

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิดภายใต้
สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

Chloride penetration resistance of fly ash concrete with aramid fiber under
chloride environment

อธิวัฒน์	ศรีเมือง
ภาณุพันธ์	ห่านชัย

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2560

Chloride penetration resistance of fly ash concrete with aramid fiber under
chloride environment

Atiwat	Srimueng
Panupha	Hanchai

An Engineering Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Bachelor of Engineering
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering
Burapha University 2017

หัวข้อโครงการ	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิด ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์
โดย	อธิวัฒน์ ศรีเมือง ภาณุพันธ์ ห่านชัย
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทางวิศวกรรมนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

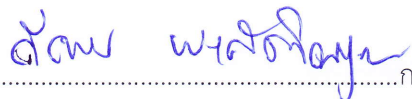

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
(ดร. ชานยุท กาฬกาญจน์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

คณะกรรมการสอบโครงการ


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)


.....กรรมการ
(ดร. ธิตาพร เชื้อสวัสดิ์)


.....กรรมการ
(ดร. วีรพร พงษ์ดิณบุตร)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของความยาวของเส้นใยอะรามิดและชนิดของเส้นใยอะรามิด ต่อความต้านทานคลอไรด์ กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด กำลังอัด และกำลังดึง หลังจากบ่มน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน และทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญคลอไรด์ 3.0% เป็นระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของทุกส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 0.40

จากผลการศึกษาพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดที่มีความยาวและชนิดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตล้วน แต่การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดที่มีความยาวและชนิดต่างๆมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตล้วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด และกำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตล้วน อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วนเล็กน้อย

คำสำคัญ: ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ คอนกรีตผสมเถ้าลอย เส้นใยอะรามิด เถ้าลอย ความต้านทานไฟฟ้า

Abstract

This research aims to study the effect of length and type of aramid fiber on chloride resistance, compressive strength and tensile strength of fly ash concrete. The rapid chloride penetration resistance, surface electrical resistivity, bulk electrical resistivity, compressive strength and tensile strength of fly ash concrete were tested at the water curing times of 28, 56 and 91 days. Bulk chloride penetration of concrete were tested after 28 days of curing time and submerging in 3.0% chloride solution for 28, 56 and 91 days. The water to binder ratio of 0.40 were used for all concrete mixtures.

From the experimental results, it was found that bulk chloride diffusion penetration of concrete with aramid fiber with different length and type is similar to that of plain concrete, but rapid chloride penetration of concrete with aramid fiber is lower than that of plain concrete. Concretes with aramid fiber have higher surface electrical resistivity, bulk electrical resistivity and tensile strength than plain concrete. However, concrete with aramid fiber have slightly lower compressive strength than plain concrete.

KEYWORDS: Chloride penetration resistance, Concrete, Fly as, Aramid fiber, Electrical resistivity

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมโยธาเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยทำการศึกษาเรื่อง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิตภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ก่อนอื่นขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ และ ดร. วีรพร พงษ์ดิณบุตร ที่กรุณารับหน้าที่เป็นกรรมการสอบโครงการ ขอขอบคุณ นาย มานัส พัดจันทร์หอม นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับงานวิจัย

อธิวัฒน์ ศรีเมือง

ภาณุพันธ์ ห่านชัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ชนิดของเส้นใย และการนำไปใช้งาน	3
2.2 วัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใย	4
2.3 คุณสมบัติของเส้นใย	6
2.3.1 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใย	7
2.3.2 ผลผลิต HS-SHCC และความสามารถในการใช้งาน	8
2.3.3 พฤติกรรมการดึงของเส้นใยเดี่ยว	9
2.4 อิทธิพลของเส้นใยต่อการแตกร้าวของคอนกรีต	11
2.5 อิทธิพลของเส้นใยต่อสมบัติการขนส่งและทางไฟฟ้า	12
2.5.1 การแทรกซึมของคลอไรด์	12
2.5.2 การแพร่ของคลอไรด์	13
2.6 การเสื่อมสภาพของเส้นใยอะรามิดในสภาวะที่เป็นด่างและเป็นกลาง	14
2.6.1 การวัดความหนาแน่น	14
2.6.2 การวัดความหนืด	15
2.6.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิว: SEM	15
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	17
3.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต	17
3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต	19

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต	22
3.4 ความต้านทานไฟฟ้าผิวของคอนกรีต	25
3.5 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต	28
3.6 กำลังอัดของคอนกรีต	31
3.7 กำลังดึงของคอนกรีต	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	35
4.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต	35
4.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต	49
4.3 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต	53
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต	60
4.5 กำลังดึงของคอนกรีต	64
บทที่ 5 สรุปผล	68
5.1 สรุป	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเส้นใย	4
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย	7
ตารางที่ 2.3 ผลลัพธ์ของการทดสอบการดึงสำหรับเส้นใย	9
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยระยอง	18
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางกายภาพปูนซีเมนต์และเถ้าลอย	18
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้	19
ตารางที่ 3.4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202	25
ตารางที่ 3.5 เกณฑ์พิจารณาความต้านทานพื้นผิวของคอนกรีตต่อการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนตามมาตรฐาน AASHTO TP9	27

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 แบบจำลองพฤติกรรมการณ์ต้านทานการถูกถอนของเส้นใยกับคอนกรีต	5
ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมการณ์รับแรงดึงระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดดึงของขึ้นตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอรับแรงดึง	5
ภาพที่ 2.3 พื้นผิวของเส้นใยโพลีเมอร์ประสิทธิภาพสูง	7
ภาพที่ 2.4 การวิเคราะห์ EDX ของวัสดุที่สังเกตได้บนเส้นใยอะรามิด	8
ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงแรงดึงสำหรับเส้นใยชนิดต่างๆ ที่ความยาวฝังตัว 2 มม	10
ภาพที่ 2.6 ลักษณะกำลังดึงของซีเมนต์	11
ภาพที่ 2.7 ลักษณะการแตกร้าวของ	12
ภาพที่ 2.8 ภาพ SEM ของเส้นใย Technora T240	16
ภาพที่ 3.1 ชุดเครื่องทดสอบ Auto titration	20
ภาพที่ 3.2 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า	23
ภาพที่ 3.3 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก	23
ภาพที่ 3.4 การตัดตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก	24
ภาพที่ 3.5 ลักษณะการประกอบตัวอย่างเข้าเซลล์	24
ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า	26
ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกที่วัดมุมแล้ว	26
ภาพที่ 3.8 การวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว	27
ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า	28
ภาพที่ 3.10 วัดค่าความต้านทานของแผ่นโพน์ด้านบน	29
ภาพที่ 3.11 วัดค่าความต้านทานของแผ่นโพน์ด้านล่าง	29
ภาพที่ 3.12 วัดค่าความต้านทานของตัวอย่างทดสอบรูป	29
ภาพที่ 3.13 เครื่องวัดกำลังอัดคอนกรีต	32
ภาพที่ 3.14 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	32
ภาพที่ 3.15 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตด้วยวิธีการผ่าซีก	34
ภาพที่ 4.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรง ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน	36
ภาพที่ 4.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 56วัน และ 91 วัน	38
ภาพที่ 4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 30 มิลลิเมตร	40
ภาพที่ 4.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 40 มิลลิเมตร	42

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิต ที่ความยาว 50 มิลลิเมตร	44
ภาพที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน	46
ภาพที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน	47
ภาพที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่แช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน	48
ภาพที่ 4.9 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต	50
ภาพที่ 4.10 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	51
ภาพที่ 4.11 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	52
ภาพที่ 4.12 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต	54
ภาพที่ 4.13 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	55
ภาพที่ 4.14 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	56
ภาพที่ 4.15 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต	57
ภาพที่ 4.16 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	58
ภาพที่ 4.17 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	59
ภาพที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีต	61
ภาพที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	62
ภาพที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียวที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	63
ภาพที่ 4.21 กำลังดึงของคอนกรีต	65
ภาพที่ 4.22 กำลังดึงของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	66
ภาพที่ 4.23 กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้โดยแพร่หลายในงานก่อสร้าง เพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสม อาทิเช่น สามารถหล่อตัวอย่างขึ้นรูปร่างตามต้องการได้มีความคงทนสูง ไม่ติดไฟ สามารถหล่อได้ในสถานที่ก่อสร้าง ตกแต่งผิวให้สวยงามได้ มีความสามารถในการต้านทานเป็นอย่างดี และที่สำคัญคือ ราคาไม่แพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเปรียบเทียบกับเหล็กซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาที่สูงกว่ากันมาก และโครงสร้างเหล็กยังทนทานต่อความร้อนได้น้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความนิยมใช้กันมากกว่าเหล็กในประเทศไทย

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ประกอบหลักคือ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ นอกจากนี้อาจมีสารผสมเพิ่มแล้วแต่คุณสมบัติที่เราต้องการ คอนกรีตเสริมเหล็กก็จะหล่อคอนกรีตโดยมีเหล็กเส้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงเนื่องจากว่า คอนกรีตนั้นมีกำลังรับแรงดึงที่น้อยมากจนเปรียบได้ว่าเหมือนไม่มีความสามารถในการรับแรงดึงอยู่เลย จึงนิยมนำวัสดุคอนกรีตและเหล็กมาใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดและแรงดึงที่ดีกว่าใช้โครงสร้างคอนกรีต และราคาก็จะถูกกว่าโครงสร้างเหล็กล้วน

อะรามิด (Aramid) กำหนดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2517 ซึ่งเป็นเส้นใยที่ได้มาจากอะโรแมติกพอลิเอไมด์อย่างน้อย 85 เปอร์เซ็นต์ ต่อด้วยเบนซินริงทั้งสองด้าน (แทนที่ จะเป็นโมเลกุลไฮดรอกซี – คล้ายเบนซินริงในพอลิเอสเตอร์) แทนที่จะเป็นเส้นใยที่มาจากไฮโดรคาร์บอนตรงๆ แบบไนลอน เส้นใยอะรามิดตัวแรกได้รับจาก บริษัท ดูปองท์ เริ่มวางตลาดในปี พ.ศ. 2508 โดยใช้ชื่อว่า “นอเม็กซ์ (Nomex)” ในตลาดปัจจุบัน พบว่ามีเส้นใยอะรามิดอยู่ 2 ชนิด และ ถือว่าทั้ง 2 ชนิดนั้นเป็นเส้นใยสมรรถนะสูง โดยชนิดที่หนึ่ง มีคุณสมบัติในการทนความร้อน ซึ่งมีหมู่เมตา- อะรามิดอยู่ มีความเหนียวปานกลาง และมีความคงทนต่อการทนต่อความร้อนดีเลิศ (ทนได้ 600-800 °C) ใช้สำหรับทำเสื้อผ้าที่ต้องทนทานความร้อน และสมบัติเป็นฉนวนกันกระแสไฟฟ้า ตัวอย่าง เช่น เส้นใยนอเม็กซ์ (บริษัท ดูปองท์) และเส้นใยโคเน็กซ์ (บริษัท เทียน) 9 ชนิดสอง ในช่วง 2513-2523 บริษัท ดูปองท์ และได้ออกแบบเส้นใยชนิดที่สอง โดยมีชื่อว่า “เคฟลาร์ (Kevlar)” เส้นใยใหม่นี้มีหมู่พารา-อะรามิด ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงสูง ค่าโมดูลัสสูง มีความคงทนต่อความร้อนมาก

เนื่องด้วยว่าปัจจุบันมีการนำคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นไปผสมเส้นใยต่างๆ อาทิเช่น คอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงมากขึ้น หรือ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้นแต่การที่ผสมเส้นใยเหล็กนั้นมีราคาที่แพงจึงไม่นิยมใช้ในงานหล่อคอนกรีตใหม่แต่นิยมนำมาใช้ในงานซ่อมแซม จึงเป็นที่มาของการคิดค้นคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้นโดย วัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงดึงและมีความยืดหยุ่นอีกชนิดหนึ่งก็คือ เส้น

ใยอะรามิต ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยอะรามิตนิยมนำมาผลิต เสื่อเกราะกันกระสุน หรือวัสดุที่ใช้ในการสร้าง ยานอวกาศ เส้นใยอะรามิตหากเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่หนักเท่ากันแล้ว เส้นใยอะรามิตจะมีความสามารถในการรับแรงดึง (tensile strength) มากกว่าเหล็กกล้าถึง 5 เท่า ทำให้วัสดุชนิดนี้มีความ น่าสนใจมาก ที่จะนำมาเป็นส่วนประกอบในการหล่อคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงดึงมากๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในวงการงานก่อสร้าง แทนที่จะนำวัสดุไปใช้ในวงการทหารอย่างเดียว เพื่อให้ นำทรัพยากรมาใช้ให้คุ้มค่าที่สุดที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดและความยาวของเส้นใยอะรามิตต่อความต้านทานการแทรกซึม คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดและความยาวของเส้นใยอะรามิตต่อความต้านทานไฟฟ้าของ คอนกรีตผสมเถ้าลอย
3. เพื่อศึกษากำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษากำลังรับแรงของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใส่เส้นใยอะรามิตภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์ โดยการหล่อคอนกรีตเสริมแล้วผสมเส้นใยอะรามิตที่ปริมาณ 1.0% โดยปริมาตรของคอนกรีต โดยแต่ละ ส่วนผสมมีความแตกต่างกันที่ความยาวของเส้นใยอะรามิต ทั้งหมด 7 ส่วนผสม โดยมีความยาวเส้นใยอยู่ที่ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร หล่อคอนกรีตเป็นรูป ลูกบาศก์ และ ทรงกระบอก แล้วนำตัวอย่างที่หล่อมาบ่ม เป็นระยะเวลา 28 , 56 และ 91 วันแล้วจึงนำตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มครบกำหนดแล้วมาทดสอบความ ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด กำลังอัด และ กำลังดึง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ผลกระทบของชนิดและความยาวของเส้นใยอะรามิตต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีตผสมเถ้าลอย
2. ทำให้ทราบผลกระทบของชนิดและความยาวของเส้นใยอะรามิตต่อความต้านทานไฟฟ้าของ คอนกรีตผสมเถ้าลอย
3. ทำให้ทราบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของเส้นใย และการนำไปใช้งาน

เส้นใยที่มีการนำไปใช้งานก่อสร้างต่าง ๆ และมีขายในท้องตลาดนั้น มีมากมาย ตัวอย่างเช่น

1. เส้นใยหิน (Asbestos) เป็นเส้นใยที่ได้มาจากธรรมชาติ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตท่อ หลัังคา และ กระเบื้องซีเมนต์ใยหิน คุณสมบัติที่สำคัญคือ มีความต้านทานการกัดกร่อนและการเสียดสีที่ดี แต่การใช้ต้องระมัดระวัง เพราะใยหินอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้
2. เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) ได้จากการดัดลวดให้มีความยาวตามที่ต้องการ การใช้งานมีทั้งการใช้ลวดเส้นตรงหรือดัดปลายของลวดนั้น เพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวที่ดีขึ้น รวมทั้งต้องมีการเคลือบป้องกันสนิมด้วย
3. เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) ใยแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตจะอยู่ในลักษณะเป็นกลุ่ม ของเส้นใยใน 1 กลุ่ม มีประมาณ 400 เส้นใย นิยมใช้กับงานตกแต่งทางสถาปัตยกรรม (Glass Reinforcement Concrete GRC) แต่ต้องระมัดระวังในการใช้งาน เพราะใยแก้วจะถูกทำลายโดยด่างในคอนกรีต ปัจจุบันแก้ไขโดยการเลือกใช้ใยแก้วที่มีความทนทานสูง
4. เส้นใยสังเคราะห์ (Polymeric Fiber) ได้แก่ เส้นใยของไนลอน และเส้นใย Polypropylene ที่มีลักษณะและความยาวแตกต่างกัน แล้วแต่การใช้งาน เช่น เส้นใยเดี่ยว เส้นใยกลุ่ม ความยาว 20 หรือ 40 มม. ใส่ในคอนกรีต เพื่อลดการแตกร้าวที่ผิว สำหรับถนนหรือพื้นคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีเส้นใยคาร์บอนที่มีความสามารถต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมาก ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่ค่อนข้างใหม่ในงานคอนกรีต
5. เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fiber) เป็นวัสดุผสมคอนกรีตที่ใหม่มาก ราคาสูง แต่มีคุณสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อน และการเสียดสีที่ดีมาก คุณสมบัติของเส้นใยแต่ละชนิด สรุปอยู่ใน ตารางที่ 2.1 โดยสังเขป

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเส้นใย

ชนิดของไฟเบอร์	ความกว้าง จำเพาะ	ความเค้นดึง MPa	โมดูลัสยืดหยุ่น GPa	Elongation At Failure, %	Poisson's Ratio
Crysotile Asbestos	2.55	2950 – 4400	160.8	3	0.30
Alkali – Resistant Glass	2.71	1960 – 2750	78.5	2.0 – 3.0	0.22
Fibrillated Polypropylene	0.91	640	7.8	8	0.29 – 0.48
Steel	7.84	1000 – 3100	196.2	3.0 – 4.0	0.30
Carbon	1.74 – 1.99	1380 – 3140	245.3 – 392.4	0.4 – 1.0	0.2 – 0.4
Kevlar	1.45	3500	63.8 – 127.5	2.0 – 4.0	0.32

2.2 วัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Cement Composites)

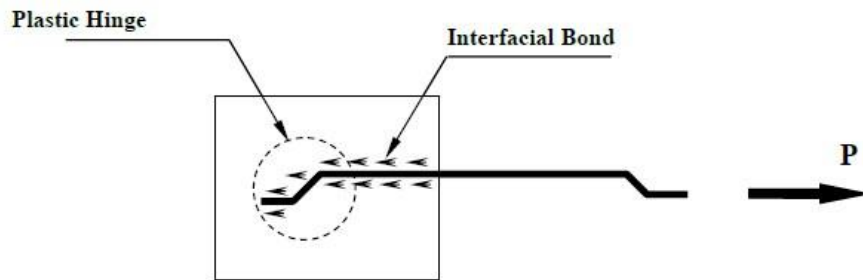
วัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใย คือ คอนกรีตที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ เส้นใยดังกล่าวอาจได้มาจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยหิน ป่านศรนารายณ์ ปอ หรือขนสัตว์บางชนิด และได้มาจากการผลิต เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว เส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักคือ เพิ่มความสามารถการต้านทานแรงดึงในคอนกรีต ลดการแตกร้าวในคอนกรีต เพิ่มความเหนียวในเนื้อคอนกรีตให้ได้มากกว่าคอนกรีตปกติ

การรับกำลังของเส้นใย

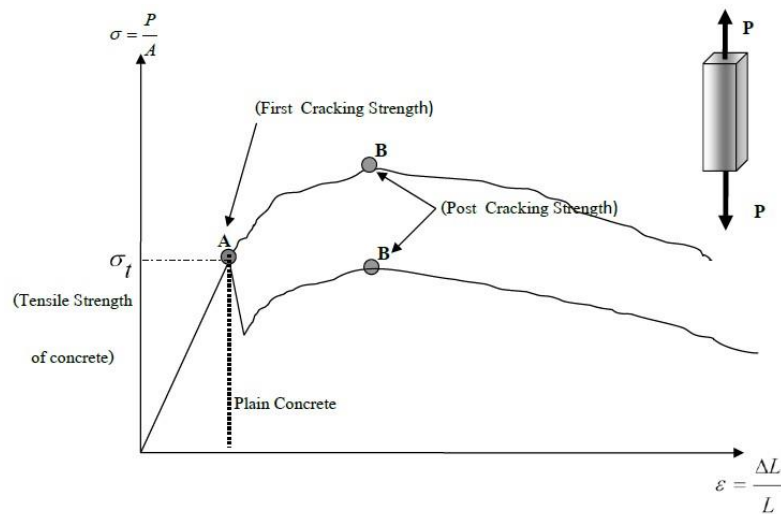
การรับกำลังดึงของเส้นใยในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับส่วนผสมคอนกรีต (Interfacial Bond) เป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 2.1 การยึดเหนี่ยวดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใย คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของเส้นใย รวมถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการผสมเส้นใย เป็นต้น

การรับกำลังดึงของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เพื่ออธิบายพฤติกรรมดังกล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้ ในชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ไม่ได้ทำการผสมเส้นใย คอนกรีตนั้นจะทำหน้าที่รับแรงดึงที่เกิดขึ้นเพียงลำพัง แต่คุณสมบัติของคอนกรีตนั้นสามารถรับกำลังดึงได้น้อยมากเมื่อความเค้นดึงในชิ้นส่วนเพิ่มมากขึ้นถึงจุด A หรือเรียกว่าค่าความเค้นดึงของคอนกรีต (Tensile Strength of concrete) หรือจุดเริ่มต้นของการแตกร้าว (First Cracking Strengths) ในจุดนี้ชิ้นส่วนรับแรงดึงที่ไม่ได้ทำการผสมเส้นใยจะไม่สามารถรับกำลังต่อไปได้ การนำเส้นใยมาผสมในคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตนั้นมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดีขึ้น เราเรียกคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีสมรรถนะสูงนี้ว่า High Performance Fiber Reinforced Cement

Composites (HPFRCC) พฤติกรรมที่ได้หลังจากการแตกร้าวนั้นการรับกำลังดึงจะเพิ่มมากขึ้นต่อไปได้อีก ในช่วงนี้เส้นใยจะเข้ามาทำหน้าที่รับแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด และทำให้สามารถรับกำลังต่อไปได้ โดยที่ พฤติกรรมการรับกำลังขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการถูกถอนออกจากเนื้อคอนกรีต ปริมาณการผสมเส้นใย จนถึงจุด B (Post Cracking 4 Strength) การรับกำลังก็จะตกลง และพฤติกรรมดังกล่าวจะเป็นเช่นนี้ จนกระทั่งเส้นใยถูกถอนออกหมด หรือเส้นใยเกิดการขาด



ภาพที่ 2.1 แบบจำลองพฤติกรรมการต้านทานการถูกถอนของเส้นใยกับคอนกรีต



ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมการรับแรงดึงระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดดึงของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอรับแรงดึง

2.3 คุณสมบัติของเส้นใย

Curosu et al. (2016) ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของเส้นใยแต่ละชนิด ซึ่งมี เส้นใย HDPE [high-density polyethylene] เส้นใย PBO [poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)] และที่ใช้ในการทดสอบนี้คือเส้นใย Aramid [poly(p-phenylene-terephthalamide)] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เส้นใย HDPE ในการตรวจสอบนี้ใช้ Dyneema SK62 จาก DSM ประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็น gel-spun เส้นใยหลายเส้นที่มีความต้านทานแรงดึงสูงและการยึดตัวต่ำที่จุดแตกหัก HDPE เพื่อการใช้งานที่ปลอดภัยและเกี่ยวกับสมบัติทางกลของเส้นใยตาม Liu และ Yu คือประมาณ 70 องศาเซลเซียส

เส้นใยอะรามิดเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ทนต่ออุณหภูมิมากกว่าเส้นใย HDPE เช่น Kevlar หรือที่ใช้ในงานนี้ คือ Technora ซึ่งเป็นเส้นใย copolymer para-aramid ที่มีความต้านทานแรงดึงสูงและโมดูลัสยืดหยุ่นสูง อุณหภูมิการสลายตัวของ Technora คือ 500 °C ซึ่งสูงกว่า HDPE อย่างมาก ผู้ผลิตอธิบายว่าเส้นใย Technora มีความทนทานต่อกรด อัลคาไลและตัวทำละลายอินทรีย์สูง Deromise และคณะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเส้นใย Technora ภายใต้สภาพต่างที่แตกต่างกัน และเน้นการย่อยสลายของการเรียงตัวบางส่วน และจัดเรียงใหม่จนเสร็จสิ้น ซึ่งสามารถทำการบันทึกการเก็บรักษาสมบัติทางกลของเส้นใยได้ถึงอย่างนั้นก็ยังคงขาดความรู้เกี่ยวกับความทนทานของเส้นใยอะรามิดในเมทริกซ์ซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าจำเป็นต้องมีการค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับเรื่องนี้

อีกทางเลือกหนึ่ง ที่พิจารณาในงานนี้คือเส้นใย PBO ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่เส้นใย PBO as-spun (PBO-AS) และเส้นใยโมดูลัสสูง (PBO-HM) เป็นที่รู้จักภายใต้ชื่อ Zylon ที่ผลิตโดย Toyobo ประเทศญี่ปุ่น เส้นใยเหล่านี้มีความต้านทานแรงดึงสูงมาก มากกว่าเส้นใย HDPE ที่ตรวจสอบในงานนี้ถึงสองเท่า และโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมาก ในกรณีของ PBO-HM มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงยิ่งกว่าเหล็ก เส้นใย PBO มีความทนทานสูงต่อตัวทำละลายอินทรีย์ กรดและเบสต่างๆ อุณหภูมิการสลายตัวจะยิ่งสูงกว่าของ Technora และดีกว่า Kevlar

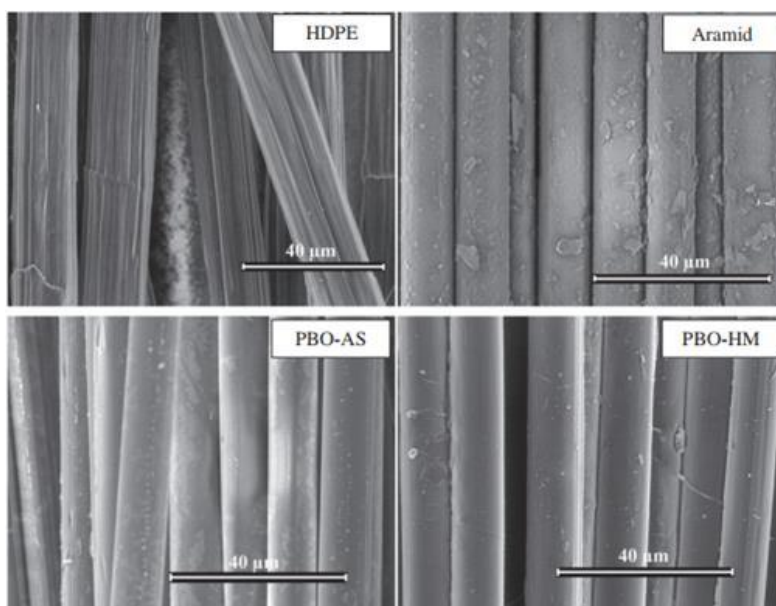
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย

ผู้ผลิต	DSM	Teijin	Toyobo	
ชนิดของเส้นใย	Dyneema	Technora	Zylon	
ประเภทของเส้นใย	HDPE	Aramid	PBO_AS	PBO_HM
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	20	12	13	13
ความยาว (mm)	6	6	6	6
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.97	1.39	1.54	1.56
กำลังรับแรงดึง (MPa)	2500	3400	5800	5800
โมดูลัสแรงดึง (GPa)	80	74	180	270
ระยะยืดสูงสุด (%)	3.5	4.5	3.5	2.5
อุณหภูมิที่ทำให้เส้นใยเริ่มคลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)	n.a.	500	650	650
อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	150	n.a.	n.a.	n.a.
จุดสมดุลของความชื้น (%)	0	2	2	0.6

n.a. = not available.

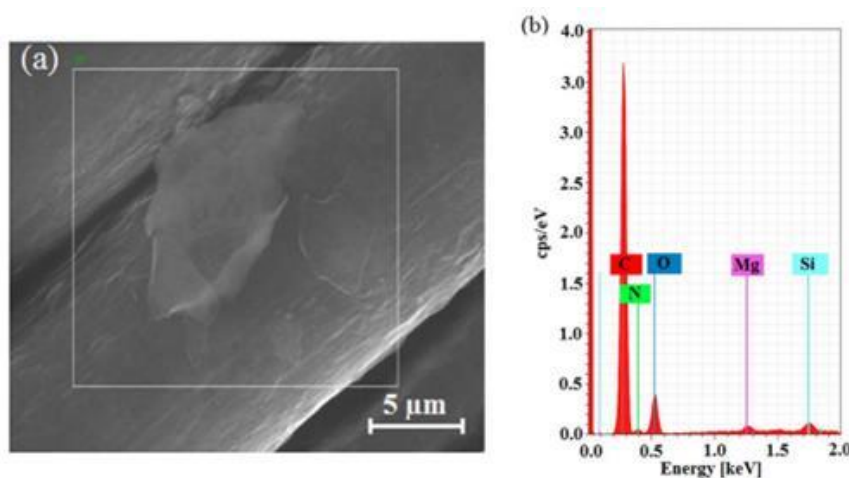
2.3.1 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใย

การตรวจสอบเส้นใยพอลิเมอร์ในงานนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีเส้นผ่าศูนย์กลางและพื้นผิวที่แตกต่างกัน เส้นใยโพลีเอธิลีนเป็นร่องลึกตามความยาวของเส้นใยทั้งหมด เส้นใย PBO ทั้งสองประเภทแสดงพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ในขณะที่เส้นใยอะรามิดแสดงพื้นผิวหยาบและไม่เหมือนกัน ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 พื้นผิวของเส้นใยโพลีเมอร์ประสิทธิภาพสูง

เพื่อตอบคำถามว่าพื้นผิวของเส้นใยอะรามิดที่ซุขระนั้นแสดงถึงคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาโดยธรรมชาติ หรือเส้นใยที่ใช้แล้วหรือไม่ ซึ่งการตรวจวัดได้ดำเนินการด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (energy dispersive X-ray spectroscopy , EDX) แสดงให้เห็นว่าเกิดความไม่สม่ำเสมอที่สังเกตเห็นได้โดยการเคลือบด้วยโครงสร้างเกล็ดที่มีออกซิเจน แมกนีเซียม และซิลิกาสูง ดังภาพที่ 2.4b สามารถนำโครงสร้างเกล็ดที่เคลือบเส้นใยออกได้ตลอด 24 ชั่วโมงโดยการกระตุ้นแม่เหล็กของเส้นใยในสารละลายรูพรีน หลังจากกระบวนการล้างนี้เสร็จสิ้น เส้นใยจะสูญเสียสีทอง กลายเป็นสีเหลืองอ่อนและการเกาะตัวเป็นก้อนจะสูงขึ้น



ภาพที่ 2.4 การวิเคราะห์ EDX ของวัสดุที่สังเกตได้บนเส้นใยอะรามิด

(a) จุดตรวจสอบ และ (b) สเปกตรัม EDX ที่สอดคล้องกัน

2.3.2 ผลผลิต HS-SHCC (High-strength strain-hardening cement-based composites) และความสามารถในการใช้งาน

วัตถุดิบถูกผสมกับเครื่องผสมแบบ Hobart ขนาด 5 ลิตรเป็นชุด ๆ ละ 3 ลิตร การผสมความเข้มข้นสูงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อทำลายเศษวัสดุแห้งและเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยที่เหมาะสม ความท้าทายเหล่านี้เกิดขึ้นเสมอเมื่อมีการผลิตเมทริกซ์ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อตัวประสานต่ำมาก และเมื่อมีการเพิ่มส่วนผสมของไมโครไฟเบอร์ที่มีอัตราส่วนสูง เวลาในการผสมทั้งหมดรวมทั้งการเพิ่มส่วนประกอบทั้งหมดคือ 8 นาที ในสภาพที่สด ซึ่งการผสม HS-SHCC ทั้งหมดมีความหนืดสูงและค่อนข้างเหนียวแต่ยังคงเหมาะสม สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามการอ้างอิง HS-SHCC ที่ทำด้วยเส้นใย HDPE หนา 20 ไมครอนแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการใช้งานได้ดีที่สุด ซึ่งอาจจะย้อนกลับไปสู่อัตราส่วนของเส้นใยที่ใช้ในการผสมที่น้อยที่สุดและธรรมชาติที่ไม่ชอบน้ำภายในของเส้นใย การทดสอบบนตารางการไหล Hägermann (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวย 70 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนบนเส้นผ่าศูนย์กลางฐาน 100 มิลลิเมตร และความสูง 60 มิลลิเมตร) พบเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตรหลังจากยกกรวย ในขณะที่เส้นผ่าน

ศูนย์กลางหลังการเกิดแรงสั่นสะเทือน 15 ครั้งอยู่ที่ 145 มิลลิเมตร การใช้งานด้วยเส้นใยประเภทอื่น ๆ ไม่ได้ ซึ่งอาจอธิบายได้ตามอัตราส่วนการผสมเส้นใยที่สูงขึ้น ส่วนผสมที่มีเส้นใยอะรามิดทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานค่อนข้างแย่ที่สุดและเกาะติดกันเป็นกระจุกใยหนาแน่นกระจายอยู่ทั่ววัสดุ ผู้เขียนสมมติว่าการเคลือบเส้นใยที่อธิบายไว้ในข้อ 2.3.1 ถูกนำออกระหว่างกระบวนการผสม ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการกระจายตัวลดลงและทำให้เกิดการรวมตัวกันของเส้นใย เพื่อยืนยันข้อสมมติฐานนี้ จึงนำส่วนเล็ก ๆ ของ M-ARA สดหลังจากการผสม วางบนตะแกรงโลหะและล้างออกด้วยน้ำจนเส้นใยปรากฏ และไม่มีซากของปูนติดอยู่ จากนั้นเส้นใยถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ESEM แสดงให้เห็นว่าไม่มีโครงสร้างเกล็ดอยู่บนเส้นใย(ผสม) นอกจากนี้เส้นใยสีน้ำตาลทองได้เปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองซีดเนื่องจากการชำระล้าง ผลเช่นเดียวกับที่พบในการทดลองกับสารละลายรูพรุน (pore solution) ดังข้อที่ 2.3.1 ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผสมทำให้เกิดการกระทำที่เพียงพอต่อเส้นใยอะรามิดในการจัดโครงสร้างทางพื้นผิวออกอย่างน้อยบางส่วน

ซึ่งกล่าวได้ว่าเมทริกซ์แรงสูงภายใต้การตรวจสอบถึง แม้จะมีความหนืดสูง มีความสามารถในการไหลเวียนได้ดีดีตราบเท่าที่ไม่มีการเพิ่มเส้นใย หมายความว่าเส้นใยมีส่วนทำให้ความสามารถในการทำงานของ HS-SHCC ที่ผ่านการทดสอบลดลง เห็นได้ชัดว่า เมทริกซ์ควรจะปรับให้เข้ากับเส้นใยแต่ละประเภท เพื่อให้เกิดคุณสมบัติเชิงรีโอโลยี (rheological) ที่ดีขึ้น เนื่องจากเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการปรับปรุงพฤติกรรมทางกลของคอมโพสิต อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพดังกล่าวไม่ใช่จุดประสงค์ของการตรวจสอบในปัจจุบัน

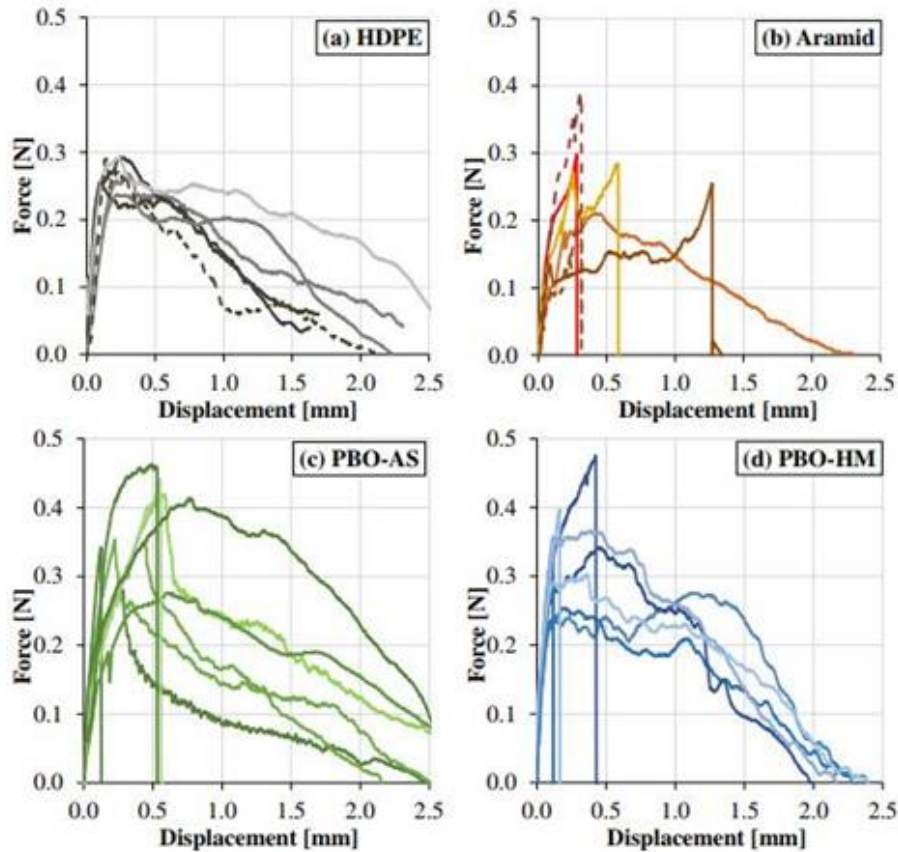
2.3.3 พฤติกรรมการดึงของเส้นใยเดี่ยว

ในกรณีอ้างอิงของเส้นใย HDPE ความยาวที่ฝังในซีเมนต์ 2 มม. ช่วยให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถดึงเส้นใยได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่ทำให้เส้นใยเกิดความเสียหาย จากภาพที่ 2.5a แสดงกราฟการดึงที่สอดคล้องกัน ซึ่งอธิบายถึงการลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงแสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานเพียงอย่างเดียวที่มีปฏิกิริยาทางกลระหว่างเส้นใย PE ที่ไม่ชอบน้ำและเมทริกซ์ซีเมนต์ เส้นใย PE ส่งผลให้เกิดแรงดึงที่คล้ายกันกับเส้นใยอื่น ๆ ซึ่งอย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นหมายถึงความแข็งแรงของพันธะต่ำสุด ดังตารางที่ 2.3 ความแข็งแรงของพันธะถูกกำหนดเป็นแรงสูงสุดหารด้วยพื้นที่ผิวฝังตัวของเส้นใย

ตารางที่ 2.3 ผลลัพธ์ของการทดสอบการดึงสำหรับเส้นใย , ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

	M-HDPE	M-ARA	M-PBO-AS	M-PBOHM
เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm)	20	12	13	13
ความเค้นที่ทำให้เส้นใยวิบัติ (MPa)	-	2523 (562)	3106 (474)	2757 (506)
ความแข็งแรงของพันธะ (MPa)	2.20 (0.15)	>3.78	4.43 (0.71)	3.41 (0.61)

M แสดงเมทริกซ์ซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงสูง (high-strength cementitious matrix)



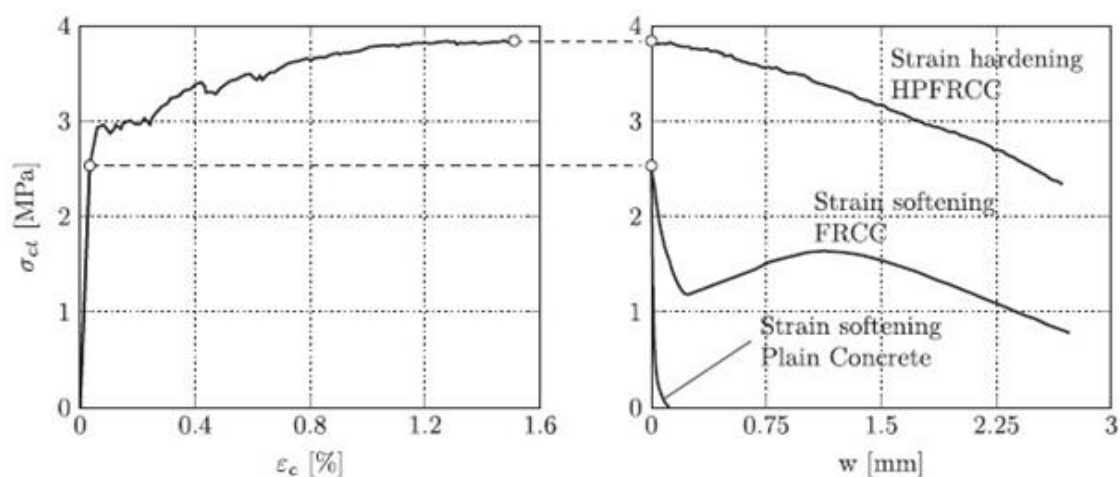
ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงแรงดึงสำหรับเส้นใยชนิดต่างๆ ที่ความยาวฝังตัว 2 มม.

สำหรับกราฟของเส้นใย aramid ระบุว่าเส้นใยแตกในเกือบทุกกรณี ซึ่งสามารถมองเห็นได้จากการลดลงของแรงอย่างทันทีทันใด ดังภาพที่ 2.5b ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับพื้นผิวที่แตกหักของ M-ARA หลังจากทดสอบแรงดึงแกนเดียว นอกจากนี้รูปร่างของเส้นโค้งไม่ได้ช่วยให้สามารถประเมินค่าโหมดการดึงออกได้อย่างตรงไปตรงมา สามารถสันนิษฐานได้ว่าความแข็งแรงของพันธะนั้นสูงกว่า 3.8 MPa เมื่อพิจารณาว่าแรงดึงสูงสุดที่มีศักยภาพสูงกว่าแรงที่วัดได้ ซึ่งนำไปสู่การพังของเส้นใย ความเครียดเฉื่อยที่ทำให้เส้นใยเกิดความเสียหาย คือ 2523 MPa ดังนั้นจึงคาดว่าจะต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใยเริ่มต้น (3400 MPa)

เส้นใยที่แสดงค่าความเค้นสูงสุดและความแข็งแรงของพันธะสูงสุด คือ เส้นใย PBO-AS จากตารางที่ 2.3 ความแข็งแรงพันธะของ PBO-HM ต่ำกว่า PBO-AS ซึ่งเป็นการตอบรับที่ดีกับผลที่ได้รับในระดับคอมโพสิต (composite) ความเครียดที่ทำให้เกิดความเสียหายของ PBO-HM ยังต่ำกว่า PBO-AS ซึ่งอาจเป็นข้อบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่แตกต่างกับเมทริกซ์ที่นำไปสู่ความเสียหายของเส้นใยมากขึ้นระหว่างการดึงออก สำหรับเส้นใย PBO ทั้งสองชนิดรองรับสมมติฐานนี้ จากภาพที่ 2.5 ในกรณีของ PBO-AS มีความเด่นชัด แรงที่ลดลงอย่างมากจากจุดสูงสุดซึ่งอาจบ่งบอกถึงพันธะเคมีบางชนิด ตามด้วยลักษณะการดึงออกที่คงที่ของพันธะแรงเสียดทาน ส่วนกราฟสำหรับเส้นใย PBO-HM มีรูปทรงนูนสูงขึ้นโดยไม่ลดลงหลังจากที่ได้รับความแข็งแรงของพันธะ อาจเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่สูงขึ้น

2.4 อิทธิพลของเส้นใยต่อการแตกร้าวของคอนกรีต

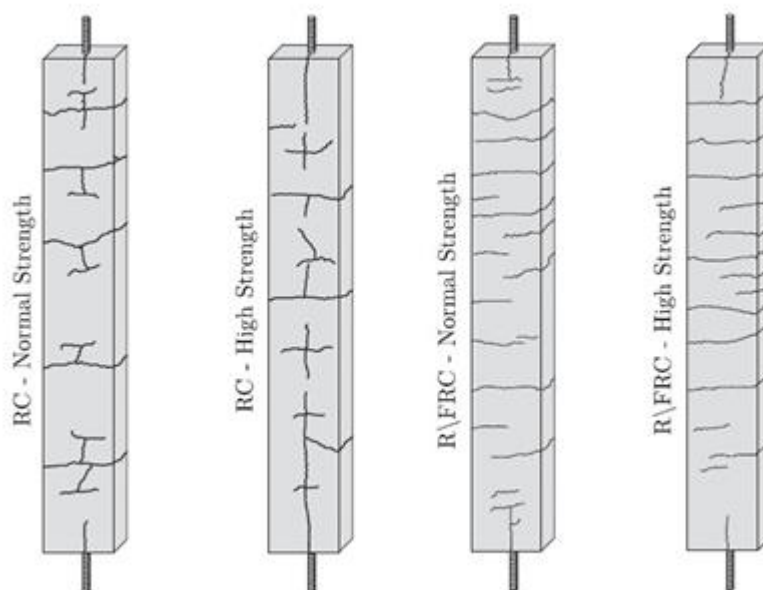
Berrocal et al. (2016) ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับคอนกรีตที่ผสมเสริมเส้นใยเหล็ก (SFRC) โดย Romualdi และคณะ ในช่วงต้นปีทศวรรษที่ 1960 ได้มีงานวิจัยจำนวนมากเพื่อให้ได้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล อย่างลึกซึ้งของวัสดุ ตามที่ Naaman และ Reinhardt ความต้านทานแรงดึงของปูนซีเมนต์สามารถ วัสดุที่เปราะ หรือ ความแข็งแรงแบบเปราะ ความเครียดของวัสดุที่มีความอ่อนตัวทำให้เกิดรอยแตกร้าวและสูญเสียความเค้น ลักษณะพฤติกรรมถูกแสดงได้ดังรูป



ภาพที่ 2.6 ลักษณะกำลังดึงของซีเมนต์

คอนกรีตมีความต้องการเส้นใยสูงและต้องมีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้คอนกรีตได้พฤติกรรมการแข็งตัวแบบเปราะ และเพิ่มประสิทธิภาพที่ต่ำของเส้นใยที่เกิดจากการสุมของเส้นใย ตำแหน่งของเส้นใยที่อยู่ในคอนกรีตเป็นอุปสรรคสำคัญในการที่ทำให้เนื้อคอนกรีตคอนกรีตไหลลงไปที่ทั่วถึง อย่างไรก็ตามเส้นใยเหล็กที่เสริมลงไปคอนกรีตจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาผู้เขียนหลายคนได้ตรวจสอบความเป็นไปได้ โดยศึกษาอิทธิพลของเส้นใยต่อประสิทธิภาพเชิงกลของคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้ความเครียดบริสุทธิ์ ข้อตกลงทั่วไปคือตัวอย่างที่มีเส้นใยเหล็กแสดงให้เห็นถึงความเครียดที่เพิ่มขึ้น รอยแตกตามขวางแคบและระยะเว้นวรรคอย่างใกล้ชิดกว่าตัวอย่างคอนกรีตธรรมดา การทดสอบความเครียดจะแสดงให้เห็นในรูปแบบ



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการแตกร้าวของ

จากการศึกษาโดย Jansson และคณะ แสดงให้เห็นว่า การทดสอบโดยวิธีการดึงระยะฝั่งที่สั้นและยาวเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของเส้นใยเหล็กที่เสริมในคอนกรีต พฤติกรรมก่อนถึงความเค้นสูงสุดดูเหมือนว่าจะไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏตัวของเส้นใยหลังจากการแตก การขยายตัวของความแตกร้าวจะเปลี่ยนลักษณะการพังเป็นแบบดึงออกจากเหล็กเส้น

2.5 อิทธิพลของเส้นใยต่อสมบัติการขนส่งและทางไฟฟ้า

Berrocal et al. ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการย่อยสลายในโครงสร้างส่วนใหญ่ของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกลไกที่ยอมให้ น้ำ ออกซิเจน และสารที่เป็นอันตราย เข้าไป เช่น ไอออนคลอไรด์ หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงกลไกที่ยอมให้มีการถ่ายเทกระแสไฟฟ้า กลไกการขนส่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสัดส่วนในการขนส่งมวลวัสดุขนาดเล็กและขนาดใหญ่ การขนส่งจำนวนมากในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็นกลไกพื้นฐาน

2.5.1 การแทรกซึมของคลอไรด์

การซึมผ่านเป็นหนึ่งในกระบวนการขนส่งที่สำคัญที่สุดซึ่งมีความเชื่อมโยงกับความทนทานของคอนกรีต การซึมผ่านเป็นมักใช้เพื่ออ้างถึงคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งทั้งหมดในขณะที่ การซึมผ่านระยะยาวเป็นที่ต้องการเพื่ออธิบายการซึมผ่านของของเหลวผ่านรูพรุนของวัสดุได้ความดันที่แตกต่างกัน แม้ว่า คำว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน มักใช้ในวรรณคดี เพื่ออ้างถึงกลไกของการซึมผ่านระยะเวลาที่ถูกต้อง

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{L \cdot \mu} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\frac{dq}{dt}$	คือ	การไหล (m^3/s)
	μ	คือ	ความหนืด (Ns/m^2)
	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ภายในของการซึมผ่านของวัสดุ (m^2)
	ΔP	คือ	ค่าการนำไฟฟ้า (Pa)
	A	คือ	พื้นที่ (m^2)
	L	คือ	ความยาว (m)

2.5.2 การแพร่กระจายของคลอไรด์

การแพร่กระจายของคอนกรีตเป็นลักษณะเชิงกลของคอนกรีตเมื่อสภาวะการตกตะกอนในรูปพรุนของคอนกรีตมีเสถียรภาพ การแพร่กระจายสามารถอธิบายเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนจากรูปพรุนที่ผิวของคอนกรีตซึ่งสามารถพบได้ในความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สูงจนถึงรูปพรุนภายในที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำ สำหรับการกระจายของคลอไรด์ในหนึ่งมินิสามารถแสดงให้เห็นในรูปของสมการดังต่อไปนี้ตามกฎข้อสองของ Fick

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ	D	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ภายใน (m^2/s)
	t	คือ	ระยะเวลาที่สัมผัส (s)
	x	คือ	ความลึกของคอนกรีตจากผิวนอก
	erf	คือ	ฟังก์ชันความผิดพลาด
	C_s และ $C(x,t)$	คือ	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและที่ความลึก x หลังจากระยะเวลา t

2.6 การเสื่อมสภาพของเส้นใยอะรามิดในสภาวะที่เป็นต่างและเป็นกลาง

Derombise et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเส้นใย Technora T240 ในรูปแบบของเส้นด้าย 1670 dtex เป็นเส้นใยอะรามิด ที่ผลิตโดย Teijin Aramid

2.6.1 การวัดความหนาแน่น

ตัวอย่างที่ได้รับการชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิ 20 ± 1 °C และแช่ใน dodecane ซึ่งดูเหมือนจะเฉื่อยและไม่ถูกดูดซับโดยเส้นใย Technora จากนั้นความหนาแน่นของเส้นใย (d_{fibres}) ถูกคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$d_{\text{finish}} = \frac{m_1 \times \rho_{\text{dodecane}} - m_2 \times \rho_{\text{air}}}{m_1 - m_2} \quad (2.3)$$

เมื่อ	m_1	=	เป็นมวลที่ชั่งน้ำหนักในอากาศ
	m_2	=	เป็นมวลชั่งน้ำหนักใน dodecane
	ρ_{air}	=	ความหนาแน่นของอากาศ
	ρ_{dodecane}	=	ความหนาแน่นของ dodecane

อัตราเทียบความพรุน (V_{porasi})

$$V_{\text{porosity}} = 1 - d_{\text{fibres}} \left(\frac{M_{\text{finish}}}{d_{\text{finish}}} + \frac{M_{\text{polymer}}}{d_{\text{polymer}}} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ	M_{finish}	=	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสุดท้าย
	M_{polymer}	=	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักพอลิเมอร์ (ไม่มีการเสร็จสิ้น)
	d_{finish}	=	ความหนาแน่นสุดท้าย
	d_{polymer}	=	ความหนาแน่นของพอลิเมอร์

เส้นใยถูกอบแห้งไว้ล่วงหน้าเป็นเวลา 48 ชั่วโมงในเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 90 °C เพื่อให้เส้นใยแห้ง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 °C กับ ซิลิกาเจล (silica gel)

จากการทดสอบการวัดความหนาแน่น พบว่า การปรากฏตัวของผิวเคลือบได้แสดงให้เห็นว่ามีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของเส้นใย Technora ตัวอย่างเช่น ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1.398 ± 0.002 สำหรับสภาพเส้นใยเมื่อไม่มีการใช้งาน (Technora T000) ในขณะที่ความหนาแน่นของเส้นใยที่ใช้งานแล้ว (Technora T240) เท่ากับ 1.387 ± 0.003 โดยมีส่วนผสมเสร็จ 2.5% โดยน้ำหนัก ค่าเหล่านี้เป็นไปตามที่รายงานไว้โดย Teijin Aramid ที่ความหนาแน่น 1.39

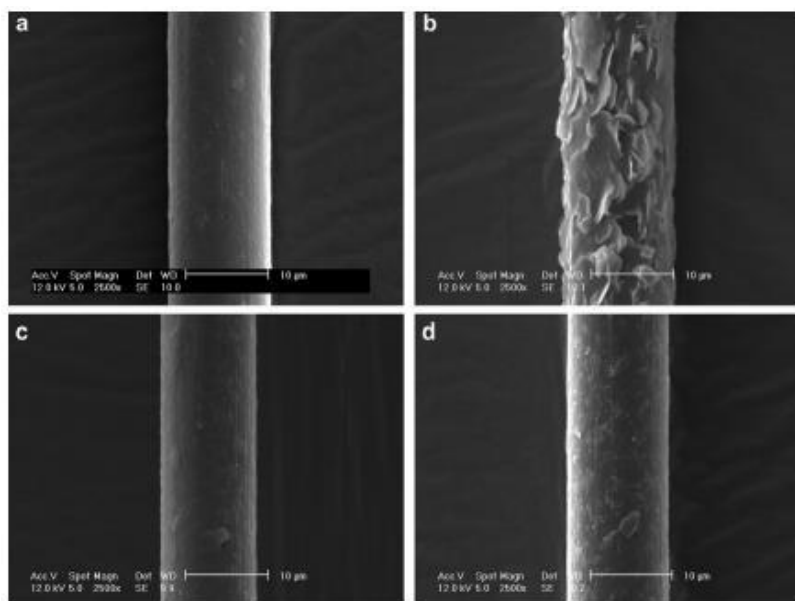
2.6.2 การวัดความหนืด

การวัดความหนืดได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องวัดความหนืดขนาดเล็ก Ubbelohde DIN (Schott Instruments) ที่ 25 °C การวัดความหนืดที่ลดลงถูกดำเนินการที่ความเข้มข้นที่สามระหว่าง 3×10^{-4} g / mL และ 1.5×10^{-3} g / mL เส้นใยถูกละลายในกรดกำมะถัน 50 mL เข้มข้นที่ 96% เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 °C ด้วยการกระตุ้นแม่เหล็ก ส่วนที่เหลือไม่ละลายหลังจากสกัดเสร็จแล้ว และชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลาย

ความหนืดที่ลดลงของ Technora T240 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก $\sim 441 \pm 60$ มิลลิลิตรต่อกรัมถึง ~ 497 มิลลิลิตรต่อกรัม หลังจากหนึ่งปีที่ pH11 ที่อุณหภูมิ 80 °C เพิ่มขึ้นถึง ~ 450 มิลลิลิตรต่อกรัม หลังจากหนึ่งปีที่ pH9 ที่อุณหภูมิ 80 °C และหลังจากหนึ่งปีในน้ำ deionised ที่อุณหภูมิ 80 °C เพิ่มขึ้นถึง ~ 492 มิลลิลิตรต่อกรัม อิทธิพลของผิวเคลือบที่มีผลทำให้ความหนืดลดลงได้รับการอธิบายไว้ที่อื่น ปรากฏว่าผิวเคลือบของเส้นใยช่วยทำให้ความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นวิวัฒนาการของความหนืดที่ลดลงของอายุเส้นใย Technora T240 อาจเกิดจากการรวมกันระหว่างการกำจัดเส้นใยและการส่งมอบห่วงโซ่จึงเป็นไปได้ที่จะประเมินการย่อยสลายทั้งหมดของ Technora T240 ได้อย่างน่าเชื่อถือ

2.6.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิว: SEM

จากภาพที่ 5 กลุ่มภาพ SEM ของเส้นใย Technora T240 ก่อนและหลังอายุหนึ่งปีที่ pH11 pH9 และในน้ำ deionised ที่อุณหภูมิ 80 °C หลังจากหนึ่งปีที่ pH9 และในน้ำ deionised ที่อุณหภูมิ 80 °C (ภาพที่ 2.8 c,d) เส้นใยไม่แสดงข้อบกพร่องของพื้นผิวอย่างครอบคลุม การจัดเรียงใหม่เฉพาะที่ในรูปแบบของมวลรวมขนาดเล็กได้รับการปฏิบัติในเงื่อนไขดังกล่าว หลังจากหนึ่งปีที่ pH11 และที่อุณหภูมิ 80 °C (ภาพที่ 2.8 b) เส้นใยแสดงรูปร่างหกเหลี่ยมแบบสม่ำเสมอที่ ซึ่งรวมถึงการจัดโครงสร้างใหม่อีกด้วย



ภาพที่ 2.8 ภาพ SEM ของเส้นใย Technora T240 (a) สภาพปกติ และหลังจากหนึ่งปี (b) pH11 ที่ 80 °C (c) pH9 ที่ 80 °C (d) ในน้ำ deionised ที่ 80 °C

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเส้นใย Technora T240 มีอายุต่ำกว่าสภาวะต่าง (pH9 และ pH11) และในน้ำ deionised นานถึงหนึ่งปีครึ่ง เฉพาะการย่อยสลายสายโซ่เล็กน้อยเท่านั้นที่ได้รับการเปิดเผยที่พื้นผิวสำหรับทุกสภาวะ และการย่อยสลายจำนวนมากอาจเกิดขึ้นที่ pH9 และ pH11 เท่านั้น สถานะพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลติกจะแสดงผลการจัดเรียงที่สมบูรณ์ ในรูปแบบของมวลรวมขนาดเล็กที่ pH9 และในน้ำ deionised และในรูปของรูปหกเหลี่ยมแบบสุ่มที่มีค่า pH11 ปรากฏว่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ไม่มีผลต่อสมบัติทางกลที่สำคัญ อันที่จริง ความต้านทานแรงดึงที่เหลือสูงกว่า 95% หลังจากหนึ่งปีครึ่งอายุภายใต้เงื่อนไขทั้งหมด และโมดูลัสแรงดึงคงตัวตลอดช่วงอายุของเส้นใย

จากการวิเคราะห์ มีหลักฐานความมั่นคงสูงของเส้นใย Technora ในสภาพที่เป็นกลางและต่างปานกลาง ในเรื่องความทนทานของเส้นใย Technora ดูเหมือนจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและส่วนผสมของคอนกรีต

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาและทดลองมีดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้เป็นปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15-2555 องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3.2
2. เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยที่เถ้าลอยที่ใช้ได้มาจากจังหวัดระยองตามมาตรฐาน ASTM C 618 เป็น class F หรือชั้นคุณภาพที่ 2 ชนิด ก ตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3.2
3. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร
4. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึงหินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ 19 มิลลิเมตร
5. น้ำ (Water) น้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตเป็นน้ำประปาที่ได้มาจากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
6. สารผสมเพิ่ม Sika ViscoCrete -10TTH ประเภท F (Water-Reducing ,High Range Admixture) ตามมาตรฐาน ASTM C494-84
7. เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร 50 มิลลิเมตร และยังมี ประเภทเส้นใยแบบเส้นตรง (straight) และ เส้นใยแบบพันเกลียว (twist) จากบริษัท Teijin

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

Chemical composition (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย ละเอียด
CaO	65.38	2.55
SiO ₂	19.15	64.45
Al ₂ O ₃	4.97	20.58
Fe ₂ O ₃	3.78	3.7
MgO	1.08	0.97
Na ₂ O	0.01	0.43
K ₂ O	0.44	1.51
SO ₃	2.1	0.18
Loi	-	4.01
TiO ₂	-	1.04
P ₂ O ₅	-	0.16
MnO	-	0.03

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางกายภาพปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

Physical properties	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย ละเอียด
Specific gravity	3.14	2.18
Blaine fineness (cm ² /g)	3,200	3,463

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

No.	Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m ³)						
			Cement	Fly ash (30%)	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)	SP	Fiber (1% by weight)
1	C	0.40	288	123	164	776	1,025	-	-
2	CAF30S	0.40	288	123	164	776	1,025	1.8	13.8
3	CAF40S	0.40	288	123	164	776	1,025	1.8	13.8
4	CAF50S	0.40	288	123	164	776	1,025	1.8	13.8
5	CAF30T	0.40	288	123	164	776	1,025	1.8	13.8
6	CAF40T	0.40	288	123	164	776	1,025	1.8	13.8
7	CAF50T	0.40	288	123	164	776	1,025	1.8	13.8

*หมายเหตุ รหัสส่วนผสมมีความหมายดังนี้ CAF50T C คือ Concrete, AF คือ Aramid Fiber, 50T คือ เส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียว ความยาว 50 มิลลิเมตร

3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด(Bulk diffusion chloride penetration)ของคอนกรีต

1.อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1.1 แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

1.2 ชุดเครื่องทดสอบ Auto titration รุ่น 785 DMP Titrino Metrohm ดังแสดงในภาพที่ 3.1

1.3 เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.3

1.4 ชุดเครื่องกรองตัวอย่าง

1.5 สว่านสำหรับชุดผิวหน้า

1.6 เตาไฟฟ้า (Hot plate)

1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

1.8 ข้อนตักสาร

1.9 ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

1.10 ปีเปตขนาด 10 มิลลิลิตร

- 1.11 กระบอกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
- 1.12 ขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 1.13 ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ
- 1.14 ตะแกรงร่อนเบอร์ 100
- 1.15 ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุชิ้น และผงตัวอย่างทดสอบ
- 1.16 กรดไนตริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 1.17 น้ำกลั่น



ภาพที่ 3.1 ชุดเครื่องทดสอบ Auto titration

2. วิธีทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยผสมคอนกรีตตามส่วนผสม ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 บ่มที่ระยะเวลา 28 วัน และนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.0% ครบตามกำหนด (ที่อายุ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน) แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากถังน้ำเกลือคลอไรด์ที่จุ่มไว้จนแห้งแล้วนำไปชั่งเอาผงคอนกรีตที่ผิวหน้าประมาณ 5 กรัม และตัวอย่างเป็นแผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนา 1 เซนติเมตร แล้วทำการบดตัวอย่างให้เป็นผงโดยเลือกบดเฉพาะบริเวณที่อยู่กึ่งกลางตัวอย่าง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร เพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตต่อไป

2.2 ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายด้วยกรด (Acid soluble) ในคอนกรีตสามารถหาได้ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และ มาตรฐาน C114 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1) นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดเป็นผงมาชั่งจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม โดยใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2.2) เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีผงคอนกรีตไว้แล้วจนถึงขีด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำละลายกรดไนตริกที่เจือจางในอัตราส่วน 1:1 แล้วลงไป 25 มิลลิลิตร ตามลงไปทันที

2.2.3) ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่มีตัวอย่างด้วยการต้มให้เดือด คอยควบคุมไม่ให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2.2.4) ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย สารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง และปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร

2.2.5) เริ่มทำการทดสอบโดยนำบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ววางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TEE-fluorocarbon-coated magnetic bar ลงไปแช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในบีกเกอร์ อยู่เหนือสารละลาย

2.2.6) เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุไฟฟ้า

2.2.7) อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีต

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water soluble) สามารถหาได้ตามมาตรฐาน ASTM C1218 และมาตรฐาน C114 โดยมีรายละเอียดวิธีการทดลอง ดังนี้

2.2.8) นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดเป็นผงมาชั่งจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม โดยใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2.9) เติมน้ำกลั่น (Reagent water meeting specification D 1193) ลงไป 50 มิลลิลิตร

2.2.10) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วปล่อยให้เย็น 24 ชั่วโมง

2.2.11) ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร

2.2.12) เติมสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ที่เจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วใน อัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด คอยควบคุมไม่ให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)

2.2.13) สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TEE-fluorocarbon-coated magnetic bar ลงไปแช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวัง อย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วย สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรือ อยู่เหนือสารละลาย

2.2.14) เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการ เปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณ คลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุไฟฟ้า

2.2.15) อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration

3.3 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง(Rapid chloride penetrability test, RCPT)ของคอนกรีต

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1.1 แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

1.2 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3.2

1.3 ชุดเซลล์ทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.5

1.4 เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.3

1.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

1.6 ซ้อนตักสาร

1.7 บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

1.8 น็อตสำหรับยึดจับตัวเซลล์ทดสอบ

1.9 ซิลิโคนใส

1.10 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

1.11 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



ภาพที่ 3.2 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า



ภาพที่ 3.3 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

2. วิธีทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1202

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

- 2.1.1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร
- 2.1.2) หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างจากแบบหล่อนำตัวอย่างไปบ่มน้ำตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน 91 วัน ตามลำดับ
- 2.1.3) เมื่อตัวอย่างครบอายุ นำตัวอย่างมาตัดออกเป็น 3 ชิ้น แต่ละชิ้นหนา 5 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.4 การตัดตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

2.1.4) นำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบโดยก่อนประกอบขึ้นตัวอย่างจะถูกเคลือบผิวด้านข้างด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารละลาย



ภาพที่ 3.5 ลักษณะการประกอบตัวอย่างเข้าเซลล์

2.2 การเตรียมสารละลาย

2.2.1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0 % โดยชั่งโซเดียมคลอไรด์ 30 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร แล้วใช้แบ่งกวนให้โซเดียมคลอไรด์ละลายในน้ำจนหมด

2.2.2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M โดยชั่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่น ปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร แล้วใช้แบ่งกวนกวนให้โซเดียมละลายในน้ำจนหมด

2.3 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

2.3.1) เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% ในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วลบ และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวก

2.3.2) ต่อสายไฟฟ้าจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ โดยต่อสายไฟฟ้าขั้วบวก และสายไฟฟ้าขั้วลบเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วลบ

2.3.3) การตั้งค่าเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า และการเรียกใช้งานโปรแกรมการทดสอบ

2.3.4) ให้ตัวอย่างออกจากเซลล์ทดสอบเพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ต่อไป

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

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

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าผิว(Surface electrical resistivity)ของคอนกรีต

1.อุปกรณ์ที่ใช้

1.1 แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

1.2 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า รุ่น Resipod Proceq ดังแสดงในภาพที่ 3.6

1.3 ปากกาเมจิก



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า

2.วิธีทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน AASHTO TP95

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- 2.1.1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 10 x 20 ตารางเซนติเมตร
- 2.1.2) หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างจากแบบหล่อ นำตัวอย่างไปบ่มน้ำตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน 91 วัน ตามลำดับ
- 2.1.3) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบขึ้นมาจากน้ำแล้วทำการเช็ดให้หมาดน้ำ
- 2.1.4) วัดมุมที่หน้าตัดให้มีมุม 0, 90, 180, 270 องศา
- 2.1.5) ลากเส้นยาวจากหน้าตัดลงมาด้านข้างยาว



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกที่วัดมุมแล้ว

2.2 การทดสอบตัวอย่าง

- 2.2.1) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบขึ้นมาจากน้ำแล้วเช็ดด้วยผ้าให้หมาดน้ำ

2.2.2) หลังจากที่ใช้ดด้วยผ้าแล้วให้ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวกดลงไปตามเส้นที่ขีดไว้แล้วบันทึกผลที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.8

2.2.3) ทำแบบเดียวกันทุกเส้นที่ขีดไว้โดยทุกครั้งก่อนที่จะวัดค่าให้นำน้ำก่อนตัวอย่างลงไปแช่น้ำก่อนแล้วนำขึ้นมาเช็ด เพื่อให้เหมือนสภาพการทดสอบครั้งแรก

2.2.4) นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว



ภาพที่ 3.8 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

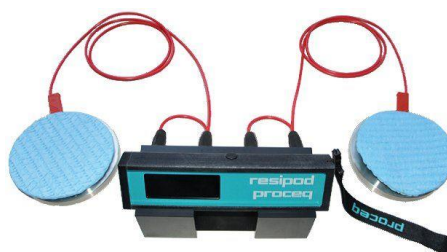
ตารางที่ 3.4 เกณฑ์พิจารณาความต้านทานพื้นผิวของคอนกรีตต่อการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนตามมาตรฐาน AASHTO TP95

Chloride Ion Penetrability	Surface Resistivity Test	
	100mm x 200mm Cylinder (kΩ-cm)	150mm x 300mm Cylinder (kΩ-cm)
High	< 12	< 9.5
Moderate	12 - 21	9.5 - 16.5
Low	21 - 37	16.5 - 29
Very Low	37 - 254	29 - 199
Negligible	> 254	> 199

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด(Bulk electrical resistivity)ของคอนกรีต

1.อุปกรณ์ที่ใช้

- 1.1 แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
- 1.2 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า รุ่น Resipod Proceq ดังแสดงในภาพที่ 3.9
- 1.3 สายไฟต่อเครื่องวัดกับเพท
- 1.4 เพทประกบ
- 1.5 โฟมประกบด้านบนและล่าง



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า

2. การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1760

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

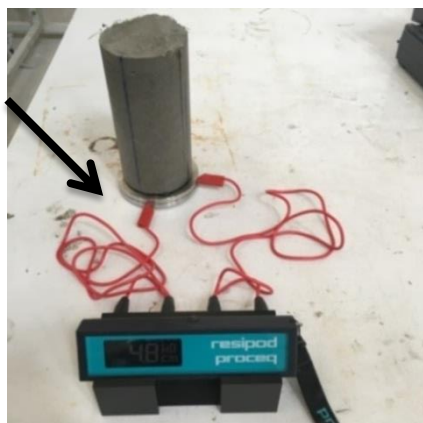
- 2.1.1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
- 2.1.2) หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างจากแบบหล่อ นำตัวอย่างไปบ่มน้ำตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน 91 วัน ตามลำดับ
- 2.1.3) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบขึ้นมาจากน้ำแล้วทำการเช็ดให้หมาดน้ำ
- 2.1.4) ต่อเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้ากับเพทประกบด้านบนและล่างด้วยสายไฟ ดังแสดงในภาพที่ 3.9
- 2.1.5) นำแผ่นโฟมมาชุบน้ำให้เปียกพอประมาณ
- 2.2 การทดสอบตัวอย่าง
 - 2.2.1) นำโฟมด้านบนมาประกบด้วยเพทบนและล่างแล้วบันทึกค่า ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 วัดค่าความต้านทานของแผ่นโคมด้านบน

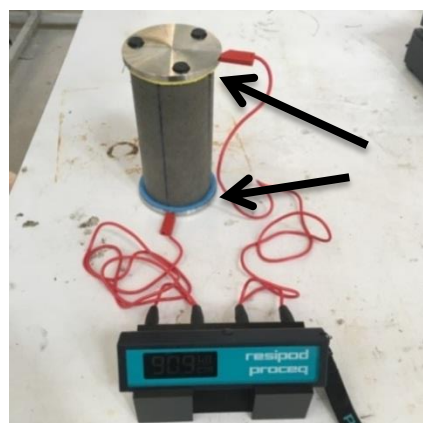
2.2.2) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบขึ้นมาจากน้ำแล้วเช็ดผ้าให้หมาดน้ำ

2.2.3) นำโคมด้านล่างมาประกบด้วยเพทบนและล่างแล้วนำตัวอย่างที่เช็ดด้วยผ้าแล้วมาวางทับเพทด้านบนแล้วบันทึกค่าที่ได้ (ภาพที่ 3.11)



ภาพที่ 3.11 วัดค่าความต้านทานของแผ่นโคมด้านล่าง

2.2.4) นำตัวอย่างมาประกบด้วยโคมทั้งบนและล่างแล้วประกบด้วยเพทอีกที่ทั้งด้านบนและล่าง บันทึกค่าที่ได้



ภาพที่ 3.12 วัดค่าความต้านทานของตัวอย่างทดสอบรูป

3. การคำนวณหาความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด

ความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีต

$$R_{\text{cylinder}} = R_{\text{measured}} - R_{\text{lower}} - R_{\text{upper}} \quad (\text{k}\Omega\text{-cm}) \quad (3.1)$$

R_{cylinder} คือ ความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีต

R_{measured} คือ ความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตรวมแผ่นโม่

R_{lower} คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นโม่ด้านล่าง

R_{upper} คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นโม่ด้านบน

ความต้านทานไฟฟ้าปรับแก้ของตัวอย่างคอนกรีต

$$R_{\text{correct}} = \frac{R_{\text{cylinder}}}{2\pi a} \quad (\text{k}\Omega) \quad (3.2)$$

R_{correct} คือ ความต้านทานไฟฟ้าปรับแก้ของตัวอย่างคอนกรีต

a คือ ระยะห่างระหว่างขั้ววัด (5 cm)

ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของตัวอย่างคอนกรีต

$$\text{Bulk resistivity} = R_{\text{correct}} \cdot K \quad (\text{k}\Omega\text{-cm}) \quad (3.3)$$

$$K = \frac{A}{L} \quad (\text{cm}) \quad (3.4)$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (cm^2)

L คือ ความสูงของตัวอย่างคอนกรีต (cm)

4. ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าที่ได้จากการทดสอบ $R_{\text{measured}} = 79.6 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, $R_{\text{lower}} = 1.3 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, $R_{\text{upper}} = 6.4 \text{ k}\Omega\text{-cm}$

วิธีการคำนวณ

หาความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีต

จากสมการที่ (3.5.1)

$$R_{\text{cylinder}} = R_{\text{measured}} - R_{\text{lower}} - R_{\text{upper}}$$

$$R_{\text{cylinder}} = 79.6 - 1.3 - 6.4$$

$$R_{\text{cylinder}} = 71.9 \text{ k}\Omega\text{-cm}$$

หาความต้านทานไฟฟ้าปรับแก้ของตัวอย่างคอนกรีต

จากสมการที่ (3.5.2)

$$R_{\text{correct}} = \frac{R_{\text{cylinder}}}{\frac{2\pi a}{(2)(\pi)(5)}}$$

$$R_{\text{correct}} = \frac{71.9}{2.29} \text{ k}\Omega$$

หาความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของตัวอย่างคอนกรีต

จากสมการที่ (3.5.3) และ สมการที่ (3.5.4) จะได้

$$\text{Bulk resistivity} = R_{\text{correct}} \cdot \frac{A}{L}$$

$$\text{Bulk resistivity} = 2.29 \times \left(\frac{\pi(5)^2}{20} \right)$$

$$\text{Bulk resistivity} = 8.99 \text{ k}\Omega\text{-cm}$$

3.6 กำลังอัด(Compressive strength)ของคอนกรีต

1. อุปกรณ์ที่ใช้

1.1 แบบหล่อตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 10 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร

1.2 ไม้บรรทัด

1.3 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบกำลังอัด

2.วิธีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS EN 12390

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.1.1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ที่มีขนาด 10x10x10 เซนติเมตร

2.1.2) หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างจากแบบหล่อ นำตัวอย่างไปบ่มน้ำตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน 91 วัน ตามลำดับ

2.1.3) นำตัวอย่างที่บ่มเสร็จแล้วขึ้นมาจากน้ำแล้วทำการวัดความกว้างความยาวนำมาคำนวณพื้นที่หน้าตัด

2.2 การทดสอบตัวอย่าง

2.2.1) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.14

2.2.2) บันทึกค่าที่ได้นำค่าที่ได้มาคำนวณหา กำลังอัดด้วยการนำแรงอัดที่ได้มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.14 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3. สูตรคำนวณหา กำลังอัดของคอนกรีต

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.5)$$

P คือ แรงอัดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต (kg)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่รับแรง (cm^2)

3.7 กำลังดึงของคอนกรีต (Spitting Tension Test)

1. อุปกรณ์ที่ใช้

1.1 แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

1.2 ไม้บรรทัด

1.3 เครื่องวัดกำลังอัดคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 3.15

2. วิธีการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.1.1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

2.1.2) หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างจากแบบหล่อนำตัวอย่างไปบ่มน้ำตามอายุที่กำหนด 28 วัน 56 วัน 91 วัน ตามลำดับ

2.1.3) นำตัวอย่างที่บ่มเสร็จแล้วขึ้นมาจากน้ำแล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความ

2.2 การทดสอบตัวอย่าง

2.2.1) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.15 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตด้วยวิธีการผ่าซีก

3. สูตรคำนวณหาำลังดึงของคอนกรีต

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.6)$$

P คือ แรงอัดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต (kg)

L คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงทรงกระบอก (cm)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีต (cm)

บทที่ 4

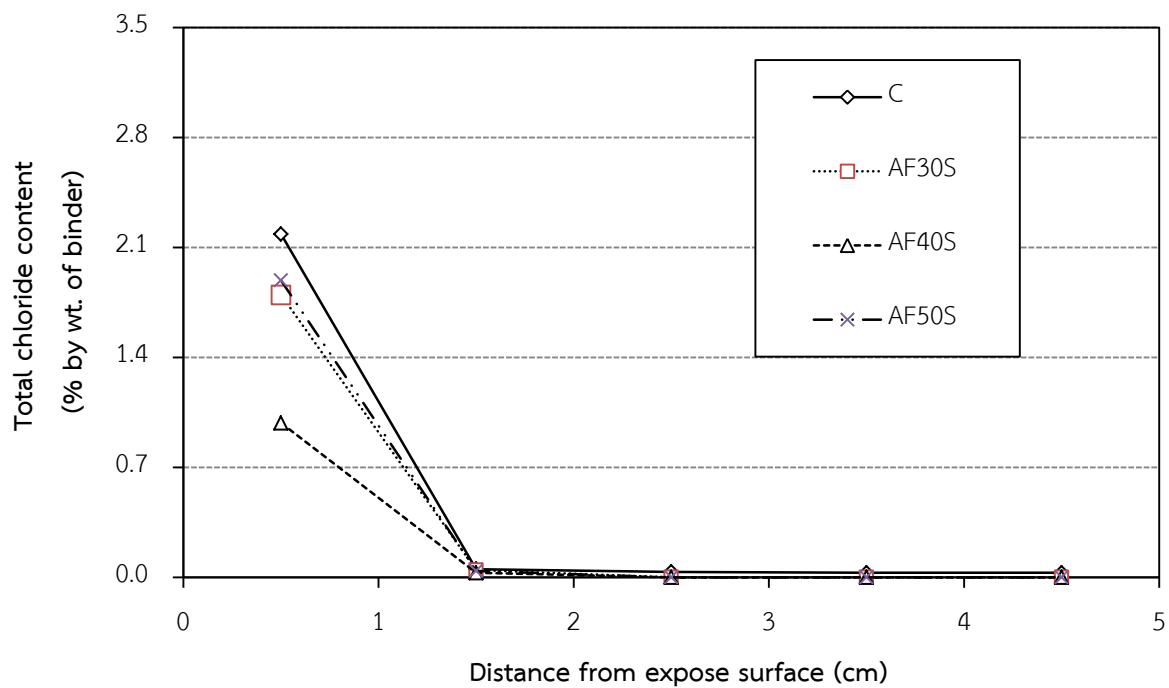
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

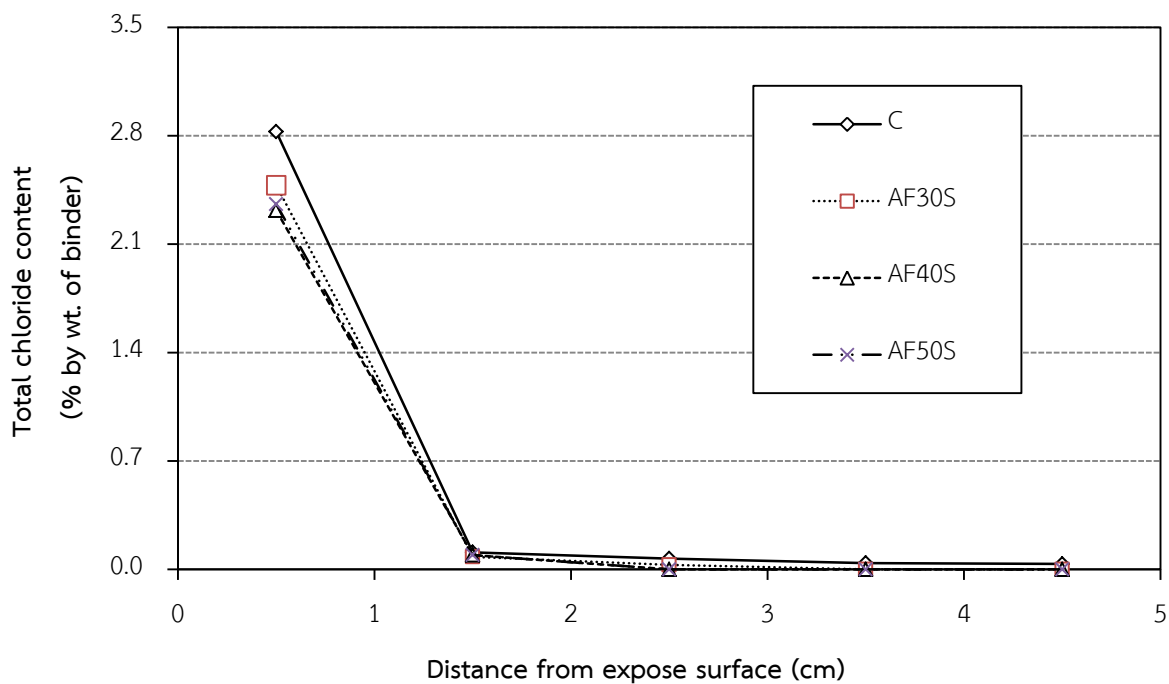
การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk Chloride diffusion) ของคอนกรีตถูกแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุผสม (% by weight of binder) และระยะจากผิวหน้า (Distance from exposed surface) ของคอนกรีต โดยหากมีปริมาณการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำแสดงว่าคอนกรีตนั้นมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

จากภาพที่ 4.1 เมื่อพิจารณาคอนกรีตล้วนกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงที่มีความยาว 30, 40, และ 50 มิลลิเมตร ภายหลังจากที่คอนกรีตถูกปล่อยให้เผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ทดสอบทุกระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ การแทรกซึมของคลอไรด์สามารถเข้าไปได้เพียง 1-2 เซนติเมตร แรกเท่านั้น โดยที่คอนกรีตล้วนมีการซึมผ่านคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิต 30S, 40S, และ 50S เมื่อพิจารณาผลกระทบของเส้นใยอะรามิตต่อการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จากภาพที่ 4.2 พิจารณาที่คอนกรีตล้วนกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตที่มีความยาว 40 มิลลิเมตร มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่สูงที่สุด และคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตที่มีความยาว 50 มิลลิเมตร มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำที่สุดทุกระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ จากภาพที่ 4.3 ถึง 4.5 พิจารณาคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิต ที่ความยาว 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงที่มีความยาว 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียวที่มีความยาว 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร ทุกระยะเวลาเผชิญคลอไรด์

จากภาพที่ 4.6 ตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ใกล้เคียงกัน ทั้งเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง และแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์พบว่า คอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าตัวอย่างที่เผชิญคลอไรด์ 56 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ และที่ระยะเวลาของคอนกรีตมากขึ้นยิ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลง ส่งผลให้ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำตามไปด้วย

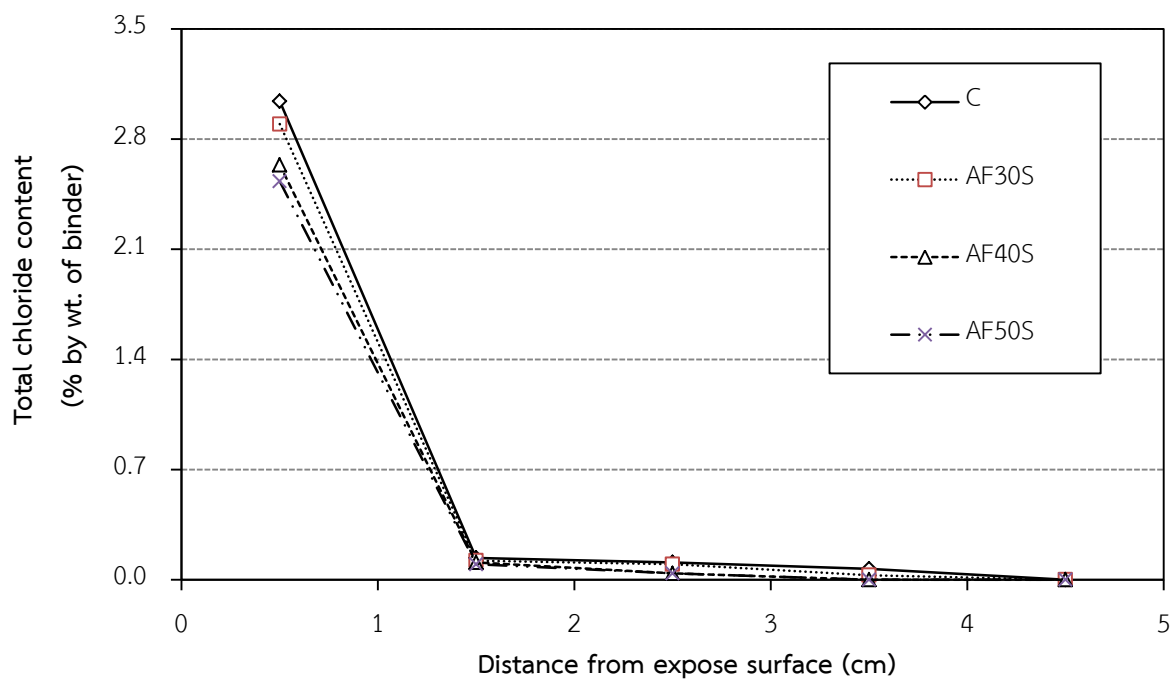


ก. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน



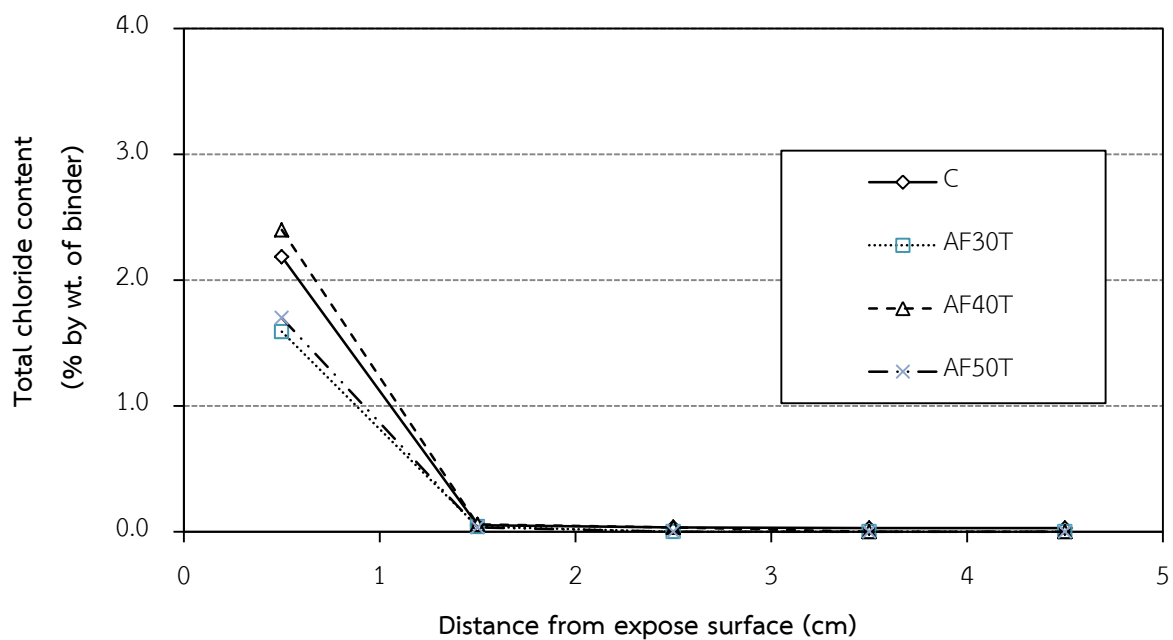
ข. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน

ภาพที่ 4.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน



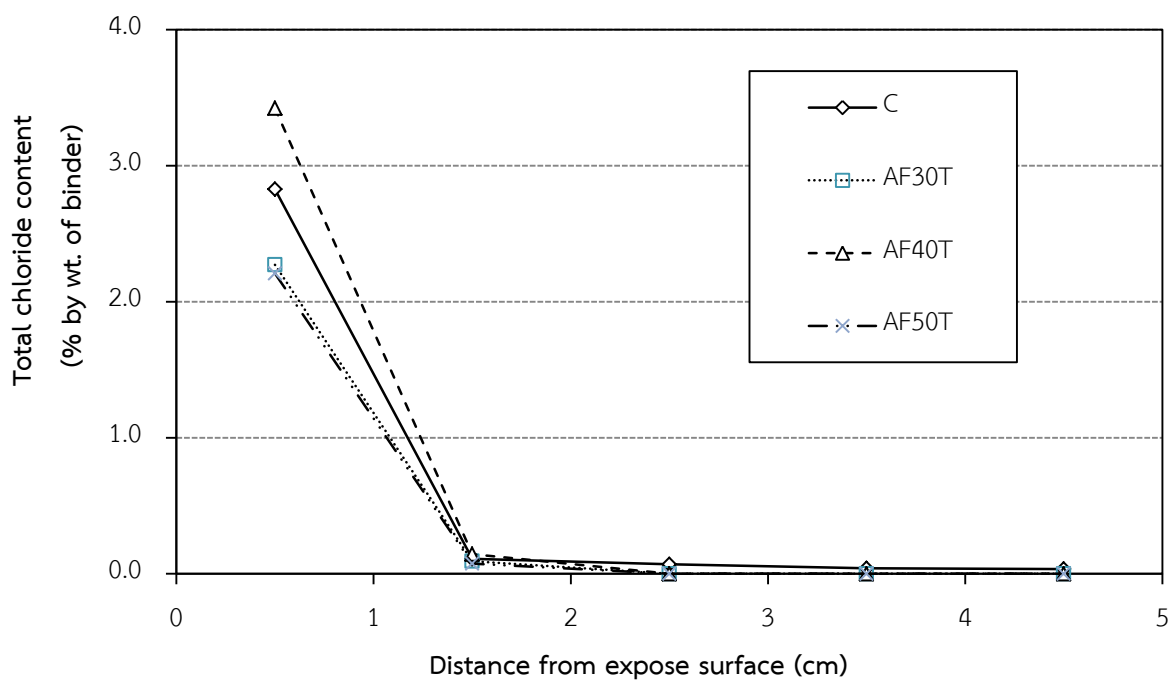
ค. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ภาพที่ 4.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรง ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน (ต่อ)

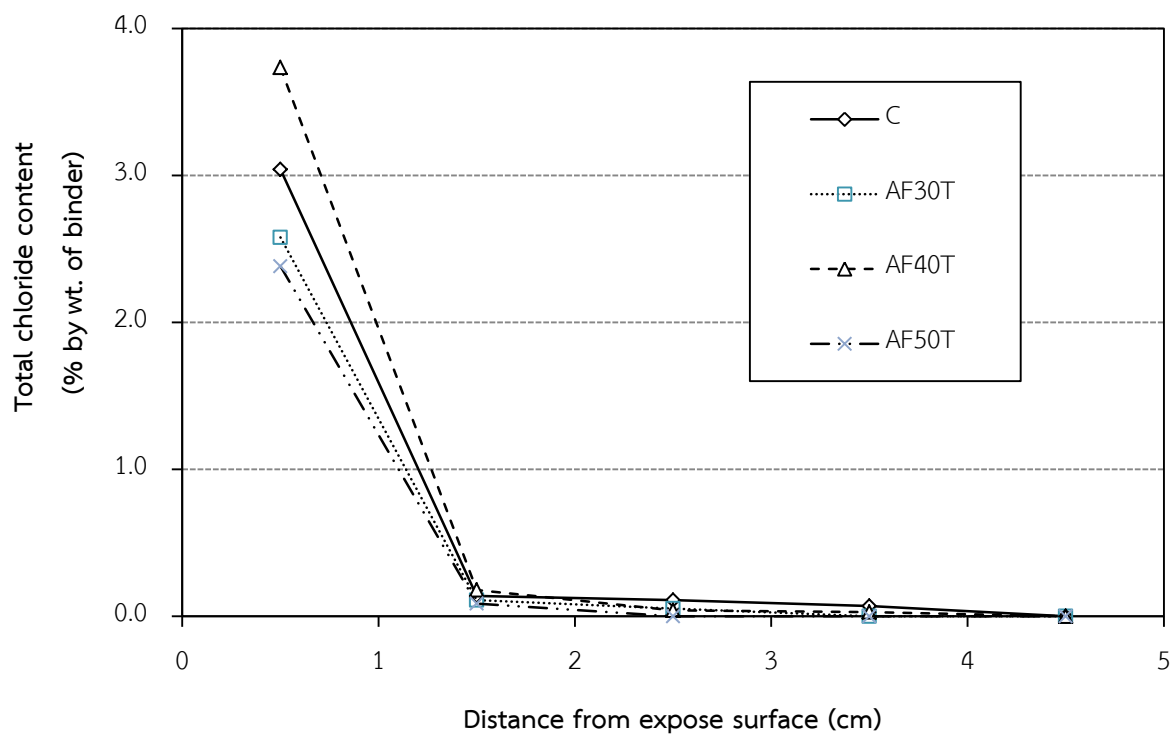


ก. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ภาพที่ 4.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน

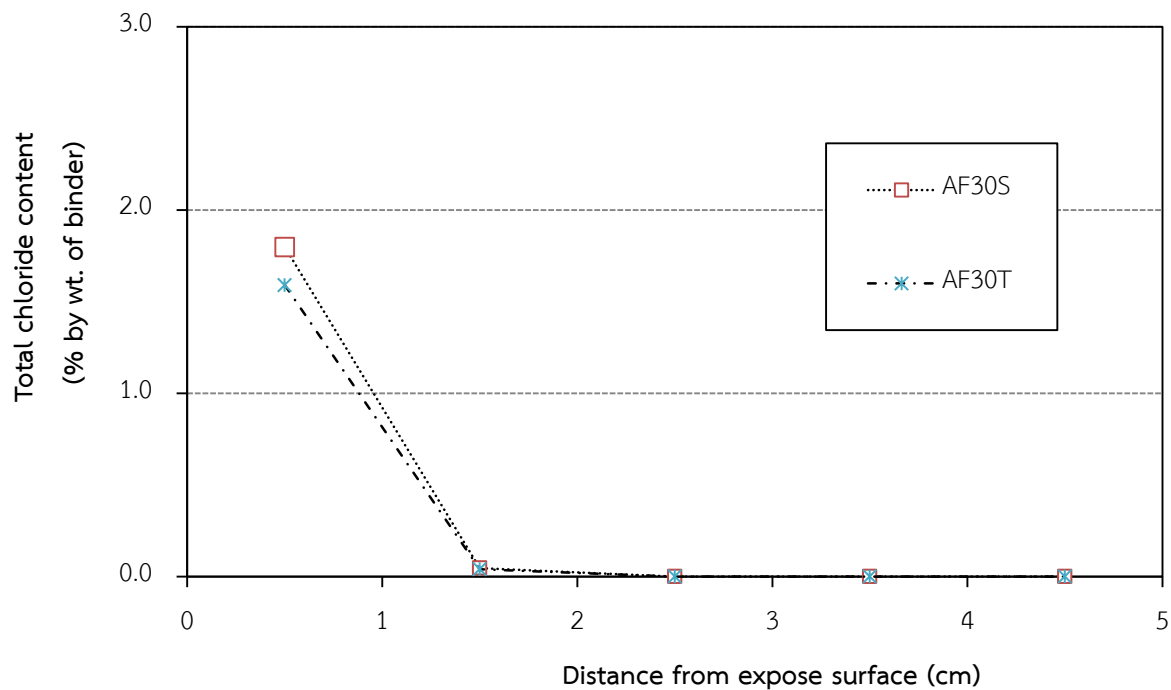


ข. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน

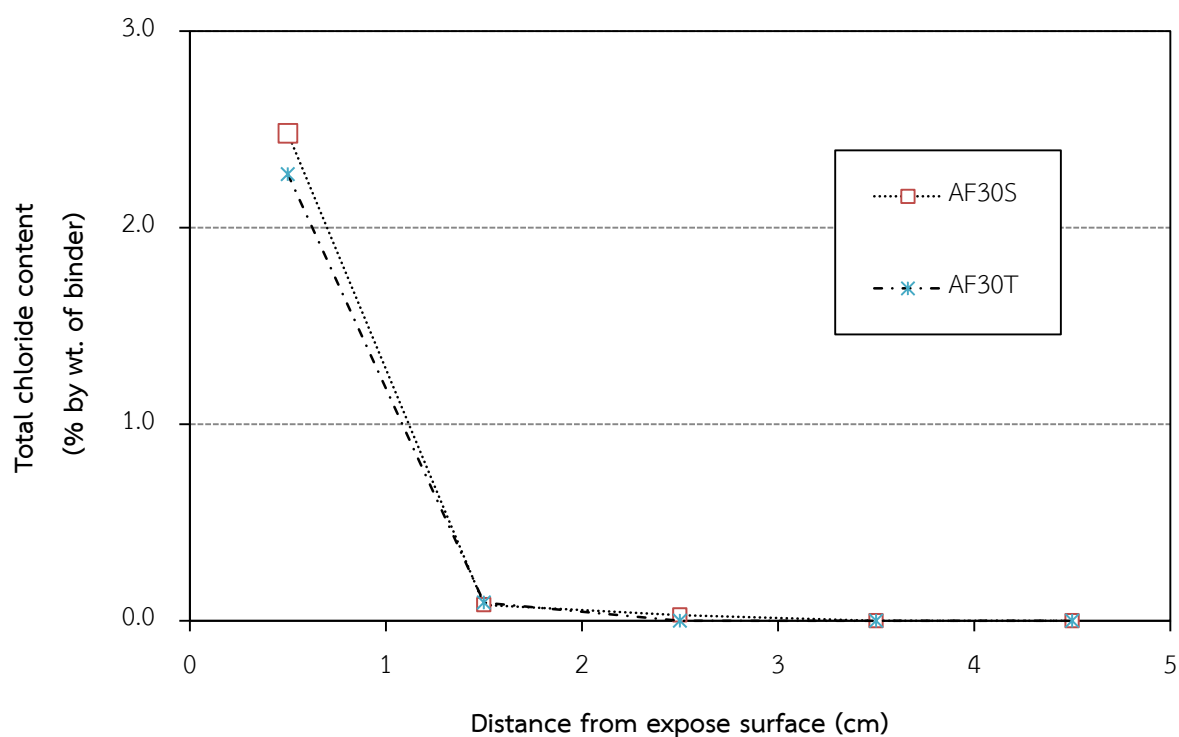


ค. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ภาพที่ 4.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน (ต่อ)

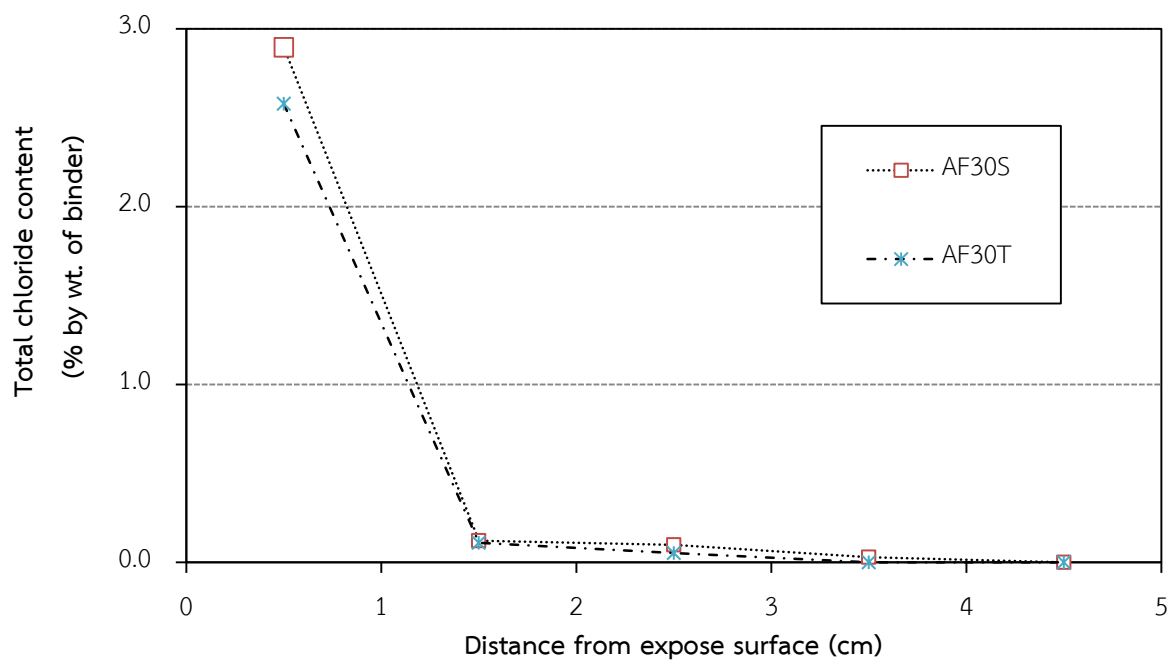


ก. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน



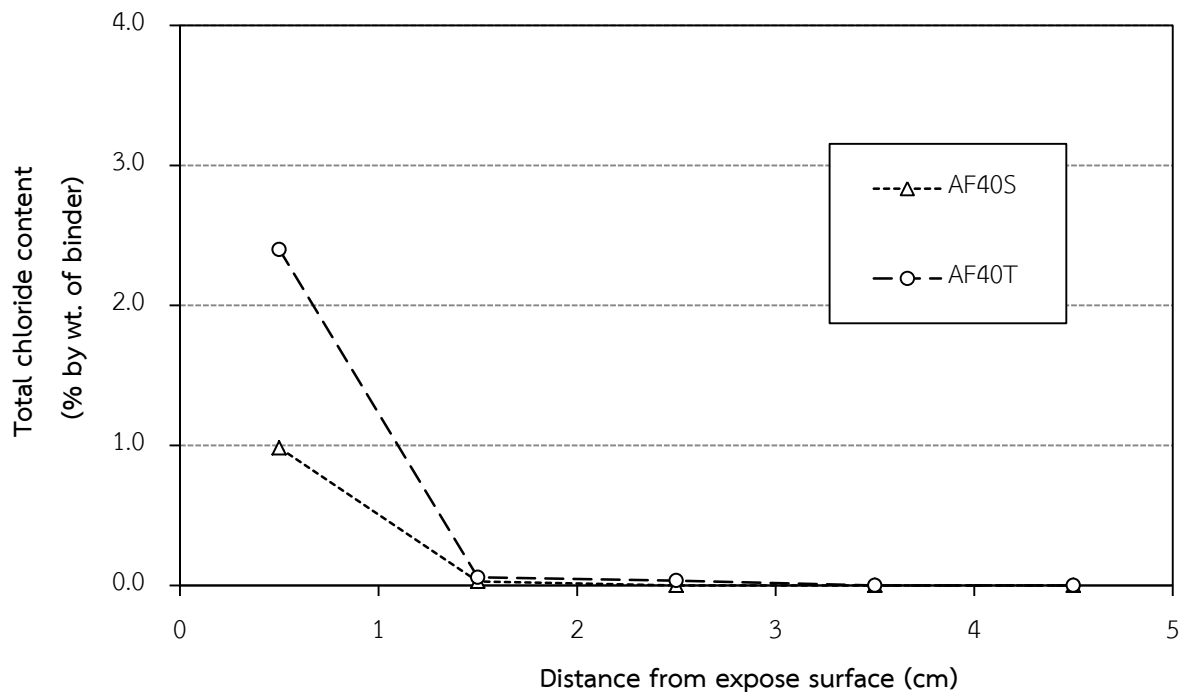
ข. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน

ภาพที่ 4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 30 มิลลิเมตร



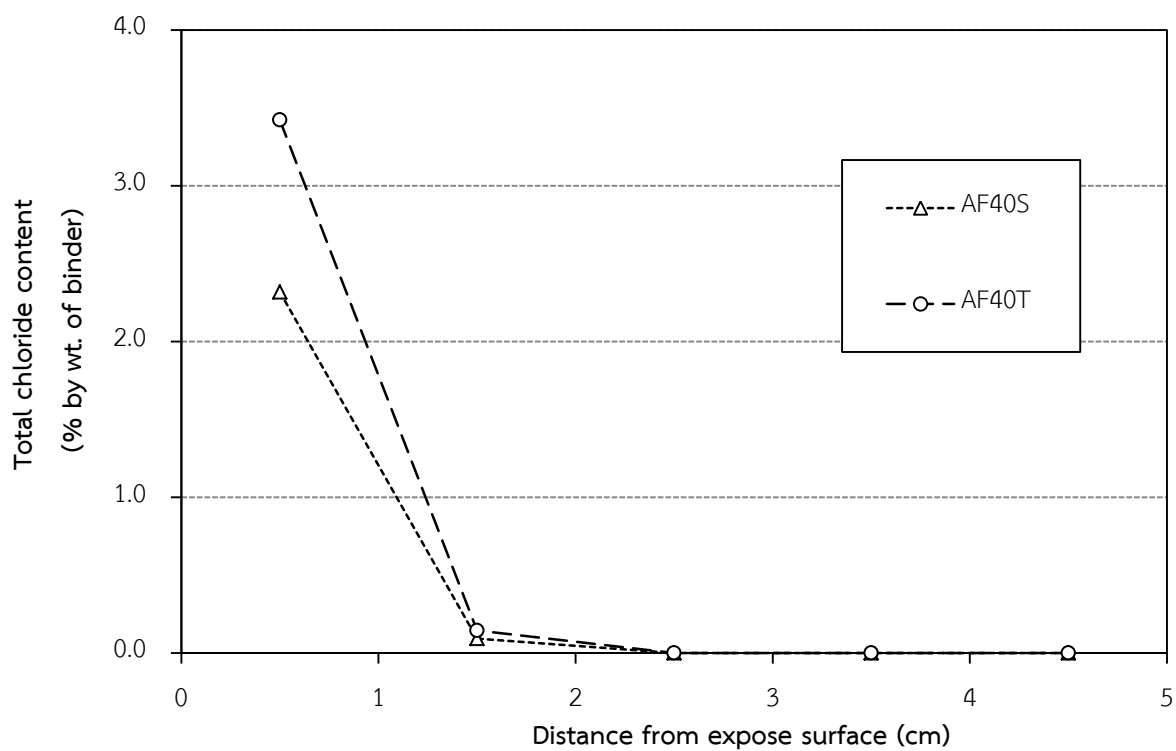
ค. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ภาพที่ 4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 30 มิลลิเมตร (ต่อ)

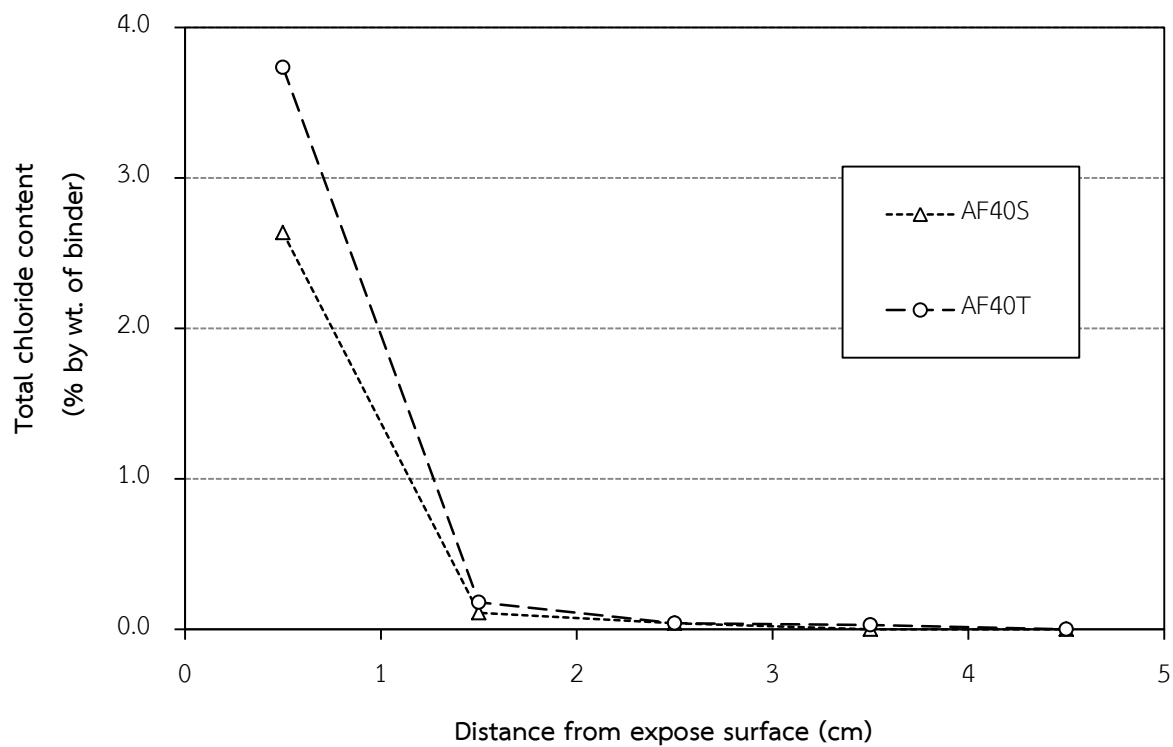


ก. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ภาพที่ 4.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 40 มิลลิเมตร

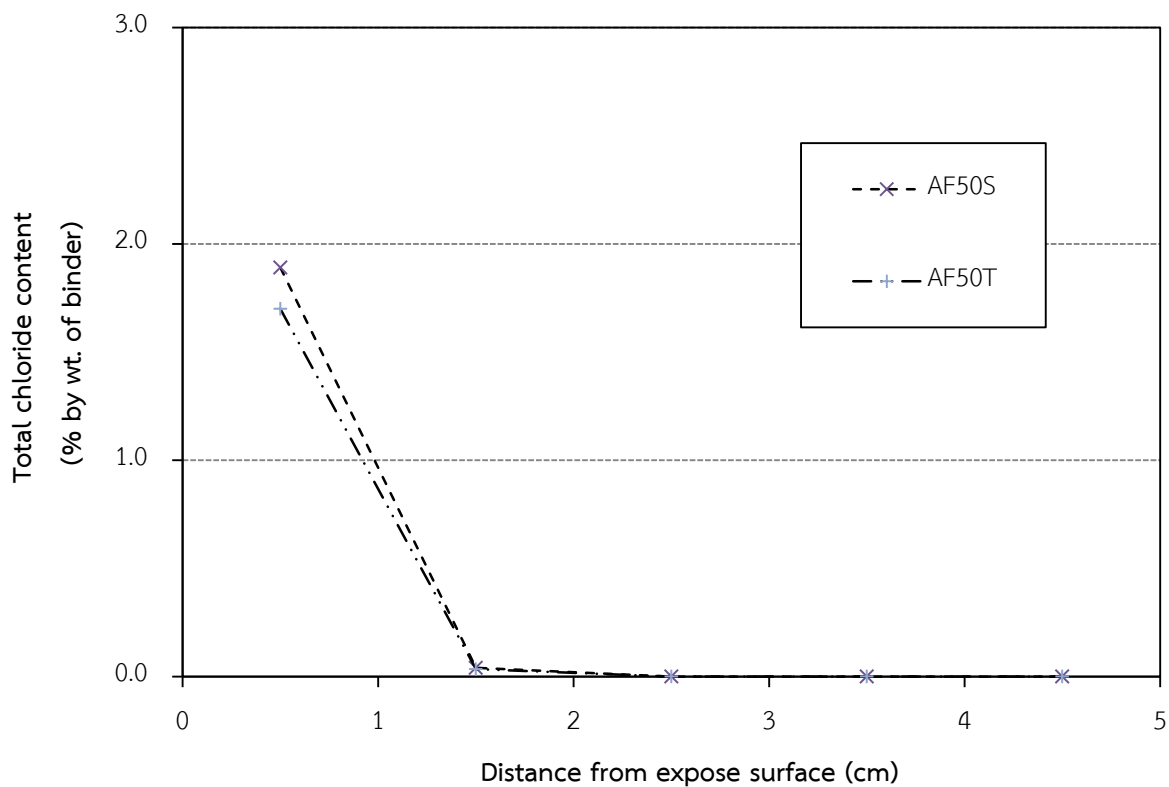


ข. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน

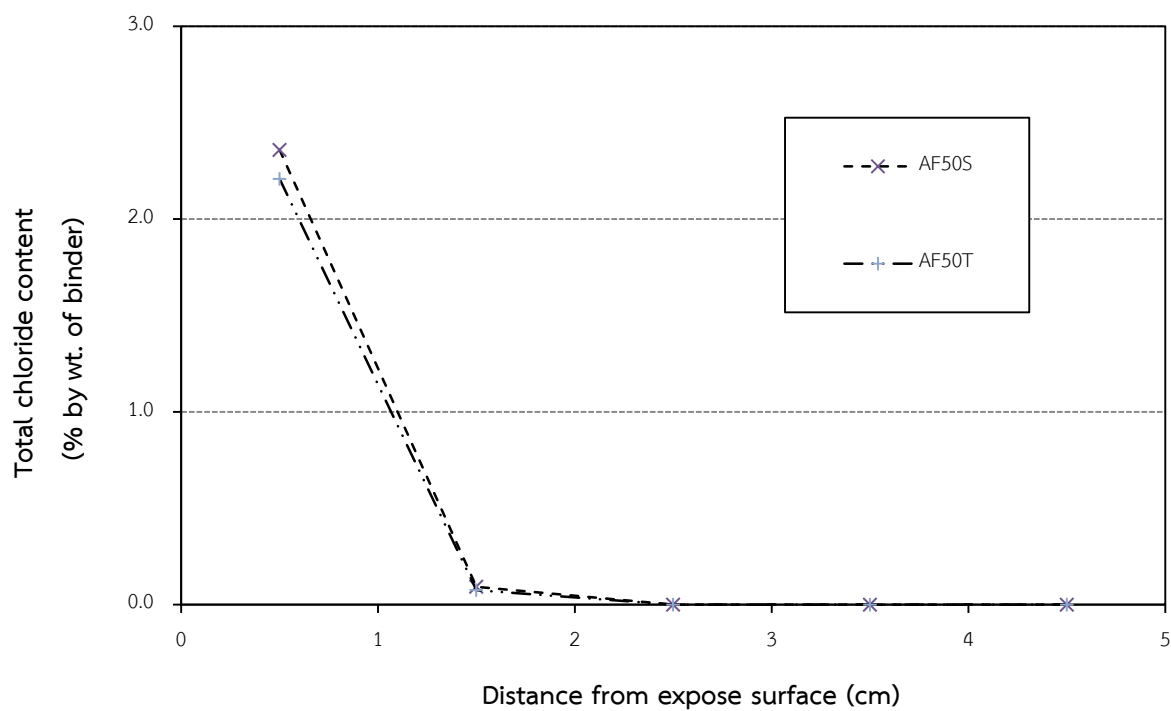


ค. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ภาพที่ 4.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 40 มิลลิเมตร (ต่อ)

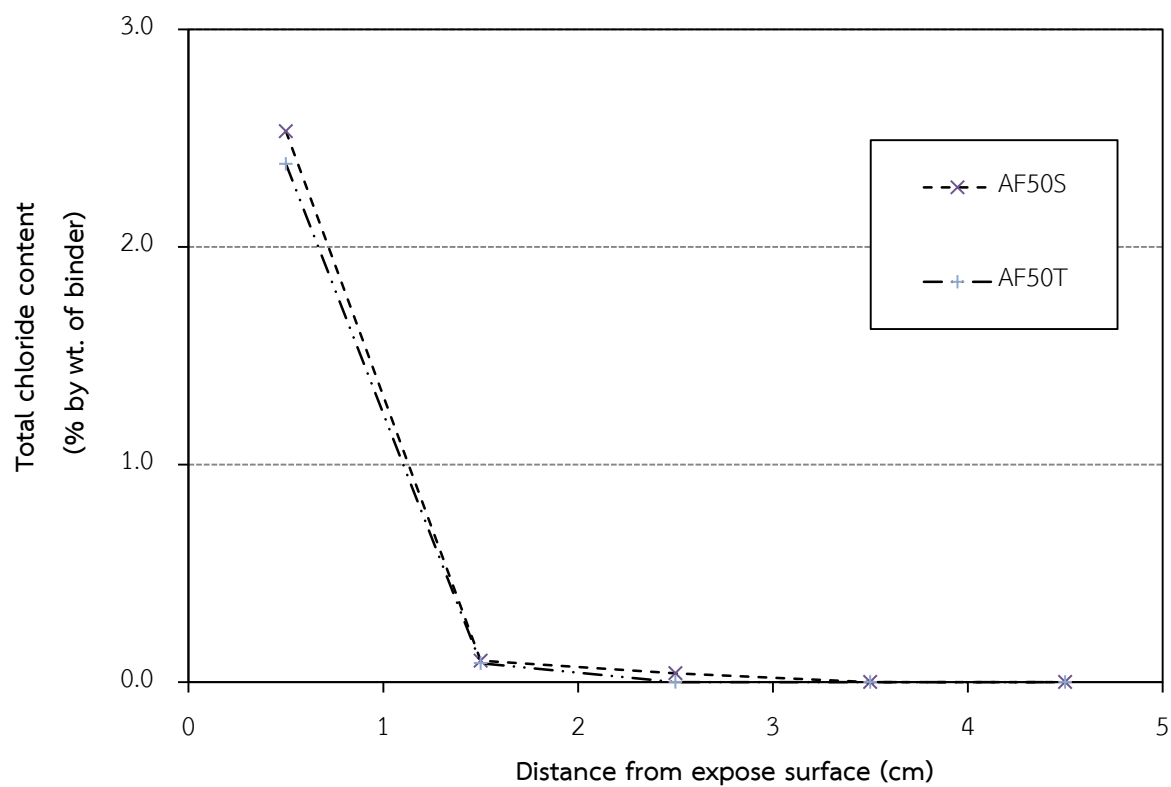


ก. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน



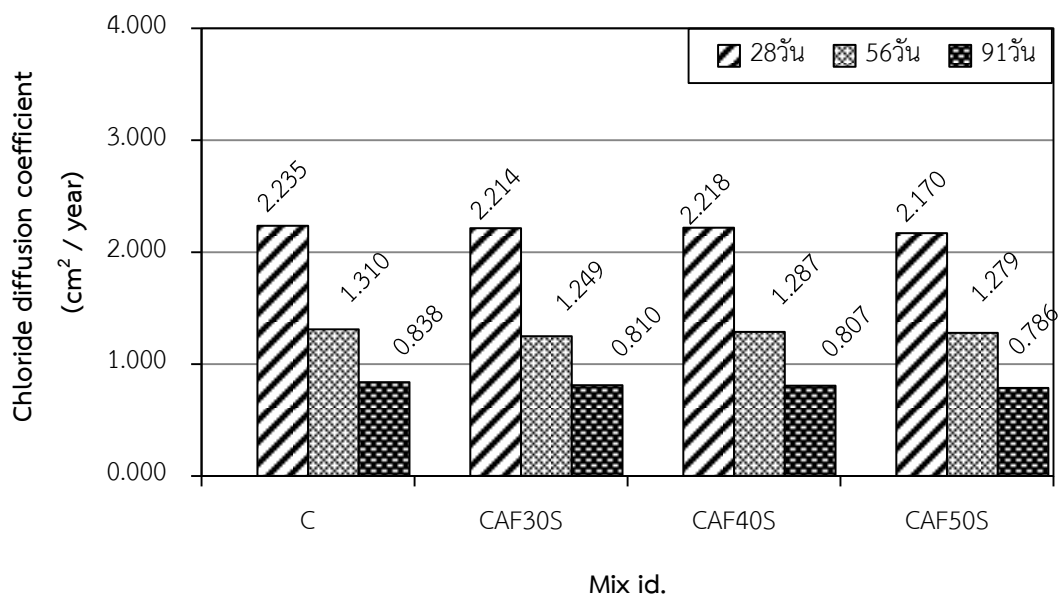
ข. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน

ภาพที่ 4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 50 มิลลิเมตร

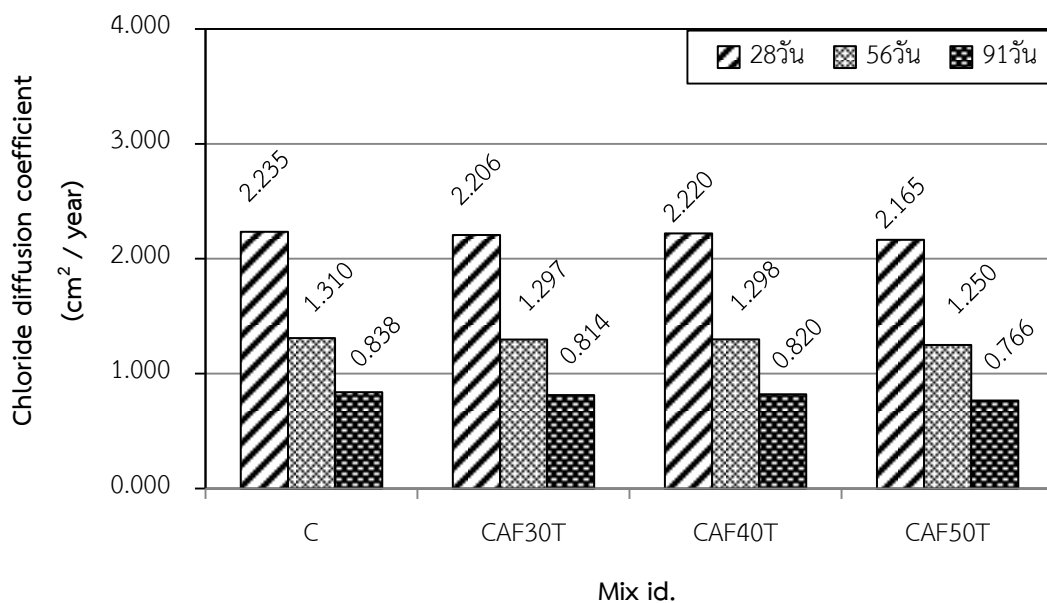


ค. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ภาพที่ 4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด ที่ความยาว 50 มิลลิเมตร (ต่อ)

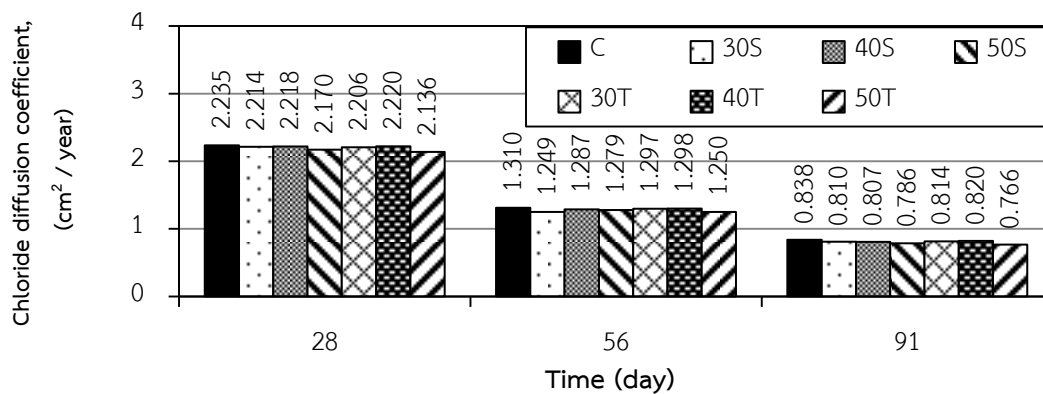


ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง

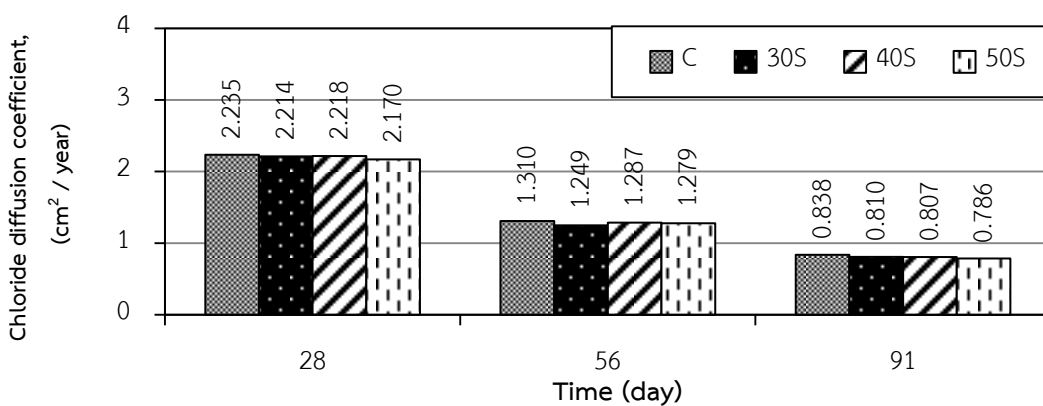


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว

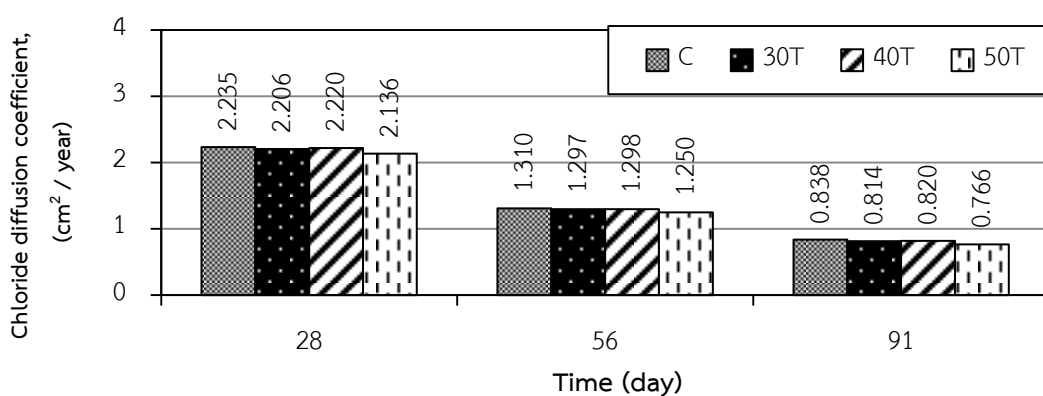
ภาพที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน



ก. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว

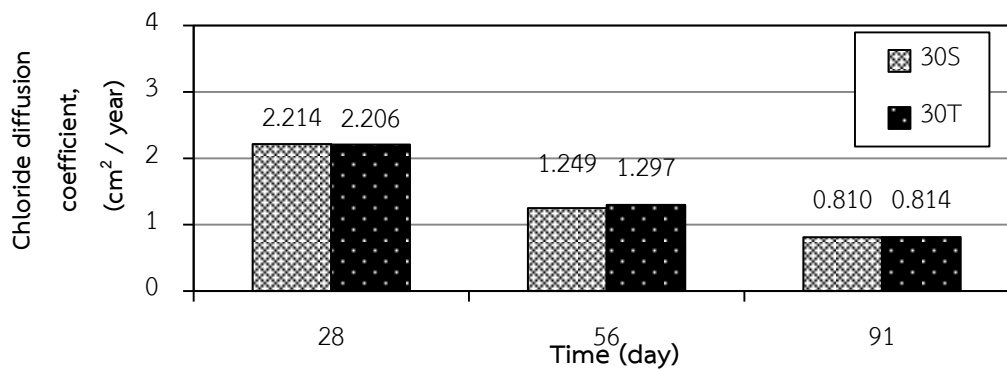


ข. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรง

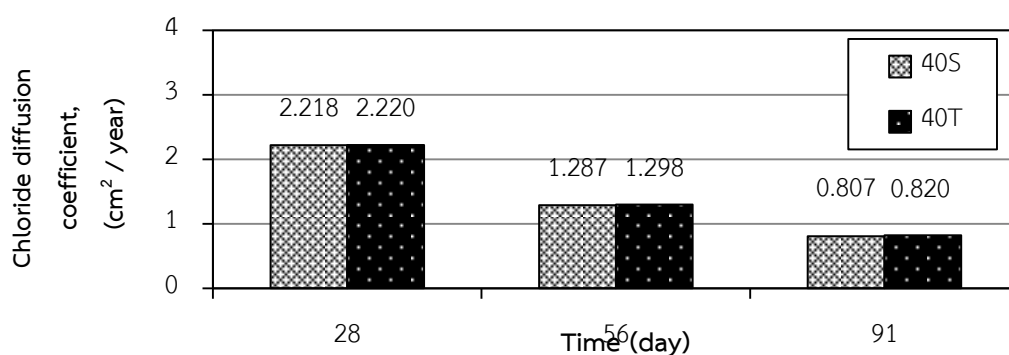


ค. ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียว

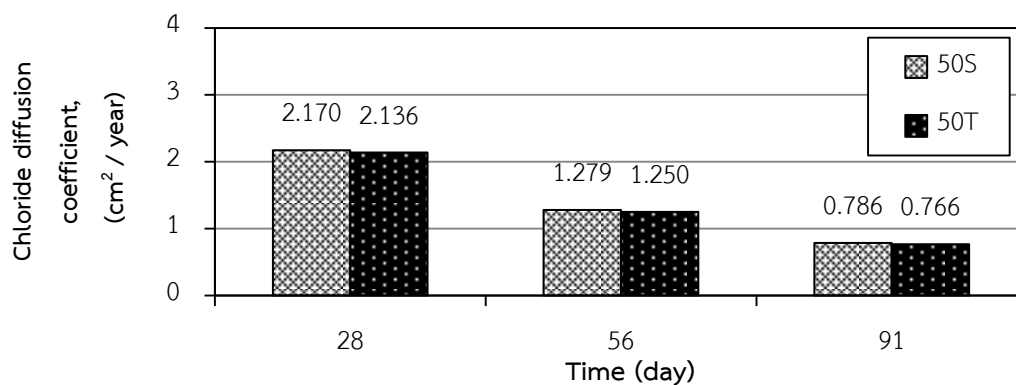
ภาพที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตยาว 30 มิลลิเมตร



ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตยาว 40 มิลลิเมตร



ค. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตยาว 50 มิลลิเมตร

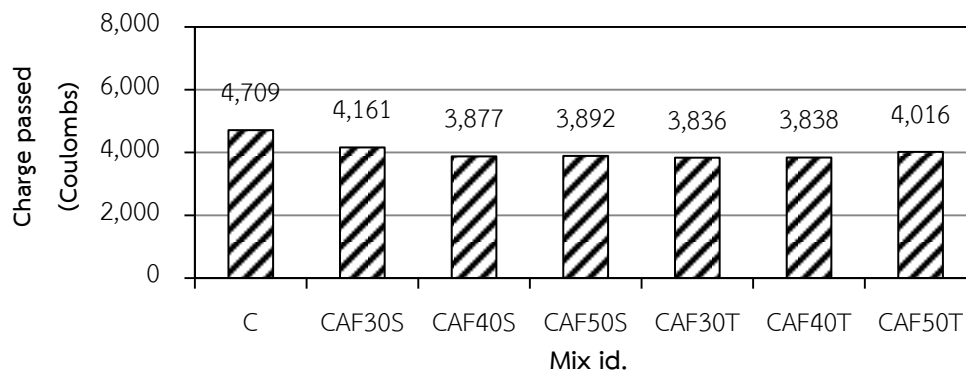
ภาพที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพั่นเกลียว ที่ บ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน

4.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

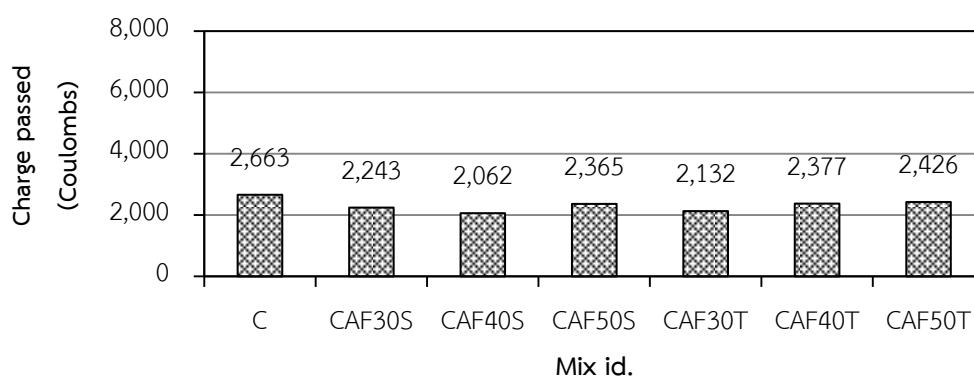
การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ของคอนกรีตแสดงด้วยค่ากราฟปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีต (Charge passed) ในหน่วยของ คูลอมบ์ (Coulombs) ซึ่งหากปริมาณของประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าต่ำ แสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทาน การแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี เนื่องจากออสอนของคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยาก

จากภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตล้วนมีค่าปริมาณประจุไฟฟ้า (Charge passed) สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต ล้วนมีการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิด พิจารณาระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมีค่า น้อยลงตามลำดับ นอกจากนี้ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีปริมาณประจุไฟฟ้า ไหลผ่านคอนกรีตใกล้เคียงกันในทุกส่วนผสม ในทางตรงกันข้าม ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน และ 91 วัน คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านมีความแตกต่างกันมากขึ้น

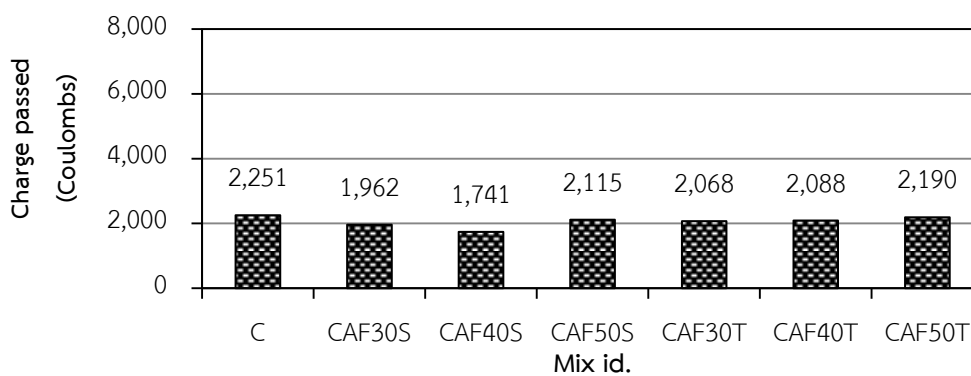
จากภาพที่ 4.11 พิจารณาที่ชนิดของเส้นใยที่มีความยาวเท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรา มิทแบบพันเกลียวมีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงเพียง เล็กน้อย ทำให้ทราบว่าชนิดของเส้นใยมีผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ ดังนั้นจากผลการทดสอบการแทรกซึม คลอไรด์แบบเร่งพบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงยาว 40 มิลลิเมตร มีค่าปริมาณของประจุ ไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด ทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด



ก.ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

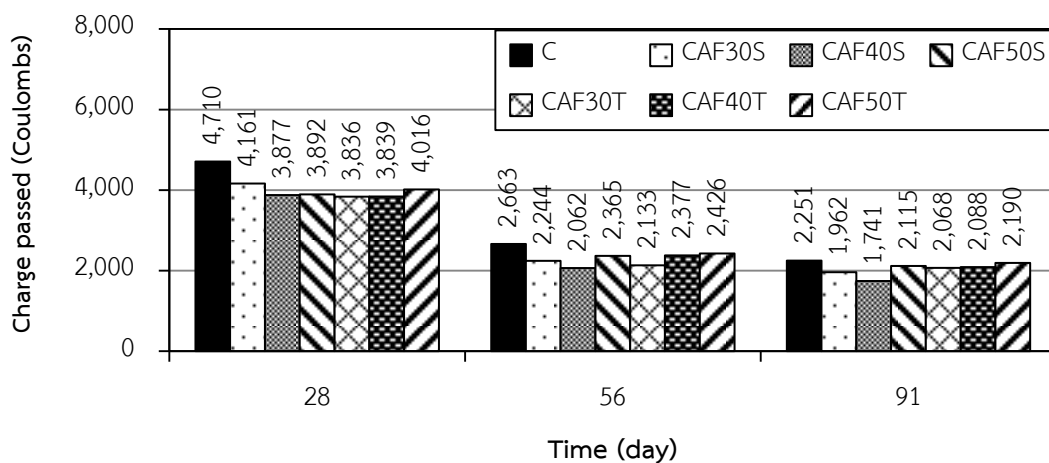


ข.ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน

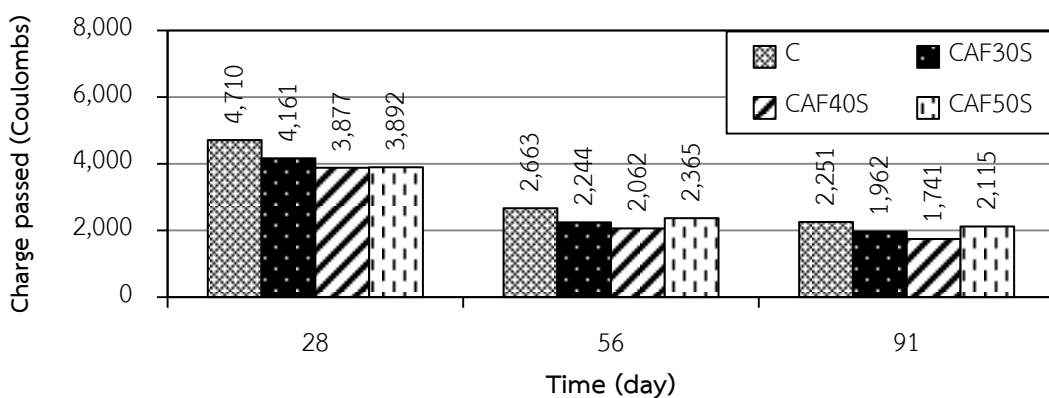


ค.ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

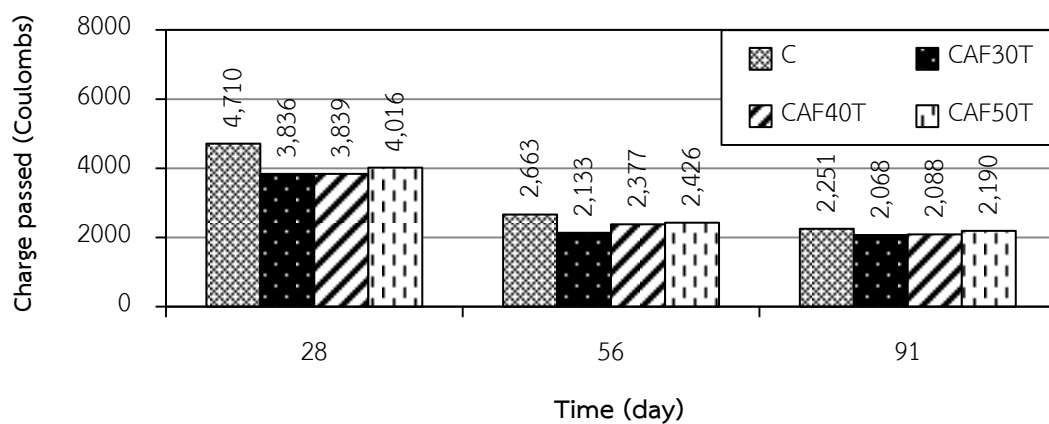
ภาพที่ 4.9 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว

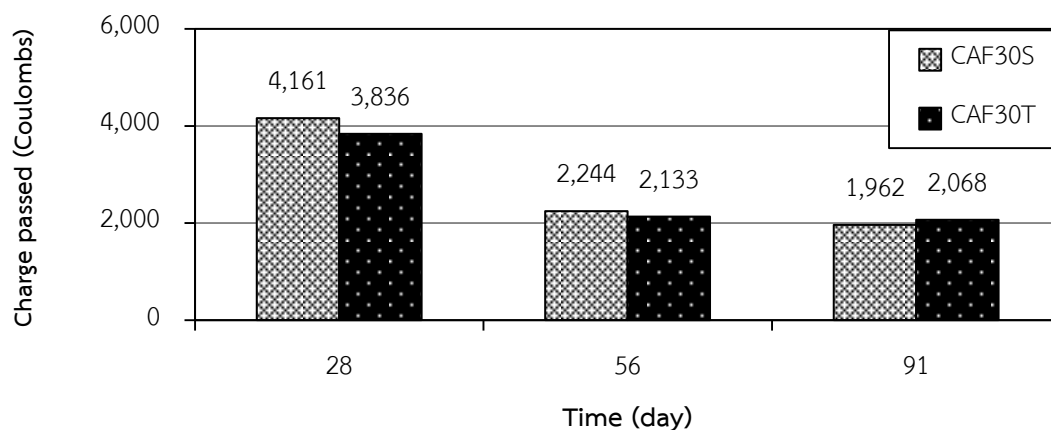


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง

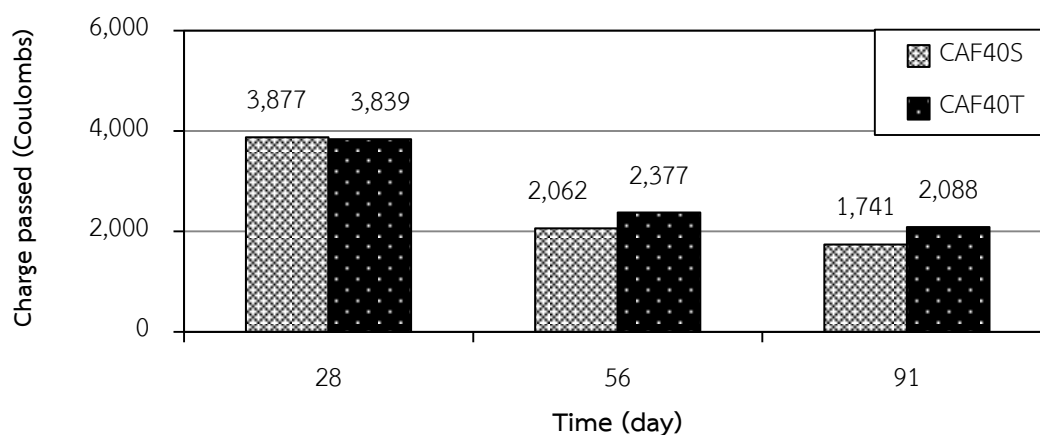


ค. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว

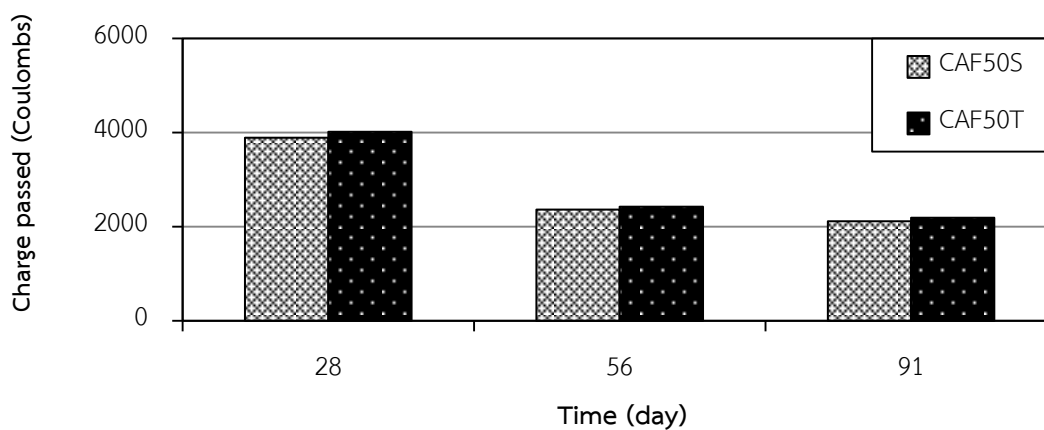
ภาพที่ 4.10 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลายบ่มนี้ 28, 56 และ 91 วัน



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 30 มิลลิเมตร



ข. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 40 มิลลิเมตร



ค. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 50 มิลลิเมตร

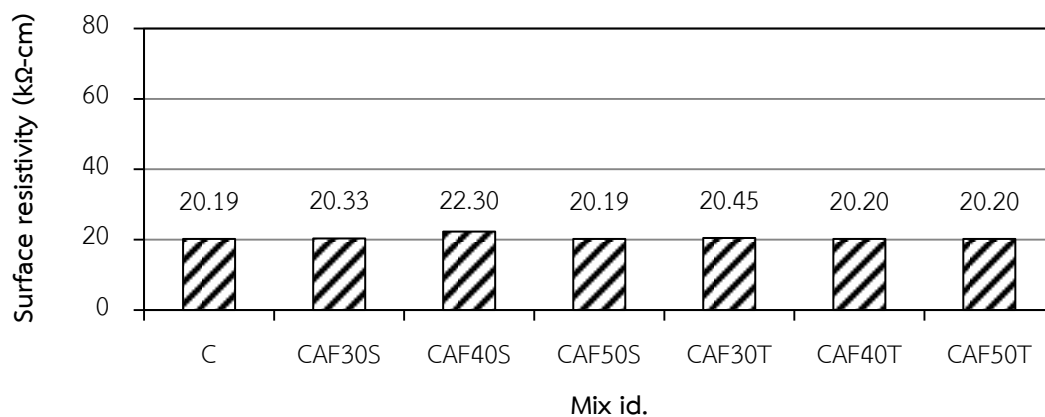
ภาพที่ 4.11 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน

4.3 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

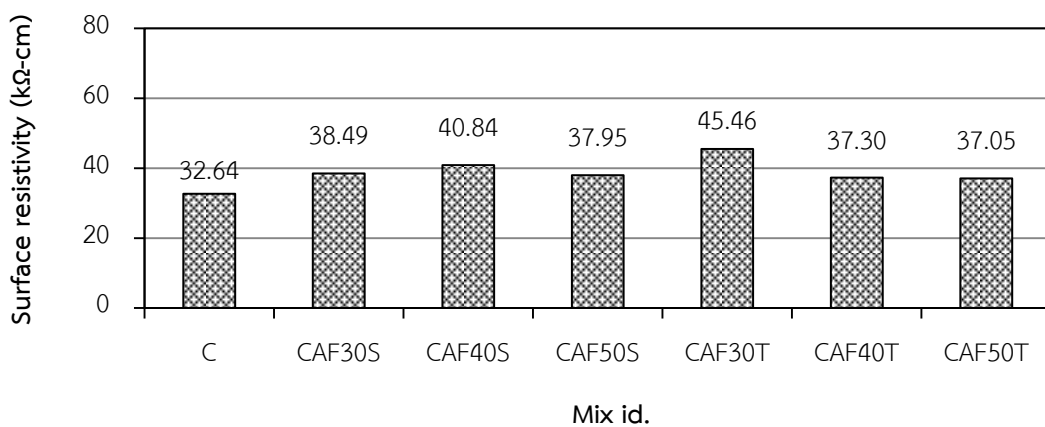
ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต แสดงให้เห็นว่าเมื่อคอนกรีตมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง จะทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อคอนกรีตมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ จะทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำตามด้วยเช่นกัน การตรวจสอบว่าความต้านทานไฟฟ้าส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีหรือไม่ สามารถเปรียบเทียบได้จากเกณฑ์พิจารณาตามมาตรฐาน AASHTO TP95 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

จากการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว (Surface electrical resistivity) การทดสอบการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด (Bulk electrical resistivity) จากภาพที่ 4-12 และภาพที่ 4-15 พบว่าตัวอย่างคอนกรีตมีค่าความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกันที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นที่ระยะเวลาบ่มน้ำเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.16 หากเปรียบเทียบที่ชนิดของเส้นใยที่มีความยาวเท่ากัน ดังภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงมีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียว

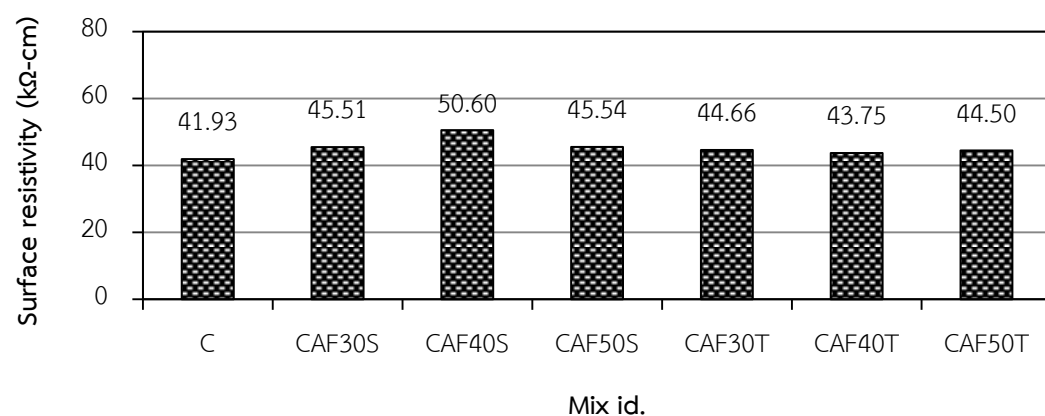
เมื่อเทียบกับมาตรฐานความต้านทานพื้นผิวคอนกรีตต่อการแทรกซึมคลอไรด์ตามมาตรฐาน AASHTO TP95 จึงได้ว่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน คลอไรด์แทรกซึมได้ต่ำ (Low) และคลอไรด์สามารถแทรกซึมได้ต่ำมาก (Very Low) กว่าที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน และ 91 วัน



ก.ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

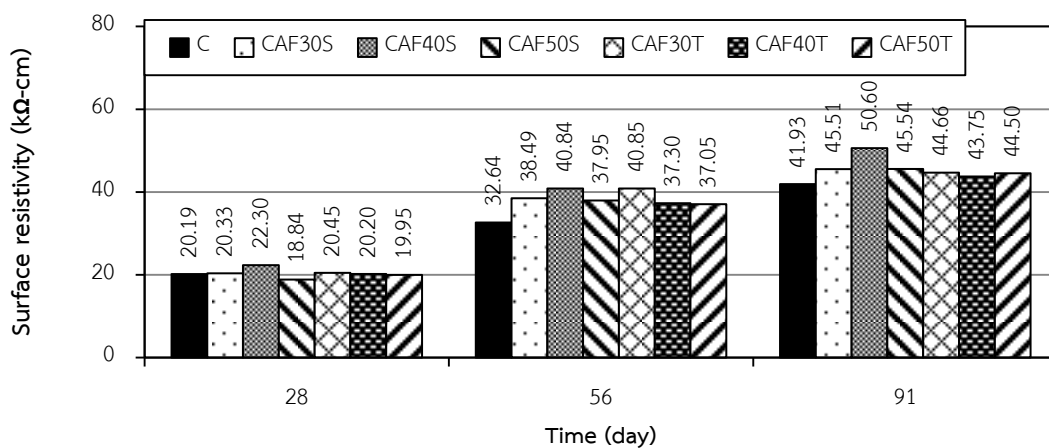


ข.ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน

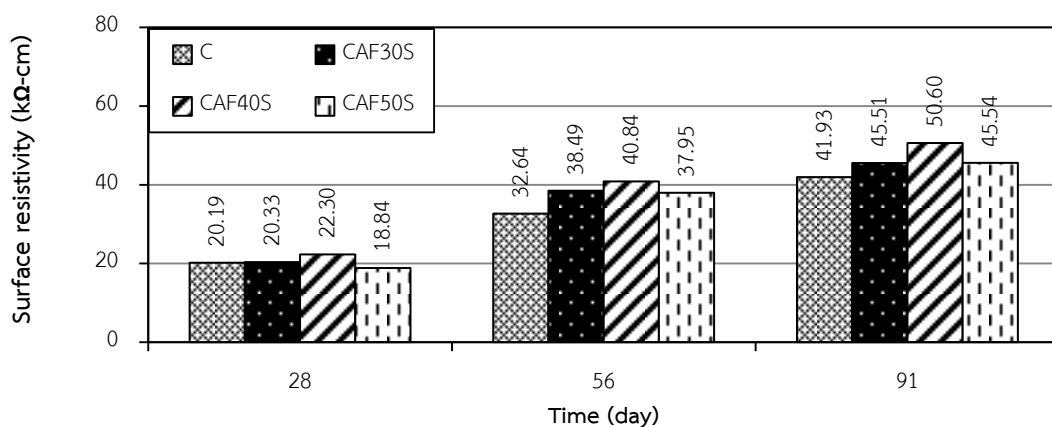


ค.ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

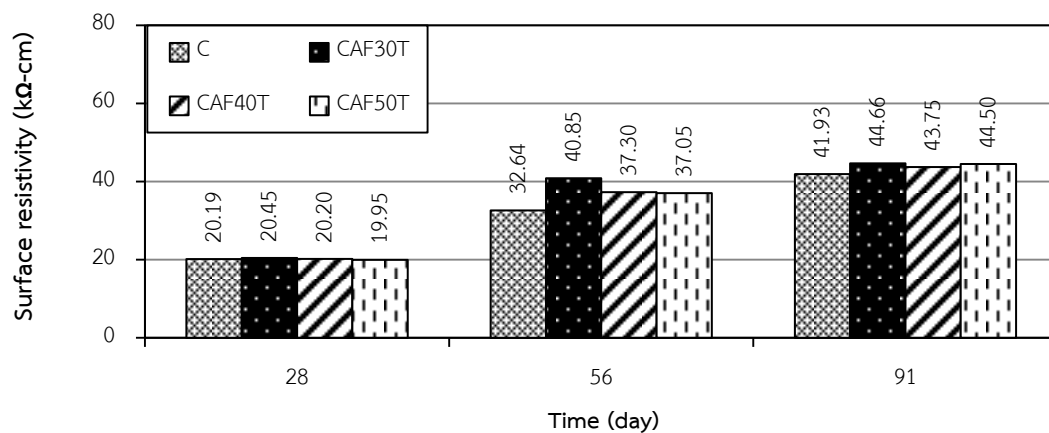
ภาพที่ 4.12 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว

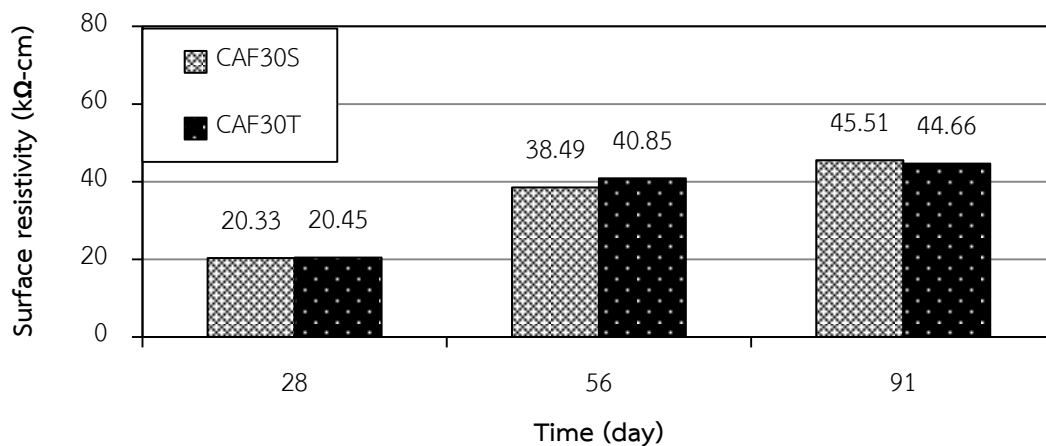


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง

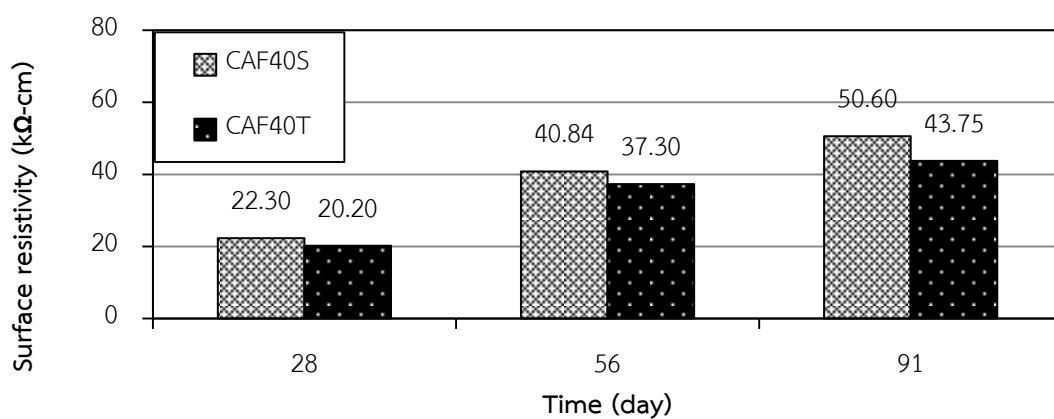


ค. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว

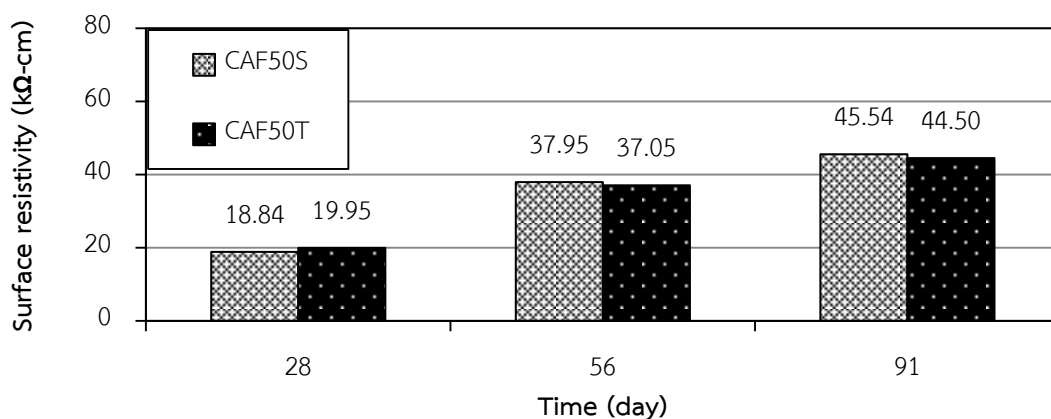
ภาพที่ 4.13 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 30 มิลลิเมตร

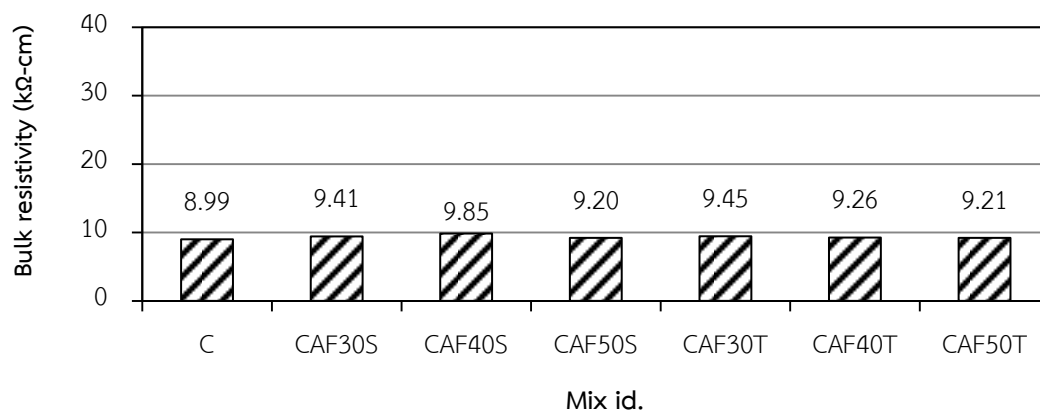


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 40 มิลลิเมตร

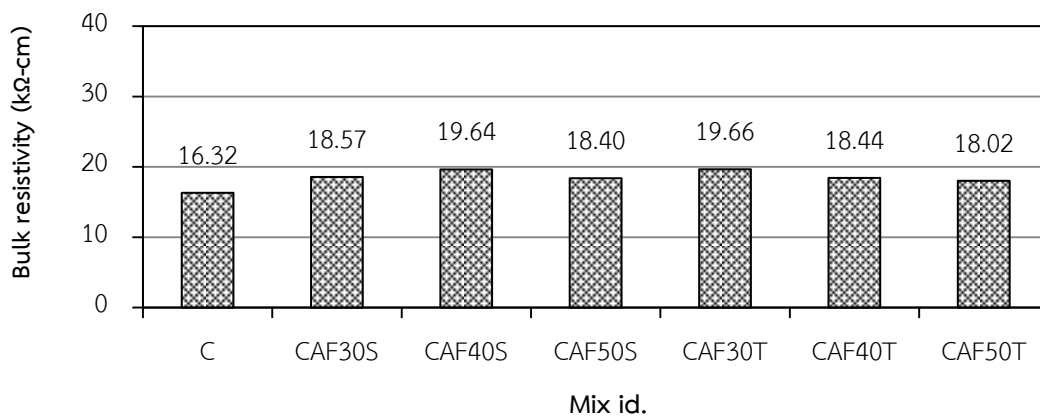


ค. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 50 มิลลิเมตร

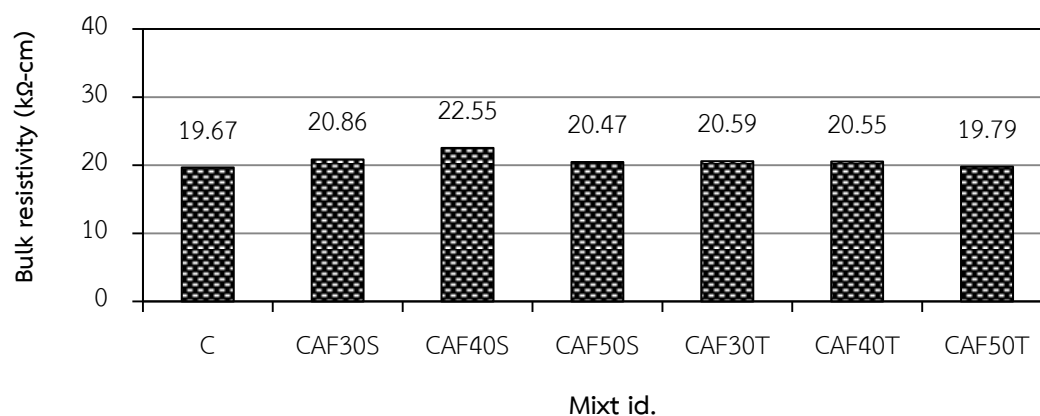
ภาพที่ 4.14 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน



ก.ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

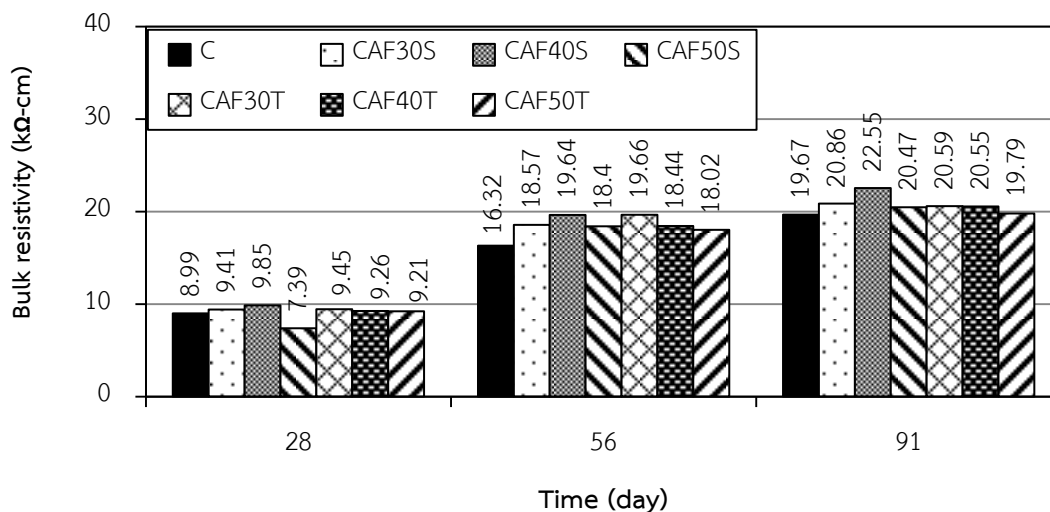


ข.ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน

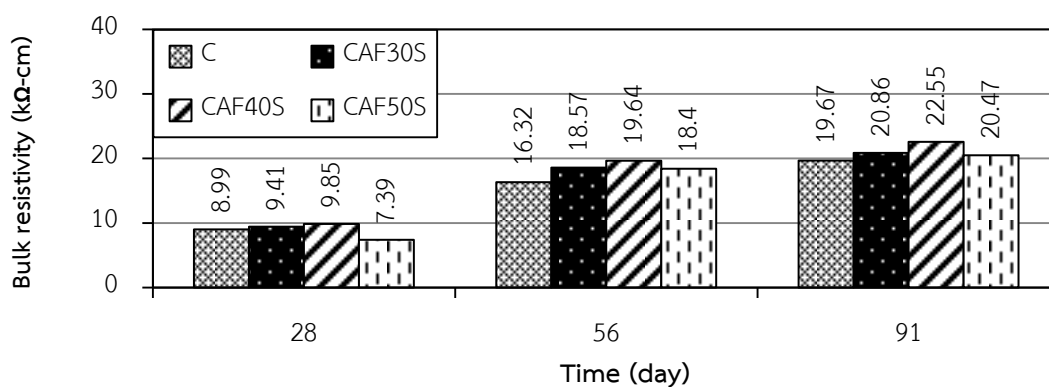


ค.ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

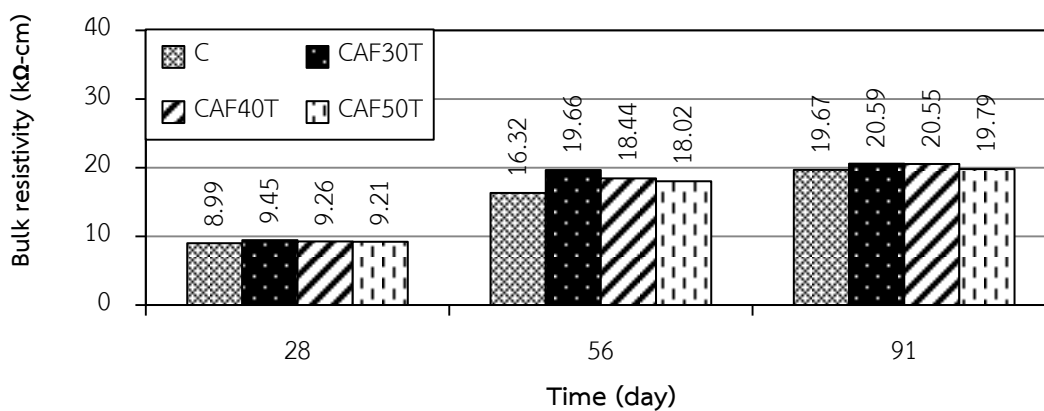
ภาพที่ 4.15 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว

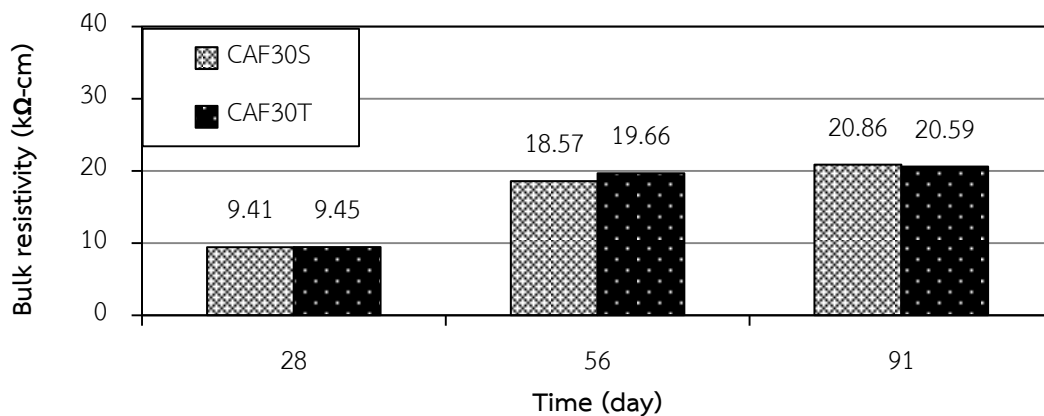


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง

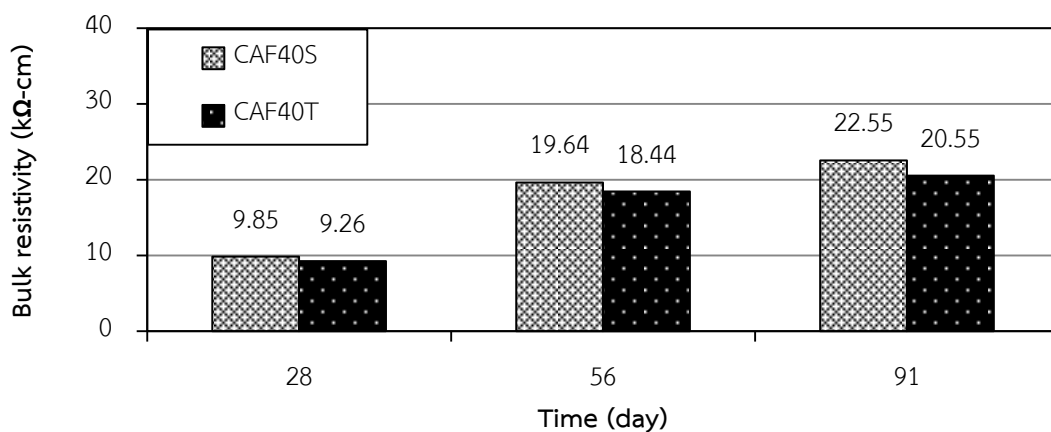


ค. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว

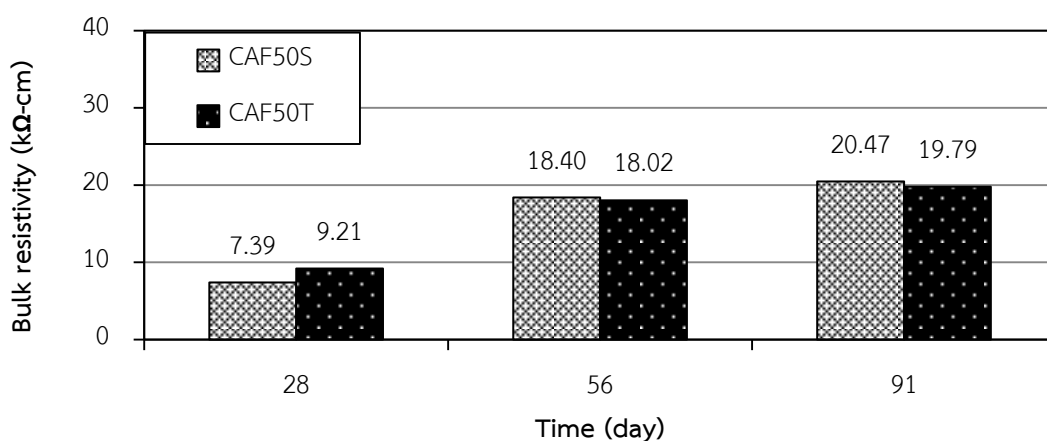
ภาพที่ 4.16 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของกรีตที่ระยะเวลายุ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 30 มิลลิเมตร



ข. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 40 มิลลิเมตร



ค. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 50 มิลลิเมตร

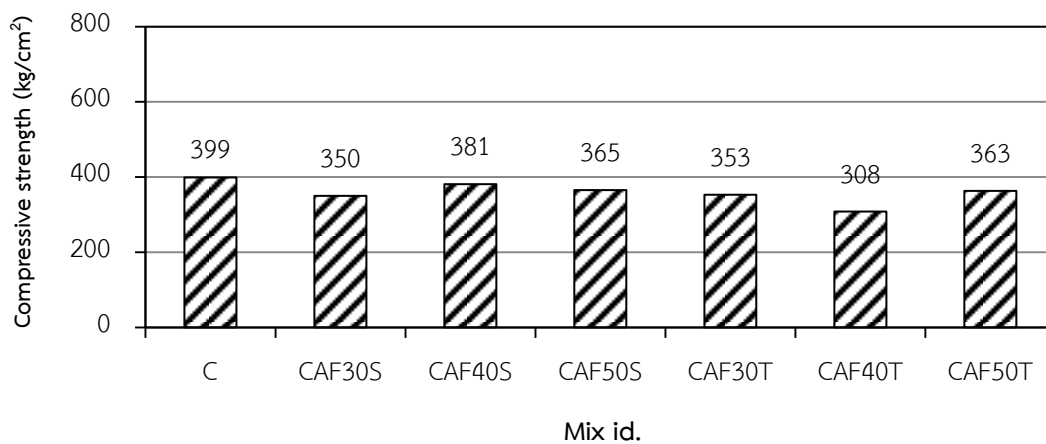
ภาพที่ 4.17 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน

4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

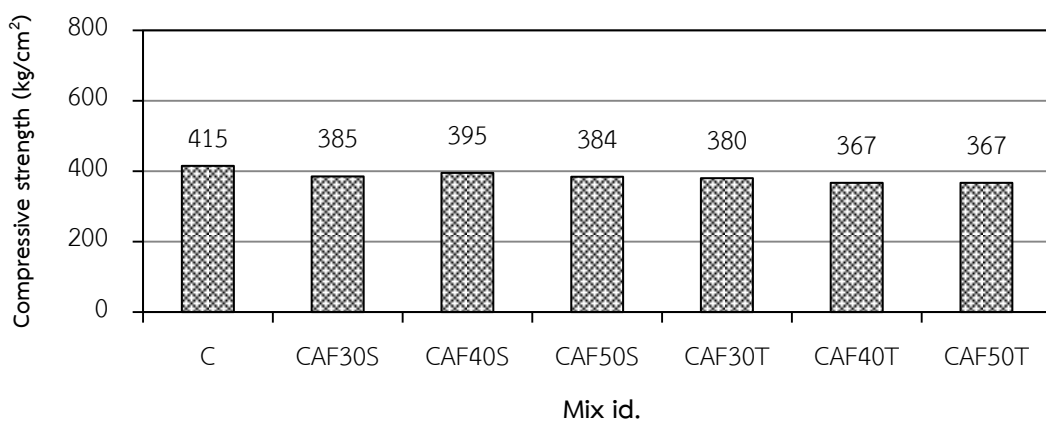
กำลังอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตแสดงให้เห็นในกราฟกำลังอัดของคอนกรีตในหน่วย kg/cm^2 โดยทดสอบคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 12390

จากภาพที่ 4.28 เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีตล้วน พบว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลายบ่มน้ำเพิ่มมากขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น เมื่อพิจารณาตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลายบ่ม 28 วัน และ 56 วัน คอนกรีตล้วนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิต แต่ในทางกลับกันคอนกรีตที่ระยะเวลายบ่ม 91 วัน คอนกรีตล้วนมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิต

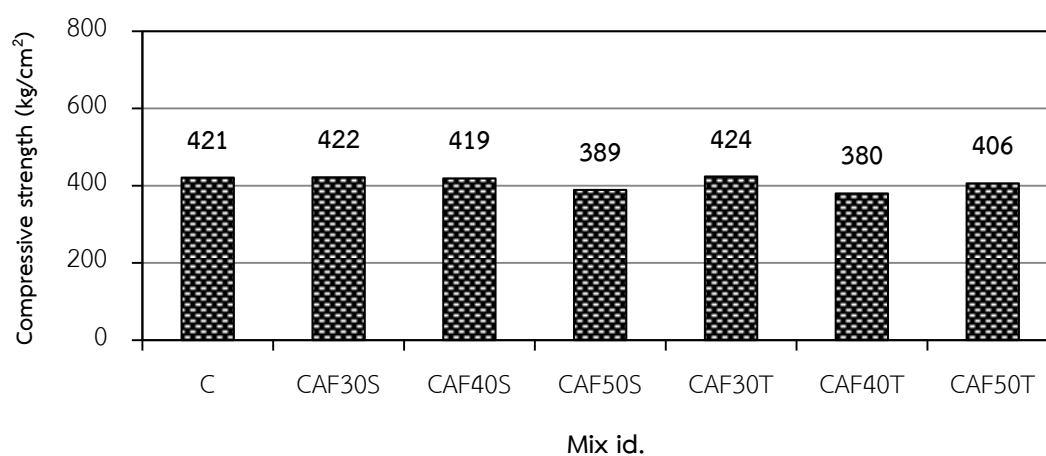
จากภาพที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตที่ความยาวแตกต่างกันไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใยที่ความยาวเท่ากัน คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียวมีค่าใกล้เคียงกัน จากภาพที่ 4.20 พบว่า เส้นใยอะรามิตไม่ได้มีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากเส้นใยอะรามิตมีการจับตัวเป็นก้อนกับมวลรวม ทำให้เกิดการแยกตัวของซีเมนต์กับมวลรวม คอนกรีตจึงมีความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำลง โดยการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยอะรามิตเกิดขึ้นระหว่างการกระบวนการผสมคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับบทที่ 2 ข้อที่ 2.3.1 ภาพที่ 2.4 จากผลการวิจัยของ Curosu et al. (2016)



ก.ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

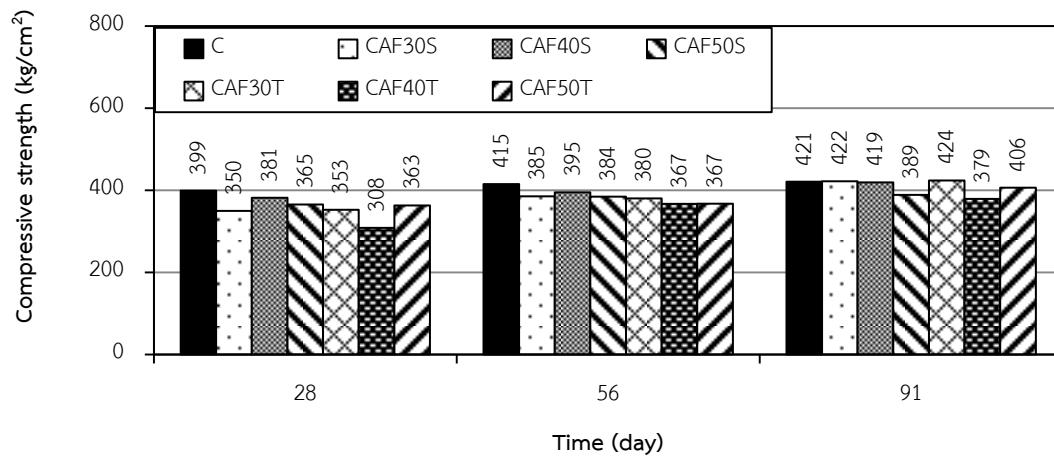


ข.ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน

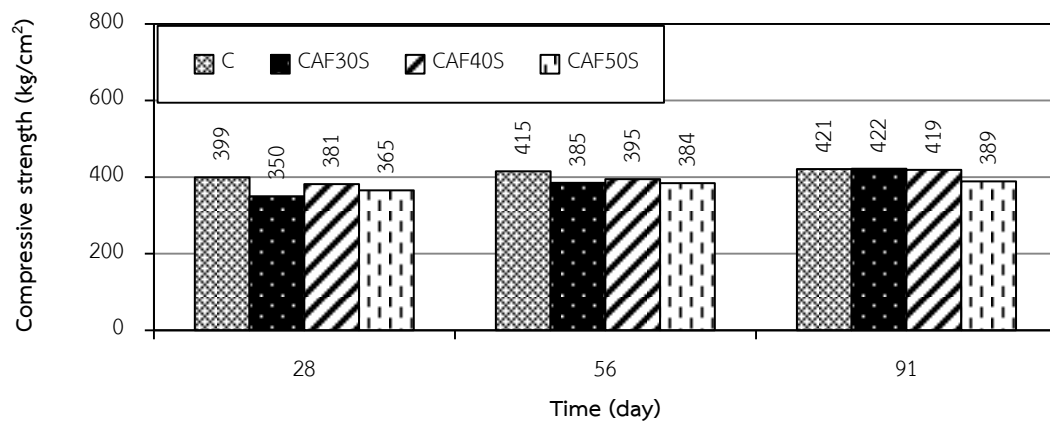


ค.ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

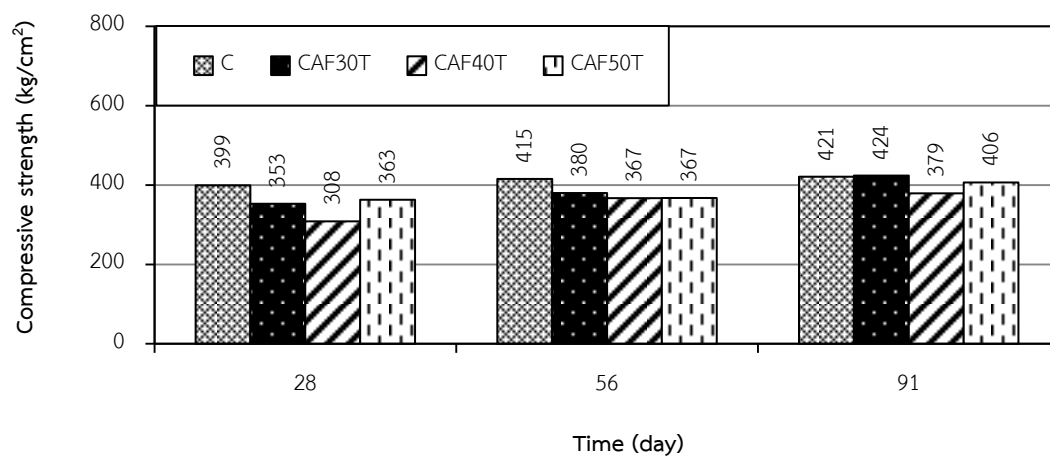
ภาพที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีต



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว

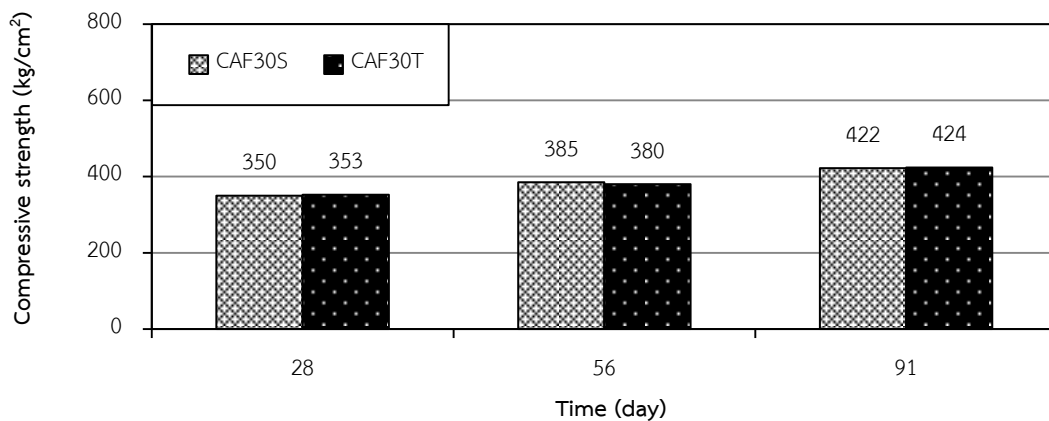


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง

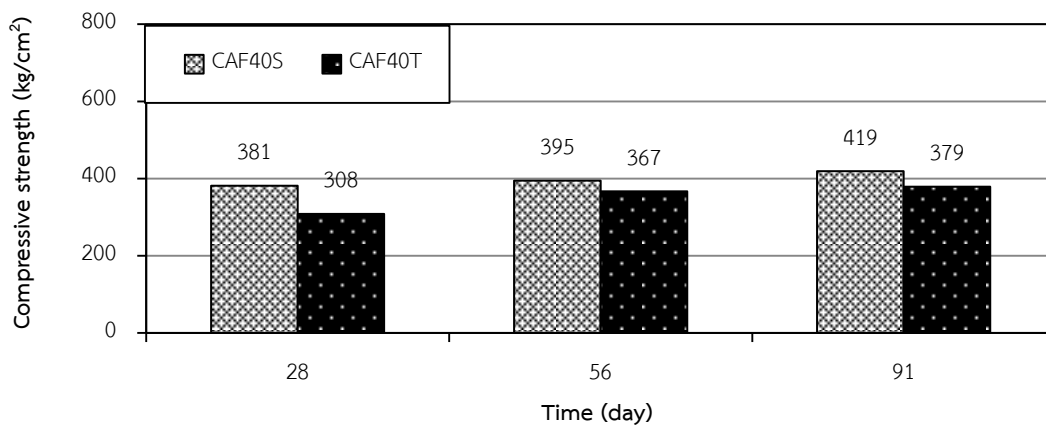


ค. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว

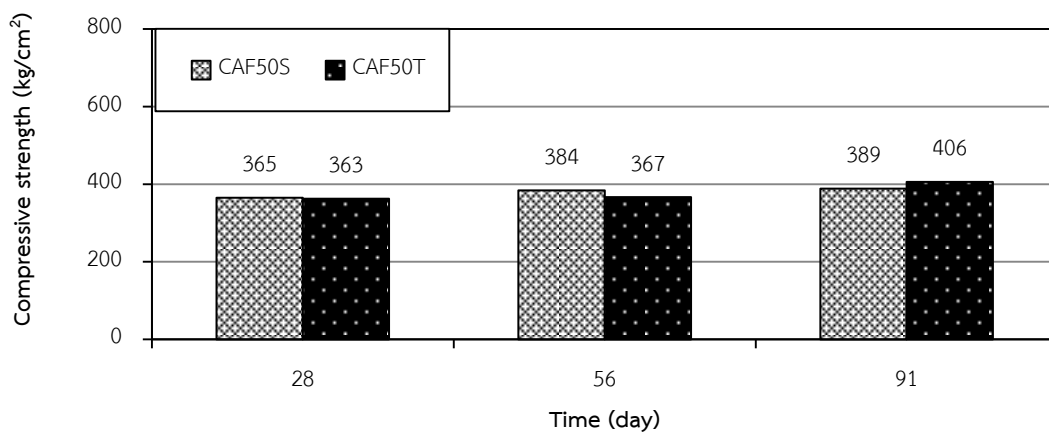
ภาพที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 30 มิลลิเมตร



ข. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 40 มิลลิเมตร



ค. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 50 มิลลิเมตร

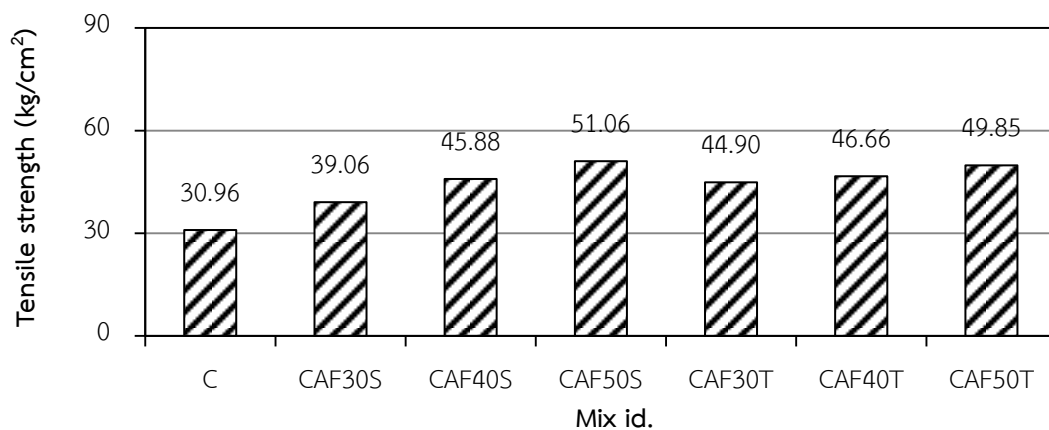
ภาพที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน

4.5 กำลังดึงของคอนกรีต

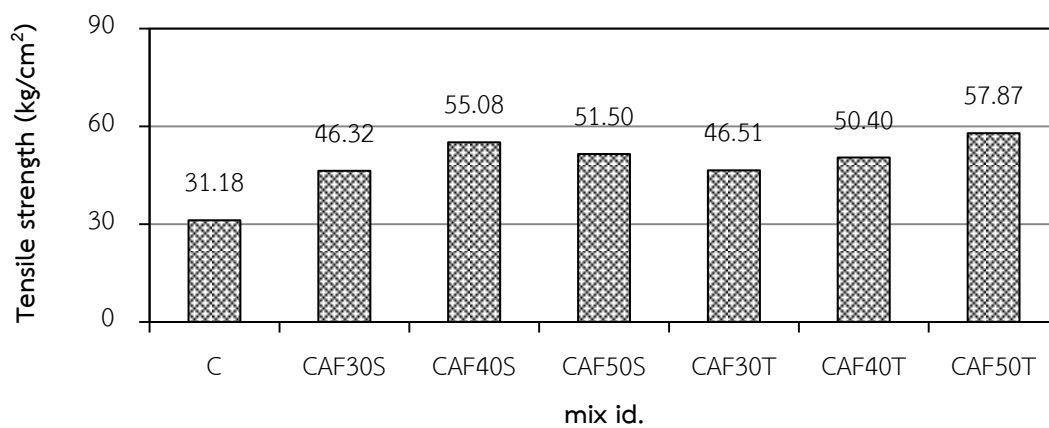
กำลังดึง (Tensile strength) ของคอนกรีตแสดงให้เห็นในกราฟกำลังดึงของคอนกรีตในหน่วย kg/cm^2 โดยทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ด้วยวิธีการ ผ่าชีกตามมาตรฐาน ASTM C496

จากภาพที่ 4.21 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีกำลังดึงมากกว่าคอนกรีตล้วนที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำพบว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำมากขึ้นส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย

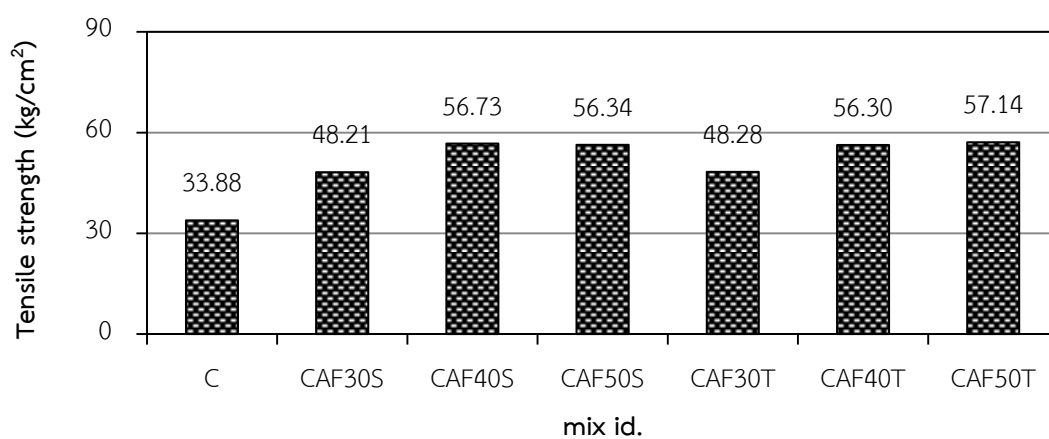
จากภาพที่ 4.22 และ ภาพที่ 4.23 เมื่อพิจารณาที่ความยาวเส้นใยอะรามิดพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดที่มีความยาวของเส้นใยอะรามิดยาวขึ้นส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตมากขึ้นตามไปด้วย การพิจารณาที่ชนิดของเส้นใยอะรามิดพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียวมีกำลังดึงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบตรง จึงสรุปได้ว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแบบพันเกลียวที่มีความยาว 50 มิลลิเมตรมีกำลังดึงมากที่สุด



ก. ระยะเวลารบ่มน้ำ 28 วัน

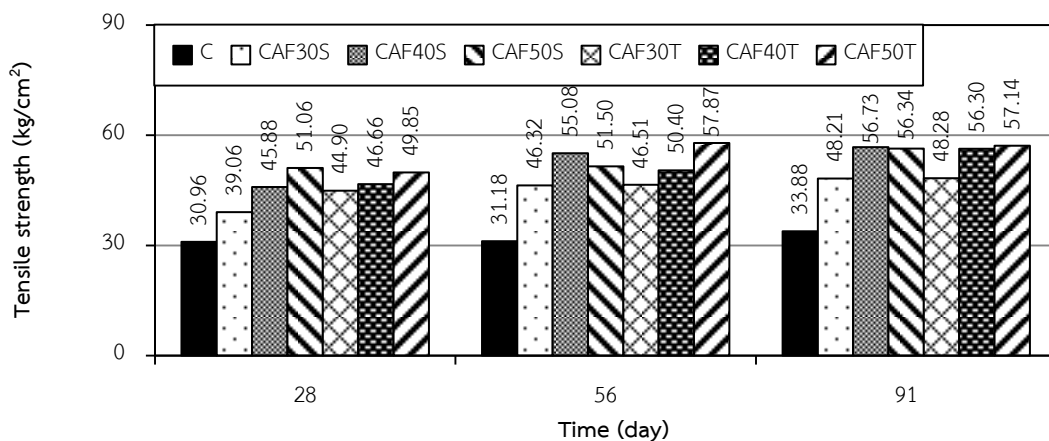


ข. ระยะเวลารบ่มน้ำ 56 วัน

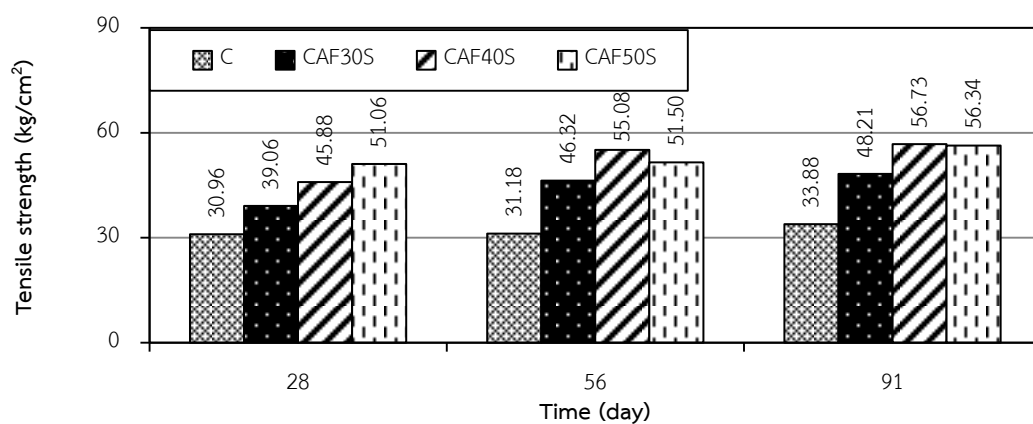


ค. ระยะเวลารบ่มน้ำ 91 วัน

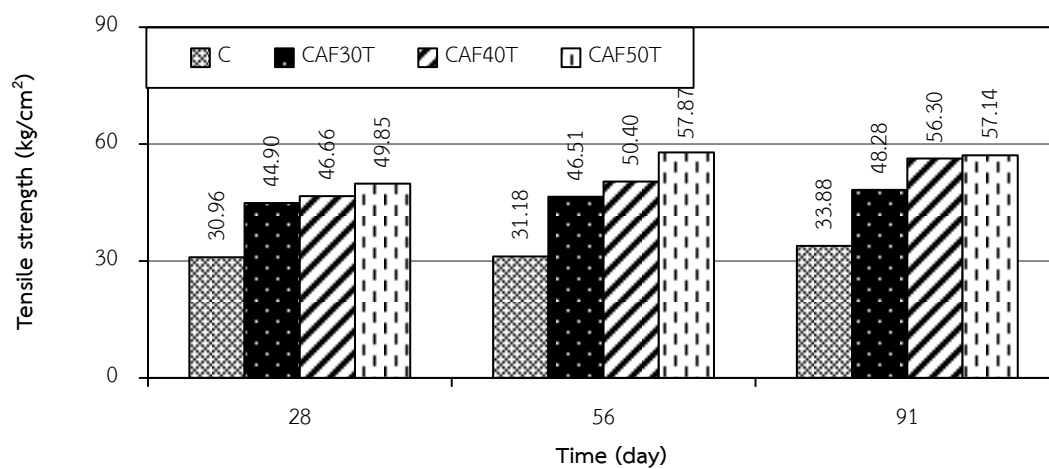
ภาพที่ 4.21 กำลังดึงของคอนกรีต



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว

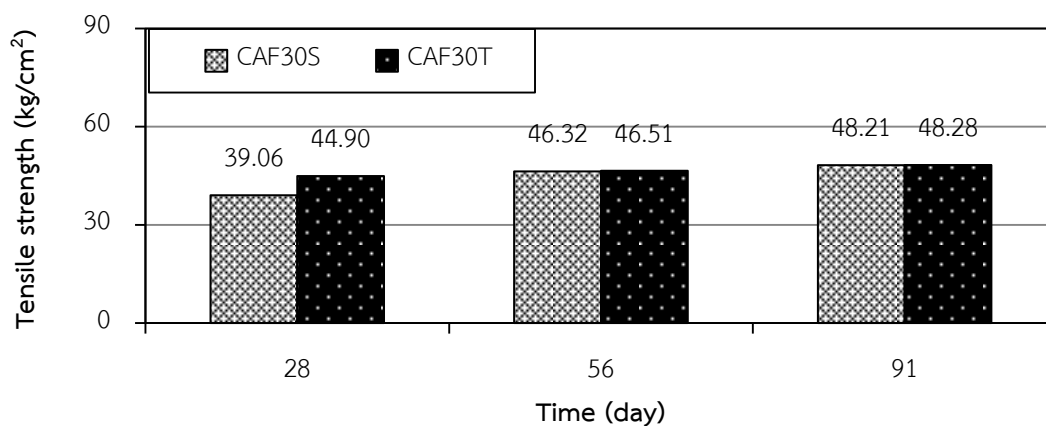


ข. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรง

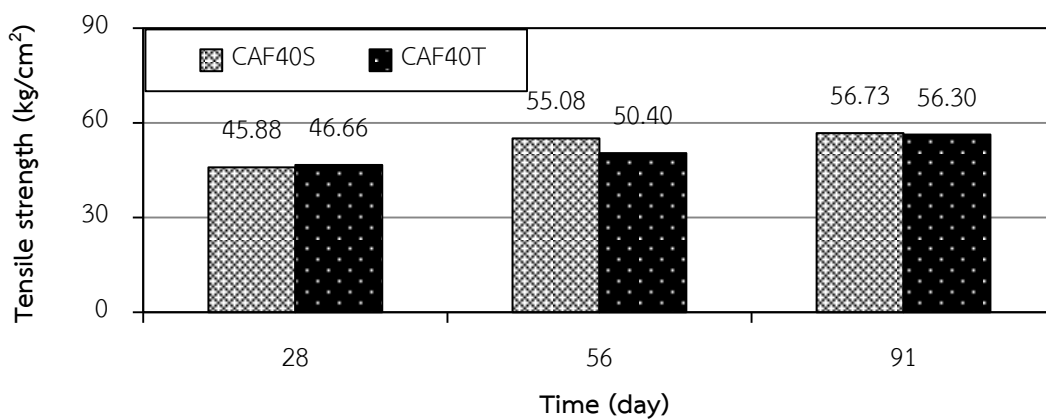


ค. คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบพันเกลียว

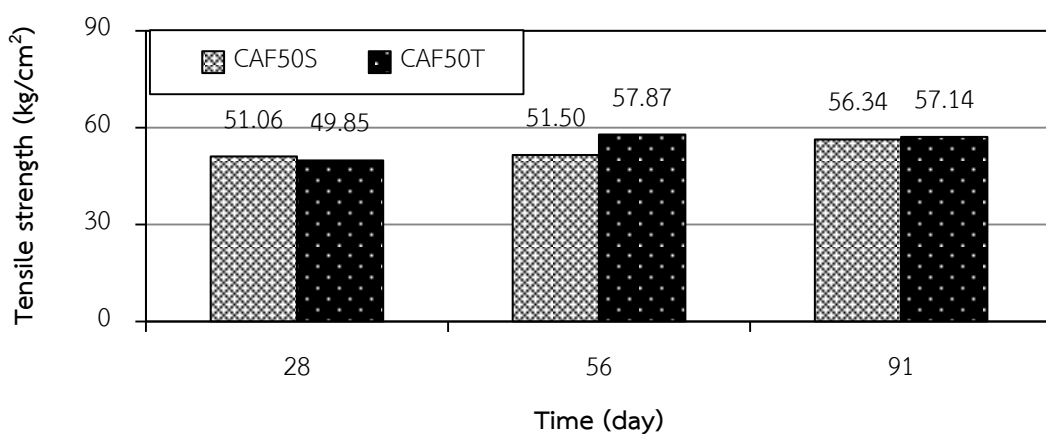
ภาพที่ 4.22 กำลังดึงของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน



ก. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 30 มิลลิเมตร



ข. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 40 มิลลิเมตร



ค. คอนกรีตผสมเส้นใยยาว 50 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.23 กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิตแบบเส้นตรงและแบบพันเกลียว ที่ระยะเวลายบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1.คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตล้วน (แตกต่างกันไม่เกิน 5%) ที่ความยาวเส้นใยและชนิดเส้นใยต่างๆ
- 2.คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิต มีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านต่ำกว่าคอนกรีตล้วน กล่าวคือมีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำ ทุกระยะเวลาบ่มน้ำ เมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้นทำให้การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำลง ขึ้น คอนกรีตที่ใช้เส้นใยอะรามิต 40S มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำ ที่สุดทุกระยะเวลาบ่มน้ำ
- 3.คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตล้วน แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำที่ 56 และ 91 วัน คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตมีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากกว่าคอนกรีตล้วนเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตที่ใช้เส้นใยอะรามิต 40S มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากที่สุด
4. คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วนเล็กน้อยในทุกระยะเวลาบ่มน้ำ
- 5.คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตมีกำลังดึงมากกว่าคอนกรีตล้วน และการใช้ความยาวของเส้นใยอะรามิตที่ยาวขึ้นทำให้กำลังดึงของคอนกรีตสูงขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้เส้นใยอะรามิต 50T มีกำลังดึงมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตอยู่ที่ระยะความลึก 1-2 เซนติเมตร เป็นส่วนใหญ่ จึงควรเพิ่มให้คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน
2. เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตมีค่าใกล้เคียงกัน จึงควรศึกษาผลของโครงสร้างโพรงช่องว่าง (Pore structure) ภายในเนื้อคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิตด้วย g เพื่อหาเหตุผลอธิบายการทดลองต่อไป

บรรณานุกรม

สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2560, จาก file:///C:/Users/User/Downloads/Fulltext%233_251476.pdf

ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion

ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete.

Annual book of ASTM standard, American society for testing and materials, 2000

ASTM C1218, Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete.

Annual Book of ASTM Standard.

ASTM C1202, Standard test method for electrical Indication of concrete's ability to resist chloridelon penetration.

ASTM C1760, Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete

AASHTO TP 95, Standard test method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.

ASTM C496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.

BS EN 12390, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.

C. G. Berrocal, K. Lundgren, I. Löfgren.(2016).“Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art”.Cement and Concrete Research, 80, pp. 69-85.

G. Derombise, L. V. V. Schoors, P. Davies.(2009).“Degradation of Technora aramid fibres in alkaline and neutral environments”.Polymer Degradation and Stability, 94, pp. 1615–1620.

I. Curosu, M. Liebscher, V. Mechtcherine, C. Bellmann, S. Michel.(2017).“Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO Fibers”.Cement and Concrete Research, 98, pp. 71-81.