

การศึกษากำลังยึดหน่วงของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตด้วยวิธีการเจาะเสียบร่วมกับกาวอีพ็อกซี่

Study of the bond strength of reinforcing steel embedded in concrete column using the drilling method combined with epoxy glue

ธีรวุฒิ ปोंกัน¹ ชุชัย สุจิรวกุล²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
teerawoot.pongkan@gmail.com, chuchai.suj@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การเจาะเสียบเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมเพื่อทำการหล่อคานคอนกรีตเพิ่มเติมเป็นสิ่งที่พบเห็นในงานต่อเติมอาคารพักอาศัยขนาดเล็กโดยทั่วไป ผู้รับเหมาก่อสร้างส่วนใหญ่ใช้วิธีการเจาะเสียบเหล็กเสริมและยึดด้วยกาวอีพ็อกซี่ในโครงสร้างคอนกรีต งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงแรงยึดหน่วงของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตด้วยกาวอีพ็อกซี่ โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการถอนมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.2 x 0.2 เมตร และความยาวเท่ากับ 0.6 เมตร โดยกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เท่ากับ 28 MPa ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบประกอบไปด้วย เหล็กเสริมหลักในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 รูปแบบได้แก่ 4-DB12 และ 4-DB16 เหล็กที่ใช้ในการฝังยึดในเสาคอนกรีตมี 2 ขนาด คือ DB12 และ DB16 ระยะฝังของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตมี 2 ระดับ คือ 120 mm และ 160 mm และจำนวนเหล็กเสริมฝังยึดเพื่อทดสอบการถอนมี 2 รูปแบบคือ 1 เส้น และ 2 เส้น เหล็กเสริมทั้งหมดที่ใช้เป็นชั้นคุณภาพ SD40 ผลการศึกษาพบว่า ระยะฝังของเหล็กเสริม ขนาดของเหล็กเสริม และจำนวนเหล็กเสริมฝังยึดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงถอนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม หากระยะฝังของเหล็กเสริมน้อย และจำนวนเหล็กเสริม 2 เส้นถูกใช้ในการฝัง จะทำให้พฤติกรรมการถอนของเหล็กเสริมที่ใช้วิธีการเจาะเสียบเหล็กเสริมร่วมกับกาวอีพ็อกซี่ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการวิบัติแบบหลุดออกของคอนกรีต

คำสำคัญ: แรงยึดหน่วง, กาวอีพ็อกซี่, ระยะฝัง

Abstract

Drilling and inserting reinforcing bars into existing reinforced concrete columns to cast additional concrete beams is a common practice in the expansion of small-scale residential buildings. In general, most contractors used the method of drilling and inserting reinforcing bars and fastening them with epoxy glue in concrete columns. This research studies the bond of reinforcing bars embedded in concrete with epoxy glue, whereby the pullout behavior of reinforcing bars embedded in reinforced concrete columns was studied. The concrete column samples used in the pullout test had a cross-sectional area of 0.2

x 0.2 meters and a length of 0.6 meters, with a compressive strength of 28 MPa. The main variables used in the comparative study were: 2 types of main rebars in reinforced concrete columns, i.e. 4-DB12 and 4-DB16; 2 sizes of rebars embedded in the concrete columns, i.e. DB12 and DB16; 2 levels of embedded length of rebar in concrete columns, i.e. 120 mm and 160 mm; and 2 different numbers of embedded rebars for the withdrawal test, 1 and 2 bars. All rebars were SD40 standard. The study's results showed that an increase in the embedded length of rebar, the size of rebars, and the number of embedded rebars resulted to a significant increase in the pullout force. However, if the embedment length of the rebar was small and two rebars were used for embedment, the pullout behavior of the rebar using the drilling method combined with epoxy glue would be reduced rapidly due to the concrete breakout failure.

Keywords: Bond, Epoxy glue, Embedded length

1. บทนำ

การก่อสร้างอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางส่วนใหญ่ในประเทศไทยใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Cast-in place concrete) ที่เป็นระบบโครงสร้างแบบเสา-คาน (Skeleton system) โดยทำการติดตั้งแบบหล่อ และเหล็กเสริมให้เสร็จเรียบร้อยก่อน จากนั้นทำการเทคอนกรีตลงในแบบ ในบางกรณีของการก่อสร้างอาคารอาจเกิดข้อผิดพลาด เช่น ลืมฝังเหล็กเสริมเพื่อต่อโครงสร้าง การไม่ได้เผื่อเหล็กเสริมออกไปในกรณีการก่อสร้างคานยื่น (Cantilever Beam) และการไม่ได้ฝังเหล็กเสริมในการก่อสร้างบันได หรือ กรณีที่มีดัดแปลงอาคารที่ต้องการเพิ่มองค์อาคารเพิ่มเติม เช่น การต่อเติมพื้นที่ภายในอาคารซึ่งทำให้ต้องมีการฝังเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างคานและพื้นที่ที่ต้องก่อสร้างเพิ่มเติม ดังนั้น การฝังเหล็กเพื่อยึดกับองค์อาคารเดิมเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อการส่งถ่ายแรงต่าง ๆ ระหว่างองค์อาคารเดิม และองค์อาคารใหม่ ซึ่งหากไม่มีการเตรียมฝังเหล็กเสริมไว้ในองค์อาคารเดิมแต่เริ่มแรกต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการจากวิศวกรที่มีประสบการณ์

ที่ผ่านมา ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมและการประยุกต์ใช้งานของเหล็กเสริมที่ฝังยึดภายหลังในคอนกรีตโดยใช้วิธีการเจาะเสียบร่วมกับการใช้

การวิจัยที่ปรึกษา ปัญหา จุฑะกานนท์ และชลนัฒนา สติติสังวร [1] ได้ศึกษา กำลังรับแรงดึงของสมอยึดที่ใช้เคมีประสานโดยฝังในคอนกรีตพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นส่งผลให้ กำลังรับแรงดึงสูงขึ้น นอกจากนี้ ขนาดของสลักเกลียวที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น และใน ส่วนของเคมีประสานทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ มีแนวโน้มการรับแรงดึงไปในทิศทาง เดียวกัน โดยมีลักษณะความเสียหาย 4 รูปแบบ คือการวิบัติโดยคอนกรีต แตก การวิบัติโดยการหลุดออก การวิบัติโดยสลักเกลียวขาด และ การวิบัติ โดยคอนกรีตแตกและโดยการหลุดออก ปิยนุช ใจแก้ว และภักดี คบกลาง [2] ได้ศึกษากำลึงยึดหน่วงระหว่างเหล็กเสริมที่เคลือบอีพ็อกซีกับคอนกรีตที่ ผสมเถ้าขานอ้อยโดยทดลองหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม. มีเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เสริมอยู่ที่จุด กึ่งกลางของหน้าตัดมีระยะฝังเท่ากับ 50 มม. คอนกรีตที่ใช้มีเถ้าขานอ้อย ผสมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก จำลองตัวอย่างให้มีลักษณะการยึดหน่วง 2 แบบ คือ ฝังเหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีตกับ เจาะคอนกรีตในภายหลัง แล้วเสริมเหล็กโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำการทดสอบตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน โดยได้พบว่า การใช้อีพ็อก ซีมีผลให้กำลังยึดหน่วงในช่วง 7 วันแรก มีค่ามากกว่ากรณีฝังเหล็กเสริม พร้อมหล่อคอนกรีตถึงประมาณร้อยละ 12 โดยต้องผสมเถ้าขานอ้อยใน อัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับในระยะยาว ตัวอย่างที่ทดสอบทั้ง 2 กรณีให้กำลังยึดหน่วงไม่แตกต่างกัน วาสิฏฐฤกษ์ จันทรเทศ และสุชัย สุจิวิร กุล [3] ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่าง คอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดเคมีที่จุดต่อ จาก การวิจัยพบว่า อุปกรณ์ฝังยึดจะช่วยเพิ่มกำลังยึดหน่วงที่รอยร้าวแรก (First-cracking Bond Strength) และก่อให้เกิดกำลังยึดหน่วงหลังรอยร้าว (Post-cracking Bond Strength) โดยกำลังยึดหน่วงที่รอยร้าวแรกขึ้นอยู่กับความ หยาบของผิวคอนกรีตเดิม ลักษณะการวิบัติส่วนใหญ่จะเกิดการแยกออก จากกันของจุดต่อโดยมีรอยร้าวที่กินลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีต และอาจมีบาง ตัวอย่างจะวิบัติแบบ Concrete Breakout ภูวิศร อ้อแสงชัย [4] ทำการ ศึกษาการเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินยึดระหว่าง คอนกรีตกับเหล็กเสริมบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังที่สัมผัสเพลิงไหม้ โดยใช้สมการทำนายค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ลดลงตามค่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอ้างอิงจากผลการทดสอบการดึงออก ประกอบกับผล การประมาณค่าอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซินจากแบบจำลองถ่ายโอนความร้อน โดยได้พบว่า การต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินมีค่าลดลงตาม ระยะเวลาเพลิงไหม้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 60 นาทีแรก ของเพลิงไหม้ (เหลือเพียง 57% 65.9% 73.7% และ 80.3% สำหรับเหล็ก เสริม DB12 DB16 DB20 และ DB25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม.) ยศ สมพรเจริญสุข [5] ทำการศึกษารัดดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริม กำลังจากภายนอกโดยยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีที่มีสลักเกลียวฝังยึด โดย ได้พบว่า คานเสริมกำลังที่มีการใช้วิธีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเพียง อย่างเดียวมีโอกาสในการเกิดการวิบัติที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด และมี พฤติกรรมเป็นแบบเปราะ เนื่องจากเกิดการหลุดล่อนที่บริเวณปลายของ

แผ่นเหล็กออกจากผิวสัมผัสคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ โดยคานมีค่าการแอ่นตัว ที่น้อยและมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะ หรือคานเสริมกำลังมีโอกาสเกิดการ วิบัติจากการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม หรือมีโอกาสเกิดการ วิบัติแบบผสมระหว่างการวิบัติ เนื่องจากเกิดการหลุดล่อนที่บริเวณปลาย ของแผ่นเหล็กและเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมา ภายหลัง ในส่วนของคานเสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและ มีสลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติม โดยส่วนใหญ่มีค่าการแอ่นตัวมากและคานมี พฤติกรรมเป็นแบบเหนียวแม้จะมีการหลุดล่อนเพียงบางส่วนของแผ่นเหล็ก ออกจากผิวสัมผัสคอนกรีต แต่คานเสริมกำลังยังคงมีความสามารถในการรับ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งบ่งชี้ได้ว่า คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมคอมโพสิตในการร่วมกันต้านทานแรงกระทำจากภายนอก

วิธีการเจาะเสียบและฝังยึดเหล็กเสริมโดยใช้การใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อม ประสานระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้ เพราะสะดวกและรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม วิศวกรไทยยังขาดความรู้และความ เข้าใจอย่างลึกซึ้งในปัจจุบันต่าง ๆ ที่ควรคำนึงเพื่อให้ได้แรงยึดหน่วงเป็นไป ตามที่ได้การออกแบบไว้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษากำลึงและ พฤติกรรมการยึดหน่วงของเหล็กเสริมที่ฝังยึดในโครงสร้างเสาคอนกรีตด้วย วิธีการเจาะเสียบร่วมกับการใช้อีพ็อกซี

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการถอนของเหล็กเสริมหลักใน คานคอนกรีตที่ฝังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวอย่างควบคุม (เหล็กเสริมได้ฝังก่อนเทคอนกรีต) และ ตัวอย่างที่เจาะ ฝังเหล็กเสริมโดยใช้การใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน
- 2.2 เพื่อเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกำลังยึดหน่วงระหว่างเหล็ก เสริมกับคอนกรีต ประกอบด้วย ขนาดของเหล็กเสริมหลักในเสา คอนกรีต ความลึกของการฝังเหล็กเสริม ขนาดของเหล็กเสริมที่ฝังใน เสา และจำนวนเหล็กเสริมที่ทำการฝัง

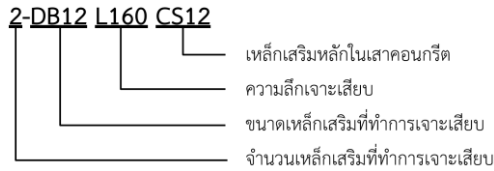
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 คอนกรีตผสมเสร็จ โดยมีกำลังอัดของคอนกรีต เท่ากับ 28 MPa
- 3.1.2 เหล็กเสริมหลักที่ใช้มี 2 ขนาด คือ DB12 และ DB16 โดยมีชั้น คุณภาพ SD40
- 3.1.3 กาวอีพ็อกซีสำหรับเจาะเสียบเหล็กเสริมของบริษัท Hilti (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น HIT-RE 500 V3
- 3.1.4 ปูนอนซิงเกร้าท์ของบริษัท ชิเก้า (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น LANKO 701 CLAVEX

3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เนื่องจากการทดสอบมีตัวอย่างทดสอบจำนวนมาก จึงกำหนดสัญลักษณ์ในการจัดการข้อมูล โดยสัญลักษณ์ดังกล่าวประกอบด้วยจำนวนเหล็กเสริมที่ทำการเจาะเสียบ ขนาดของเหล็กเสริมที่ทำการเจาะเสียบ ความลึกเจาะเสียบ และเหล็กเสริมหลักในเสา ดังแสดงในรูปที่ 1



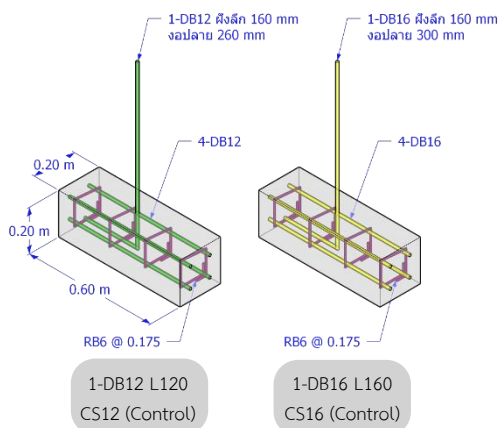
รูปที่ 1 ตัวอย่างสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างเสาคอนกรีตมีขนาดหน้าตัด 0.2 x 0.2 เมตร ความยาว 0.6 เมตร จำนวน 14 ตัวอย่าง และได้เสริมเหล็กแกน และเหล็กปลอก ได้ถูกเตรียมไว้เพื่อทดสอบการถอนของเหล็กเส้น โดยเหล็กเส้นที่จะทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ตัวอย่างควบคุม

เหล็กเสริมได้ฝังในตัวอย่างเสา ก่อนการเทคอนกรีตจำนวน 2 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วย เหล็กเสริมหลัก DB12 จำนวน 1 ตัวอย่าง และ เหล็กเสริมหลัก DB16 จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยมีลักษณะการฝังในตัวอย่างเสา คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 และรายละเอียดของตัวอย่างควบคุมได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 1



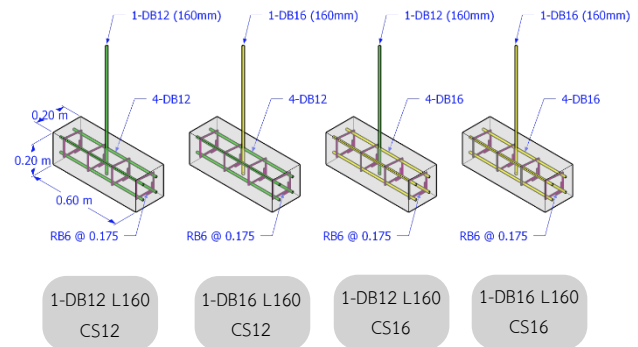
รูปที่ 2 ตัวอย่างควบคุม (เหล็กเสริมได้ฝังก่อนเทคอนกรีต)

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเสริมเหล็กตัวอย่างควบคุม

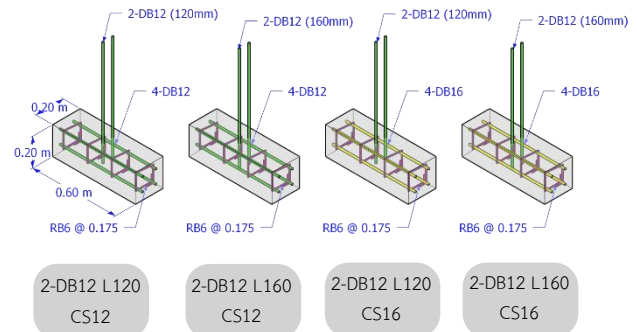
จำนวนเหล็กเสริมที่ถูกฝัง (เส้น)	ขนาดเหล็กเสริม	ระยะฝัง (mm)	ระยะจอลาย (mm)	การเหล็กเสริมในเสา คอนกรีต	สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
1	DB12	160	260	4-DB12 RB6@0.175	1-DB12 L160 CS12 (Control)
1	DB16	160	300	4-DB16 RB6@0.175	1-DB16 L160 CS16 (Control)

3.3.2 ตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริมโดยใช้การอัดฉีด

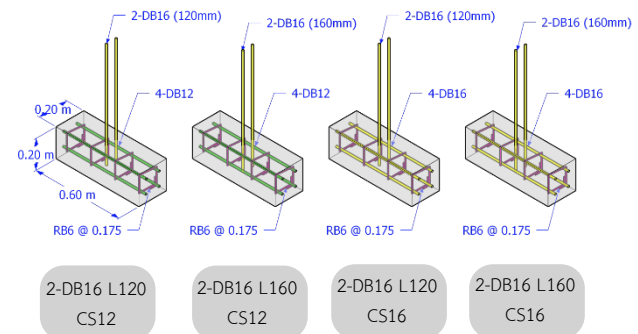
เหล็กเสริมได้ฝังในเสาโดยใช้การอัดฉีดเป็นวัสดุเชื่อมประสานจำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งมีตัวแปรหลักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดของเหล็กเสริมหลักในเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก คือ DB12 และ DB16 ความลึกของการฝังเหล็กเสริมที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 120 mm และ 160 mm และขนาดของเหล็กเสริมที่ฝังแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ DB12 และ DB16 รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริม 1 เส้น ขนาด DB12 และขนาด DB16 รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริม 2 เส้น ขนาด DB12 และ รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริม 2 เส้น ขนาด DB16 โดยรายละเอียดของตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริมโดยใช้การอัดฉีดเป็นวัสดุประสานแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริม 1 เส้น ขนาด DB12 และ ขนาด DB16



รูปที่ 4 ตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริม 2 เส้น ขนาด DB12



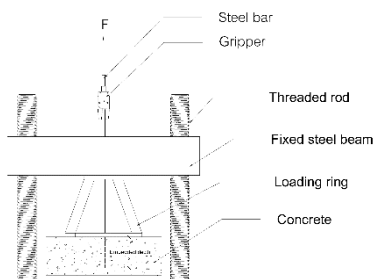
รูปที่ 5 ตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริม 2 เส้น ขนาด DB16

ตารางที่ 2 รายละเอียดการฝังเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตโดยใช้กาวยีฟ็อกซ์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

จำนวนเหล็กเสริมที่ผูกฝัง (เส้น)	ขนาดเหล็กเสริม	ระยะฝัง (mm)	การเสริมเหล็กในเสาคอนกรีต	สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
1	DB12	160	4-DB12 RB6 @0.175	1-DB12 L160 CS12
	DB16	160		1-DB16 L160 CS12
2	DB12	120		2-DB12 L120 CS12
		160		2-DB12 L160 CS12
	DB16	120		2-DB16 L120 CS12
		160		2-DB16 L160 CS12
1	DB12	160	4-DB16 RB6 @0.175	1-DB12 L160 CS16
	DB16	160		1-DB16 L160 CS16
2	DB12	120		2-DB12 L120 CS16
		160		2-DB12 L160 CS16
	DB16	120		2-DB16 L120 CS16
		160		2-DB16 L160 CS16

3.4 การเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบแรงยึดหน่วง

การทดสอบแรงยึดหน่วงของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต เริ่มจากการวัดขนาดเพื่อหาจุดกึ่งกลาง และทำการเจาะเสียบเพื่อฝังยึดเหล็กเสริมในโครงสร้างเสาให้ได้ความลึกที่กำหนด โดยรายละเอียดของตัวอย่างได้แสดงในตารางที่ 2 จากนั้นนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ UTM วางตัวอย่างบนพื้นที่ทดสอบ ติดตั้ง Loading ring บนตัวอย่างทดสอบ จากนั้นควบคุมหัวทดสอบของเครื่องทดสอบมาจับยึดเหล็กเสริมที่ผ่านการเจาะเสียบและยึดด้วยกาวยีฟ็อกซ์ หรือเหล็กเสริมได้ฝังก่อนเทคอนกรีต (กรณีตัวอย่างควบคุม) โดยกรณีที่ฝังเหล็กเสริมไว้ 2 เส้น จะทำการยึดเหล็กเสริมให้เป็นเส้นเดียวกันโดยวิธีการเชื่อมด้วยไฟฟ้าเพื่อให้หัวทดสอบสามารถจับกับเหล็กเสริมได้อย่างมั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 6

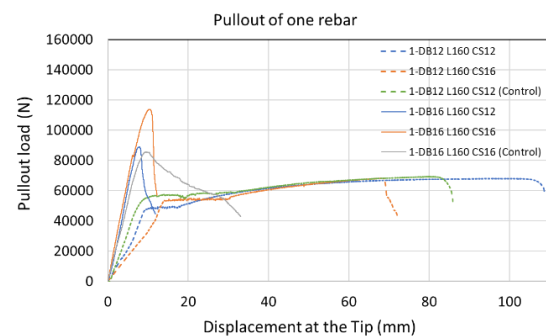


รูปที่ 6 การทดสอบกำลังยึดหน่วงของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีต

4. ผลการทดสอบ

4.1 พฤติกรรมการถอนของเหล็กเสริม 1 เส้น ที่ฝังในคอนกรีต

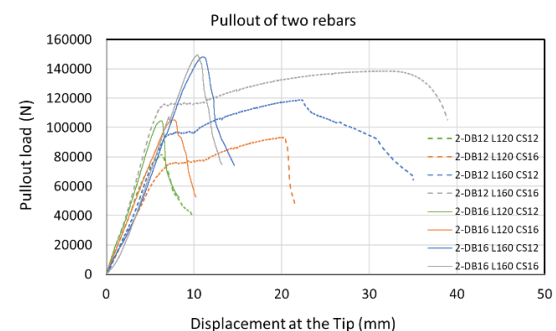
ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเจาะเสียบเหล็ก 1 เส้น ขนาด DB12 และตัวอย่างควบคุมที่ฝังเหล็กเสริมไว้ก่อน 1 เส้น ฝังลึก 160 mm มีพฤติกรรมการถอนในทิศทางเดียวกันคือเมื่อเหล็กเสริมถึงจุดคลาก จะยังสามารถรับแรงถอนต่อไปได้อีกเล็กน้อยก่อนที่คอนกรีตจะวิบัติ ในส่วนของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเจาะเสียบเหล็ก 1 เส้น ขนาด DB16 และตัวอย่างควบคุม มีค่ากำลังรับแรงถอนสูงกว่า การฝังด้วยเหล็กเส้นขนาด DB12 ตัวอย่างเหล่านี้ไม่ปรากฏพฤติกรรมการคลาก โดยแรงถอนจะลดลงทันทีอย่างเห็นได้ชัดจนเมื่อคอนกรีตเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 พฤติกรรมการถอนของตัวอย่างที่ฝังเหล็กเสริมจำนวน 1 เส้น

4.2 พฤติกรรมการถอนของเหล็กเสริม 2 เส้น ที่ฝังในคอนกรีต

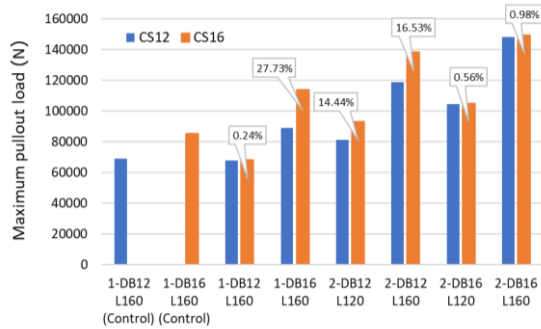
ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเจาะเสียบเหล็ก 2 เส้น ขนาด DB12 จำนวนทั้งหมด 4 ตัวอย่าง มีพฤติกรรมการรับแรงถอนเกือบไปในทิศทางเดียวกันคือแสดงการคลากของเหล็กเสริมและระยะการเคลื่อนตัวค่อนข้างมาก ยกเว้นตัวอย่าง 2-DB12 L120 CS12 ที่มีระยะฝังน้อย และขนาดเหล็กแกนในเสามีขนาดเล็ก อาจทำให้เกิดการวิบัติของคอนกรีตก่อนที่เหล็กเสริมจะคลาก ส่วนตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ทำการเสียบเหล็กขนาด DB16 ทำให้ค่ากำลังรับแรงถอนสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยระยะฝังของเหล็กเสริมที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงถอนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างเสาเกิดการวิบัติจากการหลุดออกของคอนกรีตและไม่สามารถรับแรงถอนได้ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 พฤติกรรมการถอนของตัวอย่างที่ฝังเหล็กเสริมจำนวน 2 เส้น

4.3 อิทธิพลของขนาดเหล็กเสริมหลักในเสาที่มีขนาดต่างกัน

เหล็กเสริมหลักที่ใช้ในเสาคอนกรีตมีขนาดแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ DB12 (ใช้สัญลักษณ์ CS12) และ DB16 (ใช้สัญลักษณ์ CS16) การเปรียบเทียบค่าแรงถอนสูงสุดกับตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ จำนวนและขนาดของเหล็กเสริมที่ฝัง และระยะฝัง ได้แสดงในรูปที่ 9 และค่าแรงถอนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า กำลังรับแรงถอนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มขนาดเหล็กเสริมหลักที่ใช้ในเสา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดของเหล็กเสริมหลักที่ใหญ่ขึ้นช่วยต้านทานการหลุดออกของคอนกรีต



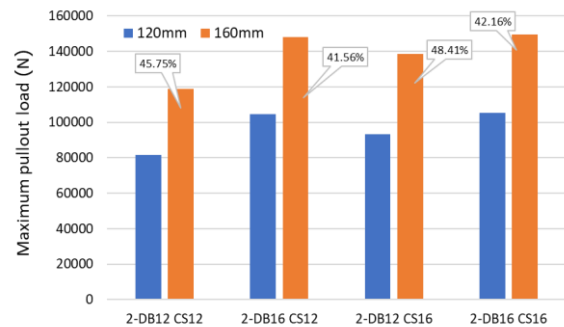
รูปที่ 9 แรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมหลักขนาดแตกต่างกัน

ตารางที่ 3 แรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมหลักขนาดแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	แรงถอนสูงสุด (N)		ร้อยละที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดเหล็กเสริมหลัก	ลักษณะการวิบัติ
	CS12	CS16		
1-DB12 L160 (Control)	69,298	-	-	Concrete breakout
1-DB16 L160 (Control)	-	85,628	-	Concrete breakout
1-DB12 L160	68,050	68,215	0.24	Rebar Yield
1-DB16 L160	89,125	113,840	27.73	Concrete breakout
2-DB12 L120	81,548	93,322	14.44	Rebar Yield & Concrete breakout
2-DB12 L160	118,853	138,497	16.53	Tension failure & Concrete breakout
2-DB16 L120	104,631	105,213	0.56	Concrete breakout
2-DB16 L160	148,115	149,572	0.98	Concrete breakout

4.4 อิทธิพลของระยะฝังของเหล็กเสริมที่แตกต่างกัน

ผลการเปรียบเทียบการรับแรงถอนของเหล็กเสริมที่ระยะฝังแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 120 mm (ใช้สัญลักษณ์ L120) และ 160mm (ใช้สัญลักษณ์ L160) เปรียบเทียบตัวอย่างที่มีการเจาะเสียบเหล็กภายหลังการเทคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 10 และตารางที่ 4 ซึ่งพบว่า ระยะฝังของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงถอนเมื่อเพิ่มระยะฝังของทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่างทดสอบ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งตัวอย่าง 2-DB12 CS16 มีค่ากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นร้อยละ 48.41 ตัวอย่าง 2-DB12 CS12 เพิ่มขึ้นร้อยละ 45.75 ตัวอย่าง 2-DB16 CS16 เพิ่มขึ้นร้อยละ 42.16 และตัวอย่าง 2-DB16 CS12 เพิ่มขึ้นร้อยละ 41.56



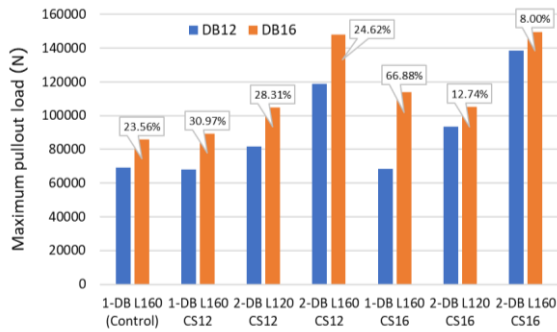
รูปที่ 10 แรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตที่มีระยะฝังแตกต่างกัน

ตารางที่ 4 แรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตที่มีระยะฝังแตกต่างกัน

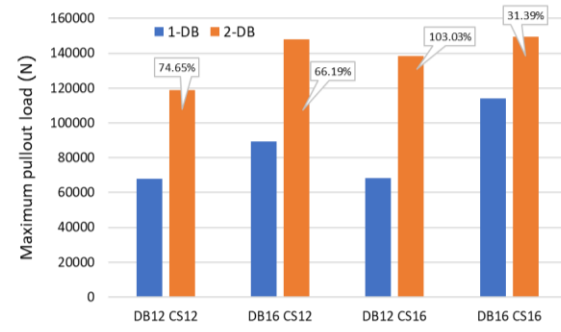
ตัวอย่าง	แรงถอนสูงสุด (N)		ร้อยละที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะฝัง	ลักษณะการวิบัติ
	120mm	160mm		
2-DB12 CS12	81,548	118,853	45.75	Concrete breakout & Rebar Yield
2-DB16 CS12	104,631	148,115	41.56	Concrete breakout
2-DB12 CS16	93,322	138,497	48.41	Rebar Yield & Tension failure
2-DB16 CS16	105,213	149,572	42.16	Concrete breakout

4.5 อิทธิพลของขนาดของเหล็กเสริมแตกต่างกันที่ฝังในเสาคอนกรีต

ผลการเปรียบเทียบแรงถอนของเหล็กเส้นที่ฝังเสาคอนกรีต ที่ใช้ขนาดของเหล็กเสริมแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ DB12 และ DB16 ได้แสดงในรูปที่ 11 และตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า ขนาดของเหล็กเสริมที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้แรงถอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ตัวอย่างทดสอบ 1-DB L160 CS16 มีอัตราค่ากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นสูงที่สุดร้อยละ 66.88 เนื่องจากเกิดการวิบัติแบบหลุดออก ขณะที่ตัวอย่างทดสอบ 2-DB L160 CS16 มีอัตราค่ากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นต่ำที่สุดร้อยละ 8.00 เนื่องจากเหล็กเกิดการคด



รูปที่ 11 แรงถอนของเหล็กเสริมขนาดแตกต่างกันที่ฝังในเสาคอนกรีต



รูปที่ 12 กำลังรับแรงถอนของเสาคอนกรีตที่จำนวนเหล็กเสริมแตกต่างกัน ณ ระยะฝังลึกที่ 160 mm

ตารางที่ 5 แรงถอนของเหล็กเสริมขนาดแตกต่างกันที่ฝังในเสาคอนกรีต

ตัวอย่าง	แรงถอนสูงสุด (N)		ร้อยละที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดเหล็กเสริม	ลักษณะการวิบัติ
	DB12	DB16		
1-DB L160 (Control)	69,298	85,628	23.56	Rebar Yield & Concrete breakout
1-DB L160 CS12	68,050	89,125	30.97	Rebar Yield & Concrete breakout
2-DB L120 CS12	81,548	104,631	28.31	Concrete breakout
2-DB L160 CS12	118,853	148,115	24.62	Rebar Yield & Concrete breakout
1-DB L160 CS16	68,215	113,840	66.88	Rebar Yield & Concrete breakout
2-DB L120 CS16	93,322	105,213	12.74	Concrete breakout
2-DB L160 CS16	138,497	149,572	8.00	Rebar Yield & Tension failure

4.6 อิทธิพลของจำนวนเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีต

ผลการทดสอบการรับแรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตที่ใช้จำนวนเหล็กเสริมแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 1 เส้น (ใช้สัญลักษณ์ 1-DB) และ 2 เส้น (ใช้สัญลักษณ์ 2-DB) ที่ระยะฝังลึก 160 mm ได้แสดงไว้ในรูปที่ 12 และตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า จำนวนเหล็กเสริมที่ฝังเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงถอนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่ตัวอย่างทดสอบ DB12 CS16 มีอัตราากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นสูงที่สุดร้อยละ 103.03 ขณะที่ตัวอย่างทดสอบ DB16 CS16 มีอัตราากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นต่ำที่สุดร้อยละ 31.39 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตอาจจะทำให้เปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากการรูดของเหล็กเสริมไปเป็นการหลุดออกของคอนกรีต

ตารางที่ 6 แรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตที่ใช้จำนวนเหล็กเสริมแตกต่างกัน (ระยะฝังที่ 160 mm)

ตัวอย่าง	แรงถอนสูงสุด (N)		ร้อยละที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะฝังลึก	ลักษณะการวิบัติ
	1-DB	2-DB		
DB12 CS12	68,050	118,853	74.65	Concrete breakout & Rebar Yield
DB16 CS12	89,125	148,115	66.19	Concrete breakout
DB12 CS16	68,215	138,497	103.03	Tension failure & Concrete breakout
DB16 CS16	113,840	149,572	31.39	Concrete breakout

4.7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างภายใต้แรงถอน

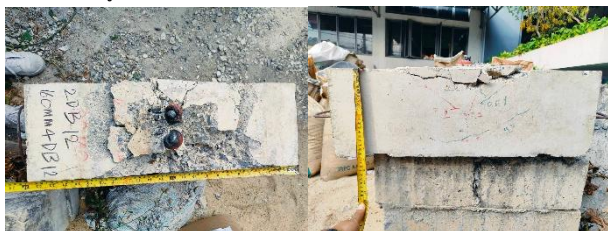
เสาคอนกรีตผ่านการทดสอบการรับแรงถอนของเหล็กเสริมที่ฝังยึดโดยใช้การยึดที่เชื่อมประสาน จะมีลักษณะการวิบัติแยกเป็น 3 แบบ ได้แก่ การวิบัติแบบรูดของเหล็กเสริม การวิบัติแบบขาดจากแรงดึง และการวิบัติแบบคอนกรีตหลุดออก ดังแสดงในรูปที่ 13 ถึง 15 ตามลำดับ โดยลักษณะการวิบัติจะขึ้นอยู่กับระยะฝังของเหล็กเสริม ขนาดของเหล็กเสริม และจำนวนของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีต จากผลการทดสอบจะสังเกตเห็นว่า ตัวอย่างที่ฝังเหล็กเสริมขนาด DB16 สามารถรับแรงถอนได้ดีกว่าตัวอย่างที่ฝังเหล็กเสริมขนาด DB12 แต่คอนกรีตที่ฝังเหล็กขนาดใหญ่กว่าจะมีการวิบัติแบบหลุดออก ในขณะที่การเสริมเหล็กขนาด DB12 จะไม่ทำให้คอนกรีตหลุดออกอย่างมาก และสามารถรับแรงถอนได้จนกระทั่งเหล็กเสริมคลาย หรือเหล็กขาดในที่สุด ดังนั้นเป็นสิ่งที่พึงระวังในการใช้ติดตั้งเหล็กขนาดใหญ่ยึดในเสาขนาดเล็ก ซึ่งมีโอกาสที่การรับแรงถอนจะไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 13 การวัดแบบคลากของเหล็กเสริม (คอนกรีตแตกร้าวเล็กน้อย)



รูปที่ 14 การวัดแบบขาดจากแรงดึง (เหล็กเสริมขาด)



รูปที่ 15 การวัดแบบคอนกรีตหลุดออก

5. บทสรุป

จากการศึกษากำลังยึดหน่วงของเหล็กเสริมที่ฝังในเสาคอนกรีตด้วยวิธีการเจาะเสียเปรียบกับการอัดฉีด สามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1 ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อแรงถอนได้แก่ ระยะฝังของเหล็กเสริม ขนาดเหล็กเสริม และจำนวนเหล็กเสริมที่ฝังยึดในคอนกรีต โดยที่ ระยะฝังที่เพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และจำนวนเหล็กเสริมที่ทำการเจาะเสียเปรียบมากขึ้นจะส่งผลให้แรงถอนสูงสุดมีค่ามากขึ้นอย่างชัดเจน
- 5.2 ตัวแปรต่างๆ ของเหล็กเสริมที่ได้ทำการศึกษาก่อให้เกิดพฤติกรรม การรับแรงถอนของเหล็กเสริม และการวัดตัวของตัวอย่างเสา โดยตัวอย่าง เสาคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมขนาดเล็กและมีระยะฝังของเหล็กเสริมที่ลึกจะ เกิดพฤติกรรมการวัดแบบคลากของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้มีการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมขณะถอนที่ยาว และการวัดส่วนใหญ่จะเกิดการคลากของเหล็กเสริมและเหล็กเสริมอาจขาดภายใต้แรงดึง ขณะที่ตัวอย่างเสาที่มี ขนาดเหล็กเสริมขนาดใหญ่ และมีจำนวนเหล็กเสริม 2 เส้น จะเกิด พฤติกรรมการวัดแบบคอนกรีตหลุดออก และเหล็กเสริมจะไม่ถึงจุดคลาก ซึ่งกรณีเหล่านี้จะไม่เป็นไปตามที่ผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ตั้งแต่ต้น ซึ่งเป็นสิ่ง ที่ควรระวังในการออกแบบ หรือควรให้ความสำคัญที่มากขึ้น
- 5.3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างควบคุมที่มีการฝังเหล็กเสริมก่อนการ เทคอนกรีตกับตัวอย่างที่ทำการเจาะเสียเปรียบเหล็กภายหลัง พบว่า กรณีที่ฝัง เหล็กเสริมขนาดเล็ก และมีระยะฝังมาก จะให้พฤติกรรมการรับแรงถอน ของตัวอย่างทั้งสองแบบมีความใกล้เคียงกัน โดยเกิดพฤติกรรมการวัด แบบคลากของเหล็กเสริม ขณะที่ กรณีที่ฝังเหล็กเสริมขนาดใหญ่ พฤติกรรม การรับแรงถอนของตัวอย่างทั้งสองแบบจะเป็นแบบคอนกรีตหลุดออก แต่

พฤติกรรมการรับแรงถอนของตัวอย่างควบคุมจะให้ความเหนียวที่มากกว่า อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเกิดการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมที่มากกว่า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณบริษัท Hilti (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การ สนับสนุนเงินทุนและวัสดุในงานวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนอาจารย์และบุคลากร ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ อำนวยความสะดวกและให้การสนับสนุนในด้านสถานที่ในการทำวิจัยและ ทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต รวมทั้งให้คำแนะนำสำหรับการทำวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จุตะกานนท์ และ ชลนิตดา สถิตีสังวร. (2550). *การศึกษา กำลังรับแรงดึงของสมอยึดที่ใช้เคมีประสานโดยฝังในคอนกรีต* [วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา].
- [2] ปิยณัฐ ใจแก้ว และ ภักดี คบกลาง. (2565). *กำลังยึดหน่วงระหว่างเหล็ก เสริมที่เคลือบอีพ็อกซีกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าขาน้อย. วารสารวิชาการ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, 10(1), 1.
- [3] วาสิฏฐฤกษ์ จันทรเกตุ, & ชูชัย สุจิรวกุล. (2565). *ตัวแปรที่ส่งผลต่อ การยึดหน่วงแบบเนืองตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 18(1), 167–176.
- [4] ภูวิศร อ้อแสงชัย. (2554). *การเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพ็อก ซีเรซินยึดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับ ผนังที่สัมผัสเพลิงไหม้* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย].
- [5] ยศ สมพรเจริญสุข. (2023). *การดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริม กำลังจากภายนอกโดยยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีที่มีสลักเกลียวฝัง ยึด. Engineering Transactions*, 26(1), หน้า [1-11]. คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.