



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม
(Chloride penetration resistance of concrete containing silica fume)

ผศ.ดร. ทวีชัย คำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 387389

สัญญาเลขที่ 18/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

(Chloride penetration resistance of concrete containing silica fume)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 18/2560

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 18/2560)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม.³ สำหรับทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\varnothing 10 \times 20$ ซม.² สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5.0 % เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน ภายหลังจากบ่มน้ำ 28 วัน

จากผลการทดลองพบว่า การใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น การใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้เมื่อกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม

Abstract

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing silica fume. The silica fume was used to replace binder content at 5%, 7.5%, 10% and 15% by weight. The water to binder ratios were kept at 0.40 and 0.50. Cube specimens of $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ size were cast for testing the compressive strength of concrete at 7, 14, 28, 56 and 91 days. Cylindrical specimens of 10-cm diameter and 20-cm height size were cast for testing the rapid chloride penetration of concrete at 7, 28 and 91 days and chloride penetration of concrete submerged in 5.0% solution of sodium chloride for 28, 56 and 91 days after curing in pure water for 28 days.

From the experimental results, it was found that the use of silica fume to replace cement in concrete results in higher compressive strength and better chloride penetration resistance. The replacement of silica fume in concrete at 15% of binder gives the highest compressive strength and chloride penetration resistance. Concretes containing silica fume at low water to binder ratio have better chloride penetration resistance than those at high water to binder ratio. From the relationship between compressive strength and charge passed of concrete and the relationship between compressive strength and chloride diffusion coefficient of concrete, the charge passed and the chloride diffusion coefficient of concrete can be determined when the compressive strength of concrete is given.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ซิลิกาฟุ่ม	4
2.2 ความต้านทานของคอนกรีตต่อการแทรกซึมคลอไรด์	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	25
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	31
3.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต	43
3.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต	50
3.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	62
4.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต	62
4.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต	68
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต	77
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีต	81

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล	89
5.1 สรุปผล	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
ผลผลิต (Output)	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์, และซิลิกาฟูม	5
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	6
ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม	8
ตารางที่ 2.4 ปริมาณคลอไรด์ในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต	11
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟูม	28
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้	44
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 1202	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟุ้งควบแน่น	6
รูปที่ 2.2 ที่มาของคลอไรด์	10
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion reaction of steel)	12
รูปที่ 2.4 แผนภาพกระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต	14
รูปที่ 2.5 แนวความคิดแบบจำลองอายุการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต	15
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของโครงสร้างถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล	16
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	26
รูปที่ 3.2 ซิลิกาฟุ้ง (silica fume)	26
รูปที่ 3.3 มวลรวมหยาบ (หิน)	27
รูปที่ 3.4 มวลรวมละเอียด (ทราย)	27
รูปที่ 3.5 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	29
รูปที่ 3.6 รูปร่างอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง	30
รูปที่ 3.7 แบบหล่อก่อนตัวอย่างคอนกรีตกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร	31
รูปที่ 3.8 แบบหล่อก่อนตัวอย่างคอนกรีต สูง 10 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร	31
รูปที่ 3.9 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า	32
รูปที่ 3.10 เซลล์ทดสอบ RCPT	32
รูปที่ 3.11 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต	33
รูปที่ 3.12 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)	33
รูปที่ 3.13 ซ้อนตักสาร	34
รูปที่ 3.14 บีกเกอร์ขนาด 250 ml	34
รูปที่ 3.15 บีกเกอร์ขนาด 1000 ml	35
รูปที่ 3.16 กรวย	35
รูปที่ 3.17 ชุดประกอบเซลล์ทดสอบ	36
รูปที่ 3.18 ซิลิโคน	36
รูปที่ 3.19 เครื่องดูด Suction apparatus	37
รูปที่ 3.20 เครื่องต้ม (Hot plate)	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.21 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม	38
รูปที่ 3.22 กรวยสำหรับกรองสารละลาย	38
รูปที่ 3.23 ขวด Suction Flask	39
รูปที่ 3.24 เครื่อง Potentiometric titration	39
รูปที่ 3.25 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	40
รูปที่ 3.26 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	40
รูปที่ 3.27 กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น 69%	41
รูปที่ 3.28 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 35%	41
รูปที่ 3.29 สารละลายมาตรฐาน 0.1M ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO ₃)	42
รูปที่ 3.30 สารกั้นซีเมนต์เคลือบชั้นตัวอย่างทดสอบ อีพ็อกซี่ (Epoxy)	42
รูปที่ 3.31 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร × 10 เซนติเมตร	43
รูปที่ 3.32 รายละเอียดเซลล์ทดสอบ RCPT	45
รูปที่ 3.33 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์บันทึกผลต่อเข้ากับเซลล์ทดสอบ	46
รูปที่ 3.34 การเรียกใช้โปรแกรมใช้งาน	47
รูปที่ 3.35 การเข้าสู่โปรแกรม	48
รูปที่ 3.36 การกรอกข้อมูลสำหรับการทดสอบ	48
รูปที่ 3.37 หน้าต่างแสดงรายละเอียดระหว่างทดสอบ	49
รูปที่ 3.38 ตำแหน่งที่เก็บบันทึกข้อมูลที่ทดสอบ	49
รูปที่ 3.39 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร × 10 เซนติเมตร	50
รูปที่ 3.40 ตัวอย่างบ่มในน้ำที่อายุ 28, 56, และ 91 วัน	50
รูปที่ 3.41 ชั้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยอีพ็อกซี่	51
รูปที่ 3.42 การแช่ตัวอย่างในสารละลายเกลือเข้มข้น 5.0%	51
รูปที่ 3.43 ชั้นคอนกรีตที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม.	52
รูปที่ 3.44 ชั้นคอนกรีตทรงกระบอกที่ตัดแล้วมาทำให้เป็นผง	52
รูปที่ 3.45 ผงคอนกรีต	53
รูปที่ 3.46 คอนกรีตที่บดแล้วจำนวน 3 กรัม	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.47 เติมน้ำกลั่น 50 ml	55
รูปที่ 3.48 คัมตัวอย่างประมาณ 2 ถึง 3 นาที	55
รูปที่ 3.49 ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	56
รูปที่ 3.50 กรวยกรองที่รองกระดาษกรอง	56
รูปที่ 3.51 การกรองสารละลายตัวอย่าง	57
รูปที่ 3.52 เติมกรด Nitric acid 3ml และ Hydrogen peroxide 3 ml	57
รูปที่ 3.53 คัมตัวอย่าง ประมาณ 2-3 นาที	58
รูปที่ 3.54 ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็น โดยแช่ในอ่างน้ำเย็น	58
รูปที่ 3.55 การทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration	59
รูปที่ 3.56 คอนกรีตทรงลูกบาศก์	61
รูปที่ 3.57 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	61
รูปที่ 4.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	63
รูปที่ 4.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	65
รูปที่ 4.3 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	66
รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะการบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 91 วัน	67
รูปที่ 4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	69
รูปที่ 4.6 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	70
รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	74
รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และ 56 วัน	76
รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	79
รูปที่ 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 7.5 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 91 วัน	79
รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56, และ 91 วัน	80
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ในระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	82
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ในระยะเวลาการบ่ม 7, 28, และ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	82
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 56 วัน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	85
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 56 วัน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	85
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	87
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาเหล็กเสริมเกิดสนิมเป็นปัญหาที่พบบ่อยมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ทำลายคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม หรือจากการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริมใน โครงสร้างมีความ สำคัญ ต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของ โครงสร้างเมื่อเหล็กเสริมใน โครงสร้าง เกิดการกัดกร่อนเป็น สนิมหน้าตัดของเหล็กเสริมจะลดลงจนกระทั่งอาจไม่เพียงพอ ต่อความปลอดภัยในการใช้งาน นอกจากนี้การเกิดสนิมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก เนื่องจาก ปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดสนิมและจะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อ คอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตหุ้มที่มี ความหนาอยู่นั้นเกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายกับ โครงสร้างมากยิ่งขึ้นเมื่อมีการ ก่อสร้างโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นชายฝั่งทะเล หรือ พื้นที่ที่เป็นน้ำกร่อย จึงมีโอกาสดัมผัสกับความชื้น ไอเกลือ และน้ำทะเลโดยตรง อยู่ตลอด ซึ่งสภาพดังกล่าวมีผลต่อ การทำลาย และลดอายุการใช้งานของ โครง สร้างคอนกรีตได้อย่างชัดเจน ส่วนความเสียหายที่เกิด ขึ้นสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การกระทำทางเคมี (Chemical Action) ได้แก่ การเสียหายจากคลอไรด์ และ การเสียหายจากซัลเฟต การกระทำทางกายภาพ (Physical Action) ได้แก่ การกัดกร่อนจาก คลื่น แรงดึงผิว และแรงดันน้ำ การเสียหายเนื่อง จากคลอไรด์ ถือเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้คอนกรีต เกิดความเสียหายมากที่สุด เพราะว่าไอออนของคลอไรด์ จะทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กเข้าไปทำ ปฏิกิริยากับเหล็กเสริมจนก่อให้เกิดสนิม เมื่อปริมาณเหล็กเสริมมีมากขึ้น ก็จะเกิดแรงดันทำให้ คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ จึงส่งผลให้ความคงทน และอายุการใช้งานลดลง เกิดการสิ้นเปลืองใน การซ่อมแซม หรือการก่อสร้างใหม่ขึ้น ทดแทนวิธีการที่จะยืดอายุการใช้งานของ โครงสร้าง คอนกรีตนั้นจำเป็นจะต้องทำให้ผิวของคอนกรีตมีความแข็งแรงโดยการเพิ่มสิ่งกีดขวางบางอย่างเข้าไป ในเนื้อของคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพ ในการยับยั้งการแพร่ของเกลือคลอไรด์ได้ การใช้วัสดุ ปอชโซลาน เช่น ซิลิกาฟูม (silica fume) ในแง่ของการพัฒนากำลังอัดซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกาฟูม เหมือนว่าจะเป็นวัสดุที่ใช้อย่างแพร่หลายมากกว่า เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าผงปูนซีเมนต์ มาก จึงเข้าไปอัดแน่นในช่องว่าง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นช่วยป้องกันการกัดกร่อนจาก สภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ การที่ซิลิกาฟูมมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบกว่าร้อยละ 90 ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอชโซลานิกได้อย่างรวดเร็ว เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื่องจากเกลือคลอไรด์เป็นส่วนประกอบหลักของน้ำทะเลที่เป็นสาเหตุหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อที่จะได้รับทราบถึงผลของอัตราการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน และผลของการใช้ซิลิกาฟูมในส่วนผสมของคอนกรีตจะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม อาทิ เช่น ซิลิกาฟูม ให้มีความต้านทานเกลือคลอไรด์ได้ดี ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมาย เพื่อที่จะศึกษาความต้านทานเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมซึ่งจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารปอซโซลานในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเพื่อสามารถนำไปทำนายปริมาณการกระจายตัวของคลอไรด์ในคอนกรีต และทำนายระยะเวลาที่เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตแบบแรง และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม โดยการศึกษาในครั้งนี้จะมุ่งเน้นถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เพราะเมื่อคอนกรีตต้านทานเกลือคลอไรด์ได้มากก็จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมทำให้สามารถนำไปทำลายปริมาณการกระจายตัวของคลอไรด์ในคอนกรีต และยังสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบโครงสร้างของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล และสภาวะแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากคลอไรด์ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม
2. เพื่อศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม ทั้งแบบแรงด้วยกระแสไฟฟ้า และแบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์
3. เพื่อหาส่วนผสมของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่มีกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการศึกษากำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมในอัตรา ส่วนแทนที่วัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต 0.40 และ 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่ซิลิกาฟูม 0%, 5%, 7.5%, 10% และ 15% ในการหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ความลึก 10 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร และความต้านทานคลอไรด์แบบแรง

โดยใช้ ตัวอย่าง คอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร นำมาตัดเป็นแผ่นหนา 5 เซนติเมตร แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำประปา ก่อนการทดสอบ ทดสอบกำลังอัด 7, 14, 28, 56, 91 วัน ทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแรง 7, 28, 91 วัน ทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ 28, 56 และ 91 วัน ภายหลังจากบ่มน้ำ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม
2. ทำให้ได้ทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม ทั้งแบบแรงด้วยกระแสไฟฟ้า และแบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์
3. ทำให้ทราบส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมซึ่งมีทั้งกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume)

2.1.1 ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed silica fume)

เป็น วัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 °C ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO₂ ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 mm และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 ม²/ก (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 mm) เป็นขนาดเล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆจึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีต คือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของ ซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้าโรงงานของ Silicon Metal and Ferrosilicon Alloy จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่วนในโรงงาน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และ พบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีนักเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่ำ

ประโยชน์ของซิลิกาฟุ้ง

1. ลดการซึม (Bleeding) และการแยกตัวของคอนกรีตสด
2. เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว
3. เพิ่มความหนาแน่น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมาก ส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่น ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟูมมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ จะพบว่ามียังองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตารางที่ 2.1

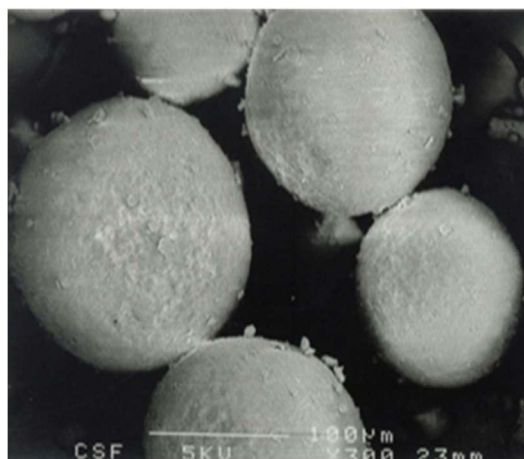
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ และซิลิกาฟูม

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ซิลิกาฟูม
SiO_2	20	92
Al_2O_3	5	0.7
Fe_2O_3	3	1.2
CaO	60	0.2
MgO	1.1	0.2
SO_3	2.4	“;”
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	2.6
LOI.	2	“;”

2.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติ ทางกายภาพของซิลิกาฟูมที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีค่อนข้างดำหรือเทา หรือเทาอมขาวที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตซิลิกาฟูมจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากรวมตัวของ ซิลิกาฟูมหลายๆ เม็ดรวมเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียด ทดสอบ โดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 cm^2/g ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3,400 cm^2/g ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1mm ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 mm เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมาก จึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซิลิกาฟูมมา

อัด รวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า คอนกรีตซิลิกาฟูม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟูมควบแน่น

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบรค (ซม ² /ก)	3,400	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.20
สี	เทา	เทาดำ, เทาอมขาว

2.1.4 การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีต

ในประเทศไทย อเมริกา และยุโรป จะใช้ซิลิกาฟูมในการผสมคอนกรีตโดยการผสม “แยก” กล่าวคือใส่ซิลิกาฟูมในการผสมคอนกรีต แต่ที่ประเทศแคนาดานอกจากการผสมแยกแล้ว ยังมีการใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ราว ร้อยละ 8 เนื่องจากซิลิกาฟูม มีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งหรือใช้งานมากพอสมควร เพราะหากไม่ระวังให้ดีอาจปลิวไปตามลมได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟูมในรูปที่ผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น (Slurry form) อย่างไรก็ตาม โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายๆ แห่งยังคงใช้ซิลิกาฟูมในรูปของผงหรือคอนกรีตซิลิกาฟูม เช่นเดิม สำหรับอันตรายของการสูดซิลิกาฟูมเข้าไปทางลมหายใจยังไม่มีรายงานที่เด่นชัดนัก แต่วัสดุที่ละเอียดขนาดนี้ไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตาม ล้วนเป็น

วัตถุหรือสิ่งแปลกปลอมของร่างกายทั้งสิ้น จึงควรหลีกเลี่ยงให้ได้รับเข้าสู่ร่างกายให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ นอกจากนี้ U.S. Occupational Safety and Health Agency (OSHA) ได้ระบุไว้ว่าปริมาณฝุ่น ในที่ซึ่งปฏิบัติงานไม่ควรสูงเกิน 15 มก/ม³ ส่วน American Conference of Governmental Industrial Hygienists ให้ค่าที่ต่ำกว่าคือปริมาณของฝุ่นในที่ทำงานไม่ควรเกิน 10 มก/ม³ ซึ่งถ้าปริมาณของฝุ่นที่เกิดในที่ทำงานมีค่าเกินนี้จะต้องใช้น้ำกากกันฝุ่นสวมป้องกันในขณะที่ทำงาน การใช้คอนกรีตซีเมนต์แทนซีเมนต์จะสามารลดปัญหานี้ได้เพราะคอนกรีตซีเมนต์จะมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และไม่ปลิวลมง่ายนัก

2.1.5 ผลกระทบของซีเมนต์ต่อการผสมและการเย็บน้ำ

เนื่องจากซีเมนต์มีความละเอียดสูงมาก ดังนั้นเมื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้น ซึ่งแนวทางแก้ไขในปัญหานี้คือการใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วย เพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตนั้นสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงตามกฎของ Abram's ส่วนการเย็บน้ำในคอนกรีตที่มีซีเมนต์พบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ซีเมนต์

2.1.6 ผลกระทบต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นในคอนกรีต

การใช้ซีเมนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่ได้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ให้ต่ำลง ดังนั้นการใช้ซีเมนต์เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอุณหภูมิเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงควรหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อกำลังอัด ซีเมนต์นิยมใช้เป็นวัสดุหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก (120 MPa ที่อายุ 90 วัน) โดยการใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งคอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีการซึมผ่านที่ต่ำมากด้วย เพราะซีเมนต์จะไปอุดพวกโครงสร้างของ Pore ของไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ไว้ การใช้ซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่น ใช้ซีเมนต์ 1 กก. แทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กก. ในคอนกรีตแต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วันที่เท่ากัน เพื่อให้เห็นภาพของการใช้ซีเมนต์ในคอนกรีต พิจารณาตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตของ Hooton (1993) ที่ใช้ซีเมนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ + ซีเมนต์) โดยในการทดลองของ Hooton พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีซีเมนต์เป็นส่วนผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วันค่อนข้างมาก กล่าวคือคอนกรีตธรรมดา (ไม่มีซีเมนต์) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 55.6 MPa แต่เมื่อใช้ซีเมนต์ร้อยละ 10 (ส่วนผสมที่ 2), ร้อยละ 15 (ส่วนผสมที่ 3), และร้อยละ 20 (ส่วนผสมที่ 4) ทำให้กำลังอัดมีค่าเป็น 70.7 MPa, 75.2 MPa, และ 74.2 MPa ตามลำดับ แต่คอนกรีตเหล่านี้เมื่อปล่อยให้มียุครบ 5 ปี กลับพบว่าคอนกรีตที่มีซีเมนต์มากๆ (ร้อยละ 20) มีกำลังอัดลดลง กล่าวคือมีกำลังอัดเท่ากับ 70.3 MPa. ส่วนที่มี

ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 79.6 MPa และ 68.6 MPa ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตที่ไม่มีซิลิกาฟูมกลับมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มจาก 55.6 MPa ที่อายุ 28 วันมาเป็น 86.0 MPa ที่อายุ 5 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 10 ของวัสดุประสานจะให้ค่ากำลังที่ดีทั้งที่อายุ 28 วัน และ 5 ปี

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม

ส่วน ผสมที่	อัตราส่วนผสม (kg/m ³)					สารลด น้ำ พิเศษ (ml/kg CM)	ค่า ยวบตัว (mm)	กำลัง อัดที่ 28 วัน (MPa)	กำลังดึง ผ่าซีก ที่ 28 วัน (MPa)
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกา ฟูม	ทราย	หิน	น้ำ				
1	401	0	729	1211	141	16.1	75	55.6	5.2
2	361	40	725	725	141	18.2	75	70.7	6.3
3	341	60	719	719	140	21.4	60	75.2	6.2
4	320	80	716	716	139	26.2	60	74.2	4.6

2.1.7 ความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี

การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต การแทรกซึมของคลอไรด์ รวมถึงการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็ม (น้ำทะเล) ด้วย เหตุที่การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีข้างต้นลดลง อาจเนื่องมาจากการที่โครงสร้างของ Pore ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กลงนั่นเอง

ในปัจจุบันพบว่าซิลิกาฟูมนิยมใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลักสิ่งที่ควรระมัดระวังให้มากคือการผสมซิลิกาฟูมในคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วกัน ควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟูมสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษได้ดีเพียงใดเพื่อที่จะได้ไม่ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมากเกินไป

2.1.8 ปฏิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

การใช้ซิลิกาฟูมจะทำให้การขยายตัวเนื่องจากปฏิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีตลดลง Malhotra กล่าวว่า การใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 15 ช่วยลดการขยายตัวของปฏิริยาของอัลคาไล-ซิลิกาได้ดีเช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 หรือใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 ส่วน Hooton รายงานว่า การใช้ซิลิกาฟูม ถึงร้อยละ 20 จะลดการขยายตัวได้มากกว่าการใช้ซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 และการใช้เพียงร้อยละ 10 ก็เพียงพอที่จะลดปัญหาการขยายตัวของปฏิริยาของอัลคาไล-ซิลิกาได้

2.2 ความต้านทานของคอนกรีตต่อการแทรกซึมคลอไรด์

2.2.1 การเกิดสนิมในเหล็กเสริม

เป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อยด้วย เนื่องจากผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีไอเกลือและความชื้นตลอดเวลา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรกที่ทำให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลง ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไขปัญหา ฉะนั้นรายงานนี้จึงเป็นการค้นคว้ารายงานการวิจัยว่าด้วยเรื่องการซึมผ่านของคลอไรด์ในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

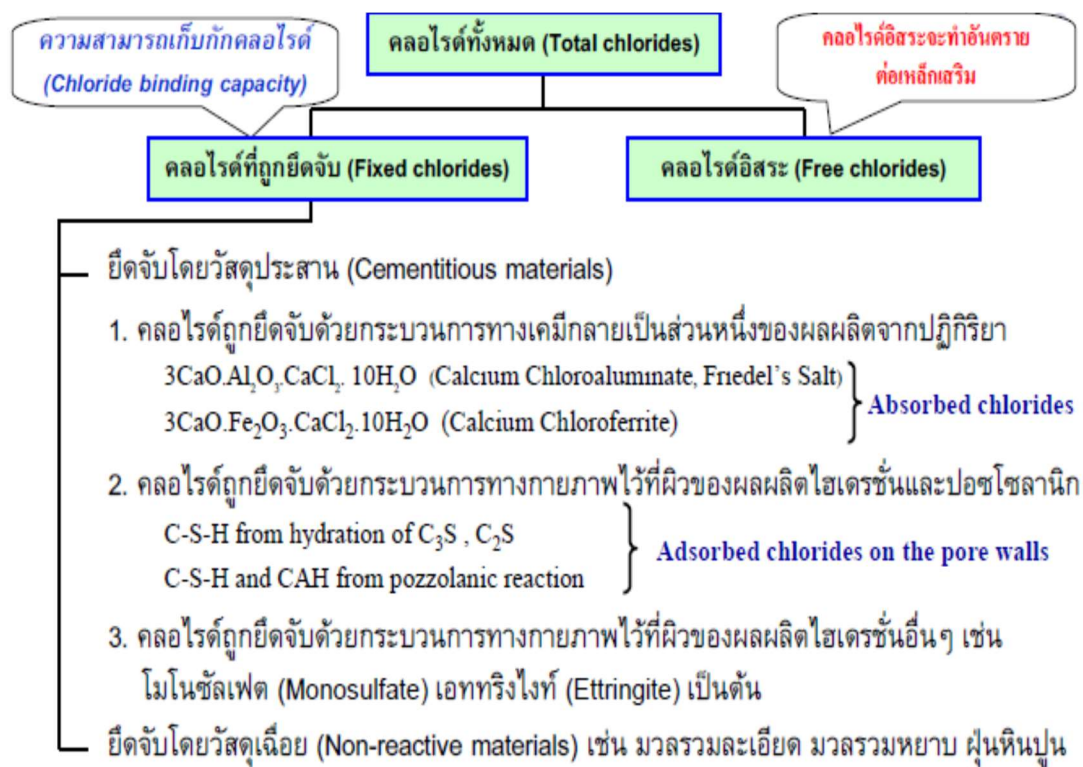
2.2.2 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่นในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหินทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาคลอไรด์แต่ปัญหาคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-Icing Salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้น มาจากน้ำทะเล ซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอหรือไม่มีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่เกิดขึ้น

โดยทั่วไปแล้วเราทราบว่าปริมาณของคลอไรด์มีมากในน้ำทะเลคือมีประมาณ 90% ซึ่งสารประกอบต่างๆของคลอไรด์ในน้ำทะเลประกอบด้วย เกลือของคลอไรด์ในรูปของสารประกอบ

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) ประมาณ 3,200 ppm. และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ประมาณ 500 ppm.

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) ดังกล่าวนั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์ในสองประเภทคือ 1. Bound chloride คือคลอไรด์ส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium Chloro-Aluminate Hydrate (Friedel's salt) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ Gel pores ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่มีผลต่อกระบวนการเกิดสนิม 2. Free chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถที่จะแพร่เข้าไปยังคอนกรีต ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ดังนั้นหากเราสามารถจับยึดคลอไรด์ในส่วนนี้ไว้ได้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไป



รูปที่ 2.2 ที่มาของคลอไรด์

[ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกัน และแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก]

2.2.3 ปริมาณของคลอไรด์ตามที่มาตรฐานกำหนด

ปริมาณการปนเปื้อนของคลอไรด์ในน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต ควรมีปริมาณไม่เกินค่าในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณคลอไรด์ในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต

ปริมาณสารในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต	ปริมาณที่ยอมให้ (ppm)
คลอไรด์	
- สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงหรืองานสะพาน	500
- สำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป	1,000

2.2.4 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล (และในน้ำกร่อย) ซึ่งมีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีตได้ ถ้าหากว่าอยู่ในสภาพหรือมีปัจจัยที่เหมาะสม โดยคลอไรด์ที่มีบทบาทที่สำคัญในการทำลายจะเป็นในส่วนของคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งการทำลายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

การซึมผ่านของคลอไรด์อิสระจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ มีน้ำอยู่ในระบบโพรงที่อยู่หนึ่ง ในคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งน้ำจะเป็นตัวพาคลอไรด์อิสระเข้าไปในคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำจะเป็นตัวกลางให้คลอไรด์อิสระผ่านเข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์อิสระจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

การซึมผ่านของคลอไรด์อิสระ ขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตในหลายๆด้าน เป็นต้นว่า ด้านความพรุนของเนื้อคอนกรีตเอง ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพของการบ่ม สภาพของอุณหภูมิทั้งในขณะผสม-เท-บ่ม ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์โดยรอบ เป็นต้น ซึ่งหากคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่เพียงพอแล้ว จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้

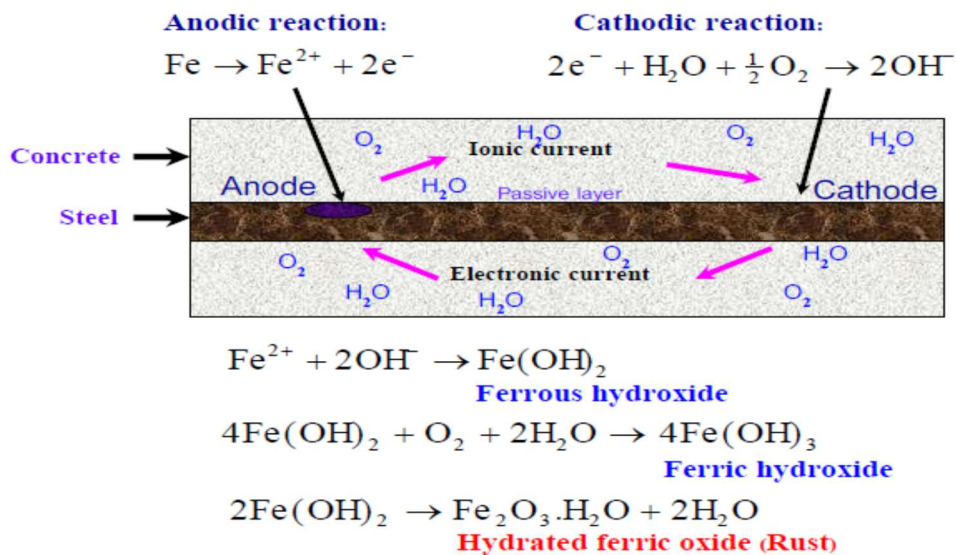
โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการซึมผ่านของคลอไรด์อิสระนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้

1. โดยการแพร่กระจาย (Diffusion): เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต
2. โดยการเคลื่อนย้าย (Migration): เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของอิสระ) ในคอนกรีต

3. โดยการพา (Convection): เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเกิด Capillary suction นั้นเอง
4. โดยการซึมผ่าน (Permeability): เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้าน hydraulic pressure ในคอนกรีต

2.2.5 ปฏิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

ปริมาณของ Chloride เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริมและถ้าหากว่ามีปริมาณมากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจมีผลทำให้ Passivity Film ไม่เกิดขึ้นได้ โดยปฏิริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ “ปฏิริยาไฟฟ้า-เคมี” โดยมีคลอไรด์ประพุดิตัวในลักษณะคล้ายกับเป็นตัวเร่งปฏิริยาการกัดกร่อน เหล็กเสริมในคอนกรีต จะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective passivity layer) บางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริมเรียกว่าฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับผิวของเหล็กเสริมได้ (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) มากเกินกว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content) ของคอนกรีต ชั้นของฟิล์มออกไซด์ของดังกล่าวจะถูกทำลาย เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ซึ่งเรียกว่า Depassivation และในขณะเดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่เหมาะสม กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีก็จะเกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 ปฏิริยาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion reaction of steel)

[ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกัน และแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก]

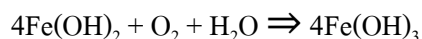
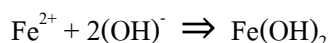
กล่าวคือ เหล็กเสริมบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า ปฏิกิริยาอโนดิก (Anodic reaction) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



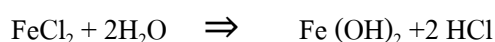
อิเล็กตรอน(e⁻) ที่เกิดขึ้นนี้ จะไหลผ่านผิวเหล็กเสริมไปยังเหล็กเสริมบริเวณที่ฟิล์มไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนได้ ก็จะได้อิออนไฮดรอกซิล (OH⁻) เรียกว่า ปฏิกิริยาคาโทดิก (Cathodic reaction)



ในขณะที่ขั้วลบ อิออนส่วนหนึ่งก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน กลายเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxide) หรือสนิมเหล็ก

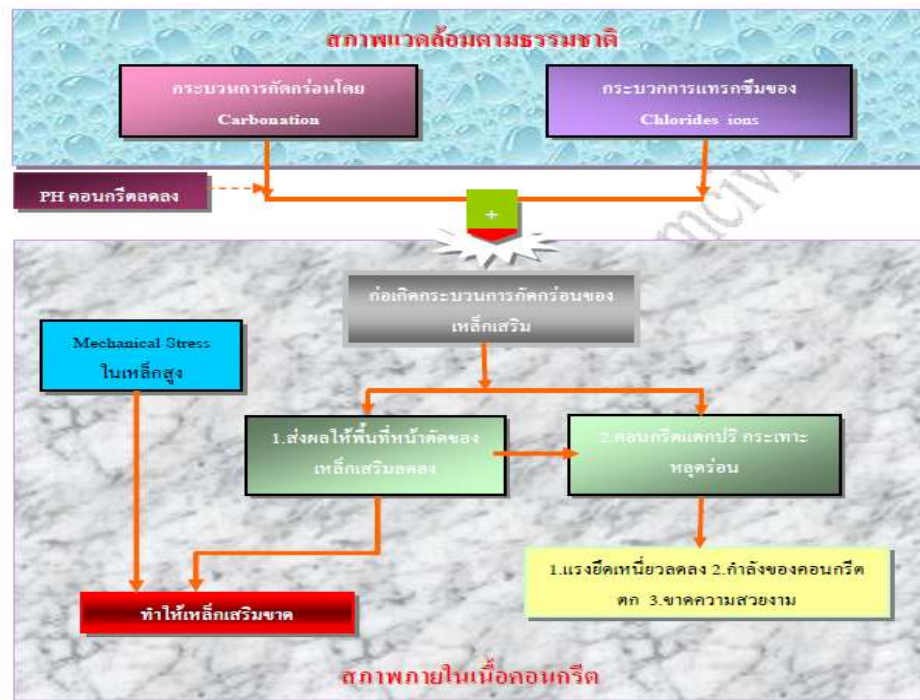


นอกจากนี้ ที่ขั้วลบ เกิดการทำปฏิกิริยากับ Cl⁻ เกิดเป็น เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₂) และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็กเพิ่มเติม



2.2.6 กลไกการทำลายเนื่องจากคลอไรด์

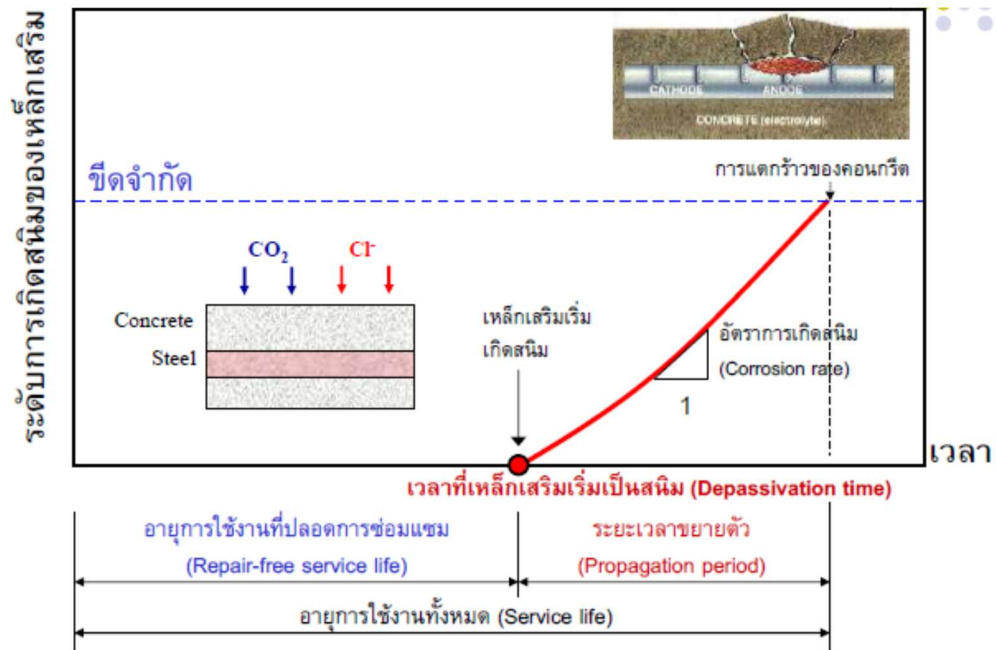
กลไกการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ เกิดขึ้นเมื่อคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตแล้วไปในคอนกรีตตรงบริเวณที่ซิดผิวเหล็กเสริมจนกระทั่งมีปริมาณคลอไรด์ที่สะสมมากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content) ของคอนกรีต ก็ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม ส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีตบริเวณนั้น



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพกระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต

[ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกัน และแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก]

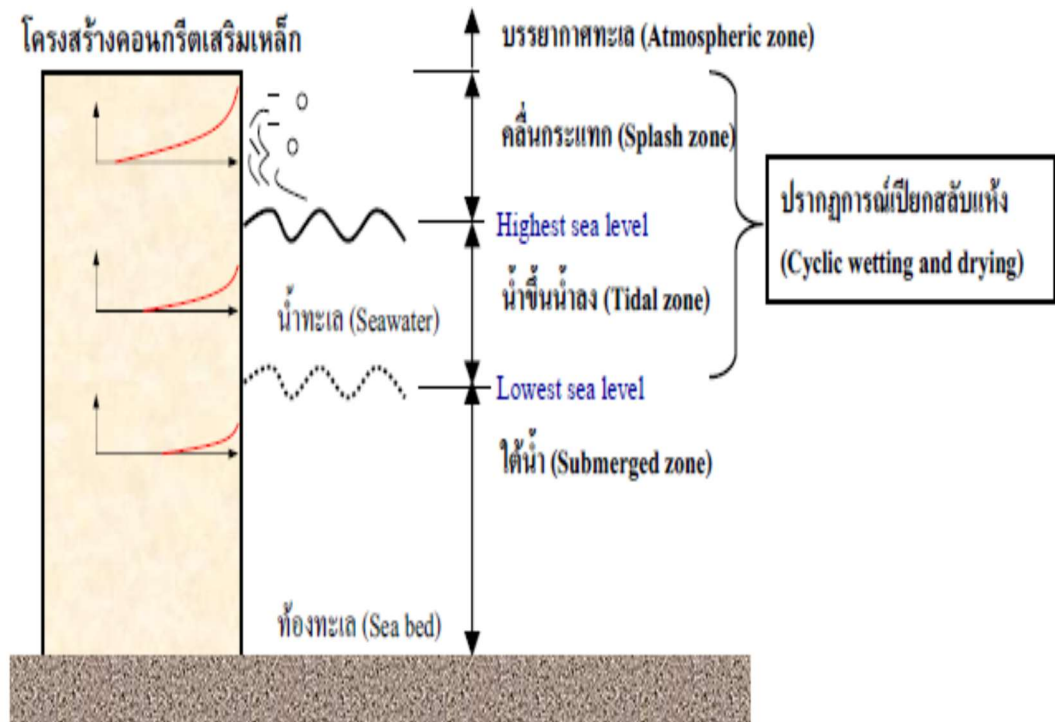
จากรูปที่ 2.5 การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1) Initial period หรือ Repair-free service life จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ (Threshold chloride content) ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบตามผิวเหล็กเสริมเสียหาย หลังจากนั้นตามด้วย 2) Propagation period ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.5 แนวความคิดแบบจำลองอายุการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

[ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกัน และแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก]

จากรูปที่ 2.6 โครงสร้างคอนกรีตส่วนที่เผชิญสภาพแวดล้อมของทะเล ที่นับว่ารุนแรงในแง่ของการเกิดสนิมคือ ส่วนที่เผชิญสภาวะการเปียกสลับแห้งเป็นวัฏจักร (Cyclic wetting and drying) โดยเฉพาะถ้ามีช่วงที่แห้งยาวนานกว่าช่วงที่เปียก การเกิดสนิมก็จะยิ่งรุนแรงมากขึ้นซึ่งทำให้สามารถจัดระดับส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเรียงกันลงไปตามลำดับที่ต้องเผชิญความรุนแรงจากทะเลได้ดังนี้ 1) ส่วนที่อยู่เหนือผิวน้ำที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) 2) ส่วนที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุด (Tidal zone) และ 3) ส่วนที่อยู่เหนือผิวน้ำที่อยู่ในบรรยากาศทะเล (Marine atmospheric zone) ซึ่งในสภาพแวดล้อมเหล่านี้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาที่จะเกิดสนิมขึ้นได้รวดเร็วกว่า การทำลายโดยน้ำทะเลจะเกิดขึ้นได้ทั้งจากสาเหตุจากเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ แต่ต้นเหตุการเกิดสนิมเหล็กของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดจากเกลือคลอไรด์เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 90% ของเกลือทั้งหมดในน้ำทะเล)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของโครงสร้างถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล
 [ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกัน และแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

2.3.1 การนำซิลิกาฟูมมาใช้ในงานคอนกรีต

Sobhani and Najimi (2013) ได้ศึกษาวิจัยการประเมินพฤติกรรมความต้านทานไฟฟ้าเคมี และคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูม ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ไฟฟ้าเคมีและคุณสมบัติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นการปรับปรุงคุณสมบัติของ การตอบสนองทางไฟฟ้าเคมี และอัตราการกัดกร่อนของการศึกษา ส่วนผสมเมื่อใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมเพิ่มในวัสดุซีเมนต์ และหรืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง การปรับปรุงเนื่องจากผลรวมของซิลิกาฟูมต่ำกว่าส่วนผสมอื่นที่เกี่ยวข้องจะลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลง ความต้านทาน อิเล็กโทรไลต์ ความต้านทาน ขั้วไฟฟ้า และความต้านทานต่อการถ่ายโอนไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์สูงสุดกับการซึมผ่านของคลอไรด์อย่างรวดเร็ว การซึมผ่านและการดูดซึมน้ำ ตามลำดับ

Khan and Siddique (2011) กล่าวว่าได้ตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นและผลกระทบที่อาจเกิดอันตรายจากการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ สำหรับการกำจัดซิลิกาฟูม (SF) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการถลุงในอุตสาหกรรมซิลิกอน และเฟอร์โรซิลิกอน ซิลิกาฟูมมีประสิทธิภาพมากในการออกแบบและพัฒนาในด้านความแข็งแรง คอนกรีตประสิทธิภาพสูง จากบทความครอบคลุมทางกายภาพทางเคมีของซิลิกาฟูมและกลไกปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับผลกระทบของซิลิกาฟูมเมื่อซึมผ่าน แชนแนล และความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานซัลเฟต คาร์บอน และความต้านทานมวลรวมต่างของคอนกรีต

Song et al (2010) ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพและความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับกระบวนการซึมผ่านของคอนกรีต ซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมแร่ธาตุสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตประสิทธิภาพสูง (High performance) ที่ไม่ต่อเนื่องและโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุนในคอนกรีต ลดการซึมผ่านที่สูงกว่าที่มีซิลิกาฟูมเนื่องจากการปรับแต่งขนาดของรูพรุนและบีบอัดแบบเมตริกซ์การลดลงของ Ca(OH)_2 ในคอนกรีตและการปรับแต่งการสัมผัสมวลรวมซีเมนต์เฟลส ในระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่สัมผัสเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานีระหว่างซิลิกาฟูมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ตามแบบโครงสร้างจุลภาคการพัฒนาขั้นตอนในการทำนายการซึมผ่านของซิลิกาฟูม ซีเมนต์คอนกรีตกำลังสูงคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ อัตราส่วนการแทนที่ซิลิกาฟูม และระดับของไฮเดรชันเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญ ผลของการคำนวณการซึมผ่านโดยใช้ขั้นตอนที่มีการยืนยันด้วยเอกสารอ้างอิงที่มี ต่อมาจะมีการประเมินผลกระทบของซิลิกาฟูมกับการซึมผ่านของคอนกรีต สุดท้ายอัตราส่วนการแทนที่ซิลิกาฟูมสูงสุดที่ช่วยลดการซึมผ่านของคอนกรีต

Al-Mehthel et al (2009) ได้นำเสนอผลการศึกษาศึกษาการปรับปรุงการต้านทานการเกิดสนิมของคลอไรด์ปนเปื้อนของซิลิกาฟูมในคอนกรีตเนื่องจากการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมสามคุณสมบัติและหนึ่งสารยับยั้งการเกิดสนิมทั่วไปมีการประเมินประสิทธิภาพการทำงานในสารยับยั้งการเกิดสนิมเหล็กเสริมในซิลิกาฟูมซีเมนต์คอนกรีตที่ปนเปื้อนด้วยของคลอไรด์เข้มข้น 0.4%, 1% และ 2% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ บางส่วนของตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะวงจรเปียกและแห้งและการเกิดสนิมได้รับการตรวจสอบโดยการวัดศักย์ภาพการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสการเกิดสนิมชุดของคอนกรีตอีกบางส่วนที่แช่ในสารละลายคลอไรด์และการเกิดสนิมถูกเร่งให้เร็วขึ้นโดยอ้างอิงข้อมูลจากศักย์ภาพขั้วบวกที่ 2 V ขอบเขตของการเกิดสนิมที่เพิ่มขึ้นกับการปนเปื้อนคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตการรวมตัวของสารยับยั้งทั่วไปลดลงโดยอัตราส่วนของการเกิดสนิมเหล็กเสริมอัตราของการเกิดสนิมเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตที่ยับยั้งสารอินทรีย์ถูกเพิ่มเข้าไปในระหว่างการผสมคอนกรีตอย่างน้อยตามที่ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งยับยั้งกระบวนการเจาะนำมาประยุกต์ใช้นอกจากนี้ข้อมูลอ้างอิงเทคนิคการเร่งหมุนเวียนถูกบันทึกสังเกตเห็นความเหมาะสมสำหรับการคัดกรองอย่างรวดเร็วของประสิทธิภาพการทำงานของสารยับยั้งการเกิดสนิม

Kulakowski et al (2009) ได้นำเสนอผลของความเข้มข้นคาร์บอนและปริมาณคาร์บอนให้เกิดสนิมเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตที่เพิ่มซิลิกาฟูมสูงถึง 20% และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.30-0.80 การเพิ่มจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.45-0.50 ความพรุนของวัสดุใช้ควบคุมกระบวนการคาร์บอนในวัสดุและจำนวนที่ใช้ของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีผลเล็กน้อยต่อคาร์บอน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น จำนวนการใช้ของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีบทบาทสำคัญ ในขณะที่เดียวกันการเกิดสนิมเหล็กเสริมระบุว่าผลกระทบของการเพิ่มซิลิกาฟูมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอน ในความเข้มข้นเท่ากับหรือต่ำกว่า 10% ซิลิกาฟูมจะไม่ลดความต้านทานการเกิดสนิมและมันอาจจะเพิ่มขึ้นจริงเมื่อใช้ในความเข้มข้นต่ำกว่าระดับนี้ เมื่อใช้ในความเข้มข้นมากกว่า 10% ซิลิกาฟูมจะเพิ่มศักยภาพในการเหนี่ยวนำคาร์บอนให้เกิดสนิมเหล็กเสริม

Al-Amoudi et al (2007) ได้ศึกษาวัสดุประสานเพิ่มเติม (SCMs) เพื่อปรับปรุงความคงทนของคอนกรีต ซิลิกาฟูมได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางทั่วโลกเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูงกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุประสานเพิ่มเติมอื่นๆ ในขณะที่คอนกรีตซิลิกาฟูมมีข้อได้เปรียบหลายอย่างกว่าซีเมนต์ผสมคอนกรีตอื่นๆ หลักๆคือการเพิ่มพลาสติกและหดตัวแห้งโดยเฉพาะภายใต้สภาพอากาศร้อน บทความนี้รายงานผลของการศึกษาคำแนะนำที่จะประเมินคุณสมบัติของตัวอย่างหล่อซีเมนต์คอนกรีตธรรมดาและซิลิกาฟูมซีเมนต์คอนกรีตและบ่มภายใต้สภาพอากาศร้อน มีการประเมินผลกระทบของขนาดตัวอย่างและวิธีการบ่มบนพลาสติกและการหดตัวแห้งบางส่วน

ของคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างซิลิกาฟุ้งซีเมนต์คอนกรีตและตัวอย่างซีเมนต์คอนกรีตธรรมดา ผลการศึกษาพบว่าประเภทของปูนซีเมนต์ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทั้งพลาสติกและการหดตัวของคอนกรีตที่ค่าเหล่านี้ในตัวอย่างซิลิกาฟุ้งซีเมนต์คอนกรีตมีมากกว่าในตัวอย่างซีเมนต์คอนกรีตธรรมดา ตามที่คาดไว้ความเครียดหดตัวในทั้งตัวอย่างหล่อซีเมนต์คอนกรีตธรรมดาและซิลิกาฟุ้งซีเมนต์คอนกรีตบ่มโดยบ่อน้ำที่ต่อเนื่องน้อยกว่าในตัวอย่างคอนกรีตที่เหมือนกันที่บ่มโดยใช้กระสอบเปียกน้ำ ผลลัพธ์ชี้ไปยังความสำคัญของการเลือกซิลิกาฟุ้งคุณภาพดีและการบ่มที่ดีสำหรับการหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเนื่องจากพลาสติกและการหดตัวโดยเฉพาะภายใต้สภาพอากาศร้อน

Toutanji and Bayasi (1999) ได้ศึกษาถึงผลของขั้นตอนการบ่มที่แข็งตัวแล้วของคอนกรีตซิลิกาฟุ้ง มีปริมาณของซิลิกาฟุ้งอยู่ 10%, 15%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ อัตราส่วนของวัสดุผสมรวมของซีเมนต์อยู่ระหว่าง 1-3.8 มีการใช้ 3 วิธีการบ่มที่แตกต่างกันบ่มใต้น้ำ บ่มชื้น และการบ่มอากาศ มีการพิจารณาสมบัติเชิงกลอย่างเช่นกำลังรับแรงอัด การซึมผ่านและช่องว่าง การบ่มใต้น้ำพบว่าช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตซิลิกาฟุ้ง ในขณะที่การบ่มอากาศให้ผลใกล้เคียงเมื่อเทียบกับการบ่มความชื้น ประสิทธิภาพในคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตซิลิกาฟุ้งจะเพิ่มขึ้นจากการบ่มใต้น้ำ แสดงให้เห็นจากความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นและการซึมผ่านและช่องว่างที่ลดลง

Babu and Prakash (1995) ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นส่วนผสมแร่ธาตุสำหรับการผลิตคอนกรีตประสิทธิภาพสูง (High performance) ในบทความนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของซิลิกาฟุ้งในคอนกรีต มักถูกตั้งข้อสังเกตจากการประเมินผลประสิทธิภาพของข้อมูลที่มีอยู่ของซิลิกาฟุ้งในคอนกรีต ค่าประสิทธิภาพโดยรวมทั้งหมดของซิลิกาฟุ้งสามารถประเมินได้ 2 ส่วน ปัจจัยประสิทธิภาพโดยทั่วไปคงที่ทั้งหมดร้อยละของการแทนที่และปัจจัยประสิทธิภาพร้อยละมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้รับจากข้อมูลก่อนหน้าที่ศึกษาเมื่อซิลิกาฟุ้งเกรดต่ำในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นค่าที่เสนอที่มีประสิทธิภาพมีขอบเขตที่ลดลงเพื่อให้บรรลุประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมีการผสมสัดส่วนที่เหมาะสม

2.3.2 กำลังของคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่ม

Atis et al (2005) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่ม ที่ศึกษาภายใต้เงื่อนไขการบ่มแบบแห้ง และแบบเปียกในการศึกษารวมทั้งสิ้น 48 คอนกรีต รวมถึงการควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และชิลิก้าฟุ่มของคอนกรีตด้วยกัน 4 แบบ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน (0.3, 0.4, 0.5, 0.6) มีปริมาณซีเมนต์แตกต่างกัน (350, 400, 450 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วนการแทนที่ชิลิก้าฟุ่ม 3 ส่วน (10%, 15%, 20%) Hyperplastisizer ถูกใช้ในคอนกรีตที่มีปริมาณต่างๆ ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ลูกบาศก์ 3 ตัวอย่างผลิตจากคอนกรีตสดถูกทดสอบหลังจากวันนั้นที่ 20 ± 2 องศาเซลเซียส กับความชื้นสัมพัทธ์ 65% และลูกบาศก์ 3 ตัวอย่างที่ 20 ± 2 องศาเซลเซียส กับความชื้นสัมพัทธ์ 100% จนกระทั่งตัวอย่างถูกนำมาใช้สำหรับการวัดที่ค่ากำลังอัด 28 วัน การเปรียบเทียบขั้นพื้นฐานของค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตระหว่างคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่มและการควบคุมคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่มถูกนำมาเปรียบเทียบการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65% ได้รับอิทธิพลมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65% ค่าเฉลี่ย 13% ต่ำกว่าของคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ทำให้คอนกรีตไวต่อสิ่งกระตุ้น เงื่อนไขการบ่มแห้งอิทธิพลของเงื่อนไขการบ่มแห้งของคอนกรีตผสมชิลิก้าฟุ่ม

Bhanja and Sengupta (2005) กล่าวว่าบทความนี้แสดงเกี่ยวกับการพัฒนาความเข้าใจที่ดีขึ้นของชิลิก้าฟุ่มต่อกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตประสิทธิภาพสูง (High performance concrete) การทดลองที่ครอบคลุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.26 - 0.42 และอัตราส่วนชิลิก้าฟุ่มต่อวัสดุประสานจาก 0.0 - 0.3 สำหรับส่วนผสมทั้งหมด มีการพิจารณาแรงอัด แรงคัด และแรงดึงแยกที่ 28 วัน แรงอัดรวมทั้งแรงดึงกำลังจะเพิ่มขึ้นกับชิลิก้าฟุ่มรวมตัวกัน และผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การแทนที่ที่เหมาะสมไม่ใช่ค่าคงที่อย่างแน่นอนแต่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุซีเมนต์ของส่วนผสม เมื่อเทียบกับแรงดึง แรงคัดมีการแสดงให้เห็นการพัฒนาที่มากขึ้น บนพื้นฐานของผลการทดลองมีการใช้วิธีการทางสถิติพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างแรงคัด 28 วันและแรงดึงกับแรงอัดของชิลิก้าฟุ่มในคอนกรีต

Rao (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของซีเมนต์กำลังสูง (High-Strength cement) กับชิลิก้าฟุ่มของมอร์ตาร์ มีการศึกษาผลกระทบของขนาดมวลรวมและผิวหน้าเฉพาะของมวลรวมกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัด มีการสังเกตการพัฒนากำลังเริ่มต้นมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มชิลิก้าฟุ่มในมอร์ตาร์มาก นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของมวลรวมและผิวหน้าเฉพาะมีบทบาทสำคัญต่อกำลังของมอร์ตาร์ กำลังของมอร์ตาร์ระยะแรกเพิ่มขึ้นและค่อยๆลดขนาดเม็ดลงและผิวหน้าเฉพาะของมวล

รวมเพิ่มขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น การสูญเสียกำลังที่มีนัยสำคัญสังเกตเห็นได้จากมอร์ตาร์ทั้งที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมที่ 180 วัน

Rao (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาของกำลังอัดกับอายุของมอร์ตาร์ร่วมกับซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ปริมาณซิลิกาฟูมต่างๆจาก 0%-30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 4 อัตราส่วน 0.35, 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีสังเกตการพัฒนาความแข็งแรงที่ 3, 7, 28 และ 90 วัน อัตราการพัฒนา กำลังที่สูงสุดพบในช่วงอายุต้นๆ (3 และ 7 วัน) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 มีค่าสูงสุดที่ 3 วันกับปริมาณของซิลิกาฟูม 22.5% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.40 และ 0.45 มีกำลังเพิ่มขึ้นถึงปริมาณสูงสุดของซิลิกาฟูมเกินกว่าที่จะลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเพิ่มขึ้น หลังจาก 7 วันการพัฒนา กำลังจะชะลอตัวลงอย่างมีนัยสำคัญที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหล่านี้ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 สังเกตเห็นการพัฒนา กำลังสม่ำเสมอที่อายุ 3, 7, 28 และ 90 วัน ขึ้นอยู่กับความพร้อมอย่างต่อเนื่องของปริมาณน้ำที่อายุทั้งหมด อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของกำลังของมอร์ตาร์ที่ 3 และ 7 วัน จนถึงกำลังที่ 28 วัน และที่ 3, 7 และ 28 วัน จนถึงกำลังที่ 90 วัน จะสังเกตเห็นว่าจะสูงขึ้นที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ซึ่งสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอื่นๆ

Duval and Kadri (1998) ได้ศึกษาความสามารถกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตซิลิกาฟูม ตรวจสอบได้จากอัตราน้ำต่ำสุดของส่วนประกอบซีเมนต์กับสารลดน้ำพิเศษ Naphthalene Sulphonate ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์บางส่วนถูกแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมได้ถึง 10% ซิลิกาฟูมไม่ได้ลดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต นอกจากนี้สารลดปริมาณของสารลดน้ำพิเศษขึ้นอยู่กับลักษณะของคอนกรีต (C_3A และค่าซัลเฟต) อัตราส่วนน้ำในส่วนประกอบซีเมนต์ที่ต่ำสุดการยุบตัวลดลงตามเวลาที่สังเกตและเพิ่มการแทนที่ที่สูงขึ้น ซิลิกาฟูมสามารถแทนที่ได้ถึง 20% ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีการควบคุมแต่ก็ยังคงให้ความแข็งแรงน้อยกว่า 15% ในบทความนี้เรานำเสนอรูปแบบการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซิลิกาฟูม ณ เวลาใดๆ รูปแบบที่เกี่ยวข้องกับส่วนประกอบวัสดุ น้ำ-ซีเมนต์และอัตราส่วนซิลิกา-ซีเมนต์ โดยคำนึงถึงข้อมูลการทดลองของผู้เขียนและนักวิจัยอื่นๆความถูกต้องของรูปแบบที่นำเสนอคือถึง 5%

Toutanji and El-Korchi (1995) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของซิลิกาฟูมในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์วัดได้จากการประเมินอัตราส่วนต่างๆของน้ำซีเมนต์ มีการใช้อัตราส่วนของน้ำซีเมนต์ที่แตกต่างกัน 5 แบบ 0.22, 0.25, 0.28, 0.31 และ 0.34 และ 2 ปริมาณของซิลิกาฟูม 16% และ 25% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ มีการปรับสารลดน้ำพิเศษให้เข้ากันกับส่วนผสมอื่นเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีการแยกจากกัน

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่มีซิลิกาฟุ่มบางส่วนถูกแทนที่ด้วยซีเมนต์ ก่อให้เกิดการจับตัวกันที่แข็งแรงมากระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม บางส่วนของซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มและเพิ่มสารลดน้ำพิเศษเข้าไปเพื่อเพิ่มกำลังของมอร์ต้าร์แต่ไม่มีผลต่อกำลังของซีเมนต์เพสต์ ผลของการตรวจสอบจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การทดสอบสมมติฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นถึงบทบาทการทำงานร่วมกันของสารลดน้ำพิเศษกับซิลิกาฟุ่มที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่กำหนดไว้ ประสิทธิภาพการทำงานของสารลดน้ำพิเศษมีมากขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาฟุ่ม บทความนี้เป็นเพียงความคิดเห็นบางส่วนจากบทความอ้างอิงเกี่ยวกับอิทธิพลของซิลิกาฟุ่มในวัสดุผสมซีเมนต์และยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัด

Wild et al (1995) ได้ศึกษาข้อมูลที่มีอยู่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ การทำงานปอชโซลานและซีเมนต์ไฮเดรชัน มีการทบทวนโดยเน้นเฉพาะในซิลิกาฟุ่มควบแน่นผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คอนกรีตซิลิกาฟุ่มควบแน่นในช่วงของปริมาณซิลิกาฟุ่มมีการรักษาที่ 2 อุณหภูมิ (20°C และ 50°C) ที่ระยะเวลาถึง 90 วัน การพัฒนากำลังและกำลังสัมพันธ์เป็นการพิจารณาในความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ซีเมนต์ไฮเดรชัน การทำงานปอชโซลาน ผลที่สังเกตได้สร้างกำลังที่แตกต่างกัน โดยตรงกับปริมาณซิลิกาฟุ่มควบแน่นและกำลังที่เพิ่มในช่วงเวลาการบ่มต้นๆซึ่งจะทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิการบ่มเป็นผลมาจากการอัตราส่วนปฏิกิริยาระหว่าง Ca(OH)_2 และซิลิกาฟุ่มควบแน่นที่เพิ่มขึ้น

2.3.3 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

Shekarchi et al (2009) ได้ศึกษาการแพร่ของเกลือคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มภายใต้สิ่งแวดล้อมทางทะเลที่รุนแรงกล่าวว่าวัสดุประสานเพิ่มเติมเช่น ซิลิกาฟุ่ม มักถูกใช้ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง (High performance concrete) สำหรับสิ่งแวดล้อมทะเลในบริเวณที่มีอากาศร้อน ดังเช่น อ่าวเปอร์เซีย โดยซิลิกาฟุ่มนั้น ช่วยปรับปรุงกำลังและ/หรือ คุณสมบัติความคงทนของคอนกรีต ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อคุณสมบัติต่างๆของตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญสภาพแวดล้อมทางทะเลของอ่าวเปอร์เซีย โดยตัวอย่างถูกเก็บมาทดสอบที่อายุ 3, 9 และ 36 เดือน และทำการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม จนถึง 7.5 % ช่วยลดสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ ในขณะที่การแทนที่มากขึ้นไปอีกนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการแพร่ของเกลือคลอไรด์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มอีกด้วย

Kayali and Zhu (2005) ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตที่เสริมเหล็กกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูมที่มีกำลังอัดสูง 70 MPa เพื่อหาการแพร่ของคลอไรด์และการเกิดสนิมภายหลังแช่บางส่วน ของแผ่นพื้นลงในสารละลายเกลือคลอไรด์ ความเข้มข้น 2% และได้ทดสอบในลักษณะเดียวกันกับ แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาที่มีกำลังอัด 32 MPa โดยพบว่าการแพร่ของเกลือคลอไรด์ใน คอนกรีตกำลังสูงมีค่าต่ำค่อนข้างมาก ในทางกลับกันพบว่ามีค่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์สูง ที่อาศัยความลึกเกินกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังอัด 32 MPa ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมใน คอนกรีตกำลังอัด 32 MPa มีค่าติดลบค่อนข้างมาก โดยติดลบเกินกว่าค่าวิกฤตที่ -350 mV (CSE) ค่า ศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมีค่าค่อนข้างคงที่และอยู่ใกล้ๆกับค่า -200 mV (CSE) ความ หนาแน่นกระแสการเกิดสนิมของคอนกรีตกำลังอัด 32 MPa มีการเกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ ในขณะที่ คอนกรีตกำลังอัดสูงค่าความหนาแน่นกระแสการเกิดสนิมไม่มีค่าเกิดขึ้นเลย นอกจากนี้ยังพบ หลักฐานว่ามีการปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการเกิดสนิมในคอนกรีตกำลังอัดสูงภายหลังการ บ่ม 28 วัน แต่ไม่พบปรากฏการณ์ดังกล่าวในคอนกรีตกำลังอัด 32 MPa ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า คอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมซิลิกาฟูม 10% มีความสามารถต้านทานการเกิดสนิมได้สูงมาก

Dotto et al (2004) กล่าวว่านอกเหนือจากซิลิกาฟูมคอนกรีตที่ได้รับการเสนอให้มีการ ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในการต่อต้านการเกิดสนิมคอนกรีตในการศึกษาการทดลอง โปรแกรมต่อกำลังอัดมีการนำความพรุนต้านทานไฟฟ้าและเส้นโค้งขั้วออกจากวัตถุประสงค์ของ การประเมินผลกระทบของการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมที่แตกต่างกัน (0%, 6% และ 12%) มีการใช้ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำยัดเกาะที่แตกต่างกัน (ซีเมนต์+ซิลิกาฟูม) 0.50, 0.65 และ 0.80 ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นว่ามีการปรับปรุงคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตที่มีการเพิ่มซิลิกาฟูมชี้ให้เห็นถึงการ ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

Bentz (2000) ได้กล่าวว่าบนพื้นฐานของแบบจำลองมัลติสเกลคอมพิวเตอร์ได้พัฒนา สมการในการทำนายการแพร่กระจายคลอไรด์ไอออนของคอนกรีตซึ่งเป็นส่วนประกอบของ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) การเพิ่มซิลิกาฟูม ระดับของความชุ่มชื้นและสัดส่วนปริมาตรมวลรวม ซิลิกาฟูมมีอิทธิพลต่อการแพร่กระจายคอนกรีตในหลายวิธี : (1) ความหนาแน่นของจุลภาคใน การเปลี่ยนแปลงพื้นที่สัมผัส (2) การลดระดับคงที่ของความชุ่มชื้นในซีเมนต์ และ (3) การผลิตเจล C-S-H ปอซโซลานที่มีการแพร่กระจาย 25 ครั้ง หรือน้อยกว่าเจล C-S-H ที่ผลิตจากสารซีเมนต์ ธรรมดา จากสมการและในข้อตกลงของผลลัพธ์ที่ได้จากเอกสารอ้างอิงซิลิกาฟูมมีผลอย่างมากต่อ การลดการแพร่กระจายในอัตราส่วนคอนกรีตน้ำต่อซีเมนต์ (w / c) ที่ต่ำ (w/c<0.4) ในระบบนี้ เพื่อให้มีการเพิ่มซิลิกาฟูมเข้าไปในระดับปานกลาง (เช่น 10%) การลดลงของการแพร่กระจาย คอนกรีตอาจจะเป็นปัจจัยจาก 15 หรือมากขึ้นซึ่งอาจเพิ่มอายุการใช้งานขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของ

เหล็กเสริมคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมกัดกร่อนที่รุนแรง

Cabrera et al (1995) ได้ศึกษาการวัดการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตสองแบบที่ทำจากและไม่ได้ทำจากซิลิกาฟูมควบแน่นซึ่งแทนที่บางส่วนของซีเมนต์ มีการใช้ระบบการบ่มที่แตกต่างกัน 3 ระบบและทดสอบตัวอย่างที่อายุแตกต่างกัน 3 อายุ ได้ดำเนินการกับตัวอย่างที่เหมาะสม วัดคาร์บอนชั้น การนำไฟฟ้า กำลัง ปริมาณปูนขาวและคลอไรด์ ออกซิเจนและการขนส่งทางไอ น้ำ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนและความถดถอยเพื่อแสดงว่าลักษณะของวัสดุและวิธีการที่ใช้ในการทำตัวอย่างและคุณสมบัติที่วัดได้มีผลกระทบอย่างยิ่งต่อการเกิดสนิมสำคัญ มีการวิเคราะห์วิธีการที่ผลกระทบเหล่านี้การปรับเปลี่ยนโดยมีอยู่ของซิลิกาฟูมควบแน่น การวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดสนิมได้รับผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และสำหรับการบ่มตัวอย่างทั้งหมดใช้ประโยชน์จากการเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญของซิลิกาฟูมควบแน่นที่มีความไวต่อการบ่มที่ไม่ดีนอกจากนี้ในขณะที่การนำไฟฟ้าและการขนส่งคลอไรด์เป็นตัวทำนายที่ดีสำหรับการเกิดสนิมในทุกการทดสอบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญของการทำนายที่แตกต่างกันเป็นการแตกต่างกันอย่างมากสำหรับการผสมซิลิกาฟูมควบแน่น

2.3.4 คลอไรด์

Jiang et al (2012) ได้ศึกษาวัตถุประสงค์ของการศึกษาตรวจสอบอิทธิพลของประเภทเกลือคลอไรด์ในการเกิดสนิมที่วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีต มีการทดลองแก้ปัญหาหาคำตอบของคอนกรีตด้วยกัน 2 ชนิด เช่น สารละลาย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ อิ่มตัว และสารสกัดจากปูนซีเมนต์ KCl , NaCl , CaCl_2 และ MgCl_2 ถูกเลือกให้เป็นจุดกำเนิดการเกิดสนิมในเหล็กเสริม มีการตรวจสอบจุดเริ่มต้นของการเกิดสนิมเฉพาะที่กัดกร่อนโดยการรวมตัวของวงจรไฟฟ้าแบบเปิด (E_{corr}) ที่มีความหนาแน่นกระแสการเกิดสนิม (I_{corr}) ซึ่งวัดได้จากความต้านทานไฟฟ้า สเปกโทรสโกปี (EIS) พบว่าขีดจำกัดของเกลือคลอไรด์ทั้ง 2 คำตอบมีไอออนบวกเดียวกัน อย่างไรก็ตามระดับวิกฤตที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงความจุไอออนบวกของเกลือคลอไรด์และมีผลกระทบจริงๆขึ้นอยู่กับปัญหา

Manera et al (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตสำหรับการเริ่มต้นการเกิดสนิมเฉพาะที่ของเหล็กในคอนกรีตที่ การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และที่ผสมซิลิกาฟูม 10% ในห้องปฏิบัติการ โดยมีการเพิ่มปริมาณคลอไรด์ 2% โดยมวลของซีเมนต์เข้าไปในส่วนผสม มีการตรวจสอบอัตราการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ทำมาจากทั้งเหล็กแข็งและเหล็กอ่อน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษานี้ประกอบด้วย การศึกษากำล้างอัดและการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูม 0%, 5%, 7.5%, 10% และ 15%

ในการศึกษากำล้างอัดของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ความลึก 10 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร และในการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร นำมาตัดเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำประปาจนถึงอายุทดสอบ ทำการทดสอบกำล้างอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซ่โดยบ่มน้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน ก่อนเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 15-2555 ดังรูปที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 ซิลิกาฟูม (Silica fume)



รูปที่ 3.2 ซิลิกาฟูม (silica fume)

3.1.3 น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำประปาที่ได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

3.1.4 มวลรวม (Aggregates)

มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) คือ หินที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือค้างอยู่บนตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มวลรวมหยาบ (หิน)

มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) คือ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



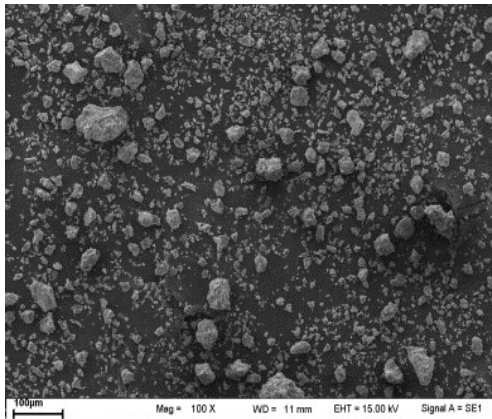
รูปที่ 3.4 มวลรวมละเอียด (ทราย)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟูม

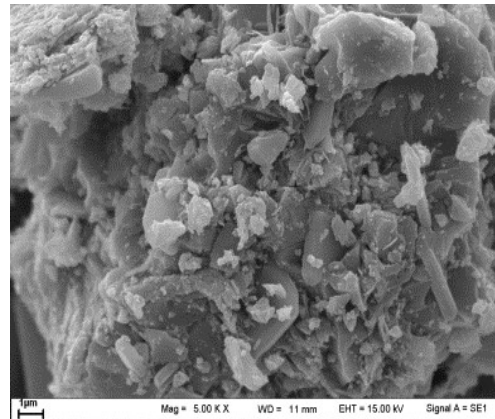
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ซิลิกาฟูม
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	21.30	92
อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	4.96	0.7
ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.10	1.2
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.61	0.2
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.81	0.2
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.21	-
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.50	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.72	-
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)	0.74	-
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความละเอียด (cm ² /g)	3,400	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.20
สี	เทา	เทาดำ เทาอมขาว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าซิลิกาฟูมมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 92 ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO หากนำออกไซด์ของซิลิกาฟูมมาเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์จะพบว่ามีส่วนประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 3.1

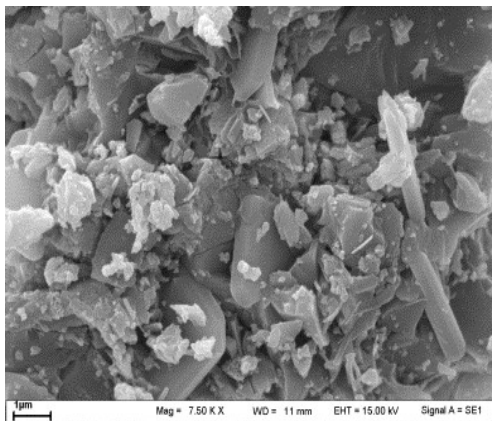
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูมที่เห็นชัดคือเป็นฝุ่นผงสีเทาดำ, เทาอมขาวที่ละเอียดมาก พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์สูงสุดประมาณ 3.15 มากกว่าซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 ค่าความละเอียดของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 150,000 (cm²/g) ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3,400 (cm²/g) ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซิลิกาฟูมประมาณ 0.1 mm. ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าประมาณ 15 mm. ดังแสดงในตารางที่ 3.1



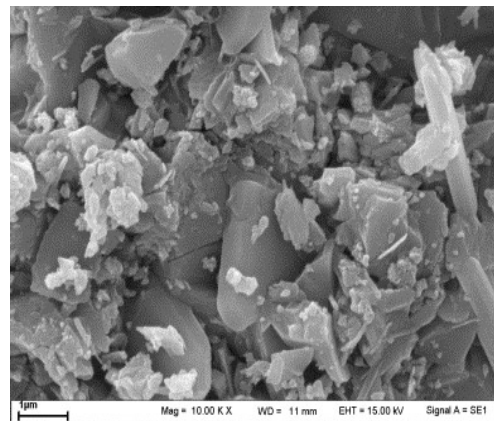
× 100



× 5,000



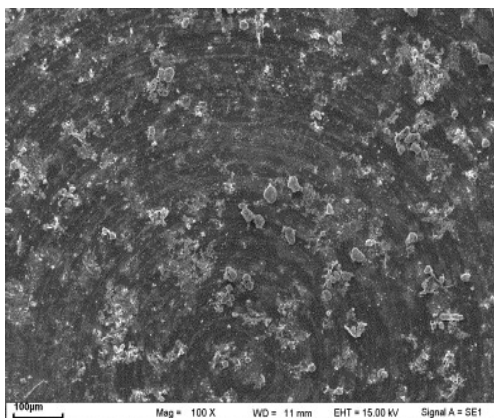
× 7,500



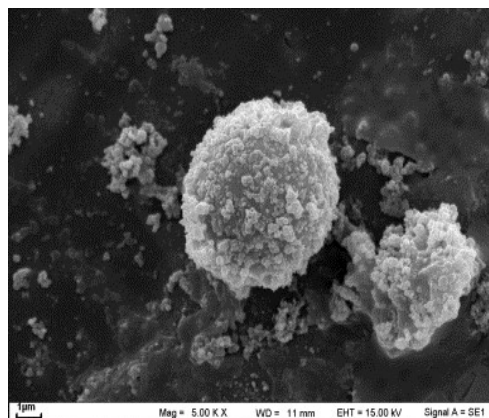
× 10,000

รูปที่ 3.5 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

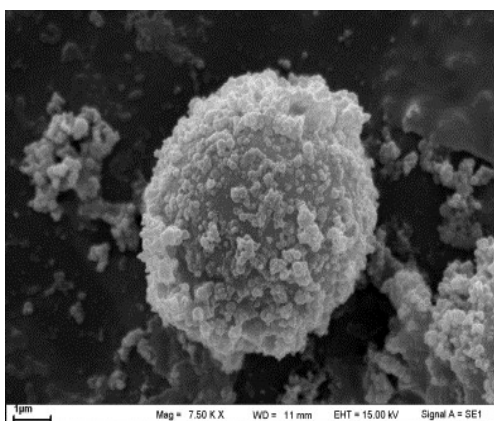
จากรูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเทคนิค SEM พบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ



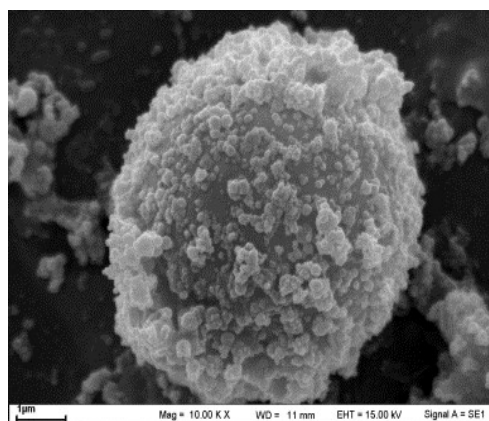
× 100



× 5,000



× 7,500



× 10,000

รูปที่ 3.6 รูปร่างอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง

จากรูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของซิลิกาฟุ้งด้วยเทคนิค SEM พบว่าอนุภาคของซิลิกาฟุ้งมีลักษณะรูปร่างทรงกลม

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร

2. แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต สูง 20 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต สูง 20 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

3. เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าใช้วัดการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งวัดค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อคอนกรีตเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 60 โวลต์



รูปที่ 3.9 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

4. เซลล์ทดสอบ RCPT

เซลล์ทดสอบ RCPT ที่ใช้ประกอบเข้ากับก้อนตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เซลล์ทดสอบ RCPT

5. เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ

เครื่องตัดตัวอย่างใช้สำหรับตัดคอนกรีตออกเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 และ 1 เซนติเมตร ลักษณะเครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต

6. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งมีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

7. ช้อนตักสาร

ช้อนตักสารละลายและคนสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ลักษณะช้อนตักสารแสดง
ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ช้อนตักสาร

8. บีกเกอร์ขนาด 250 ml

บีกเกอร์ขนาด 250 ml ใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลักษณะบีกเกอร์ขนาด 250 ml ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 บีกเกอร์ขนาด 250 ml

9. ปีกเกอร์ขนาด 1000 ml

ปีกเกอร์ขนาด 1000 ml ใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเติมน้ำกลั่นจนถึงปริมาณ 1000 ml ลักษณะปีกเกอร์ขนาด 1000 ml ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ปีกเกอร์ขนาด 1000 ml

10. กรวย

กรวยใช้สำหรับเวลาทดสอบสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงในเซลล์ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กรวย

11. ชุดประกอบเซลล์ทดสอบ

ชุดประกอบเซลล์ทดสอบสำหรับประกอบเซลล์ทดสอบเข้ากับก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ
 ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชุดประกอบเซลล์ทดสอบ

12. ซิลิโคน

ทาก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารละลาย ลักษณะ
 ซิลิโคนดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ซิลิโคน

13. น้ำกลั่น

ใช้ผสมละลายสาร โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

15. เครื่องดูด Suction apparatus

เครื่องดูด Suction apparatus ใช้สำหรับต่อเข้ากับขวด (Suction flask) ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่องดูด Suction apparatus

16. เครื่องต้ม (Hot plate)

เครื่องต้ม (Hot plate) ใช้สำหรับต้มตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องต้ม (Hot plate)

17. แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม
แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม ใช้สำหรับกรองสารละลายดัง
แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม

18. กรวยสำหรับกรองสารละลาย
กรวยสำหรับกรองสารละลาย ใช้สำหรับกรองสารละลายลงในขวด (Suction flask)
ดังแสดงดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กรวยกรองสารละลาย

19.ขวด Suction flask

ขวด Suction flask ใช้สำหรับรองรับสารละลายที่ผ่านการกรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขวด Suction flask

20. เครื่อง Potentiometric titration

เครื่อง Potentiometric titration ใช้สำหรับไตเตรทตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่อง Potentiometric titration

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ใช้เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วลบ ลักษณะสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ใช้เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวก ลักษณะสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3. กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น 69%

กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น 69% ที่ใช้สำหรับการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น 69%

4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 35%

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 35% ที่ใช้สำหรับการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 35%

5. สารละลายมาตรฐาน 0.1M ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)

สารละลายมาตรฐาน 0.1M ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ที่ใช้สำหรับการทดสอบ
 ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 สารละลายมาตรฐาน 0.1M ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)

6. สารกั้นซึมเคลือบชั้นตัวอย่างทดสอบ อีพ็อกซี (Epoxy)

สารกั้นซึมเคลือบชั้นตัวอย่างทดสอบ อีพ็อกซี (Epoxy) ใช้สำหรับเคลือบชั้นตัวอย่างที่
 ใช้ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 สารกั้นซึมเคลือบชั้นตัวอย่างทดสอบ อีพ็อกซี (Epoxy)

3.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร \times 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.31 โดยผสมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.31 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร \times 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

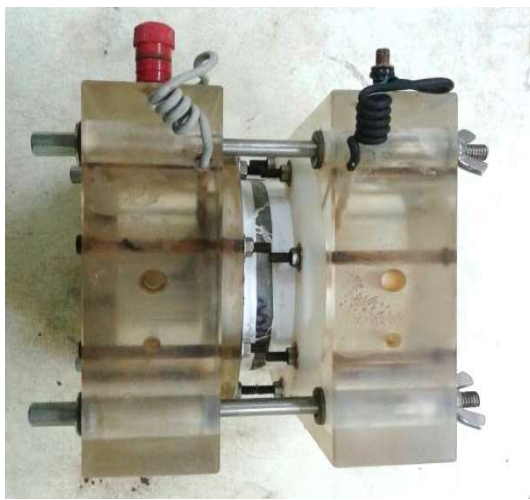
No.	Mix id.	Mix proportion of concrete (kg/m ³)					
		Binder			Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
		Cement	Silica fume	Super plasticizer			
1	C40	421	-	-	144	799	1,025
2	C40SF050	396	21	1.3	142	799	1,025
3	C40SF075	384	31	1.2	141	799	1,025
4	C40SF100	372	41	1.2	140	799	1,025
5	C40SF150	348	61	2.0	138	799	1,025
6	C50	369	-	-	161	799	1,025
7	C50SF050	348	18	-	159	799	1,025
8	C50SF075	338	27	-	159	789	1,025
9	C50SF100	327	36	-	158	799	1,025
10	C50SF150	307	54	-	156	799	1,025

หมายเหตุ : "C" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
 "SF" หมายถึง ซิลิกาฟูม

2. หลังจากตัวอย่างแข็งตัวแล้วให้นำตัวอย่างที่ได้บ่มในน้ำเปล่า เพื่อนำไปทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีแบบแรง ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ ที่ตัวอย่างอายุ 7, 28, และ 91 วัน ตามลำดับ

3. นำตัวอย่างที่ตัดออกเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร ผ่านการบ่มครบอายุตามที่กำหนด ทำให้ชิ้นงานมีความชื้นในเนื้อคอนกรีต

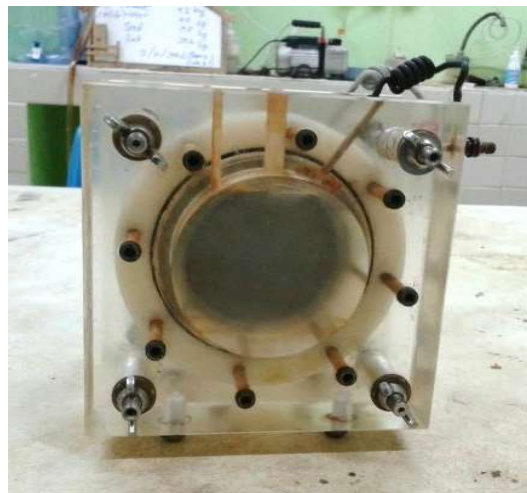
4. นำตัวอย่างที่ซึบน้ำออกจนแห้งมาทำการทดสอบด้วยซิลิโคนรอบตัวอย่าง และรองนกว่าซิลิโคนที่ทาไว้จนแห้ง และทำการประกอบเซลล์ทดสอบ RCPT กับตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปด้านบน



รูปด้านข้าง



รูปด้านหน้า

รูปที่ 3.32 รายละเอียดเซลล์ทดสอบ RCPT

3.3.2 การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ชั่งสารโซเดียมคลอไรด์ 30 กรัม โดยให้ละเอียดถึงตำแหน่งทศนิยม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร ใช้แท่งคนสารโซเดียมคลอไรด์จนละลายได้หมด สำหรับการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1,000 มิลลิลิตร สามารถใช้ในการทดสอบได้ประมาณ 3 ตัวอย่างการทดสอบ

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม โดยให้ละเอียดถึงตำแหน่งทศนิยม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร ใช้แท่งคนสารคนสารโซเดียมคลอไรด์จนละลายได้หมด

3.3.3 วิธีการทดสอบ

1. เตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% ในช่องเซลล์ทดสอบ RCPT ที่ขั้วลบ (-) และเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวก(+)

2. การต่อสายไฟ

ต่อสายไฟจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.33 โดยต่อสายไฟขั้วบวกเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วบวก และสายไฟขั้วลบเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วลบ



รูปที่ 3.33 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์บันทึกผลต่อเข้ากับเซลล์ทดสอบ

3. การตั้งค่าเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า และการเรียกใช้งานโปรแกรมการทดสอบ

1.) เปิดสวิตซ์เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง ON (ควรเปิดเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าก่อนทำการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที) จากนั้นกดปุ่ม “Reset” ที่เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 60 โวลต์ ตั้งค่าช่วงการบันทึกค่าทุกๆ 30 นาที และตั้งเวลาในการทดสอบทั้งหมด 360 นาที จากนั้นเลือกช่องสัญญาณที่จะทดสอบ สังเกตไฟสัญญาณสีแดงสว่างขึ้น แสดงว่าเครื่องได้เริ่มต้นทดสอบแล้ว

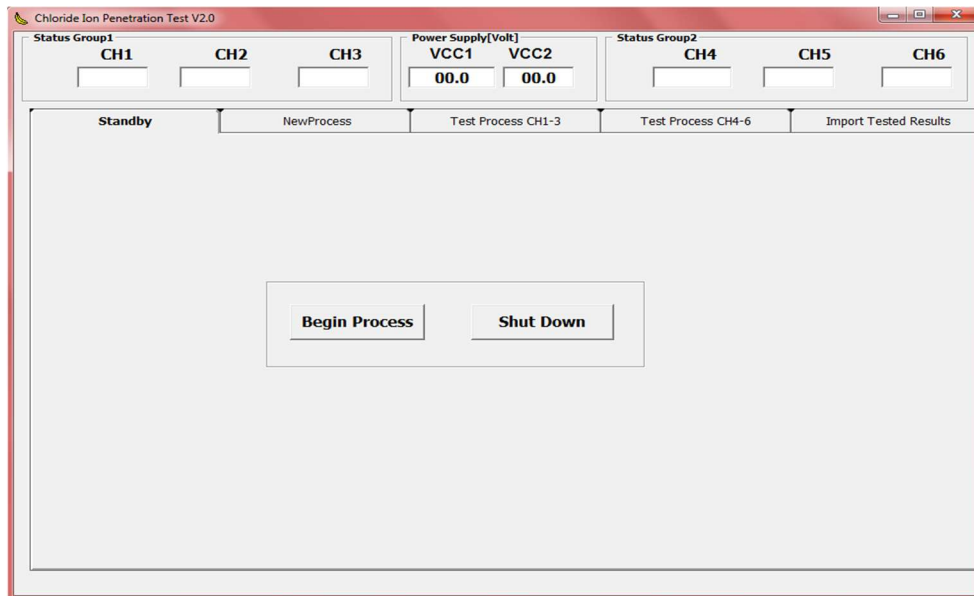
2.) ต่อสายสัญญาณ RS – 232 จากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ Serial port ของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อถ่ายโอนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ และแสดงผลการทดสอบในรูปแบบตารางและกราฟ

3.) เรียกใช้งานโปรแกรมทดสอบโดยดับเบิลคลิกที่ Chloride Ion Penetration Test V2.0 ดังรูปที่ 3.34



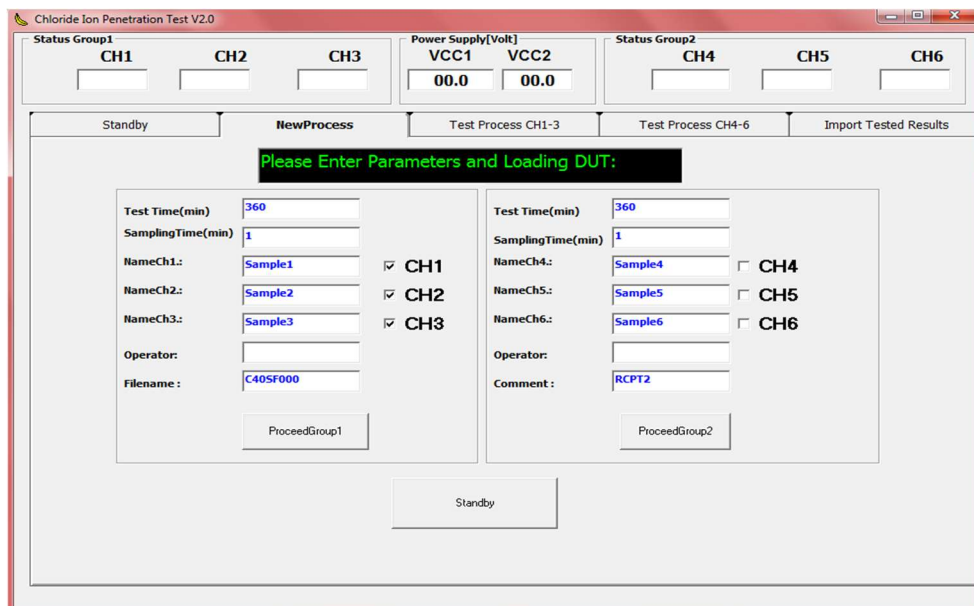
รูปที่ 3.34 การเรียกใช้โปรแกรมใช้งาน

4.) หลังจากเรียกใช้โปรแกรมใช้งานแล้ว จะขึ้นหน้าต่างดังแสดงในรูปที่ 3.35 จากนั้นให้คลิกที่ “Begin Process”



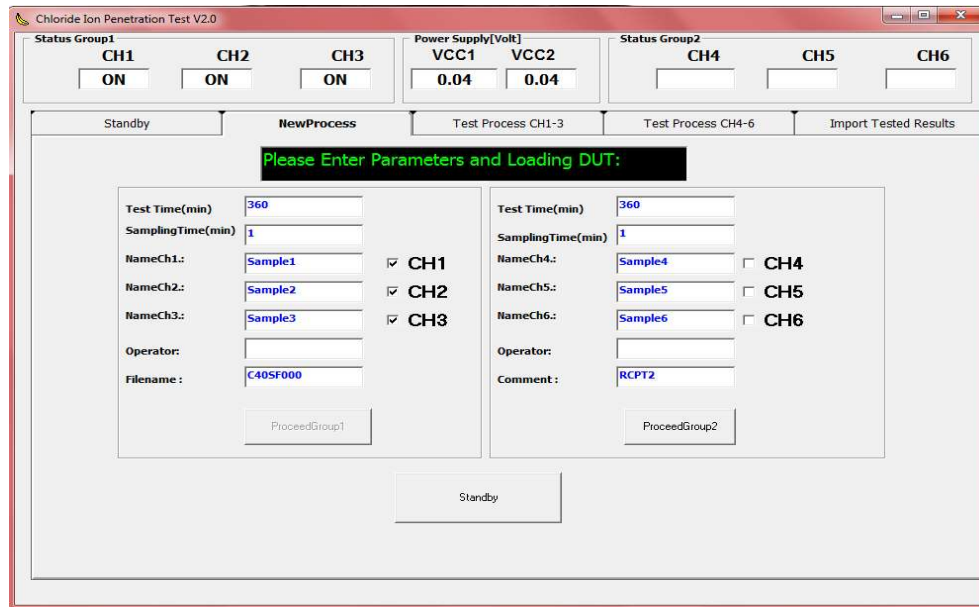
รูปที่ 3.35 การเข้าสู่โปรแกรม

5.) กรอกรายละเอียดสำหรับการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 การกรอกข้อมูลสำหรับการทดสอบ

6.) กดปุ่ม ProceedGroup1 สำหรับช่องสัญญาณ 1-3 เพื่อเริ่มการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 หน้าต่างแสดงรายละเอียดระหว่างทดสอบ

7.) หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นให้คลิก “back process” และคลิก “Shut down” เพื่อปิดโปรแกรม

8.) สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกบันทึกอยู่ใน “Result” ดังแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 ตำแหน่งที่เก็บบันทึกข้อมูลที่ทดสอบ

9.) ให้นำตัวอย่างออกจากเซลล์ทดสอบเพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ต่อไป

* หมายเหตุ สำหรับสกุณที่ใช้ให้ขโลมด้วยน้ำมัน แล้วใช้ผ้าสะอาดเช็ดให้แห้งก่อนเก็บทุกครั้ง

3.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซงของคอนกรีต

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

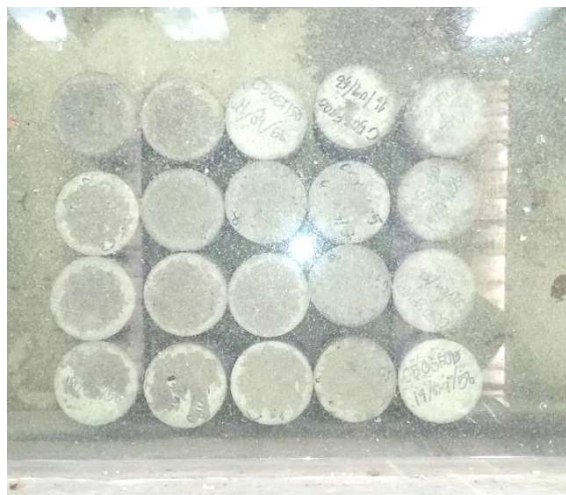
1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร \times 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.39 โดยผสมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.39 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร \times 10 เซนติเมตร

3.4.2 วิธีการทำการทดลอง

1. ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม. หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเปล่าอีก 28, 56, และ 91 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 ตัวอย่างบ่มในน้ำเปล่าที่อายุ 28, 56, และ 91 วัน

2. ชิ้นตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเคลือบด้วยอีพ็อกซี ยกเว้นที่บริเวณด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3.41 แล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่สารละลายคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนัก (ใช้ NaCl 82.39 กรัมต่อน้ำ 1,000 กรัม) เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน เพื่อให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์จากสารละลายเข้าสู่ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.41 ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยอีพ็อกซี



รูปที่ 3.42 การแช่ตัวอย่างในสารละลายเกลือเข้มข้น 5.0%

3. นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร × 10 เซนติเมตรที่แช่ในสารละลายคลอไรด์ไอออนจนครบระยะเวลาที่กำหนด 28, 56 และ 91 วัน มาตัดเป็นชั้นความหนาประมาณ 1 ซม. จำนวน 5 ชั้น ที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม. จากผิวด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.43



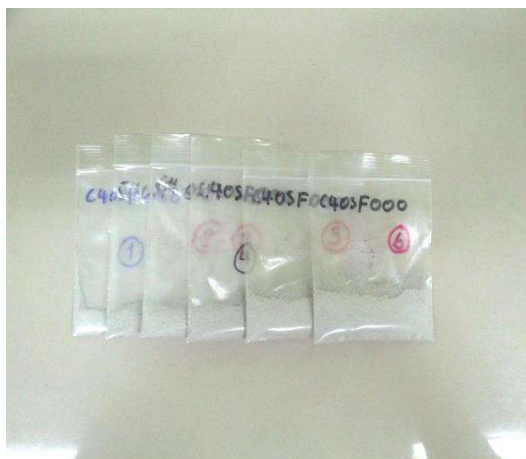
รูปที่ 3.43 ชั้นคอนกรีตที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม.

4. แล้วยนำชั้นคอนกรีตทรงกระบอกที่ตัดแล้วมาทำให้เป็นผง แยกผงคอนกรีตทรงกระบอกดังกล่าวตามระดับชั้นความลึกจากผิวดังตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.44 ชั้นคอนกรีตทรงกระบอกที่ตัดแล้วมาทำให้เป็นผง

5. จากนั้นนำผงคอนกรีตทรงกระบอกมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามวิธี ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) และทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามวิธีการทดสอบของ ASTM C1218 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) ดังแสดงในรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 ผงคอนกรีต

3.4.3 การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ

คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ก็คือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังนี้ [ASTM C1152]

1. นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดแล้วเก็บมาจำนวนประมาณ 3 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 100 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 69% ที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml
3. ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด ประมาณ 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)
4. ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นโดยแช่ในอ่างน้ำเย็น
5. นำกรวยกรองที่รองกระดาษกรองมาล้างแผ่นกรองด้วยน้ำกลั่นให้เปียกจากนั้นทำการติดตั้งบนขวด (Suction flask)

6. เชียบสายยางประกอบเข้ากับเครื่องดูด (suction apparatus) ทำการเปิดสวิตซ์เตสารใน บีกเกอร์ลงในกรวยกรองจืดล้างสารในบีกเกอร์ลงในกรวยให้หมด ดังแสดงในรูปที่ 3.47

7. เตสารจากขวด (Suction flask) ที่ได้จากการกรองลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ล้างขวด (Suction flask) จากนั้นนำไปไตเตรท

8. จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration ซึ่งจะทำให้การไตเตรทให้โดย อัตโนมติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าเมื่อถึงจุด (End point) จะเสปปริมาณคลอไรด์และ ปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้และประจุ

9. จุดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

3.4.4. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระในระบบ

คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) ในระบบของคอนกรีตก็คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระดังนี้ [ASTM C1218]

1. นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดแล้วจำนวนประมาณ 3 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml ดังแสดงในรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 คอนกรีตที่บดแล้วจำนวน 3 กรัม

2. เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้จนกระทั่งได้ความจุ 50 ml ดังแสดงในรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 เติมน้ำกลั่น 50 ml

3. ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือดประมาณ 5 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate) ดังแสดงในรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 ต้มตัวอย่างประมาณ 5 นาที

4. ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.49 ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

5. นำกรวยกรองที่รองกระดาษกรองมาล้างแผ่นกรองด้วยน้ำกลั่นให้เปียกจากนั้นทำการติดตั้งบนขวด (Suction flask) ดังแสดงในรูปที่ 3.50



รูปที่ 3.50 กรวยกรองที่รองกระดาษกรอง

6. เสียบสายยางประกอบเข้ากับเครื่องดูด (suction apparatus) ทำการเปิดสวิตซ์เตสสารใน บีกเกอร์ลงในกรวยกรองชนิดล้างสารในบีกเกอร์ลงกรวยให้หมด ดังแสดงในรูปที่ 3.51



รูปที่ 3.51 การกรองสารละลายตัวอย่าง

7. เทสารจากขวด (Suction flask) ที่ได้จากการกรองลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ล้างขวด (Suction flask)

8. เติมกรด Nitric acid 3ml และ Hydrogen peroxide 3 ml ดังแสดงในรูปที่ 3.52



รูปที่ 3.52 เติมกรด Nitric acid 3ml และ Hydrogen peroxide 3 ml

9. ต้มตัวอย่างบนเครื่องต้ม (hot plate) ประมาณ 2-3 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.53



รูปที่ 3.53 ต้มตัวอย่าง ประมาณ 2-3 นาที

10. ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็น โดยแช่ในอ่างน้ำเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.54 ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นโดยแช่ในอ่างน้ำเย็น

11. จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration ซึ่งจะทำการไตเตรตหาโดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าเมื่อถึงจุด (End point) จะหาปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้และประจุ ดังแสดงในรูปที่ 3.55



รูปที่ 3.55 การทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration

12. จุดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

3.4.5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

จากผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแห้งของคอนกรีต สามารถนำมาคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ในคอนกรีตได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2 ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ในกรณีที่ D_a มีค่าที่ต่ำหมายความว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อย

$$C(x, t) = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i \quad (3.1)$$

- โดยที่ $C(x,t)$: ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับความลึก X (cm)
 C_s : ความเข้มข้นของพื้นผิวคลอไรด์ (% by wt. of binder)
 C_i : ความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดในกลุ่มตัวอย่างคอนกรีต (% by wt. of binder)
 t : ระยะเวลาการบ่ม (year)
 x : ความลึกจากพื้นผิวสัมผัส (cm)
 D_a : สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (cm^2/year)

3.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในรูปที่ 3.56 โดยผสมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.56 คอนกรีตทรงลูกบาศก์

2. หลังจากตัวอย่างแข็งตัวแล้วให้นำตัวอย่างที่ได้บ่มในน้ำเปล่า เพื่อนำไปทดสอบความสามารถรับกำลังอัดของคอนกรีต ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ ที่ตัวอย่างอายุ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

3. นำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มครบอายุตามที่กำหนด ไปทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต อ่าน และบันทึกผลที่ได้จากเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.57



รูปที่ 3.57 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

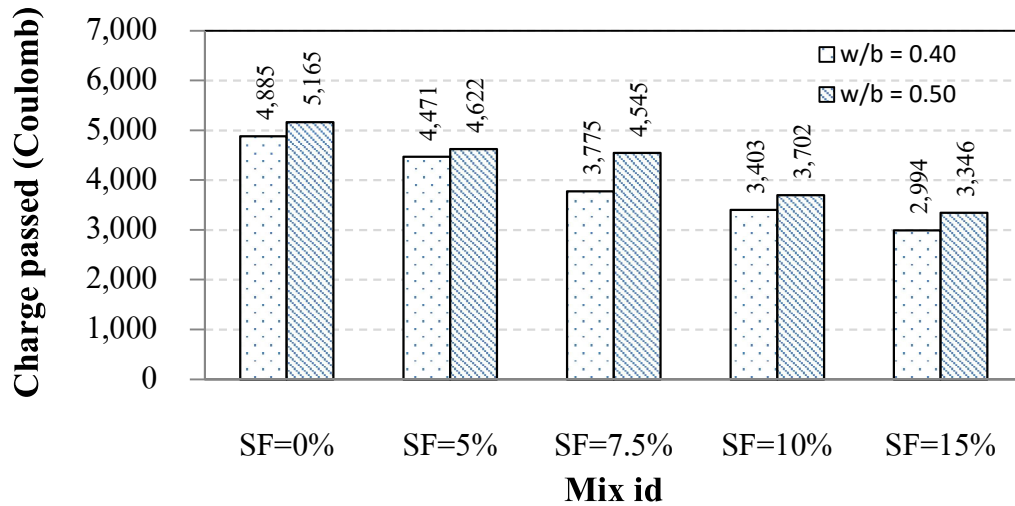
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต สามารถพิจารณาได้จากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ซึ่งถูกแสดงด้วยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีต (Charge passed) ในหน่วยคูลอมป์ (Coulomb) โดยเมื่อปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำ หมายถึง คอนกรีตมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ ซึ่งแสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

4.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

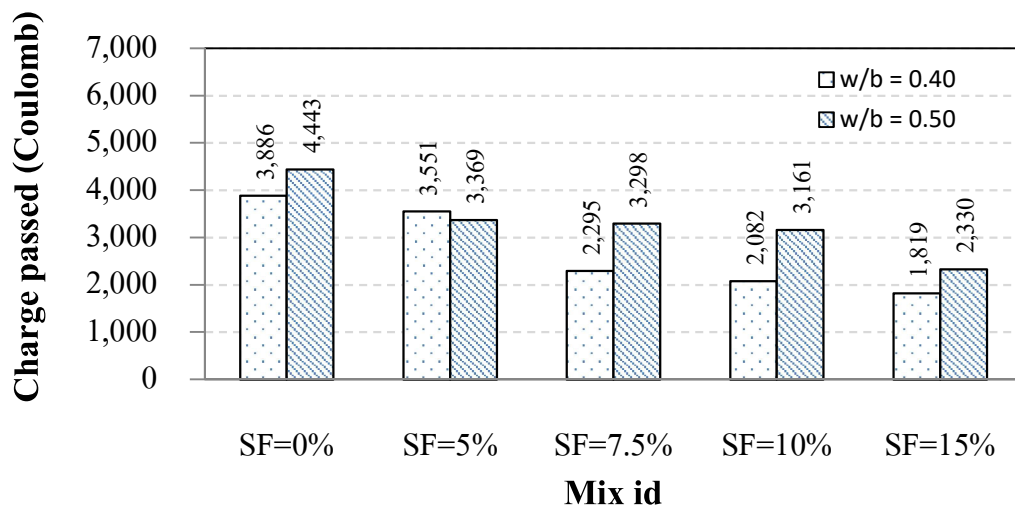
จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ทั้งที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ดังแสดงได้จากการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ต่ำกว่า (ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต) เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 นั้นมีปริมาณน้ำน้อยกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งเมื่อปริมาณน้ำน้อยก็จะทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง และเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กความพรุนของคอนกรีตจึงลดลง

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 1202

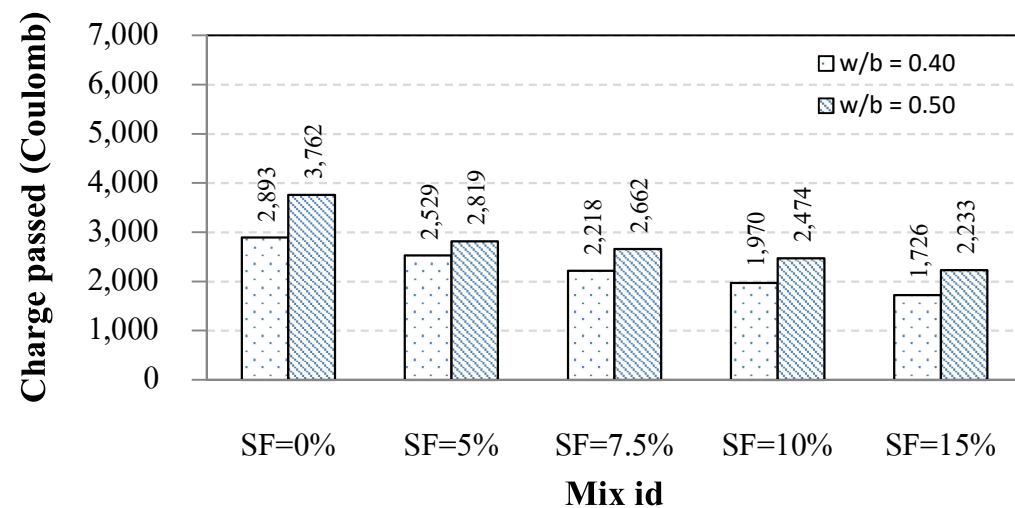
Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 – 4,000	Moderate
1,000 2,000	Low
100 – 1,000	Very low
< 100	Negligible



(ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน



(ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน



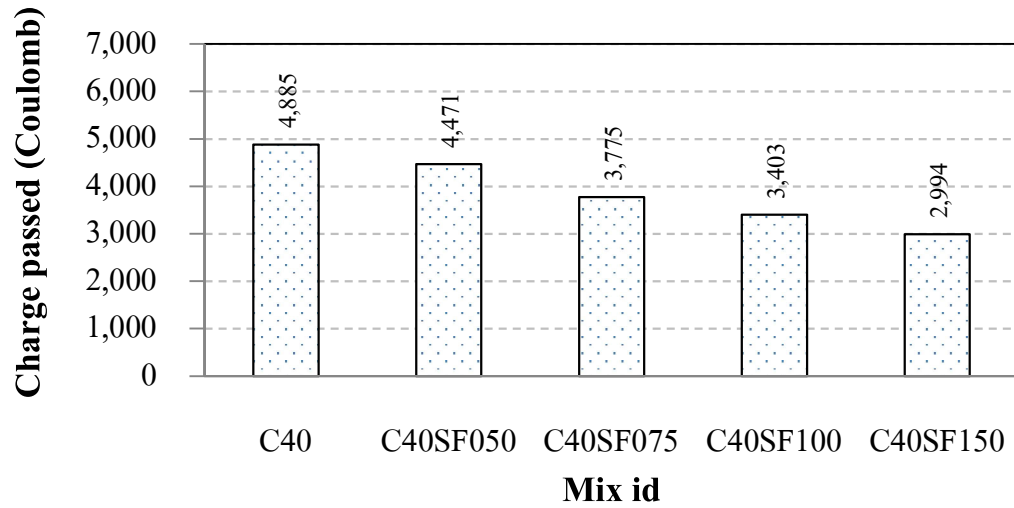
(ค) ที่ระยะการบ่มที่ 91 วัน

รูปที่ 4.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

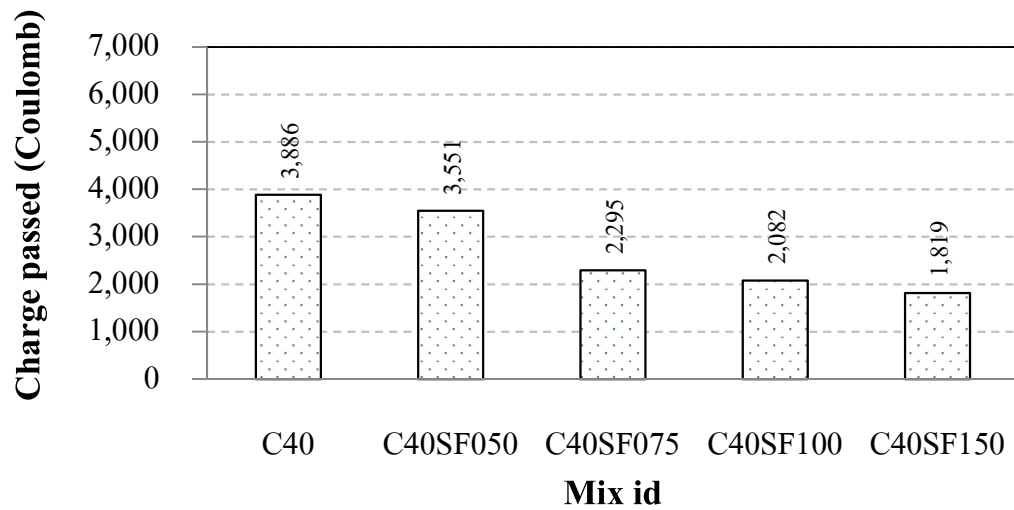
4.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาฟุ่มต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มนั้นมีปริมาณประจุที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว เนื่องจากซิลิกาฟุ่มสามารถทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลให้การแทนที่ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 นั้นมีความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด

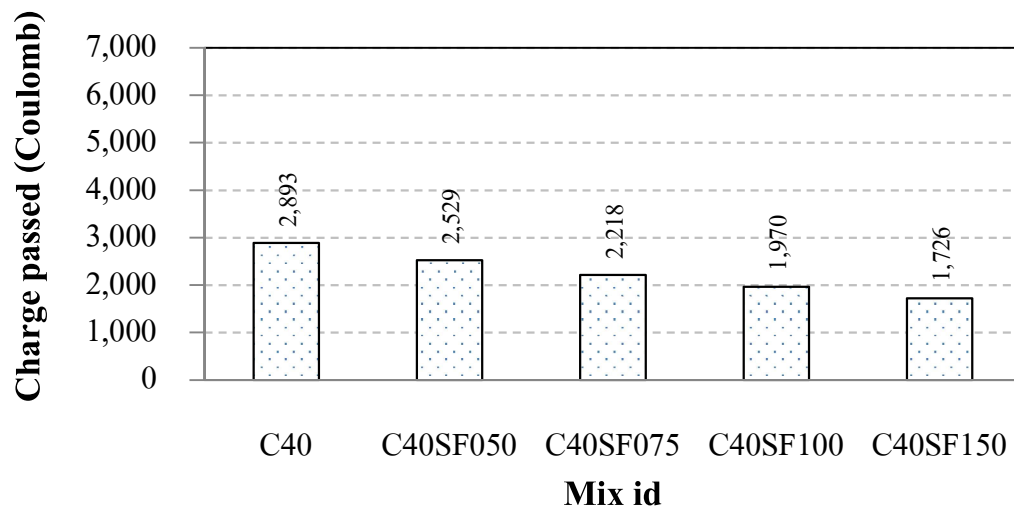
จากรูปที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำที่น้อยกว่าทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมีน้อยกว่า ส่งผลให้ความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่า



(ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน

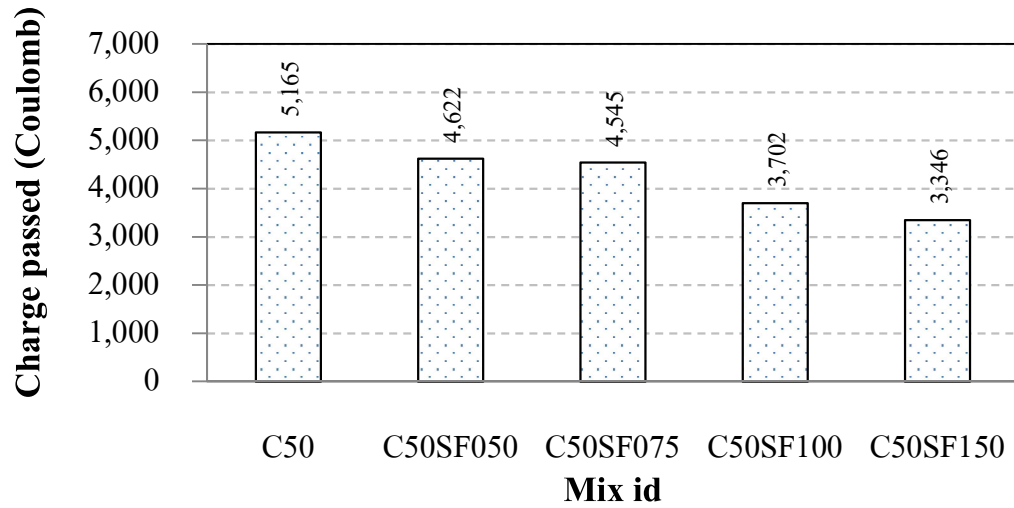


(ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

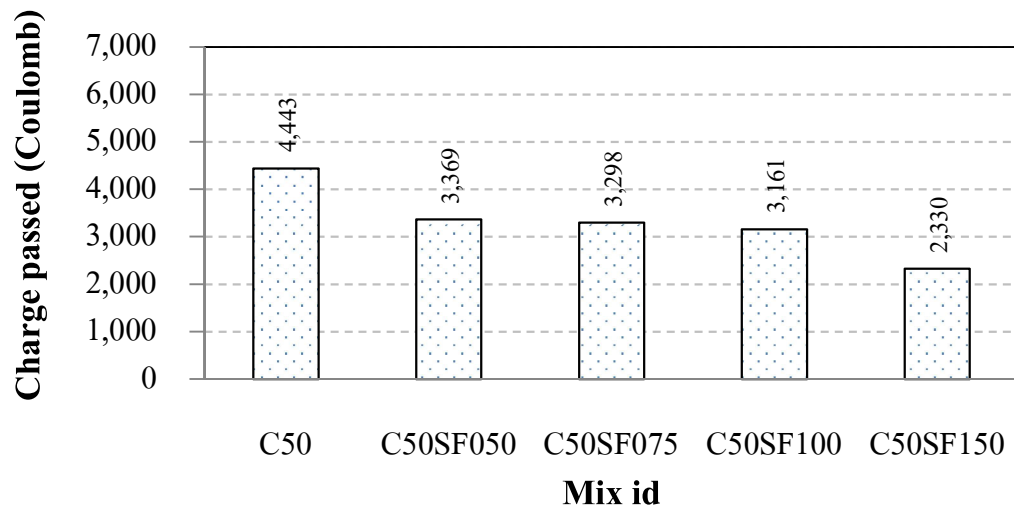


(ค) ที่ระยะการบ่ม 91 วัน

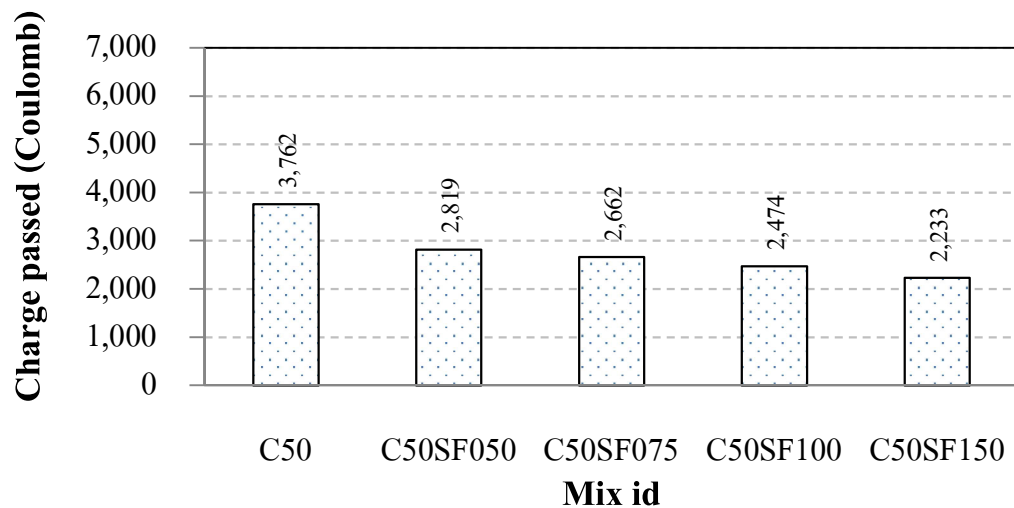
รูปที่ 4.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟวมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน



(ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

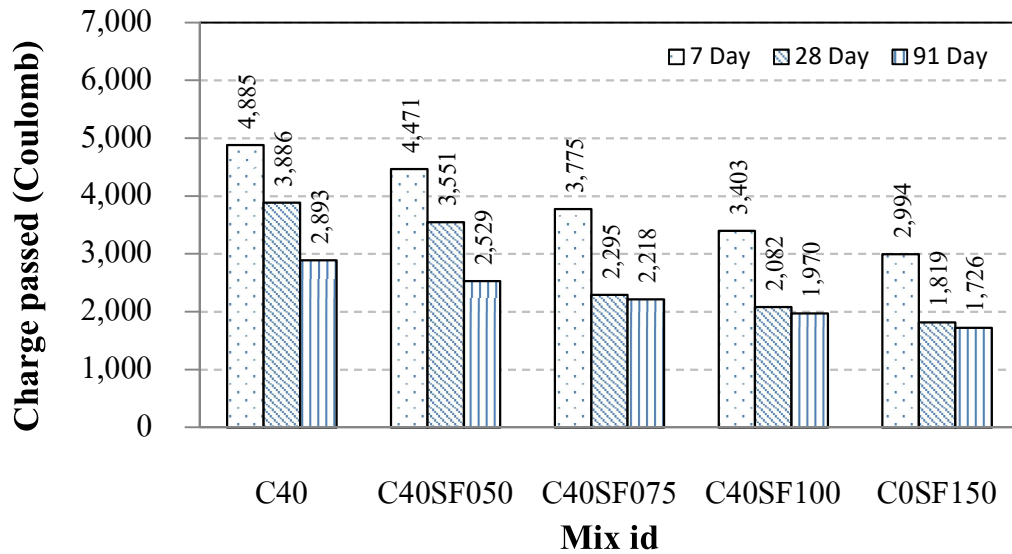


(ค) ที่ระยะการบ่ม 91 วัน

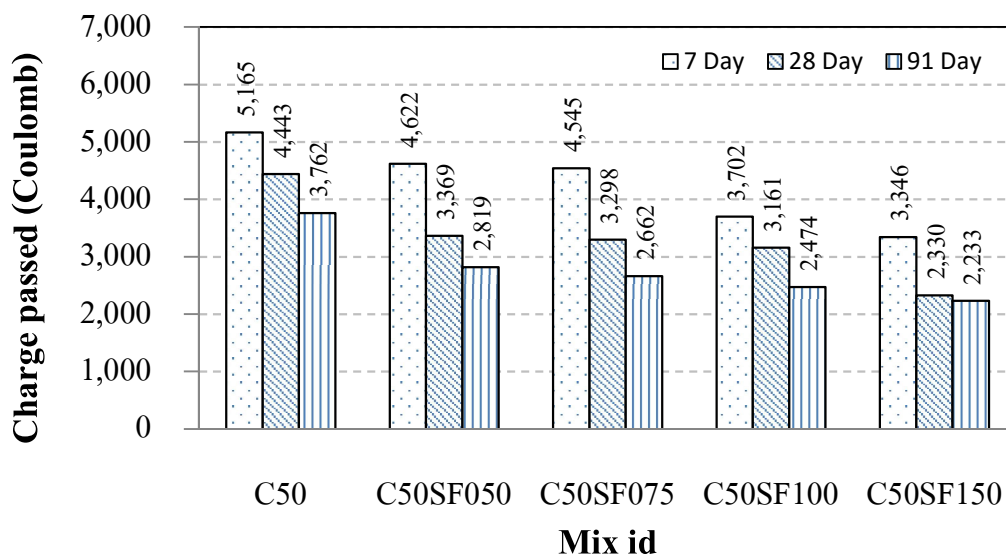
รูปที่ 4.3 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4.1.3 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.4 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่ 7, 28 และ 91 วัน พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 91 วันดีที่สุด เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย เกล็ดคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านได้น้อยลง



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

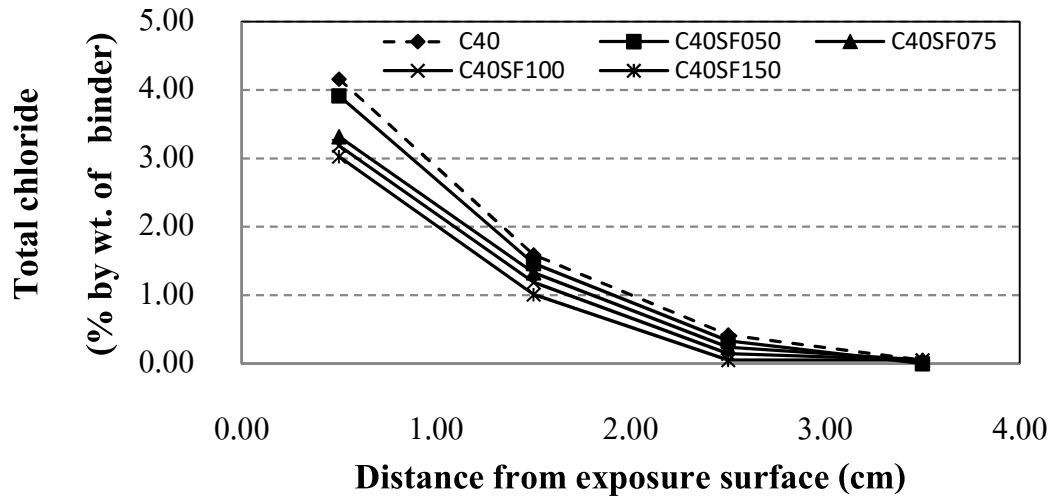


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

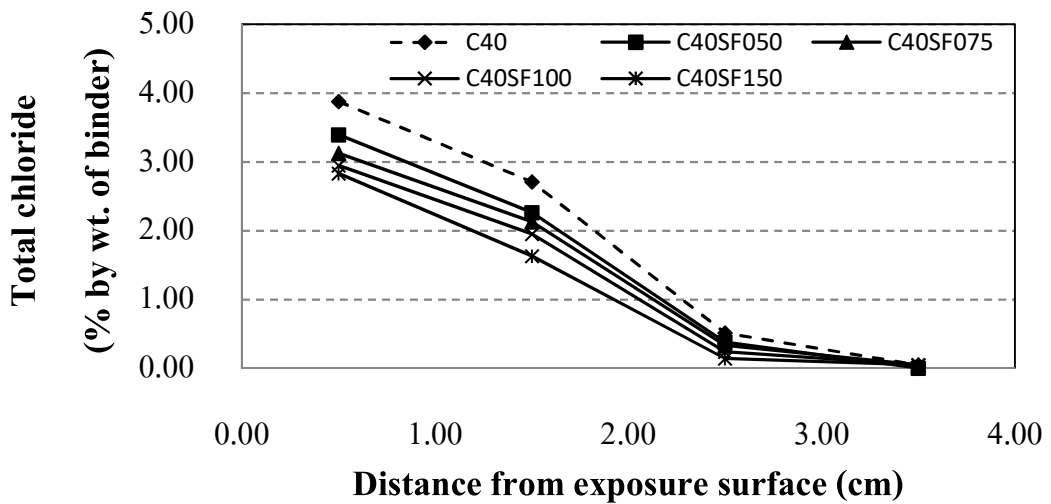
รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน

4.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแห้งของคอนกรีต

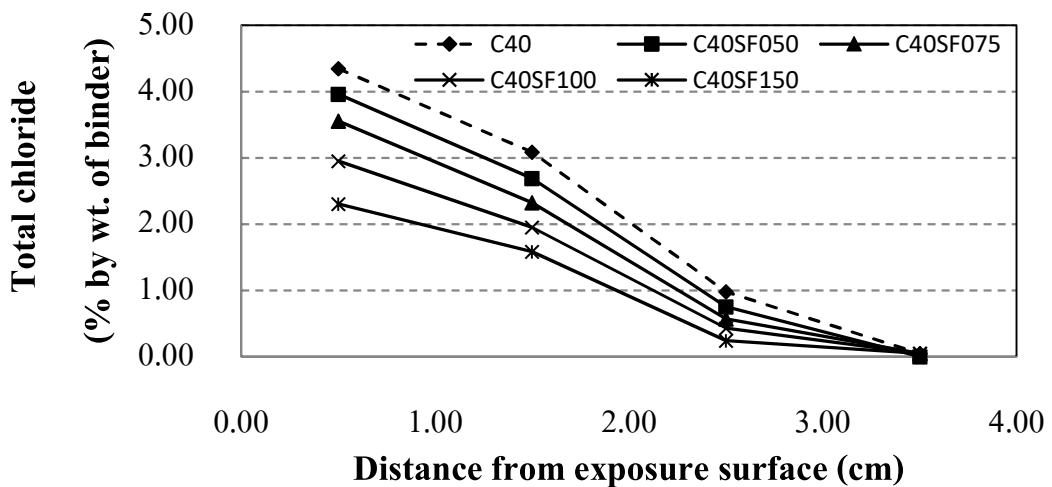
การแทรกซึมคลอไรด์แบบแห้งของคอนกรีต พิจารณาได้จากการแช่ก้อนตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายเกลือคลอไรด์ โดยทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในช่วงความลึกต่างๆกันตามมาตรฐาน ASTM C1152 จำนวนสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ในคอนกรีต โดยใช้สมการคำตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2 ภายหลังแช่เผชิญสารละลายเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน ดังแสดงในรูปของกราฟการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



(ก) ที่ระยะเวลาการแช่ 28 วัน

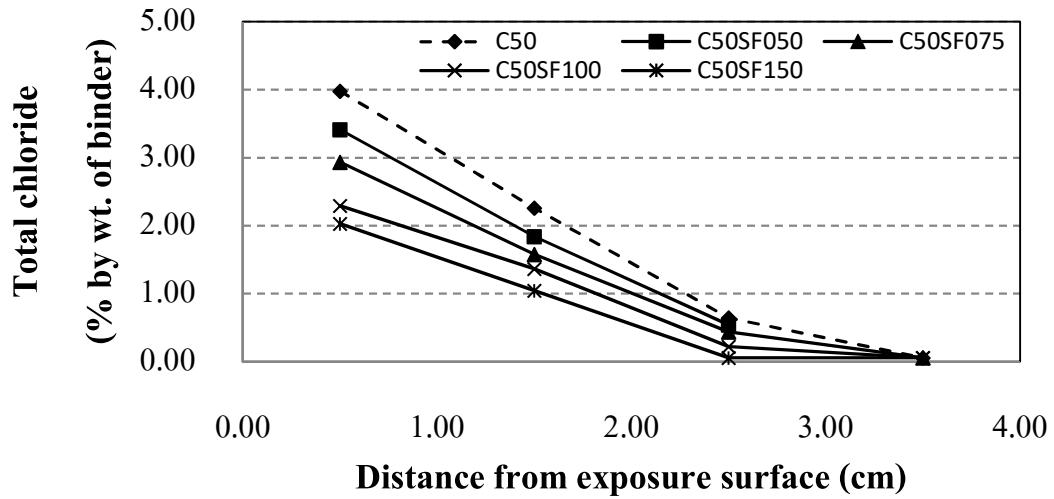


(ข) ที่ระยะเวลาการแช่ 56 วัน

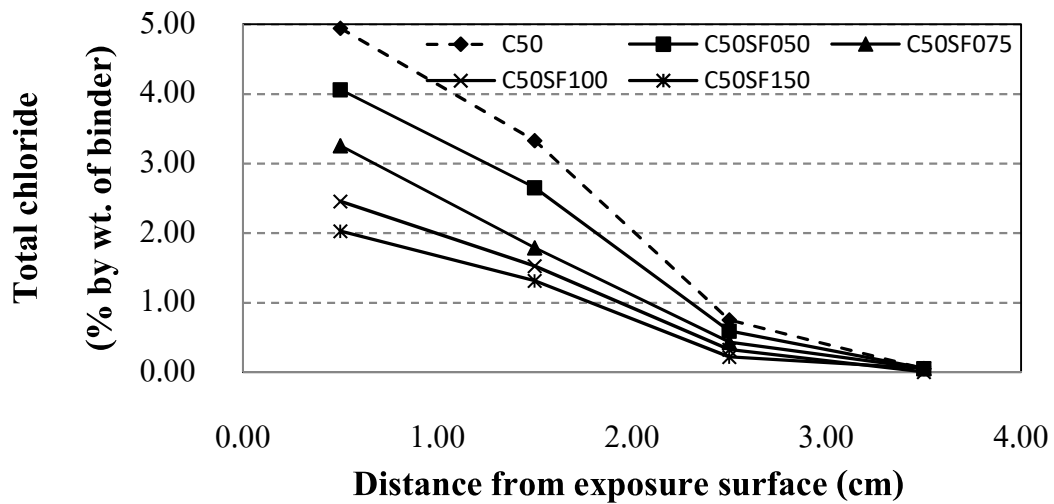


(ค) ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน

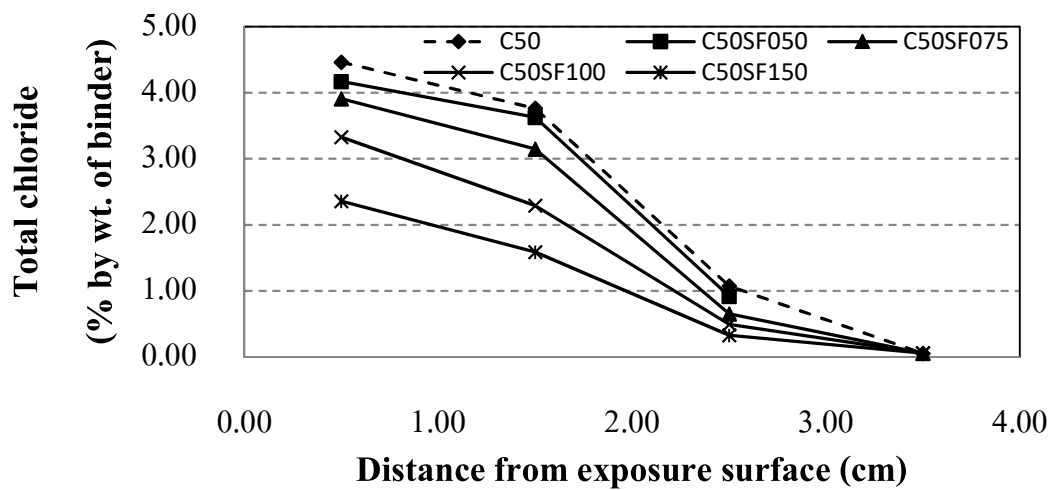
รูปที่ 4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ก) ที่ระยะเวลาการแช่ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาการแช่ 56 วัน



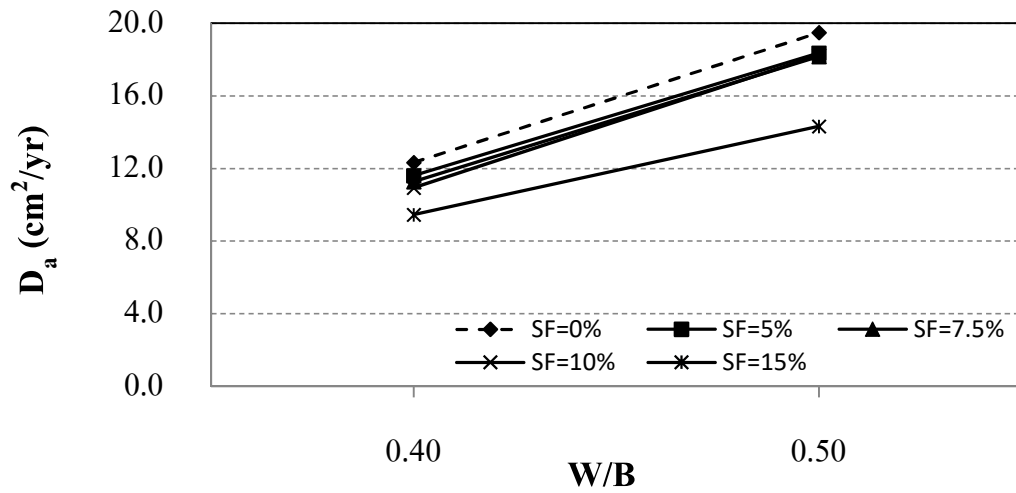
(ค) ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน

รูปที่ 4.6 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

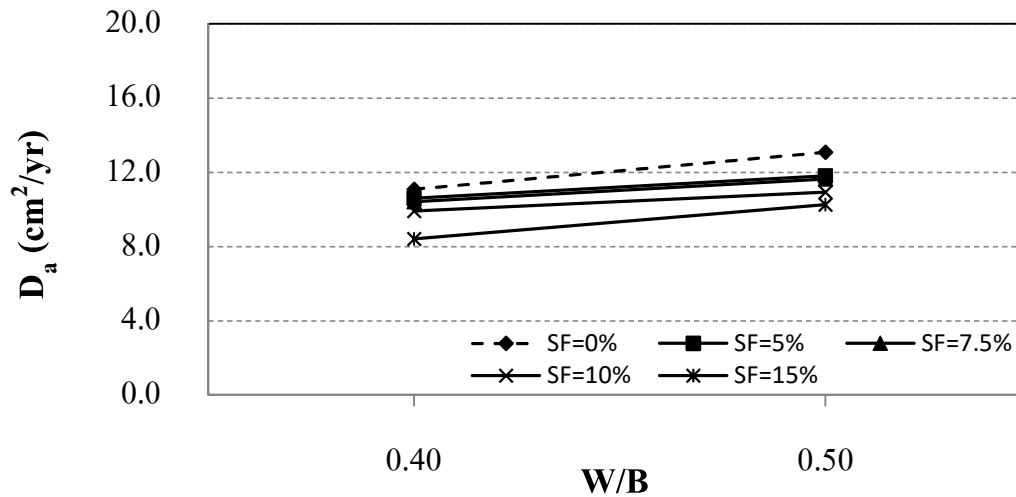
เพื่อให้การเปรียบเทียบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ มีความชัดเจนและพิจารณาได้ง่ายขึ้น จึงนำค่าการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) แล้วพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

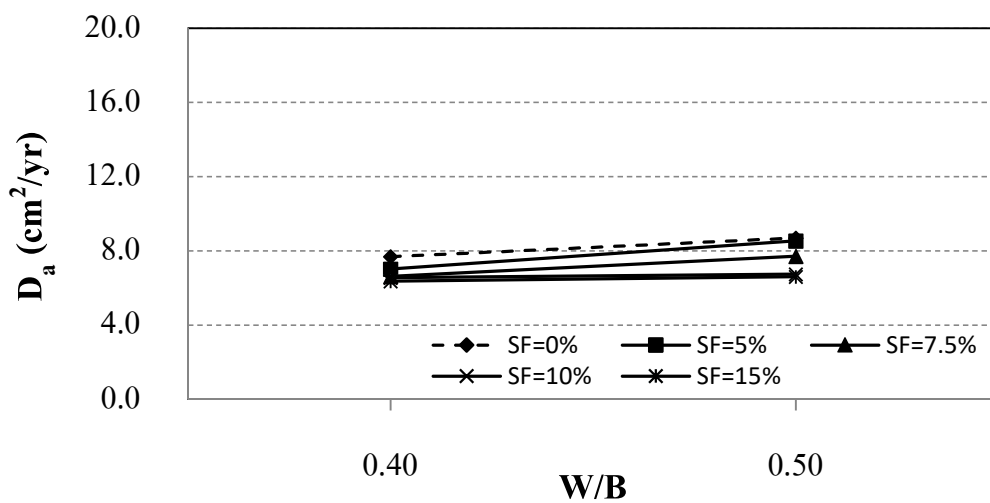
จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ทั้งที่ระยะเวลาเผชิญสารละลายคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน ดังแสดงได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำกว่า เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 นั้นมีปริมาณน้ำน้อยกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งเมื่อปริมาณน้ำน้อยก็จะทำให้คอนกรีตมีช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตน้อยลงและเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมที่เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กจึงช่วยเติมเต็มช่องว่างที่มีอยู่ให้มีจำนวนน้อย



(ก) ที่ระยะเวลาการแช่ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาการแช่ 56 วัน

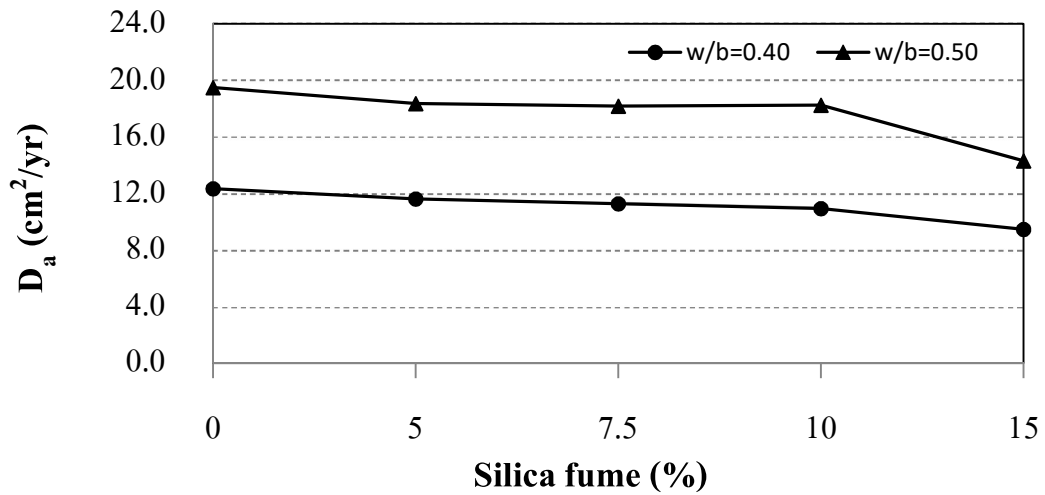


(ค) ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน

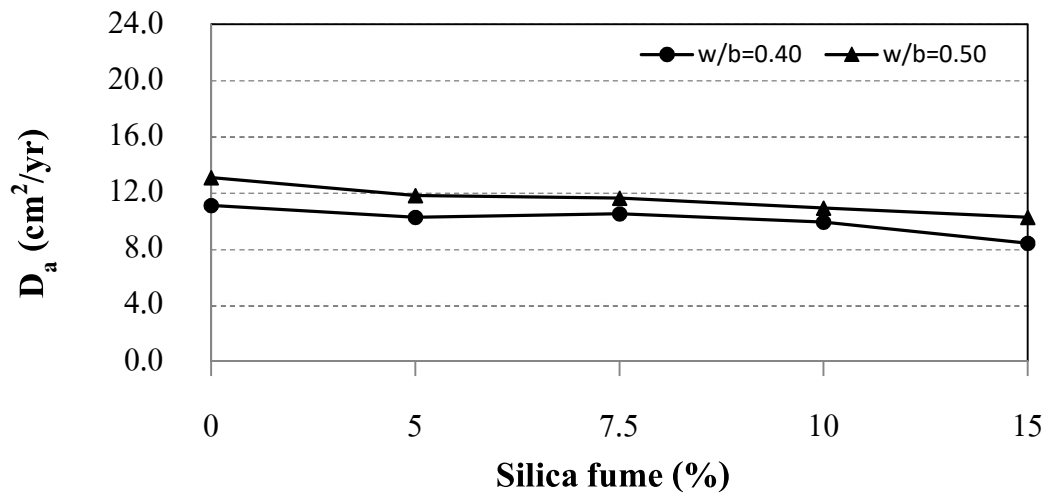
รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาฟุ่มต่อวัสดุประสาน

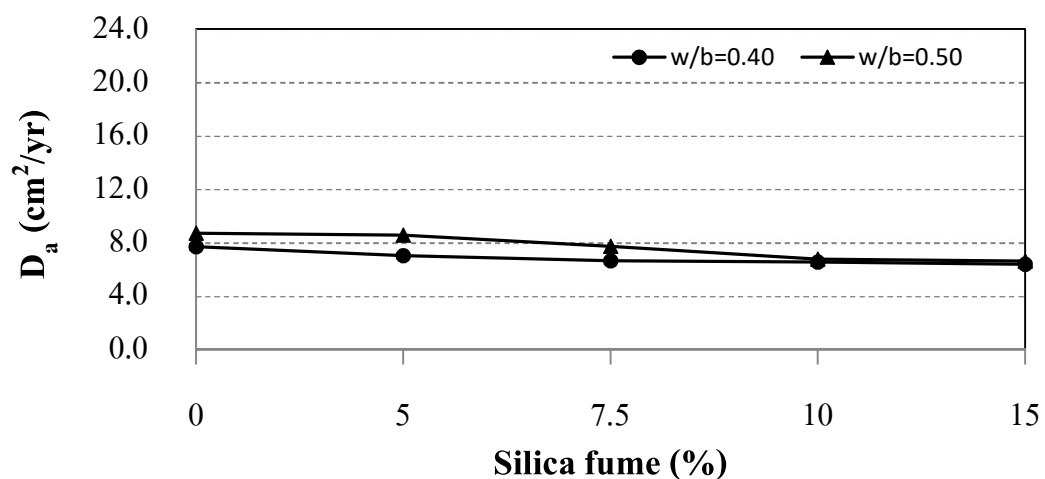
จากรูปที่ 4.8 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว เนื่องจากซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแทนที่ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 นั้นมีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ได้ดีที่สุด



(ก) ที่ระยะเวลาการแช่ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาการแช่ 56 วัน

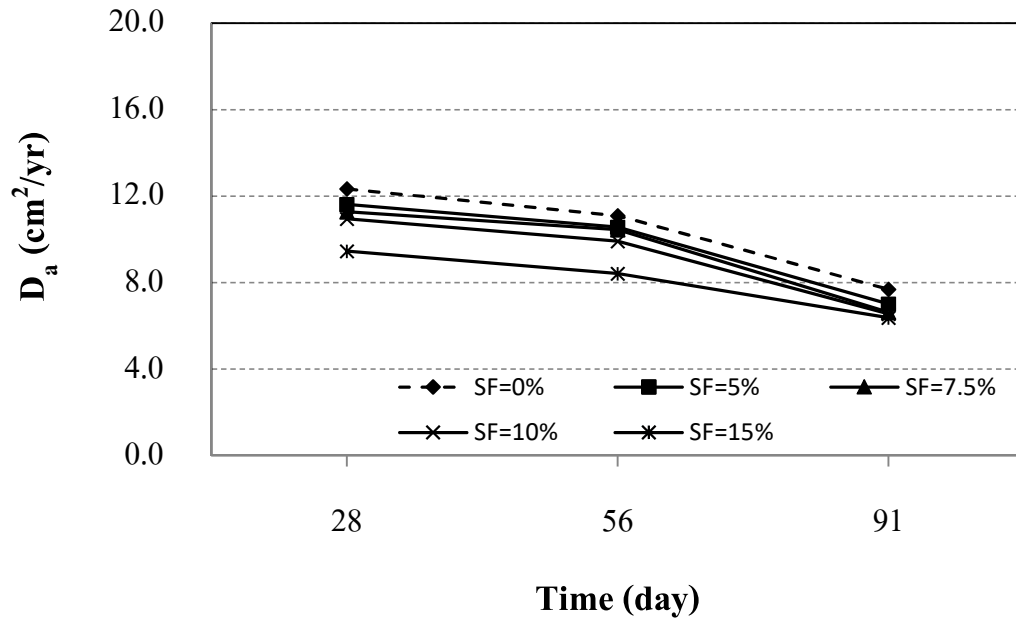


(ค) ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน

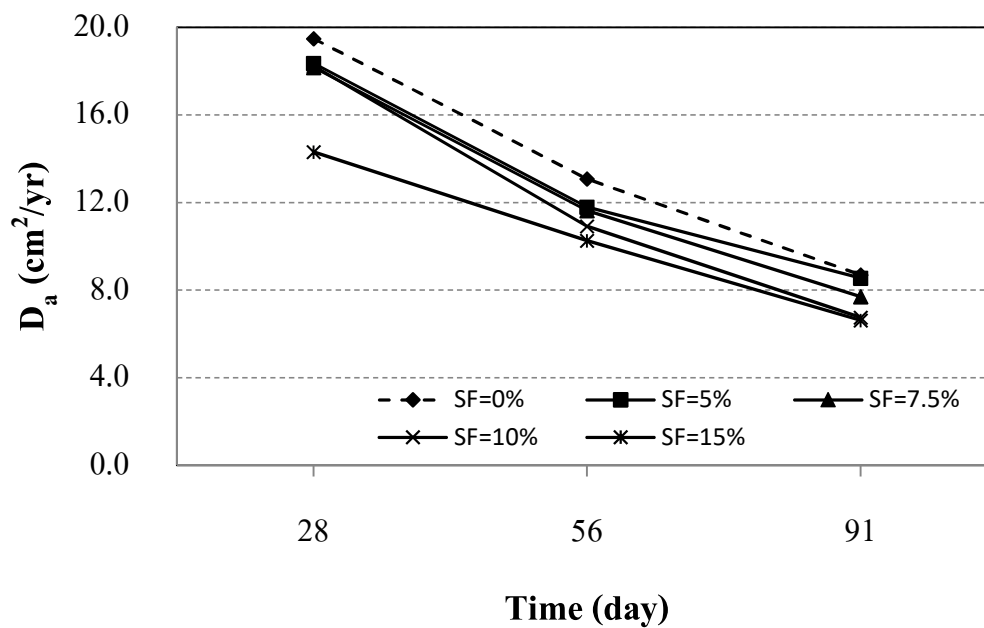
รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

4.2.3 ผลกระทบของระยะเวลา

จากรูปที่ 4.9 พิจารณาระยะเวลาการแช่ในสารละลายคลอไรด์ที่ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ระยะเวลาการแช่ที่ 91 วันดีที่สุดใน เนื่องจากระยะการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างเนื่อง และสมบูรณ์ที่สุด คอนกรีตจึงมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลง



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



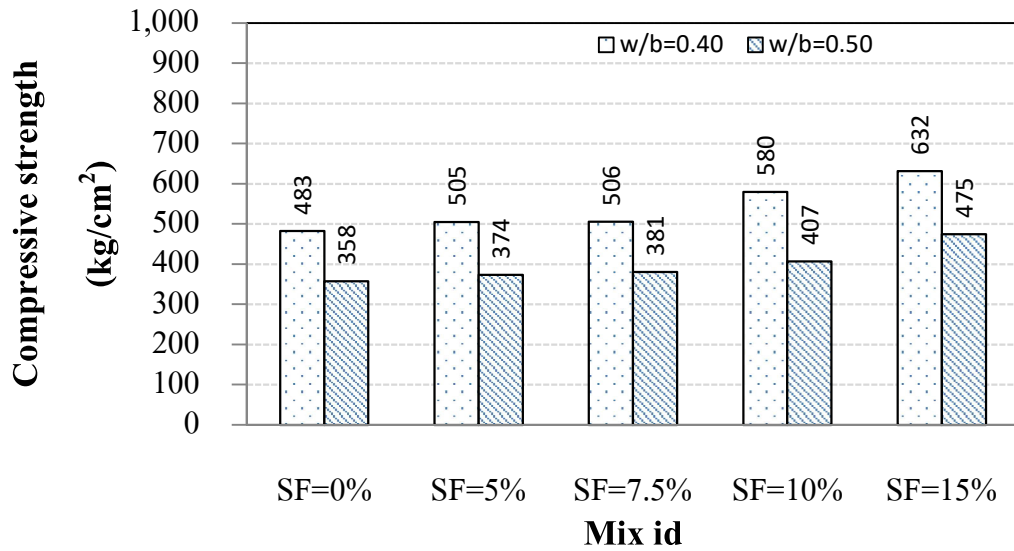
(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน

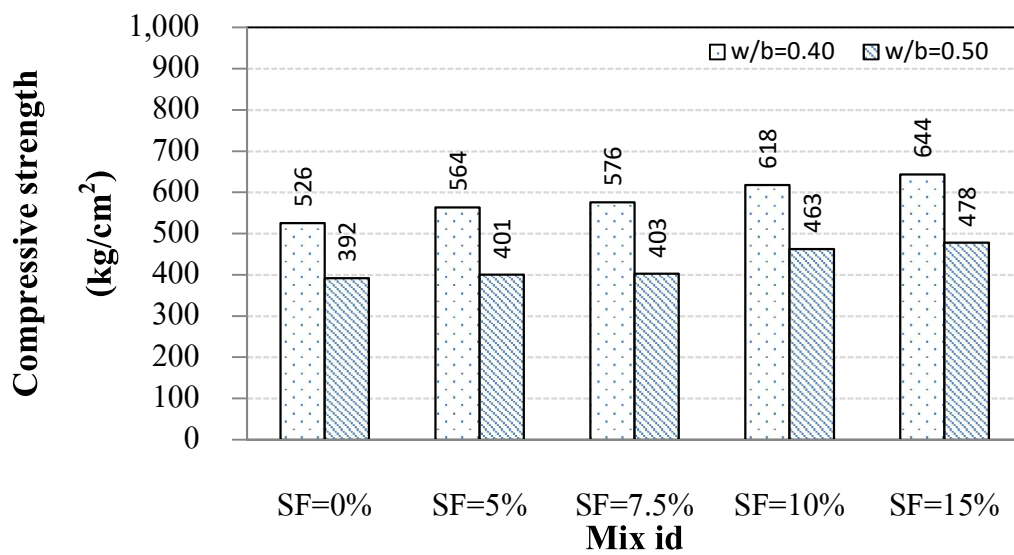
4.3 กำลั้งอัดของคอนกรีต

4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

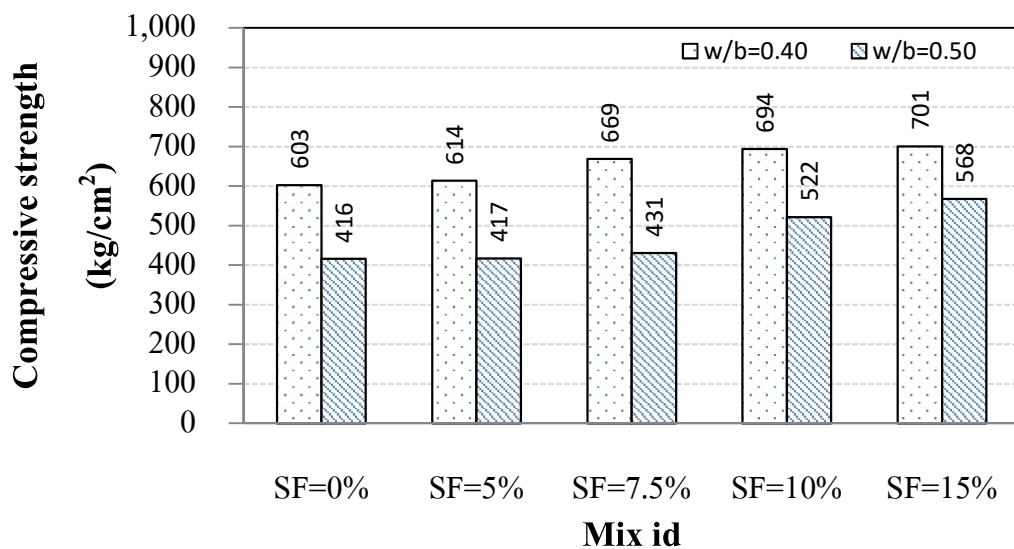
จากรูป 4.10 กำลั้งอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ให้กำลั้งอัดที่สูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำน้อยทำให้ช่องว่างภายในคอนกรีตน้อยลง และเมื่อมีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กเข้าไป ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำมีกำลั้งอัดที่สูงกว่า



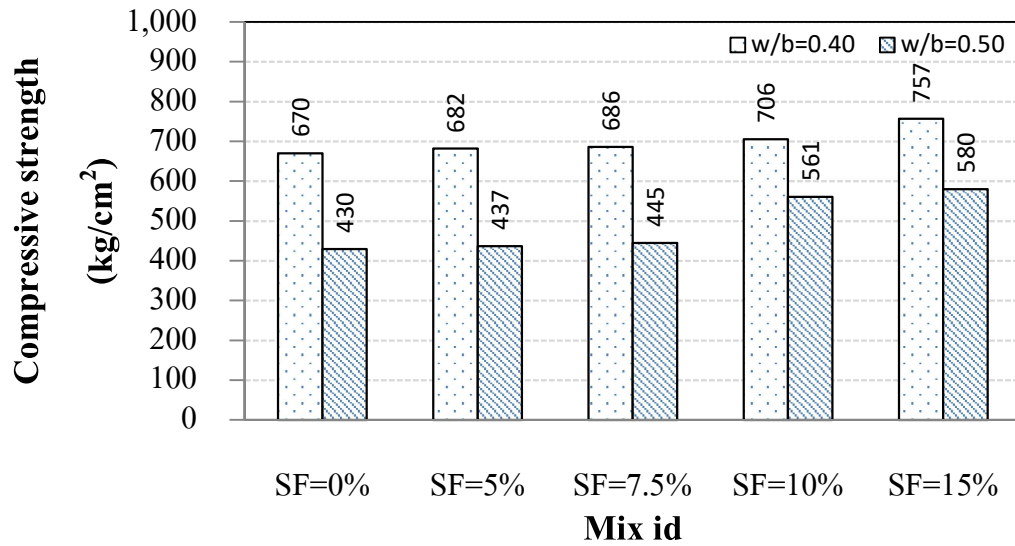
ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



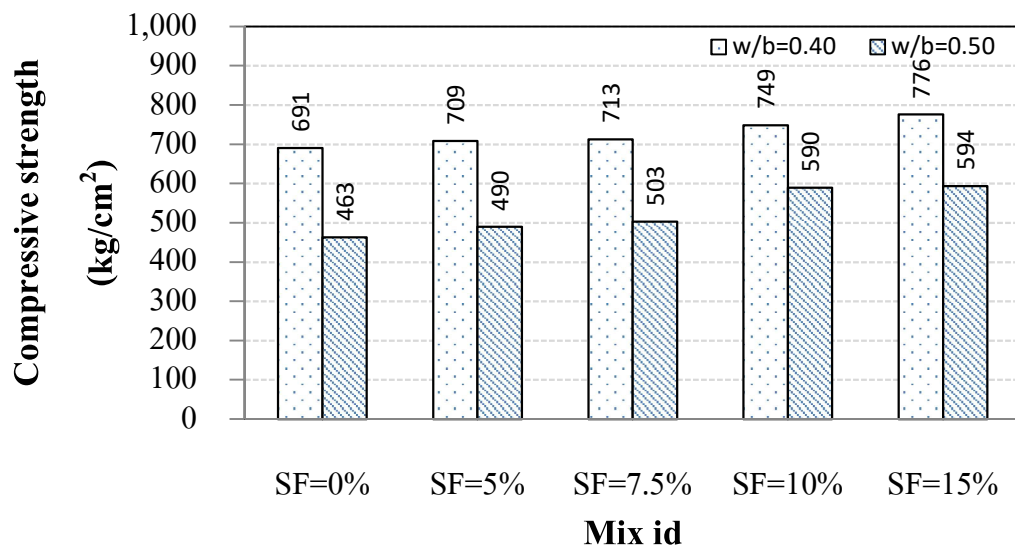
ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน



ค) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



ง) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

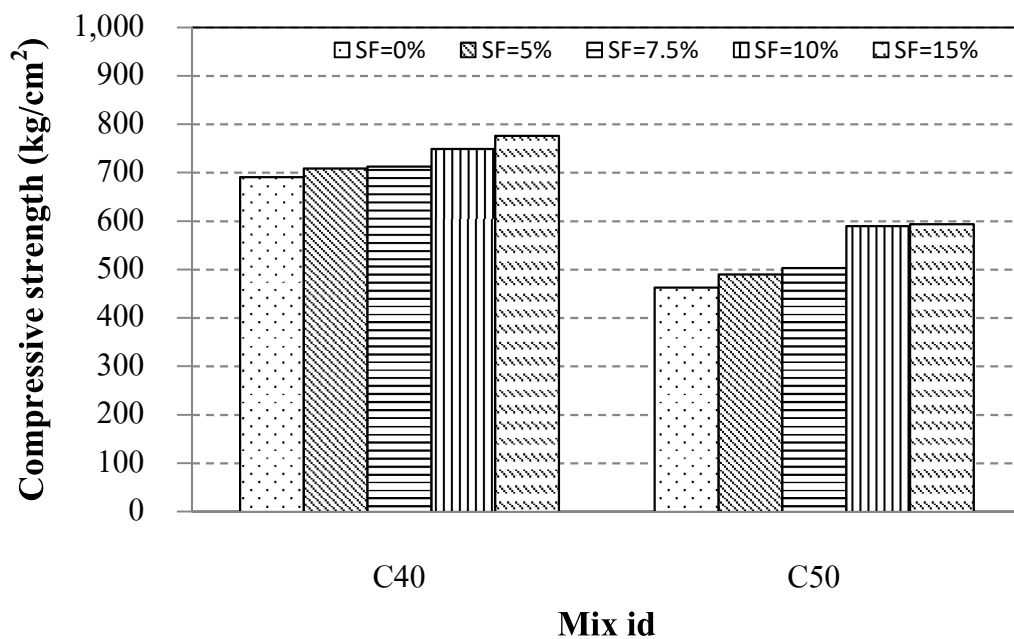


จ) ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน

รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสาน 0.40 และ 0.50

4.3.2 ผลกระทบอัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อวัสดุประสาน

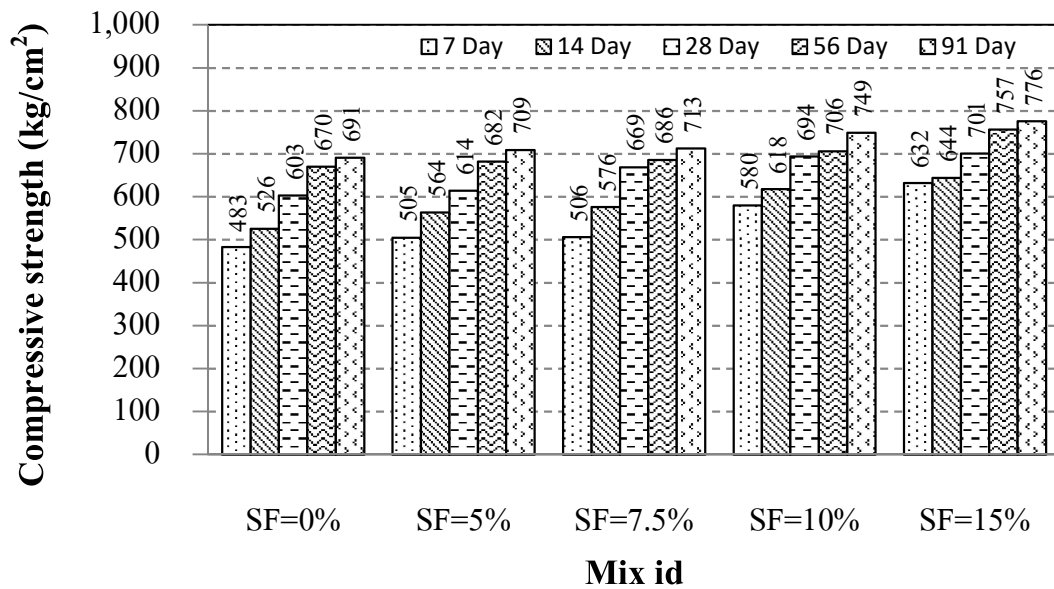
จากรูป 4.11 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 91 วัน ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 15 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนอื่นๆ และคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม เพราะซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น



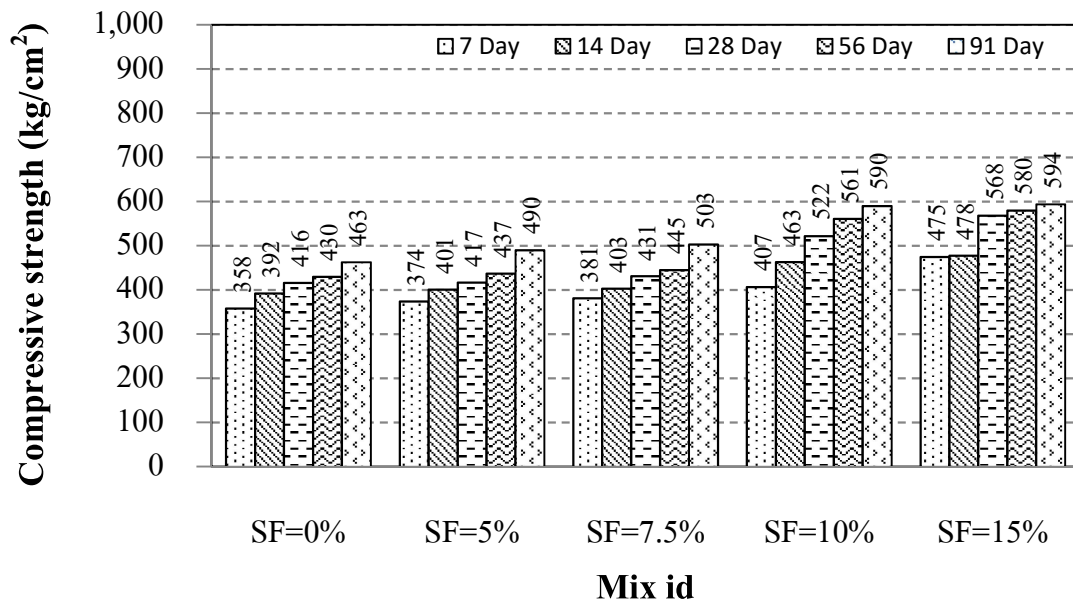
รูปที่ 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 91 วัน

4.3.3 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูป 4.12 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ซึ่งพบว่า ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ทั้งที่แทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มและไม่มี การแทนที่ กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาของการบ่ม เพราะระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

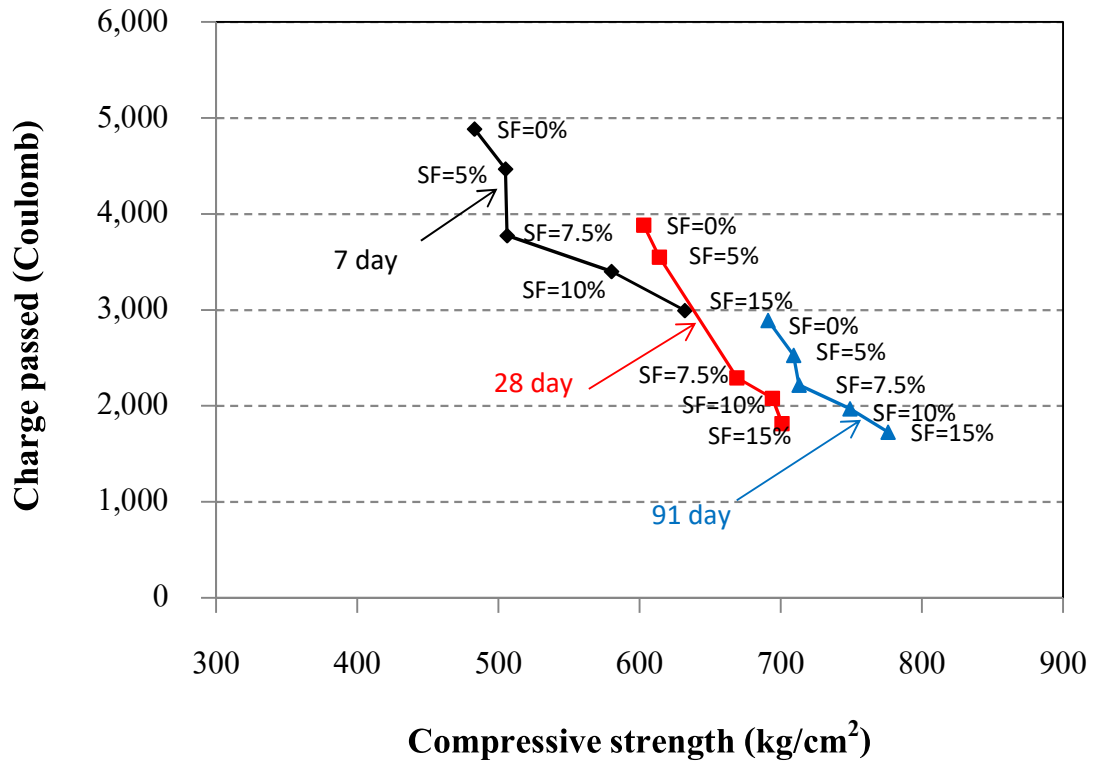
ในการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ซึ่งเป็นคุณสมบัติในด้านความคงทนของคอนกรีต มีความจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตไปพร้อมกันด้วย เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีทั้งความคงทนและกำลังที่ดี โดยเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

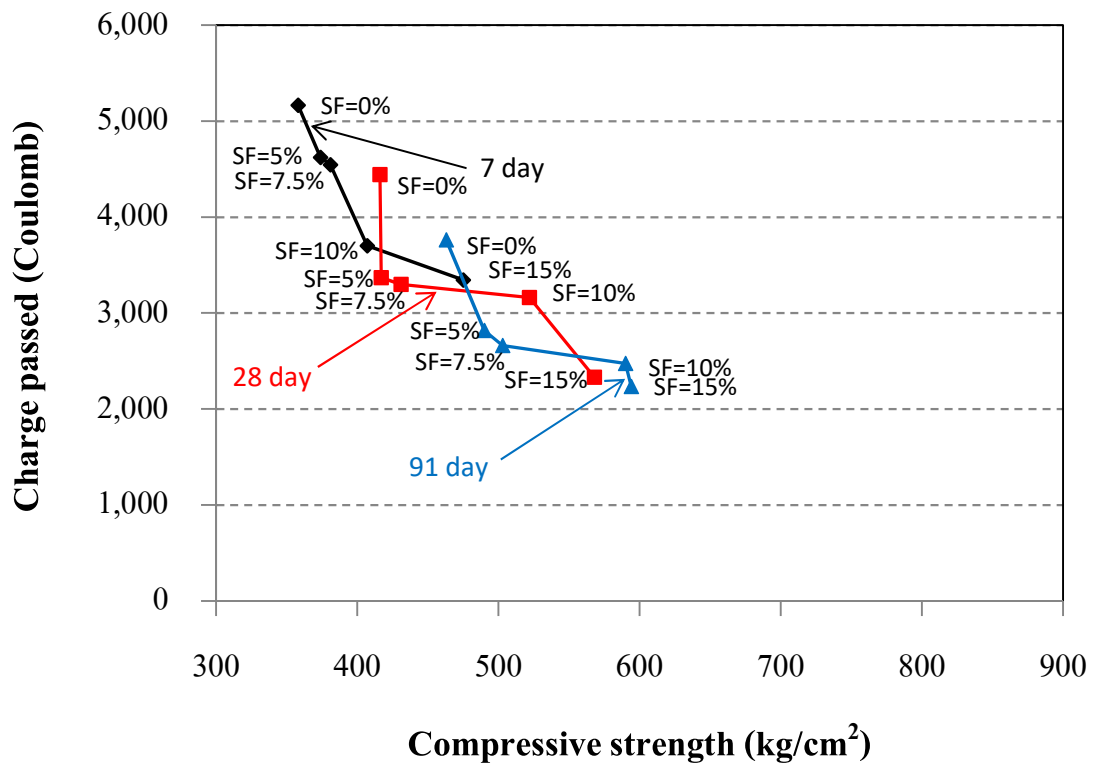
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและกำลังอัดพบว่า บริเวณด้านบนซ้ายของรูปมีการแทรกซึมคลอไรด์สูงและกำลังอัดต่ำ บริเวณด้านล่างซ้ายของรูปมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดต่ำ บริเวณด้านล่างขวาของรูปมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดสูง และบริเวณด้านบนขวาของรูปมีการแทรกซึมคลอไรด์สูงและกำลังอัดสูง ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่มีเพียงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์สูงและค่ากำลังอัดต่ำ การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมจะให้ทั้งค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ ซึ่งการแทนที่ในร้อยละ 15 จะให้ค่าทั้งสองสูงที่สุด เนื่องจากซิลิกาฟูมมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น เมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดสูง และเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้นการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ส่งผลค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่มีเพียงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์สูงและค่ากำลังอัดต่ำ การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมจะให้ทั้งค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ ซึ่งการแทนที่ในร้อยละ 15 จะให้ค่าทั้งสองสูงที่สุด เนื่องจากซิลิกาฟูมมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น เมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดสูง และเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้นการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ส่งผลค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำและกำลังอัดมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต ในระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



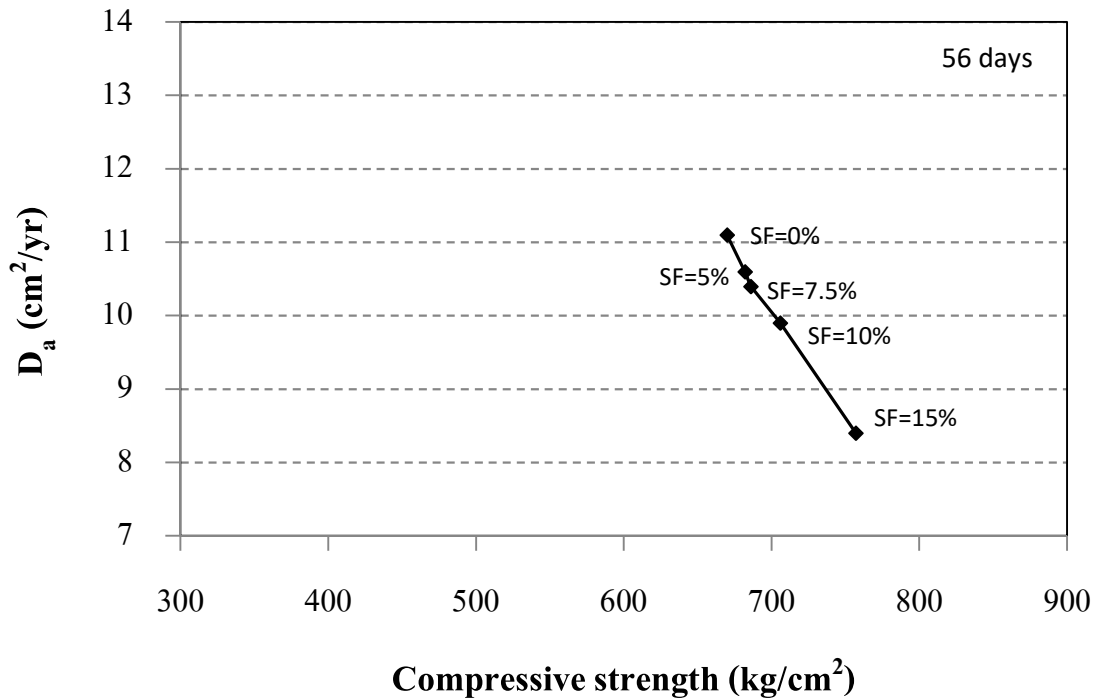
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต ในระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

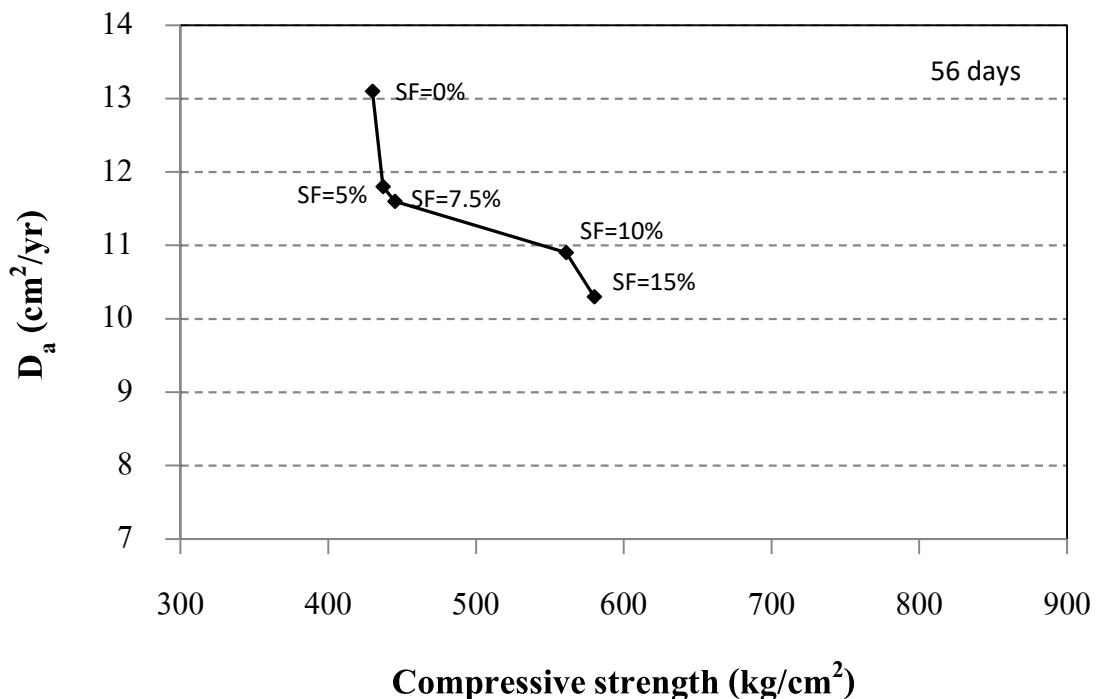
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่และกำลังอัดจะพบว่า บริเวณด้านบนซ้ายของรูปมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงและกำลังอัดต่ำ บริเวณด้านล่างซ้ายของรูปมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำและกำลังอัดต่ำ บริเวณด้านล่างขวาของรูปมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำและกำลังอัดสูง และบริเวณด้านบนขวาของรูปมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงและกำลังอัดสูง ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าลดลง กำลังสูงขึ้น คอนกรีตล้วนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตสูง และกำลังอัดต่ำ ซึ่งคอนกรีตที่มีการผสมซิลิกาฟูมจะให้ค่าที่ตรงกันข้ามกับคอนกรีตล้วน และเมื่อมีการผสมซิลิกาฟูมเข้าไปถึงร้อยละ 15 ผลที่ได้ทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่และกำลังอัดจะให้ค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นสารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆดีขึ้น และด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ที่สุด

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าลดลง กำลังสูงขึ้น คอนกรีตล้วนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตสูง และกำลังอัดต่ำ ซึ่งคอนกรีตที่มีการผสมซิลิกาฟูมจะให้ค่าที่ตรงกันข้ามกับคอนกรีตล้วน และเมื่อมีการผสมซิลิกาฟูมเข้าไปถึงร้อยละ 15 ผลที่ได้ทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่และกำลังอัดจะให้ค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นสารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆดีขึ้น และด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ที่สุด แต่ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่าจึงทำได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง กำลังอัดต่ำกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 56 วัน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 56 วัน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบ เร่งของคอนกรีต

ในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมด้วยการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งนั้น ทดสอบที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ส่วนการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบช้าใน สารละลายคลอไรด์นั้น ตัวอย่างคอนกรีตมีอายุการบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญสารละลายคลอไรด์อีก 28, 56 และ 91 วัน ทำให้อายุตัวอย่างคอนกรีตไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบหา ความสัมพันธ์กันได้โดยตรง แต่หากสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการ แทรกซึมของคลอไรด์ และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ แยกกัน ได้แทน โดยจากรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของ คอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ก็จะสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านและสัมประสิทธิ์การ แพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ เมื่อกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\text{RCPT} = -10.179f'_c + 9,498.2 \quad (4.1)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม²)

RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต (คูลอมป์)

$$D_a = -0.030f'_c + 31.106 \quad (4.2)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม²)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (ซม²/ปี)

จากรูปที่ 4.18 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน 0.40 ก็จะสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของ คอนกรีตได้ เมื่อกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$\text{RCPT} = -10.614f'_c + 8,407.6 \quad (4.3)$$

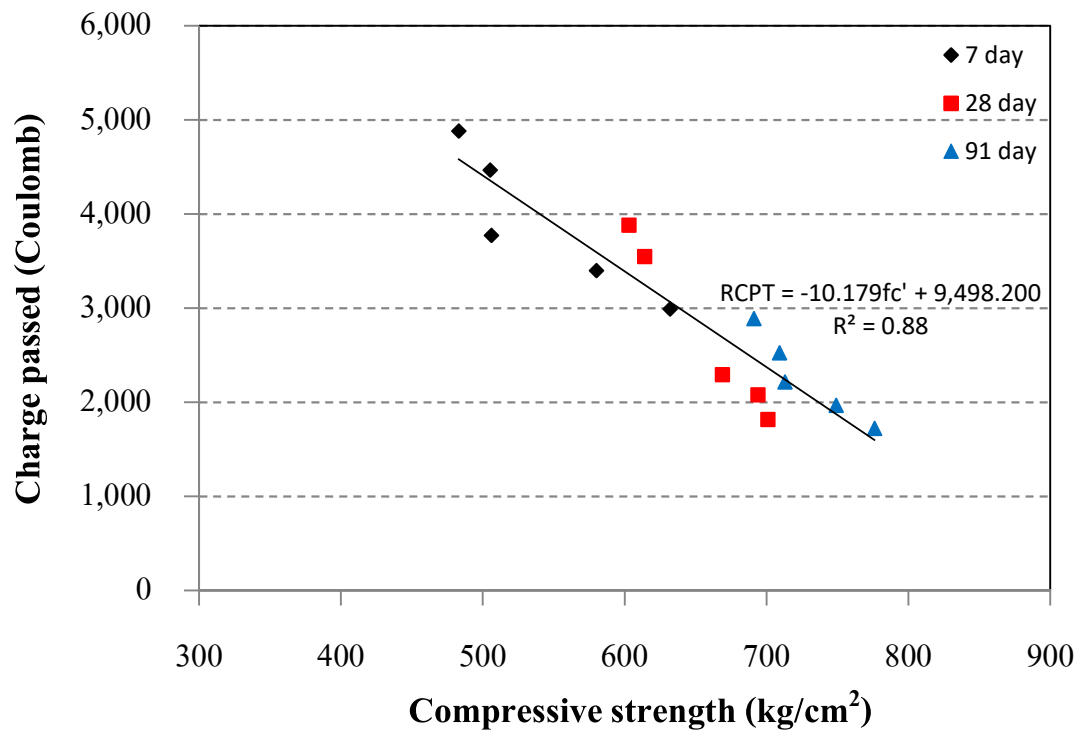
โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม²)

RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต (คูลอมป์)

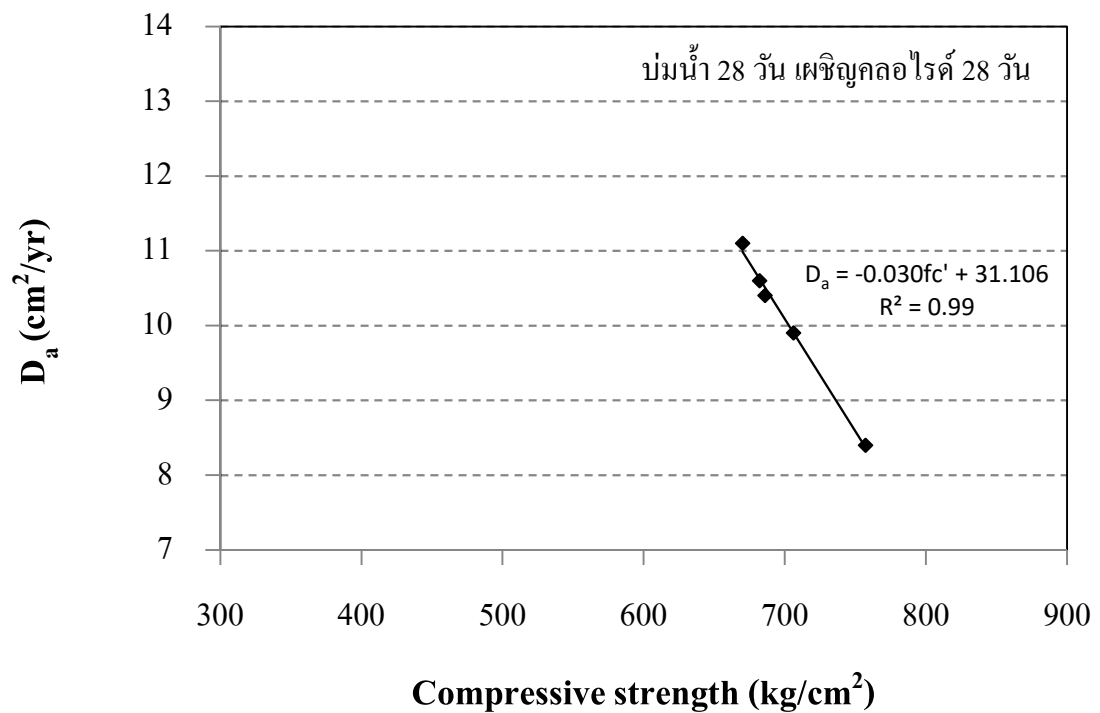
$$D_a = -0.012f'_c + 17.615 \quad (4.4)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม²)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (ซม²/ปี)

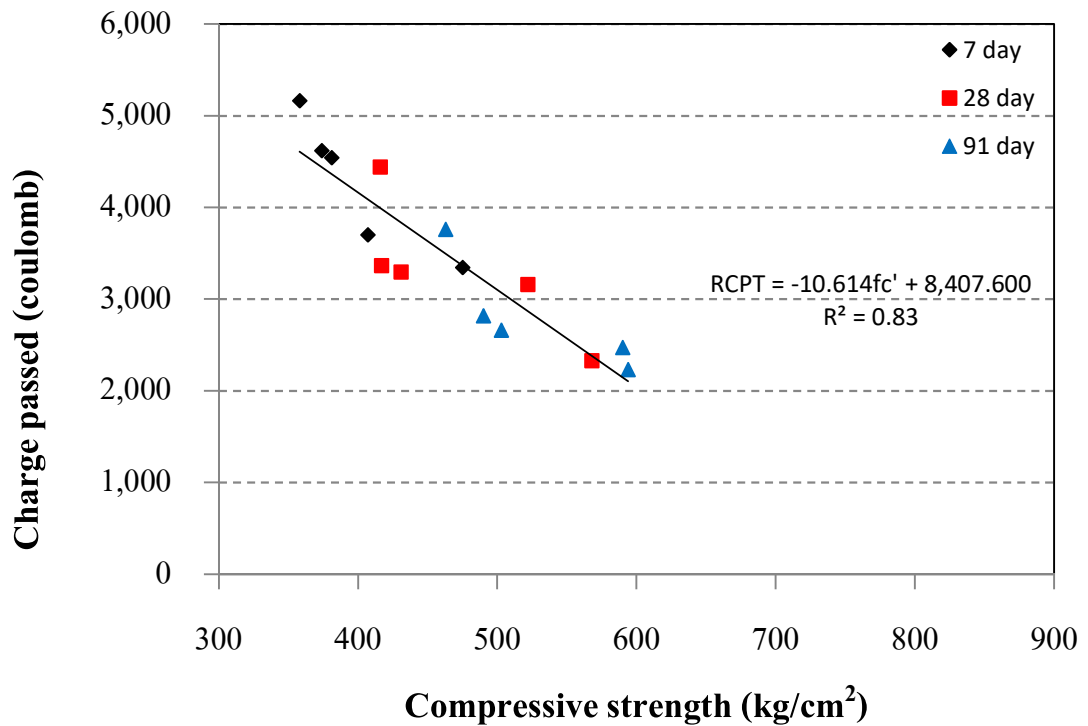


ก) ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต

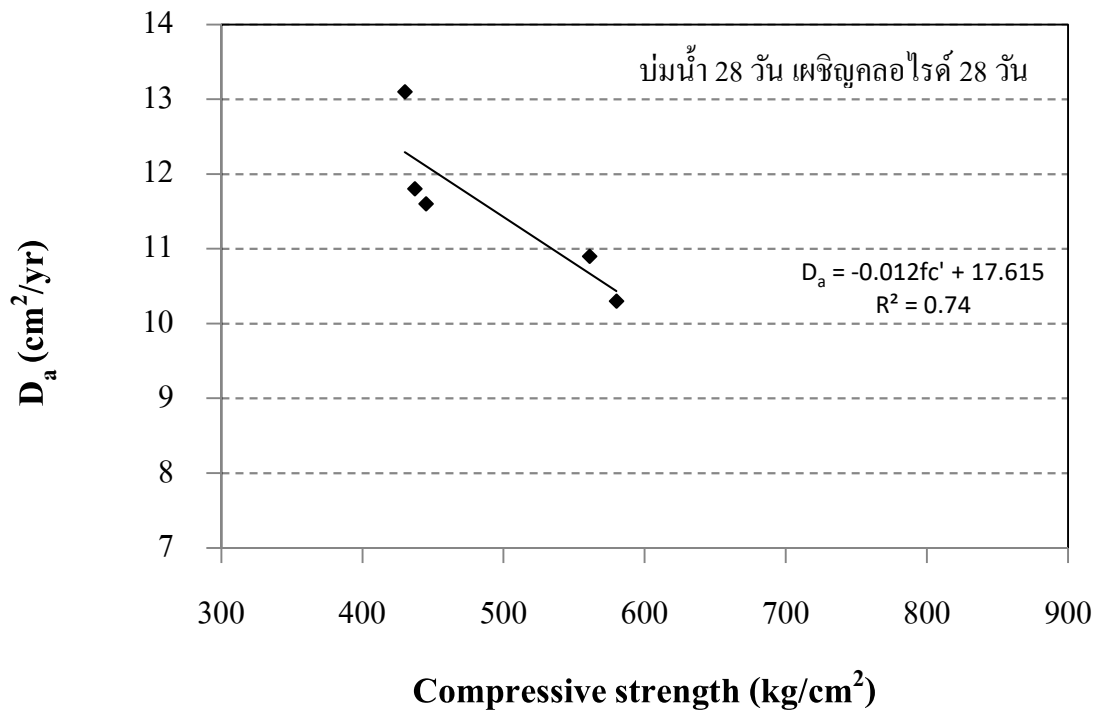


ข) ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ก) ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต



ข) ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

1. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานของคอนกรีตร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 มีผลกระทบต่อกำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 และทุกๆระยะเวลาการบ่มคอนกรีต ช่วยปรับปรุงให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น แต่การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน

2. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15 มีการแทรกซึมของคลอไรด์สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตดีที่สุด ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 และทุกๆระยะเวลาการบ่ม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำถึง $6.4 \text{ cm}^2/\text{yr}$ ค่ากำลังอัดสูงถึง 776 kg/cm^2 และปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน 1,726 คูลอมป์ ที่อายุ 91 วัน (คอนกรีตล้วนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ $7.7 \text{ cm}^2/\text{yr}$ ค่ากำลังอัด 691 kg/cm^2 และปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน 2,893 คูลอมป์) เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น การแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในปริมาณมากขึ้น และในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทั้งในด้านกำลัง ความคงทน และการแทรกซึมดีที่สุด

3. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้เมื่อทราบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม โดยจากค่าของกำลังอัดที่เท่ากันสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ได้จากกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานถึงร้อยละ 15 ในคอนกรีตยังทำให้กำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมมากกว่าร้อยละ 15 เพื่อตรวจสอบความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตว่ายังมีคุณสมบัติที่ดีหรือไม่ เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมในคอนกรีตต้องอาศัย Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ด้วย

2. เนื่องจากการบ่มคอนกรีตในงานก่อสร้างจริงมักละเลยการบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นที่เหมาะสม และเพียงพอจึงทำให้มีความแตกต่าง จากการศึกษาในโรงงานนี้ซึ่งมีการบ่มคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมในน้ำ จึงมีความจำเป็นในการศึกษาอิทธิพลของการบ่มคอนกรีตในอากาศต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม

3. เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตทำให้กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น จึงควรมีการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมด้วย เพื่อใช้อธิบายการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

มีแผนเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

บรรณานุกรม

ทวีชัย สำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกัน และแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ASTM C 1218. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

ASTM C 1152. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

C.D. Atis, F. Ozcan, A. Kılıc , O. Karahan, C. Bilim, M.H. Severcan., 2004. Civil Engineering Department, Cukurova University, 01330 Balcali-Adana, Turkey

D.P. Bentz., 2000. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive Stop 8621, Gaithersburg, MD 20899-8621, USA

G. Appa Rao., 2001. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India

Ha-Won Song, Seung-Woo Pack, Sang-Hyeok Nam, Jong-Chul Jang, Velu Saraswathy., 2009.

Department of Civil Eng., Yonsei Univ., Seoul 120-740, Republic of Korea

Houssam A. Toutanji, Ziad Bayasi., 1999. Department of Civil Engineering, San Diego State University, San Diego, CA 92182, USA Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA

Houssam A. Toutanji, Tahar El-Korchi., 1995. University of Puerto Rico, Mayaguez, PR 00681 Mayaguez, PuertoRico, 00681, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609 Worcester, MA 01609

Jafar Sobhani , Meysam Najimi, 2013. Department of Concrete Technology, Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Tehran 13145-1696, Iran Department of Civil and Environmental Engineering and Construction, University of Nevada, Las Vegas, NV, USA

J.M.R. Dotto, A.G. de Abreu, D.C.C. Dal Molin b, I.L. Muller., 2004. Department of Structures and Civil Construction, Federal University of Santa Maria, 97119-900 RS, Brazil Department of Civil Engineering, Federal University of Rio, Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha, 99-90035-190 Porto Alegre, RS, Brazil Department of Metallurgy,

Federal University of Rio, Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha, 99-90035-190 Porto Alegre, RS, Brazil

J. G. Cabrera, P. A. Claisset and D. N. Hunt., 1995. CEMU, Department of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK School of the Built Environment, Coventry University, Coventry, CV15FB, UK School of Mathematics and information Science, Coventry University, Coventry, CV15FB, UK

K. GANESH BABU, P.V. SURYA PRAKASH., 1995. Ocean Engineering Centre, Indian Institute of Technology, Ocean Engineering Centre, IIT, Madras

Linhua Jiang, Guohong huang, Jinxia Xu Yeran Zhu, Lili Mo., 2012. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, PR China Nanjing Hydraulic Research Institute, Ruidi High Technology Co., Nanjing 210024, PR China.

Mohammad Iqbal Khan, Rafat Siddique., 2011. Department of Civil Engineering, King Saud University, P.O. Box 800, Riyadh 11421, Saudi Arabia Civil Engineering, Thapar University, Patiala, Punjab – 147004, India

Marlova P. Kulakowski, Fernanda M. Pereira, Denise C.C. Dal Molin., 2009. Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Av. Unisinos, 950, 93022-000 So Leopoldo, RS, Brazil Programa de Pos-Graduacao em Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais, Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Fundacao de Ciencia e Tecnologia (CIENTEC), Brazil Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brazil

Mohammad Shekarchi, Alireza Rafiee, Hamed Layssi., 2009. Construction Materials Institute, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

O.S.B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, M. Shameem, M. Ibrahim., 2007. King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

O. Kayali, B. Zhu., 2005. School of Aerospace, Civil and Mechanical Engineering, University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy, Canberra, ACT 2600, Australia

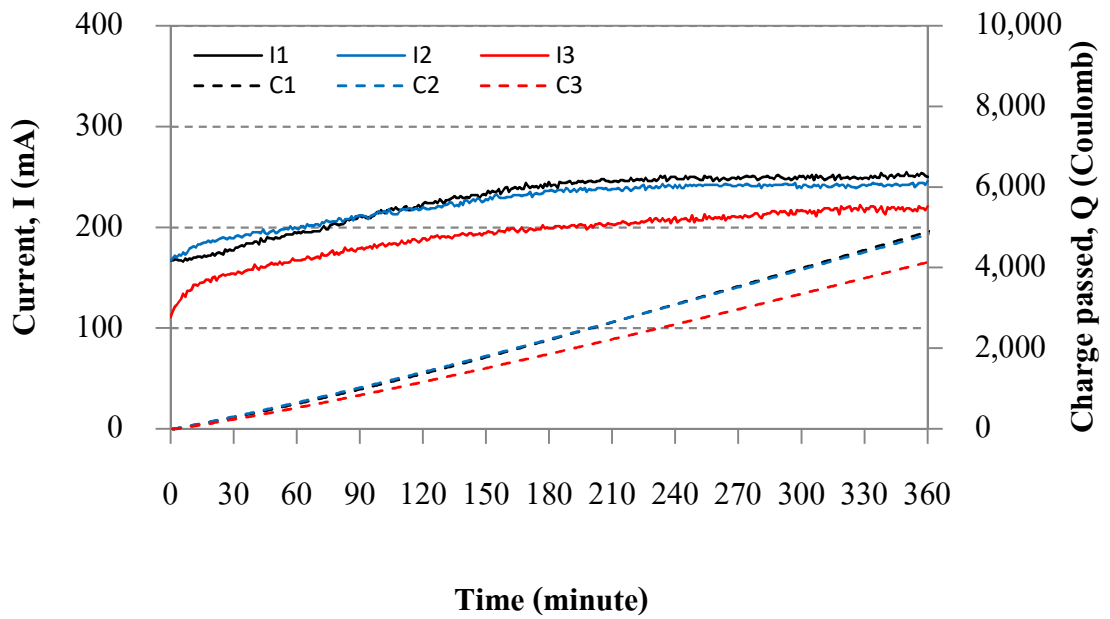
R. Duval and E.H. Kadri., 1998. Laboratoire de Mate riaux et Science des Constructions, Universite de Cergy-Pontoise, Rue d'Eragny, Neuville-sur Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France

- S. Bhanja, B. Sengupta., 2005. Department of Civil Engineering, Bengal Engineering College (D.U.), Howrah, West Bengal, 711103, India Department of Civil Engineering, Jadavpur University, Kolkata, West Bengal, 700032, India
- S. Wild, B.B. Sabir, and J.M. Khatib., 1995. Centre for Research in the Built Environment, University of Glamorgan, Pontypridd. UK

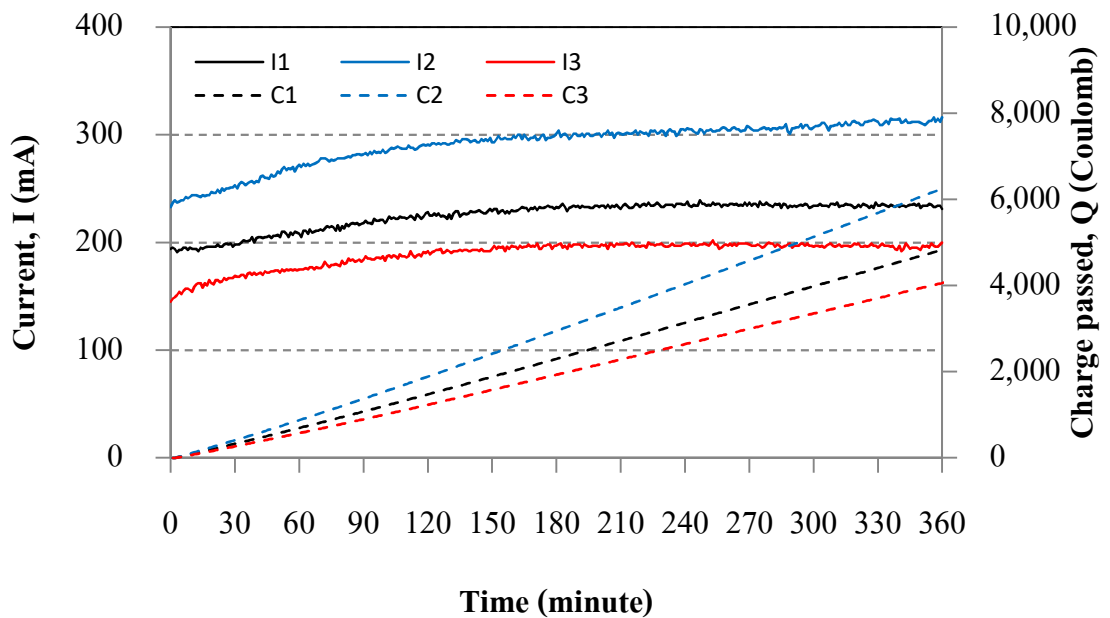
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

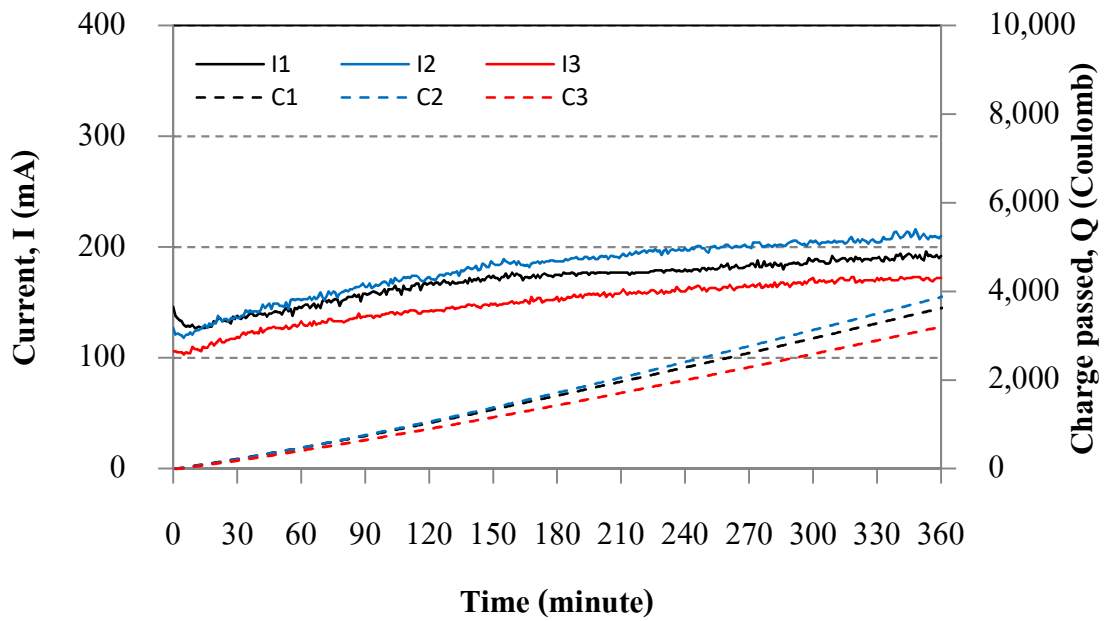
กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต



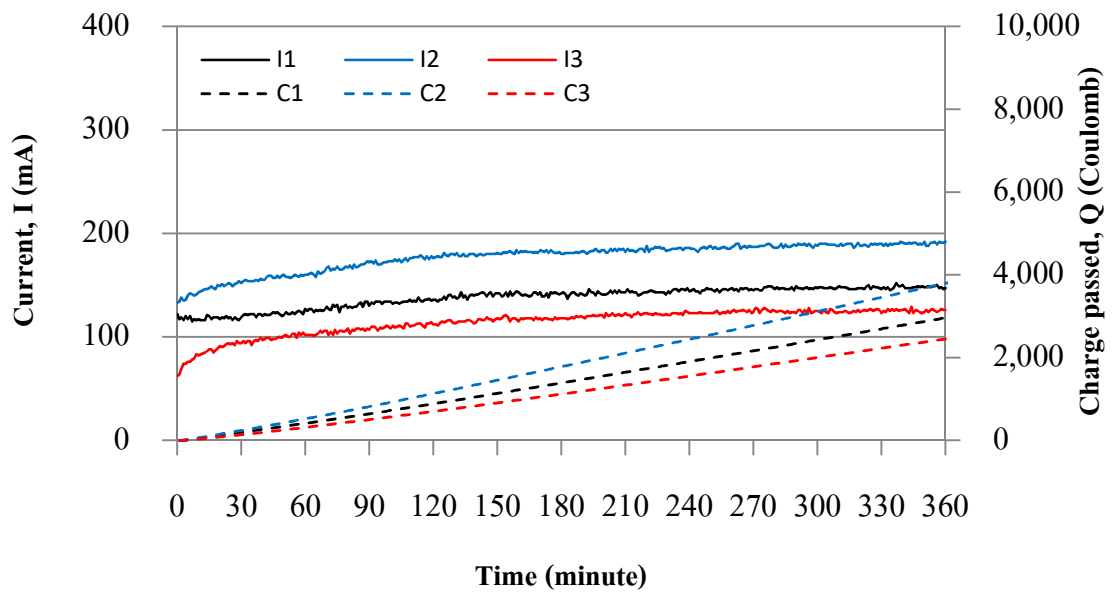
รูปที่ ก-1 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



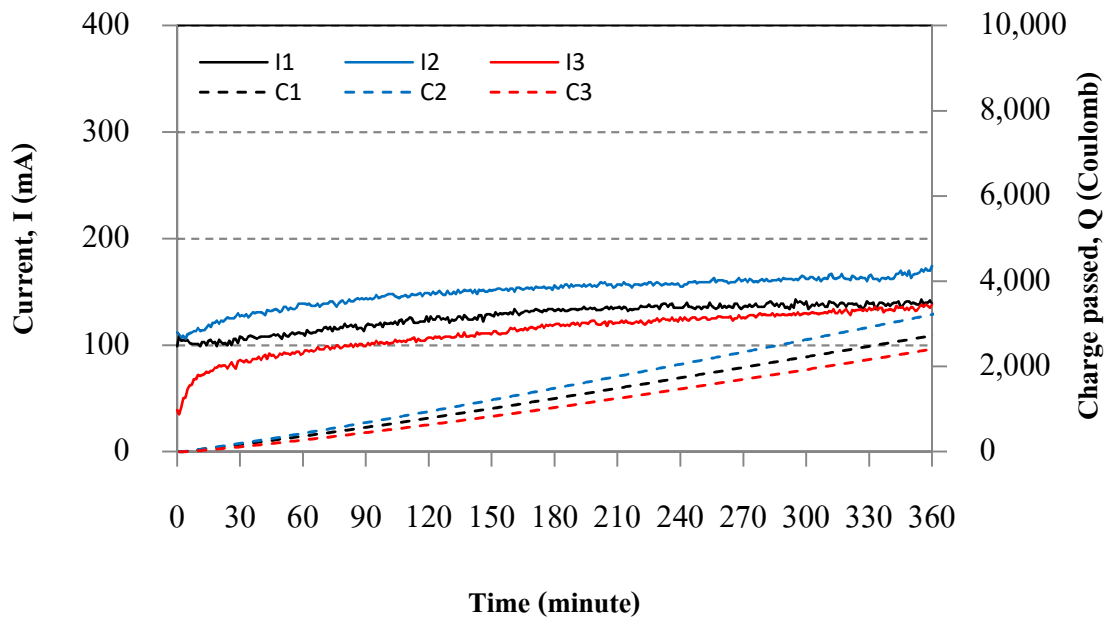
รูปที่ ก-2 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF50
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



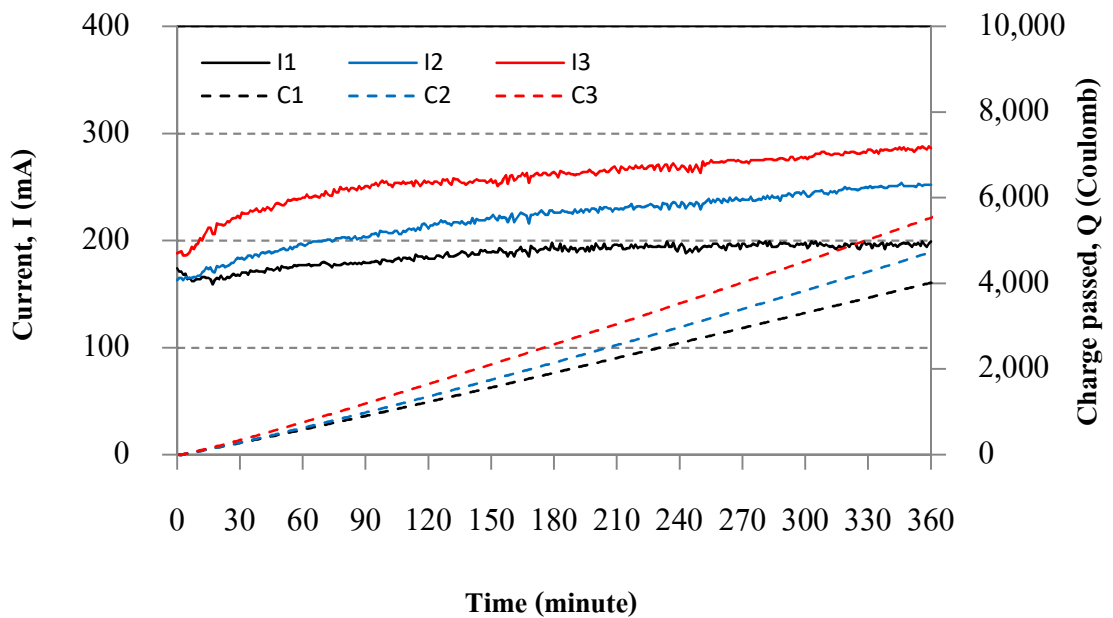
รูปที่ ก-3 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF075
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



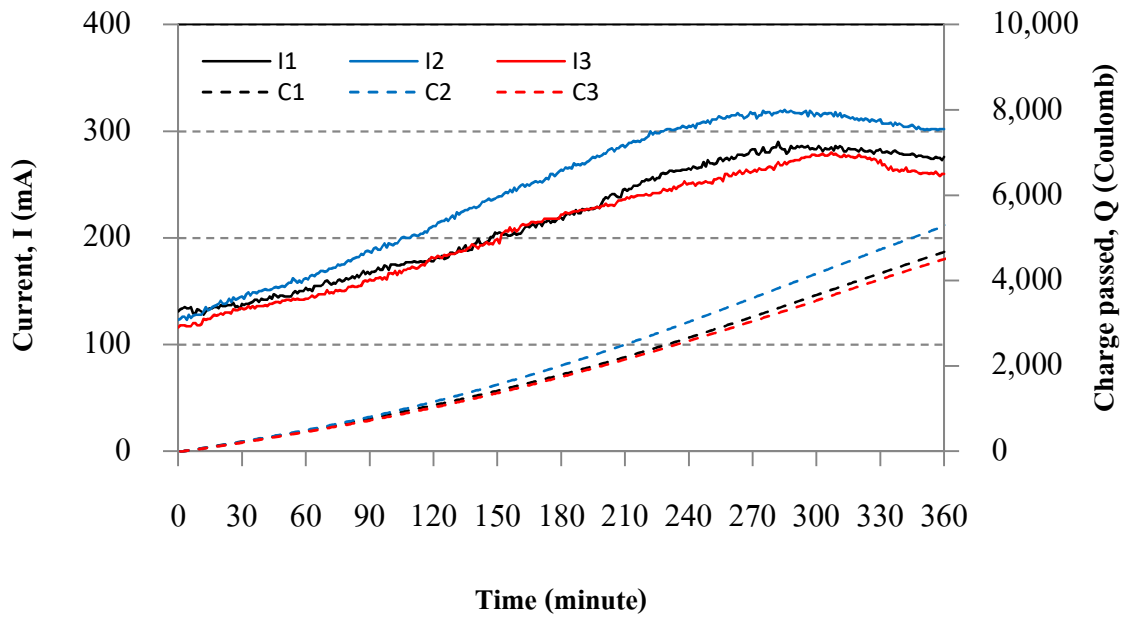
รูปที่ ก-4 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF100
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



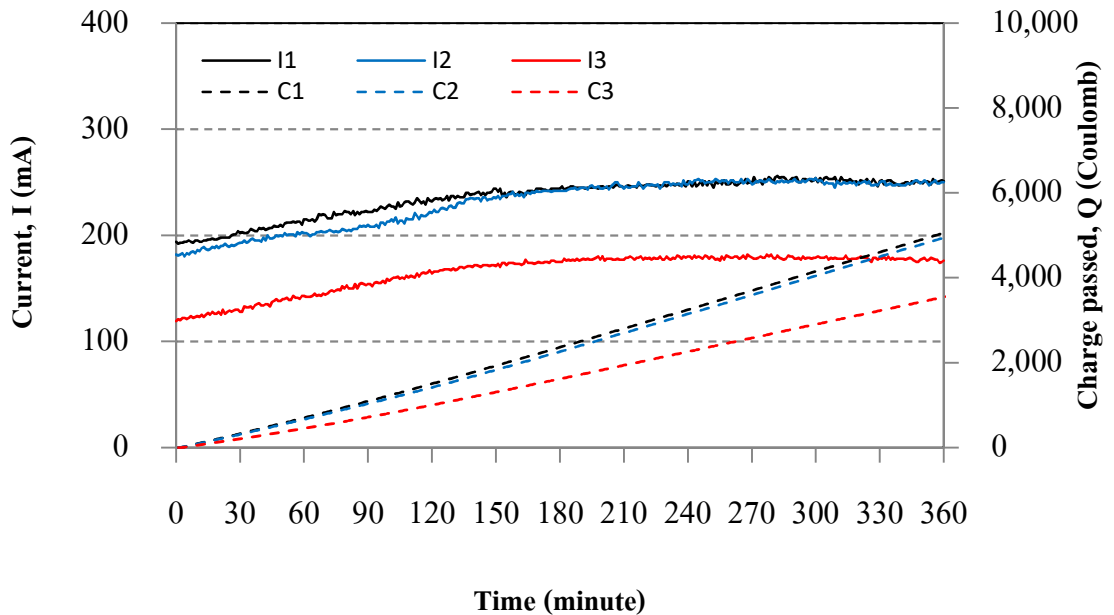
รูปที่ ก-5 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF150
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



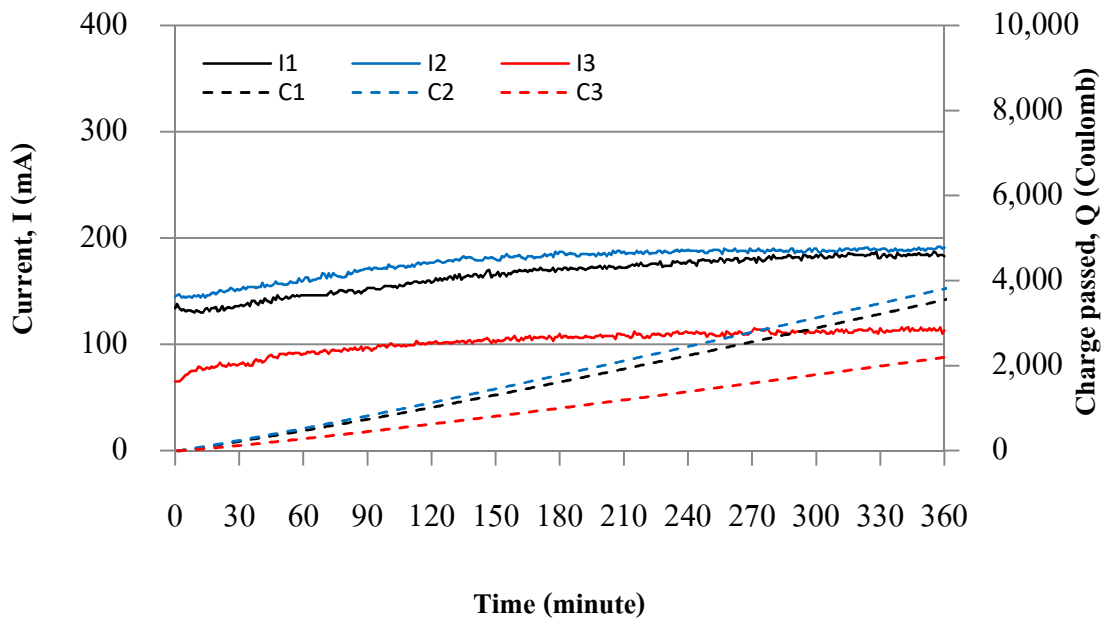
รูปที่ ก-6 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



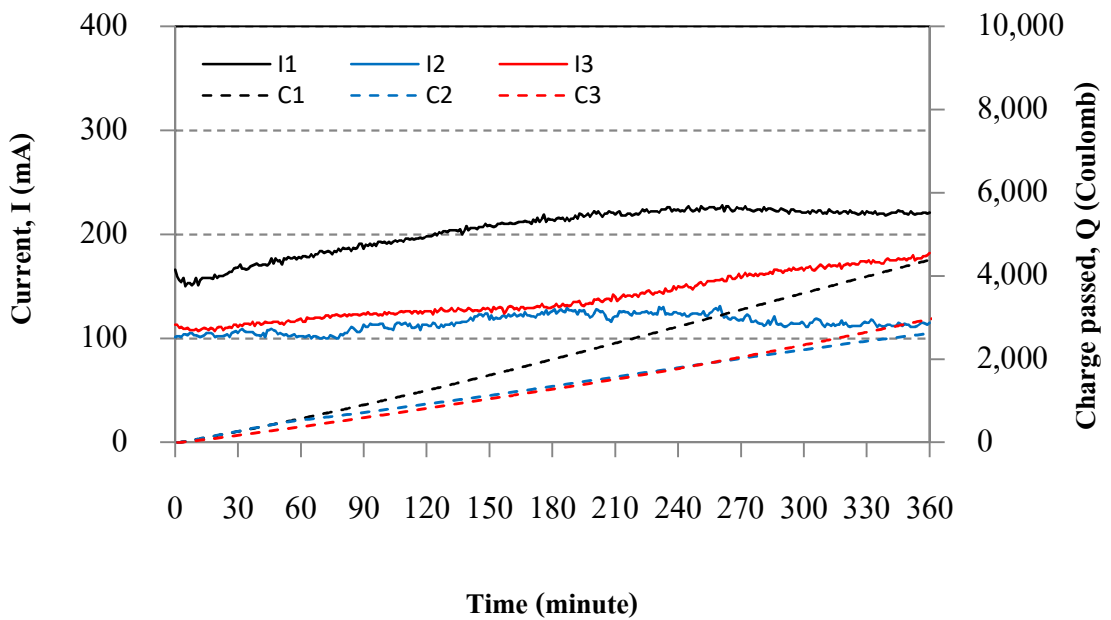
รูปที่ ก-7 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF050
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



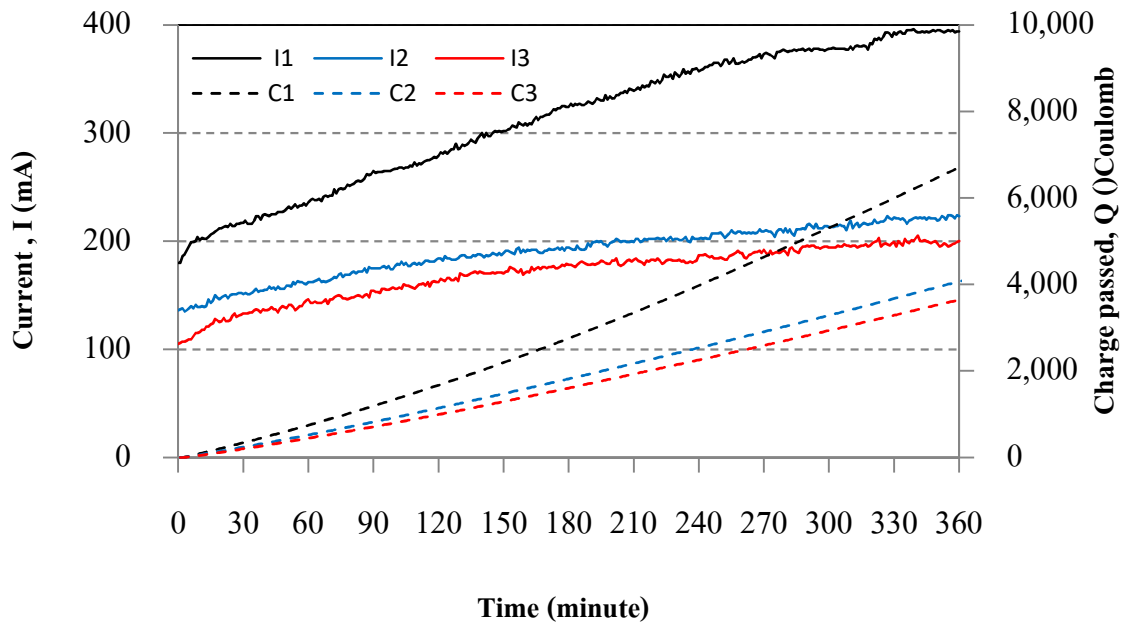
รูปที่ ก-8 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF075
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



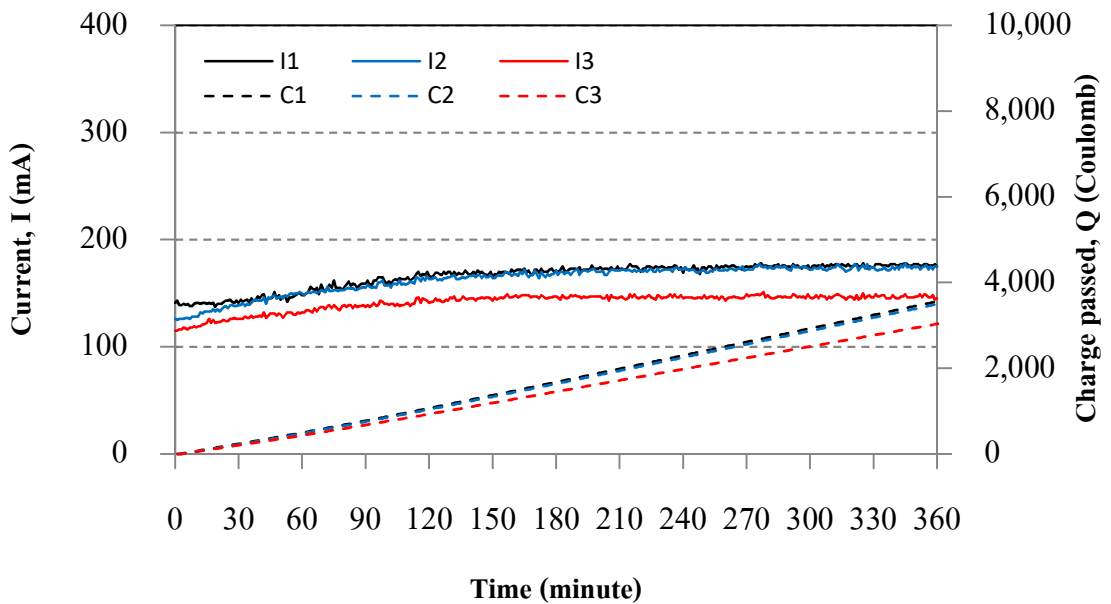
รูปที่ ก-9 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF100
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



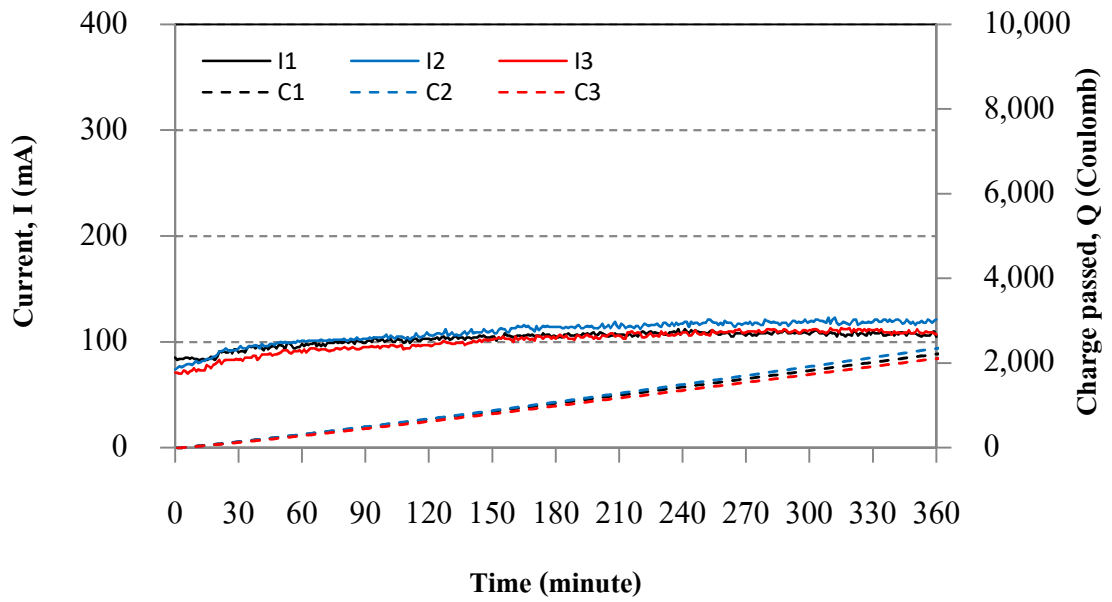
รูปที่ ก-10 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF150
ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



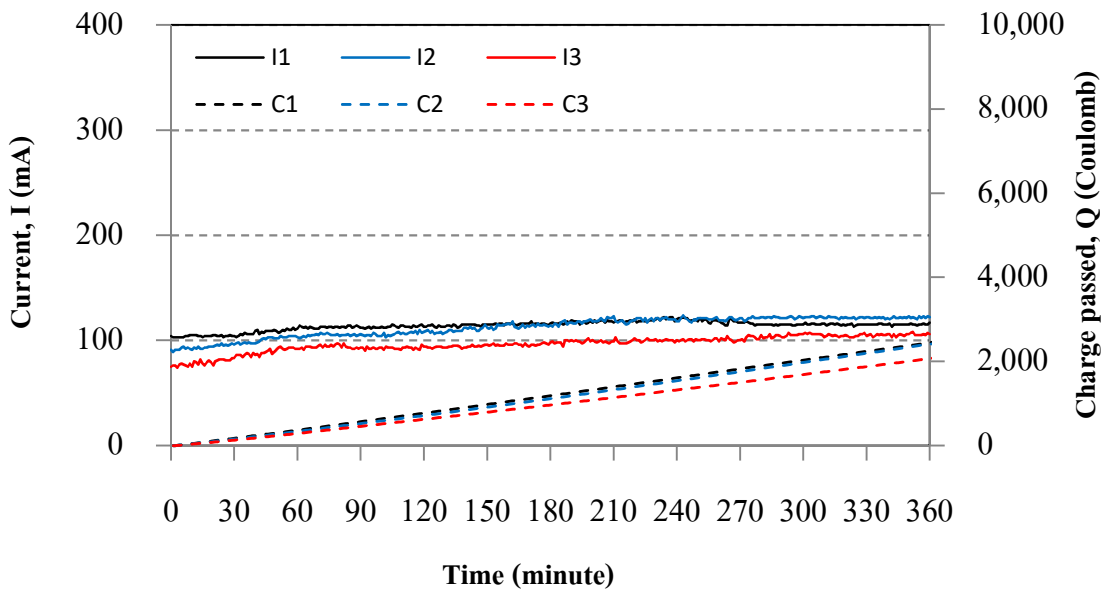
รูปที่ ก-11 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



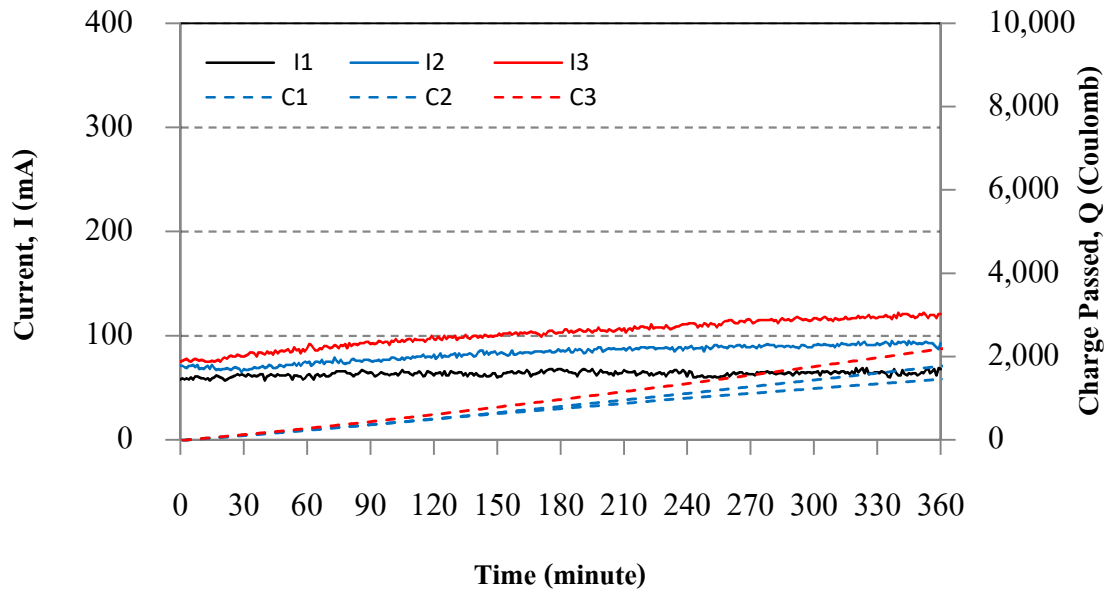
รูปที่ ก-12 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF050
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



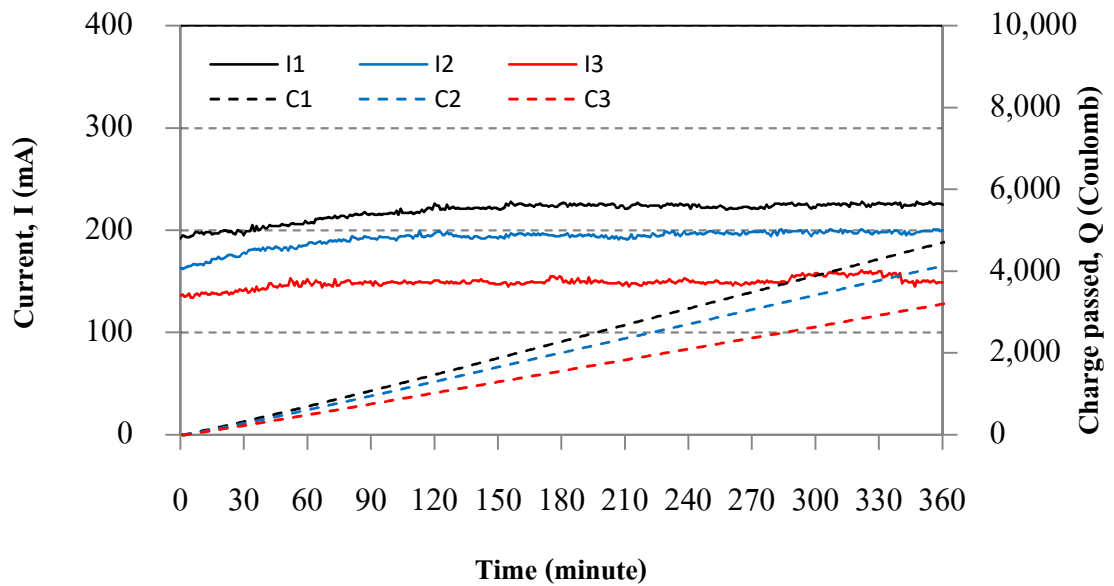
รูปที่ ก-13 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF075
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



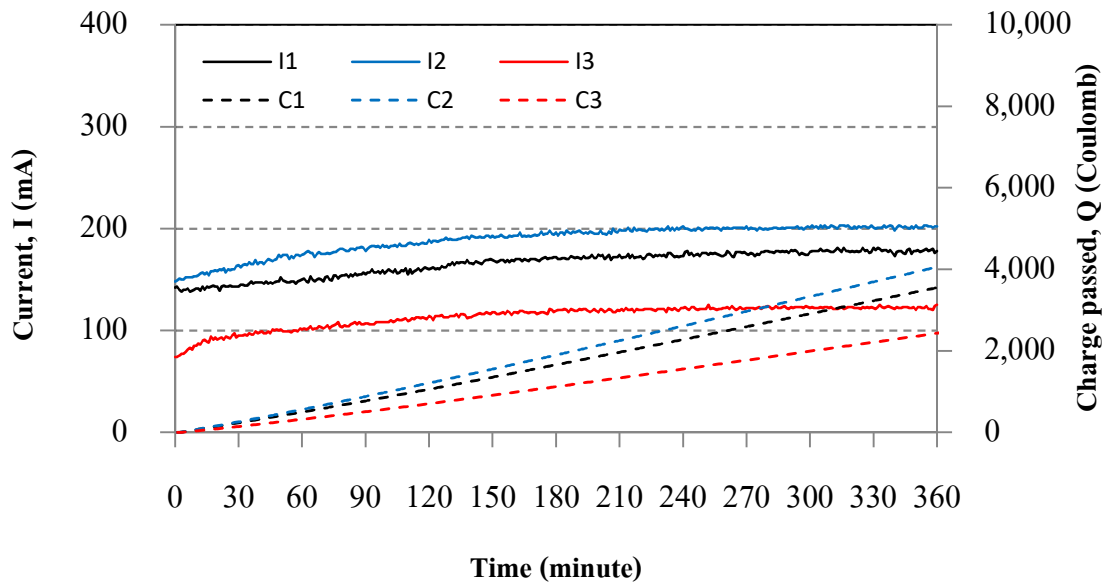
รูปที่ ก-14 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF100
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



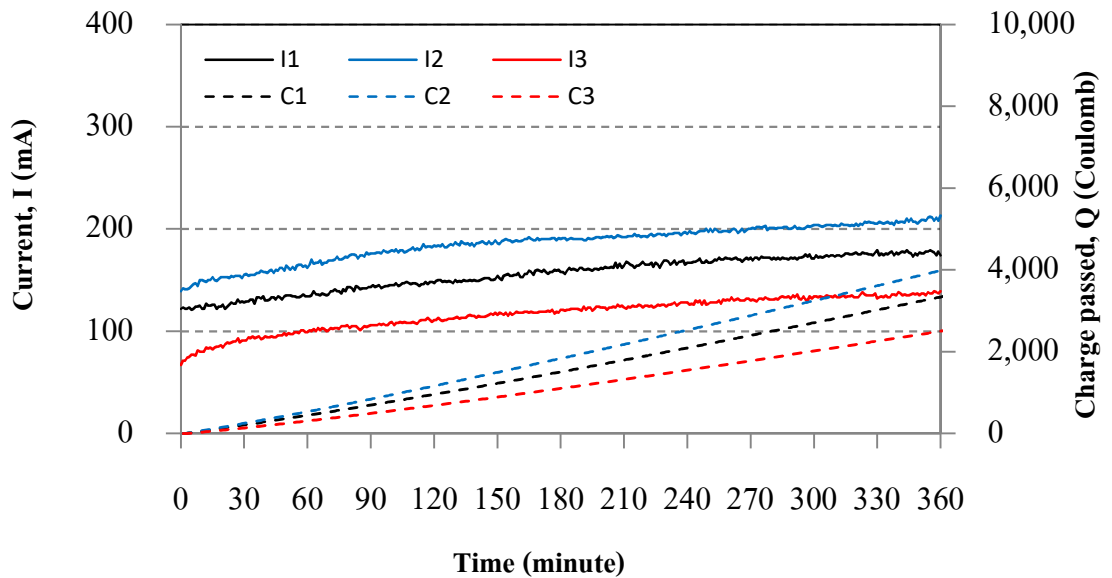
รูปที่ ก-15 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF150
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



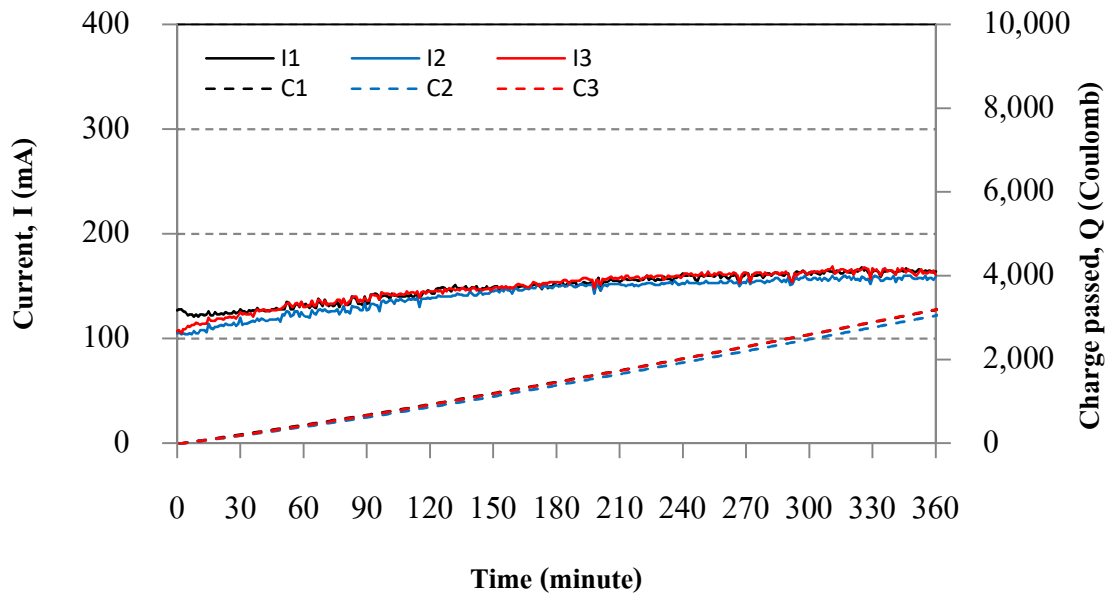
รูปที่ ก-16 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



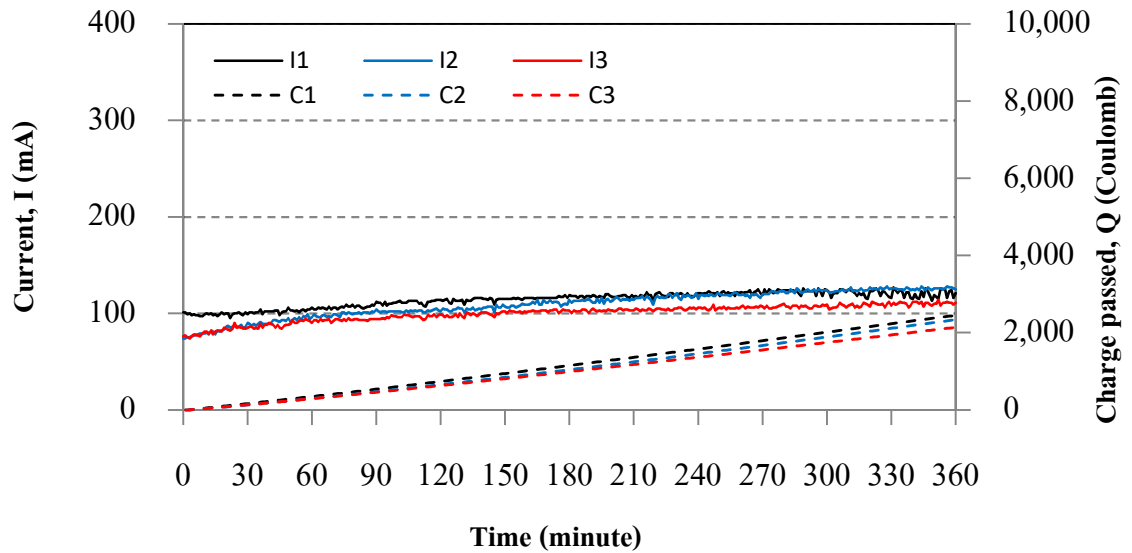
รูปที่ ก-17 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF050
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



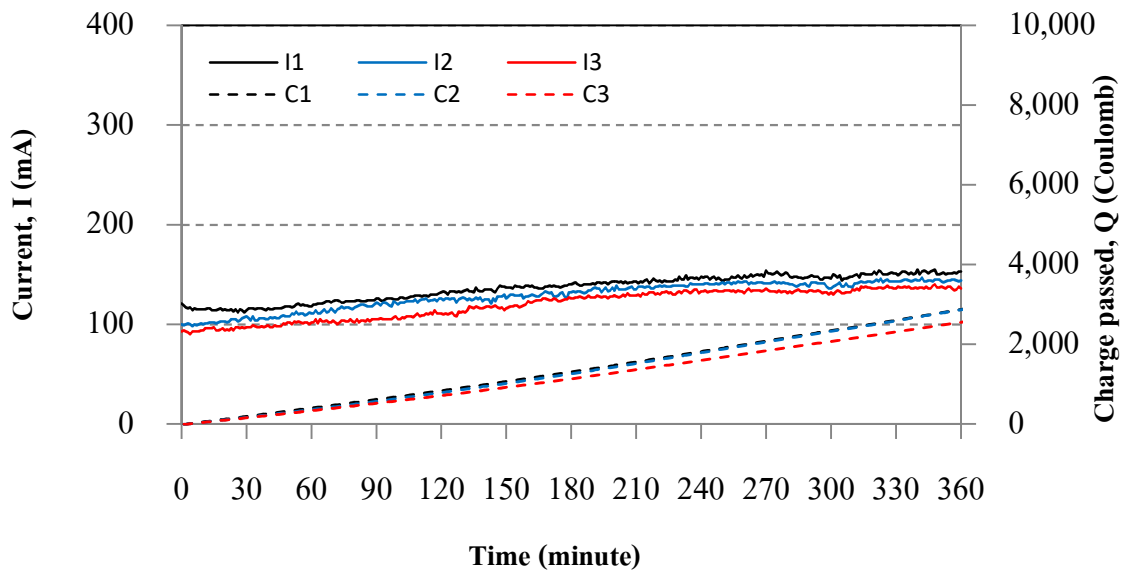
รูปที่ ก-18 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF075
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



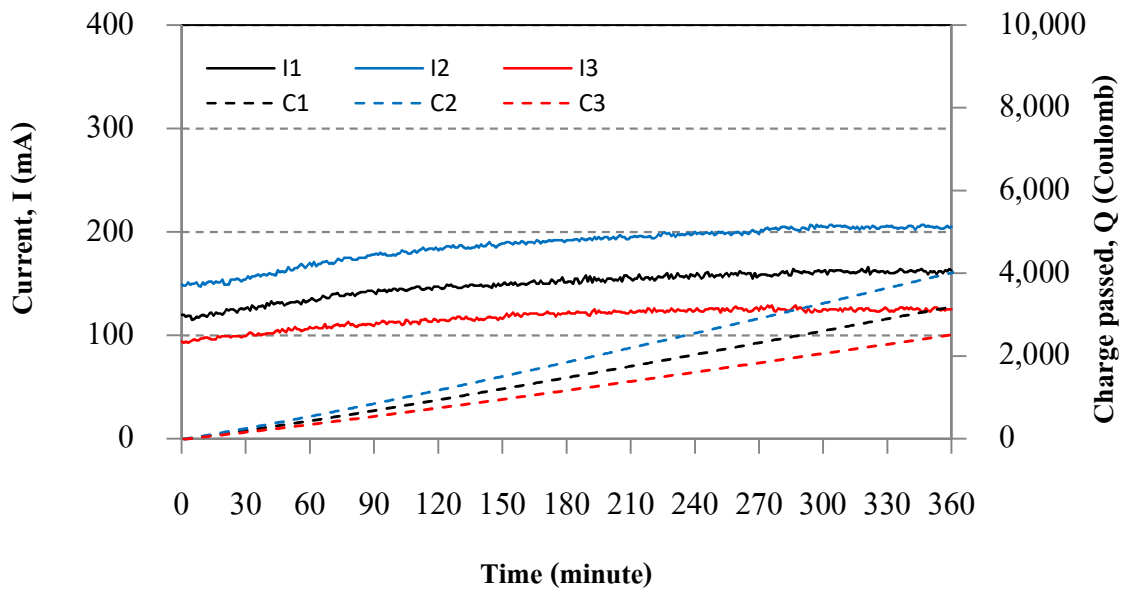
รูปที่ ก-19 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF100
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



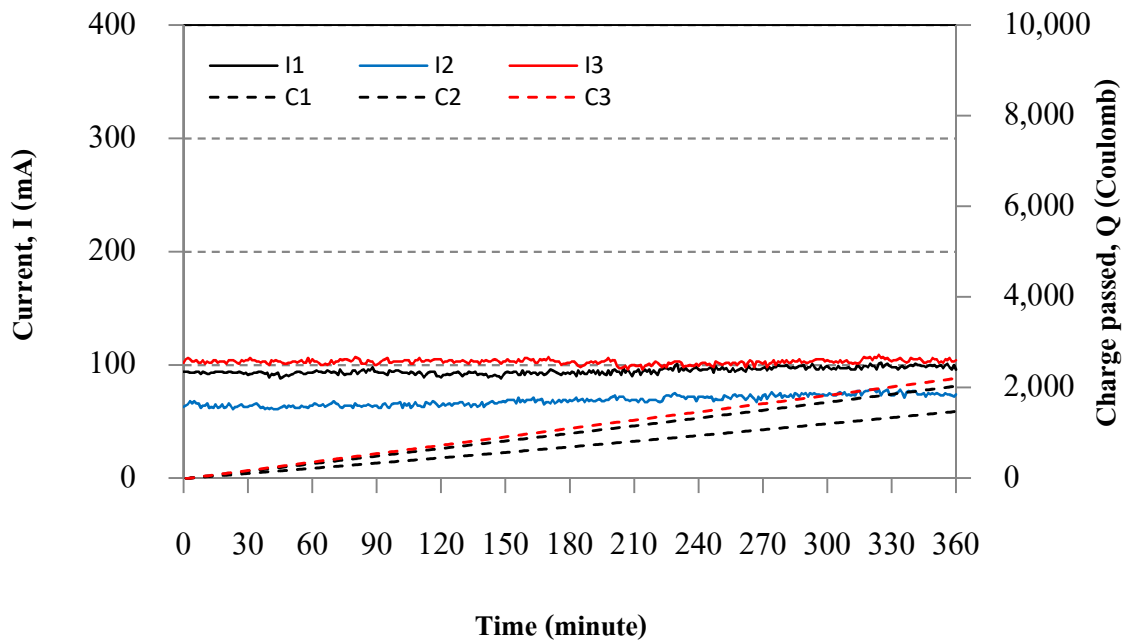
รูปที่ ก-20 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF150
ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



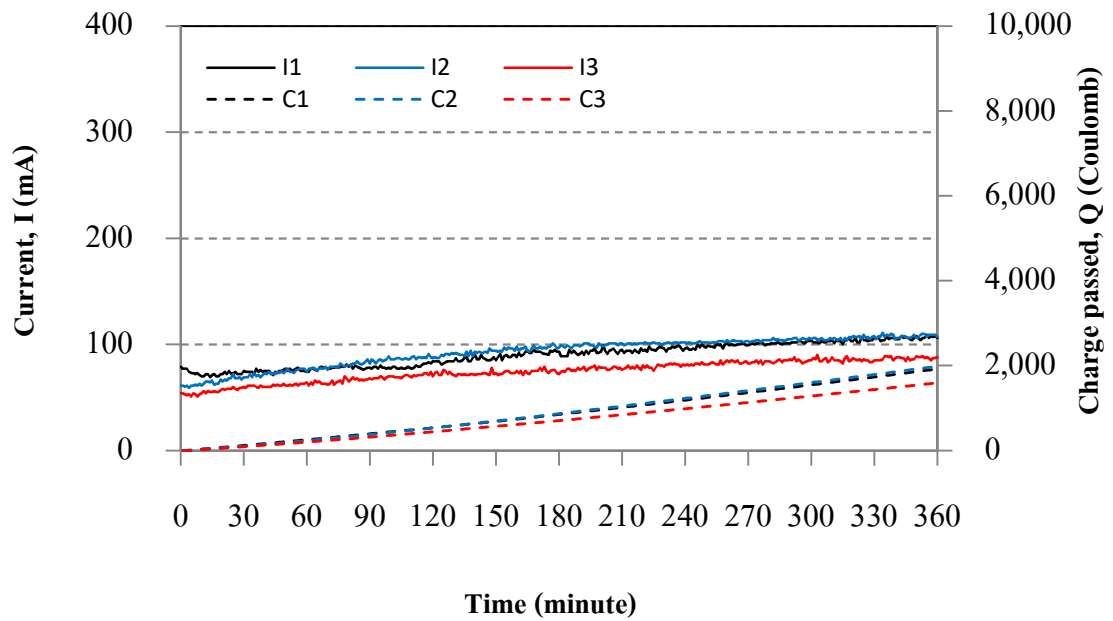
รูปที่ ก-21 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



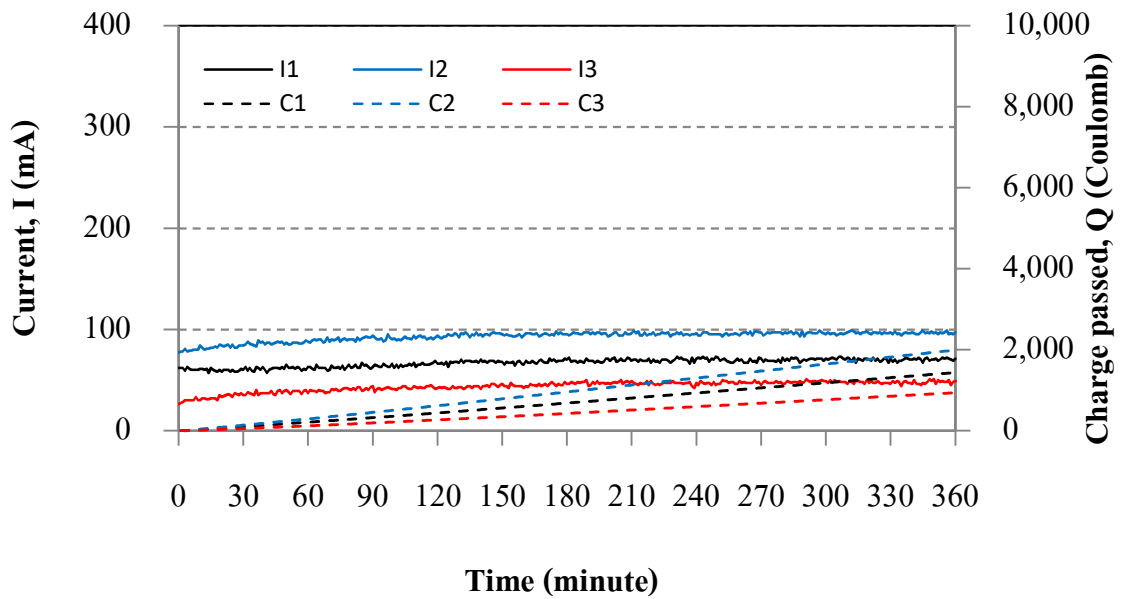
รูปที่ ก-22 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF050
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



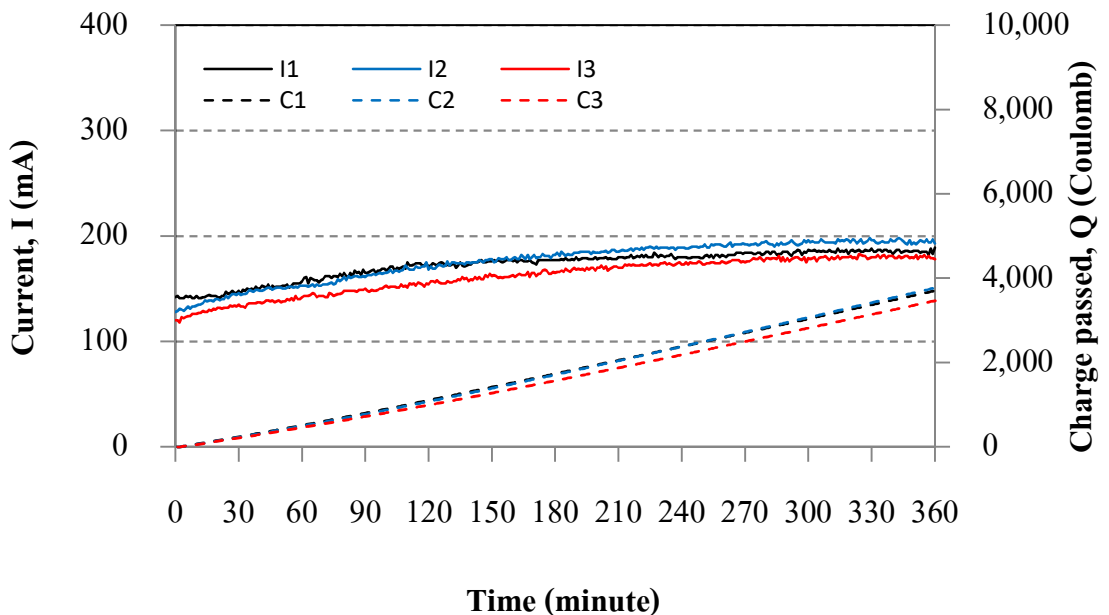
รูปที่ ก-23 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF75
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



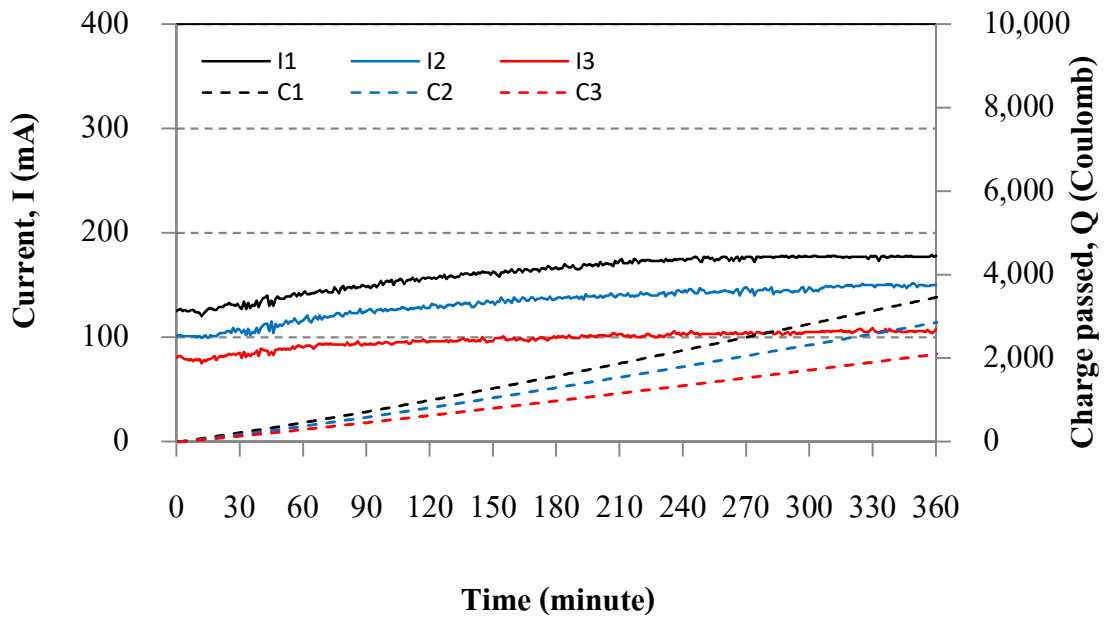
รูปที่ ก-24 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF100
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



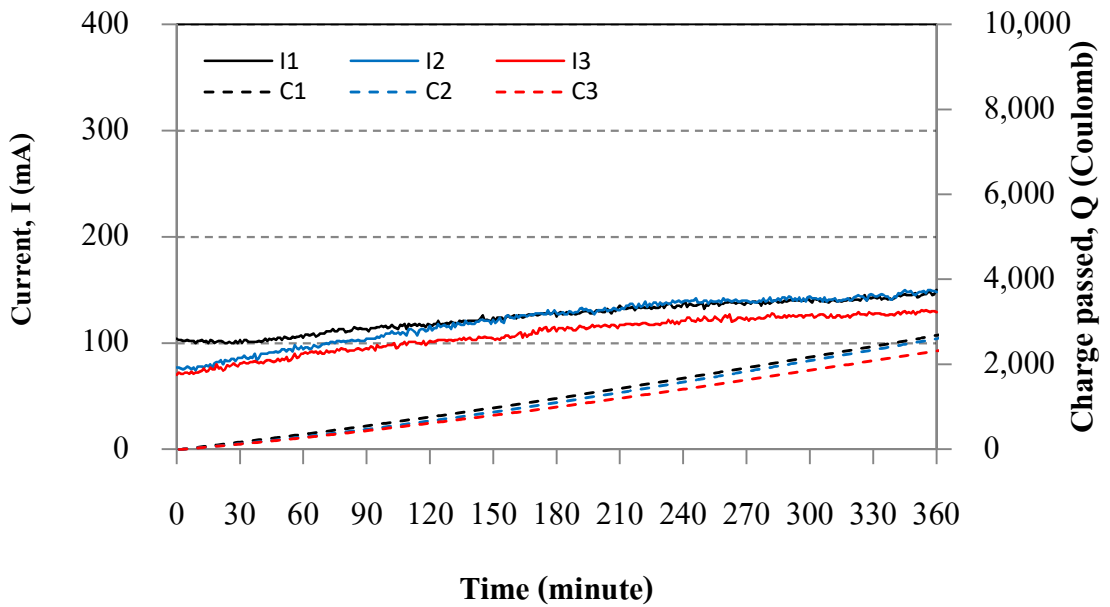
รูปที่ ก-25 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C40SF150
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



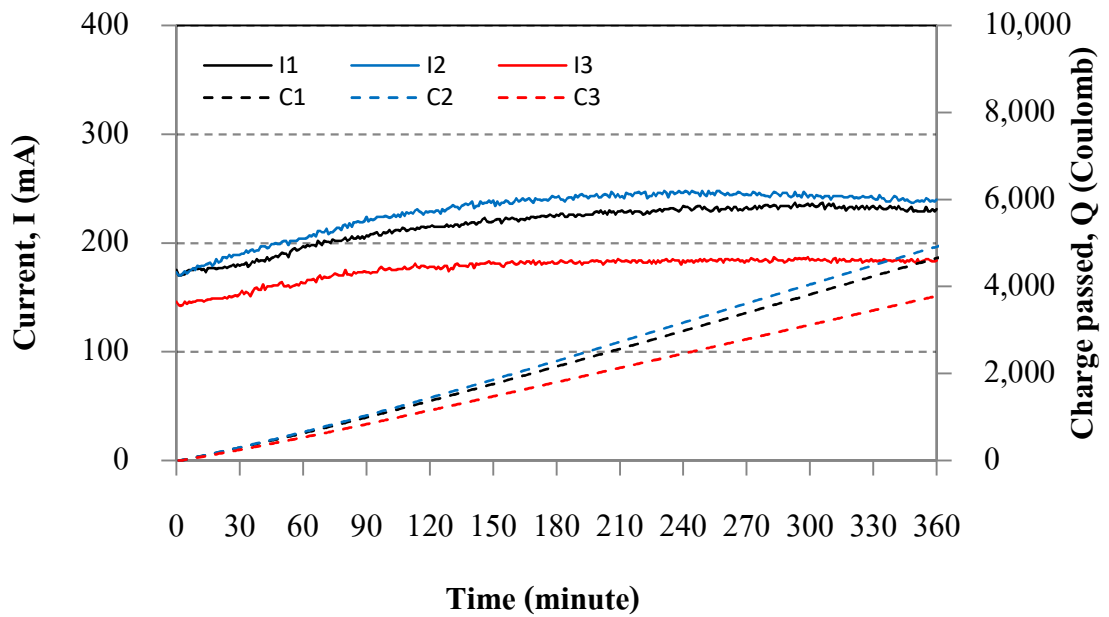
รูปที่ ก-26 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



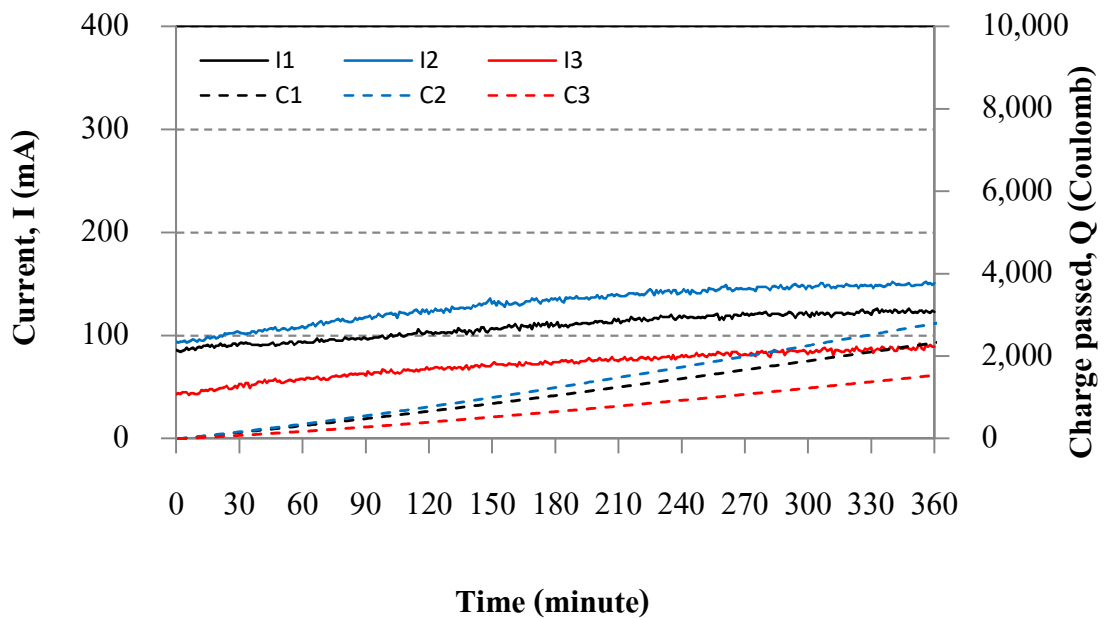
รูปที่ ก-27 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF050
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



รูปที่ ก-28 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF075
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



รูปที่ ก-29 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF100
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



รูปที่ ก-30 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต C50SF150
ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน