รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

(Chloride penetration resistance and corrosion of reinforcing steel in concrete containing interground fly ash cement and cement with partially replacement of fly ash under marine environment)

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 3245

สัญญาเลขที่ 129/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

(Chloride penetration resistance and corrosion of reinforcing steel in concrete containing interground fly ash cement and cement with partially replacement of fly ash under marine environment)

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีงบประมาณ 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 129/2561

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 129/2561)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี โดยพิจารณาผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต พร้อมทั้งศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตด้วย

จากผลการศึกษาที่ระยะเวลา 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานชนิดต่าง ๆ ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ดีมาก โดยมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตน้อยมาก สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนวัสดุประสานร้อยละ 60 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีที่สุด เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยและขนาดอนุภาคเถ้าลอยที่เล็กทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น แต่กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มากขึ้นหมายถึงปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง และเมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตร่วมด้วย พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก มีกำลังอัดของคอนกรีตที่ดี และมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่น้อยและใกล้เคียงกันมาก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีกำลังอัดสูงถึงร้อยละ 96 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กมีกำลังอัดร้อยละ 70 ของคอนกรีตควบคุม

Abstract

The objectives of this investigation were to study the effect of chloride penetration resistance of concrete after 7 years exposure in marine environment of Thailand. The effects of cement type, fly ash to binder ratio and water to binder ratio in concrete were considered in this study. In addition, corrosion of steel embedded in concrete and compressive strength of concrete was also studied.

From the experimental results at 7 years, the results showed that concrete with pozzolan materials had the best chloride penetration resistance, the lowest chloride diffusion coefficient and the weight loss of embedded steel. For concrete using fly ash to replace Portland cement type I at percentages of 60 by weight of binder results in better chloride penetration resistance. Because products from pozzolanic reaction of fly ash and fine particles of fly ash make concrete denser. But the increase fly ash replacement of cement is more effective reducing the compressive strength of concrete. The effect of compressive strength and chloride penetration resistance were considered, the results showed that the pozzolan concrete and blast-furnace slag concrete had better compressive strength and lowest diffusion coefficient. The pozzolan concrete and blast-furnace slag concrete with W/B ratio of 0.60 have 96 percent and 70 percent compressive strength of control concrete respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ…….....	ง
Abstract…….....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ปัจจัยการเสื่อมสภาพของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล.....	4
การแทรกซึมของคลอไรด์.....	8
รูปแบบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต.....	8
ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต.....	9
คลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีต.....	10
ค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต.....	11
วัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีต.....	12
องค์ประกอบทางเคมีและสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์.....	14
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ.....	16
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	17
วัสดุปอซโซลาน.....	18
ปฏิกิริยาปอซโซลานิก.....	18
เถ้าลอย.....	19
ตะกรันที่ได้จากการถลุงเหล็ก.....	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	วิธีการทดลอง	26
	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต	26
	วิธีการทดลอง	36
	การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	37
	การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต	40
	การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	42
	การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม	43
	การคำนวณอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีต	46
4	ผลการทดลอง	48
	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 7 ปี โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ และปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย	48
	กำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	68
	ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	75
5	สรุปผล	90
	สรุปผลการทดลอง	90
	ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม		92
ภาคผนวก		95

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 ปริมาณสารที่ยอมให้ในน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีต..... 11

2-2 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่าง ๆ..... 13

2-3 ปริมาณสารประกอบออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์..... 15

2-4 คุณสมบัติสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์..... 16

2-5 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618..... 20

2-6 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา..... 21

2-7 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดในASTM C989..... 22

3-1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5..... 29

3-2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารปอซโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก..... 30

3-3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย..... 31

3-4 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด..... 32

3-5 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ..... 32

3-6 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต..... 34

3-7 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตตามมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน..... 47

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
2-2	กลไกการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	6
2-3	การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ	16
2-4	ลักษณะของเอททริงไกต์ (Ettringite)	17
2-5	ลักษณะของเถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างกลม	19
3-1	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1)	27
3-2	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (OPC5)	27
3-3	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP)	28
3-4	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS)	28
3-5	รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอย (Fly ash)	28
3-6	แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และอุปกรณ์กำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริม	33
3-7	แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดตำแหน่งการวางเหล็กเสริม	35
3-8	บริเวณวางตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่วัดโกมุทวัฒนาราม	36
3-9	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต	38
3-10	การบดตัวอย่าง ผงตัวอย่างที่ทำการเก็บ และเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ	38
3-11	ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกราฟการกระจาย การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณและได้จากการทดลอง	41
3-12	แท่งตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัด และการทดสอบกำลังอัด	42
3-13	อุปกรณ์ในการระบายพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริม	44
3-14	การใช้โปรแกรม Photoshop เพื่อหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม	45
4-1	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต OPC1W40 OPC1W50 และ OPC1W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	49
4-2	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต OPC5W40 OPC5W50 และ OPC5W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	50
4-3	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต SCGPW40 SCGPW50 และ SCGPW60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-4	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CIFA20W40 CIFA20W50 และ CIFA20W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	52
4-5	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CIFA40W40 CIFA40W50 และ CIFA40W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	53
4-6	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CIFA60W40 CIFA60W50 และ CIFA60W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	54
4-7	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CBFSW40 CBFSW50 และ CBFSW60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	55
4-8	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (OPC1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	56
4-9	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน (OPC5) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	57
4-10	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	57
4-11	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน CIFA20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	58
4-12	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ของน้ำหนักวัสดุประสาน CIFA40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	58
4-13	การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 ของน้ำหนักวัสดุประสาน CIFA60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-14 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก CBFS อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 59

4-15 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 61

4-16 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 62

4-17 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 64

4-18 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 65

4-19 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (OPC1) และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (OPC5) 67

4-20 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS) ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 67

4-21 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 69

4-22 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-23 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 71

4-24 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน 73

4-25 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 74

4-26 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 75

4-27 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 76

4-28 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 76

4-29 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 77

4-30 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 77

4-31 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 78

4-32 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-33 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 1 เซนติเมตร 80

4-34 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 2 เซนติเมตร 80

4-35 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 5 เซนติเมตร 82

4-36 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 7.5 เซนติเมตร 82

4-37 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 83

4-38 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 84

4-39 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 85

4-40 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 86

4-41 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 87

4-42 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-43 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี 89

บทที่ 1
บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลานานนั้นต้องคำนึงถึงความเสียหายที่เกิดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเด็นสำคัญ เพราะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมทำให้โครงสร้างที่ได้ทำการคำนวณลักษณะการใช้งานในตอนต้นของการก่อสร้างเกิดการเสียลักษณะทางกายภาพ ความคงทนในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างและอายุการใช้งาน (Service life) ของโครงสร้างที่ออกแบบไว้ลดลง ทำให้จำเป็นต้องซ่อมแซมโครงสร้างที่เกิดความเสียหาย ซึ่งการซ่อมแซมโครงสร้างที่สมบูรณ์แล้วนั้นมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงได้มีการคิดค้นการปรับปรุงคุณสมบัติบางส่วนของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงขึ้น ในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีราคาค่อนข้างสูง ได้มีการศึกษานำวัสดุเหลือทิ้ง เช่น เถ้าถ่านหิน และตะกรันที่เกิดจากการถลุงเหล็ก มาใช้เพื่อทดแทน หรือ/และลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลงโดยคงไว้ซึ่งคุณสมบัติเดิมหรือพัฒนาคุณสมบัติในบางด้านให้เด่นชัดขึ้น

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเกิดจากการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นปัญหาหลัก เมื่อเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและค่าความเข้มข้นคลอไรด์เกินจุดวิกฤติของเหล็กเสริมจะเป็นสาเหตุให้เหล็กเสริมที่อยู่ภายในเริ่มเกิดสนิมขึ้น เมื่อเกิดสนิมเหล็กมากพอจะทำให้เกิดแรงดันภายในทำให้เนื้อคอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริมเกิดการแตกออก ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดการเสียรูปและทำให้กำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างลดลง ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต้องพิจารณาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตด้วย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละสัดส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่เหมาะสม จะช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้ยาวนานมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล ที่มีความรุนแรงเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแทรกซึมคลอไรด์และประเมินการกัดกร่อนในระยะยาว เพื่อหาแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการต้านทาน

การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมจริง งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต การสูญเสียน้ำหนักและพื้นที่เกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมที่ใช้วัสดุประสานผสมทดแทนชนิดต่าง ๆ ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลที่ระยะเวลา 7 ปี

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ ผสมวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย
2. เพื่อศึกษากำลังในการรับแรงอัด ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
3. เพื่อศึกษาหาส่วนผสมที่มีคุณสมบัติที่ดีในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และมีกำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

ขอบเขตของงานวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ในงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานแตกต่างกัน โดยเก็บตัวอย่างและทำการศึกษาตัวอย่างคอนกรีตที่มีระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี

1.1 ส่วนผสมที่ใช้ในตัวอย่างคอนกรีตมี ดังนี้ วัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด) ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก และใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 40 และ 60 เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนผสม

1.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

1.3 ใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริม 4 ค่า คือ 10 20 50 และ 75 มิลลิเมตร ฝังเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (RB12) ชั้นคุณภาพ SR24 ยาว 50 มิลลิเมตร

1.4 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 3 ค่า คือ 0.40 0.50 และ 0.60

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างขึ้นมาทดสอบ

2. การทดสอบ ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

2.1 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218

2.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39

2.3 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักและพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.4 นำผลการกระจายตัวแทรกซึมคลอไรด์มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาส่วนผสมคอนกรีตที่มีความเหมาะสมในการต้านทานคลอไรด์ พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีต การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม และพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ

1. ทำให้ทราบถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ ผสมวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

2. ทำให้ทราบถึงลักษณะการสูญเสียพื้นที่และน้ำหนักของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานที่มีสัดส่วนผสมแตกต่างกันในการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

3. ทำให้ทราบถึงสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ดีในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและกำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยการเสื่อมสภาพของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

การทำลายจากสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุก่อสร้างที่ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยมใช้เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างโครงสร้างริมชายฝั่งทะเล แต่เมื่อโครงสร้างมีอายุการใช้งานถึงระดับหนึ่งวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมจะเกิดการเสื่อมสภาพ เป็นผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างลดลง การเสื่อมสภาพสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การเกิดสนิมในเหล็กเสริม เนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล การผุกร่อนของคอนกรีต เนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากเกลือตกผลึก เป็นต้น โดยการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่าง ๆ จะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามลักษณะที่โครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเล

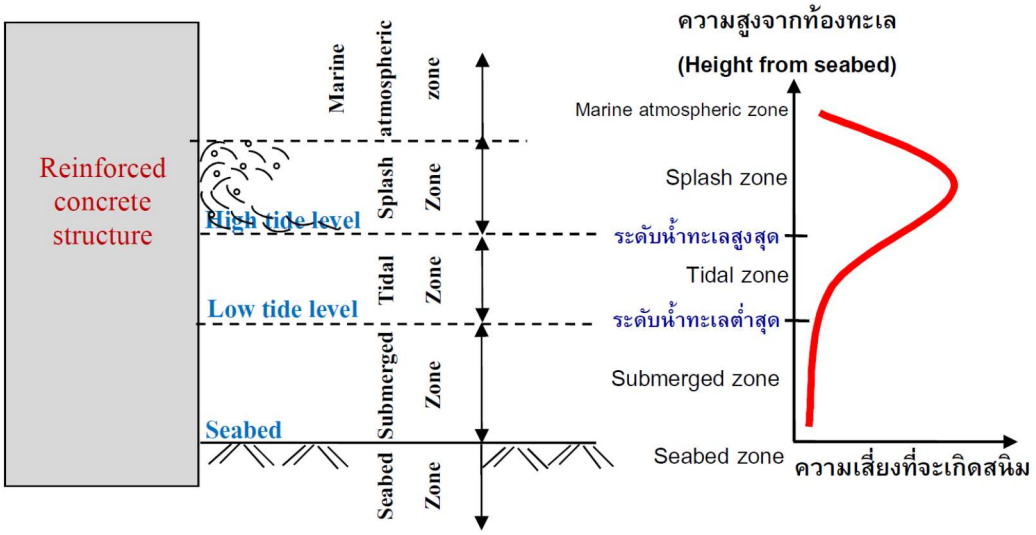
1. บริเวณที่โครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเล มีดังนี้

บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณนี้จะสัมผัสกับน้ำทะเลตลอดเวลา (อยู่ใต้ระดับน้ำทะเลต่ำสุด) ถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี เหล็กเสริมของโครงสร้างในบริเวณนี้จะไม่เกิดสนิม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) โครงสร้างในบริเวณนี้จะสัมผัสกับน้ำทะเลเป็นครั้งคราว (อยู่ระหว่างระดับน้ำทะเลต่ำสุดและสูงสุด) โครงสร้างในบริเวณนี้สามารถเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลได้ มากกว่าบริเวณแรก

บริเวณไอทะเล (Splash zone) โครงสร้างในบริเวณนี้จะสัมผัสกับไอของน้ำทะเลและอากาศตลอดเวลา (อยู่เหนือระดับน้ำทะเลสูงสุด) คอนกรีตในบริเวณนี้จะมีลักษณะเปียกและแห้งสลับกันไปมาตลอดเวลา สภาวะแวดล้อมดังกล่าวเป็นอันตรายอย่างมากต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไอของน้ำทะเลจะนำพาคลอไรด์เข้าไปในผิวคอนกรีต และเนื่องจากคอนกรีตในบริเวณนี้สัมผัสกับอากาศ จึงทำให้คลอไรด์สามารถทำปฏิกิริยาจนเกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมได้

บริเวณเหนือน้ำทะเล (Marine atmospheric zone) โครงสร้างในบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง อย่างไรก็ตามกระแสลมจะพัดไอระเหยของน้ำทะเลเข้าสู่โครงสร้างได้ โครงสร้างในบริเวณนี้มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์และปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น



ภาพที่ 2-1 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ทวีชัย สำราญวานิช และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, 2561)

2. การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

โดยปกติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะไม่เป็นสนิมเพราะเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดชั้นฟิล์ม (Passive layer) ขึ้นมาเคลือบผิวเหล็กไว้ตามธรรมชาติ แต่เมื่อคลอไรด์ซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากกว่าค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมได้และชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่จะเสื่อมประสิทธิภาพ ทำให้เหล็กเสริมเริ่มทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำจนเกิดเป็นสนิม โดยปริมาณคลอไรด์ที่มากเพียงพอที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมนั้น โดยทั่วไปจะเรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป สนิม (Corrosion) เกิดจาก กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ดังสมการที่ 2-1 ถึงสมการที่ 2-5 ซึ่งมีเหล็กเป็นตัวให้ประจุไฟฟ้า (Anode) และมีตัวรับประจุไฟฟ้า (Cathode) คือ น้ำและอากาศ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 เมื่อเหล็กบริเวณนั้นเป็น Anode มันจะปล่อยประจุเหล็ก (Fe^{2+}) และประจุลบ/ อิเลคตรอน (e^-) ออกมา

2.2 เมื่อ e^- เจอกับความชื้นในคอนกรีต (และในอากาศ) และสร้างเป็นประจุไฮดรอกซิล (OH^-) ขึ้นมา

2.3 เมื่อ OH^- เจอกับ Fe^{2+} ก็จะเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ หรือสนิม สนิมเป็นสารประกอบที่มีปริมาตรมาก หากปริมาตรดังกล่าวมีมากกว่าปริมาตรของเนื้อเหล็กที่สูญเสียไปก็จะเกิดแรงดันในเนื้อคอนกรีตและทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนได้

สมการการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

$$Fe^{2+} + 2OH \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (2\text{-}1)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (2\text{-}2)$$

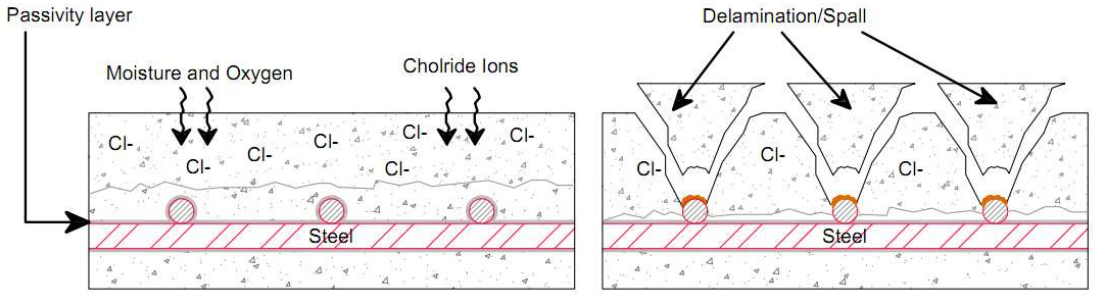
$$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3H_2O + 2H_2O \quad (2\text{-}3)$$

Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบ จะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_2$) และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็กเพิ่มเติมดังสมการ

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2 \quad (2\text{-}4)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \quad (2\text{-}5)$$

เนื่องจากการเกิดสนิมจำเป็นต้องอาศัยออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณไอทะเล (Splash zone) จึงมีโอกาสเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ได้มากและรุนแรงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ



ภาพที่ 2-2 กลไกการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (นุศรา ขยันกิจ, 2558)

กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

คลอไรด์อิออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์อิออนเข้าไปสะสมในผิวของเหล็กเสริมจนมากถึงจุดวิกฤต เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเริ่มเกิดสนิม โดยกระบวนการในการเกิดสนิมเหล็กนั้น เกิดจากสาเหตุของการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์อิออนผ่านเนื้อคอนกรีต แบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลา คือ

ระยะเวลาช่วงแรก (Initial period) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มแรกตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม ในช่วงนี้คลอไรด์อิออนจะแพร่ผ่านเข้ามาและสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับคลอไรด์วิกฤต นอกจากนั้นน้ำและออกซิเจนที่เป็นส่วนประกอบหลักในการเกิดสนิมก็จะซึมผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมเช่นกัน ซึ่งระยะเวลาช่วงแรกนี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความทึบของคอนกรีต ความหนาของระยะหุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น

ระยะเวลาขยายตัวต่อเนื่อง (Propagation period) หมายถึง ระยะเวลาการพัฒนาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต กล่าวคือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการเสียรูปและวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน

3. การผุกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล

โดยปกติแล้วในดินและในที่ ๆ มีน้ำใต้ดินจะมีซัลเฟต อยู่ในรูปของเกลือซัลเฟต แม้ว่าในดินที่มีซัลเฟตจะไม่ทำอันตรายร้ายแรงต่อคอนกรีตแต่สารละลายในรูปของซัลเฟตเมื่อซึมผ่านไปในคอนกรีตที่มีความพรุน จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ในซีเมนต์เพสต์ เกิดเป็นยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต (Calcium sulpho aluminate) หรือเอททริงไกต์ (Ettringite) จะไปเพิ่มปริมาตรของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้า และค่อย ๆ ทำให้คอนกรีตแตกหลุดล่อนออกมาเป็นผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกและอายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง ปฏิกิริยาทางเคมีของซัลเฟตกับปูนซีเมนต์สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน ดังนั้นการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟตจะมีความรุนแรงสูงสุดกับโครงสร้างที่อยู่บริเวณใต้น้ำทะเลและใต้ดิน เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตตลอดเวลา

แต่เดิมมีความเข้าใจในเรื่องที่ว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่ต่ำจะเหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในน้ำทะเลโดยแท้จริงแล้วพบว่าในน้ำทะเลมีปริมาณซัลเฟตอยู่ประมาณ

ร้อยละ 10 ส่วนคลอไรด์นั้นกลับมีถึงร้อยละ 90 ดังนั้นการคำนึงถึงการเกิดสนิมในเหล็กเสริม เนื่องจากคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักน่าจะมีเหตุผลมากกว่าการพิจารณาเพียงซัลเฟตเท่านั้น ในการพิจารณาโครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล นอกจากจะพิจารณาโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเลแล้ว โครงสร้างที่สัมผัสกับไอทะเล ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเลแบบสภาวะเปียกสลับแห้งก็ยังจัดว่าเป็นโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงความต้านทานต่อสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นกัน เนื่องจากอากาศสามารถนำพาเกลือคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างได้ และเนื่องจากโครงสร้างในสภาวะนี้สัมผัสกับอากาศทำให้เหล็กเสริมในโครงสร้างเกิดสนิมขึ้นได้

การแทรกซึมของคลอไรด์

คลอไรด์จะมีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีต ถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ปนอยู่ เช่น สิ่งแวดล้อมทะเล คลอไรด์จะเริ่มซึมเข้าสู่คอนกรีตที่ผิวนอกของชิ้นส่วนโครงสร้างก่อน แล้วค่อย ๆ ซึมเข้าสู่เนื้อในของคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตนี้ต้องใช้เวลา ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ด้าน เช่น

1. ปริมาณของคลอไรด์ที่สัมผัสกับคอนกรีต
2. คุณสมบัติการยอมให้ของไหลซึมผ่านได้ของคอนกรีต
3. ความทึบของคอนกรีต

ถ้าปริมาณของคลอไรด์มีมากกว่าค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต จะทำให้ชั้นด่างธรรมชาติที่ปกป้องเหล็กเสริมในคอนกรีตถูกทำลายและจะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ถ้ามีน้ำและออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดสนิมเหล็กอย่างเพียงพอ เมื่อเกิดสนิมขึ้นจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริม เนื่องจากการขยายตัวของสนิม เป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดรอยแตกและหลุดแยกออก (Crack and delaminate)

รูปแบบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

โดยทั่วไป รูปแบบการแทรกซึมคลอไรด์อิออนนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะ ดังนี้ (ทวีชัย สำราญวานิช, 2561)

1. โดยการแพร่กระจาย (Diffusion) เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยคลอไรด์อิออนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนต่ำกว่า

2. โดยการเคลื่อนย้าย (Migration) เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของอิออน) ในคอนกรีต บริเวณผิวคอนกรีตที่มีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นบวกจะดึงดูด

อิออนของคลอไรด์ที่มีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกให้มาสะสมที่ผิวคอนกรีต

3. โดยการพา (Convection) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในช่วงน้ำขึ้น น้ำทะเลจะพาเอาคลอไรด์เข้ามาในเนื้อคอนกรีต แต่เมื่อน้ำลง น้ำทะเลจะระเหยออกเหลือไว้เพียงเกลือคลอไรด์ ทำให้เมื่อเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งบ่อยครั้งขึ้น ความเข้มข้นของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

4. โดยการซึมผ่าน (Permeability) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างด้านความดันน้ำ (Hydraulic pressure) ในคอนกรีต เมื่อมีระดับความดันแตกต่างกันทำให้น้ำไหลจากที่ ๆ มีความดันสูงไปยังที่ ๆ มีความดันต่ำ และน้ำอาจพาคลอไรด์ที่มีอยู่เข้าสู่โครงสร้างได้

สมการการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's 2nd law) ใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนเข้าสู่คอนกรีตเนื่องจากการแพร่

$$C(x,t) = C_s\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ $C_{(x,t)}$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล t (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม^2/ปี)

t คือ อายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)

ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้านและสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างคอนกรีตนั้นได้เผชิญ ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตทั้งหมด (Total chloride) แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือถูกดูดซับด้วยผิวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต (Gel pores) ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

1.1 การดักจับทางเคมี (Chemical binding) การดักจับอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A โดยคลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroaluminate, Friedel's salt) และ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroferrite) ดังนั้นคลอไรด์อิออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3A สูง

1.2 การดักจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) โดยยึดไว้บนผิวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น C-S-H C-A-H หรือ เอททริงไกต์ เป็นต้น

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างออกไปได้

คลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีต

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล และรักติพงษ์ สหมิตรมงคล (2551) ปัญหาการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์นั้นไม่ใช่ปัญหาที่พบเห็นได้ในโครงสร้างที่อยู่ริมทะเลเท่านั้น อาจเกิดจากการปนเปื้อนของคลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตคอนกรีต ซึ่งอาจจะเป็นการปนเปื้อนของคลอไรด์ในน้ำหรือทรายที่ใช้ผลิตคอนกรีต หรืออาจจะปนเปื้อนอยู่ในส่วนผสมอื่น ๆ ก็เป็นได้

คลอไรด์สามารถละลายในน้ำหรือละลายในกรดได้ โดยส่วนใหญ่แล้วคลอไรด์ที่อยู่ในสารผสมเพิ่มจะเป็นคลอไรด์ที่สามารถละลายได้ในน้ำ ในขณะที่คลอไรด์ในมวลรวมที่ใช้ผสมในคอนกรีตนั้นส่วนใหญ่เป็นคลอไรด์ที่ละลายได้ในกรด คลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นคลอไรด์ชนิดที่ทำความเสียหายกับโครงสร้างคอนกรีตได้มากกว่า เนื่องจากสามารถละลายออกมาจากเนื้อคอนกรีตได้ง่าย มาตรฐาน วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ได้แนะนำปริมาณการปนเปื้อนของคลอไรด์ในน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีตก่อนนำไปใช้งาน ดังนี้

ตารางที่ 2-1 ปริมาณสารที่ยอมให้ในน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีต (มาตรฐาน วสท. 1014-40, 2540)

ชื่อสาร	ปริมาณที่ยอมให้ (ppm.)
คลอไรด์	
สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงหรืองานสะพาน	500
สำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป	1,000

ค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต เกิดจากการที่องค์ประกอบภายในของคอนกรีตสามารถยึดจับคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ (Fixed chloride) แต่เมื่อคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้มากกว่าที่คอนกรีตจะยึดจับได้ จะทำให้เกิดคลอไรด์อิสระในเนื้อคอนกรีตนั้น (Free chloride) และคลอไรด์อิสระดังกล่าวจะเข้าไปทำลายชั้นฟิล์มธรรมชาติที่มีฤทธิ์เป็นด่างคอยปกป้องเหล็กเสริมภายในไว้ลง และทำให้เริ่มเกิดสนิมในเหล็กเสริมขึ้น

ทวีชัย สำราญวานิช และสุเชียรัตน์ จัว (2558) ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต หรืออัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio) หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตนั้น ดังสมการที่ 2-7

$$C_{fix} = C_{total} - C_{free} \quad (2\text{-}7)$$

เมื่อ C_{total} คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (% by weight of binder)

C_{fix} คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (% by weight of binder)

C_{free} คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระ (% by weight of binder)

หารสมการที่ 2-7 ด้วยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (C_{total}) จะได้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับดังสมการที่ 2-8

$$\alpha_{fix} = 1 - \alpha_{free} \quad (2\text{-}8)$$

เมื่อ α_{fix} คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio)

α_{free} คือ อัตราส่วนคลอไรด์อิสระ (Free chloride ratio)

วัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีต

ซีเมนต์ (Cement) เป็นสารเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดการรวมตัวกัน เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่และแข็งแรงขึ้น ปฏิกิริยาที่พบเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซีเมนต์ตามความหมายทางวิศวกรรมโยธาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ บิทูมินัสซีเมนต์ (Bituminous cement) เช่น ยางมะตอย (Asphalts) และน้ำมันดิน (Tars) เราใช้บิทูมินัสซีเมนต์ผสมกับหินและทราย ราดทำผิวถนน และเรียกส่วนผสมนี้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) ส่วนนันบิทูมินัสซีเมนต์ (Non bituminous cement) ได้แก่ อลูมินาซีเมนต์ (Alumina cement) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) มีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อน ในการใช้ก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตต้องผสมน้ำในปริมาณมากพอสมควร แล้วทิ้งไว้ให้แห้งจึงจะแข็งตัว เรามักจะนิยมเรียกซีเมนต์ชนิดนี้ว่า ไฮดรอลิกซีเมนต์ (Hydraulic cement) เพราะต้องใช้น้ำเป็นส่วนผสมหลัก ให้กำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ดีเมื่อแข็งตัว ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงเป็นที่นิยมใช้ในการก่อสร้างมากที่สุด ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีหลายชนิด และในแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

ชนิดของปูนซีเมนต์ในประเทศไทยตามมาตรฐาน มอก.15 จำแนกปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการงานก่อสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่จะใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ต้องการคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น องค์อาคาร ถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ข้อเสียของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ไม่ทนต่อซัลเฟต จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากดินหรือน้ำ และไม่ทนต่อปฏิกิริยาเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ดัดแปลงให้ต้านทานต่อซัลเฟตได้ปานกลาง ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดขึ้นช้าและคายความร้อนออกมาน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ปานกลาง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความละเอียดสูง เป็นผลทำให้สามารถแข็งตัวและให้กำลังได้รวดเร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จึงนิยมใช้ในงานที่เร่งด่วนหรือต้องใช้ความรวดเร็วในการถอดแบบก่อสร้าง เช่น เสาเข็ม คอนกรีตอัดแรง และขณะเกิดปฏิกิริยาจะมีความร้อนสูง เพราะความร้อนนี้เองจึงไม่เหมาะสมกับการก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ (Mass concrete)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษ ที่มีการพัฒนากำลังของคอนกรีตอย่างช้า ๆ ทำให้อัตราการคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์น้อยลงไปด้วย ส่งผลทำให้การขยายตัวน้อยช่วยลดการแตกร้าวที่ผิวของคอนกรีต เหมาะสำหรับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนขนาดใหญ่ เป็นต้น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสมบัติในการต้านทานซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับการก่อสร้างในบริเวณที่มีการสัมผัสกับซัลเฟตที่เข้มข้น เช่น บริเวณดินหรือน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีที่ใช้ด่างต่าง ๆ เป็นต้น

ผู้ผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นคนแรก คือ โจเซฟ แอสปดิน เขาได้นำดินเหนียวกับหินปูนมาเผารวมกันแล้วนำมาบดจนละเอียด เมื่อนำมาผสมกับน้ำและเกิดการแข็งตัวแล้วจะเป็นก้อนสีเหลืองปนเทา เหมือนก้อนหินจากเหมืองของเมืองปอร์ตแลนด์ (Portland) ในประเทศอังกฤษ เขาจึงเรียกชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้น โจเซฟ แอสปดิน จึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นบิดาของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ชนิดนี้เองที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดในปัจจุบัน

ตารางที่ 2-2 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของปูนซีเมนต์	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
ตามมาตรฐาน ASTM	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO
TYPE I (Normal)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
TYPE II (Modified)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
TYPE III (High early strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
TYPE IV (Low heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
TYPE V(Sulfate resistant)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์ผสม ที่เกิดจากการผสมวัสดุทดแทนลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางด้าน ได้แก่

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สารปอซโซลาน (Portland pozzolan cement) เกิดจากการบดสารปอซโซลานผสมรวมกับซีเมนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดจากสารปอซโซลานจะพัฒนาการรับกำลังอย่างช้า ๆ จึงต้องใช้เวลาบ่มนานกว่าซีเมนต์ชนิดอื่น กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สารปอซโซลานขึ้นอยู่กับปริมาณสารปอซโซลานที่ใช้ผสมแทนที่ซีเมนต์

โดยทั่วไปอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารปอซโซลาน ดังนั้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงราคาถูก มีความสามารถทำให้คอนกรีตขยายหรือหดตัวน้อย ความทึบน้ำสูง การคายความร้อนในการทำปฏิกิริยากับกับน้ำต่ำ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ธรรมดา จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass concrete) นอกจากนี้ยังทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland blast furnance slag cement) ผลิตขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C205 ได้จากการบดปูนซีเมนต์กับตะกรันเตาถลุง (Blast furnance slag) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการถลุงเหล็ก ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ประกอบด้วย ปูนขาว ซิลิก้า และอลูมิน่า แต่คุณสมบัติผันแปรไม่เหมือนในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ASTM C595 กำหนดปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กในปูนซีเมนต์ระหว่างร้อยละ 25-70 หรือไม่เกินร้อยละ 65 ของส่วนผสมทั้งหมด ซีเมนต์ชนิดนี้มีระยะก่อตัวและเย็นตัวช้ามาก มีความถ่วงจำเพาะต่ำและทนสารเคมีได้ดี จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการปริมาตรมากกว่าความแข็งแรงและงานที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ

องค์ประกอบทางเคมีและสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2-2 ประกอบด้วย

1. สารประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2. สารประกอบออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Na_2O) และ (K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาเคมีและได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์ที่เป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติที่ต่างกันของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate, $3CaO.SiO_2$, C_3S) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 45-55 เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาเข้ม เมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดการแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในระยะแรก (Early age) และจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่าความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate, $2CaO.SiO_2$, C_2S) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15-35 C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่อผสมกับน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนขึ้น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_2S มีค่าประมาณ 250 จูลต่อกรัม ทำให้คอนกรีตมีกำลังแข็งแรงขึ้นในระยะหลัง (Later age) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ช้ากว่าแต่มีปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอทำให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงได้เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะ

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate, $3CaO.Al_2O_3$, C_3A) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7-15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมากประมาณ 880 จูลต่อกรัม การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมาก คือ จะสามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวแต่กำลังที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ/ และ C_2S แต่มีข้อดีคือช่วยเร่งอัตราการให้กำลังในระยะแรกของ C_3S

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium ferro aluminate, $4CaO.Al_2O_3.Fe2O_3$, C_4AF) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5-10 ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูลต่อกรัม โดย C_4AF พัฒนาได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

ตารางที่ 2-3 ปริมาณสารประกอบออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์

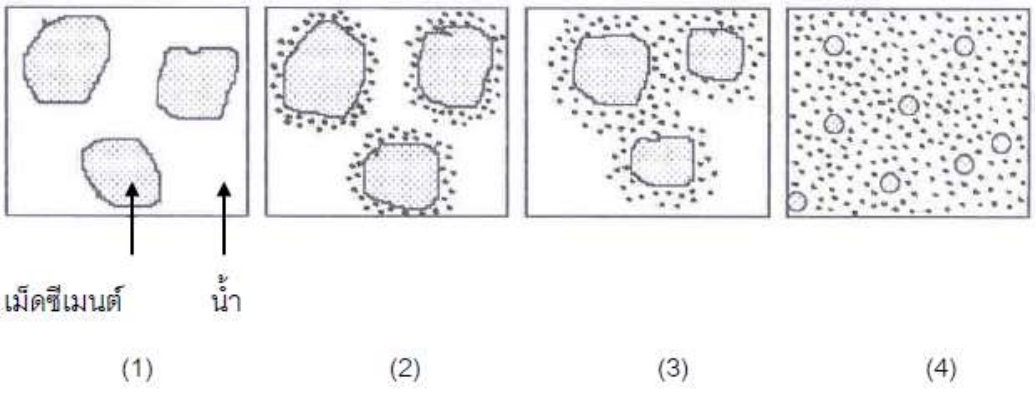
สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์
สารประกอบหลัก	
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO)	60.0-67.0
ซิลิกอนออกไซด์ (Silicon oxide, SiO_2)	17.0-25.0
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide, Al_2O_3)	3.0-8.0
ไอออนออกไซด์ (Ferric oxide, Fe_2O_3)	0.5-6.0
สารประกอบรอง	
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer trioxide, SO_3)	1.0-3.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)	0.1-0.4
อัลคาไลน์ (Alkalies, Na_2O)	0.2-1.3
ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium oxide, K_2O)	0.2-1.3

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์

สารประกอบ	ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	การพัฒนากำลังอัด	กำลังอัด	ความร้อนจากปฏิกิริยา (จูล/กรัม)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)
C_3S	เร็ว (ชั่วโมง)	เร็ว (ชั่วโมง)	สูง	500	45-55
C_2S	ช้า (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	ค่อนข้างสูง	250	15-35
C_3A	ทันที	เร็วมาก (1วัน)	ต่ำ	850	7-15
C_4AF	เร็วมาก (นาที)	เร็วมาก (1วัน)	ต่ำ	420	5-10

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

ในขณะที่ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว เราเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเริ่มทำให้ผิวของคอนกรีตเกิดการแข็งตัวก่อน ส่วนเนื้อคอนกรีตภายในจะเริ่มมีการแข็งตัวภายหลัง และถึงแม้ว่าน้ำที่ผสมในคอนกรีตจะแห้งแล้วก็ตามปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ยังคงดำเนินต่อไป เพราะยังคงมีโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาเพิ่มอีก ระยะนี้จึงเป็นระยะสำคัญของคอนกรีตมากที่จำเป็นต้องทำการบ่มโดยการให้น้ำกับคอนกรีตอย่างเพียงพอ หากคอนกรีตไม่ได้รับน้ำหรือไม่มีน้ำเพื่อทำปฏิกิริยาอย่างเพียงพอแล้ว จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดแบบไม่สมบูรณ์ได้



ภาพที่ 2-3 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (สุพัตรา จินาวัฒน์ และพิบูลย์ จินาวัฒน์, 2539)

จากภาพที่ 2-3 เมื่อผสมซีเมนต์กับน้ำ ภาพที่ 2-3 (1) จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำที่ผิวของซีเมนต์ ภาพที่ 2-3 (2) และเมื่อระยะเวลาผ่านไป ปฏิกิริยาจะเพิ่มมากขึ้น ภาพที่ 2-3 (3) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้จะเกิดผลึกของ SiO_2, CaO และ CSH Gel ที่ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดความแข็งแรง

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต

เมื่อแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S) ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะก่อให้เกิด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังสมการที่ 2-9 และ สมการที่ 2-10

$$2(3CaO.SiO_2) + 7H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.4H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2\text{-}9)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 5H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.4H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2\text{-}10)$$

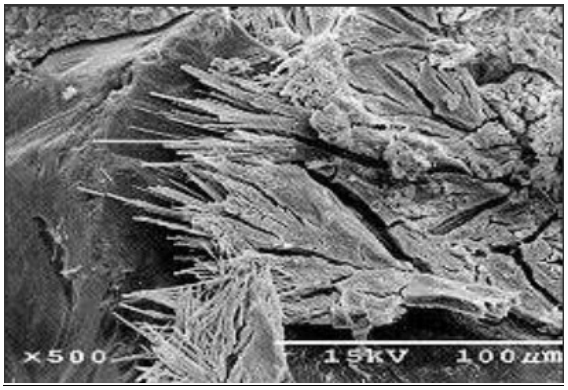
2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2-11

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2\text{-}11)$$

เพื่อหน่วงปฏิกิริยาที่เกิดอย่างรวดเร็ว จึงนิยมใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างกระบวนการบดปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดเอททริงไกต์ (ภาพที่ 2-4) ดังสมการที่ 2-12

$$3CaO.Al_2O_3 + 3(CaSO_4.2H_2O) + 26H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \quad (2\text{-}12)$$



ภาพที่ 2-4 ลักษณะของเอททริงไกต์ (Ettringite)

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) จะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า ยิบซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์มากกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนต เมื่อเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์และยิบซัมทำปฏิกิริยากันจะก่อให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium sulfoferrite) ดังสมการที่ 2-13

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + CaSO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad (2\text{-}13)$$

วัสดุปอซโซลาน

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้าง แต่ยังคงคุณสมบัติเดิมไว้หรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น โดยได้มีการนำวัสดุอื่น ๆ มาใช้ผสม วัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ก็คือ วัสดุปอซโซลาน มาตรฐาน ASTM C618 นิยามความหมายของวัสดุปอซโซลานว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นซีเมนต์อยู่น้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์ (Cementatious material) วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมในคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่ามาก ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ในปัจจุบันมีวัสดุปอซโซลานในปริมาณมากและสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในงานโครงสร้างได้ เช่น เถ้าลอย (Pulverized fuel ash, PFA) ตะกรันที่ได้จากการถลุงเหล็ก (Ground granular blast furnace slag, GGBFS) เป็นต้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก คือ ปฏิกิริยาของสารประกอบออกไซด์ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังสมการที่ 2-14 และ สมการที่ 2-15 โดยผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ได้จะมีผลที่คล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่เกิดช้ากว่ามาก

$$2SiO_2 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \quad (2\text{-}14)$$

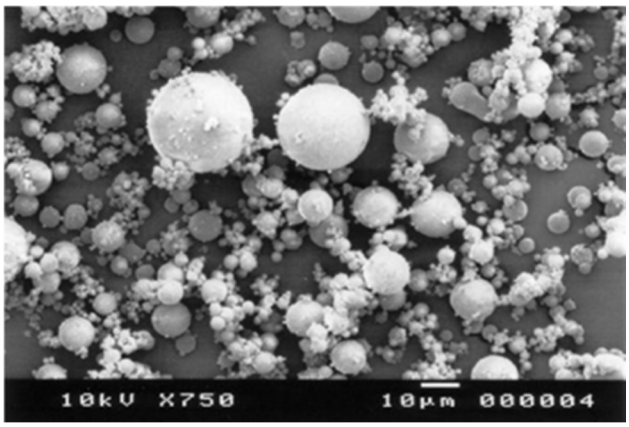
$$2Al_2O_3 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \quad (2\text{-}15)$$

เถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย โดยทั่วไปจะประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก อาจมีปริมาณมากถึงร้อยละ 80-90 มีออกไซด์ของอัลคาไลเป็นองค์ประกอบรองและมีความชื้น เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง พบว่า มีปริมาณปีละ 3.5 ล้านตัน แต่มีการนำมาใช้ประโยชน์ประมาณ 1.8 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 33 ของปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ลดการใช้พลังงานที่ต้องใช้ถ่านหินในการผลิตปูนซีเมนต์ลง โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีลักษณะกลมละเอียดและมีสีเทาคล้ายปูนซีเมนต์ (ภาพที่ 2-5) มีส่วนประกอบหลักเป็นออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีอาจเปลี่ยนไป เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน ชนิดของถ่านหิน เป็นต้น ชนิดของเถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2-5 ได้แก่

เถ้าลอยชนิด F (Class F) เกิดจากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์(Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ

เถ้าลอยชนิด C (Class C) เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์(CaO) สูง เถ้าลอยชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง



ภาพที่ 2-5 ลักษณะของเถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างกลม

ตารางที่ 2-5 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด (ร้อยละ)	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ (SiO_2+ Al_2O_3+Fe_2O_3) อย่างต่ำ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบเท่าโซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.5	1.5

ตะกรันที่ได้จากการถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกต อลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก จุดเด่นของตะกรันเตาถลุงเหล็กคือสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต มีข้อดี 2 ประการ คือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการและสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานในแต่ละงานได้

องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยทั่วไปประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียม องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีสารประกอบออกไซด์อื่น ๆ ตามตารางที่ 2-6 และการที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)
SiO_2	32-40
Al_2O_3	7-16
Fe_2O_3	0.1-1.5
CaO	32-45
MgO	5-15
SO_3	0.7-2.2
MnO	0.2-1.0

มาตรฐาน ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (Slag activity index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะมีค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูงดังตารางที่ 2-7 โดยค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จากสมการที่ 2-16

ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ) = [SP/P] x100 (2-16)

เมื่อ SP คือ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 50

P คือ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

ตามมาตรฐาน ASTM C595 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นส่วนผสมออกเป็น 3 ประเภท ตามปริมาณที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นส่วนผสม คือ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงด้วยตะกรัน (Slag-modified portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมไม่เกินร้อยละ 25 และแบ่งออกเป็น Type IS ซึ่งใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type IS (MS) สำหรับต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง Type IS (A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type IS (MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland blast-furnace slag cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมร้อยละ 25 ถึง 70 ซึ่งยังแบ่งออกเป็น Type I (SM) ที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type I (MS) สำหรับต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง Type I (A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type I (MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง

3. ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือใช้ร่วมกับปูนขาวเพื่อใช้ในงานก่ออิฐหรือฉาบปูน

ตารางที่ 2-7 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989

อายุและชั้นคุณภาพ	ค่าต่ำสุดของดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5 ตัวอย่างติดต่อกัน	ผลทดสอบแต่ละตัวอย่าง
ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันที่อายุ 7 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	-	-
- ชั้นคุณภาพ 100	75	70
- ชั้นคุณภาพ 120	95	90
ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันที่อายุ 28 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	75	70
- ชั้นคุณภาพ 100	95	90
- ชั้นคุณภาพ 120	115	110
ความละเอียดของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ไม่เกินร้อยละ)	-	20
ปริมาณฟองอากาศของมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน (ไม่เกินร้อยละ)	-	12

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

Thomas and Bamforth (1999) ทำการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 70 เป็นวัสดุประสาน ทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 1 2 3 6 และ 8 ปี พบว่า เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 70 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ไม่แตกต่างกัน และมีค่าดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด

Thomas and Matthews (2004) ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 10 ปี โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย มีการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด และเมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีความคงทนเพิ่มมากขึ้น เพราะค่าการแทรกซึมคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีความสัมพันธ์กัน

Yigiter, Yazici and Aydin (2007) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีต โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.43 0.53 และ 0.63 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.53 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 34 และ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 220 วัน แสดงให้เห็นว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมที่ 30 มิลลิเมตรไม่เพียงพอสำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

Chalee and Jaturapitakkul (2009) ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและความละเอียดของเถ้าลอยต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาค 30.6 และ 9.7 ไมโครเมตร เป็นวัสดุประสาน โดยที่เถ้าลอยทั้งสองชนิดนั้นมีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกัน ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.00 0.15 0.25 0.35 และ 0.50 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสาน 3 ค่า คือ 0.45 0.55 และ 0.65 ทดสอบในสภาพแวดล้อมทะเลที่เป็นบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal zone) เป็นระยะเวลา 2 3 4 และ 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าลอยและเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคอนกรีตลงด้วย

วสุ วิทยเขตปภา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2553) ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 บ่มตัวอย่างจนครบ 28 วัน จากนั้นไปแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 6 เดือน ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า และการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตมีผลทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น

Yildirim, Ilica and Sengul (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดต่าง ๆ ต่อความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนร้อยละ 37 และ 56 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย Class F ที่ร้อยละ 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากผลการทดลอง พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานมีการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดอื่น คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุด และตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อย แต่ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานมีค่าน้อยที่สุด

Simcic, Pejovnik, Schutter and Bosiljkov (2015) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนร้อยละ 20 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ จากการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีการแทรกซึมคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อย หมายถึง ความต้องการระยะหุ้มเหล็กเสริมที่น้อย ดังนั้น โครงสร้างที่ใช้เถ้าลอย จะมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นด้วย

2. กำลังอัดของคอนกรีต

Siddique (2004) บทความนี้ได้ศึกษาการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยปริมาณสูง โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 45 และ 50 และทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด ทดสอบกำลังอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต โดยจะทำการทดสอบจนคอนกรีตมีอายุถึง 365 วัน ทำการหล่อก้อนตัวอย่างเป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด 150 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นนั้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

Oner and Akyuz (2007) ได้ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทำการผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 0 15 30 50 70 90 และ 110 ของปริมาณปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 14 28 63 119 180 และ 365 วัน ทำการหล่อก้อนตัวอย่างเป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด 150 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัดผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นนั้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว แต่เมื่อเลยจุดอิ่มตัวไปแล้วจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง จุดอิ่มตัวของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ที่ร้อยละ 55-59 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

3. พื้นที่การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

Yeau and Kim (2005) ได้ศึกษาความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 5 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 0 25 40 และ 55 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับความหนาของระยะหุ้มเหล็กเสริมและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมีพื้นที่การเกิดสนิมมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 40 และ 55 ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 40 ขึ้นไป สามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้เป็น 2 เท่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

Cheewaket, Jaturapitakkul and Chalee (2012) ได้ศึกษาเวลาเริ่มต้นของการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 ขึ้นไป สามารถยืดระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในการศึกษาวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
2. การทดสอบตัวอย่างเมื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

1. วัสดุที่ใช้ในตัวอย่างคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สารปอซโซลาน ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กและเถ้าลอย เป็นวัสดุประสาน ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ และใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียด

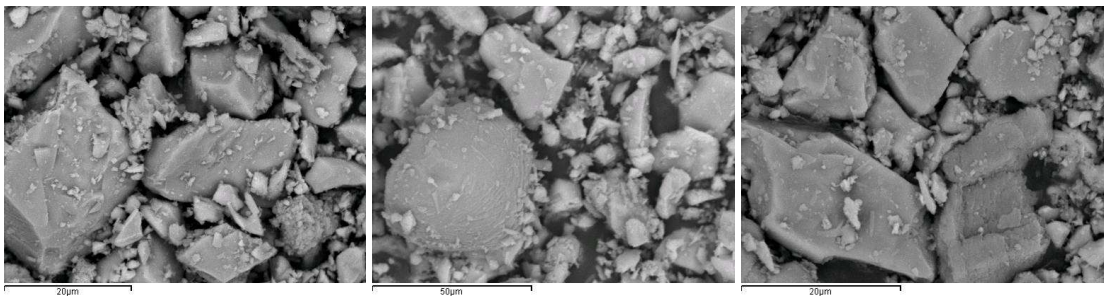
1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type I normal Portland cement หรือ Standard portland cement) ตามมาตรฐาน มอก. 15 และ ASTM C150 จัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐานที่เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณสมบัติในด้านใดเป็นพิเศษ ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น งานก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีต ทางเท้า ถนน อาคาร สะพาน ถังน้ำ บ่อน้ำ ท่อระบายน้ำ และอื่น ๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากดินหรือน้ำและไม่ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมี

1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Type V sulphate resistance Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดปรับปรุงคุณสมบัติพิเศษให้ทนต่อซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นี้มีปริมาณของ C_3A ต่ำ ทำให้ทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟตลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงนิยมใช้ในสภาวะที่โครงสร้างต้องเผชิญกับซัลเฟตในปริมาณมาก

1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland pozzolan cement หรือ Pozzolanic cement) เกิดจากการบดสารปอซโซลานผสมกับเม็ดปูนซีเมนต์ในขั้นตอนการผลิต กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สารปอซโซลานขึ้นอยู่กับปริมาณสารปอซโซลานที่ใช้ผสมแทนที่ซีเมนต์ โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารปอซโซลาน

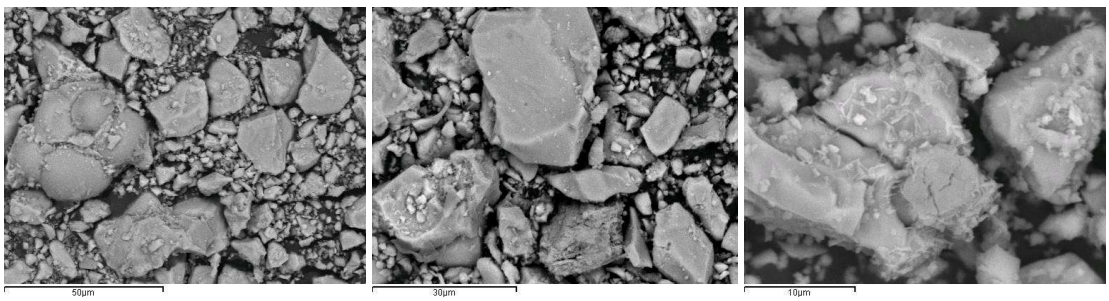
1.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland blast furnace slag cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมกับเม็ดปูนซีเมนต์ การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้ เนื่องจากการแทนที่โดยลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลงและทำให้คอนกรีตทึบน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และซัลเฟตในคอนกรีตได้ดี ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องมาจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำที่ต่ำ

1.5 เถ้าลอย เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในการศึกษานี้ได้ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นเถ้าลอยเกรด มอก.Class 2ข. (CaO มากกว่าร้อยละ 10) มาตรฐาน ASTM Class F (Si+Fe+Al มากกว่าร้อยละ 70)



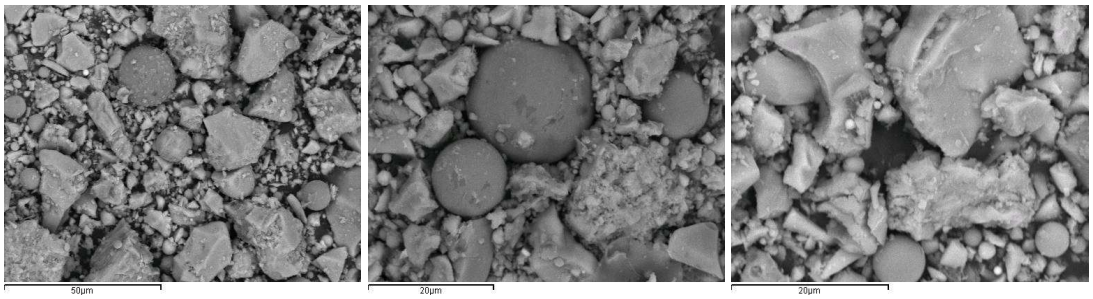
x1,000 x1,000 x2,500

ภาพที่ 3-1 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1)



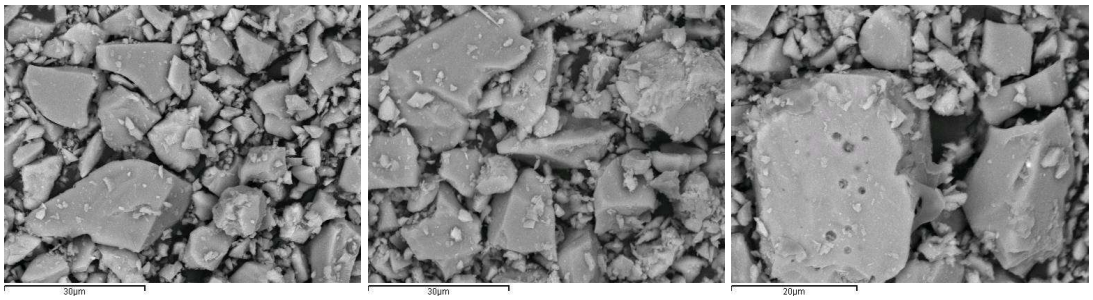
x1,000 x1,500 x3,500

ภาพที่ 3-2 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (OPC5)



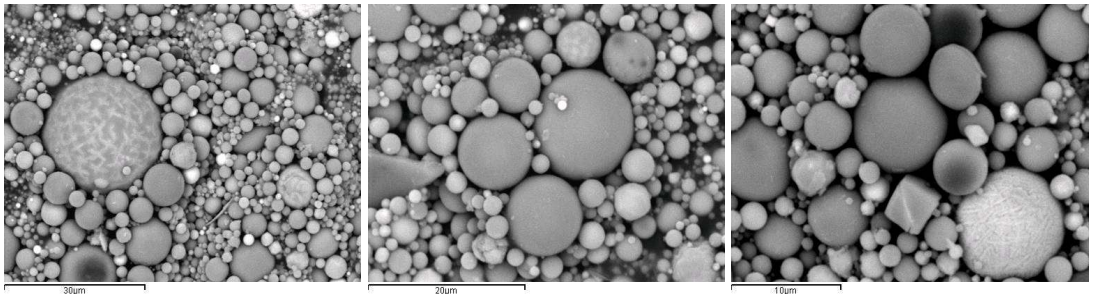
x1,000 x2,000 x2,500

ภาพที่ 3-3 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP)



x1,500 x1,500 x2,000

ภาพที่ 3-4 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS)



x1,500 x2,500 x3,500

ภาพที่ 3-5 รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอย (Fly ash)

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	19.51	21.87
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.97	3.87
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.78	4.34
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.38	64.56
แมกเนเซียมออกไซด์ (MgO)	1.08	1.11
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.16	2.08
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.01	0.01
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.44	0.24
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI)	2.27	1.59
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)	72.9	58.4
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	0.9	18.6
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)	6.8	2.9
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF)	11.5	13.2
คุณสมบัติทางกายภาพ		
Blain fineness (cm^2/g)	3,550	3,830

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารปอซโซลาน	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	24.98	28.76
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	9.25	11.27
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	5.97	1.69
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	52.65	51.41
แมกเนเซียมออกไซด์ (MgO)	1.62	3.91
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.48	2.05
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	<0.01	0.01
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.78	0.39
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI)	1.85	0.01
คุณสมบัติทางกายภาพ		
Blain fineness (cm^2/g)	4,470	5,160

ตารางที่ 3-3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (Fly ash)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	40.93
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	22.42
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	13.64
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	13.63
แมกเนเซียมออกไซด์ (MgO)	2.93
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.92
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.89
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.39
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI)	0.46
คุณสมบัติทางกายภาพ	
Blain fineness (cm^2/g)	2,460

1.6 มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) ที่ใช้เป็นหินปูน (Lime stone) เมื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดคละ พบว่า มีขนาดคละที่ดี จึงสามารถนำไปใช้ในส่วนผสมได้ทันที โดยไม่ต้องทำการแยกขนาดอีก ในการศึกษานี้จะใช้หินนี้ในทุกส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

1.7 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ที่ใช้เป็นทรายบกจากจังหวัดชลบุรี จากการทำการทดสอบขนาดคละ พบว่า ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นเป็นทรายที่มีขนาดคละที่ดี จึงสามารถนำทรายไปใช้ในการทดสอบได้ทันที โดยไม่ต้องทำการคัดแยกขนาดของทรายอีก ในการศึกษานี้จะใช้ทรายชนิดนี้ในทุกส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

1.8 น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้น้ำประปาในห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต วิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตารางที่ 3-4 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง
เบอร์ 4	13.4	2.68	2.68	97.32
เบอร์ 8	68.5	13.70	16.38	83.62
เบอร์ 16	162.4	32.48	48.86	51.41
เบอร์ 30	87.8	17.56	66.42	33.58
เบอร์ 50	63.8	12.76	79.18	20.82
น้ำหนักรวม	500.0	100		

ตารางที่ 3-5 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง
1”	-	-	-	100
¾”	23.1	2.31	2.31	97.69
½”	582.0	58.23	60.54	39.46
3/8”	284.2	28.44	88.98	11.02
เบอร์ 4	99.2	9.92	98.90	1.10
น้ำหนักรวม	999.4	100		

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ มีดังนี้

2.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

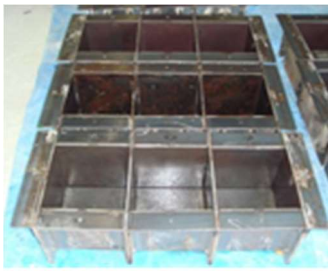
2.2 แท่นกำหนดระยะฝังเหล็กเสริม

2.3 เหล็กกลมผิวเรียบนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร

2.4 เครื่องผสมคอนกรีต

2.5 เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต

2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล



แบบหล่อ

อุปกรณ์กำหนดระยะ

ภาพที่ 3-6 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 200x200x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และอุปกรณ์กำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริม

3. วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

3.1 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยบางส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สารปอซโซลานและ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3-6 ทำการฝังเหล็กเสริมในทุกอัตราส่วนผสม โดยใช้แท่นกำหนดระยะฝังของเหล็กเสริม กำหนดให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 10 20 50 และ 75 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3-7 ทำการถอดแบบเมื่อระยะเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และบ่มตัวอย่างโดยใช้กระสอบป่านพรมน้ำอีก 27 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลจริง เพื่อให้เกิดการแทรกซึมคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าสู่ตัวอย่าง

ตารางที่ 3-6 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต

Mix designation	Mix proportion (per 1 m^3 of concrete)				
	Cement (kg)	Fly Ash (kg)	SSD Rock (kg)	SSD Sand (kg)	Water (kg)
OPC1W40	435	-	1025	776	174
OPC1W50	382	-	1025	776	191
OPC1W60	340	-	1025	776	204
OPC5W40	435	-	1025	776	174
OPC5W50	382	-	1025	776	191
OPC5W60	340	-	1025	776	204
SCGPW40	435	-	1025	776	174
SCGPW50	382	-	1025	776	191
SCGPW60	340	-	1025	776	204
CIFA20W40	335	84	1025	776	168
CIFA40W40	242	162	1025	776	162
CIFA60W40	156	234	1025	776	156
CIFA20W50	295	74	1025	776	185
CIFA40W50	215	143	1025	776	179
CIFA60W50	139	208	1025	776	173
CIFA20W60	264	66	1025	776	198
CIFA40W60	193	128	1025	776	193
CIFA60W60	125	187	1025	776	187
CBFSW40	435	-	1025	776	174
CBFSW50	382	-	1025	776	191
CBFSW60	340	-	1025	776	204

<u>หมายเหตุ</u>: ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ มีดังนี้

OPC1 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

OPC5 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

SCGP คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

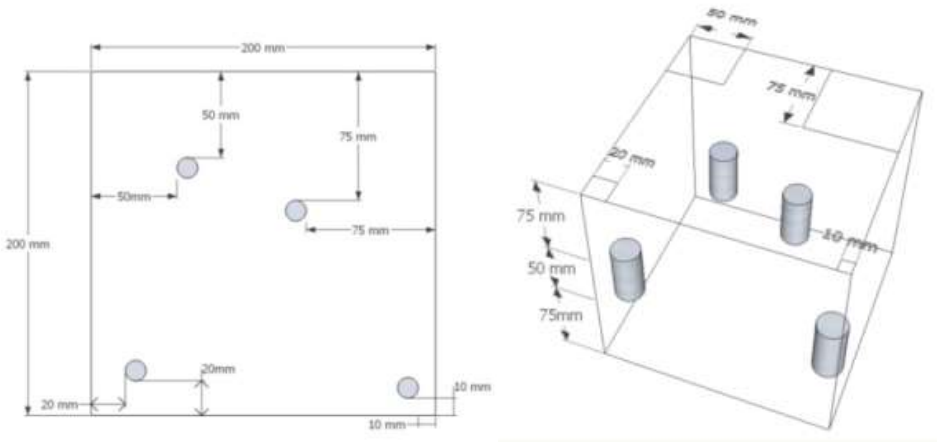
CBFS คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก

CIFA20 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

W40 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

<u>ตัวอย่าง</u> เช่น CIFA20W40 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

จากตารางที่ 3-6 จะพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ จะมีทั้งตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่ผสมสารปอซโซลานตั้งแต่กระบวนการผลิตและตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานผสมแทนที่วัสดุประสานภายหลัง เนื่องจากการศึกษานี้ต้องการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่ผสมสารปอซโซลานในขั้นตอนผลิตกับคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในขั้นตอนการผสมต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม



ภาพที่ 3-7 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดตำแหน่งการวางเหล็กเสริม

3.2 สถานที่ในการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตและทำการบ่มจนครบกำหนดเวลาแล้ว จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลจริงที่ บริเวณใต้ศาลา วัดโกมุทวัฒนาราม ตำบลอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โดยจะนำตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลที่อายุ 7 ปี ขึ้นมาทำการทดสอบ

สถานที่ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตมาเผชิญนี้ มีสภาวะแบบเปียกสลับแห้ง คล้ายโครงสร้างจริงริมชายฝั่งทะเล มีการขึ้นและลงของน้ำทะเลวันละ 2 รอบ ระยะเวลาขึ้นและลงของน้ำทะเลอาจจะไม่คงที่ตลอด เพราะการขึ้นและลงของน้ำทะเลและสภาวะแวดล้อมจะเปลี่ยนไปตามฤดูกาล เช่น ฤดูร้อนอากาศอาจจะแห้งทำให้คอนกรีตเผชิญสภาวะแห้งมากกว่าสภาวะเปียก หรือ/ และ ฤดูหนาวน้ำทะเลจะขึ้นสูงเป็นเวลานาน ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียกเป็นเวลานานกว่า เป็นต้น

ภาพที่ 3-8 บริเวณวางตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่วัดโกมุทวัฒนาราม

วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

1. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218
2. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39
3. การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักและพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1.1.1 เครื่องเจาะ (Coring machine)

1.1.2 เครื่องตัด

1.1.3 ครกหิน

1.1.4 ตะแกรงเบอร์ 200

1.1.5 บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร

1.1.6 กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร

1.1.7 ช้อนตักสาร

1.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดถึง 0.0001 กรัม

1.1.9 เครื่องดูด (Suction apparatus)

1.1.10 ชุดกรองสูญญากาศ (Vacuum filter set)

1.1.11 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบ

1.1.12 เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP titrino metrohm

1.1.13 Magnetic Stirring Bar

1.1.14 เครื่องให้ความร้อน (Hot pate)

1.2 สารเคมีที่ใช้

1.2.1 กรดไนตริก (Nitric acid)

1.2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

1.2.3 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)

1.2.4 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)

2. วิธีการทดสอบหาค่าปริมาณคลอไรด์

2.1 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ เมื่อตัวอย่างคอนกรีตได้เผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลจนครบระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในการศึกษานี้ กำหนดไว้ที่ระยะเวลา 7 ปี จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อมทะเลกลับมาทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ โดยนำก้อนตัวอย่างที่ได้มาเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก โดยทำการเจาะจากผิวหน้าของก้อนตัวอย่างลงไปตลอดช่วงความสูงของก้อนตัวอย่าง จะได้แท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร จำนวน 2 แท่ง แล้วจึงนำแท่งตัวอย่างที่เจาะได้มาตัดเป็นชิ้นความหนาชิ้นละ 10 มิลลิเมตร ลึกลงไปจากผิวหน้าเป็นจำนวน 10 ชั้น

ภาพที่ 3-9 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

จากนั้นนำตัวอย่างที่ตัดแล้วมาบดละเอียด แล้วจึงนำมาหาขนาดคละที่เหมาะสมโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และนำผงตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป

ภาพที่ 3-10 การบดตัวอย่าง ผงตัวอย่างที่ทำการเก็บ และเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

2.2 วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) หรือ คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) ดังนี้

2.2.1 นำตัวอย่างซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2.2 เติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างซีเมนต์บดเป็นผง จนถึงขีด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่ทำให้เจือจางในอัตราส่วน 1 : 1 ลงไป 25 มิลลิลิตร ทันที

2.2.3 ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่มีตัวอย่างด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำ ออกจากเครื่องต้ม (Hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2.2.4 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย โดยที่ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร ทำการถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิปกติ

2.2.5 สำหรับตัวอย่างที่เย็นแล้ว นำบีกเกอร์ไปวางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แช่ Electrode ลงในสารละลาย ด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายของ buret ขนาด 10 มิลลิลิตร ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในแก้วตัวอย่างสารละลาย

2.2.6 เครื่อง Auto titration จะทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา

2.2.7 จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (%Chloride by weight of concrete)

2.3 วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) หรือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C 1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ดังนี้

2.3.1 นำตัวอย่างซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.3.2 นำไปต้มให้เดือด 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

2.3.3 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย โดยที่ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร

ทำการถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น

2.3.4 เติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจาง ในอัตราส่วน 1 : 1 ลงไป 3 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)

2.3.5 สำหรับตัวอย่างที่เย็นแล้ว นำบีกเกอร์ไปวางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10 มิลลิลิตร buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในสารละลาย

2.3.6 เครื่อง Auto titration จะทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา

2.3.7 จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (%Chloride by weight of concrete)

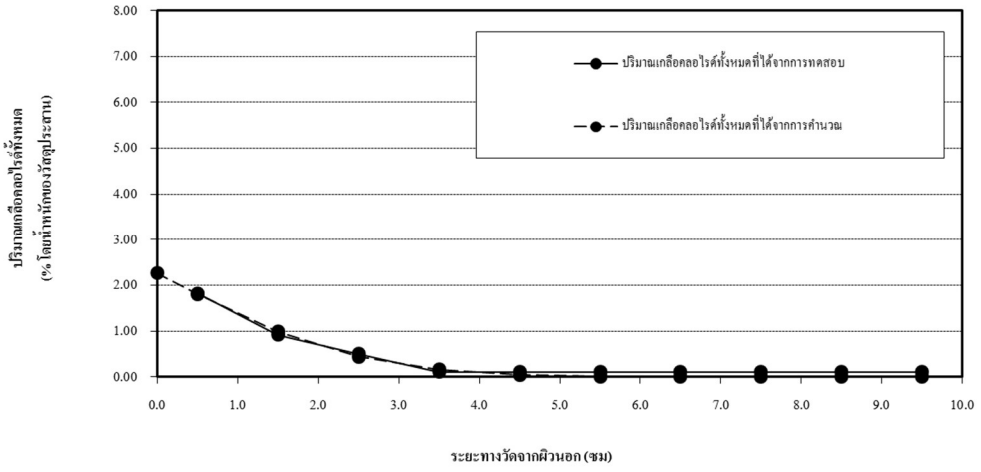
การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

หลังจากทดสอบผงคอนกรีตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีตแล้ว นำค่าที่ได้มาทำการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) ดังสมการที่ 2-6 ซึ่งสมการที่ 2-6 เป็นสมการกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) การคำนวณย้อนกลับจะใช้วิธีผลต่างกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least square method) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (D_a) และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาทำการปรับแก้โดยใช้หลักการว่าให้ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) ที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง แล้วทำการปรับแก้

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (D_a) เพื่อให้ค่าการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2-2 กับค่าการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3-11

Mix	SCGP W40						
D_a	C_s	C_i	Exposure time, t	Depth from exposure surface, X	Chloride concentration at depth X (% by wt.of binder)		$(Cxt-Cxt,cal)^2$
(cm^2/year)	(% by wt.of binder)	(% by wt.of binder)	(years)	(cm)	C_{xt}	$C_{xt\,Cal}$	
0.27	2.267	0.00	7.00	0.0		2.267	
				0.5	1.83	1.803	0.00064
				1.5	0.92	0.990	0.00481
				2.5	0.50	0.442	0.00353
				3.5	0.11	0.158	0.00218
				4.5	0.11	0.044	0.00440
				5.5	0.11	0.010	0.01020
				6.5	0.11	0.002	0.01190
				7.5	0.11	0.000	0.01223
				8.5	0.11	0.000	0.01227
				9.5	0.11	0.000	0.01228
					$\sum (C_{xt} - C_{xt,cal})^2$		0.07444

(ก) ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต



(ข) กราฟการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกราฟการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณและได้จากการทดลอง

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
   1.1 อุปกรณ์ปรับระดับผิวหน้าคอนกรีต
   1.2 กำมะถัน
   1.3 เตาให้ความร้อน
   1.4 ภาชนะต้มกำมะถัน
2. วิธีในการทดสอบหากำลังอัด
   2.1 นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร
   2.2 นำแท่งตัวอย่างที่ได้จากการเจาะมาตัดให้ได้สัดส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 1 : 2
   2.3 ทำการปรับระดับผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตด้วยกำมะถัน
   2.4 นำก้อนตัวอย่างมาทดสอบเพื่อหากำลังอัดคอนกรีต (Compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39 (Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens)

ภาพที่ 3-12 แท่งตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัด และการทดสอบกำลังอัด

การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1.1 แผ่นใสที่มีเส้นกราฟขนาด 5x5 เซนติเมตร

1.2 ปากกาเคมี

1.3 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)

1.4 Hexamethylene tetramine

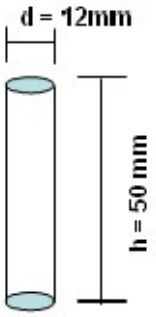
1.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

2. การทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริม

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล นอกจากจะทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์แล้ว ในการศึกษานี้ยังศึกษาการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล นอกจากนี้การกัดกร่อนบริเวณพื้นที่ผิวรอบ ๆ เหล็กเสริมได้ถูกพิจารณาด้วยการคำนวณพื้นที่การกัดกร่อน จะทำได้ 2 วิธี คือ

2.1 โดยการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1x1 มม^2 มาทาบรอบเหล็กเสริมแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม (ดังภาพที่ 3-13) จากนั้นนับพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของเหล็กเสริม (Area of lateral surface corrosion) และนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด สามารถคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิม (Corrosion of lateral surface area) ได้ดังสมการที่ 3-1

$$\text{Corrosion of lateral surface area (\%)} = \frac{\text{Area of lateral surface corrosion}}{\text{Lateral surface area}} \times 100 \qquad (3\text{-}1)$$



โดยที่

$$\text{Lateral surface area} = \pi \times d \times h$$

$$= \pi \times 12 \times 50$$

$$= 1{,}885 \text{ มม}^2$$

โดยการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1x1 ตารางมิลลิเมตร มาทาบรอบเหล็กเสริมแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม (ดังภาพที่ 3-11) จากนั้นนับพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กเสริม ด้วยการใช้โปรแกรม Adobe photoshop (ปรีชา กาเพชร, ชยันต์ ภักดีไทย และวินัย ศรวัติ, 2554) ดังนี้

2.1.1 ไปที่ File เปิดรูปที่แผ่นใสที่เราแรเงาพื้นที่เกิดสนิมไว้แล้ว

2.1.2 ไปตั้งค่า Analysis > Set measurement scale > แล้วตั้งค่าดังภาพที่ 3-14 (ก)

2.1.3 ตั้งค่าที่ Window > เลือก Measurement log

2.1.4 ไปที่แถบด้านซ้ายเครื่องมือ Magic wand > แล้วเลือกพื้นที่ที่แรเงา ดังภาพที่ 3-14 (ข)

2.1.5 กด Analysis > Record measurement จะได้พื้นที่การเกิดสนิม บันทึกเป็น A_C ดังภาพที่ 3-14 (ข)

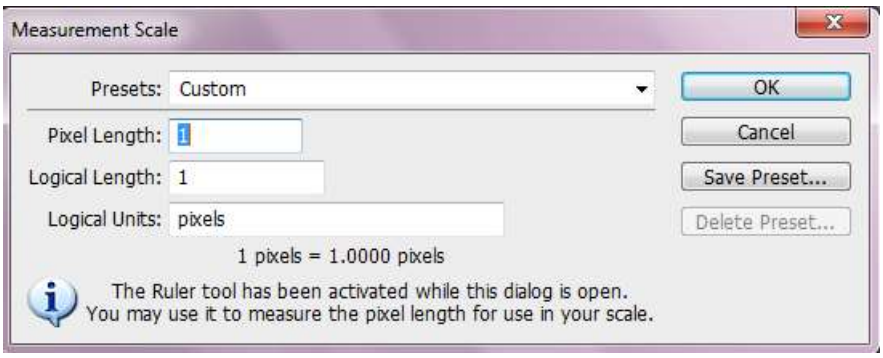
2.1.6 เลือกเครื่องมือ Rectangular maquee แล้วเลือกให้พอดีกับพื้นที่ผิวเหล็ก ดังภาพที่ 3-14 (ค)

2.1.7 Analysis > Record measurement จะได้พื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็กเสริม บันทึกเป็น A_a ดังภาพที่ 3-14 (ค)

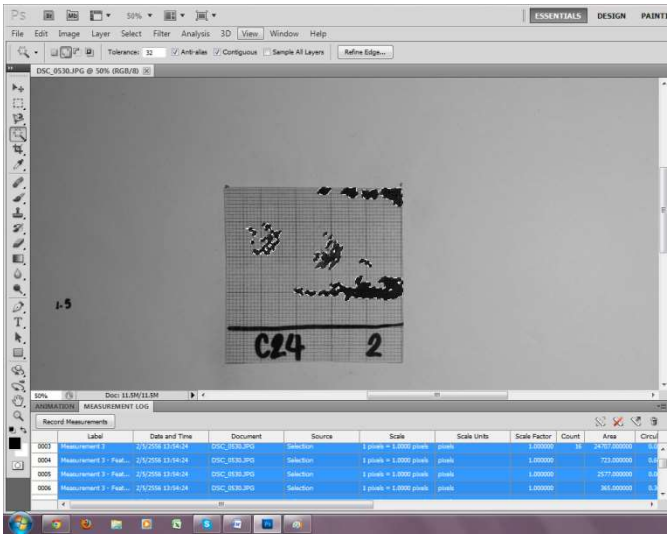
2.1.8 คำนวณหาร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมจาก

Corrosion of lateral surface area (%) = $(A_c/ A_a)*100$

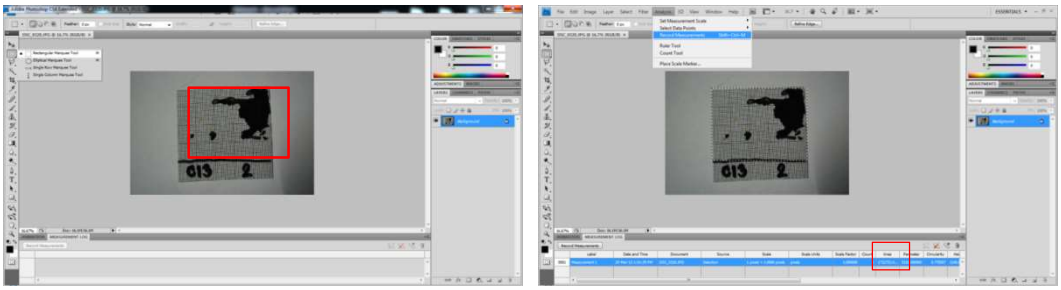
ภาพที่ 3-13 อุปกรณ์ในการระบายพื้นที่การเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริม



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3-14 การใช้โปรแกรม Photoshop เพื่อหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.2 การทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม นำเหล็กเสริม มาทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำเหล็กไปแช่ในสารละลาย โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.001 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น (W_i) จากนั้นนำเหล็กไปแช่ในสารละลายกรด เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 25 °C ตามมาตรฐาน ASTM G1 (Standard practice for preparing cleaning and evaluating corrosion test specimens) แล้วนำขึ้นมาทำความสะอาด แล้วชั่งน้ำหนักทำการบันทึกเป็นค่าน้ำหนักสุดท้าย (W_f) โดยทำจนกว่าค่าน้ำหนักสุดท้ายไม่ลดลงจากครั้งแรกที่แช่ในสารละลายกรดจึงจะนำค่าน้ำหนักสุดท้ายมาคำนวณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-2

$$\text{Weight loss}\,(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \text{x } 100 \qquad (3\text{-}2)$$

การคำนวณอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีต

จากผลการทดสอบที่ได้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (D_a) และค่าคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (C_s) นั้นสามารถนำมาคำนวณช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ได้โดยสมการ ดังนี้

$$C_d < C_{lim} \qquad (3\text{-}3)$$

โดยที่ C_{lim}ขึ้นอยู่กับประเภทและสัดส่วนของวัสดุประสานที่ใช้ โดยกำหนดให้มีค่าดังตารางที่ 3-7

$$C_d = (C_s - C_0)\left[1 - \text{erf}\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right] + C_0 \qquad (3\text{-}4)$$

โดยที่ C_d คือ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่สะสมบริเวณผิวเหล็กเสริม

c คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (เซนติเมตร) (โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (ซม^2/ปี)

t_r คือ อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการ (ปี)

C_0 คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

ตารางที่ 3-7 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตตามมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2555)

ประเภทของวัสดุประสาน	ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
ปูนซีเมนต์ล้วน	0.45
ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย	
- เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานน้อยกว่า 0.15	0.45
- เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.15 แต่ไม่ถึง 0.35	0.35
- เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.35 แต่ไม่ถึง 0.50	0.30

บทที่ 4

ผลการทดลอง

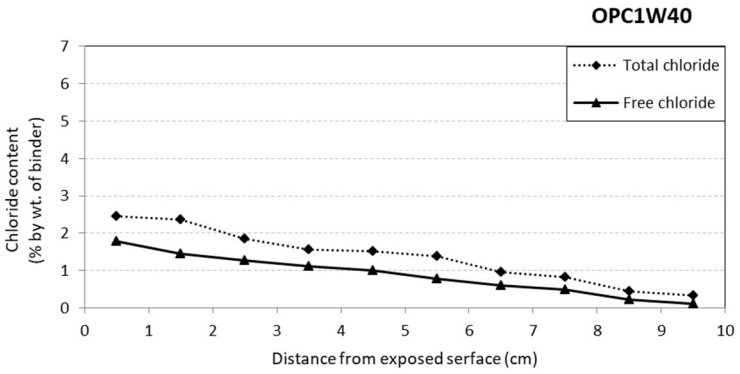
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ และปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย

1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

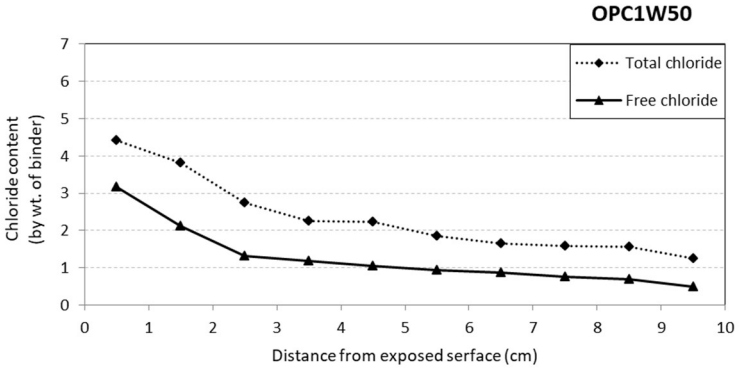
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยใช้ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (OPC5) ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก (CBFS) ปูนซีเมนต์สารปอซโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (CIFA)

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ถูกแสดงในปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในหน่วยของร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน (% by weight of binder) โดยที่ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระที่ต่ำลงแสดงถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น

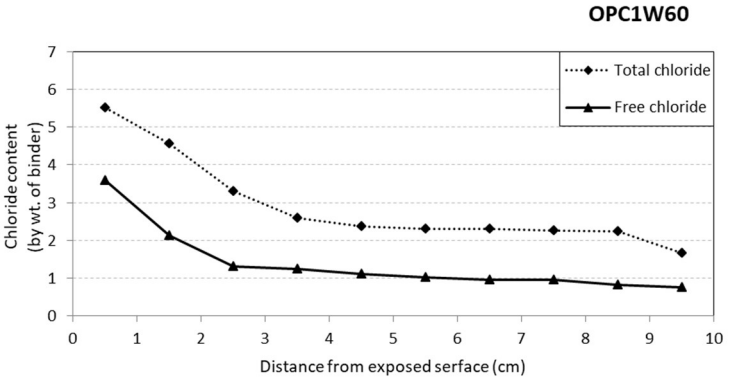
จากภาพที่ 4-1 ถึงภาพที่ 4-7 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี จากผลทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) นั้น มีค่าสูงกว่าปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในทุกระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตในทุกสัดส่วนผสมและในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเป็นตัวเปรียบเทียบในทุกสัดส่วนผสมและในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงเท่านั้น



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

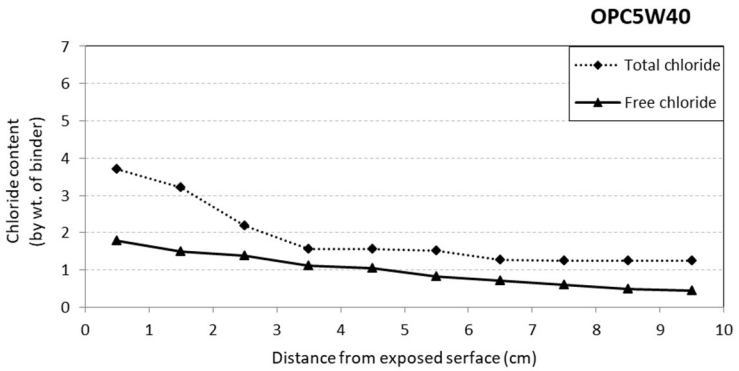


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

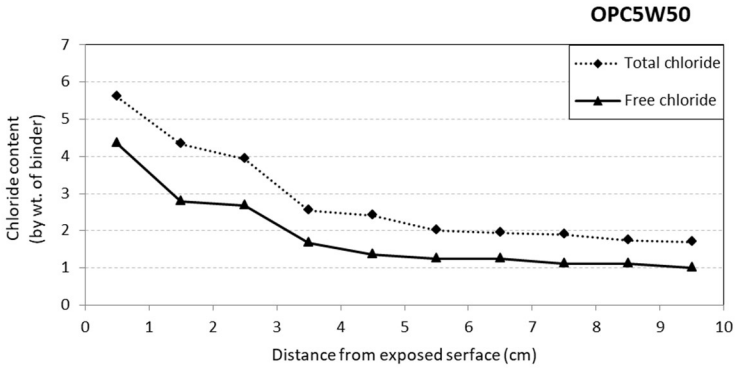


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

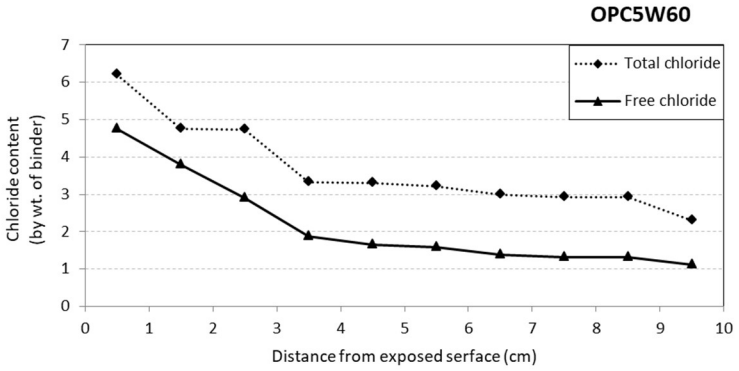
ภาพที่ 4-1 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต OPC1W40 OPC1W50 และ OPC1W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

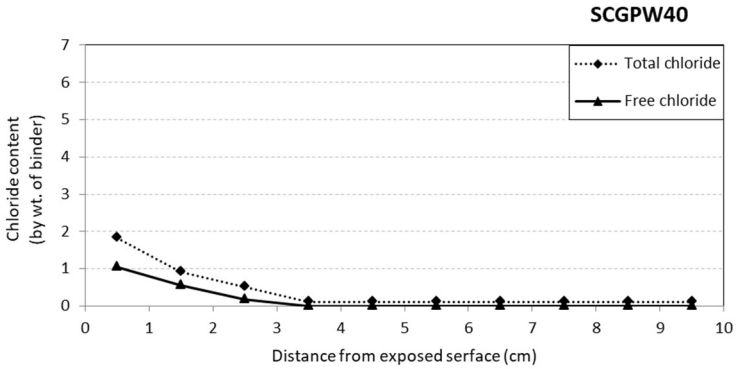


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

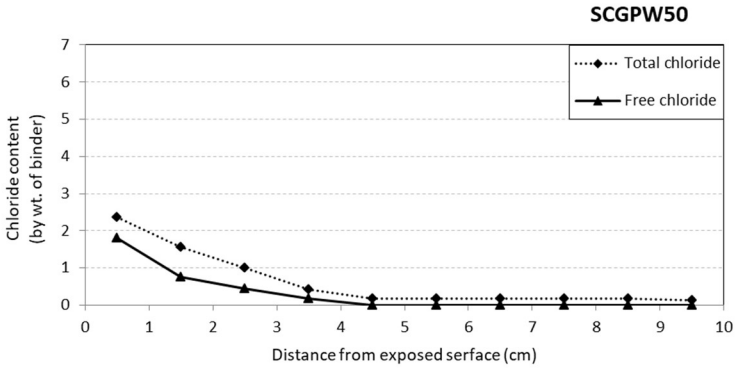


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

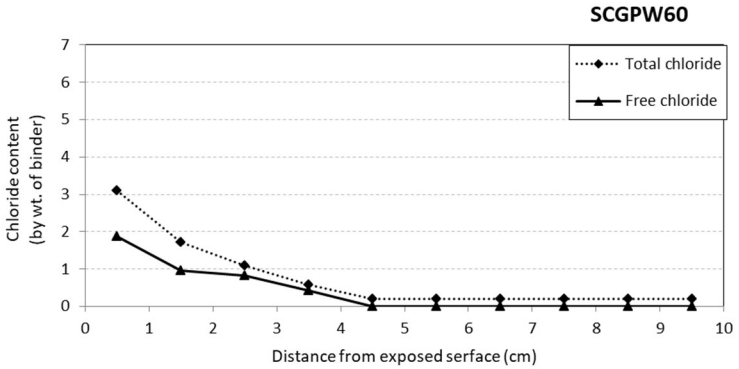
ภาพที่ 4-2 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต OPC5W40 OPC5W50 และ OPC5W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

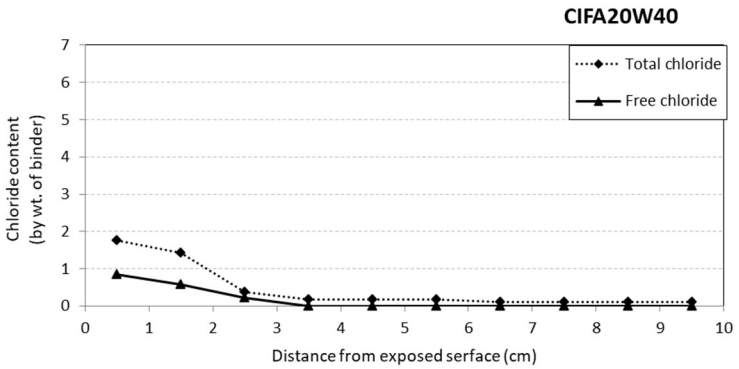


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

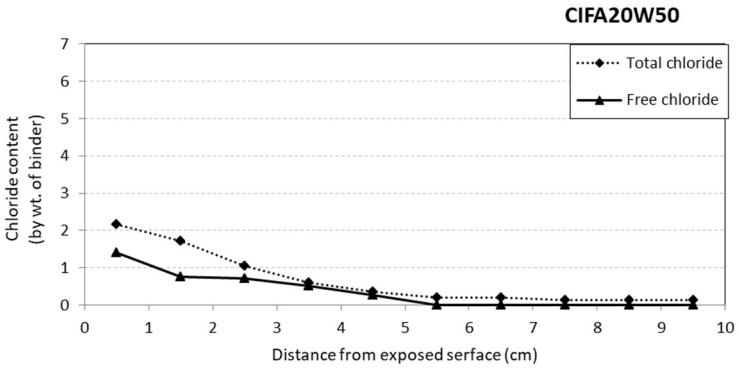


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

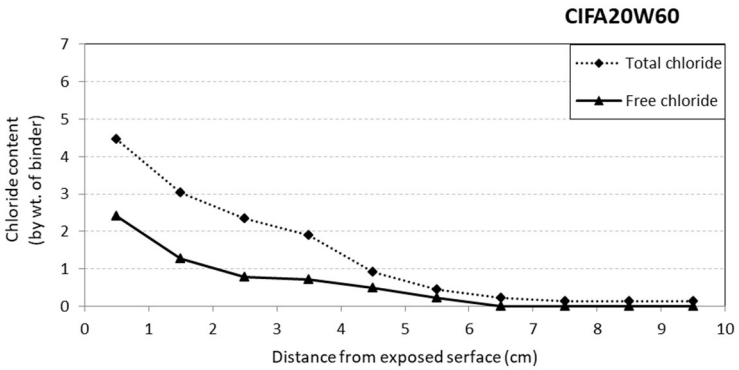
ภาพที่ 4-3 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต SCGPW40 SCGPW50 และ SCGPW60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

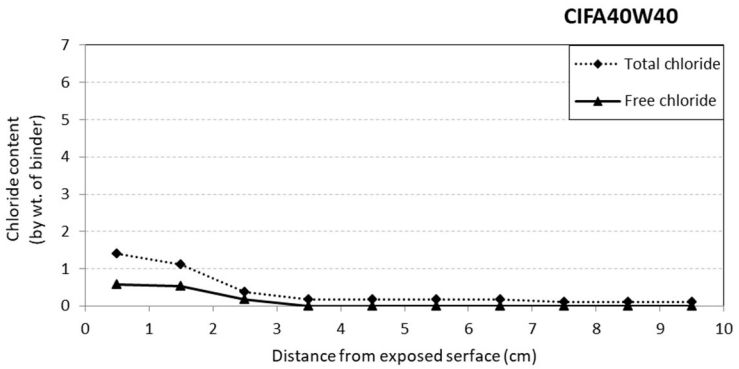


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

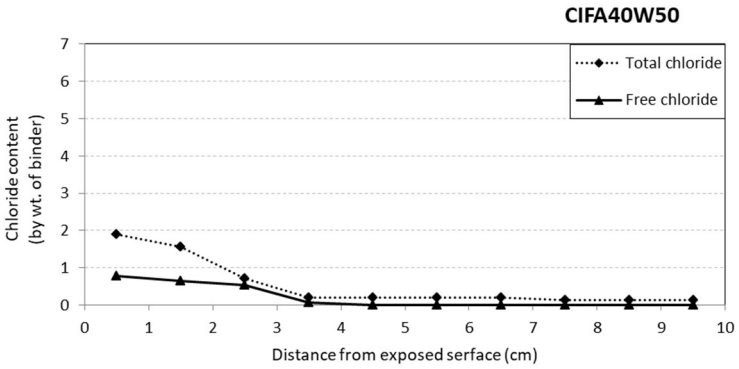


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

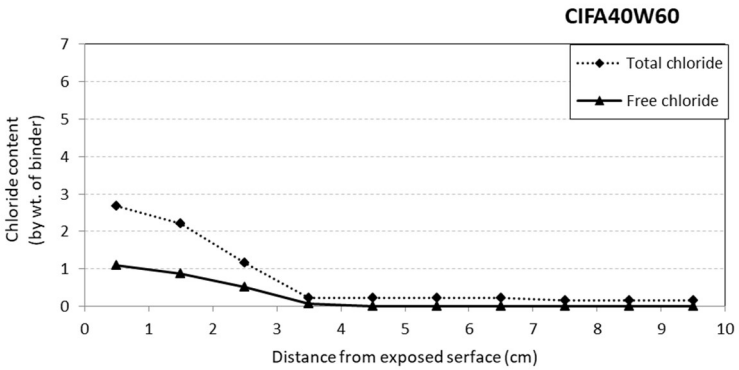
ภาพที่ 4-4 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CIFA20W40 CIFA20W50 และ CIFA20W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

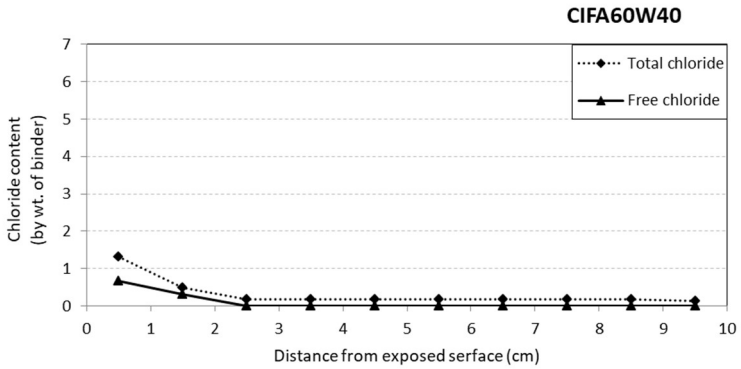


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

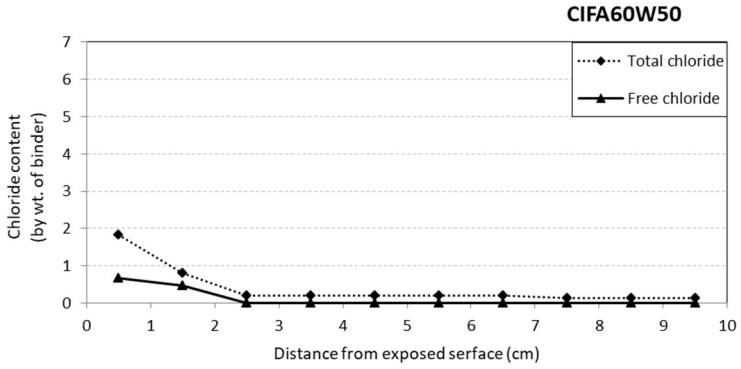


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

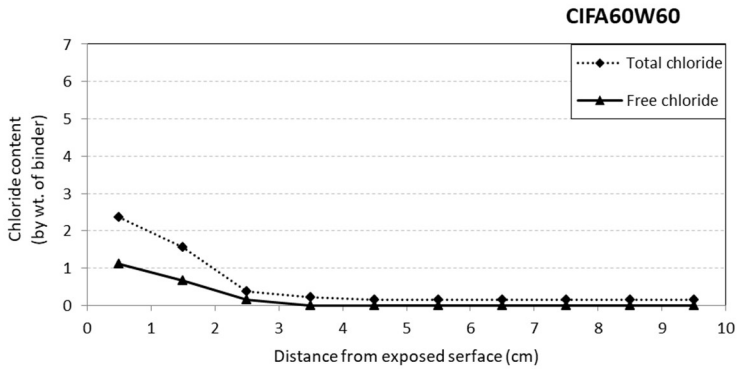
ภาพที่ 4-5 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CIFA40W40 CIFA40W50 และ CIFA40W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

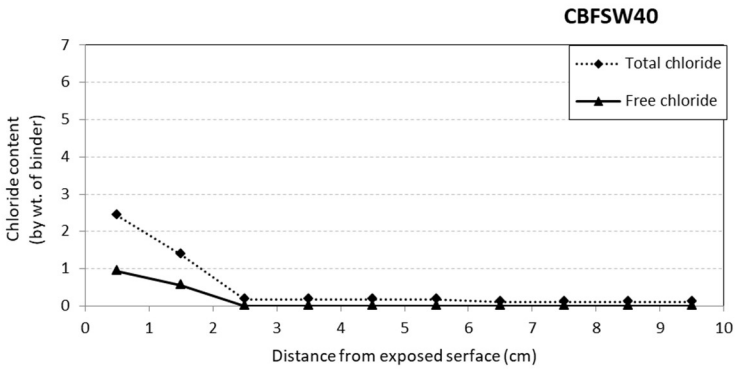


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

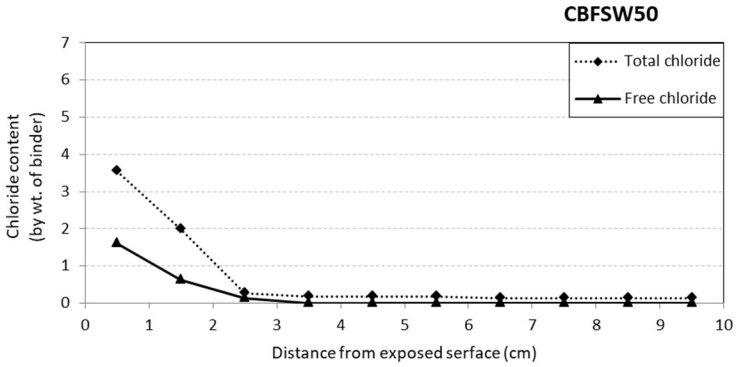


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

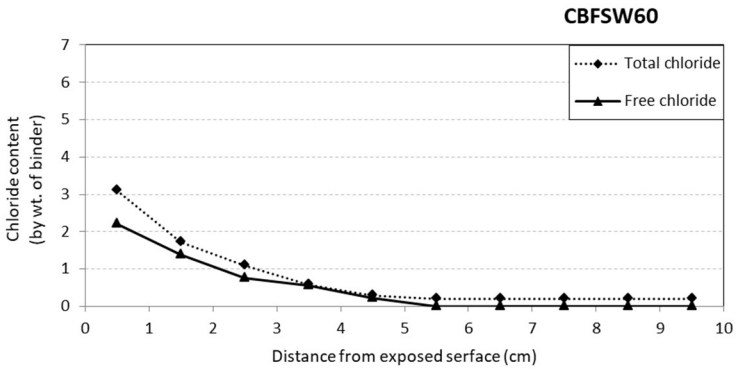
ภาพที่ 4-6 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CIFA60W40 CIFA60W50 และ CIFA60W60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



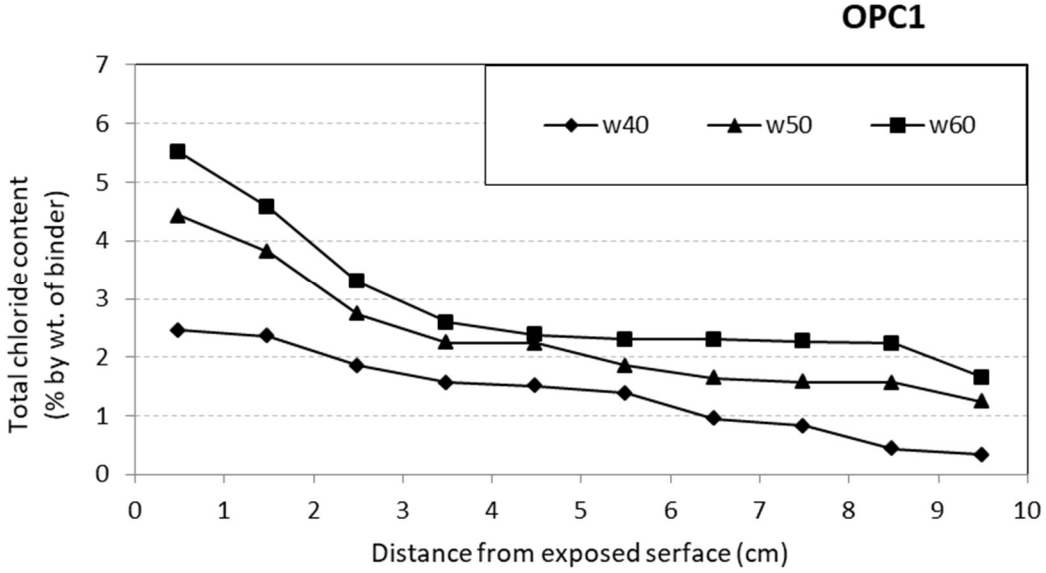
(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



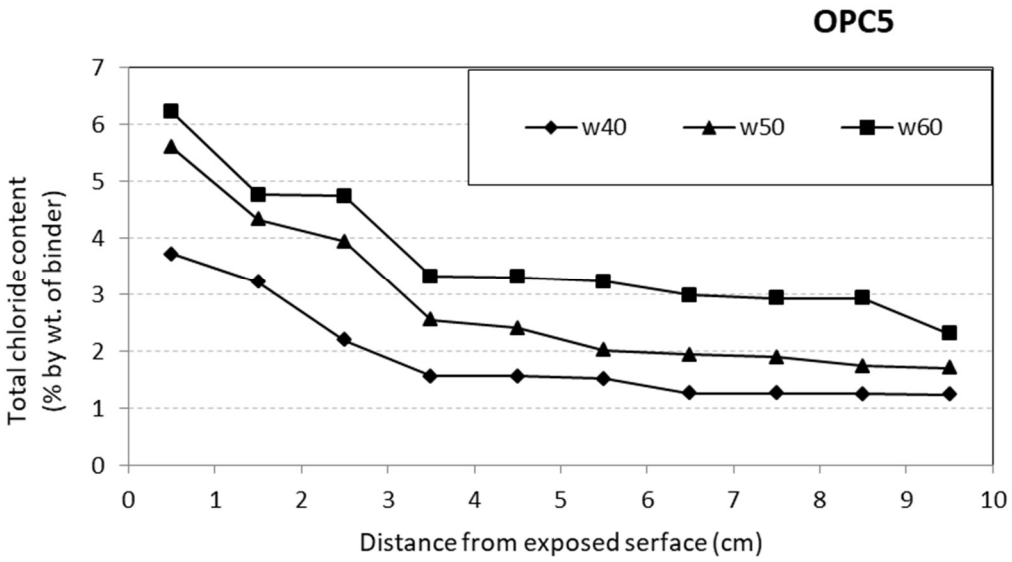
(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4-7 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของคอนกรีต CBFSW40 CBFSW50 และ CBFSW60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

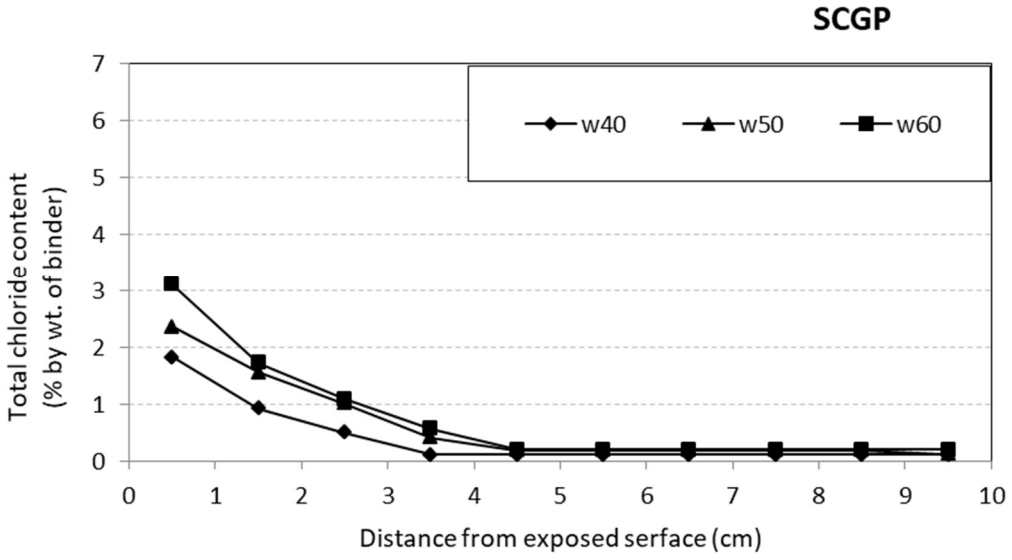
1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จากภาพที่ 4-8 ถึงภาพที่ 4-14 เปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดเดียวกันที่ส่วนผสมที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน คือ 0.40 0.50 และ0.60 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดน้อยกว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ และคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากที่สุด ดังนั้นจากค่าคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่มีปริมาณคลอไรด์ต่ำที่สุด จึงมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่มากกว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น เกิดจากการที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำนั้นมีความพรุนในคอนกรีตน้อย ทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงที่มีความพรุนมากกว่า และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานที่เป็นสารปอซโซลานจะมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนมาก เพราะสารปอซโซลานมีความละเอียดและมีความเป็นสารเติมเต็ม (Filler) ช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานนั้นมีความทึบน้ำมากขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานจึงมีการแทรกซึมคลอไรด์น้อยมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนอย่างเห็นได้ชัด



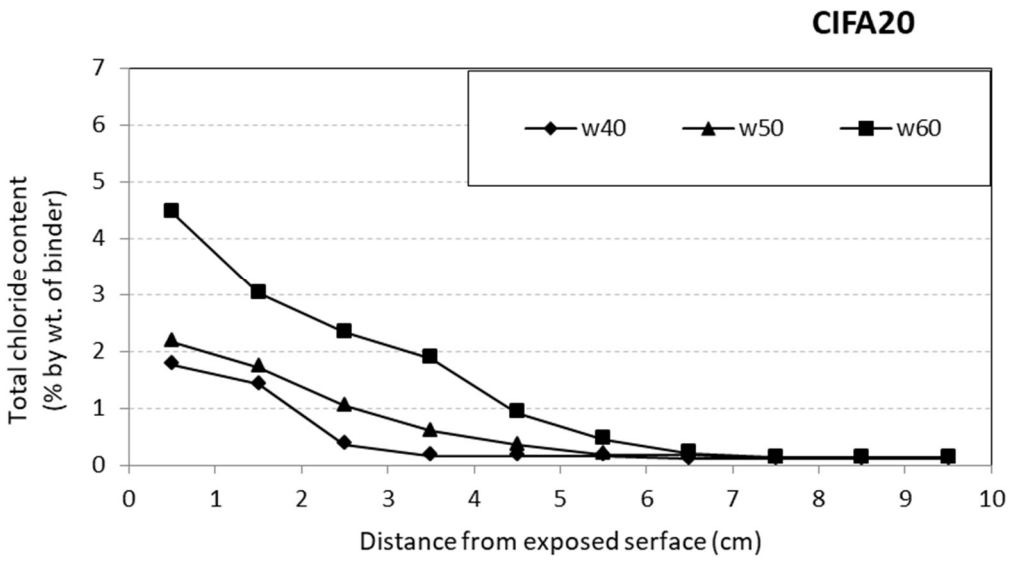
ภาพที่ 4-8 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (OPC1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



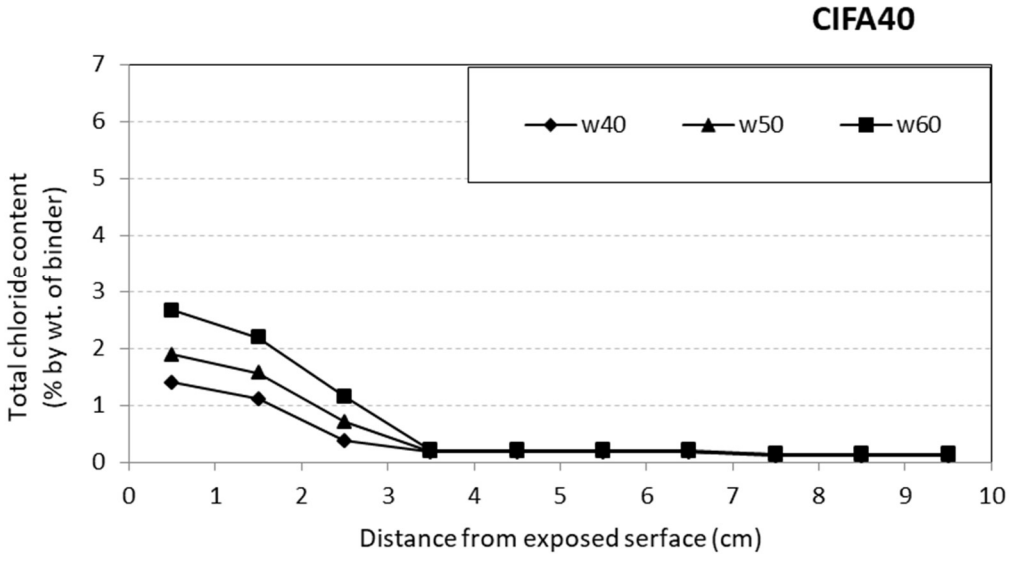
ภาพที่ 4-9 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน (OPC5) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



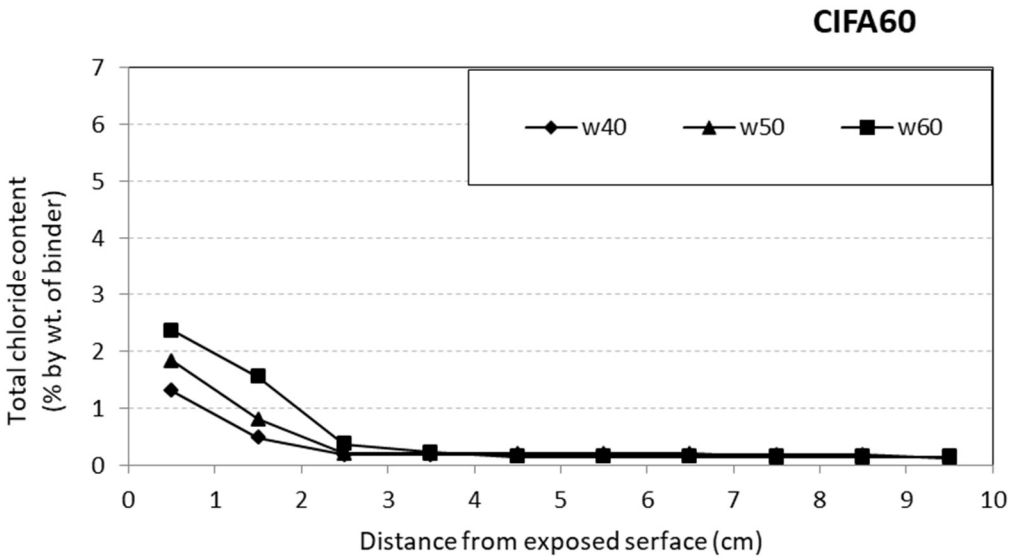
ภาพที่ 4-10 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



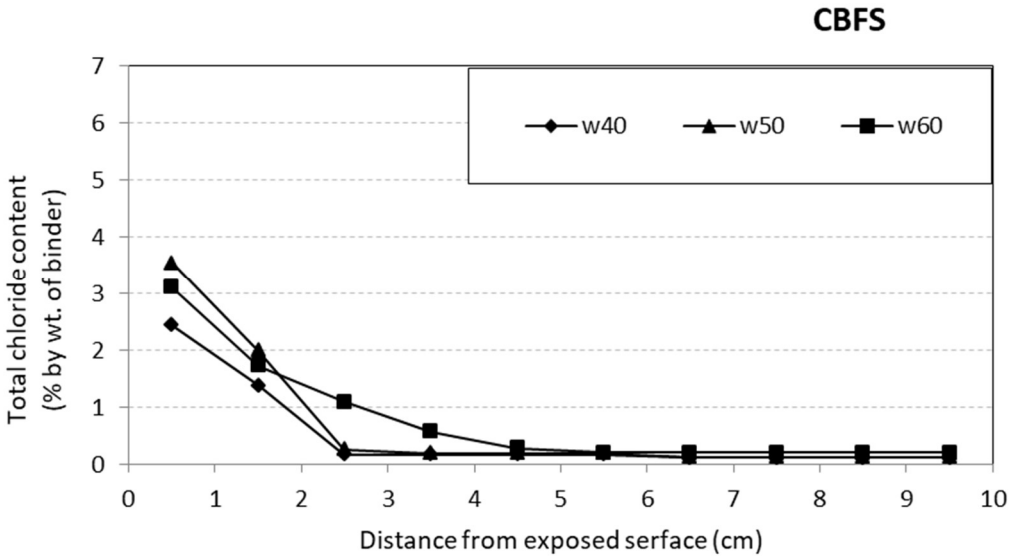
ภาพที่ 4-11 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน CIFA20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



ภาพที่ 4-12 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ของน้ำหนักวัสดุประสาน CIFA40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



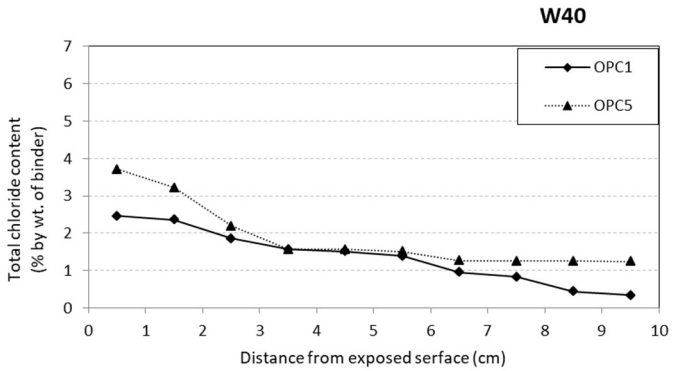
ภาพที่ 4-13 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 ของน้ำหนักวัสดุประสาน CIFA60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



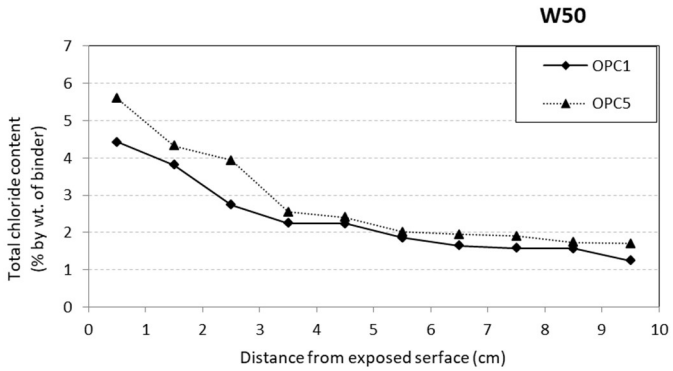
ภาพที่ 4-14 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก CBFS อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 0.5 และ 0.6 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

1.2 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ จากภาพที่ 4-15 ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันนั้น พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทั้ง 0.40 0.50 และ 0.60 ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตน้อยกว่า ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่มีส่วนช่วยยึดจับคลอไรด์ได้ ด้วยกระบวนการทางเคมีให้อยู่ในรูปของเกลือฟรีเดล (Friedal's salt) (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

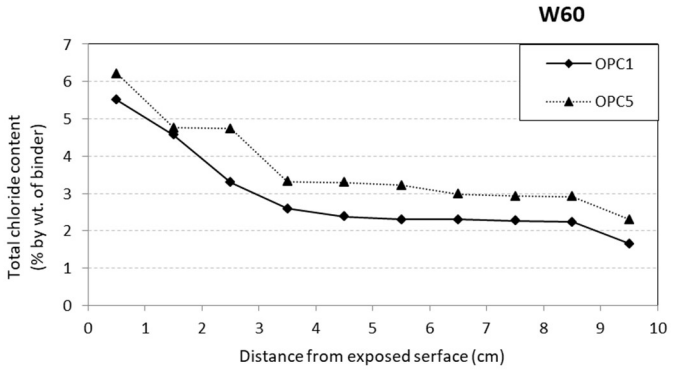
เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC1) กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS) ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน ในระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลที่ 7 ปีนั้น ให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน จากภาพที่ 4-16 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระดับความลึก 3 เซนติเมตร จากผิวหน้าของคอนกรีตนั้น คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) มีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก และมีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ผลการทดลองให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ จากผิวหน้าคอนกรีตถึงระยะ 3 เซนติเมตรนั้น คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เนื่องจากการที่คอนกรีตเผชิญอยู่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ซึ่งอาจเกิดการชะล้างของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตได้ รวมทั้งการชะล้างเนื่องจากน้ำฝน แต่เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกตั้งแต่ 3-10 เซนติเมตรขึ้นไปนั้น การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กจะมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก มีความละเอียดของผงเม็ดปูนซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงต้นมีมากกว่า จึงทำให้ช่วยลดโพรงช่องว่างในเนื้อของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในเนื้อของคอนกรีตจึงทำได้น้อยลง



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

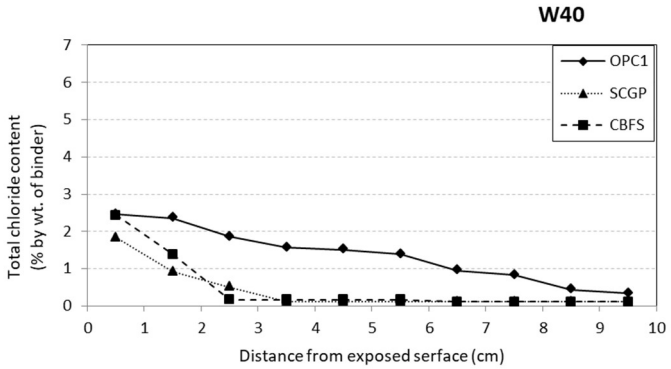


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

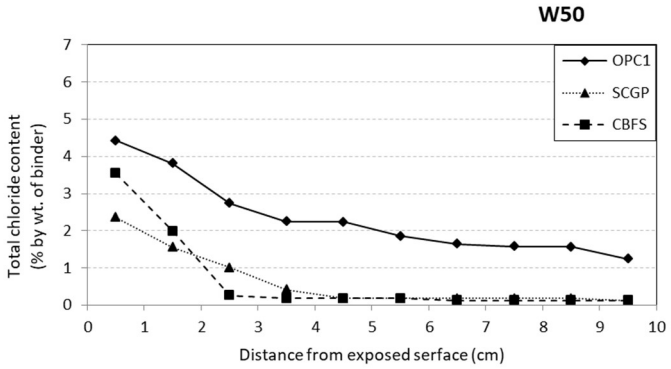


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

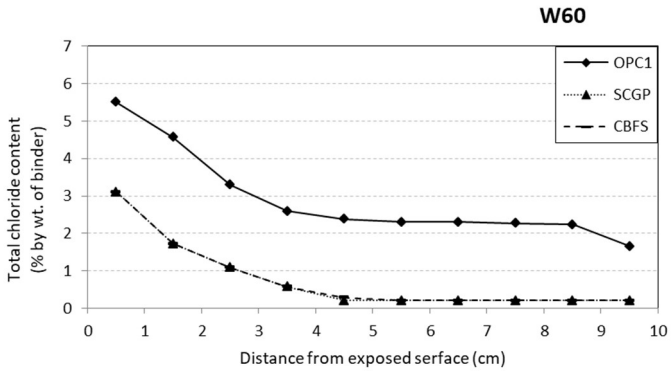
ภาพที่ 4-15 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

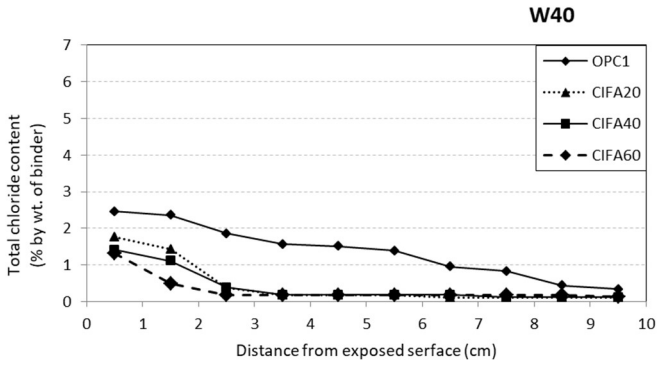


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

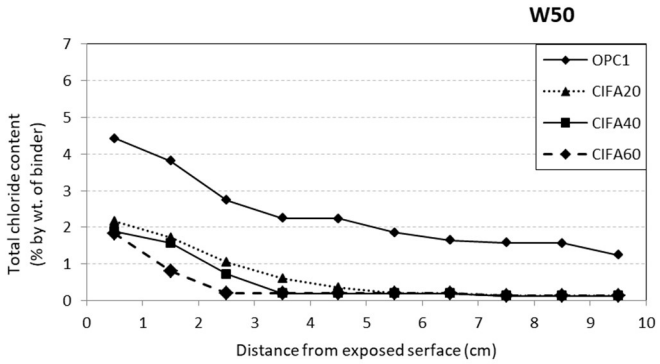
ภาพที่ 4-16 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร้อยละ 40 และ ร้อยละ 60 ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันนั้น จากภาพที่ 4-17 เมื่อพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยทั้งสามอัตราส่วนนั้นมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ทีน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระดับความลึก 3 เซนติเมตร จากผิวหน้าคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร้อยละ 40 และร้อยละ 60 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระดับความลึก 3 เซนติเมตรจากผิวหน้าคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 และร้อยละ 60 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด

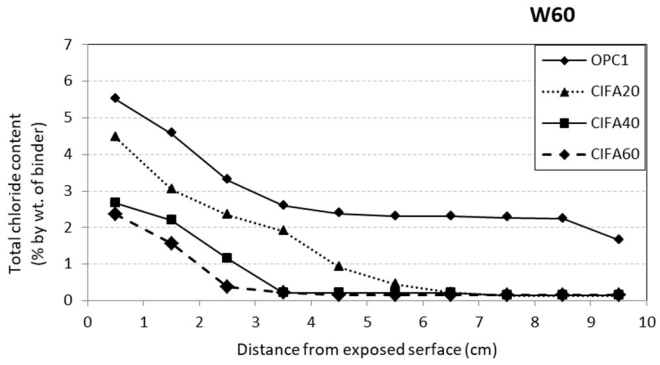
จากภาพที่ 4-18 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร้อยละ 40 และ ร้อยละ 60 ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันนั้น เมื่อพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 และเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยทั้งสามอัตราส่วนและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก 60 ที่ระดับความลึก 3 เซนติเมตร จากผิวหน้าคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มากที่สุด และที่ระดับความลึก 4 เซนติเมตร จากผิวหน้าของคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 และร้อยละ 60 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

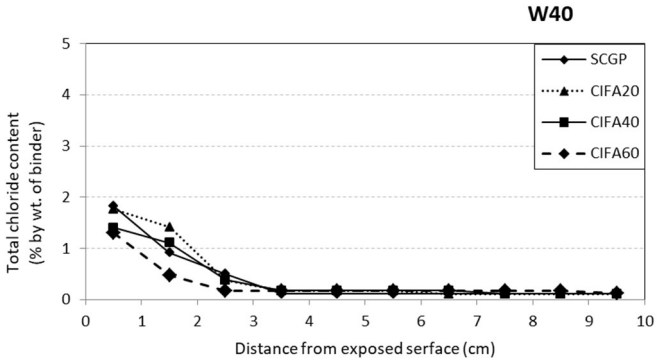


(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

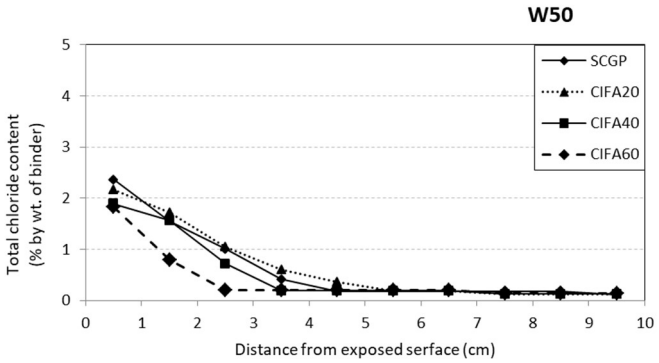


(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

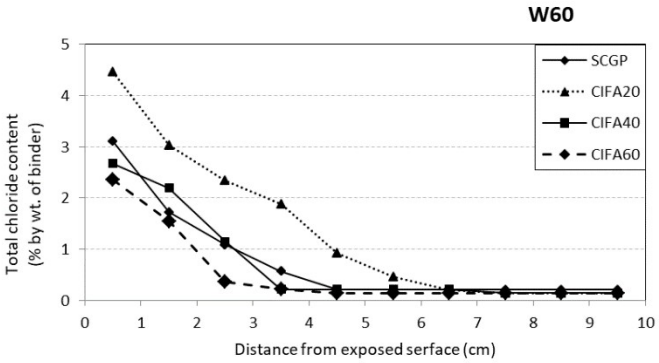
ภาพที่ 4-17 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ค) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

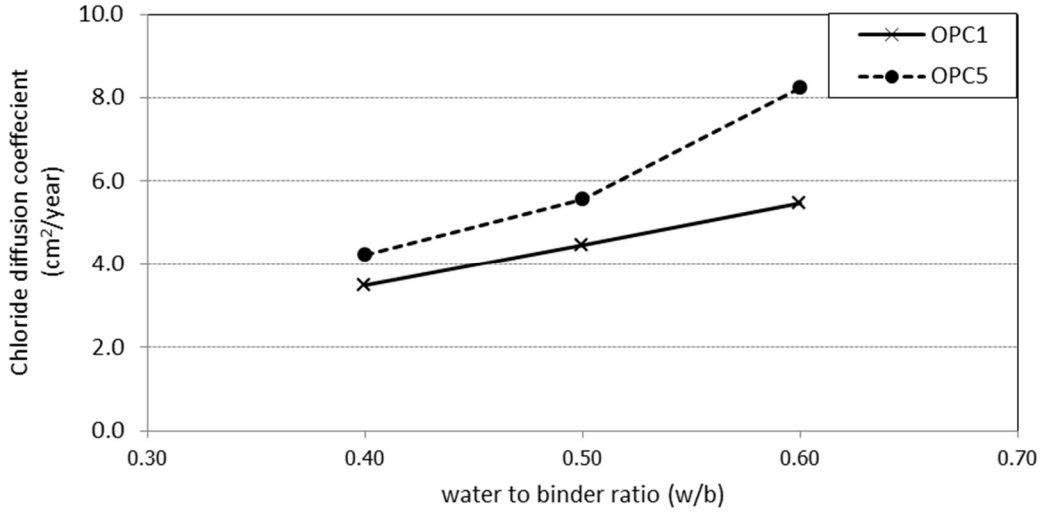
ภาพที่ 4-18 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

2. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

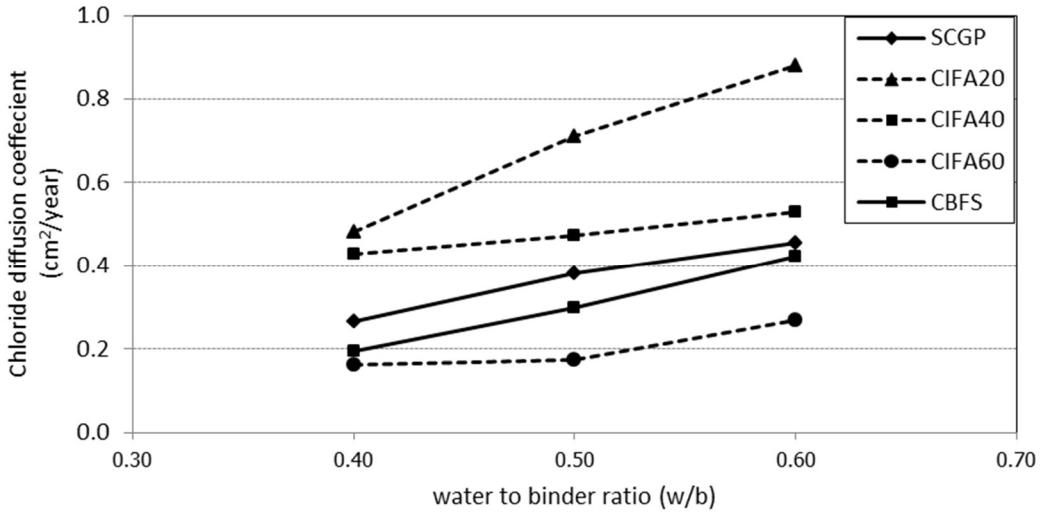
หลังจากได้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีตแล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จากภาพที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (OPC5) เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ส่วนผสมเดียวกัน พบว่า คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยที่สุด และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

จากภาพที่ 4-20 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 60 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS) เป็นวัสดุประสาน เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่น้อยที่สุด คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 เป็นวัสดุประสานตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 เป็นวัสดุประสาน มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมากที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นนั้น หมายถึงคอนกรีตนั้นมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4-19 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (OPC1) และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (OPC5)



ภาพที่ 4-20 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (SCGP) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 40 60 และปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก (CBFS) ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

กำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

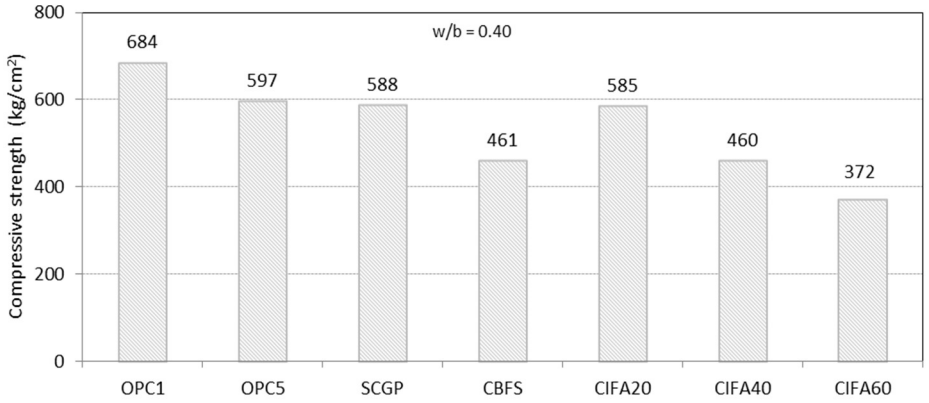
1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-21 เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดเดียวกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 จะพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ จะมีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ในทุกคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดเดียวกัน เนื่องจากการเติมน้ำเพิ่มขึ้นในสัดส่วนผสมของคอนกรีตนั้น ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต คือ ทำให้คอนกรีตมีช่องว่างภายในเนื่องจากน้ำหรือมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลทำให้คุณสมบัติการต้านทานกำลังอัดลดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

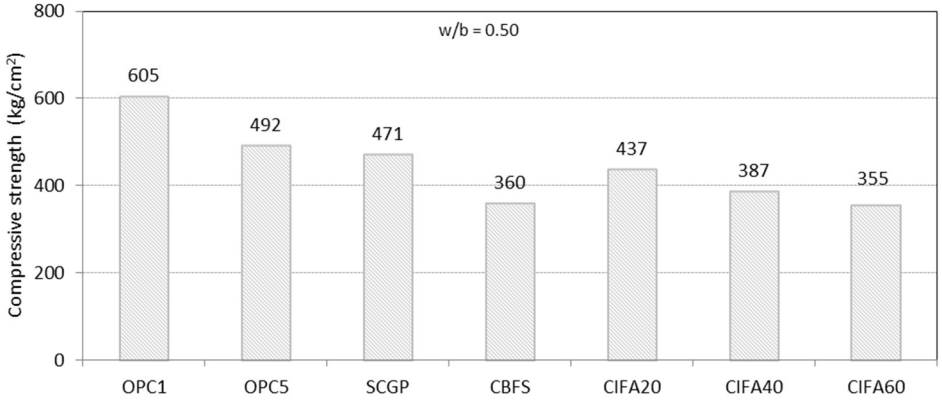
2. ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

จากภาพที่ 4-21 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 40 และ 60 เมื่อพิจารณาจากภาพ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีกำลังอัดมากที่สุด เนื่องจาก เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือ เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มาก จึงทำให้เกิด สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่เพิ่มการยึดประสานระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมที่ผสมในคอนกรีต จึงทำให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุด

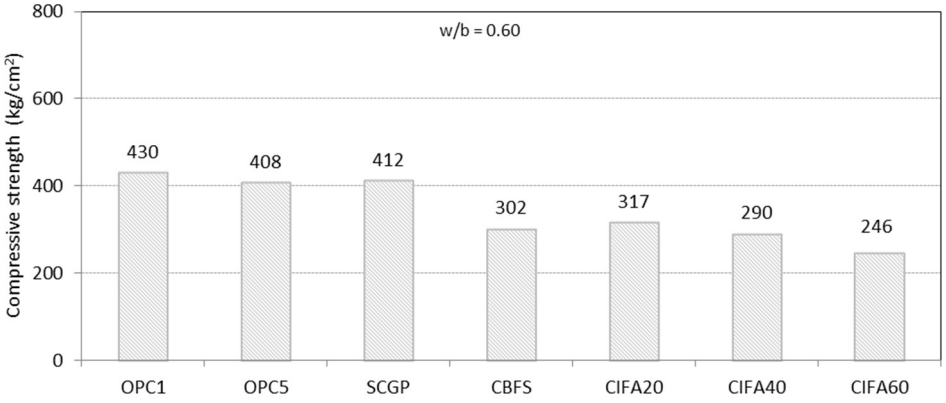
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เมื่อพิจารณาจากภาพ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุด



(ก) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



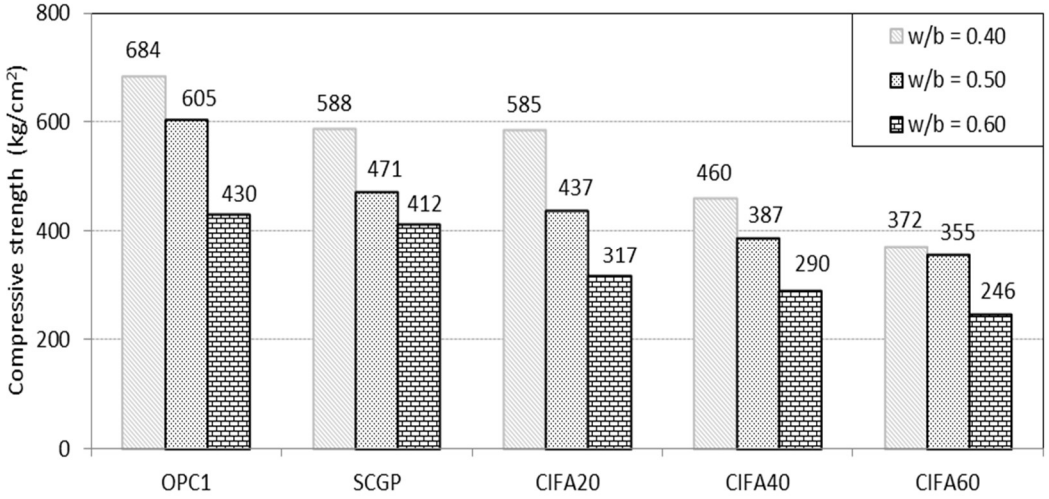
(ค) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4-21 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

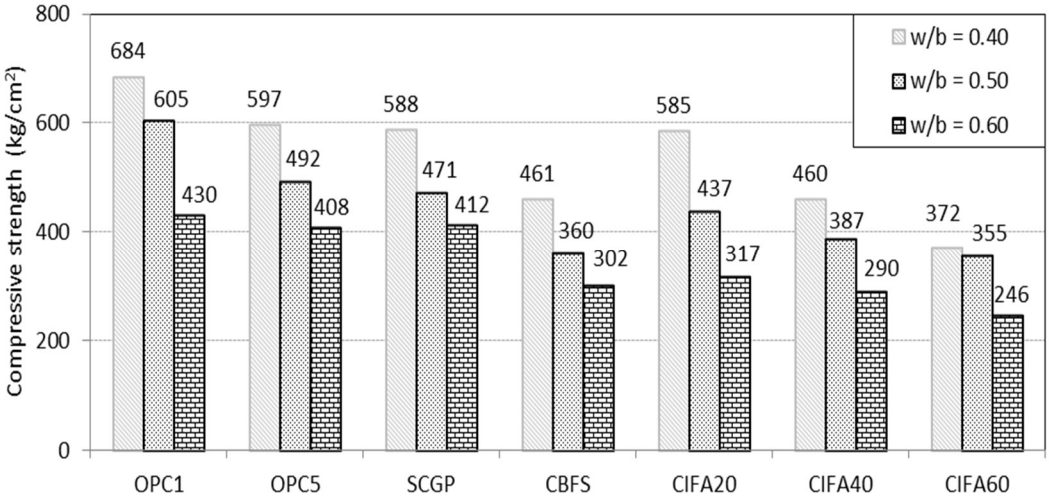
3. ผลกระทบของการแทนที่บางส่วนวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย

จากภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี เมื่อพิจารณาจากภาพ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มากกว่าจึงทำให้เกิด สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่ทำให้รับกำลังอัดได้ดี ส่วนในกลุ่มคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานนั้นมีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเถ้าลอยไม่ได้มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุประสาน และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานมากขึ้น จะพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจะลดต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในวัสดุประสานจะทำให้อัตราส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในคอนกรีตนั้นลดต่ำลง จึงทำให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี เมื่อพิจารณาจากภาพ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดมากที่สุด เช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังอัดให้กับคอนกรีต แต่ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนวัสดุประสานในปริมาณที่มากคือ ร้อยละ 40 และร้อยละ60 ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น (Chindaprasirt, Jaturapitakkul & Sinsiri, 2005) ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตลดต่ำลง



ภาพที่ 4-22 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

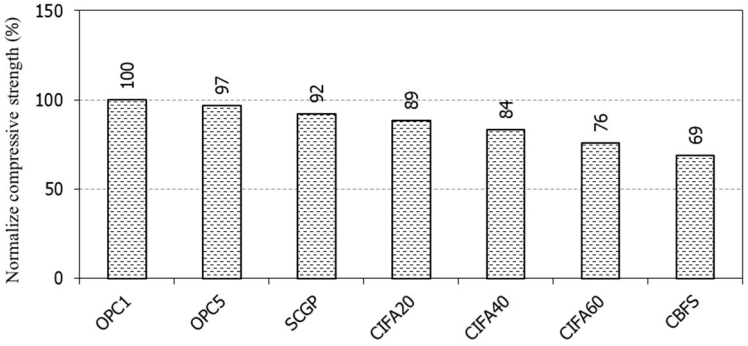


ภาพที่ 4-23 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

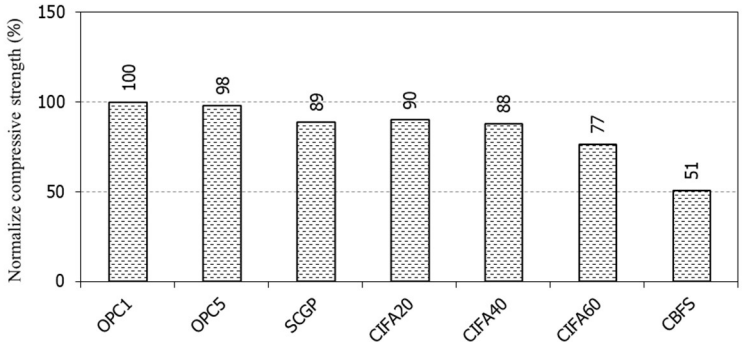
4. ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

จากภาพที่ 4-24 ถึง ภาพที่ 4-25 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน และ 7 ปี เมื่อพิจารณาจากภาพ 4-24 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่เวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มากที่สุดจึงทำให้ได้ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเยอะ จึงทำให้รับกำลังอัดได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี ส่วนในกลุ่มคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานมากขึ้น จะพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจะลดต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในวัสดุประสานจะทำให้อัตราส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตนั้นลดต่ำลง จึงทำให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลงด้วย ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานนั้น มีกำลังอัดถือว่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมมาก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 92 ของคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กนั้น มีกำลังอัดที่น้อยที่สุด โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 69 ของคอนกรีตควบคุม เนื่องจากสารปอซโซลานที่เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตต้องการผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นน้อย แต่เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก มีการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

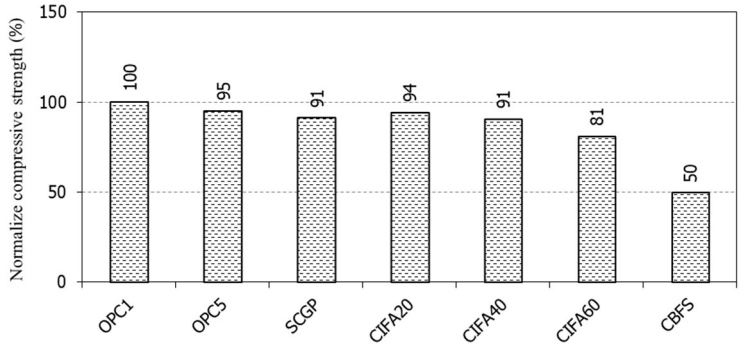
เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-25 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดมากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 96 ของคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กมีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 70 ของคอนกรีตควบคุม เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สารปอซโซลานทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมาก ซึ่งเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังอัดให้กับคอนกรีต



(ก) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน

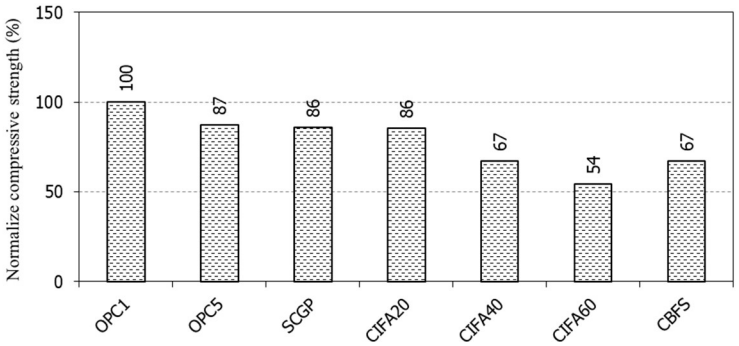


(ข) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน

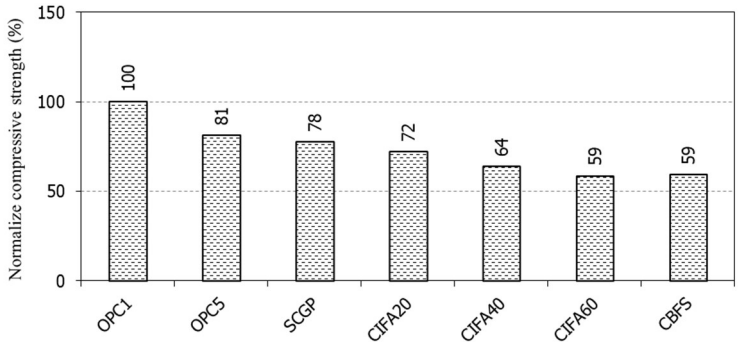


(ค) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน

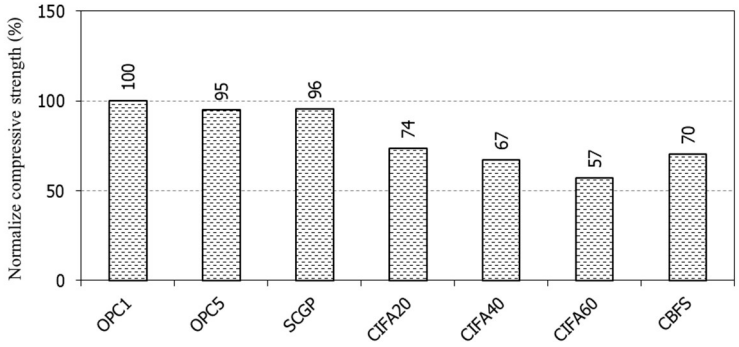
ภาพที่ 4-24 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 28 วัน



(ก) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ข) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



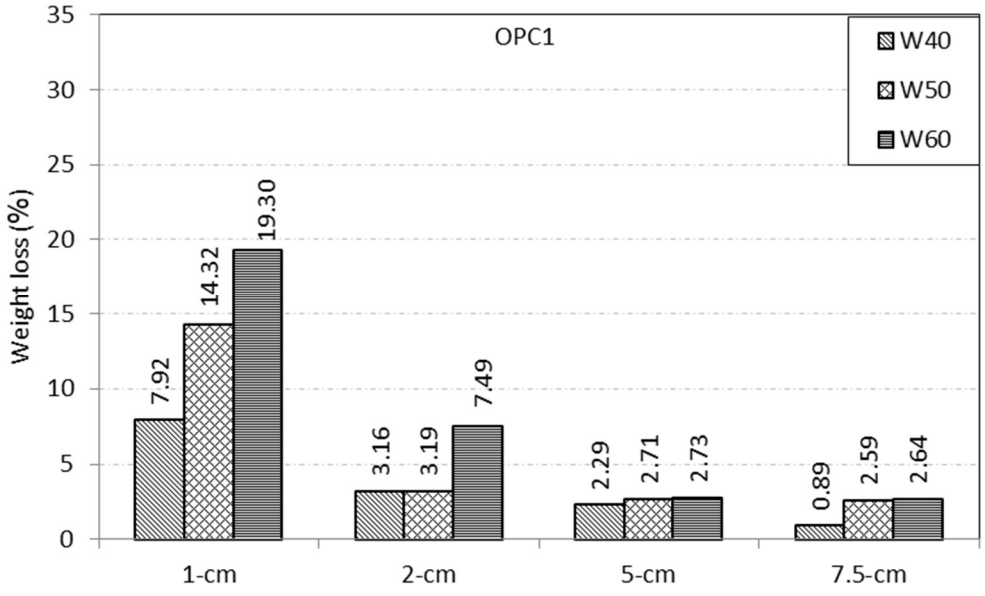
(ค) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

ภาพที่ 4-25 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

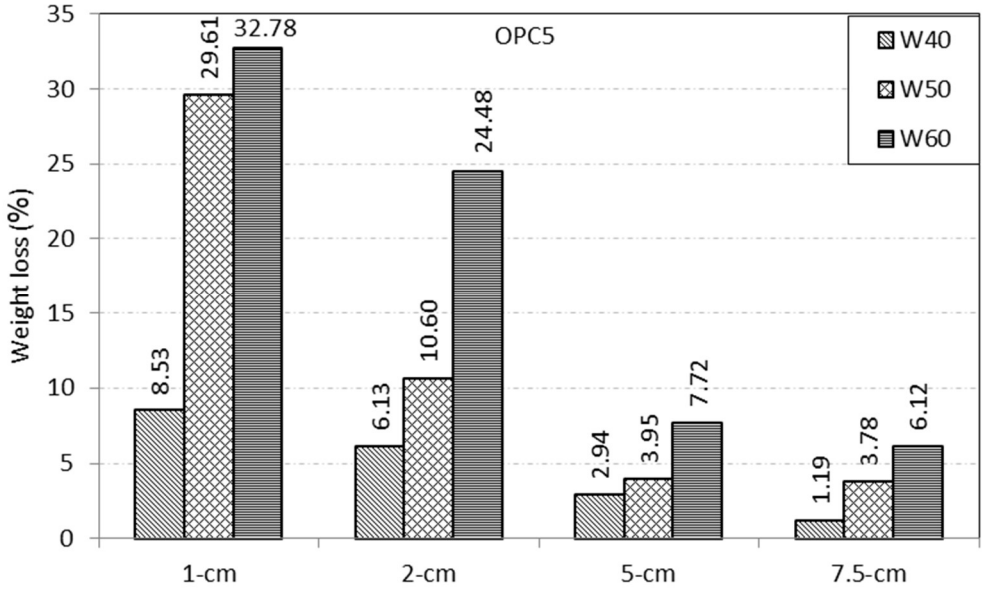
ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

1. การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

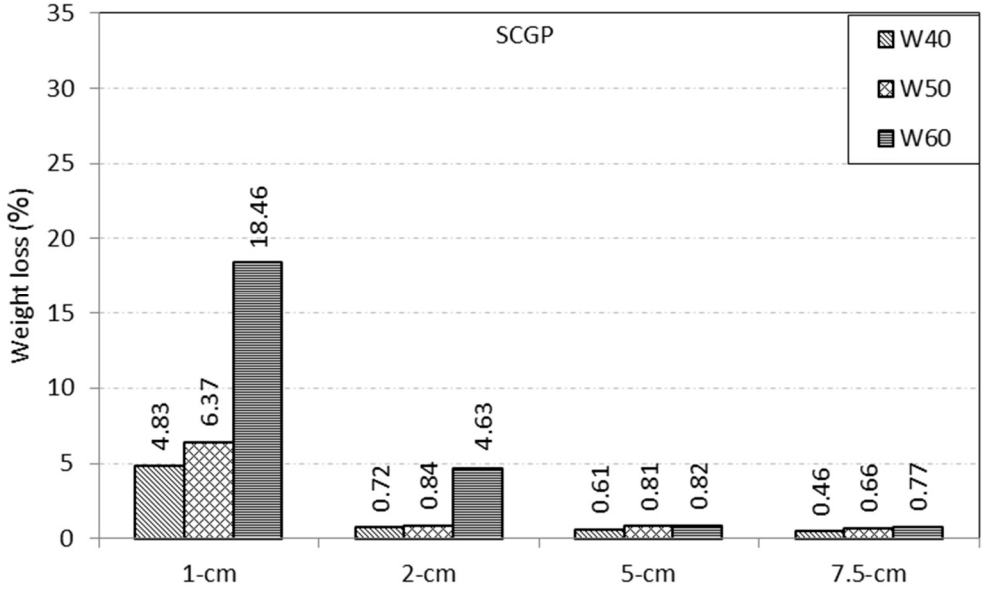
1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จากภาพที่ 4-26 ถึงภาพที่ 4-32 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่าง ๆ ในแต่ละภาพทำการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยที่ในระดับความลึกชั้นเดียวกัน พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มมากขึ้น คลอไรด์ในน้ำทะเลจึงแทรกซึมเข้าไปทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต และเมื่อพิจารณาที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) ที่มากขึ้น จะพบว่า ที่ระยะความลึกของเหล็กเสริมจากผิวหน้าของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะลดลง เป็นเพราะ เมื่อระยะจากผิวหน้าของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



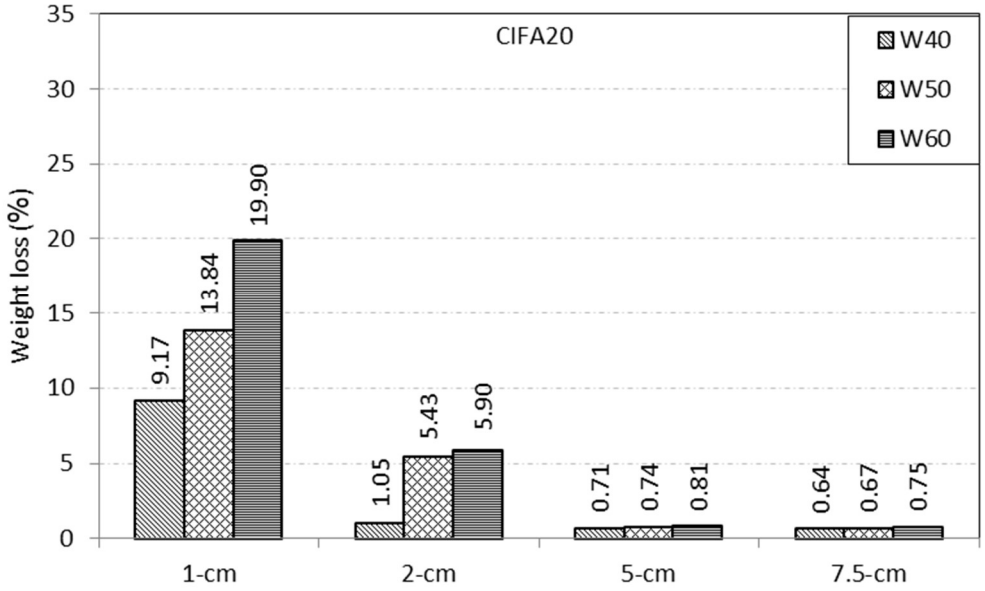
ภาพที่ 4-26 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



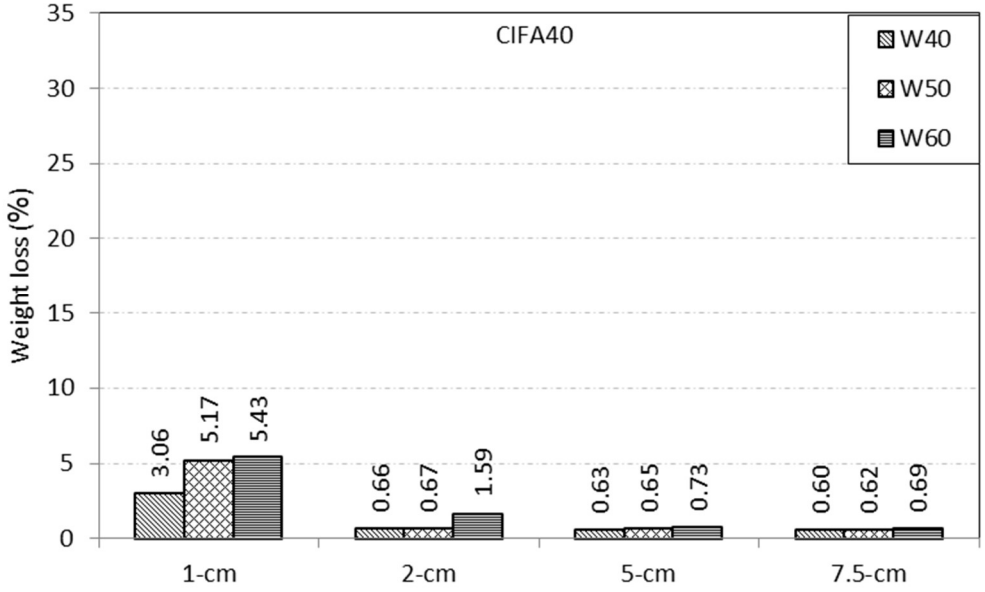
ภาพที่ 4-27 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



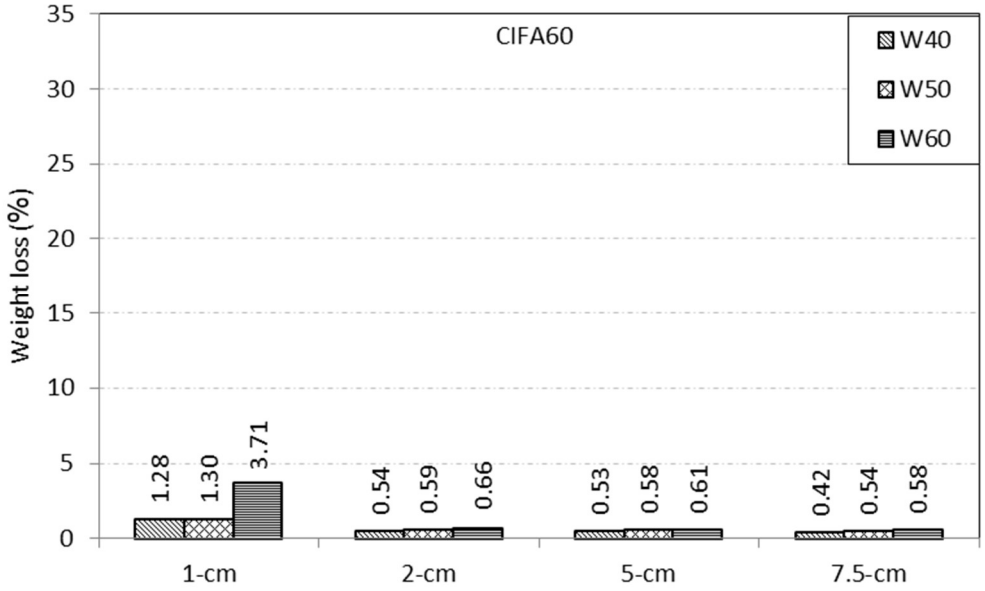
ภาพที่ 4-28 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



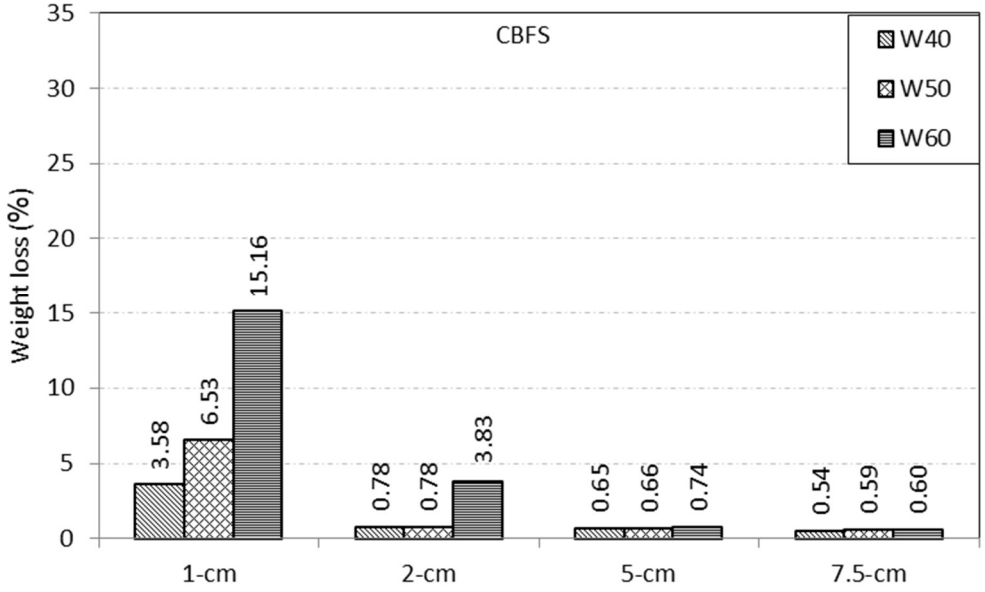
ภาพที่ 4-29 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



ภาพที่ 4-30 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



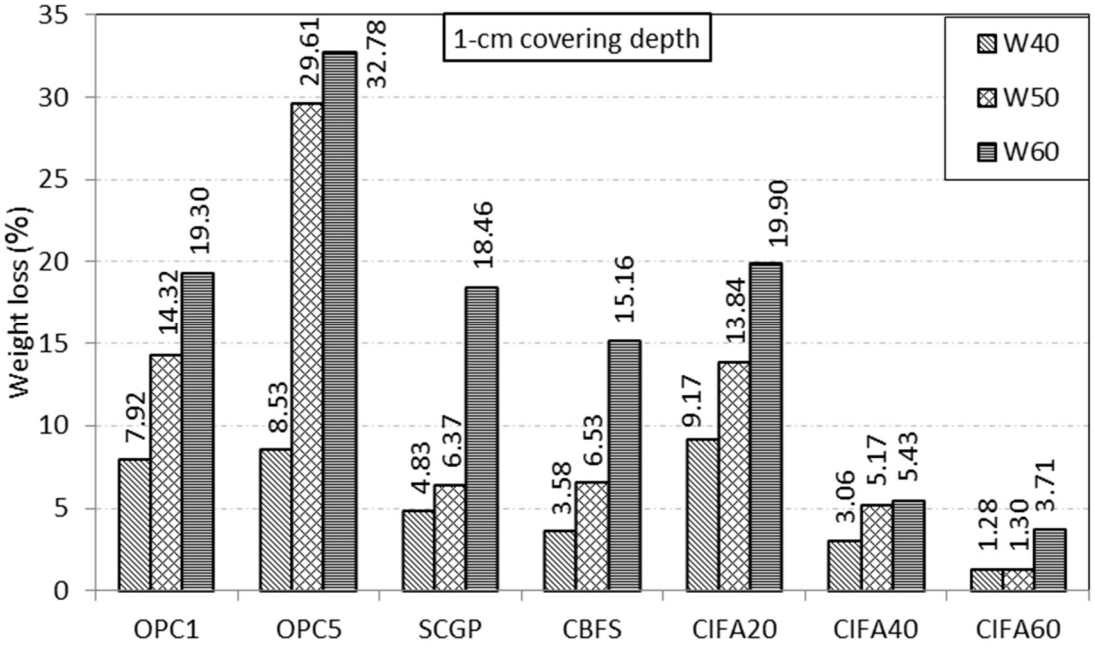
ภาพที่ 4-31 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



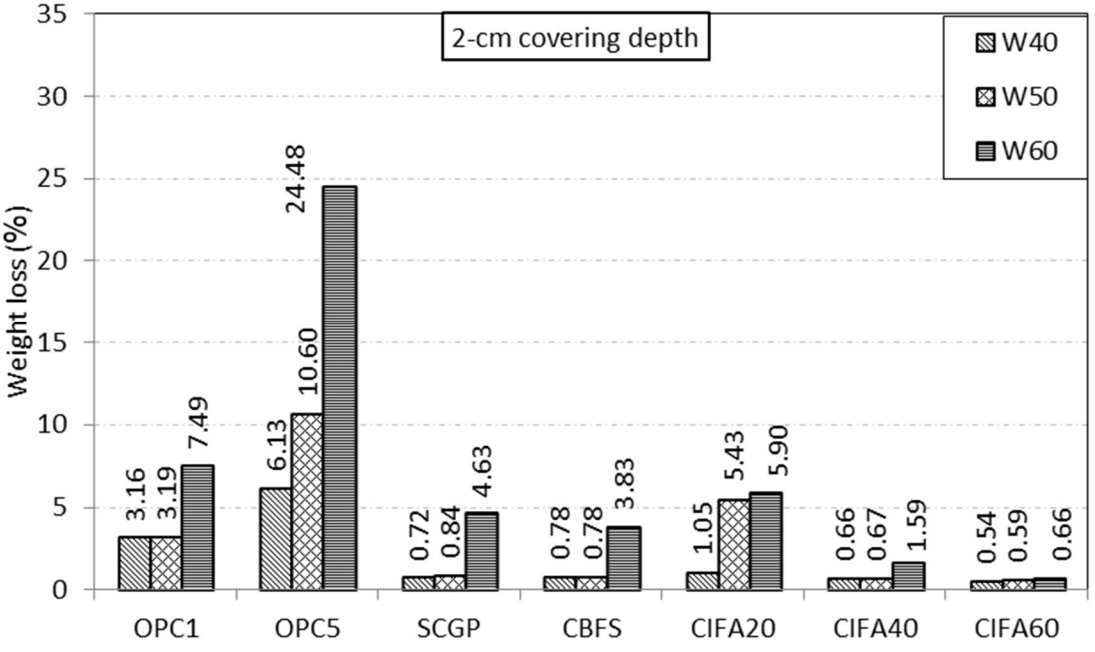
ภาพที่ 4-32 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

1.2 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ จากภาพที่ 4-33 เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 1 เซนติเมตร เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่ระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่น้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-34 เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 2 เซนติเมตร เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่ระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากที่สุดเช่นเดียวกับระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 1 เซนติเมตร รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 และ 60 ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันและน้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



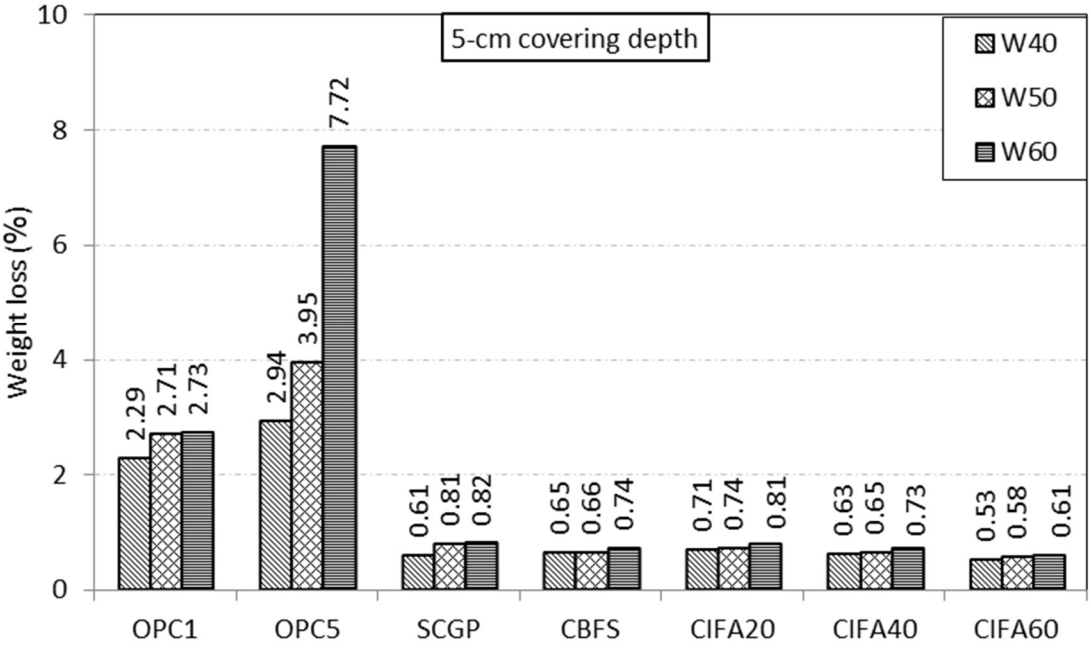
ภาพที่ 4-33 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 1 เซนติเมตร



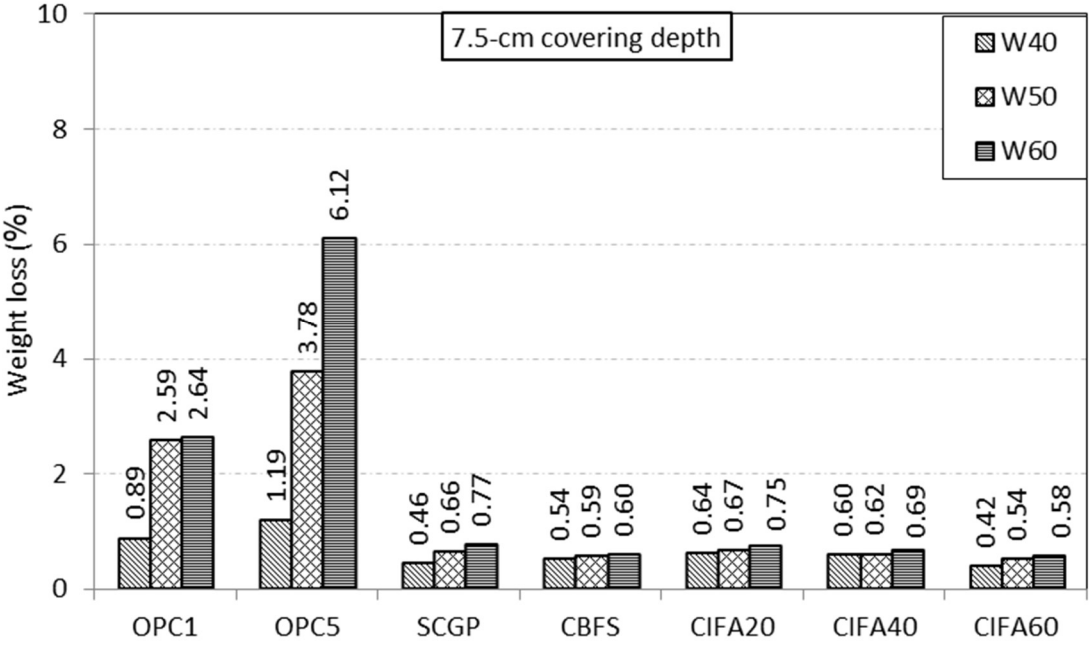
ภาพที่ 4-34 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 2 เซนติเมตร

จากภาพที่ 4-35 เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 5 เซนติเมตร เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่ระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตามด้วยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และกลุ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่น้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-36 เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 7.5 เซนติเมตร เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก ที่ระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตามด้วยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และกลุ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่น้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และมีแนวโน้มเดียวกับการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 5 เซนติเมตร และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าวัสดุประสานชนิดเดียวกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4-35 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 5 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-36 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 7.5 เซนติเมตร

OPC1W40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	7.92	3.16	2.29	0.89
OPC1W50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	14.32	3.19	2.71	2.59
OPC1W60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	19.30	7.49	2.73	2.64

ภาพที่ 4-37 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

OPC5W40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	8.53	6.13	2.94	1.19
OPC5W50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	29.61	10.60	3.95	3.78
OPC5W60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	32.78	24.48	7.72	6.12

ภาพที่ 4-38 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

SCGPW40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	4.83	0.72	0.61	0.46
SCGPW50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	6.37	0.84	0.81	0.66
SCGPW60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	18.46	4.63	0.82	0.77

ภาพที่ 4-39 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

CBFSW40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	3.58	0.78	0.65	0.54
CBFSW50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	6.53	0.78	0.66	0.59
CBFSW60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	15.16	3.83	0.74	0.60

ภาพที่ 4-40 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

CIFA20W40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	9.17	1.05	0.71	0.64
CIFA20W50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	13.84	5.43	0.74	0.67
CIFA20W60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	19.90	5.90	0.81	0.75

ภาพที่ 4-41 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

CIFA40W40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	3.06	0.66	0.63	0.60
CIFA40W50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	5.17	0.67	0.65	0.62
CIFA40W60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	5.43	1.59	0.73	0.69

ภาพที่ 4-42 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

CIFA60W40				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	1.28	0.54	0.53	0.42
CIFA60W50				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	1.30	0.59	0.58	0.54
CIFA60W60				
Depth (cm.)	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	3.71	0.66	0.61	0.58

ภาพที่ 4-43 ภาพถ่ายการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

บทที่ 5
สรุปผล

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำและมีอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าที่ระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงกว่าด้วย

2. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดน้อยลง ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิก ของสารปอซโซลานที่ใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต ทำให้โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตลดลงหรือทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

3. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนมากอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่า และมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่า

4. คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 60 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด และมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่น้อยที่สุด แต่มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำที่สุด

5. เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่เหมาะสม พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่ดี

โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มีกำลังอัดของคอนกรีตคิดเป็นร้อยละ 96 และ 70 ของคอนกรีตควบคุม และมีอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่น้อย

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป ดังนี้

1. เนื่องจากเถ้าลอยอาจจะมีแหล่งผลิตและที่มาต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงควรจะมีการศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยจากแหล่งอื่นต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต รวมทั้งความคงทนของคอนกรีตร่วมด้วย

2. ควรศึกษาการกระจายตัวของขนาดโพรงช่องว่าง (Pore size distribution) ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดต่าง ๆ เพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบผลกระทบของเถ้าลอยต่อโครงสร้างโพรงช่องว่างในคอนกรีต

บรรณานุกรม

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2555). *มยผ-1332-55 มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน.*

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2532). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล่ม 1: ข้อกำหนดคุณภาพ (มอก. 15-2532)*, กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. (2540). *ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต (วสท. 1014-40)*, พิมพ์ครั้งที่ 1, คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. (2543). *ความคงทนของคอนกรีต*, กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทอง จำกัด.

ทวีชัย สำราญวานิช และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2561). *การเสื่อมสภาพโครงสร้างคอนกรีต*, กรุงเทพฯ: บริษัท จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด. ISBN 978-616-468-647-2

ทวีชัย สำราญวานิช และ สุเธียรัตน์ จัว (2558). แบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, *2*, 25-37

นุสรา ขยันกิจ. (2558). *ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย.* วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. (2549). *คอนกรีตเทคโนโลยี*, 13, CPAC.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). *ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ คอนกรีต*, สมาคมคอนกรีตไทย.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). *เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)*, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน.

ปรีชา กาเพ็ชร, ชยันต์ ภักดีไทย, และ วินัย ศรวัติ. (2554). การหาพื้นที่ใบจากภาพถ่ายดิจิตอล. *แก่นเกษตร 39*, ฉบับพิเศษ, 392-397.

วสุ วิทยเขตปภา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2553). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15*, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล, ทวีชัย สำราญวานิช, และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร. (2551). *โครงการศึกษาวิจัยการสึกกร่อนของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากน้ำทะเล*, กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

สุพัตรา จินาวัฒน์ และ พิบูลย์ จินาวัฒน์. (2539). *Portland cement and technology เอกสารประกอบการอบรมผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ เล่ม 1*, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02

ASTM C1218, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02

ASTM C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02

ASTM G109-99a, Standard test method for determining the effects of chemical admixture on the corrosion of embedded steel in concrete exposed chloride environments. *Annual Book of ASTM Standards*, 03.02

Chalee, W. & Jaturapitakkul, C. (2009). Effects of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures*, *42*, 505-514.

Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., & Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in marine environment. *Construction and Building Materials*, *24*, 1352-1357.

Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., & Chalee, W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 years result under marine site. *Construction and Building Materials*, *37*, 693-698.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. & Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement & Concrete Composites*, *27*, 425-428.

Chindaprasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, H. T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, *21*, 356-361.

Oner, A. & Akyuz, S. (2007). An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, *29*, 505-514.

Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, *34*, 487-493.

Simcic, T., Pejovik, S., Schutter, G. D., & Bosiljkov, V. B. (2015). Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles. *Construction and Building Materials*, *93*, 1216-1223.

Thomas, M. D. A. (1996). Chloride thresholds in Marine concrete. *Cement and Concrete Research*, *26*, 513-519.

Thomas, M. D. A. & Bamforth, P. B. (1999). Modeling chloride diffusion in concrete Effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, *29*, 487-495.

Thomas, M. D. A. & Matthews, J. D. (2004). Performance of Pfa concrete in a marine environment 10-year results. *Cement &Concrete Composites*, *26*, 5-20.

Yeau, K.Y. & Kim, E. K. (2005). An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, *35*, 1391-1399.

Yigiter, H., Yazici, H., & Aydin, S. (2007). Effect of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete. *Building and environment*, *42*, 1770-1776.

Yildirim, H., Ilica, T., & Sengul, O. (2011). Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. *Construction and Building Materials*, *25*, 1282-1288.

ภาคผนวก

ข้อมูลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
เป็นระยะเวลา 7 ปี

ตารางภาคผนวก ก การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
OPC1 W40	1	2.46	1.77
	2	2.36	1.44
	3	1.86	1.27
	4	1.56	1.11
	5	1.50	1.00
	6	1.39	0.78
	7	0.95	0.61
	8	0.83	0.50
	9	0.44	0.22
	10	0.34	0.11
OPC1 W50	1	4.43	3.17
	2	3.81	2.11
	3	2.73	1.31
	4	2.25	1.18
	5	2.24	1.06
	6	1.85	0.93
	7	1.65	0.87
	8	1.58	0.75
	9	1.56	0.68
	10	1.24	0.50
OPC1 W60	1	5.51	3.59
	2	4.57	2.14
	3	3.29	1.31
	4	2.60	1.24
	5	2.38	1.10
	6	2.30	1.03
	7	2.30	0.97
	8	2.27	0.97
	9	2.23	0.83
	10	1.66	0.76

ตารางภาคผนวก ก (ต่อ)

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
OPC5 W40	1	3.71	1.77
	2	3.21	1.50
	3	2.20	1.39
	4	1.56	1.11
	5	1.56	1.05
	6	1.51	0.83
	7	1.26	0.72
	8	1.26	0.61
	9	1.25	0.50
	10	1.24	0.44
OPC5 W50	1	5.59	4.35
	2	4.32	2.80
	3	3.94	2.67
	4	2.55	1.68
	5	2.41	1.37
	6	2.02	1.24
	7	1.94	1.24
	8	1.90	1.12
	9	1.74	1.12
	10	1.70	0.99
OPC5 W60	1	6.21	4.76
	2	4.76	3.79
	3	4.74	2.90
	4	3.32	1.86
	5	3.30	1.66
	6	3.22	1.59
	7	2.98	1.38
	8	2.93	1.31
	9	2.92	1.31
	10	2.30	1.10

ตารางภาคผนวก ก (ต่อ)

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
SCGP W40	1	1.83	1.05
	2	0.92	0.55
	3	0.50	0.17
	4	0.11	0.00
	5	0.11	0.00
	6	0.11	0.00
	7	0.11	0.00
	8	0.11	0.00
	9	0.11	0.00
	10	0.11	0.00
SCGP W50	1	2.36	1.80
	2	1.56	0.75
	3	1.01	0.44
	4	0.41	0.19
	5	0.19	0.00
	6	0.19	0.00
	7	0.19	0.00
	8	0.19	0.00
	9	0.19	0.00
	10	0.12	0.00
SCGP W60	1	3.10	1.86
	2	1.72	0.97
	3	1.09	0.83
	4	0.57	0.41
	5	0.21	0.00
	6	0.21	0.00
	7	0.21	0.00
	8	0.21	0.00
	9	0.21	0.00
	10	0.21	0.00

ตารางภาคผนวก ก (ต่อ)

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
CIFA20 W40	1	1.77	0.85
	2	1.42	0.57
	3	0.37	0.23
	4	0.17	0.00
	5	0.17	0.00
	6	0.17	0.00
	7	0.11	0.00
	8	0.11	0.00
	9	0.11	0.00
	10	0.11	0.00
CIFA20 W50	1	1.41	0.59
	2	1.11	0.53
	3	0.38	0.18
	4	0.18	0.00
	5	0.18	0.00
	6	0.18	0.00
	7	0.18	0.00
	8	0.12	0.00
	9	0.12	0.00
	10	0.12	0.00
CIFA20 W60	1	1.30	0.66
	2	0.48	0.30
	3	0.18	0.00
	4	0.18	0.00
	5	0.18	0.00
	6	0.18	0.00
	7	0.18	0.00
	8	0.18	0.00
	9	0.18	0.00
	10	0.12	0.00

ตารางภาคผนวก ก (ต่อ)

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
CIFA40 W40	1	1.41	0.59
	2	1.11	0.53
	3	0.38	0.18
	4	0.18	0.00
	5	0.18	0.00
	6	0.18	0.00
	7	0.18	0.00
	8	0.12	0.00
	9	0.12	0.00
	10	0.12	0.00
CIFA40 W50	1	1.30	0.66
	2	0.48	0.30
	3	0.18	0.00
	4	0.18	0.00
	5	0.18	0.00
	6	0.18	0.00
	7	0.18	0.00
	8	0.18	0.00
	9	0.18	0.00
	10	0.12	0.00
CIFA40 W60	1	2.17	1.40
	2	1.72	0.77
	3	1.05	0.70
	4	0.60	0.51
	5	0.36	0.26
	6	0.19	0.00
	7	0.19	0.00
	8	0.13	0.00
	9	0.13	0.00
	10	0.13	0.00

ตารางภาคผนวก ก (ต่อ)

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
CIFA60 W40	1	1.30	0.66
	2	0.48	0.30
	3	0.18	0.00
	4	0.18	0.00
	5	0.18	0.00
	6	0.18	0.00
	7	0.18	0.00
	8	0.18	0.00
	9	0.18	0.00
	10	0.12	0.00
CIFA60 W50	1	2.17	1.40
	2	1.72	0.77
	3	1.05	0.70
	4	0.60	0.51
	5	0.36	0.26
	6	0.19	0.00
	7	0.19	0.00
	8	0.13	0.00
	9	0.13	0.00
	10	0.13	0.00
CIFA60 W60	1	1.89	0.78
	2	1.57	0.65
	3	0.72	0.52
	4	0.20	0.07
	5	0.20	0.00
	6	0.20	0.00
	7	0.20	0.00
	8	0.13	0.00
	9	0.13	0.00
	10	0.13	0.00

ตารางภาคผนวก ก (ต่อ)

Simple	Depth (cm)	Total Cl (% Cl by wt. of binder)	Free Cl (% Cl by wt. of binder)
CBFS W40	1	2.44	0.94
	2	1.39	0.55
	3	0.17	0.00
	4	0.17	0.00
	5	0.17	0.00
	6	0.17	0.00
	7	0.11	0.00
	8	0.11	0.00
	9	0.11	0.00
	10	0.11	0.00
CBFS W50	1	3.54	1.62
	2	1.99	0.62
	3	0.26	0.12
	4	0.19	0.00
	5	0.19	0.00
	6	0.19	0.00
	7	0.12	0.00
	8	0.12	0.00
	9	0.12	0.00
	10	0.12	0.00
CBFS W60	1	3.10	2.21
	2	1.72	1.38
	3	1.09	0.76
	4	0.57	0.55
	5	0.28	0.21
	6	0.21	0.00
	7	0.21	0.00
	8	0.21	0.00
	9	0.21	0.00
	10	0.21	0.00