

อิทธิพลของคลอไรด์ต่อกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

Influence of Chloride on the Compressive Strength of Reinforced Concrete Columns

ณัฐพล โสมวงศ์¹, ศรัญญู ชัยวิเชียร² และ ปิโยรส ทะเสนฮศ^{3*}

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดสระบุรี

² สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดสระบุรี

³ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดสระบุรี

Corresponding: Piyoros.ta@rmutti.at.th

บทคัดย่อ

การกัดกร่อนภายในโครงสร้างคอนกรีตเป็นปัญหาที่ส่งผลให้องค์อาคารมีความสามารถในการรับแรงลดลง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของคลอไรด์ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีตัวแปรคือ การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม อัตราการกัดกร่อนของคลอไรด์ และรูปแบบการเสริมแรง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ขนาดตัวอย่าง 20x20x80 เซนติเมตร หลังการบ่ม 28 วัน ภายใต้การกัดกร่อนจากคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบแรงดันประจุจากมาตรฐาน NT Build 356 ความเข้มข้นสารละลายร้อยละ 5 แรงดันไฟฟ้า 18 โวลต์ แรงไฟเป็นระยะเวลาที่ 1, 4 และ 8 วัน และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) จากนั้นทดสอบแรงกดจนกระทั่งเกิดการวิบัติ จากการศึกษาพฤติกรรมและการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านน้อยลงเมื่อซิลิกาฟุ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กมาก จึงสามารถเข้าไปอุดโพรงในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดความทึบแน่น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นตัวกลางในการเร่งผ่านได้น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่มและเมื่อเสาตัวอย่างเกิดการกัดกร่อนจากสนิม การรับแรงก็จะลดลงตามไปด้วย ด้านการเสริมแรงด้วยแผ่น CFRP พบว่าสามารถเพิ่มกำลังได้ทั้ง 2 รูปแบบ แต่ลักษณะการวิบัติจะแตกต่างกันโดยการพันห้วท้ายจะเกิดการวิบัติแบบเฉียบพลันบริเวณกลางเสาซึ่งเป็นส่วนไม่ได้เสริมแรง ขณะที่รูปแบบการพันทั้งแท่งตัวอย่าง แผ่น CFRP จะช่วยโอברัดวัสดุไม่ให้หลุดร่อนออกมาแต่หากเกินขีดจำกัดที่รับได้จะเริ่มเกิดการฉีกขาดจนเกิดการวิบัติในที่สุด

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด; คลอไรด์; ซิลิกาฟุ่ม; เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. บทนำ

อาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทย นิยมก่อสร้างด้วยระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีการคือนำไปหล่อขึ้นรูปเป็นโครงสร้างต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางมีความแข็งแรงก็ย่อมมีการเสื่อมสภาพจากแวดล้อมที่ต้องเผชิญ ยกตัวอย่างพื้นที่ดินเค็มในภาคอีสานส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีการแพร่กระจายไปในพื้นที่ต่างๆประมาณร้อยละ 28.7 ของพื้นที่ทั้งหมด[1] โดยอาศัยน้ำบาดาลเป็นตัวละลายและนำพาไปตามรอยแยกในดิน คลอไรด์เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้อายุการใช้งานขององค์อาคารลดลง โดยเฉพาะเสาเป็นชิ้นส่วนหลักในการรับแรง ในชิ้นส่วนเสาจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม คลอไรด์จะซึมผ่านความพรุนของเนื้อคอนกรีตโดยมีน้ำเป็นตัวกลางพาให้คลอไรด์แทรกซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้[2] หากมีปริมาณคลอไรด์ที่เพียงพอที่จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิม สามารถสังเกตเห็นได้จากคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวหรือเกิดการปริแตกที่ผิวของคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการรับกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กลดต่ำลง จึงทำให้เกิดคำถามอื่นๆตามมา เช่น ความปลอดภัยของโครงสร้าง ความสามารถในการใช้งานของโครงสร้างต่อไป รวมไปถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น

เพื่อให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ การใช้วัสดุปอซโซลานมาแทนที่วัสดุประสานจะช่วยต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี[3] สารปอซโซลานคือวัสดุประเภทซิลิกา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดตัวเชื่อมประสานหรือ Calcium Silicate Hydrate เพิ่มขึ้นและยังลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้น[4] ทำให้การรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้สารปอซโซลานประเภทซิลิกาฟุ่มถูกนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ถึงกว่า 100 เท่าและอยู่ในสภาพที่ไม่เป็นผลึก[5] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ซิลิกาฟุ่มสามารถเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเนื้อของคอนกรีตทำให้เกิดความทึบแน่น โดย Khan and Siddique(2011)รายงานว่า ซิลิกาฟุ่มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ลดการซึมผ่านของน้ำ ลดโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เพิ่มความต้านทานการเกิดสนิม เพิ่มความต้านทานของซัลเฟต รวมถึงเพิ่มความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวมของคอนกรีตด้วย[6]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ผสมในคอนกรีตเสริมเหล็กต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีระยะเวลาการทดสอบที่ทำให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนเท่ากัน ศึกษากำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งจากการประยุกต์มาตรฐาน NT Build 356[7] เมื่ออัตราการกัดกร่อนต่างกัน นอกจากนี้ยังศึกษารูปแบบการเสริมแรงด้วยการใช้แผ่น CFRP ในการเสริมกำลัง เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์

2.วัตถุประสงค์

- 1.เพื่อศึกษาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ผสมในคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกันต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีระยะเวลาการทดสอบที่ทำให้เหล็กกัดกร่อนเท่ากัน
- 2.เพื่อศึกษากำลั้งอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอัตราการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่ต่างกัน
- 3.เพื่อศึกษารูปแบบการเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อถูกกัดกร่อนจากคลอไรด์ต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

3. วัสดุและวิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของคลอไรด์ที่มีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0, 10 และ 20%โดยน้ำหนัก ตัวอย่างเสาคอนกรีตถูกบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ก่อนนำไปผ่านกระบวนการเร่งการกัดกร่อนด้วยสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 5% โดยประยุกต์จากมาตรฐาน NT Build 365 [7] ใช้กระแสไฟฟ้าแรงดัน 18 โวลต์ จากนั้นทำการทดสอบความสามารถการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่าง เพื่อประเมินผลกระทบของการกัดกร่อน ตัวอย่างจะถูกแบ่งระยะเวลาการกัดกร่อน ได้แก่ ไม่มีการกัดกร่อน (0วัน) กัดกร่อนระยะเริ่มต้น(1วัน) กัดกร่อนระยะกลาง(4วัน) กัดกร่อนระยะปลาย(8วัน) จากนั้นตัวอย่างที่แสดงความเสียหายมากที่สุดจะถูกนำมาเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ CFRP โดยใช้วิธีพันรอบเสาในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ผลทดสอบจะครอบคลุมทั้งด้านกำลังอัด ความคงทน และศักยภาพในการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะการกัดกร่อน

3.1 วัสดุและส่วนผสม

- 3.1.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คุณสมบัติตรงตาม มอก.15เล่ม1-2555[8] เป็นวัสดุประสานหลัก
- 3.1.2 ซิลิกาฟุ่มใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0,10 และ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์
- 3.1.3 มวลรวมหยาบปรับให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง โดยใช้หินภูเขาขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว
- 3.1.4 มวลรวมละเอียด ในงานวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำโขงปรับให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.90
- 3.1.5 เหล็กเสริมในเสาตัวอย่างใช้ DB 12 มม.SD 40 เป็นเหล็กแกนเสา และ เหล็ก RB 6 มม. SR 24เป็นเหล็กปลอกมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 24-2559[9] และ มอก.20-2559[10] ตามลำดับ
- 3.1.6 วัสดุที่ใช้เสริมแรงใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ CFRP (Hydrasheet CF 300) ซึ่งมีความแข็งแรงและมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง ทนไฟ ขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้ดี ทนการกัดกร่อน ทนต่อแรงเฉือนและการตัดสูง ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพโครงสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติความแข็งแรงในการเฉือนและการเสีรูป[11] โดยคุณสมบัติแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ CFRP (Hydrasheet CF 300)

Grade	Hydrasheet CF200	Hydrasheet CF300
Weight ,g/m ²	200	300
Thickness ,mm	0.11	0.16
Tensile Strength ,kgf/cm ²	390	590
Tensile Strength Design ,kgf/cm ²	35,500	35,500
Tensile Modulus Design ,kgf/cm ²	2.35x10 ⁸	2.35x10 ⁸
Delivery ,m x m	0.5 x 10	0.5 x 10

3.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ออกแบบตามมาตรฐาน ACI.ให้กำลังอัดประลัยที่ 240 กก./ซม² ค่ายุบตัว 8-10 เซนติเมตรปริมาณฟองอากาศร้อยละ 2 แบ่งเป็น Mix1-240 ksc.SF0% , Mix2-240 ksc.SF10% และ Mix3-240 ksc.SF20% ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของคอนกรีตโดยน้ำหนัก

Mix No.	ซิลิกาฟูม	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	หิน	สารลดน้ำ	หน่วย
Mix1_240 ksc.SF0%	-	292.00	186.00	876.00	1006.00	2.190	kg/m ³
Mix2_240 ksc.SF10%	29.20	263.80	186.00	876.00	1006.00	3.942	kg/m ³
Mix3_240 ksc.SF20%	58.40	233.60	186.00	876.00	1006.00	8.03	kg/m ³

หมายเหตุ: SF = ซิลิกาฟูม

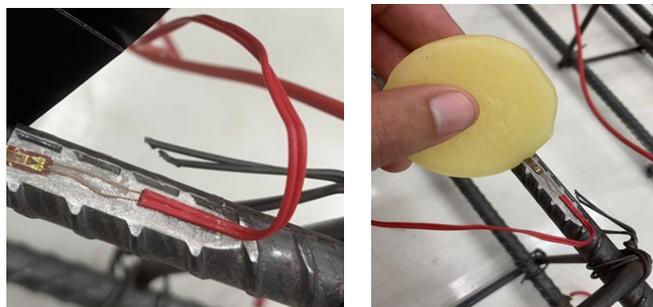
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างทดสอบ การเร่งการกักกร่อนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี การทดสอบทางกลเพื่อหาค่าความแข็งแรง และการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังกับตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยใช้เกณฑ์การประเมินเชิงกล เช่น ความสามารถในการรับแรงสูงสุด (Ultimate Load) ค่าความแข็ง (Stiffness) และค่าความเหนียว (Toughness)

3.3.1 วิธีการเตรียมเสาตัวอย่าง

ในงานวิจัยครั้งนี้กำหนดหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ตัวอย่าง ขนาด 20 x 20 x 80 เซนติเมตร โดยมีเหล็กแกนเสา 4 ท่อนคือเหล็กDB12 SD40 ส่วนเหล็กปลอกใช้เหล็ก RB6 SR24 ระยะห่างของปลอกอยู่ที่ 15 เซนติเมตร จากนั้นนำเหล็กแกนเสามาติดตั้ง Electrical Strain Gauge เพื่อเก็บค่าความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเสา โดยการติดจำเป็นต้องขัดเหล็กให้เกิดผิวเรียบแล้วเช็ดให้สะอาดแล้วติด Electrical Strain Gauge

ดังภาพที่ 3.2 เมื่อเสร็จตามขั้นตอนที่กล่าวมา นำเหล็กเข้าไปวางบนแบบพิมพ์เพื่อทำการหล่อเป็นเสาตัวอย่างโดยใช้ อัตราส่วนผสมตามที่ออกแบบไว้ตามตารางที่ 3.2 และบ่มด้วยการพันให้ครบ 28 วัน ดังภาพที่ 3.3



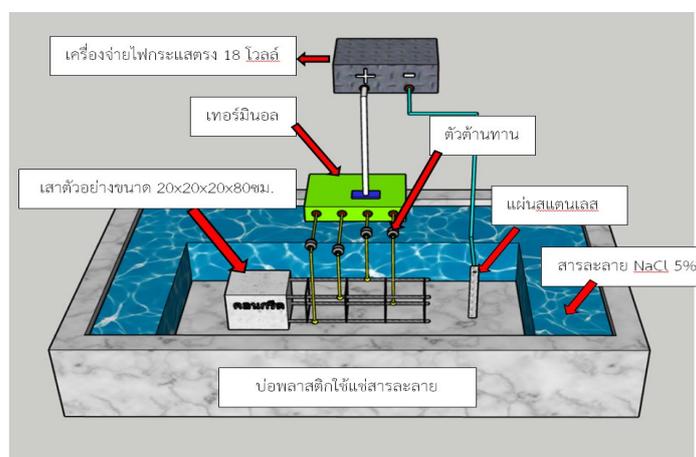
ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงการติดตั้ง Electrical Strain Gauge



ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.2 วิธีกรเร่งกระแสไฟ

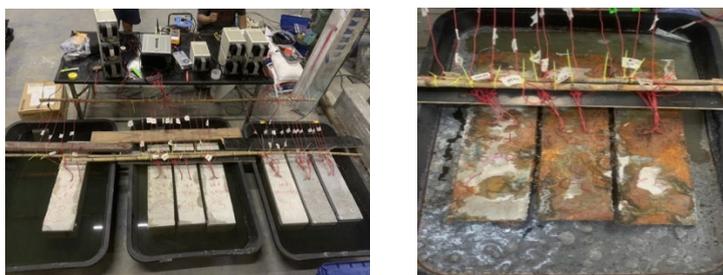
การเกิดสนิมโดยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เรียกว่า การเร่งปฏิกิริยากัดกร่อนด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้หลักการของ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพื่อเร่งการเกิดสนิมบนโลหะ ประยุกต์มาจากมาตรฐาน NT Build 356[7] ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงการเร่งกระแสไฟเพื่อให้เกิดกระบวนการเกิดสนิม

วิธีการคือ นำตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมภายในคอนกรีตนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าเพื่อจำลองสภาพดินเค็มที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพ เหล็กทำหน้าที่เป็นแอโนด (Anode) เป็นขั้วบวก จะสูญเสียอิเล็กตรอนแล้วจะไหลไปสู่ขั้วลบผ่านสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยแผ่นสแตนเลสทำหน้าที่เป็นแคโทด (Cathode) จากนั้นเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรง ตรวจสอบกระแสไฟฟ้าทุก 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่กำหนด

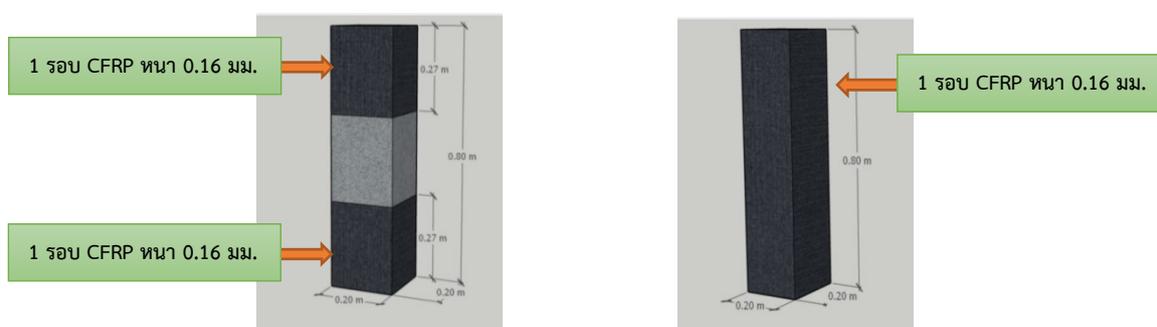
งานวิจัยนี้ใช้วิธีการเร่งการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้า ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มแล้วเป็นเวลา 28 วัน จะถูกนำไปแช่ในอ่างพลาสติกซึ่งบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 คิดเป็นอัตราส่วน 1 กิโลกรัมของโซเดียมคลอไรด์ ต่อน้ำ 3.42 กิโลกรัม จากนั้นดำเนินการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบขนานกับเหล็กเสริมในคอนกรีตเพื่อเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมโดยวิธีนี้ประยุกต์มาจากมาตรฐาน NT Build 356 [7] ทุกตัวอย่างใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 18 โวลต์ เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 1 วัน 4 วันและ 8 วัน ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงตัวอย่างการเร่งกระแสไฟและการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์

3.3.3 การเสริมกำลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงชนิด CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการบ่ม 28 วัน โดยไม่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม และจำลองการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์เป็นเวลา 8 วัน ก่อนเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP หนา 0.16 มม. โดยพันรอบบริเวณหัว-ท้าย (ยาว L/3) และพันทั้งแท่ง อย่างละ 1 รอบ ตามภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ภาพแสดงลักษณะรูปแบบการเสริมแรง

3.3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6272[12] โดยจะให้น้ำหนักค่อยๆ ถ่วงแรงลงไปให้เสาตัวอย่างจนเกิดการวิบัติ ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้เราติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด (Strain Gauge) และติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการขยายตัวของเสาตัวอย่างเนื่องจากแรงอัด Linear variable differential transformer(LVDT) ดังภาพที่ 3.7 เพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตัวอย่างและเปรียบเทียบกำลังการรับน้ำหนักต่อไป

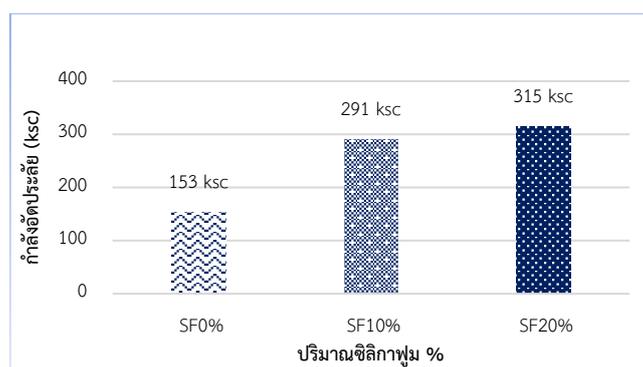


ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงการทดสอบการรับแรงอัดทั้งแบบธรรมดาและแบบเสริมแรง

4. ผลการวิจัย

4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C-192[13] ตัวอย่างแต่ละชุดมีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มต่างกันคือ 0%, 10% และ 20% ก่อนนำมาทดสอบกำลังอัดหลังจากบ่มครบ 28 วันจะได้ค่ากำลังอัดตามที่แสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกแต่ละอัตราส่วน

ผลทดสอบ ซิลิกาฟุ่ม 0% ให้กำลังอัดประลัย 153 ksc ผสมซิลิกาฟุ่ม 10% กำลังอัดประลัย 291 ksc และ ผสมซิลิกาฟุ่ม 20% กำลังอัดประลัย 315 ksc เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มเข้าไปในคอนกรีต กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยเฉพาะในช่วง 0-10% อัตราการเพิ่มกำลังสูงขึ้นประมาณ 90% ผลทดสอบแสดงให้เห็น

เห็นได้ว่าซิลิกาฟูมที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กจะช่วยเข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดความทึบแน่นรวมถึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกส่งผลให้มีกำลังอัดที่สูงขึ้น

4.2 กำลังรับดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างเสาสั้น ขนาดหน้าตัด 20×20 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร เสริมเหล็กแกนด้วยเหล็กข้ออ้อย DB12 (SD40) จำนวน 4 เส้น และเหล็กปลอก RB6 (SR24) ตามมาตรฐาน มอก. 24-2559[9] และ มอก. 20-2559[10] ตามลำดับ โดยผลการทดสอบเหล็กเสริมแสดงในตารางที่ 4.1

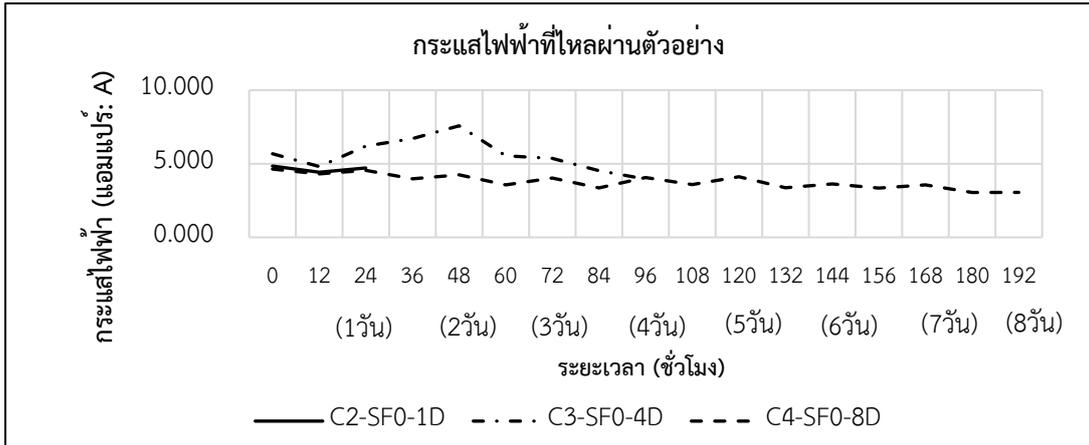
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเส้นกับมาตรฐาน มอก.

รายการ	มอก.20-2543 SR24	ผลทดสอบ SR24	มอก.24-2559 SD40	ผลทดสอบ SD40
ประเภทเหล็ก	RB 6 มม.	RB6 มม.	DB 12 มม.	DB 12 มม.
Yield Strength	≥ 2400 ksc	2800 ksc	≥ 4000 ksc	4090 ksc
Ultimate Strength	≥ 3900 ksc	5058 ksc	≥ 4900 ksc	5164 ksc
Elongation (%)	≥ 18%	25%	≥ 14%	18%
ผลการประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

4.3 ผลทดสอบของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

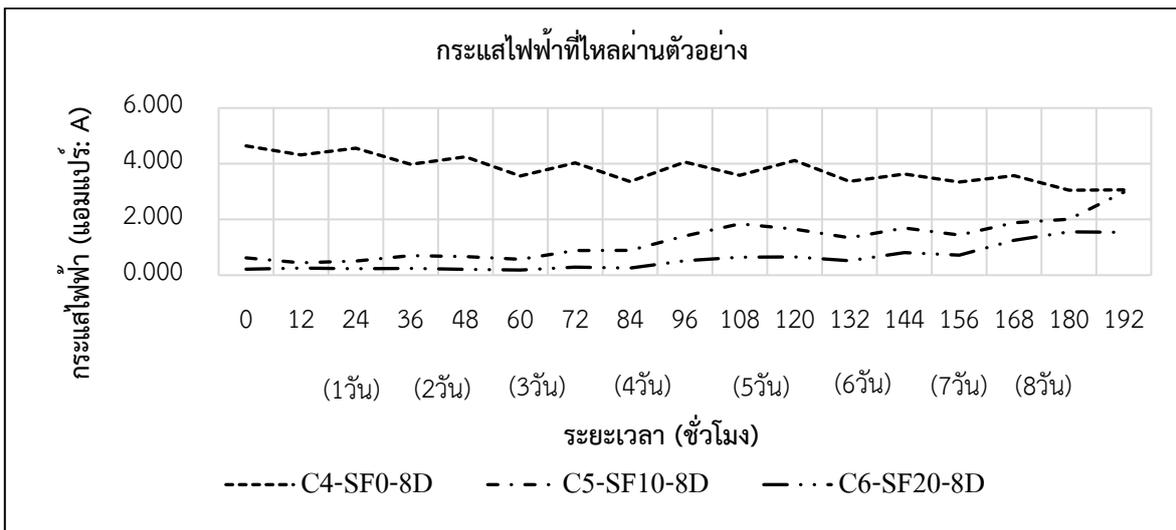
4.3.1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างชุดนี้จะวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตโดยมีอัตราส่วนผสมเท่ากันต่างกันที่ระยะเวลาในการเร่งการกักกร่อนด้วยกระแสไฟ คือ 0, 1, 4 และ 8 วัน พบว่า C2-SF0-1D มีกระแสไฟฟ้าค่อยๆลดลงแต่อาจไม่ค่อยเห็นข้อแตกต่างเพราะเวลาในการกักกร่อนเพียง 24 ชม. C3-SF0-4D กระแสไฟเพิ่มขึ้นสูงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลา 24 ถึง 48 ชม. และลดลงอย่างมีนัยยะ สาเหตุอาจเกิดจากคอนกรีตมีความทึบแน่นต่ำและเกิดการแตกร้าวทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เหล็กเสริมที่ถูกกักกร่อนทำให้เป็นสนิมมีการไหลไปผสมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ส่งผลถึงความสามารถในการนำพากระแสไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพด้อยลง กระแสไฟจึงค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วน C4-SF0-8D กระแสไฟลดลงต่อเนื่องแสดงให้เห็นถึงกระบวนการกักกร่อนเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น สรุปคือเมื่อระยะเวลาการกักกร่อนเพิ่มขึ้นการเกิดสนิมก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการกักกร่อน

กลุ่มที่ 2 เป็นการทดสอบกระแสไฟในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม 0%, 10% และ 20% โดยเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟเป็นเวลา 8 วันเท่ากัน เพื่อศึกษาผลของซิลิกาฟุ่มต่อการกักกร่อนของเหล็กเสริม ผลจากการวัดกระแสไฟพบว่า C4-SF0-8D (ไม่มีซิลิกาฟุ่ม) มีแนวโน้มของกระแสไฟลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงความทึบแน่นค่อนข้างต่ำ ความพรุนค่อนข้างสูง ทำให้กระแสไฟไหลผ่านคอนกรีตเข้าสู่เหล็กเสริมมากที่สุด กลุ่มตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่ม C5-SF10-8D และ C6-SF20-8D กระแสไฟค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 60 ชม.แรก สันนิษฐานว่าอาจเกิดการกักกร่อนค่อนข้างน้อย เป็นเพราะอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่ช่วยอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านค่อนข้างยาก แต่หลังจาก 84 ชม. กระแสไฟเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ บ่งบอกถึงเสาคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าวและการกักกร่อนที่รุนแรงขึ้น



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าแต่ละอัตราส่วนต่อช่วงเวลา

4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต

หัวข้อนี้กล่าวถึงการสังเกตลักษณะทางกายภาพของเสาคอนกรีตหลังการทดสอบการกัดกร่อน เพื่อประเมินผลกระทบจากการกัดกร่อนและการเสริมแรง โดยพิจารณารอยแตกร้าว การหลุดร่อน สีเปลี่ยนจากสนิม และลักษณะเหล็กเสริมภายใน ซึ่งช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างและการกัดกร่อนในแต่ละตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเท่ากันแต่ระยะเวลาการกัดกร่อนแตกต่างกันในแต่ละระดับ ซึ่งจะมีลักษณะทางกายภาพในแต่ละระดับการกัดกร่อน คือ C1-SF0-0D ตัวอย่างนี้จะเป็นตัวอย่างควบคุมจะไม่มีกัดกร่อนเลย ระดับกัดกร่อนเริ่มต้น 1 วัน C2-SF0-1D ดังภาพที่ 4.4(ก) ระยะกลาง C3-SF0-D4 ภาพที่ 4.4(ข) ระยะปลาย C4-SF0-D8 ดังภาพที่ 4.4 (ค)



ภาพที่ 4.4 (ก) C2-SF0-1D



ภาพที่ 4.4 (ข) C3-SF0-D4



ภาพที่ 4.4 (ค) C4-SF0-D8

กลุ่มตัวอย่างที่ 2 ทดสอบการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนผสมซิลิกาฟุ่มที่แตกต่างกัน พบว่าการเติมซิลิกาฟุ่มในอัตรา 10% (C5-SF10-8D) และ 20% (C6-SF20-8D) ช่วยลดความเสียหายจากการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม(C4-SF0-8D) โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพหลังการทดสอบ



ภาพที่ 4.5 (ก) C4-SF0-8D



ภาพที่ 4.5 (ข) C5-SF10-8D



ภาพที่ 4.5 (ค) C6-SF20-8D

จากภาพที่ 4.5(ก) พบรอยแตกร้าวจำนวนมาก โดยเฉพาะแนวตั้งบริเวณกลางและด้านข้างของคอนกรีตมีคราบสนิม แสดงถึงปริมาณสนิมที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กภายใน ภาพที่ 4.5(ข) เกิดรอยร้าวขนาดเล็กถึงปานกลาง บางแนวอาจเชื่อมต่อกันแต่ไม่ลึกหรือกว้างเท่า C4-SF0-8D และมีคราบสนิมเล็กน้อย ส่วนใหญ่ยังอยู่ระดับผิวเผิน แสดงถึงการกัดกร่อนในระดับปานกลาง และประสิทธิภาพของซิลิกาฟุ่มในการชะลอการกัดกร่อนเริ่มปรากฏชัด ภาพที่ 4.5(ค) ตัวอย่าง C6-SF20-8D ส่วนใหญ่สภาพพื้นผิวคอนกรีตที่ยังเรียบเนียน มีเพียงรอยแตกกลายงาเล็กน้อย และแทบไม่พบคราบสนิม บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มทดลองอื่น

กลุ่มตัวอย่างที่ 3 เป็นการนำตัวอย่างเสาที่มีการกัดกร่อนเป็นเวลา 8 วัน ที่ไม่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม เป็นเงื่อนไขเดียวกันกับตัวอย่าง C4-SF0-8D ดังนั้น ลักษณะทางกายภาพจะเป็นในลักษณะเดียวกัน ดังภาพที่ 4.5 (ก)

ข้อสังเกตหากดูจากลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม แสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนเริ่มต้นจะเกิดขึ้นบริเวณระยะหุ้มของคอนกรีต เนื่องจากเป็นจุดที่คลอไรด์แทรกซึมได้ง่าย สาเหตุเพราะลูกปูนจะมีส่วนผสมแค่

ปูนกับทรายไม่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูม แม้เสาตัวอย่างจะมีเนื้อคอนกรีตที่ทึบแน่นแต่ยังมีรอยร้าวเกิดขึ้น เห็นได้ชัดจากตัวอย่าง C6-SF20-8D

4.3.3 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กเสริม

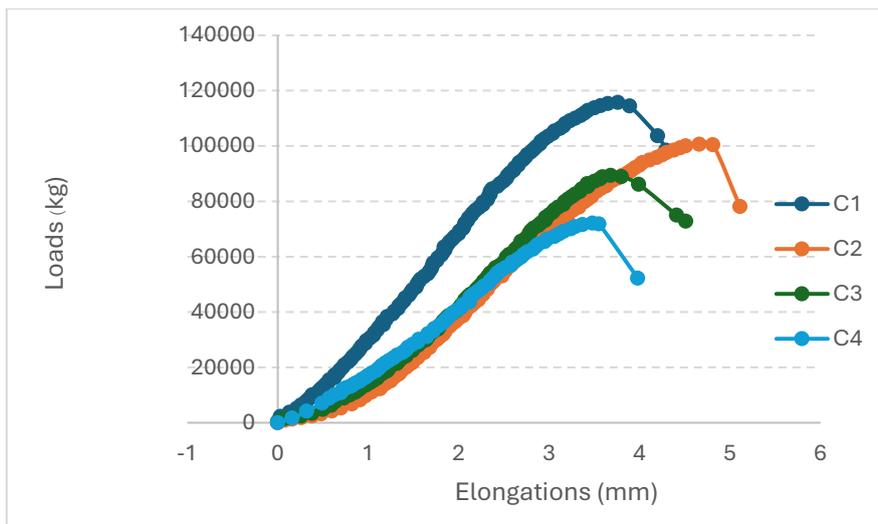
พฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวลดลง ทำให้ความสามารถในการรับแรงของเสาลดลงตาม หลังการทดสอบพบว่าจุดที่เหล็กเกิดสนิมส่วนใหญ่มักเกิดบริเวณที่สูญเสียชั้นฟิล์มที่ป้องกันผิวเหล็ก เช่น ปลายเหล็กที่ถูกตัดด้วยความร้อนหรือจุดตัดโค้งที่มีรอยแตกร้าว ซึ่งส่งผลให้เกิดสนิมได้ง่ายและรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือสารละลายไอออน จะเห็นได้ชัดจากลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง C4-SF0-8D เสียหายมากที่สุด เนื่องจากถูกกัดกร่อนนานถึง 8 วัน และไม่มีซิลิกาฟูมช่วยเพิ่มความทึบแน่นของคอนกรีตแสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กเสริมเสาตัวอย่าง C4-SF0 -8D

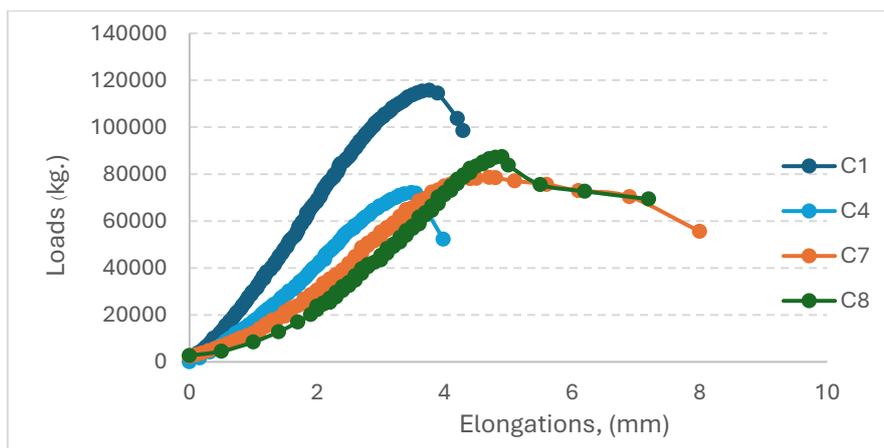
4.4.4 พฤติกรรมของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อหน้าตัด ลักษณะของแรงกระทำ คุณภาพวัสดุ และสภาพแวดล้อม การศึกษาพฤติกรรมเหล่านี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการประเมินความสามารถในการรับแรง หัวข้อนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งในด้านวัสดุ (เช่น การใช้ซิลิกาฟูม) ระยะเวลาการกัดกร่อน และการเสริมแรงด้วย CFRP เพื่อเข้าใจกลไกการพังทลายที่เกิดขึ้น ผลการทดสอบที่ได้สามารถสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกันของตัวอย่างเสาแต่ละกลุ่มอย่างชัดเจน ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป



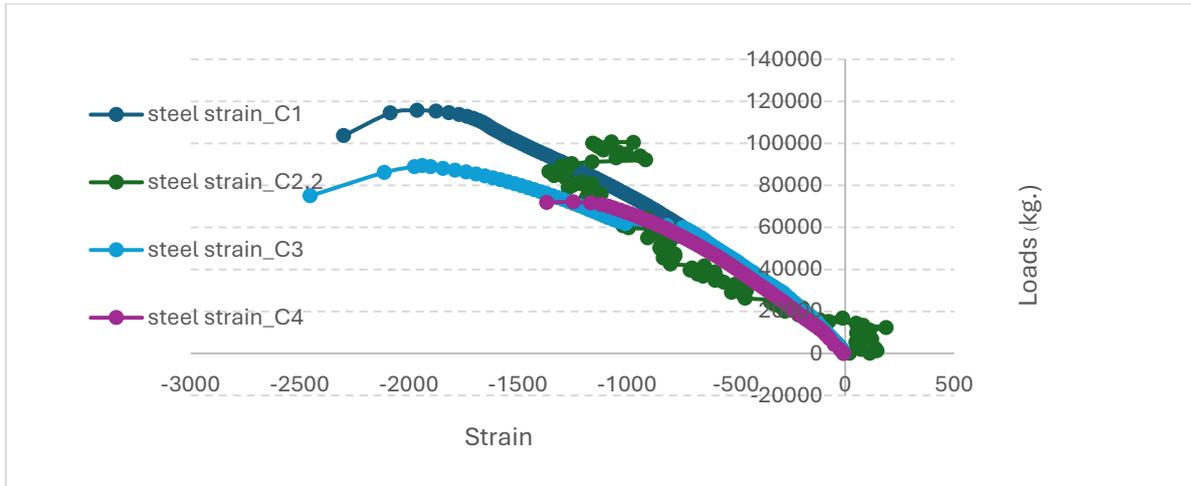
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่าง โดยมีระยะการกักกร่อนเหล็กเสริม จากคลอไรด์ต่างกัน

จากภาพที่ 4.7 แสดงผลทดสอบของเสาตัวอย่างชนิดบล็อกเดี่ยวที่ถูกกักกร่อนด้วยคลอไรด์ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นพฤติกรรมการวิบัติแบบไม่มีความเหนียวและเกิดการพังทลายอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมของเสาบล็อกเดี่ยว อาจจัดอยู่ในประเภทเสาที่ไม่มีการโอบรัด (unconfined column) [14-15] เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสา เหล็กบล็อกจะรับน้ำหนักบรรทุกจนเกิดความเสียหาย จากนั้นน้ำหนักจะถูกถ่ายไปส่วนกลางของคอนกรีตและเหล็กแกน ส่งผลให้เริ่มมีการสูญเสีย Stiffness โดยเฉพาะเหล็กแกนซึ่งจะเริ่มร้าวหรือโก่งเดาะ เมื่อเสารับน้ำหนักบรรทุกอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคอนกรีตเกิดการบดอัด (Crushing of concrete) เสาจะเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว [18] ดังภาพที่ 4.11 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการวิบัติของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กจะขึ้นอยู่กับกำลังวัสดุของคอนกรีตและเหล็กแกน อย่างไรก็ตามการทดสอบครั้งนี้การเสริมเหล็กบล็อกจะมีระยะห่างคงที่ตลอดช่วงความยาว เพื่อเลียนแบบสภาพการใช้งานจริงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในงานก่อสร้างทั่วไป จึงสังเกตได้ว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นใกล้บริเวณปลายของตัวอย่างทั้ง 2 ด้าน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับแรงรวมจากทั้งแรงเฉือนและแรงอัด ผลทดสอบยังพบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่าง จะลดลงตามระยะเวลาการกักกร่อนที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ไม่ถูกกักกร่อนเลย (0วัน)รับน้ำหนักได้สูงสุดที่ 115,710 กิโลกรัม และลดลงเหลือ 100,631, 89,379 และ 72,145 กิโลกรัม สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการกักกร่อนด้วยคลอไรด์เป็นระยะเวลา 1, 4 และ 8 วัน คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 100%, 86.9%, 77.2% และ 62.3% เมื่อเปรียบเทียบกับเสาควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงตามระยะเวลาการกักกร่อนที่มากขึ้น ให้ผลในทำนองเดียวกันกับ [16] นอกจากนี้ยังพบว่าเสาตัวอย่างควบคุมจะมีค่า Stiffness มากที่สุดและเสาที่ถูกกักกร่อนทั้งหมดจะมีค่า Stiffness ใกล้เคียงกัน



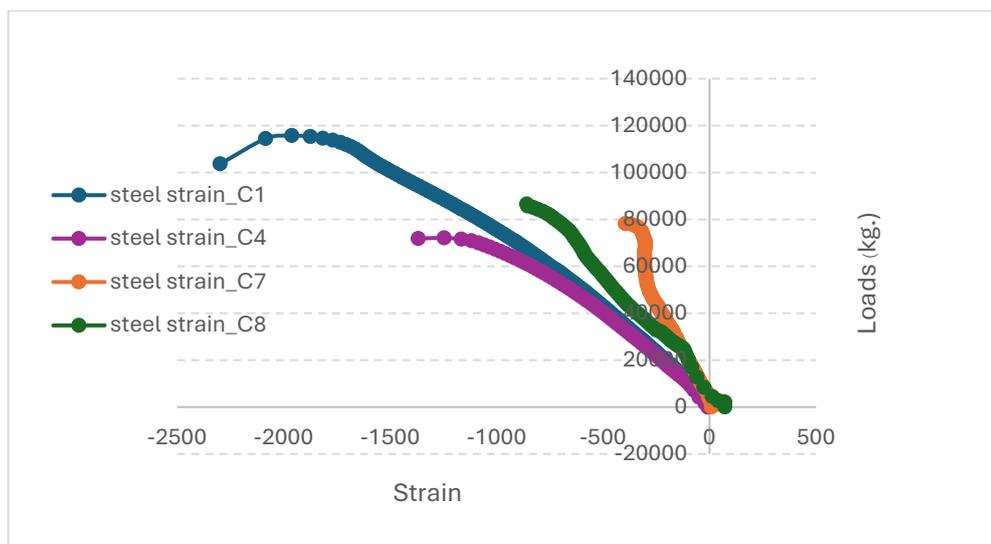
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมแรงต่างกัน

จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่าง ถูกกักร่อนจากคลอไรด์ที่ระยะเวลา 8 วันเท่ากัน โดยเปรียบเทียบเสาที่ไม่ได้เสริมแรง C4 กับเสาที่เสริมแรงด้วยแผ่น CFRP แบบพันบางส่วน C7 และพันรอบทั้งหมด C8 ผลทดสอบพบว่าตัวอย่างเสา C7 และ C8 มีความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.8 และ 21.1 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบต่างกันส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักได้ไม่มากนัก เมื่อเทียบกับเสาตัวอย่าง C4 อาจเป็นเพราะจำนวนรอบที่พันน้อยเกินไป นอกจากนี้การลดลงของกำลังรับน้ำหนักในเสาตัวอย่างที่ถูกกักร่อนจากคลอไรด์ไม่ได้เกิดจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่หายไปเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีต เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ถูกกักร่อนจากคลอไรด์เกิดการแตกร้าวในระหว่างทดสอบ โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟูม เช่น C4 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวชัดเจน ขณะที่ C7 และ C8 แสดงพฤติกรรมที่มีความเหนียวมากกว่าเสาควบคุม โดยอาจจัดอยู่ในกลุ่มเสาที่มีการโอบรัดระดับปานกลาง (Moderately-Confined Column) [14] เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถช่วยเพิ่มการโอบรัดและป้องกันการพัฒนารอยแตกร้าวของเสาตัวอย่างดังภาพที่ 4.12 และ 4.13 โดยให้ผลทดสอบในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยอื่น [17] ที่แสดงให้เห็นว่า CFRP ช่วยยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความเหนียวของโครงสร้างคอนกรีตที่ผ่านการกักร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4.9 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่างโดยมีระยะการกักต่อนเหล็กเสริมจากคลอไรด์ต่างกัน

ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่างที่มีระยะเวลากักต่อนต่างกัน พบว่า เสาตัวอย่าง C1, C2 และ C3 เหล็กเกิดการคราก โดยมีค่าความเครียดเท่ากับ -2,297, -2,318 และ -2,451 ไมโครสเตรน หลังตัวอย่างรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเสาตัวอย่างควบคุมหรือเสาที่มีการกักต่อนของเหล็กแกนช่วงเริ่มต้น ความสามารถในการรับน้ำหนักยังขึ้นอยู่กับกำลังวัสดุของคอนกรีตและเหล็กแกน ในขณะที่ เสาตัวอย่าง C4 มีการกักต่อนของเหล็กแกนและเกิดรอยแตกร้าวมากที่สุด แต่มีค่าความเครียดของเหล็กเพียง -1,366 ไมโครสเตรน ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 71,838 กิโลกรัม โดยที่เหล็กไม่เกิดการคราก แต่ลักษณะของการวิบัติเกิดจากการบดอัดของคอนกรีตก่อน เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตลดลงจากการกักต่อนและรอยร้าว จากการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเสาตัวอย่างที่ถูกกักต่อนในอัตราที่สูงมากขึ้น มีแนวโน้มที่วัสดุคอนกรีตจะเกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กจะเกิดการคราก ฉะนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในเสาจึงขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมากกว่ากำลังของเหล็กเสริม



ภาพที่ 4.10 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมและน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมแรงต่างกัน

ภาพที่ 4.10 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมและน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมแรงต่างกัน โดยตัวอย่างเสาถูกกักต่อนของเหล็กแกนมากที่สุด (ระยะเวลาเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า 8 วัน) ผลทดสอบพบว่าเหล็กแกนในเสาตัวอย่างมีค่า ความเครียดเท่ากับ -1,366, -394 และ -853 ที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 71,838, 78,146 และ 85,725 กิโลกรัม ของตัวอย่าง C4, C7 และ C8 ตามลำดับ โดยเหล็กแกนของตัวอย่างเสาทั้ง 3 ต้นไม่เกิดการครากตัว นอกจากนั้นพบว่าเสาตัวอย่างที่มีการเสริมแรงด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ทั้งสองรูปแบบ ความเครียดของเหล็กในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะน้อยกว่าตัวอย่างเสาควบคุมและเสาที่ไม่ได้เสริมแรง อาจเกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกถูกแบ่งทั้ง เหล็กแกน คอนกรีต และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ฉะนั้นค่าความเครียดในเหล็กแกนจึงมีค่าต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กมีการรับน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเสาที่ไม่ได้มีการเสริมแรง และลักษณะการวิบัติเกิดจากการที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ฉีกขาดทั้งสองรูปแบบ โดยอาจกล่าวได้ว่าเสาเกิดการวิบัติเมื่อวัสดุคอนกรีตและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไม่สามารถรับน้ำหนักได้

4.4.5 ลักษณะการวิบัติของเสาตัวอย่างหลังการทดสอบแรงกด

เมื่อเสาถูกกระทำด้วยแรงกดจนถึงจุดวิบัติ จะเกิดลักษณะความเสียหายที่สะท้อนถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายของเสาตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมแรงกับเสาตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยแผ่น CFRP ภายหลังจากกระบวนการกักต่อนด้วยคลอไรด์ เป็นเวลา 8 วันเท่ากัน



ภาพที่ 4.11 C4-SF0-8D



ภาพที่ 4.12 C7-SF0-8D-CF1



ภาพที่ 4.13 C8-SF0-8D-CF2

จากตัวอย่าง C4-SF0-8D รอยแตกร้าวตามแนวตั้งและแนวเฉียงเป็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากแรงอัดร่วมกับแรงเฉือนจะเห็นได้อย่างชัดเจนถ้าเทียบกับอีก 2 ตัวอย่าง เมื่อเสารับน้ำหนักอย่างต่อเนื่องจนคอนกรีตเกิดการบดอัด (crushing) โครงสร้างของเสาจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน ดังภาพที่ 4.11 ส่วนตัวอย่าง C7-SF0-8D-CF1 สังเกตได้ว่าบริเวณกลางเสา (ส่วนที่ไม่ได้พัน CFRP) เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนอย่างรุนแรงเป็นผลจากการที่ไม่มีแรงโอบรัด พฤติกรรมนี้เป็นลักษณะ การวิบัติแบบเฉพาะจุด (Localized Failure) และ C8-SF0-8D-CF2 รอยร้าวจะมีแนวตรงหรือเฉียงบนผิวแผ่น CFRP เกิดจากแรงอัดที่เสารับแรงเกินกำลังที่รับได้และจะเกิดบริเวณที่มีความเค้นสูงสุด แผ่น CFRP จะช่วยโอบรัดวัสดุไม่ให้หลุดออกแต่หากเกินขีดจำกัดวัสดุเสริมแรงก็เริ่มฉีกขาด การวิบัติแบบนี้เป็นการวิบัติแบบควบคุมได้

5.สรุปผลงานวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ โดยเปรียบเทียบผลของการผสมซิลิกาฟูมในสัดส่วนต่าง ๆ และการเสริมแรงด้วยแผ่น CFRP หลังการกัดกร่อนแบบเร่งรัด ผลการทดสอบด้านกำลังอัด ความเสียหาย และการวิบัติ ช่วยสรุปแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สภาวะกัดกร่อนผลการศึกษารูปได้ดังนี้

5.1 การผสมซิลิกาฟูมในอัตรา 10% และ 20% ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเพราะอนุภาคของซิลิกาฟูมที่มีขนาดเล็กเข้าไปอุดช่องว่างทำให้เกิดความทึบแน่นส่งผลให้เหล็กเสริมภายในเกิดการกัดกร่อนน้อยลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม ส่วนด้านการให้กำลังซิลิกาฟูมในอัตรา 20% ให้กำลังอัดสูงสุด

5.2 ผลของการกัดกร่อน การเร่งการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้าทำให้เหล็กเสริมภายในเสาเกิดสนิม และส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเกาะของเหล็กเสริมลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดที่ลดลงตามลำดับด้วย โดยเสาที่ผ่านการกัดกร่อนเป็นเวลา 8 วัน (C4-SF0-8D) มีค่ากำลังอัดลดลงมากที่สุด

5.3 ผลของการเสริมแรงด้วยแผ่น CFRP เสาที่ได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อน สามารถช่วยฟื้นฟูกำลังอัดของเสาได้ทั้ง 2 แบบ แต่รูปแบบการเสริมแรงส่งผลต่อประสิทธิภาพการเพิ่มแรงโดยการพันทั้งความยาวของเสา

ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสามารถเพิ่มกำลังได้ถึง 21.17% เมื่อเทียบกับเสาที่ไม่มีการเสริมแรง และยังคงควบคุมการแตกร้าวให้เกิดการวิบัติแบบพลาสติก ไม่พังทลายทันที

ข้อเสนอแนะการวิจัยครั้งต่อไป

- จากการทดลองการกักคร่อนที่มีระดับต่างกันในตัวอย่างกลุ่มที่ 1 สามารถนำข้อมูลมาประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยใช้ข้อมูลการสูญเสียหน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมจากการกักคร่อนซึ่งสัมพันธ์กับกำลังรับแรงของโครงสร้าง
- ศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงของเสาที่เสริมด้วย CFRP เมื่อเวลาผ่านไป (เช่น 6 เดือน, 1 ปี) เพื่อประเมินความทนทานระยะยาว
- วิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เปรียบเทียบต้นทุน ประสิทธิภาพของวิธีเสริมแรงแต่ละแบบ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงและข้อจำกัดด้านงบประมาณ
- เปรียบเทียบวัสดุเสริมแรงชนิดอื่น เช่น GFRP, แผ่นเหล็กบาง หรือเส้นใยพอลิเมอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ CFRP

อ้างอิง

- [1] Department of Mineral Resources. (2015). *Development of saline soil areas in northeastern Thailand (Phase 2: Expansion phase)*. Ministry of Natural Resources and Environment.
- [2] Lampabok, S. (n.d.). *Durability of concrete from chloride-induced corrosion*. Industrial Technology Program (Construction), Udon Thani Rajabhat University.
- [3] Raksorn, S., & Jindaprasert, P. (2014). *Two types of pozzolanic materials used in concrete applications*. Concrete Journal, Thailand Concrete Association (TCA Magazine).
- [4] The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd. (CPAC). (2000). Mineral admixture. In Concrete technology (p. 61). Bangkok: The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd.
- [5] Chattharapattathakul, C. (1999). *Silica fume*. Concrete Journal, Thailand Concrete Association, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [6] Samranwanich, T., & Kittchanon, A. (2021). *Chloride resistance and compressive strength of silica fume concrete*. Naresuan University Engineering Journal, 16(1), 107–118.
- [7] Nordtest. (n.d.). *NT Build 356: Concrete, repairing materials and protective coating – Embedded steel method, chloride permeability*. Espoo, Finland: Nordtest.
- [8] Thai Industrial Standards Institute. (2012). TIS 15 Part 1–2555: *Portland cement – Test methods*. Ministry of Industry.
- [9] Thai Industrial Standards Institute. (2016). TIS 24–2559: *Steel bars for reinforced concrete – Deformed (ribbed) bars*. Ministry of Industry.

[10] Thai Industrial Standards Institute. (2016). *TIS 20–2559: Steel bars for reinforced concrete – Plain round bars*. Ministry of Industry.

[11] Department of Public Works and Town & Country Planning. (2020). *Manual for strengthening structural stability of buildings to mitigate disaster impacts*. Ministry of Interior.

[12] ASTM International. (2017). *ASTM D6272–17: Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials by four-point bending*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[13] ASTM International. (2019). *ASTM C192/C192M–19: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[14] Jun-Jie Zeng, Yu-Yi Ye, Wei-Te Liu, Yan Zhuge, Yue Liu, Qing-Rui Yue. (2023). *Behaviour of FRP spiral-confined concrete and contribution of FRP longitudinal bars in FRP-RC columns under axial compression*. Engineering Structures, 281, Article 115747. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115747>

[15] J.G. Teng, T. Jiang, L. Lam, Y.Z. Luo. (2009). *Refinement of a design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete*. Journal of Composites for Construction, 13(4), 269–278.

[16] Tanbo Pan, Zhengxie Zhang, Yonglai Zheng, Kai Wang. (2025). *Acoustic emission-based analysis of mechanical behavior and damage evolution in corroded RC square columns*. Construction and Building Materials, 469, Article 140458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140458>

[17] Wang, B., Zhang, Y.-J., Ren, Q.-X., Feng, H.-Y., Bi, R., & Zhao, X. (2025). Axial compression properties of reinforced concrete columns strengthened with textile-reinforced ultra-high toughness cementitious composite in chloride environment. *Journal of Building Engineering*, 111, Article 113116. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113116>

[18] Chirawatcharadej, M. (n.d.). *Reinforced concrete design: Strength design method (1st ed.)*. Civil Engineering Program, School of Engineering, Suranaree University of Technology.