การพัฒนาจุดต่อเสา-เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบสลักเกลียว

Development of Precast Concrete Column-Column Bolted Connection

วศิน พงศ์ไพบูลย์สิริ[1,*] ชูชัย สุจิวรกุล[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
[2] สาขาวิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: eiyo.yy@gmail.com*

บทคัดย่อ

การศึกษามุ่งเน้นไปที่การหาขนาดชิ้นส่วนจุดต่อที่เหมาะสมจากวัสดุที่หาได้ทั่วไปตามท้องตลาด การออกแบบจุดต่อจะถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับเหล็กยืนในเสา 3 ขนาดคือ DB12 DB16 และ DB20 (ชั้นคุณภาพ SD40) การศึกษาเริ่มจากการใช้สมการอย่างง่ายเพื่อกำหนดขนาดของชิ้นส่วนสำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองประกอบด้วย 5 ชิ้นส่วนได้แก่ 1. เหล็กทาบ (Splice bar) 2. รอยเชื่อม 1 (Weld 1) 3. เหล็กแผ่นตั้ง (Plate) 4. รอยเชื่อม 2 (Weld 2) และ 5. เหล็กแผ่นฐาน (Baseplate) จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขของแรงและจุดรองรับให้กับแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อขณะรับแรงดึงผ่านกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยให้ทราบถึงปริมาณหน่วยแรงวอนมิสเซสที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนและหน่วยแรงเฉือนสูงสุดบริเวณรอยเชื่อมซึ่งช่วยระบุถึงสภาพการวิบัติ ลำดับการคราก และกำลังรับแรงดึงสูงสุดของจุดต่อ ผลเหล่านี้จะยืนยันถึงความปลอดภัยในการออกแบบ อีกทั้งยังเป็นข้อมูลสนับสนุนในการกำหนดแนวทางพัฒนาปรับปรุงชิ้นส่วนจุดต่อในโอกาสต่อไป

คำสำคัญ: จุดต่อแบบสลักเกลียว, ไฟไนต์เอลิเมนต์, เสาคอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

The objective of this study is to develop precast concrete column-column bolted connection by applying the finite element method (FEM) to the design of this connection. This study focused on the finding of the suitable size of all connected parts that could be made from available materials in market. The design of connection would be developed for supporting 3 different sizes of rebars in the column including DB12, DB16 and DB20 (SD40). The study started from the use of simple equation to specify the size of the connected parts for making the model in FEM. This model consisted of 5 connected sub-parts including 1. Splice bar, 2. Weld 1, 3. Plate 1, 4. Weld 2 and 5. Baseplate. Then, force and boundary conditions were assigned into the model to study the behavior of connector under tensile load through linear and non-linear finite element analysis. FEM analysis would lead to obtain the quantity of Von Misses stress in the sub-parts and maximum shear stress around welding that help indicate the failure mode, sequence of yielding and maximum tensile strength of connection. These results would confirm the safety of design and provide guidelines for supporting further development of connection.

Keywords: Bolted Column Connection, Finite Element Analysis, Precast Concrete Column

1. บทนำ

การก่อสร้างชิ้นส่วนเสาถือเป็นองค์อาคารที่มีความยากในการควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง โดยเฉพาะในกรณีที่เสาคอนกรีตที่มีความสูง ดังนั้นชิ้นส่วนเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Column) จึงถูกนำมาใช้เพื่อแทนที่การก่อสร้างแบบเดิม เนื่องด้วยสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างและง่ายต่อการควบคุมคุณภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการก่อสร้างเสาแบบหล่อในที่ (Cast in Place Column) [1] ยกตัวอย่างเช่นการควบคุมคุณภาพงานเทคอนกรีตหรืองานตั้งระยะดิ่งของตัวเสา ในปัจจุบัน จุดต่อเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จที่สามารถพบเห็นมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ การต่อเหล็กยืนโดยใช้ท่อลอนสังกะสี (Corrugate duct) ปลอกต่อเชิงกล (Mechanical sleeve) และการต่อแบบสลักเกลียว (Bolted connection) โดยหากพิจารณาถึงความนิยมในการใช้แล้ว การต่อเหล็กยืนในเสาแบบท่อลอนสังกะสีและกระบอกสำเร็จรูปมักได้รับความนิยมในการใช้มากกว่า เนื่องด้วยสามารถหาซื้อง่ายกว่าจุดต่อแบบสลักเกลียว

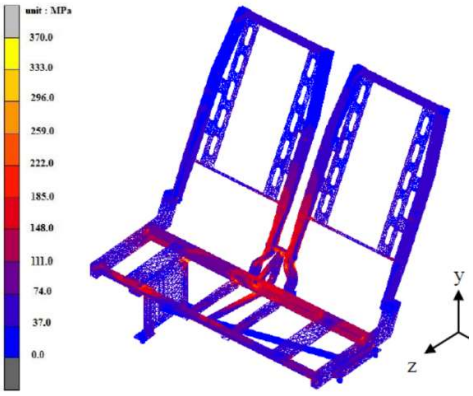
อย่างไรก็ดี จุดต่อแบบสลักเกลียวอาจให้สมบัติบางประการที่เหนือกว่าจุดต่อแบบอื่น จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยนี้ กล่าวคือจุดต่อแบบสลักเกลียวเป็นจุดต่อที่อาศัยการถ่ายแรงเชิงกลซึ่งแตกต่างกับจุดต่อแบบท่อลอนสังกะสีและปลอกต่อเชิงกลที่ใช้การถ่ายแรงผ่านแรงยึดหน่วงระหว่าง

มอร์ตาร์เกราต์ (Mortar grout) กับเหล็กเสริม ทำให้ต้องรอเวลาการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์เกราต์ ด้วยเหตุนี้เอง การเลือกใช้จุดต่อแบบสลักเกลียวจะสามารถลดการใช้อุปกรณ์ค้ำยันชั่วคราวและระยะเวลาการทำงานของเครื่องจักร อีกทั้งง่ายต่อการปรับตั้งระยะดิ่งขณะติดตั้งชิ้นส่วนเสา

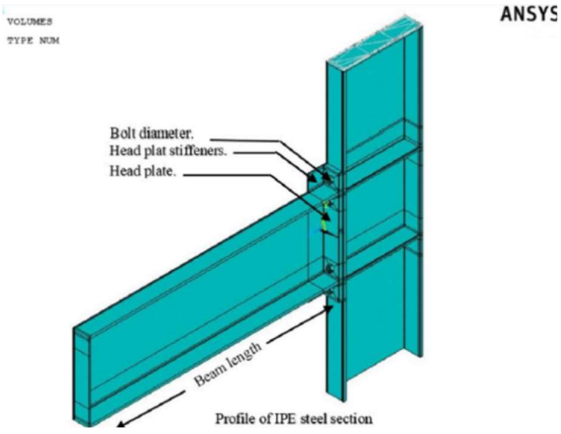
การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาออกแบบชิ้นส่วนจุดต่อเสา-เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบสลักเกลียว โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อภายใต้แรงดึง เพื่อใช้วิเคราะห์หาขนาดของชิ้นส่วนที่เหมาะสมก่อนการนำไปสร้างจริง โดยการศึกษาจะทำการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนจุดต่อเสาเพื่อใช้รองรับเหล็กยืนในเสาจำนวน 3 ขนาด คือ DB12 DB16 และDB20 (ชั้นคุณภาพ SD40) และตั้งเกณฑ์การออกแบบให้ชิ้นส่วนจุดต่อต้องสามารถทนต่อแรงดึงที่จุดครากของเหล็กยืนในเสาได้โดยไม่เกิดการครากภายในชิ้นส่วนจุดต่อ จึงถือได้ว่าจุดต่อมีขนาดและรูปทรงที่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยไม่มากที่ได้ศึกษาความแข็งแรงของชิ้นส่วนและจุดต่อโดยใช้สลักเกลียว ปกรณ์ บุราคร [2] ได้ทำการวิเคราะห์ และออกแบบปรับปรุงโครงสร้างชิ้นส่วนเบาะที่นั่งในรถโดยสารด้วยโปแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการศึกษาเป็นการออกแบบ และทดสอบความแข็งแรงผ่านแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 1 ซึ่งการนำไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้นั้น ทำให้การศึกษาเกิดความสะดวกรวดเร็วและประหยัดต้นทุนกว่าเมื่อเทียบกับสร้างแบบจำลองจริง โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความเสียหายที่เกิดด้วยปริมาณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเทียบกับหน่วยแรงที่จุดครากของวัสดุ จึงสามารถนำผลวิเคราะห์ไปออกแบบปรับปรุงเพิ่มขนาดความหนาให้กับชิ้นส่วนได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

ElSabbagh [3] ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปจากแรงดัดของจุดต่อแบบสลักเกลียว-เพลทปลายขยาย โดยมีตัวแปร คือ ความหนาของตัวเพลทปลายแบบขยาย ความหนาของแผ่นเสริม และขนาดของสลักเกลียวที่ใช้ โดยการทดสอบทำโดยการสร้างแบบจำลองจุดต่อแบบสลักเกลียว-เพลทปลายขยายแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ดังที่แสดงในรูปที่ 2 และใส่แรงทั้งแบบทางเดียว และแบบวัฏจักรเพื่อทำการเก็บค่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียรูป และแรงดัดที่เกิดขึ้น โดยมุ่งหวังให้ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความหนาของแผ่นเพลทขยายปลายคานจะสามารถเพิ่มกำลังดัดได้ราวร้อยละ 7-15 และเมื่อเพิ่มขนาดหน้าตัดของสลัก ก็จะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้เช่นกัน โดยกรณีที่แรงเป็นแบบวัฏจักร จุดต่อจะรับแรงดัดได้ลดลงราวร้อยละ 16 เมื่อเทียบกับการใส่แรงแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 1 แบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างเบาะที่นั่งในรถโดยสาร [2]



รูปที่ 2 แบบจำลองจุดต่อแบบสลักเกลียว-เพลทปลายขยาย [3]

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาและออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้เป็นจุดต่อระหว่างเสา – เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบสลักเกลียว

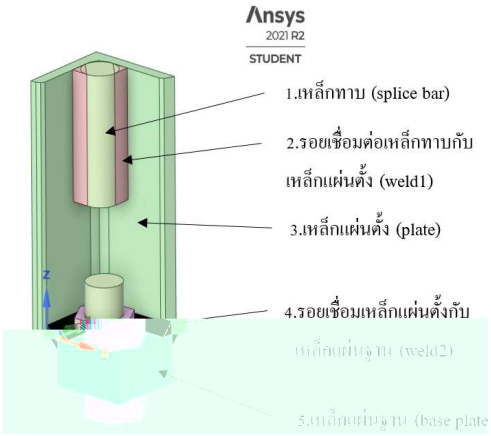
2.2 ศึกษาพฤติกรรม และหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้เป็นจุดต่อระหว่างเสา–เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบสลักเกลียว

3. วิธีการศึกษา

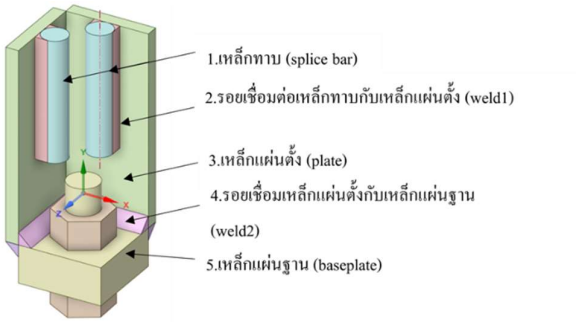
3.1 การกำหนดแบบร่างขั้นต้น (Preliminary design)

การกำหนดแบบร่างขั้นต้น คือ กระบวนการกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนที่จะออกแบบอย่างคร่าว ๆ ก่อนเริ่มการพัฒนา วัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการแก้ไขชิ้นงานให้ได้มากที่สุด ผู้วิจัยได้นำหลักการของกลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials) เพื่อคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนย่อยในจุดต่อก่อนที่จะสร้างลงในแบบจำลองโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชิ้นส่วนย่อยภายในจุดต่อสำหรับจุดต่อ CC12 CC16 และ CC20 ดังที่แสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ



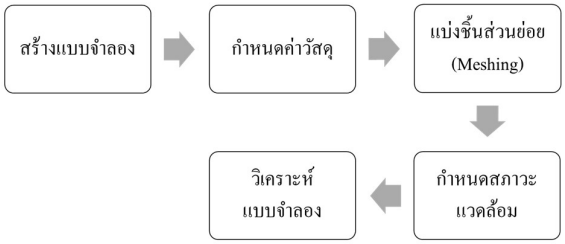
รูปที่ 3 ชิ้นส่วนย่อย 5 ชิ้นส่วนของแบบจำลอง CC12



รูปที่ 4 ชิ้นส่วนย่อย 5 ชิ้นส่วนของแบบจำลอง CC16 และ CC20

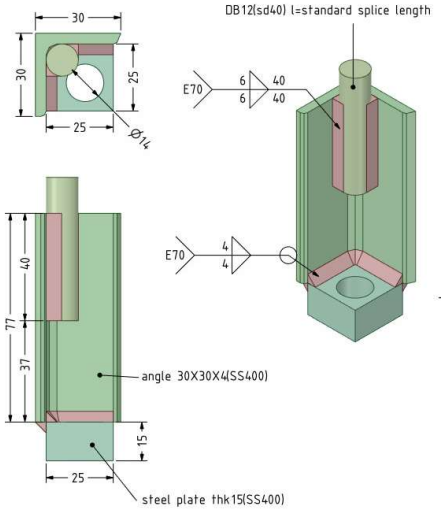
3.2 การสร้างแบบจำลองจุดต่อเสาสำหรับใช้ในการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟแวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในตระกูล Workbench 2021 R2 โดยจะทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของชิ้นส่วนสภาพแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) แล้วจึงนำผลหน่วยแรงที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกับกำลังครากของวัสดุ ดังที่แสดงในรูปที่ 5

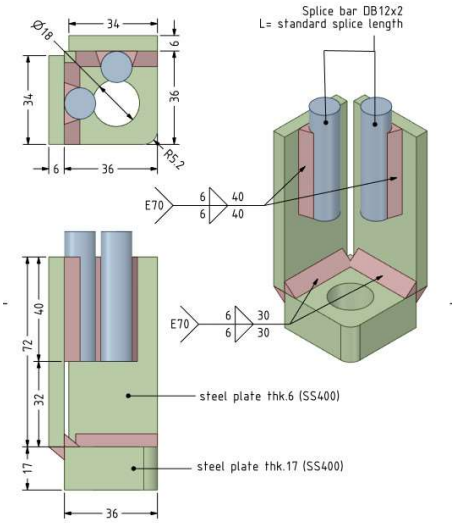


รูปที่ 5 ขั้นตอนการพัฒนาออกแบบชิ้นส่วนจุดต่อเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จ [4]

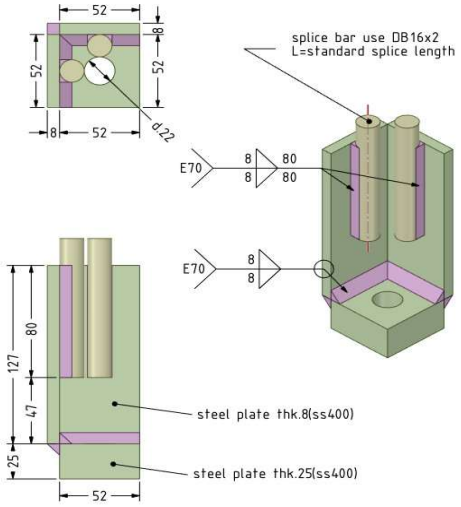
โดยหลังจากที่ได้ขนาดเบื้องต้นของแต่ละชิ้นส่วนภายในจุดต่อจากการคำนวณอย่างง่าย ก็สามารถที่จะทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมย่อยที่ใช้เพื่อการวาดแบบจำลองสามมิติ Space Claim 2021 R2 ซึ่งทำให้ได้แบบจำลอง 3 มิติ ของจุดต่อทั้ง 3 ขนาด คือ CC12 CC16 และ CC20 ดังแสดงในรูปที่ 6 รูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



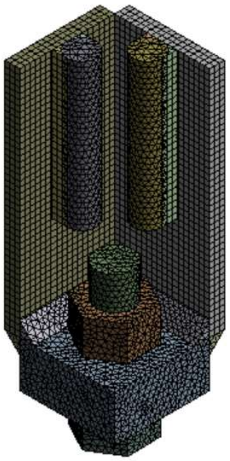
รูปที่ 6 ขนาดชิ้นส่วนจุดต่อ CC12



รูปที่ 7 ขนาดชิ้นส่วนจุดต่อ CC16



รูปที่ 8 ขนาดชิ้นส่วนจุดต่อ CC20



รูปที่ 9 แบบจำลองภายหลังที่โปรแกรมทำการแบ่งเอลิเมนต์

3.3 การตั้งค่าวัสดุสำหรับใช้ในการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองจุดต่อเสาไฟไนตุเอลิเมนต์จะถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้วัสดุเหล็ก 3 ประเภท แยกตามเกรดความแข็งแรงของเนื้อวัสดุได้คือ 1. SD40 สำหรับชิ้นส่วนเพลท และเบสเพลท 2. SS400 สำหรับเหล็กทาบ และ 3. E70 สำหรับรอยเชื่อม โดยจะทำการกำหนดคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นของแบบจำลอง โดยการตั้งค่าวัสดุจะเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากำลังวัสดุที่กำหนดลงในโปรแกรม Workbench 2021R2

ชั้นคุณภาพวัสดุ	ตำแหน่งชิ้นส่วน	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)	หน่วยแรงที่จุดคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง (MPa)	มอดูลัสแทนเจนต์
SD40	splice bar	2.00E+05	400	560	0.3	0
SS400	plate, baseplate	2.00E+05	250	400	0.3	0
E70	weld 1, weld 2	2.00E+05	390	480	0.3	0

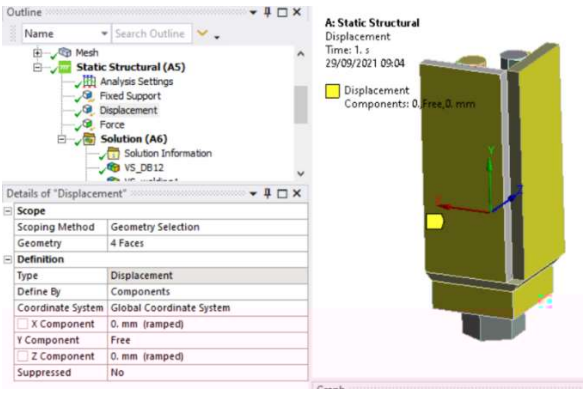
3.4 การแบ่งชิ้นส่วนย่อยแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์

การแบ่งชิ้นส่วนย่อยเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ การแบ่งชิ้นส่วนย่อยที่ละเอียดจะส่งผลให้ได้คำตอบที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด เรียกว่า การลู่เข้าของคำตอบ (Convergence) [5] โดยสำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชิ้นส่วนย่อยให้เล็กที่สุดเท่าที่โปรแกรมยินยอมให้ เนื่องด้วยเงื่อนไขโปรแกรมเวอร์ชั่นสำหรับนักศึกษา (Student Version) โดยจะพบว่า ขนาดเอลิเมนต์ที่โปรแกรมยอมให้แบ่งได้เล็กที่สุดคือ 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 9 โดยการกำหนดประเภทของเอลิเมนต์ที่ทำการแบ่งย่อย โปรแกรมจะทำการกำหนดให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ประเภทสามมิติ

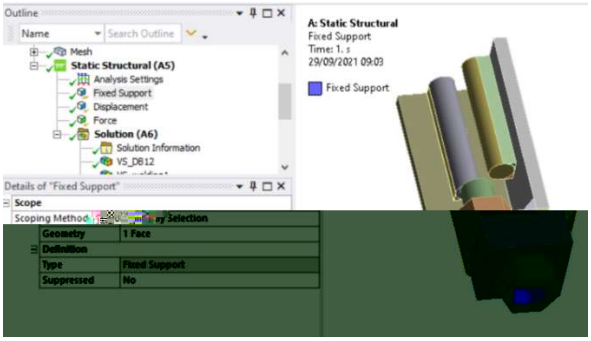
3.5 การกำหนดสภาวะแวดล้อมกับแบบจำลอง

สภาวะแวดล้อมในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์หมายถึงเงื่อนไขขอบเขต และแรงภายนอกที่มากระทำกับแบบจำลอง โดยหากต้องการผลวิเคราะห์ที่ถูกต้องจากการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องกำหนดสภาวะแวดล้อมของแบบจำลองให้สมจริงมากที่สุด

การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตจะต้องกำหนดค่าความอิสระในการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน ให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งาน เมื่อพิจารณาถึงจุดต่อที่ติดตั้งไปกับชิ้นส่วนเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จ จะเห็นได้ว่าขณะที่เสาอยู่ภายใต้แรงกระทำ ชิ้นส่วนเหล็กแผ่นตั้ง (Plate) และเหล็กแผ่นฐาน (Base plate) จะถูกยึดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแนวราบ (x-z plane) ดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องจากเนื้อคอนกรีตที่หุ้มห่อชิ้นส่วนจุดต่อไว้ และกำหนดให้ส่วนปลายล่างสุดของสลักเกลียวถูกยึดแน่น (Fix) ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยกำหนดค่าการสัมผัส (contact type) ของแต่ละชิ้นส่วนย่อยทุกชิ้นเป็นแบบยึดติด (bonded)



รูปที่ 10 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับชิ้นส่วนเหล็กแผ่น และเหล็กแผ่นฐาน



รูปที่ 11 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบยึดแน่นให้กับจุดต่อ

3.6 การใช้สมการกลศาสตร์ของวัสดุเพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณหาหน่วยแรงในแต่ละชิ้นส่วน [6-7] จะใช้สมการกลศาสตร์ของวัสดุ โดยใช้เพื่อตรวจสอบกับค่าหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในกรณีที่มีการตั้งค่าข้อมูลที่ป้อนผิด โดยโปรแกรมจะไม่เตือนผู้ใช้งาน โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนสามารถประมาณค่าได้อย่างง่ายดังนี้

หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเหล็กทาบ (Splice bar) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (1)

$$f_t = \frac{P}{A} \quad (1)$$

โดยที่ P คือแรงดึงที่ทำต่อเหล็กทาบ 1 ข้าง (N) และ A คือพื้นที่หน้าตัดรับแรงดึง (mm^2)

หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเหล็กแผ่นตั้ง (Plate) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2)

$$f_t = \frac{T}{2bt} \quad (2)$$

โดยที่ T คือแรงดึงทั้งหมดที่กระทำกับจุดต่อ (N) , b คือความกว้างของเหล็กแผ่นตั้ง (mm) และ t คือความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง (mm)

หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเหล็กแผ่นฐาน (Baseplate) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (3)

$$f_b = \frac{6Te}{\sqrt{2}BH^2} \quad (3)$$

โดยที่ T คือแรงดึงทั้งหมดที่กระทำกับจุดต่อ (N), e คือระยะเยื้องศูนย์วัดจากขอบขอบเบสเพลทถึงขอบของโบลท์ (mm), B คือความยาวด้านของเบสเพลท (mm) และ H คือความหนาของเบสเพลท (mm)

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นรอยเชื่อม (Weld 1, Weld 2) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (4)

$$f_v = \frac{T}{0.707al} \quad (4)$$

โดยที่ T คือแรงดึงที่กระทำกับรอยเชื่อม (N) , a คือขนาดขาของรอยเชื่อม (mm) และ l คือความยาวรอยเชื่อม (mm)

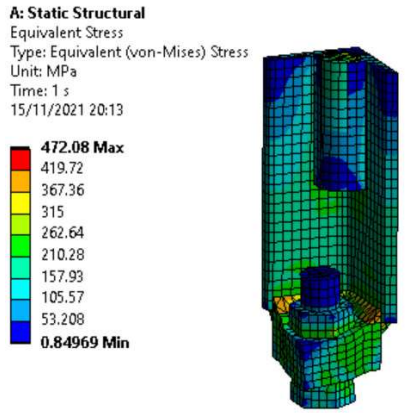
4. ผลการศึกษา

การวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เพื่อที่จะสามารถทราบถึงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด โดยในการวิเคราะห์ในแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะทำการกำหนดแรงภายนอกเป็นปริมาณการเสียรูปในทิศทางขนานกับเหล็กทาบ (y-direction) ไว้ที่ 50 มิลลิเมตร แทนการใส่แรงดึงที่บริเวณปลายเหล็กทาบ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงกำลังรับแรงดึงสูงสุดของจุดต่อ โดยจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงปฏิกริยาในทิศทาง y-direction กับปริมาณการเสียรูปของจุดต่อ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถทราบถึงปริมาณหน่วยแรงวอนมิสเซสที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วน

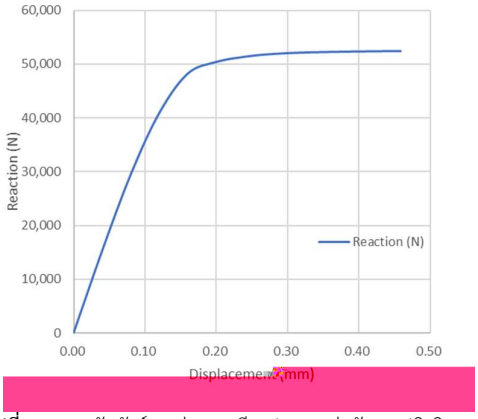
4.1 ผลการศึกษา จุดต่อ CC12

เมื่อพิจารณาที่เป้าหมายของการออกแบบชิ้นส่วนจุดต่อ CC12 กล่าวคือต้องมีความสามารถรับแรงดึงมากกว่า 45,200 N (แรงดึงที่ทำให้เหล็ก DB12 คราก) ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองจุดต่อ CC12 สามารถทนแรงดึงได้ราว 51,000 N จึงถือได้ว่าจุดต่อ CC12 ผ่านเกณฑ์การออกแบบเนื่องด้วยมีความสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดยสามารถทราบถึงหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆภายในชิ้นส่วนดังที่แสดงในรูปที่ 12 และ รูปที่ 14

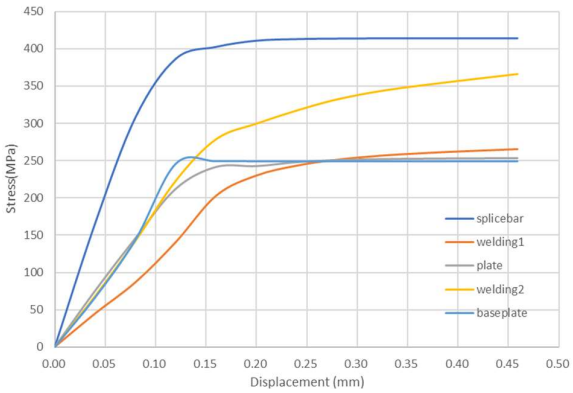
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ได้พบว่า ปริมาณหน่วยแรงวอนมิสเซสในชิ้นส่วนจะพัฒนาขึ้นตามระยะยืดและแรงดึง โดยชิ้นส่วนเบสเพลทจะพัฒนาหน่วยแรงถึงจุดครากเป็นชิ้นส่วนแรกที่ระยะการเสียรูปของจุดต่อ 0.16 มิลลิเมตร หรือที่แรงดึงประมาณ 48,000 N หลังจากนั้นชิ้นส่วนเหล็กทาบ และเหล็กแผ่นตั้งพัฒนาหน่วยแรงวอนมิสเซสจนถึงจุดครากตามมา ทำให้รอยเชื่อม 1 และรอยเชื่อม 2 ไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงวอนมิสเซสได้ถึงจุดคราก เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของจุดต่อกับแรงปฏิกริยา จะทำให้สามารถเห็นถึงการลู่เข้าของเส้นกราฟ ดังที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งสามารถสะท้อนเป็นกำลังรับดึงแรงสูงสุดที่ชิ้นงานรับได้



รูปที่ 12 หน่วยแรงวอนมิสเซสจากการวิเคราะห์ของจุดต่อ CC12



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของจุดต่อกับแรงปฏิกิริยาของจุดต่อ CC12

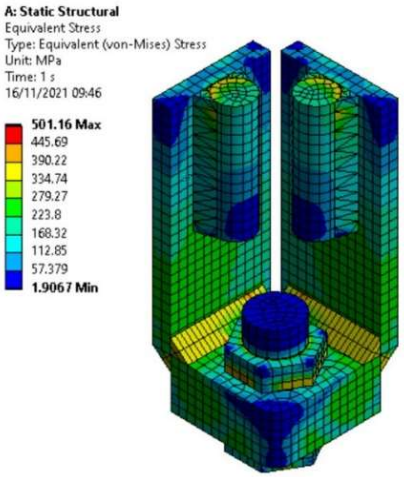


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวอนมิสเซส และระยะการเสียรูปของจุดต่อ CC12

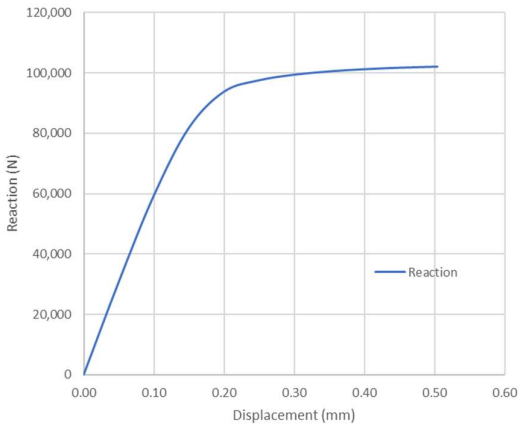
4.2 ผลการศึกษา จุดต่อ CC16

เมื่อพิจารณาที่เป้าหมายของการออกแบบชิ้นส่วนจุดต่อ CC16 กล่าวคือต้องมีความสามารถรับแรงดึงที่มากกว่า 80,400 N (แรงดึงที่ทำให้เหล็ก DB16 คราก) ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองจุดต่อ CC16 สามารถทนแรงดึงได้ราว 97,000 N จึงถือได้ว่าจุดต่อ CC16 ผ่านเกณฑ์การออกแบบเนื่องด้วยมีความสามารถรับแรงดึงมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดยสามารถทราบถึงหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆภายในชิ้นส่วนดังที่แสดงในรูปที่ 15 และ รูปที่ 17

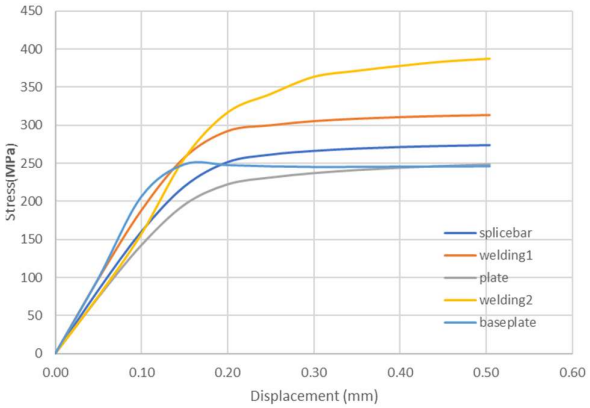
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จะพบว่า ปริมาณหน่วยแรงวอนมิสเซสในชิ้นส่วนจะพัฒนาขึ้นตามระยะยืด และแรงดึง โดยชิ้นส่วนเบสเพลทจะพัฒนาหน่วยแรงถึงจุดครากเป็นชิ้นส่วนแรกที่ระยะการเสียรูปของจุดต่อ 0.15 มิลลิเมตร หรือที่แรงดึงประมาณ 81,000 N และทำให้ชิ้นส่วนอื่น ๆ ไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงวอนมิสเซสได้ถึงจุดคราก เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของจุดต่อกับแรงปฏิกิริยา จะทำให้สามารถเห็นถึงการลู่เข้าของเส้นกราฟ ดังที่แสดงในรูปที่ 16 ซึ่งสามารถสะท้อนเป็นกำลังรับดึงแรงสูงสุดที่ชิ้นงานรับได้



รูปที่ 15 หน่วยแรงวอนมิสเซสจากการวิเคราะห์ของจุดต่อ CC16



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของจุดต่อกับแรงปฏิกิริยาของจุดต่อ CC16

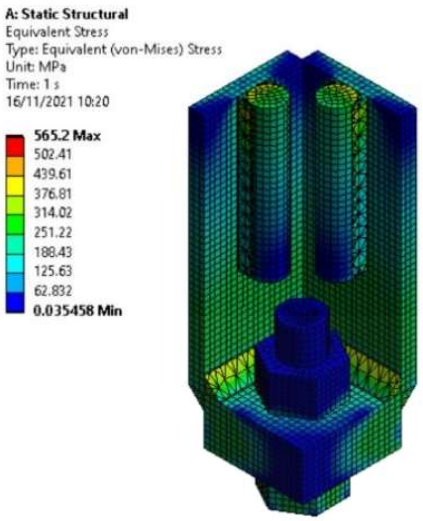


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวอนมิสเซส และระยะการเสียรูปของจุดต่อ CC16

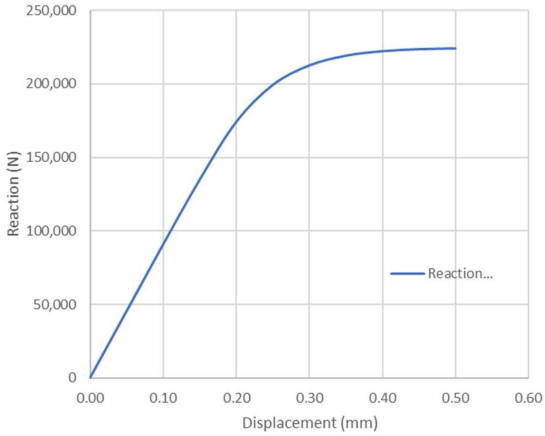
4.3 ผลการศึกษา จุดต่อ CC20

เมื่อพิจารณาที่เป้าหมายของการออกแบบชิ้นส่วนจุดต่อ CC20 กล่าวคือต้องมีความสามารถรับแรงดึงที่มากกว่า 125,600 N (แรงดึงที่ทำให้เหล็ก DB20 คราก) ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองจุดต่อ CC20 สามารถทนแรงดึงได้ราว 199,000 N จึงถือได้ว่าจุดต่อ CC20 ผ่านเกณฑ์การออกแบบเนื่องด้วยมีความสามารถรับแรงดึงมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยสามารถทราบถึงหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆภายในชิ้นส่วนดังที่แสดงในรูปที่ 18 และ รูปที่ 20

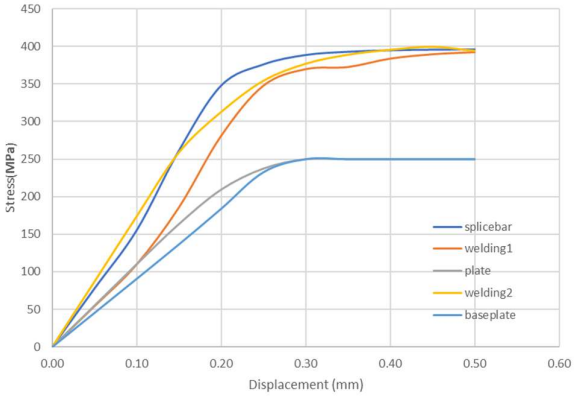
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จะพบว่า ปริมาณหน่วยแรงวอนมิสเซสในชิ้นส่วนจะพัฒนาขึ้นตามระยะยืดและแรงดึง โดยชิ้นส่วนเหล็กแผ่นตั้ง และเหล็กแผ่นฐานพัฒนาหน่วยแรงถึงจุดครากเป็นชิ้นส่วนแรก ที่ระยะการเสียรูปของจุดต่อ 0.30 มิลลิเมตร หรือที่แรงดึงประมาณ 210,000 N หลังจากนั้นบริเวณรอยเชื่อม 2 และรอยเชื่อม 1 จะพัฒนาหน่วยแรงวอนมิสเซสจนถึงจุดครากตามลำดับ ส่งผลให้ชิ้นส่วนเหล็กทาบไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงวอนมิสเซสได้ถึงจุดคราก เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของจุดต่อกับแรงปฏิกิริยา จะทำให้สามารถเห็นถึงการลู่เข้าของเส้นกราฟ ดังที่แสดงในรูปที่ 19 ซึ่งสามารถสะท้อนเป็นกำลังรับดึงแรงสูงสุดที่ชิ้นงานรับได้



รูปที่ 18 หน่วยแรงวอนมิสเซสจากการวิเคราะห์ของจุดต่อ CC20



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปของจุดต่อกับแรงปฏิกิริยาของจุดต่อ CC20



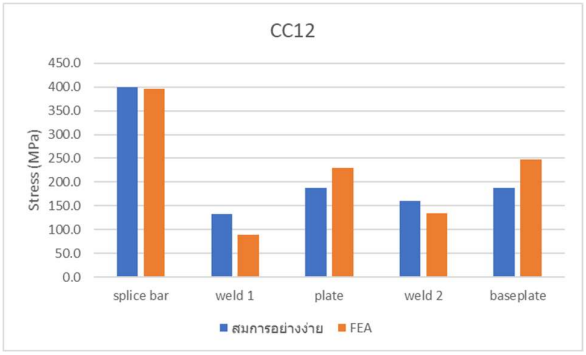
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวอนมิสเซส และระยะการเสียรูปของจุดต่อ CC16

4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณอย่างง่าย

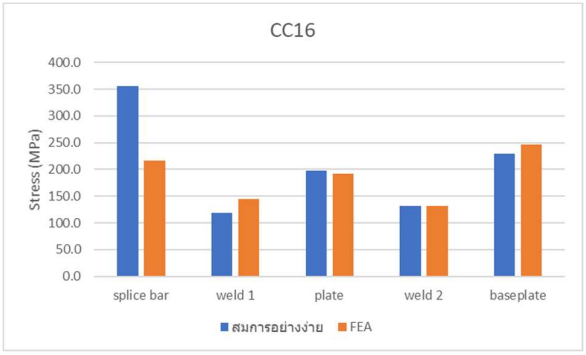
การเปรียบเทียบหน่วยแรงวอนมิสเซสที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนจุดต่อจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับการคำนวณมืออย่างง่าย เป็นขั้นตอนที่สามารถช่วยตรวจสอบความถูกต้องของการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ กล่าวคือหากแนวโน้มของคำตอบที่ได้มีผลที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณมือ ก็จะเป็นเครื่องชี้เตือนให้ผู้ใช้งานโปรแกรมเกิดความระมัดระวังและกลับไปตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการศึกษามีการนำหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนจุดต่อทั้งที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวนมืออย่างง่ายมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลของหน่วยแรงภายในชิ้นส่วนจุดต่อของทั้งสองวิธีมีค่าที่สอดคล้องใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 21 รูปที่ 22 และ รูปที่ 23

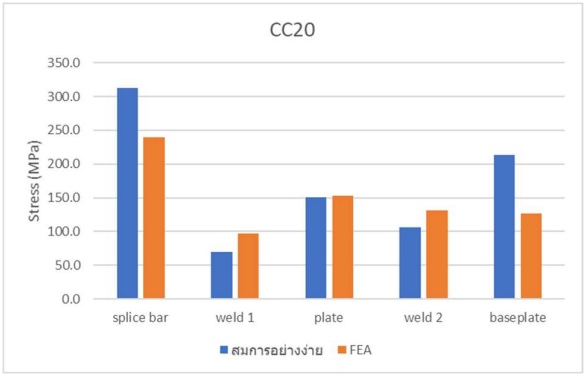
และจากผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงภายในจุดต่อที่สอดคล้องกันนี้ก็จะเป็นสิ่งยืนยันความถูกต้องในการศึกษา



รูปที่ 21 เปรียบเทียบหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ของจุดต่อ CC12



รูปที่ 22 เปรียบเทียบหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ของจุดต่อ CC16



รูปที่ 23 เปรียบเทียบหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ของจุดต่อ CC20

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ทราบถึงค่าหน่วยแรง และลำดับก่อนหลังของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นที่เกิดการคราก ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปปรับปรุงพัฒนาขนาดต่าง ๆ ของชิ้นส่วนจุดต่อให้มีความเหมาะสม และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ยังสามารถระบุถึงกำลังรับแรงดึงสูงสุดของจุดต่อได้ โดยจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองจุดต่อทั้ง 3 ขนาดสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าเกณฑ์แรงดึงสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ ยังไม่เกิดการครากใด ๆ ขณะรับแรงดึงสูงสุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จุดต่อเสา–เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบสลักเกลียวที่ได้ถูกพัฒนาและออกแบบไว้เบื้องต้นสามารถนำไปใช้ได้อย่างปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ทรงพล มั่นศรี, วิษณุ เมตตาประสพกิจ, ธีรพล จันทร์เจริญ และวิบูลย์ ยิ่งเจริญกุล (2546). *จุดต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป*, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 1-93.

[2] ปกรณ์ บุราคร (2556). *การวิเคราะห์ความแข็งแรงและปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 54-64.

[3] Elsabbagh, A., Sharaf, T., Nagy, G.and ElGhandour, M., (2019). *Behavior Of Extended End-plate Bolted Connections Subjected To Monotonic And Cyclic Loads*, Engineering Structures 190 (2019), Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, pp. 142-159.

[4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2555). *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 40-66.

[5] Ansys Inc., (2017). *Ansys Mechanical ADPL Feature Archive*, Ansys Inc., U.S.A.

[6] GmbH, B., (1978). *Precast Concrete Connection Details-structure Design Manual*, Dusseldorf, Germany, pp. 53-73.

[7] Precast/Prestresses concrete institute (2010). *PCI Design Precast and Prestresses concrete Handbook 7 th ed.*, Chicago, USA, pp. CH 6-1 to 6-116.