

ชื่อหัวข้อภาษาไทย การซ่อมแซมโครงสร้าง

ชื่อหัวข้อภาษาอังกฤษ Structural Rehabilitation

นางสาวกัลยณัฐ ขวนขวยทรัพย์¹ นายรวิวัชร เกียรติศิลป์² นายรัชพล หอมเสียง³และ รศ.ดร.วัฒนชัย สมิตรากร⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อใช้งานเป็นเวลานานมักเกิดความเสียหายขึ้นและอาจจำเป็นต้องทำการซ่อมแซม หนึ่งในความเสียหายที่พบบ่อยคือเหล็กเสริมในโครงสร้างเสื่อมสภาพ เพื่อหาและพัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการลงมือปฏิบัติงานยิ่งขึ้น คณะผู้จัดทำจึงทดลองวิธีการติดตั้งเหล็ก Rehab Bar เข้าไปด้วยน้ำยาเคมีอีพอกซีตรงตำแหน่งที่เหล็กเสริมเกิดความเสียหาย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบคานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างแรกจะเป็นคานควบคุมที่ไม่ได้ติดตั้ง Rehab Bar และเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่มีความเสียหาย ส่วนตัวอย่างที่เหลือบริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริมรับแรงดึงจะถูกทำให้เสียหายและติดตั้ง Rehab Bar เข้าไป ซึ่งความยาว Rehab Bar ในแต่ละคานตัวอย่างจะต่างกันไป เป็น 200, 400 และ 600 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบแบบ 4 Point Test พบว่าคานที่ติดตั้ง Rehab Bar รับกำลังได้เพียงร้อยละ 26.01 ของคานควบคุม และเหล็ก Rehab Bar ไม่ได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพเนื่องจากยึดตัวไม่ถึงจุดคราก ในขณะที่มีการโก่งตัวเฉลี่ยเท่ากับ 17.69 มิลลิเมตร มีค่าใกล้เคียงกับคานควบคุม ซึ่งเหล็ก Rehab Bar ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพอาจเนื่องมาจากคานที่มีความลึกประสิทธิภาพน้อย รวมถึงการที่เหล็ก Rehab Bar ไม่แนบติดกับคานก็อาจส่งผลให้การรับกำลังไม่ดีเท่าที่ควร

Abstract

Deterioration of reinforcing steel is a common cause of structural damage in buildings, often requiring repair. This study investigates an alternative repair method involving the installation of supplemental reinforcing bars, termed *Rehab Bars*, bonded with epoxy adhesive at locations of damaged tensile reinforcement. Four reinforced concrete beam specimens were tested: one control beam with intact reinforcement and no Rehab Bars, and three beams with intentionally damaged tensile reinforcement repaired using Rehab Bars of varying lengths (200 mm, 400 mm, and 600 mm). Under four-point bending tests, the repaired beams achieved only 26.01% of the load capacity of the control beam. The Rehab Bars did not yield, indicating inefficient stress transfer, although the average deflection (17.69 mm) was comparable to the control. The reduced performance is attributed to shallow installation depth and poor bonding with the concrete, limiting the effectiveness of the repair technique.

Keywords: Rehab Bar, structural repair, epoxy adhesive, reinforced concrete

คำสำคัญ: Rehab Bar, การซ่อมแซมโครงสร้าง, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, น้ำยาเคมีอีพอกซี

1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีตึกอาคารมากมายที่เริ่มเสื่อมสภาพและต้องการการซ่อมแซมโครงสร้าง โดยทั่วไปอาคารที่มีอายุการใช้งานถึง 10 ปี ควรมีการตรวจสอบสภาพเพื่อดำเนินการซ่อมแซม และในประเทศไทยเองก็มีจำนวนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมากกว่า 2,000,000 หลัง [3] ซึ่งจากการคาดการณ์ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [2] อาจมีอาคารเก่ากว่า 4,000 แห่งในกทม.ที่ไม่เคยตรวจสอบอาคารและรอการดูแลอย่างเหมาะสม จึงกล่าวได้ว่าปัญหาการซ่อมแซมอาคารถือเป็นปัญหาใหญ่ที่กำลังเกิดขึ้นในตอนนี้ เนื่องจากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของประชาชน ทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหานี้สูงขึ้นในอนาคต ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลให้อาคารเสื่อมโทรมมาได้จากหลายปัจจัยหนึ่งในปัจจัยที่พบได้บ่อยคือ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อันเป็นผลมาจากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่ร้อนชื้นดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงเห็นว่าการพัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพเพื่อแก้ไขปัญหาระบบรับกำลังของอาคารที่ลดลงเนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมเป็นปัญหาที่ควรได้รับการแก้ไข

จากที่กล่าวไปในข้อมูลที่กล่าวไปในข้างต้น คณะผู้จัดทำจึงได้พัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่แก้ปัญหาเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนจากสนิม โดยการใช้ Rehab Bar ไปปิดทาบบริเวณเหล็กเสริมที่เกิดสนิมซึ่งน้ำยาจะเสียนเหล็กจะช่วยยึดให้ Rehab Bar สามารถช่วยรับกำลังแทนเหล็กเสริมที่เกิดถูกกัดกร่อนจากสนิมได้ ซึ่งแตกต่างจากวิธีซ่อมแซมที่ทำกันทั่วไป [1] ที่ต้องสกัดเนื้อคอนกรีตออกจนถึงบริเวณเหล็กเสริม และต้องตัดส่วนที่มีสนิมมากออกแล้วจึงเชื่อมเหล็กขึ้นใหม่เข้าไปแทน โดยการเชื่อมเหล็กมีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ทำ และยังกระทบต่อชิ้นส่วนเหล็ก ดังนั้นการพัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ทำการซ่อมแซมอาคารมีคุณภาพ และปลอดภัยกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

จากวิธีการพัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ด้วย Rehab Bar คณะผู้จัดทำจึงจัดทำโครงการนี้ขึ้นเพื่อศึกษาเกี่ยวกับวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการลงมือปฏิบัติมากยิ่งขึ้น และทดสอบกำลังรับแรงของวิธีการซ่อมแซมในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับการคำนวณออกแบบต้นแบบ

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อพัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการลงมือปฏิบัติมากยิ่งขึ้น
- เพื่อทดสอบกำลังรับแรงของวิธีการซ่อมแซมในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับการคำนวณออกแบบ

1.3 สมมติฐาน

เมื่อพัฒนาวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพแล้ว จะทำให้เกิดความคล่องตัวในการลงมือปฏิบัติมากยิ่งขึ้นและทำให้โครงสร้างสามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับการคำนวณออกแบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- วิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการลงมือปฏิบัติมากยิ่งขึ้น
- ได้ทดสอบกำลังรับแรงของวิธีการซ่อมแซมในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับรายการคำนวณออกแบบ
- ได้ประยุกต์ใช้ความรู้จากรายวิชาวิชา 2101307 Reinforcement Concrete Design
- นำข้อมูลวิธีการซ่อมแซมอาคารรูปแบบใหม่ไปพัฒนาต่อยอด และใช้ประโยชน์ในการซ่อมแซมอาคาร

2 ทบทวนวรรณกรรม

การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเป็นสนิมมีหลายวิธีที่สามารถเลือกใช้ตามลักษณะและระดับความเสียหายของโครงสร้าง วิธีที่ใช้อยู่คือการขัดสนิมและทาน้ำยาป้องกันสนิม แต่ในกรณีที่มีการกัดกร่อนรุนแรง หรือโครงสร้างต้องการความแข็งแรงเพิ่มเติม การเสริมเหล็กเสริมใหม่หรือการติดตั้งคานเหล็กเสริมอาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสม [10-11]

การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็ก คือ องค์ประกอบที่สำคัญในอาคารโครงสร้างเหล็ก การเชื่อมต่อเหล็กรวมถึงส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น ตะปู, สลักเกลียว เป็นต้น

และการเชื่อม ซึ่งมีหน้าที่เชื่อมต่อส่วนประกอบเหล็กสองส่วนหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการเชื่อมต่ออาคารเหล็กกับโครงสร้างอื่น ๆ การเชื่อมต่อเหล็กยังใช้ในการซ่อมแซมอาคารได้อีก

ข้อดีของการเชื่อมต่อการเชื่อม

- ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อสูงถึง 100%
- สามารถใช้กับโครงสร้างเหล็กที่ซับซ้อนได้
- เสียรบกวนต่ำ
- ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย
- มีน้ำหนักเบา

ข้อเสียของการเชื่อมต่อการเชื่อม

- มีความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากการเกิดความร้อนตอนเชื่อม
- รอยเชื่อมมีโอกาสแตกและหักได้
- การเชื่อมต่อการเชื่อมต้องการช่างที่มีฝีมือแม่นยำ
- ยากที่จะทำการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม
- โลหะฐานอาจเกิดการล้าได้จุดเชื่อม

การฝังเหล็กยึดในคอนกรีตด้วยน้ำยาเคมี สามารถเกิดการยึดได้จากทั้งแรงดึง แรงเฉือน อาจมาได้จากหลายสาเหตุ อย่างไรก็ตามการติดตั้งที่ไม่ถูกต้อง เป็นสิ่งที่พบได้บ่อย ดังนั้นเพื่อให้ไม่เกิดความผิดพลาดจากการใช้การฝัง ควรติดตั้งให้มีระยะฝังของเหล็กในคอนกรีต (embedment depth) มีความลึกที่เหมาะสม หากว่าฝังตื้นเกินไปอาจจะทำให้การฝังไม่สามารถสร้างแรงยึดเกาะที่เพียงพอได้(embedment depth) และระยะห่างระหว่างรูเจาะและระยะห่างจากขอบควรมากกว่า 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก หากว่าใกล้กันเกินไปจะสร้างภาระให้คอนกรีต ทำให้เกิดการวิบัติแบบ Cone Failure ที่คอนกรีตเสียหายและหลุดออกมาลักษณะเป็นกรวย [8] จากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการหาระยะฝังที่มีประสิทธิภาพ โดยทดลองระยะฝังตั้งแต่ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กจนถึง 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก จากการทดสอบพบว่าไม่มีระยะฝังไหนที่สามารถรับแรงดึงได้จนถึงจุดครากของเหล็ก ยิ่งฝังลึกมากก็ยิ่งรับแรงได้มากขึ้น

3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1.1 การเตรียมคานตัวอย่างเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ

- กำหนดสิ่งที่ต้องการทราบจากการทดสอบ คือ ความสามารถในการรับกำลังของ Rehab Bar เมื่อใช้ซ่อมแซมเหล็กรับแรงดึง

ของคานที่วัดด้วย Bending Moment และกำหนดจำนวนคานที่จะใช้ทดสอบคือ 4 คาน โดยคานตัวแรกเป็นตัวควบคุม (Control Specimen) ที่ไม่ได้มีการซ่อมแซม ส่วนอีก 3 คาน จะใช้ระยะทาบซ่อมแซม (Splice of Rehab Bar) ที่แตกต่างกันไป เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจากผลของระยะทาบ

- วิเคราะห์หน้าตัดคานและรูปแบบการวิบัติของคานที่จะเกิดขึ้น เพื่อออกแบบหน้าตัดคาน ขนาดเหล็กเสริม และขนาดเหล็กปลอกให้เหมาะสมกับรูปแบบการวิบัติด้วย Bending Moment จากการวิเคราะห์ขนาดหน้าตัดคานเท่ากับ 200 x 300 mm เหล็กเสริมบนล่างคือ DB12 เหล็กปลอกใช้ RB9 spacing 100 mm และ Span Length 1.8 m สามารถวิบัติด้วย Bending Moment ได้ เมื่อทดสอบแบบ 4 point test
- หาระยะที่เหมาะสมในการทาบเหล็กที่ใช้ซ่อมแซมคาน (Splice of Rehab Bar) ด้วยสมการระยะฝังของเหล็กรับแรงดึง(L_d) ในการทดลองใช้ค่า L_d เท่ากับ 300, 200 และ 100 mm ตามลำดับ

- คำนวณหาความสามารถในการรับแรงของ Rehab Bar เมื่อใช้น้ำยาจะเสียนเหล็กเพื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ

- ถอดปริมาณงานไม้แบบ เหล็กเสริมและคอนกรีตที่ใช้ในการขึ้นหล่อคานทดสอบ เพื่อเตรียมหล่อคานทดสอบทั้ง 4 คาน

- หลังจากจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์แล้ว ทำการขึ้นแบบหล่อและใส่เหล็กเสริมโดยคานทดสอบ 3 ชิ้น ยกเว้นตัวควบคุม เหล็กเสริมรับแรงดึงทำการตัดให้ตรงกลางเหลื่อพื้นที่หน้าตัดประมาณร้อยละ 20 ของหน้าตัดเดิมเพื่อจำลองความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนสนิม

- เมื่อใส่เหล็กในไม้แบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงทำการเทคอนกรีต และบ่มคอนกรีตให้ครบ 28 วันแล้วจึงนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

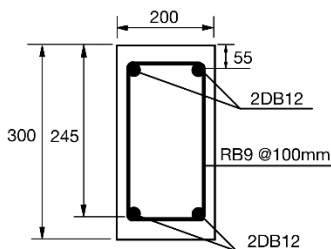
- การเก็บคอนกรีต เพื่อทดสอบกำลังคอนกรีตในวันที่ทดสอบ 4 Point Test และบันทึกผล
- นำเหล็กเสริม DB12 ไปตั้งทดสอบ เพื่อหา Yielding Strength และบันทึกผล
- นำคาน 3 ตัว ที่จำลองความเสียหายตรงกึ่งกลางเหล็กรับแรงดึง มาซ่อมแซมด้วย Rehab Bar โดยเจาะ 2 รูต่อการใช้ Rehab Bar 1 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเท่ากับ 14 mm ระยะฝั่งลึก 80 mm (6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก) ตำแหน่งรูอยู่ห่างจากกึ่งกลางคานมาทางซ้ายด้วยระยะเท่ากับ L_d และเจาะรูห่างจากกึ่งกลางคานมาทางขวาด้วยระยะ L_d ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300 mm สำหรับคานชั้นที่ 1 , 200 mm สำหรับคานชั้นที่ 2 และเท่ากับ 100 mm สำหรับคานชั้นที่ 3
- เมื่อเจาะรูแล้วทำการบากคานตามแนวที่ติดตั้ง Rehab Bar เพื่อให้ Rehab Bar แนบสนิทกับคานมากยิ่งขึ้น
- ฉีดน้ำยาเจาะเสียบเหล็ก เข้าไปในรู แล้วใส่ Rehab Bar ที่ตัดเตรียมไว้เข้าไปในรูเจาะ 2 ฝั่งที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ ทำแบบนี้ทั้ง 2 ด้านของคาน
- หลังจากกรน้ำยาเจาะเสียบเหล็กแห้งตัวประมาณ 4 ชั่วโมง ก็นำคานทั้ง 4 ขึ้นไปเข้าเครื่องทดสอบ โดยก่อนทดสอบ ติด strain gauge ที่ Rehab Bar ทุกเส้น และ LVDT เซนเซอร์ที่วัดระยะเคลื่อนตัวของเหล็ก และนำไปทดสอบแบบ 4 point test
- บันทึกผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบ strain gauge และ LVDT เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผล

3.2 รายการคำนวณเพื่อเตรียมตัวอย่างคานในการทดสอบ

3.2.1 วิเคราะห์หน้าตัดคานและรูปแบบการวิบัติ

Double Reinforcement Section Analysis

รูปที่ 1 หน้าคานทดสอบ



$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0.85 \\ \epsilon_u &= 0.003 \\ E_s &= 200,000 \text{ MPa} \\ f'_c &= 24 \text{ MPa} \\ f_y &= 400 \text{ MPa} \\ d &= 245, d' = 55 \\ A_s &= A'_s = 226.2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X &= 0.85f'_c b \beta_1 \\ Y &= A'_s E_s \epsilon_u - A_s f_y \\ Z &= -A'_s E_s \epsilon_u d' \\ c; 0 &= Xc^2 + Yc + Z\end{aligned}$$

$$a = \beta_1 c, f'_s = E_s \epsilon_u \left(\frac{c-d'}{c} \right)$$

นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ (1) เพื่อหา Moment Capacity ของหน้าตัด

$$\begin{aligned}M_n &= 0.85f'_c b a \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \\ M_n &= 22.49 \text{ kN} \cdot \text{m}\end{aligned} \quad (1)$$

3.2.2 การหาระยะทาบทที่ใช้ในการซ่อมแซมคานตัวอย่าง (Splice of Rehab Bar)

หาระยะทาบทที่ใช้ในการซ่อมแซมจากสมการระยะฝั่งของเหล็กรับแรงดึง (L_d)

$$L_d = \left(\frac{f_y}{1.1\lambda\sqrt{f_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{C_b + K_{tr}} \right) d_b \geq 300 \text{ mm} \quad (2)$$

โดยที่

$\psi_t = 1.3$ สำหรับเหล็กบน และ 1.0 สำหรับเหล็กอื่นๆ

$\psi_e =$ ตัวแปรสำหรับเหล็กเสริมเคลือบอีพอกซี มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับเหล็กที่ไม่เคลือบ

$\psi_s = 0.8$ สำหรับเหล็กเสริมที่ไม่เกิน 19 mm และ 1.0 สำหรับเหล็กเสริมขนาด 22 mm ขึ้นไป

$\lambda =$ ตัวแปรสำหรับคอนกรีตมวลเบา มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ

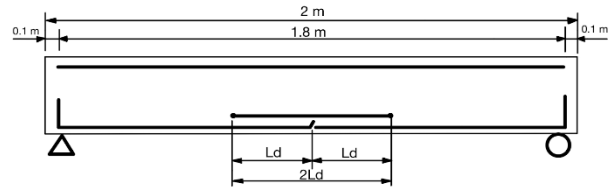
$d_b =$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)

$K_{tr} =$ ดัชนีเหล็กปลอก สามารถใช้ค่าเท่ากับ 0 ได้

$C_b =$ ระยะที่น้อยกว่าระหว่างระหว่างเหล็กเสริม และระยะหุ้มของคอนกรีต

$$L_d = 285.03 \text{ mm} \geq 300 \text{ mm}$$

ดังนั้นระยะทาบทที่ใช้ในการซ่อมแซมคานตัวอย่างเท่ากับ 300 mm โดยในการทดสอบ ใช้ค่า L_d เท่ากับ 300, 200 และ 100 mm ตามลำดับ

รูปที่ 2 ความยาวระยะทาบท L_d

ตารางที่ 1 คานทดสอบและวิธีการทดสอบแต่ละชั้นตัวอย่าง

คานทดสอบ	รูปแบบการวิบัติ	วิธีทดสอบ	ความยาว Rehab Bar (mm)	จำนวน Rehab Bar	สภาพเหล็กเสริมรับแรงดึง
คานควบคุม	Bending Moment	4 Point Test	-	-	สมบูรณ์
คานทดสอบ 1	Bending Moment	4 Point Test	200	2	ตัดตรงกลาง
คานทดสอบ 2	Bending Moment	4 Point Test	400	2	ตัดตรงกลาง
คานทดสอบ 3	Bending Moment	4 Point Test	600	2	ตัดตรงกลาง

4 ผลการดำเนินงาน

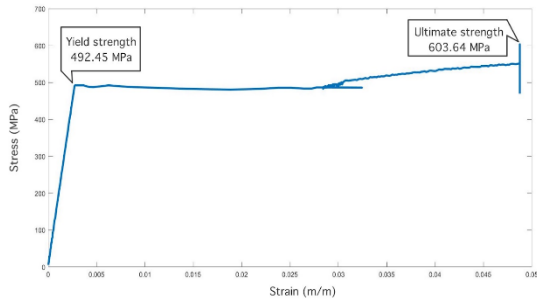
4.1 ผลการทดสอบกำลังวัสดุ

4.1.1 ผลการทดสอบคอนกรีต

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังคอนกรีตจากตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น

	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซ.ม.)	15.10	15.10	15.00	15.07
พื้นที่หน้าตัด (ตร.ม.)	0.018	0.018	0.018	0.018
แรงสูงสุดที่รับ (kN)	490.90	402.50	436.40	443.27
กำลังคอนกรีต (MPa)	27.41	22.47	24.69	24.86

4.1.2 ผลการทดสอบเหล็ก



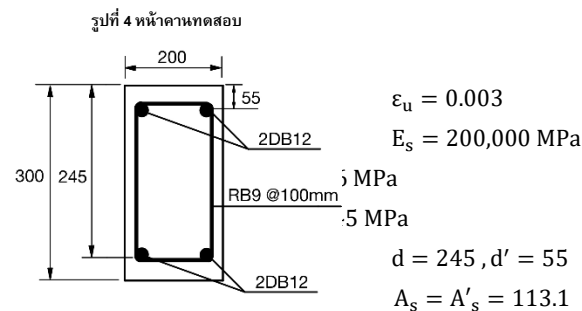
รูปที่ 3 กราฟ Stress – Strain ของเหล็ก DB12

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์กราฟ Stress-Strain ของเหล็ก DB12

Yield Strength (MPa)	Yield Strain (m/m)	Ultimate Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
492.45	0.0025	603.63	179,699

4.2 การวิเคราะห์หน้าตัดคานจากผลทดสอบวัสดุ

Double Reinforcement Section Analysis



$$X = 0.85f'_c b \beta_1$$

$$Y = A'_s E_s \epsilon_u - A_s f_y$$

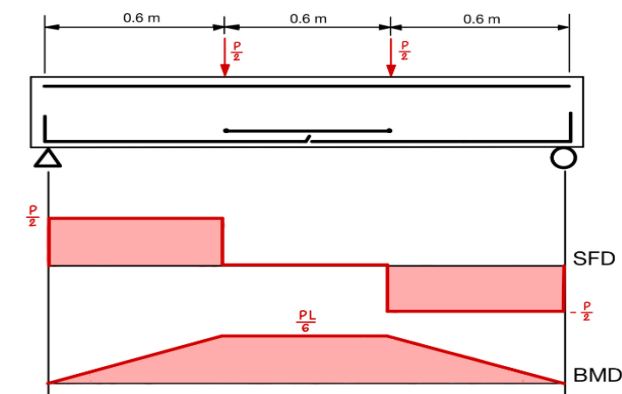
$$Z = A'_s E_s \epsilon_u d'$$

$$c; 0 = Xc^2 + Yc + Z$$

$$a = \beta_1 c, f'_s = E_s \epsilon_u \left(\frac{c-d'}{c} \right)$$

นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ (1) เพื่อหา Moment Capacity ของหน้าตัด

$$M_n = 0.85f'_c b a \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s \left(d - d' \right) \quad (1) \quad M_n = 26.80 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



รูปที่ 5 Shear Force Diagram และ Bending Moment Diagram

แรงสูงสุดที่คานสามารถ

$$M = \frac{PL}{6}; 26.80 = \frac{P \cdot (1.8)}{6}; P = 89.33 \text{ kN}$$

4.3 ผลการทดสอบคานทดสอบ

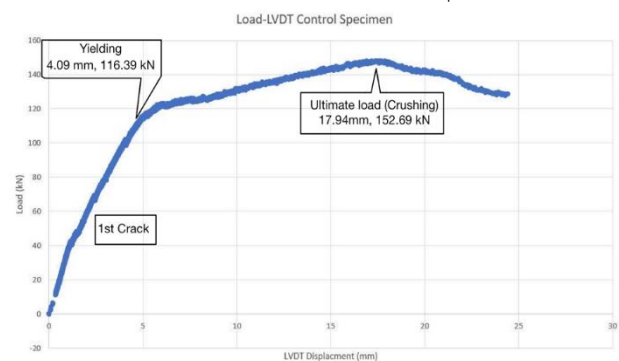
4.3.1 ผลการทดสอบคานควบคุม

จากการทดสอบคานควบคุมแบบ 4 Point Test จนคานวิบัติและนำค่าที่เก็บจากการทดสอบ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (kN), Average LVDT (mm) และ Strain ที่กึ่งกลางของเหล็กรับแรงดึง ($\mu\text{m/m}$) พบว่าจากการรูปที่ 6 เส้นกราฟเริ่มมีการกระตุกเป็นผลมาจากรอยแตก จะเห็นรอยกระตุกเริ่มปรากฏขึ้นบนกราฟช่วง Load ประมาณ 50 kN ซึ่งสอดคล้องกับขั้นตอนทดสอบคานในห้องปฏิบัติการที่เริ่มปรากฏรอยแตกให้เห็นตอน Load ประมาณ 51.7 kN และเกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นหลังจากนั้นตลอดจนคานเสริม

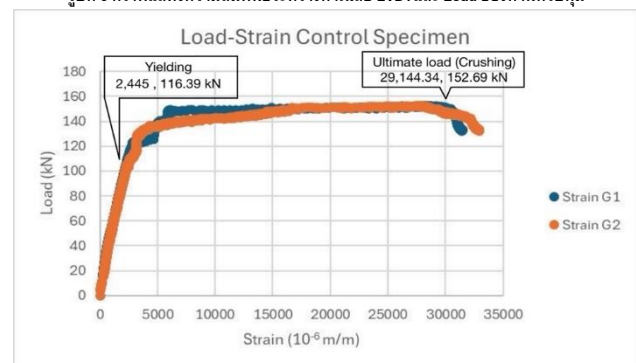
จากการรูปที่ 6 พบว่าเหล็กเสริมในคานเริ่มเกิดการคราก (Yield Point) เมื่อให้แรงถึง 116.39 kN ขณะนั้นมีค่า Average LVDT อยู่ที่ 4.09 mm และเมื่อเทียบกับกราฟในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าที่จุด Yield Point เหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งสองเส้นเกิดการครากไล่เลี่ยกันที่ Load เท่ากับ 116.39 kN และค่า Strain อยู่ที่ 2445 $\mu\text{m/m}$ หรือ 0.00244 ซึ่งสอดคล้องจากผลการทดสอบเหล็กที่ค่าความเครียดของเหล็กจนถึงจุดคราก (y) ที่มีค่าอยู่ที่ 0.0025 ซึ่งหลังจากเหล็กเสริมรับแรงดึงคราก เหล็กก็ยึดตัวอย่างรวดเร็ว สังเกตจากรูปที่ 7 ที่กราฟวิ่งขนานกับแกนนอน หรือแกนของ Strain และคานก็โก่งตัวอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยดูจากรูปที่ 6 ที่กราฟวิ่งขนานกับแกนนอน หรือแกนของ Average LVDT

ซึ่งทั้งค่า Strain และ Average LVDT ก็เริ่มจะลดลง เมื่อคานถึงจุด Ultimate Point ที่ค่า Load เท่ากับ 152.69 kN และเกิดการ Crushing ที่ส่วนบนของคาน แสดงให้เห็นว่าคานไม่สามารถรับแรงได้มากกว่านี้อีกแล้ว เมื่อ Load ลดลง การขยับของ Average LVDT และ Strain ก็ลดตามไปด้วย

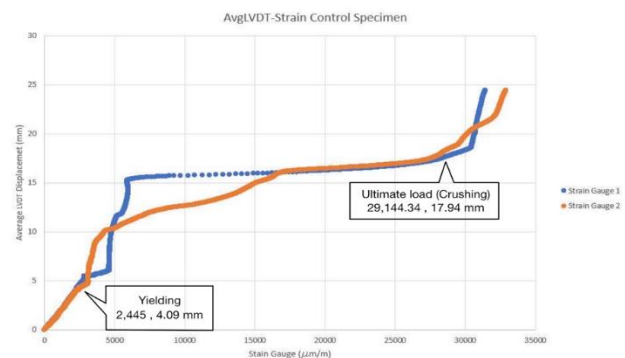
เมื่อดูความสัมพันธ์ของ Strain และ Average LVDT จากรูปที่ 8 จะเห็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของเหล็กที่จุดกลางคานเทียบกับการเคลื่อนตัวของทั้งคาน หลังจากเหล็กถึงจุดครากไปแล้ว Strain G2 จะยืดออกก่อน Strain G1 และเมื่อไปถึงจุด Crushing และคานเกิดการวิบัติ ค่าของ Average LVDT จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการหลุดตัวของคานหลังการวิบัติ



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย LVDT และ Load ของคานควบคุม



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และ Load ของคานควบคุม



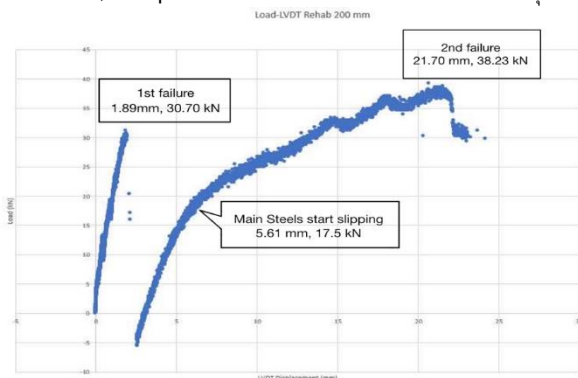
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Strain gauge และค่าเฉลี่ย LVDT ของคานควบคุม

4.3.2 ผลทดสอบคานาติดตั้ง Rehab bar 200 mm

จากการทดสอบคานาติดตั้ง Rehab bar 200 mm แบบ 4 Point Test จนคานาวิบัติและนำค่าที่เก็บจากการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (kN), Average LVDT (mm) และ Strain บน Rehab bar ($\mu\text{m/m}$) พบว่าจากกราฟรูปที่ 4.3-5 เส้นกราฟเริ่มมีการกระตุกเป็นผลมาจากรอยแตก จะเห็นรอยร้าวเริ่มปรากฏขึ้นบนกราฟช่วง Load ประมาณ 7 kN ซึ่งสอดคล้องกับตอนทดสอบคานาในห้องปฏิบัติการที่เริ่มปรากฏรอยร้าวให้เห็นตอน Load ประมาณ 7.9 kN และเกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นหลังจากนั้นตลอดจนจนคานาเสร็จ

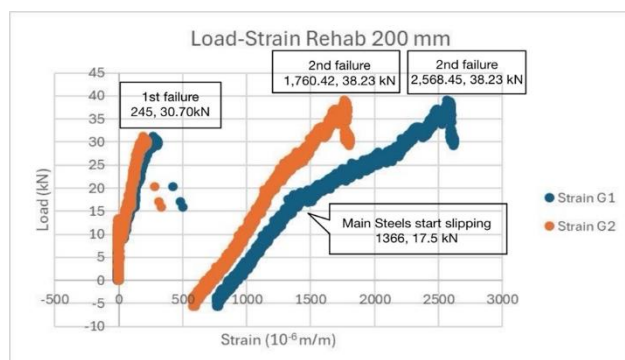
จากกราฟรูปที่ 4.3-5 พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานาที่ทำการสร้างความเสียหายบริเวณกึ่งกลางด้วยการบาก เกิดการคราก (Yield Point) เมื่อให้แรงถึง 7 kN สังเกตจากความชันของเส้นกราฟที่เปลี่ยนไป และเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานาเกิดการวิบัติเมื่อให้ Load ถึง 30.70 kN ขณะนั้นคานามีค่า Average LVDT ประมาณ 1.89 mm และเหล็ก Rehab bar 200 mm มีการยืดออก 245 $\mu\text{m/m}$ หลังจากเหล็กเสริมในคานาวิบัติ Load จึงตกอย่างฉับพลัน แล้วจึงค่อยเพิ่มขึ้น และสังเกตกราฟในรูปที่ 4.3-6 จะเห็นได้ว่าหลังจากเหล็กในคานาวิบัติ เมื่อให้ Load ถึงประมาณ 17.50 kN และมีค่า Strain ของ Rehab bar เป็น 1,366 $\mu\text{m/m}$ ความชันของเส้นกราฟจะเปลี่ยน เช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.3-7 ที่ความชันของกราฟเริ่มเปลี่ยน หลังจากค่า Strain ของ Rehab bar เป็น 1,366 $\mu\text{m/m}$ และมีค่า Average LVDT ประมาณ 5.61 mm แสดงให้เห็นว่าเหล็ก Rehab bar 200 mm จะยืดตัวออกเยอะขึ้น และการเคลื่อนตัวของคานาก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการหลุดของเหล็กเสริมในคานา (Slipping) ทั้งนี้ Rehab bar ก็ยังไม่ถึงค่าคราก เนื่องจากค่า Strain ยังไม่ถึงค่าความเครียดของเหล็กขณะถึงจุดคราก (y) ตามที่ทดสอบเหล็กไว้

จากกราฟในรูป 4.3-5 เมื่อให้ Load ถึง 38.23 kN ซึ่งเป็นแรงสูงสุด จะเห็นได้ว่าคานาเกิดการวิบัติอีกครั้งจากคอนกรีต ในขณะนั้นคานามีค่า Average LVDT ประมาณ 21.70 mm และเหล็ก Rehab bar ที่ติด Strain G1 ถึงค่าความเครียดของเหล็กขณะถึงจุดคราก (y) เนื่องจากมีค่า Strain เท่ากับ 2,568.45 $\mu\text{m/m}$ ในขณะที่เหล็ก Rehab bar ที่ติด Strain G2 ไม่ถึงจุดคราก



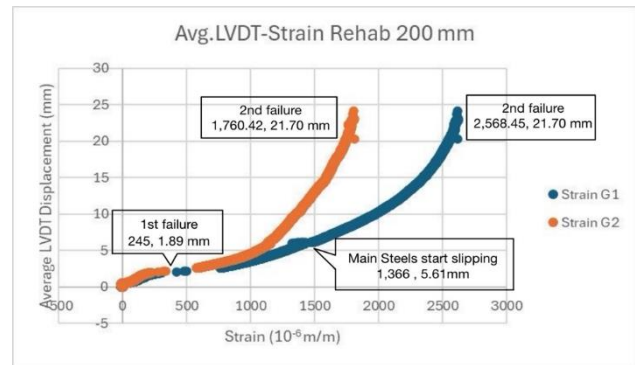
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ LVDT และ Load ของคานาติดตั้ง Rehab bar

200 mm



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และ Load ของคานาติดตั้ง Rehab

bar 200 mm



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และค่าเฉลี่ย LVDT ของคานาติดตั้ง

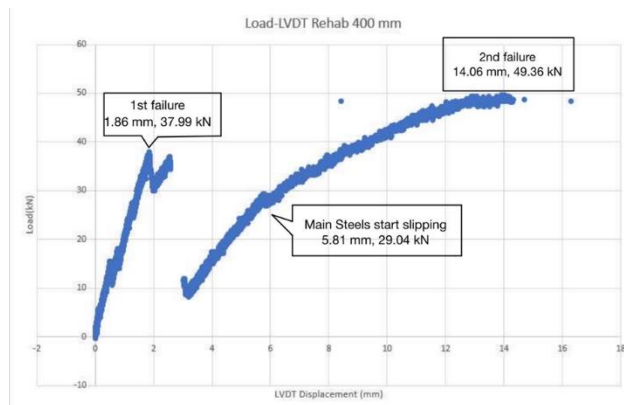
Rehab bar 200 mm

4.3.3 ผลทดสอบคานาติดตั้ง Rehab bar 400 mm

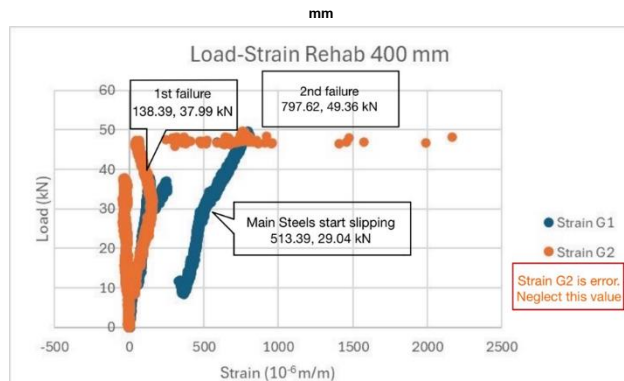
จากการทดสอบคานาติดตั้ง Rehab bar 400 mm แบบ 4 Point Test จนคานาวิบัติและนำค่าที่เก็บจากการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (kN), Average LVDT (mm) และ Strain บน Rehab bar ($\mu\text{m/m}$) พบว่าจากกราฟรูปที่ 12 เส้นกราฟเริ่มมีการกระตุกเป็นผลมาจากรอยแตก จะเห็นรอยร้าวเริ่มปรากฏขึ้นบนกราฟช่วง Load ประมาณ 10 kN ซึ่งสอดคล้องกับตอนทดสอบคานาในห้องปฏิบัติการที่เริ่มปรากฏรอยร้าวให้เห็นตอน Load ประมาณ 11.5 kN และเกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นหลังจากนั้นตลอดจนจนคานาเสร็จ

จากกราฟรูปที่ 12 พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานาที่ทำการสร้างความเสียหายบริเวณกึ่งกลางด้วยการบาก เกิดการคราก (Yield Point) เมื่อให้แรงถึง 6 kN สังเกตจากความชันของเส้นกราฟที่เปลี่ยนไป และเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานาเกิดการวิบัติเมื่อให้ Load ถึง 37.99 kN ขณะนั้นคานามีค่า Average LVDT ประมาณ 1.86 mm และเหล็ก Rehab bar 400 mm มีการยืดออก 138.39 $\mu\text{m/m}$ หลังจากเหล็กเสริมในคานาวิบัติ Load จึงตกอย่างฉับพลัน แล้วจึงค่อยเพิ่มขึ้น และสังเกตกราฟในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าหลังจากเหล็กในคานาวิบัติ เมื่อให้ Load ถึงประมาณ 29.04 kN และมีค่า Strain ของ Rehab bar เป็น 513.39 $\mu\text{m/m}$ ความชันของเส้นกราฟจะเปลี่ยน เช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 14 ที่ความชันของกราฟเริ่มเปลี่ยน หลังจากค่า Strain ของ Rehab bar เป็น 513.39 $\mu\text{m/m}$ และมีค่า Average LVDT ประมาณ 5.81 mm แสดงให้เห็นว่าเหล็ก Rehab bar 400 mm จะยืดตัวออกเยอะขึ้น และการเคลื่อนตัวของคานาก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการหลุดของเหล็กเสริมในคานา (Slipping) ทั้งนี้ Rehab bar ก็ยังไม่ถึงค่าคราก เนื่องจากค่า Strain ยังไม่ถึงค่าความเครียดของเหล็กขณะถึงจุดคราก (y) ตามที่ทดสอบเหล็กไว้

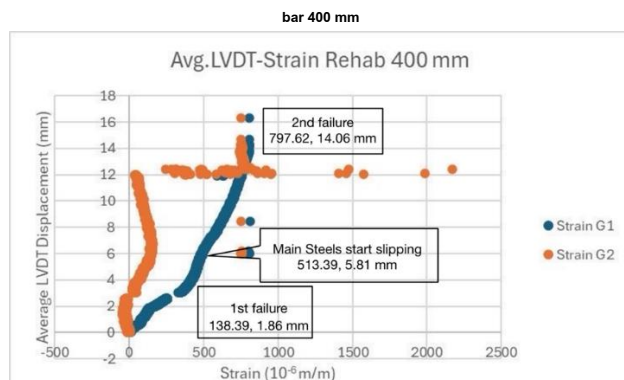
จากกราฟในรูป 12 เมื่อให้ Load ถึง 49.36 kN ซึ่งเป็นแรงสูงสุด จะเห็นได้ว่าคานาเกิดการวิบัติอีกครั้งจากคอนกรีต ในขณะนั้นคานามีค่า Average LVDT ประมาณ 14.06 mm และเหล็ก Rehab bar ที่ติดตั้งไว้ทั้งสองฝั่ง ไม่ถึงค่าความเครียดของเหล็กขณะถึงจุดคราก (y) ซึ่งจากกราฟในรูป 13 และกราฟในรูป 14 จะเห็นได้ว่า Strain G2 ให้ค่าที่ผิดปกติทำให้สรุปผลไม่ได้ แต่จากการดูค่าของ Strain G1 ที่จุดที่คานาวิบัติมีค่า Strain เท่ากับ 797.62 $\mu\text{m/m}$ ในขณะที่เหล็ก Rehab bar ที่ติด Strain G2 ไม่ถึงจุดคราก



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย LVDT และ Load ของคานติดตั้ง Rehab bar 400



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และ Load ของคานติดตั้ง Rehab



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และค่าเฉลี่ย LVDT ของคานติดตั้ง

Rehab bar 400 mm

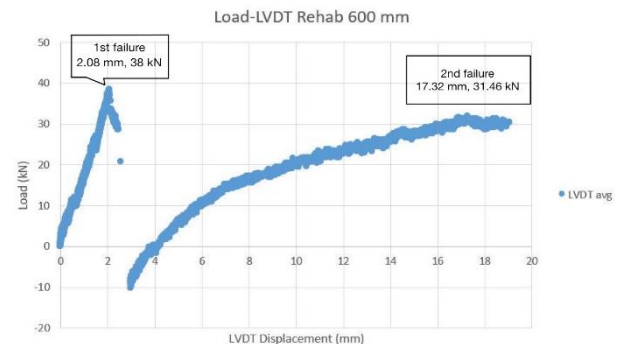
4.3.4 ผลทดสอบคานติดตั้ง Rehab bar 600 mm

จากการทดสอบคานติดตั้ง Rehab bar 600 mm แบบ 4 Point Test จนคานวิบัติและนำค่าที่เก็บจากการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (kN), Average LVDT (mm) และ Strain บน Rehab bar ($\mu\text{m/m}$) พบว่าจากกราฟรูปที่ 4.3-13 เส้นกราฟเริ่มมีการกระตุกเป็นผลมาจากรอยแตก จะเห็นรอยกระตุกเริ่มปรากฏขึ้นบนกราฟช่วง Load ประมาณ 7 kN ซึ่งสอดคล้องกับตอนทดสอบคานในห้องปฏิบัติการที่เริ่มปรากฏรอยร้าวแรกให้เห็นตอน Load ประมาณ 7.6 kN อ้างอิงจากกราฟที่ 4.3-16 และเกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นหลังจากนั้นตลอดจนจนคานเสร็จ

จากกราฟรูปที่ 4.3-13 พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานที่ทำการสร้างความเสียหายบริเวณกึ่งกลางด้วยการบาก เกิดการวิบัติเมื่อให้ Load ถึง 38 kN ขณะนั้นคานมีค่า Average LVDT ประมาณ 2.08 mm และเหล็ก Rehab bar 600 mm มีการยืดออก 53.57 $\mu\text{m/m}$ หลังจากเหล็กเสริมในคานวิบัติ Load จึงตกอย่างฉับพลัน แล้วจึงค่อยเพิ่มขึ้น และสังเกตกราฟในรูปที่ 4.3-14 จะเห็นว่าหลังจากเหล็กในคานวิบัติ กราฟจะวิ่งตามแกนนอนมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเหล็ก

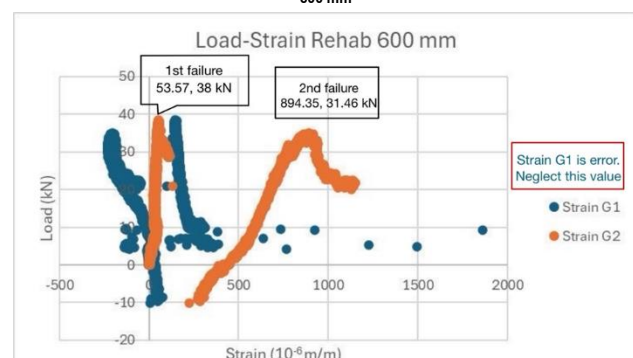
Rehab bar 600 mm จะยืดตัวออกเยอะขึ้น และการเคลื่อนตัวของคานก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ Rehab bar ก็ยังไม่ถึงค่าคราก เนื่องจากค่า Strain ยังไม่ถึงค่าความเครียดของเหล็กขณะถึงจุดคราก (y) ตามที่ทดสอบเหล็กไว้

จากกราฟในรูป 4.3-13 เมื่อให้ Load ถึง 31.46 kN ซึ่งเป็นแรงสูงสุด จะเห็นได้ว่าความเกิดการวิบัติอีกครั้งจากคอนกรีต ในขณะนั้นคานมีค่า Average LVDT ประมาณ 17.32 mm และเหล็ก Rehab bar ที่ติดตั้งไว้ทั้งสองฝั่ง ไม่ถึงค่าความเครียดของเหล็กขณะถึงจุดคราก (y) ซึ่งจากกราฟในรูป 4.3-14 และกราฟในรูป 4.3-15 จะเห็นได้ว่า Strain G1 ให้ค่าที่ผิดปกติทำให้สรุปผลไม่ได้ แต่จากการดูค่าของ Strain G1 ที่จุดที่คานวิบัติมีค่า Strain เท่ากับ 894.35 $\mu\text{m/m}$ ในขณะที่เหล็ก Rehab bar ที่ติด Strain G2 ไม่ถึงจุดคราก



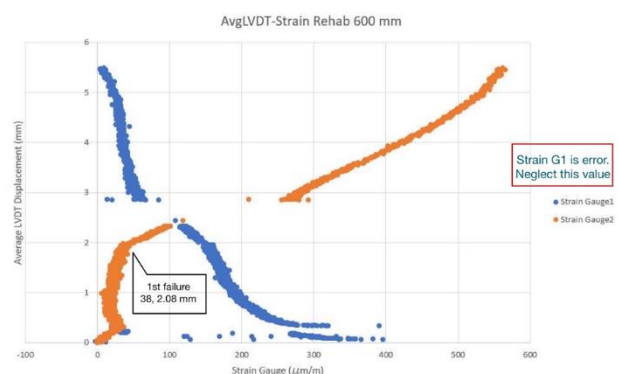
รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ LVDT และ Load ของคานติดตั้ง Rehab bar

600 mm



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และ Load ของคานติดตั้ง Rehab

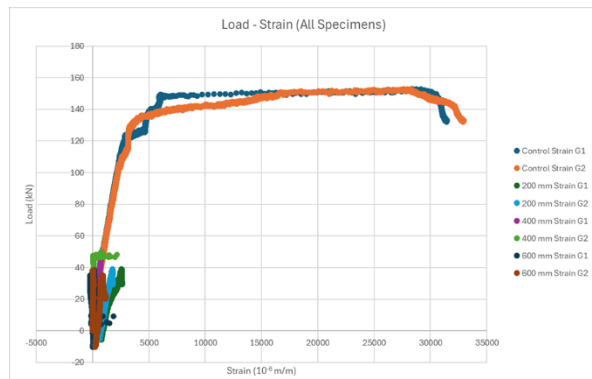
bar 600 mm



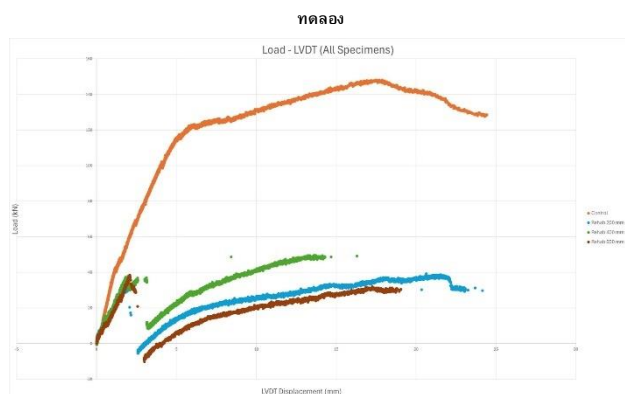
รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจาก Strain gauge และค่าเฉลี่ย LVDT ของคานติดตั้ง

Rehab bar 600 mm

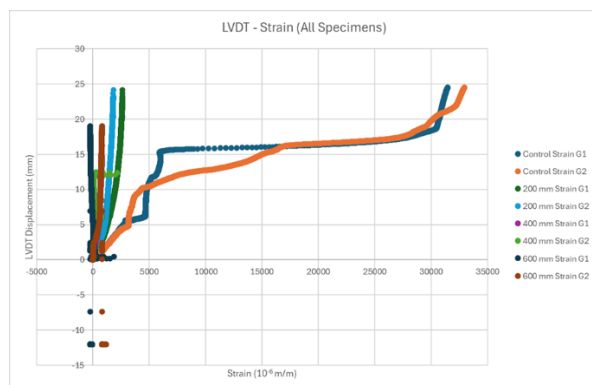
4.3.5 สรุปผลการทดสอบคานทดสอบ



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย LVDT และ Load ของคานติดตั้งทุกตัวอย่างการ



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Load และ Strain ของทุกคานทดสอบ



รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย LVDT และ Strain ของทุกคานทดสอบ

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคานควบคุม

Main Steel Yielding			Ultimate Point (Crushing)			Ultimate Load from calculation (kN)
Load (kN)	Avg. LVDT (mm)	Avg. Strain ($\mu\text{m/m}$)	Load (kN)	Avg. LVDT (mm)	Avg. Strain ($\mu\text{m/m}$)	
116.39	4.09	2,445.00	152.69	17.94	29,144.34	89.33

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบของคานที่ติดตั้ง Rehab Bar

	1st Failure			Main Steel Slipping			2nd Failure		
	Load (kN)	Avg. LVDT (mm)	Avg. Strain ($\mu\text{m/m}$)	Load (kN)	Avg. LVDT (mm)	Avg. Strain ($\mu\text{m/m}$)	Load (kN)	Avg. LVDT (mm)	Avg. Strain ($\mu\text{m/m}$)
Rehab Bar 200 mm	30.79	1.89	245.00	17.50	5.61	1,366.00	38.32	21.70	2,164.44
Rehab Bar 400 mm	37.99	1.86	138.39	29.04	5.81	513.39	49.36	14.06	797.62
Rehab Bar 600 mm	38.00	2.08	53.57	-	-	-	31.46	17.32	894.35
Average	35.56	1.94	145.65	23.27	5.71	939.70	39.69	17.69	1,285.47

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างคานทดสอบทั้ง 4 ตัว

	เปรียบเทียบระหว่าง 2nd Failure กับ Ultimate Point ของคานควบคุม			เปรียบเทียบระหว่าง 2nd Failure กับ 1st Failure		
	Load (%)	Avg. LVDT (%)	Avg. Strain (%)	Load (%)	Avg. LVDT (%)	Avg. Strain (%)
Rehab Bar 200 mm	25.10	120.96	7.43	124.82	1,148	883.44
Rehab Bar 400 mm	32.33	78.37	2.74	129.93	784.95	576.36
Rehab Bar 600 mm	20.60	96.54	3.07	82.79	831.73	1,669.50
Average	26.01	98.62	4.41	112.51	921.56	1,043.1

จากการทำตารางสรุปจะเห็นได้ว่าคานติดตั้ง Rehab Bar ที่รับแรงได้มากที่สุดคือ คานติดตั้ง Rehab bar 400 mm โดยรับแรงได้สูงถึง 49.36 kN คิดเป็นร้อยละ 32.33 ของแรงสูงสุดที่คานควบคุมรับได้

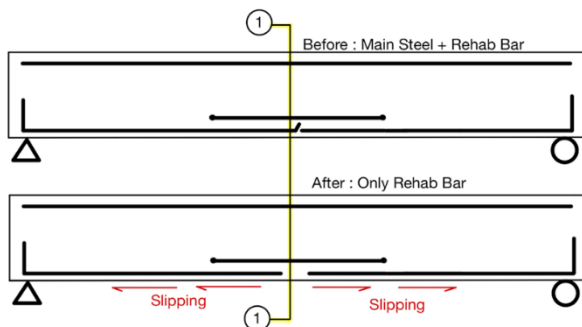
ในส่วนของการยึดตัวของเหล็ก จากผลค่า Strain จะพบว่าเหล็ก Rehab Bar โดยเฉลี่ยไม่ถึงจุดคราก ซึ่งเมื่อเทียบกับคานควบคุมที่เหล็กยึดไปจนถึงจุด Ultimate tensile strength จะเห็นว่าเหล็ก Rehab Bar ยึดสูงสุดเพียงแค่อ้อยู่ 7.43 ของคานควบคุม แต่เมื่อเทียบการยึดตัวของเหล็ก Rehab Bar ระหว่างการวิบัติครั้งแรก และครั้งที่สอง พบว่าหลังจากคานวิบัติครั้งแรกการ

ยึดตัวของเหล็ก Rehab Bar จะเพิ่มสูงอย่างมาก โดยในคานาติดตั้งเหล็ก Rehab Bar 600 mm มีการยึดตัวคิดเป็นร้อยละ 1,669.5 เมื่อเทียบกับการยึดของเหล็ก Rehab Bar ตอนวิบัติครั้งแรก และจากค่าเฉลี่ยของ LVDT จะเห็นว่าคานาที่โก่งตัวมากที่สุดคือ คานาที่ติดตั้ง Rehab Bar 200 mm ซึ่งโก่งตัวมากถึง 21.7 mm และมากกว่าคานาคอมมู โดยมากกว่าคิดเป็นร้อยละ 20.96 ในขณะที่คานาที่ติดตั้งเหล็ก Rehab Bar อื่นๆ จะมีค่า LVDT น้อยกว่าคานาคอมมู แต่โดยรวมก็ถือว่าค่าไม่ได้ต่างกันมาก

5 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

5.1 อภิปรายผลการทดสอบคานทดสอบ

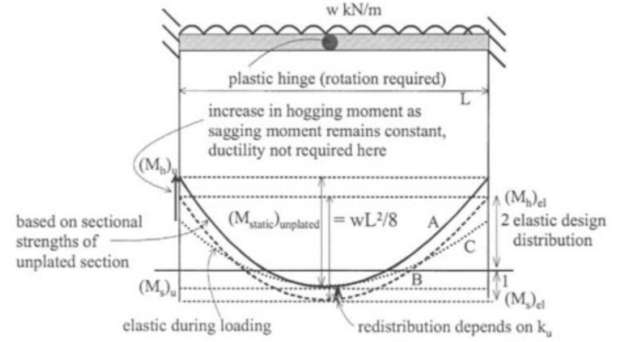
จากผลการทดสอบโมบที่ 4 พบว่าคานาที่ติดตั้ง Rehab Bar 200 และ 400 mm ซึ่งเป็นความยาวที่น้อยกว่าระยะทาบที่คำนวณไว้ (L_d) หลังจากเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานาวิบัติตรงกึ่งกลางคานาที่บากไว้ เหล็กเสริมรับแรงดึงที่ขาดก็เกิด Main Steel Slipping คือ เหล็กเคลื่อนออกจากตำแหน่งเดิม ทำให้แต่ก่อนที่หน้าตัดมีเหล็กช่วยรับกำลัง ตอนนั้นกลับเหลือแค่เหล็ก Rehab Bar รับแรงอย่างเดียวเหมือนในรูปที่ 21 ทั้งนี้ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงที่ขาดไปแล้ว เกิดการ Slipping เกี่ยวเนื่องกับความยาวของเหล็ก Rehab Bar เพราะเมื่อทาบเหล็กด้วยความยาวที่เหมาะสม เหล็กก็สามารถรับแรงได้โดยไม่หลุดออกจากกัน ในทางตรงกันข้าม หากระยะทาบเหล็กน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ก็จะเกิดการ Slipping แยกออกจากกัน เหล็กที่นำมาทาบ จะเห็นว่า Slipping ไม่เกิดขึ้นในคานาติดตั้ง Rehab Bar 600 mm เนื่องจากระยะทาบยาวเพียงพอ ตรงกับที่คำนวณไว้ ผลที่ตามมาของ Main Steel Slipping ทำให้เหล็ก Rehab Bar ต้องรับแรงมากขึ้น ค่า Strain ที่ติดบนเหล็ก Rehab Bar จะเพิ่มสูงอย่างมีนัยสำคัญ เห็นได้จากกราฟในรูป 10 และ 14 ที่เส้นกราฟความชันจะลดลง และขนานกับแกนนอนมากขึ้น



รูปที่ 21 Main Steel Slipping Concept

เมื่อดูผลค่า Strain ของเหล็ก Rehab Bar ทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกันเอง พบว่า ในเหล็ก Rehab Bar 200 mm มีการยึดตัวสูงกว่าคานาที่ติดตั้ง Rehab Bar ขนาดอื่น ๆ นอกจากจะเป็นผลมาจาก Main Steel Slipping อย่างรวดเร็วตั้งแต่รับแรงได้เพียง 17.5 kN ทำให้เหล็ก Rehab Bar 200 mm ต้องเริ่มรับแรงแทนเหล็กเสริมรับแรงดึงและเกิดการยึดออกแล้ว ก็อาจเป็นผลมาจากความของ Rehab Bar เนื่องจากของ Strain เกิดจากการนำความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับความยาวเดิม ซึ่งเหล็ก Rehab Bar 200 mm มีความยาวเดิมที่สั้นกว่า เมื่อตัวหารมีค่าน้อยก็ทำให้ได้ค่าที่มาก ในทางกลับกันเหล็ก Rehab Bar 400 และ 600 mm เมื่อนำไปเป็นตัวหารก็จะได้ค่า Strain ที่น้อยลง

อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบค่า Strain ของเหล็กที่ติดตั้ง Rehab Bar กับคานาคอมมู ค่า Strain ของคานาที่ติดตั้ง Rehab Bar มีค่าน้อยมาก เนื่องจากหน้าตัดของคานาวิบัติและคอนกรีตไม่สามารถรับแรงได้แล้ว ทำให้เหล็ก Rehab Bar ไม่ได้ยึดเต็มความสามารถ ในทางกลับกันค่าการโก่งตัวของคานา หรือ Average LVDT ก็ใกล้เคียงกับค่าโก่งตัวจากคานาคอมมู โดยเฉพาะคานาติดตั้ง Rehab Bar 200 mm ที่มีค่าโก่งตัวถึง 21.7 mm ซึ่งมากกว่าคานาคอมมู ทั้งที่รับแรงน้อยกว่ามาก พฤติกรรมนี้คล้ายกับ Plastic hinge เป็นจุดที่หน้าตัดเกิดการวิบัติและไม่สามารถรับแรงได้แล้ว เกิดการหมุนได้โดยปราศจากโมเมนต์ดัดเพิ่มเติม เมื่อเกิดพฤติกรรมนี้คานาจะสามารถเกิดการบิดหมุนด้วยมุมที่กว้างขึ้น กลายเป็น inelastic deformation ขนาดใหญ่จากแรงดัด รวมไปถึงการเกิดการกระจายโมเมนต์ใหม่ หรือ redistribute moments (Damping Technologies for Tall Buildings, 2019) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพคานาหลังทดสอบจะพบว่าคานามีการบิดหมุนและโก่งตัวมากอ้างอิงจากรูปที่ 23

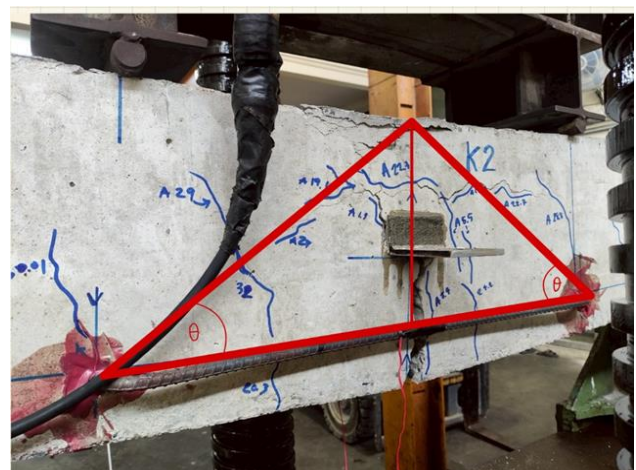


รูปที่ 22 ลักษณะ Plastic hinge



รูปที่ 23 การโก่งตัวของคานาติดตั้ง Rehab Bar 200 mm หลังทดสอบ

ในส่วนของการรับแรงของคานาติดตั้ง Rehab Bar เมื่อเทียบกับแรงสูงสุดที่ควบคุมรับได้ พบว่าคานาติดตั้ง Rehab Bar รับแรงได้เฉลี่ยร้อยละ 26.01 ของแรงสูงสุดที่คานาคอมมูรับได้ ซึ่งถือว่าน้อยและไม่ได้เสริมกำลังโครงสร้างอย่างที่ควรเป็น จากงานวิจัยของ Smith & Triantafillou (1998) [9] ได้ระบุว่าการใช้ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของพื้นคอนกรีตที่เสียหายได้ถึง 30-50% และยังช่วยลดการเสียรูปเมื่อรับแรงทำให้โครงสร้างกลับมามีเสถียรภาพเหมือนเดิม [7,9] และงานวิจัยของ Ali Demir, Emre Ercan 2 และ Duygu Dönmez Demir [6] ที่ใช้แผ่นเหล็กมาติดเสริมกำลังจากภายนอกด้วยที่หนีบ ก็ทำให้คานารับกำลังได้สูงขึ้นเกือบสองเท่า แต่ในงานวิจัยนี้คานาติดตั้ง Rehab Bar ไม่สามารถเสริมกำลังได้เท่าที่ควรมาจากการตำแหน่งที่ติดตั้งเหล็ก Rehab Bar ระยะ Depth คานาน้อย มุมที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5.1-4 ก็ค่อนข้างแคบ เมื่อ Moment arm น้อย ส่งผลถึงค่าแรงดัดที่ลดลงและทำให้ Rehab Bar ไม่ได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพ รวมไปถึงการติดตั้ง Rehab Bar ซึ่งไม่ได้แนบชิดกับตัวคานา ทำให้ช่วยรับแรงได้ไม่ดีเท่าที่ควร สังเกตจากช่วงแรกที่ค่าการยึดตัวของเหล็ก Rehab Bar เพิ่มขึ้นเฉลี่ยเกือบ 10 เท่า เทียบกับก่อนเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานาวิบัติ บ่งชี้ให้เห็นว่าในช่วงแรก Rehab Bar ยังไม่ได้รับแรงและยึดออกเท่าไรนัก และมาเริ่มรับแรงเพิ่มขึ้นหลังเหล็กในคานาวิบัติไปแล้ว



รูปที่ 21 ระยะความลึกประสิทธิภาพ และมุมที่เกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เพิ่มระยะ Depth ด้วยการติดตั้ง Rehab Bar ไว้ด้านใต้คาน
- ติดตั้ง Rehab Bar ให้แนบกับคานทดสอบมากยิ่งขึ้น
- ควรติด Strain gauge ที่ Main Steel ในทุกตัวอย่าง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการซ่อมแซมโครงสร้างสามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจาก รศ.ดร.พัฒนชัย สมิทธาทร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อเสนอแนะ รวมถึงปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งปริญญานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ บริษัท อิลติ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติ ไปจนถึงการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท เอ็น.เอส.พลัส เอ็นจิเนียริง จำกัด. (2018). ขั้นตอนและวิธีการซ่อมอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. สืบค้นจาก <https://www.nsplusengineering.com/18105717/>
- [2] Pepsteel. (2024). การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็ก: ข้อดีข้อเสียของแต่ละประเภท. สืบค้นจาก การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็ก ข้อดีข้อเสียของแต่ละประเภท | Pepsteel TH
- [3] สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการกรุงเทพมหานคร. (2563). กทม.นำร่องเก็บข้อมูลตึกเก่า 12 เขต คาดเสร็จในปี 64. สืบค้นจาก กทม.นำร่องเก็บข้อมูลตึกเก่า 12 เขต คาดเสร็จในปี 64 | Thai PBS News ข่าวไทยพีบีเอส
- [4] สำนักการวางผังและพัฒนาเมือง กรุงเทพมหานคร. (2562). ข้อมูลอาคารใน กทม.และผังเมืองรวม กทม. (Dashboard). สืบค้นจาก ข้อมูลอาคารใน กทม.และผังเมืองรวม กทม. (Dashboard) - สำนักการวางผังและพัฒนาเมือง
- [5] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.). (2560). เดือนสัญญาณภัยอาคารเก่า: การตรวจสอบอาคารประจำปีเป็นเรื่องสำคัญ. สืบค้นจาก <https://www.consmagazine.com>
- [6] Ali Demir, Emre Ercan, & Duygu Dönmez Demir. (2018). Strengthening of reinforced concrete beams using external steel members. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/326413269>
- [7] American Concrete Institute (ACI). (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08).
- [8] Gurbuz, T., Kaya, Y., Ilki, A., & Kumbasar, N. (2007). Pullout performance of retrofit adhesive anchors in low strength concrete [Conference paper]. Istanbul Technical University. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/262675455>
- [9] Horseen. (n.d.). HM-2 0 Unidirectional Carbon Fiber Wrap. Retrieved from <https://www.horseen.com/carbon-fiber-strengthening-system/unidirectional-CFRP-wrap>
- [10] JSW One MSME. (2024). Repair of RCC structures: Techniques and materials used. Retrieved from Repair of RCC structures: Techniques and materials used
- [11] Mohammed Hashad. (2021). Rehabilitation of reinforced concrete slabs. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/353298281_Rehabilitation_of_reinforced_concrete_slabs

- [12] Pepsteel. (2024). การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็ก: ข้อดีข้อเสียของแต่ละประเภท. สืบค้นจาก การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็ก ข้อดีข้อเสียของแต่ละประเภท | Pepsteel TH
- [13] NBM&CW. (2022). Structural rehabilitation of reinforced concrete structures. Retrieved from <https://www.nbmcw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/waterproofing-repair-chemicals/structural-rehabilitation-of-reinforced-concrete-structures.html>