

ผลกระทบของคลอไรด์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของคานขลุคคอนกรีตเสริมเหล็ก

Effect of Chloride on Flexural Strength of Reinforced Concrete Slender Beams

นครรัตน์ สุภา¹, ปิยอรส ทะเสนฮต^{2*}, ศรัญญู ชัยวิเชียร³ และ พุฒิพัทธ์ ราชคำ⁴

^{1,2,4} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง

*Corresponding author; E-mail address: nakronratsupa@gmail.com, piyoros.ta@mmut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของคานขลุคคอนกรีตเสริมเหล็กผสมซิลิกาฟุ้ง เมื่อเหล็กเสริมถูกทำให้เกิดการกัดกร่อนจากคลอไรด์ด้วยวิธีการแรงกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน 12 โวลต์ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณซิลิกาฟุ้งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 0, 10 และ 20) และระยะเวลาทดสอบการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหล็กเสริมถูกกัดกร่อน (0 วัน, 5 และ 8 วัน) ระยะช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 3.76 กำลังรับแรงดัดประลัยคอนกรีตเป็นประเภทปกติสำหรับการทดสอบคานตัวอย่างทั้งหมดจะรับน้ำหนักบรรทุกแบบทิศทางเดียวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คานที่ผสมซิลิกาฟุ้งในอัตรา 10–20% มีความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์สูง ลดความเสี่ยงการเกิดสนิม และเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด โดยเฉพาะคานที่ผสมซิลิกาฟุ้ง 20% ให้ผลดีที่สุด คานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ้งและผ่านการกัดกร่อนแสดงค่ากำลังดัดลดลงอย่างชัดเจนสะท้อนถึงบทบาทสำคัญของซิลิกาฟุ้งในการเพิ่มความทนทานและยืดอายุการใช้งานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คำสำคัญ: คานขลุค, ซิลิกาฟุ้ง, คลอไรด์, วิธีทดสอบแบบเร่ง

Abstract

This study presents a performance comparison of reinforced concrete slender beams mixed with incorporating silica fume. The reinforcing steel was subjected to accelerated corrosion using a 12-volt impressed current method. The variables included the replacement of cement with silica fume (0%, 10%, and 20% by weight) and corrosion duration (0, 5, and 8 days). The shear span-to-effective depth ratio was maintained at 3.76, and the concrete used was normal strength. All beam specimens were tested under single-point loading at mid-span until failure. Results indicated that beams with 10–20% silica fume showed improved resistance to chloride penetration, reduced corrosion risk, and enhanced flexural capacity. The beams with 20% silica fume exhibited the highest structural performance. In contrast, beams without silica fume and subjected to corrosion showed a significant reduction in flexural strength. These findings highlight the critical role of silica fume in improving durability and extending the service life of reinforced concrete slender beams.

Keywords: Slender beam, silica fume, chloride, accelerated testing method

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน และประหยัดค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตาม ปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เกิดจากคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้ามาในคอนกรีต ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้าง การศึกษาและพัฒนาแนวทางในการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อการกัดกร่อนเพื่อยืดอายุการใช้งานออกไปโดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังอัดและความทึบแน่นของคอนกรีตทำให้การซึมผ่านของน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก [5]

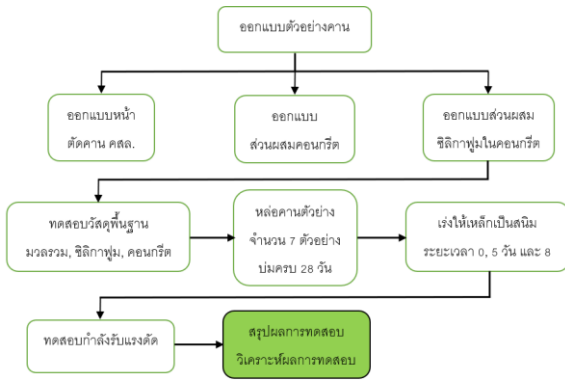
ในบทความนี้ ผู้วิจัยนำเสนอการศึกษสมรรถนะของคานขลุคคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมซิลิกาฟุ้ง ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มความทึบแน่นและลดการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยจำลองสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยการเร่งกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน 12 โวลต์ ภายใต้ตัวแปรหลัก ได้แก่ ปริมาณซิลิกาฟุ้ง (ร้อยละ 0, 10 และ 20) และระยะเวลาการกัดกร่อน (0 วัน, 5 วัน และ 8 วัน)

โดยวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยเพื่อ 1) ศึกษาปริมาณซิลิกาฟุ้งที่ผสมในคอนกรีตต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อระยะเวลาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากคลอไรด์เท่ากัน 2) ศึกษา กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระยะเวลาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ต่างกัน

ผลการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานภายใต้การรับแรงแบบทิศทางเดียวจนกระทั่งเกิดการวิบัติ จะถูกอธิบายในบทความนี้

2. ขั้นตอนการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของคลอไรด์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผสมซิลิกาฟุ้ง แล้วทำการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเร่งโดยการประยุกต์จากมาตรฐาน NT Build 365 เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมด วิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผังขั้นตอนการทดลอง

โดยทำการทดสอบคานตัวอย่าง จำนวน 5 ตัวอย่าง คือ B1-SF0-0D หมายถึง คานตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ 0% แรงกระแสะไฟฟ้าให้เหล็กแกนเกิดการกัดกร่อน 0 วัน, B2-SF0-5D หมายถึง คานตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ 0% แรงกระแสะไฟฟ้าให้เหล็กแกนเกิดการกัดกร่อน 5 วัน, B3-SF0-8D หมายถึง คานตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ 0% แรงกระแสะไฟฟ้าให้เหล็กแกนเกิดการกัดกร่อน 8 วัน, B4-SF10-8D หมายถึง คานตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ 10% แรงกระแสะไฟฟ้าให้เหล็กแกนเกิดการกัดกร่อน 8 วัน, B5-SF20-8D หมายถึง คานตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ 20% แรงกระแสะไฟฟ้าให้เหล็กแกนเกิดการกัดกร่อน 8 วัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

ชื่อคาน	ซิลิกาฟุ่ม (เปอร์เซ็นต์) จากน้ำหนักปูนซีเมนต์	ระยะเวลาเร่งการกัดกร่อน (วัน)
B1_SF0_0D	0	0
B2_SF0_5D	0	5
B3_SF0_8D	0	8
B4_SF10_8D	10	8
B5_SF20_8D	20	8

2.1 ออกแบบตัวอย่างคาน

2.1.1 ออกแบบหน้าตัดคาน

ออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตโดยวิธีกำลัง ตามมาตรฐาน ACI 318-19 ขนาดหน้าตัด 15x25 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 200 เซนติเมตร ใช้เหล็กแกนล่าง DB12 (SD40) จำนวน 3 เส้น, เหล็กแกนบน RB9 (SR24) จำนวน 2 เส้น และเหล็กปลอก RB6 (SR24) ระยะห่าง 15 ซม. ระยะช่วงเดือนต่อความลึกประสิทธิภาพ A/D เท่ากับ 3.76

2.1.2 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI โดยกำหนดค่ากำลังประลัยของคอนกรีต เท่ากับ 240 กก./ซม.² ค่ายุบตัวของคอนกรีต 8-10 ซม. ปริมาณฟองอากาศที่ 2 % ตามสัดส่วน (MIX1) จากนั้นใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ร้อยละ 10 และ 20 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก

MIX No.	อัตราส่วนผสมคอนกรีต (กก./ตัวอย่าง)					
	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ	ซิลิกาฟุ่ม	สารลดน้ำพิษ (ชนิด F)
MIX1 240 ksc. SF=0%	28.70	78.80	105.00	17.60	-	0.50
MIX2 240 ksc. SF=10%	25.83	78.80	105.00	17.60	2.87	0.75
MIX3 240 ksc. SF=20%	22.16	78.80	105.00	17.60	5.74	1.72

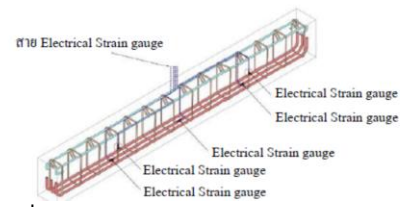
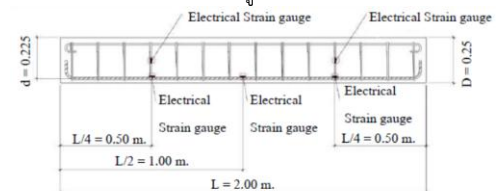
2.2 เตรียมวัสดุในการทดสอบและการทดสอบวัสดุ

2.2.1 การเตรียมวัสดุผสมคอนกรีต และการทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต ให้เป็นไปตามมาตรฐาน มทข. 101-2545 มาตรฐานงานคอนกรีต และคอนกรีตเสริมเหล็ก [7]

2.2.2 การทดสอบเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐาน มทข. 103-2545 มาตรฐานงานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต [8]

2.3 หล่อคานตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคานตามที่ได้ออกแบบไว้ จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยหลังจากทำการตัดและผูกเหล็กเสริมแกนหลักที่ถูกมัดด้วยเหล็กปลอกให้ได้ระยะหุ้มตามขนาดหน้าตัดคานแล้วให้ทำการติดตั้ง electrical strain gauge (ดังรูปที่ 2) นำเหล็กเสริมใส่ลงในแบบหล่อคานที่เตรียมไว้ ทำการการผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบแล้วผสมให้เข้ากันแล้วทำการเติมสารลดน้ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อผสมเสร็จให้ทำการตรวจสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต ทำการเทคอนกรีตสดนั้นลงในแบบที่เตรียมไว้ แล้วปาดหน้าให้เรียบ (ดังรูปที่ 3 ก) เก็บตัวอย่างลงในแบบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. ทั้งคอนกรีตไว้ในแบบหล่อจนแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงแกะออกจากแบบ แล้วบ่มคานคอนกรีตจนครบอายุคอนกรีตที่ 28 วัน (ดังแสดงในรูปที่ 3ข)



รูปที่ 2 ตัวอย่างการติดตั้ง (electrical strain gauge)



(ก) การเทคอนกรีต



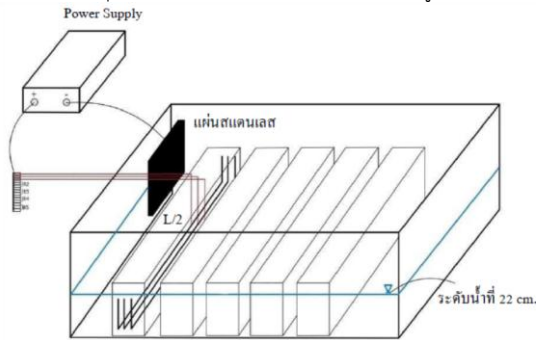
(ข) บ่มคอนกรีต

รูปที่ 3 การเทคอนกรีตและการบ่มคอนกรีต

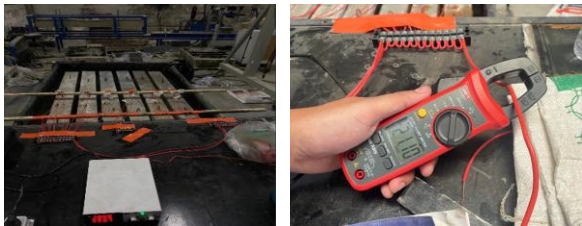
2.4 เร่งให้เหล็กเป็นสนิม

เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กบ่มครบตามระยะเวลา 28 วัน นำตัวอย่างมาลงในอ่างแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ในระดับความสูงจากท้องตัวอย่างคานเท่ากับ 22 ซม. ทำการต่อวงจรไฟฟ้าในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาทำให้เหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนโดยต่อวงจรแบบขั้วลบเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลสม่ำเสมอ (ดังรูปที่ 4) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ และติดตั้งแผ่นเหล็กกันสนิม (stainless steel) เป็นขั้วลบรับอิเล็กตรอน (cathode) เหล็กเสริมในคานตัวอย่างทำหน้าที่เป็นขั้วบวกที่เสียอิเล็กตรอน (anode) จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบซึ่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (direct current, DC) (ดังรูปที่ 5 ก) บันทึก

ผลกระทบไฟฟ้าจนครบระยะเวลาที่กำหนด โดยวัดจากเครื่องแคลมป์มิเตอร์ดิจิตอล AC/DC ทุก 12 ชั่วโมงของแต่ละวัน (ดังแสดงในรูปที่ 5 ข)



รูปที่ 4 การต่อวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น

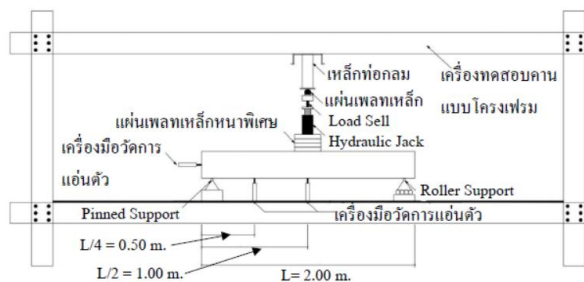


(ก) การเร่งกระแสไฟฟ้า (ข) การเก็บค่ากระแสไฟฟ้า
รูปที่ 5 การเร่งกระแสไฟฟ้าและการเก็บค่ากระแสไฟฟ้า

2.5 การทดสอบ

2.5.1 ติดตั้งเครื่องมือ

ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของคานตัวอย่าง จะทดสอบประเภทแรงกระทำแบบจุดหนึ่งแรง (Center Points bending testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D6272 โดยการทดสอบจะให้น้ำหนัก (Load) ลงไปที่คานตัวอย่างจนเกิดการแอ่นตัวและเกิดการวิบัติ ระหว่างการทดสอบบันทึกผลการทดสอบผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 6)



รูปที่ 6 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบคาน

3. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคานทดสอบเพื่อเร่งปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเหล็กเสริม ลักษณะการเสื่อมสภาพของคานตัวอย่างและการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม พฤติกรรมของคานขลุคคอนกรีตเสริมเหล็ก และการเปรียบเทียบค่าทดลองและค่าทฤษฎีของโมเมนต์ดัด ซึ่งได้ผลการทดสอบจากคานตัวอย่างคาน จำนวน 5 ตัวอย่าง ดังนี้

3.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์

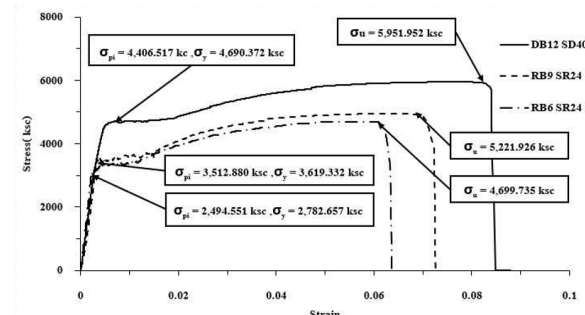


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในอัตราส่วนผสมซิลิกาฟุมที่แตกต่างกัน

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. โดยทดสอบกับคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด (f_c') หลังบ่ม 28 วัน และปริมาณซิลิกาฟุม (SF) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่มีซิลิกาฟุม (SF0) คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุมในอัตราส่วน 10% (SF10) และ 20% (SF20) พบว่า การเติมซิลิกาฟุมในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยคอนกรีตที่ไม่มีการเติมซิลิกาฟุม (SF0) มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 153 ksc เมื่อเติมซิลิกาฟุมในอัตราส่วน 10% (SF10) พบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 291 ksc หรือเพิ่มขึ้น 90.2% เมื่อเทียบกับคอนกรีต SF0 แสดงให้เห็นถึงผลของซิลิกาฟุมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาฟุมเป็น 20% (SF20) ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 315 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้น 106% จากค่ากำลังอัดของคอนกรีต SF0 และเพิ่มขึ้น 8.25% เมื่อเทียบกับ SF10 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุมจาก 10% เป็น 20% ยังคงช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต แต่ในอัตราที่ลดลงเมื่อเทียบกับการเติมซิลิกาฟุม 10% (ดังแสดงในรูปที่ 6)

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเติมซิลิกาฟุมในอัตราส่วน 10%-20% สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปริมาณที่เหมาะสมของซิลิกาฟุมในคอนกรีตทั่วไปมักอยู่ในช่วง 5%-20% ของน้ำหนักวัสดุประสาน

3.2 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม



รูปที่ 8 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก

ค่าจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพชั้นคุณภาพ SR24 และ SD40 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. 9 มม. และ 12 มม. โดยจะทำการทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กเส้น ตามมาตรฐาน มอก.20-2543 (เหล็กเส้นกลม) มอก.24-2536 (เหล็กข้ออ้อย) ทำการทดสอบดึงเหล็กเสริมจนเกิดการวิบัติเพื่อทราบถึงค่าหน่วยแรงที่จุดคราก (Yield Strength) โดยมีสัญลักษณ์คือ

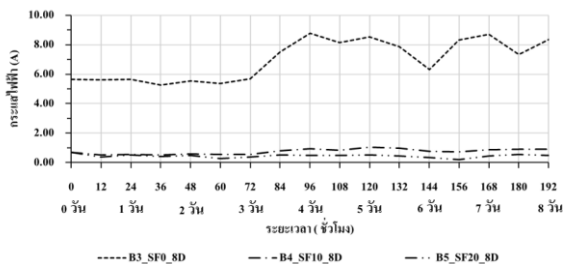
σ_{pi} หมายถึง หน่วยแรงดึงที่จุดยืดหยุ่น (Proportionaliti Limit)

σ_y หมายถึง หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (Yield Stress)

σ_u หมายถึง หน่วยแรงดึงประลัย (Ultimate Stress)

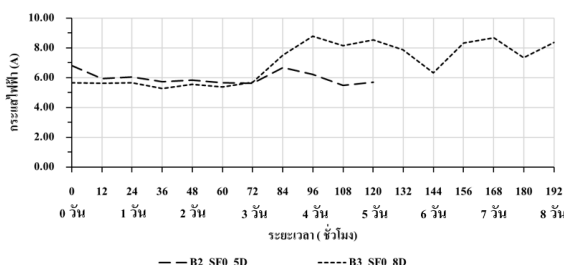
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาถึงเหล็กเสริมรับแรงดึง พบว่าเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. มีค่าแรงดึงที่จุดครากสูงสุด (σ_y) เท่ากับ 4,690 ksc และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด elongation (E) เท่ากับ 15.5% ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. มีค่าแรงดึงที่จุดครากสูงสุด (σ_y) เท่ากับ 3,619 ksc และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด elongation (E) เท่ากับ 18.75% ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. มีค่าแรงดึงที่จุดครากสูงสุด (σ_y) เท่ากับ 2,782 ksc และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด elongation (E) เท่ากับ 11.25% ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (ดังแสดงในรูปที่ 8)

3.3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคานทดสอบเพื่อเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม



รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคานตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณซิลิกาฟุ่มต่างกันแต่ละเวลาเท่ากัน

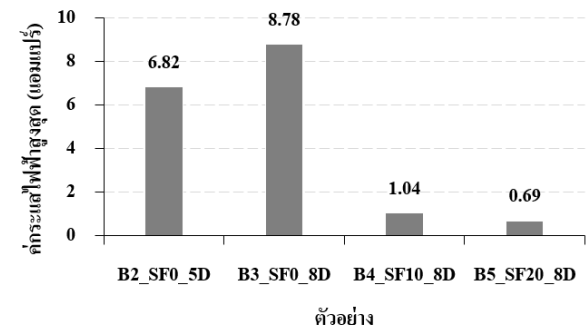
รูปที่ 9 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคานที่ผสมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 0,10 และ 20 ในระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมเท่ากันที่ 8 วัน พบว่าคานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม (B3_SF0_8D) มีค่ากระแสสูง แสดงถึงความพูนและส่งผลต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมมากที่สุด ส่วนคานที่ผสมซิลิกาฟุ่ม 10% และ 20% (B4_SF10_8D และ B5_SF20_8D) มีค่ากระแสต่ำกว่า โดยคานที่ผสมซิลิกาฟุ่ม 20% มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างน้อยที่สุด ส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยตามด้วย อาจจะเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นทำให้ระบบโครงของคอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟุ่มระหว่างร้อยละ 10-20 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและความทนทานต่อคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม

รูปที่ 10 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม ในระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมต่างกันที่ 5 วัน และ 8 วัน พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นสูงและลดลงเล็กน้อยในช่วงต้นก่อนจะเพิ่มขึ้นหลัง 72 ชั่วโมง เนื่องจากการเกิดสนิมและรอยร้าวในคอนกรีต ซึ่งเร่งกระบวนการกัดกร่อน คาน B3_SF0_8D มีค่ากระแสสูง

กว่าคาน B2_SF0_5D ในช่วงท้าย แสดงถึงการเกิดออกซิเดชันที่มากกว่า

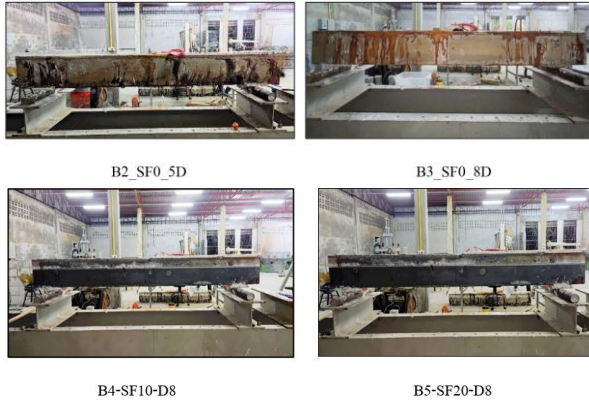


รูปที่ 11 เปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคานทดสอบที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มต่างกัน

การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าคานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม (B2_SF0_5D และ B3_SF0_8D) มีค่ากระแสไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะ B3_SF0_8D ที่มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 8.78 A แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของสารที่เป็นตัวเร่งการกัดกร่อนต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของคอนกรีตในกลุ่มนี้มีความพรุนสูงและมีโอกาสที่ไอออนคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ง่าย ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมภายในคาน ซึ่งจะลดอายุการใช้งานของโครงสร้างในระยะยาว ในทางกลับกัน คานที่ผสมซิลิกาฟุ่ม (B4_SF10_8D และ B5_SF20_8D) มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะ B5_SF20_8D ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ 0.69A แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างคอนกรีตในกลุ่มนี้มีการลดความพรุนลงอย่างมาก เนื่องจากซิลิกาฟุ่มช่วยเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและปรับปรุงโครงสร้าง ทำให้สารกัดกร่อนไม่สามารถแทรกซึมได้อย่างง่ายดาย ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างคานที่ผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณต่างกัน พบว่าปริมาณซิลิกาฟุ่มมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของกระแสไฟฟ้า การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มจาก 10% (B4_SF10_8D) ไปเป็น 20% (B5_SF20_8D) ช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าลงอีก 33.65% แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณสูงขึ้นจะมีความหนาแน่นมากขึ้นและช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างคานคอนกรีตได้ (ดังแสดงในรูปที่ 11)

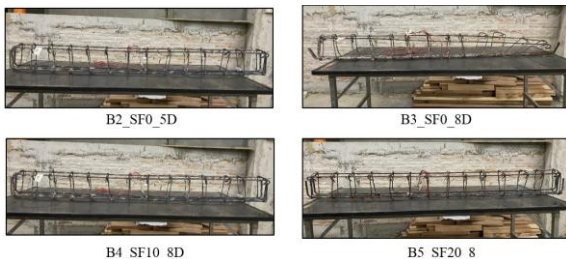
3.4 ลักษณะการเสื่อมสภาพของคานตัวอย่างและการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม

หลังจากบ่มคานคอนกรีต 28 วันแล้วทำการเร่งการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าพบว่าคานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม (B2_SF0-5D และ B3_SF0-8D) การเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะ B3_SF0-8D ที่มีรอยแตกร้าวและสนิมรุนแรง ส่วนคานที่ผสมซิลิกาฟุ่ม 10% และ 20% (B4_SF10-8D และ B5_SF20-8D) มีสนิมซึมออกน้อย แสดงให้เห็นว่าซิลิกาฟุ่มช่วยลดความเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ดังแสดงในรูปที่ 12)



รูปที่ 12 สภาพคานตัวอย่างหลังจากถูกแรงให้เกิดสภาวะการกัดกร่อน
ในระยะเวลา 5 วัน และ 8 วัน

หลังการทดสอบแรงกระแทกไฟฟ้าให้เหล็กแกนเกิดสนิม จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของคาน หลังจากนั้นนำเอาเนื้อคอนกรีตออกเพื่อดูลักษณะทางกายภาพ พบว่าเหล็กเสริมในคานที่ไม่มีซิลิกาฟุ่ม (SF0) มีการกัดกร่อนและเกิดสนิมในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่มีส่วนผสมซิลิกาฟุ่มในสัดส่วนต่าง ๆ (SF10 และ SF20) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่าง B2_SF0_5D และ B3_SF0_8D ซึ่งแสดงให้เห็นการกัดกร่อนที่รุนแรงและมีสนิมปกคลุมพื้นที่ผิวเป็นบริเวณกว้าง ในขณะที่ตัวอย่าง B4_SF10_8D และ B5_SF20_8D ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม 10% และ 20% ตามลำดับ พบว่ามีการกัดกร่อนน้อยกว่าและจำกัดอยู่เฉพาะบางจุดเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของซิลิกาฟุ่มที่ช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีตผ่านการเติมเต็มช่องว่าง (filler effect) และปฏิกิริยา pozzolanic ที่ลดการซึมผ่านของน้ำและสารกัดกร่อน เช่น คลอไรด์ ส่งผลให้เหล็กเสริมในคานที่มีซิลิกาฟุ่มได้รับการปกป้องจากสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า (ดังแสดงในรูปที่ 13)



รูปที่ 13 สภาพเหล็กเสริมหลังจากถูกแรงให้เกิดสภาวะการกัดกร่อนใน
ระยะเวลา 5 วัน และ 8 วัน

หลังจากดำเนินการแรงกระแทกไฟฟ้าและทดสอบกำลังรับแรงของคานตัวอย่างทุกชุดเสร็จสิ้นแล้ว ได้ทำการนำเนื้อคอนกรีตออกเพื่อให้เหลือเฉพาะโครงเหล็กเสริม แล้วทำการวัดการสูญเสียของเหล็กเสริมโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัดเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อน ทั้งนี้ การวัดค่าการสูญเสียของเหล็กเสริมดำเนินการโดยการวัดขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมในบริเวณที่มีการกัดกร่อนของแต่ละตัวอย่าง การเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนผ่านกระแสไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไหลผ่านโครงเหล็กเสริมทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอในแต่ละตำแหน่ง ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ จึงมีการเก็บข้อมูลการสูญเสียของเหล็กเสริมจากหลายตำแหน่งบนคานเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ตัวอย่างคานควบคุม (B1_SF0_0D) เหล็กปลอกและเหล็กแกนไม่มีการสูญเสีย ขณะที่เมื่อระยะเวลาการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเป็น 5 วัน (B2_SF0_5D)

พบว่ามีการสูญเสียของเหล็กปลอก 15.50% และเหล็กแกน 5.42% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กปลอกได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนมากกว่าเนื่องจากอยู่ใกล้ผิวคอนกรีต ทำให้สัมผัสกับไอออนคลอไรด์และความชื้นโดยตรงมากกว่าเหล็กแกน ขณะที่เหล็กแกนที่อยู่ลึกลงไปภายในคอนกรีตยังได้รับการป้องกันบางส่วน เมื่อระยะเวลาการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเป็น 8 วัน (B3_SF0_8D) พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น โดยเหล็กปลอกสูญเสีย 23.17% และเหล็กแกนสูญเสีย 25.75% เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเกิดสนิมของเหล็กแกนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการเร่งแรงกระแทกไฟฟ้าที่ 5 วัน เหล็กปลอกสูญเสียมากกว่าเหล็กแกน เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไป คอนกรีตเริ่มเสื่อมสภาพมากขึ้นและเกิดรอยร้าวและหลุดร่อนบริเวณท้องและปลายคานจากกระบวนการกัดกร่อน ส่งผลให้สารละลายไอออนคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตได้มากขึ้นและเข้าถึงเหล็กแกนโดยตรง ทำให้เหล็กแกนเกิดสนิมและสูญเสียหน้าตัดในอัตราที่สูงกว่าเหล็กปลอกที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีต คานที่ไม่มีซิลิกาฟุ่ม (B3_SF0_8D) มีอัตราการสูญเสียของเหล็กแกนสูงกว่าเหล็กปลอก โดยเหล็กแกนเสียหาย 25.75% ในขณะที่เหล็กปลอกเสียหาย 23.17% สาเหตุเกิดจากความพรุนของคอนกรีตที่ทำให้สารละลายไอออนคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กแกนได้ง่าย ในทางกลับกัน คานที่มีซิลิกาฟุ่ม (B4_SF10_8D และ B5_SF20_8D) กลับมีแนวโน้มตรงข้าม โดยเหล็กปลอกมีการสูญเสียสูงกว่าเหล็กแกน เช่น ใน B5_SF20_8D เหล็กปลอกเสียหาย 1.83% ขณะที่เหล็กแกนเสียหายเพียง 0.83% เนื่องจากซิลิกาฟุ่มช่วยลดความพรุนของคอนกรีต ทำให้เหล็กแกนได้รับการป้องกันที่ดีขึ้น ขณะที่เหล็กปลอกที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีตมากกว่ายังคงเผชิญกับการกัดกร่อนโดยตรง (ดังแสดงในตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมหลังจากแรงกระแทกไฟฟ้า

ชื่อคาน	ชนิดเหล็ก	เส้นผ่านศูนย์กลางเดิม (mm.)	เส้นผ่านศูนย์กลางหลังการทดสอบ (mm.)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)
B1_SF0_0D	เหล็กปลอก	6.00	6.00	0.00
	เหล็กแกน	12.00	12.00	0.00
B2_SF0_5D	เหล็กปลอก	6.00	5.07	15.50
	เหล็กแกน	12.00	11.35	5.42
B3_SF0_8D	เหล็กปลอก	6.00	4.61	23.17
	เหล็กแกน	12.00	8.91	25.75
B4_SF10_8D	เหล็กปลอก	6.00	5.58	7.00
	เหล็กแกน	12.00	11.65	2.92
B5_SF20_8D	เหล็กปลอก	6.00	5.89	1.83
	เหล็กแกน	12.00	11.9	0.83

3.5 พฤติกรรมของคานชุดคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผลการทดสอบความสามารถการรับน้ำหนักของคานตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขการเร่งปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเป็นระยะเวลา 8 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุก

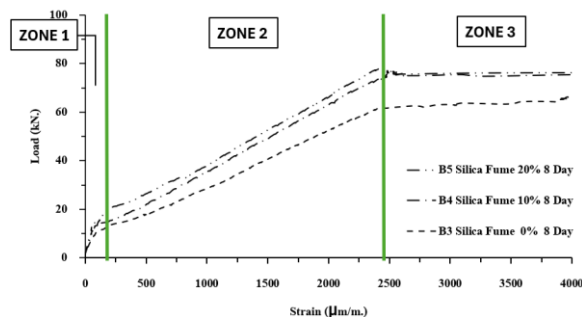
ตัวอย่าง	แรง ณ ตำแหน่งที่จุดคลาก (kN)	Strain ($\mu\text{m/m}$)
B1_SF0_0D	73.606	2665
B2_SF0_5D	68.983	2382
B3_SF0_8D	61.860	2438
B4_SF10_8D	76.149	2420
B5_SF20_8D	74.023	2267

จากผลการทดสอบ B1_SF0_OD เหล็กเสริมในคานเกิดการคลากเมื่อรับน้ำหนัก เท่ากับ 73.6 kN มีค่า Strain เท่ากับ 2665 $\mu\text{m/m}$, B2_SF0_5D เหล็กเสริมในคานเกิดการคลากเมื่อรับน้ำหนัก เท่ากับ 68.9 kN มีค่า Strain เท่ากับ 2382 $\mu\text{m/m}$, B3_SF0_8D เหล็กเสริมในคานเกิดการคลากเมื่อรับน้ำหนัก เท่ากับ 61.8 kN มีค่า Strain เท่ากับ 2348 $\mu\text{m/m}$, B4_SF10_8D เหล็กเสริมในคานเกิดการคลากเมื่อรับน้ำหนัก เท่ากับ 76.1 kN มีค่า Strain เท่ากับ 2420 $\mu\text{m/m}$, B5_SF20_8D เหล็กเสริมในคานเกิดการคลากเมื่อรับน้ำหนัก เท่ากับ 74.0 kN มีค่า Strain เท่ากับ 2267 $\mu\text{m/m}$

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับน้ำหนักบรรทุก

ตัวอย่าง	Strain ($\mu\text{m/m}$)	Force (kN)
B1_SF0_OD	2665	73.606
B2_SF0_5D	2382	68.983
B3_SF0_8D	2438	61.860
B4_SF10_8D	2420	76.149
B5_SF20_8D	2267	74.023

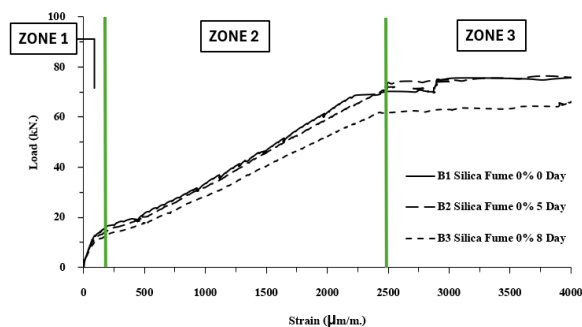
B1_SF0_OD (ไม่มีซิลิกาฟุ่ม) จุดครากอยู่ที่ 73.606 kN
B2_SF0_5D (ไม่มีซิลิกาฟุ่ม) จุดครากอยู่ที่ 68.983 kN
B3_SF0_8D (ไม่มีซิลิกาฟุ่ม) จุดครากอยู่ที่ 61.860 kN
B4_SF10_8D (ผสมซิลิกาฟุ่ม 10%) จุดครากอยู่ที่ 76.149 kN
B5_SF20_8D (ผสมซิลิกาฟุ่ม 20%) จุดครากอยู่ที่ 74.023 kN



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะยืดตัวของเหล็กเสริม

หลังจากที่การทดสอบแรงกดลงไปยังคานตัวอย่างจนคาน คล. เกิดรอยแตกร้าวแรก First Crack (Zone 1) เมื่อน้ำหนักถูกกดลงต่อเนื่องจนคาน คล. เกิดการครากตัว (Zone 2) หลังจากคาน คล. เกิดการครากตัวจนกระทั่งคาน คล. เกิดการวิบัติ (Zone 3) (ดังแสดงในรูปที่ 14)

จากผลการทดสอบ B3_SF0_8D มีค่า Load เท่ากับ 61.86 (kN) ค่า Strain เท่ากับ 2,438 ($\mu\text{m/m}$) B4_SF10_8D มีค่า Load เท่ากับ 76.14 (kN) ค่า Strain เท่ากับ 2,420 ($\mu\text{m/m}$) และ B5_SF20_8D มีค่า Load เท่ากับ 74.02 (kN) ค่า Strain เท่ากับ 2,267 ($\mu\text{m/m}$)



รูปที่ 15 การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีซิลิกาฟุ่มภายใต้เงื่อนไขการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

จากผลการทดสอบ B1_SF0_OD มีค่า Load เท่ากับ 69.59 (kN) ค่า Strain เท่ากับ 2,300 ($\mu\text{m/m}$) B2_SF0_5D มีค่า Load เท่ากับ 68.98 (kN) ค่า Strain เท่ากับ 2,382 ($\mu\text{m/m}$) และ B3_SF0_8D มีค่า Load เท่ากับ 61.86 (kN) ค่า Strain เท่ากับ 2,438 ($\mu\text{m/m}$) (ดังแสดงในรูปที่ 12)

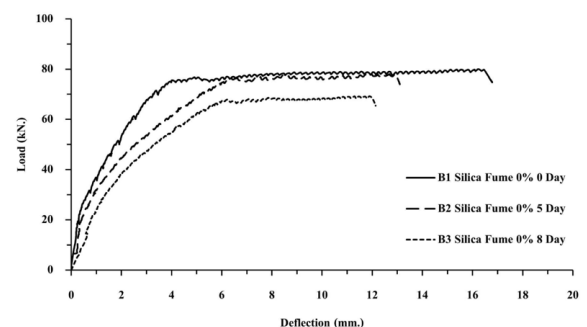
พบว่าความสามารถการรับน้ำหนักของคานจะลด คสล. ลดลงเมื่อระยะเวลาการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น คานควบคุม (B1_SF0_OD) มีค่ากำลังสูงสุดที่ 73.606 kN เนื่องจากไม่มีผลกระทบจากการกัดกร่อน ขณะที่คานที่ถูกเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นเวลา 5 วัน (B2_SF0_5D) และ 8 วัน (B3_SF0_8D) มีค่ากำลังลดลงตามลำดับ อันเป็นผลจากการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมจากกระบวนการกัดกร่อน ซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กลดลงและลดความสามารถในการรับแรง เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมพบว่าคาน (B2_SF0_5D) มีค่ากำลังลดลงเหลือ 71.680 kN คิดเป็นการลดลง 2.61% ขณะที่คาน (B3_SF0_8D) มีค่ากำลังลดลงเหลือ 68.016 kN คิดเป็นการลดลง 7.58% แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังของคานตัวอย่าง

ตารางที่ 5 การทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดและพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

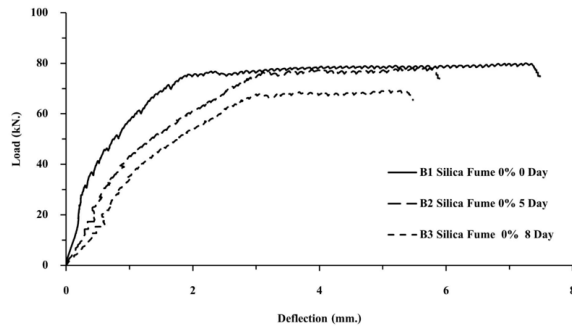
ตัวอย่าง	First Crack (kN)	Yield Point (kN)	Ultimate (kN)
B1_SF0_OD	17.900	71.424	79.966
B2_SF0_5D	18.600	67.539	76.569
B3_SF0_8D	15.800	62.004	68.549
B4_SF10_8D	20.400	69.467	77.289
B5_SF20_8D	23.000	74.402	82.754

ผลการทดสอบพบว่าการผสมซิลิกาฟุ่มในคอนกรีตเสริมเหล็กส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานอย่างมีนัยสำคัญ คานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่มมีค่ากำลังรับแรงที่จุดแตกแรก (First crack) และค่ากำลังสูงสุด (Ultimate) ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคานที่ผสมซิลิกาฟุ่ม

โดยคานที่ไม่ได้ผ่านการกัดกร่อน (B1_SF0_OD) มีค่ากำลังที่จุด Ultimate Load สูงสุดที่ 79.966 kN ขณะที่คานที่ผ่านการกัดกร่อนเป็นเวลา 5 วัน (B2_SF0_5D) และ 8 วัน (B3_SF0_8D) มีค่ากำลังลดลงเป็น 76.569 kN และ 68.549 kN ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมส่งผลต่อการลดลงของกำลังรับแรงดัดของคาน นอกจากนี้ การพิจารณาพฤติกรรมการเสียรูปจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการแอ่นตัวของคาน พบว่าคานที่ถูกกัดกร่อนมีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้ผ่านการกัดกร่อน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความแข็งแกร่งของคานตัวอย่าง (stiffness member) ลดลงจากการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมตามระดับความรุนแรงของตัวอย่างทดสอบ (ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ไม่ผสมซิลิกาฟุมโดยเวลาในการกักต่อนต่างกัน



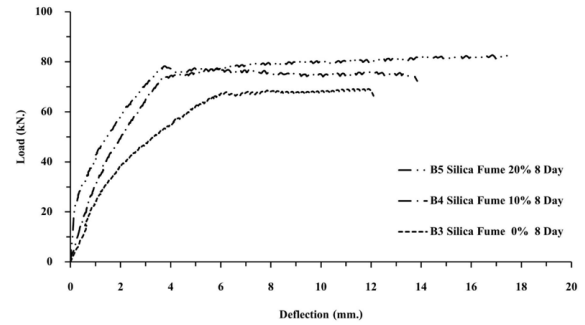
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการแอ่นตัวที่จุดหนึ่งในสี่ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ปริมาณการผสมซิลิกาฟุมต่างกันโดยเวลาในการกักต่อนเท่ากันของคาน

ตารางที่ 6 พฤติกรรมการแตกร้าวและการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมซิลิกาฟุมและไม่ผสมซิลิกาฟุม

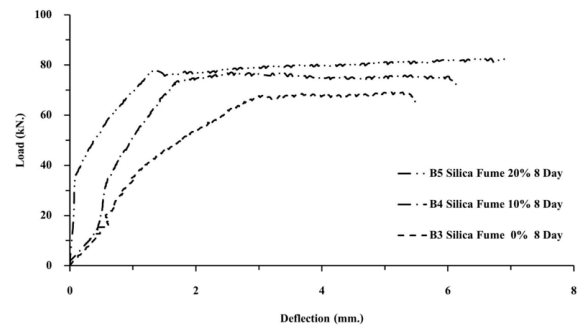
ตัวอย่าง	First Crack (kN)	Shear Crack (kN)	Ultimate (kN)	การวิบัติ
B1_SF0_0D	17.9	46.0	79.9	วิบัติเนื่องจากแรงดัด
B2_SF0_5D	18.6	36.1	76.5	วิบัติเนื่องจากแรงดัด
B3_SF0_8D	15.8	30.5	68.5	วิบัติเนื่องจากแรงดัด
B4_SF10_8D	20.4	43.1	77.2	วิบัติเนื่องจากแรงดัด
B5_SF20_8D	23.0	45.0	82.7	วิบัติเนื่องจากแรงดัด

พฤติกรรมการแตกร้าวและการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมซิลิกาฟุมและไม่ผสมซิลิกาฟุมรับน้ำหนักกระทำที่ระยะ L/2 ระยะห่างจากจุดรองรับเท่ากับ 1.65 เมตร โดยวิธีการดัดแบบหนึ่งจุด (Center Point Loading Test) ตามมาตรฐาน ASTM C239 คานตัวอย่างมีรูปแบบการแตกร้าวที่มีทิศทางสอดคล้องกันทั้งหมดที่ได้ทั้งคานเนื่องจากแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำแบบจุดเดียวบนกลางกลางคาน โดยพฤติกรรมการแตกร้าวและการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมซิลิกาฟุม (ดังแสดงในตารางที่ 6)

ในขณะที่คานที่ผสมซิลิกาฟุม 20% มีค่ากำลังรับแรงสูงสุดเท่ากับ 82.754 kN คิดเป็น 21% จากคานที่ไม่มีการผสมซิลิกาฟุม ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของคาน คานที่ผสมซิลิกาฟุมมีพฤติกรรมการเสียรูปที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุม โดยการเพิ่มซิลิกาฟุมส่งผลให้การแอ่นตัวของคานลดลงในช่วงก่อนและหลังเกิดรอยร้าวแรก ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่มีความทึบแน่นมากขึ้นและการลดรูพรุนของวัสดุส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้คานมีความสามารถในการรับแรงได้ดีขึ้น นอกจากนี้ซิลิกาฟุมยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะกัดกร่อนของเหล็กเสริม คานตัวอย่างจึงสามารถรักษาความแข็งแรงของโครงสร้างได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการเร่งการกัดกร่อน (ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19)



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปริมาณการผสมซิลิกาฟุมต่างกันโดยเวลาในการกักต่อนเท่ากัน



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการแอ่นตัวที่จุดหนึ่งในสี่ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปริมาณการผสมซิลิกาฟุมต่างกันโดยเวลาในการกักต่อนเท่ากันของคาน

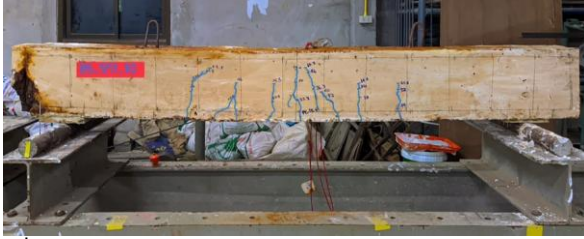
จากการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมซิลิกาฟุมในสัดส่วนต่างกันภายใต้การเร่งการกัดกร่อน พบว่า ระยะเวลาในการเร่งสนิมถึง 8 วันไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติคานที่มีคุณภาพสูง โดยเฉพาะด้านความทนทานต่อคลอไรด์ คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุมแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในแง่ของลักษณะแตกร้าว พฤติกรรมโครงสร้าง และกำลังรับโมเมนต์ดัด



รูปที่ 20 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานตัวอย่าง B1-SF0-0D



รูปที่ 21 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานตัวอย่าง B2-SF0-5D



รูปที่ 22 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานตัวอย่าง B3-SF0-8D



รูปที่ 23 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานตัวอย่าง B4-SF10-8D



รูปที่ 24 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานตัวอย่าง B5-SF20-8D

จากการศึกษาพฤติกรรมของคานตัวอย่างที่ผ่านการเร่งให้เกิดการกัดกร่อนและการผสมซิลิกาฟุม พบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อการเกิดรอยร้าวและความสามารถในการรับน้ำหนักของคานอย่างชัดเจน

- ผลกระทบของการเร่งให้เกิดการกัดกร่อน การเร่งให้เกิดการกัดกร่อนส่งผลให้คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง โดยเฉพาะในคานที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟุม การเพิ่มระยะเวลาการเร่งให้เกิดสนิมจาก 5 วันเป็น 8 วัน ทำให้ค่าการรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรก (First Crack) และน้ำหนักสูงสุดก่อนการวิบัติลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากกระบวนการเกิดสนิมทำให้ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบและความสามารถในการรับแรงดัดลดลง ส่งผลให้คานเสียหายมากกว่าคานควบคุม

- ผลกระทบของการผสมซิลิกาฟุม การเติมซิลิกาฟุมในปริมาณ 10% และ 20% ส่งผลให้คานสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีซิลิกาฟุมในสภาวะเดียวกัน โดยพบว่าคานที่ผสมซิลิกาฟุมสามารถรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกได้สูงขึ้น รวมถึงสามารถรองรับน้ำหนักสูงสุดได้มากกว่าคานที่ไม่มีซิลิกาฟุม สะท้อนให้เห็นว่าซิลิกาฟุมมีบทบาทในการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต

- แนวโน้มของการเกิดรอยร้าวและการวิบัติ คานทุกตัวอย่างมีรูปแบบการวิบัติที่คล้ายกัน คือเริ่มเกิดรอยร้าวจากแรงดัดบริเวณท้องคาน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยร้าวขยายตัวจนเกิดรอยร้าวเฉือน เมื่อถึงค่าการรับน้ำหนักสูงสุด คานเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดทุกตัวอย่าง

3.6 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักจากผลการทดสอบและมาตรฐานการออกแบบ

จากผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุมช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (F_c) และความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด (M_{test}) โดยตัวอย่างที่มีซิลิกาฟุม 10% และ 20% ให้ค่า M_{test}/M_{theory} สูงสุดเท่ากับ 1.039 และ 1.112 หรือเพิ่มขึ้น 3.9 และ 11.2% ตามลำดับ ในกรณีตัวอย่างที่ไม่มีซิลิกาฟุมให้ค่า M_{test}/M_{theory} ต่ำสุดที่ 0.921 หรือ

ลดลง 7.9% จากการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ด้วยกระแสไฟฟ้า 12 โวลต์ เป็นระยะเวลาสูงสุด 8 วัน พบว่าหน้าตัดเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนสูงสุดเท่ากับ 23.17 และ 25.75 เปอร์เซ็นต์ของเหล็กปลอกและเหล็กแกนตามลำดับ โดยปริมาณแทนที่ของซิลิกาฟุมในปูนซีเมนต์มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ระยะเวลาการกัดกร่อนเท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ (ดังแสดงในตาราง 7)

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่าทดลองและค่าทฤษฎีของโมเมนต์ดัด

ชื่อคาน	แรง (Pn)	As หลังการทดสอบ (cm ²)	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)	Mtest (kN-m.)	Mtheory (kN-m.)	Mtest/Mtheory
B1_SF0_0D	79.96	1.13	153	33.18	30.88	1.075
B2_SF0_5D	76.56	1.01	153	31.77	30.88	1.029
B3_SF0_8D	68.54	0.62	153	28.44	30.88	0.921
B4_SF10_8D	77.28	1.07	291	32.07	30.88	1.039
B5_SF20_8D	82.75	1.11	315	34.34	30.88	1.112

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมซิลิกาฟุมภายใต้สภาวะการกัดกร่อนของโซเดียมคลอไรด์ โดยเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานในกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันทั้งด้านการผสมซิลิกาฟุมและระยะเวลาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1 การผสมซิลิกาฟุมช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ลดโอกาสการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และลดการสูญเสียหน้าตัดเหล็กจากการกัดกร่อน ส่งผลให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

4.1.2 คานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุมมีค่าการไหลของกระแสไฟฟ้าสูง แสดงถึงความพรุนที่มากกว่าและเสี่ยงต่อการกัดกร่อนสูงกว่า

4.1.3 คานที่ผสมซิลิกาฟุมในอัตรา 10–20% แสดงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า และสามารถรับโมเมนต์ดัดได้มากกว่าคานที่ไม่ได้เติมซิลิกาฟุม

4.1.4 การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุมช่วยให้เนื้อคอนกรีตหนาแน่นขึ้น ลดช่องว่างภายใน และลดการแพร่กระจายของไอออนคลอไรด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.1.5 คานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุมแต่ผ่านการเร่งการกัดกร่อนมีการลดลงของกำลังรับแรงดัดมากกว่าคานที่ผสมซิลิกาฟุม

4.1.6 คานที่ผสมซิลิกาฟุม โดยเฉพาะในอัตราส่วน 20% มีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดสูงสุด ขณะที่คานที่ไม่ผสมซิลิกาฟุมถูกเร่งการกัดกร่อนเป็นเวลา 8 วัน มีค่าการรับโมเมนต์ดัดลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นๆ

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ควรพิจารณาผสมซิลิกาฟุมในช่วง 10–20% หากต้องใช้งานในพื้นที่เสี่ยงต่อคลอไรด์ โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟุมระหว่างร้อยละ 10-20 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและความทนทานต่อคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ที่ให้

ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM C494/C494M-17 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
- [2] CPAC (2560). คอนกรีตเทคโนโลยี . <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063>.
- [3] นุชิต ศิริทองคำ (2542). การแก้ไขปัญหาดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้ดินเคลย์นาหว่านเป็นวัสดุธรรมชาติวิทยาในการปรับปรุงดิน. ส่วนแร่โลหะ สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี. <http://library.dmr.go.th/elib/cgi-bin/opacexe.exe?op=mmvw&db=Main&skin=s&mmid=10482&bid=10296>.
- [4] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2550). TCA e-magazine วารสารคอนกรีตสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ฉบับที่ 1 ประจำเดือนสิงหาคม 2550.
- [5] อธิภพ ศรีบุญเรือง (2558). ผลกระทบของความเค็มของผิวดินบนต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] มงคล จิรวัชรเดช (2557). ออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. หนังสือ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พิมพ์ครั้งที่ 1.
- [7] มทข. 101-2545 มาตรฐานงานคอนกรีต และคอนกรีตเสริมเหล็ก
- [8] มทข. 103-2545 มาตรฐานงานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต
- [9] มยผ. 1201 50 มาตรฐานการทดสอบหาขนาดผลของมวลรวม (ASTM C33) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
- [10] มยผ. 1506-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีทดสอบหาค่าการสักร่อนของเหล็กเสริม (Half-Cell Potential)
- [11] สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. การทดสอบมาตรฐาน NT Build 356. https://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/348515?Resolve_DOI=10.14457/KMUTT.the.2014.153
- [12] วิเชียร ขาลี (2557). การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจาก. งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [13] ศักดิ์จุฬา นามจันทร์ (2559). ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกวแทนที่บางส่วนของทรายภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [14] อาณสิทธิ์ การินทอง (2562). พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้ภาวะการกัดกร่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] อานนท์ วงษ์แก้ว (2558). ผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล. งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [16] อานนท์ วงษ์แก้ว (2560). การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม. งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.