

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหงสา
CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF CONCRETE WITH HONGSA FLY ASH

ชิตชนก เพื่อนบิดา
ปวีณวัชร อัครชุนหะวงศ์

โครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2560

CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF CONCRETE WITH HONGSA FLY ASH

CHIDCHANOK PHAUNBIDA
PAWEENAWACH AKKARACHOONHAWONG

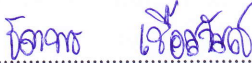
AN ENGINEERING PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY 2017

หัวข้อโครงการ	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหุงสา
โดย	ชิตชนก เพื่อนบิดา ปวีณวัชร อัครขุนพะวงค์
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการควบคุมโครงการ

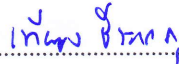

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสต์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

คณะกรรมการสอบโครงการ


.....ประธานกรรมการสอบโครงการ
(ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสต์)


.....กรรมการ
(ดร. เทียง ชีวะเกตุ)


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

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมโยธาฯ นี้ มุ่งศึกษาผลกระทบของความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจากหงสา เถ้าลอยจากแม่เมาะ และเถ้าลอยจากระยอง โดยทำการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแรง และทดสอบกำลังอัดภายหลังบ่มน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน และทดสอบแบบแพร่คลอไรด์ทั้งหมด ภายหลังจากบ่มน้ำ 28 วัน นำไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน ตามลำดับ และทำการตรวจสอบความพรุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยจากหงสาอนุภาคเล็ก (HSS) มีความต้านทานคลอไรด์ดีที่สุดในทุกการทดสอบ ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยจากหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยจากระยอง (BLCP) และเถ้าลอยจากแม่เมาะ (MM) ตามลำดับ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

คำสำคัญ : การแทรกซึมคลอไรด์, กำลังอัด, คอนกรีต, เถ้าลอย

Abstract

This civil engineering project aims to study the effect of fly ash from Hongsa, Mae Moh and Rayong on chloride resistance of concrete. The rapid chloride penetration test and compressive strength test were performed at the water curing times of 28, 56 and 91 days. Bulk chloride diffusion test were done after the water curing times of 28 day and 3.0% chloride solution submersion for 28, 56 and 91 days. The porosity of concrete with cement replacement of fly ash at 30% and 50% and water to binder ratio of 0.40 was investigated.

From the experimental results, it was found that concrete with replacement of cement by 50% of fly ash has higher chloride penetration resistance than that of 30% of fly ash. Concrete with small particle Hongsa fly ash (HSS) has the highest chloride resistance from all testings. The chloride resistance of concrete decreases as using large particle Hongsa fly ash (HSL) Rayong fly ash (BLCP) and Mae Moh fly ash (MM), respectively. Compressive strength of fly-ash concrete is lower than cement-only concrete.

KEYWORDS: Chloride penetration, Compressive strength, Concrete, Fly ash

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมโยธาฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความละเอียดถี่ถ้วน เอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา และ อาจารย์ ดร. เทียง ชีวะเกตุ ที่รับหน้าที่เป็นกรรมการสอบโครงการ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่านจนทำให้โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ของโครงการวิศวกรรมโยธาฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบเป็นกตัญญูตเวทิตาแด่ บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็น ผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาตราบจนทุกวันนี้

ชิตชนก เพื่อนบิดา
ปวีณวัชร อัครชุนหวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4
2.2 เถ้าลอย	5
2.3 ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตอันเนื่องมาจากคลอไรด์	7
2.4 แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต	8
2.5 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	8
2.6 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์	10
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
3 วิธีการทดลอง	14
3.1 วัสดุและส่วนผสมของคอนกรีต	14
3.2 วิธีการทดสอบ	19
3.2.1 ความต้านทานคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต	19
3.2.2 ความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต	25
3.2.3 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต	33
3.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต	35
3.2.5 ความพรุนของคอนกรีต	37
3.2.6 กำลังอัดของคอนกรีต	39

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	41
4.1 ความต้านทานคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต	41
4.1.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย	41
4.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	43
4.1.3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่าง	45
4.2 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตแบบแพร่ทั้งหมด	46
4.2.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย	46
4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	52
4.2.3 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์	64
4.2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต	68
4.3 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตและที่ผิวของคอนกรีต	69
4.3.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย	69
4.3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	71
4.3.3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่าง	75
4.4 ความพรุนในคอนกรีต	76
4.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	77
4.5.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย	77
4.5.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	78
4.5.3 ผลกระทบจากระยะเวลาที่ในการบ่ม	80
5 สรุปผล	81
5.1 สรุปผล	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	86
บทความ	117
ประวัติผู้จัดทำ	125

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15 (2547)	5
ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C618	6
ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน มอก.2135 (2545)	6
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน	17
ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	17
ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน (ต่อ)	18
ตารางที่ 3-3 ส่วนผสมคอนกรีต	19
ตารางที่ 3-4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202	25
ตารางที่ 3-5 เกณฑ์พิจารณาระดับการแทรกซึมคลอไรด์จากการทดสอบการต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ตามมาตรฐาน AASHTO TP95	36

ภาพที่ 2-1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์	7
ภาพที่ 2-2 สิ่งแวดล้อมทางทะเล 5 สิ่งแวดล้อม (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550)	8
ภาพที่ 2-3 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550)	10
ภาพที่ 2-4 กระบวนการการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก	11
ภาพที่ 3-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	14
ภาพที่ 3-2 มวลรวมหยาบ	14
ภาพที่ 3-3 มวลรวมละเอียด	15
ภาพที่ 3-4 ชนิดของเถ้าลอย	15
ภาพที่ 3-5 ภาพขยายของวัสดุประสาน	16
ภาพที่ 3-5 ภาพขยายของวัสดุประสาน (ต่อ)	17
ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	18
ภาพที่ 3-7 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า	19
ภาพที่ 3-8 ชุดเซลล์ทดสอบและอุปกรณ์สำหรับยึดจับตัวเซลล์ทดสอบ	20
ภาพที่ 3-9 เครื่องตัดคอนกรีต	20
ภาพที่ 3-10 เครื่องชั่งน้ำหนัก	20
ภาพที่ 3-11 การบ่มตัวอย่างในบ่อบ่ม	21
ภาพที่ 3-12 การตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นขนาดความหนา 5 เซนติเมตร เพื่อทำไปทดสอบ RCPT	21
ภาพที่ 3-13 การประกอบเซลล์ทดสอบเข้ากับตัวอย่าง	22
ภาพที่ 3-14 เติมน้ำละลายในช่องเซลล์ทดสอบ	22
ภาพที่ 3-15 ตำแหน่งการต่อสายไฟ	23
ภาพที่ 3-16 ตำแหน่งการต่อสายไฟเพื่อโอนถ่ายข้อมูลการทดสอบ	23
ภาพที่ 3-17 โปรแกรม RAPID CHLORIDE-Shortcut	24
ภาพที่ 3-18 หน้าต่างโปรแกรม RAPID CHLORIDE-Shortcut ก่อนการเข้าสู่โปรแกรมการใช้งาน	24
ภาพที่ 3-19 หน้าต่างโปรแกรม RAPID CHLORIDE-Shortcut สำหรับเริ่มทดสอบ	24
ภาพที่ 3-20 ครกหินบดตัวอย่างการทดสอบ	25
ภาพที่ 3-21 ชุดเครื่องกรองตัวอย่าง	26
ภาพที่ 3-22 เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP Titrino Metrohm	26
ภาพที่ 3-23 เตาไฟฟ้า	26
ภาพที่ 3-24 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์	27

ภาพที่ 3-25 ทาอีพ็อกซีลงบนด้านล่างและด้านข้างของตัวอย่าง	27
ภาพที่ 3-26 แซ่ตัวอย่างในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.0%	28
ภาพที่ 3-27 การตัดตัวอย่างและนำมาบดเป็นผง	28
ภาพที่ 3-28 การบดตัวอย่างให้เป็นผง	28
ภาพที่ 3-29 เติมสารละลายกรดไนตริก 25 ml. ลงในปิกเกอร์	29
ภาพที่ 3-30 การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่ใส่สารละลายไนตริกแล้ว	29
ภาพที่ 3-31 กรองสารละลายที่ผ่านการต้มให้ใสโดยใช้เครื่องดูด	30
ภาพที่ 3-32 ไตรเตรทตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว	30
ภาพที่ 3-33 ทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องหลังจากต้มตัวอย่าง	31
ภาพที่ 3-34 ใส่สารละลายไนตริกและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์	31
ภาพที่ 3-35 ไตรเตรทตัวอย่างและจดบันทึกค่า	32
ภาพที่ 3-36 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต	33
ภาพที่ 3-37 การวัดความต้านไฟฟ้าที่โคมด้านบนของคอนกรีต	33
ภาพที่ 3-38 การวัดความต้านไฟฟ้าที่โคมด้านล่างของคอนกรีต	34
ภาพที่ 3-39 การวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต	34
ภาพที่ 3-40 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต	35
ภาพที่ 3-41 การทำเครื่องหมายบนตัวอย่างทดสอบ	35
ภาพที่ 3-42 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต	36
ภาพที่ 3-43 ตู้อบตัวอย่าง	37
ภาพที่ 3-44 หม้อที่บรรจุตัวอย่าง	37
ภาพที่ 3-45 ชุดให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง	37
ภาพที่ 3-46 อบตัวอย่าง	38
ภาพที่ 3-47 แซ่ตัวอย่างในน้ำประปา	38
ภาพที่ 3-48 การซั่งตัวอย่างในน้ำ	39
ภาพที่ 3-49 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE	39
ภาพที่ 3-50 การวัดพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต	40
ภาพที่ 3-51 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	40

ภาพที่ 4-27 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีต (ต่อ)	79
ภาพที่ 4-28 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่างต่อกำลังอัดของคอนกรีต	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ อาทิเช่น คอนกรีตสามารถหล่อขึ้นรูป และตกแต่งรูปทรงตามที่ต้องการได้ มีความสามารถในการรับแรงอัดสูง ไม่ติดไฟ ซึ่งคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสมอันได้แก่ หินหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพคอนกรีตสดเป็นของเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักได้ ถึงแม้ว่าคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูง แต่ความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ เมื่อถูกแรงดึงจะทำให้คอนกรีตเปราะแตกได้ง่าย ด้วยสาเหตุนี้ ระบบคอนกรีตเสริมแรงจึงถูกนำมาใช้ โดยการนำวัสดุอื่นที่สามารถรับแรงดึงได้ดีมาใส่ไว้ในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีต วัสดุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ เหล็ก จึงเกิดเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยอาจกล่าวได้ว่า คอนกรีตรับแรงอัด และเหล็กรับแรงดึง คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีฟองอากาศกระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีต เมื่อโครงสร้างเผชิญกับสภาพแวดล้อมทะเล ทำให้เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพได้ เนื่องจากในน้ำทะเลมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ประมาณร้อยละ 1.6-1.8 โดยน้ำหนักน้ำทะเล ซึ่งคลอไรด์เป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และนำไปสู่การแตกร้าวของคอนกรีตจากขยายตัวของสนิมเหล็ก ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความคงทนและความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างลดลงด้วย และยังมีผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงไปด้วย ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้จึงมีความจำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมเพื่อไม่ให้โครงสร้างเสียหายก่อนเวลาอันควรหรือยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมมักจะมีราคาค่อนข้างสูง

โดยทั่วไปเหล็กเสริมในคอนกรีตจะถูกป้องกันการเกิดสนิมจากสถานะความเป็นต่างของคอนกรีต และชั้นฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-FeO}_2$) จนกระทั่งคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงชั้นผิวของเหล็กเสริมและสะสมจนมีปริมาณถึงระดับคลอไรด์วิกฤติแล้ว ชั้นฟิล์มออกไซด์ของเหล็กจะถูกทำลายลง ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม เมื่อบริเวณดังกล่าว มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอ จะทำให้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการเป็นสนิมเกิดขึ้น เกิดเป็นสนิมเหล็กเข้าไปแทนที่เนื้อเหล็กเสริมและดันคอนกรีตให้แตกร้าว เมื่อคอนกรีตมีรอยแตกร้าวจะทำให้อากาศ ความชื้น และคลอไรด์สามารถเข้าไปได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมบริเวณดังกล่าวเกิดสนิมเร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคลอไรด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักจะมีสาเหตุมาจากคลอไรด์ในสถานะแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งานแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตจะถูกเรียกว่าเกลือคลอไรด์ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือคลอไรด์ 2 ประเภท ดังนี้

- เกลือคลอไรด์จับยึด หมายถึง เกลือคลอไรด์ที่ถูกจับด้วยปฏิกิริยาและเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบ หรืออาจจะถูกจับยึดด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งเกลือคลอไรด์ ประเภทนี้ไม่ส่งผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต
- เกลือคลอไรด์อิสระ หมายถึง เกลือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในโพรงช่องว่างของคอนกรีตซึ่งเกลือคลอไรด์ ประเภทนี้หากมีมากพอแล้วจะสามารถทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้

จึงจำเป็นที่จะต้องใช้คอนกรีตที่มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี ซึ่งเรียกว่ามารีนคอนกรีต การทำมารีนคอนกรีตมีหลากหลายวิธีโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้เหมาะสมต่อการต้านทานความเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งในโครงการนี้จะเป็นการนำเถ้าลอยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

โครงการนี้จึงมุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมด้วยเถ้าลอย โดยศึกษาการต้านทานคลอไรด์แบบแรง และแบบแพร่ทั้งหมดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระ หากคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มาก ก็จะสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดี นอกจากนี้ ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปพัฒนาการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบเร่ง
2. เพื่อศึกษาความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบแพร่ทั้งหมดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
3. เพื่อศึกษาความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย
4. เพื่อศึกษาปริมาณความพรุนภายในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย
5. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจากหงสา 2 ประเภท คือเถ้าลอยหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL), เถ้าลอยหงสาอนุภาคเล็ก (HSS), เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และเถ้าลอยระยอง (BLCP) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 สำหรับการศึกษาความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 3.0% และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.30 M. ซึ่งจะทำให้การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน และสำหรับการศึกษาความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดจะนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำอุณหภูมิห้องที่อายุ 28 วัน ไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน นับตั้งแต่เริ่มแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แล้วจึงนำมาทำการทดสอบตามลำดับ และสำหรับการทดสอบปริมาณความพรุนของคอนกรีตจะทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 160 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบเร่ง
2. ทำให้ทราบถึงความต้านทานของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบแพร่ทั้งหมดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
3. ทำให้ทราบถึงความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย
4. ทำให้ทราบถึงปริมาณความพรุนภายในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย
5. ทำให้ทราบถึงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญมาก ไม่ว่าจะเป็นการก่อสร้างบ้านเรือนขนาดเล็กไปจนถึงอาคารขนาดใหญ่ ถนน สะพาน หรือแม้แต่เชื่อมกันน้ำก็ล้วนต้องใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสิ้น ปูนซีเมนต์มีอยู่หลายประเภท แต่ละประเภทมีคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-1 เพื่อเหมาะสมสำหรับสิ่งก่อสร้างที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป

ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 15 (2547) สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทคือ

ก. ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เหมาะสำหรับการก่อสร้างทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษจำเพาะแต่อย่างใด

ข. ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่อาจได้รับความร้อน และมีคุณสมบัติทนต่อซัลเฟตได้ปานกลาง

ค. ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดได้สูงในระยะแรก เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่เร่งรีบ ต้องการใช้งานเร็วหรือถอดแบบในเวลาอันสั้น

ง. ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตมวล (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์เก็บน้ำหรือฝายกั้นน้ำ

จ. ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulfate Resistance Portland Cement) เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อนได้สูงจากสารเคมีต่างๆ โดยเฉพาะซัลเฟต

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15 (2547)

รายการที่	คุณลักษณะ	ประเภทที่				
		1	2	3	4	5
1	SiO ₂ ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	-	20.00	-	-	-
2	Al ₂ O ₃ ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	-	6.00	-	-	-
3	Fe ₂ O ₃ ร้อยละ ไม่มากกว่า	-	6.00	-	6.50	-
4	MgO ร้อยละ ไม่มากกว่า	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
5	SO ₃ ร้อยละ ไม่มากกว่า					
	5.1 เมื่อมี C ₃ A ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	3.00	3.00	3.50	2.30	2.30
	5.2 เมื่อมี C ₃ A มากกว่าร้อยละ 8	3.50	-	4.50	-	-
6	น้ำหนักระเหยเนื่องจากการเผา ร้อยละ ไม่มากกว่า	3.00	3.00	3.00	2.50	3.00
7	กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ร้อยละ ไม่มากกว่า	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
8	C ₃ S ร้อยละ ไม่มากกว่า	-	-	-	35.00	-
9	C ₂ S ร้อยละ ไม่มากกว่า	-	-	-	40.00	-
10	C ₃ A ร้อยละ ไม่มากกว่า	-	8.00	15.00	7.00	5.00
11	C ₄ AF+2(C ₃ A) ร้อยละ ไม่มากกว่า	-	-	-	-	25.00

2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอยจากถ่านหิน หรือ เถ้าถ่านหิน เป็นผลพลอยได้จากโรงงานที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อให้พลังงานความร้อนแก่หม้อไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2547) เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกกันว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยออกมาตามอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) และเถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยออกไปกับอากาศร้อน ซึ่งจะก่อให้เกิดมลภาวะในพื้นที่รอบโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยจากถ่านหินมีลักษณะ เป็นฝุ่นผงคล้ายปูนซีเมนต์ มีสีเทาดำ หรือน้ำตาล จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) อย่างหนึ่ง ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี คือ ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าสารปอซโซลานมีความละเอียดมาก และมีน้ำเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุดมหมู่ปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติยึดประสาน ส่วนใหญ่เถ้าลอยจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม เถ้าลอยแบ่งชั้นคุณภาพไว้ 2 ชั้น ตามมาตรฐาน ASTM C618

ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-2 และ เถ้าลอยถูกแบ่งตามมาตรฐาน มอก.2135 (2545) ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติ	ชั้นคุณภาพ	
	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ	70.0	50.0
SO_3 ร้อยละ	5.0	5.0
MgO น้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ	5.0	5.0
Na_2O น้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ	1.5	1.5
Moisture	3.0	3.0
Loss on ignition	6.0	6.0

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน มอก.2135 (2545)

คุณสมบัติ	ชั้นคุณภาพ			
	1	2		3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
SiO_2 ไม่น้อยกว่า ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
CaO	-	น้อยกว่า ร้อยละ 10	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 10	-
SO_3	5.0	5.0	5.0	5.0
Moisture	3.0	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition	6.0	6.0	6.0	12.0

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในคอนกรีต กล่าวคือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในเถ้าลอย ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) โดยที่ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2-1) ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอะลูมินา ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$) ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2-2)



2.3 ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตอันเนื่องมาจากคลอไรด์

เป็นที่ทราบกันว่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาทิ สร้างรอยแตกร้าวที่เกิดจากสนิมขยายตัวและดันคอนกรีตให้หลุดร่อน คราบน้ำสนิมจากเหล็ก และยังรวมไปถึงการวิบัติของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักของการเกิดสนิมภายในเหล็กเสริม ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเกิดบริเวณที่มีสภาวะแวดล้อมทะเล คลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม เมื่อสนิมขยายตัวจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว และมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2-1

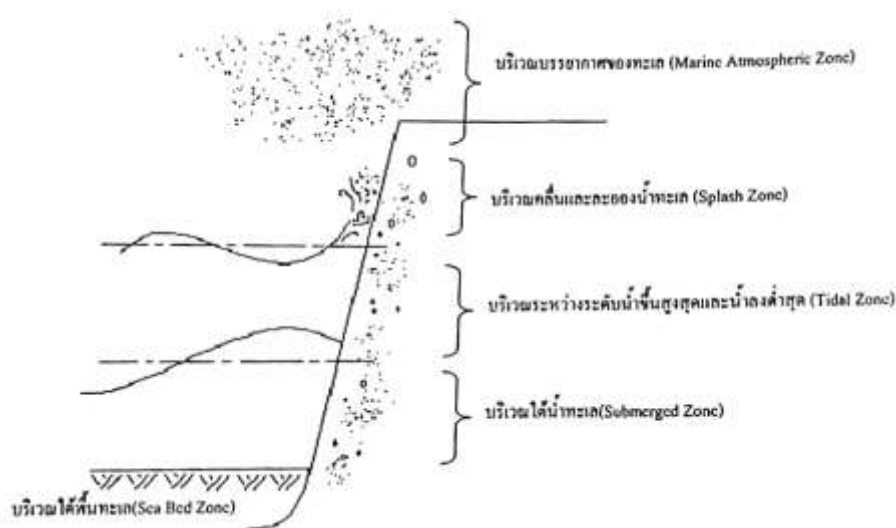


ภาพที่ 2-1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่าผลกระทบโดยรวมจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ ดังที่ได้อธิบายมาแล้ว คือ กำลังรับแรงต่างๆ ของคอนกรีตโดยรวมลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอนตัว หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วยรวมถึงความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลายโดยกระบวนการดังกล่าวคือ การแตกร้าวของคอนกรีตเป็นสวนหนึ่งที่จะช่วยเร่งให้น้ำและออกซิเจน สามารถเข้าถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ซึ่งยังส่งผลให้การเร่งการเกิดของสนิมเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น การเกิดสนิมเหล็กจะมีผลเสีย อาทิเช่น พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วลบ ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนจะลดลง ส่วนเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วบวกจะเปสนิมพอกพูนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยสนิมจะขยายตัวเพิ่มปริมาตร 4-6 เท่า และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้ก็จะลดลง จนกระทั่งโครงสร้างคอนกรีตจะแตกออกด้วยการขยายตัวของสนิมและเสียความสามารถในการรับกำลัง

2.4 แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล คลอไรด์เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) จะซึมเข้าสู่คอนกรีต ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมหากมีปริมาณคลอไรด์ บริเวณผิวเหล็กเสริมมีมากเกินไปกว่าค่าคลอไรด์วิกฤติจะทำให้ เหล็กเสริมเริ่มเป็นสนิมซึ่งความเสียหายจากสาเหตุต่างๆนี้ จะมีระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันในบริเวณที่ต่างกัน เช่น บริเวณใต้ทะเล บริเวณระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด บริเวณที่สัมผัสคลื่นและละอองน้ำทะเล หรือสภาวะที่ต้องเผชิญกับลมทะเลและโครงสร้างบนผิวดินที่มีคลอไรด์ ดังแสดงไว้ในภาพ 2-2



ภาพที่ 2-2 สิ่งแวดล้อมทางทะเล 5 สิ่งแวดล้อม (ทวีชัย สำราญวานิช, 2553)

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จึงไม่เป็นปัญหานัก ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุดมักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำรอลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลจะมีความเสี่ยงต่อการกร่อนของเหล็กเสริมน้อยมาก

2.5 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง หรือเจือปนในวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตอย่างเช่น หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ที่มีคลอไรด์ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีต ส่วนมากจะมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกของคอนกรีต

คลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) การแพร่ของอออนคลอไรด์ (Chloride diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าไปยังโพรงโดยคลอไรด์ โดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ คลอไรด์จะแพร่จากความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่แพร่เข้าภายในของคอนกรีตเทียบกับระยะเวลา ดังสมการที่ (2-3)

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (2-3)$$

$C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

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

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ตารางเซนติเมตร/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ตารางเซนติเมตร)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

- 2) การแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งด้วยแรงแคปพิลลารี (Capillary Suction) โดยรูพรุนที่แห้งของคอนกรีตจะมีแรงดึงดูดให้น้ำที่มีคลอไรด์อยู่เข้าไปในคอนกรีต มักเกิดกับคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยการแทรกซึมวิธีนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้ระยะเวลาน้อย
- 3) การดึงดูดอออน (Ion Adsorption) เนื่องจากผนังของโพรงช่องว่างมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกจะดึงดูดคลอไรด์อออนที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเข้าไปภายในคอนกรีตได้ ประจุลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้นสูงขึ้น
- 4) การซึมผ่าน (Permeability) เข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ มักเกิดจากโครงสร้างคอนกรีตที่มีแรงดันน้ำมากกระทำ โดยใช้ความแตกต่างของ Hydraulic head กล่าวคือ คลอไรด์จะแพร่จาก Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่ Hydraulic head ที่ต่ำกว่า

ปัญหาคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนใหญ่มักจะมาจากสภาวะแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน คลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตทั้งหมดถูกเรียกว่าเกลือคลอไรด์ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือคลอไรด์ 2 ประเภท คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และคลอไรด์อิสระ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-3

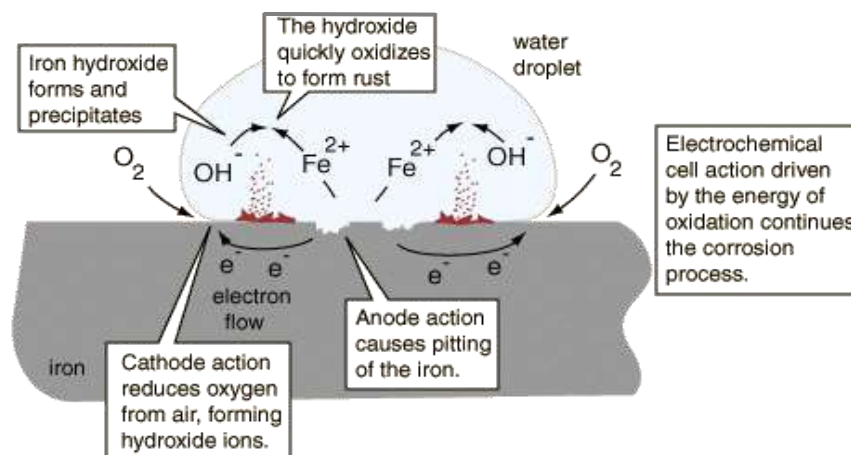


ภาพที่ 2-3 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550)

2.6 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

โดยปกติเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีชั้นฟลอมออกไซด์ (Protective passivity layer) บางๆเคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟลอมออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-FeO}_3$) แต่เมื่อใดก็ตาม หากเกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริม และสะสมจนมีปริมาณถึงค่าคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ชั้นฟลอมออกไซด์นี้จะถูกทำลายลง ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจน (O_2) และความชื้น (H_2O) ในปริมาณที่มากพอแล้ว กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-4 กล่าวคือ บริเวณที่ฟลอมออกไซด์ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลายปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ดังแสดงในสมการที่ (2-4)

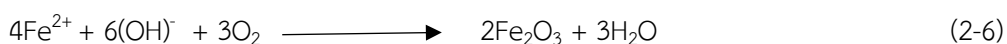




ภาพที่ 2-4 กระบวนการการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก

(ที่มา : <http://mini-engineer.blogspot.com/2014/10/corrosion-of-steel-in-concrete.html>,2557)

อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นนี้จะวิ่งผ่านไปยังฟลอมที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) เรียกว่ากระบวนการคาโธดิก (Cathodic process) เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังแสดงไว้ในสมการเคมีที่ (2-5) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นโดยที่ Fe_2O_3 ก็คือเฟอร์ริกออกไซด์หรือสนิม ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2-6)



กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตอันเนื่องมาจากคลอไรด์ คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, (2543) คลอไรด์ไอออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์ไอออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนเกินค่าคลอไรด์วิกฤติ เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมจนกระทั่งโครงสร้างไม่อยู่ในสภาพปลอดภัยในการใช้งาน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2552) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเกลือลอย ผุ่นหินปูนและสารขยายตัวในมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน ขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมเกลือลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ส่วนผุ่นหินปูนให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลง อาจเกิดจากผลกระทบการเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง แต่ขาดคุณสมบัติของการเป็นวัสดุประสาน ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านได้ สำหรับสารขยายตัวให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

การใช้สารขยายตัวที่เหมาะสม ทำให้เนื้อมอร์ตาร์แน่นมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน จะเห็นว่ามีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูงขึ้นและให้แนวโน้มผลการทดสอบไปในทางเดียวกันนอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบด้วยวิธี Bulk diffusion test วิธี RCPT และวิธี RMT มีแนวโน้มผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน

สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2554) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าลอยบิทูมินัสต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น แต่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นจาก 28 วันเป็น 91 วันส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งจึงเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของเถ้าลอยพบว่า เถ้าลอยบิทูมินัสมีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าเถ้าลอยลิกไนต์ยกเว้นเถ้าลอยบิทูมินัส FA-2B

สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2554) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปูนขาวอิสระสูงต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานช่วยให้มอร์ตาร์มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด เถ้าลอยที่มี free lime สูงตามธรรมชาติในทุกอัตราส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime ตามปกติ อาจเป็นเพราะองค์ประกอบทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีในเถ้าลอยที่แตกต่างกัน สำหรับเถ้าลอยที่มีการเติม free lime เห็นได้ว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีผลกระทบต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพียงเล็กน้อยแต่ก็ยังดีกว่าใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และที่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง อีกทั้งปริมาณ free lime ที่มีเพิ่มขึ้นในเถ้าลอยไม่ได้เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ แต่จำเป็นจะต้องพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางกายภาพของเถ้าลอยด้วย การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดให้ผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ไปในแนวโน้มเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่ามอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 91 วันมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน

สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2555) ได้ทำการศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยต่ำลง ซีเมนต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ให้ค่ากำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ในทุกอัตราส่วนผสม นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50 ช่วยให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เถ้าลอยระยอง B (Blair Athol) และเถ้าลอยระยอง BM (Blair Athol and Melawan) มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ดีกว่าเถ้าลอยแม่เมาะ

อุดมพร กุลมงคล (2555) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย จากแม่เมาะและระยอง พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงที่อายุ 28 วัน มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา ส่วนที่อายุ 318 วัน คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงที่มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 10 และ 30 ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย เมื่อพิจารณาอายุการทดสอบที่มากขึ้น คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาและคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาและคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่ที่อายุการทดสอบ 91 วัน คอนกรีตมีแนวโน้มที่จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

Simcic et al. (2015) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีผลทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยเนื่องจากเถ้าลอยไปอุดรูพรุนช่องว่างภายในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น อีกทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ส่งผลดีต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กเสริมในคอนกรีต

Jun Liu et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยอาจเป็นเพราะเถ้าลอยมีอนุภาคเล็กสามารถไปอุดรูพรุนช่องว่างภายในคอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย อีกทั้งคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยเนื่องจากผลผลิตพันธะที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกิกไปยึดจับคลอไรด์ไว้ นอกจากนี้หากใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น จาก 0.38 เป็น 0.53 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงส่งผลต่ออายุการใช้งานของคอนกรีตที่สั้นลง

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาความสามารถความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยโดยมีการทดสอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ ทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetration test), ทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test), ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิว (Bulk and surface electrical resistivity test), ทดสอบปริมาณความพรุนของคอนกรีต (Porosity test) และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength test)

3.1 วัสดุและส่วนผสมของคอนกรีต

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type I normal Portland cement หรือ standard Portland cement) ตามมาตรฐาน มอก.15 (2547) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-1 ซึ่งจัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป และรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

- 2) มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หินที่นำมาทดสอบมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ขนาดอนุภาคใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว (หิน $\frac{3}{4}$ ") มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.50 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 มวลรวมหยาบ

- 3) มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ทราบที่นำมาทดสอบมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.00 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 มวลรวมละเอียด

- 4) เถ้าลอย (Fly ash) จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน โดยในการทดสอบนี้จะใช้ เถ้าลอยหอสานุนภาคใหญ่ (HSL), เถ้าลอยหอสานุนภาคเล็ก (HSS), เถ้าลอยจากแม่เมาะ (MM) และเถ้าลอยจากระยอง (BLCP) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-4 ซึ่งลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-5 โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ



ก.เถ้าลอยหอสานุนภาคใหญ่ (HSL)



ข.เถ้าลอยหอสานุนภาคเล็ก (HSS)

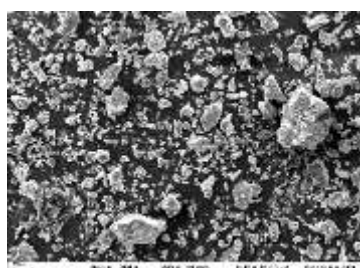


ค.เถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

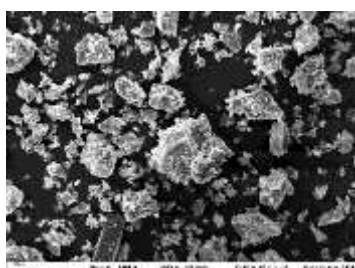


ง.เถ้าลอยระยอง (BLCP)

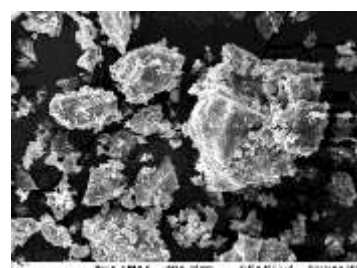
ภาพที่ 3-4 ชนิดของเถ้าลอย



X250

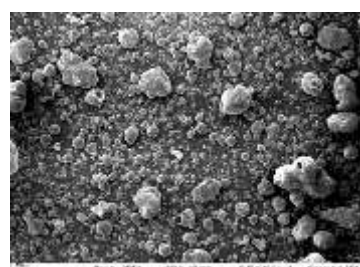


X500

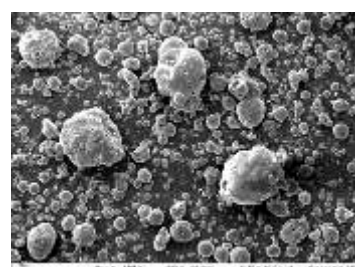


X1000

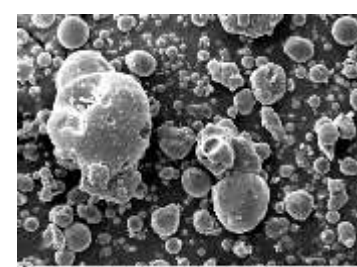
ก. ภาพขยายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



X250

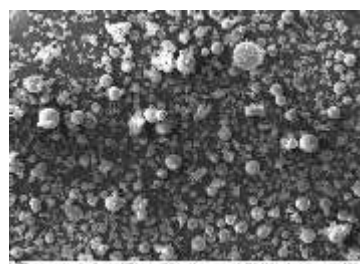


X500

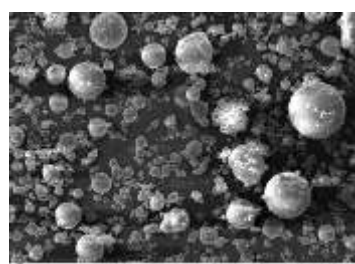


X1000

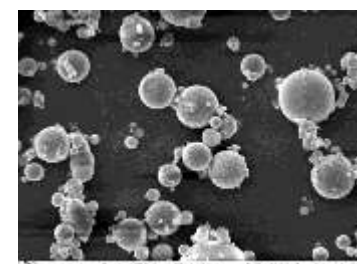
ข. ภาพขยายเม็ดลอยหรงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



X250

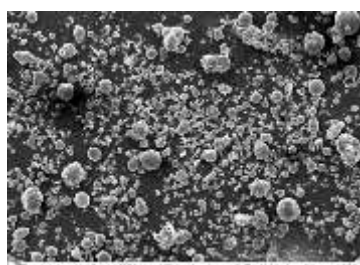


X500

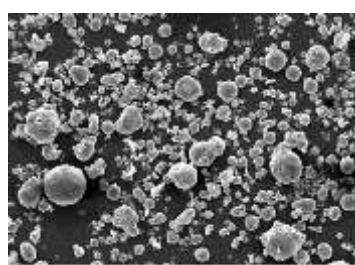


X1000

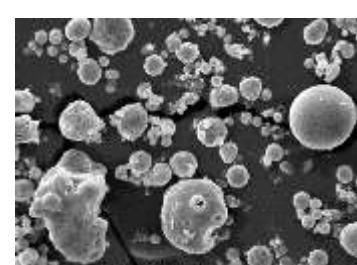
ค. ภาพขยายเม็ดลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS)



X250



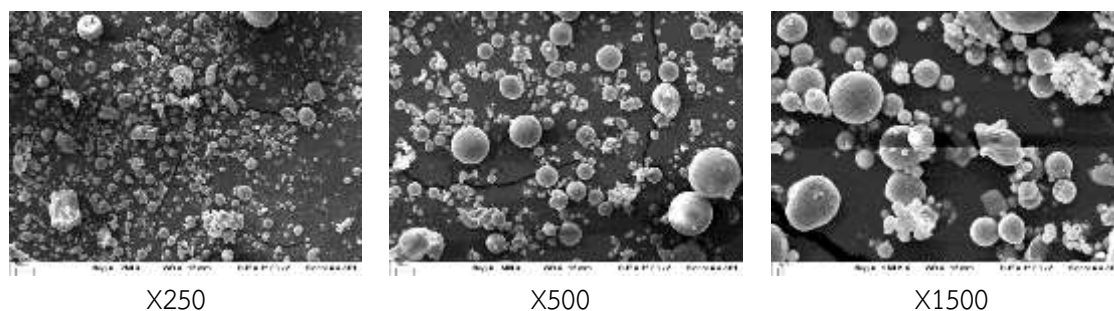
X500



X1500

ง.ภาพขยายเม็ดลอยแม่เมาะ (MM)

ภาพที่ 3-5 ภาพขยายของวัสดุประสาน



จ. ภาพขยายเถ้าลอยระยอง (BLCP)
ภาพที่ 3-5 ภาพขยายของวัสดุประสาน (ต่อ)

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ความละเอียด (ตารางเซนติเมตร/กรัม)
ปูนซีเมนต์	3.14	3,200
เถ้าลอยหรงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)	1.67	3,293
เถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS)	1.91	3,522
เถ้าลอยแม่เมาะ (MM)	2.49	3,157
เถ้าลอยระยอง (BLCP)	2.18	3,463

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical compositions (%)	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยหรงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)	เถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS)	เถ้าลอยแม่เมาะ (MM)	เถ้าลอยระยอง (BLCP)
SiO ₂	19.51	48.70	48.68	34.50	64.45
Al ₂ O ₃	4.97	30.40	30.44	17.91	20.58
Fe ₂ O ₃	3.78	6.11	5.97	13.73	3.76
CaO	65.38	6.05	5.85	20.76	2.55
MgO	1.08	2.50	2.59	3.00	0.97
SO ₃	2.16	0.31	0.44	3.80	0.18
LOI	2.27	0.93	0.89	1.26	4.01
Na ₂ O	0.01	0.43	0.43	1.78	0.43
K ₂ O	0.44	3.33	3.44	2.13	1.51
TiO ₂	-	0.57	0.57	0.44	1.04
P ₂ O ₅	-	0.09	0.10	0.26	0.16

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน (ต่อ)

Chemical compositions (%)	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยหยาบ อนุภาคใหญ่ (HSL)	เถ้าลอยหยาบ อนุภาคเล็ก (HSS)	เถ้าลอยแม่ เมาะ (MM)	เถ้าลอย ระยอง (BLCP)
SrO	-	0.02	0.02	0.10	0.05
Cr ₂ O ₃	-	0.03	0.03	<0.01	<0.01
ZnO	-	0.02	0.03	0.02	0.02
BaO	-	0.21	0.22	0.14	<0.01
ZrO ₂	-	0.02	0.02	0.01	0.06
MnO	-	0.04	0.02	0.10	0.03

เถ้าลอยหยาบอนุภาคเล็ก (HSS), เถ้าลอยหยาบอนุภาคใหญ่ (HSL) และเถ้าลอยระยอง มีองค์ประกอบเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 เป็น Class F หรือ ชั้นคุณภาพที่ 2 ชนิด ก ตามมาตรฐาน มอก 2135-2545 สำหรับเถ้าลอยแม่เมาะ มีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 เป็น Class C หรือ ชั้นคุณภาพที่ 2 ชนิด ข ตามมาตรฐาน มอก 2135-2545

3.1.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาใช้ในการทดสอบถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 9 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3-3 โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-6 จำนวน 36 ก้อน สำหรับการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง แบบแพร่ทั้งหมด ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิว และปริมาณความพรุนของคอนกรีต และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร³ ดังแสดงไว้ในรูป ที่ 3-6 สำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จำนวน 27 ก้อน โดยผสมตัวอย่างตามส่วนผสมคอนกรีต ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3



ก.ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ข.ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์

ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ตารางที่ 3-3 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix. id.	Mix proportion of concrete (kg/m ³)				
	Cement	Fly ash	Sand (SSD)	Rock (SSD)	Water
C100	435	-	776	1,030	169
C70MM30	294	126	776	1,030	163
C50MM50	205	205	776	1,030	159
C70HSL30	272	117	776	1,030	150
C50HSL50	182	182	776	1,030	140
C70HSS30	280	120	776	1,030	155
C50HSS50	190	190	776	1,030	147
C70BLCP30	287	123	776	1,030	159
C50BLCP50	198	198	776	1,030	153

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ความต้านทานคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ASTM C1202

3.2.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร
- 2) เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

- 3) ชุดเซลล์ทดสอบและอุปกรณ์สำหรับยึดจับตัวเซลล์ทดสอบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 ชุดเซลล์ทดสอบและอุปกรณ์สำหรับยึดจับตัวเซลล์ทดสอบ

- 4) เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 เครื่องตัดคอนกรีต

- 5) ปีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิเมตร
 6) แท่งกวนสาร
 7) ช้อนตักสาร
 8) เครื่องชั่งน้ำหนักมีความละเอียด 0.01 กรัม ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 เครื่องชั่งน้ำหนักมีความละเอียด 0.01 กรัม

- 9) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 3.0 %
- 10) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.30 M

3.2.1.2 การเตรียมตัวอย่าง

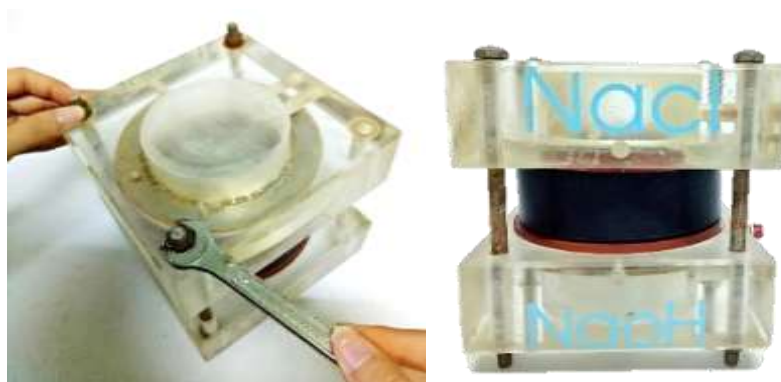
หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หลังจากนั้นรอให้คอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แล้วถอดแบบหล่อออกจากตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-11 โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน 56 วัน และ 91 วันตามลำดับ เมื่อตัวอย่างครบอายุที่กำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างมาตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตออกเป็นชิ้นขนาดความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-12 จากนั้นนำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-11 การบ่มตัวอย่างในบ่อบ่ม



ภาพที่ 3-12 การตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นขนาดความหนา 5 เซนติเมตร เพื่อทำไปทดสอบ RCPT



ภาพที่ 3-13 การประกอบเซลล์ทดสอบเข้ากับตัวอย่าง

3.2.1.3 การเตรียมสารละลาย

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยชั่งสารโซเดียมคลอไรด์ 30 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร แล้วใช้แท่งแก้วกวนให้โซเดียมคลอไรด์ละลายในน้ำจนหมด
- 2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.30 M โดยชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปจนมีปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร แล้วใช้แท่งแก้วกวนให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำจนหมด

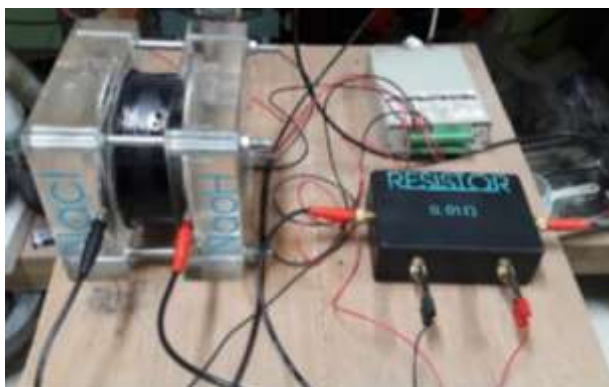
3.2.1.4 วิธีการทดสอบ

- 1) เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% ในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วลบและเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ในช่องเซลล์ทดสอบขั้วบวก ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบ

- 2) ต่อสายไฟจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ โดยต่อสายไฟขั้วบวกเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วบวก และสายไฟขั้วลบเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วลบ ดังแสดงในภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 ตำแหน่งการต่อสายไฟ

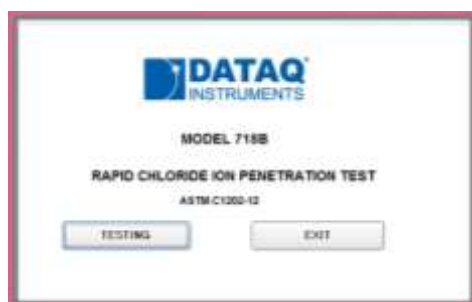
- 3) เปิดสวิตช์เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ON (ควรเปิดเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าก่อนทำการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที) จากนั้นปรับค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 60 โวลต์ ต่อสายสัญญาณ RS-232 จากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ Serial port ของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อถ่ายโอนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-16
- 4) เรียกใช้งานโปรแกรมการทดสอบ RAPID CHLORIDE-Shortcut ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-17 ซึ่งหลักจากเรียกโปรแกรมใช้งานแล้ว จะขึ้นหน้าต่างดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-18 จากนั้นเลือกคำสั่ง TESTING จะเข้าสู่การใช้งานโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 3-19 กดปุ่ม START เพื่อเริ่มการทดสอบ และรอจนโปรแกรมทดสอบครบ 360 นาที กด SAVE เลือกไฟล์เดอร์ที่ต้องการบันทึก โดยค่าที่ได้จะแสดงผลเป็นค่า Charge passed ในหน่วยคูลอมป์ ซึ่ง Charge passed จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ซึ่งเกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-4 จากนั้นปิดเครื่องและทำความสะอาดเซลล์ทดสอบ



ภาพที่ 3-16 ตำแหน่งการต่อสายไฟเพื่อโอนถ่ายข้อมูลการทดสอบ



ภาพที่ 3-17 โปรแกรม RAPID CHLORIDE-S shortcut



ภาพที่ 3-18 หน้าต่างโปรแกรม RAPID CHLORIDE-S shortcut ก่อนการเข้าสู่โปรแกรมการใช้งาน



ภาพที่ 3-19 หน้าต่างโปรแกรม RAPID CHLORIDE-S shortcut สำหรับเริ่มทดสอบ

ตารางที่ 3-4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

Charge Passed (Coulombs)	Chloride ion permeability classification
>4,000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very low
<100	Negligible

3.2.2 ความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ASTM C1556

3.2.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 g
- 2) เครื่องตัดคอนกรีต
- 3) ครกหินบดตัวอย่างการทดสอบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 ครกหินบดตัวอย่างการทดสอบ

- 4) ปีกเกอร์ ขนาด 250 ml
- 5) กระบอกลดขนาด 50 ml
- 6) ชุดเครื่องกรองตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 ชุดเครื่องกรองตัวอย่าง

- 7) เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP Titrino Metrohm ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-22 เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP Titrino Metrohm

- 8) เตาไฟฟ้า แสดงไว้ในภาพที่ 3-23



ภาพที่ 3-23 เตาไฟฟ้า

- 9) ตะแกรงร่อนเบอร์ 20
 10) ถังพลาสติกสำหรับบรรจุชิ้นตัวอย่างและผงตัวอย่างทดสอบ
 11) กรดไนตริก (Nitric Acid) ดังแสดงในภาพที่ 3-24
 12) สารละลายมาตรฐาน 0.05 N โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) ดังแสดงในภาพที่ 3-24
 13) สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ดังแสดงในภาพที่ 3-24
 14) กรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-24



ก.กรดไนตริก



ข.สารละลายมาตรฐาน 0.05 N โซเดียมคลอไรด์



ค.สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท



ง.กรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ภาพที่ 3-24 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

3.2.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตรหลังจากนั้นรอให้คอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แล้วถอดแบบหล่อออกจากตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 28 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเคลือบด้วยอีพ็อกซีสีลงบนด้านล่างและด้านข้างของตัวอย่าง โดยยกเว้นผิวด้านบนของตัวอย่างไว้ ดังแสดงในภาพที่ 3-25 เพื่อให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตในทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.0% ดังแสดงในภาพที่ 3-26 เป็นระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน นำมาหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระต่อไป



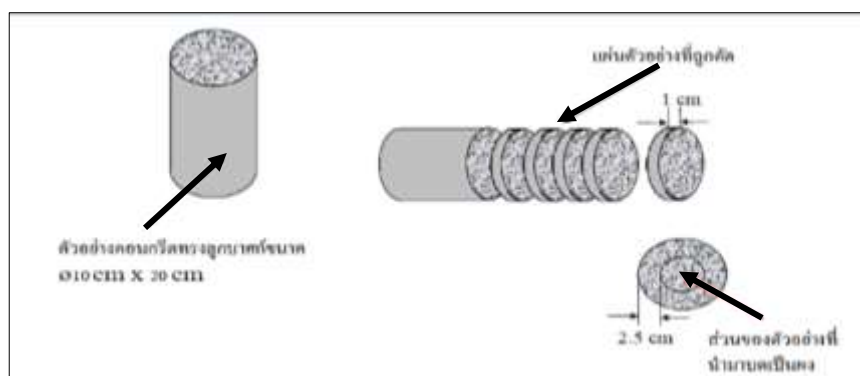
ภาพที่ 3-25 ทาอีพ็อกซีสีลงบนด้านล่างและด้านข้างของตัวอย่าง



ภาพที่ 3-26 แซ่ตัวอย่างในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.0%

3.2.2.3 วิธีการทดสอบ

- 1) เมื่อครบอายุ ให้นำคอนกรีตขึ้นจากสารละลายเกลือคลอไรด์และทิ้งให้แห้งในอากาศ (ประมาณ 24 ชม.) จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตที่แห้งในอากาศ มาตัดให้มีความหนา 1 เซนติเมตร ตลอดช่วงความยาวของตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-27 แล้วนำตัวอย่างที่ตัดแล้วมาบดละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 3-28 และนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และนำผงตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป



ภาพที่ 3-27 การตัดตัวอย่างและนำมาบดเป็นผง



ภาพที่ 3-28 การบดตัวอย่างให้เป็นผง

2) นํามาหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) วิธีการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C1152 ดังนี้

- ก. นำผงตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ปริมาณประมาณ 5.00 กรัม โดยชั่งความละเอียดถึง 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml.
- ข. เติมนํ้ากลั่นลงไปในบีกเกอร์ที่มีผงตัวอย่าง จนถึงขีดระดับ 100 ml ของบีกเกอร์ แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่ทำให้เจือจางในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml ทันที ดังแสดงในภาพที่ 3-29



ภาพที่ 3-29 เติมนํ้ากลั่นและกรดไนตริก 25 ml. ลงในบีกเกอร์

- ค. ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่มีตัวอย่างด้วยการต้มให้เดือด ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-30 อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเตาไฟฟ้า (Hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น



ภาพที่ 3-30 การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่ใส่สารละลายไนตริกแล้ว

- ง. ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยนํ้ากลั่นจำนวนเล็กน้อย ทำการถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-31 และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยนํ้ากลั่น ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิปกติ โดยปริมาตรของสารละลายที่ผ่านการกรองต้องไม่เกิน 175 ml



ภาพที่ 3-31 กรองสารละลายที่ผ่านการต้มให้ใสโดยใช้เครื่องดูด

- จ. สำหรับตัวอย่างที่เย็นแล้ว นำปีกเกอร์ไปวางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ 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) ลงในแก้วตัวอย่างสารละลายเครื่อง Auto titration จะทำการไทเทรตให้โดยอัตโนมัติ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-32 โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา



ภาพที่ 3-32 การไทเทรตตัวอย่าง

- ฉ. จัดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

- 3) นํามาหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 ดังนี้
- ก. นำตัวอย่างซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5.00 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml และใส่น้ำลงไป 50 ml
 - ข. นำไปต้มให้เดือด 5 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-33



ภาพที่ 3-33 ทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องหลังจากต้มตัวอย่าง

- ค. ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ทำการถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น โดยที่ปริมาตรของสารละลายที่กรองแล้วต้องไม่เกิน 175 ml
- ง. เติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจาง ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-34 ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)



ภาพที่ 3-34 ใส่สารละลายไนตริกและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์

- จ. สำหรับตัวอย่างที่เย็นแล้ว นำปิ๊งเกอร์ไปวางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ 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) ลงในสารละลาย
- ฉ. เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-35 โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)



ภาพที่ 3-35 ไตเตรทตัวอย่างและจดบันทึกค่า

3.2.3 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ASTM C1760

3.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-36



ภาพที่ 3-36 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด

3.2.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หลังจากนั้นรอให้คอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แล้วถอดแบบหล่อออกจากตัวอย่าง จากนั้น นำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปา ตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน ตามลำดับ เมื่อตัวอย่างครบอายุที่กำหนด นำตัวอย่างคอนกรีตที่ขึ้นจากบ่มน้ำแช่ผิวให้แห้ง และทดสอบความต้านทานไฟฟ้าภายในระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้ทุกตัวอย่างมีความชื้นที่ใกล้เคียงกัน

3.2.3.3 วิธีการทดสอบ

- 1) ใช้เครื่องมือการวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต โดยเริ่มจากวัดต้านทานไฟฟ้าของโพลีคาร์บอน จากนั้นบันทึกค่า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-37



ภาพที่ 3-37 การวัดความต้านไฟฟ้าที่โพลีคาร์บอนของคอนกรีต

- 2) ใช้เครื่องมือการวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต โดยวัดความต้านทานไฟฟ้าของ โฟมด้านล่าง จากนั้นบันทึกค่า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-38



ภาพที่ 3-38 การวัดความต้านไฟฟ้าที่โฟมด้านล่างของคอนกรีต

- 3) ใช้เครื่องมือการวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต โดยวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต โดยประกบโฟมที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างคอนกรีตต่อวงจรวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-39 บันทึกหน้าตัด ความสูง และความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ จากนั้นนำไปปรับแก้คำนวณหาความต้านทานไฟฟ้า หน่วยกิโลโอห์มเซนติเมตร ($k\Omega cm$)



ภาพที่ 3-39 การวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

3.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน AASHTO TP-95

3.2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-40



ภาพที่ 3-40 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

3.2.4.2 การเตรียมตัวอย่าง

- 1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หลังจากนั้นรอให้คอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แล้วถอดแบบหล่อออกจากตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน และ 91 วันตามลำดับ เมื่อตัวอย่างครบอายุที่กำหนด นำตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่มน้ำแช่ผิวให้แห้ง และทดสอบความต้านทานไฟฟ้าภายในระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้ทุกตัวอย่างมีความชื้นใกล้เคียงกัน
- 2) ทำเครื่องหมายที่มุม 0, 90, 180, 270 องศา บนตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-41



ภาพที่ 3-41 การทำเครื่องหมายบนตัวอย่างทดสอบ

3.2.4.3 วิธีการทดสอบ

- 1) ใช้เครื่องมือการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต โดยวัดต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ทั้ง 4 มุมที่ทำเครื่องหมายไว้ บันทึกค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-42 และนำมาเฉลี่ย หน่วยกิโลโห์มเซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการซึมผ่านและความต้านทานที่ผิวของคอนกรีตซึ่งเกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-5



ภาพที่ 3-42 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

ตารางที่ 3-5 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์จากการทดสอบการต้านทานไฟฟ้าที่ผิวตามมาตรฐาน AASHTO TP95

Surface resistivity (kΩcm)	Chloride ion permeability classification
<12	High
12-21	Moderate
21-37	Low
37-254	Very low
>254	Negligible

3.2.5 ความพรุนของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ASTM C642

3.2.5.1 อุปกรณ์ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องตัดคอนกรีต
- 2) ตู้บที่สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 100-110 องศาเซลเซียส ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-43



ภาพที่ 3-43 ตู้บตัวอย่าง

- 3) หม้อที่ขนาดบรรจุตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-44



ภาพที่ 3-44 หม้อที่บรรจุตัวอย่าง

- 4) ชุดให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-45



ภาพที่ 3-45 ชุดให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง

- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.5.2 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 160 วัน เมื่อตัวอย่างครบอายุ นำตัวอย่างคอนกรีตมาตัดมีความหนา 5 เซนติเมตร จะได้จำนวน 4 ตัวอย่าง

3.2.5.3 วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างคอนกรีตมาอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 100-110 องศาเซลเซียส ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-46 อบตัวอย่างจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ บันทึกข้อมูลแล้วนำไปคำนวณ



ภาพที่ 3-46 อบตัวอย่าง

- 2) หลังจากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำประปา จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-47 บันทึกข้อมูลแล้วนำไปคำนวณ



ภาพที่ 3-47 แช่ตัวอย่างในน้ำประปา

- 3) นำตัวอย่างมาต้มให้น้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ในอากาศ 14 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังต้มและชั่งน้ำหนักในน้ำ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-48 บันทึกข้อมูลแล้วนำไปคำนวณ



ภาพที่ 3-48 การชั่งตัวอย่างในน้ำ

3.2.6 กำลังอัดของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน BS 1881-116

3.2.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-49



ภาพที่ 3-49 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE

3.2.6.2 เตรียมตัวอย่าง

- 1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 10x10x10 เซนติเมตร โดยนำคอนกรีตสดใส่ลงในแบบหล่อทีละชั้น ให้ชั้นแรกหนาประมาณหนึ่งในสามของความสูงแบบหล่อ ทำการกระทุ้งคอนกรีตในแต่ละแบบจำนวน 35 ครั้ง ใส่คอนกรีตให้สูง สองในสามของความสูงแบบหล่อ และใส่คอนกรีตจนเต็มความสูง โดยทุกครั้งที่ใส่คอนกรีตจะทำการกระทุ้ง 35 ครั้ง แล้วปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ
- 2) หลังจากนั้นรอให้คอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แล้วถอดแบบหล่อออกจากตัวอย่างและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องจนถึงกำหนดอายุที่จะทดสอบ

3.2.6.3 วิธีการทดสอบ

- 1) เมื่อตัวอย่างคอนกรีตอายุครบกำหนด ที่ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน นำมาบันทึกพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-50 ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบในแต่ละอายุต้องมีประมาณ 3 ตัวอย่าง เพื่อเป็นการหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตโดยทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจบบันทึกกำลังอัดเฉลี่ย ดังแสดงในภาพที่ 3-51



ภาพที่ 3-50 การวัดพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต



ภาพที่ 3-51 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

บทที่ 4

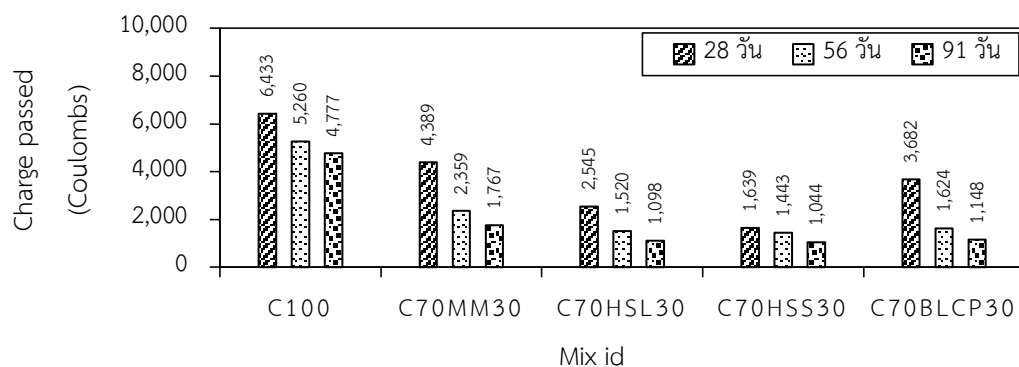
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

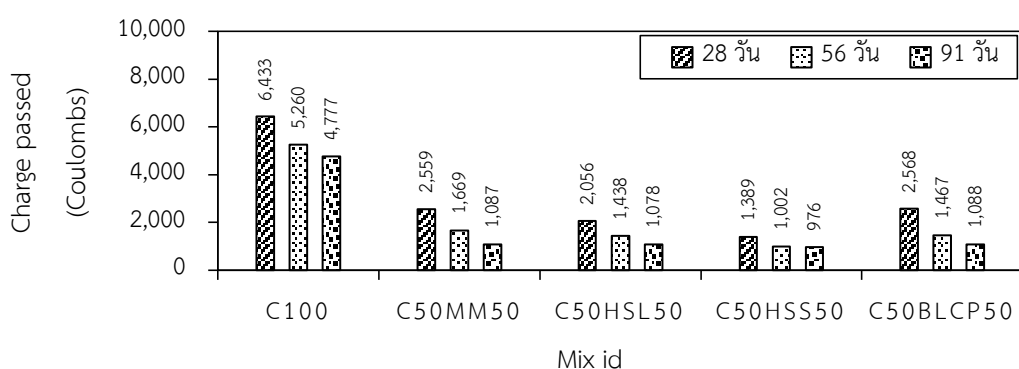
ผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test) ของคอนกรีตแสดงด้วยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต (Charge passed) ในหน่วยคูลอมป์ (Coulombs) ซึ่งหากค่าปริมาณของประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าที่ต่ำแสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี เนื่องจากออสโมซิสของคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้ยาก

4.1.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยต่างชนิดกันดังแสดงในภาพที่ 4-1 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยในทุกช่วงอายุ โดยปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยหอสานุนภาคเล็กมีค่าต่ำที่สุด ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยหอสานุนภาคเล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเล็กจึงไปอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต อีกทั้งการที่เถ้าลอยหอสานุนภาคเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ช่วยให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น เกิดขึ้นมากตามไปด้วย ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิดอื่นที่อายุเดียวกัน



ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

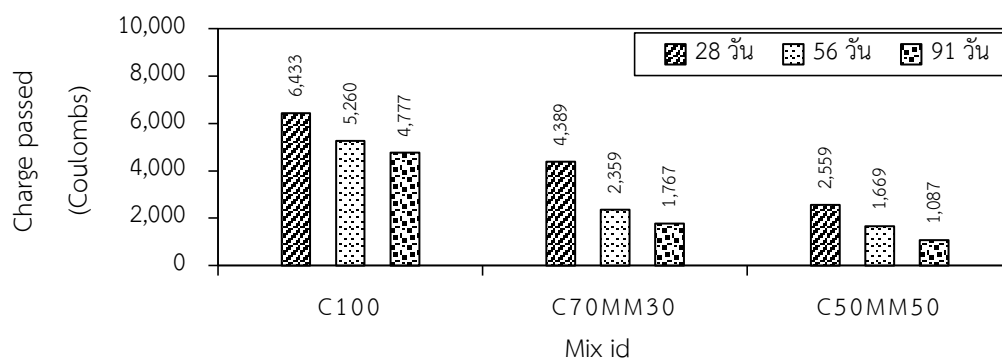


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง

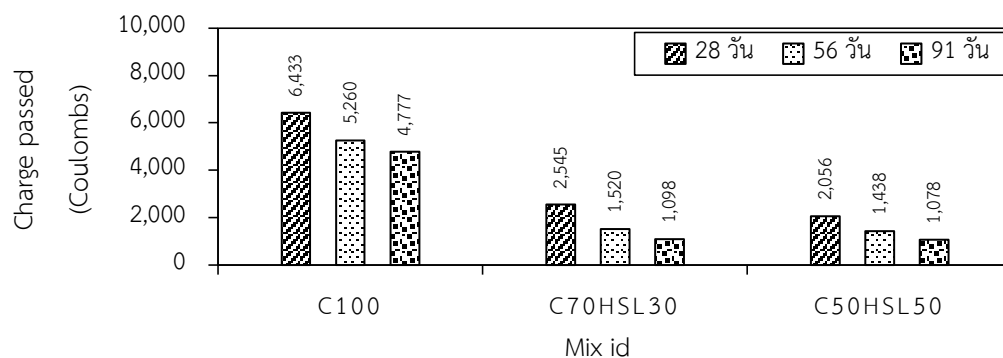
4.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทุกส่วนผสม มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น จากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตจะมีค่าต่ำลง กล่าวคือ ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น และเถ้าลอยที่อยู่ในคอนกรีตก่อให้เกิดแรงดึงดูดในโพรงทำให้โพรงช่องว่างในคอนกรีตมีขนาดเล็กลง มีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้การแพร่ของไอออนคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ถ้าส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีจะส่งผลดีต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเหล็กเสริมให้ยาวนานยิ่งขึ้น จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่มากขึ้น

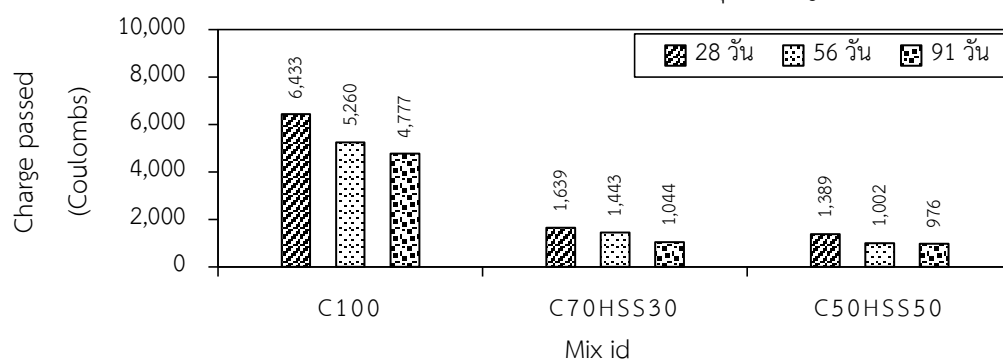


ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

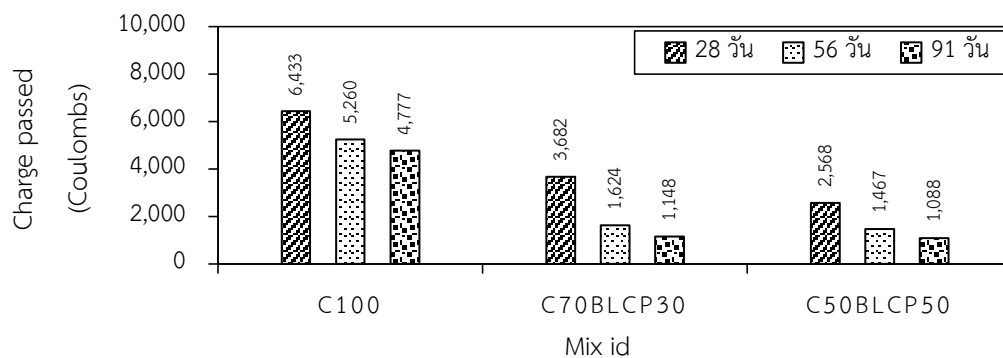
ภาพที่ 4-2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์แบบแรง



ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหยาบอนุภาคใหญ่ (HSL)



ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหยาบอนุภาคเล็ก (HSS)

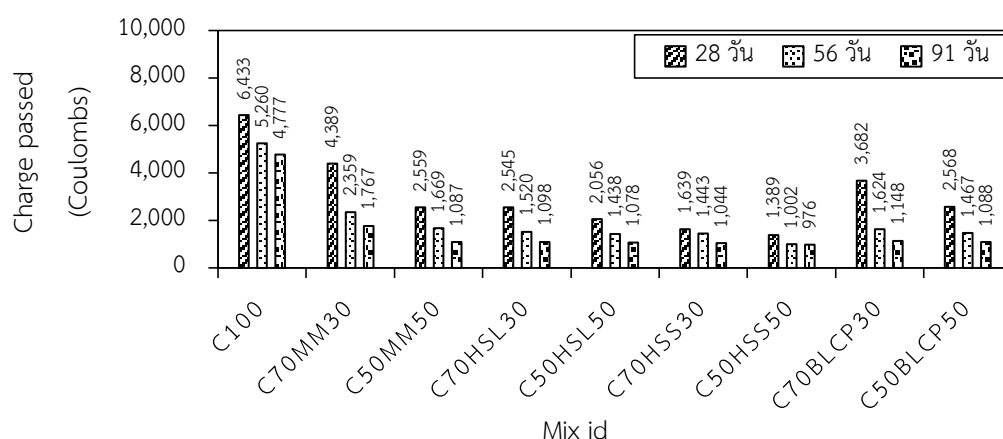


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

ภาพที่ 4-2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง (ต่อ)

4.1.3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีระยะเวลาในการบ่มน้ำแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4-3 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อมีการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่อายุนานขึ้นในทุกส่วนผสม อาทิเช่น อายุการบ่มจาก 28 วันเป็น 91 วัน คอนกรีตที่มีระยะเวลาในการบ่มที่ 91 วันจึงมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุดเนื่องจากการบ่มน้ำช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยปฏิกิริยาปอซโซลานีระหว่างเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอมูมิเนตไฮเดรต ในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตแน่น ทึบน้ำ ทำให้อ่อนของคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ยาก โดยส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีจะส่งผลดีต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

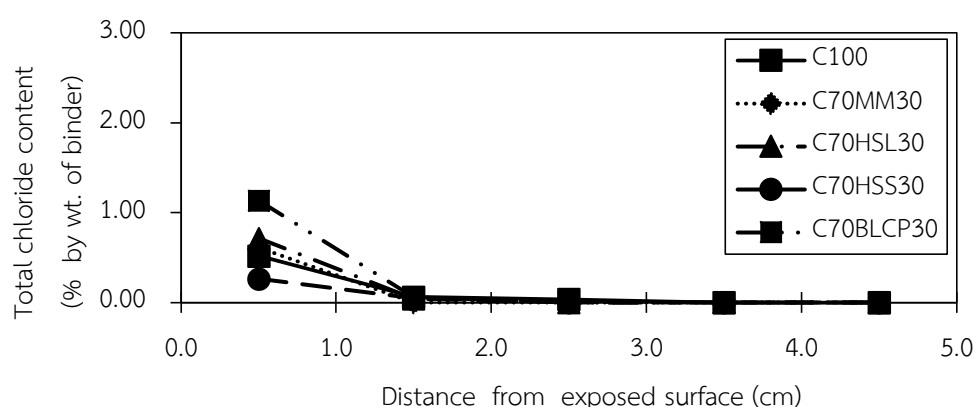


ภาพที่ 4-3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่างต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

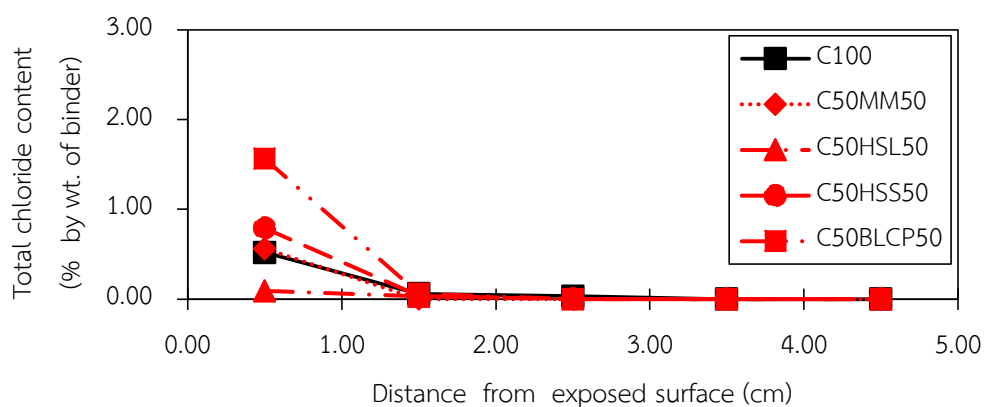
4.2 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตแบบแพร่ทั้งหมด

4.2.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยต่างชนิดกันดังแสดงในภาพที่ 4-4, 4-5 และ 4-6 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่งคอนกรีตผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็กมีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีที่สุด เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่เล็ก จึงไปอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมากขึ้น คลอไรด์ที่อยู่ภายนอกจึงซึมผ่านคอนกรีตได้น้อยลง และจากผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปูนล้วนดังแสดงในภาพที่ 4-7, 4-8 และ 4-9 เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตซึ่งมีความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ส่งผลในคลอไรด์อิสระที่จะทำอันตรายต่อเหล็กเสริมน้อยลงซึ่งเป็นผลดีต่อคอนกรีต

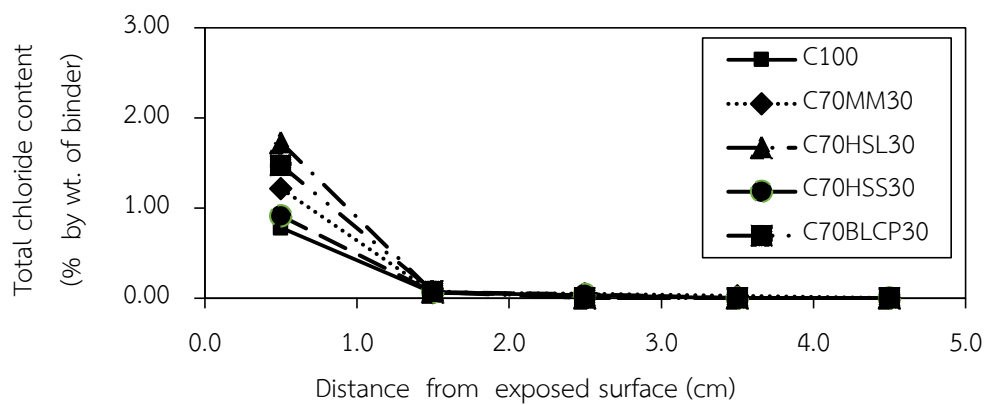


ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

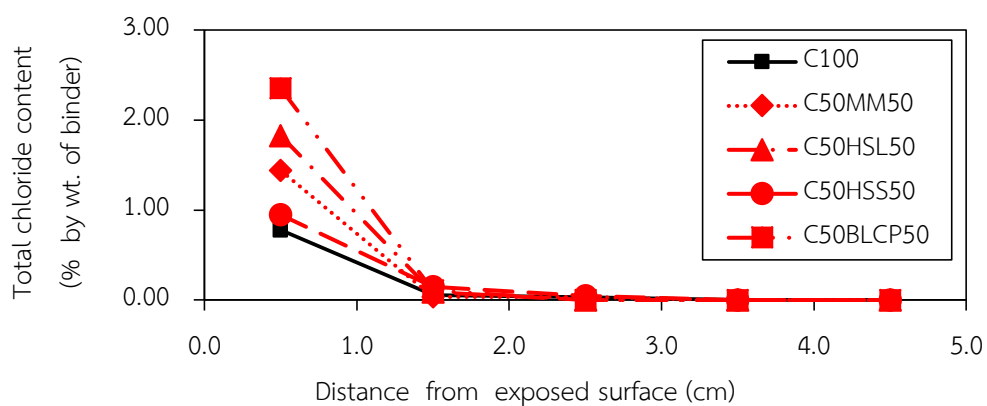


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-4 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 28 วัน

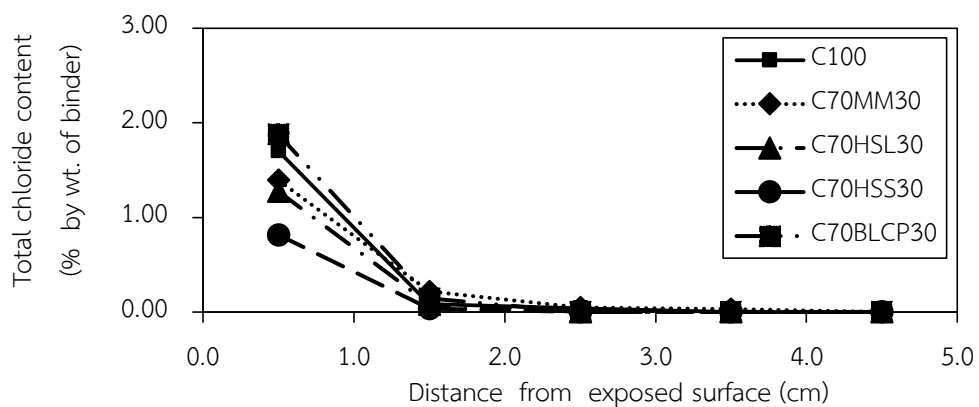


ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

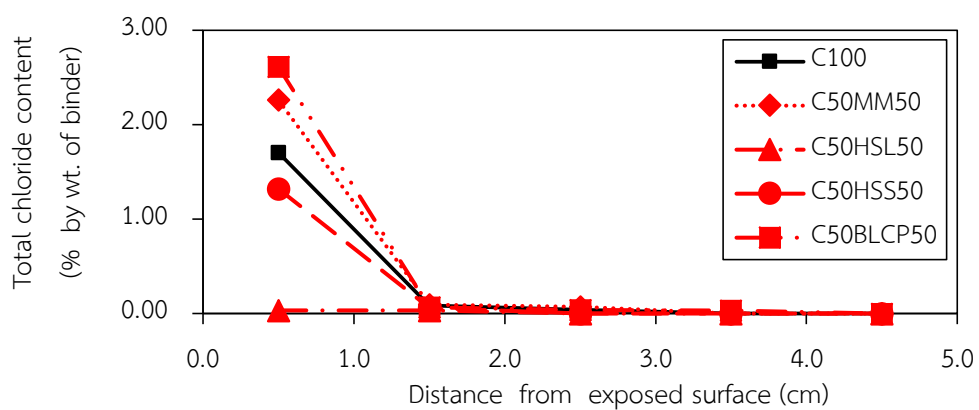


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-5 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 56 วัน

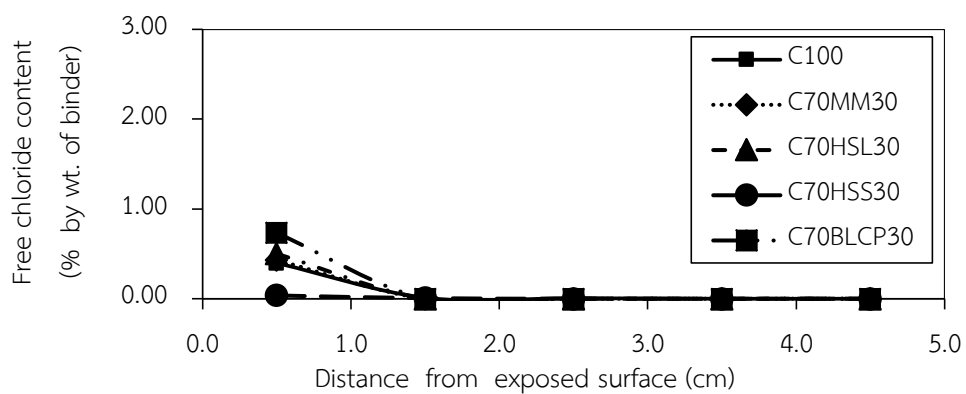


ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

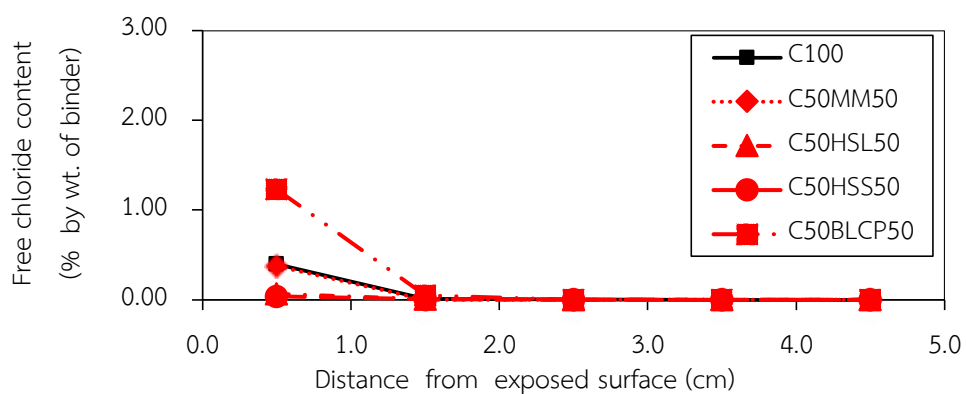


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-6 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 91 วัน

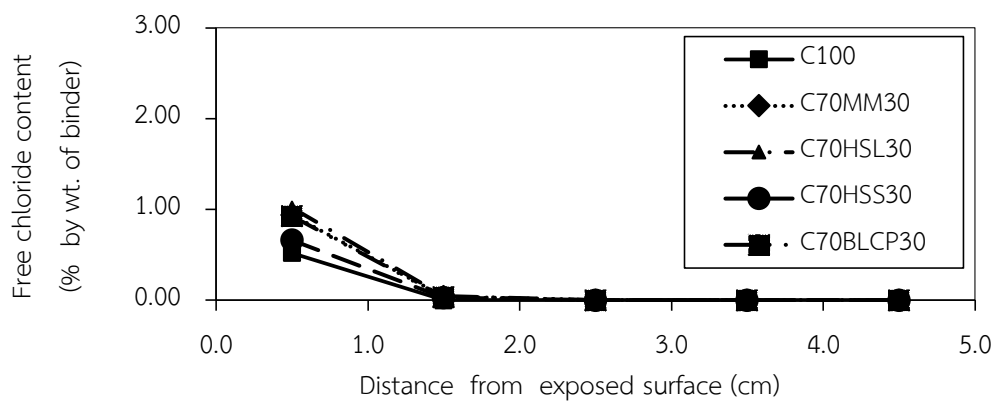


ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

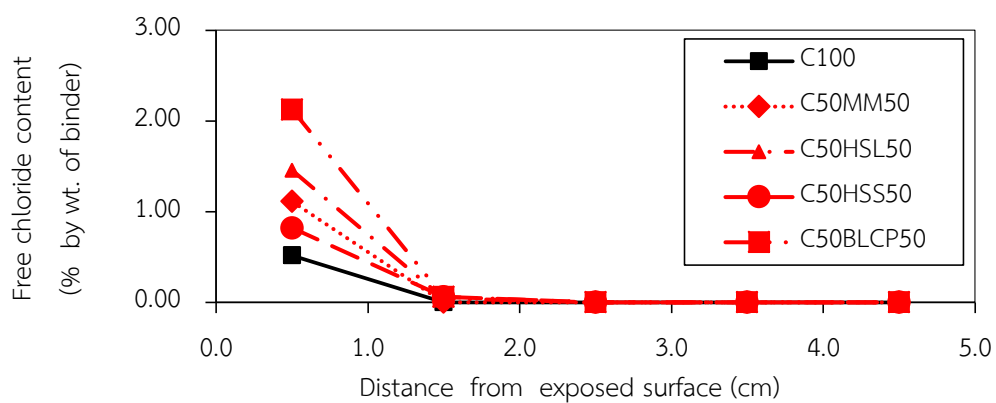


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-7 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 28 วัน

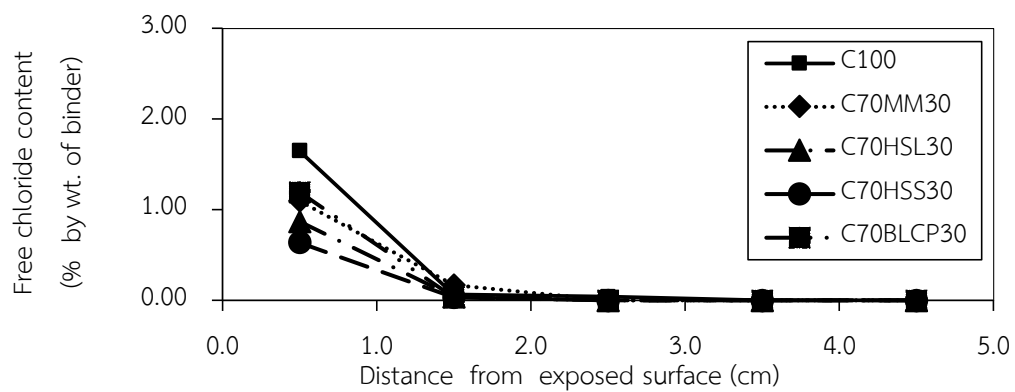


ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

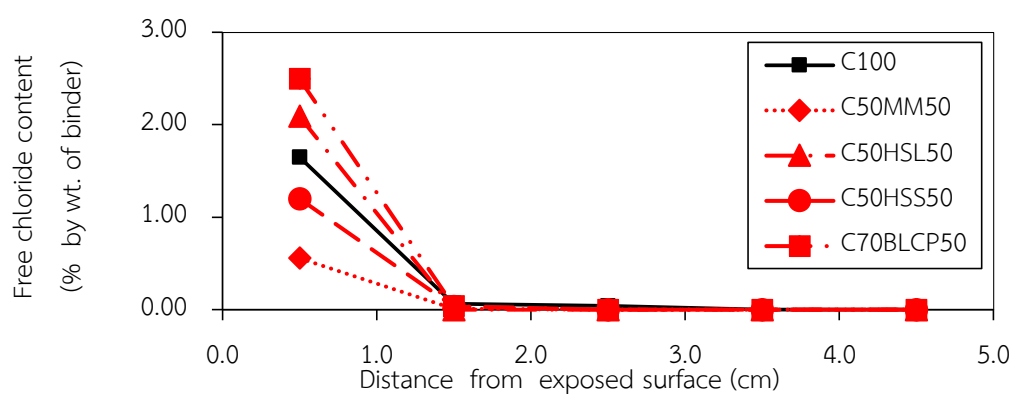


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-8 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 56 วัน



ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ30

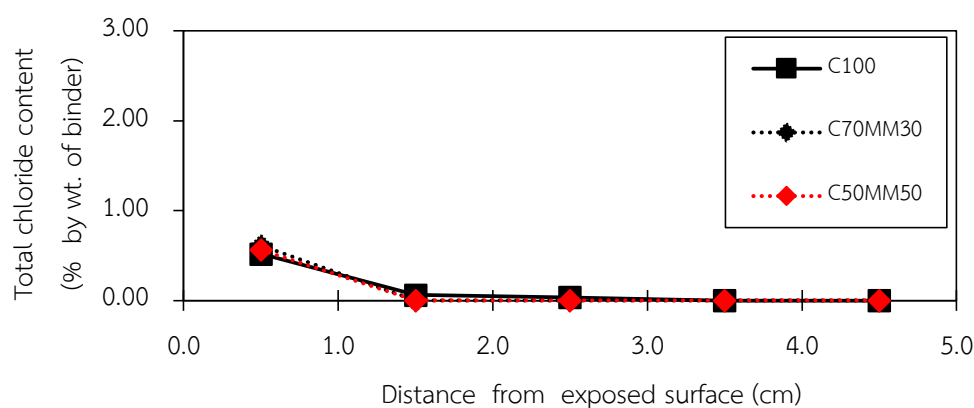


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ50

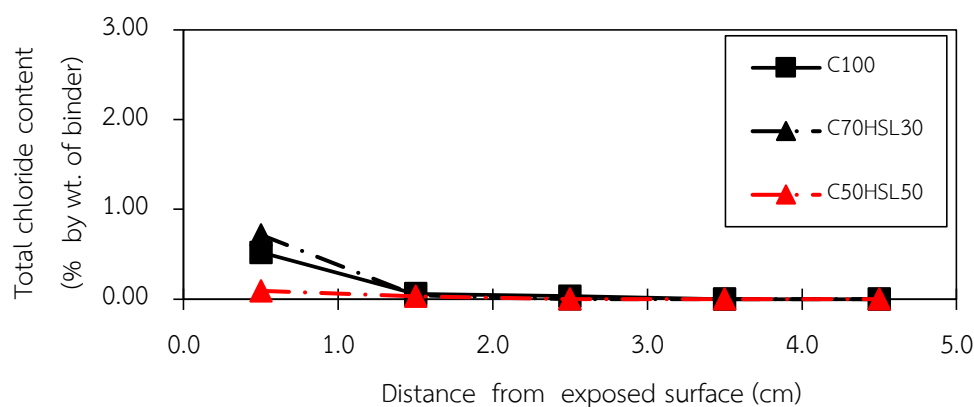
ภาพที่ 4-9 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 91 วัน

4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4-10, 4-11 และ 4-12 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวกับคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำลงในทุกส่วนผสม เนื่องจาก ปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นไปอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้มาก ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น คลอไรด์จึงแพร่เข้าเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระดังแสดงในภาพที่ 4-13, 4-14 และ 4-15 จะเห็นว่าปริมาณคลอไรด์อิสระก็ลดลงเช่นกันเนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตซึ่งมีความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ เมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากก็ปฏิกิริยาก่เกิดได้มากความสามารถในการยึดจับคลอไรด์จึงมากไปด้วย

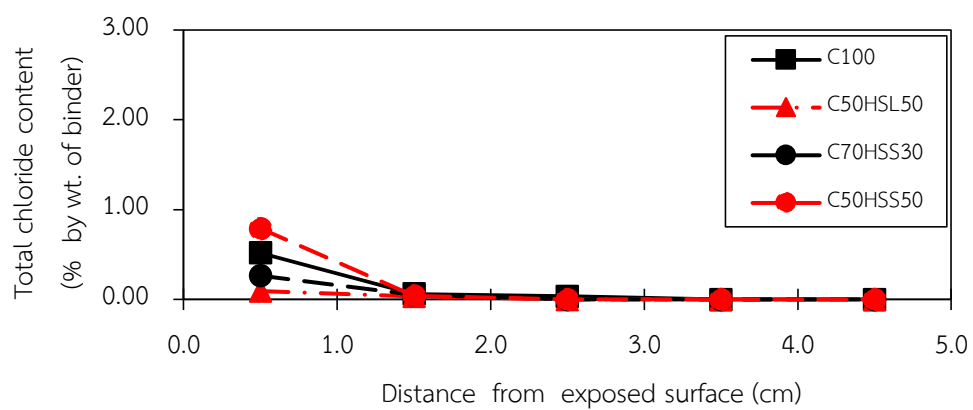


ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

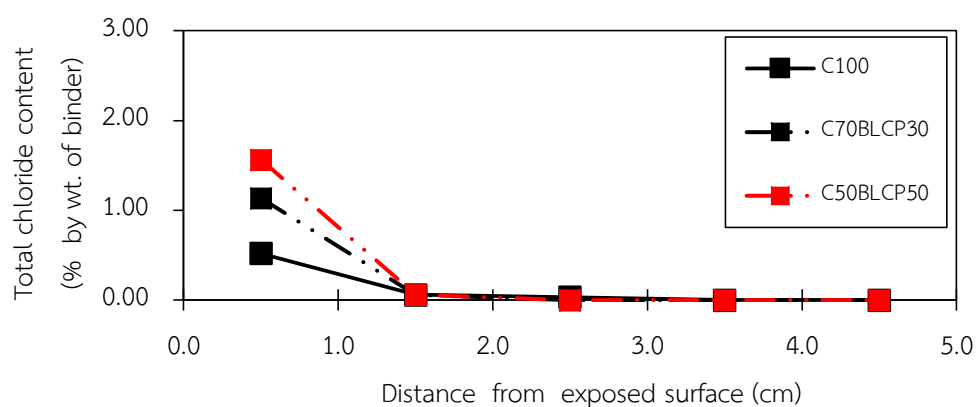


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)

ภาพที่ 4-10 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 28 วัน

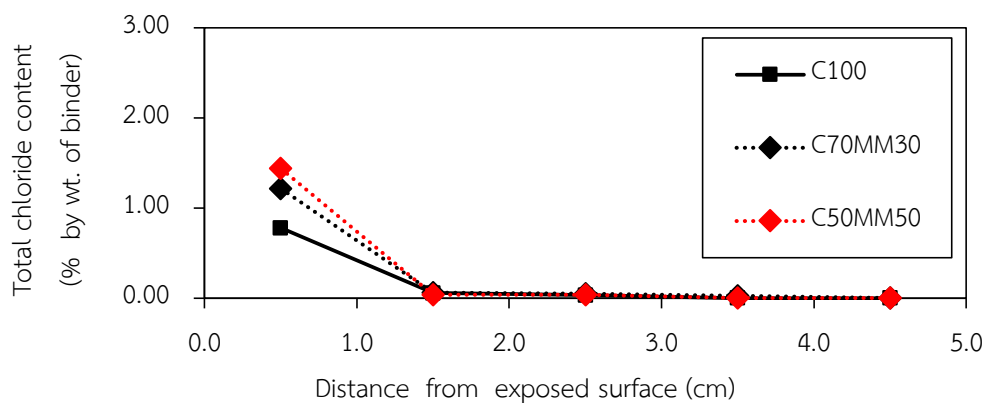


ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหึ่งสอนุภาคเล็ก (HSS)

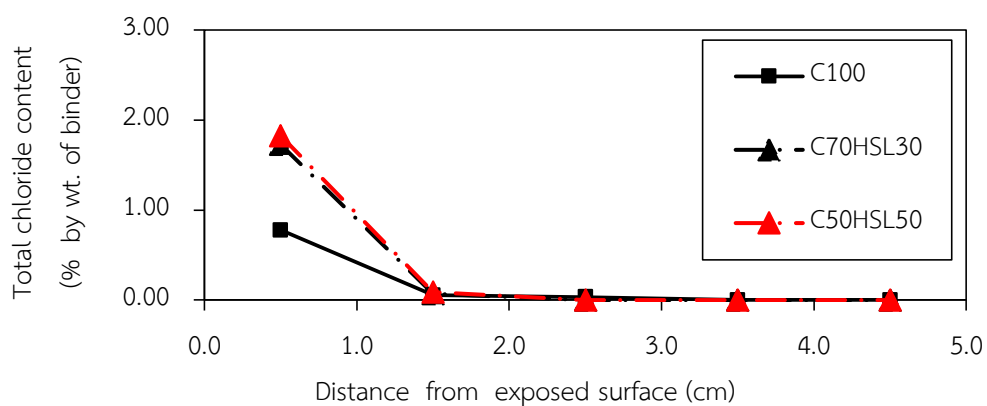


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

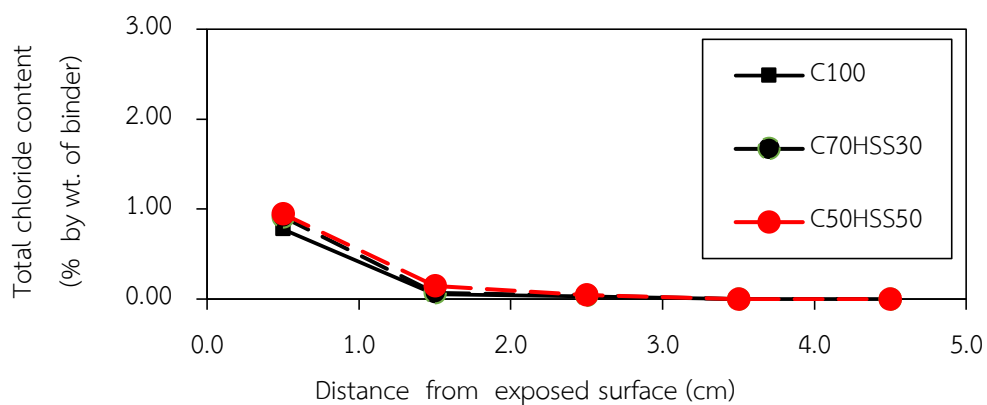
ภาพที่ 4-10 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 28 วัน (ต่อ)



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

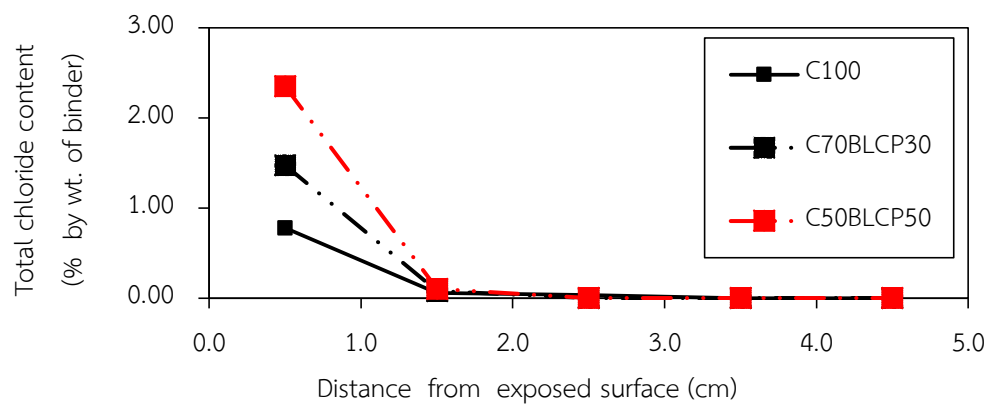


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหังสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



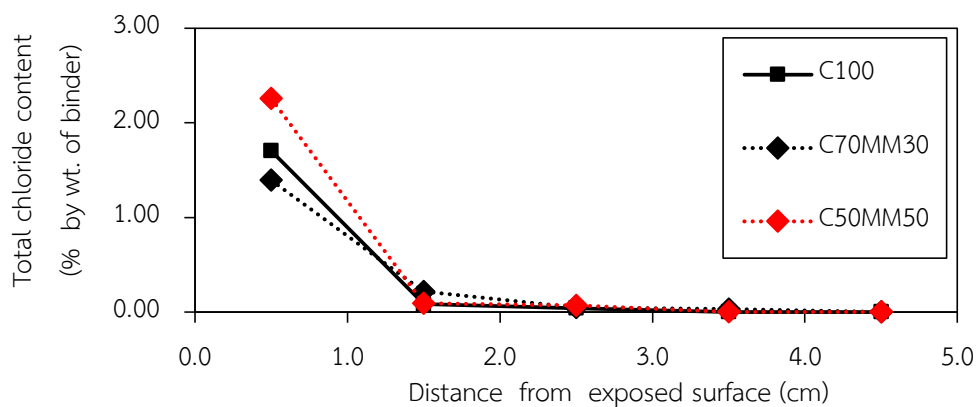
ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหังสาอนุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-11 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 56 วัน

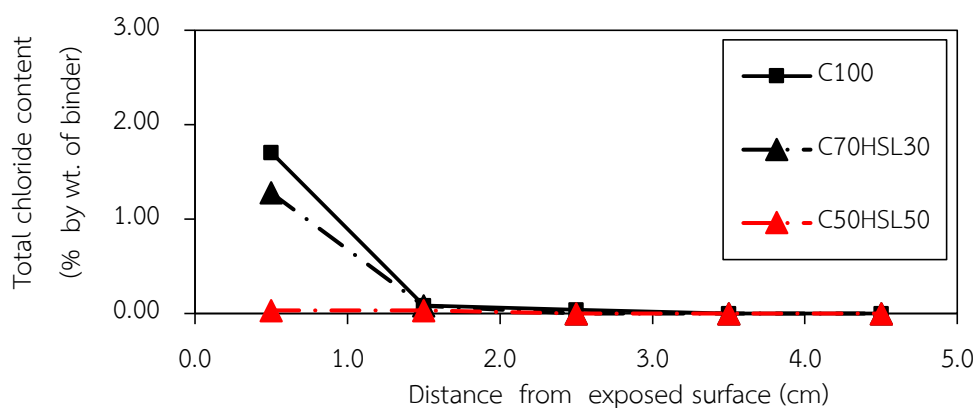


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

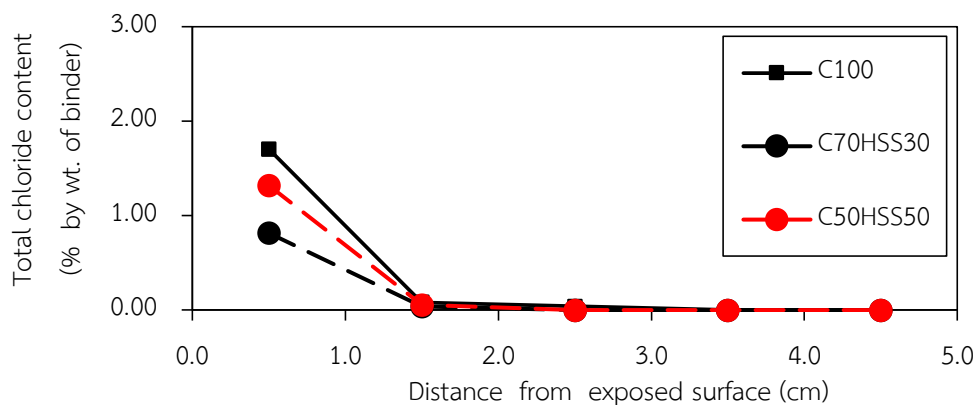
ภาพที่ 4-11 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 56 วัน (ต่อ)



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

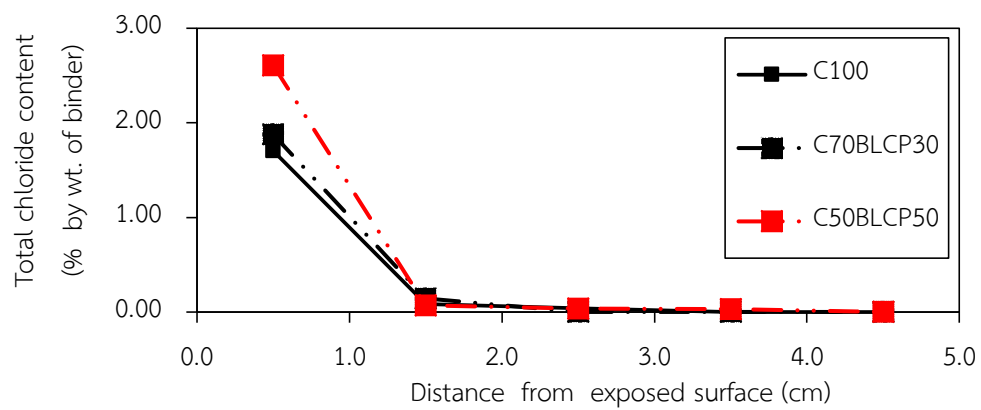


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหองสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



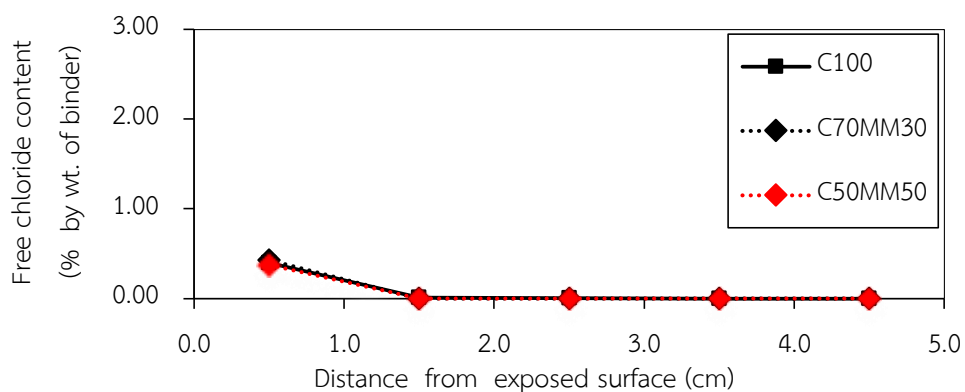
ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหองสาอนุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-12 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 91 วัน

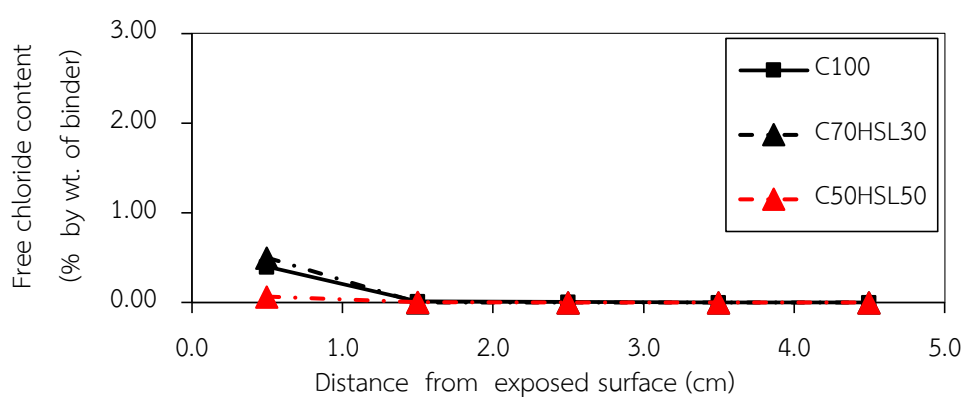


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

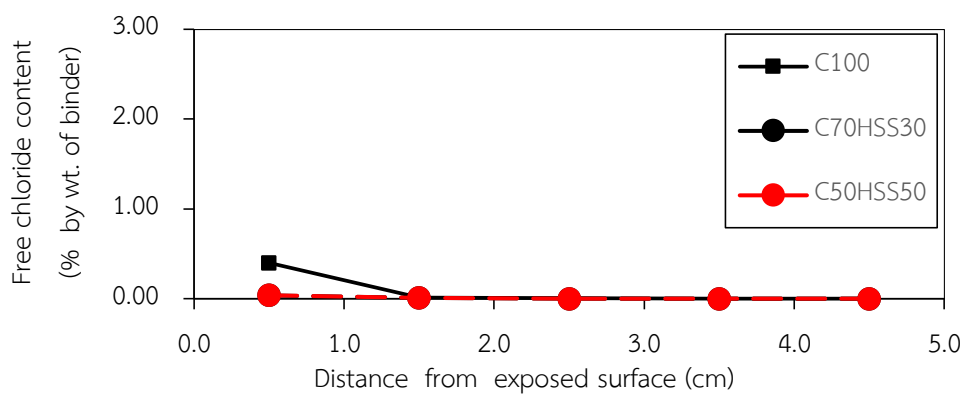
ภาพที่ 4-12 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 91 วัน (ต่อ)



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

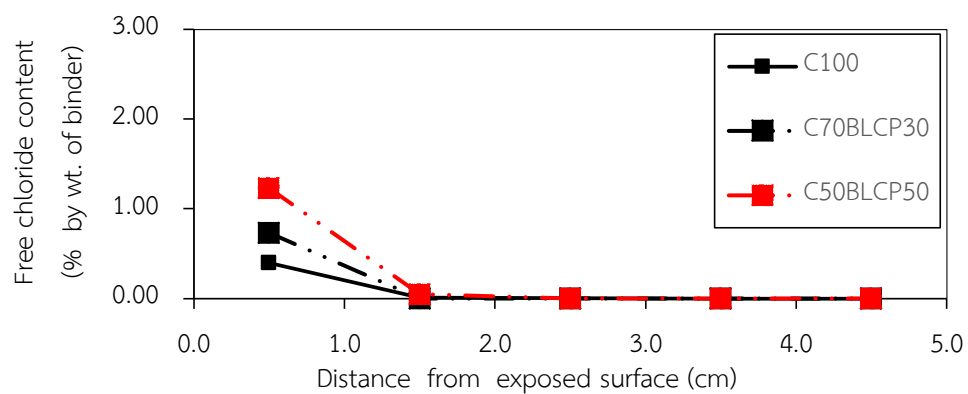


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



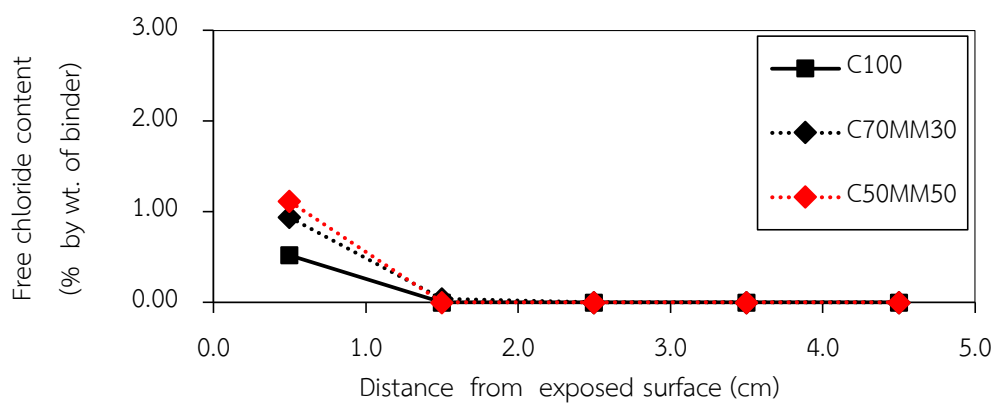
ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-13 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 28 วัน

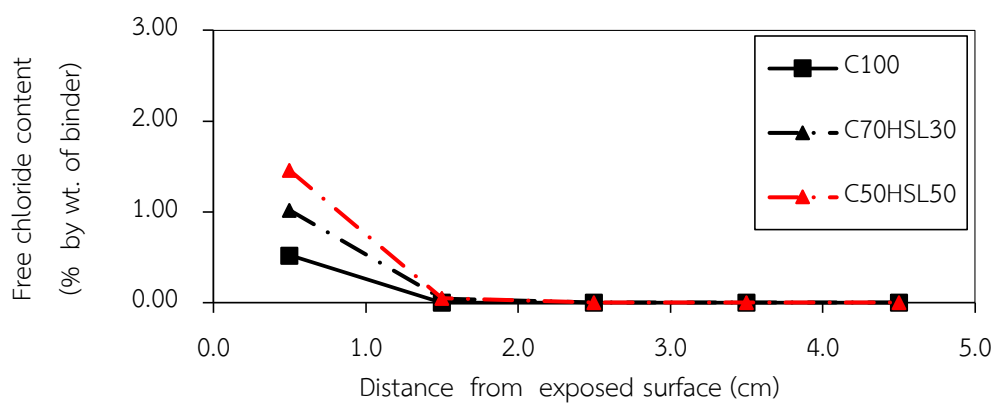


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

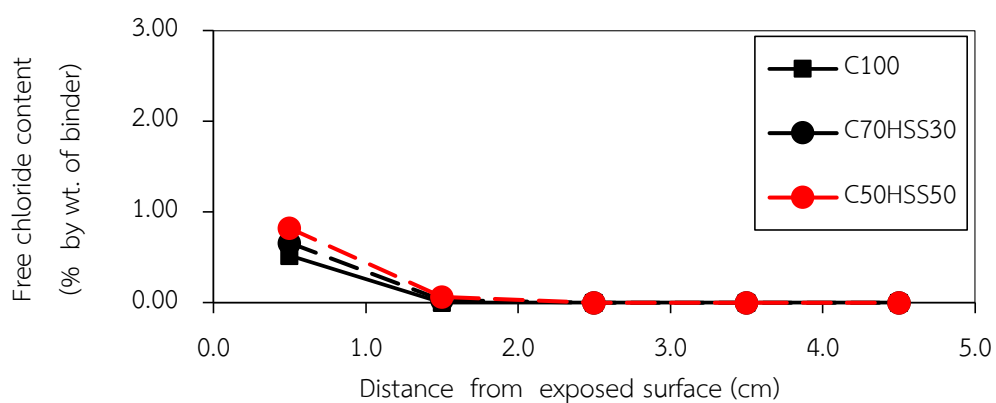
ภาพที่ 4-13 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 28 วัน (ต่อ)



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

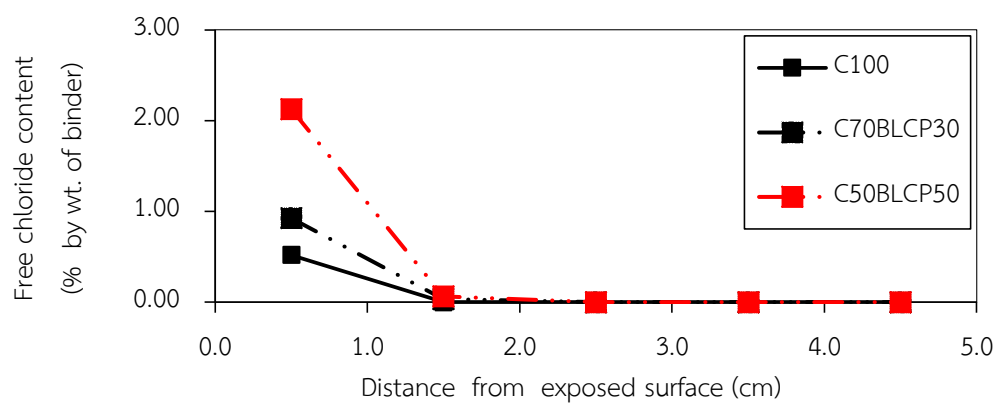


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหังสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



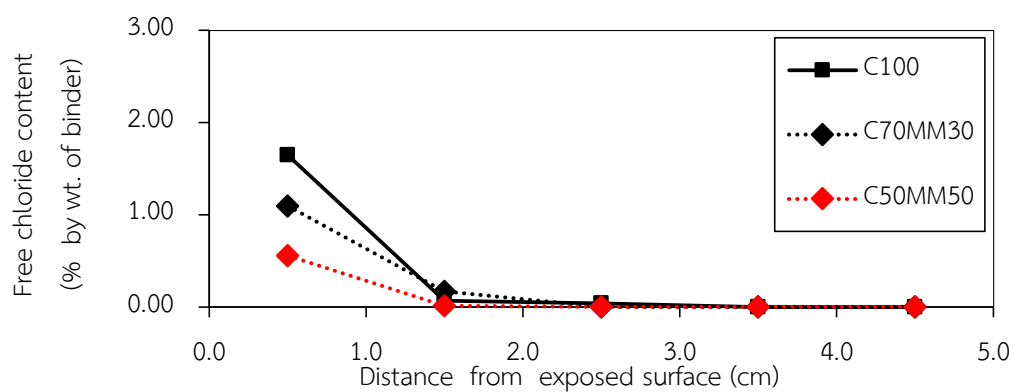
ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหังสาอนุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-14 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 56 วัน

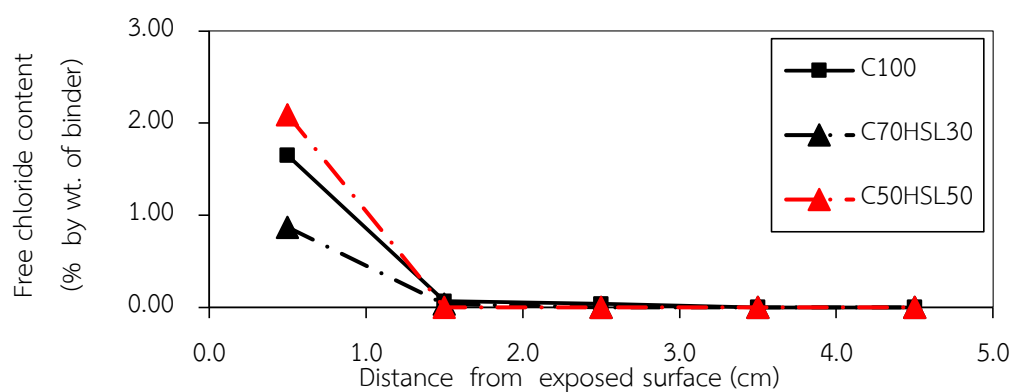


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

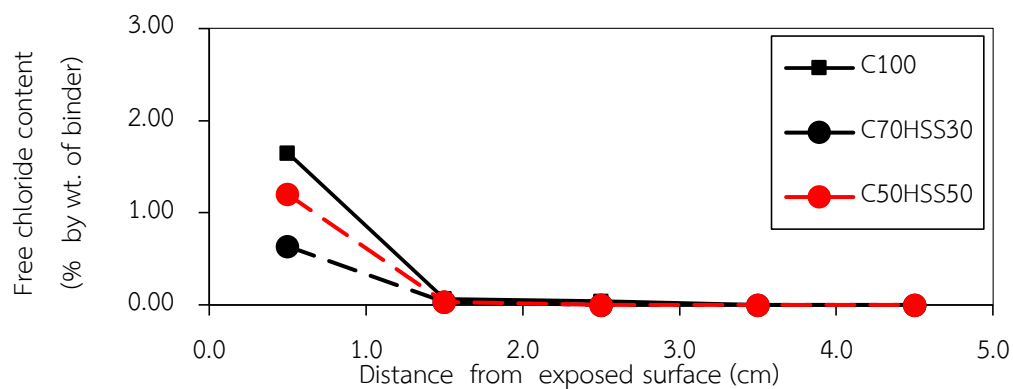
ภาพที่ 4-14 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 56 วัน (ต่อ)



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

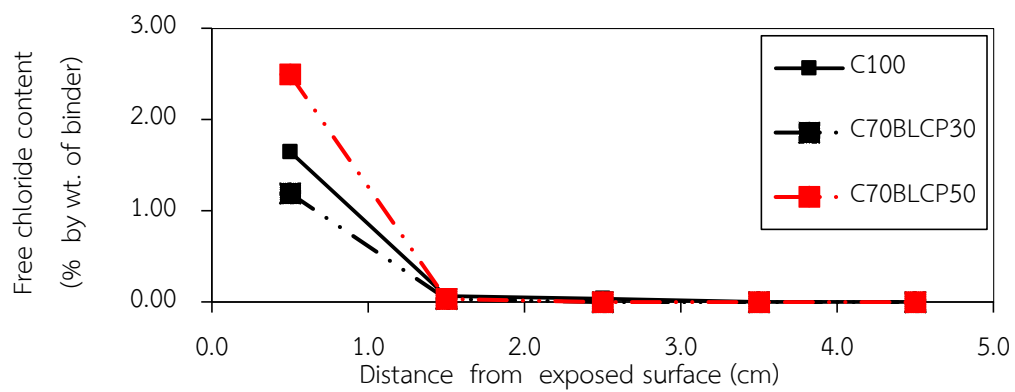


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหงสาอนุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-15 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 91 วัน

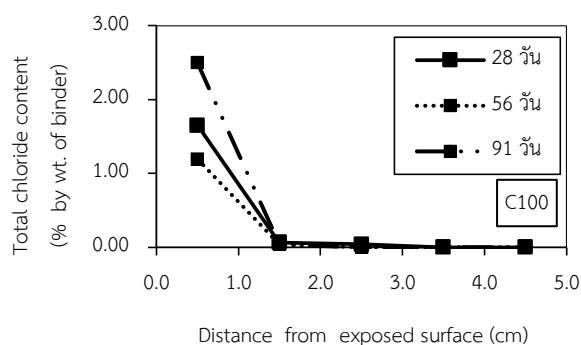


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

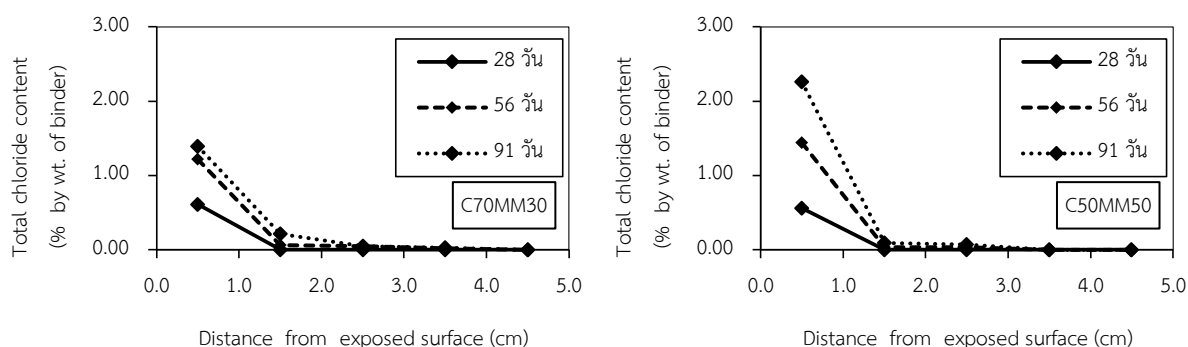
ภาพที่ 4-15 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ 91 วัน (ต่อ)

4.2.3 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์

พิจารณาจากระยะที่เผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังจากตัวอย่างคอนกรีตเผชิญกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0% ที่ระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-16 และ 4-17 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย มีการคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไป 2 เซนติเมตร แต่คอนกรีตปูนล้วนมีคลอไรด์แทรกซึม 3 เซนติเมตร ซึ่งหมายความว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเนื่องจากแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต ระยะทางที่น้อยกว่า และเมื่อคอนกรีตต้องเผชิญสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลานานขึ้น อีออนของเกลือคลอไรด์ก็สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้มากและลึกขึ้นมากยิ่งขึ้น

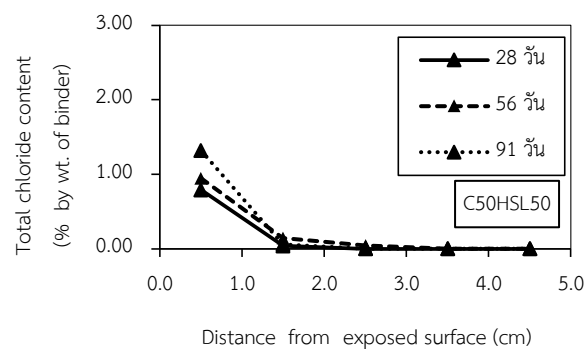
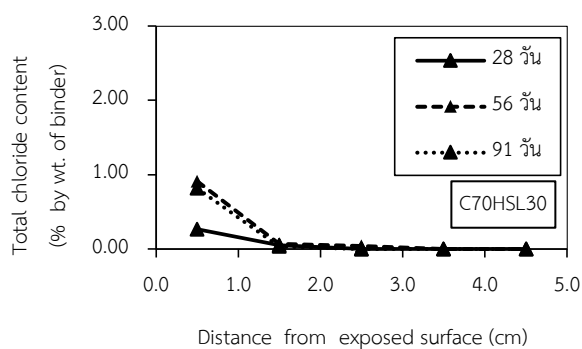


ก. คอนกรีตล้วน (C100)

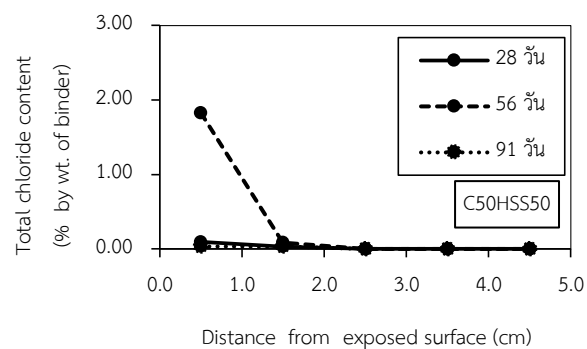
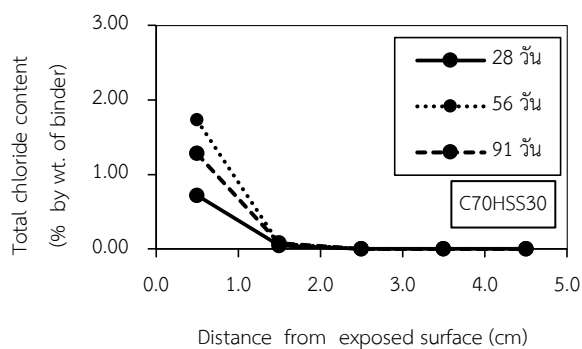


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

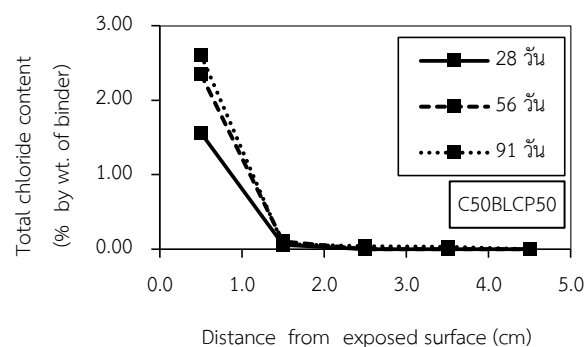
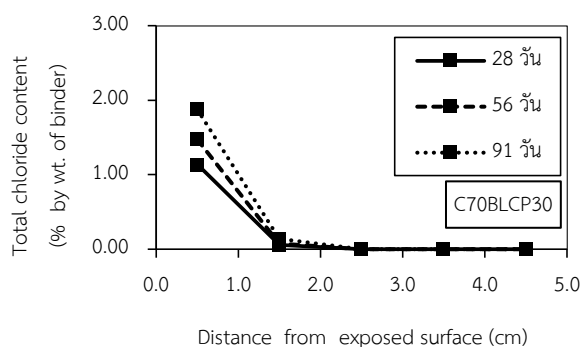
ภาพที่ 4-16 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต



ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุภาคใหญ่ (HSL)

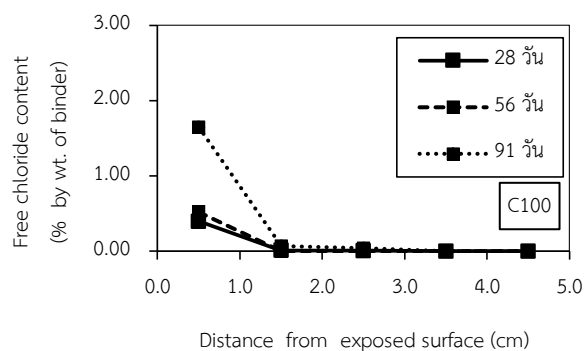


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุภาคเล็ก (HSS)

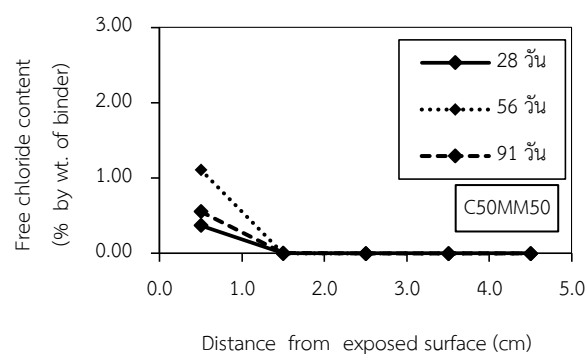
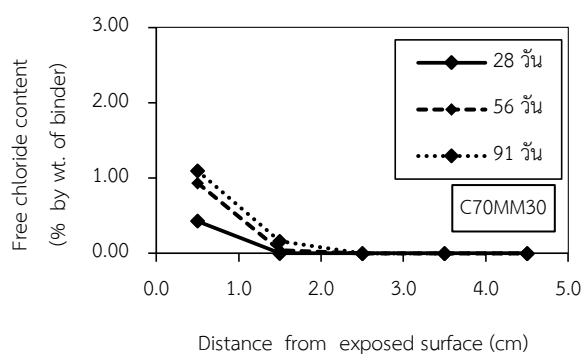


จ. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

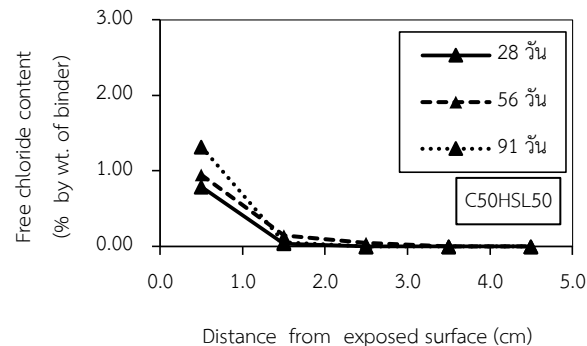
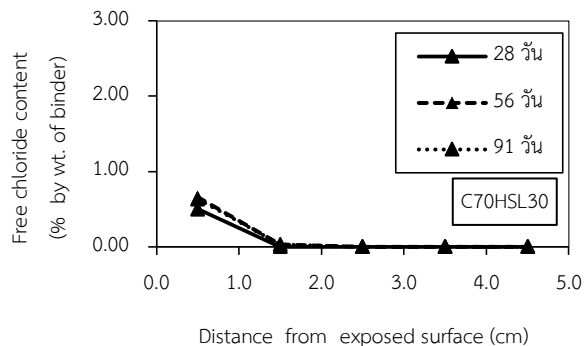
ภาพที่ 4-16 ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่อความต้านทานคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต (ต่อ)



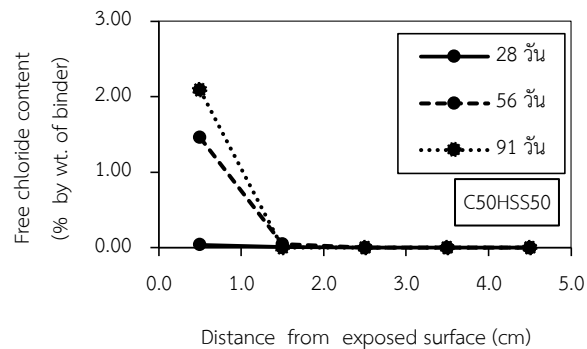
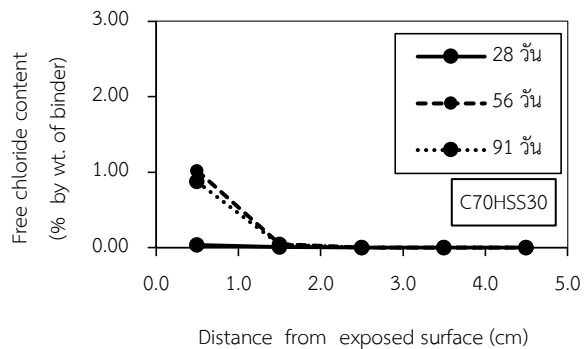
ก. คอนกรีตล้วน (C100)



ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

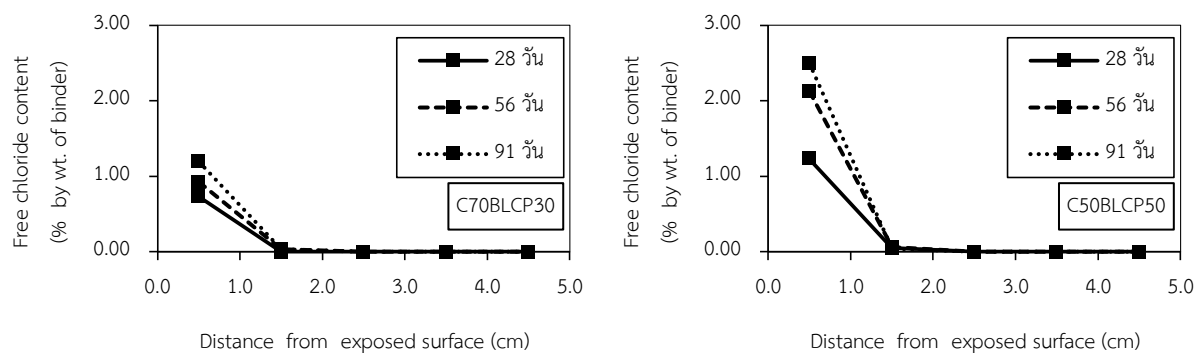


ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุภาคใหญ่ (HSL)



ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-17 ผลกระทบของระยะเวลาที่เผชิญสารละลายคลอไรด์ต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีต

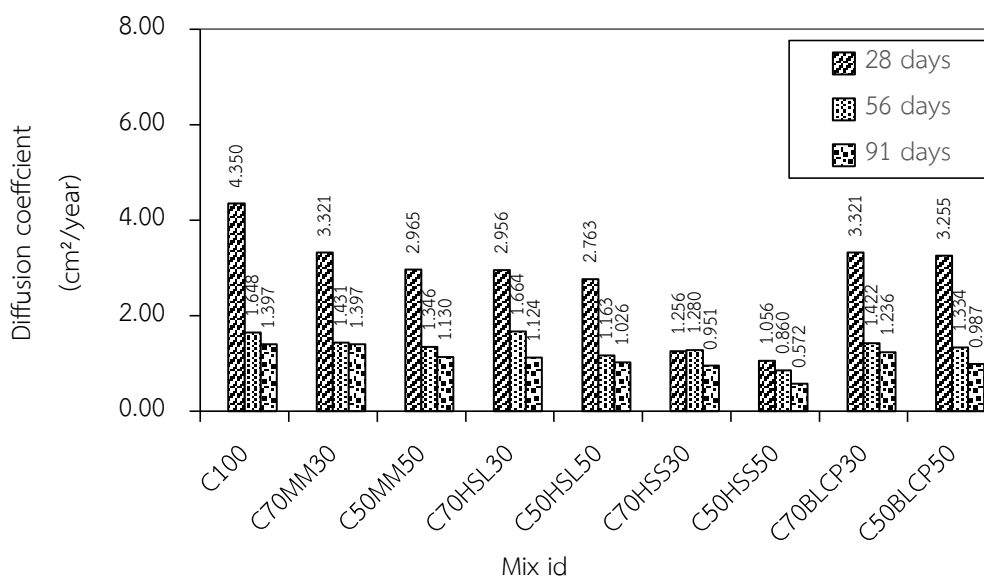


จ. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

ภาพที่ 4-17 ผลกระทบของระยะเวลาที่เผชิญสารละลายคลอไรด์ต่อความต้านทานคลอไรด์อิสระของคอนกรีต (ต่อ)

4.2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับปริมาณคลอไรด์อิสระ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (%by weight of binder) เทียบกับค่าระยะจากผิวหน้า (Distance from exposed surface) ของคอนกรีต และหากนำค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมาคำนวณตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ก็จะมีผลแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-18 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยหุงสาอนุภาคเล็ก (HSS) มีค่าต่ำที่สุดในทุกระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดเล็กจึงสามารถไปอุดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้รูพรุนในคอนกรีตมีขนาดเล็กลง คลอไรด์ซึมผ่านได้ยากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อใช้ เถ้าลอยหุงสาอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยอง (BLCP) เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และปูนซีเมนต์ล้วน ตามลำดับ และพบว่าหากมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ก็จะมีค่าน้อยลงตามไปด้วย แสดงว่าคอนกรีตนั้นมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

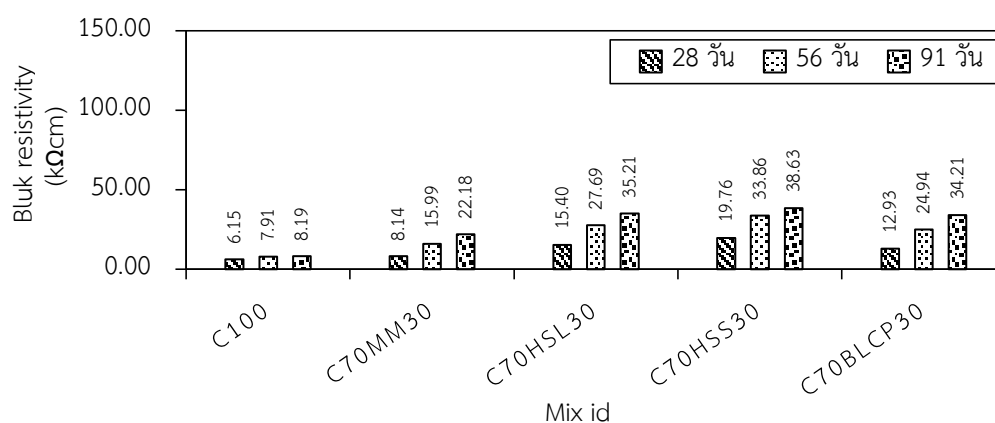


ภาพที่ 4-18 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

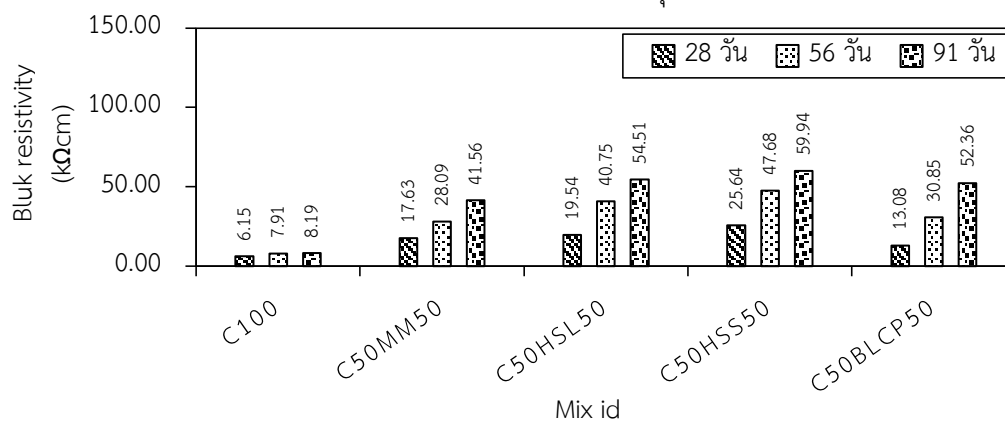
4.3 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิวของคอนกรีต

4.3.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยต่างชนิดกัน ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4-19 และผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวดังแสดงในภาพที่ 4-20 พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็กมีความต้านทานไฟฟ้าดีที่สุด กล่าวคือมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีด้วย เนื่องจากเถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็กสามารถไปอุดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทึบ จึงต้านทานไฟฟ้าได้ดี

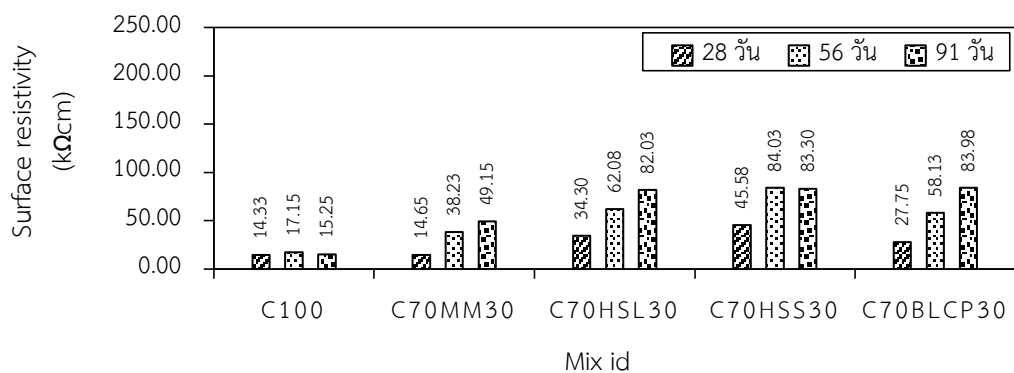


ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

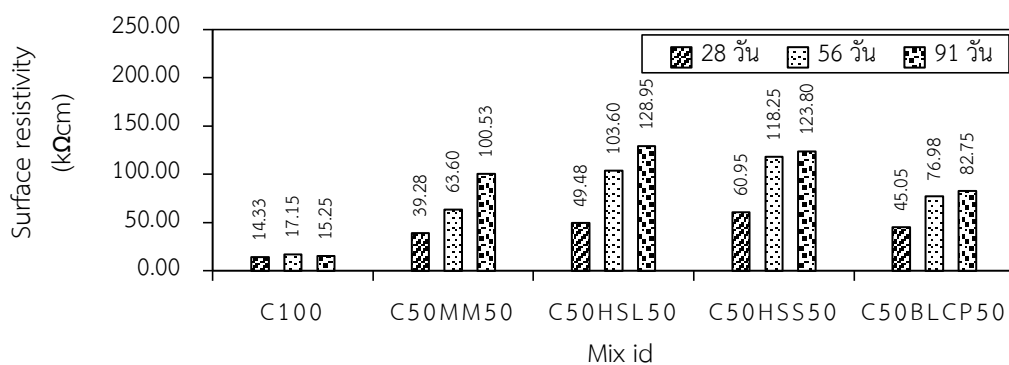


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-19 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด



ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

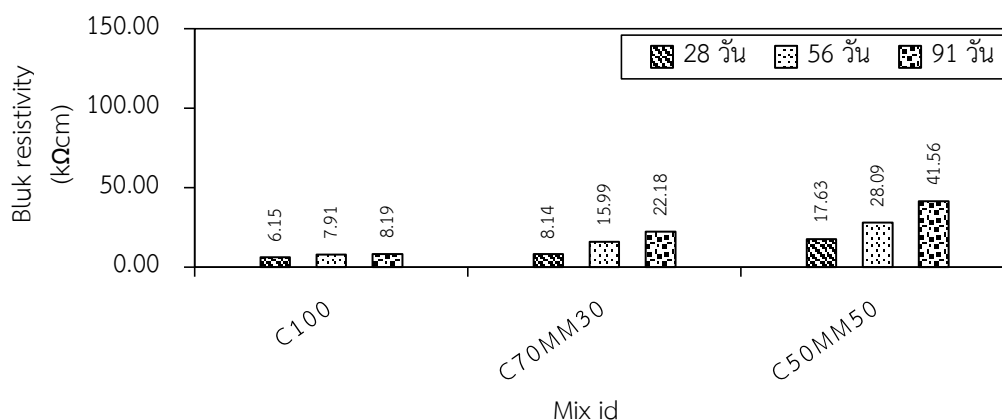


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

ภาพที่ 4-20 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

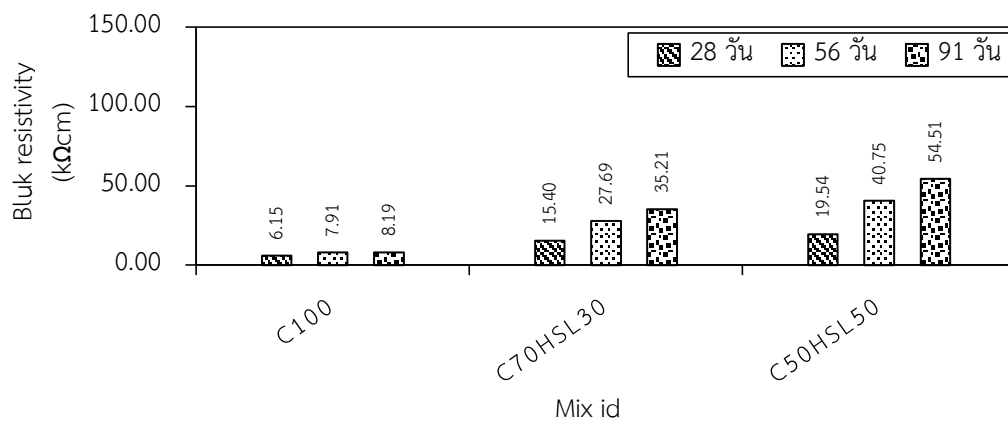
4.3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและทั้งหมดของคอนกรีต (Surface electrical resistivity and bulk electrical resistivity) ของคอนกรีต แสดงด้วยค่าความต้านทานไฟฟ้าในหน่วย $k\Omega cm$ ซึ่งหากค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงแสดงว่า คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี เมื่อพิจารณาผลกระทบของเถ้าลอย พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในทุกส่วนผสม มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าก็สูงขึ้น แสดงถึงความต้านทานการแทรกซึมของ คลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้นเช่นกัน จากผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-21 และ 4-22 ความต้านไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนที่มากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยที่มีปริมาณมากขึ้น สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น และเถ้าลอยที่อยู่ในคอนกรีตก่อให้เกิดแรงดึงดูดในโพรงทำให้โพรงช่องว่างในคอนกรีตมีขนาดเล็กลง มีความแน่น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้การแพร่ของไอออนคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถต้านทาน คลอไรด์ได้ดีจะส่งผลดีต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ จากผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่มากขึ้น

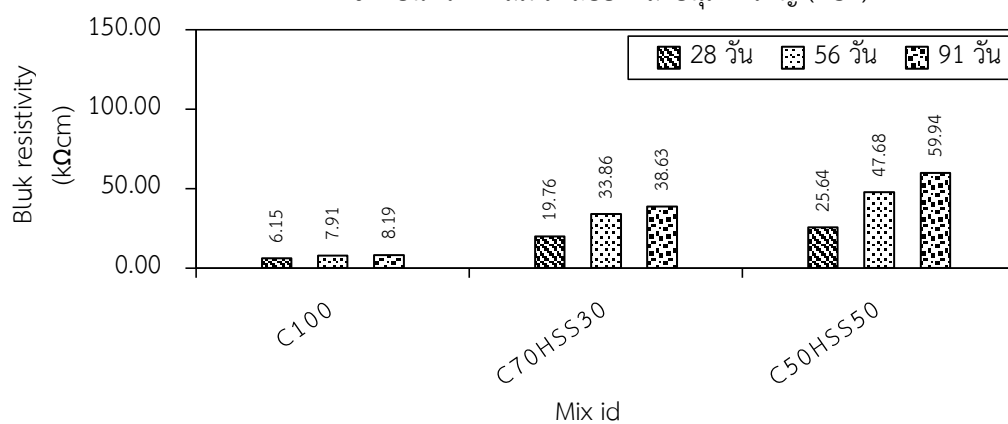


ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

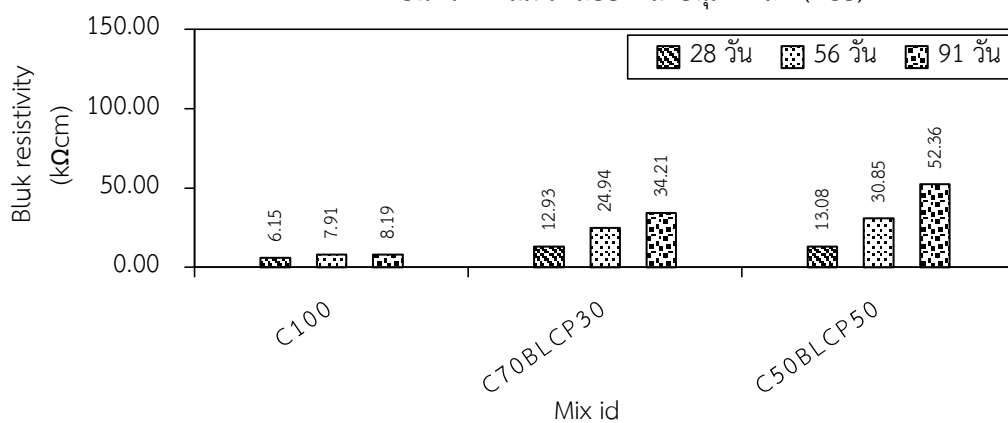
ภาพที่ 4-21 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด



ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหยาบขนาดใหญ่ (HSL)

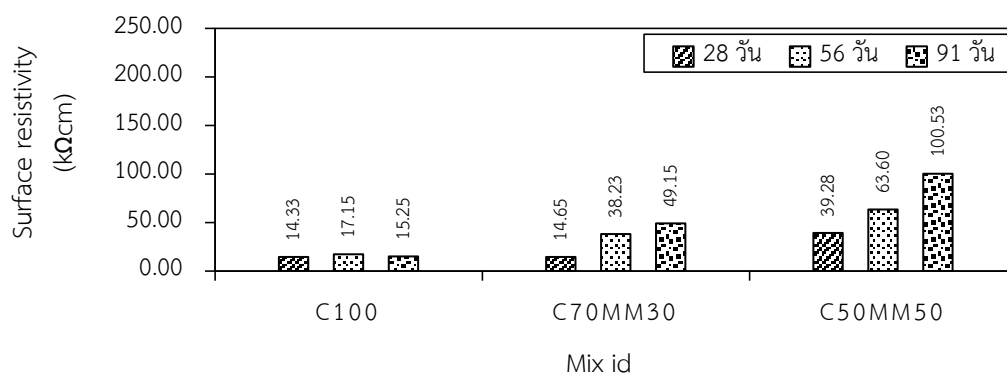


ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหยาบขนาดเล็ก (HSS)

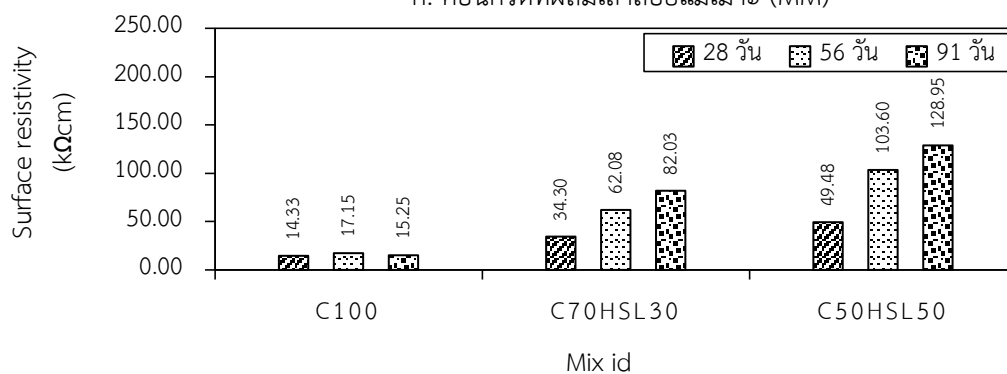


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

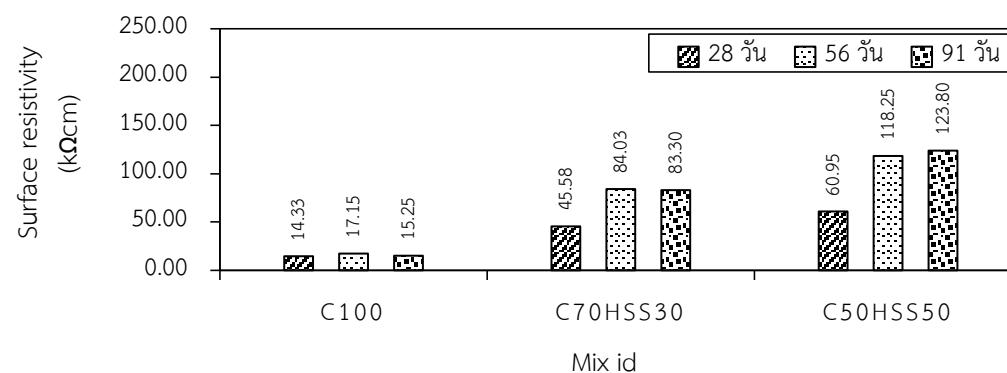
ภาพที่ 4-21 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด (ต่อ)



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

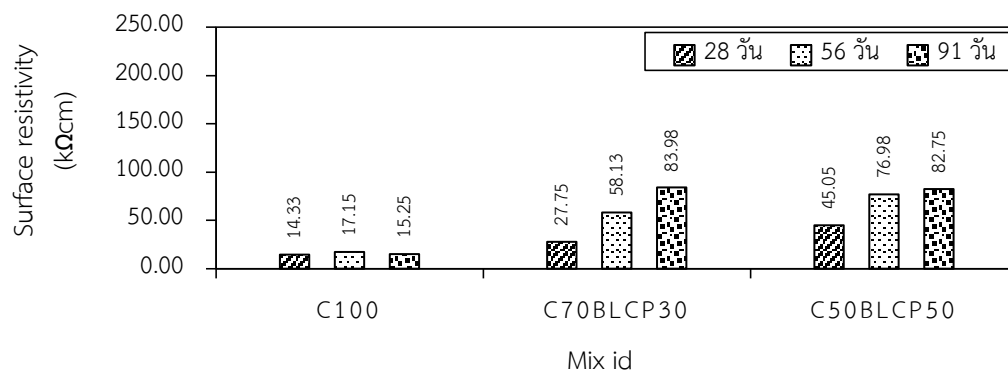


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคใหญ่ (HSL)



ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS)

ภาพที่ 4-22 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

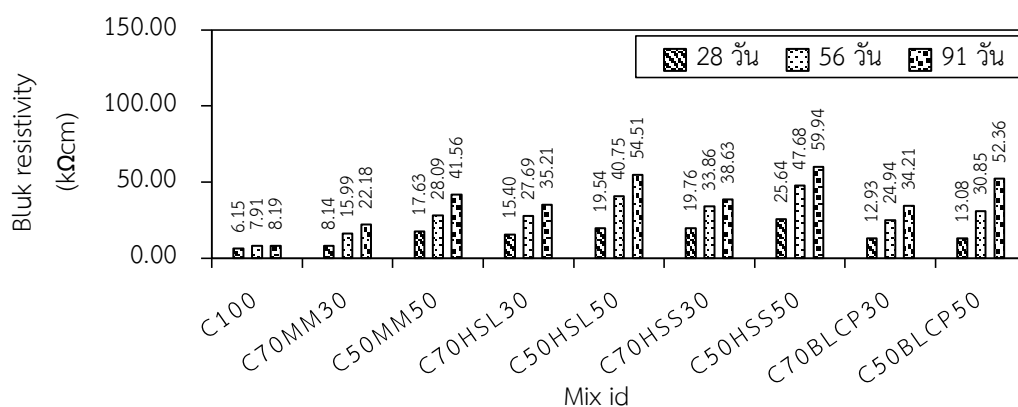


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (BLCP)

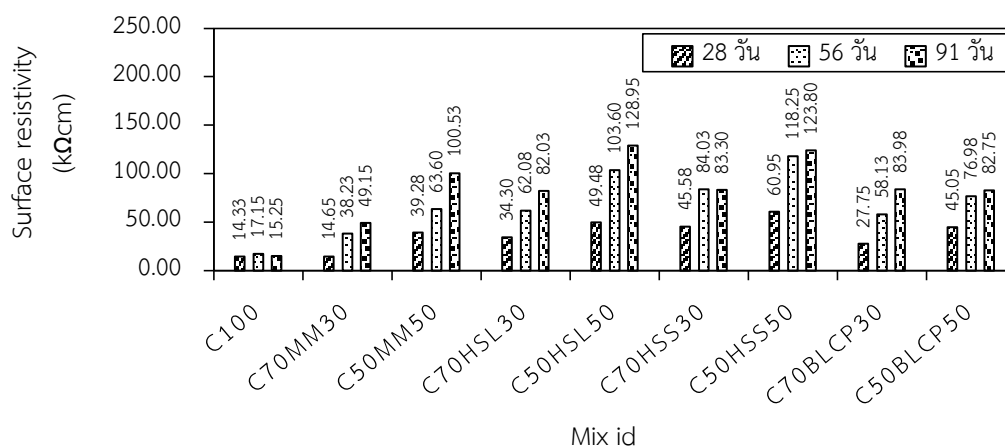
ภาพที่ 4-22 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว (ต่อ)

4.3.3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีระยะเวลาในการบ่มน้ำแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-23 และ ภาพที่ 4-24 พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการบ่มตัวอย่างคอนกรีตนานขึ้น เนื่องจากการบ่มน้ำช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตแน่น ทึบน้ำ รูพรุนเล็กลงและอออนของคลอไรด์ก็แทรกซึมเข้าไปได้ยาก



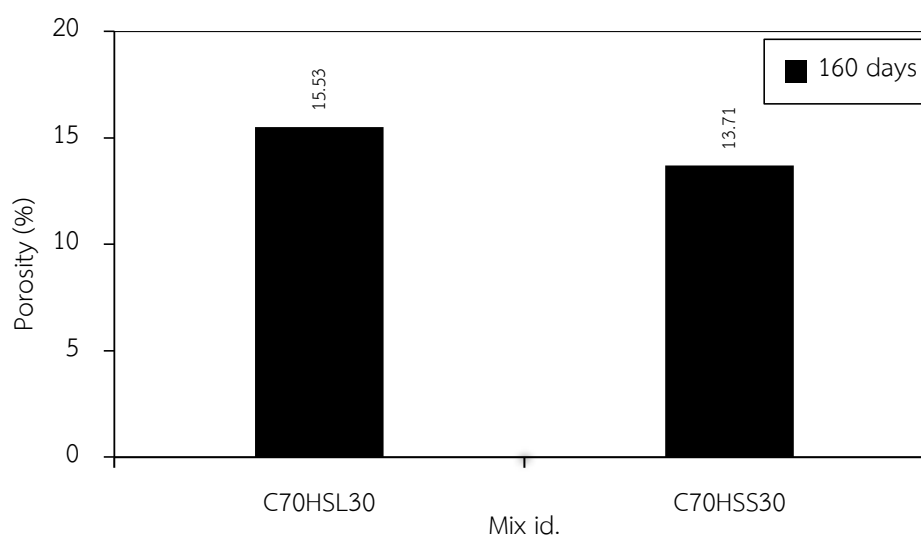
ภาพที่ 4-23 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่างต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของแต่ละส่วนผสม



ภาพที่ 4-24 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่างต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของแต่ละส่วนผสม

4.4 ความพรุนในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 4-25 จะเห็นว่าปริมาณความพรุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุนภาคเล็ก มีปริมาณโพรงช่องว่างน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุนภาคใหญ่เนื่องจาก เถ้าลอยหอสานุนภาคเล็กมีอนุภาคที่เล็กกว่าทำให้สามารถกระจายตัวในเนื้อโพรงช่องว่างของคอนกรีตได้สม่ำเสมอและทั่วถึง สามารถไปอุดโพรงช่องว่างได้มากกว่า และอัตราในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกก็มากกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้โพรงช่องว่างในคอนกรีตเล็กลง อีกทั้งยังแสดงว่าคอนกรีตมีความแน่น ความตึงน้ำที่ดี น้ำสามารถซึมผ่านได้ยากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีปริมาณความพรุนภายในเนื้อคอนกรีตที่ต่ำ

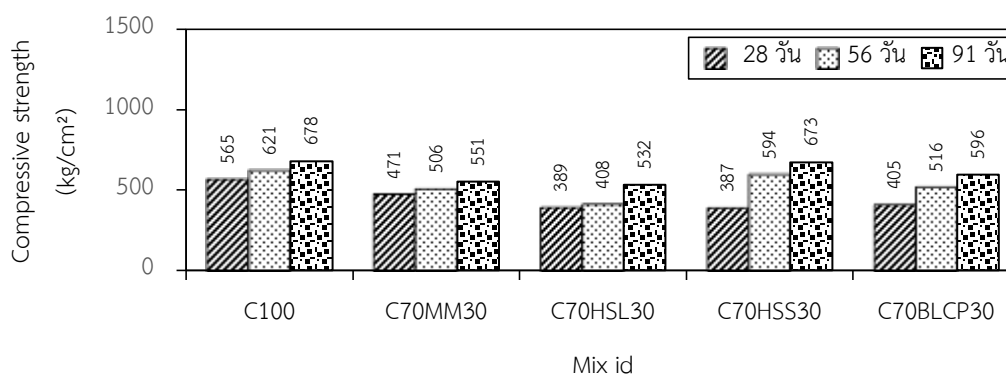


ภาพที่ 4-25 ปริมาณความพรุนในคอนกรีต

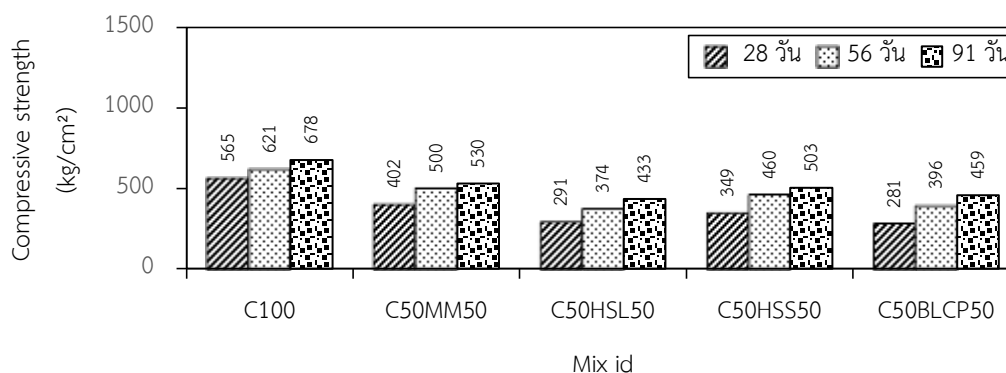
4.5 กำลังอัดของคอนกรีต

4.5.1 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่ใช้ชนิดของเถ้าลอยที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4-26 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยหอสานุนุภาคเล็กมีกำลังอัดที่ต่ำกว่ามาจากปูนล้วน เนื่องจากเถ้าลอยหอสานุนุภาคเล็ก ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดสารให้กำลังสูงขึ้นในช่วงปลาย



ก. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30

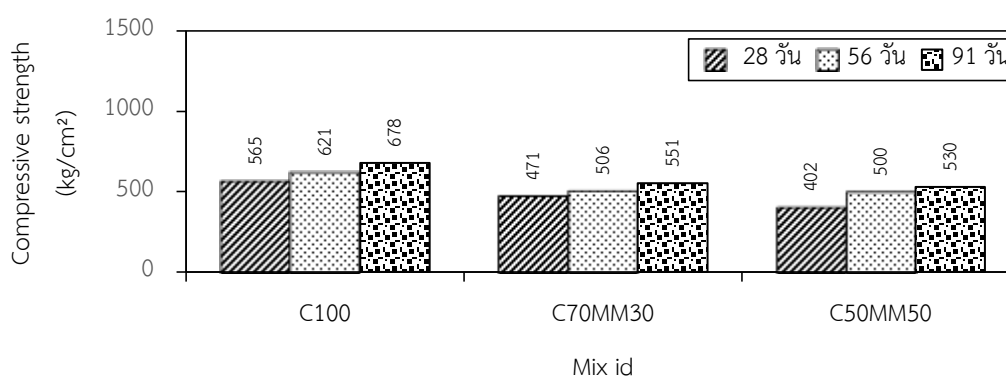


ข. อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 50

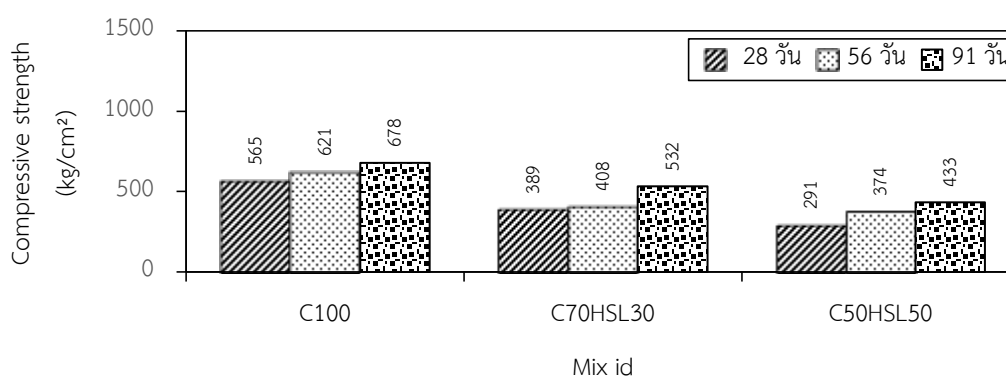
ภาพที่ 4-26 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีต

4.5.2 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีเถ้าลอยในอัตราส่วนที่ต่างกัันดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-27 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยร้อยละ 50 ก็มีแนวโน้มของกำลังอัดต่ำลงเช่นกัน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มาก ก็จะทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง สารให้กำลังและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและก่ลดลงเช่นกัน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงก็อาจจะไม่เพียงพอที่เถ้าลอยจะนำไปเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป เป็นผลให้กำลังอัดในช่วงหลังจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มากในตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ของวัสดุประสาน

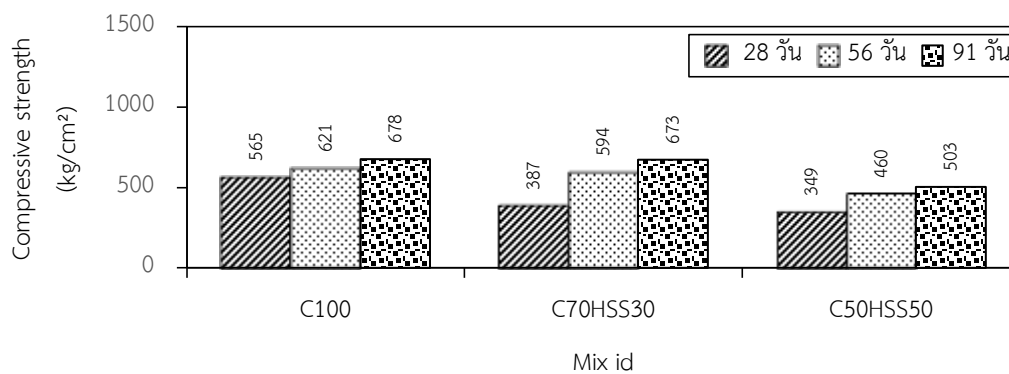


ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (MM)

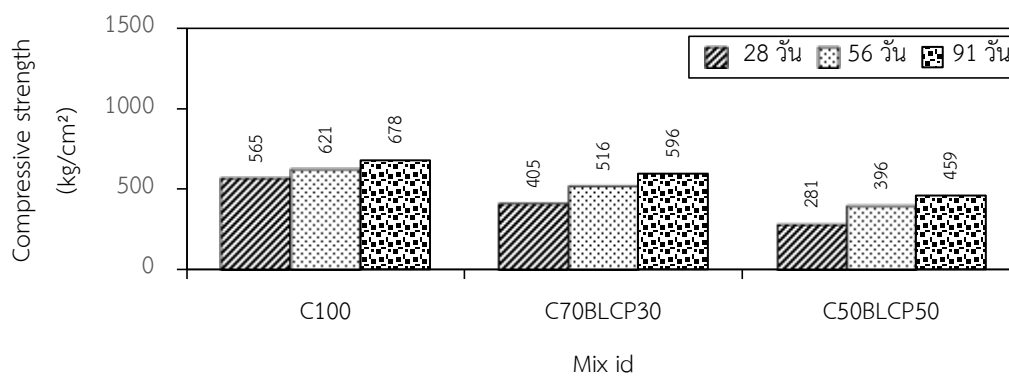


ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหังสาอนุภาคใหญ่ (HSL)

ภาพที่ 4-27 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีต



ค. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานขนาดเล็ก (HSS)

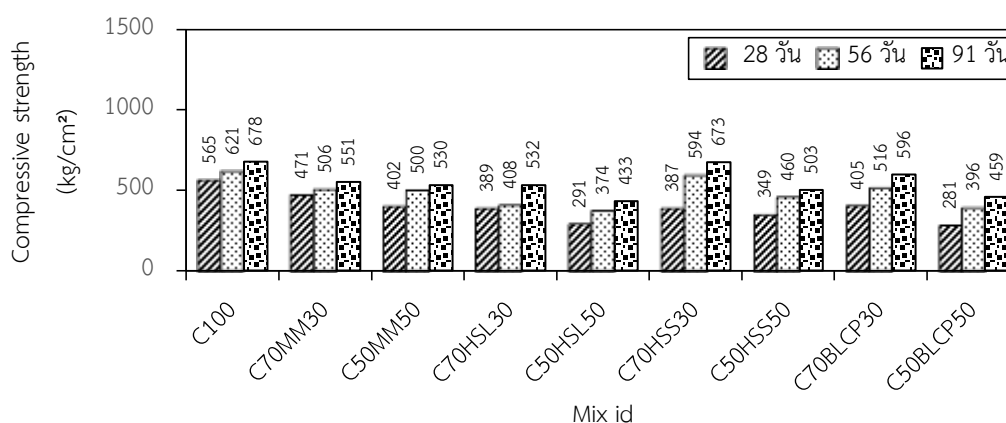


ง. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานขนาดใหญ่ (BLCP)

ภาพที่ 4-27 ผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีต (ต่อ)

4.5.3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างที่ต่างกันดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-28 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อแทนที่เถ้า ลอยด้วยร้อยละ 50 ก็มีแนวโน้มของกำลังอัดต่ำลงเช่นกัน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มาก ก็ จะทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง สารให้กำลังและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันและก่ลดลงเช่นกัน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงก็อาจจะไม่เพียงพอที่เถ้าลอยจะ นำไปเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป เป็นผลให้กำลังอัดในช่วงหลังจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มากใน ตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ของวัสดุประสาน



ภาพที่ 4-28 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มตัวอย่างต่อกำลังอัดของคอนกรีต

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาความสามารถด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยต่างชนิดกัน คือ เถ้าลอยหอสานุนภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยหอสานุนภาคเล็ก (HSS) เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และเถ้าลอยระยอง (BLCP) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแรง พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50 ผลการทดสอบปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มต่ำลงในทุกชนิดเถ้าลอย และเมื่อตัวอย่างมีระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ผลการทดสอบของทุกตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีแนวโน้มต่ำลงเช่นเดียวกัน กล่าวคือ คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีหากผสมเถ้าลอยและมีระยะเวลาบ่มนาน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุนภาคเล็ก (HSS) มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด รองลงเป็น เถ้าลอยหอสานุนภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยอง (BLCP) และเถ้าลอยแม่เมาะ (MM) ตามลำดับ

2. จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดโดยแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระของตัวอย่างผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลง และเมื่อตัวอย่างมีระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีแนวโน้มต่ำลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้ยากขึ้น กล่าวคือ คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น และเมื่อนำปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหอสานุนภาคเล็ก (HSS) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด รองลงเป็น เถ้าลอยหอสานุนภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยอง (BLCP) และเถ้าลอยแม่เมาะ (MM) ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดโดยแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

3. จากความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิวที่ได้จากการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิว พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิวสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จาก

ร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มสูงขึ้น และเมื่อตัวอย่างมีระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านไฟฟ้าสูงขึ้น เช่นเดียวกัน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหยาบอนุภาคเล็ก (HSS) มีความต้านทานไฟฟ้าทั้งก่อนและที่ผิวมากที่สุด รองลงเป็น เถ้าลอยหยาบอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยอง (BLCP) และเถ้าลอยแม่เมาะ (MM) ตามลำดับ

4. จากปริมาณความพรุนภายในคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยหยาบอนุภาคเล็ก (HSS) มีปริมาณความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยหยาบอนุภาคใหญ่ (HSL) เนื่องจากมีปริมาณความพรุนน้อยกว่า ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น คอนกรีตมีความแน่น และที่ผิวมากยิ่งขึ้น

5. จากกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ พบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ผลกำลังอัดมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 อีกทั้ง ยังมีแนวโน้มที่สูงกว่าในการพัฒนากำลังอัดได้ในอายุภายหลัง

6. จากผลการทดสอบด้วยวิธีความต้านทานคลอไรด์แบบแรง วิธีความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด และวิธีความต้านทานไฟฟ้าทั้งก่อนและที่ผิว พบว่า มีแนวโน้มผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อมีความต้านทานคลอไรด์แบบแรงสูง ก็จะมีค่าความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดสูงตาม และมีความต้านทานไฟฟ้าทั้งก่อนและที่ผิวสูงขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป ดังนี้

1. การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำเกินไปอาจจะส่งผลกระทบต่อการความต้านทานการแทรกซึมที่ใกล้เคียงกันมากเกินไป อาจจะต้องศึกษาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่านี้เพื่อให้แสดงผลกระทบอย่างชัดเจน

2. ควรศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหยาบเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการเลือกใช้ปริมาณเถ้าลอยในงานคอนกรีตต่อไป เนื่องจากเถ้าลอยหยาบเป็นเถ้าลอยที่เพิ่งนำเข้ามาในประเทศไทยและยังมีการศึกษาที่น้อยกว่าเถ้าลอยชนิดอื่นๆ

3. ควรมีระยะเวลาในการบ่มนานยิ่งขึ้น เพื่อจะได้ผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกมักเกิดภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพราะต้องอาศัยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในการทำปฏิกิริยา

4.ควรมีการทดสอบปริมาณความพรุนของคอนกรีต (Porosity test) เพิ่มในทุกส่วนผสม เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบปริมาณความพรุนภายในคอนกรีตต่อความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยต่างชนิดกัน

บรรณานุกรม

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2547). เถ้าลอยแม่เมาะ. สืบค้นเมื่อ 8 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://maemoh.egat.com/index.php/sarattd?id=89>
- คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธาวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. ทวีชัย สำราญวานิช (2553) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 22(3) 79-85.
- สุรชาติ ฤกษ์โหรา., ทวีชัย สำราญวานิช, วรางคณา แสงสรอย, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์(2555), “ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง” , การประชุมวิชาการระดับชาติ
- สุรชาติ ฤกษ์โหรา., ทวีชัย สำราญวานิช, วรางคณา แสงสรอย, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์(2554), “ผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปูนขาวอิสระสูงต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7
- สุรชาติ ฤกษ์โหรา., ทวีชัย สำราญวานิช, วรางคณา แสงสรอย, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล(2554), “ผลกระทบของเถ้าลอยลิ้นไนด์และเถ้าลอยบิพูนีสต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม” , การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 8
- บทความ (Atom). (2557). การเกิดสนิมของเหล็ก. สืบค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://mini-engineer.blogspot.com/2014/10/corrosion-of-steel-in-concrete.html>
- มอก. 15 เล่ม 1-2547, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- มอก. 2135-2545, เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต
- อุดมพร กุลมงคล., ทวีชัย สำราญวานิช, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล(2555), “ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และเถ้าถ่านแม่เมาะ และในจังหวัดระยอง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาสิทธิ์., ทวีชัย สำราญวานิช, ภัทวฒน แสนเจริญ, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2554), “ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผุ่นหินปูนและสารขยายตัว” , การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 5

บรรณานุกรม (ต่อ)

- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาสิทธิ์., ทวีชัย สำราญวานิช., ภัควัฒน์ แสนเจริญ. และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2552), “ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14
- AASHTO TP-95, Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration
- ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates
- ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
- ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete
- ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- ASTM C1218, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete
- ASTM C1556, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion
- ASTM C1760, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete.
- BS 1881-116:1983, Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes. *British Standards*
- .Jun Liu.,Guangfeng Ou., Qiwen Qiu., Xiaochi Chen.,Jing Hong. and Feng Xing
“Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition”, *Construction and Building Materials* 146 (2017) 493-501
- Tina Simcic., Stane Pejovnik., Geert De Schutter. and Violeta Bokan Bosiljkov,
“Chloride ion penetration in to fly ash modified concrete during wetting-drying cycles”, *Construction and Building Materials* 93 (2015) 1216-1223.

ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหงสา

Chloride resistance of concrete with Hongsa fly ash

ชิดชนก เฟือนบิดา (Chidchanok Phaunbida)¹

ปวีณวัชร อัครขุนหวงศ์ (Paweehawach Akkarachoonhawong)²

ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ (Thidaporn Chuosavasdi)³

ทวีชัย สำราญวานิช (Taweechai Sumranwanich)⁴

¹นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Email: ^[1]chidchanok_ph@hotmail.com ^[2]57050511@go.buu.ac.th ^[3]thidaporn@buu.ac.th

^[4]twc@buu.ac.th

บทคัดย่อ: โครงการงานวิศวกรรมโยธานี้ มุ่งศึกษาผลกระทบของความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจากหงสา เถ้าลอยจากแม่เมาะ และเถ้าลอยจากกระยอง โดยทำการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และทดสอบกำลังอัดภายหลังบ่มน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน และทดสอบแบบแพร่คลอไรด์ทั้งหมด ภายหลังจากบ่มน้ำ 28 วัน นำไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน ตามลำดับ และทดสอบความพรุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และ 50 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ร้อยละ 50 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ร้อยละ 30 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยจากหงสา อนุภาคเล็ก (HSS) มีความต้านทานคลอไรด์ดีที่สุดในทุกการทดสอบ ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยจากหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยจากกระยอง (BLCP) และเถ้าลอยจากแม่เมาะ (MM) ตามลำดับ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

คำสำคัญ : การแทรกซึมคลอไรด์, กำลังอัด, คอนกรีต, เถ้าลอย

ABSTRACT: The civil Engineering project aims to study the effect of fly ash from Hongsa, Mae Moh and Rayong on chloride resistance of concrete. The rapid chloride penetration test and compressive strength test were performed at the water curing times of 28, 56 and 91 days. Bulk chloride diffusion test were performed after the water curing times of 28 day and 3.0% chloride solution submersion. The porosity of concrete with cement replacement of fly ash at 30% and 50% and water to binder ratio of 0.40 was used. From the experimental results, it was found that concrete with replacement of cement by 50% of fly ash has higher chloride penetration resistance than that of 30% of fly ash. Concrete with small particle Hongsa fly ash (HSS) has the highest chloride resistance from all testing types. The chloride resistance of concrete decrease as using large particle Hongsa fly ash (HSL) Rayong fly ash (BLCP) and Mae Moh fly ash (MM), respectively. Compressive strength of fly-ash concrete is lower than cement-only concrete.

KEYWORDS: Chloride penetration, compressive strength, concrete, fly ash

1.บทนำ

ในปัจจุบันความเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมทะเล คือ การแทรกซึมของคลอไรด์ ซึ่งคลอไรด์เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ถ้ามีน้ำและออกซิเจนมากพอ [1]

การลดปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องมาจากปัญหาการแทรกซึมของคลอไรด์วิธีที่นิยมใช้กันคือการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสานซึ่งทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้น [2] เนื่องจากเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ เป็นต้น ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นและด้วยอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมากยิ่งขึ้นการใช้งานเถ้าลอยในงานโครงสร้างคอนกรีตสำหรับประเทศไทยมีมาตั้งต่อก่อนช่วงปี พ.ศ.2536 [3] โดยเถ้าลอยที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้า BLCP ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งาน จึงได้มีการนำเข้าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าหงสา ประเทศลาว เข้ามาใช้งานด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเพื่อหาส่วนผสมคอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีและกำลังอัดที่สูงซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเลือกส่วนผสมคอนกรีตไปใช้ในงานคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล

2.รายละเอียดการทดสอบ

2.1 วัสดุประสาน

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน เถ้าลอยที่ใช้ประกอบไปด้วยเถ้าลอยจากแม่เมาะ (MM) เถ้าลอยจากกระยอง (BLCP) เถ้าลอยจากหงสาซึ่งมีเถ้าลอยหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยหงสาอนุภาคเล็ก (HSS) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่ง องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีดัง ตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แสดงรายละเอียดส่วนผสมตารางที่ 3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพ	OPC Type 1	MM	BLCP	HSL	HSS
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.49	2.18	1.67	1.91
ความละเอียดทดสอบโดยวิธี Blaine fineness (cm ² /g)	3,350	3,157	3,463	3,293	3,522

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย

คุณสมบัติทางเคมี	OPC Type 1	MM	BLCP	HSL	HSS
SiO ₂	19.87	34.50	64.45	48.70	48.68
Al ₂ O ₃	4.87	17.91	20.58	30.40	30.44
Fe ₂ O ₃	3.55	13.73	3.76	6.11	5.97
CaO	65.03	20.76	2.55	6.05	5.85

คุณสมบัติทางเคมี	OPC Type 1	MM	BLCP	HSL	HSS
MgO	2.52	3.00	0.97	2.50	2.59
LOI	2.26	1.26	4.01	0.93	0.89
Na ₂ O	0.02	1.78	0.43	0.43	0.43
K ₂ O	0.45	2.13	1.51	3.33	3.44
TiO ₂	0.26	0.44	1.04	0.57	0.57
P ₂ O ₅	0.07	0.26	0.16	0.09	0.10

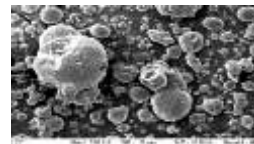
ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และร้อยละ 50 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.40

ตารางที่ 3 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

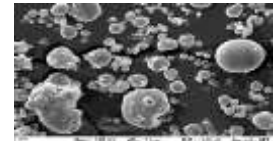
No	Mix id.	Mix property of concrete,(kg/m ³)				
		C	FA	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
1	C100	435	-	174	776	1025
2	C70MM30	294	126	168	776	1025
3	C50MM50	205	205	164	776	1025
4	C70HSL30	272	117	156	776	1025
5	C50HSL50	182	182	145	776	1025
6	C70HSS30	280	120	160	776	1025
7	C50HSS50	190	190	152	776	1025
8	C70BLCP30	287	123	162	776	1025
9	C50BLCP50	198	198	156	776	1025

หมายเหตุ “C” คือ Cement

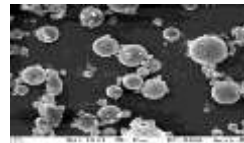
“FA” คือ Fly ash



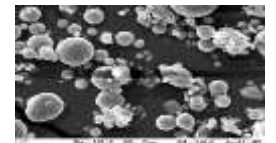
ก.เถ้าลอย HSL(x1000)



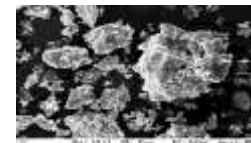
ข.เถ้าลอย HSS (x1000)



ค.เถ้าลอย MM (x1500)



ง.เถ้าลอย BLCP (x1500)



จ.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (x1000)

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอน

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetration Test) ASTM C1202 [4]

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างคอนกรีตครบ 28 วัน, 56 วันและ 91 วัน ก่อนทำการทดสอบตัดตัวอย่างทดสอบ ให้มีความหนาเท่ากับ 5 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างมา ประกอบในเซลล์ทดสอบ ด้านหนึ่งใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 3.0% อีกด้านใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.30 M ดังแสดงในภาพที่ 2 รายงานการทดสอบด้วยการวัดกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตและใช้ค่าดังกล่าวในการจัดระดับคุณภาพของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 4



ก.เซลล์ทดสอบ



ข.ทดสอบ RCPT

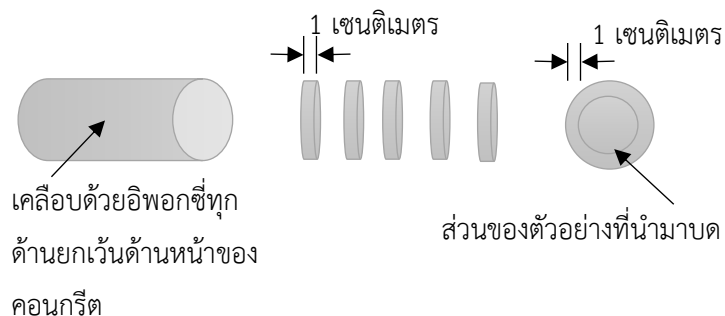
ภาพที่ 3 รายละเอียดการทดสอบความต้านทานการแทรกซึม
คลอไรด์แบบเร่ง

ตารางที่ 4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนใน
คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

Charge Passed (coulombs)	Chloride ion Penetrability
>4000	High
2000-4000	Moderate
1000-2000	Low
100-1000	Very Low
<100	Negligible

2.2.2 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion test) ASTM C1556 [5]

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างคอนกรีตครบ 28
วัน จากนั้นเคลือบผิวตัวอย่างด้วยอีพอกซี แซ่ตัวอย่างทดสอบ
ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.0% เป็นเวลา
28 วัน, 56 วัน และ 91 วัน ตัดตัวอย่างเป็นแผ่นมีความหนาชั้น
ละ 1 เซนติเมตร จำนวน 5 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 4 และนำไป
บดเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด



ภาพที่ 4 การตัดตัวอย่างและส่วนของตัวอย่างที่นำมาบด

2.2.3 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและที่ผิว (Bulk and surface electrical resistivity) ASTM C1760 [6], AASHTO TP95 [7]

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10
เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างคอนกรีตครบ 28 วัน,
56 วัน และ 91 วัน นำตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำแล้วทำการทดสอบ
ทันทีและทำการทดสอบไม่เกิน 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 5 ได้
ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งก้อนและที่ผิว และใช้ค่าความต้าน
ทานไฟฟ้าที่ผิวในการจัดระดับคุณภาพของคอนกรีตดังแสดงใน
ตารางที่ 5



ก.การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด



ข.การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

ภาพที่ 5 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้า

ตารางที่ 5 เกณฑ์พิจารณาความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของ
คอนกรีตตามมาตรฐาน AASHTO TP-95

Surface Resistivity Test (k Ω cm)	Chloride ion Penetrability
<12	High
12-21	Moderate
21-37	Low
37-254	Very Low
>254	Negligible

2.2.การทดสอบปริมาณความพรุนในคอนกรีต ASTM C642 [8]

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างคอนกรีตครบ 160 วัน เมื่อตัวอย่างครบอายุ นำตัวอย่างคอนกรีตมาตัดเป็นแว่นให้มีความหนาตัวอย่างละ 5 เซนติเมตร จะได้จำนวน 4 ตัวอย่าง จากนั้นนำคอนกรีตมาอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสอบตัวอย่างจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ บันทึกข้อมูล ดังแสดงไว้ในภาพที่ 6 หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำประปา จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ บันทึกข้อมูล ดังแสดงไว้ในภาพที่ 6 นำตัวอย่างมาต้มให้น้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ในอากาศ 14 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งหลังต้มและชั่งน้ำหนักในน้ำ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 6 บันทึกข้อมูลแล้วนำไปคำนวณ



ก.อบตัวอย่าง

ข.ชั่งตัวอย่าง

ค.ชั่งตัวอย่างในน้ำ

ภาพที่ 6 การทดสอบปริมาณความพรุนใน

2.2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต BS 1881-116

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 10x10x10 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างครบ 28 วัน, 56 วัน 91 วัน จากนั้นนำมาทดสอบโดยทดสอบส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 7 เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีต

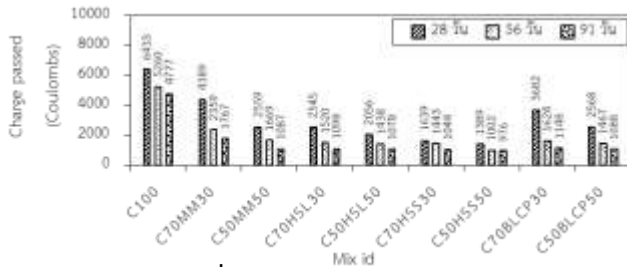


ภาพที่ 7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.ผลการทดสอบ

3.1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

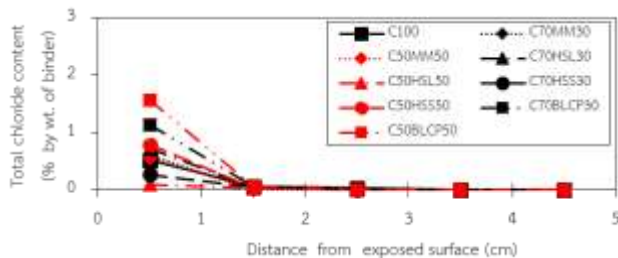
จากผลการทดสอบแสดงด้วยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตในหน่วยคูลอมป์ (Coulombs) ซึ่งหากค่าปริมาณของประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าที่ต่ำแสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีเนื่องจากอออนของคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้ยากจากภาพที่ 8 พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหุงสอนุภาคเล็ก (HSS) มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ เถ้าลอยหุงสอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยอง (BLCP) เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และ คอนกรีตล้วน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอายุการบ่มที่นานขึ้นความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อีกทั้งการที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าแทนที่ร้อยละ 30



ภาพที่ 8 ความต้านทานไฟฟ้าแบบแรง

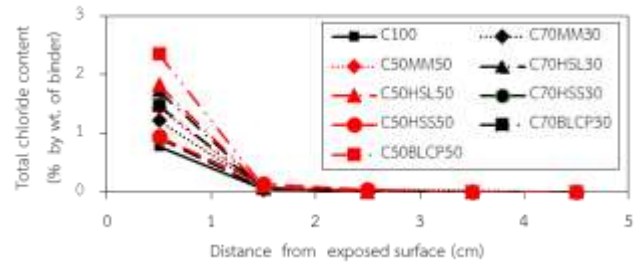
3.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด

การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์ที่ยึดจับ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) เทียบกับค่าระยะจากผิวหน้า (Distance from exposed surface) ของคอนกรีต โดยหากมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำแสดงว่าคอนกรีตนั้นมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี จากภาพที่ 9 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหงสาอนุภาคเล็ก (HSS) มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ เถ้าลอยหงสาอนุภาค (HSL) เถ้าลอยระยะยง (BLCP) เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และ คอนกรีตล้วน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอายุการบ่มที่นานขึ้นความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อีกทั้งการที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าแทนที่ร้อยละ 30 และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการทดสอบข้างต้นที่กล่าวมา

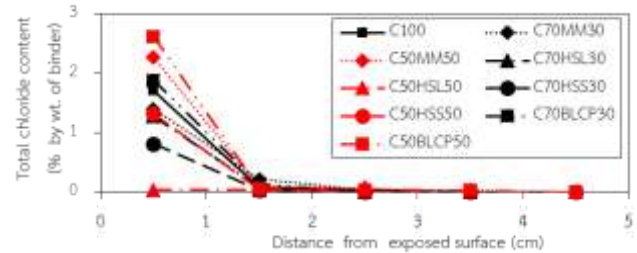


ก. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตอายุ 28

ภาพที่ 9 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

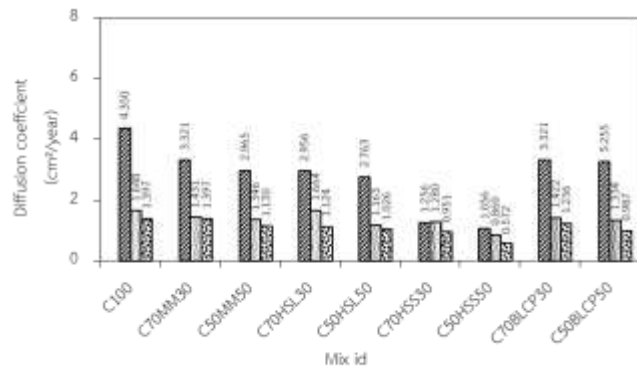


ข. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตอายุ 56 วัน



ค. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตอายุ 91 วัน

ภาพที่ 9 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ต่อ)

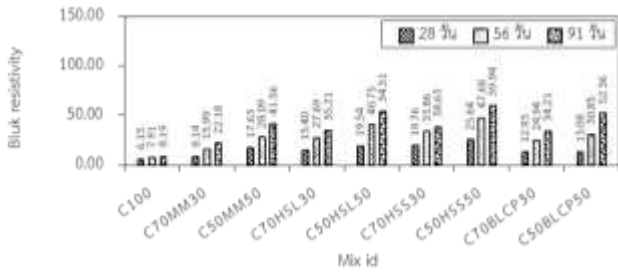


ภาพที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

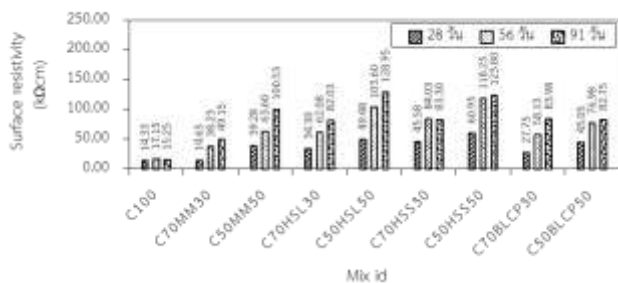
3.3 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งก่อนและที่ผิว

จากผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งก่อนและที่ผิวของคอนกรีตในหน่วย $k\Omega cm$ ซึ่งหากค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงแสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี จากภาพที่ 11 และ 12 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหงสาอนุภาคเล็ก (HSS) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ เถ้าลอยหงสาอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยะยง (BLCP) เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และคอนกรีตล้วน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอายุการบ่มที่นานขึ้นค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อีกทั้ง

การที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 มีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า แทนที่ร้อยละ 30



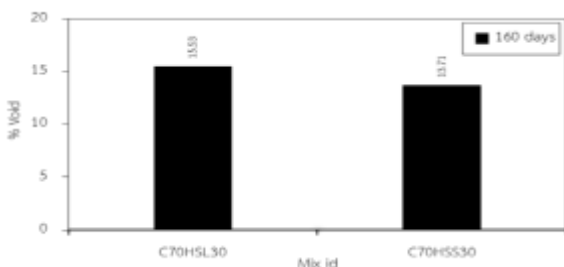
ภาพที่ 10 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งก้อน



ภาพที่ 11 ความต้านทานไฟฟ้าผิว

3.4 ปริมาณความพรุนในคอนกรีต

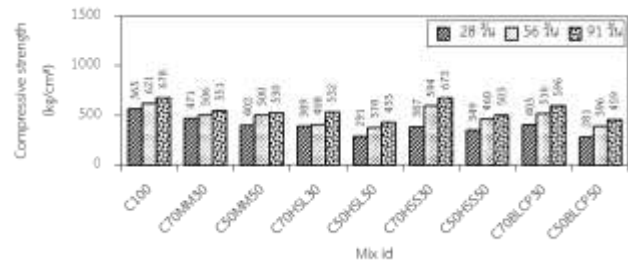
จากภาพที่ 12 จะเห็นว่าปริมาณความพรุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก มีปริมาณความพรุนที่ต่ำกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรงสาอนุภาคใหญ่เนื่องจาก เถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็กมีอนุภาคที่เล็กกว่าทำให้สามารถกระจายตัวในเนื้อโพรงช่องว่างของคอนกรีตได้สม่ำเสมอและทั่วถึง สามารถไปอุดรูพรุนได้มากกว่า และอัตราในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกก็มากกว่าเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสในการทำปฏิกิริยาได้มาก ส่งผลให้รูพรุนในคอนกรีตเล็กลง ซึ่งแสดงถึงความแน่นของเนื้อคอนกรีต ความทึบน้ำ การซึมผ่านของน้ำที่ยากขึ้น เมื่อคอนกรีตมีปริมาณความพรุนภายในเนื้อคอนกรีตที่ต่ำ



ภาพที่ 12 ปริมาณความพรุนภายในคอนกรีต

3.5 กำลังอัดของคอนกรีต

จากภาพที่ 13 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหรงสา HSL มีกำลังอัดที่ตีรองมาจากปูนล้วน เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยจะเห็นว่า แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำเพิ่มมากขึ้นกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น



ภาพที่ 13 กำลังอัดของคอนกรีต

4.สรุปผล

- 1.การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมีผลทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นและการแทนที่เถ้าลอยมากขึ้นก็ส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีขึ้น
- 2.ระยะเวลาการบ่มน้ำที่เพิ่มขึ้น จาก 28 วัน เป็น 91 วัน ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น
- 3.คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS) มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ เถ้าลอยหรงสาอนุภาคใหญ่ (HSL) เถ้าลอยระยะยง (BLCP) เถ้าลอยแม่เมาะ (MM) และคอนกรีตล้วน ตามลำดับ มีแนวโน้มเดียวกันทุกๆการทดสอบ
- 4.กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหรงสาอนุภาคเล็ก (HSS) มีกำลังอัดที่ตีรองมาจากปูนล้วนและเมื่อเวลาบ่มน้ำนานขึ้นส่งผล

แนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันหากเพิ่มอัตราการแทนที่เถ้าลอย ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มต่ำลง

5.กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สารานวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ อีกทั้ง อาจารย์ ดร. เทียง ชีวะเกตุ คณะกรรมการสอบ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่านจนทำให้โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

6.เอกสารอ้างอิง

[1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1

[2] Chindaprasirt P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon V, 2008. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel, rice husk ash and fly ash. Construction and Building Materials, 22: 932-938.

[3] ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547 เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ส.).

[4] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

[5] ASTM C1556, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion.

[6] ASTM C1760, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete.

[7] AASHTO TP95, Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.

[8] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete

[9] BS 1881-116:1983, Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes. British Standards.

ประวัติย่อของผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	นางสาวชิตชนก เผื่อนบิดา
วัน เดือน ปี เกิด	17 มีนาคม 2539
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลลาดพร้าว จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	5/1054 หมู่บ้านนนทวัน 5 แขวงโคกแฝด เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530.
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2560 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี พ.ศ.2556 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมัธยมวัดหนองจอก
ชื่อ-สกุล	นางสาวปวิณวัชร อัครชุนหวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	30 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศเส จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	18 เจริญกรุง 22 แขวงตลาดน้อย เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพมหานคร 10100.
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2560 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี พ.ศ.2556 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสตรีวัดมหาพฤฒา ราม ในพระบรมราชินูปถัมภ์