



ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิด
CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE, ELECTRICAL RESISTIVITY AND MECHANICAL
PROPERTIES OF CONCRETE WITH ARAMID FIBER

มานัส พัดจันทร์หอม¹ และ ทวีชัย สำราญวานิช^{2*}

¹มหาบัณฑิต ²รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

*Corresponding author, E Mail: twc@buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของเส้นใยอะรามิดต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยในการศึกษาใช้เส้นใยอะรามิดที่มีรูปร่างต่างกันสองชนิดคือ ชนิดเส้นตรงและชนิดพันเกลียว และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันสามค่าคือ 60, 80 และ 100 โดยทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ความต้านทานไฟฟ้า กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยผสมปริมาณเส้นใย 1% โดยปริมาตรคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใย คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดมีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย สำหรับคุณสมบัติเชิงกลพบว่า การผสมเส้นใยอะรามิดในคอนกรีตไม่ได้ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ช่วยเพิ่มกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตอย่างมาก นอกจากนี้การผสมเส้นใยยังช่วยปรับปรุงรูปแบบความเสียหายของตัวอย่างคอนกรีตให้มีความเหนียวมากขึ้น

คำสำคัญ: เส้นใยอะรามิด; คอนกรีต; ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์; ความต้านทานไฟฟ้า; สมบัติเชิงกล

ABSTRACT

This paper aims to study the effect of aramid fiber on chloride penetration resistance, electrical resistivity and mechanical properties of concrete. The study used aramid fibers with two different shapes of straight and twisted, and three aspect ratios of 60, 80 and 100. Bulk chloride diffusion, rapid chloride penetration, electrical resistivity, compressive strength and tensile strength of concrete were investigated. Water to binder was kept at 0.55, and the fiber content of 1% by volume of concrete was applied. From the experimental results, it was found that aramid fiber reinforced concrete (AFRC) had higher bulk chloride diffusion resistance and rapid chloride penetration resistance than controlled concrete without fiber. AFRC had higher both surface and bulk electrical resistivities than no-fiber concrete. The use of aramid fiber in concrete did not significantly affect the compressive strength for mechanical properties, but it greatly increased the splitting tensile strength of concrete. Besides, the presence of fibers improves damage patterns of concrete specimens to be more ductile.

KEYWORDS: Aramid Fiber; Concrete; Chloride Penetration Resistance; Electrical Resistivity; Mechanical Properties

Manus Patchanhom¹ and Taweechai Sumranwanich^{2*}

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

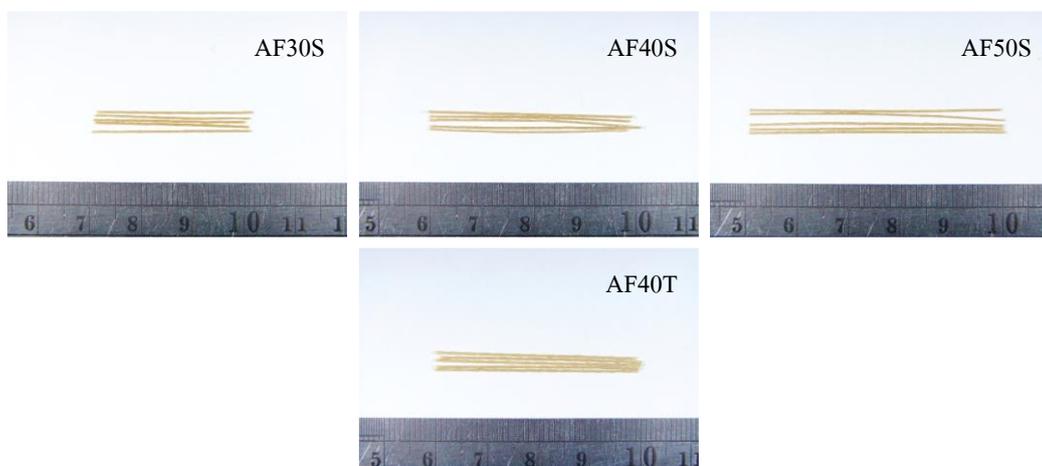
1. บทนำ

จากการศึกษาด้านวัสดุคอนกรีตที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงโดยการผสมเส้นใยสั้น ๆ และไม่ต่อเนื่องในคอนกรีตช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น กำลังดึง และกำลังคด [1, 2] นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการเสียดรูป ความต้านทานการแตกร้าวและความคงทนของคอนกรีต [3, 4] โดยคอนกรีตเสริมเส้นใยถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในโครงสร้างวิศวกรรมโยธา เช่น งานพื้น งานอุโมงค์ เป็นต้น [5] ซึ่งรูปร่างและขนาดต่าง ๆ ของเส้นใยอาจทำมาจากวัสดุได้หลายชนิด เช่น เหล็ก แก้ว วัสดุสังเคราะห์หรือวัสดุธรรมชาติ อย่างไรก็ตามแม้เส้นใยที่ใช้งานอาจผลิตมาจากวัสดุหลากหลายแต่เส้นใยเหล็กถือเป็นเส้นใยที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุด [5, 6] แต่การใช้เส้นใยเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ชายฝั่งทะเล อาจส่งผลให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา เช่น การเกิดสนิมของเส้นใยเหล็ก และการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) ซึ่งมีความเสี่ยงทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสั้นลง [7] ในปัจจุบันเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) เป็นที่สนใจในการนำมาใช้ในโครงสร้างคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากสามารถเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเส้นใยเหล็กและไม่เกิดสนิม นอกจากนี้เส้นใยสังเคราะห์ยังมีประสิทธิภาพในการควบคุมรอยแตกร้าวและลดการซึมผ่านของน้ำที่อาจมีส่วนประกอบของคลอไรด์ ซัลเฟต ซึ่งล้วนเป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมและเนื้อคอนกรีตทำให้เสื่อมสภาพและทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสียหายส่งผลทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสั้นลง [8, 9] ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ต่อคุณสมบัติด้านความคงทนต่อคลอไรด์และคุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญของคอนกรีตไปด้วยกัน

2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแฉะลอกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะชั้นคุณภาพ C เป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมหยาบคือหินปูนซึ่งมีขนาดโตสุด 19 มม. และใช้ทรายบดเป็นมวลรวมละเอียด เส้นใยที่ใช้คือเส้นใยอะรามิดซึ่งมีสองชนิดและสามความยาว โดยรูปร่างและลักษณะของเส้นใยแสดงในรูปที่ 1 ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยแสดงในตารางที่ 1 คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55 และใช้แฉะลอบแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณเส้นใยอะรามิด 1% โดยปริมาตรของคอนกรีต ทั้งนี้รายละเอียดของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 รูปร่างและลักษณะเส้นใยอะรามิดที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยอะรามิด

Aramid fiber type	AF30S	AF40S	AF50S	AF40T
Length (mm)	30	40	50	40
Diameter (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5
Length/diameter	60	80	100	80
Density (g/cm ³)	1.39	1.39	1.39	1.39
Tensile strength (MPa)	3,430	3,430	3,430	3,430
Modulus of elasticity (MPa)	72,500	72,500	72,500	72,500
Shape	Straight	Straight	Straight	Twisted

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

No.	Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m ³)						
			Binder		Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)	Fiber (1% by Vol.)	
			Cement	Fly ash (30%)				Type	Quantity
1	CF	0.55	240	103	189	776	1,025	-	-
2	CFAF30S	0.55	240	103	189	776	1,025	AF30S	13.8
3	CFAF40S	0.55	240	103	189	776	1,025	AF40S	13.8
4	CFAF50S	0.55	240	103	189	776	1,025	AF50S	13.8
5	CFAF40T	0.55	240	103	189	776	1,025	AF40T	13.8

หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ส่วนผสมคอนกรีต มีดังนี้

CF คือ คอนกรีตผสมเถ้าลอย

CFAFxxS คือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิด (AF) ความยาว xx มิลลิเมตร ชนิดเส้นตรง (Straight, S)

CFAFxxT คือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและเส้นใยอะรามิด (AF) ความยาว xx มิลลิเมตร ชนิดพันเกลียว (Twisted, T)

2.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

2.2.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. บ่มตัวอย่างในน้ำจืดครบ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างไปเคลือบสีฟ็อกซ์ทุกด้านยกเว้นไว้ด้านเดียวตามมาตรฐาน ASTM C1556 [10] แล้วนำไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลาอีก 28, 56 และ 91 วัน เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างขึ้นมาตัดเป็นชั้นแต่ละชั้นมีความหนา 1 ซม. โดยตัดทั้งหมด 5 ชั้น แล้วนำไปบดเป็นผงและนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แล้วนำผงที่ได้มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่อง Potentiometric titration เพื่อหาค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1152 [11] ของแต่ละชั้นตามความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีต และนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่อไปตามสมการที่ 1

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

โดยที่ $C(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าทีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ t (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ($\text{cm}^2/\text{ปี}$), x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (cm), t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

2.2.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เมื่อครบอายุบ่มที่ 28, 56 และ 91 วัน ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 [12] โดยนำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกมาตัดออกเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีความหนา 5 ซม. จากนั้นนำตัวอย่างที่ตัดมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ เดิมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% ในช่องเดิมสารละลายขั้วลบและเดิมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ในช่องเดิมสารละลายขั้วบวก ต่อสายจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า 60 โวลต์คงที่ วัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตจนครบ 6 ชั่วโมง

2.2.3 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เมื่อครบอายุบ่มที่ 28, 56 และ 91 วัน จึงทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวตามมาตรฐาน AASHTO TP 95 [13] โดยหลังจากครบอายุการบ่มให้นำตัวอย่างขึ้นมาจากบ่มบ่มและใช้ผ้าซับผิวตัวอย่างให้แห้ง จากนั้นทำการวัดและทำเครื่องหมายมุม 0, 90, 180, 270 องศาบนผิวหน้าวงกลมของตัวอย่างนำเครื่องทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวหน้ามาวางตามแนวยาวของตัวอย่างแล้วอ่านค่า จากนั้นหมุนตัวอย่างและทำการวัดที่ 90, 180 และ 270 องศา จากนั้นวัดซ้ำที่มุม 0, 90, 180, 270 องศา อีกครั้งเพื่อยืนยันผลการทดสอบ

2.3.4 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด

ในการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขึ้นเกี่ยวกับการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวโดยทำการวัดค่าความต้านทานของแผ่นฟองน้ำรองด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างก่อน จากนั้นวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกซึ่งวางอยู่ระหว่างแผ่นเหล็กและมีฟองน้ำรองอยู่ระหว่างตัวอย่างและแผ่นเหล็กเพื่อให้พื้นผิวสัมผัสแนบสนิทไม่เกิดช่องว่าง

2.2.5 กำลั้งอัด

ทำการทดสอบกำลั้งอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS EN 12390 [14] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม.³ ภายหลังบ่มน้ำเป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน

2.2.6 กำลั้งดึงแบบผ่าซีก

ทำการทดสอบกำลั้งดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM C496 [15] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ภายหลังบ่มน้ำเป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน

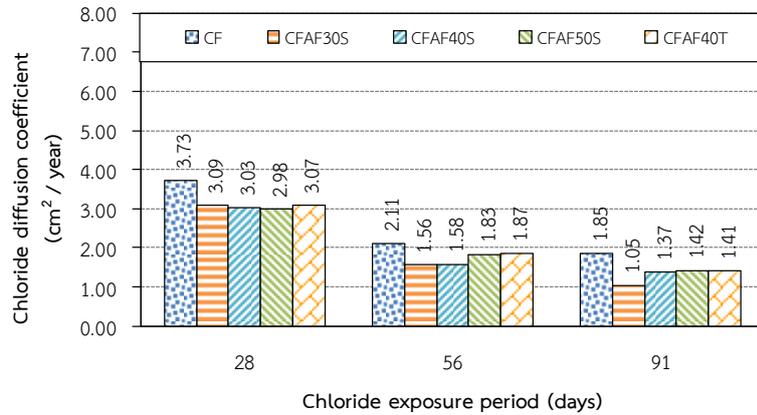
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

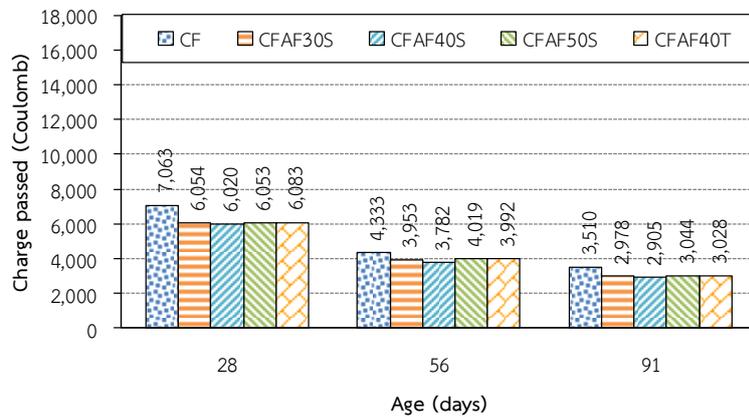
จากผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อปี (cm^2/year) โดยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยอย่างเห็นได้ชัดที่ทุกระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อาจเป็นเพราะการผสมเส้นใยอะรามิดช่วยลดรอยแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีตและการผสมเส้นใยยังช่วยลดความต่อเนื่องของโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต โดยเทียบเคียงกับผลการศึกษาการผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตซึ่งพบว่า เส้นใยเหล็กช่วยขัดขวางทำให้โพรงช่องว่างในคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง [16, 4] และยังช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย [17] เมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดเส้นใยอะรามิดต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตพบว่า ชนิดของเส้นใยอะรามิดส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ค่อนข้างน้อย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ไม่แตกต่างกันทั้งชนิดเส้นตรงและชนิดพันเกลียว และหากเปรียบเทียบผลกระทบของความยาวของเส้นใยอะรามิดต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดที่มีความยาวเส้นใย 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรมีความแตกต่างกันเล็กน้อยที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ส่วนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยความยาว 30 และ 40 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ใกล้เคียงกันมาก และคอนกรีตที่ผสมเส้นใยความยาว 50 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยความยาว 30 และ 40 มิลลิเมตร ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดทุกชนิดถูกควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไว้ที่ 0.55 ประกอบกับเส้นใยอะรามิดสามารถดูดน้ำเข้ามาเก็บในช่องว่างของเส้นใยอะรามิดได้ [18] จึงทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความทึบแน่น ผลกระทบของความยาวเส้นใยอะรามิดต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดจึงมีความแตกต่างไม่มากนัก แต่ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วันพบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยความยาว 30 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยความยาว 40 และ 50 มิลลิเมตรอย่างค่อนข้างชัดเจน อาจเนื่องจากการใช้เส้นใยที่สั้นกว่าจะมีจำนวนเส้นใยที่สามารถกระจายตัวขัดขวางความต่อเนื่องของโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ดีกว่า ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดความยาว 30 มิลลิเมตร จึงมีค่าต่ำกว่าและเห็นได้ชัดเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยได้สมบูรณ์มากขึ้น

3.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่าน

จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตสามารถแสดงในรูปของปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านเนื้อคอนกรีต โดยมีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb) จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเส้นใยที่อายุทดสอบ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใย อาจเป็นเพราะการผสมเส้นใยอะรามิดช่วยลดรอยแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีต และการผสมเส้นใยยังช่วยลดความต่อเนื่องของโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต จึงทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามอายุด้วย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่มากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาการผสมเส้นใยแก้วในคอนกรีต [19] ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้เส้นใยแก้วมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงกว่าคอนกรีตล้วน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำ

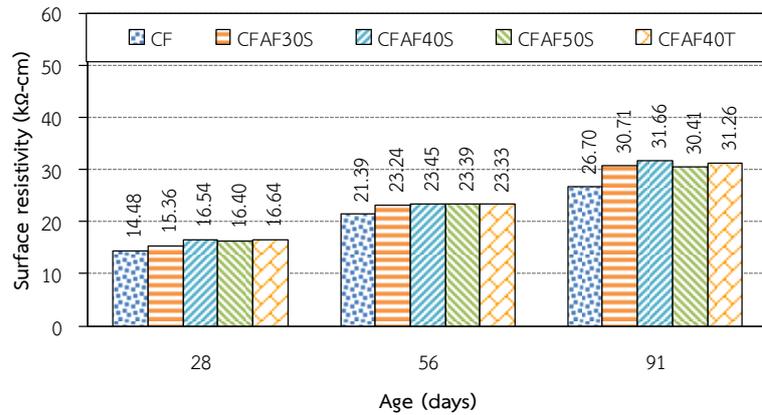


รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 3 ปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านของคอนกรีต

นานขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดเส้นใยที่ส่งผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดพบว่า ชนิดของเส้นใยอะรามิดที่ใช้ในการทดสอบนั้นให้ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งใกล้เคียงกันมากในทุกอายุการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความยาวเส้นใยอะรามิดต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุทดสอบ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดความยาว 40 มิลลิเมตร มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งสูงที่สุด และคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดความยาว 50 มิลลิเมตร มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด แต่ความแตกต่างของความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดที่มีความยาวต่างๆ ยังถือว่าน้อยมาก เนื่องจากเส้นใยอะรามิดในคอนกรีตสามารถดูดน้ำเข้ามาเก็บในช่องว่างของเส้นใยอะรามิดได้ [18] จึงทำให้ผลกระทบของความยาวเส้นใยอะรามิดต่อปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดไม่ค่อยมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chan [20] ที่ได้ศึกษาความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดทั้งชนิดเส้นตรงและชนิดพันเกลียว ที่ความยาว 30 40 และ 50 มิลลิเมตร ก็พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแต่ละความยาวมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

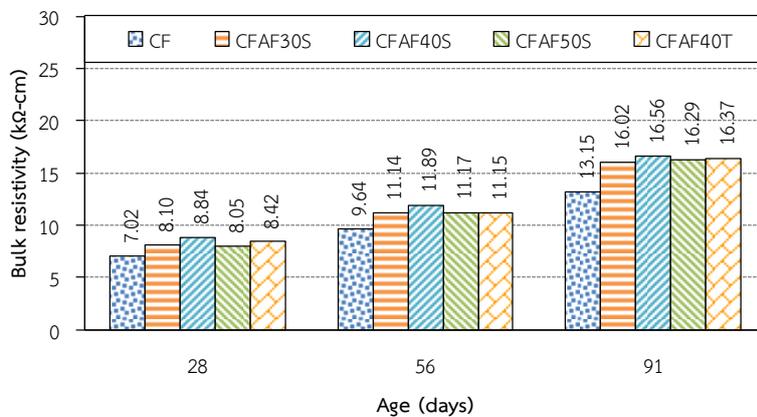
3.3 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดทุกชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเส้นใยที่อายุการทดสอบ 28 วัน แต่ที่อายุทดสอบ 56 วัน และ 91 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยอย่างชัดเจน เนื่องจากเส้นใยอะรามิดมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดสูงขึ้น แต่ที่ผลการทดสอบ 28 วัน ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดและคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมีค่าใกล้เคียงกันนั้น อาจเป็นเพราะว่าขนาดของโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตซึ่งผสมเกล็ดลดยังมีขนาดที่ใหญ่จึงทำให้เห็นผลกระทบของเส้นใยได้ค่อนข้างน้อย แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุการบ่มที่นานขึ้น ขนาดโพรงช่องว่างมีขนาดเล็กลงทำให้ความสามารถของเส้นใยปรากฏชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahmani et al. [21] ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยแก้ว เส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยเหล็ก ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าคอนกรีตส่วนที่ไม่ผสมเส้นใย เนื่องจากเส้นใยแก้วและเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเส้นใยที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดที่อายุทดสอบ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ชนิดของเส้นใยอะรามิดนั้นส่งผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตน้อยมาก และเมื่อพิจารณาผลกระทบของความยาวของเส้นใยอะรามิดต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่อายุทดสอบ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ความยาวของเส้นใยอะรามิดมีผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตค่อนข้างน้อยมากที่ทุกอายุของการทดสอบ เนื่องจากเส้นใยอะรามิดในคอนกรีตสามารถดูดน้ำเข้ามาเก็บในช่องว่างของเส้นใยอะรามิดได้ [18] ทำให้คอนกรีตที่บ่มแน่นผลกระทบของความยาวเส้นใยอะรามิดต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดมีความแตกต่างเล็กน้อย

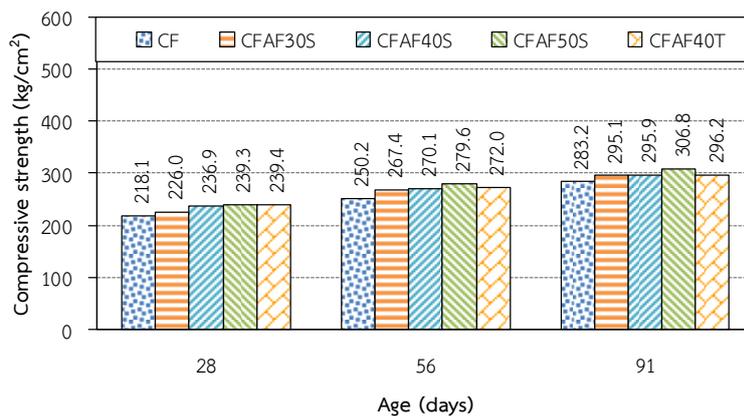
3.4 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด

ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตมีหน่วยเดียวกันกับผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตคือ $k\Omega\text{-cm}$ แต่การวัดความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าของทั้งก้อนตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งต่างจากการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวที่ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตเฉพาะบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างเท่านั้น จากรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยอะรามิดเล็กน้อยที่

อายุการทดสอบ 28 วัน แต่ที่อายุทดสอบ 56 วัน และ 91 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ทำการผสมเส้นใยอย่างชัดเจน ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้โดยหลักการและเหตุผลเดียวกันกับความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวกล่าวคือ อาจเป็นผลมาจากเส้นใยอะรามิดมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดเส้นใยต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดพบว่า ชนิดของเส้นใยอะรามิดส่งผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในทุกอายุการทดสอบ และแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลกระทบของความยาวของเส้นใยอะรามิดพบว่า ความยาวของเส้นใยอะรามิดส่งผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต



รูปที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต



ก.คอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย



ข.คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิด

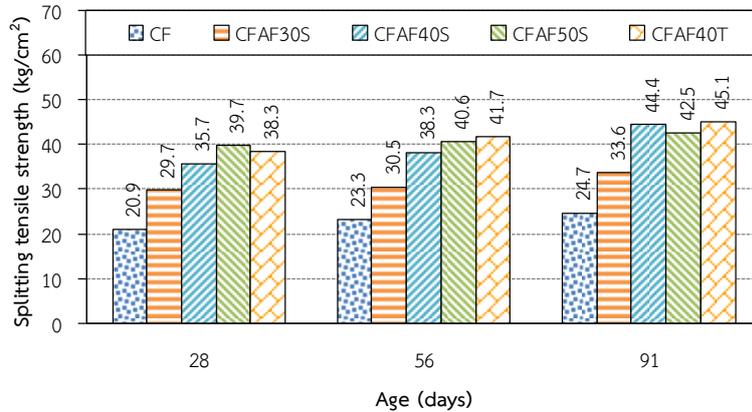
รูปที่ 7 รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบกำลังอัด

3.5 กำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต โดยโครงสร้างคอนกรีตต้องมีกำลังอัดที่เพียงพอสำหรับการต้านทานแรงกระทำต่อโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดไปพร้อมกับคุณสมบัติด้านความคงทนในหัวข้อที่ผ่านมา จากรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดทุกชนิดมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยเพียงเล็กน้อยที่ทุกอายุการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตาม รูปแบบความเสียหายของตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิดภายใต้แรงอัดนั้นแตกต่างจากคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยคอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดเกิดรอยแตกขนาดเล็กกระจายไปทั่วผิวคอนกรีต ในขณะที่คอนกรีตที่ไม่มีการผสมเส้นใยเกิดรอยแตกขนาดใหญ่และบางส่วนก็หลุดล่อนออก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen [22] ที่ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยอะรามิดทั้งชนิดเส้นตรงและชนิดพันเกลียว ความยาวที่ใช้ได้แก่ 30 40 และ 50 มิลลิเมตร พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแต่ละชนิดทุกความยาวและคอนกรีตคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และมีรูปแบบความเสียหายเป็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กจำนวนมากบริเวณผิวคอนกรีต

3.6 กำลังดึงแบบผ่าซีก

คุณสมบัติด้านกำลังดึงของคอนกรีตก็มีความสำคัญต่อการควบคุมการเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเช่นกัน จากรูปที่ 8 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดทุกส่วนผสมนั้นมีกำลังดึงแบบผ่าซีกสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยที่ทุกอายุการทดสอบ กำลังดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยอะรามิดที่ใช้ โดยการใส่เส้นใยอะรามิดชนิดเส้นตรงที่มีความยาว 50 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen [22] ที่พบว่ากำลังดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมีการเสริมเส้นใยอะรามิดในคอนกรีต นอกจากนี้ การผสมเส้นใยอะรามิดในคอนกรีตยังส่งผลต่อรูปแบบความเสียหายของตัวอย่างคอนกรีตเช่นกัน รูปที่ 9 แสดงรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตแล้ว ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดเกิดรอยแตกร้าวตามยาวของตัวอย่าง แต่ไม่แยกออกจากกันและยังคงมีความเหนียวด้วยการยึดรั้งอยู่ด้วยเส้นใยอะรามิดที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าว นั้น ในขณะที่คอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเกิดการแตกร้าวขนาดใหญ่และแยกออกเป็นสองส่วนทันที แสดงให้เห็นความเปราะของคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย



รูปที่ 8 กำลังดึงของคอนกรีต



ก.คอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย



ข.คอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิด

รูปที่ 9 รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเส้นใยอะรามิด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย โดยมีทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านที่ต่ำกว่า เนื่องจากการเส้นใยอะรามิดช่วยลดรอยแตกกว้างจากการหดตัวของคอนกรีตและช่วยลดความต่อเนื่องของโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตจึงทำให้การแทรกซึมคลอไรด์น้อยลง
2. คอนกรีตที่ผสมเส้นใยอะรามิดมีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและทั้งหมดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเส้นใย เนื่องจากเส้นใยอะรามิดเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น
3. ชนิด (เส้นตรง และพันเกลียว) และความยาว (30, 40 และ 50 มิลลิเมตร) ของเส้นใยอะรามิดไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต
4. เส้นใยอะรามิดไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต แต่เส้นใยอะรามิดช่วยเพิ่มกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตอย่างมาก และช่วยปรับปรุงรูปแบบความเสียหายของคอนกรีตให้มีความเหนียวมากขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยสอนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับผู้แต่งคนที่ 1 และการสนับสนุนจากศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวัสดุศาสตร์ การก่อสร้าง และเทคโนโลยีการบำรุงรักษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์เทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการจราจร มหาวิทยาลัยบูรพา และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumranwanich, T. *et al.* Behavior and calculation method of the flexural strength of reinforced concrete beam with fiber. *KMUTT Research and Development Journal*, 2007, 30(2), pp. 345-362. (in Thai)
- [2] Sua-iam, G. and Makul, N. Use of palm fiber as a reinforced fibre for improving the bending strength of lightweight foam concrete. *Engineering Journal of Research and Development, EIT*, 2016, 27(3), pp. 29-36.
- [3] Larisa, U. *et al.* Fiber-reinforced concrete with mineral fibers and nanosilica. *Procedia Engineering*, 2017, 195, pp. 147-154.
- [4] Prak, L. and Sumranwanich, T. Compressive strength and water permeability of concrete mixed with steel fiber. In: *proceedings of the 25th national convention of civil engineering*, Chonburi, Thailand, 15-17 Jul 2020, pp. 1826-1830. (in Thai)
- [5] Löfgren, I. Fibre-reinforced concrete for industrial construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. *Dissertation, Göteborg. Chalmers University of Technology*; 2005.
- [6] Abrycki, M. and Zajdzinski, A. *Effect of fibres on corrosion of steel reinforcement*. Master's thesis, Göteborg. Chalmers University of Technology, 2012.
- [7] Permsuwan, P. *et al.* Corrosion of different types of steel in atmospheric and tidal marine environment of Thailand. *Engineering Journal of Research and Development, EIT*, 2011, 22(4), pp. 17-24.
- [8] Berrocal, CG. *et al.* Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: a review. In: *proceedings of the 7th international conference of fibre concrete*, Prague, Czech Republic, 12-13 Sep 2013, pp.1-10.
- [9] Sumranwanich, T. and Tangtermsirikul, S. *Concrete structure deterioration*. Bangkok: Charansanitwong Printing; 2018. (in Thai)
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C1556. *Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion*. 2004.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM C1152. *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*. 2004.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM C1202. *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. Annual Book of ASTM Standards, 2004.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Official. AASHTO TP95. *Standard method of test for surface resistivity of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. 2011.
- [14] British Standards Institution. BS EN 12390. *Testing of hardened concrete*, London: British Standards Institution. 2009.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM C496. *American standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards, 2004.
- [16] Singh, AP. Strength and permeability characteristics of steel fibre reinforced concrete. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2013, 7(10), pp. 733-738.
- [17] Mangat, PS. and Azari, MM. A theory for the free shrinkage of steel fibre reinforced cement matrices. *Journal of Materials Science*, 1984, 19, pp. 2183-2194.

- [18] Connor, C. and Chadwick, MM. Characterization of absorbed water in aramid fibre by nuclear magnetic resonance. *Journal of Materials Science*, 1996, 31, pp. 3871-3877.
- [19] Chandramouli, K. *et al.* Rapid chloride permeability test for durability studies on glass fibre reinforced concrete. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010, 5, pp. 67-71.
- [20] Chan, L. *Performance of hybrid aramid fiber reinforced concrete in marine environment*. Thesis, Thammasat University, 2016.
- [21] Rahmani, T. *et al.* Durability of glass, polypropylene and steel fiber reinforced concrete. In: *proceedings of the international conference on durability of building materials and components*, Porto, Portugal, 11-15 April 2011, pp.1-8.
- [22] Nguyen, C. *Mechanical properties and application of aramid fiber reinforced concrete*. Thesis, Chulalongkorn University, 2015.