

ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศไทย

ณัฐพล วงษ์วาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

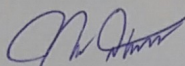
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์
ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ ณัฐพล วงษ์วาร เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

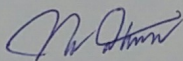


..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์

Warangkana S.

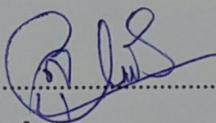
..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรางคณา แสงสร้อย)



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

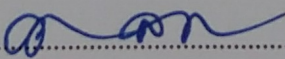
ชิตพร เชื้อสวัสดิ์

..... กรรมการ
(ดร. ชิตพร เชื้อสวัสดิ์)



..... กรรมการ
(ดร. สุนิสา คำสุข)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



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

วันที่ ๘ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย
สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง
และคอยเอาใจใส่ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของการศึกษาวิตานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจำเป็น
ต้องใช้หลักวิชาการด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ การใช้อุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติคอมพิวเตอร์ใน
ด้านต่าง ๆ ทั้งทางด้านกายภาพ และด้านเคมี

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง และบำรุงรักษา (Construction &
Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ขอขอบคุณครอบครัว และทุก ๆ คน ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา
สำหรับประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่คณาจารย์ ครอบครัว ตลอดจน
ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ณัฐพล วงษ์วาร

56910169: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์/ สิ่งแวดล้อมทะเล/ ปูนซีเมนต์/ ใต้อลอย/
ผงหินปูน/ เหล็กเสริม

ณัฐพล วงษ์วาร: ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

ภายใต้สิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศไทย (CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF
CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENT OF THAILAND) คณะกรรมการควบคุม

วิทยานิพนธ์: ทวีชัย สำราญวานิช, Ph.D., 193 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อม
ทะเล 4 ปี และ 5 ปี โดยพิจารณาผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ อัตราส่วนวัสดุประสาน
และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์
ของคอนกรีต พร้อมทั้งศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต และกำลังอัดคอนกรีตด้วย
เพื่อมุ่งหาส่วนผสมคอนกรีตที่คงทนต่อการแทรกซึมคลอไรด์และป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก
เสริม

จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ใต้อลอยแทนที่บางส่วนของ
ปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ตะกรันสูงเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม
ทะเลดีที่สุด โดยมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำมากและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิม
น้อย คอนกรีตที่ใช้ใต้อลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 60 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
0.40 มีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมต่ำมาก คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมี
ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ใต้อลอยและผง
หินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน คอนกรีตที่ใช้ใต้อลอยร้อยละ 35 และผงหินปูนร้อยละ 5 แทนที่
วัสดุประสาน มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์
ต่ำที่สุด และมีการเกิดสนิมของเหล็กน้อยที่สุด และมีค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ดี คอนกรีตที่มีส่วนผสม
ของใต้อลอยมีขนาดโพรงช่องว่างเฉลี่ยลดลงและความพรุนเพิ่มขึ้น แต่มีความสามารถต้านทาน
การแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

56910169 : MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORD : CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE/ MARINE ENVIRONMENT/
CEMENT/ FLY ASH/ LIMESTONE POWDER/ STEEL

NATTAPON WONGWAN: CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF
CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENT OF THAILAND. ADVISORY
COMMITTEE: TAWEECHAI SUMRANWANICH, Ph.D. 193 P. 2017.

This research aims to study chloride penetration resistance of concrete exposed to marine environment for 4 and 5 years. The effects of cement type, fly ash and limestone powder to binder ratio and water to binder ratio of concrete were considered in this study. In addition, corrosion of steel embedded in concrete and compressive strength of concrete were also studied. The objective is to determine durable concrete mixed for resisting chloride penetration and protecting steel from corrosion.

From the study results, it was found that concretes containing pozzolan cement, partial replacement of cement with fly ash and slag cement have the best resistance to chloride penetration in the marine environment. The chloride diffusion coefficient in concrete is very low and corrosion of steel in concrete is less. Concrete containing 60% fly ash replacement in concrete and water to binder ratio of 0.40 has very low corrosion of steel in concrete. Concrete containing partial replacement of cement with limestone powder has low chloride penetration resistance and compressive strength than concrete containing partial replacement of cement with fly ash and limestone powder. Concrete containing 35% fly ash and 5% limestone powder replacement of cement has the best chloride penetration resistance and lowest chloride diffusion coefficient with the least of corrosion of steel and good compression strength. Concrete with fly ash has smaller average pore diameter and higher porosity, but has better chloride penetration resistance than cement concrete.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	4
แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	4
ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต	4
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	7
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	10
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการแทรกซึมคลอไรด์	10
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต	15
ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	15
ค่าระดับความเข้มข้นวิกฤติ (Chloride Threshold) จากมาตรฐานก่อสร้าง ต่าง ๆ	16
ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าระดับคลอไรด์.....	18
การเพิ่มขึ้นของค่าระดับคลอไรด์วิกฤต.....	21
วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤต.....	22
การวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต.....	25
การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินวิจัย.....	33
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	33
วัสดุที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต.....	33
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้.....	47
วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	51
การเตรียมตัวอย่าง.....	51
สถานที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล.....	54
การทดสอบคอนกรีต.....	55
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	55
กำลังอัดคอนกรีต.....	59
ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตด้วยวิธี MIP.....	59
ความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642.....	60
การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	62
การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิม.....	63
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	64
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์.....	64
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ในน้ำทะเล.....	64
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	72
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน.....	76
ผลกระทบของอัตราส่วนหินปูนต่อวัสดุประสาน.....	79
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและหินปูนต่อวัสดุประสาน.....	81
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์.....	84
สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์.....	94
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล.....	94
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	95
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน.....	96

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยต่อวัสดุประสาน	97
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	97
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	98
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	99
กำลังอัดของคอนกรีต	100
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	100
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	101
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยต่อวัสดุประสาน	102
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	103
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	104
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	105
ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและความพรุน	106
พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม	110
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	110
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	111
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยต่อวัสดุประสาน	112
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	113
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	114
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	115
การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม	116
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ในน้ำทะเล	116
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	117
ผลกระทบของอัตราส่วนถั่วลอ่ยต่อวัสดุประสาน	118
ผลกระทบของอัตราส่วนผลหินปูนต่อวัสดุประสาน	119
ผลกระทบของอัตราส่วนผลถั่วลอ่ยและหินปูนต่อวัสดุประสาน	120
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	121
อายุการใช้งานที่ปลอดภัยซ่อมแซมของคอนกรีต	122

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล	124
สรุปผล.....	124
ข้อเสนอแนะ	125
บรรณานุกรม.....	127
ภาคผนวก	130
ภาคผนวก ก การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตของคอนกรีต	131
ภาคผนวก ข สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต.....	150
ภาคผนวก ค พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต.....	152
ภาคผนวก ง การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีต	162
ภาคผนวก จ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตของคอนกรีต.....	172
ภาคผนวก ฉ เหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 4 และ 5 ปี	174
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	193

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ 15
2-2	ระดับคลอไรด์วิกฤตที่สภาพการทดสอบต่าง ๆ 16
2-3	ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตตามมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ 18
2-4	การประเมินความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม โดยการทดสอบแบบ Half-cell potentials 18
3-1	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 40
3-2	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน..... 41
3-3	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ผสมตะกรันถลุงเหล็ก..... 42
3-4	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทะเล..... 42
3-5	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงหินปูนและเถ้าลอย 43
3-6	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและผงหินปูน 44
3-7	ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน เถ้าลอยและผงหินปูน 45
3-9	ขนาดคละของมวลรวมละเอียด..... 46
3-9	ขนาดคละของมวลรวมหยาบ 46
3-10	ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล..... 52
4-1	อายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีต..... 122

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	แผนผังแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต..... 5
2-2	ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก..... 7
2-3	กลไกการดึงคูดแบบคาพิลลารี 9
2-4	กลไกการดึงคูดอออนเข้าไปในคอนกรีต 9
2-5	ความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์..... 11
2-6	การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอ..... 12
2-7	กลไกการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก..... 13
2-8	แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต..... 14
2-9	การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์..... 22
2-10	รายละเอียดการหล่อตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109 24
3-1	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1..... 33
3-2	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5..... 34
3-3	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน 35
3-4	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบดร้อยละ 10 (SCGL10)..... 35
3-5	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบดร้อยละ 20 (SCGL20)..... 35
3-6	รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบด (Marine GGBFS)..... 36
3-7	ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอย..... 37
3-8	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของถ้ำลอย..... 37
3-9	ลักษณะทางกายภาพของผงหินปูน..... 38
3-10	ภาพถ่ายกำลังสูงของผงหินปูน..... 38
3-11	ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปอซโซลาน ถ้ำลอย และผงหินปูน..... 39
3-12	แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร..... 47
3-13	อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 47
3-14	เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร..... 48
3-15	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล..... 48
3-16	เครื่องผสมคอนกรีต 49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-17 เครื่องจีเขย่าคอนกรีต.....	49
3-18 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการวางเหล็กเสริม.....	51
3-19 บริเวณวางตัวอย่างและตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้ศาลาวัดโกมุทพัฒนาราม.....	55
3-20 เครื่องเจาะคอนกรีตขณะทำงาน และตำแหน่งเจาะเพื่อนำแท่งคอนกรีตมาทดสอบ.....	55
3-21 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะออกมาและการตัดแท่งตัวอย่าง	56
3-22 ครกใช้บดตัวอย่างและผงตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว	56
3-23 เครื่องไทดเรทอัด โนมิตด้วยวิธีจุกยุดีทางศักย์ไฟฟ้า	57
3-24 แท่งตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบกำลังอัด	59
3-25 แช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาความพรุนของเนื้อคอนกรีต	60
3-26 การอบตัวอย่างในตู้อบควบคุมอุณหภูมิ	61
3-27 การชั่งน้ำหนักแบบต่าง ๆ ในการทดสอบความพรุนคอนกรีต.....	61
3-28 ขนาดของแท่งเหล็กที่ฝังในก้อนตัวอย่าง.....	62
3-29 แท่งเหล็กที่เกิดสนิมและแผ่นกราฟที่ทำการระบายพื้นที่เกิดสนิมแล้ว.....	63
4-1 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	64
4-2 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	65
4-3 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	66
4-4 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	67
4-5 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	68
4-6 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	69
4-7 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-8 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	71
4-9 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	72
4-10 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	73
4-11 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	74
4-12 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบดที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	75
4.13 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	76
4.14 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	77
4.15 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	78
4-16 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-17 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	80
4-18 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	81
4-19 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	82
4-20 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	83
4-21 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	84
4-22 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	85
4-23 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	86
4-24 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี.....	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-25 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	88
4-26 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	89
4-27 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	90
4-28 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบด ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	91
4-29 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบด ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	91
4-30 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันถลุงเหล็กบด ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	92
4-31 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCG1 ผสมเถ้าลอยและ SCGSLAG ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญ สิ่งแวดล้อมทะเลต่าง ๆ	94
4-32 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเผชิญ สิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี.....	95
4-33 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตคอนกรีตที่มีเถ้าลอย (SCG1 FA20, SCG1 FA40, SCG1 FA60, SCGP และ SCG1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-34 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตคอนกรีตที่มีผงหินปูน (SCG1 L5, SCG1 L10 และ SCG1 L15) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี.....	97
4-35 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี.....	98
4-36 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี	99
4.37 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี	100
4-38 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี	101
4-39 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอย (SCG1 FA20, SCG1 FA40, SCG1 FA60, SCGP, SCG1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี	102
4-40 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีผงหินปูน (SCGL (intergrind), SCG1L5, SCG1L10, SCG1L15 และ SCG1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี.....	103
4-41 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี	104
4-42 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี.....	105
4-43 ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5 และ SCGP ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-44 ความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5 และ SCGP ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี ..	107
4-45 ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี ..	108
4-46 ความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี ..	109
4-47 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี ..	110
4-48 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี ..	111
4-49 ผลกระทบของอัตราส่วนแก้ลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้แก้ลอยแทนที่ร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี ..	112
4-50 ผลกระทบของอัตราส่วนหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี ..	113
4-51 ผลกระทบของอัตราส่วนแก้ลอยและหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี ..	114
4-52 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ (SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA) ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลที่ 4 และ 5 ปี ..	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-53 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี	116
4-54 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี	117
4-55 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี.....	118
4-56 ผลกระทบของอัตราส่วนผลหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี.....	119
4-57 ผลกระทบของอัตราส่วนผลเถ้าลอยและหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี.....	120
4-58 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี	121
4-59 อายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตประเภทต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 เซนติเมตร.....	123

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมทางทะเล (Marine environment) ในประเทศไทย เป็นโครงสร้างคอนกรีตที่มีการเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร ซึ่งเกิดจากความเสียหายจากการแทรกซึมของคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยคลอไรด์จะทำการแทรกซึมผ่านเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และเนื้อคอนกรีต ทำให้เกิดสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ เช่น การสึกกร่อนของเหล็กเสริมจากสนิม เนื้อคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าว และหลุดออกเป็นแผ่นเป็นต้น ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่ลดลง เกิดการสูญเสียงบประมาณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ซ่อมแซม และบำรุงรักษาโครงสร้างเหล่านี้เป็นจำนวนมาก และอีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญ คือ ผู้ที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้างยังขาดความรู้และความเข้าใจในการออกแบบการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทางทะเล ดังนั้น การป้องกันการแทรกซึมคลอไรด์เป็นสิ่งจำเป็น และมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อไม่ให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศไทยเกิดความเสียหาย และเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความคงทนของคอนกรีตต่อการแทรกซึมคลอไรด์ โดยพิจารณาจากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ เทียบกับระยะทางผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งการที่ค่าแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตต่ำ บ่งบอกว่าส่วนผสมคอนกรีตที่เลือกใช้มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่เสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศไทยมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม กำลังอัด และความพรุนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบต่าง ๆ เพื่อหาความคงทนของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานประเภทต่าง ๆ ในส่วนผสมของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
2. เพื่อศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
3. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
4. เพื่อศึกษาขนาดโพรงช่องว่างและความพรุนของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดประเภทต่าง ๆ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และได้ศึกษาการใช้สารปอชโซลาน เช่น แก้วลอย และวัสดุเติมเต็มช่องว่าง เช่น ผงหินปูน แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตด้วย

โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะหุ้มเหล็กเสริม 4 ค่า คือ 1 2 5 และ 7.5 เซนติเมตร สำหรับฝังแท่งเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SR 24 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 3 ค่า คือ 0.40 0.50 และ 0.60 ทำการบ่มคอนกรีต 28 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปวางบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) เพื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี เมื่อครบระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 ปี และ 5 ปี จึงทำการเก็บตัวอย่างมาทดสอบ โดยทำการเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และนำแท่งเหล็กที่ฝังไว้มาทดสอบหา

1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 และปริมาณคลอไรด์อิสระ ตามมาตรฐาน ASTM C1218 ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีตที่เผชิญน้ำทะเล
2. การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิม ตามมาตรฐาน ASTM G1
3. กำลังอัดคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39
4. ขนาดโพรงช่องว่างภายในของคอนกรีต ด้วยวิธี MIP
5. ความพรุนของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 642

ทั้งนี้พิจารณาผลทดสอบที่ได้กับผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 ปี 2 ปี และ 3 ปี ประกอบกันด้วย

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ใช้วัสดุประสานประเภทต่าง ๆ
2. ทำให้ทราบถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และลักษณะการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากสนิมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ใช้วัสดุประสานประเภทต่าง ๆ
3. ทำให้ทราบกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ใช้วัสดุประสานประเภทต่าง ๆ
4. ทำให้ทราบถึงขนาดโพรงช่องว่างภายในและความพรุนของคอนกรีต ใช้วัสดุประสานประเภทต่าง ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์ในคอนกรีตพบได้ 2 แหล่ง ได้แก่ คลอไรด์ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตเอง ซึ่งได้มาจากวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เช่น หิน ทราช โดยเฉพาอย่างยิ่ง หิน และทราชบริเวณใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) มีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว และคลอไรด์ที่มาจากโครงสร้างคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเลจากดิน หรือเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2543)

สำหรับประเทศไทย โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลจะถูกทำลายโดยเกลือคลอไรด์ซึ่งเป็นสาเหตุหลัก เนื่องจากในน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์มากกว่า 90% เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟต ทำให้เกลือคลอไรด์เข้าไปทำลายโครงสร้างเหล็กของคอนกรีตจนเกิดสนิม และทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเสื่อมสภาพได้ง่าย ไร่ก็ตามสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา แม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่เกิดขึ้น

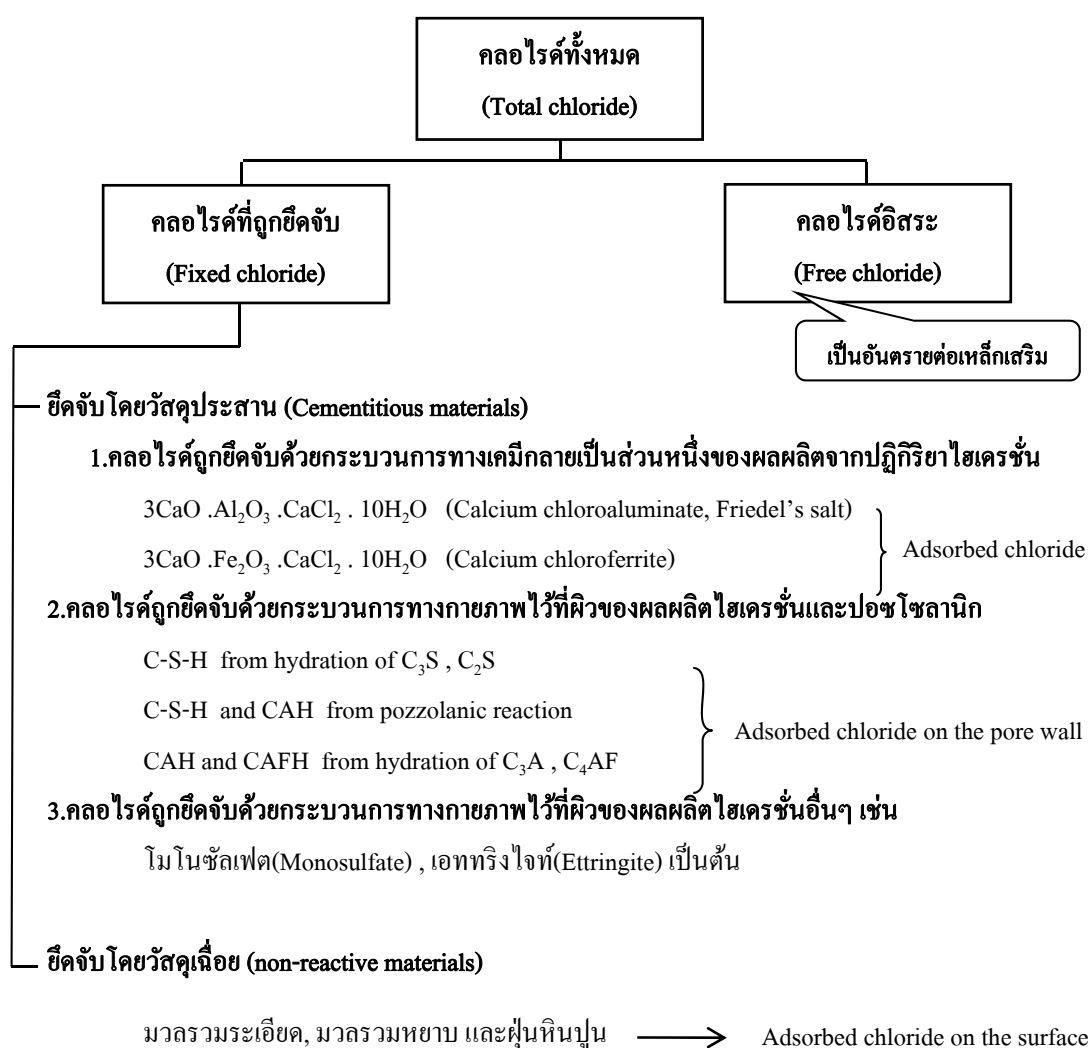
ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยเข้าด้วยกัน เช่น ชนิดปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสิ่งแวดล้อมที่เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตเกิดจากผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท (ภาพที่ 2-1) สามารถจำแนกประเภทของคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีต ได้ดังนี้

1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับด้วยกลไกดังต่อไปนี้ คือ Chemical binding คลอไรด์บางส่วนถูกจับยึดโดยผลผลิตที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Friedal's salt) หรือ $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Calcium chloroferrite) และ Physical binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกจับยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ตาม

ผิว หรือโพรงของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกจับยึดอยู่บนผิวของวัสดุเนื้อ เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะมีในปริมาณน้อยมากก็ตาม

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) และสามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ ก็สามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเริ่มเหล็กออกไปได้



ภาพที่ 2-1 แผนผังแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สำราญวานิช, 2553)

คลอไรด์เหล่านี้เข้าไปทำอันตราย โดยการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งความเสียหายอาจไม่เท่ากันตลอดทั้ง โครงสร้าง จึงสามารถประเมินความเสี่ยงที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเกิดสนิม เมื่อ โครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่สัมผัสกับน้ำทะเลตามลักษณะของที่ตั้งของ โครงสร้าง แบ่งออกเป็น 4 บริเวณ ดังนี้

1. บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone)

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปนจะมีความเข้มข้นลดลงตามระยะห่างของ โครงสร้างจากน้ำทะเล แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับ ไอเกลือจากน้ำทะเล ขึ้นอยู่กับทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพา ละอองไอเกลือ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่มีความรุนแรงน้อย

2. บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone)

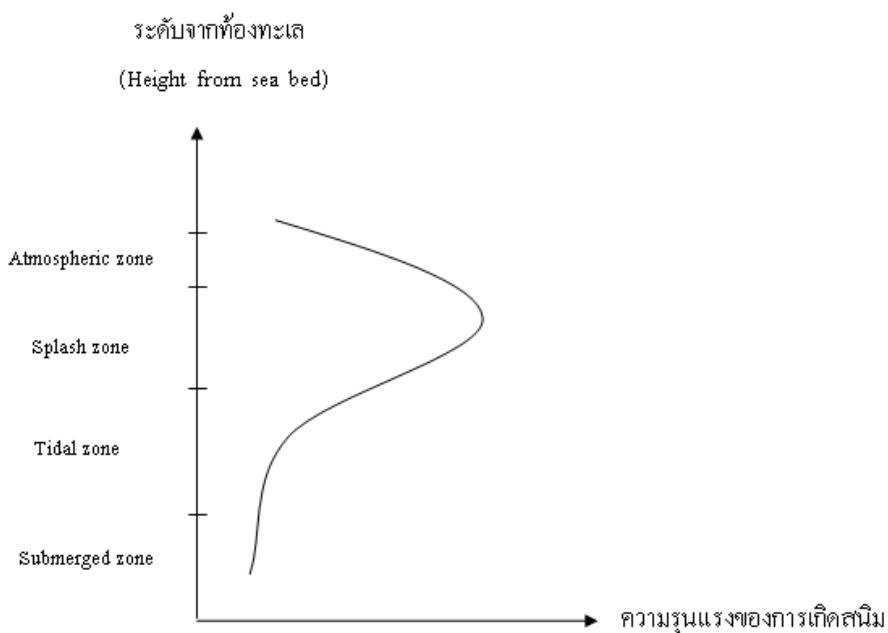
บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด โครงสร้างบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่น และละอองน้ำทะเล ซึ่งอยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลง ความเสียหายของโครงสร้างบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับคอนกรีตมีความชื้น และมีออกซิเจน ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ โครงสร้างยังเกิดความเสียหายได้จากการเกิดการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะ (Abrasion) เนื่องจากการกระทบของคลื่น

3. บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone)

เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างน้ำขึ้นสูงสุด และน้ำลงต่ำสุด โครงสร้างในบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่น และละอองน้ำทะเล โดยความเสียหายของเหล็กเสริมใน โครงสร้างเกิดได้จากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่น และกระแสน้ำ การขูดสีจากกรวด หรือทรายที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิต

4. บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone)

เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำต่ำสุด โครงสร้างในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของ โครงสร้างบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด การกัดกร่อนทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม



ภาพที่ 2-2 ความเสี่ยงต่อการเกิดสึนามิของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
(ทวิชัย สำราญวานิช, 2550)

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล เมื่อคลอไรด์แทรกซึมไปในคอนกรีต จะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างเหล็กเสริม ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นแรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไก และธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน สามารถแบ่งกลไกการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตเป็น 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) คลอไรด์ไอออนจะถูกแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ ไอออนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำในโพรงคอนกรีตที่อึดตัว ซึ่งเป็นไปตาม กฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \quad (2-1)$$

โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t
(โมล /ลิตร)

$C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t
(โมล / ลิตร)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ตร.ซม./ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ (2-1) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2-2) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

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

โดยที่ C_d คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม
(%โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)

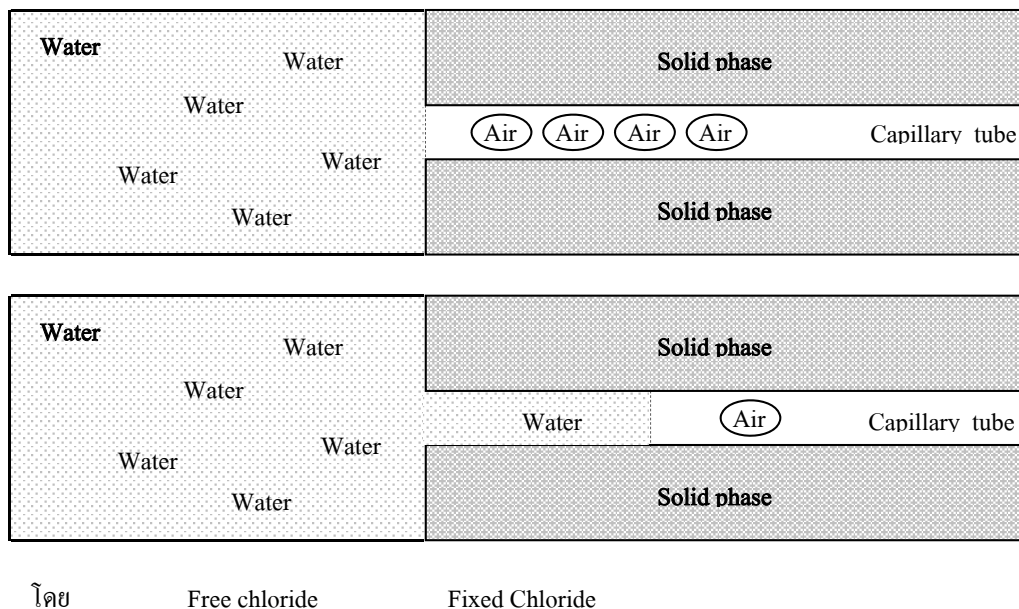
c คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (เซนติเมตร)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ตร.ซม./ปี)

t คือ อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
(ปี)

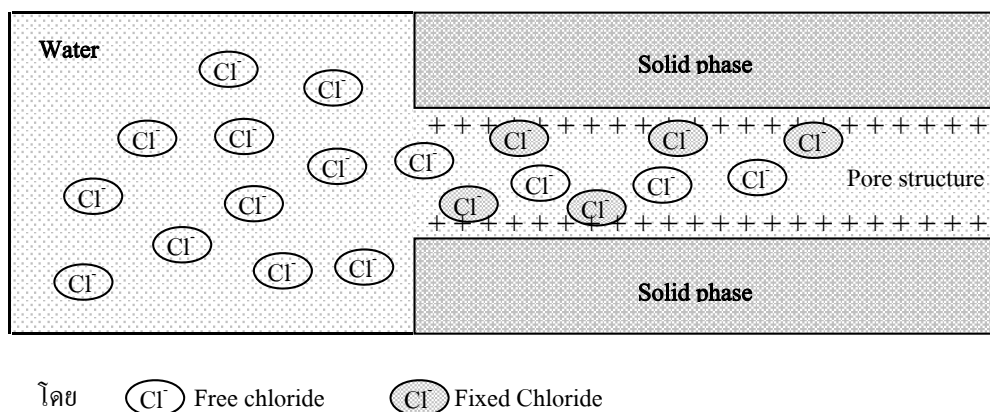
B คือ น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. (กก./ลบ.ม.)

2. การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งขนาดเล็กบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลมักอยู่ในวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งจะถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล ซึ่งน้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงเล็กที่แห้งที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต เมื่อสภาพคอนกรีตเปียกจะถูกทำให้แห้ง ซึ่งน้ำที่ผิวคอนกรีตจะระเหยออกไปคงเหลือแต่คราบเกลือ ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และใช้ระยะเวลาสั้น โดยในแต่ละรอบของกลไกนี้ (สภาพเปียกสลับแห้ง) จะทำให้คลอไรด์มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ คลอไรด์เหล่านี้สามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีต และบริเวณเหล็กเสริม ส่งผลให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมได้



ภาพที่ 2-3 กลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี

3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) การดึงดูดไอออนเกิดขึ้นได้ เนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีต และสะสมอยู่ในบริเวณนั้น



ภาพที่ 2-4 กลไกการดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต

4. ความดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head ทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออน เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูง ไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล ด้วยกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า เมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต คลอไรด์จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า ทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์ เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

Soroka (1993) กล่าวว่า คลอไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นในน้ำ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อการแทรกซึมของคลอไรด์มีน้ำอยู่ในระบบโพรง กลไกที่เกิดขึ้นเป็นทั้งการดูดซึมน้ำแบบคาพิลลารี (Capillary suction) หรือการแพร่อย่างง่ายของไอออนของน้ำใน โพรงที่อยู่หนึ่ง ในกรณีแรกเกิดกับคอนกรีตที่มีลักษณะค่อนข้างแห้ง โดยน้ำทำหน้าที่พาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต ส่วนกรณีหลังจะเกิดกับคอนกรีตที่อิ่มตัว หรือค่อนข้างอิ่มตัว โดยน้ำทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวกลางให้คลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะเกิดกลไกขึ้นได้ทั้งสองกรณีซึ่งอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Bakker (1988) กล่าวว่า ในกรณีที่คอนกรีตป็นเป็อนคลอไรด์ตั้งแต่ส่วนผสม การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีที่สัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา และนำไปสู่สภาวะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนได้อีกต่อไป

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์

เหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสภาวะแวดล้อมคลอไรด์จะเป็นสนิมได้ ก็ต่อเมื่อ เงื่อนไข ทั้ง 3 ประการนี้ ต้องเกิดขึ้น

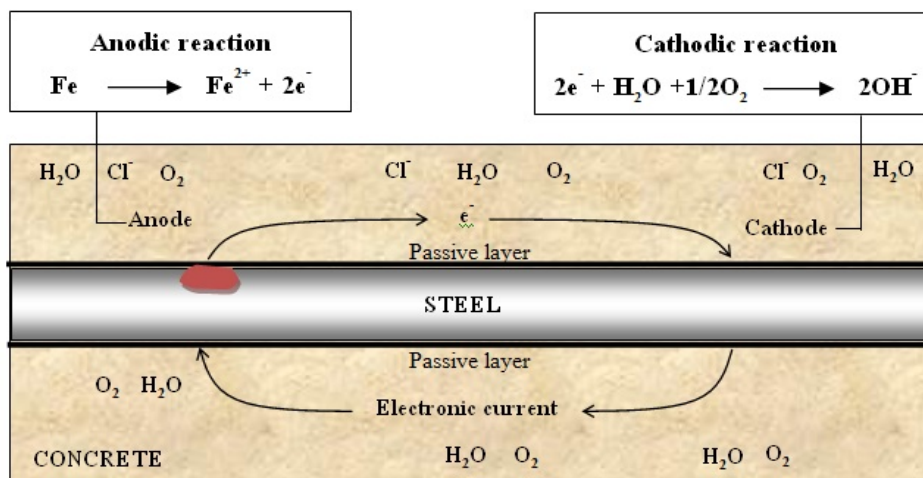
1. ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนถึงปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) ซึ่งความเป็นต่างในระดับที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก จะมีค่า pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 ซึ่งเรียกว่า “ระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นต่าง” ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยสาเหตุต่าง ๆ เช่นคาร์บอนเนชัน (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุน

2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สถานะสารละลาย และพอเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม โดยปกติความชื้นที่อยู่บริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริมเพียงพออยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริม โดยแพร่ผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือ แพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) เป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก



ภาพที่ 2-5 ความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์

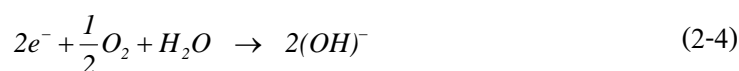


ภาพที่ 2-6 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์
(ทวิชัย สำราญวานิช, 2550)

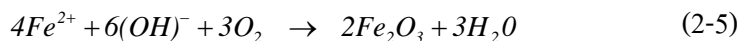
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมดังภาพที่ 2-6 ในคอนกรีต เริ่มจากความเป็นต่างในบริเวณที่หุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริม มีค่าความเป็นต่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้น ดังสมการต่อไปนี้



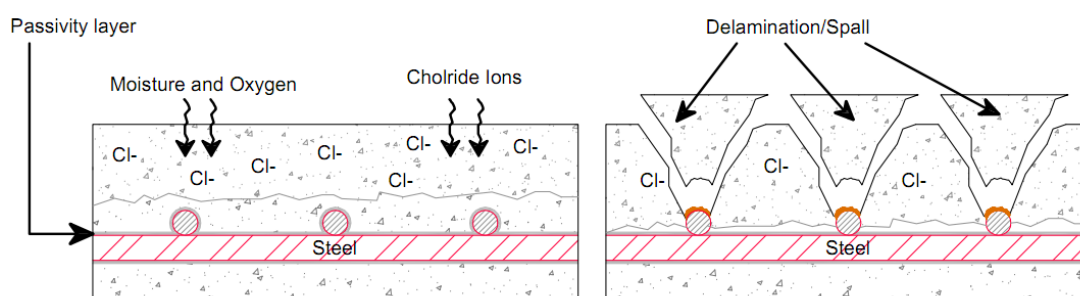
เหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพการละลาย และอิเล็กตรอนวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) จากนั้น $2e^-$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิก จะรวมตัวกับน้ำ และออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน ($(OH)^-$) ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมจะเกิดขึ้น ดังสมการต่อไปนี้



โดยที่ Fe_2O_3 คือ เฟอริกออกไซด์ (Ferric oxide) หรือสนิม อาจเกิดต่างบริเวณกับที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ซึ่งหมายความว่า สนิมอาจจะเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้

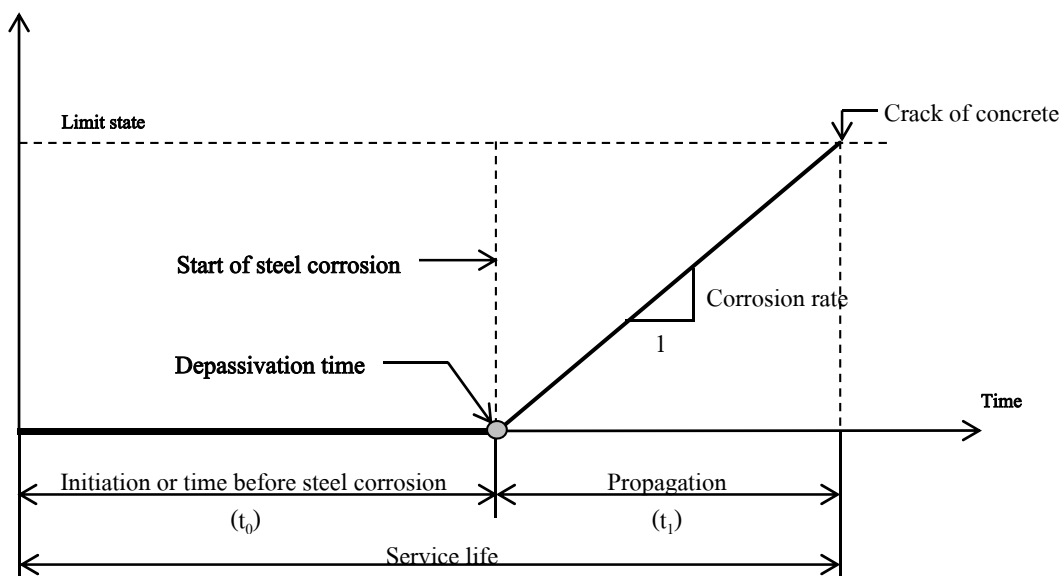


ภาพที่ 2-7 กลไกการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ

1. Initial period หรือระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม ในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนี้ ออกซิเจน และน้ำ จะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมเช่นกัน ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) จะใช้เวลานาน หรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น

2. Propagation period หรือระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน



ภาพที่ 2-8 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบถูกกัดกร่อนทำให้มีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกเกิดสนิม ทำให้สนิมที่เกิดบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการพัฒนาปริมาณมากขึ้น ประมาณ 4-6 เท่า จนไปดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กระแทงออก เมื่อการเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้น ๆ เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรง และมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตมีปริมาณมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบโครงสร้างนั้น ๆ นอกจากนี้ การซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออน ผ่านเนื้อคอนกรีต เป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเช่นกัน

Bakker (1988) กล่าวว่า ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มผสม การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีสัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา และอาจนำไปสู่สถานะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนได้อีกต่อไป

ค่า pH ของคอนกรีตบริเวณที่หุ้มรอบเหล็กเสริม เป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ

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

ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต

ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต หมายถึง ระดับ หรือปริมาณคลอไรด์ที่มากเพียงพอที่ทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มเกิดสนิม ทั้งนี้ต้องมีปัจจัยอื่นร่วมด้วย นั่นคือ ความชื้นและออกซิเจนในปริมาณที่เหมาะสม โดยกระบวนการในการเกิดสนิมดังกล่าวนี้อยู่ในช่วงขยายตัวต่อเนื่อง Propagation period ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างต่อเนื่อง ในการศึกษาเกี่ยวกับระดับคลอไรด์วิกฤต สามารถเปรียบเทียบค่าระดับคลอไรด์วิกฤตในรูปค่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ค่าเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์อิสระต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และอัตราส่วน Cl^- / OH^- จากการทดลองของนักวิจัยหลายท่าน ได้สรุปค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต

ตารางที่ 2-2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตตามมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ

ประเภทโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด				
	(% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)				(kg /m ³ คอนกรีต)
	BS	ACI	ACI	ACI	JSCE
	8110	201	357	222	
คอนกรีตอัดแรง	0.10	-	0.06	0.08	-
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญเกลือคลอไรด์	0.20	0.10	0.10	0.20	-
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือไม่มี ความชื้น	0.40	-	-	-	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ		0.15			1.2

หมายเหตุ

BS 8110: British Standard for the design and construction of reinforced and prestressed concrete structures

ACI 201: American Concrete Institute for guide for durable concrete

ACI 357: American Concrete Institute for guide for the design and construction of fixed concrete offshore structures

ACI 222: American Concrete Institute for corrosion of metals in concrete

JSCE: Japan Society of Civil Engineer for standard specifications for concrete structures

ค่าระดับความเข้มข้นวิกฤต (Chloride threshold) จากมาตรฐานก่อสร้างต่าง ๆ

ระดับคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold level) ของคอนกรีต มีความสำคัญ เนื่องจากเหล็กเสริมใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสภาพแวดล้อมที่มีเกลือคลอไรด์จะเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม และเริ่มผุกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตตรงบริเวณผิวเหล็กเสริมมีค่าถึงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต ชั้น Passive film ที่ปกป้องเหล็กเสริมก็จะสลายไปกระบวนการผุกร่อนก็จะเริ่มเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ มาตรฐาน หรือข้อกำหนดของการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่าง ๆ เช่น BS และ ACI ได้ควบคุมปริมาณคลอไรด์สูงสุด (Maximum chloride content) ในคอนกรีตตอนเริ่มต้นมิให้มีค่าเกินกว่าที่กำหนด โดยปริมาณคลอไรด์ตอนเริ่มต้นมาจากส่วนผสมคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ไม่รวมคลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่เข้ามาในคอนกรีตภายหลัง แต่มาตรฐานการก่อสร้างของญี่ปุ่น (JSCE) ได้กำหนดค่าระดับคลอไรด์วิกฤตไว้เลย ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม และเริ่มผุกร่อน ดังนั้นจึงได้มีการ

ระบุค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดดังตารางที่ 2-2 และค่าปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐาน และข้อกำหนดต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-3 โดยแบ่งตามประเภทของโครงสร้าง

จากตารางที่ 2-2 แสดงระดับคลอไรด์วิกฤตที่สภาพการทดสอบต่าง ๆ จะเห็นว่าปริมาณคลอไรด์สูงสุดที่ยอมให้ใช้ในคอนกรีตอัดแรงจะถูกกำหนดให้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตโครงสร้างอื่น ๆ เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงมีระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) น้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา อีกทั้งขนาดของลวดอัดแรง หรือลวดสลิงอัดแรงก็มีขนาดเล็กกว่า ลวดอัดแรง หรือลวดสลิงอัดแรงจะรับหน่วยแรงอยู่ในปริมาณสูง ดังนั้น หากลวดอัดแรง หรือลวดสลิงอัดแรงเกิดการผุกร่อน ทำให้เสี่ยงต่อการวิบัติของโครงสร้างมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ส่วนโครงสร้างที่อยู่ในสถานะแห้ง หรือไม่มีความชื้นก็ยอมให้ปริมาณคลอไรด์สูงสุดมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสถานะเผชิญเกลือคลอไรด์ เพราะไม่มีน้ำที่จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นได้

จากข้อกำหนด ACI 318 สำหรับอาคาร โครงสร้างคอนกรีต และข้อกำหนด ACI 222.1 เพื่อป้องกันการผุกร่อนของเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างคอนกรีต ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดสำหรับคอนกรีตอัดแรง และคอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะเผชิญเกลือคลอไรด์ไว้เท่ากัน คือ 0.06 และ 0.15 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ทั้งนี้หากพิจารณาเทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในตารางที่ 2-3 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตที่ยอมให้จากมาตรฐาน และข้อกำหนดต่าง ๆ ตามข้อกำหนด ACI 222 พบว่า ข้อกำหนดปริมาณคลอไรด์ในตารางที่ 2-2 มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากค่าปริมาณคลอไรด์ในตารางที่ 2-2 กำหนดเป็นคลอไรด์อิสระ ส่วนค่าปริมาณคลอไรด์ในตารางที่ 2-3 กำหนดเป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด นอกจากนี้ในข้อกำหนด ACI 318 ได้กำหนดค่าคลอไรด์อิสระสูงสุดสำหรับโครงสร้างประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสถานะแห้ง หรือไม่มีความชื้น และคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น ๆ ไว้ด้วย

ตารางที่ 2-3 ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตตามมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ

ประเภทโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุด (% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)	
	ACI 318	ACI 222.1
คอนกรีตอัดแรง	0.06	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะเผชิญเกลือคลอไรด์	0.15	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะแห้งหรือไม่มีความชื้น	1.00	
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่น ๆ	0.30	

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าระดับคลอไรด์

1. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) หมายถึง ผลการยึดจับระหว่างเนื้อซีเมนต์กับคลอไรด์ไอออน ทำให้ปริมาณคลอไรด์ไอออนในสารละลายในโพรงช่องว่างคอนกรีตลดลง โดยสารประกอบ C_3A และ C_4AF ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ สามารถยึดจับคลอไรด์ในคอนกรีตให้เป็นสารประกอบ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedel's salt) และ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ตามลำดับ อีกทั้งความสามารถเก็บกักคลอไรด์ถูกพิจารณาว่าเป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต เนื่องจากคลอไรด์ที่ถูกยึดจับไว้จะไม่ส่งผลต่อการผุกร่อนของเหล็กเสริม และยังสามารถเก็บกักคลอไรด์มากก็จะทำให้ความเสี่ยงในการเกิดสนิมลดลง มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่อค่าระดับคลอไรด์วิกฤต โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของสารประกอบ C_3A พบว่า เมื่อปริมาณ C_3A มากขึ้น ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสูงขึ้นด้วย แต่บางการศึกษากลับพบว่า เมื่อปริมาณ C_3A น้อยลง ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตไม่น้อยลงเสมอไป ทั้งนี้ เป็นผลมาจากวิธีการวัดการเกิดการผุกร่อนที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้น ผลของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่อค่าระดับคลอไรด์วิกฤตจึงยังไม่ชัดเจน อาจเป็นเพราะความไม่แน่นอนของวิธีการที่ใช้วัดการเริ่มเกิดการผุกร่อน อย่างไรก็ตาม ความสามารถเก็บกักคลอไรด์นี้ ทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง และทำให้อัตราการผุกร่อนของเหล็กเสริมลดลงด้วย

2. ความสามารถต้านกรด (Buffering capacity) พฏิกิริยาการแตกตัวละลายของผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ pH ลดลง สามารถหาได้จากการทดสอบความสามารถเป็นกลางด้วยกรด (Acid neutralization capacity, ANC) โดยวัดความต้านทานการลดลงของ pH แสดงเป็นกราฟไทเทรทชันระหว่างค่า pH กับ โมลเทียบเท่าของกรด (Molar equivalent of acid) ซึ่งสามารถ

มองเห็นยอดกราฟมีค่าคงที่หลายตำแหน่ง แม้ว่ามีการเพิ่มปริมาณกรดขึ้น แสดงว่า มีผลกระทบของการยับยั้งที่เกิดจากความต้านทานของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ ต่อการลดลงของค่า pH อีกทั้งยัง พบว่า มียอดกราฟอันหนึ่งที่มีค่า pH เท่ากับ 12.6 ซึ่งเป็นจุดที่สามารถสำรองของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

3. รอยต่อระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต (Steel-concrete interface) มีสมมติฐานว่า เมื่อคอนกรีตถูกหล่อลงไปหุ้มเหล็กเสริมในแบบแล้ว จะเกิดขึ้นของผลึกต่อเนื่องของแคลเซียมไฮดรอกไซด์รอบ ๆ รอยต่อระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีตจะช่วยป้องกันการลดลงของ pH ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อต่อได้ และยังลดการเคลื่อนที่ของไอออนด้วย แต่มีงานวิจัยที่รายงานไว้ว่า ไม่พบชั้นผลึกต่อเนื่องของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่รอยต่อระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีต แต่กลับพบว่ามีความพรุน (Porosity) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีต

มีการศึกษาผลของช่องว่างของฟองอากาศที่ถูกกักเก็บไว้ (Entrapped air void) บริเวณใกล้กับเหล็กเสริมในคอนกรีต เนื่องจากการฟุ้งร้อนมักเกิดตรงบริเวณนี้ ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ เกิดจากผลของการเยิ้มของน้ำ (Bleeding) หรือการทรุดตัวของเนื้อคอนกรีต (Concrete settlement) ทำให้เกิดการฟุ้งร้อนของเหล็กเสริมบริเวณช่องว่างนี้ การที่ช่องว่างนี้เกิดการฟุ้งร้อน เนื่องจากบริเวณช่องว่างอยู่ใกล้กับเหล็กที่มีความอึดตัวของน้ำ ทำให้เกิดความเหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี เมื่อเทียบกับส่วนของเนื้อคอนกรีตที่แน่น ซึ่งจะต้านทานการไหลของกระแสระหว่างข้อต่อ และคาโรต ดังนั้น ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีตมีผลค่อนข้างสำคัญต่อระดับคลอไรด์ในปัจจุบัน

มีงานวิจัย พบว่า เมื่อมีการเพิ่มของปริมาณช่องว่างฟองอากาศ ทำให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตลดต่ำลง ทั้งนี้ การวัดปริมาณฟองอากาศบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีต เป็นเรื่องที่ยากหากไม่กะเทาะตัวอย่างออกมา อย่างไรก็ตาม มีนักวิจัยบางท่านเสนอเทคนิค การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic method) ในการวัดปริมาณช่องว่างฟองอากาศเหล่านี้

4. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลาน (Cement replacement with pozzolan) มีงานวิจัยผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อระดับค่าคลอไรด์วิกฤตน้อยมาก เมื่อเทียบกับการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อการแพร่ของคลอไรด์ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการศึกษายาวนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Pulverized fly ash, PFA) หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground granulated blast furnace slag, GGBS) ซึ่งค่าระดับคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย หรือคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กขึ้นกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และแหล่งที่มาของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต กล่าวคือ เป็น

คลอไรด์ผสมตั้งแต่ต้น (Internal chloride) หรือคลอไรด์ที่มาจากภายนอกคอนกรีต (External chloride)

มีรายงานวิจัย พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล เมื่อใช้เกลือแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมากขึ้น ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตจะมีค่าลดลง อัตราการเกิดสนิมลดลง และระยะเวลาการผุกร่อนของเหล็กเสริมมากขึ้น เนื่องจาก ผลของความสามารถสำรองของคอนกรีตผสมเกลือจะน้อยลง ในทางตรงกันข้ามคอนกรีตที่ผสมเกลือคลอไรด์ตั้งแต่ต้น เมื่อใช้เกลือแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าปูนซีเมนต์ที่ไม่แทนที่ด้วยเกลือ ซึ่งยังไม่มีเหตุผลว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น อีกทั้ง ความแตกต่างในผลของเกลือต่อค่าระดับคลอไรด์วิกฤตนี้ นอกจากเป็นผลมากรอยต่อระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตแล้ว ดูเหมือนว่าค่าระดับคลอไรด์วิกฤตยังขึ้นกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอก แหล่งที่มาของคลอไรด์ และวิธีการวัดการผุกร่อนอีกด้วย

การใช้ตะกรันจากเตาถลุงเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนแทนที่ ทำให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสูงขึ้น เนื่องจากความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่สูงของตะกรันจากเตาถลุงเหล็กที่มีระดับออกซิเจนสูง และการที่ระยะเวลาการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเกลือหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กที่เพิ่มขึ้นจากการลดลงของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ เนื่องจาก โครงสร้างโพรงแน่นขึ้น และความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่สูงของตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก

5. ปัจจัยอื่น ๆ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกก็ส่งผลต่อค่าระดับคลอไรด์วิกฤต เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ระดับความชื้น และประเภทของแคโทดอน เป็นต้น มีรายงานว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตลดต่ำลงอย่างมาก และยังทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และ pH ลดลงด้วย

ความชื้นของคอนกรีตที่สูงขึ้น ทำให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตลดลง เนื่องจาก ความต้านทาน (Resistivity) ของคอนกรีตลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น มีการศึกษาค่าความต้านทานของคอนกรีต พบว่า หากความต้านทานของคอนกรีตสูงขึ้นค่าระดับคลอไรด์วิกฤตก็สูงขึ้นด้วย

นอกจากนี้ศักย์ไฟฟ้า และส่วนประกอบของเนื้อเหล็ก มีผลต่อค่าระดับคลอไรด์วิกฤต เมื่อสัดส่วนของนิเคิล และ โครเมียมในเหล็กเสริมสูงขึ้น ทำให้มีการเพิ่มการยับยั้งการผุกร่อนของเหล็กเสริม เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่า เกิดการยับยั้งของศักย์ไฟฟ้าในลักษณะที่ดีขึ้น ทำให้เหล็กเสริมมีความต้านการผุกร่อนมากยิ่งขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อมีการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าคาโรดิก ด้วยวิธี AC impedance ก็จะทำให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสูงขึ้น

การเพิ่มขึ้นของค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

1. สารยับยั้งการผุกร่อน (Corrosion inhibitors)

ข้อดีของการใช้สารยับยั้งการผุกร่อนในคอนกรีต คือ สามารถป้องกันการผุกร่อนของเหล็กเสริมได้ทั่วคอนกรีต เนื่องจากสารยับยั้งการผุกร่อน ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวของเหล็กเสริม ไม่ให้กระบวนการผุกร่อนเกิดขึ้น แต่ผลเสียต่อคอนกรีตก็มี ดังนั้น จึงมีการใช้อย่างจำกัดในเชิงพาณิชย์

แคลเซียมไนไตรต์ (Calcium nitrite) เป็นสารยับยั้งการผุกร่อนในคอนกรีตที่ใช้กันมานานตั้งแต่ช่วงกลางทศวรรษที่ 1970 เนื่องจากสามารถยับยั้งการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต และทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตช่วงต้น ๆ ดีอีกด้วย นอกจากนี้หากใช้ในปริมาณที่เหมาะสมก็สามารถช่วยเร่งการก่อตัวของคอนกรีตได้

มีรายงานวิจัยจำนวนมาก พบว่า แคลเซียมไนไตรต์มีประสิทธิภาพดีในการต้านทานการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต เนื่องจากช่วยลดอัตราการผุกร่อน และเพิ่มระยะเวลาการเกิดสนิมให้นานขึ้นด้วย ทั้งนี้มีการแนะนำให้ใช้แคลเซียมไนไตรต์กับคอนกรีตคุณภาพสูง เช่น คอนกรีตกำลังสูง หรือคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ๆ และผสมเกล็ดลอยด้วย เป็นต้น

มีการเสนอแนะให้ใช้อัตราส่วนเชิงโมลระหว่างไนไตรต์ไอออนต่อคลอไรด์ไอออน (Ratio of $[NO_2^-]/[Cl^-]$) ในการบอกค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสำหรับคอนกรีตที่ผสมแคลเซียมไนไตรต์ เนื่องจากอัตราส่วนนี้ บ่งบอกถึงจำนวนของสารยับยั้งที่ต้องการใช้ในการยับยั้งการผุกร่อนของเหล็กเสริม เนื่องจากคลอไรด์

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยใหม่ ๆ พบว่า แคลเซียมไนไตรต์ไม่มีผลต่อค่าระดับคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ทั้งที่งานวิจัยในอดีตพบว่า แคลเซียมไนไตรต์สามารถยับยั้งการผุกร่อนของเหล็กเสริมได้นั้น อาจเป็นผลจากความต้านทานอิเล็กโทรไลต์ของคอนกรีตที่เพิ่มสูงขึ้น มากกว่าผลจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิวเหล็กเสริม ยิ่งไปกว่านั้น พบว่า แคลเซียมไนไตรต์ในคอนกรีตช่วยเร่งการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ ซึ่งไม่ช่วยยืดระยะเวลาในการเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริม

2. การเคลือบผิวของเหล็กเสริม (Coating of reinforcing steel)

การเคลือบด้วยกัลวาไนซ์ (Galvanized coating) หรือการเคลือบสังกะสีของเหล็กเสริม ทำหน้าที่สองประการ คือ เป็นทั้งตัว sacrifice แทนเหล็ก และตัวป้องกันให้กับเหล็กเสริม มีรายงานว่า การเคลือบกัลวาไนซ์ ช่วยเพิ่มค่าระดับคลอไรด์วิกฤต และลดอัตราการผุกร่อน

การเคลือบด้วยสารป้องกัน (Barrier coating) เป็น การเคลือบผิวเหล็กด้วยสารอีพ็อกซี (Epoxy) ซึ่งยับยั้งไม่ให้ไอออนที่เป็นอันตรายต่อเหล็กมาสัมผัสกับผิวเหล็กได้ แต่ต้องระมัดระวังใน

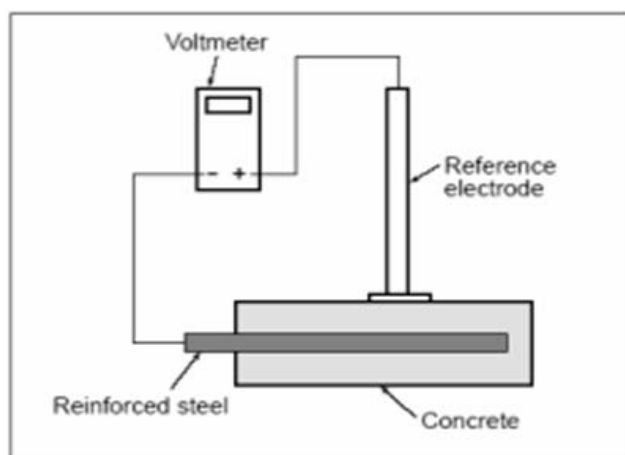
การใช้งานอย่างมากในการขนส่ง การเก็บรักษา และการติดตั้งเหล็กเสริมที่เคลือบอีพ็อกซี เพราะหากมีความเสียหายเกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติด้านทานการผุกร่อนของเหล็กเสริมลดลง มีงานวิจัยพบว่า เมื่อมีความเสียหายเกิดกับเหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซีมากขึ้น จะทำให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตลดลงได้

จากการศึกษาล่าสุดพบว่า เหล็กเสริมที่เคลือบด้วยอีพ็อกซีที่นั้น มีคุณสมบัติที่ดี และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานเมื่อเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ หากมีการเคลือบผิวที่เหมาะสม และการใช้งานที่ดี

วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

1. วิธีทดสอบแบบครึ่งเซลล์ศักย์ไฟฟ้า (Half-cell potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C876 เป็นการทดสอบหาศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว หรือเรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า “การทดสอบแบบครึ่งเซลล์ศักย์ไฟฟ้า (Half-cell potentials test)” เป็นขั้นตอนวิธีการประเมินการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเบื้องต้น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย และค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ อีกทั้งวิธีการนี้ไม่ต้องคำนึงถึงผลของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และอายุของโครงสร้างที่ทำการตรวจสอบ การตรวจสอบทำได้โดยอาศัยคุณสมบัติของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริม

การวัดศักย์ไฟฟ้าผุกร่อนที่เกิดขึ้น ต้องอาศัยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ทั่วไป ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของ Copper/ Copper sulphate หรือ Silver/ Silver chloride เป็นต้น การวัดศักย์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์โดยพื้นฐานจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ผลที่ได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์ บ่งบอกถึงระดับความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต สามารถใช้การประเมินตามมาตรฐาน ASTM C876 ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 การประเมินความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมโดยการทดสอบแบบ Half-cell Potentials

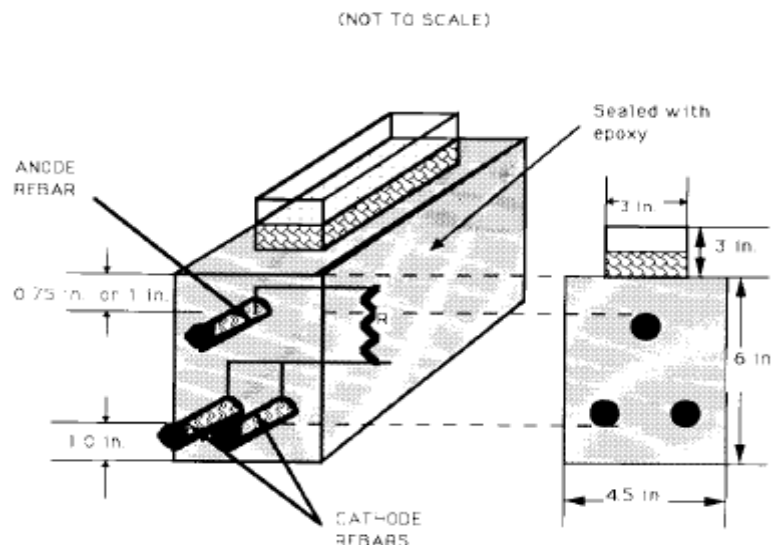
ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้จากการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบ Copper /Copper sulphate	ความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต
มีค่าต่ำกว่า -200 mV	มีโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะไม่เกิดการกัดกร่อน
มีค่าอยู่ระหว่าง -200mV ถึง -350 mV	มีโอกาสร้อยละ 50 ที่เหล็กเสริมจะเกิดการกัดกร่อน
มีค่าสูงกว่า -350 mV ขึ้นไป	มีโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะเกิดการกัดกร่อน

ทั้งนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจาก ความชื้นของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ดังนั้น ควรปล่อยให้ตัวอย่างทดสอบมีพื้นผิวชื้นเพียงพอ ก่อนที่จะเริ่มวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

2. วิธีทดสอบแบบหาผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อการเกิดสนิมของโลหะในคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109 เป็นขั้นตอนวิธีการประเมินผลกระทบเนื่องจากการใช้สารผสมเพิ่มต่อการเกิดสนิมของโลหะในคอนกรีต วิธีการนี้สามารถประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้แม่นยำกว่าวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (ASTM C876) โดยการประเมินการเกิดสนิม จะใช้หลักการการไหลของกระแสของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งการทดสอบจะทำการวัดปริมาณศักย์ไฟฟ้าที่ไหลสะสม ไปทำการแปลงเป็นค่ากระแส ซึ่งใช้กฎของโอห์ม (Ohm's laws) และนำค่ากระแสที่ได้ มาคำนวณเป็นค่าประจุที่ไหลผ่านในโครงสร้างคอนกรีต ในหน่วยคูลอมบ์

การประเมินการเกิดสนิมสามารถทำได้ โดยหล่อตัวอย่างทรงปริซึมขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 4.5 x 11.0 x 6.0 นิ้ว พร้อมทั้งเสริมเหล็ก (ภาพที่ 2-10) เมื่อตัวอย่างคอนกรีตถึงอายุทดสอบทำการชั่งสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% เพื่อให้ระยะเวลาการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเกิดได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 2-10 รายละเอียดการหล่อตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109

การทดสอบทำโดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าพร้อมตัวต้านทานขนาด 100 และนำค่าที่ได้แปลงเป็นค่ากระแส โดยใช้กฎของโอห์ม จากนั้นนำค่ากระแสที่ได้ ไปคำนวณหาปริมาณประจุ (Q) ไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน 100 ซึ่งคิดจากสมการต่อไปนี้

$$Q = It \quad (2-8)$$

โดยที่ Q คือ ประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน 100 Ω (คูลอมบ์)

I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน 100 Ω (แอมแปร์)

t คือ ระยะเวลาในการทดสอบ (วินาที)

หมายเหตุ ค่าของคูลอมบ์ เท่ากับ 150 ที่กระแสไหลผ่าน 150 μA ตลอดระยะเวลา 6 เดือน บ่งบอกได้ชัดเจนว่าเหล็กเสริม มีการเกิดสนิมที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้

ทั้งนี้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109 ก็ยังไม่สามารถบอกระยะเวลาที่เหล็กเสริมเกิดสนิม (Depassivation time) ได้ชัดเจน จึงจำเป็นต้องนำวิธีการทดสอบหาศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาประเมินร่วมด้วย กล่าวคือ เราสามารถหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเป็นสนิมได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของของความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า (Current density) และศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้จากตัวอย่างทดสอบ

3. การทดสอบตัวอย่างผงคอนกรีตเพื่อหาระดับคลอไรด์วิกฤต

การทดสอบตัวอย่างผงคอนกรีตเพื่อหาระดับคลอไรด์วิกฤตทำได้ โดยนำตัวอย่างทดสอบ มาเจาะหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าต่าง ๆ เพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1152) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1218)

การวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

1. การเริ่มเกิดการผุกร่อน (Corrosion initiation) ในการหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตนั้น จำเป็นต้องทราบระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนพอดี และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่เริ่มผุกร่อน การหาเหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนพอดี สามารถหาได้จากการตรวจสอบการไหลของกระแสมาโครเซลล์ (Macrocell current) ระหว่างขั้วแอโนด (Anode) และคาโทด (Cathode) การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) หรือการวัดอัตราการผุกร่อน (Corrosion rate) ด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นต้น

อุปกรณ์มาโครเซลล์ เป็นที่นิยมในการใช้ตรวจวัดความเสี่ยงของการผุกร่อน ซึ่งการผุกร่อนเกิดเมื่อกระแสมาโครเซลล์สูงขึ้นทันที มาโครเซลล์ประกอบด้วย เหล็กขั้วแอโนด และขั้วคาโทดที่ทำจากตาข่ายไทเทเนียม แกรไฟท์ หรือเหล็กสแตนเลส ทั้งหมดถูกฝังในคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ ทั้งนี้ การวัดกระแสมาโครเซลล์ไม่ได้ให้อัตราการผุกร่อนโดยตรง และอาจให้ค่าที่ผิดพลาดได้เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เป็นวิธีที่เป็นที่ยอมรับในการวัดความเสี่ยงของการผุกร่อนของเหล็กเสริม ในทางปฏิบัติจะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลาย ๆ จุด บนผิวหน้าคอนกรีตตามแนวของเหล็กเสริม แล้วนำมาสร้างเป็นแผนที่ศักย์ไฟฟ้า (Potential map) โดยบริเวณพื้นที่ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูง บ่งบอกถึง ความเสี่ยงสูงในการเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริม อย่างไรก็ตาม ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ขึ้นกับสภาพของคอนกรีต เช่น ระดับความชื้น ระดับของการเกิดคาร์บอนเนชัน และการตกผลึกของเกลือ ซึ่งมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้ และนำไปสู่การแปลผลที่ผิดพลาดได้

การวัดอัตราการผุกร่อนด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นวิธีที่ให้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุดสำหรับการผุกร่อนของเหล็ก โดยให้ค่าอัตราการผุกร่อนโดยตรง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผุกร่อน และการเริ่มเกิดการผุกร่อนยังไม่ชัดเจน เนื่องจากมีความแปรเปลี่ยนค่อนข้างมาก ส่งผลต่อความแม่นยำของระดับคลอไรด์วิกฤต อัตราการ ผุกร่อนของเหล็กเสริมเริ่มมีนัยสำคัญ เมื่อมีค่าเกินกว่า $1-2 \text{ mA} / \text{m}^2$ อีกทั้ง ยังมีความไม่

แน่นอนรอบ ๆ บริเวณที่สูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม เนื่องจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า และต้องใช้เวลาเวลานานเพียงพอที่จะเห็นสีออกไอซ์ของเหล็กที่เกิดสนิมขึ้น

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เนื่องจากการผุกร่อน สามารถใช้หาระดับคลอไรด์วิกฤตได้ แม้ว่าจะไม่ได้ให้เวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนก็ตาม การสูญเสียน้ำหนัก คำนวณจากผลต่างน้ำหนักแห้งเหล็กก่อนฝังลงในคอนกรีต และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะหนึ่งก็กะเทาะคอนกรีตเอาแห้งเหล็กออกมาทำความสะอาดเพื่อสนิมออกไปแล้ววัดน้ำหนักอีกครั้ง วิธีการนี้สามารถใช้ได้ เมื่อการเกิดสนิมเกิดขึ้นไปได้ระยะหนึ่งจนสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วิธีการนี้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพสำหรับการวัดการผุกร่อนหลุมลึก (Pitting corrosion) หากมีการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

2. ปริมาณคลอไรด์ (Chloride content) เมื่อการผุกร่อนเกิดขึ้น จะต้องทำการวัดปริมาณคลอไรด์ หรือการกระจายตัวของคลอไรด์ตามระดับความลึก เพื่อหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตในการวัดปริมาณคลอไรด์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเก็บตัวอย่าง (Sampling) และการวิเคราะห์ (Analysis)

การเก็บตัวอย่าง เกี่ยวข้องกับการเจาะคอนกรีตแล้วเก็บเอาฝุ่นคอนกรีตที่ระดับความลึกจากผิวหน้าต่าง ๆ ซึ่งต้องพยายามให้มีส่วนที่เป็นเนื้อซีเมนต์เพสต์ในแต่ละตัวอย่างเท่า ๆ กัน โดยประมาณ โดยเทียบกับเนื้อคอนกรีตนั้น เพราะหากเก็บตัวอย่างที่มีส่วนที่เป็นมวลรวมมาก ๆ อาจทำให้การวิเคราะห์ผลคลาดเคลื่อนได้

การวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water soluble chloride) จากสารละลายของตัวอย่างฝุ่นผงคอนกรีต หรือมอร์ตาร์ในน้ำด้วยการต้ม ซึ่งความเข้มข้นของคลอไรด์ หาได้จากวิธี Potentiometry หรือใช้วัดคลอไรด์ไอออน และแสดงค่าเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของซีเมนต์ หรือคอนกรีต คลอไรด์อิสระที่วัดด้วยการใช้น้ำละลายออกมาขึ้นอยู่กับความละเอียดของฝุ่นผงที่บด ปริมาณน้ำที่เติม อุณหภูมิ วิธีการกวน และเวลาที่ปล่อยให้ชะออกมา ส่วนการใช้วิธีการกดเอาสารละลายในโพรงช่องว่างออกมาจากซีเมนต์เพสต์ด้วยความดันสูงนั้น (Pore press method) ให้ค่าคลอไรด์อิสระได้ถูกต้องมากกว่าวิธีการใช้น้ำละลายออกมา อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้จะทำให้คลอไรด์ที่ถูกยึดจับอาจกลายเป็นคลอไรด์อิสระได้ ซึ่งทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่าความจริงได้

วิธีการที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง คือ การวัดคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ด้วยการใส่กรดละลายออกมา โดยตั้งสมมติฐานว่าทั้งคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และคลอไรด์อิสระจะ

ละลายออกมาด้วยกรด การวัดคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid soluble chloride) หรือคลอไรด์ทั้งหมดนี้อาจทำได้ โดยการใช้ขี้วัดคลอไรด์อ่อน หรือการไตเตรทชั้น

X-ray fluorescence ก็สามารถชี้หาปริมาณคลอไรด์ได้ แต่เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูงและต้องการผู้เชี่ยวชาญระดับสูงในการวิเคราะห์ ดังนั้น จึงถูกใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น

การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

1. ปริมาณคลอไรด์อิสระ ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณ

คลอไรด์อ่อนที่เป็นอันตราย (Aggressive chloride content) และคุณสมบัติยับยั้งของเนื้อประสานจากซีเมนต์ (Inhibitive properties of cement matrix) คลอไรด์ที่ถูกแยกออกมาจากสารละลายในคอนกรีตด้วยเนื้อประสานส่วนที่เป็นของแข็ง (คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ) จะไม่เคลื่อนที่ และไม่สามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปที่ผิวเหล็กเสริม ดังนั้น ตามทฤษฎีแล้วปริมาณคลอไรด์อิสระ (คลอไรด์ที่ละลายในน้ำ) จึงนิยมใช้แสดงในค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

ประเภทของคลอไรด์ที่ส่งผลกระทบต่อการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต คือ คลอไรด์อิสระเท่านั้น ดังนั้นปริมาณคลอไรด์อิสระจึงเป็นปัจจัยที่ถูกพิจารณาความเสี่ยงของการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ปัจจุบันมีแนวคิดเกี่ยวกับคลอไรด์ที่ถูกยึดจับอาจจะสามารถเปลี่ยนสภาพเป็นคลอไรด์อิสระได้ จากค่า pH ของคอนกรีตลดลง เพราะมีงานวิจัยที่บ่งบอกว่าเมื่อคอนกรีตมีค่า pH ลดลง จะทำให้ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง

อัตราส่วนของ $[Cl^-]/[OH^-]$ ถูกพิจารณาว่าเหมาะสมในการใช้บอกระดับคลอไรด์วิกฤต เพราะไม่ได้สะท้อนถึงความเสี่ยงที่เกิดจากคลอไรด์เพียงอย่างเดียว แต่ยังบ่งบอกถึงความเสี่ยงที่เกิดจากคลอไรด์ และคาร์บอนชั้นร่วมกันอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของ $[Cl^-]/[OH^-]$ ไม่สามารถแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตได้มากนัก เพราะไม่รวมผลการยับยั้งของเนื้อประสานจากซีเมนต์เข้ามาด้วย ซึ่งอาจมีชั้นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ที่แน่นบริเวณรอบผิวเหล็กเสริม การตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดชั้นฟิล์มต่อเนื่องบนผิวเหล็กเสริมที่ต้านทานการลดลงของค่า pH ได้ นอกจากนี้ อัตราส่วนของ $[Cl^-]/[OH^-]$ ไม่เกี่ยวเนื่องกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนต่าง ๆ

2. คลอไรด์ทั้งหมด การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยค่าคลอไรด์ทั้งหมด เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด และถูกใช้ในมาตรฐานต่าง ๆ ด้วยการแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตในรูปแบบของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในรูปแบบร้อยละ โดยน้ำหนักของซีเมนต์เป็นที่นิยม

เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณ และครอบคลุมความเสี่ยงของการผุกร่อนของคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และ ผลการยับยั้ง เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

มีงานวิจัยเสนอแนะว่า การแสดงระดับคลอไรด์วิกฤตที่เหมาะสมโดยรวมทั้งผลของคุณสมบัติของสารยับยั้ง และสารอันตรายต่อคอนกรีต โดยใช้ความสามารถเป็นกลางด้วยกรด (Acid neutralization capacity, ANC) และปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid soluble chloride) ทั้งนี้ ความสามารถเป็นกลางด้วยกรด บ่งบอกถึง ความสามารถสำรองของคอนกรีต (Buffering capacity of concrete) กล่าวคือ ปริมาณกรดที่ต้องใช้ในการลดค่า pH ของคอนกรีต และซีเมนต์ เพสต์ถึงค่าหนึ่ง ๆ ทั้งนี้ อัตราส่วนของคลอไรด์ทั้งหมดต่อ ANC นี้ เหมาะสมที่สุดสำหรับแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต เมื่อพิจารณาทั้งผลการยับยั้ง โดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และสารอันตรายต่อเหล็กเสริม เช่น เหล็กคลอไรด์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Matthews (1989) ได้ทำการศึกษาความสามารถการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผง หินปูน พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration) ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผง หินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ นำทดสอบในบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal zone) เป็นระยะเวลา 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีส่วนผสมของผงหินปูนร้อยละ 5 มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีส่วนผสมของหินปูนร้อยละ 25 ตามลำดับ เนื่องจาก ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของ คอนกรีต (Chloride binding capacity) ที่ผสมผงหินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่าต่ำ เพราะว่ามี ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่ำ (Low cementitious material) และคอนกรีตมีความพรุนสูง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของผงหินปูน ร้อยละ 5

Hornain, Marchand, Duhot, and Moranville-Regourd. (1995) ได้ทำการศึกษาการแพร่ คลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินปูน เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น เนื่องจาก การเติมฝุ่นหินปูน โดยทุกตัวอย่างใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การเติมฝุ่นหินปูน มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง เนื่องจากอนุภาคของฝุ่นหินปูนช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่าง ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น นอกจากนี้ ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ ITZ มีผลต่อค่า การแพร่ของคลอไรด์เพียงเล็กน้อย

Thomas (1996) ได้ศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาพแวดล้อมที่ติดกับทะเลในช่วง 1 ถึง 4 ปี โดยตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กประสบกับสภาพน้ำขึ้นน้ำลง ค่าการสูญเสียมวลของเหล็กเสริม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณเหล็กเสริม พบว่า ระดับของคลอไรด์ที่สูงที่สุดโดยที่การสูญเสียมวลของเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนไม่เห็นชัดเจนแปรเปลี่ยนไปตามระดับของปริมาณเถ้าลอย ทำให้สรุปได้ว่า เถ้าลอยคอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีในการปกป้องเหล็กเสริมในสภาพแวดล้อมทะเล

Tsiviliss, Chaniotakis, Badogiannis, Pahoulas and Ilias. (1999) ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) ของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A แตกต่างกัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของ C_3A ต่ำ (7.54%) และมีค่า C_3S สูง (65.15%) ให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง (11.74%) และ C_3S ต่ำ (57.99%)

Rui Luo, Yuebo Cai, Changyi Wang and Xiaoming Huang. (2003) ทำการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ และการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมตะกั่วหนักเหล็ก (GGBS) โดยแทนที่วัสดุประสานด้วย ตะกั่วหนักเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 70 จากการศึกษา พบว่า ตะกั่วหนักเหล็กช่วยให้ช่องว่างในโพรงของคอนกรีต (Pore structure) ลดลง และทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ลดลงด้วย เนื่องจาก ตะกั่วหนักเหล็กที่ผสมเพิ่มลงไปช่วยยึดจับคลอไรด์ด้วยกระบวนการทางเคมีให้กลายเป็น Friedal's salt ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกั่วหนักเหล็กมีค่าสูงขึ้น

Chindapasirt, Jaturapitakkul and Sinsiri. (2005) ทำการทดลองหาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังอัดคอนกรีต ความพรุน และขนาดของโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ 19.1 และ 6.4 ไมโครเมตร มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอย 0.00 0.20 และ 0.40 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น แต่จะช่วยลดขนาดโพรงช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เฟสของคอนกรีตได้

Chindapasirt, Chotithanorm, Cao and Sirivivatnanon. (2007) ทำการทดลองผลกระทบของความละเอียดของขนาดเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยใช้เถ้าลอยที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เถ้าลอยดั้งเดิม เถ้าลอยบดละเอียด 45% และเถ้าลอยบดละเอียด 10% ทำการทดลองตาม ASTM C1202 พบว่า ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วย เถ้าลอย และความละเอียดของเถ้าลอยที่ใช้ผสมในคอนกรีต

Ghrici, Kenai and Said-Mansour. (2007) ทำการศึกษาความทนทานของคอนกรีต และ มอร์ต้าร์ที่ผสมสารปอชโซลาน และผงหินปูน โดยผสมวัสดุ 3 อย่างเข้าด้วยกัน คือ สารปอชโซลาน ผงหินปูน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงหินปูนจนถึง 20% แทนที่สารปอชโซลานจนถึง 30% นำไป ทดสอบค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การซึมผ่านของคลอไรด์อออน ลดลงอย่างมาก เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด ที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 นั้น ให้ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์อออนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ วัสดุประสาน 2 ชนิด และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานที่ 0.40 นั้น คอนกรีตที่ที่ผสมสารปอชโซลาน 30% ให้ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ อออนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ตามลำดับ

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร, วสุ วิทยเขตปภา และทวิชัย

สำราญวานิช. (2551) ทำการศึกษาเรื่องความสามารถกักเก็บคลอไรด์ และการแพร่ของคลอไรด์ใน ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 และ 0.50 และอัตราส่วนการผสม ฝุ่นหินปูนที่ 0.05, 0.15 และ 0.25 พบว่า ความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตรา การแทนที่ด้วย วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่อัตราส่วนน้ำ 0.40 มีค่าลดลง และที่อัตราส่วน 0.50 ค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการแพร่ ของคลอไรด์พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำ หรืออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน ด้วย ฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังอัดที่ 91 วันจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หรือ อัตราส่วนการแทนที่ฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น

ชัยเฉลิม ราศรี, ทวิชัย สำราญวานิช, เฉลิมชัย วานิชย์กล้าเลิศ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล.

(2553) ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูน และเถ้าลอย แทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยทำการแทนที่วัสดุประสานด้วย ผงหินปูน และเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40-0.60 ทำการบ่ม ตัวอย่างคอนกรีตให้มีอายุ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง เมื่อทดสอบ ตัวอย่างถึงระยะเวลา 180 วัน และ 365 วัน จากการศึกษา พบว่า คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนใน อัตราส่วนร้อยละ 15 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ผงหินปูน และเถ้าลอย แทนที่วัสดุ ประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 มีความต้านทานการแทรกซึม คลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

วสุ วิทยเขตปภา, ทวิชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล.

(2553) ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

ประเภทที่ 5 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ซึ่งใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 บ่มตัวอย่างจนครบ 28 วัน ก่อนทำการทดสอบ นำไปแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 6 เดือน จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า การแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีต มีผลทำให้ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น

Chalee and Jaturapitakkul (2009) ทำการทดลองหาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย โดยหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอย 0% 15% 25% 35% และ 50% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 4 และ 5 ปี พบว่า การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในตัวอย่างคอนกรีตล้วน มีผลต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ มากกว่าในตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย

Cheewaket, Jaturapitakkul, and Chalee (2010) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยการหาค่าปริมาณคลอไรด์อิสระ และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เพื่อนำมาศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาในการเผชิญสภาพแวดล้อมทะเลจริง และปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอย ต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอยชนิด Class F ที่ 0% 15% 25% 35% และ 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 0.55 และ 0.65 หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 200 มิลลิเมตร และนำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 3 4 5 และ 7 ปี จากผลการทดสอบ พบว่า ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์โดยร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดขึ้นอยู่กับค่าปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอย เมื่อเถ้าลอยมาก ความสามารถในการกักเก็บ คลอไรด์ของคอนกรีตก็จะมากขึ้นด้วย จากงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนั้นไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

นุสรุ ขยันกิจ (2558) ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ระยะเวลา 2 ปี และ 3 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกอนสูงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลดีที่สุด ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำมาก และเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิมน้อย สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด พบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนวัสดุประสานในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีขึ้น เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย และขนาดอนุภาคเถ้าลอยที่เล็ก ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่

วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตยังดีขึ้น แต่กำลังอัดคอนกรีตต่ำลงมาก การใช้ปริมาณผงหินปูนแทนที่บางส่วนวัสดุประสานในคอนกรีตไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น เนื่องจากความสามารถเติมเต็มช่องว่างภายในคอนกรีตของอนุภาคผงหินปูน สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิดพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 แทนที่บางส่วนวัสดุประสาน มีทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำลงและกำลังอัดที่สูงขึ้น

บทที่ 3

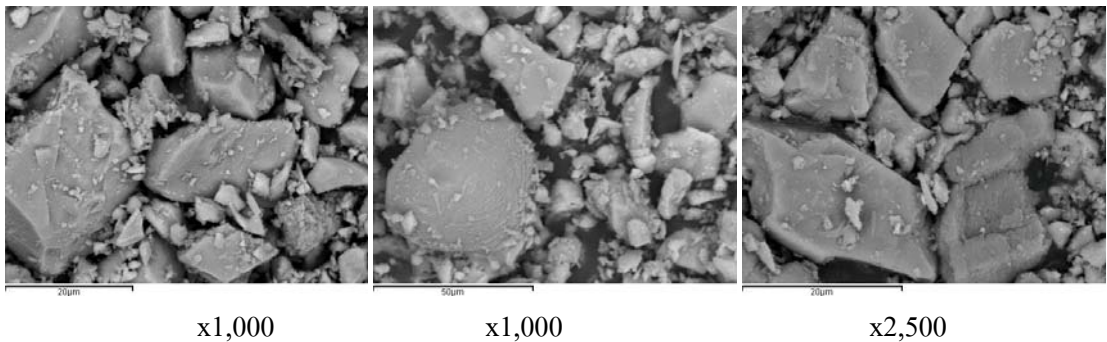
วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานและวัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ เฝ้าดูสิ่งแวดล้อมทะเลในระยะยาวเพื่อนำมาทำการทดสอบ และส่วนที่ 2 คือ การทดสอบ โดยมีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีต งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างคอนกรีตที่เฝ้าดูสิ่งแวดล้อมทะเลขึ้นมาทำการทดสอบภายหลังเฝ้าดูสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

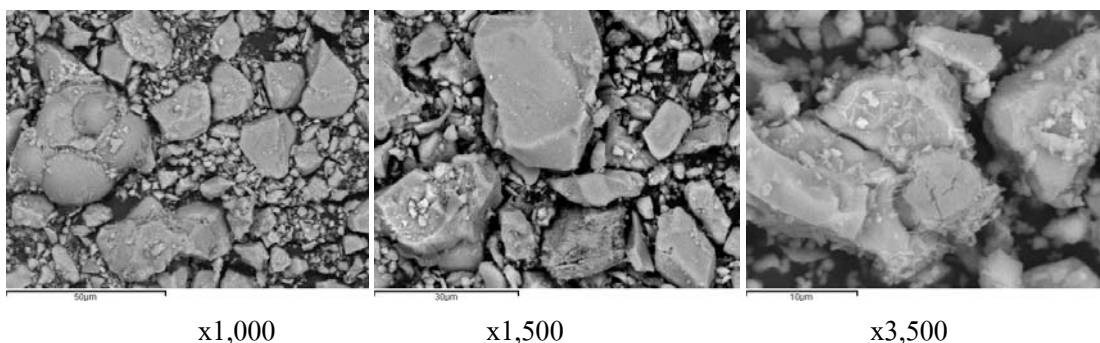
วัสดุที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีต หรือใช้ในงานก่อสร้างตามปกติ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 3-1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อถูกถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงดังภาพที่ 3-1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน และผงหินปูน แต่ใกล้เคียงใกล้เคียง โดยพิจารณาจากค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค D (v, 0.5) ดังตารางที่ 3-7 และกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังภาพที่ 3-11



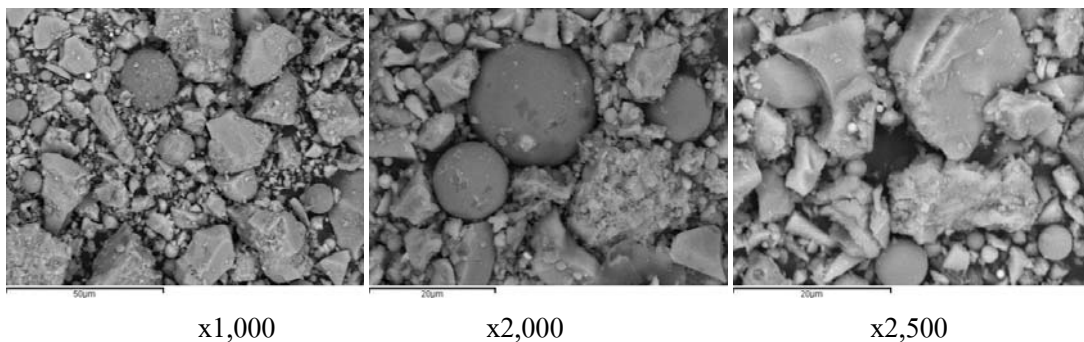
ภาพที่ 3-1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting Portland cement) เนื่องจากมีปริมาณ C_3A ต่ำมาก เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือ หรือสารละลายซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 ประเภท 5 ดังภาพที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 3-1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เมื่อถูกถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงดังภาพที่ 3-4 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทปอชโซลาน และผงหินปูน แต่มีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอย โดยพิจารณาจากค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค $D(v, 0.5)$ ดังตารางที่ 3-3 และกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน (Portland pozzolan cement) เป็นปูนที่ได้จากการบดสารปอชโซลานกับปูนเม็ด มีคุณสมบัติตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอชโซลาน มอก. 849-2532 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 3-1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน เมื่อถูกถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงดังภาพที่ 3-3 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าผงหินปูน แต่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และเถ้าลอย โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค $D(v, 0.5)$ ดังตารางที่ 3-3 และกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังภาพที่ 3-11

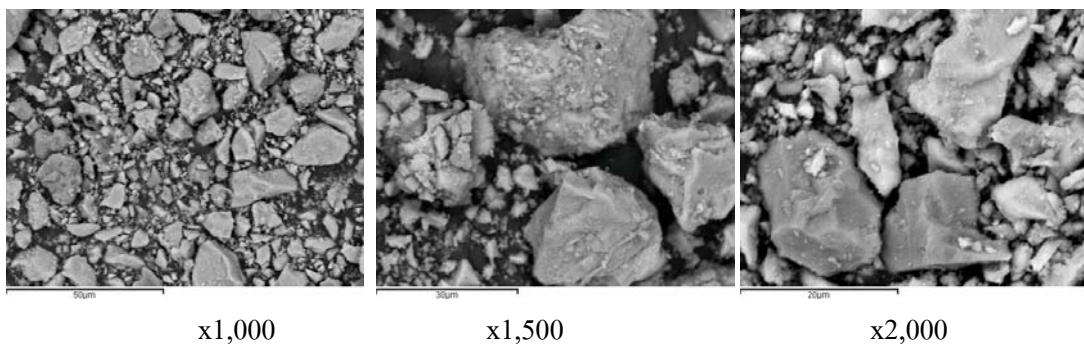


ภาพที่ 3-3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

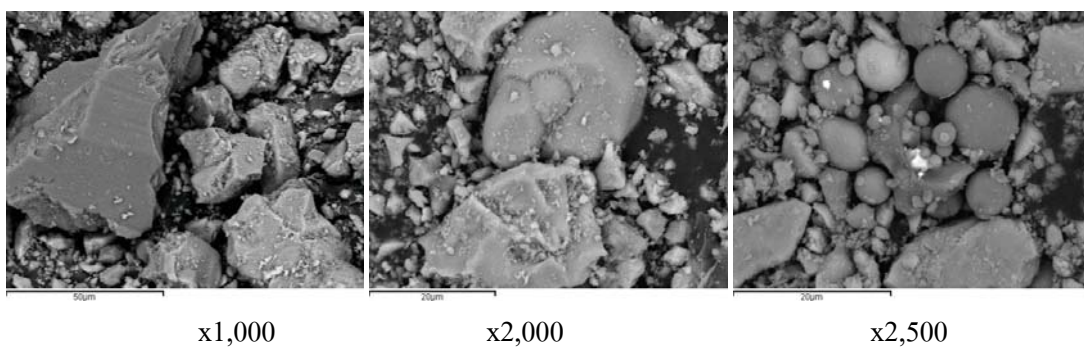
4. ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบด (Intergrinding limestone cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดหินปูนกับปูนเม็ด ประกอบด้วย

4.1 ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบด 10%

4.2 ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบด 20%

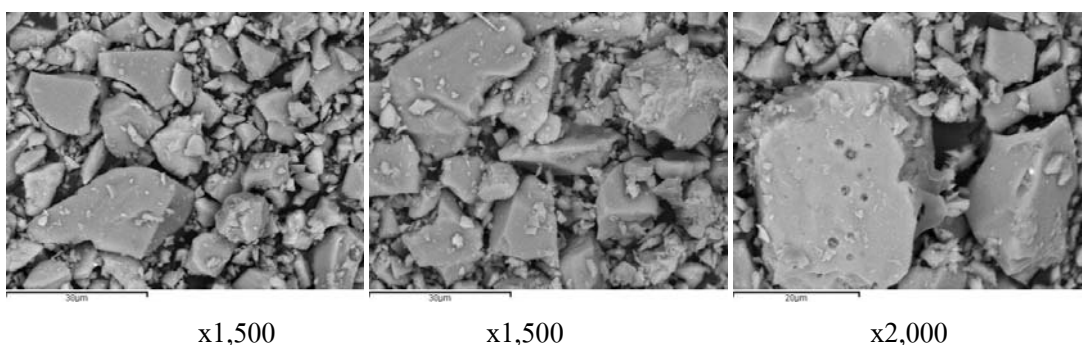


ภาพที่ 3-4 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบดร้อยละ 10 (SCGL10)



ภาพที่ 3-5 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนบดร้อยละ 20 (SCGL20)

5. ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) กับปูนเม็ด ตะกรันถลุงเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก (Pig iron) เกิดจากกระบวนการกำจัดความไม่บริสุทธิ์ออกจากเหล็ก ที่เป็นการหลอมตัวของ แคลเซียมออกไซด์จากหินปูน กับซิลิกาและอลูมินาจากแร่เหล็กและถ่าน โค้ก (Coke) เมื่อทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการ Quenching หรือที่เรียกว่า Granulation จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Granulated Blast-Furnace Slag ซึ่งเมื่อนำไปบดให้ละเอียดเรียกว่า Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS) ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วย CaO SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และน้ำจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ได้ CSH โดยตะกรันเตาถลุงเหล็กจะได้ CSH มากกว่า C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กจะช้ากว่า ดังนั้นการรับกำลังในระยะแรกจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ต่ำกว่า



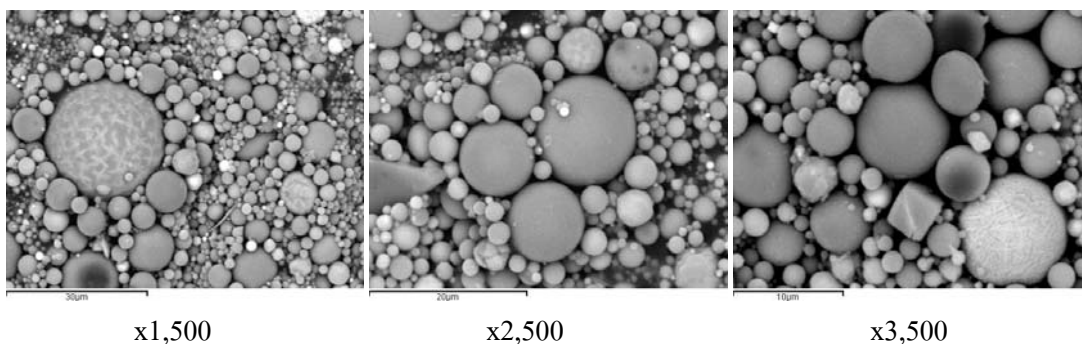
ภาพที่ 3-6 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG)

6. เถ้าลอย (Fly ash, FA) เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในแต่ละปีมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ซึ่งในประเทศไทย เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากมีซิลิกา หรืออะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ในงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นเถ้าลอยเกรดมอก. Class 2 ข. ($\text{CaO} > 10\%$) ASTM class F ($\text{Si} + \text{Fe} + \text{Al} > 70\%$) อนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยจากถ่านหินแม่เมาะ เมื่อถูกถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงดังภาพที่ 3-8 พบว่าเถ้าลอยมีอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปอซโซลาน และผงหินปูน

โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค D (v, 0.5) ดังตารางที่ 3-7 และกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาค ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-7 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย



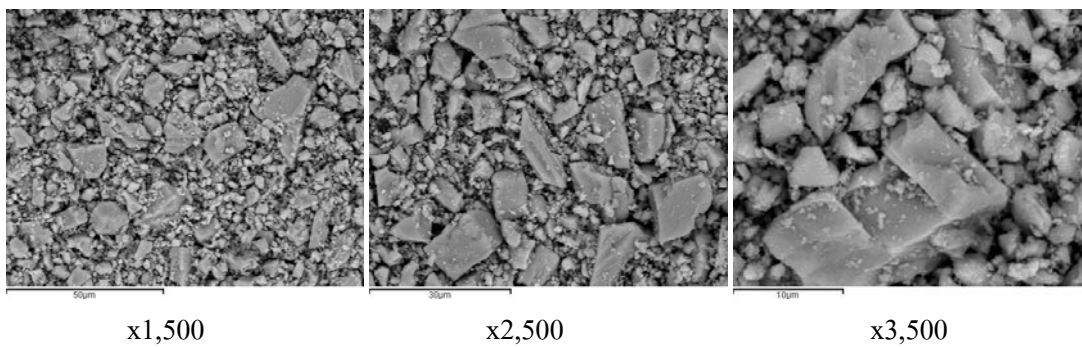
ภาพที่ 3-8 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าลอย

7. ผงหินปูน (Limestone powder, L) ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการการย่อยหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ (Clinker) มีลักษณะละเอียด และมีความบริสุทธิ์ต่ำ ใช้เป็นวัสดุเติมแทรกช่องว่าง (Filler) ของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้จะใช้ผงหินปูนของ บริษัท Surint Omya จำกัด ดังภาพที่ 3-9 อนุภาคเฉลี่ยของผงหินปูนจากบริษัท Surint Omya จำกัด เมื่อถูกถ่ายด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงดังภาพที่ 3-10 พบว่ามีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์

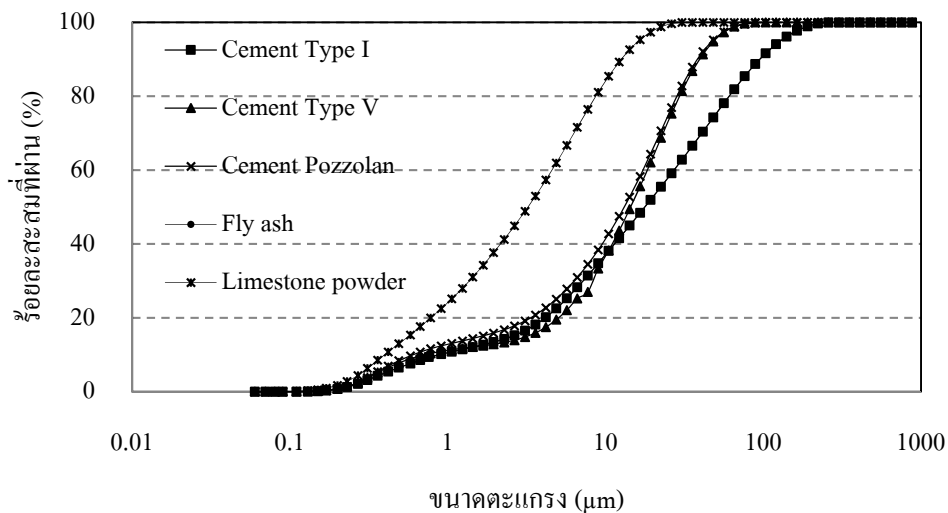
ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปอชโซลาน และแก้วลอย โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคD (v, 0.5) ดังตารางที่ 3-7 และกราฟขนาดคละของอนุภาคดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-9 ลักษณะทางกายภาพของผงหินปูน



ภาพที่ 3-10 ภาพถ่ายกำลังสูงของผงหินปูน



ภาพที่ 3-11 ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน

8. ปูนซีเมนต์ทะเล เป็นปูนซีเมนต์ที่มีปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีให้มีความสามารถในการทนทานต่อการการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต และทนทานต่อการกัดกร่อนโดยซัลเฟต ด้วยการนำวัสดุปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทะเลแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

Chemical compositions (% by weight)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5
Silicon dioxide, SiO ₂	19.51	21.87
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	4.97	3.87
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	3.78	4.34
Calcium oxide, CaO	65.38	64.56
Magnesium oxide, MgO	1.08	1.11
Sulfur trioxide, SO ₃	2.16	2.08
Sodium oxide, Na ₂ O	0.01	0.01
Potassium oxide, K ₂ O	0.44	0.24
Loss on ignition, LOI	2.27	1.59
Tricalcium silicate, C ₃ S	72.9	58.4
Dicalcium silicate, C ₂ S	0.9	18.6
Tricalcium aluminate, C ₃ A	6.8	2.9
Tetracalcium aluminoferrite, C ₄ AF	11.5	13.2
Physical property		
Blaine fineness (cm ² /g)	3,550	3,830

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน

Chemical compositions (% be weight)	ปูนซีเมนต์ผสม ผงหินปูน 10%	ปูนซีเมนต์ผสม ผงหินปูน 20%
Silicon dioxide, SiO ₂	17.48	16.2
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	4.49	4.13
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	3.36	3.01
Calcium oxide, CaO	63.29	62.67
Magnesium oxide, MgO	1.02	0.98
Sulfur trioxide, SO ₃	2.35	2.37
Sodium oxide, Na ₂ O	0.01	0.89
Potassium oxide, K ₂ O	0.44	2.39
Loss on ignition, LOI	7.20	9.93
Physical property		
Blaine fineness (cm ² /g)	4,500	4,600

ตารางที่ 3-3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ปอชโซลานและปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

Chemical compositions (% by weight)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอชโซลาน	ปูนซีเมนต์ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก[f
Silicon dioxide, SiO ₂	24.98	28.76
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	9.25	11.27
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	5.97	1.69
Calcium oxide, CaO	52.65	51.41
Magnesium oxide, MgO	1.62	3.91
Sulfur trioxide, SO ₃	2.48	2.05
Sodium oxide, Na ₂ O	< 0.01	0.01
Potassium oxide, K ₂ O	0.78	0.39
Loss on ignition, LOI	1.85	0.01
Physical property		
Blaine fineness (cm ² /g)	4,470	5,160

ตารางที่ 3-4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทะเล

Chemical compositions (% by weight)	ปูนซีเมนต์ทะเล
Silicon dioxide, SiO ₂	27.64
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	12.04
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	7.71
Calcium oxide, CaO	38.43
Magnesium oxide, MgO	1.83
Sulfur trioxide, SO ₃	1.99
Sodium oxide, Na ₂ O	3.38
Potassium oxide, K ₂ O	1.26
Loss on ignition, LOI	5.25

ตารางที่ 3-5 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงหินปูนและเถ้าลอย

Chemical compositions (% be weight)	Limestone powder, L	Fly ash, FA
Silicon dioxide, SiO ₂	0.46	40.93
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	0.06	22.42
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	0.03	13.64
Calcium oxide, CaO	55.25	13.63
Magnesium oxide, MgO	0.37	2.93
Sulfur trioxide, SO ₃	0.01	1.92
Sodium oxide, Na ₂ O	0.01	0.89
Potassium oxide, K ₂ O	0.01	2.39
Loss on ignition, LOI	43.79	0.46
Physical property		
Blaine fineness (cm ² /g)	8,840	2460

ตารางที่ 3-6 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและผงหินปูน

Chemical compositions (% be weight)	Fly ash, FA (Mae Moh)	Limestone powder, LP
Silicon dioxide, SiO ₂	40.93	0.46
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	22.42	0.06
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	13.64	0.03
Calcium oxide, CaO	13.63	55.25
Magnesium oxide, MgO	2.93	0.37
Sulfur trioxide, SO ₃	1.92	<0.01
Loss on ignition, LOI	0.46	43.79
Sodium oxide, Na ₂ O	0.89	<0.01
Potassium oxide, K ₂ O	2.39	0.01
Titanium Dioxide, TiO ₂	0.43	<0.01
Tricalcium silicate, C ₃ S	93	-
Phosphorus pentoxide P ₂ O ₅	0.15	0.01
Free CaO	0.22	-
Physical properties		
Blaine Fineness(cm ² /g)	4,658	8,840
Specific gravity	2.20	2.69

ตารางที่ 3-7 ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน

Mean diameters	Portland cement type 1 (μm)	Portland cement type 5 (μm)	Portland cement pozzolan (μm)	Fly ash (μm)	Limestone powder (μm)
D (v, 0.1)	0.89	0.71	0.60	0.89	0.40
D (v, 0.5)	17.74	14.43	13.16	17.84	3.23
D (v, 0.9)	94.87	39.48	38.19	94.87	12.58
D [4, 3]	35.23	18.09	17.02	35.23	5.08
D [3, 2]	2.64	2.45	2.22	2.54	1.18

ตัวย่อ

ความหมาย

- D (v, 0.1) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 10 เล็กกว่า
D (v, 0.5) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 50 เล็กกว่า
D (v, 0.9) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 90 เล็กกว่า
D [4, 3] ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าโดยปริมาตร
D [3, 2] ค่ามัธยฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าโดยพื้นที่ผิว

9. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ เป็นทรายบกจากจังหวัดชลบุรีที่ได้ทำการทดสอบขนาดละเอียดแล้วพบว่าทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นเป็นทรายที่มีขนาดละเอียดดี จึงสามารถนำทรายนี้ไปใช้ในการทดสอบได้ทันที โดยไม่ต้องทำการคัดแยกขนาดของทรายอีก ในงานวิจัยนี้ใช้ทรายบกในทุกส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3-8 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบน ตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ผ่านตะแกรง
เบอร์ 4	13.4	2.68	2.68	97.32
เบอร์ 8	68.5	13.70	16.38	83.62
เบอร์ 16	162.4	32.48	48.86	51.14
เบอร์ 30	87.8	17.56	66.42	33.58
เบอร์ 50	63.8	12.76	79.18	20.82
เบอร์ 100	50.1	10.02	89.20	10.80
รวม	500.0	100		

10. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

มวลรวมหยาบที่ใช้ เป็นหินปูน (Lime stone) เมื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดคละ พบว่ามีขนาดคละที่ดี จึงสามารถนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการคัดแยกขนาด ในงานวิจัยนี้ใช้หินปูนในทุกส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3-9 ขนาดคละของมวลหยาบ

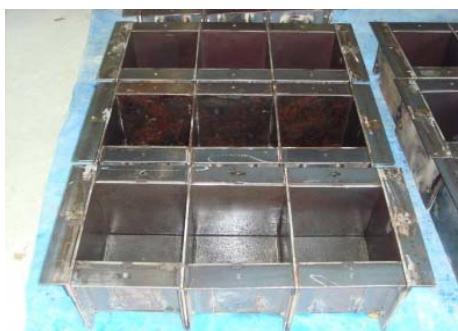
ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบน ตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ผ่านตะแกรง
1"	-	-	-	100
3/4"	23.10	2.31	2.31	97.69
1/2"	582.0	58.23	60.54	39.46
3/8"	284.2	28.44	88.98	11.02
เบอร์ 4	99.2	9.92	98.9	1.1
เบอร์ 8	0.6	0.06	98.96	1.04
รวม	999.4	100		

11. น้ำ (Water)

ที่ใช้ผสมคอนกรีตใช้น้ำประปาในห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีตและวิศวกรรม
โครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ยกเว้นส่วนผสม
คอนกรีตที่ใช้ SCGSEA จะใช้น้ำทะเลเป็นส่วนผสม โดยที่น้ำทะเลที่ใช้มีความเข้มข้นคลอไรด์
เท่ากับ 1.0%

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร
ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2. อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

3. เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร สำหรับฝัง
ในตัวอย่างคอนกรีต ดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร

4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

5. เครื่องผสมคอนกรีตดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 เครื่องผสมคอนกรีต

6. เครื่องฉีดยาคอนกรีตดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 เครื่องฉีดยาคอนกรีต

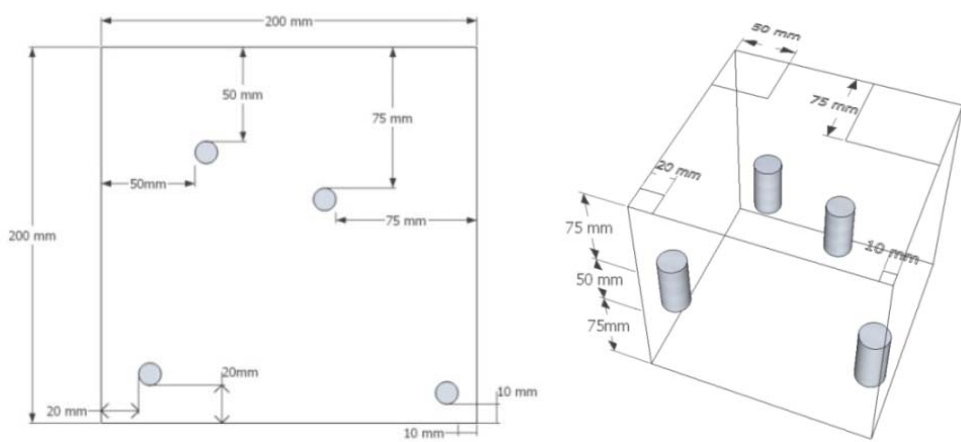
7. เครื่องเจาะตัวอย่าง (Coring machine)
8. เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ
9. ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ
10. เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP TitrinoMetrohm
11. TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar
12. เครื่องกวนแม่เหล็ก
13. เครื่องดูด (Suction apparatus)
14. เครื่องต้ม (Hot plate)
15. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

16. แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบ
17. ซ้อนตักสาร
18. ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
19. กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร
20. ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
21. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
22. กรวย (Buchner funnel)
23. ขวดกรองแก้วก้นโป่ง (Filtration flask)
24. ตะแกรงเบอร์ 20
25. กรดไนตริก (Nitric Acid)
26. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
27. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N Sodium chloride (NaCl)
28. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N Silver nitrate (AgNO_3)

วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 20 x 20 x 20 เซนติเมตร โดยใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 0.50 และ 0.60 ทำการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน และเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ซึ่งการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน และเถ้าลอยแทนที่ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่านั้น ดังตารางที่ 3-10 ทำการฝังเหล็กเสริมโดยใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) เท่ากับ 1 2 5 และ 7.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3-18 โดยใช้อุปกรณ์กำหนดระยะฝังเหล็กเสริมจากนั้นทำการถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง แล้วบ่มตัวอย่างโดยใช้กระสอบป่านพรมน้ำอีก 27 วัน จึงนำตัวอย่างไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 3-18 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการวางเหล็กเสริม

ตารางที่ 3-10 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล

Code	Mix designation	Mix proportion of concrete (kg/m ³)					
		Cement	Rock (SSD)	Sand (SSD)	Additive		Water
					FA	LP	
C1	SCG1 W40	435	1,025	776	-	-	174
C2	SCG1 W50	382	1,025	776	-	-	191
C3	SCG1 W60	340	1,025	776	-	-	204
C4	SCG5 W40	435	1,025	776	-	-	174
C5	SCG5 W50	382	1,025	776	-	-	191
C6	SCG5 W60	340	1,025	776	-	-	204
C7	SCC1 W40	435	1,025	776	-	-	174
C8	SCC1 W50	382	1,025	776	-	-	191
C9	SCC1 W60	340	1,025	776	-	-	204
C10	TPI1 W40	435	1,025	776	-	-	174
C11	TPI1 W50	382	1,025	776	-	-	191
C12	TPI1 W60	340	1,025	776	-	-	204
C13	SCGP W40	435	1,025	776	-	-	174
C14	SCGP W50	382	1,025	776	-	-	191
C15	SCGP W60	340	1,025	776	-	-	204
C16	SCGL10 W40	435	1,025	776	-	-	174
C17	SCGL10 W50	382	1,025	776	-	-	191
C18	SCGL10 W60	340	1,025	776	-	-	204
C19	SCGL20 W40	435	1,025	776	-	-	174
C20	SCGL20 W50	382	1,025	776	-	-	191
C21	SCGL20 W60	340	1,025	776	-	-	204
C22	SCG FA20 W40	335	1,025	776	84	-	168
C23	SCG1 FA40 W40	242	1,025	776	162	-	162
C24	SCG1 FA60 W40	156	1,025	776	234	-	156
C25	SCG1 FA20 W50	295	1,025	776	74	-	185
C26	SCG1 FA40 W50	215	1,025	776	143	-	179
C27	SCG1 FA60 W50	139	1,025	776	208	-	173
C28	SCG1 FA20 W60	264	1,025	776	66	-	198

ตารางที่ 3-10 (ต่อ)

Code	Mix designation	Mix proportion of concrete (kg/m ³)					
		Cement	Rock (SSD)	Sand (SSD)	Additive		Water
					FA	LP	
C29	SCG1 FA40 W60	264	1,025	776	66	-	198
C30	SCG1 FA60 W60	125	1,025	776	187	-	187
C31	SCG1 LP5 W50	362	1,025	776	-	19	190
C32	SCG1 LP10 W50	342	1,025	776	-	38	190
C33	SCG1 LP15 W50	322	1,025	776	-	57	189
C34	SCG1 LP5 W60	322	1,025	776	-	17	204
C35	SCG1 LP10 W60	305	1,025	776	-	34	203
C36	SCG1 LP15 W60	287	1,025	776	-	51	191
C37	SCG1 FA35L5 W40	244	1,025	776	142	20	163
C38	SCG1 FA30L10 W40	245	1,025	776	123	41	164
C39	SCG1 FA25L15 W40	247	1,025	776	103	62	165
C40	SCG1 FA35L5 W50	216	1,025	776	126	18	180
C41	SCG1 FA30L10 W50	217	1,025	776	108	36	181
C42	SCG1 FA25L15 W50	218	1,025	776	91	55	182
C43	SCG1 FA35L5 W60	193	1,025	776	113	16	193
C44	SCG1 FA30L10 W60	194	1,025	776	97	32	194
C45	SCG1 FA25L15 W60	195	1,025	776	81	49	195
C46	SCGSEA W40	435	1,025	776	-	-	174
C47	SCGSEA W30	505	1,025	776	-	-	152
C48	SCGSEA W35	400	1,025	776	-	-	140
C49	SCGSLAG W40	435	1,025	776	-	-	174
C50	SCGSLAG W50	382	1,025	776	-	-	191
C51	SCGSLAG W60	340	1,025	776	-	-	204
C52	SCGSEA W25	388	1,102	941	-	-	97
C53	SCGSEA W30-2	356	1,102	941	-	-	107

หมายเหตุ: โดยที่ Mix designation ต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

SCG1 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

SCG5 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

LP5 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน ร้อยละ 5

LP10 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10

LP15 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน ร้อยละ 15

FA35 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 35

FA30 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30

FA25 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 25

FA35 LP5 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 35

ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

FA30 LP10 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30

ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

FA25 LP15 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 25

ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 15

W40 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

W50 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

W60 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ตัวอย่าง เช่น SCG1 FA35 L5 W50 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 5 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

สถานที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตสิ่งแวดลอมทะเล

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดลอมทะเล ใช้พื้นที่บริเวณใต้ศาลาวัดโกมุท-
พัฒนาราม ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี โดยใช้ระยะเวลาศึกษาทั้งหมด 10 ปี แต่ในงานวิจัยนี้จะนำ
ตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดลอมทะเลระยะเวลา 4 และ 5 ปี มาใช้ในการศึกษาสิ่งแวดลอมทะเล
บริเวณใต้ศาลาวัดโกมุทพัฒนาราม พบว่ามีระดับน้ำทะเลขึ้น และลงวันละ 2 รอบ คือ ตอนเช้าน้ำ
ทะเลมีระดับสูงสุด จากนั้นเวลาบ่ายน้ำทะเลลดลงต่ำสุดจนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้ง และช่วงเย็น
น้ำทะเลขึ้นสูงสุดอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ระยะเวลาขึ้นลงของน้ำทะเลเปลี่ยนแปลง
ตามฤดูกาล เช่น ฤดูหนาวน้ำทะเลขึ้นสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียก
นานกว่าฤดูอื่น ๆ หรือตัวอย่างคอนกรีตไม่ได้อยู่ในสภาวะแห้งสนิท



ภาพที่ 3-19 บริเวณวางตัวอย่างและตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้ศาลาวัดโกมพวัตนาราม

การทดสอบคอนกรีต

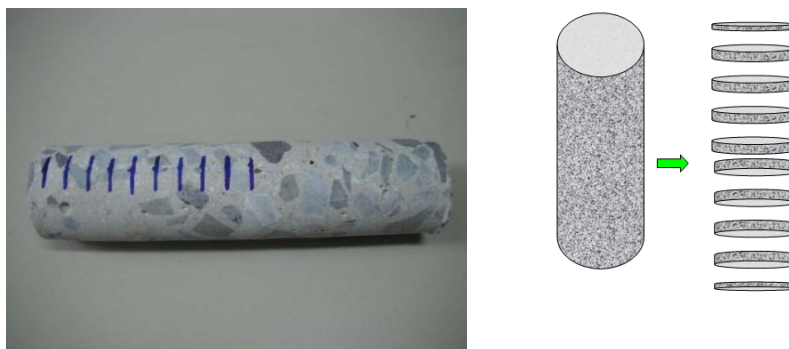
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

1. การเตรียมผงดตัวอย่างคอนกรีตก่อนการไตเตรท

นำตัวอย่างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลแล้วเป็นระยะเวลา 4 ปี และ 5 ปี มาทำการเจาะด้วยเครื่องเจาะคอนกรีต โดยทำการเจาะจากผิวหน้าคอนกรีตลงไป และเพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 2 ตัวอย่าง ดังภาพที่ 3-20 แล้วนำแท่งคอนกรีตที่เจาะมาจากตัวอย่างคอนกรีตนั้น ตัดแบ่งเป็นชิ้นความหนา 10 มิลลิเมตร ลึกลงไปจากผิวหน้าเป็นจำนวน 10 ชิ้น ดังภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-20 เครื่องเจาะคอนกรีตขณะทำงาน และตำแหน่งเจาะเพื่อนำแท่งคอนกรีตมาทดสอบ



ภาพที่ 3-21 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะออกมาและการตัดแท่งตัวอย่าง

นำตัวอย่างผงคอนกรีตที่ได้จากการบดมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ดังภาพที่ 3-26 แล้วนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) และปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ทำการไตเตรทโดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ดังภาพที่ 3.22 ซึ่งเครื่องทดสอบจะพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า “Potentiometric titration”



ภาพที่ 3-22 ครกใช้บดตัวอย่างและผงตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว



ภาพที่ 3-23 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติด้วยวิธีจุดยุติทางศักย์ไฟฟ้า

วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์

1. วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) คือ คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) ดังนี้

- 1.1 นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผง 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 1.2 เติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ที่มีซีเมนต์บดเป็นผง จนถึงขีด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำละลายกรดไนตริกที่เจือจาง ในอัตราส่วน 1 : 1 ลงไป 25 มิลลิลิตร ตามลงไปทันที
- 1.3 นำบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างนำไปให้ความร้อนด้วยการต้มจนเดือด (อย่าให้เดือดเกิน 2-3 นาที) จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
- 1.4 ทำการประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง แล้วล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร)
- 1.5 นำบีกเกอร์สารที่เย็นแล้วมาวางลงบนเครื่องกวนแม่เหล็ก แล้วใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แล electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงใน หรืออยู่เหนือสารละลาย

1.6 เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง และค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดที่ยุติปฏิกิริยา

1.7 ทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็น ร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

2. วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218(Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ดังนี้

2.1 นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผง 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม มาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2 เติมน้ำกลั่นลงไป ในบีกเกอร์ที่มีซีเมนต์บดเป็นผง จนถึงขีด 100 มิลลิลิตร

2.3 นำไปต้มให้เดือด 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

2.4 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ตั้งบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกัน ไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วกัน ไปทันทีด้วยน้ำกลั่น (ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร)

2.5 เติมน้ำสารละลายกรดไนตริกเจือจาง ในอัตราส่วน 1 : 1 ลงไป 3 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1-2 นาที จนเดือด (อย่าให้เดือดนานเกิน 2-3 นาที) จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)

2.6 นำบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ววางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป ใส่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงใน หรืออยู่เหนือสารละลาย

2.7 เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดง

ปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดที่ยุติปฏิกิริยา

2.8 ทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็น ร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

กำลังอัดคอนกรีต

แท่งคอนกรีตที่เจาะออกมาจากตัวอย่างคอนกรีตมาตัดให้ได้สัดส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 1 : 2 และทำการปรับผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตตัวอย่างด้วยกำมะถัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบเพื่อหากำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39



ภาพที่ 3-24 แท่งตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบกำลังอัด

ขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตด้วยวิธี MIP

การทดสอบเพื่อหาขนาดของโพรง และการกระจายตัวของโพรงภายในคอนกรีต ทำการทดสอบด้วยวิธี Mercury intrusion porosimeter (MIP) โดยใช้เครื่อง Pore sizer distribution ใช้หลักการวิเคราะห์ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน โดยใช้ปรอทอัดเข้าไปในรูพรุนของตัวอย่างใช้ความดัน 30,000 psi ซึ่งจะสามารถวัดโพรงขนาด 6 ไมครอนขึ้นไปได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมตัวอย่าง โดยการตัดก้อนมอร์ต้าให้เป็นรูปทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด $0.5 \times 0.5 \times 1.5$ ตารางเซนติเมตร
2. นำไปอบในเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. จากนั้นส่งตัวอย่างไปทดสอบที่สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วว.)

ความพรุนของคอนกรีตด้วยวิธี ASTM C 642

การทดสอบเพื่อหาความพรุนของเนื้อคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 642 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมตัวอย่างคอนกรีตให้มีปริมาตรไม่ต่ำกว่า 350 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณ 800 กรัม
2. นำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3-25



ภาพที่ 3-25 แช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาความพรุนของเนื้อคอนกรีต

3. อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนด นำตัวอย่างออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 20-25 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำตัวอย่างไปอบอีกครั้งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 20-25 องศาเซลเซียส ทำการจดบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง เป็น น้ำหนัก (A) โดยค่าน้ำหนักที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 ต้องต่างจากขั้นตอนที่ 2 ไม่เกินร้อยละ 0.5 หากเกินให้ทำขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.5



ภาพที่ 3-26 การอบตัวอย่างในตู้อบควบคุมอุณหภูมิ

5. นำตัวอย่างมาต้มด้วยน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ทำการปล่อยให้เย็นเป็นระยะเวลา 14 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาเช็ดผิวให้แห้ง และชั่งน้ำหนักจะได้น้ำหนักอิมตัวอย่างแห้ง (B)
6. นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในน้ำจะได้น้ำหนัก (C) ดังภาพที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 การชั่งน้ำหนักแบบต่างๆ ในการทดสอบความพรุนคอนกรีต

7. นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ 3-1

$$\text{Volume of permeable pore space (voids), \%} = (B - A) / (B - C) \times 100 \quad (3-1)$$

การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

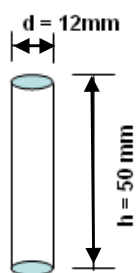
เกิดสนิมพื้นที่ผิวรอบ ๆ เหล็กเสริม ได้ถูกพิจารณาด้วยการคำนวณพื้นที่การเกิดสนิม โดยการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1 x 1 ตารางมิลลิเมตร มาทาครอบเหล็กเสริมแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม ดังภาพที่ 3-29 จากนั้นนับพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของเหล็กเสริม และนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด สามารถคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิม ดังสมการ 3-2

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

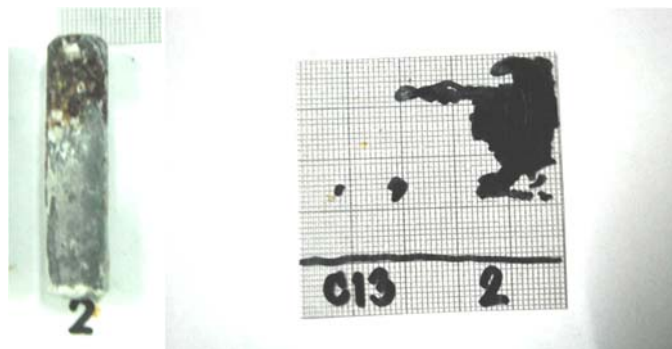
โดยที่พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถหาได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 หาโดยการนับช่องตารางกราฟที่ระบายไว้ 1 ช่อง เท่ากับ 1 ตารางมิลลิเมตร

วิธีที่ 2 หาโดยคำนวณพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรมโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-28 ขนาดของแท่งเหล็กที่ฝังในก้อนตัวอย่าง



ภาพที่ 3-29 แท่งเหล็กที่เกิดสนิมและแผ่นกราฟที่ทำการระบายพื้นที่เกิดสนิมแล้ว

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล นอกจากจะทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์แล้ว ในงานวิจัยนี้ยังทำการศึกษาการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยนำเหล็กเสริมมาทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำเหล็กไปแช่ในสารละลาย โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดในการชั่ง 0.001 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น (W_i) จากนั้นนำเหล็กไปแช่ในสารละลายกรด เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM G1 (Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens) แล้วนำขึ้นมาทำความสะอาด ชั่งน้ำหนักแล้วทำการบันทึกเป็นค่าน้ำหนักสุดท้าย (W_f) โดยทำงานกว่าค่าน้ำหนักสุดท้ายไม่ลดลงจากครั้งแรกที่แช่ในสารละลายกรด จึงจะนำค่าน้ำหนักสุดท้ายมาคำนวณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

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

โดยที่ W_i = น้ำหนักเหล็กเริ่มต้นก่อนเป็นสนิม (กรัม)

W_f = น้ำหนักภายหลังขัดสนิมออก (กรัม)

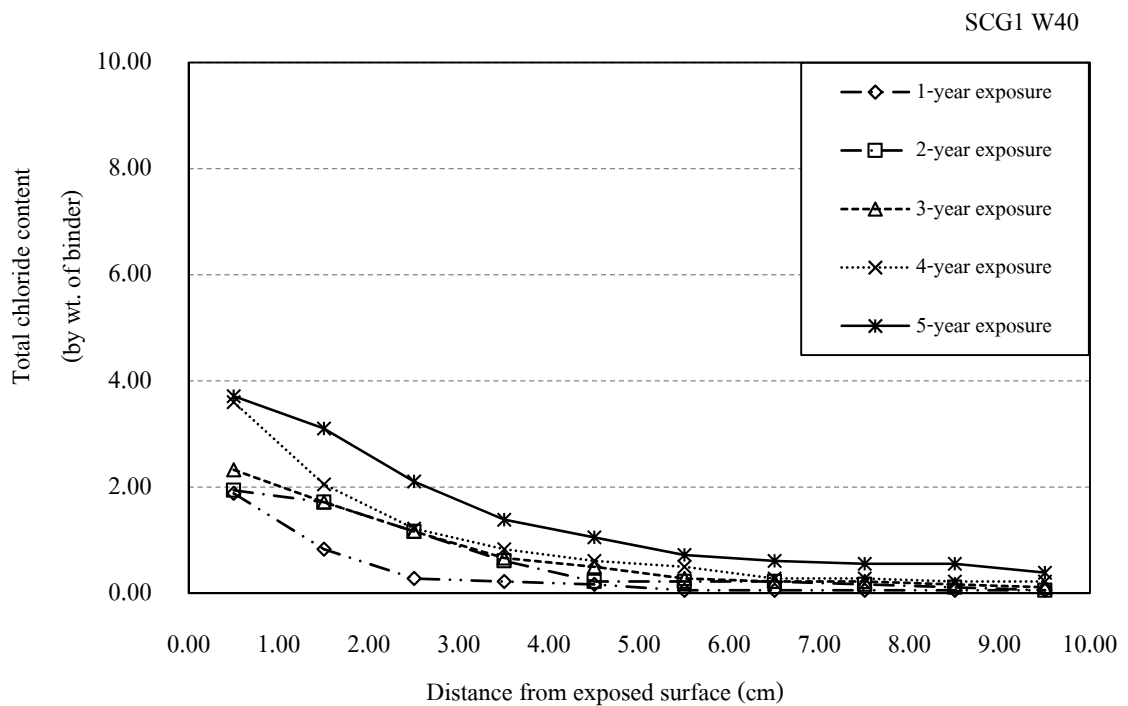
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

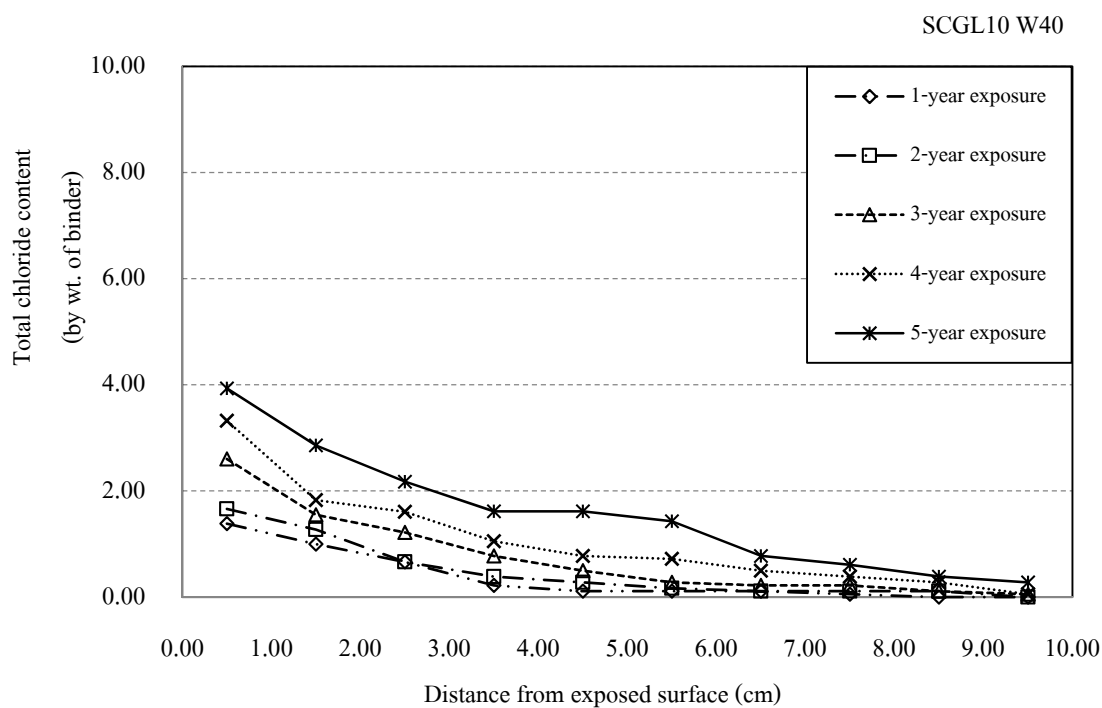
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

จากภาพที่ 4-1 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น เนื่องจากคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตมากขึ้นตามระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล



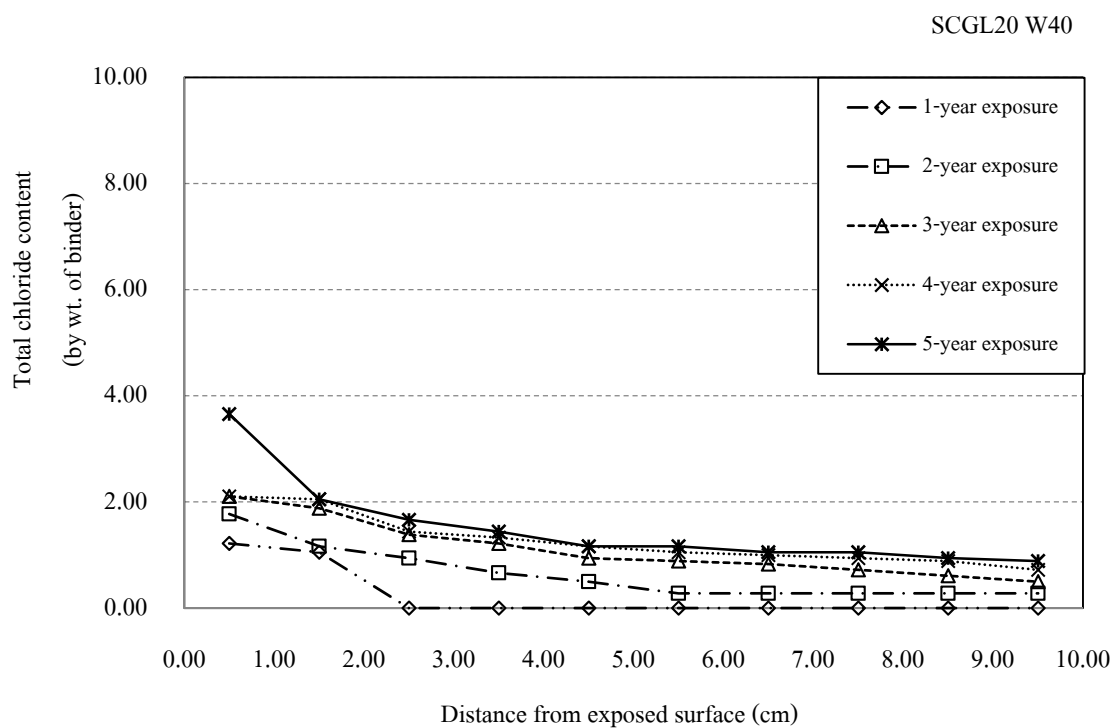
ภาพที่ 4-1 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-2 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นกัน



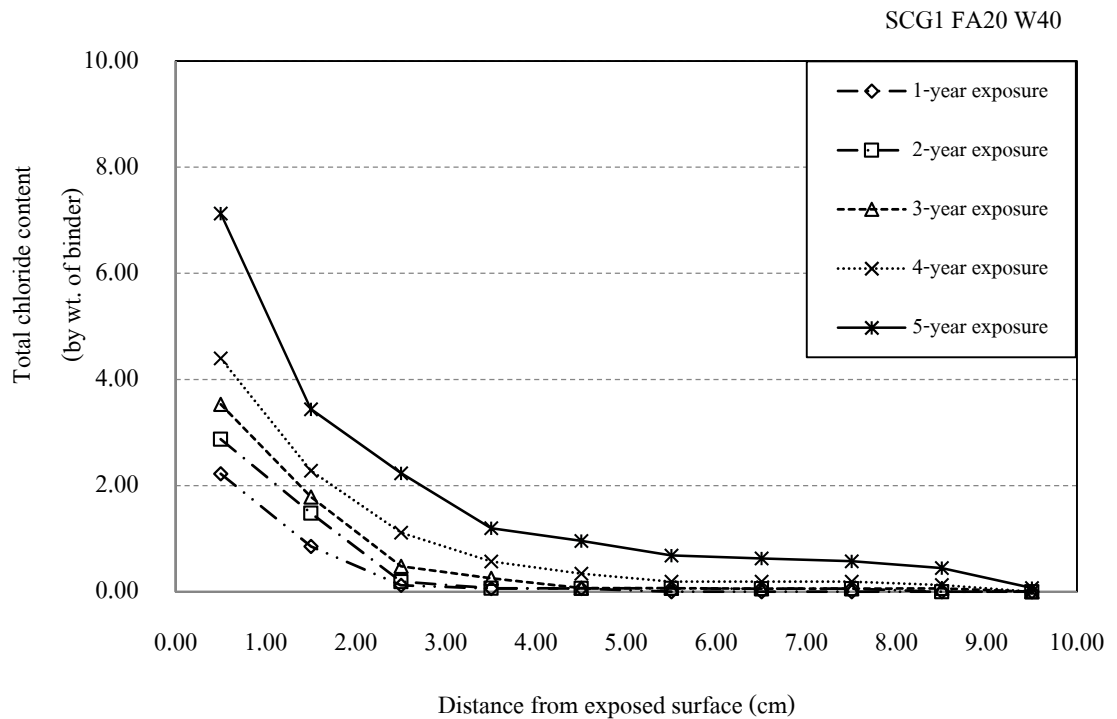
ภาพที่ 4-2 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-3 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นเดียวกัน



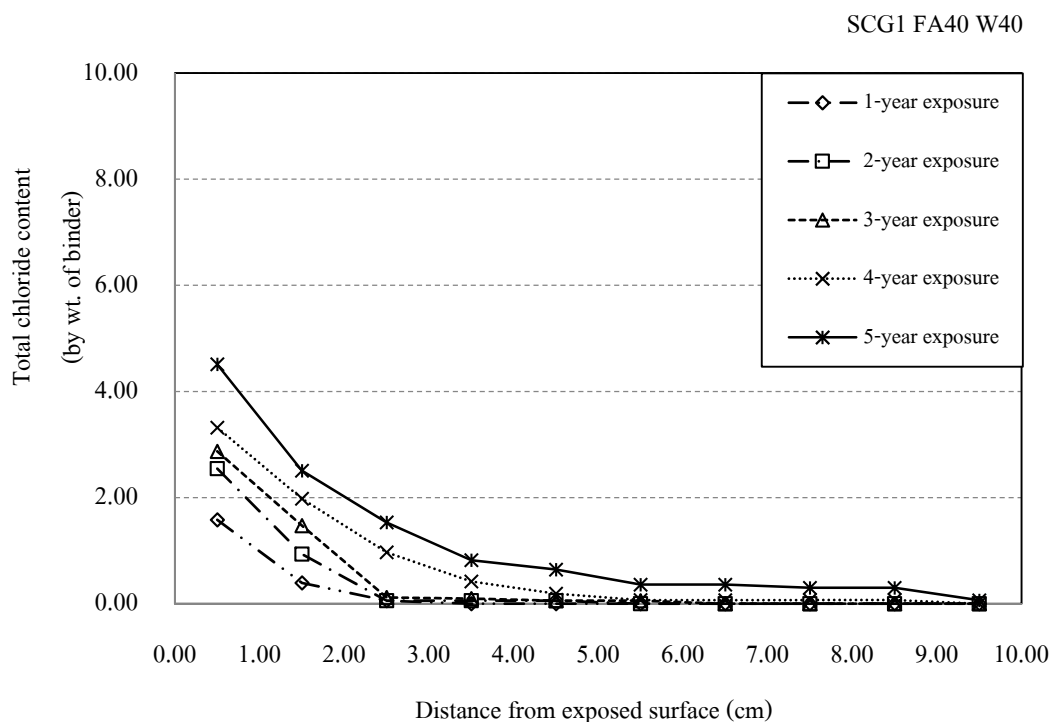
ภาพที่ 4-3 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-4 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นเดียวกัน



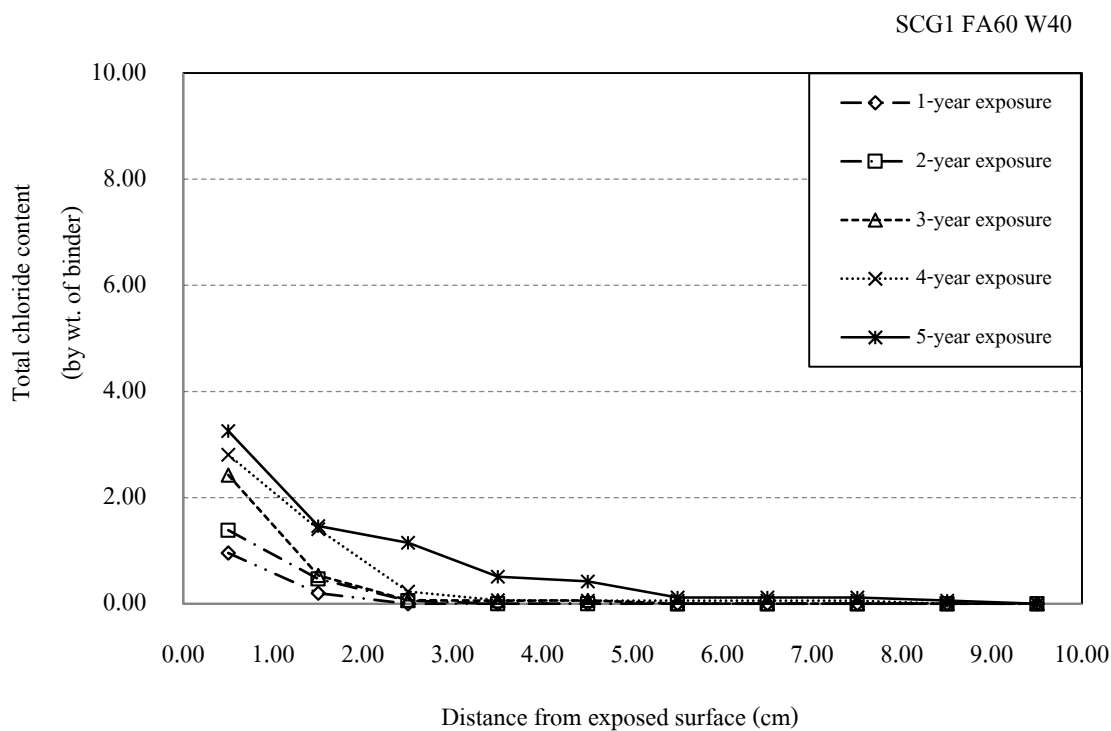
ภาพที่ 4-4 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-5 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นเดียวกัน



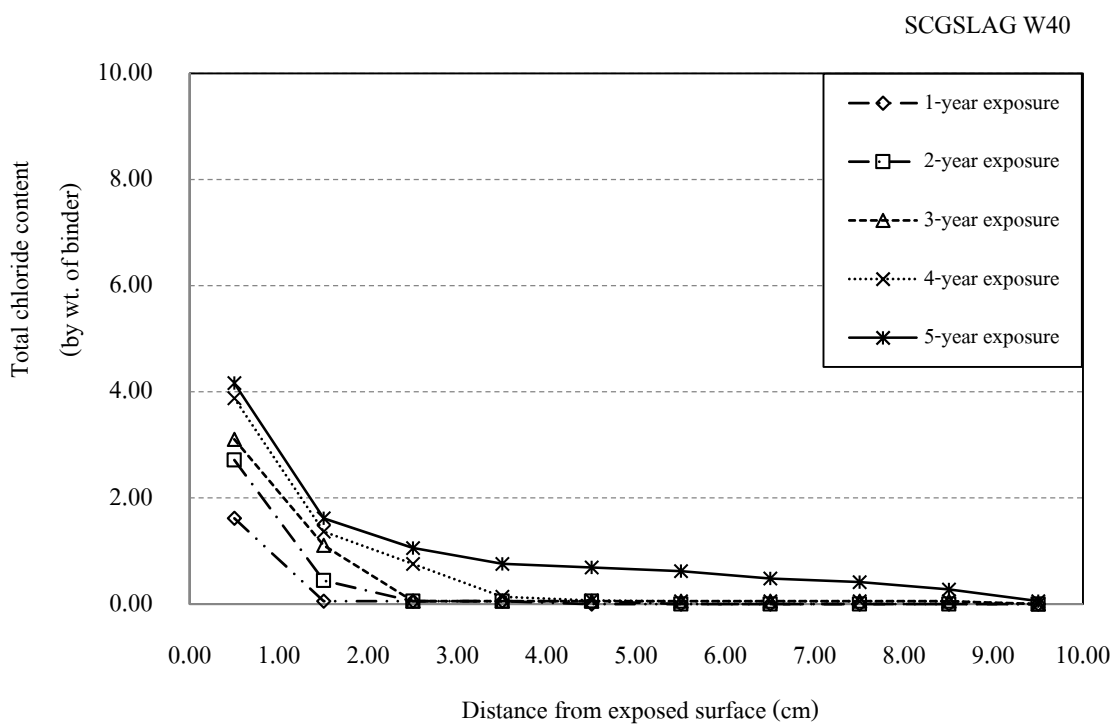
ภาพที่ 4-5 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-6 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นเดียวกัน



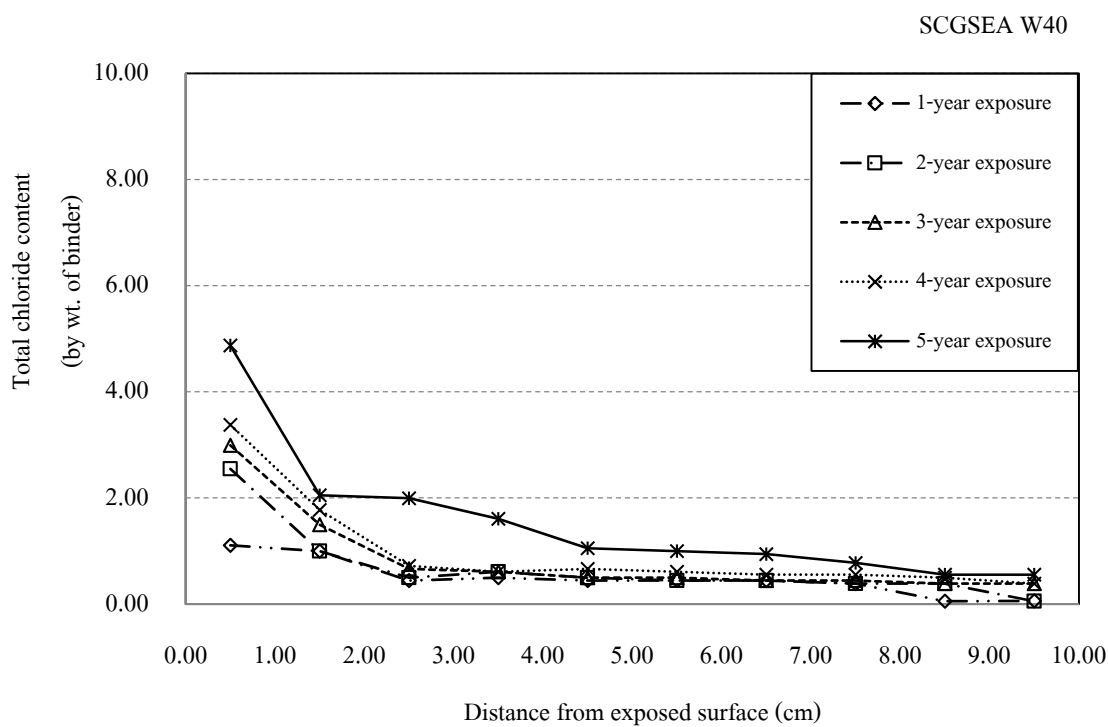
ภาพที่ 4-6 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-7 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของ
คอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4-7 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

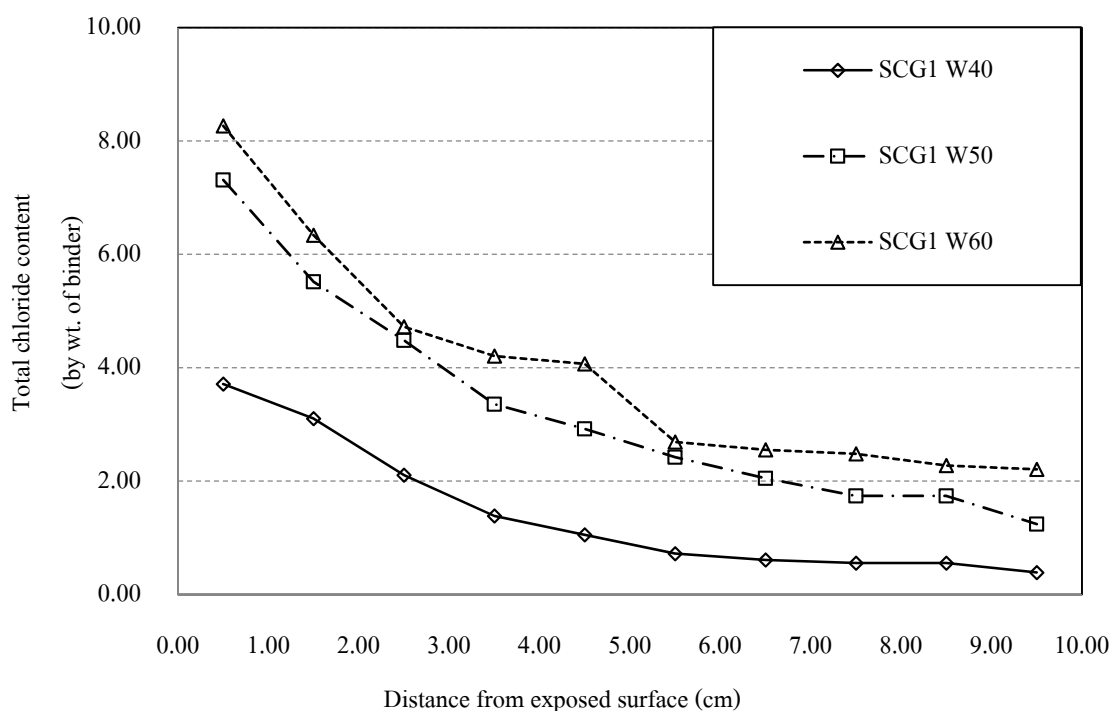
จากภาพที่ 4-8 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์น้ำ
 ทะเลที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น
 ตามระยะเวลาเผชิญถึงแนวค้ำมทะเลเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4-8 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่
 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

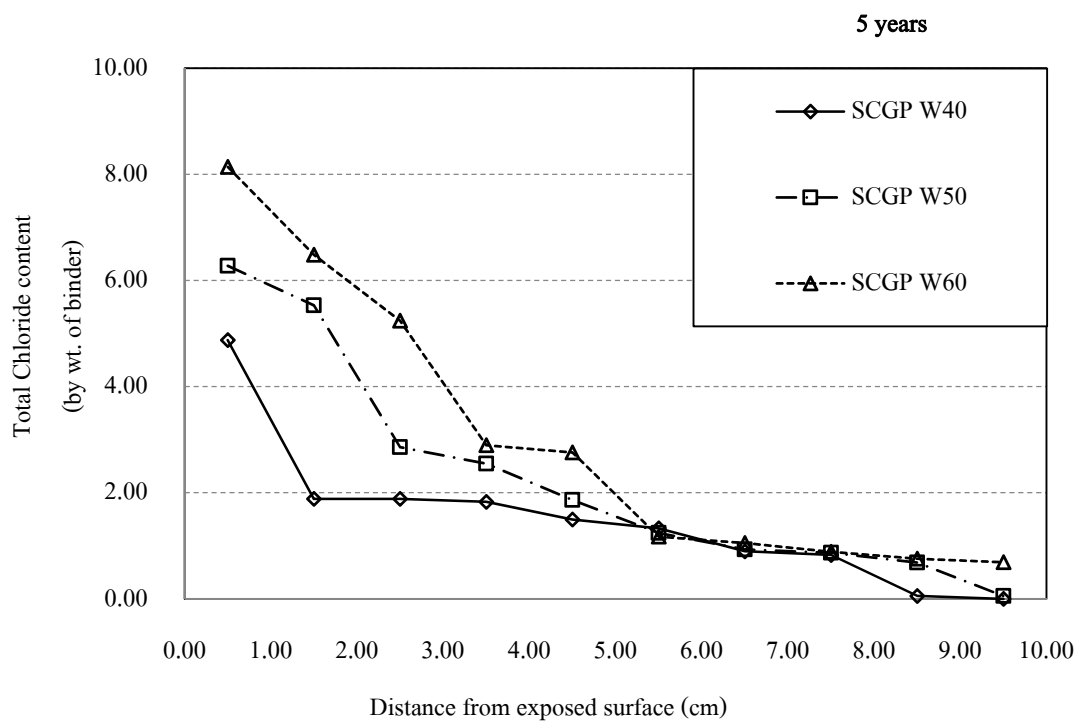
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-9 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูง การแทรกซึมคลอไรด์จึงมากขึ้น



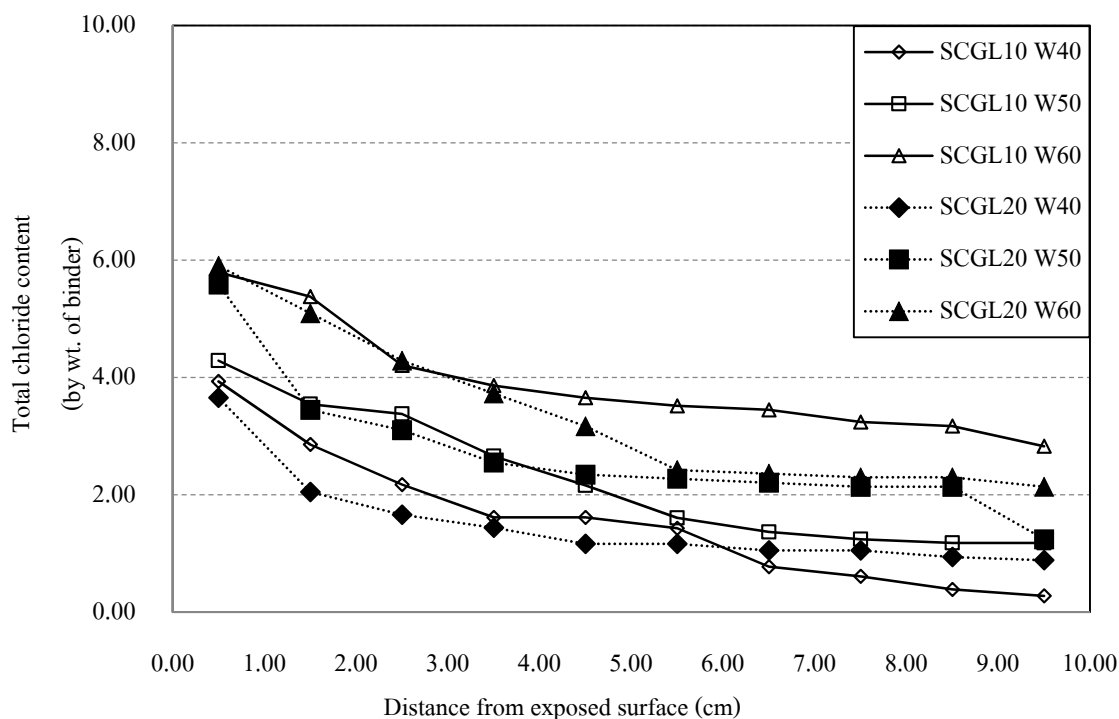
ภาพที่ 4-9 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-10 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นเช่นกัน



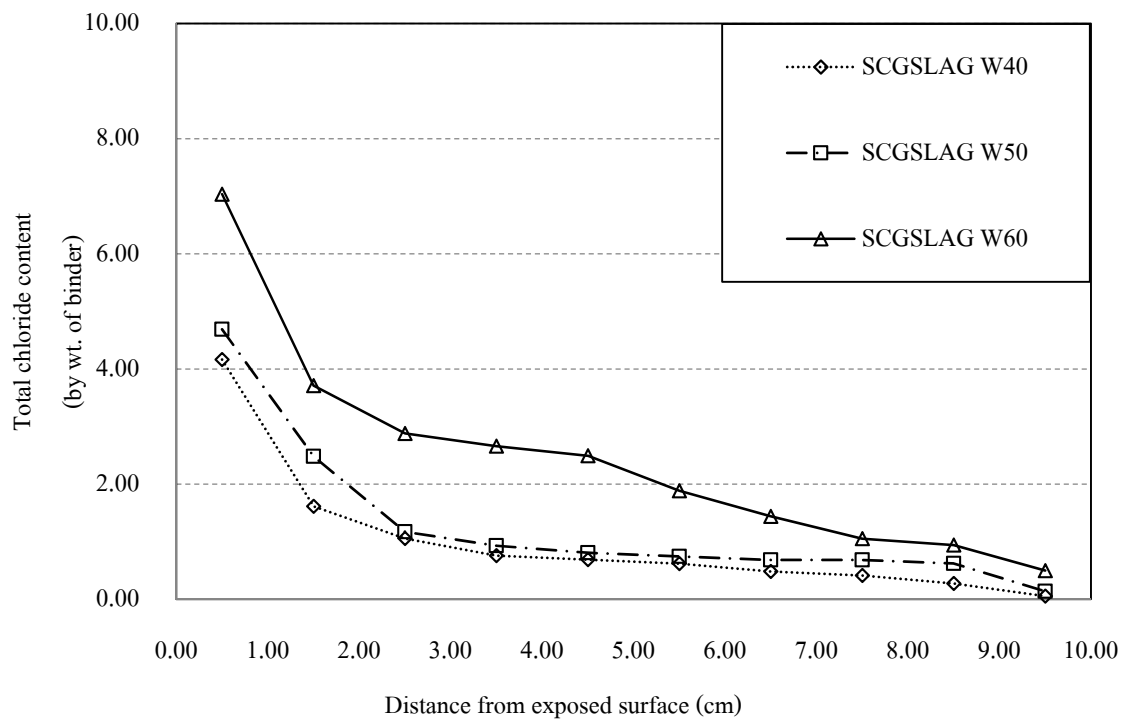
ภาพที่ 4-10 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-11 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4-11 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

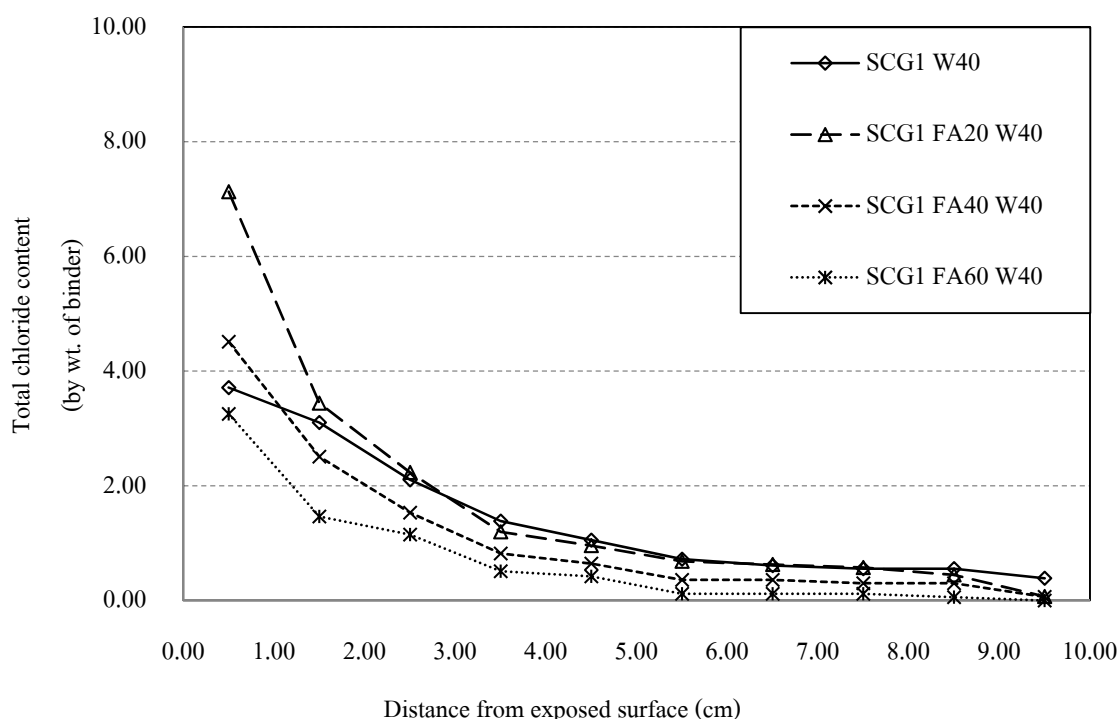
จากภาพที่ 4-12 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4-12 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

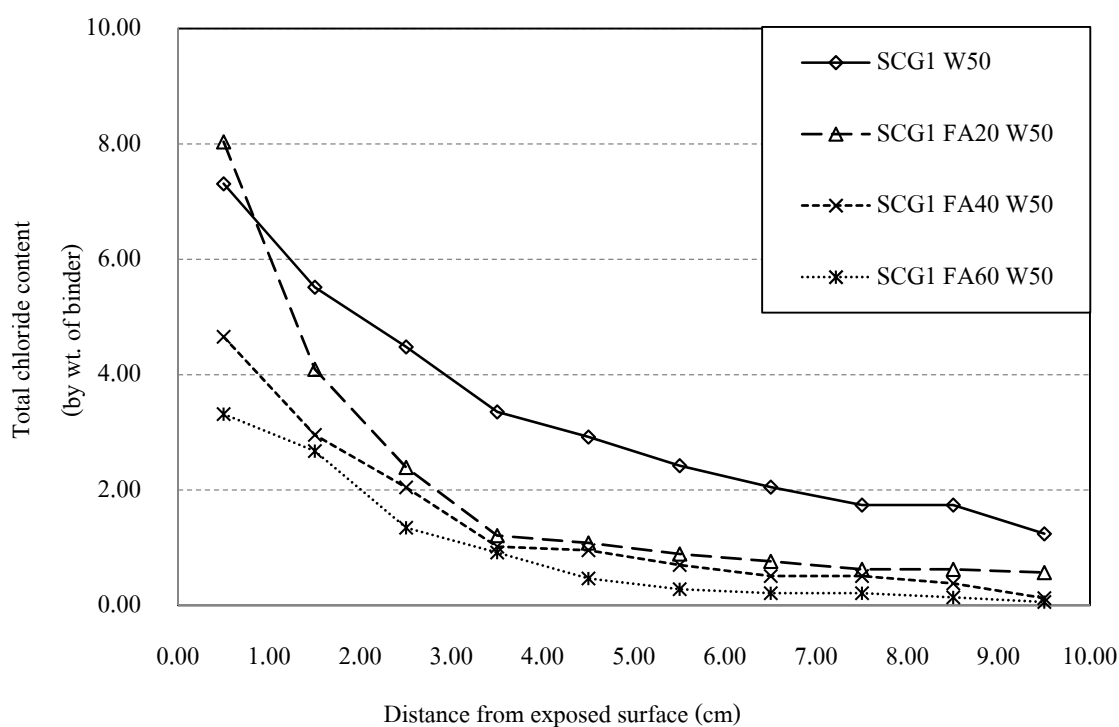
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-13 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีการแทรกซึมคลอไรด์น้อยที่สุด



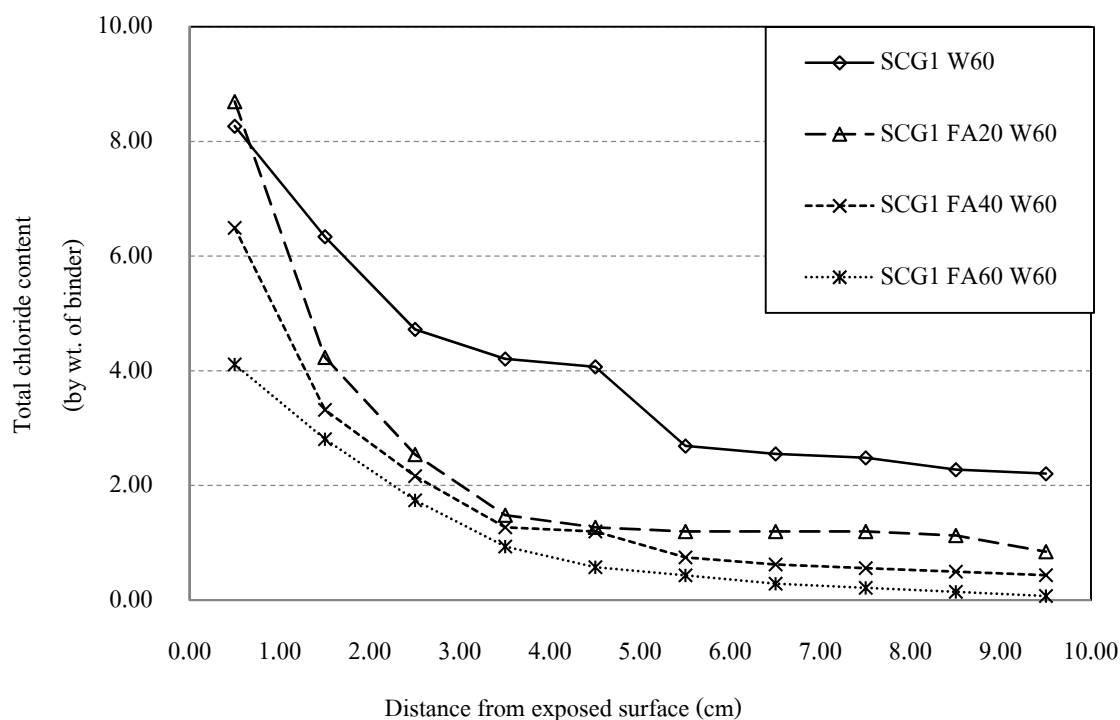
ภาพที่ 4-13 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-14 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนโดยคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีการแทรกซึมคลอไรด์น้อยที่สุด



ภาพที่ 4-14 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

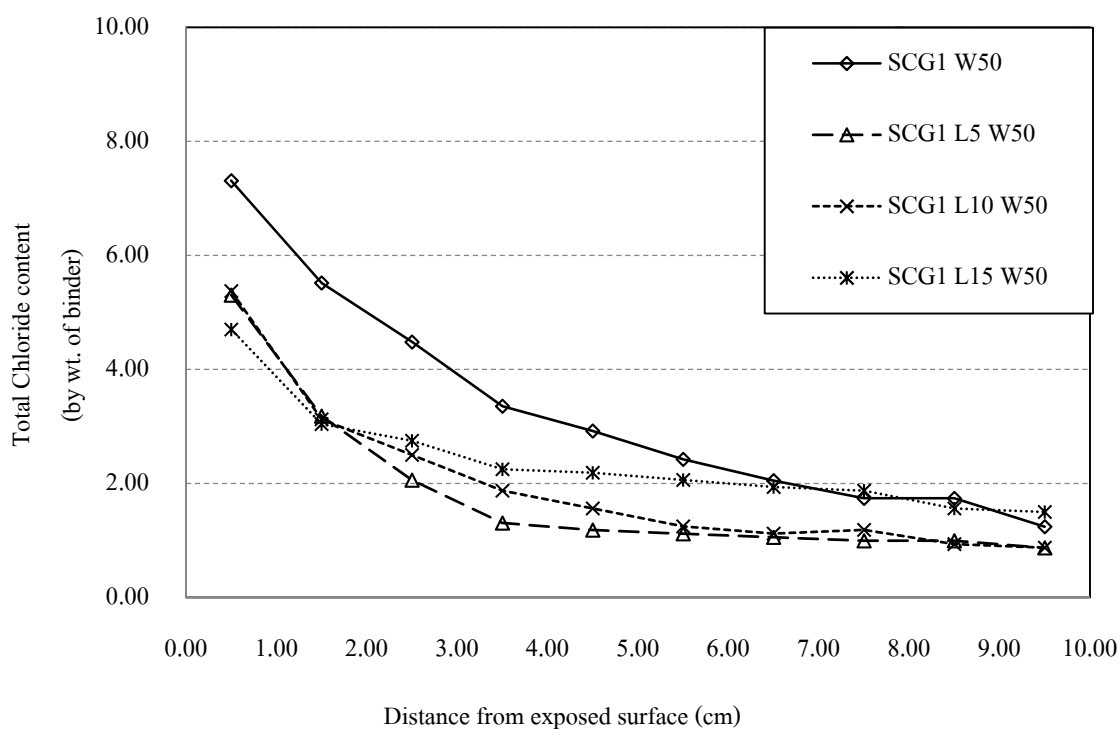
จากภาพที่ 4-15 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนโดยคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 มีการแทรกซึมคลอไรด์น้อยที่สุด



ภาพที่ 4-15 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

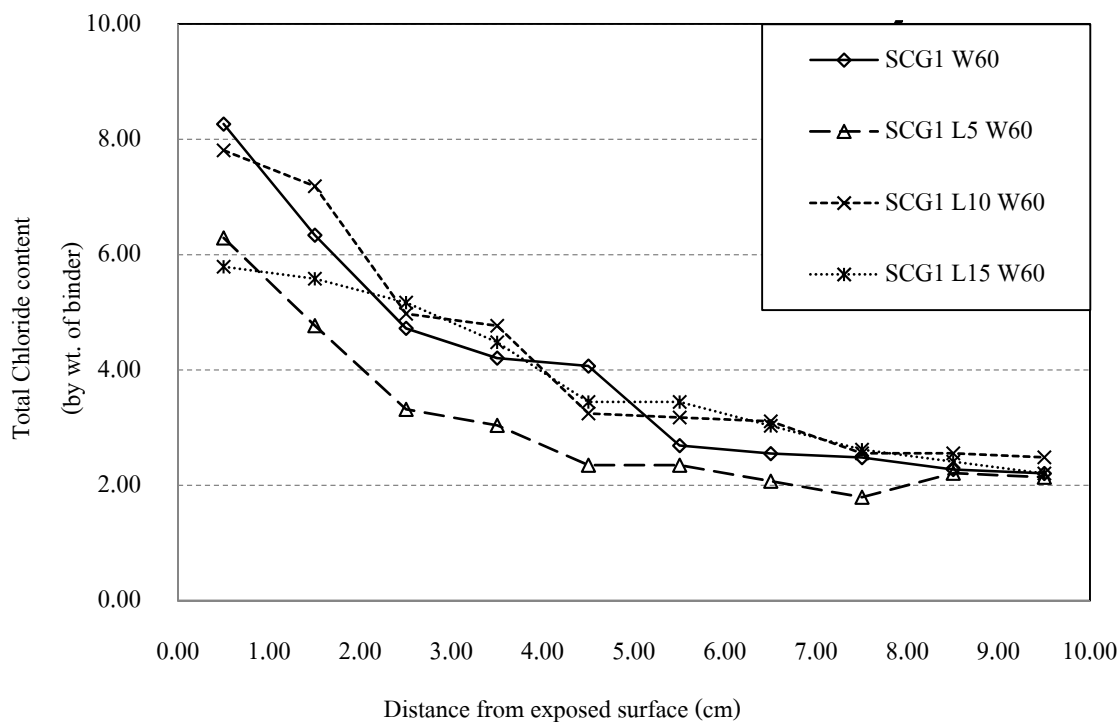
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-16 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



ภาพที่ 4-16 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

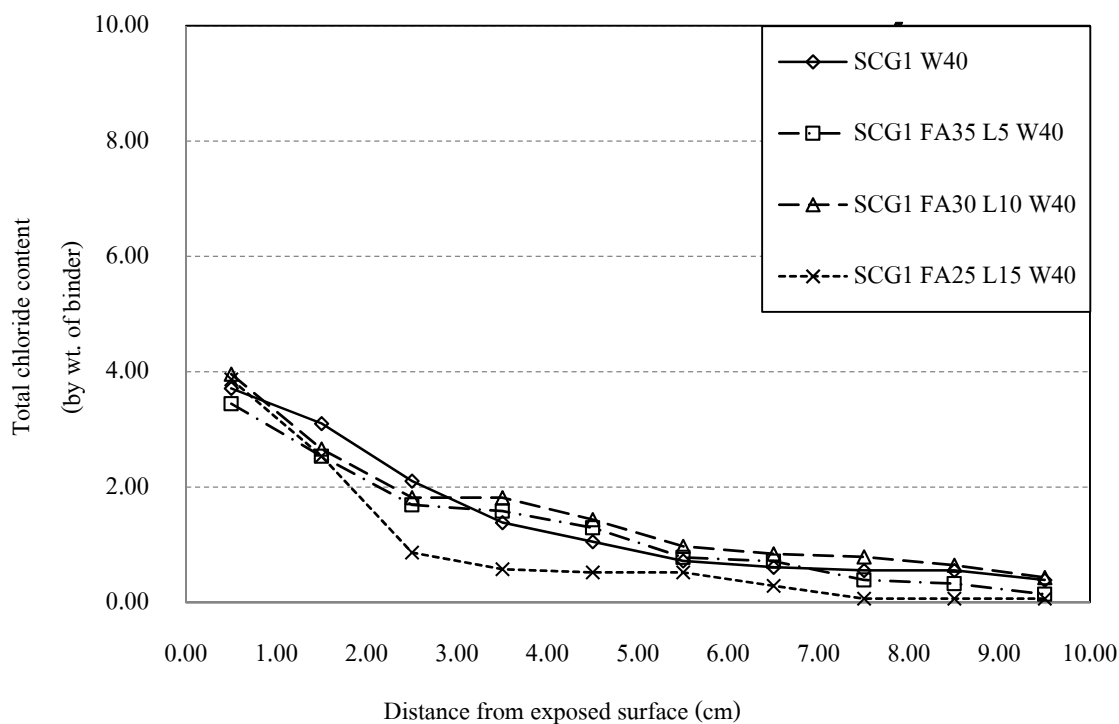
จากภาพที่ 4-17 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



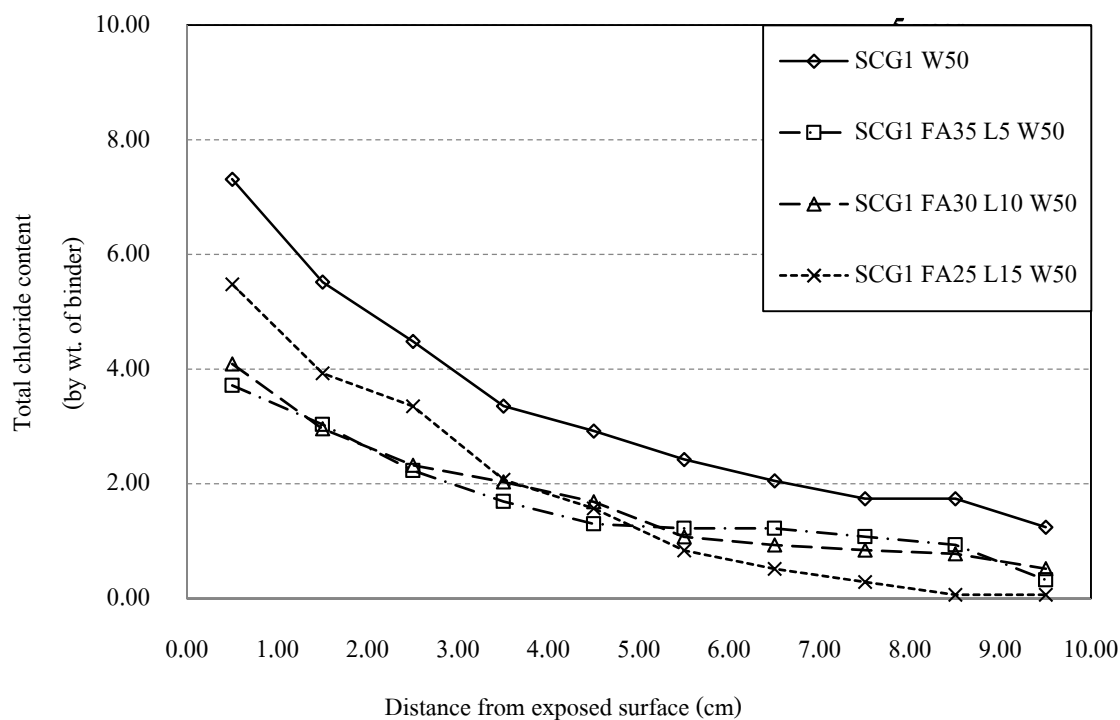
ภาพที่ 4-17 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนผลึกเกลือและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

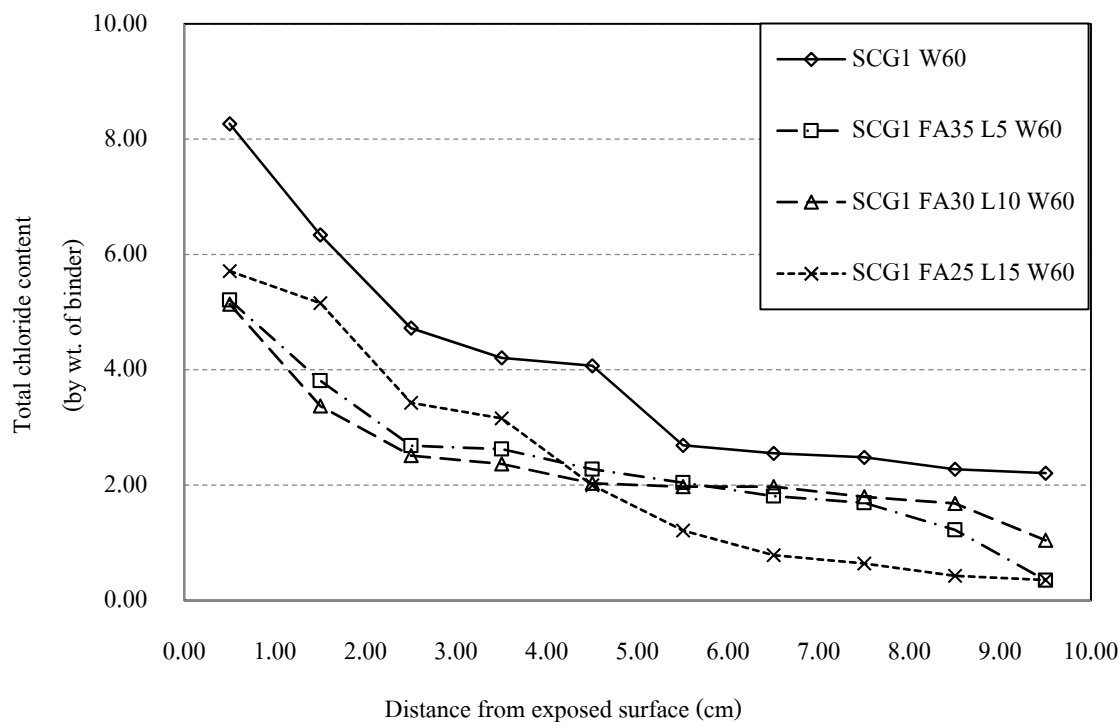
จากภาพที่ 4-18 4-19 และ 4-20 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเกลือลอยและหินปูนผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเกลือลอยและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



ภาพที่ 4-18 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเกลือลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี



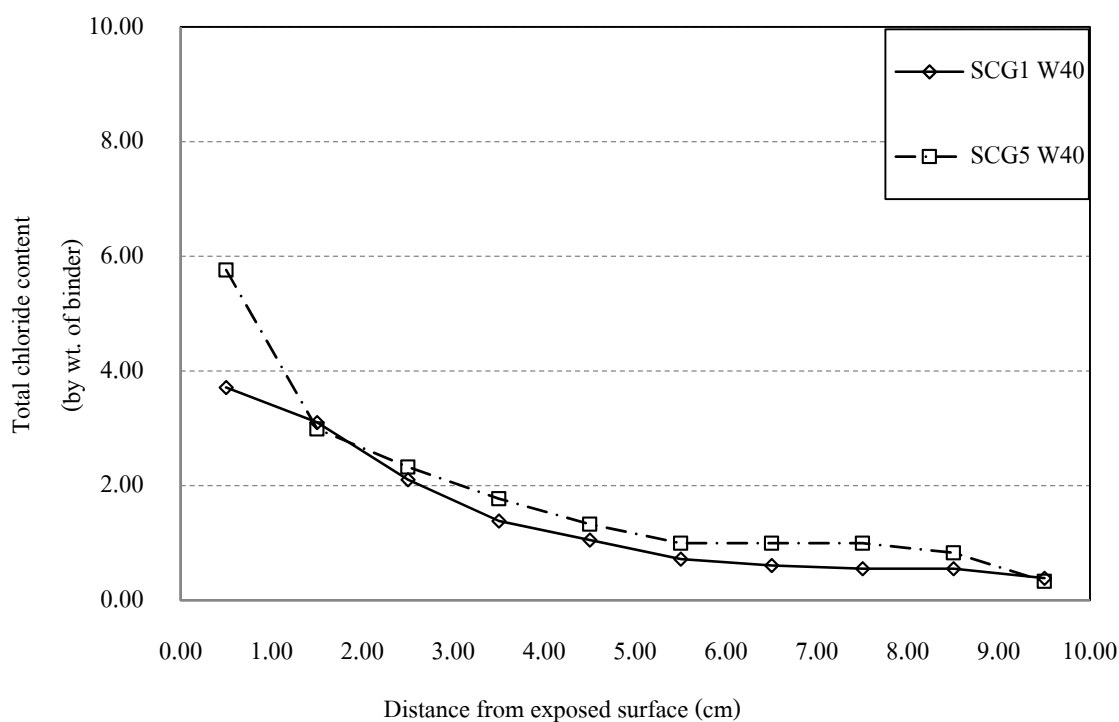
ภาพที่ 4-19 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี



ภาพที่ 4-20 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

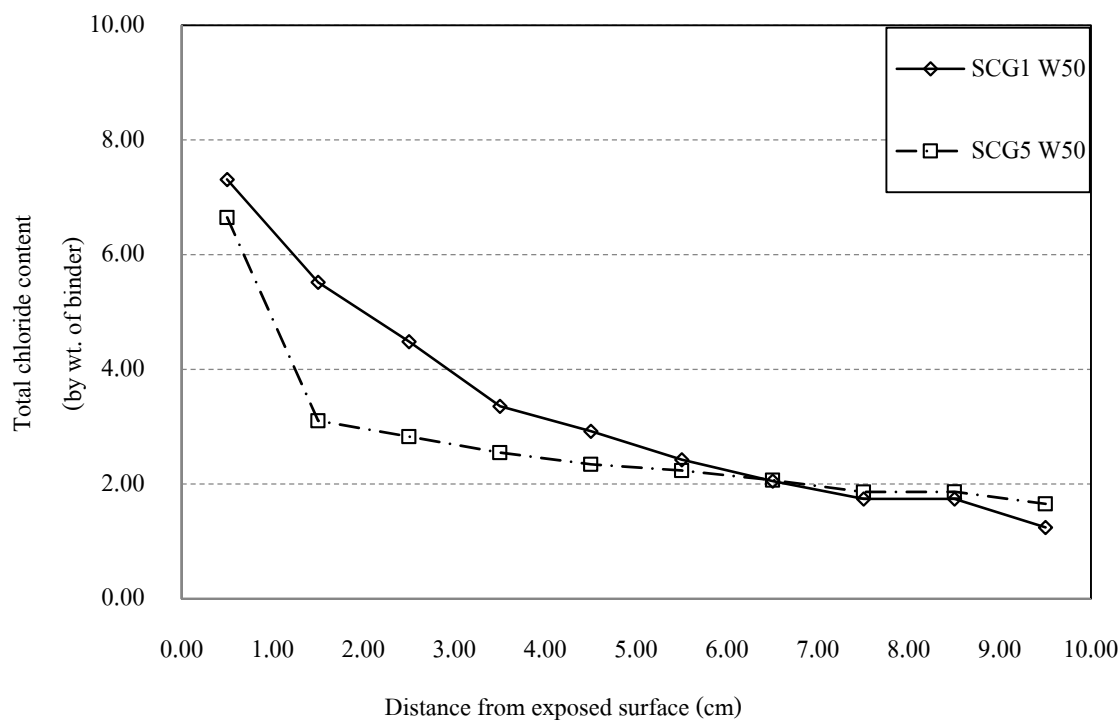
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

จากภาพที่ 4-21 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่ามากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



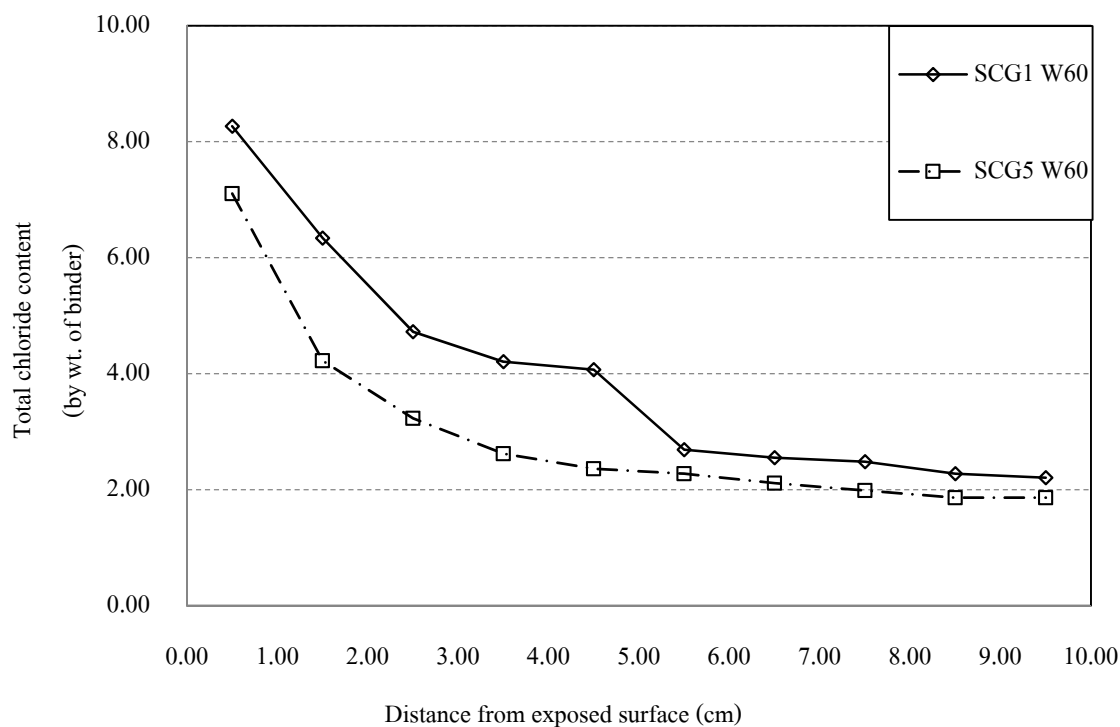
ภาพที่ 4-21 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-22 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



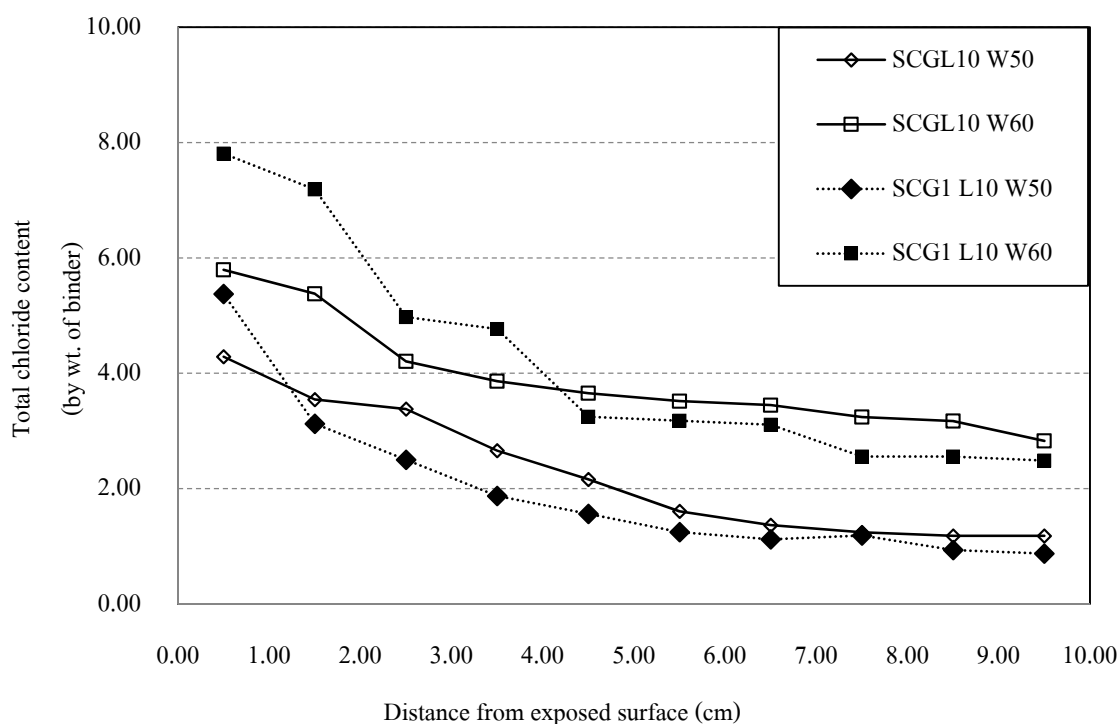
ภาพที่ 4-22 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-23 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



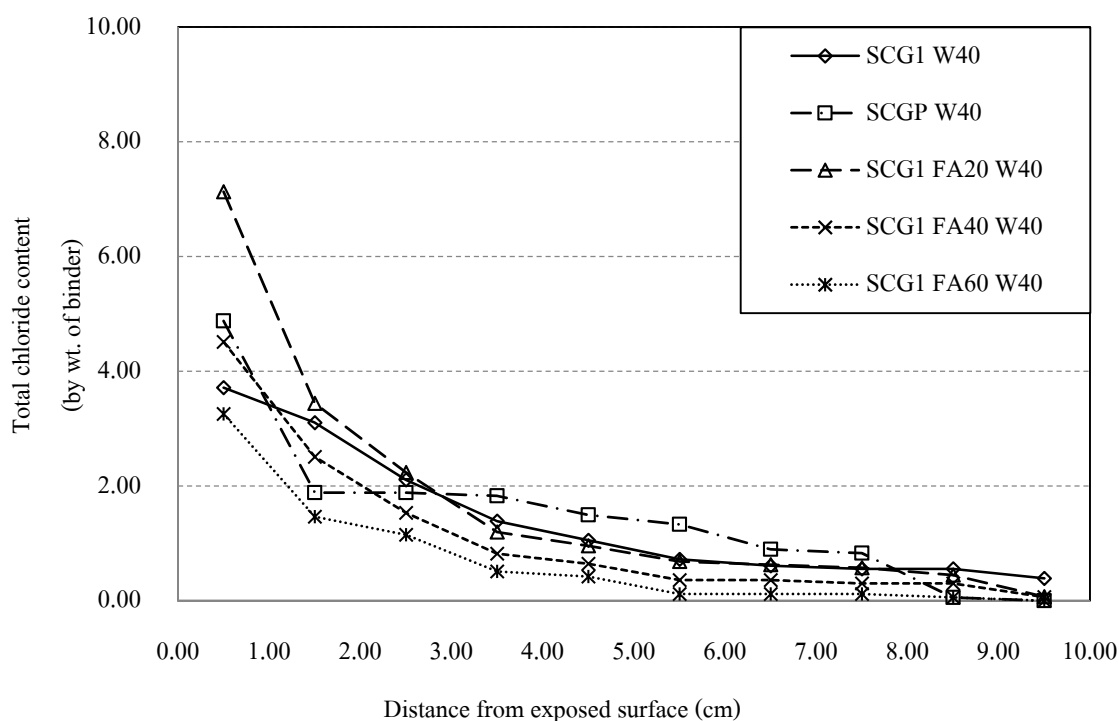
ภาพที่ 4-23 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-24 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน (SCGL10) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (SCG1 L10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน (SCGL10) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (SCG1 L10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (SCG1 L10) มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน (SCGL10) แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (SCG1 L10) มีการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน (SCGL10)



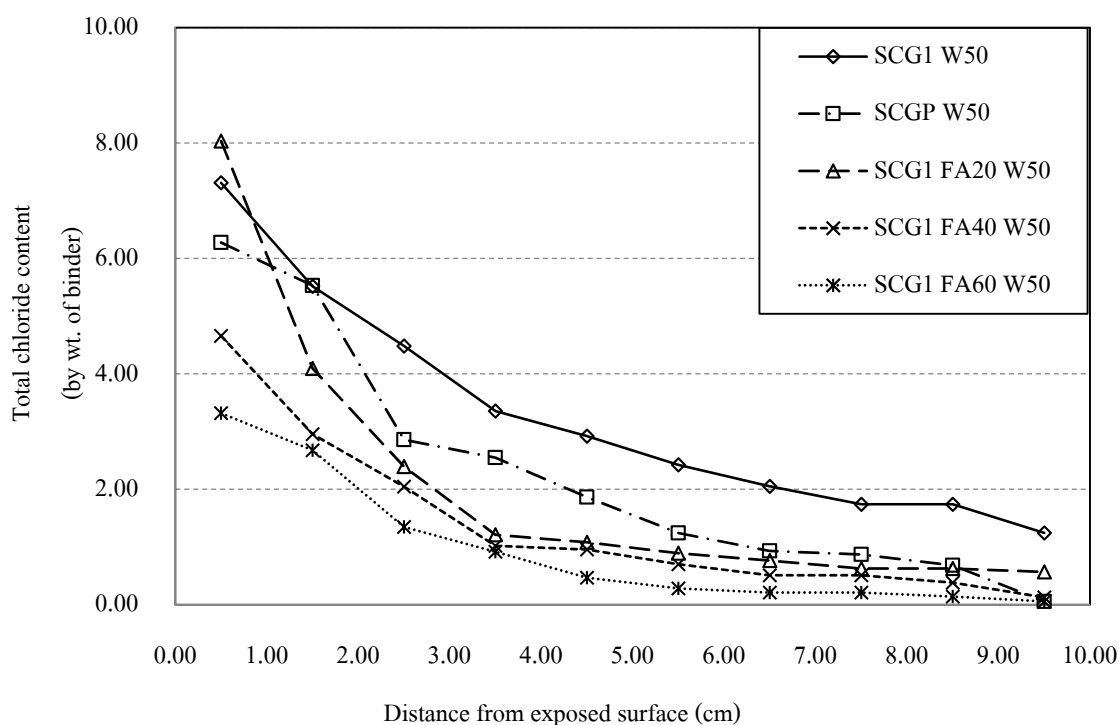
ภาพที่ 4-24 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-25 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (SCG1) ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (SCG1 FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 และ 40 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (SCG1) และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP)



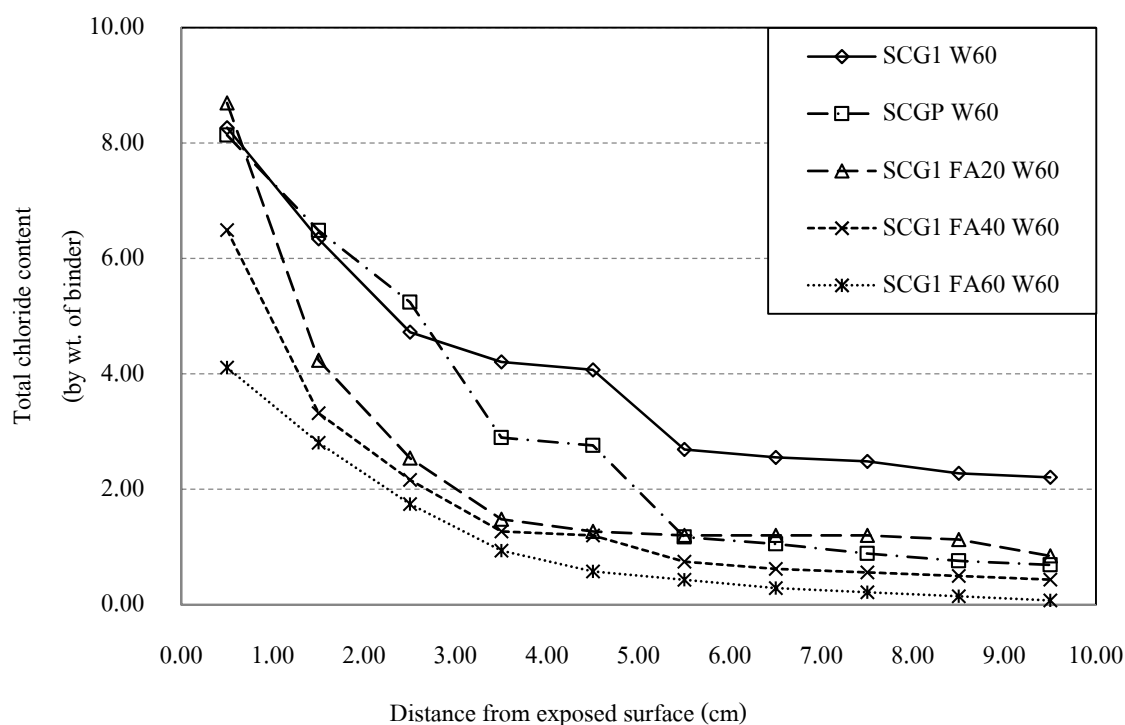
ภาพที่ 4-25 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-26 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (SCG1) ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (SCG1 FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (SCG1) และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP)



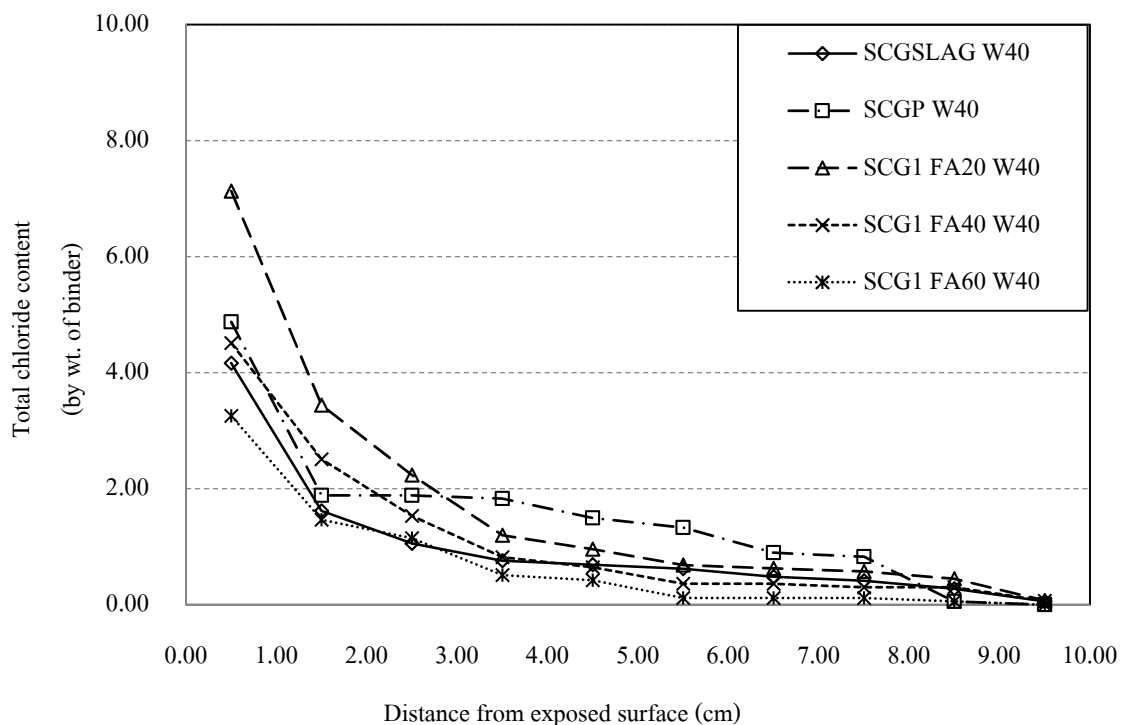
ภาพที่ 4-26 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-27 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (SCG1) ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (SCG1 FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (SCG1) และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP)



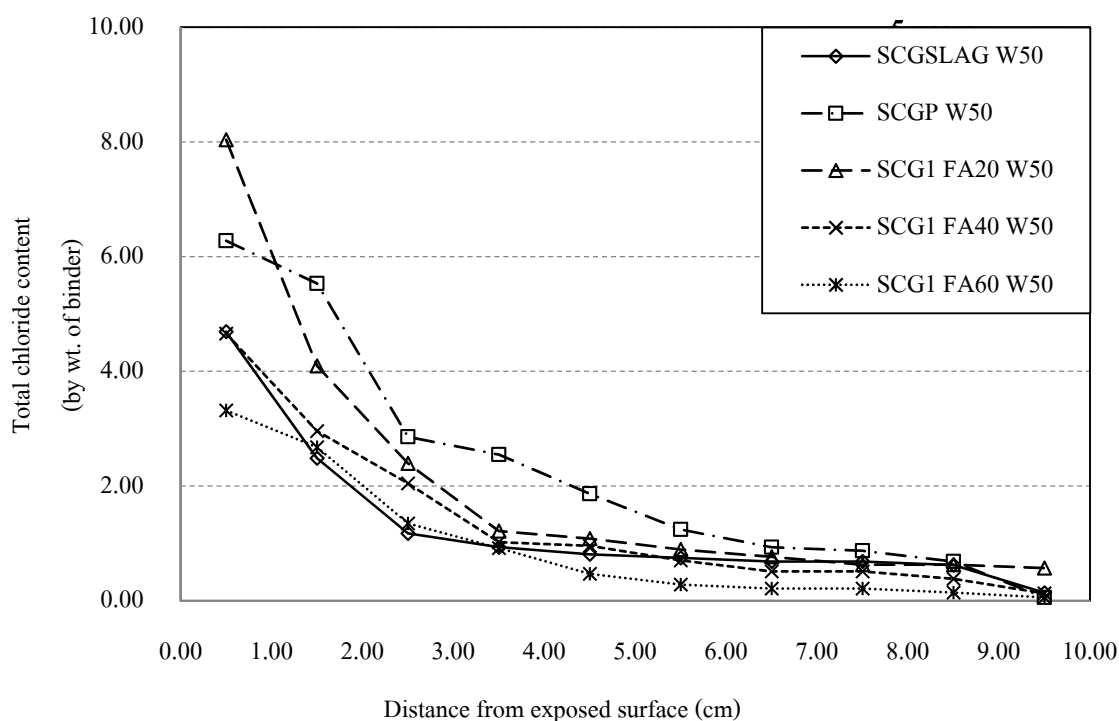
ภาพที่ 4-27 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-28 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG) ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (SCG1 FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 60 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG) และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP)



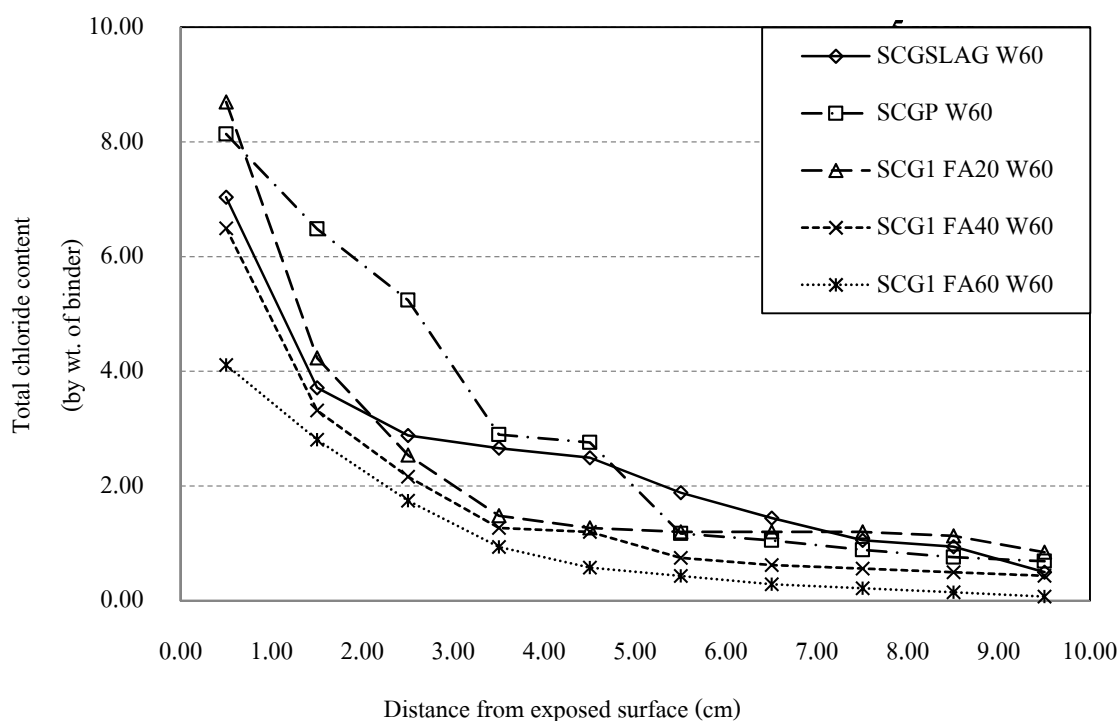
ภาพที่ 4-28 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-29 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG) ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (SCG1 FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ต่ำกว่าคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 คอนกรีตที่ใช้ ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG) และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP)



ภาพที่ 4-29 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-30 แสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG) ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP) และปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (SCG1 FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (SCGSLAG) และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (SCGP)

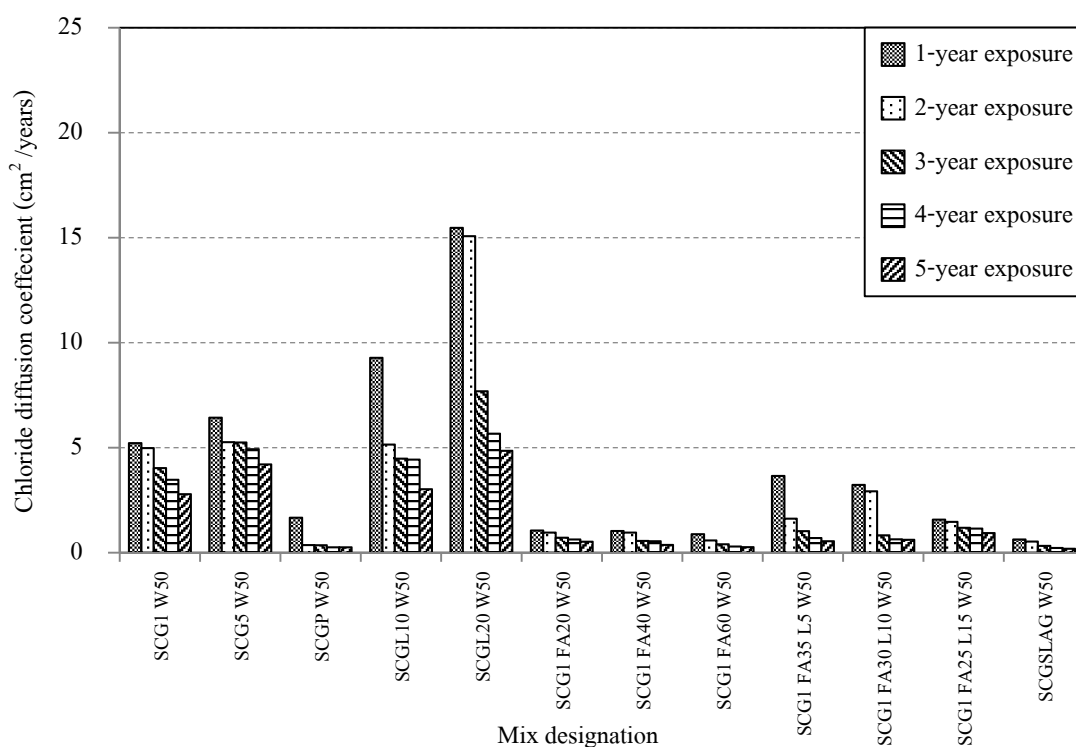


ภาพที่ 4-30 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และปูนซีเมนต์ปอดแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

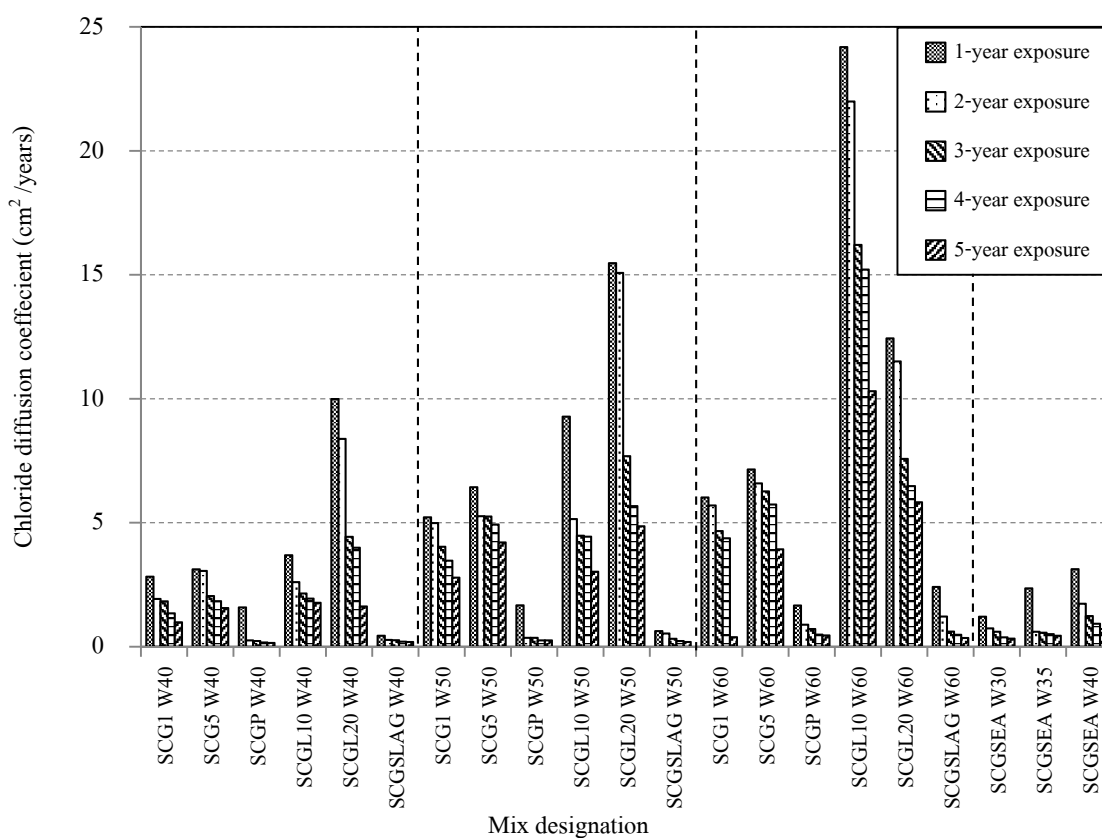
จากภาพที่ 4-31 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลต่าง ๆ กันที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 ปี ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกัน และใช้เกลือแทนที่วัสดุประสานในปริมาณต่างกัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมีผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น จึงทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าต่ำลง



ภาพที่ 4-31 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCG1 ผสมเกลือ และ SCGSLAG ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลต่าง ๆ

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

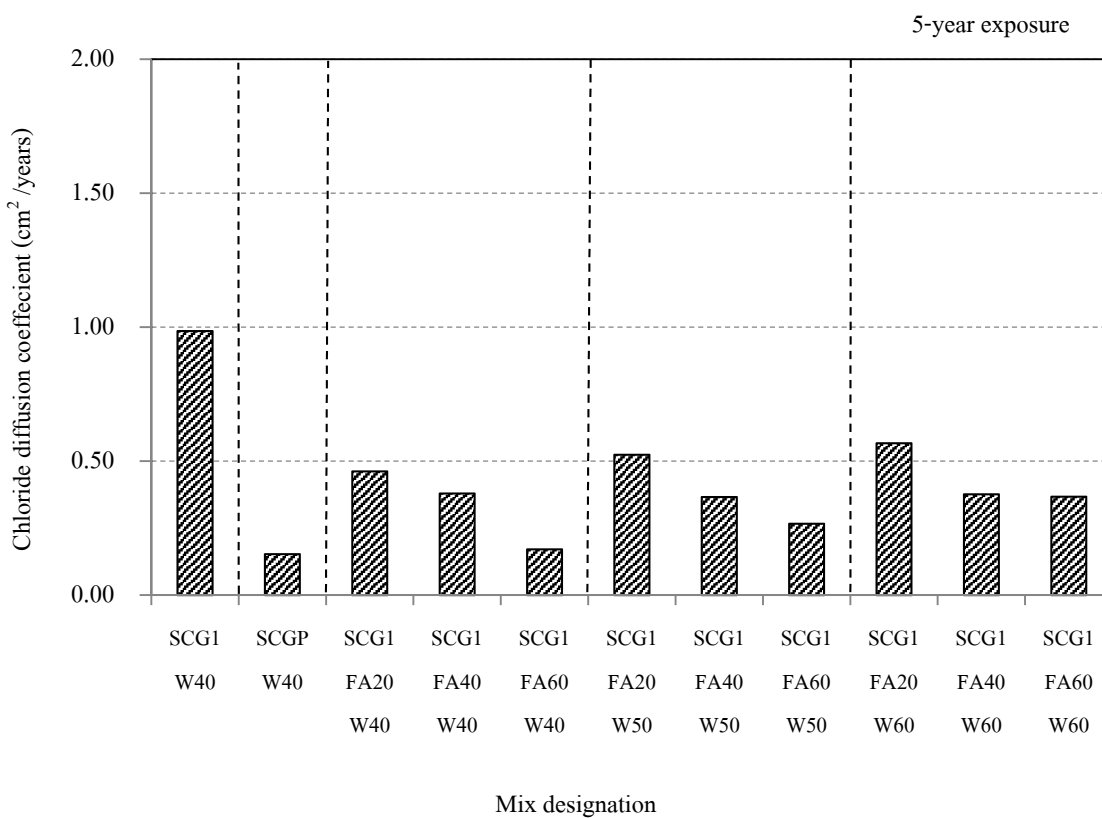
จากภาพที่ 4-32 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อยลง เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้นคอนกรีตที่ใช้ SCGP, SCG1 ผสมเถ้าลอย, SCGLAG และ SCGSEA มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตในใช้ SCG1 ล้วน



ภาพที่ 4-32 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

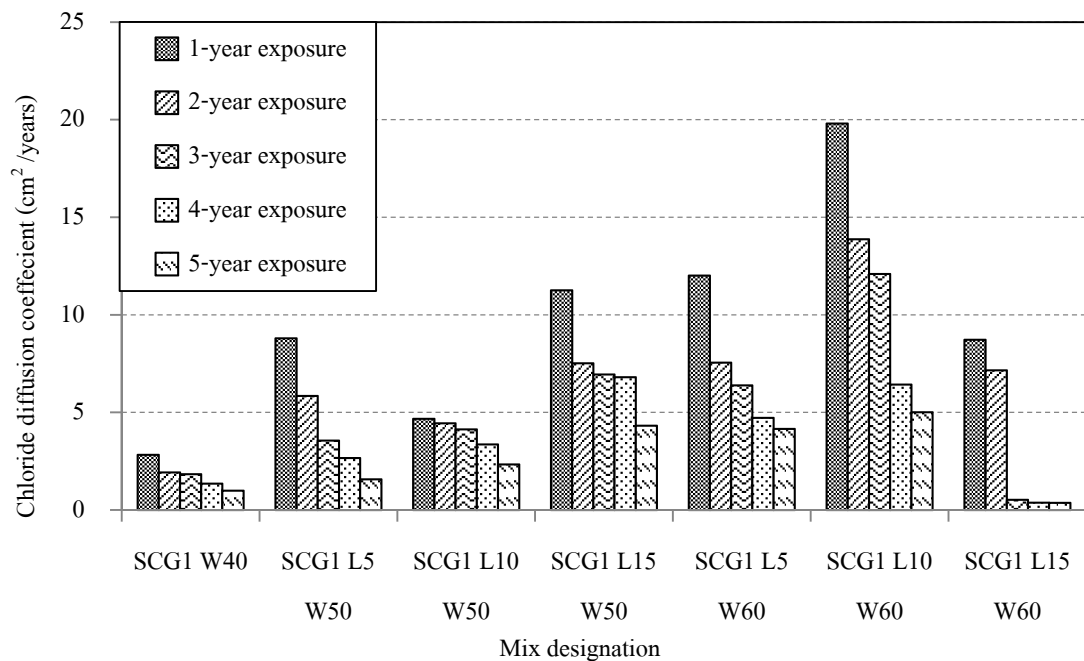
จากภาพที่ 4-33 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีเถ้าลอย (SCG1 FA20, SCG1 FA40, SCG1 FA60 และ SCGP) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ SCGP และ SCG1 ผสมเถ้าลอยมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ SCG1 ล้วน และคอนกรีตที่ใช้ SCGP มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด



ภาพที่ 4-33 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (SCG1 FA20, SCG1 FA40, SCG1 FA60 และ SCGP) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

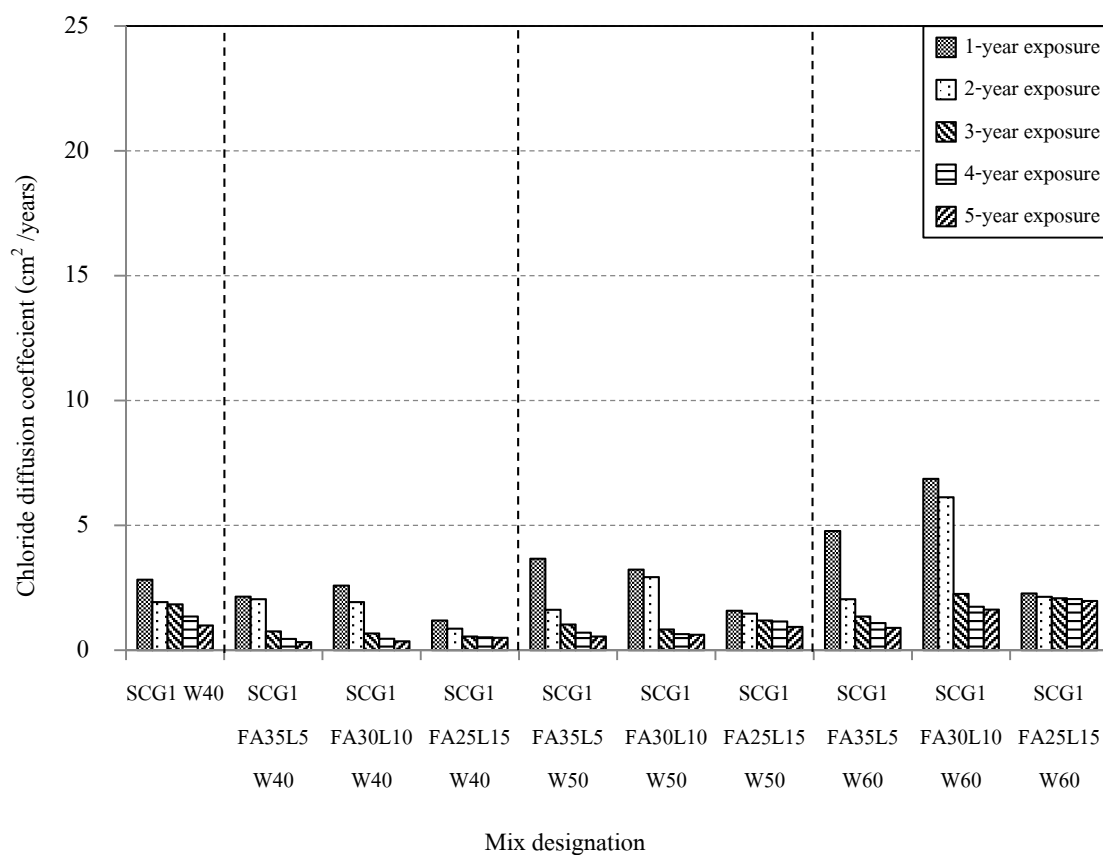
จากภาพที่ 4-34 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีผงหินปูน (SCG1 L5, SCG1 L10 และ SCG1 L15) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่าคอนกรีตที่ใช้ SCG1 ผสมผงหินปูนมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ SCG1 ล้วน



ภาพที่ 4-34 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตคอนกรีตที่มีผงหินปูน (SCG1 L5, SCG1 L10 และ SCG1 L15) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

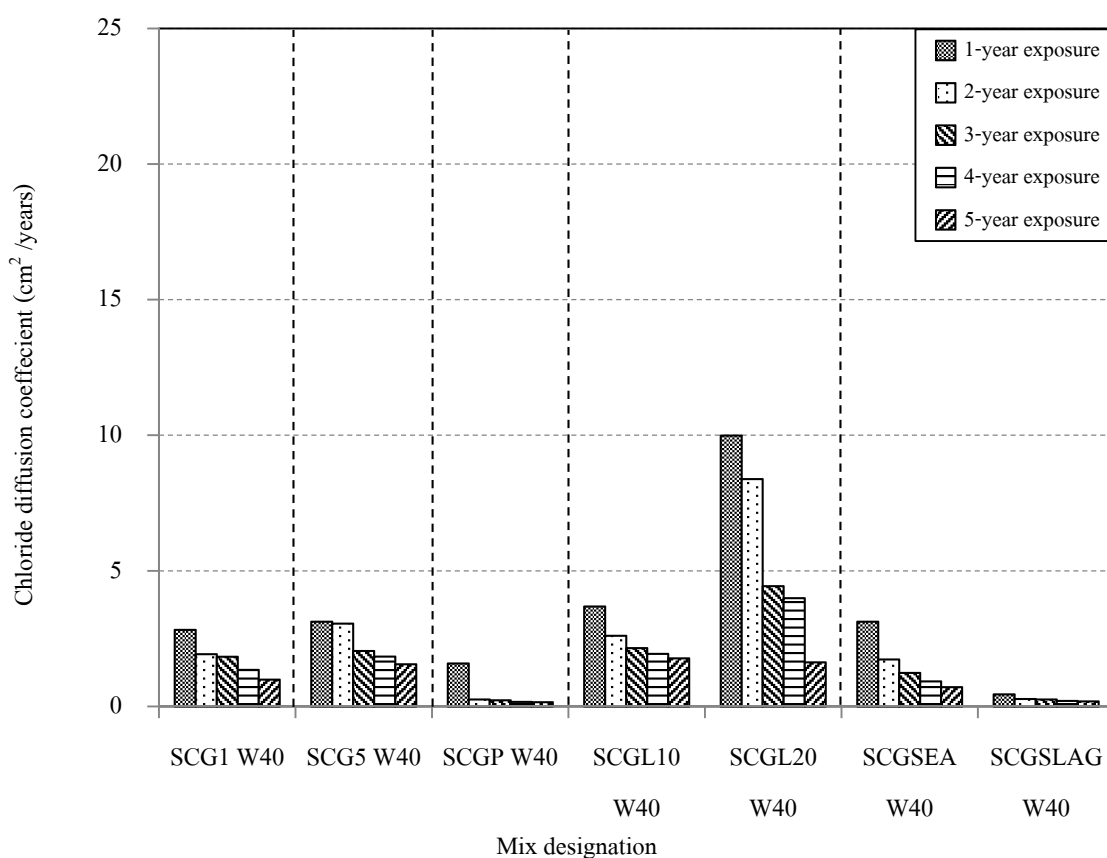
จากภาพที่ 4-35 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มากกว่าคอนกรีตในใช้ SCG1 ล้วน และคอนกรีตที่ใช้ SCG1 ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 35 และร้อยละ 5 มีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด



ภาพที่ 4-35 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

จากภาพที่ 4-36 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อยลง เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมนานขึ้น คอนกรีตที่ใช้ SCGP และ SCGLAG มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGL10 และ SCGL20

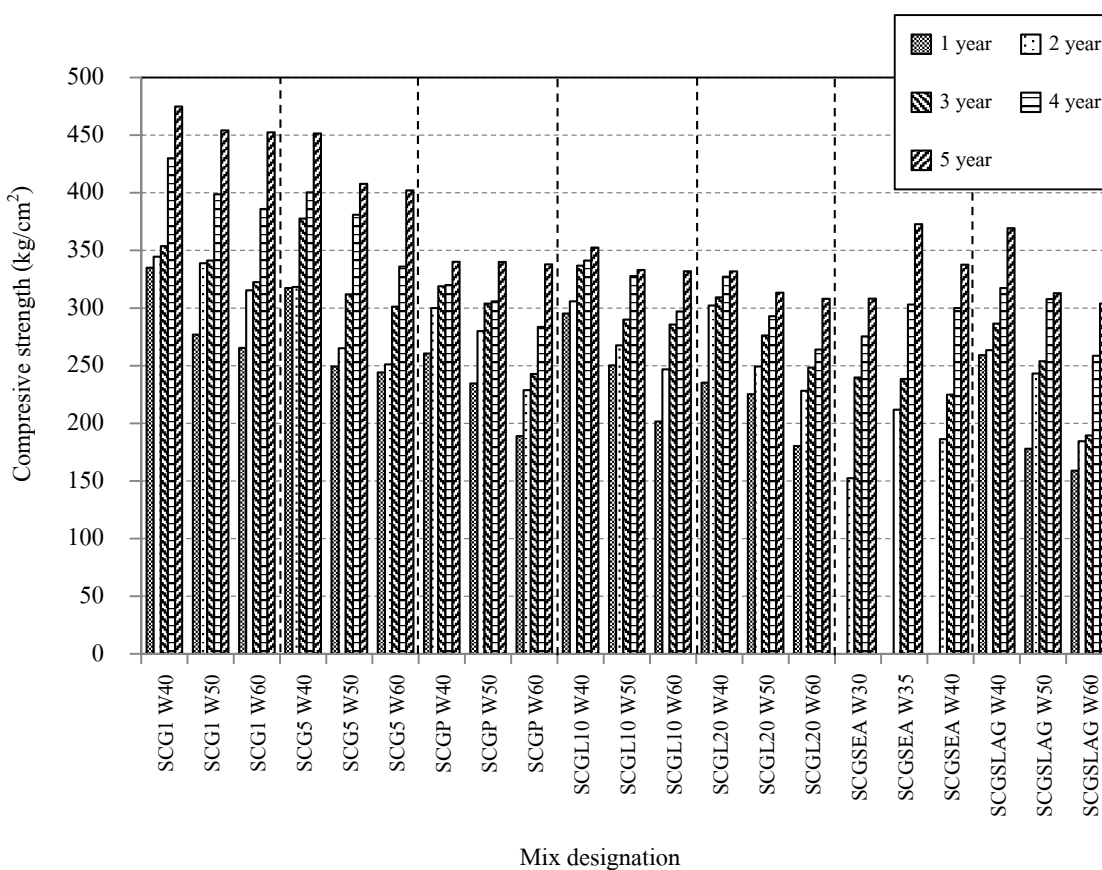


ภาพที่ 4-36 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

กำลังอัดของคอนกรีต

ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

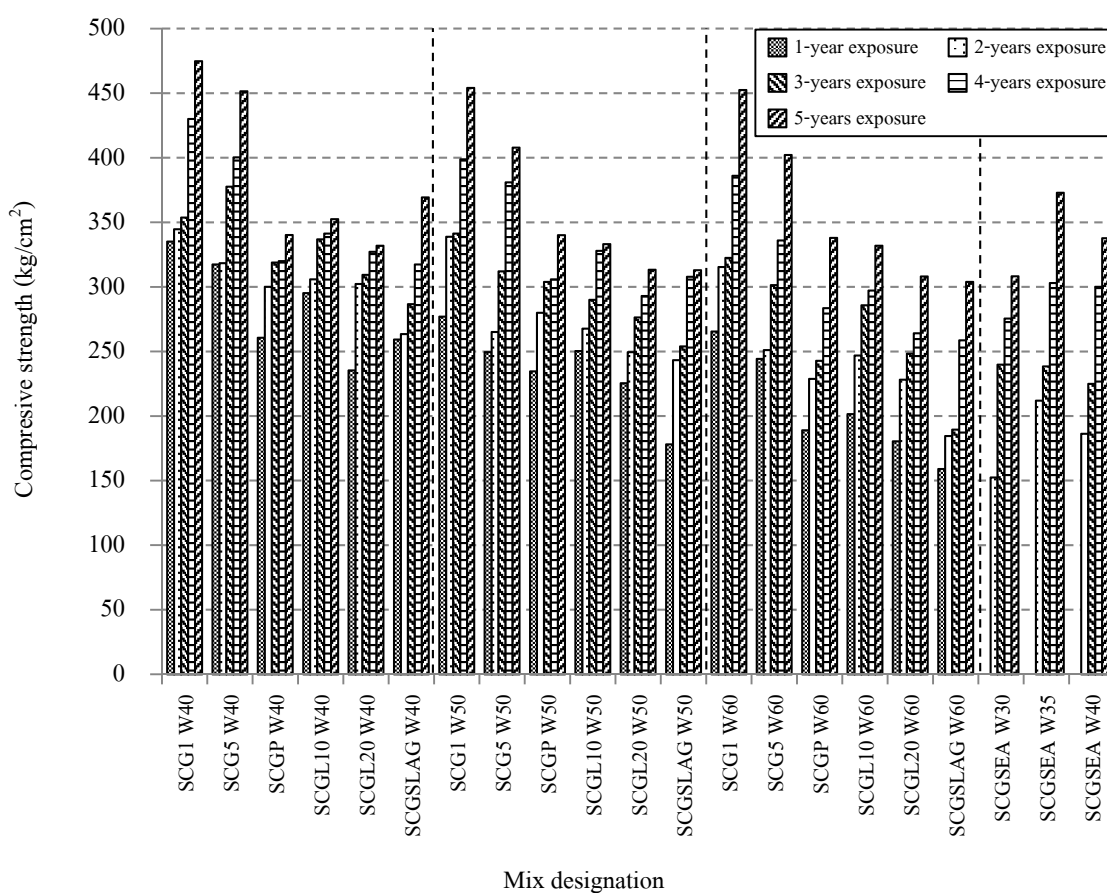
จากภาพที่ 4-37 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น และคอนกรีตที่ใช้ SCG1 มีกำลังอัดของคอนกรีตมากที่สุด



ภาพที่ 4-37 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

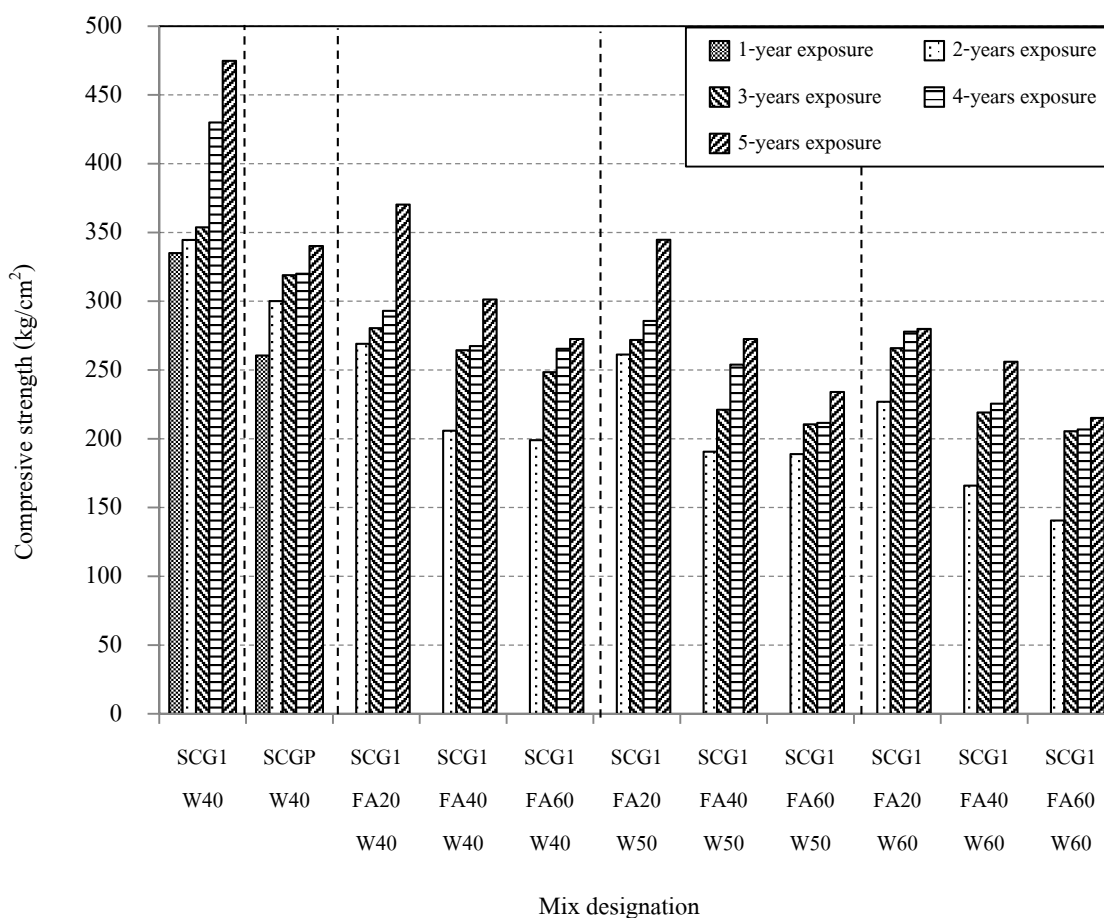
จากภาพที่ 4-38 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงและคอนกรีตที่ใช้ SCG1 มีกำลังอัดของคอนกรีตมากที่สุด



ภาพที่ 4-38 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

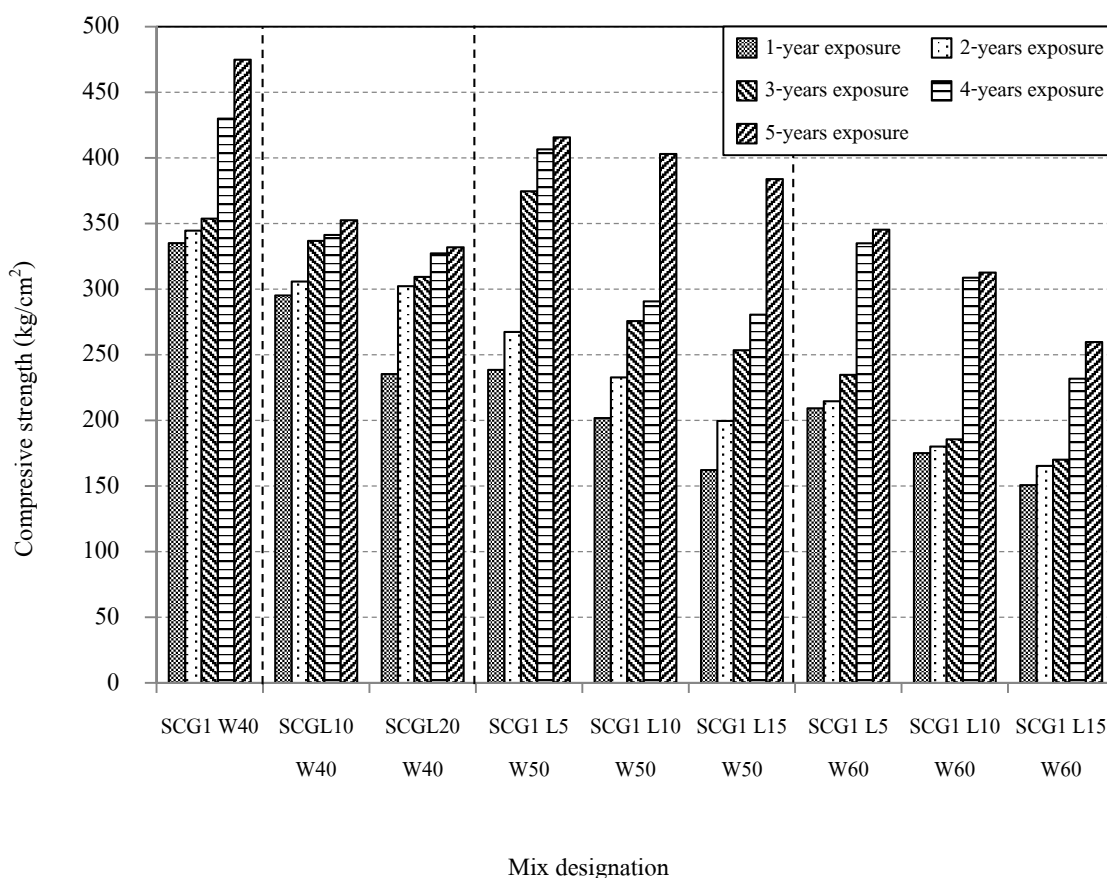
จากภาพที่ 4-39 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอย (SCG1 FA20, SCG1 FA40, SCG1 FA60, SCGP และ SCG1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และคอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่ (SCG1FA20, SCG1FA40, SCG1FA60) มีกำลังอัดน้อยกว่า SCG1



ภาพที่ 4-39 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอย (SCG1 FA20, SCG1 FA40, SCG1 FA60, SCGP, SCG1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 0.60 ที่ระยะเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

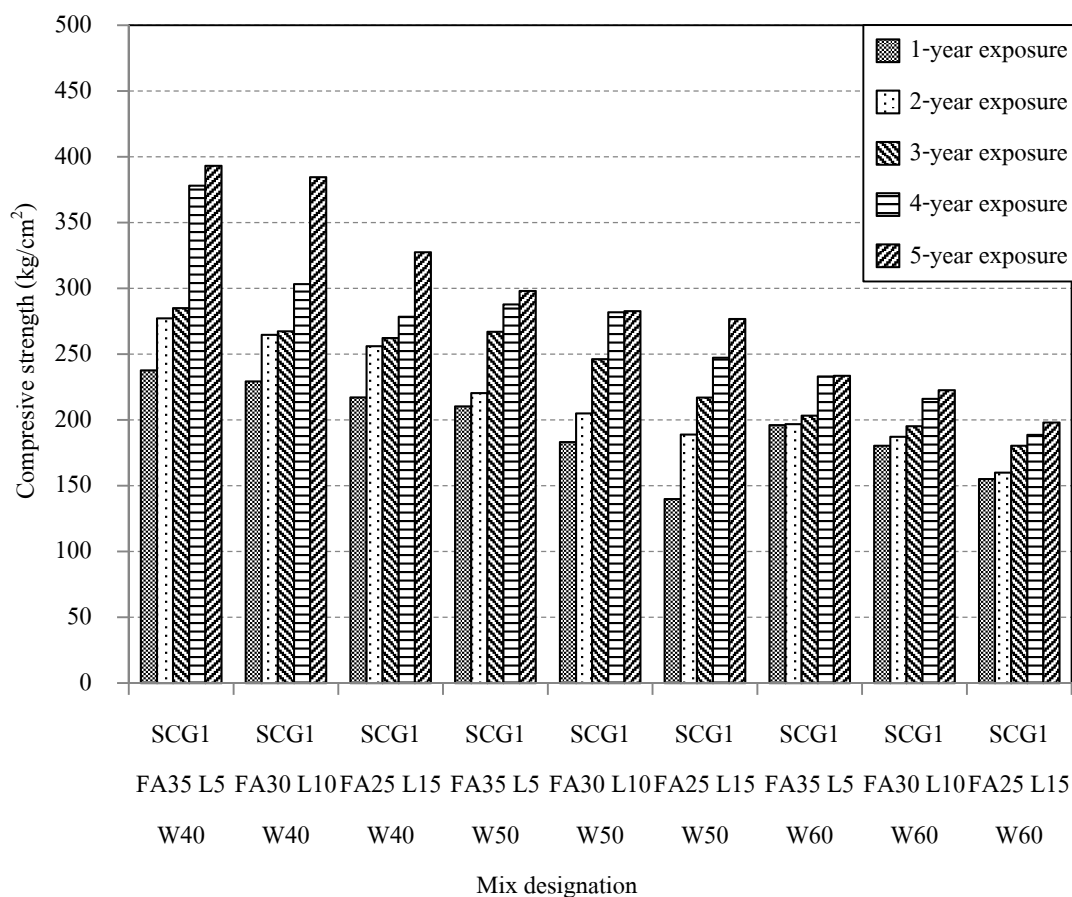
จากภาพที่ 4-40 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่มีผงหินปูน (SCGL (intergrind), SCG1 LP10 และ SCG1 LP20) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น คอนกรีตที่ใช้ SCGL (intergrind) และ SCG1 ผสมผงหินปูน มีกำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ SCG1 ล้วน และคอนกรีตที่ใช้ SCG1 ผสมผงหินปูนมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ SCGL (intergrind) ที่อายุ 4 และ 5 ปี



ภาพที่ 4-40 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีผงหินปูน (SCGL (intergrind), SCG1L5, SCG1L10, SCG1L15 และ SCG1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

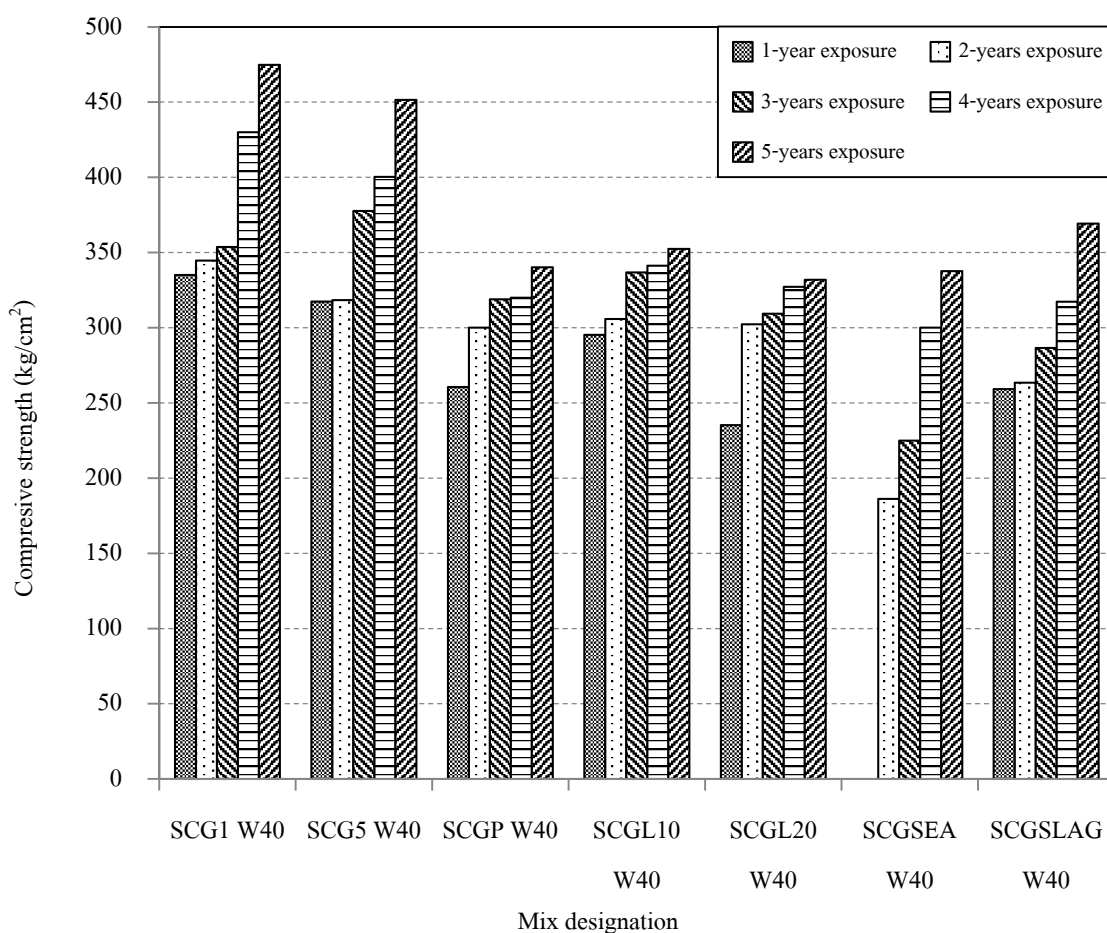
จากภาพที่ 4-41 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนมีกำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของผงหินปูนมากขึ้น ทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 0.50 และ 0.60



ภาพที่ 4-41 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

จากภาพที่ 4-42 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น เมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น คอนกรีตที่ใช้ SCGP และ SCGLAG มีกำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตในใช้ SCG1, SCG5, SCGL10 และ SCGL20

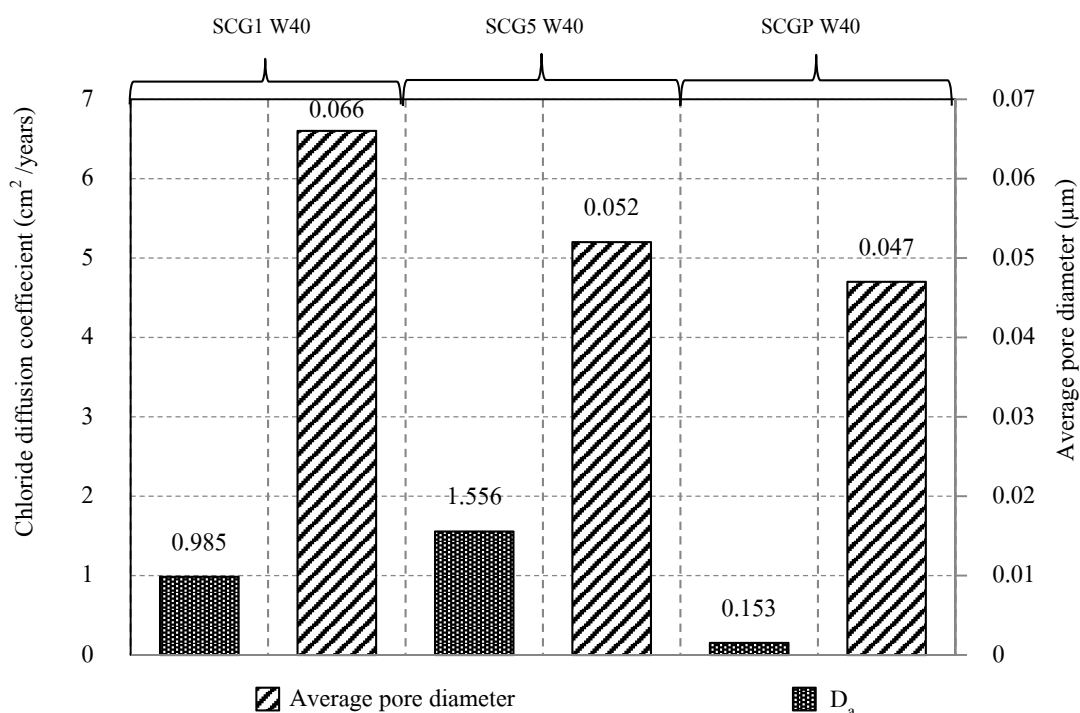


ภาพที่ 4-42 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 1 2 3 4 และ 5 ปี

ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและความพรุนของคอนกรีต

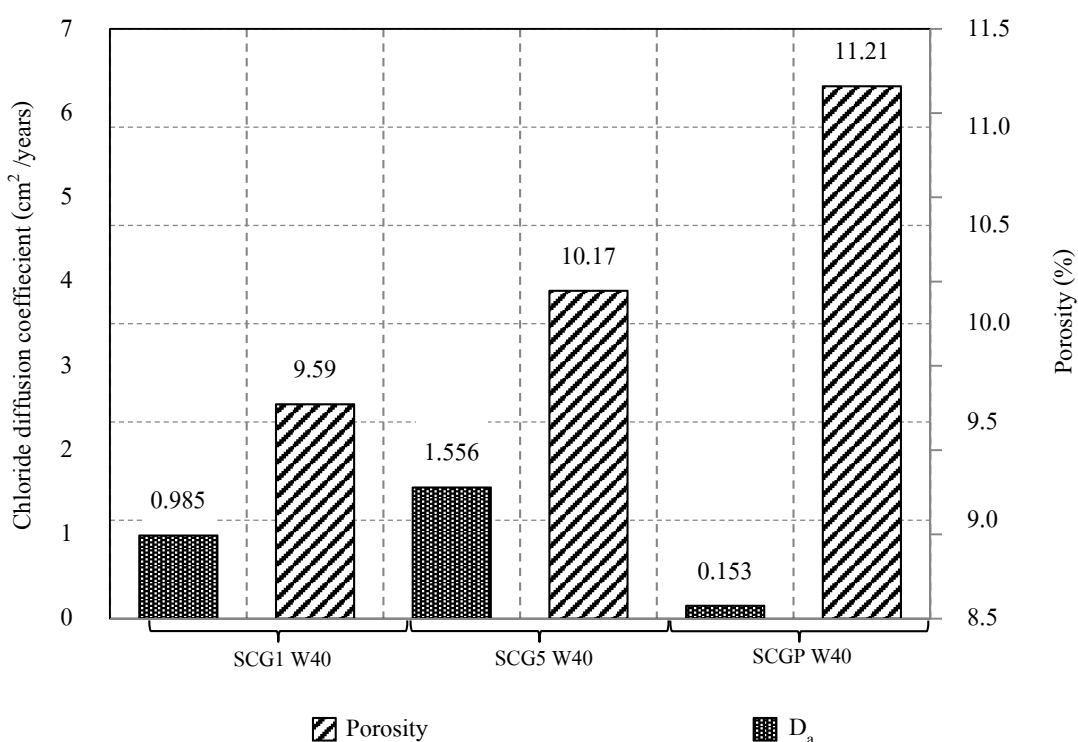
จากผลความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านมาข้างต้น ทำการเลือกส่วนผสมคอนกรีตเพื่อศึกษาขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและความพรุน ได้แก่ SCG1, SCG5, SCGP, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากภาพที่ 4-43 แสดงขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5 และ SCGP ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่า SCGP มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตน้อยที่สุด



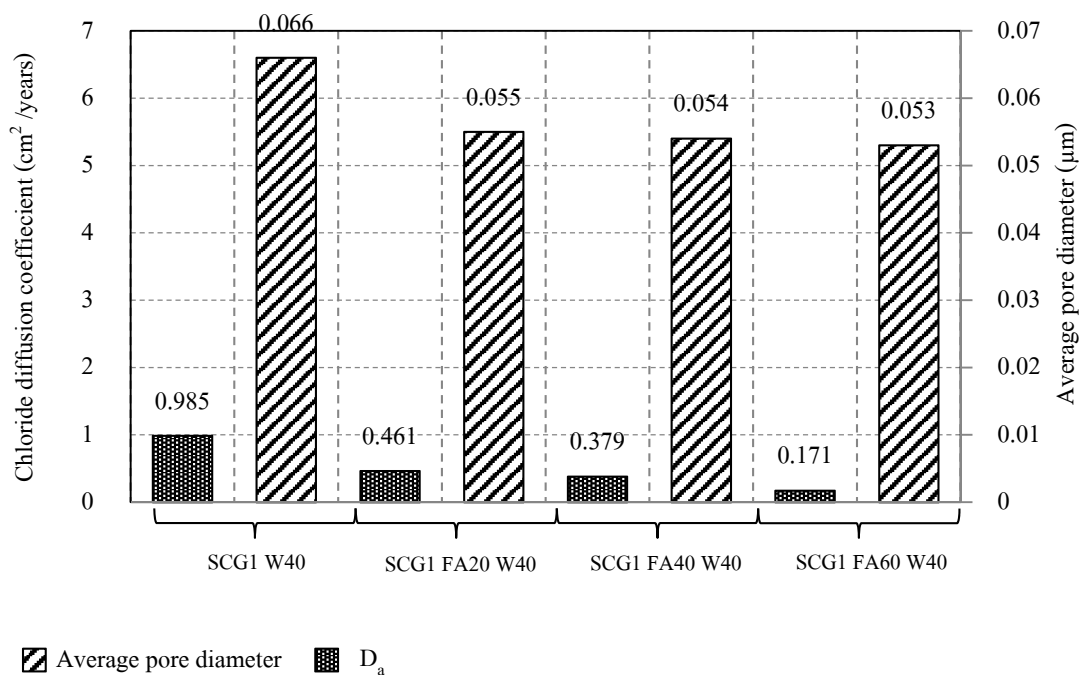
ภาพที่ 4-43 ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5 และ SCGP ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-44 แสดงความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5 และ SCGP ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่า SCGP มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตน้อยที่สุด แต่มีความพรุน (ปริมาณโพรงช่องว่าง) มากที่สุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาภาพที่ 4-43 และ 4-44 พบว่า SCGP มีขนาดโพรงช่องว่างเล็ก แต่มีความพรุน (ปริมาณโพรงช่องว่าง) มาก แต่โพรงช่องว่างอาจไม่ต่อเนื่องกัน จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยลง



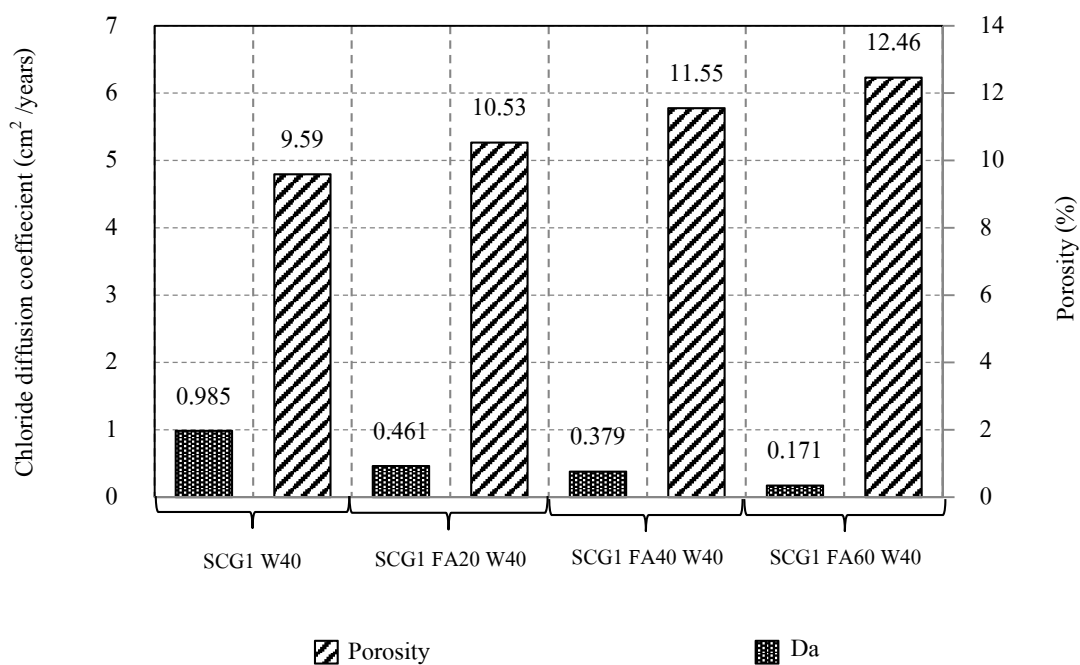
ภาพที่ 4-44 ความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5 และ SCGP ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-45 แสดงขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่า SCG1FA60 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยของคอนกรีตน้อยที่สุด



ภาพที่ 4-45 ขนาดโพรงช่องว่างภายในเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

จากภาพที่ 4-46 แสดงความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี พบว่า SCG1FA60 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตน้อยที่สุด แต่มีความพรุน (ปริมาณโพรงช่องว่าง) มากที่สุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาภาพที่ 4-45 และ 4-46 พบว่า SCG1FA60 มีขนาดโพรงช่องว่างเล็ก แต่มีความพรุน (ปริมาณโพรงช่องว่าง) มาก แต่โพรงช่องว่างอาจไม่ต่อเนื่องกัน จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยลง ดังนั้นทั้งขนาดโพรงช่องว่างภายในเนื้อและมีความพรุนมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

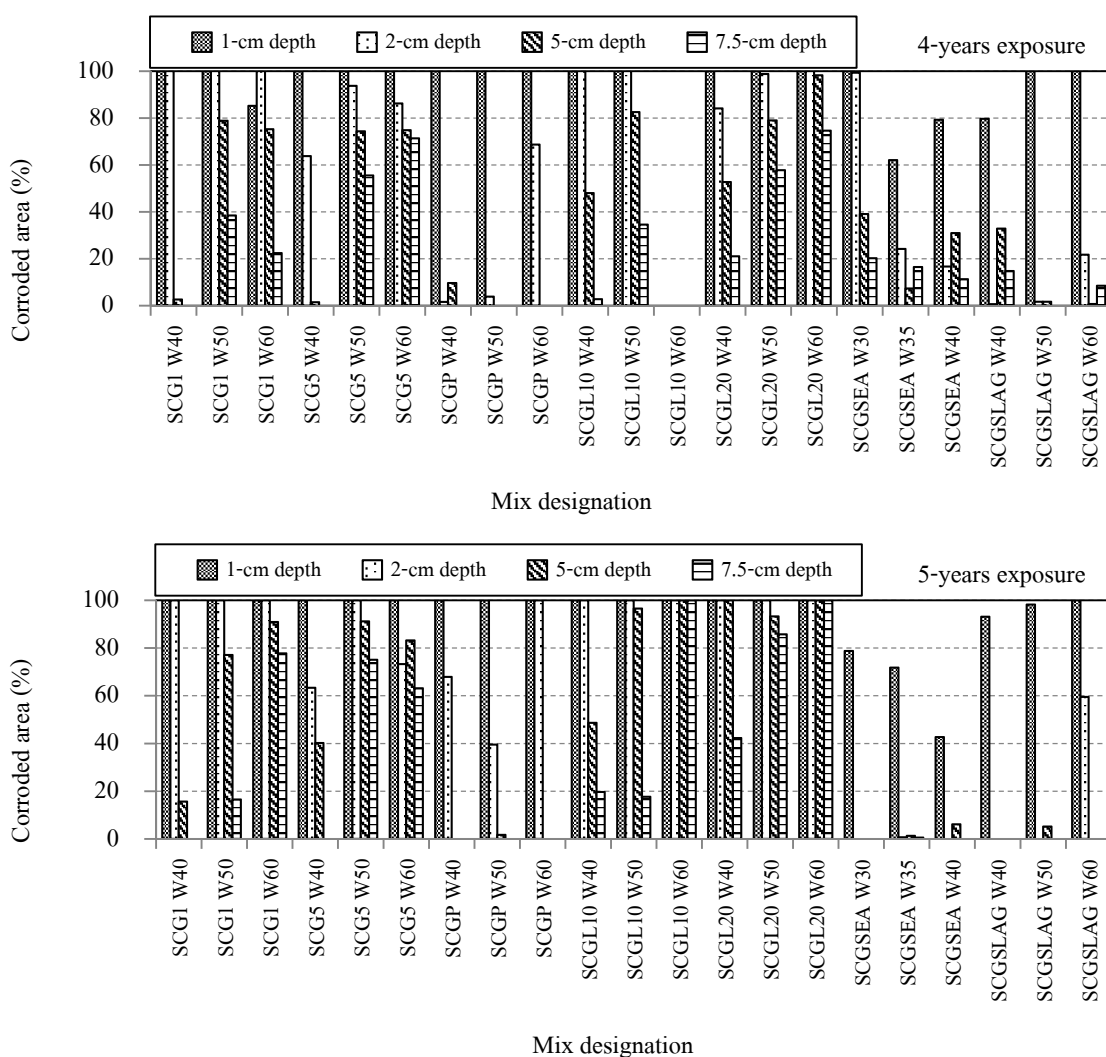


ภาพที่ 4-46 ความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG1FA20, SCG1FA40 และ SCG1FA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 5 ปี

พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

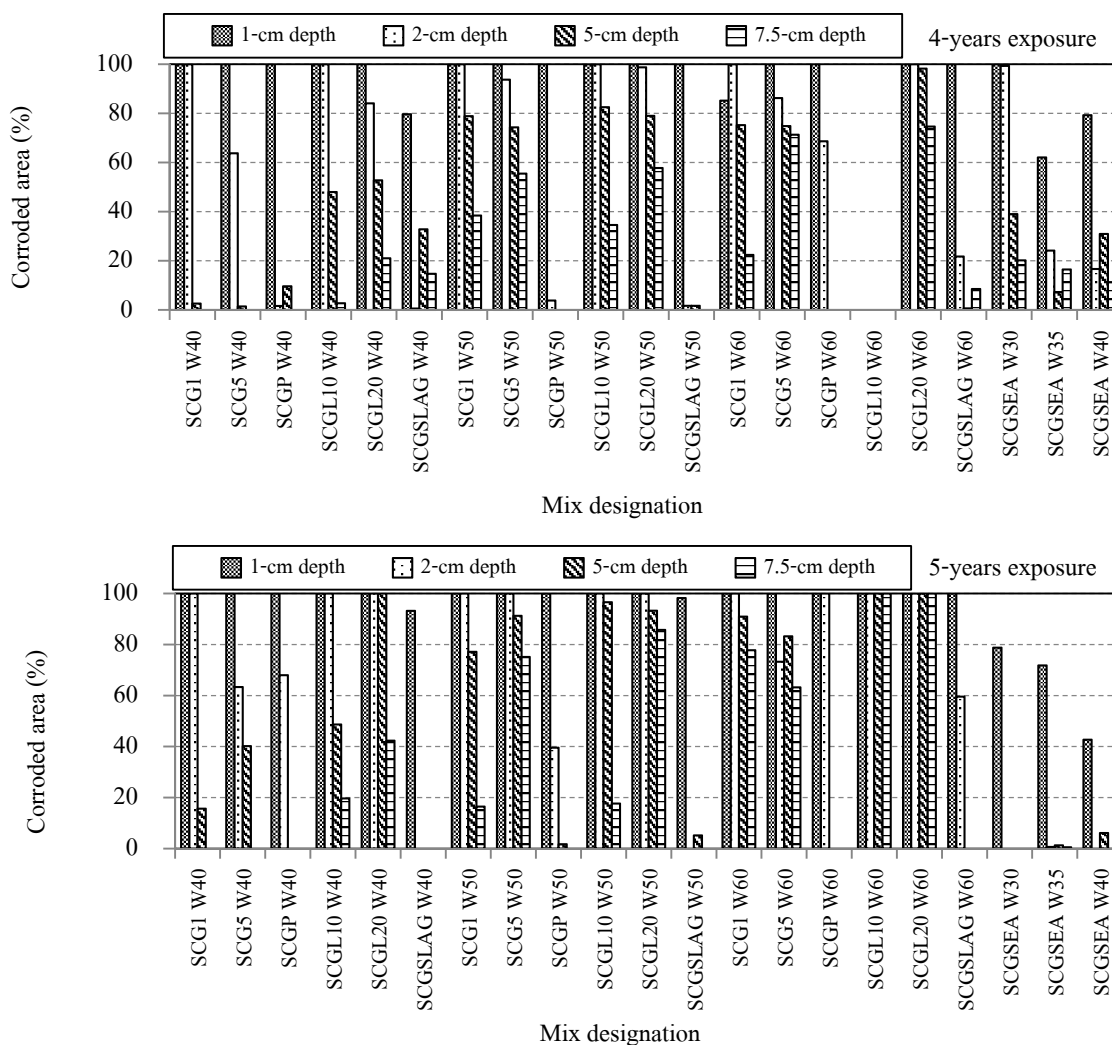
จากภาพที่ 4-47 แสดงผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGLAGC และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลมากขึ้น พื้นที่การเกิดสนิมมีมากขึ้นเช่นกัน แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อเกิดสนิมเต็มพื้นผิวของเหล็กแล้ว



ภาพที่ 4-47 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

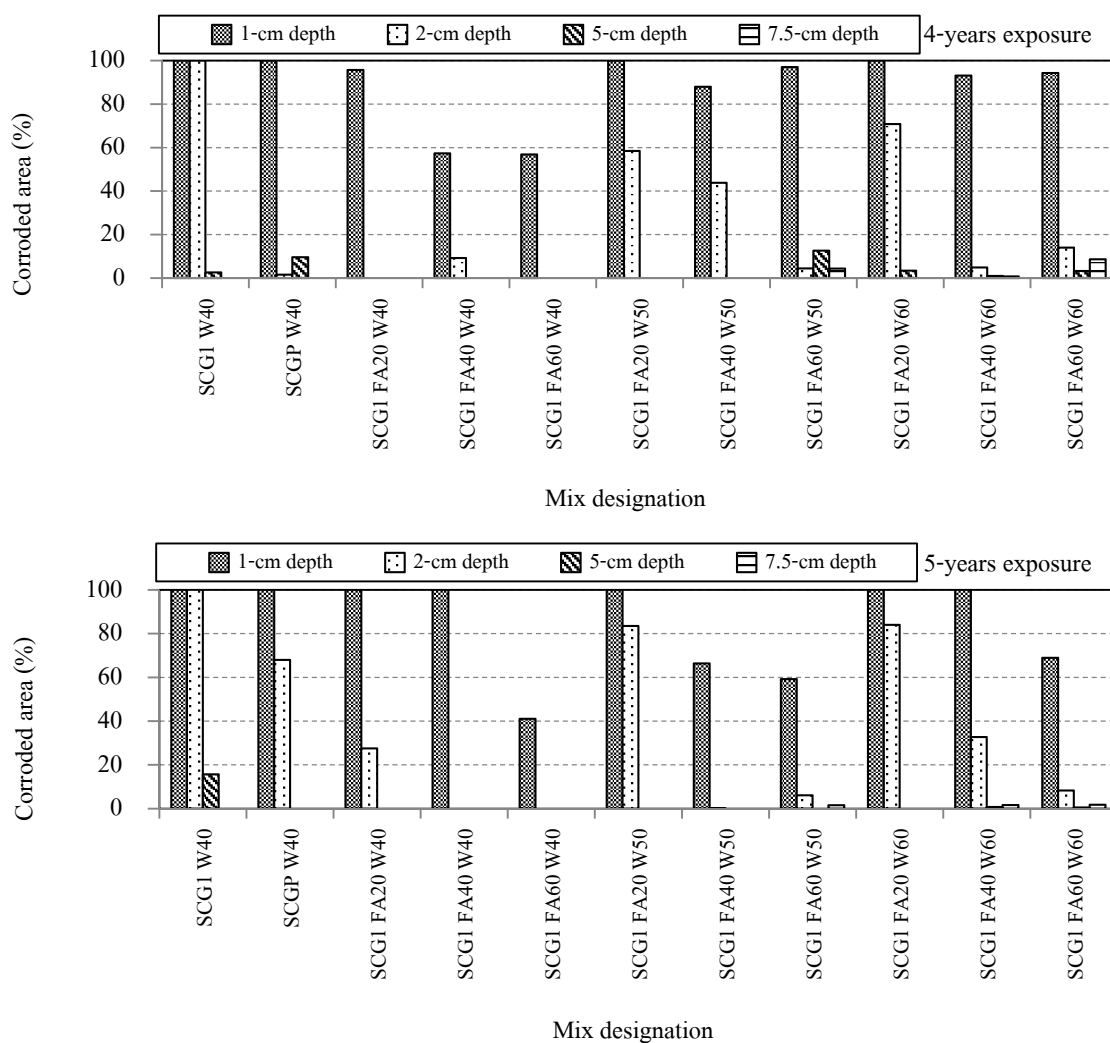
จากภาพที่ 4-48 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นพื้นที่การเกิดสนิมมีมากขึ้นเช่นกัน แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อเกิดสนิมเต็มพื้นที่ผิวเหล็กแล้ว



ภาพที่ 4-48 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

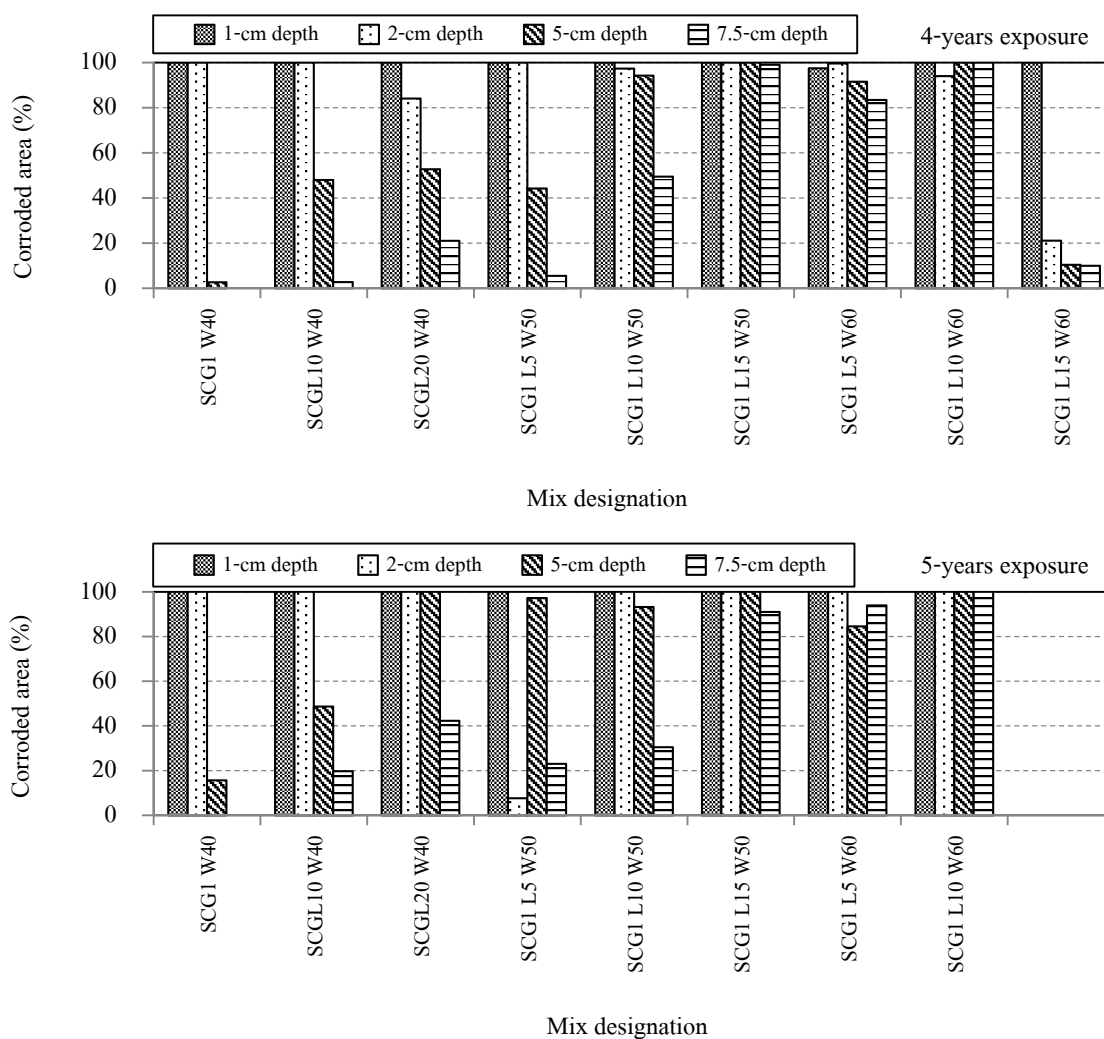
จากภาพที่ 4-49 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานมากขึ้น พื้นที่การเกิดสนิมมีน้อยลง แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อเกิดสนิมเต็มพื้นที่ผิวเหล็กแล้ว



ภาพที่ 4-49 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20, 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

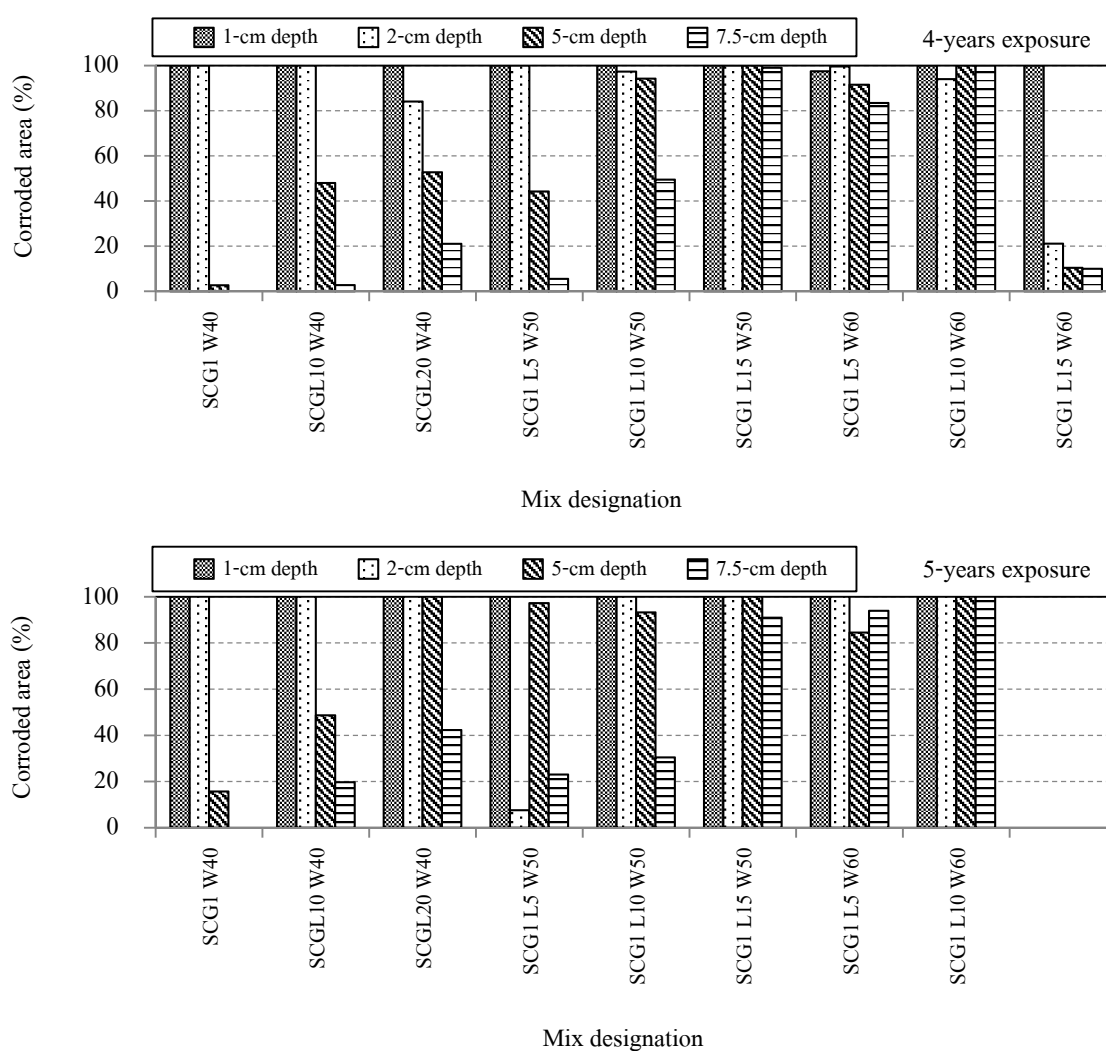
จากภาพที่ 4-50 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนหินปูนต่อวัสดุประสานมากขึ้นพื้นที่การเกิดสนิมมีมากขึ้น แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อเกิดสนิมเต็มพื้นที่ผิวเหล็กแล้ว



ภาพที่ 4-50 ผลกระทบของอัตราส่วนหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

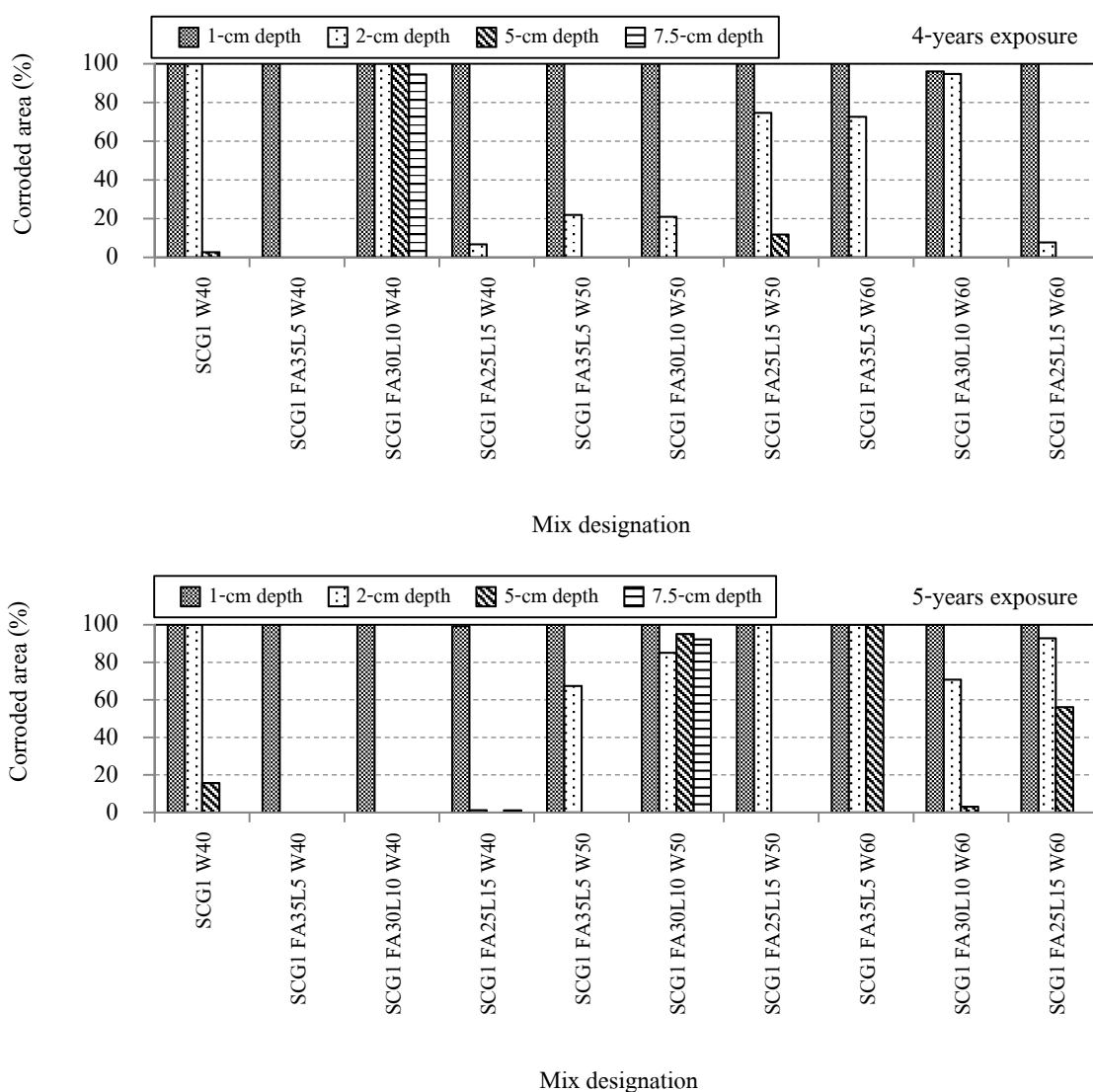
จากภาพที่ 4-51 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยและหินปูนต่อวัสดุประสานมากขึ้นพื้นที่การเกิดสนิมมีมากขึ้น แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อเกิดสนิมเต็มพื้นที่ผิวเหล็กแล้ว



ภาพที่ 4-51 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

จากภาพที่ 4-52 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ (SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA) ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าคอนกรีตที่ที่แทนที่ผงหินปูนน้อยมีพื้นที่เกิดสนิมน้อยกว่า แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อเกิดสนิมเต็มพื้นที่ผิวเหล็กแล้ว

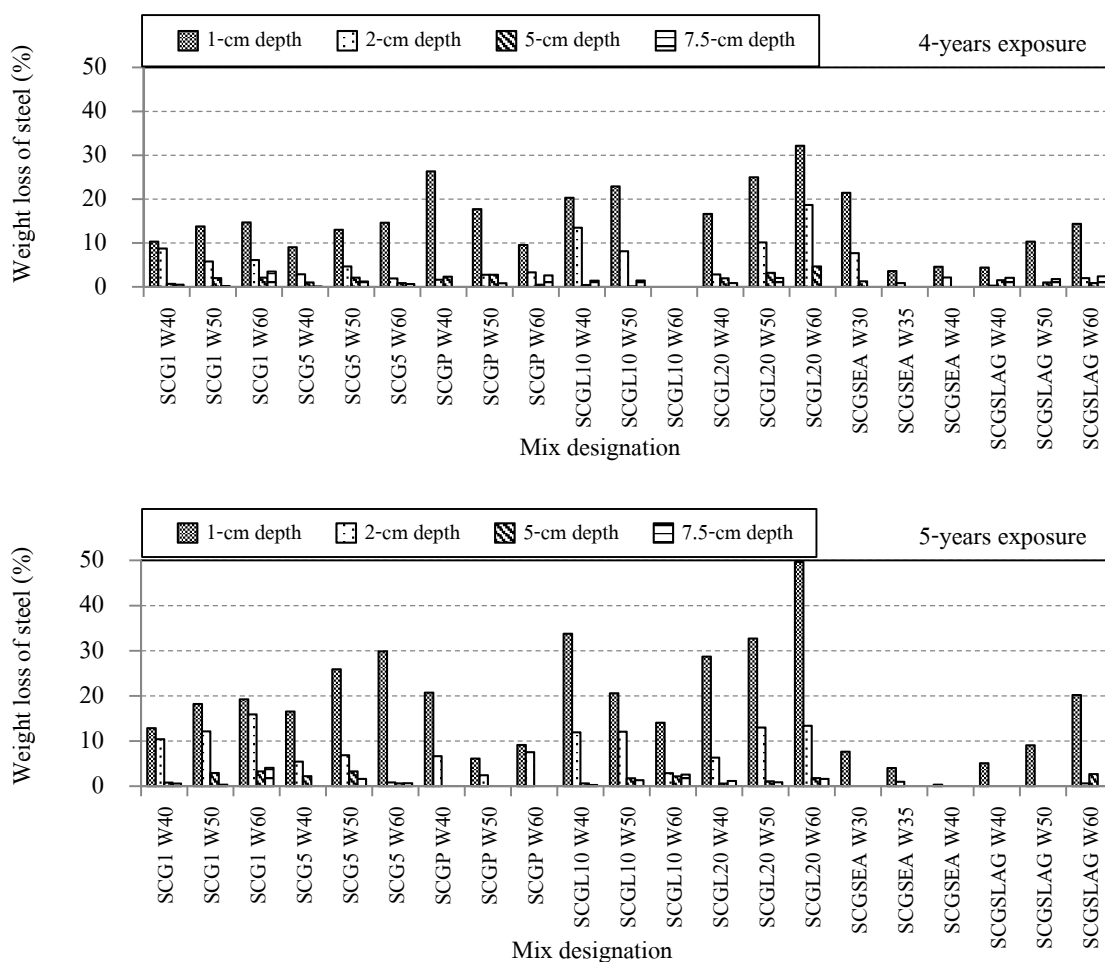


ภาพที่ 4-52 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ (SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA) ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลที่ 4 และ 5 ปี

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

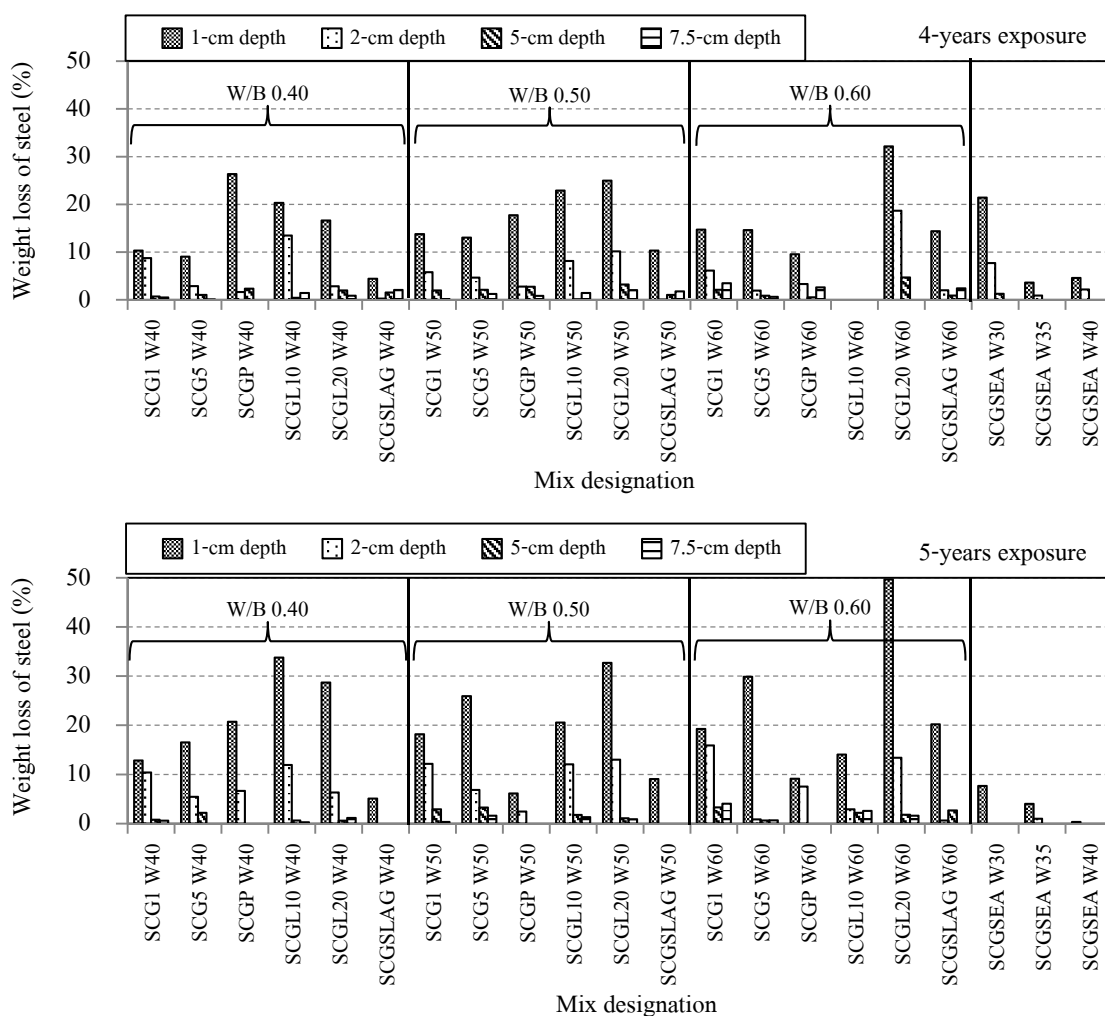
จากภาพที่ 4-53 แสดงผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่อระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลมากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีมากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4-53 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

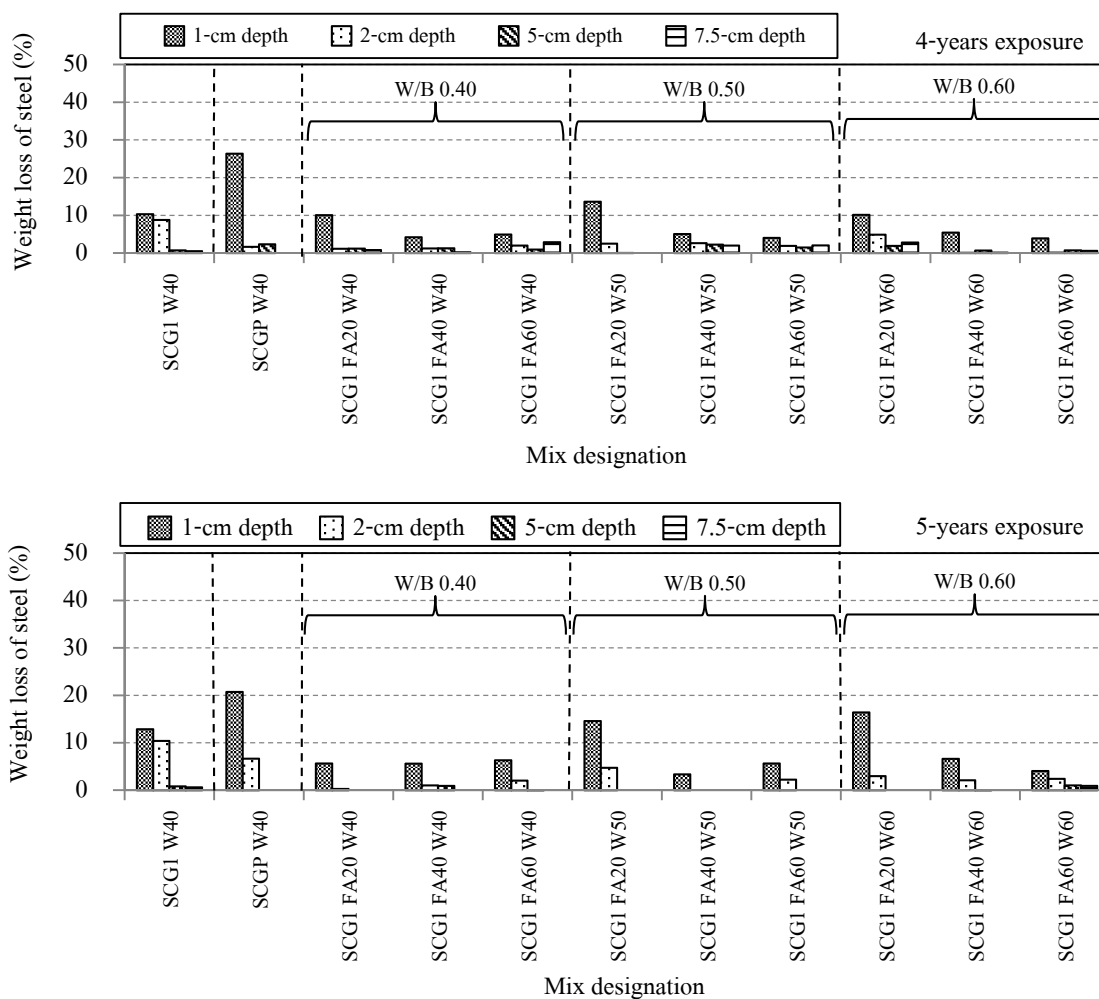
จากภาพที่ 4-54 แสดงผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีมากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4-54 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

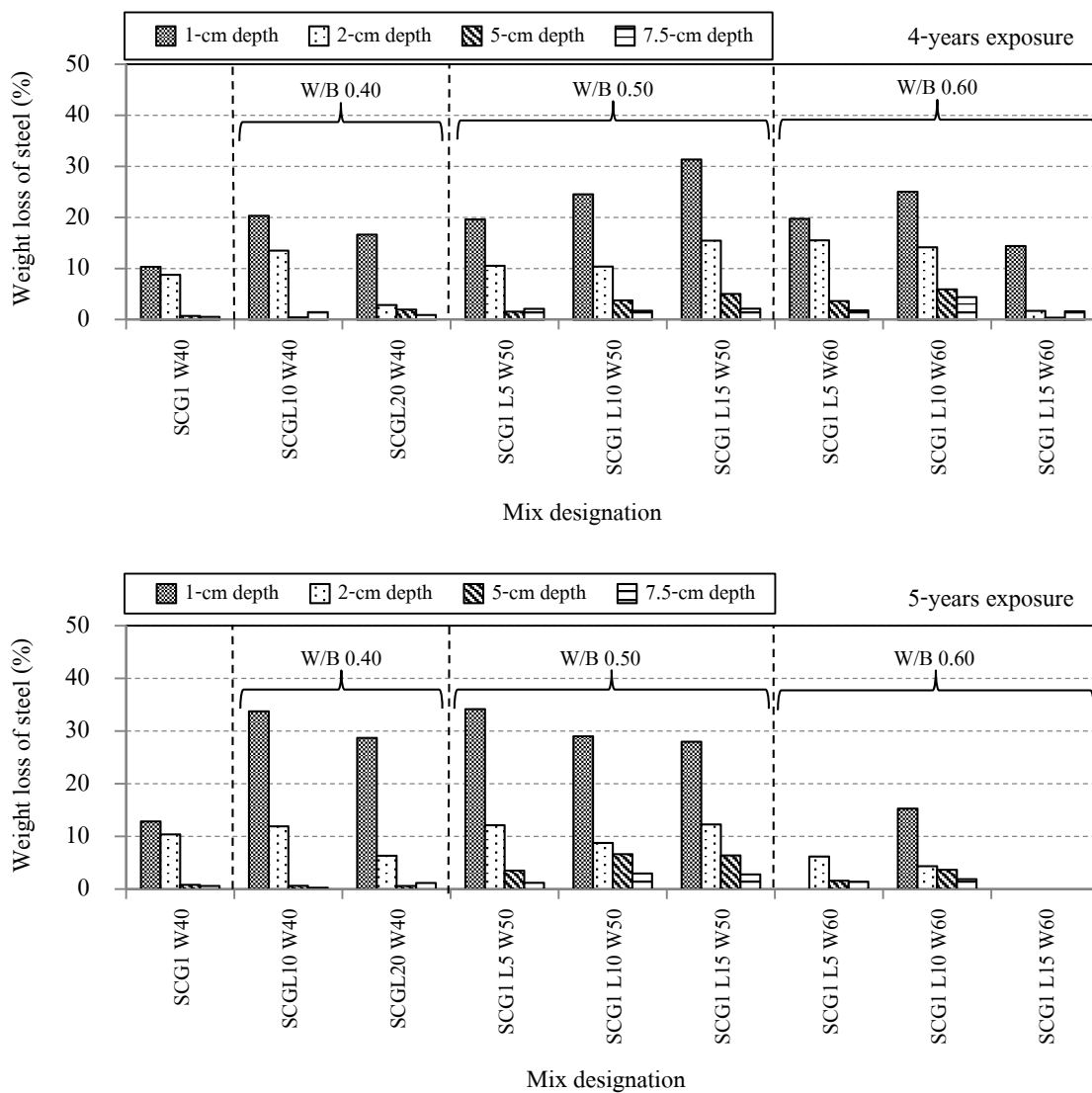
จากภาพที่ 4-55 แสดงอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ที่ร้อยละ 20 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานมากขึ้นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยลง



ภาพที่ 4-55 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนผลหินปูนต่อวัสดุประสาน

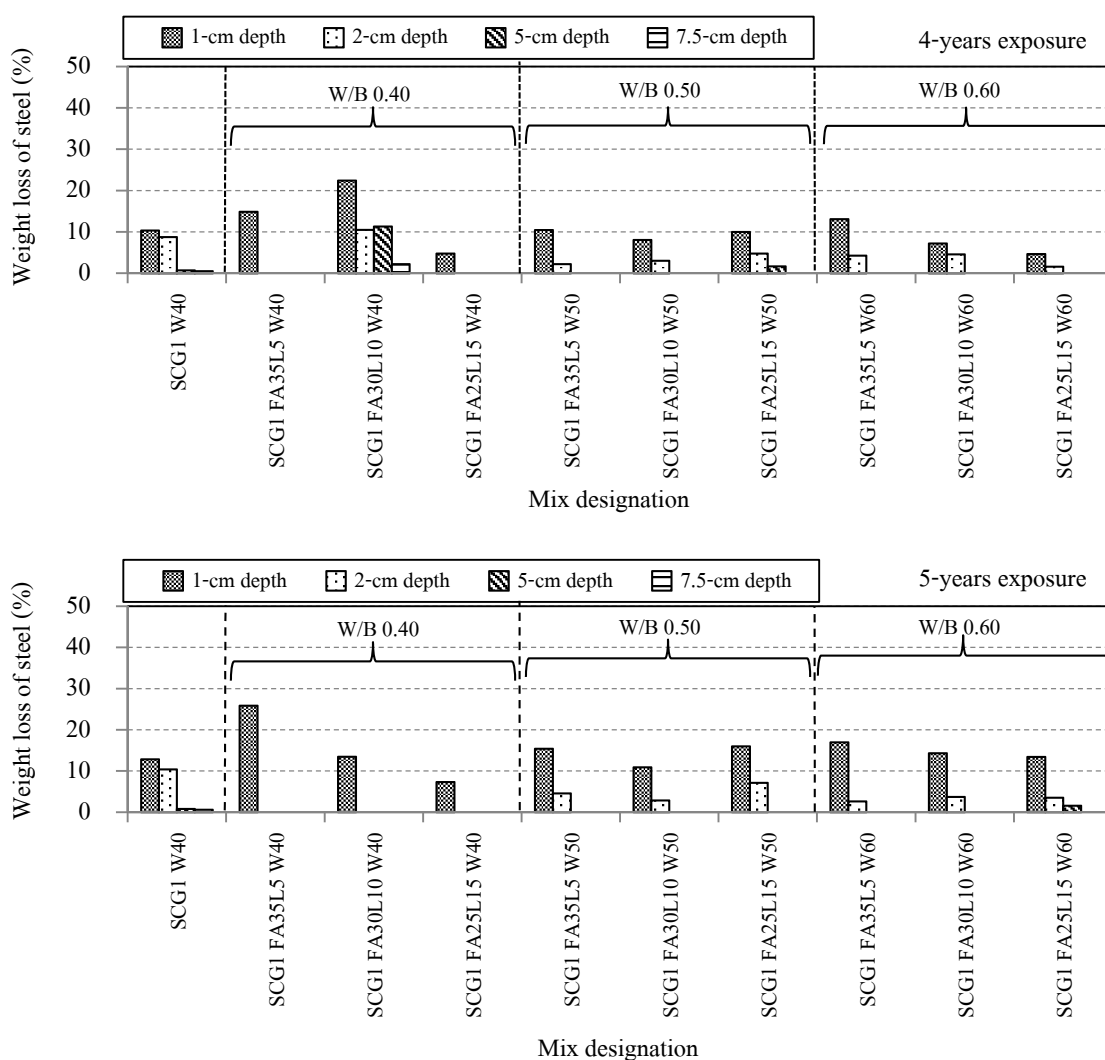
จากภาพที่ 4-56 แสดงอัตราส่วนผลหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนผลหินปูนต่อวัสดุประสานมากขึ้นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากขึ้น



ภาพที่ 4-56 ผลกระทบของอัตราส่วนผลหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของอัตราส่วนผลเฉลยและหินปูนต่อวัสดุประสาน

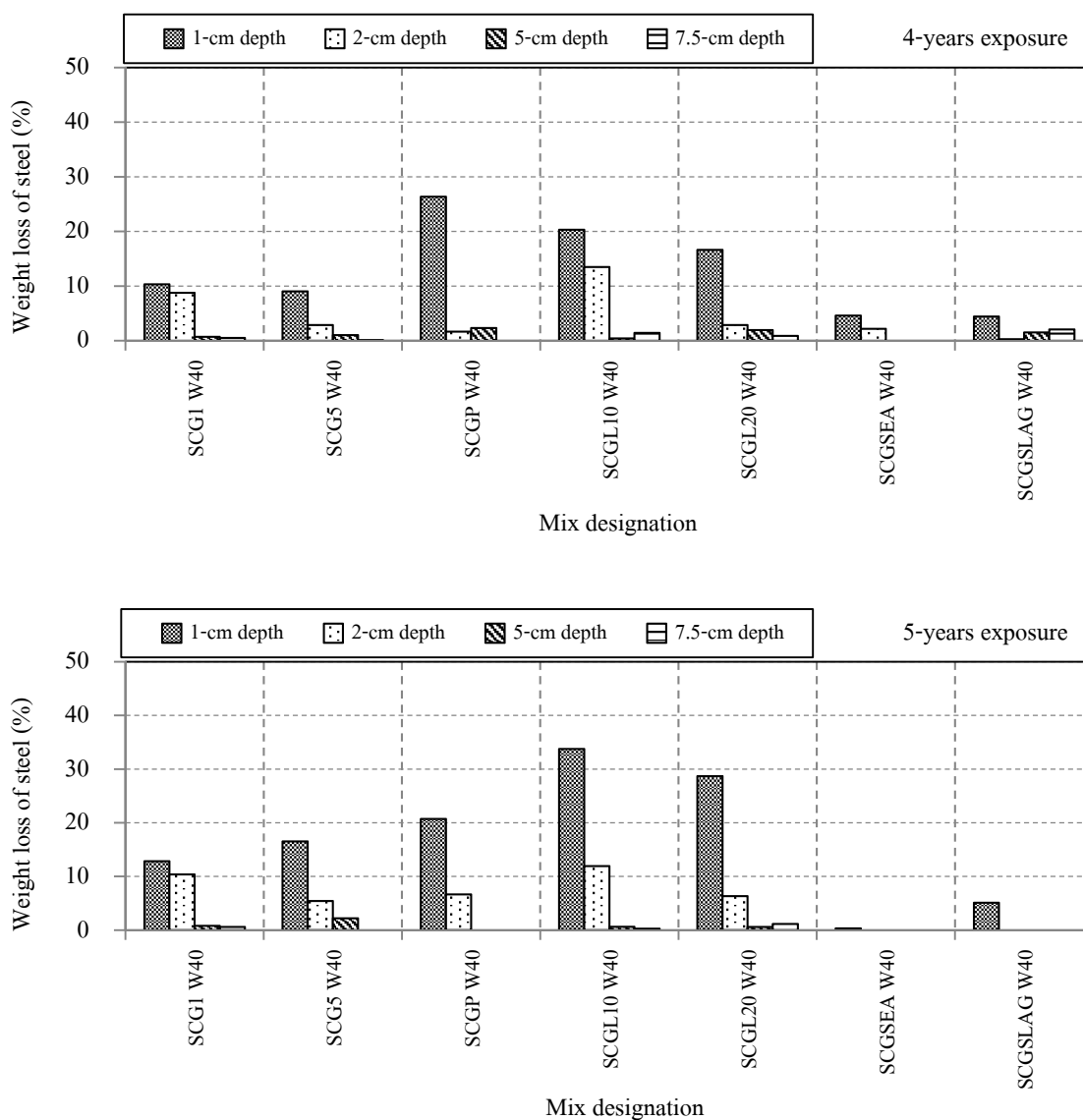
จากภาพที่ 4-57 แสดงอัตราส่วนผลเฉลยและหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าเมื่ออัตราส่วนหินปูนต่อวัสดุประสาน มากขึ้นการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ก็ลดลงกับคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 4-57 ผลกระทบของอัตราส่วนผลเฉลยและหินปูนต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

จากภาพที่ 4-58 ซึ่งแสดงผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี พบว่าคอนกรีตที่ใช้ SCGP, SCGSLAG และ SCGSEA มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 4-58 ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ของคอนกรีตที่ใช้ SCG1, SCG5, SCGP, SCGL, SCGSLAG และ SCGSEA ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี

อายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีต

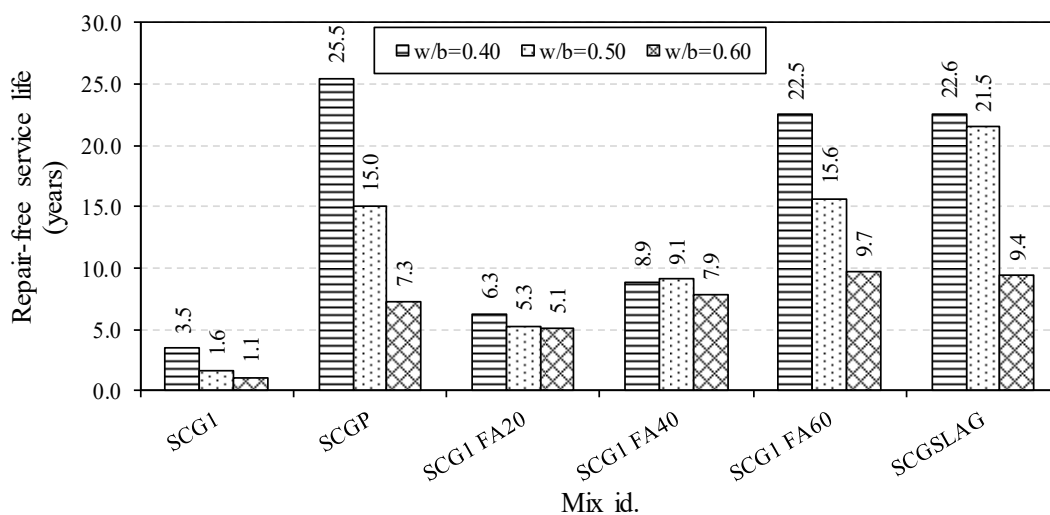
อายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีตสามารถทำนายได้จากสมการคำตอบกฎข้อที่สองของฟิคค์ (Fick's second law) ในสมการที่ 3-4 ซึ่งหากใช้ค่าตัวแปรดังตารางที่ 4-1 ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า (C_s) ของคอนกรีตที่ได้จากผลการทดสอบคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี และใช้ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (C_d) ตามมาตรฐาน มยพ.1332-55 (มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน) และใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) 5 เซนติเมตร จะได้ระยะเวลาหรืออายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนวัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 0.50 และ 0.60 ดังภาพที่ 4-59

ตารางที่ 4-1 เงื่อนไขในการคำนวณอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีต

Mix id.	Covering depth (cm)	D_a (cm^2/year)	C_s (% by wt. of binder)	C_d (% by wt. of binder)
SCG1 W40	5.0	0.99	4.11	0.45
SCG1 W50	5.0	2.79	7.79	0.45
SCG1 W60	5.0	3.14	8.04	0.45
SCGP W40	5.0	0.15	6.10	0.45
SCGP W50	5.0	0.25	6.50	0.45
SCGP W60	5.0	0.45	8.70	0.45
SCG1 FA20 W40	5.0	0.46	9.10	0.35
SCG1 FA40 W40	5.0	0.38	5.60	0.30
SCG1 FA60 W40	5.0	0.17	4.20	0.30
SCG1 FA20 W50	5.0	0.52	10.20	0.35
SCG1 FA40 W50	5.0	0.37	5.70	0.30
SCG1 FA60 W50	5.0	0.27	3.60	0.30
SCG1 FA20 W60	5.0	0.57	9.30	0.35
SCG1 FA40 W60	5.0	0.38	8.00	0.30
SCG1 FA60 W60	5.0	0.37	4.90	0.30
SCGSLAG W40	5.0	0.19	5.20	0.45
SCGSLAG W50	5.0	0.19	5.70	0.45
SCGSLAG W60	5.0	0.35	8.50	0.45

จากภาพที่ 4-59 แสดงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตประเภทต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 เซนติเมตร พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นส่งผลให้อายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตลดลง อายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนมากขึ้นจากร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 60 และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน พบว่า อายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 มีอายุการใช้งานต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แต่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันสำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ร้อยละ 60

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาดสูงเหล็กบด พบว่า มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ยกเว้น อายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาดสูงเหล็กบดที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน อย่างมีนัยสำคัญ อายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่ามากที่สุด (25.5 ปี) รองลงมาคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาดสูงเหล็กบด และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 60



ภาพที่ 4-59 อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของคอนกรีตประเภทต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 เซนติเมตร

บทที่ 5

สรุปผล

สรุปผล

จากการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ เถ้าลอย และผงหินปูนแทนที่บางส่วนวัสดุประสานทั้งแบบวัสดุประสาน 2 ชนิด (Binary binder) และวัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) ในส่วนผสมคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 4 และ 5 ปี สามารถสรุปผลได้ดังนี้ คือ

1. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลงและระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น เนื่องจากคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลานในคอนกรีต
2. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าและมีการเกิดสนิมของเหล็กน้อยกว่า ทั้งนี้มีค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าด้วย และเมื่อพิจารณาที่ความพรุนของของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความพรุนน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
3. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกอนเตาถลุงเหล็กและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ส่วนมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่า และมีการเกิดสนิมของเหล็กน้อยกว่า โดยมีค่ากำลังอัดคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน
4. เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด (Binary binder) พบว่า
 - 4.1 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วน of วัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 60 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด และมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อยที่สุด แม้ว่ามีค่ากำลังอัดคอนกรีตต่ำที่สุดและต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนก็ตาม อาจเนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยในคอนกรีต

ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างเล็กลง แต่ผลความพรุนของคอนกรีตสูงขึ้น เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณมากขึ้นจึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

4.2 คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนเมื่อใช้แทนที่ไม่เกินร้อยละ 5 เท่านั้น และมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมใกล้เคียงกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยที่มีกำลังอัดคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน อาจเนื่องจากผลของการเติมเต็มช่องว่างของผงหินปูนในคอนกรีต ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างเล็กลง

5. เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด และมีการเกิดสนิมของเหล็กน้อยที่สุด และมีค่ากำลังอัดคอนกรีตดีที่สุดต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน อาจเนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยและผลของการเติมเต็มช่องว่างของผงหินปูนในคอนกรีต ทำให้ขนาดโพรงช่องว่างเล็กลง

6. เมื่อพิจารณาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตทุกส่วนผสม พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด และมีการเกิดสนิมของเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีความเป็นสารปอซโซลานจากการบดสารปอซโซลานร่วมกับ Clinker ด้วย

7. จากผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตและขนาดโพรงช่องว่างของคอนกรีต พบว่า เมื่อมีการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสานบางส่วน ทำให้คอนกรีตมีขนาดโพรงช่องว่างเฉลี่ยเล็กลง ทำให้สัมประสิทธิ์ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีขึ้น แต่ความพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสานในปริมาณเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูน ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลต่าง ๆ พร้อมทั้งหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ดังนั้น จึงควรพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต เพื่อใช้ในการคำนวณหาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของโครงสร้างคอนกรีตต่อไปในอนาคต

2. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) เพียงอย่างเดียว จึงควรทำการศึกษาเหล็กข้อย้อย (Deformed bar) ที่ชั้นคุณภาพต่าง ๆ ด้วย เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างไปจากเหล็กกลมผิวเรียบ

3. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (Uncracked) ภายใต้อิมมersion เติมน้ำ จึงควรศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แตกร้าว (Cracked) ภายใต้อิมมersion เติมน้ำ ด้วยในอนาคต เพราะ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกร้าว

บรรณานุกรม

- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2555). *มยศ-1332-55 มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน*.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. (2543). *ความคงทนคอนกรีต*. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2553). *การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์*. โยธาสาร. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ปีที่ 22 ฉบับที่ 3, พฤษภาคม-มิถุนายน, 79-85.
- ชัยเฉลิม ราศรี, ทวีชัย สำราญวานิช, เฉลิมชัย วานิชย์ล้ำเลิศ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2553). *ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิดในสิ่งแวดล้อมทะเล*. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, โรงแรม Grand Pacific Sovereign Resort and Spa
- นุศวรา ขันกิจ. (2558). *ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. (2549). *คอนกรีตเทคโนโลยี(13).CPAC*
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). *แก้รอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)*. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). *ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ คอนกรีต*. สมาคมคอนกรีตไทย
- ปรีชา กาเพ็ชร, ชยันต์ ภัคดีไทย, และวินัย ศรีวิดี. (2554). *การหาพื้นที่ไปจากภาพถ่ายดิจิทัล*. แก่นเกษตร 39, ฉบับพิเศษ, 392-3397.
- วสุ วิทเขตปลา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2553). *ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมแก้รอย*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2553). *ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมแก้รอย ฟูนหินปูนและสารขยายตัว*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร, วสุ วิทยเขตปภา และ ทวีชัย สำราญวานิช. (2551). ความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, Volume 04.02.
- ASTM C1218, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, Volume 04.02.
- ASTM C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standard 2005*, Volume 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*, Volume 03.02.
- Bakker RFM. (1988). Corrosion of steel in concrete. New York : Chapman and Hall.
- 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, (pp.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, (pp.1352-1357).
- 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, (pp.356-361).
- 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, (pp.425–428)
- Ghrici M., Kenai S., & Said-Mansour M., 2007. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cement & Concrete Composite* 29, (pp.542-549)

- Hornain, H., Marchand J., Duhot V., & Moranville-Regourd M. (1995), Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.8, (pp.1667-1678)
- Matthews, J.D. (1989). Performance of Limestone-Filled *Cements*. *Building Research Establishment*, BR 245
- Soroka. (1993), "Concrete in hot environments", Great Britain: Alden Press.
- Rafat Siddique. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research* 34, (pp.487-493)
- Rui Luo, Yuebo Cai, Changyi Wang Xiaoming Huang. (2003). Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. *Cement and Concrete Research*. 33, (pp.1-7)
- Tezuka Y., D. Gomes, J. Martin J.G. Djanikian. (1992). Durability aspect cement with high limestone filler content. Pro. 9th Int. Congr. On the chemistry of cement., New Delhi, India, (pp. 53-59)
- Thomas M. (1996). Chloride thresholds in Marine concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 4, (pp.513-519)
- Tsivilis S., Chaniotakis, E., Badogiannis, E., Pahoulas G. Ilias, A. (1999). A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements. *Cement and Concrete Composite*, 21, 2, (pp.139-146)
- Tsivilis, S., Tsatilas, J., Kakali, G., Chaniotakis, E., Sakellariou, A. (2003). The permeability of Portland Limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, (pp.1465-1471)