

กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้างเหล็กภายใต้เกณฑ์สภาวะจำกัด

Optimization Method for Steel Structure Design under Limit State Criteria

วิศรุต จุฑาธวัช¹ วิรัชกร กมลเวช² ศิระ สุรินทร์³ และ ผศ. ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์⁴

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นำเสนอกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยอัลกอริทึม Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) โดยติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายนอกของเสาเหล็กกลมกลวงที่ต่อกับคานเหล็กหน้าตัดโวลต์แฟรงค์ ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกทำให้เกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสา รวมทั้งการวิบัติที่เกิดจากแรงอัดและการวิบัติที่เกิดจากแรงดึงในตำแหน่งขอบบนและล่างของคานตามลำดับโดยจัดทำรูปแบบจำลองสามมิติจากรหัสโปรแกรม ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ร่วมกับอัลกอริทึม BESO ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ANSYS และ MATLAB ของแต่ละปริมาตรคงเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่กำหนดในขนาดเสาที่แตกต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นเพื่อหาค่าสูงสุดของแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายนอกและการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของแผ่นเหล็กเสริมที่ลดปริมาตรลงเทียบกับกำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ในแผ่นเหล็กเสริมปริมาตรขนาดเล็กจะให้ผลลัพธ์การเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ไม่มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เสาเหล็กกลมกลวง, การโก่งเดาะเฉพาะที่, BESO

Abstract

This thesis presents, the process of stiffener steel plate topology Optimization using the Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) algorithm, the external reinforcing steel sheet of a round hollow steel column (HSS) connected to a wide-flank cross-section steel beam. The structure is subjected to a constant load. The stresses that develop in the structure occur the local buckling of the round HSS, both stresses caused by the compression stress in upper edge beam and the tension stress in lower edge beam. By Define a 3D model, physical properties data of the structure, finite element method (FEM) collaborate with a BESO algorithm from

program computer code with commercial software ANSYS and MATLAB for each remaining volume of stiffener steel plates given in different round HSS sizes. The structural analysis was analyzed by a non-linear FEM process. The study was found that the efficiency of the steel plate decreased in design volume compared the increased load capacity. In small design volumes of stiffener is ineffective.

Keywords: Round HSS, Local buckling, BESO

1. บทนำ

ปัญหาที่พบโดยมากในชิ้นส่วนโครงสร้างเสาคือการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ที่จุดต่อระหว่างเสากับคาน ซึ่งไม่มีการเสนอวิธีเพิ่มกำลังรับแรงของรอยต่อจากปัญหานี้ในมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก ที่ผ่านมามีใช้ประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบเป็นหลัก หรือหากเลือกใช้แผ่นเหล็กเสริมกำลัง (stiffener) ก็มักเกิดปัญหาใช้วัสดุมากเกินความต้องการ เนื่องจากมีบางส่วนของแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น รวมถึงหากต้องการชิ้นรูปที่มีลักษณะเฉพาะก็จะมีราคาที่สูงเนื่องจากต้องมีการผลิตเข้าหลอมขึ้นมาก่อนด้วย แต่ด้วยการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดของเทคโนโลยีในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กให้มีรูปร่างและขนาดตามการออกแบบ ทำให้การเลือกใช้แผ่นเหล็กเพื่อเสริมกำลังถูกใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกและราคาเหมาะสม

การจะทราบถึงขนาด รูปร่าง โทโพโลยี (topology) และการเลือกวิธีติดตั้งแผ่นเหล็กจำเป็นเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีและโปรแกรมสำหรับการออกแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง แต่ในปัจจุบันโปรแกรมสำหรับการออกแบบยังมีอยู่อย่างจำกัดและใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก ส่งผลให้เกิดการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้รองรับโครงสร้างที่หลากหลายขึ้นพร้อมทั้งลดเวลาในการประมวลผลลงนำไปสู่การลดการใช้ทรัพยากรในการผลิตและต้นทุนค่าวัสดุ

2. ความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างเหล็ก

2.1.1 การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling)

การโก่งเดาะเฉพาะที่คือการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นที่ปีก (flange) เหว (web) หรือส่วนใดส่วนหนึ่งของเสาในขณะที่เสาทั้งต้นยังคงอยู่ในสภาพเดิม ไม่เกิดการโก่งเดาะเนื่องจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t) มีค่าสูง กล่าวคือชิ้นส่วนของหน้าตัดเสามีความบางเกินไป ซึ่งสำหรับเสาเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นมักประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบาง การโก่งเดาะจึงมักเกิดขึ้นที่บริเวณปีกหรือเหวก่อนเกิดการโก่งเดาะทั้งเสา ส่งผลให้กำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาลดน้อยลง [1]

2.1.2 หน่วยแรงอัดวิกฤต

1. หน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงยึดหยุ่น

พิจารณาแผ่นเหล็กบางที่ปลายทั้งสองด้านมีการรองรับแบบธรรมดา (simply support) โดยมีความยาว a และความกว้าง b โดยสมการทั่วไปแสดงในสมการที่ (1)

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (1)$$

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์ของการโก่งเดาะ มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb}\right)^2$, m คือ จำนวนคลื่นครึ่งลูกของการโก่งในทิศทาง x

2. หน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่น

ในช่วงไม่ยึดหยุ่นพฤติกรรมของการโก่งเดาะจะเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) [1] มีค่าหน่วยแรงอัดวิกฤตโดยประมาณแสดงดังสมการที่(2)

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E\sqrt{\tau}}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (2)$$

โดยที่ τ มีค่าเท่ากับ E_t / E , E_t คือ โมดูลัสสัมผัส

2.1.3 การออกแบบโครงสร้างเหล็กภายใต้ข้อกำหนด AISC360-16 [2]

1. การออกแบบกำลังรับแรงอัดสำหรับชิ้นส่วนไม่ชะลุด

ในปริญญานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการออกแบบหน้าตัดเสากลมกลวง (Round HSS) เท่านั้น กำลังรับแรงอัดระบุคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3)$$

โดย F_{cr} สามารถคำนวณได้ดังนี้

เมื่อ $F_y/F_e \leq 2.25$ หรือ $L_c/r \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = F_y (0.658^{F_y/F_e}) \quad (4)$$

เมื่อ $F_y/F_e > 2.25$ หรือ $L_c/r > 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (5)$$

โดยที่ A_g คือ พื้นที่หน้าตัดรวม, F_e คือ หน่วยแรงอัดยึดหยุ่น, L_c คือ ความยาวประสิทธิผล, r คือ รัศมีไจเรชั่น

2. การออกแบบกำลังรับแรงดัดสำหรับหน้าตัดอัดแน่น

กำลังรับแรงดัดระบุคำนวณได้จากสมการที่ (6)

เมื่อ $D/t \leq 0.07E/F_y$

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (6)$$

โดยที่ Z คือ โมดูลัสพลาสติก

3. การออกแบบสำหรับรวมแรงตามแนวแกน (axial force) และ โมเมนต์ดัด (bending moment)

ปฏิสัมพันธ์ของแรงอัดและแรงดัดสำหรับหน้าตัดที่มีแกนสมมาตรสองแกนและมีแกนสมมาตรแกนเดียวให้สมการดังนี้

เมื่อ $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (7)$$

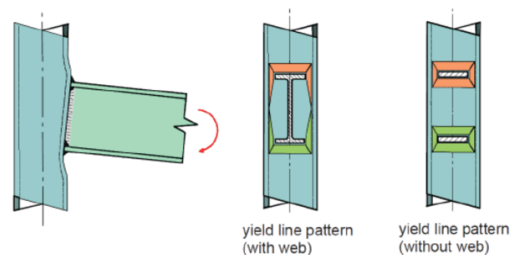
เมื่อ $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (8)$$

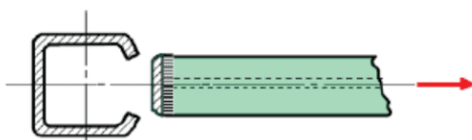
โดยที่ P_r คือ กำลังรับแรงอัดที่ต้องการของหน้าตัด, P_c คือ กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้, M_r คือ กำลังรับแรงดัดที่ต้องการ, M_c คือ กำลังรับแรงดัดที่สามารถรับได้

2.1.3 รอยต่อคาน-เสา

โดยทั่วไปรูปแบบวิบัติของเสาสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือการวิบัติเนื่องจากการเสีรูปของเสาเหล็ก (column plastification) เป็นการเสีรูปของเสาเหล็กกลวงบริเวณที่เชื่อมต่อกับคานเหล็กหน้าตัดโวลด์แฟรงค์ แสดงดังรูปที่ 2.1 และการวิบัติเนื่องจากการเฉือนทะลุ (punching shear failure) เป็นการวิบัติที่เกิดการร้าวและแยกออกจากกันบริเวณที่ผิวเสาเหล็กติดกับคานเหล็กหน้าตัดโวลด์แฟรงค์ [3] แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การวิบัติเนื่องจากการเสีรูปของเสาเหล็ก [4]



รูปที่ 2.2 การวิบัติเนื่องจากการเฉือนทะลุ [4]

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้าง (Structural Optimization)

ตั้งแต่แนวคิดนี้ถูกเสนอขึ้นในปี ค.ศ.1960 การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้าง (structural optimization) ก็ถูกใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในขั้นตอนกระบวนการออกแบบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเค้นของโครงสร้าง หรือปฏิบัติตามเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ต่างๆ รูปแบบของปัญหาการเสริมประสิทธิภาพจะประกอบด้วย 3 ส่วนเสมอได้แก่ ตัวแปรในการออกแบบ (design variables), วัตถุประสงค์ และข้อจำกัด [5]

2.2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยี (Topology Optimization)

กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และกระบวนการทางคณิตศาสตร์ในวิธีการเหล่านั้น การแก้ปัญหการเพิ่มประสิทธิภาพถูกทำให้ง่ายขึ้นโดยการลดขนาดโครงสร้างระดับจุลภาค [6] ได้เสนอวิธีที่สะดวกกว่าโดยในระหว่างกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพจะทำการกำจัดเอลิเมนต์ที่ไม่มีประสิทธิภาพออกแล้วคงไว้ซึ่งเอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ หากใช้วิธีการจำแนกเอลิเมนต์ที่ไม่มีประสิทธิภาพมอดูลัสสภาพยืดหยุ่น (Young's modulus) ในเอลิเมนต์นั้นจะลดลงและสรุปว่าไม่มีเอลิเมนต์นั้น โดยวิธีนี้จะสามารถหาคำตอบในปัญหาขนาดเล็ก แต่สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งมีการคำนวณหลายเอลิเมนต์ส่งผลให้อาจไม่เหมาะสมในการทำงาน [7]

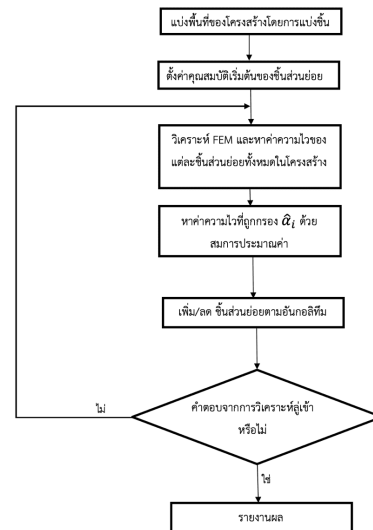
2.2.2 Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)

จากปัญหาของ ESO ที่เมื่อเอลิเมนต์ถูกระบุว่าไม่มีประสิทธิภาพจึงถูกกำจัดแบบฮาร์ดคิล (Hard Kill) คือกำจัดออกและไม่สามารถนำกลับมาได้ แม้ว่าไม่ได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ต่ำที่สุด ซึ่งปัญหานี้ถูกแก้ไขโดยจะไม่เพียงนำเอลิเมนต์ที่ไม่มีประสิทธิภาพออกแต่ยังป้องกันเอลิเมนต์ที่อ่อนแอโดยการนำมายึดติดกับวัสดุพิเศษเมื่อจำเป็น โดยวิธีนี้เรียกว่า Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) เมื่อเอลิเมนต์ที่ไม่มีประสิทธิภาพถูกกำจัดออกไปแล้ว อัลกอริทึมจะพิจารณาว่าควรนำกลับมาจะสามารถนำเอลิเมนต์นั้นกลับมาได้

จากการทำงานของ BESO เมื่ออัลกอริทึมพบเอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพทางกลไม่เพียงพอ จะทำการตัดวัสดุพิเศษเข้าไปบริเวณที่ใกล้เคียงเอลิเมนต์นั้น ส่งผลให้บริเวณใกล้เคียงเอลิเมนต์ที่มีค่าความไวสูงจะถูกจัดลำดับความสำคัญให้มีการเสริมกำลัง อย่างไรก็ตามเอลิเมนต์ที่เป็นช่องว่างจะมีความไวเท่ากับ 0 เนื่องจากเอลิเมนต์เหล่านี้จะไม่ถูกรวมอยู่ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการติดตั้งและนำออกของเอลิเมนต์ในอัลกอริทึม BESO นั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดสัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ในแต่ละการวนซ้ำ และจะค่อยๆเพิ่มปริมาตรของเอลิเมนต์ที่ต้องการนำออก ด้วยวิธีนี้จะทำการกำหนดค่าอัตราส่วนปริมาตรวิวัฒนาการ (Evolutionary Volume Ratio, EVR) ซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาตรของการทำซ้ำในรอบถัดไป [7]

แผนภาพขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม BESO แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึม BESO

2.3 ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method, FEM) เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้คอมพิวเตอร์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย โดยสามารถใช้ในการคำนวณค่าความเค้น, ความเครียด, การโก่งตัว และปัญหาทางวิศวกรรมโครงสร้างอื่นๆ ระเบียบวิธีนี้ถูกใช้กับการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กเนื่องจากช่วยลดต้นทุนในการทดสอบทางกายภาพ โดยหลักการทั่วไปของ FEM คือจะทำการแบ่งวัตถุที่มีความต่อเนื่องออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (element) พฤติกรรมของแต่ละเอลิเมนต์สามารถอธิบายได้ด้วยชุดสมการอย่างง่าย และสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของแต่ละองค์ประกอบนี้เมื่อรวมกันจะเป็นสมการชุดใหญ่ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างทั้งหมด [8]

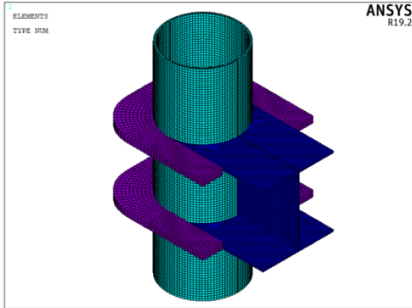
ANSYS คือซอฟต์แวร์วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยสามมิติที่เรียกว่า SOLID185 ซึ่งเอลิเมนต์ย่อยเหล่านี้สามารถถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสามมิติได้หลากหลาย โดยลักษณะของ SOLID185 เป็นเอลิเมนต์ไอโซพารามิเทริก (isoparametric) แบบแปดจุด (node) ต่อที่มุม แต่ละจุดประกอบด้วยสามระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) ได้แก่ การเลื่อนที่ (translation) ในทิศทาง x, y และ z ด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

3. การดำเนินงาน

การใช้แผ่นเหล็กติดตั้งเข้ากับเสาเพื่อเสริมประสิทธิภาพการรับกำลังเป็นหนึ่งในวิธีที่วิศวกรผู้ออกแบบเลือกใช้ โดยจากการศึกษาพบว่าวิธีการเชื่อมแผ่นเหล็กเต็มหน้าตัดเสากลางในเพิ่มประสิทธิภาพการรับกำลังได้มากกว่าวิธีการเชื่อมแผ่นเหล็กรอบเสากลางนอก [9] แต่ในการก่อสร้างจริงนั้นมีความลำบากกว่าเนื่องจากต้องทำการตัดหัวเสาบริเวณวิกฤต (critical) ออกแล้วจึงทำการเชื่อมแผ่นเหล็กเข้าให้เต็มพื้นที่หน้าตัดเสา ดังนั้นปัญหานี้จึงเลือกใช้วิธีการเสริมกำลังด้วยการเชื่อมแผ่นเหล็กรอบเสากลางนอกที่บริเวณวิกฤตคือที่จุดบนสุดและล่างสุดของคานาหน้าตัดโวลต์แฟรงค์ซ์เข้าเชื่อมต่อกับเสาเหล็กที่กลมกลวง

3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม ANSYS

แบบจำลองสามมิติของโครงสร้างเสาเหล็กทอกกลมกลวงที่มีคานเหล็กหน้าตัดเวดแฟรงค์มาต่อพร้อมติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังถูกสร้างขึ้นผ่านโปรแกรม ANSYS โดยคุณสมบัติวัสดุถูกนำมากำหนดเป็นพารามิเตอร์สำหรับการสร้างแบบจำลอง และได้ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลลัพธ์แบบจำลองสามมิติ

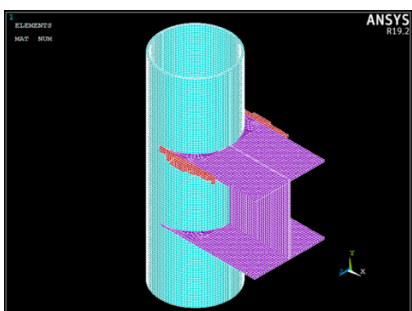
แล้วจึงทำการเก็บค่าพิกัดของทุกจุด (node) ไว้ในไฟล์ชื่อ p.dat และเก็บค่าพิกัดทุกจุดที่มุมของทุกเอลิเมนต์ไว้ในไฟล์ชื่อ t.dat เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเสริมประสิทธิภาพโทโพโลยีด้วยอัลกอริทึม BESO ในโปรแกรม MATLAB

3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยโปรแกรม MATLAB

ทางคณะผู้จัดทำร่วมกับที่ปรึกษาปริญญาโทได้พัฒนาโค้ด (code) ที่ใช้สำหรับกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยโปรแกรม MATLAB โดยอ้างอิงตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และอัลกอริทึม Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นหลังการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลัง

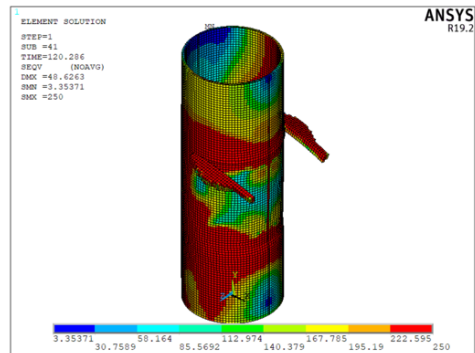
ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB ในรูปของไฟล์ nodeupdate.dat และไฟล์ elementupdate.dat ซึ่งบรรจุข้อมูลพิกัดของโครงสร้างในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนรวมถึงข้อมูลส่วนอื่นๆที่จำเป็นสำหรับการขึ้นรูปแบบจำลองสามมิติ จะถูกอ่านในโปรแกรม ANSYS ด้วยฟังก์ชัน Modeling ทำให้ได้แบบจำลองสามมิติหลังจากกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองสามมิติหลังจากกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยี

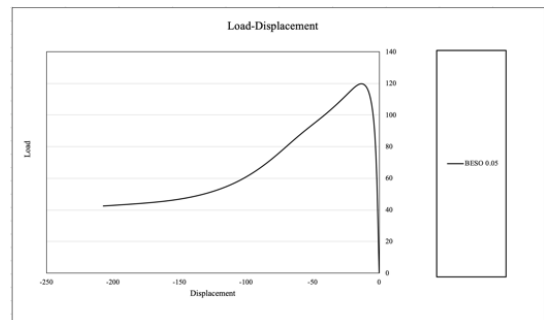
กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นด้วยโปรแกรม ANSYS ใช้แนวคิด Equilibrium on deformed shape กล่าวคือทุกๆครั้งที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีการคำนวณค่า Stiffness ของแต่ละเอลิเมนต์ขึ้นมาด้วย โดยทำการตั้งค่าการวิเคราะห์ในฟังก์ชัน Solution Control เป็น Large Displacement Static เนื่องจากต้องการคำนวณผลของ 2nd Order จากการคำนวณค่า Stiffness Matrix ของแต่ละเอลิเมนต์และกำหนดค่า Time at end of load step ไว้ที่ 200 กล่าวคือในระหว่างการวิเคราะห์จะทำการเพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อยๆจนเท่ากับ 200 ด้วยวิธี arc-length ซึ่งจะทำให้การเพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าที่เป็นขีดจำกัดของวัสดุแล้วแรงกระทำจะลดลง ทำให้แรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์จะเท่ากับแรงกระทำสูงสุดที่โครงสร้างรับได้ แต่กระบวนการวิเคราะห์นี้มีลักษณะการวิเคราะห์ที่เมื่อรู้จบจึงต้องทำการกำหนดค่าการวนซ้ำโดยเลือกใช้ที่สี่ร้อยรอบการวนซ้ำเป็นจำนวนรอบต่ำสุด จึงหยุดการวิเคราะห์

เมื่อสิ้นสุดการวนซ้ำรอบที่สี่ร้อย ทำการอ่านค่า Time ที่มากที่สุดจากฟังก์ชัน Read Result แล้วใช้ฟังก์ชัน Plot Result พล็อตผลลัพธ์ของ von Mises stress โดยค่า Time ที่มากที่สุดที่อ่านไว้จะเท่ากับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลลัพธ์ von Mises stress ของเสาและแผ่นเหล็กเสริมกำลังขณะรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

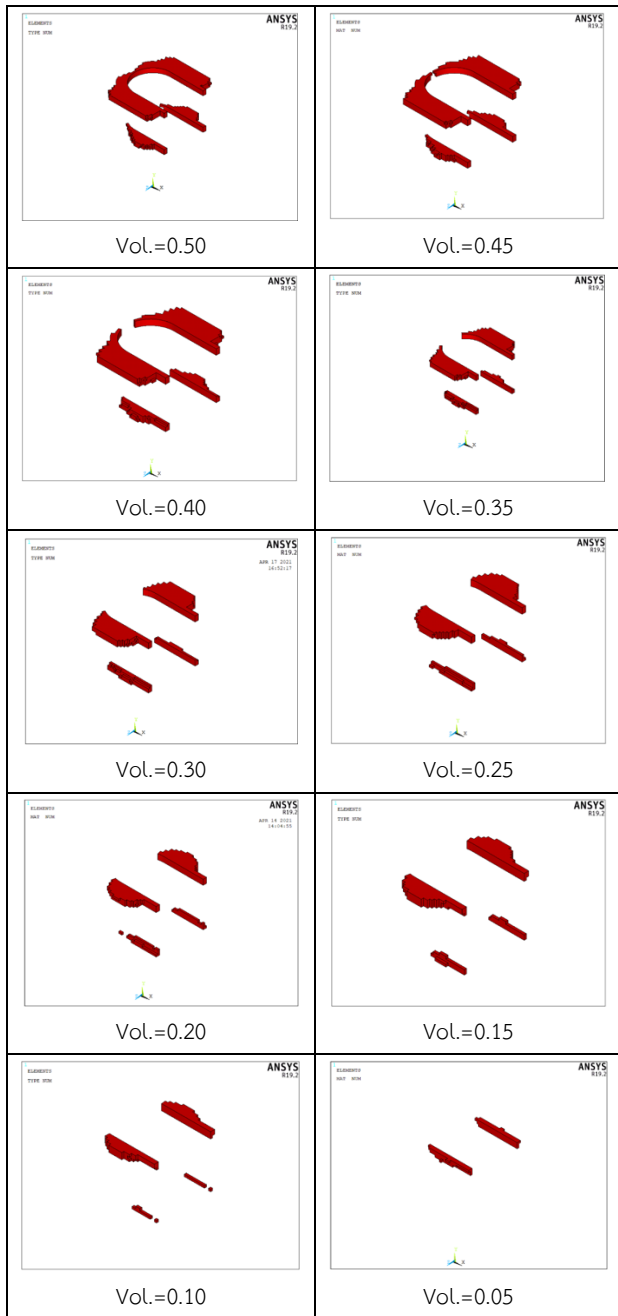
ผลลัพธ์อื่นที่ได้จากกระบวนการนี้คือความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเสียรูปของปลายคานในแนวตั้ง โดยใช้ฟังก์ชัน TimeHist Postpro เพื่อนำข้อมูลออกมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเสียรูปของปลายคานในแนวตั้ง

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 โทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังหลังการเพิ่มประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.1 โทโพโลยีของแผ่นเหล็กเสริมกำลังทุกปริมาณครกเหลือของเสาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 250 มม.

4.1 กำลังรับแรงที่เปลี่ยนไปของเสาเมื่อติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ปริมาณครกเหลือต่างๆ

เสาเหล็กกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 200 มม., 250 มม., 300 มม. และ 350 มม. ที่ทำการกำจัดเอลิเมนต์ของแผ่นเหล็กเสริมกำลังออกจนเหลือปริมาณเท่ากับ 50%, 45%, 40%, 35%, 30%, 25%, 20%, 15%, 10% และ 5% ได้ผลการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นหลังกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม.

ปริมาณครกเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (%)	กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวง (ตัน)	ร้อยละของกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น
100	63.71	28.12
50	61.69	24.06
45	61.21	23.10
40	60.32	21.31
35	59.21	19.07
30	57.70	16.03
25	56.92	14.47
20	55.87	12.35
15	54.48	9.57
10	52.73	6.04
5	50.55	1.66
ไม่ทำการเสริมกำลัง	49.73	-

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มม.

ปริมาณครกเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (%)	กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวง (ตัน)	ร้อยละของกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น
100	94.84	29.55
50	89.66	22.46
45	88.82	21.32
40	87.25	19.18
35	85.42	16.68
30	82.87	13.20
25	78.49	7.21
20	76.59	4.61
15	75.51	3.15
10	74.77	2.13
5	74.12	1.24
ไม่ทำการเสริมกำลัง	73.21	-

ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม.

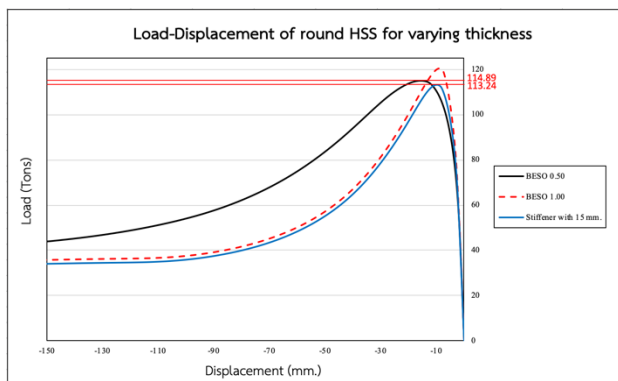
ปริมาณครกเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (%)	กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวง (ตัน)	ร้อยละของกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น
100	120.59	24.98
50	114.89	19.07
45	114.25	18.41
40	112.89	17.00
35	110.66	14.69
30	108.28	12.22
25	102.47	6.20
20	99.09	2.69
15	98.48	2.06
10	97.81	1.37
5	96.89	0.41
ไม่ทำการเสริมกำลัง	96.49	-

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 มม.

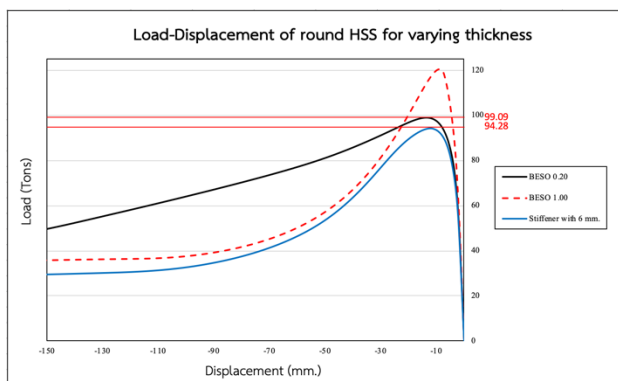
ปริมาณคงเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (%)	กำลังรับแรงสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวง (ตัน)	ร้อยละของกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น
100	145.54	23.05
50	137.33	16.11
45	136.61	15.50
40	134.79	13.96
35	133.54	12.90
30	129.40	9.40
25	123.36	4.29
20	121.20	2.47
15	120.56	1.93
10	120.29	1.70
5	119.78	1.27
ไม่ทำการเสริมกำลัง	118.28	-

แนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงสูงสุดของเสาเทียบกับปริมาณคงเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลังหลังกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ พบว่าการลดลงไม่เป็นเส้นตรง

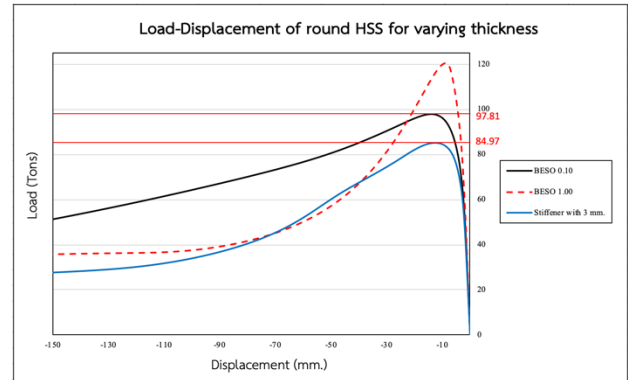
4.2 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังกับการลดความหนาแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยตรง



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นของการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีที่ปริมาณคงเหลือ 50% กับแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ลดความหนา 50% (เหลือ 15 มม.) ของเสาหน้าตัด 300 มม.



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นของการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีที่ปริมาณคงเหลือ 20% กับแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ลดความหนา 80% (เหลือ 6 มม.) ของเสาหน้าตัด 300 มม.



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นของการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีที่ปริมาณคงเหลือ 10% กับแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ลดความหนา 90% (เหลือ 3 มม.) ของเสาหน้าตัด 300 มม.

จากผลลัพธ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณคงเหลือเท่ากันของวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังกับการลดความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยตรง ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่เท่ากัน โดยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีด้วยอัลกอริทึม BESO ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่า กล่าวคือวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีด้วยอัลกอริทึม BESO ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า

4.3 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังกับข้อกำหนด

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงที่ได้จากข้อกำหนด AISC360-16 กับได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสา (มม.)	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากข้อกำหนด AISC360-16 (ตัน)	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น (ตัน)
200	27	49.73
250	37.26	73.21
300	49.88	96.49
350	63.30	118.28

แสดงให้เห็นว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นมีค่ามากกว่าที่ได้จากข้อกำหนด AISC360-16

5. อภิปรายผลและสรุปผล

1. แนวโน้มการลดลงของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเทียบกับปริมาณคงเหลือของแผ่นเหล็กเสริมกำลังหลังกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ พบว่าการลดลงไม่เป็นเส้นตรง กล่าวคือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาที่ลดลงเมื่อเทียบกับปริมาตรที่ลดลง หากคิดเป็นร้อยละแล้วพบว่า การลดลงมีค่า

ต่ำกว่า แต่พบว่ามีความแปรปรวนตรงเหลือที่การลดลงของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่ามากกว่าปริมาณแผ่นเหล็กที่ลดลง โดยสามารถตรวจสอบได้จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังที่ลดลงจริงเทียบกับกำลังที่ลดลงในอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่งของแผ่นหน้าตัดเสา ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญสำหรับการตัดสินใจเลือกติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังว่ามีความคุ้มค่าหรือไม่

2. ที่ ปริมาตรคงเหลือเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับอัลกอริทึม BESO กับการลดความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยตรง พบว่าให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่เท่ากัน โดยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีด้วยอัลกอริทึม BESO ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่า ซึ่งมีสาเหตุจากวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีด้วยอัลกอริทึม BESO มีกระบวนการวิเคราะห์การกำจัดเอลิเมนต์ที่ไม่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักที่จะเพิ่มขึ้นของโครงสร้างออก ต่างจากการลดความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยตรง ที่เลือกกำจัดเอลิเมนต์เพื่อให้ได้ปริมาตรคงเหลือที่ต้องการโดยไม่ผ่านกระบวนการใดๆเลย
3. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเหล็กกลมกลวงที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นมีค่ามากกว่าที่ได้จากข้อกำหนด AISC360-16 กล่าวคือหากออกแบบโดยเลือกใช้ข้อกำหนด AISC360-16 จะมีความปลอดภัยมากกว่าการออกแบบด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น เนื่องจากมีการลดทอนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เสาสามารถรับได้ลง ในทางกลับกันก็จะทำให้ใช้ค่าก่อสร้างสูงเกินจริง เพราะต้องเลือกใช้ขนาดเสาที่ใหญ่หรือหนาขึ้น เพื่อให้ผลลัพธ์ที่แสดงมีค่าสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่ต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา จัดหาข้อมูลที่เป็น และตรวจสอบแก้ไขส่วนที่บกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นกระทั่งการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณรัฐ ชู ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และทุกความช่วยเหลือตลอดการจัดทำปริญญานิพนธ์ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านสำหรับความรู้อันเป็นประโยชน์ในการจัดทำปริญญานิพนธ์

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณทุกการสนับสนุนและกำลังใจที่ดีตลอดมาจากสมาชิกในครอบครัวและเพื่อนร่วมภาควิชา

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทักษิณ เทพชาตรี และ อัครวัชร เล่นวารีย์. 2562. *พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Building*. American National Standard ANSI/AISC 360-16.
- [3] ตรีเทพ อุไรพงษ์ และ กิจพัฒน์ ภู่วรรณ. 2559. *การเสริมกำลังจุดต่อระหว่างคานเหล็กตัวไอกับเสาเหล็กท่อกกลม โดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น*. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] Wardenier, J. (2010). *Hollow sections in structural applications*. 2nd ed. Delf, The Netherlands.
- [5] Hichao, A., Shenyang, C., and Hai, H., (2016). *Structural optimization for multiple structure cases and multiple payload cases with a two-level multipoint approximation method*. Beihang University.
- [6] Xie, Y.M., and Steven, G.P. (1993). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, 49(5):885-896.
- [7] Yazdanpanah, M. (2014). *Implementation of bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) in the underground excavations and slope stability*. RMIT University.
- [8] Wu, J. (2013). *Numerical modelling and optimization of new RHS column-to-I beam connections*. Swansea University.
- [9] รัฐ ชู. 2561. *การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไร้เชิงเส้นของท่อเหล็กที่มีแผ่นเสริมกำลัง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.