

กำลังรับแรงและพฤติกรรมของข้อต่อเชิงกลจากการทดสอบ

Strength and behavior of Mechanical Coupler Based on Laboratory Tests

วีระพงศ์ ดำหนู^{1,*} และ สมชาย ปฐมศิริ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: Weerapong.doo@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถหลีกเลี่ยงการต่อเหล็กเสริมได้ โดยทั่วไป วิศวกรโครงสร้างอาจกำหนดให้ต่อเหล็กเสริมโดยวิธีการทาบ หรือการเชื่อม อย่างไรก็ตาม หลายหน่วยงานก่อสร้างนำวิธีการต่อเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกลมาใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งเจ้าของผลิตภัณฑ์ข้อต่อเชิงกลมักจะต้องส่งตัวอย่างมาให้ห้องปฏิบัติการทดสอบก่อนนำไปเสนอใช้งานแทนวิธีการที่กำหนดในแบบและรายการประกอบแบบ งานศึกษานี้รวบรวมผลการทดสอบข้อต่อเชิงกลจากห้องปฏิบัติการจำนวน 500 ตัวอย่างมาวิเคราะห์ ซึ่งสังเกตได้ว่า ตัวอย่างที่นิยมนำมาทดสอบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ชนิด A หรือข้อต่อเกลียวสองทาง ใช้งานกับเหล็กข้ออ้อย หน่วยงานก่อสร้างต้องการทดสอบกำลังรับแรงดึงเมื่อมีข้อต่อเชิงกล เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมปกติ และต้องการทราบว่าขนาดที่ข้อต่อหรือขนาดที่เหล็กเสริม ณ ระยะเท่าใด รายละเอียดเฉพาะที่ระบุเพิ่มขึ้นคือการทดสอบกรณีที่ขึ้นเกลียวข้อต่อเพียงบางส่วน ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างเกือบทั้งหมดขนาดที่เหล็กเสริม ที่ระยะแตกต่างกัน ขึ้นกับขนาดและกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม ไม่อาจคาดได้ว่าเหล็กจะขาดที่ท่อนใด ในกรณีที่ขึ้นเกลียวไม่เต็มทีเหล็กก็มีได้ขาดทางด้านท่อนที่ขึ้นไม่เต็มทีเสมอไป ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังรับแรงดึงของการต่อเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกล ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดึงของตัวข้อต่อเองและความแข็งแรงของเกลียวเป็นสำคัญ ดังนั้นตัวข้อต่อเชิงกลจะต้องมีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าเหล็กเสริมเสมอ การขึ้นเกลียวควรต้องกำหนดค่าทอร์กให้เป็นมาตรฐาน และก่อนนำข้อต่อเชิงกลไปใช้งานต้องผ่านการทดสอบที่จำลองสภาพการใช้งานจริงในโครงสร้าง

คำสำคัญ: ข้อต่อเชิงกล, การทดสอบ, กำลังรับแรง, พฤติกรรม

Abstract

In reinforced concrete structures, it is inevitable to have splices. In general, structural engineers specify the splice method either by lap or welded splice. Nevertheless, many construction sites use the mechanical coupler as an alternative method. In such case, the product owner needs to test samples in the laboratory before use for the method specified in the

drawing and specifications. This study collected test results of mechanical couplers around 500 samples for analyses. It is observed that all samples are of type A or double-sided coupler for deformed bars. Construction sites always want to test its tensile strength the same way as regular tensile test of reinforced steel. In particular, they want to know the point of failure either at the coupler or at the steel bar and the location. An additional test requirement is for partial tightening of coupler. The tensile test results indicate that almost all samples failed at the steel bar at various distance depending on the size and tensile strength of the reinforced steel. It is unpredictable to figure out which bar will be failed. For partial tightening tests, the steel bars are not always failed at the loosen side. It can be concluded that tensile strength of splices by using mechanical coupler essentially depends on the strength of coupler and tightness. The tensile strength of mechanical coupler must be higher than the reinforced steel bar. The tightness of coupling should be designated by the standard torque. Most importantly, it must be tested under the simulated structural conditions before allow to be used in the project.

Keywords: Coupler, Laboratory Test, Strength, Behavior

1. คำนำ

การทำงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องมีการต่อเหล็กเสริม เพราะว่าเหล็กเส้นเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่มีความยาวเป็นมาตรฐาน ต้องตัดและต่อ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพหน้างานของโครงสร้าง ในการปฏิบัติงาน วิศวกรโยธาามิทางเลือกวิธีการต่อเหล็กเสริม เช่น การต่อด้วยวิธีการทาบและมัดด้วยลวด การต่อโดยการเชื่อมเหล็กเส้นสองท่อนเข้าด้วยกัน เป็นต้น ซึ่งวิศวกรโยธาใช้งานกันเป็นประจำอยู่แล้ว แต่ก็ยังมีวิธีการต่อเหล็กเสริมโดยใช้ข้อต่อเชิงกล (Mechanical coupler) ให้เลือกใช้ด้วย ในระดับสากล มาตรฐาน ACI 318 [1] และ BS8110 [2 - 4] อนุญาตให้นำข้อต่อเชิงกลใช้งานได้ โดยบรรยายความต้องการที่จะต้องมี

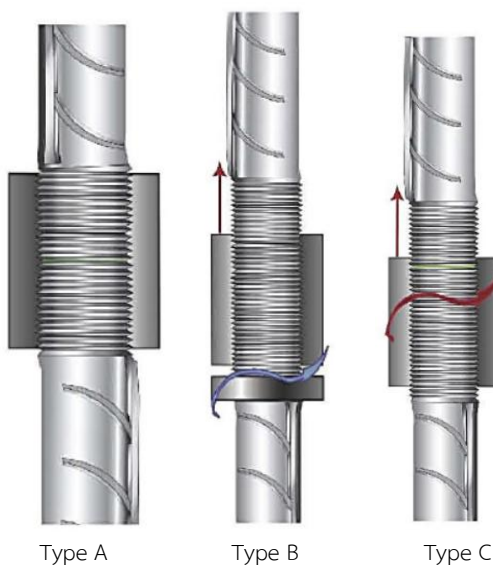
จากการใช้ข้อต่อเชิงกลในการต่อเหล็กเสริมไว้ก่อนข้างละเอียด รวมทั้ง ASTM A1034/A1034M-23 [5] ก็ได้ให้รายละเอียดวิธีการทดสอบคุณสมบัติของข้อต่อเชิงกลไว้อย่างละเอียด อาจกล่าวได้ว่าวิศวกรโยธามีข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับข้อต่อเชิงกลค่อนข้างมากให้พิจารณาอย่างรอบคอบก่อนการตัดสินใจเลือกใช้ข้อต่อเชิงกลอย่างถูกวิธี

บทความนี้รายงานผลศึกษาการใช้งานข้อต่อเชิงกลทั้งในภาคสนามและการทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการเพื่อทำความเข้าใจทั้งทฤษฎีและปฏิบัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาลักษณะและรายละเอียดของข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในงานในประเทศไทย 2) ศึกษาการปฏิบัติงาน ปัญหาและอุปสรรคการต่อเหล็กเสริมโดยใช้ข้อต่อเชิงกลในภาคสนาม และ 3) ศึกษาวิธีการทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังและพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อเหล็กเสริมในห้องปฏิบัติการ

2. ข้อต่อเชิงกล

2.1 ลักษณะของข้อต่อเชิงกล

ข้อต่อเชิงกล เป็นวิธีการทางเลือกสำหรับการต่อเหล็กเสริมสองท่อนเข้าด้วยกัน ด้วยการทำให้เหล็กเสริมและชิ้นเข้ากับเกลียวของข้อต่อเชิงกลให้แน่น ข้อต่อเชิงกลเริ่มนำมาใช้ในงานก่อสร้างไทยช่วงต้นทศวรรษ 1990 ใช้ในการต่อเหล็กเสริมในเสา ในคาน หรือในโครงสร้างอื่น ๆ ข้อต่อเชิงกล จำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ Type A, B, และ C ดังที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของข้อต่อเชิงกล

ข้อต่อเชิงกล Type A เป็นชนิดมาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดเมื่อสามารถขันหมุนท่อนเหล็กด้านใดด้านหนึ่งเข้าไปในเกลียวได้โดยสะดวก Type B เป็นข้อต่อที่กำหนดตำแหน่ง (Position coupling) ใช้กับงานติดตั้งโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast) ซึ่งไม่สามารถขันหมุนได้เนื่องจากมีน้ำหนักรวมมาก ปลายด้านหนึ่งของเหล็กเสริมจะเป็นเกลียวยาว

กว่าปลายอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นเกลียวมาตรฐาน สำหรับ Type C ใช้ในการกำหนดตำแหน่งเช่นกัน โดยที่ปลายเกลียวด้านหนึ่งจะมีแหวนรองกันไว้

มาตรฐานอเมริกันโดย American Concrete Institute [1] ยอมรับให้นำวิศวกรสามารถนำ Mechanical connection หรือข้อต่อเชิงกลมาต่อเหล็กเสริมได้ โดยกำหนดรายละเอียดไว้อย่างครอบคลุมเพียงพอต่อการปฏิบัติงาน เช่น บรรยายว่าสามารถใช้ได้ทั้งรับแรงดึงและรับแรงอัด ข้อต่อเชิงกลต้องมีกำลังรับแรงดึงได้ไม่ต่ำกว่า 125% ของกำลังรับแรงดึงที่จุดคานงของเหล็กเสริม (f_y) เป็นต้น มาตรฐานอังกฤษโดย British Standard [2 – 4] ก็ได้ระบุรายละเอียดเกี่ยวกับ Mechanical coupler และยินยอมให้นำมาใช้งานได้ทั้งรับแรงดึงและรับแรงอัด สำหรับวิธีการทดสอบกำลังรับแรงของข้อต่อเชิงกลนั้นเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานวิธีทดสอบของ ASTM A1034/A1034M-23 [5]

สำหรับประเทศไทยนั้น กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย เผยแพร่มาตรฐานงานเหล็กเสริมคอนกรีต มยผ. 1103-64 [6] โดยกล่าวถึงข้อต่อเหล็กเสริมไว้สั้น ๆ ว่า

“ในการต่อเหล็กเสริมโดยอุปกรณ์ทางกล กำลังของรอยต่อจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 125 ของกำลังครากของเหล็กเสริมที่ได้รับการต่อนั้น”

ในการใช้งานจริงนั้น รายการประกอบแบบก่อสร้างของบางโครงการจะระบุรายละเอียดของข้อต่อเชิงกลไว้ด้วย เช่น มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ [7] ระบุว่า

“สามารถใช้วิธีการต่อด้วยระบบข้อต่อเหล็กแบบเชิงกล (Mechanical Splicing Systems) โดยใช้วิธี Coupler ตามมาตรฐาน ACI 318 และ BS 8110 แทนการต่อด้วยวิธีทาบ หรือต่อด้วยวิธีเชื่อมได้ทุกกรณี แต่ทั้งนี้ ผนังหน้าตัดใด ๆ จะมีรอยต่อของเหล็กเสริมเกินร้อยละ 50 ของจำนวนเหล็กเสริมทั้งหมดไม่ได้ และจะต้องมีกำลังของรอยต่อไม่น้อยกว่าร้อยละ 125 ของกำลังของเหล็กเสริมนั้น (Yield Strength)”

กรณีของ บริษัท แผลงฤทธิ์ จำกัด [8] กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับการต่อเหล็กเสริมในงานโครงสร้างไว้ในรายการประกอบแบบดังนี้

“สามารถใช้วิธีการต่อด้วยระบบข้อต่อเหล็กแบบเชิงกล (Mechanical Splicing Systems) โดยใช้วิธี Coupler ตามมาตรฐาน ACI 318 และ BS 8110 แทนการต่อด้วยวิธีทาบ หรือต่อด้วยวิธีเชื่อมได้ทุกกรณี แต่ทั้งนี้ ผนังหน้าตัดใด ๆ จะมีรอยต่อของเหล็กเสริมเกินร้อยละ 50 ของจำนวนเหล็กเสริมทั้งหมดไม่ได้”

หน่วยออกแบบและตรวจสอบงานก่อสร้าง [9] กำหนดการทำงานเกี่ยวกับข้อต่อเชิงกลไว้ว่า

“กรณีที่ใช้วิธีการต่อเหล็กโดยข้อต่อเชิงกล ในการต่อเหล็กเสาหรือเหล็กเสริมขนาดตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ขึ้นไป ผู้รับจ้างสามารถใช้ข้อต่อเหล็กเชิงกลที่ไม่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมและเป็นแบบเกลียวขนาน โดยจุดต่อต้องสามารถรับกำลังได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 125 ของกำลังเหล็กเสริมนั้น ๆ ซึ่งข้อต่อเชิงกลทุกขนาดที่ใช้ต้องทำการทดสอบความแข็งแรงของการต่อยึดและต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ว่าจ้างก่อนดำเนินการ”

จะเห็นได้ว่า ข้อต่อเชิงกล ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีทางเลือกหนึ่งที่ใช้สำหรับการต่อเหล็กเสริมเข้าด้วยกัน มีมาตรฐานทั้งในระดับสากลและระดับประเทศรองรับ รายละเอียดข้อกำหนดที่ระบุไว้ในเอกสารมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก อาจกล่าวได้ว่า ส่วนอ้างอิงมาจาก ACI 318 [1] เป็นหลักสำหรับวิธีการทดสอบกำลังของข้อต่อเชิงกลอ้างอิงจากมาตรฐานของ ASTM A1034/A1034M-23 [5]

2.2 การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับข้อต่อเชิงกล

งานวิจัยเกี่ยวกับข้อต่อเชิงกลในแง่ต่าง ๆ มีเป็นจำนวนมาก เช่น จงชัย (2564) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกัน [10] โดยทดสอบเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 20 และ 25 มม. ขึ้นคุณภาพ SD40 ผ่านการให้ความร้อน 500 700 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นลงในอากาศ นำไปทดสอบกำลังคุณสมบัติรับแรงดึง พบว่ากำลังรับแรงดึงของข้อต่อเหล็กเชิงกลโดยส่วนใหญ่จะใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่ไม่ได้ต่อทาบ

พชร (2556) ศึกษาพฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล [11] โดยหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 0.40×0.40 เมตร เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีและไม่มี การใช้ข้อต่อเชิงกล พบว่า ตัวอย่างที่มีข้อต่อเชิงกลมีข้อดีหลายประการที่สังเกตได้ เช่น สามารถชะลอการโก่งเดาะได้ดีขึ้นรวมถึงสามารถสลายพลังได้สูงกว่า ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรสามารถรับแรงได้สูงกว่าเมื่อเสาเกิดความเสียหายจากการรับแรงกระทำสูงสุดแล้วยังคงมีพฤติกรรมในการรับแรงที่ลดลงช้ากว่า

งานวิจัยข้อต่อเชิงกลทำกันโดยทั่วไปในหลายประเทศ ในเอเชีย Nateghi-Alahi and Shokrzadeh (2019) [12] วิจัยการใช้งานข้อต่อเชิงกลในประเทศอิหร่าน Radovanovic [13] บรรยายการใช้งานข้อต่อเชิงกลในประเทศมอนเตเนโกสำหรับก่อสร้างโครงสร้างเสาและคานของสะพาน และผลทดสอบกำลังรับแรงดึง

งานวิจัย [10 – 13] แสดงให้เห็นว่าข้อต่อเชิงกลมีข้อดีหลายประการ หากได้รับการออกแบบและก่อสร้างอย่างระมัดระวัง ให้เป็นไปตามมาตรฐานและรายการประกอบแบบอย่างเคร่งครัด มาตรฐานสากล ACI 318 (1995) และ BSI (1997) ได้กำหนดความต้องการของการใช้ข้อต่อเชิงกลไว้อย่างละเอียด รายการประกอบแบบโครงการบางแห่งมีการระบุให้ใช้ข้อต่อเชิงกลได้ ทั้งนี้อ้างอิงไปยัง ACI318 และ BSI 8110 ดังนั้นมาตรฐานทั้งสองจึงเป็นสิ่งที่วิศวกรโยธาวิชาชีพควรให้ความสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นต้นฉบับที่รายการประกอบแบบก่อสร้างของไทยมักจะอ้างอิงไปถึงอีกทอดหนึ่ง อย่างไรก็ตาม มักจะไม่มีกรกล่าวถึงการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของข้อต่อเชิงกลเท่าที่ควร ทั้ง ๆ ที่มาตรฐาน ASTM A1034/A1034M-23 ได้ให้รายละเอียดไว้พร้อมครอบคลุมการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดสอบ ตลอดจนการประเมินผลทดสอบกำลังรับแรงของข้อต่อเชิงกล ในบทความนี้จะได้ศึกษาวิจัยให้ครอบคลุมทั้งทางเอกสาร ทางห้องปฏิบัติการทดสอบ และการปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม เพื่อให้เข้าใจ

ทฤษฎี การนำไปใช้งานจริง ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในภาคสนามและห้องปฏิบัติการทดสอบเพื่อถ่ายทอดประสบการณ์และบทเรียน

3. วิธีการศึกษาวิจัย

งานศึกษานี้สังเกตการทำงานเหล็กเสริมคอนกรีตในภาคสนามจากโครงการก่อสร้างอาคารสูงของภาคเอกชนจำนวน 1 แห่ง และอาคารขนาดใหญ่พิเศษของภาครัฐจำนวน 1 แห่ง และรวบรวมผลการทดสอบกำลังของข้อต่อเชิงกลจากห้องปฏิบัติการจำนวน 500 ตัวอย่างมาวิเคราะห์ทางสถิติจำแนกตามลักษณะของตัวอย่าง เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ลักษณะการเตรียมตัวอย่าง เป็นต้น จากการสังเกตพบว่า ตัวอย่างข้อต่อเชิงกลที่นิยมนำมาทดสอบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ชนิด A หรือข้อต่อเกลียวสองทาง ใช้งานต่อเหล็กเสริมประเภทเหล็กข้ออ้อย หน่วยงานก่อสร้างต้องการทดสอบกำลังรับแรงดึงเมื่อมีข้อต่อเชิงกลเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมทั่วไป และต้องการทราบว่าการขาดของเหล็กเสริมอยู่ที่ตำแหน่งใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งขาดที่ข้อต่อเชิงกลหรือขาดที่เหล็กเสริม ณระยะเท่าใด เพื่อพิสูจน์ว่าข้อต่อเชิงกลมีความแข็งแรงกว่าเหล็กเสริมคอนกรีต ไม่ได้ทำให้กำลังรับแรงดึงบริเวณรอยต่อลดต่ำกว่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

การทดสอบกำลังรับแรงของข้อต่อเชิงกลที่ใช้ต่อเหล็กเสริมข้ออ้อย (Deformed bars) เข้าด้วยกัน กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดเป็นการต่อเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16, 20, 25, 28 และ 32 มิลลิเมตร ทดสอบโดยเครื่องให้แรงแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ตามข้อกำหนดการทดสอบข้อต่อเชิงกลของ ASTM A1034/A1034M-23 (American Society for Testing and Materials) เจ้าของกลุ่มตัวอย่างอาจจะเตรียมตัวอย่าง 2 แบบ มาให้ห้องปฏิบัติการทดสอบกำลังรับแรงดึง ได้แก่ แบบขันแน่น 100% ทั้งสองปลาย และแบบขันไม่เท่ากัน ด้านที่ 1 ขันเกลียวแน่น 100% และด้านที่ 2 ขันเกลียวเพียง 75%

ข้อมูลผลทดสอบกำลังรับแรงสำรวจรวบรวมมาจาก 2 ห้องปฏิบัติการของภาครัฐ ซึ่งทดสอบระหว่างวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ถึงวันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2567 ครอบคลุมจำนวนโครงการก่อสร้าง 53 โครงการ จำแนกตามลักษณะโครงการ เป็นงานก่อสร้างอาคาร 51 โครงการ งานก่อสร้างถังเก็บน้ำใส 1 โครงการ และงานก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ 1 โครงการ จำแนกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ได้ดังนี้

- 1) เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 24 ตัวอย่าง
- 2) เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. จำนวน 141 ตัวอย่าง
- 3) เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. จำนวน 141 ตัวอย่าง
- 4) เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มม. จำนวน 111 ตัวอย่าง
- 5) เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มม. จำนวน 83 ตัวอย่าง

ทั้งนี้หน่วยงานก่อสร้างเป็นฝ่ายจัดเตรียมชิ้นตัวอย่างเหล็กเสริมทำเกลียวและขันต่อเชิงกลมาให้กับห้องปฏิบัติการทดสอบตามความต้องการของตน ห้องปฏิบัติการมีหน้าที่ติดตั้งชิ้นตัวอย่างเข้ากับเครื่องให้แรงแบบอเนกประสงค์และทดสอบกำลังรับแรงดึง

4. ผลลัพธ์และอภิปราย

4.1 การใช้งานข้อต่อเชิงกลในภาคสนาม

การใช้ข้อต่อเชิงกลในงานภาคสนาม ผู้ศึกษาวิจัยได้ดูวิธีการและขั้นตอนการต่อข้อต่อเชิงกลในภาคสนาม โดยการต่อข้อต่อเชิงกล ในส่วนของเสาอาคาร ในการต่อข้อต่อเชิงกลแต่ละครั้งต้องมีการเตรียมการในการต่อให้เป็นไปตามวิธีการที่ถูกต้อง ขั้นตอนในการต่อมีดังนี้ ทำการกลึงเกลียวเหล็กที่จะทำการต่อ การกลึงเกลียวเหล็กมีทั้งในสถานที่ก่อสร้างและภายนอกสถานที่ก่อสร้าง หลังจากกลึงเกลียวเสร็จ ทำการใส่ปลอกปิดเกลียวไว้เพื่อป้องกันเกลียวเหล็กที่กลึงแล้วเกิดความเสียหาย นำเหล็กที่กลึงเกลียวแล้วมาเตรียมพร้อมหน้างานเพื่อทำการต่อเกลียวข้อต่อเชิงกล การเตรียมความพร้อมในภาคสนาม ทำการติดตั้งนั่งร้านเพื่อความปลอดภัยและสะดวกในการต่อข้อต่อเชิงกล รูปที่2 การเตรียมความพร้อมเพื่อทำการต่อข้อต่อเชิงกลซึ่งเป็นการจัดเตรียมส่วนภาคสนาม ขั้นตอนการต่อข้อต่อเชิงกล สวมข้อต่อเชิงกลกับเหล็กเสาที่กลึงเกลียวไว้ โดยทำการหมุนข้อต่อเชิงกลให้แน่นสุดเกลียวโดยช่างผู้ติดตั้ง และทำการหมุนเกลียวด้วยเครื่องมือหมุนเกลียวแน่นตามวิธีการติดตั้งและตรวจสอบตามลำดับ

จากนั้นทำการต่อเหล็กด้านบน โดยการหย่อนเหล็กตรงเกลียวข้อต่อเชิงกล ทำการหมุนเหล็กลงเกลียวข้อต่อเชิงกลให้แน่นโดยช่างผู้ติดตั้ง และทำการหมุนเกลียวด้วยเครื่องมือหมุนเกลียวแน่นตามวิธีการติดตั้ง หลังจากเสร็จขั้นตอนดังกล่าว รูปที่3 การต่อข้อต่อเชิงกลเข้ากับเหล็กด้านบนแล้วเสร็จพร้อมทำการเทคอนกรีตตามขั้นตอนต่อไป และทำการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้งโดยผู้ควบคุมงานของโครงการดังกล่าว

ปัญหาและอุปสรรค การต่อข้อต่อเชิงกล ผู้ควบคุมงานควรเฝ้าระวังการต่อข้อต่อเชิงกลทุกครั้ง ช่างติดตั้งข้อต่อเชิงกลต้องมีความชำนาญการต่อข้อต่อเชิงกล การต่อข้อต่อเชิงกลต้องมีการติดตั้งนั่งร้านเพื่อความปลอดภัยและป้องกันความผิดพลาดจากการติดตั้ง หลังจากต่อข้อต่อเชิงกลแล้วเสร็จต้องมีการตรวจสอบรอยต่อและความเรียบร้อยของรอยต่อ โดยการตรวจสอบอย่างละเอียดทุกรอยต่อเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการต่อเหล็กแต่ละเส้น ก่อนทำการเข้าแบบหล่อเสาเพื่อทำการเทคอนกรีตทุกครั้งโดยผู้ควบคุมงาน



รูปที่ 2 การใช้งานข้อต่อเชิงกลในการก่อสร้าง

การเตรียมความพร้อมในการต่อข้อต่อเชิงกลโดยการติดตั้งนั่งร้านบริเวณที่ทำการต่อเพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการต่อข้อต่อเชิงกล เหล็กเสาที่กลึงเกลียวโดยหุ้มด้วยปลอกเพื่อป้องกันเกลียวเสียรูปและพร้อมทำการต่อข้อต่อเชิงกลในภาคสนาม



รูปที่ 3 การใช้งานข้อต่อเชิงกลในการก่อสร้าง

การต่อข้อต่อเชิงกล เมื่อทำการต่อแล้วเสร็จ ผ่านการตรวจสอบความแน่นของเกลียวข้อต่อเชิงกลอย่างละเอียด จากผู้ควบคุมงานก่อนทำการเทคอนกรีตในภาคสนาม

4.2 กำลังรับแรงของข้อต่อเชิงกลในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบทั้งหมด 500 ตัวอย่าง เป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16, 20, 25, 28 และ 32 มิลลิเมตร จากหลากหลายโรงงานผลิต ข้อสังเกตที่น่าสนใจมาก คือ ตัวอย่างเหล็กเสริมที่นำมาต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเกือบทั้งหมดเป็นเหล็กข้ออ้อยที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) หรือ Temp-Cored rebar กล่าวคือ เป็นเหล็กข้ออ้อยที่มีสัญลักษณ์ตัว T

ตาราง 2 เป็นผลลัพธ์การทดสอบแรงดึงที่จุดคราก (Yield) และจุดประลัย (Ultimate) โดยแสดงค่าสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าน้อยที่สุด ค่ามากที่สุด ค่าฐานนิยม ค่ามัธยฐาน ค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลทดสอบในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมข้ออ้อยที่นำมาทดสอบสามารถรับแรงที่จุดครากและที่จุดประลัยได้ไม่น้อยกว่าค่าแรงที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเส้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ของเหล็กเสริมคอนกรีต (เหล็กข้ออ้อย)

สัญลักษณ์	ความต้านแรงดึงที่จุดคาน ไม่น้อยกว่า (กก./ตร. ซม.)	ความต้านแรงดึงสูงสุด ไม่น้อยกว่า (กก./ตร. ซม.)	ความยืดในช่วงความยาว 5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ไม่น้อยกว่า (ร้อยละ)
SD 30	3,000	4,900	17
SD 40	4,000	5,700	15
SD 50	5,000	6,300	13

ตารางที่ 2 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมซึ่งต่อด้วยข้อต่อเชิงกล

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	แรงดึงที่จุดคราก (กิโลกรัม)	แรงดึงที่จุดประลัย (กิโลกรัม)
16 24 ตัวอย่าง	Min = 9,900 Max = 11,930 Mode = 11,320 Median = 11,270 Mean = 11,130 S.D. = 542	Min = 12,630 Max = 14,666 Mode = N.A. Median = 13,182 Mean = 13,373 S.D. = 579
20 142 ตัวอย่าง	Min = 13,930 Max = 27,280 Mode = 17,245 Median = 17,271 Mean = 17,565 S.D. = 1,859	Min = 17,905 Max = 32,810 Mode = 20,070 Median = 20,717 Mean = 21,175 S.D. = 2,066
25 141 ตัวอย่าง	Min = 18,579 Max = 30,327 Mode = 25,790 Median = 27,077 Mean = 26,418 S.D. = 2,432	Min = 27,917 Max = 40,778 Mode = 31,270 Median = 32,860 Mean = 32,792 S.D. = 2,385
28 111 ตัวอย่าง	Min = 25,550 Max = 38,521 Mode = 31,270 Median = 32,350 Mean = 32,865 S.D. = 2,554	Min = 30,540 Max = 46,123 Mode = 39,050 Median = 41,290 Mean = 41,227 S.D. = 2,419
32 84 ตัวอย่าง	Min = 17,437 Max = 49,824 Mode = 42,227 Median = 44,103 Mean = 44,445 S.D. = 3,884	Min = 21,301 Max = 63,469 Mode = 53,702 Median = 56,175 Mean = 55,865 S.D. = 4,644

4.3 พฤติกรรมการขาดของข้อต่อเชิงกล

พฤติกรรมการขาดเป็นสิ่งที่เจ้าของผลิตภัณฑ์ข้อต่อเชิงกลต้องการทราบมากที่สุด จากผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดที่รวบรวมได้ ระบุว่า การขาดเกิดขึ้นที่เหล็กเสริมทั้งสิ้น ไม่มีผลทดสอบที่แสดงว่าตัวอย่างขาดที่ข้อต่อเชิงกล ซึ่งเป็นไปได้ว่า ผลทดสอบเหล่านี้เป็นผลที่นำไปใช้หรือนำไปส่งมอบให้กับผู้ควบคุมงาน เป็นไปได้อีกเช่นกันอาจจะเคยมีผลทดสอบที่ขาดบริเวณข้อต่อเชิงกลอยู่บ้าง แต่ไม่เคยถูกนำออกมาเสนอให้ทราบ

ในที่นี้ จึงวิเคราะห์พฤติกรรมการขาด จำแนกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 1) กรณีที่ชั้นเกลียวข้อต่อสองด้านทั้งหมด 100% และ 2) กรณีที่ชั้นเกลียวข้างหนึ่ง 100% และอีกข้างหนึ่งเพียง 75% ดังที่แสดงผลไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ สำหรับระยะการขาดวัดจากจุดกึ่งกลางของข้อต่อเชิงกล

สาเหตุที่มีการทดสอบกรณีที่ชั้นเกลียวข้างหนึ่งเพียง 75% เพราะว่าการรายการประกอบแบบอาจจะกำหนดให้ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว เพื่อจำลองสภาพการทำงานซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในภาคสนามเมื่อแรงงานไม่ได้ชั้นเกลียวเต็ม 100%

จากผลการขาดในตารางที่ 3 สังเกตได้ว่า ระยะขาดโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 205 (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร) ถึง 268 มิลลิเมตร (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร) ไม่ปรากฏว่าระยะการขาดมีความสัมพันธ์โดยตรงหรือความสัมพันธ์ผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ระยะการขาดอาจจะสั้นเพียงแค่ 40 มิลลิเมตร (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 และ 32 มิลลิเมตร) ซึ่งใกล้กับจุดต่อเหล็กเสริมมาก เกือบจะขาดบริเวณรอยเกลียว รอยขาดจะไม่ห่างจากจุดกึ่งกลางของข้อต่อเชิงกลเกิน 410 มิลลิเมตร (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 4 แสดงผลการขาดของตัวอย่างที่ชั้นเกลียวข้างหนึ่งเพียง 75% เท่านั้น จากการสังเกตพบว่า รอยขาดมักจะขาดที่เหล็กด้านที่ชั้นเกลียว 75% ระยะขาดโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 178 (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร) ถึง 243 มิลลิเมตร (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร) สังเกตว่าระยะการขาดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม กล่าวคือ ระยะขาดมีแนวโน้มห่างจากจุดกึ่งกลางของข้อต่อมากขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมใหญ่ขึ้น ระยะการขาดอาจจะสั้นเพียงแค่ 40 มิลลิเมตร (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร) ซึ่งใกล้กับจุดต่อเหล็กเสริมมาก เกือบจะขาดบริเวณรอยเกลียว รอยขาดจะไม่ห่างจากจุดกึ่งกลางของข้อต่อเชิงกลเกิน 370 มิลลิเมตร (เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบรอยขาดระหว่างตารางที่ 3 และตารางที่ 4 สังเกตเห็นได้ว่า การชั้นเกลียวเพียง 75% มีส่วนทำให้ระยะการขาดเฉลี่ยสั้นลง เช่น เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ระยะขาดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 247 และ 178 มิลลิเมตร สำหรับการชั้นเกลียว 100% สองด้าน และการชั้นเกลียว 75% ด้านหนึ่ง หรือกรณีของเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ระยะขาดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 218 และ 203

มิลลิเมตร สำหรับการชันเกลียว 100% สองด้าน และการชันเกลียว 75% ด้านหนึ่ง ยกเว้นเพียงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร เท่านั้น ระยะขาดเฉลี่ยสำหรับการชันเกลียว 100% สองด้าน มีค่า (205 มิลลิเมตร) มากกว่า ระยะขาดเฉลี่ยสำหรับการชันเกลียว 75% ด้านหนึ่ง (243 มิลลิเมตร) อาจพอจะกล่าวได้ว่า การชันเกลียวไม่แน่นอนสนิทเต็ม 100% อาจส่งผลให้เหล็กเสริมขาดที่ระยะใกล้กับรอยต่อมากขึ้น

ตารางที่ 3 ลักษณะการขาดของการต่อเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกลชันเกลียว 100% สองทาง

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ตำแหน่งขาด	ระยะขาด (มม.)
16 จำนวนตัวอย่าง = 21	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 140 Max = 345 Mode = 270 Median = 260 Mean = 247 S.D. = 58
20 จำนวนตัวอย่าง = 125	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 80 Max = 385 Mode = 160 Median = 220 Mean = 218 S.D. = 79
25 จำนวนตัวอย่าง = 129	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 90 Max = 400 Mode = 260 Median = 280 Mean = 268 S.D. = 67
28 จำนวนตัวอย่าง = 104	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 40 Max = 410 Mode = 330 Median = 260 Mean = 244 S.D. = 81
32 จำนวนตัวอย่าง = 78	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 40 Max = 400 Mode = 60 Median = 210 Mean = 205 S.D. = 116

** ระยะขาดวัดจากจุดศูนย์กลางของข้อต่อเชิงกล

ตารางที่ 4 ลักษณะการขาดของการต่อเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกลชันเกลียว 75% และ 100%

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ตำแหน่งขาด	ระยะขาด (มม.)
16 จำนวนตัวอย่าง = 3	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 150 Max = 210 Mode = N.A. Median = 175 Mean = 178 S.D. = 30
20 จำนวนตัวอย่าง = 17	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 90 Max = 370 Mode = 340 Median = 160 Mean = 203 S.D. = 96
25 จำนวนตัวอย่าง = 12	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 90 Max = 340 Mode = N.A. Median = 250 Mean = 225 S.D. = 86
28 จำนวนตัวอย่าง = 7	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 40 Max = 320 Mode = N.A. Median = 230 Mean = 208 S.D. = 102
32 จำนวนตัวอย่าง = 6	100% ขาดที่เหล็ก 0% ขาดที่ข้อต่อ	Min = 180 Max = 340 Mode = 180 Median = 225 Mean = 243 S.D. = 67

** ระยะขาดวัดจากจุดศูนย์กลางของข้อต่อเชิงกล

5. สรุป

การต่อเหล็กเสริมเป็นกิจกรรมที่ต้องมีในงานก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทุกประเภท การต่อเหล็กเสริมสามารถทำได้หลายวิธี ในบทความนี้ศึกษาวิจัยวิธีการทำงาน กำลังและพฤติกรรมของการต่อเหล็กเสริมด้วยวิธีการใช้ข้อต่อเชิงกล โดยการสังเกตการทำงานในโครงการก่อสร้างภาคสนาม และรวบรวมผลทดสอบกำลังรับแรงของข้อต่อเชิงกลจำนวน 500 ตัวอย่าง จากหลายห้องปฏิบัติการทดสอบ ครอบคลุมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16, 20, 25, 28 และ 32 มิลลิเมตร หลากหลายยี่ห้อ

จากการสังเกตการต่อเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกลในภาคสนามพบว่า จะต้องมีการวางแผนและประสานงานกันระหว่างผู้รับเหมาและเจ้าของผลิตภัณฑ์ข้อต่อเชิงกลอย่างใกล้ชิดเพื่อทำเกลียวที่เหล็กเสริม และเตรียม

ข้อต่อเชิงกลให้พร้อมต่อการทำงาน แรงงานจำเป็นต้องได้รับการฝึกฝน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขึ้นเกลียวให้แน่นตรงตามข้อกำหนด

สำหรับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กรณีขึ้นเกลียวแน่น 100% ทั้งสองด้าน ระยะขาดโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 205 ถึง 268 มิลลิเมตร ไม่ปรากฏว่าระยะการขาดมีความสัมพันธ์โดยตรงหรือความสัมพันธ์ผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ระยะการขาดอาจจะสั้นเพียงแค่ 40 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับจุดต่อเหล็กเสริมมาก เกือบจะขาดบริเวณรอยเกลียว รอยขาดจะไม่ห่างจากจุดกึ่งกลางของข้อต่อเชิงกลเกิน 410 มิลลิเมตร กรณีที่ขึ้นเกลียวด้านหนึ่งเพียง 75% ระยะขาดโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 178 ถึง 243 มิลลิเมตร ระยะการขาดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ระยะการขาดอาจจะสั้นเพียงแค่ 40 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับจุดต่อเหล็กเสริมมาก เกือบจะขาดบริเวณรอยเกลียว รอยขาดจะไม่ห่างจากจุดกึ่งกลางของข้อต่อเชิงกลเกิน 370 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบสองกรณี การขึ้นเกลียวเพียง 75% มีส่วนทำให้ระยะการขาดเฉลี่ยสั้นลง

ข้อเสนอแนะจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ชี้ให้เห็นความสำคัญของการทำงานข้อต่อเชิงกลให้ได้มาตรฐานตรงตามข้อกำหนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขึ้นเกลียวให้แน่น เพราะเป็นที่ประจักษ์ชัดว่าการขึ้นเกลียวไม่แน่น (เช่น 75%) มีส่วนทำให้เหล็กดัดนั้นขาดง่ายขึ้น และระยะขาดสั้นลง ซึ่งอาจจะส่งผลต่อคุณภาพการทำงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบกำลังของข้อต่อเหล็กเชิงกลจำนวนมากจากบริษัทผู้ผลิตและจำหน่าย และบริษัทคู่สัญญางานก่อสร้างโครงการต่าง ๆ จำนวนมาก อีกทั้งยังได้มีโอกาสเยี่ยมชมการก่อสร้างโดยใช้ข้อต่อเชิงกลและสนทนากับวิศวกรและผู้บริหารโครงการหลายท่านทำให้ได้รับความรู้และประสบการณ์มาทำงานศึกษาวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล หน่วยงานต้นสังกัดที่ให้การสนับสนุนงบประมาณบางส่วนสำหรับการเข้าร่วมงานประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 30

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Concrete Institute (1995). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95).
- [2] British Standard (1997). BS 8110-1 Structural use of concrete – Part 1: Code of practice for design and construction.

- [3] British Standard (1985). BS 8110-2 Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances.
- [4] British Standard (1985). BS 8110-3 Structural use of concrete – Part 3: Design charts for singly reinforced beams, doubly reinforced beams and rectangular columns.
- [5] American Society for Testing and Materials (2023). ASTM A1034/A1034M-23: Standard Test Methods for Testing Mechanical Splices for Steel Reinforcing Bars.
- [6] กรมโยธาธิการและผังเมือง (2564). มาตรฐานงานเหล็กเสริมคอนกรีต.
- [7] มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ (2568). รายการประกอบแบบก่อสร้าง งานถนน ที่จอดรถ ทางเดินเชื่อม ระบบสาธารณูปโภคและภูมิทัศน์ โดยรอบ กลุ่มอาคารเรียนรวมและกลุ่มอาคารหอพักนักศึกษา ศูนย์แม่ริม มหาวิทยาลัยราชภัฏ ตำบลชี้เหล็ก อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่.
- [8] บริษัท แผลงฤทธิ์ จำกัด (2568). รายการประกอบแบบก่อสร้าง งานโครงสร้าง โครงการอาคารหอพักนักศึกษานานาชาติ หลังที่ 2 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ พื้นที่ชายทุ่ง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่.
- [9] หน่วยออกแบบและตรวจสอบงานก่อสร้าง (2568). รายการประกอบแบบ โครงการก่อสร้างอาคารอเนกประสงค์ปฏิบัติการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร.
- [10] จองชัย ใจตรง (2564). ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเหล็กเชิงกล. *วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.
- [11] พชร เครือวิทย์ (2556). พฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล. *วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.
- [12] Nateghi-Alahi, F., and Mohamad Rezza Shokrzadeh (2019). Behavior considerations for mechanical rebar couplers. International Congress on Science & Engineering, University of Tokyo, Japan, October 14 – 15, 2019.
- [13] Radovanovic, Z. (2019). Quality control of rebar couplers in splicing of reinforcement bars. 13th IQC International Quality Conference, pp. 569 – 580.