				5.5	0.175	0.045	0.01679
				6.5	0.175	0.010	0.02705
				7.5	0.175	0.002	0.02983
							C_s 5.0450
							D_a 1.1055



Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix I50SF10 อายุ 2 ปี แข็งน้ำทะเล Total chloride

Fick 's Second Law :

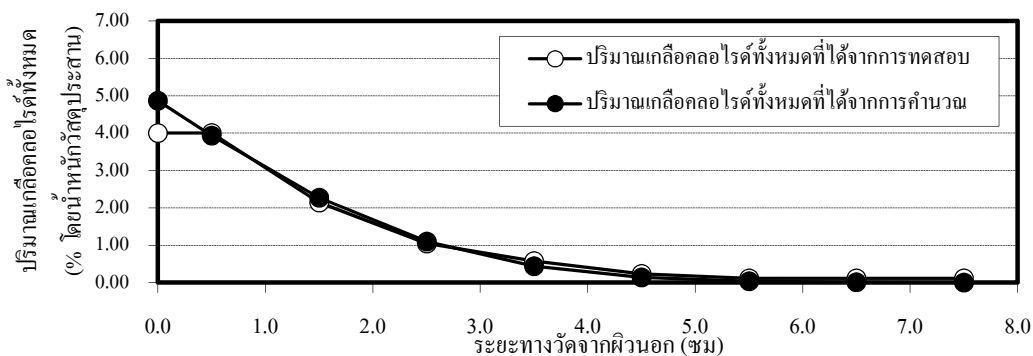
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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}	$C_{xt\text{ Cal}}$	$\sum(C_{xt}-C_{xt,cal})^2$
1.06	4.870	0.00	2.00	0.0	4.004	4.870	
				0.5	4.004	3.936	0.00453
				1.5	2.147	2.273	0.01597
				2.5	1.044	1.097	0.00274
				3.5	0.580	0.436	0.02080
				4.5	0.232	0.141	0.00822
				5.5	0.116	0.037	0.00622
				6.5	0.116	0.008	0.01170
				7.5	0.116	0.001	0.01316
							C_s 4.8696
							D_a 1.0624



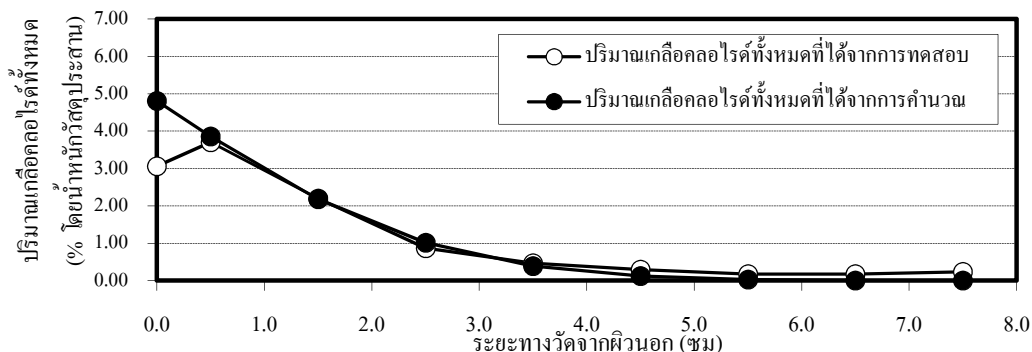
Calculation of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

Mix I50SF15 อายุ 2 ปี แข็งน้ำทะเล Total chloride

Fick 's Second Law :
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation 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 (cm²/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		
					C_{xt} (% by wt.of binder)	$C_{xt\text{Cal}}$	$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$
1.00	4.807	0.00	2.00	0.0	3.065	4.807	
				0.5	3.701	3.859	0.02492
				1.5	2.197	2.180	0.00029
				2.5	0.867	1.017	0.02246
				3.5	0.463	0.386	0.00585
				4.5	0.289	0.118	0.02928
				5.5	0.173	0.029	0.02093
				6.5	0.173	0.006	0.02818
				7.5	0.231	0.001	0.05310
							0.18501



ภาคผนวก ค
พื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่เกิดสนิม
และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิม

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลการทดสอบพื้นที่ผิวการเกิดสนิมและการสูญเสียเหล็กจากสนิม

Mix id.	Rust Area										Weight loss of steel in concrete (%)				
	Covering depth (cm)										Covering depth (cm)				
	1		2		5		7.5		All Area Rust Area %		1	2	5	7.5	
I40	264028	264028	24428	264028	9.25	264028	984	0.37	264028	0	0.00	4.5	0.9	0	0
I40-BA10	264028	130420	49.40	264028	27480	10.41	264028	0	0.00	264028	0	0.00	0.7	0	0
I40-BA30	264028	29075	11.01	264028	38495	14.58	264028	0	0.00	264028	0	0.00	0	0	0
I40-SF5	264028	64946	24.60	264028	13457	5.10	264028	0	0.00	264028	0	0.00	0.6	0.2	0
I40-SF10	264028	135227	51.22	264028	8594	3.25	264028	0	0.00	264028	0	0.00	0.2	0	0
I40-SF15	264028	162694	61.62	264028	2800	1.06	264028	0	0.00	264028	0	0.00	0	0	0
I50	264028	75593	28.63	264028	92467	35.02	264028	747	0.28	264028	0	0.00	5.4	1.1	0
I50-BA10	264028	131484	49.80	264028	34205	12.96	264028	4901	1.86	264028	0	0.00	1.5	1	0
I50-BA30	264028	121985	46.20	264028	46163	17.48	264028	0	0.00	264028	0	0.00	1.2	0.7	0
I50-SF5	264028	166352	63.01	264028	72651	27.52	264028	2061	0.78	264028	0	0.00	5.2	0.9	0
I50-SF10	264028	264028	100.00	264028	126487	47.91	264028	0	0.00	264028	0	0.00	4.8	0.7	0
I50-SF15	264028	264028	100.00	264028	20233	7.66	264028	0	0.00	264028	0	0.00	3.8	0.5	0

ภาคผนวก ง
กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางภาคผนวก ง-1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

<i>Mix id.</i>	อายุ 28 วัน				อายุ 2 ปี			
	<i>Load</i> (kN)	<i>Area</i> (cm ²)	<i>Strength</i> (kg/cm ²)	<i>Average</i> (kg/cm ²)	<i>Load</i> (kN)	<i>Area</i> (cm ²)	<i>Strength</i> (kg/cm ²)	<i>Average</i> (kg/cm ²)
I40	289.74	78.57	375.9	372	86.50	15.91	554.2	553
	283.73		368.1		86.10		551.6	
I40BA10	346.98	78.57	450.2	439	95.60	15.91	612.5	595
	330.30		428.5		90.20		577.9	
I40BA30	269.98	78.57	350.3	347	88.40	15.91	566.4	548
	265.05		343.9		82.60		529.2	
I40SF5	388.08	78.57	503.5	507	95.90	15.91	614.4	632
	392.87		509.7		101.30		649.0	
I40SF10	354.97	78.57	460.5	474	90.60	15.91	580.5	603
	375.85		487.6		97.60		625.3	
I40SF15	315.68	78.57	409.6	413	89.70	15.91	574.7	597
	320.24		415.5		96.70		619.5	

ตารางภาคผนวก ง-1 (ต่อ)

<i>Mix id.</i>	อายุ 28 วัน				อายุ 2 ปี			
	<i>Load</i> (kN)	<i>Area</i> (cm ²)	<i>Strength</i> (kg/cm ²)	<i>Average</i> (kg/cm ²)	<i>Load</i> (kN)	<i>Area</i> (cm ²)	<i>Strength</i> (kg/cm ²)	<i>Average</i> (kg/cm ²)
I50	274.79	78.57	356.5	345	71.50	15.91	458.1	464
	257.68		334.3		73.30		469.6	
I50BA10	293.08	78.57	380.2	387	79.30	15.91	508.1	489
	303.52		393.8		73.50		470.9	
I50BA30	227.00	78.57	294.5	294	74.70	15.91	478.6	456
	225.82		293.0		67.50		432.5	
I50SF5	293.25	78.57	380.5	396	79.80	15.91	511.3	516
	317.64		412.1		81.40		521.5	
I50SF10	299.18	78.57	388.2	388	77.10	15.91	494.0	491
	298.52		387.3		76.10		487.6	
I50SF15	270.14	78.57	350.5	349	72.60	15.91	465.1	482
	267.31		346.8		77.80		498.4	

ภาคผนวก จ

Mercury Intrusion Porosimeter test (MIP)

ตารางภาคผนวก จ-1 ผลการทดสอบขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและความพรุนของคอนกรีต
ด้วยวิธี MIP

Mix id.	Average pore diameter (μm)	Porosity (%)
I40	0.057	13.42
I40BA10	0.068	10.23
I40BA30	0.068	7.74
I40SF5	0.051	7.91
I40SF10	0.047	8.77
I40SF15	0.042	9.89
I50	0.064	8.11
I50BA10	0.067	15.77
I50BA30	0.068	13.02
I50SF5	0.07	14.93
I50SF10	0.057	16.31
I50SF15	0.058	8.84

ภาคผนวก จ
ความพรุนตาม ASTM C642

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM C642

Mix id.	Oven dry weight after drying for 48 hr. (g)	Saturated mass after boiling weight after boil 24 hr. (g)	Immersed apparent mass weighed in the water	Porosity (%)
I40	354.2	367.5	221.3	9.1
I40-BA10	462.8	483.9	287.3	10.7
I40-BA30	367.5	386.6	227.4	12.0
I40-SF5	429.5	444.7	260.8	8.2
I40-SF10	299.3	308.9	185.2	7.7
I40-SF15	436.6	450.6	268.7	7.7
I50	443.5	464.1	276.4	11.0
I50-BA10	320.6	340.2	196.9	13.7
I50-BA30	228.5	243.1	143.3	14.6
I50-SF5	334.5	349.6	209.3	10.8
I50-SF10	236	246	146.9	10.1
I50-SF15	298.3	310.8	184.4	9.9

ภาคผนวก ข

ความชื้นภายในคอนกรีตที่เผชิญสภาวะเปียกสลับแห้ง

ตารางภาคผนวก ข-1 ผลการทดสอบการเก็บกักความชื้นของคอนกรีตที่ใช้ถ้ำกันความชื้นที่บางส่วนของทราย

Mix id.														
Time	I40	I40BA10	I40BA30	I50	I50BA10	I50BA30								
day	wt. (g)	Moisture content (%)	wt. (g)	Moisture content (%)	wt. (g)	Moisture content (%)	wt. (g)	Moisture content (%)	wt. (g)	Moisture content (%)	wt. (g)	Moisture content (%)	wt. (g)	Moisture content (%)
0	2,404.25	0.00	2,338.20	0.00	2,309.06	0.00	2,410.92	0.00	2,374.86	0.00	2,322.03	0.00		
1	2,486.56	3.42	2,441.79	4.43	2,418.82	4.75	2,512.28	4.20	2,482.83	4.55	2,436.88	4.95		
2	2,490.72	3.60	2,445.24	4.58	2,423.07	4.94	2,516.85	4.39	2,485.57	4.66	2,442.88	5.20		
3	2,491.80	3.64	2,445.31	4.58	2,424.40	5.00	2,518.47	4.46	2,486.67	4.71	2,444.33	5.27		
4	2,493.84	3.73	2,446.58	4.64	2,426.05	5.07	2,520.11	4.53	2,488.24	4.77	2,446.51	5.36		
5	2,493.71	3.72	2,447.19	4.66	2,426.63	5.09	2,520.33	4.54	2,488.70	4.79	2,447.11	5.39		
6	2,492.75	3.68	2,446.74	4.64	2,426.33	5.08	2,520.00	4.52	2,488.56	4.79	2,446.10	5.34		
7	2,491.01	3.61	2,444.48	4.55	2,424.64	5.01	2,518.69	4.47	2,487.40	4.74	2,445.52	5.32		
8	2,492.24	3.66	2,445.33	4.58	2,426.28	5.08	2,520.63	4.55	2,488.95	4.80	2,447.20	5.39		
9	2,493.50	3.71	2,446.42	4.63	2,426.62	5.09	2,521.48	4.59	2,489.43	4.82	2,448.28	5.44		
10	2,493.61	3.72	2,446.71	4.64	2,427.07	5.11	2,522.13	4.61	2,489.59	4.83	2,448.76	5.46		
11	2,493.07	3.69	2,446.68	4.64	2,427.26	5.12	2,521.17	4.57	2,489.52	4.83	2,447.87	5.42		
12	2,494.10	3.74	2,447.43	4.67	2,428.23	5.16	2,522.67	4.64	2,490.68	4.88	2,449.81	5.50		
13	2,494.41	3.75	2,447.20	4.66	2,428.18	5.16	2,523.52	4.67	2,491.70	4.92	2,451.00	5.55		
14	2,404.55	2.76	2,447.16	4.66	2,428.40	5.17	2,522.61	4.67	2,491.11	4.90	2,451.48	5.57		

ภาคผนวก ซ
Micro hardness ของมอร์ต้าร์

ตารางภาคผนวก ซ-1 ผลการทดสอบ Micro hardness ของมอร์ต้าร์

<i>Bottom Ash Mix</i>		<i>Bottom Ash Mix</i>		<i>OPC Mix</i>	
<i>Sand patical</i>		<i>Bottom ash patical</i>		<i>Sand patical</i>	
<i>Distance (μm)</i>	<i>HV</i>	<i>Distance (μm)</i>	<i>HV</i>	<i>Distance (μm)</i>	<i>HV</i>
33.34	48.24	33.33	86.54	23.33	55.44
43.33	60.47	34.15	75.39	31.15	42.35
54.10	64.26	34.43	83.56	32.79	48.39
55.74	55.36	36.67	80.69	33.33	52.35
59.62	55.39	39.34	80.72	39.34	40.01
68.85	58.69	43.25	70.60	44.26	46.99
94.67	66.21	44.26	86.54	44.26	48.25
101.61	60.47	44.26	66.26	45.90	66.26
117.06	68.39	45.00	68.39	47.54	55.29
121.67	43.5	45.90	46.99	47.54	56.26
153.33	64.28	47.54	103.71	50.32	43.5
183.61	48.25	53.33	72.96	52.46	42.35
188.33	72.92	54.05	83.52	52.65	45.79
		54.10	60.44	60.00	43.48
		55.74	80.69	61.67	55.39
		63.33	64.26	63.36	75.39
		68.33	52.38	65.57	65.44
		70.49	64.26	66.26	48.25
		75.41	57.01	67.21	53.85
		78.69	58.69	68.85	45.79
		79.48	63.20	69.30	60.6
		108.21	66.26	69.33	43.5
		108.33	62.34	76.67	55.39

ตารางภาคผนวก ซ-1 (ต่อ)

<i>Bottom Ash Mix</i>		<i>Bottom Ash Mix</i>		<i>OPC Mix</i>	
<i>Sand patical</i>		<i>Bottom ash patical</i>		<i>Sand patical</i>	
<i>Distance (μm)</i>	<i>HV</i>	<i>Distance (μm)</i>	<i>HV</i>	<i>Distance (μm)</i>	<i>HV</i>
		<i>127.81</i>	<i>55.39</i>	<i>78.33</i>	<i>69.69</i>
		<i>130.00</i>	<i>62.30</i>	<i>85.00</i>	<i>49.58</i>
		<i>132.79</i>	<i>66.33</i>	<i>91.80</i>	<i>73.56</i>
		<i>140.98</i>	<i>66.26</i>	<i>96.67</i>	<i>43.50</i>
		<i>147.54</i>	<i>44.61</i>	<i>106.67</i>	<i>68.56</i>
		<i>152.41</i>	<i>66.26</i>	<i>108.09</i>	<i>48.29</i>
		<i>180.29</i>	<i>62.30</i>	<i>109.84</i>	<i>58.72</i>
		<i>180.31</i>	<i>78.00</i>	<i>111.48</i>	<i>52.35</i>
		<i>193.44</i>	<i>58.67</i>	<i>116.67</i>	<i>60.51</i>
		<i>195.08</i>	<i>66.23</i>	<i>116.90</i>	<i>52.35</i>
		<i>209.84</i>	<i>73.01</i>	<i>132.68</i>	<i>33.08</i>
		<i>217.70</i>	<i>66.26</i>	<i>138.95</i>	<i>52.35</i>
				<i>140.00</i>	<i>62.34</i>
				<i>145.90</i>	<i>60.44</i>
				<i>146.67</i>	<i>58.69</i>
				<i>148.33</i>	<i>70.64</i>
				<i>154.98</i>	<i>60.47</i>
				<i>158.16</i>	<i>58.69</i>
				<i>160.85</i>	<i>68.39</i>
				<i>178.33</i>	<i>62.30</i>
				<i>211.67</i>	<i>60.26</i>
				<i>218.33</i>	<i>64.26</i>
				<i>229.89</i>	<i>66.26</i>