

# การเสริมประสิทธิภาพการออกแบบแผ่นเหล็กเสริมกำลังสำหรับโครงสร้างเหล็กคาน-เสาที่รองรับเครน Optimal stiffener design of steel beam-to-column connection supporting heavy cranes

กรวิญญู ทิพย์รักษ์<sup>1</sup> วุฒิพงษ์ หล่อสมฤดี<sup>2</sup> ณัฐพร จิตราภรณ์<sup>3</sup> และ ผศ. ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการออกแบบแผ่นเหล็กเสริมกำลัง เพื่อใช้ประกอบในโครงสร้างนั้นมีการใช้วัสดุมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นเนื่องมาจากข้อจำกัดในการขึ้นรูปของแผ่นเหล็ก แต่เนื่องด้วยปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้า ประกอบกับความเร็วในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด ทำให้สามารถขึ้นรูปแผ่นเหล็กให้มีรูปร่างและโทโพโลยีที่ต้องการได้ง่ายขึ้น คณะผู้จัดทำจึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีและหารูปร่างที่ดีที่สุดของแผ่นเหล็กเสริมกำลังสำหรับเสาเหล็กกลวงที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) โดยในปริภูมิพหุนั้นคณะผู้จัดทำจะศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างเหล็กคาน-เสาที่รองรับเครน และหาโทโพโลยีที่ดีที่สุดของแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ ANSYS จากการศึกษาพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีของแผ่นเหล็กเสริมกำลังได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถลดปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับการทำแผ่นเหล็กเสริมกำลังลงได้ในขณะที่ประสิทธิภาพในการเสริมแรงให้กับเสายังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: BESO, การเสริมประสิทธิภาพโทโพโลยี, โครงสร้างเหล็กคาน-เสาที่รองรับเครน

## Abstract

In the present day, the structural stiffener design is overuse of material because of the limitation of steel plate forming. Since advanced technology has been developed in combination with the leap of computer processing speed, the steel plate can be easier formed into required shape and topology. Therefore, the Finite Element Analysis (FEM) and Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) are chosen and used to optimize topology and find the most suitable shape of structural stiffener. In this thesis, we studied the behavior of beam-to-column

connections supporting heavy cranes and found the best topology of stiffener by using FEM and BESO with MATLAB and ANSYS. After the research and trial run of developed program, the result met the objective to reduce the using of material for stiffener while reinforcing performance was in acceptable criteria.

Keywords: BESO, Topology Optimization, Beam-to-column structure supporting heavy cranes

## 1. บทนำ

ที่ผ่านมาการออกแบบแผ่นเหล็กเสริมกำลังเพื่อใช้ประกอบในโครงสร้างนั้นมีการใช้วัสดุมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นเนื่องมาจากข้อจำกัดในการขึ้นรูปของแผ่นเหล็กที่ส่วนมากแล้วสามารถขึ้นรูปได้อย่างจำกัด และมีราคาสูงหากต้องการขึ้นรูปที่มีรายละเอียดและลักษณะเฉพาะ แต่ด้วยการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กให้มีรูปร่างและโทโพโลยีตามที่ต้องการได้สะดวกยิ่งขึ้นและราคาถูกลง ประกอบกับความเร็วในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด ตลอดสองทศวรรษที่ผ่านมาจึงมีความเป็นไปได้สูงที่ในอนาคตอันใกล้จะมีการนำแผ่นเหล็กเสริมกำลังรูปร่างเฉพาะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างมาใช้งานอย่างแพร่หลาย

อย่างไรก็ตามระเบียบวิธี และโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดนั้นยังมีอยู่อย่างจำกัด ใช้งานกับโครงสร้างได้ไม่หลากหลาย และใช้ทรัพยากรในการวิเคราะห์สูงดังนั้นสาขาวิศวกรรมโครงสร้างจึงมีความต้องการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบสำหรับโครงสร้างที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และใช้ทรัพยากรในการคำนวณน้อยลงเพื่อมารองรับความต้องการในอนาคตการก่อสร้างในการลดต้นทุนค่าวัสดุในการก่อสร้างในอนาคต และเพื่อให้สอดคล้องกับค่านิยมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการพัฒนาที่ยั่งยืนในปัจจุบันอีกด้วย

## 2. ความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การออกแบบโครงสร้างเหล็ก

#### 2.1.1 การออกแบบโครงสร้างเหล็กภายใต้มาตรฐาน AISC

##### 1. การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัด

หลักเกณฑ์ในการหาค่าหน่วยแรงวิกฤต ( $F_{cr}$ ) สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเหล็กรับแรงอัดที่มีหน้าตัดบีบอัดและไม่ชะลุดมี 2 กรณีดังนี้

a) เมื่อ  $KL/r > 4.71\sqrt{E/F_y}$  หรือ  $F_y/F_e > 2.25$

$$F_{cr} = 0.877F_e \leq F_y \quad (1)$$

b) เมื่อ  $KL/r \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$  หรือ  $F_y/F_e \leq 2.25$

$$F_{cr} = (0.658)^{F_y/F_e} F_y \quad (2)$$

โดยสามารถหาค่าแรงอัดระบุ (nominal compressive strength,  $P_n$ ) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

โดยที่  $F_y$  คือ หน่วยแรงคราก,  $F_e$  คือ หน่วยแรงอัดยืดหยุ่น,  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น,  $r$  คือ รัศมีจอร์เจสัน,  $L_c$  คือ ความยาวประสิทธิภาพ,  $A_g$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน

##### 2. การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงดัด

เนื่องจากชิ้นส่วนรับแรงดัดที่ใช้ในการคำนวณเป็นหน้าตัดบีบอัดไม่ชะลุด และมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นจึงจะไม่พิจารณาการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกคาน (flange local buckling) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของเอวคาน (web local buckling) และการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) แต่จะพิจารณาเฉพาะการคราก (yielding) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (4)$$

โดยที่  $Z$  คือ โมดูลัสแบบพลาสติกของหน้าตัดรอบแกนที่ดัด

##### 3. การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดและแรงดัด

ในการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดและแรงดัดที่มีความสมมาตรแกนเดียวและสองแกน มาตรฐาน AISC ได้กำหนดไว้ดังนี้

a) เมื่อ  $\frac{P_r}{P_C} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_C} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (5)$$

b) เมื่อ  $\frac{P_r}{P_C} < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_C} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (6)$$

โดยที่  $P_r$  คือ กำลังรับแรงอัดที่ต้องการ,  $P_C$  คือ กำลังรับแรงอัดที่รับได้,  $M_r$  คือ กำลังรับแรงดัดที่ต้องการ,  $M_C$  คือ กำลังรับแรงดัดที่รับได้

#### 2.1.2 การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling)

การโก่งเดาะเฉพาะที่ คือ การที่เสาก่อเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นที่ปีก (flange) เอว (web) หรือส่วนใดส่วนหนึ่งในขณะที่เสายังคงอยู่ในสภาพเดิมไม่เกิด

การโก่งเดาะ สำหรับเสาเหล็กชนิดขึ้นรูปเย็น อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของปีกหรือเอวจะมีค่ามาก การโก่งเดาะจึงมักเกิดขึ้นที่บริเวณปีก หรือเอวก่อนที่จะเกิดการโก่งเดาะทั้งเสา ทำให้กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาลดลง

เมื่อพิจารณาแผ่นเหล็กบางที่ปลายทั้งสองด้านมีการรองรับแบบง่าย (simply support) โดยมีความยาว  $a$  และความกว้าง  $b$  สมการทั่วไปในการหาหน่วยแรงวิกฤตตามแกนของแผ่นบางในช่วงยึดหยุ่นเป็นดังนี้

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (7)$$

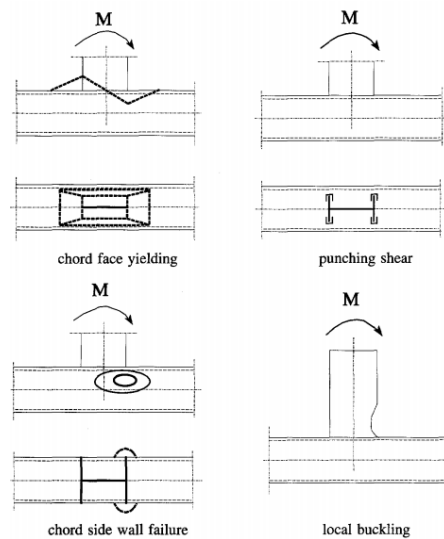
ในการวิเคราะห์ช่วงไม่ยึดหยุ่น พฤติกรรมจะเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) โดย Bleich ได้เสนอให้ค่าหน่วยแรงอัดวิกฤตโดยประมาณในช่วงไม่ยึดหยุ่นดังที่แสดงในสมการที่ (8)

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (8)$$

โดยที่  $\tau$  มีค่าเท่ากับ  $E_t/E$ ,  $E_t$  คือ โมดูลัสสัมผัส,  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ของการโก่งเดาะ มีค่าเท่ากับ  $(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb})^2$ ,  $m$  คือ จำนวนคลื่นครึ่งลูกของการโก่งในทิศทาง  $x$

#### 2.1.3 รอยต่อคาน-เสา

จากการทดสอบรอยต่อรูปตัวที (T-joint) แบบระนาบเดียวของคานหน้าตัดรูปตัว I (I-beam) และเสาเหล็กสี่เหลี่ยมกลวง [1] พบว่าโดยทั่วไปแล้วรูปแบบการวิบัติเฉพาะที่ของเสาจจะมีอยู่ 4 รูปแบบ ได้แก่ การครากที่ระนาบสัมผัส (chord face yielding) การวิบัติที่ระนาบด้านข้าง (chord side wall failure) การวิบัติเฉพาะที่บริเวณปีกคาน (local buckling of brace flanges) และการเฉือนทะลุ (punching shear)



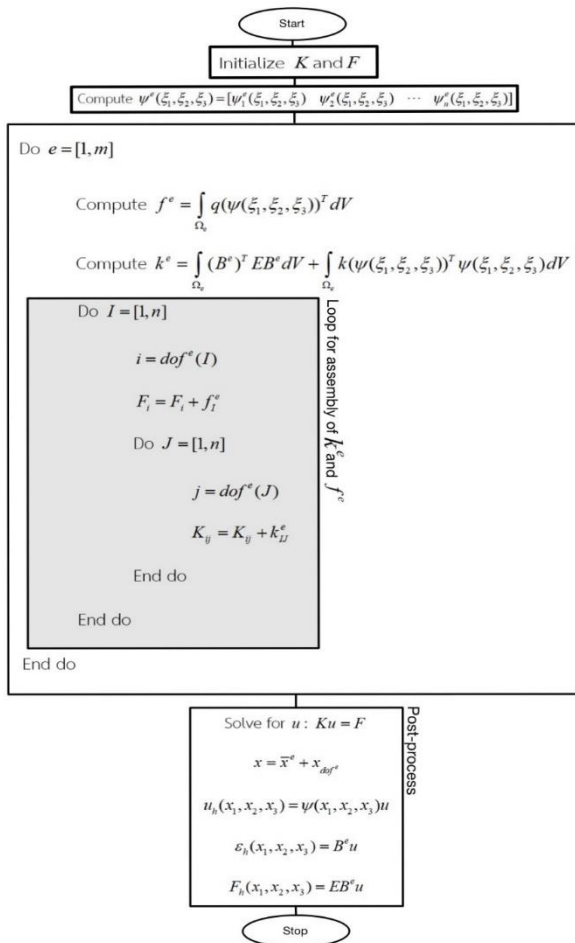
รูปที่ 2.1 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อคาน-เสา [1]

การเสริมกำลังจะทำให้บริเวณรอยต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวิธีการเสริมกำลังของรอยต่อหลากหลายวิธี ทั้งการเสริมกำลังภายในเสา เช่น การใช้แผ่นเหล็กเสริมเป็นวงแหวนที่ตำแหน่งรอยต่อ (ring stiffened connection) การเติมคอนกรีตลงในเสา และการเสริม

กำลังภายนอกเสา เช่น การเสริมแผ่นเหล็กกรอบเสา (collar plate stiffened connection) และการเสริมแผ่นเหล็กทะลุผ่านเสา (through plate-to-hollow section connection) [2]

## 2.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

การแก้ปัญหาแบบสามมิติด้วย FEM เป็นปัญหาที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ สามารถสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ที่โครงสร้างสองมิติด้วย FEM เป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.2 เพื่อให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่โครงสร้างสามมิติด้วย FEM

## 2.3 การเสริมประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้าง (Structural Optimization)

การเสริมประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้างมีเป้าหมายเพื่อการลดน้ำหนักของโครงสร้าง หรือปรับปรุงพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ โดยจะแบ่งประเภทของปัญหาตามวัตถุประสงค์, ข้อจำกัด และลักษณะของตัวแปรในการออกแบบ (Design Variables) สามารถเขียนรูปแบบทั่วไปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

หาเซตของ  $X$  ที่

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(X) \\ & \text{subject to} && g_j(X) \leq 0 \quad (j = 1, m) \\ & && x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i = 1, n) \end{aligned} \quad (9)$$

โดยที่  $f(X)$  คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์,  $g_j(X)$  คือ ฟังก์ชันข้อจำกัด,  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  คือ ตัวแปรในการออกแบบ,  $x_i^L$  และ  $x_i^U$  คือ ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของ  $x_i$  ตามลำดับ

### 2.3.1 Evolutionary Structural Optimization (ESO)

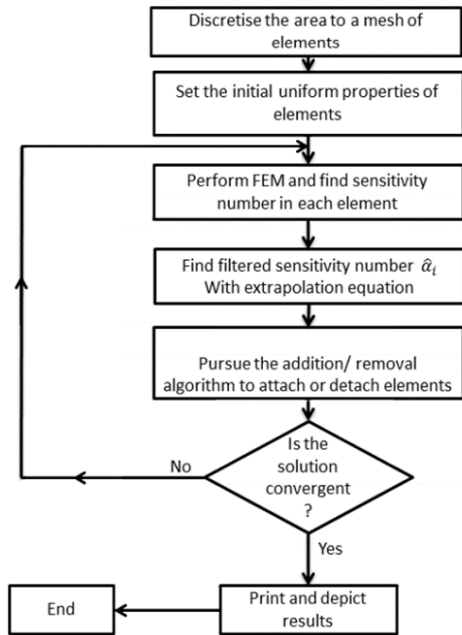
Evolutionary Structural Optimization (ESO) เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพรูปร่างและโทโพโลยีของโครงสร้าง ทำโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ แนวคิดของ ESO คือ การกำจัดเอลิเมนต์ที่มีความเค้นต่ำออกไปจากโครงสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งรูปทรงที่เหมาะสมที่สุด โดยจะทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

กระบวนการทำงานจะเริ่มจากการกำหนดขอบเขตการออกแบบ (Design Domain) ซึ่งเป็นขอบเขตที่กำหนดให้สามารถมีการเปลี่ยนแปลงได้ และขอบเขตที่ไม่สามารถมีการเปลี่ยนแปลง (Non-Design Domain) [3] ดำเนินการแบ่งโครงสร้างออกเป็นโครงตาข่ายซึ่งประกอบด้วยเอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่สามารถระบุสมบัติทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ได้ชัดเจน และกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ จากนั้นจึงวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อพบเอลิเมนต์ที่มีความเค้นต่ำก็จะทำการกำจัดเอลิเมนต์นั้นออกไปจากโครงสร้าง โดยเกณฑ์ในการกำจัดออก (Rejection Criterion, RC) จะพิจารณาจาก von Mises Stress ที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์ [4] เมื่อกระบวนการกำจัดเอลิเมนต์ดำเนินมาถึงสถานะคงที่ (Steady State) หรือจุดที่ไม่มีเอลิเมนต์ในโครงสร้างให้กำจัดสำหรับค่าอัตราส่วนการขจัดที่กำลังใช้ จึงทำการเพิ่มค่าอัตราวิวัฒนาการ (Evolutionary Rate, ER) เข้าไป กระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าจะถึงจุดที่เหมาะสม ซึ่งวิธีนี้จะนำไปสู่โครงสร้างสุดท้ายที่มีการกระจายความเค้นที่สม่ำเสมอ

### 2.3.2 Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)

Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) เป็นวิธีที่พัฒนามาจาก ESO โดยมีความต่างจาก ESO ในด้านการกำจัดเอลิเมนต์ที่ไม่ได้ถูกใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่ง ESO จะเป็นการกำจัดแบบฮาร์ดคิล (Hard Kill) คือเมื่อนำเอลิเมนต์ออกไปแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาได้ แต่สำหรับ BESO เมื่อเอลิเมนต์ที่ไม่ได้ถูกใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพถูกกำจัดแล้ว ถ้าอัลกอริทึมตัดสินใจว่าจะนำกลับมา ก็จะสามารถนำเอลิเมนต์นั้นกลับมาได้

การทำงานของ BESO เมื่ออัลกอริทึมพบส่วนที่มีประสิทธิภาพทางกลไกการทำงานไม่เพียงพอ จะทำการแนบวัสดุพิเศษเข้าไปในช่องว่างบริเวณใกล้เคียงส่วนนั้น ด้วยเหตุนี้ในบริเวณใกล้เคียงเอลิเมนต์ที่มีค่าความไวสูงกว่าจะถูกจัดความสำคัญให้มีการเสริมกำลัง ในการนำเข้าและเอาออกของ BESO นี้จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดสัดส่วนปริมาตร (Volume Fraction) ในแต่ละการทำซ้ำและค่อย ๆ เพิ่มปริมาณเอลิเมนต์ที่ต้องการจะนำออก โดยการเพิ่มตัวแปรหนึ่งเข้าไป คือ สัดส่วนปริมาตรวิวัฒนาการ (Evolutionary Volume Ratio, EVR) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดปริมาณในการทำซ้ำรอบถัดไป



รูปที่ 2.3 แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึม BESO [5]

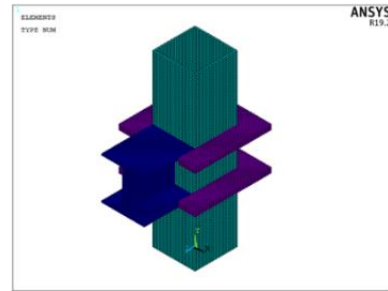
BESO สามารถลดขนาดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่ ESO ไม่สามารถนำเอาลิเมนต์ที่กำจัดออกไปแล้วกลับคืนมาได้โดยใช้การทำงานแบบสองทิศทาง (bi-directional) ทำให้ BESO มีประสิทธิภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร วิธีนี้ให้ขอบเขตที่ชัดเจนและมีเกณฑ์ในการเสริมประสิทธิภาพที่แม่นยำ มีเทคนิคการกรองที่ช่วยให้สามารถแก้ปัญหาเชิงตัวเลขได้ อีกทั้งยังมีการใช้ซอฟต์แวร์ (Soft Kill) ซึ่งสามารถลดปัญหาการได้ผลลัพธ์ที่ขาดเสถียรภาพ BESO สามารถโปรแกรมให้ทำงานสัมพันธ์กับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่าย และไม่มีการคำนวณการหลังการประมวลผลที่ยุ่งยาก นอกจากนี้ความเร็วในการลู่เข้าหาค่าตอบของ BESO นั้นจะเร็วกว่า ESO และมีความน่าเชื่อถือมากกว่า แต่ในทางกลับกัน BESO ไม่เหมาะกับการใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่ใช้วัสดุที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากในวิธีนี้ผลลัพธ์ที่ได้ในรอบของการทำซ้ำปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ในรอบของการทำซ้ำก่อนหน้า (History Dependent) ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้กับวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (Elastic Material) มากกว่า [5]

### 3. การดำเนินงาน

ถึงแม้จากการศึกษาจะพบว่าการเสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กภายในเสาเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพด้านกำลังมากกว่าการเสริมแผ่นเหล็กรอบเสา [6] แต่วิธีการก่อสร้างเสากลางที่มีแผ่นเหล็กเสริมกำลังเชื่อมอยู่ภายในเสาเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องทำการตัดหัวเสาบริเวณที่ต้องการเสริมกำลังออกเพื่อที่จะเชื่อมแผ่นเหล็กเสริมกำลังไว้ด้านใน นอกจากนี้การเสริมแผ่นเหล็กภายในเสายังทำให้เหล็กสูญเสียคุณสมบัติความเหนียว (ductility) มากกว่าการเสริมแผ่นเหล็กรอบเสา จึงส่งผลให้โครงสร้างไม่สามารถคงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้เท่ากับอีกวิธีหนึ่งด้วยเหตุนี้ในปริญญาวิทยานิพนธ์นี้จึงจะศึกษาเฉพาะการเสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กรอบเสาเท่านั้น

### 3.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS

แบบจำลองของโครงสร้างเสา-คานที่ติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม ANSYS และได้มีการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยสามารถสร้างออกมาได้ดังรูปที่ 3.1

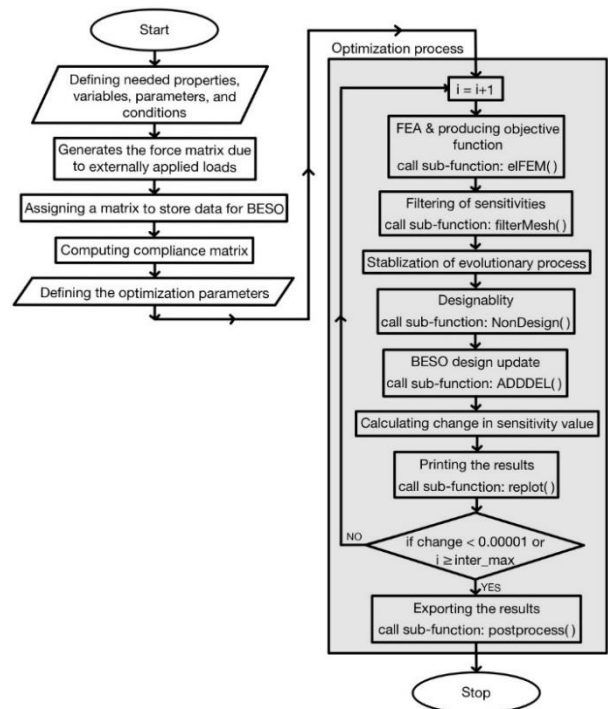


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแบบจำลอง

จากนั้นจึงหาพิกัดของทุกจุดและพิกัดของจุดที่มุมของเอลิเมนต์ในแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยจะเก็บข้อมูลไว้ในไฟล์ p.dat และไฟล์ t.dat ตามลำดับเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเสริมประสิทธิภาพต่อไป

### 3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยโปรแกรม MATLAB

ในขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพโทโลยีของแผ่นเหล็กเสริมกำลังทางคณะผู้จัดทำร่วมกับที่ปรึกษาปริญญาวิทยานิพนธ์ได้ทำการพัฒนาโปรแกรม MATLAB โดยใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ของ MATLAB (MATLAB coding language) ในการดำเนินการตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับ BESO โดยเป็นการดำเนินการต่อเนื่องมาจากขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างในโปรแกรม ANSYS สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานที่สำคัญของโปรแกรมใน MATLAB ได้ดังนี้

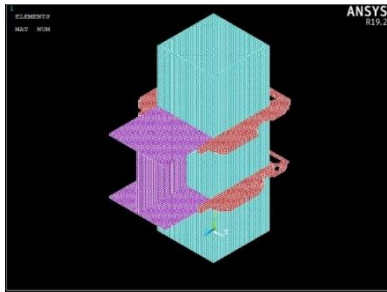


รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยโปรแกรม MATLAB

### 3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างหลังจากการเพิ่มประสิทธิภาพ

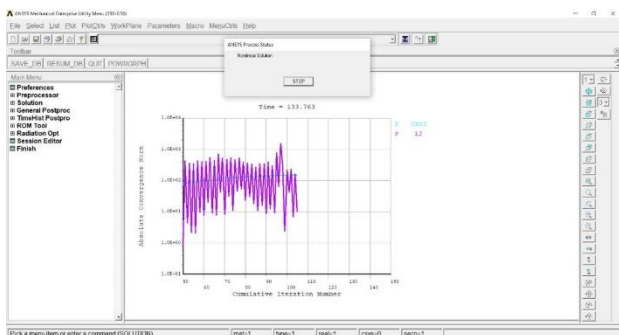
#### โทโพโลยีแผ่นเหล็กเสริมกำลัง

การส่งออกผลลัพธ์จากโปรแกรม MATLAB จะส่งออกในรูปแบบของไฟล์ elementupdate.dat และ nodeupdate.dat ซึ่งเป็นข้อมูลจุดพิกัดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนและข้อมูลการเชื่อมต่อเข้าที่จุดของเอลิเมนต์ของโครงสร้างหลังการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยีแล้ว การอัปเดตแบบจำลองสามารถทำได้โดยการอ่านไฟล์ elementupdate.dat และไฟล์ nodeupdate.dat ในโปรแกรม ANSYS



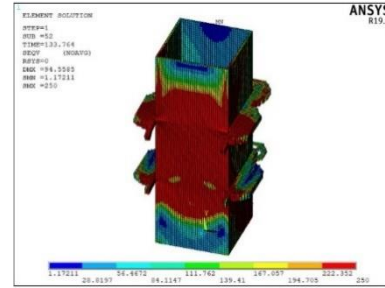
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบบจำลองหลังผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยี

ในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างโดยการทำการฟังก์ชันการวิเคราะห์ของโปรแกรม ANSYS โดยตั้งลักษณะการวิเคราะห์แบบ Large Displacement Static คือ จะมีการคิดผลของ second order และมีการคำนวณคิดสมมูลใหม่จากการที่เอลิเมนต์เสียรูปร่าง นอกจากนี้ยังตั้งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นเป็นแบบวิธี Arc-length โดยการวิเคราะห์จะทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทีละน้อยจนถึงค่าหนึ่งทีวีสตราบไม่ไหวจากนั้นน้ำหนักบรรทุกจึงลดลง การวิเคราะห์ลักษณะนี้โปรแกรมจะวิเคราะห์ไปเรื่อย ๆ ไม่มีที่สิ้นสุด จึงต้องกำหนดให้โปรแกรมวิเคราะห์ไปถึงสัร้อยรอบการทำงานเข้าเป็นอย่างต่ำแล้วจึงหยุดการวิเคราะห์ เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่รับได้ และมีข้อมูลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ระหว่างการวิเคราะห์โปรแกรม ANSYS จะแสดงผลออกมาเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.4

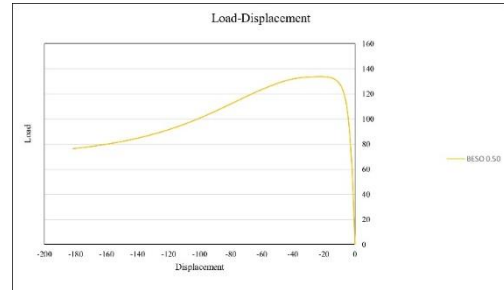


รูปที่ 3.4 การแสดงผลของโปรแกรม ANSYS ระหว่างการวิเคราะห์โครงสร้าง

จากนั้นจึงเลือกอ่านผลจากน้ำหนักบรรทุกที่สูงที่สุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ ทำการพล็อตผลลัพธ์ของ von Mises stress ขณะที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด และเก็บผลลัพธ์น้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกน y และเก็บข้อมูลน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูป



รูปที่ 3.5 ตัวอย่าง von Mises stress ของเสาและแผ่นเหล็กเสริมกำลังขณะรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างกราฟน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูป

## 4. ผลการดำเนินงาน

### 4.1 การรับแรงที่ปลายคานกรณีมีแผ่นเหล็กเสริมกำลังปริมาตรต่าง ๆ

สำหรับเสาสี่เหลี่ยมกลวงหนา 10 มม. ขนาด 200x200 250x250 300x300 และ 350x350 มม. เมื่อทำการลดปริมาตรวัสดุของแผ่นเหล็กเสริมกำลังลงไปสู่ปริมาตร 50% 45% 30% 25% 20% 15% 10% และ 5% จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับเสาสี่เหลี่ยมกลวงขนาดต่าง ๆ ที่ปริมาตรของแผ่นเหล็กเสริมกำลังหลังจากเพิ่มประสิทธิภาพได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคานของเสากลวง 200x200 มม.

ปริมาตรที่เหลืออยู่ (%)	กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคาน (ตัน)	กำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น (%)
100	76.933	130.55
50	75.649	126.70
45	75.057	124.92
40	73.739	120.97
35	72.603	117.57
30	70.973	112.69
25	68.125	104.15
20	64.018	91.84
15	59.277	77.64
10	51.779	55.17
5	47.452	42.20
ไม่มีแผ่นเหล็กเสริมกำลัง	33.37	-

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคานของเสากลาง 250x250 มม.

ปริมาตรที่เหลืออยู่ (%)	กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคาน (ตัน)	กำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น (%)
100	105.43	130.91
50	89.864	96.82
45	89.195	95.35
40	87.074	90.71
35	86.628	89.73
30	82.779	81.30
25	81.314	78.09
20	78.938	72.89
15	76.149	66.78
10	73.585	61.16
5	65.684	43.86
ไม่มีแผ่นเหล็กเสริมกำลัง	45.659	-

ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคานของเสากลาง 300x300 มม.

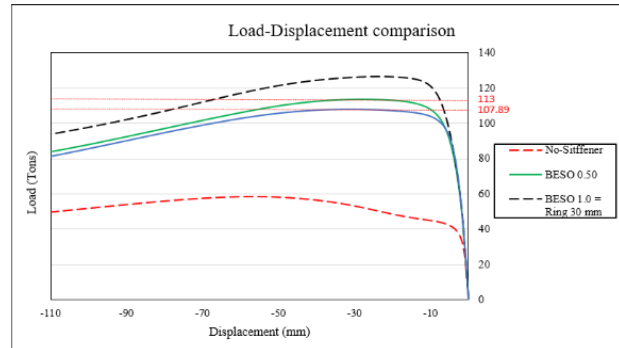
ปริมาตรที่เหลืออยู่ (%)	กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคาน (ตัน)	กำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น (%)
100	126.69	116.61
50	113.6	94.23
45	110.76	89.38
40	107.29	83.44
35	105.42	80.25
30	105.22	79.90
25	99.872	70.76
20	98.126	67.77
15	95.858	63.90
10	91.305	56.11
5	82.45	40.97
ไม่มีแผ่นเหล็กเสริมกำลัง	58.487	-

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคานของเสากลาง 350x350 มม.

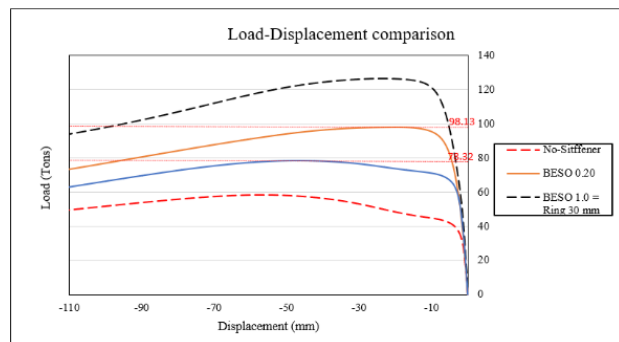
ปริมาตรที่เหลืออยู่ (%)	กำลังรับแรงสูงสุดที่ปลายคาน (ตัน)	กำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น (%)
100	146.3	103.01
50	133.76	85.61
45	133.28	84.94
40	200	177.53
35	127.02	76.26
30	124.25	72.41
25	122.15	69.50
20	118.41	64.31
15	114.17	58.43
10	110.85	53.82
5	98.983	37.35
ไม่มีแผ่นเหล็กเสริมกำลัง	72.065	-

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดแนวโน้มการลดลงของแรงสูงสุดที่รับได้หลังจากเพิ่มประสิทธิภาพจะเห็นว่าถึงแม้จะลดปริมาณวัสดุของแผ่นเหล็กเสริมกำลังลง แต่แรงสูงสุดของเสาที่รับได้เมื่อมีน้ำหนักรวมกระทำเป็นบริเวณที่ปลายคานกลับไม่ได้ลดลงไปด้วยสัดส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง

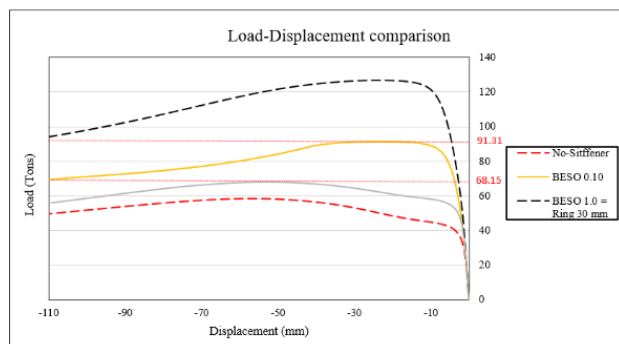
4.2 เปรียบเทียบการเสริมประสิทธิภาพด้วยระเบียบวิธี BESO กับการลดความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยตรง



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบระหว่าง BESO 0.50 และแผ่นเหล็กเสริมกำลังหนา 15 มม. (เหลือ 50% จากความหนา 30 มม.)



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบระหว่าง BESO 0.20 และแผ่นเหล็กเสริมกำลังหนา 6 มม. (เหลือ 20% จากความหนา 30 มม.)



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบระหว่าง BESO 0.10 และแผ่นเหล็กเสริมกำลังหนา 3 มม. (เหลือ 10% จากความหนา 30 มม.)

จากรูปที่แสดงสามารถเห็นได้ว่าแม้ว่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรที่เหลืออยู่ของแผ่นเหล็กเสริมกำลังจะเท่ากันคือ 50% 20% และ 10% แต่แรงสูงสุดที่ปลายคานที่เสากลางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเสริมกำลัง

หลังจากเพิ่มประสิทธิภาพด้วยระเบียบวิธี BESO สามารถรับได้กลับสูงกว่าการลดความหนาโดยตรงจนเหลือปริมาตรเท่ากันถึง 5.29% 25.29% และ 33.98% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธี BESO มีศักยภาพสูงกว่าการลดความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังโดยตรง

#### 4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับมาตรฐาน

**ตารางที่ 4.5** ผลการคำนวณหากำลังรับแรงที่ปลายคานสูงสุดที่เสาสีเหลี่ยมกลวงสามารถรับได้

หน้าตัดเสาเหล็ก	$P_r$ AISC360-16 (ตัน)	$P_r$ FEM (ตัน)	ความแตกต่างระหว่าง AISC และ FEM (%)
SHS200x200x10	36.17	33.37	7.75
SHS250x250x10	52.18	45.66	12.50
SHS300x300x10	69.35	58.49	15.66
SHS350x350x10	84.82	72.07	15.04

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ปลายคานที่เสาสีเหลี่ยมกลวงสามารถรับได้ตามมาตรฐาน AISC360-16 มีค่ามากกว่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS อย่างมีนัยสำคัญ

### 5. สรุปและอภิปรายผล

- เมื่อทำการลดปริมาตรวัสดุของแผ่นเหล็กเสริมกำลังลงไปสู่ปริมาตรต่าง ๆ ที่ตั้งเอาไว้สำหรับเสาทุกขนาดมีแนวโน้มการรับแรงที่ปลายคานใกล้เคียงกันคือเมื่อแผ่นเหล็กเสริมกำลังมีปริมาตรลดลงประสิทธิภาพในการรับแรงของเสากลางเมื่อมีน้ำหนักมากกระทำที่ปลายคานก็ลดลงด้วยเช่นกัน แต่ไม่ได้ลดลงด้วยอัตราส่วนแบบหนึ่งต่อหนึ่งหากแต่การลดลงของความสามารถในการรับแรงมักจะต่ำกว่าปริมาณวัสดุที่ลดลงเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ยกเว้นในบางปริมาตรเป้าหมายที่มีความจำเป็นต้องกำจัดเอลิเมนต์ที่มีความสำคัญในการเสริมแรงให้กับเสาออก
- การติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังในรูปแบบที่ดำเนินการวิจัยนี้ส่งผลกระทบกับคุณสมบัติด้านความเหนียวของเสาสีเหลี่ยมกลวงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นต่างจากการเสริมกำลังด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น การติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเสากลาง ที่จะทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวของโครงสร้างเหล็กลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [6]
- ประสิทธิภาพในการรับแรงที่ปลายคานที่เสาสีเหลี่ยมกลวงเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพด้วยระเบียบวิธี BESO สามารถรับได้สูงกว่าการลดความหนาโดยตรงจนเหลือปริมาตรเท่ากันอันเนื่องมาจากการเลือกกำจัดเอลิเมนต์ที่ไม่มีประสิทธิภาพในการช่วยเสริมแรงออกไปจากโดเมนอย่างมีหลักการที่น่าเชื่อถือของระเบียบวิธี BESO
- กำลังรับแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณปลายคานซึ่งยื่นออกมาจากเสาสีเหลี่ยมกลวงที่คำนวณได้จากมาตรฐาน AISC360-16 มีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใน

โปรแกรม ANSYS อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นในหน้าตัดเสา ทำให้ค่าที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างมากกว่าในมาตรฐานที่กำหนดให้ความเค้นในหน้าตัดเสากระจายตัวเท่ากันทั้งหน้าตัดและไม่คำนึงถึงการกระจุกตัวของความเค้นเฉพาะที่ โดยในบางกรณีตัวคูณลดในมาตรฐานอาจไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมส่วนต่างดังกล่าวจนอาจทำให้นำไปสู่ความไม่ปลอดภัยในการออกแบบโครงสร้างลักษณะนี้ได้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้เป็นอย่างมาก ขอขอบพระคุณ คุณรัฐ ชู ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างมากสำหรับทุกความช่วยเหลือที่ท่านได้มอบให้ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวและเพื่อนร่วมชั้นปีทุกท่านที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lu, L. H. (1997). The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections. Delf: Delf University Press.
- [2] Voth, A. P. (2010). Branch plate-to-circular hollow structural section connections. University of Toronto.
- [3] เหมวิช ชินวงศ์. 2562. การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าพหุโหลที่เหมาะสมที่สุดกับการออกแบบบานประตูระบายน้ำ. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] Chu, D. N. (1997). Evolutionary structural optimization method for systems with stiffness and displacement constraints. Victoria University of Technology.
- [5] Yazdanpanah, M. (2014). Implementation of bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) in the underground excavations and slope stability. RMIT University.
- [6] รัฐ ชู. 2561. การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไร้เชิงเส้นของท่อเหล็กที่มีแผ่นเสริมกำลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.