

JETA

Online ISSN: 2774-0889



Journal of Engineering Technology Access



วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 : กรกฎาคม – ธันวาคม 2568

Journal Engineering Technology Access (JETA)

Vol. 5 No. 2 July – December 2025

วัตถุประสงค์

1. เพื่อรวบรวมและเผยแพร่ผลงานวิจัยของนักวิชาการชาวไทยและต่างชาติ โดยเฉพาะผลงานวิจัยของบุคลากรและนักศึกษาภายในคณะและมหาวิทยาลัยให้เป็นที่รู้จักในระดับชาติหรือนานาชาติ
2. เพื่อสร้างเครือข่ายนักวิชาการทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ
3. เพื่อเผยแพร่ชื่อเสียงของคณะและของมหาวิทยาลัย
4. เพื่อสนับสนุนการนำผลงานวิชาการและวิจัยไปใช้ประโยชน์

หน่วยงาน

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

214 หมู่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

โทร. 0 4250 3777

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสนะแสง

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นายเจษฎา หงษ์ณี

ทีมบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกตมาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญนันท์ นิลกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรมาส เลาหวนิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสนะแสง	มหาวิทยาลัยนครพนม

ฝ่ายจัดการวารสาร

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วีระ รัตน์งาม | รองคณบดีฝ่ายวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา |
| 3. นางสาวถนอมวรรณ ศรีวงษา | เจ้าหน้าที่ |
| 4. นางรุ่งรัตน์ จรคำ | เจ้าหน้าที่ |

บทบรรณาธิการ

Journal Engineering Technology Access (JETA) วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ฉบับนี้เป็นปีที่ 5 ฉบับที่ 2 : กรกฎาคม – ธันวาคม 2568 มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวม เผยแพร่ผลงานวิจัยของบุคลากร นักศึกษาทั้งภายในคณะ บุคคลภายนอกมหาวิทยาลัยให้เป็นที่รู้จักในระดับชาติหรือนานาชาติ และเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ ข้อคิดเห็นทางวิชาการและวิจัยแก่นักวิชาการ อาจารย์ นักศึกษา ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ ครุศาสตร์อุตสาหกรรม และนวัตกรรม เพื่อสร้างเครือข่ายนักวิชาการและเสริมสร้างประสิทธิภาพด้านการพัฒนางานวิจัย วารสารฉบับนี้ประกอบด้วยบทความวิจัยจำนวน 1 บทความ ซึ่งบทความทั้งหมดเป็นบทความที่น่าสนใจ และสามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับศาสตร์ที่เกี่ยวข้องได้ ทั้งนี้ผู้ที่สนใจสามารถติดตามอ่านบทความวารสารฉบับออนไลน์ได้

วารสารฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ประกอบด้วย บรรณาธิการบริหาร กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายในและภายนอก ที่กรุณาพิจารณาแก้ไขปรับปรุงบทความให้มีความสมบูรณ์ และมีคุณภาพ อีกทั้งขอขอบพระคุณเจ้าของบทความทุกท่านที่ให้ความสนใจ และส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ กองบรรณาธิการขอเชิญผู้สนใจทุกท่านร่วมส่ง บทความวิจัย และบทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ ครุศาสตร์อุตสาหกรรม และนวัตกรรม เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่มีค่าใช้จ่าย และหากท่านมีข้อเสนอแนะหรือต้องการทราบข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวารสารฯ สามารถติดต่อได้ที่ jeta@npu.ac.th กองบรรณาธิการยินดีรับฟังข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงวารสารฯ ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นไป

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสณะแสง

บรรณาธิการ

สารบัญ

หน้า

บทบรรณาธิการ

สมชาติ โสณะแสง

ก

สารบัญ

ข

บทความวิจัย

อิทธิพลของคลอไรด์ต่อกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ณัฐพล โหมวงศ์, ศรัญญู ชัยวิเชียร และปิโยรส ทะเสนฮอด

1

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 จังหวัดสมุทรปราการ

² สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดสมุทรปราการ

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดสมุทรปราการ

Corresponding: Piyoros.ta@rmutti.at.th

บทคัดย่อ

การกัดกร่อนภายในโครงสร้างคอนกรีตเป็นปัญหาที่ส่งผลให้องค์อาคารมีความสามารถในการรับแรงลดลง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของคลอไรด์ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีตัวแปรคือ การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม อัตราการกัดกร่อนของคลอไรด์ และรูปแบบการเสริมแรง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ขนาดตัวอย่าง 20x20x80 เซนติเมตร หลังการบ่ม 28 วัน ภายใต้การกัดกร่อนจากคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบแรงดัน ประยุกต์จากมาตรฐาน 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. เพื่อศึกษาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมในคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกันต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีระยะเวลาการทดสอบที่ทำให้เหล็กกัดกร่อนเท่ากัน
2. เพื่อศึกษากำลั้ดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอัตราการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่ต่างกัน
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 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 24 เป็นเหล็กปลอกมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน 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



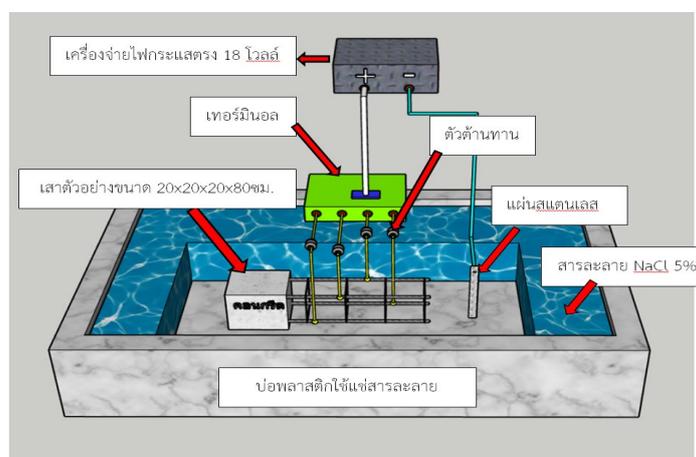
ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงการติดตั้ง Electrical Strain Gauge



ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.2 วิธีกรเร่งกระแสไฟ

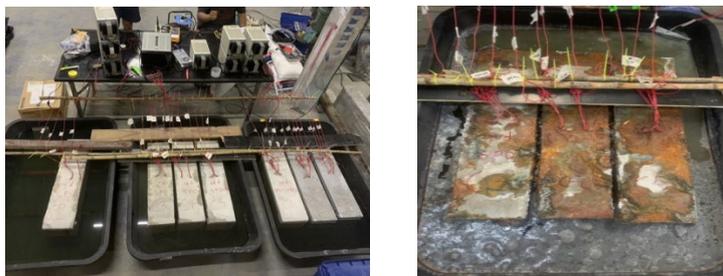
การเกิดสนิมโดยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เรียกว่า การเร่งปฏิกิริยากัดกร่อนด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้หลักการของ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพื่อเร่งการเกิดสนิมบนโลหะ ประยุกต์มาจากมาตรฐาน NT Build 356[7] ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงการเร่งกระแสไฟเพื่อให้เกิดกระบวนการเกิดสนิม

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

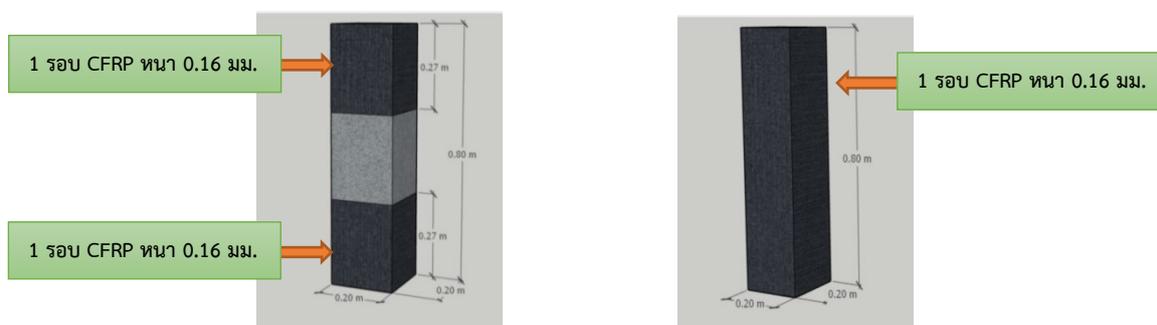
งานวิจัยนี้ใช้วิธีการเร่งการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้า ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มแล้วเป็นเวลา 28 วัน จะถูกนำไปแช่ในอ่างพลาสติกซึ่งบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 คิดเป็นอัตราส่วน 1 กิโลกรัมของโซเดียมคลอไรด์ ต่อน้ำ 3.42 กิโลกรัม จากนั้นดำเนินการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบขนานกับเหล็กเสริมในคอนกรีตเพื่อเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมโดยวิธีนี้ประยุกต์มาจากมาตรฐาน 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 โดยไม่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูม 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 ถ่วงแรงลงไปทีละน้อยจนเกิดการวิบัติ ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้เราติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด (Strain Gauge) และติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการขยายตัวของเสาตัวอย่างเนื่องจากแรงอัด Linear variable differential transformer(LVDT) ดังภาพที่ 3.7 เพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาตัวอย่างและเปรียบเทียบกำลังการรับน้ำหนักต่อไป

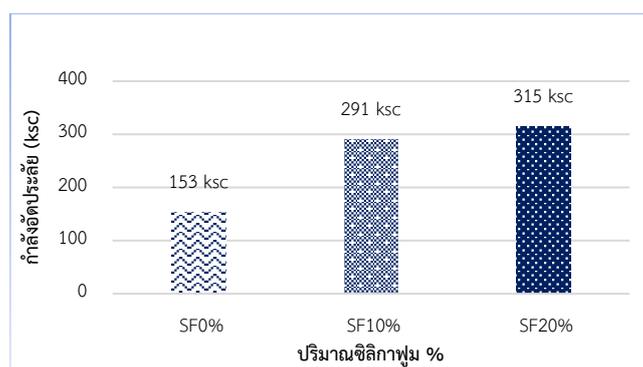


ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงการทดสอบการรับแรงอัดทั้งแบบธรรมดาและแบบเสริมแรง

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

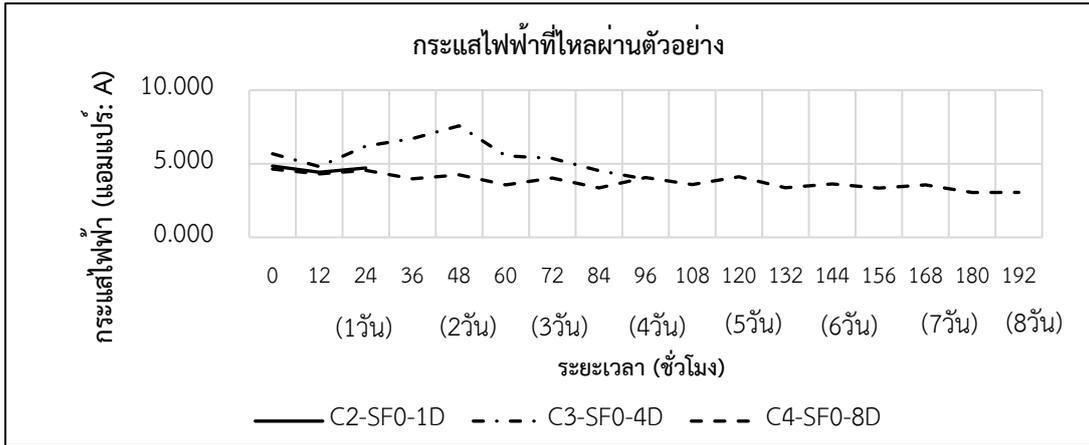
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเส้นกับมาตรฐาน มอก.

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

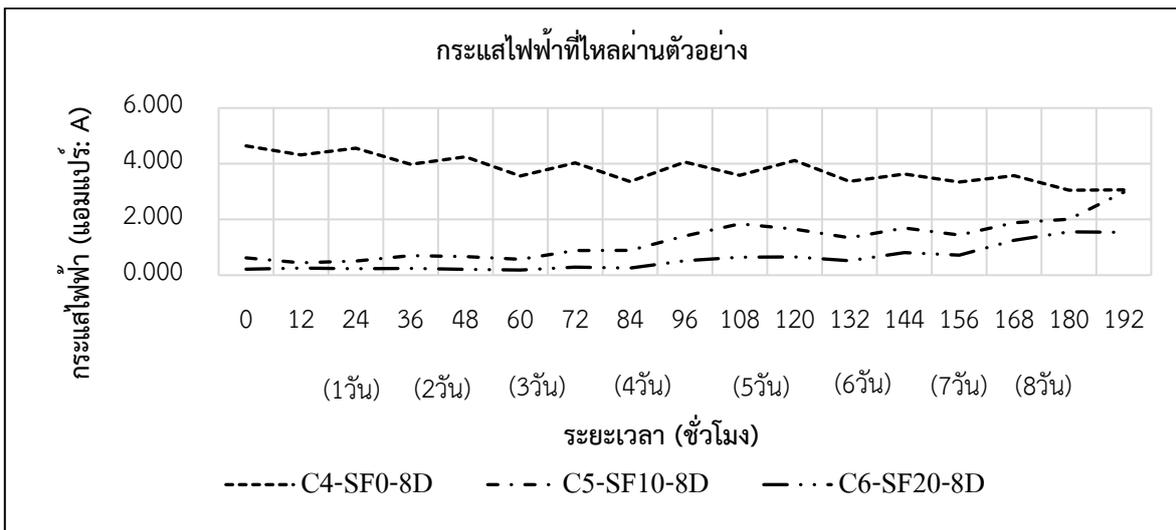
4.3.1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

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 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการกักถ่วง

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



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าแต่ละอัตราส่วนต่อช่วงเวลา

4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต

หัวข้อนี้กล่าวถึงการสังเกตลักษณะทางกายภาพของเสาคอนกรีตหลังการทดสอบการกัดกร่อน เพื่อประเมินผลกระทบจากการกัดกร่อนและการเสริมแรง โดยพิจารณารอยแตกร้าว การหลุดร่อน สีเปลี่ยนจากสนิม และลักษณะเหล็กเสริมภายใน ซึ่งช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างและการกัดกร่อนในแต่ละตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเท่ากันแต่ระยะเวลาการกัดกร่อนแตกต่างกันในแต่ละระดับ ซึ่งจะมึลักษณะทางกายภาพในแต่ละระดับการกัดกร่อน คือ C1-SF0-0D ตัวอย่างนี้จะเป็นตัวอย่างควบคุมจะไม่มีกรัดกร่อนเลย 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 ส่วนใหญ่สภาพพื้นผิวคอนกรีตที่ยังเรียบแน่น 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

ปูนกับทรายไม่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม แม้เสาตัวอย่างจะมีเนื้อคอนกรีตที่ทึบแน่นแต่ยังมีรอยร้าวเกิดขึ้น เห็นได้ชัดจากตัวอย่าง C6-SF20-8D

4.3.3 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กเสริม

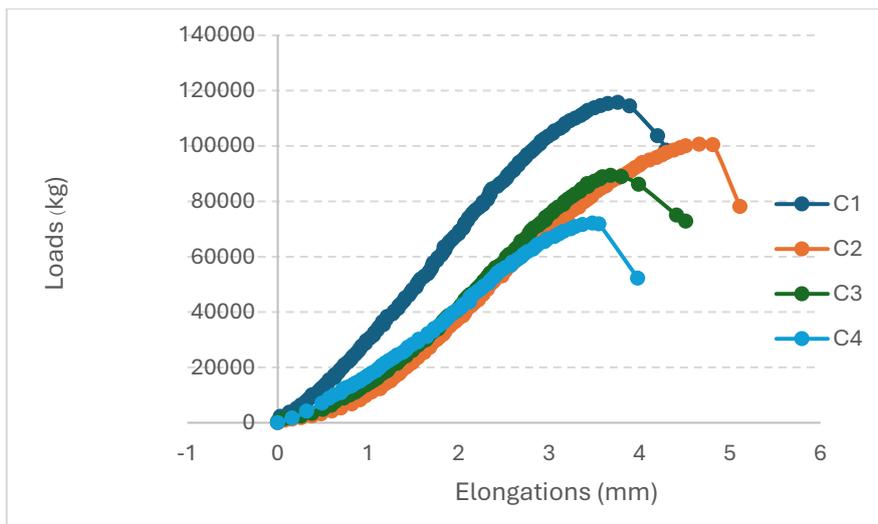
พฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวลดลง ทำให้ความสามารถในการรับแรงของเสาลดลงตาม หลังการทดสอบพบว่าจุดที่เหล็กเกิดสนิมส่วนใหญ่มักเกิดบริเวณที่สูญเสียชั้นฟิล์มที่ป้องกันผิวเหล็ก เช่น ปลายเหล็กที่ถูกตัดด้วยความร้อนหรือจุดตัดโค้งที่มีรอยแตกร้าว ซึ่งส่งผลให้เกิดสนิมได้ง่ายและรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือสารละลายไอ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



ภาพที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กเสริมเสาตัวอย่าง C4-SF0 -8D

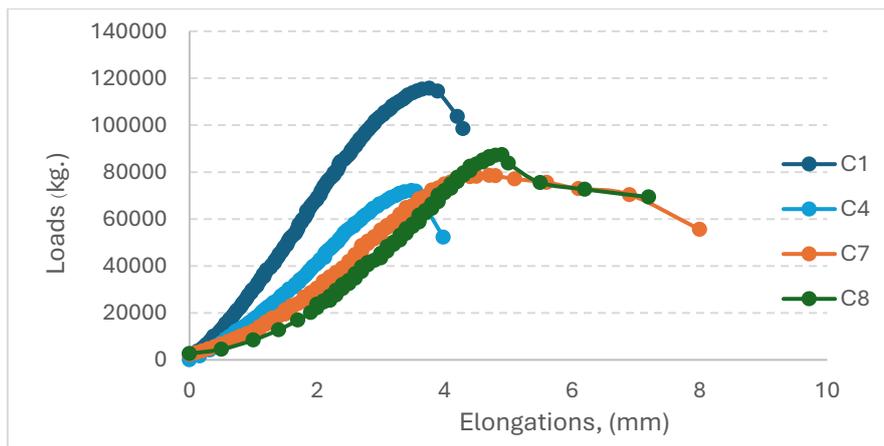
4.4.4 พฤติกรรมของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

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



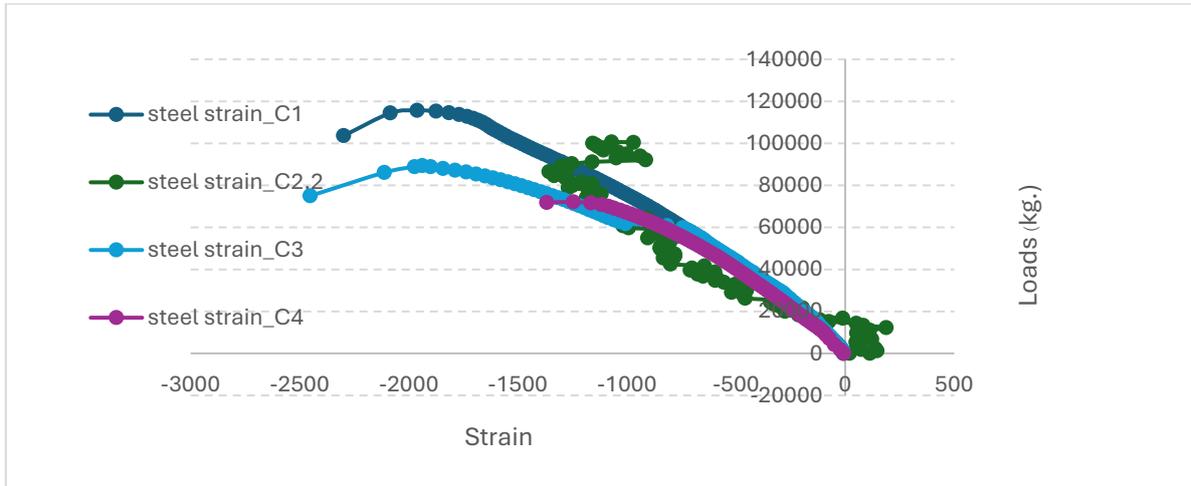
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่าง โดยมีระยะการกักกร่อนเหล็กเสริม จากคลอไรด์ต่างกัน

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



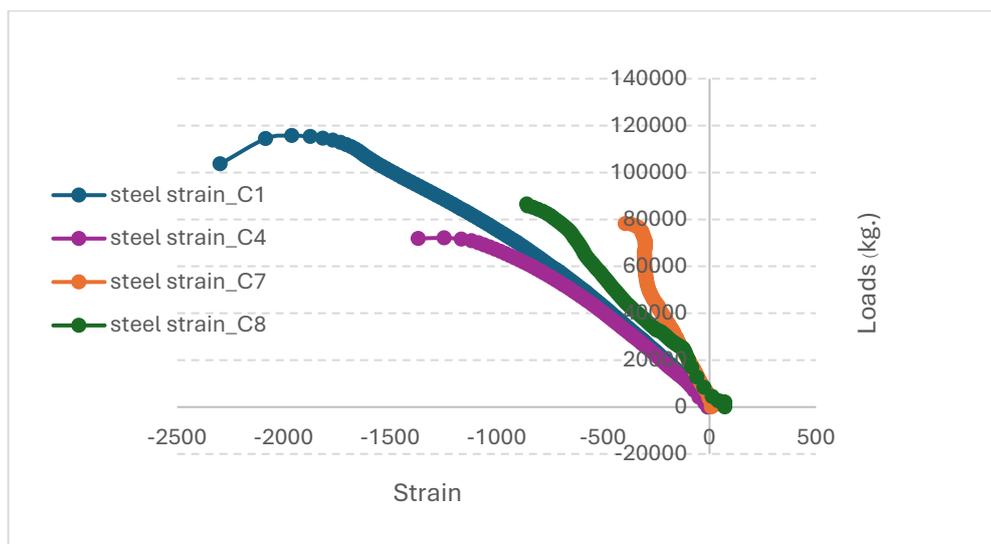
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมแรงต่างกัน

จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่าง ถูกกั๊กก่อนจากคอลอไรด์ที่ระยะเวลา 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 นอกจากนี้การลดลงของกำลังรับน้ำหนักในเสาตัวอย่างที่ถูกกั๊กก่อนจากคอลอไรด์ไม่ได้เกิดจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่หายไปเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีต เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ถูกกั๊กก่อนจากคอลอไรด์เกิดการแตกร้าวในระหว่างทดสอบ โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟูม เช่น C4 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวชัดเจน ขณะที่ C7 และ C8 แสดงพฤติกรรมที่มีความเหนียวมากกว่าเสาควบคุม โดยอาจจัดอยู่ในกลุ่มเสาที่มีการโอบรัดระดับปานกลาง (Moderately-Confined Column) [14] เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถช่วยเพิ่มการโอบรัดและป้องกันการพัฒนารอยแตกร้าวของเสาตัวอย่างดังภาพที่ 4.12 และ 4.13 โดยให้ผลทดสอบในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยอื่น [17] ที่แสดงให้เห็นว่า CFRP ช่วยยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความเหนียวของโครงสร้างคอนกรีตที่ผ่านการกั๊กก่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



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 โดยตัวอย่างเสาถูกกักตร้อนของเหล็กแกนมากที่สุด (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 ภายหลังจากกระบวนการกักตร้อนด้วยคลอไรด์ 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

- จากการทดลองการกักต่อนที่มีระดับต่างกันในตัวอย่างกลุ่มที่ 1 สามารถนำข้อมูลมาประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยใช้ข้อมูลการสูญเสียหน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมจากการกักต่อนซึ่งสัมพันธ์กับกำลังรับแรงของโครงสร้าง
- 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.