# การออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพของเสาไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีแบบกลุ่มอนุภาคโดยมีการเรียนรู้อย่างครอบคลุม
# Comprehensive Learning Particle Swarm optimization of High-Voltage Transmission Tower

**ธราเทพ อังคฉัตรชัย[1] ธัญชนก ศิริครรชิตถาวร[2] และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์[3]**

*[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ*

## บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะแสดงการออกแบบโครงสร้างโครงเหล็กถักสำหรับเสาไฟฟ้าแรงสูงขนาด 230 kV โดยการออกแบบจะใช้วิธีการออกแบบโดยวิธี Load Resistance Factor Design (LRFD) ตามมาตรฐานการออกแบบ American Institute of Steel Construction 2016 (AISC 2016) โดยคำนึงถึงพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นของโครงสร้าง Nonlinear structural behavior ส่วนการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการออกแบบขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างใช้อัลกอริทึม Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากอัลกอลิทึม Particle Swarm Optimization (PSO) ในการออกแบบนี้ผู้ศึกษาจะใช้ซอฟท์แวร์ 2 ตัวทำงานร่วมกันซึ่งได้แก่ Microsoft Visual Basic Application เพื่อใช้ในการเขียนโค้ดคอมพิวเตอร์เกี่ยวกับอัลกอริทึม CLPSO เพื่อสื่อสาร ควบคุม และทำงานร่วมกับอีกซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่าง SAP2000 การทำงานร่วมกันนี้เรียกว่า Open Application Programming Interface (OAPI) โดยจุดประสงค์ของการนำอัลกอริทึมนี้มาใช้ในการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูงคือต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยการหาหน้าตัดเหล็กที่มีให้เลือกอย่างจำกัดในท้องตลาดมาใช้งานให้มีขนาดเล็กและเหมาะสมที่สุด โดยที่ยังสามารถใช้งานได้ ผ่านเงื่อนไขตามประมวล AISC-LRFD 2016

คำสำคัญ: การออกแบบโครงเหล็กถัก, การหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงโครงสร้าง, CLPSO, Microsoft Visual Basic Application, OAPI

## Abstract

This research presents the optimum design of truss structure in 230 kV high voltage transmission tower complying with Load Resistance Factor Design (LRFD) under the American Institute of Steel Construction 2016 (AISC 2016) specifications in which the analysis and design realistically incorporate the influences of nonlinear structural behavior. The Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) algorithm is developed in this research based on a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. This work employs the computer programming platforms combining collaboration between Microsoft Visual Basic Application and SAP200. Microsoft Visual Basic Application is used in computer coding on the CLPSO algorithm in order to communicate, control, and work with the structural analysis and design software SAP2000. This direct communication is ended by an Open Application Programming Interface (OAPI). The proposed CLPSO algorithm provides a design of high voltage transmission tower coming with the optimum cross-sectional area selected from the limited collection of standard steel cross-sections as well as strictly complying with the AISC-LRFD 2016 specifications.

Keywords: Optimum design, CLPSO, Microsoft Visual Basic Application, OAPI

## 1. บทนำ

ในงานก่อสร้างโดยปกติแล้วจะมีค่าใช้จ่ายหลายรายการในการทำงานก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นค่าวัสดุอุปกรณ์ ค่าแรงงาน ค่าเครื่องจักร ค่าการดำเนินการ เป็นต้น โดยค่าใช้จ่ายสำหรับโครงการก่อสร้างที่มีโครงสร้างเป็นเหล็กนั้น จะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของ Raw Material และ Fabrication มากที่สุด โดยมีสัดส่วนอยู่ที่ส่วนละประมาณ 30 – 40 % ดังนั้น หากทางเจ้าของโครงการมีความต้องการที่จะลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของโครงการลง การลดค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุลงจึงเป็นเรื่องที่ควรให้ความสำคัญ โดยหนึ่งในวิธีการลดค่าใช้จ่ายในส่วนวัสดุลงที่ใช้กันโดยทั่วไปคือการลดขนาด

หน้าตัดของเหล็กที่ใช้ลง เพื่อให้น้ำหนักโดยรวมของเหล็กลดลง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อเหล็กลดลงด้วย

ในปัจจุบันความสวยงามของอาคารสิ่งปลูกสร้างต่างๆเริ่มมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น หนึ่งในวิธีที่จะทำให้อาคารดูสวยงามก็คือการทำให้อาคารมีรูปทรงที่แปลกใหม่ ส่งผลให้อาคารสิ่งปลูกสร้างต่างๆเริ่มมีความซับซ้อนของตัวโครงสร้างมากยิ่งขึ้น แต่ถึงแม้การออกแบบให้โครงสร้างที่ซับซ้อนสามารถใช้งานได้นั้นจะสามารถทำได้ง่ายยิ่งขึ้น เนื่องจากสมัยนี้มีซอฟท์แวร์จำนวนมากที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ออกแบบ ทั้งนี้การออกแบบให้โครงสร้างที่ซับซ้อนสามารถใช้งานได้ และมีต้นทุนที่ต่ำ (Optimum Design) นั้นอาจจะเป็นเรื่องที่ไม่ยากมากนักสำหรับวิศวกรที่มีประสบการณ์ในการออกแบบสูง แต่ไม่ใช่กับวิศวกรรุ่นใหม่ นี่เป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับวิศวกรรุ่นใหม่เป็นอย่างมาก เนื่องจากการออกแบบให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ และมีต้นทุนที่ต่ำนั้นจะต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบ มาประกอบเข้ากับวิธีการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้คำตอบที่เหมาะสม ซึ่งการใช้วิธีลองผิดลองถูกนี้จะมีปัญหาที่ทำให้วิธีนี้ทำได้ยาก ได้แก่ การที่ขนาดหน้าตัดของเหล็กในตลาดที่สามารถเลือกใช้ได้นั้นมีอยู่จำกัด กล่าวอีกอย่างคือมีความไม่ต่อเนื่องของค่าหน้าตัดเหล็กอยู่ หรือที่เรียกว่า Non-smooth optimization problem ทำให้การลองผิดลองถูกเลือกหน้าตัดมาคำนวณเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดนั้นทำได้ยาก และการที่ปัญหาในการศึกษานี้เป็นปัญหาแบบ Non-linear เพราะการได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดนั้นจำเป็นจะต้องใช้หลักการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ดังนั้น การคำนวณวิเคราะห์ปัญหาที่เป็น Non-linear หลายครั้งด้วยวิธีการลองผิดลองถูกนั้นค่อนข้างจะทำได้ไม่สะดวกนัก

## 2. ปัญหาที่สนใจ

ปัญหาที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้คือการออกแบบโครงสร้างเสาไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริทึม Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) หรือย่อว่า ซีแอลพีเอสโอ โดยคำตอบที่ดีที่สุดนั้นก็คือการออกแบบที่ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักโดยรวมน้อยที่สุด โดยที่การออกแบบนั้นยังคงผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

### *2.1 เสาไฟฟ้าแรงสูง*

เสาไฟฟ้าแรงสูง หรือ Transmission Tower นั้นเป็นโครงสร้างที่ทำมาเพื่อใช้ในงานเกี่ยวกับไฟฟ้าแรงสูง มีหน้าที่ในการรองรับติดตั้งสายไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่เหนือจากพื้นดิน เนื่องจากสายไฟฟ้าแรงสูงนั้นเป็นสายเปลือยจึงมีความจำเป็นต้องยกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะ มีความสูงอยู่ที่ 15 - 55 เมตร ส่วนใหญ่มักจะใช้เหล็กในการก่อสร้างและมีรูปแบบโครงสร้างเป็น โครงถัก ( Truss ) แต่ในบางครั้งอาจใช้วัสดุเป็นคอนกรีตหรือไม้ก็ได้

โดยในการศึกษานี้จะเป็นการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 239 kV ที่มีความสูงจากระดับพื้นดินถึงยอด 45 เมตร มีส่วนขยายบริเวณขาที่ 7 เมตรจากพื้นดินและมีแขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน CICA อยู่ด้านซ้ายและขวา ดังรูปที่ 2.1

### *2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้*

เหล็กที่ใช้ในการก่อสร้างเสาไฟฟ้าแรงสูงนี้จะใช้เป็นเหล็กฉากชนิดขา 2 ข้างเท่ากัน โดยจะแบ่งเหล็กฉากเป็น 2 แบบคือ Mild Steel (JIS SS400) และ High Strength Steel (JIS SS540)

**รูปที่ 2.1** โมเดลเสาส่งไฟฟ้า 230 kV

### *2.3 Loading Conditions*

#### *2.3.1 แรงลม (Wind Load)*

การคำนวณความเร็วลม แบ่งออกได้เป็น 3 กรณีได้แก่

1) ในเหตุการณ์ปกติ ความแรงของลมที่มาปะทะเข้ากับส่วนต่างๆของสายส่งไฟฟ้า จะใช้ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 50 ปี
2) ขณะเกิดอุบัติเหตุ ความแรงของลมที่มาปะทะในกรณีเกิดอุบัติเหตุ เช่น สายดินขึงอากาศขาด, พวงลูกถ้วยไฟฟ้าขาดหรือสายเฟสขาด จะใช้ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 10 ปี
3) ขณะที่ก่อสร้างซ่อมบำรุง ความแรงของลมที่มาปะทะ จะใช้ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 1 ปี

#### *2.3.2 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)*

ในส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่จะหมายถึงน้ำหนักของตัวโครงเหล็กถักทั้งหมด รวมไปถึงส่วนแขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน CICA ด้วย ซึ่งน้ำหนักบรรทุกคงที่นี้จะถูกคำนวณด้วยซอฟท์แวร์ SAP2000 อัตโนมัติ

#### *2.3.3 น้ำหนักบรรทุกสัญจร (Live Load)*

สามารถแบ่งน้ำหนักบรรทุกสัญจรออกเป็น 5 กรณีหลักขึ้นอยู่กับสถาณการณ์ที่เกิดขึ้น โดยแบ่งได้ดังนี้

1) เหตุการณ์ปกติ, ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 50 ปี ปะทะแนวขวาง
2) เหตุการณ์ปกติ, ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 50 ปี ปะทะแนวสายไฟ
3) เหตุการณ์ปกติ, ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 50 ปี ปะทะแนวเฉียงทำมุม 15°กับแนวขวาง
4) ขณะเกิดอุบัติเหตุ ใช้ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 10 ปีปะทะ ขณะที่ตัวนำทุกเส้นอยู่ในสภาวะใช้งาน

ด้วย Overload factor = 1.10 โดยอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็นอีก 3 กรณี ได้แก่ สายดินขึงอากาศขาด สายเฟสขาด และพวงลูกถ้วยพัง

5) ขณะซ่อมบำรุง ใช้ความเร็วลมสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในรอบ 1 ปีปะทะ ขณะที่ตัวนำทุกเส้นอยู่ในสภาวะใช้งานด้วย Overload factor = 1.30 โดยการซ่อมบำรุง สามารถแบ่งได้อีก 2 กรณี ได้แก่ ซ่อมบำรุงสายดินขึงอากาศ และ ซ่อมบำรุงสายเฟส

*2.4 Combination Loads*

ในการออกแบบเสาส่งไฟฟ้านี้ จะใช้หลักการออกแบบตาม AISC 2016 [ 17 ] ด้วยวิธีแบบ Load and Resistance Factor Design (LRFD) ซึ่งหมายถึงการออกแบบโดยให้ Design strength มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ Required strength ที่หามาได้ ภายใต้ LRFD load combinations สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R_u \leq \phi R_n \quad (1)$$

โดยที่ $R_u$ คือ required strength using LRFD load combinations, $R_n$ คือ nominal strength, $\phi$ คือ resistance factor และ $\phi R_n$ คือ design strength

จากมาตรฐานการออกแบบ AISC 2016 [ 17 ] Chapter B หัวข้อ B2 ระบุไว้ว่า Load combinations สำหรับวิธีการออกแบบ LRFD นั้นจะใช้ตาม ASCE/SEI 7-16 [ 18 ] Chapter 2 หัวข้อที่ 2.3 COMBINING FACTORED LOADS USING STRENGTH DESIGN ซึ่งในการออกแบบนี้จะใช้ Basic Combinations ที่มีรายละเอียดดังนี้

1) 1.4D
2) 1.2D + 1.6L + 0.5($L_r$ or S or R)
3) 1.2D + 1.6($L_r$ or S or R) + (L or 0.5W)
4) 1.2D + 1.0W + L +0.5($L_r$ or S or R)
5) 0.9D + 1.0W

โดยที่ D คือ dead load, L คือ live load, $L_r$ คือ roof live load, S คือ snow load, R คือ rain load, W คือ wind load

*2.5 Constrains*

เนื่องจากโครงสร้างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นโครงสร้างเหล็กถักดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นภายในเมมเบอร์จะมีเพียงแรงดึง (Tension Force) และแรงอัด (Compression Force) เท่านั้น ดังนั้นการออกแบบเมมเบอร์นี้จะใช้หลักการออกแบบสำหรับองค์อาคารรับแรงดึงและองค์อาคารรับแรงอัดเท่านั้น โดยอ้างอิงจาก [ 17 ]

*2.5.1 การออกแบบสำหรับเหล็กรับแรงดึง*

ค่ากำลังออกแบบรับแรงดึงของเหล็ก หรือ $\phi_t P_n$ สามารถหาได้จากมาตรฐานการออกแบบ [ 17 ] Chapter D หัวข้อ D2 ซึ่งได้แบ่งกรณีการวิบัติของ Tensile member ไว้ 2 กรณีได้แก่

1) เกิดการ yield ของเหล็กเนื่องจากแรงดึงใน Gross Area

$$P_n = F_y A_g \quad (2)$$

$\phi_t$ = 0.90

โดยที่ $F_y$ คือ specified minimum yield stress, $A_g$ คือ gross area of member

2) เกิดการฉีก (Rupture) ของเหล็กเนื่องจากแรงดึงใน Effective

$$P_n = F_u A_e \quad (3)$$

$\phi_t$ = 0.75

โดยที่ $F_u$ คือ specified minimum tensile strength, $A_e$ คือ effective net area

ซึ่งค่า $A_e$ สามารถหาค่าได้จากสูตร

$$A_e = A_n U \quad (4)$$

โดยที่ $A_n$ คือ net area (ดูรายละเอียดใน [ 17 ] Section B4.3)
$U$ คือ shear lag factor (ดูรายละเอียดใน [ 17 ] Table D3.1)

*2.5.2 การออกแบบสำหรับเหล็กรับแรงอัด*

ค่ากำลังออกแบบรับแรงอัดของเหล็ก หรือ $\phi_c P_n$ ($\phi_c$ = 0.90 for LRFD) สามารถหาได้จาก Code [AISC, 2016] Chapter E ซึ่งลักษณะการวิบัตินั้นมีได้หลายกรณี ขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัดและความ slender ของเมมเบอร์นั้น สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน Table User Note E1.1 เพื่อนำไปใช้ในการเลือกวิธีการคำนวณค่า $P_n$ ต่อไป

*2.5.3 เงื่อนไขด้านกำลัง*

หลังจากผู้ศึกษาได้ค่ากำลังที่ออกแบบ $\phi P_n$ จากข้อ 2.5.1 หรือ 2.5.2 แล้ว ผู้ศึกษาจะนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ต้องการที่ใช้ LRFD load combination หรือ $P_u$โดยที่

$$P_u \leq \phi P_n \quad (5)$$

หรือ

$$\frac{P_u}{\phi P_n} \leq 1 \quad (6)$$

*2.5.4 เงื่อนไขด้านการใช้งาน*

ในการออกแบบครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้นำผลจาก Second order มาคิดด้วย โดยวิธีคิดจะใช้วิธีที่เรียกว่า Direct design method ซึ่งผู้ศึกษาจะนำแรงแนวดิ่งที่กระทำกับโครงสร้างมา 0.2% เปลี่ยนเป็นแรงในแนวข้างเพื่อให้เกิดการ sway ของโครงสร้างขึ้นมาและทำให้เกิด Large Displacement ($\Delta$) ขึ้น ซึ่งแรงนี้ได้ใส่ลงไปใน 2.3 Loading Conditions แล้ว และในการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูงนี้ทางวิศวกรของเจ้าของโครงการระบุว่าไม่จำเป็นต้องตรวจสอบ Serviceability จากค่า $\Delta$ ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเงื่อนไขด้านกำลังเป็นเงื่อนไขที่ครอบคลุมเงื่อนไขด้าน Serviceability อยู่แล้ว

## 3. ภาพรวมของวิธีพีเอสโอ และวิธีซีแอลพีเอสโอ

ทุกวันนี้ การแก้ปัญหาต่างๆมีความท้าทายมากยิ่งขึ้นตามความซับซ้อนของปัญหา คอมพิวเตอร์มักถูกใช้ในกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้าง ดังนั้นการพัฒนาอัลกอริทึมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

วิธีการการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่ม (Particle Swarm Optimization) หรือที่ย่อว่า พีเอสโอ (PSO) เป็นวิธีการหาคำตอบแบบสุ่ม (Random Search Algorithm) ประเภทหนึ่ง [ 7 ] ถูกพัฒนาขึ้นโดย Kennedy และ Eberhart [ 8 ] ซึ่งอ้างอิงจากพฤติกรรมทางสังคมของกลุ่มสัตว์ต่างๆ เช่น ฝูงนก, ฝูงปลาและอาณานิคมมด

วิธีการการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่ม เริ่มต้นด้วยการสุ่มเวคเตอร์ความเร็ว (Velocity) และ ตำแหน่ง (Location) ของพาร์ทิเคิล (Particle) พาร์ทิเคิลจะมีประสบการณ์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว เรียกว่า *pbest* และทั้งกลุ่มจะมีตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม เรียกว่า *gbest* โดย *pbest* นั้นได้จากการเปรียบเทียบคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ หากตำแหน่ง ณ ขณะนั้นให้คำตอบที่ที่ดีกว่าคำตอบที่ได้จากการวนซ้ำก่อนหน้า (น้อยที่สุดหรือมากที่สุด ขึ้นอยู่กับปัญหาในการหาค่าที่ดีที่สุด) จะอัพเดท *pbest* ด้วยตำแหน่งนั้นๆ สำหรับค่า *gbest* จะอัพเดทด้วย*pbest* ของพาร์ทิเคิลที่ให้คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดีที่สุด โดยในแต่ละการวนซ้ำ พาร์ทิเคิลจะมีการอัพเดทเวคเตอร์ความเร็วและตำแหน่งด้วยสมการ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$v^i_{k+1} = round[\, w v^i_k + c_1 r_1 \frac{p^i_k - x^i_k}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{p^g_k - x^i_k}{\Delta t}\,] \qquad (7)$$

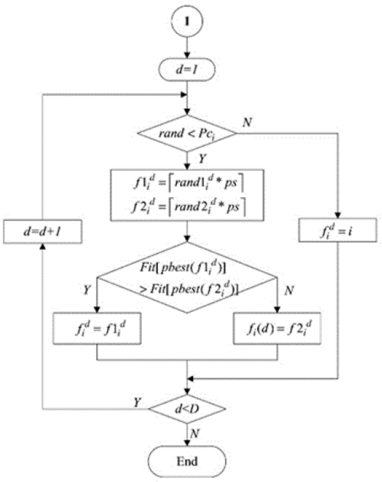
$$x^i_{k+1} = x^i_k + v^i_{k+1}\,\Delta t \qquad (8)$$

โดย $v^i_{k+1}$ คือ ความเร็วของพาร์ทิเคิล $i$ ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k+1 , $v^i_k$ คือความเร็วของพาร์ทิเคิล $i$ ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k , $p^i_k$ คือตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของพาร์ทิเคิล i ของการวนซ้ำครั้งที่ k, $p^g_k$ คือตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม ของการวนซ้ำครั้งที่ k, $x^i_k$ คือตำแหน่งของพาร์ทิเคิล i ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k, $x^i_{k+1}$ คือตำแหน่งของพาร์ทิเคิล i ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k+1, $\Delta t$ คือ Time step value [ 9 ] โดยในการศึกษาครั้งนี้ให้มีค่าเป็น 1 และ $r_1$ , $r_2$ คือค่าคงที่การสุ่ม (Random numbers) มีค่าระหว่าง [0,1]

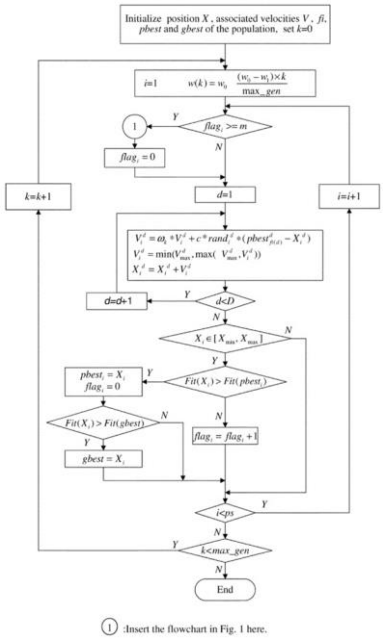
ถึงแม้ว่าวิธีการการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่มหรือพีเอสโอ จะเป็นวิธีที่ประมวลผลคำตอบได้เร็ว ใช้ได้ง่าย และได้คำตอบที่ดี แต่วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่มก็ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการลู่เข้าสู่คำตอบที่รวดเร็วเกินไป (Premature convergence) สำหรับการแก้ปัญหาหลายรูปแบบ (Multimodal Problems) [ 13 ] รวมถึงถูกดึงดูดเข้าสู่ค่าค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local optimum) ได้ง่ายเนื่องจากทุกพาร์ทิเคิลจะเรียนรู้จากประสบการณ์ *gbest* เท่านั้น ที่แม้ว่าค่า *gbest* ล่าสุดจะมีค่าที่ไม่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดโดยรวม (Global optimum) แต่พาร์ทิเคิลก็จะถูกดึงดูดให้ทำการค้นหาบริเวณนั้นๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบที่เร็ว แต่คำตอบที่ได้ก็ไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดโดยรวมแต่เป็นค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่

วิธีซีแอลพีเอสโอ จึงมีการพัฒนากระบวนการเรียนรู้ (Learning strategy) ขึ้นเพื่อกำจัดข้อด้อยของพีเอสโอ ในเรื่องการลู่เข้าสู่คำตอบที่รวดเร็วเกินไป โดยพาร์ทิเคิลจะสามารถเรียนรู้ผ่านประสบการณ์ *pbest* ของพาร์ทิเคิลอื่นๆได้ รวมถึงสามารถกระโดดไปยังบริเวณอื่นๆ เพื่อมิให้เกิดการดึงดูดเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ โดยมีกระบวนการตาม Flow chart ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

ด้วยข้อมูลจากการทดลอง [ 15 ] ที่มีจุดประสงค์ในการลดการสูญเสียพลังงาน พบว่าการสูญเสียพลังงานเมื่อทดลองด้วยพีเอสโอลดลง 19.61 % ส่วนวิธีซีแอลพีเอสโอลดลง 21.6% และยังพบว่าหากเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุดจากวิธีพีเอสโอแล้ว ยังมีค่าที่มากกว่าค่าที่แย่ที่สุดจากซีแอลพีเอสโอ จะเห็นได้ว่าซีแอลพีเอสโอให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า รวมถึงลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วกว่าพีเอสโอ นอกจากนี้ผู้ศึกษาได้ทำการทดสอบความแม่นยำและความเร็วในการลู่เข้าสู่คำตอบของอัลกอริทึมด้วยปัญหามาตรฐาน (Benchmark test function) ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ Rosenbrock function ในการทำการทดสอบ และพบว่าคำตอบที่ได้จากกระบวนการซีแอลพีเอสโอนั้นมีค่าใกล้เคียง 0 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดโดยรวมต่ำสุดสำหรับฟังก์ชันนี้ มากกว่าวิธีพีเอสโอ ซึ่งหมายถึงวิธีการ ซีแอลพีเอสโอ จะมีความแม่นยำในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้มากกว่าวิธีพีเอสโอ และการลู่เข้าของคำตอบโดยวิธีซีแอลพีเอสโอนั้นมีการลู่เข้าที่เร็วกว่า ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกใช้วิธีซีแอลพีเอสโอในการหาคำตอบเชิงโครงสร้างที่ดีที่สุดสำหรับเสาไฟฟ้าแรงสูง




**รูปที่ 3.1** Flow chart การเลือกเอ็กเซมพลาร์ของพาร์ทิเคิล $i$ [ 13 ]



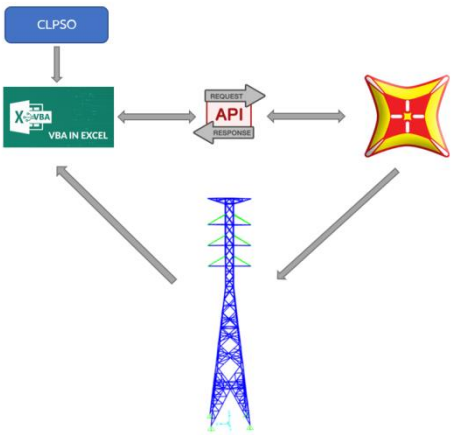

**รูปที่ 3.2** Flow chart การทำงานของอัลกอริทึมซีแอลพีเอสโอ [ 13 ]

## 4. การประยุกต์ใช้ซีแอลพีเอสโอในการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูง

*4.1 การหาคำตอบที่ดีที่สุดในการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูง*

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการออกแบบสำหรับโครงการเสาส่งไฟฟ้านี้ กระบวนการที่ใช้จะเป็นการทำซ้ำโดยอัตโนมัติ โดยผู้ศึกษาได้นำหลักการของ วิธีซีแอลพีเอสโอ และข้อจำกัดที่ผู้ศึกษาสนใจ (constraint) มาทำการเขียนโค้ด (code) ลงไปใน Microsoft Visual Basic Application ส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างและคำตอบที่ได้นั้นจะใช้ commercial analysis software ในส่วนนี้ โดยในการศึกษานี้ผู้ศึกษาใช้ SAP2000 มาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้าง

การที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2 ตัวนี้สามารถทำงานและส่งผ่านข้อมูลระหว่างกันได้นั้นโดยปกติแล้วเรียกว่า Open Application Programming Interface (OAPI)

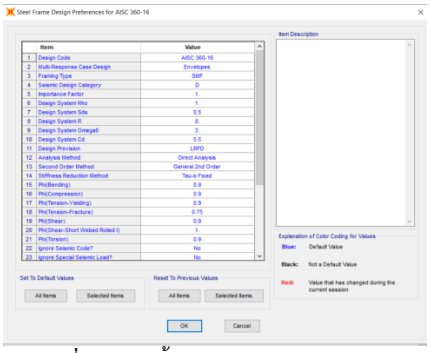



**รูปที่ 4.1** หลักการในการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูงด้วยซีแอลพีเอสโอ

*4.2 ขั้นตอนการทำงาน*

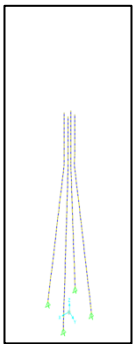
*4.2.1 การขึ้นแบบโครงสร้างใน SAP2000*

ก่อนที่จะเริ่มทำการวิเคราะห์โครงสร้างนั้น สิ่งที่ต้องทำเป็นอันดับแรกคือการขึ้นแบบโมเดลโครงสร้างใน SAP2000 ก่อนพร้อมทั้งตั้งค่าต่างๆให้ตรงกับมาตรฐานที่ผู้ศึกษาใช้ เช่น คุณสมบัติวัสดุ JIS , Catalog หน้าตัดเหล็กในตลาด, มาตรฐานการออกแบบ AISC หรือแรงที่กระทำ เป็นต้น



**รูปที่ 4.2** การตั้งค่ามาตรฐานการออกแบบ

ในโครงการก่อสร้างเสาส่งไฟฟ้านี้มีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีเมมเบอร์จำนวนมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์โครงสร้าง ผู้ศึกษาได้จัดกลุ่มให้เมมเบอร์ที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่น การวางแนวและความยาวของเมมเบอร์ เป็นต้น ให้อยู่กลุ่มเดียวกัน โดยในการออกแบบนี้สามารถจัดกลุ่มได้ทั้งหมด 7 กลุ่ม



**รูปที่ 4.3** เมมเบอร์กลุ่มที่ 1

*4.2.2 Microsoft Visual Basic Application*

ในการเขียน code วิธีการออกแบบโดยใช้วิธีซีแอลพีเอสโอนั้น จะทำการเขียนผ่านโปรแกรม Microsoft Visual Basic Application ซึ่งเป็นภาษาพื้นฐานที่มีอยู่ใน Microsoft Excel อยู่แล้ว แต่ก่อนที่ผู้ศึกษาจะทำการเขียน code ได้นั้น ผู้ศึกษาจำเป็นที่จะต้องเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับซีแอลพีเอสโอ ให้พร้อม โดยข้อมูลที่สำคัญมีดังนี้

1) ฟังก์ชันจุดประสงค์

ในการออกแบบโครงสร้างเสาไฟฟ้าแรงสูงนี้มีจุดประสงค์คือการออกแบบเพื่อให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ และมีน้ำหนักรวมต่ำที่สุด ซึ่งการที่โครงสร้างสามารถใช้งานได้นั้นจะถูกควบคุมโดยซอฟท์แวร์ SAP2000 อยู่แล้ว เพราะฉะนั้นในการออกแบบโดยใช้วิธีซีแอลพีเอสโอจะกำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ น้ำหนักรวมของเหล็กทั้งโครงสร้างที่น้อยที่สุด สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Minimize\ W(x)= \sum_{i=1}^{ng} A_i \sum_{j=1}^{mk} \rho_j L_j \qquad (9)$$

เมื่อ $W(x)$ คือน้ำหนักรวมของทั้งโครงเหล็ก, $Ng$ คือจำนวนกลุ่มของเมมเบอร์ที่ผู้ศึกษาได้จัดไว้, $Mk$ คือจำนวนเมมเบอร์ที่อยู่ในแต่ละกลุ่ม $i$, $A_i$ คือพื้นที่หน้าตัดของกลุ่ม $i$, $\rho_j$ คือความหนาแน่นของเหล็กชิ้นที่ j, $L_j$ คือความยาวเหล็กชิ้นที่ $j$

2) การกำหนดตัวแปร

ในการขึ้นแบบโครงสร้าง เพื่อจะนำไปใช้ใน Optimization process ผู้ศึกษาจะทำการจัดกลุ่ม เมมเบอร์ ของโครงสร้าง ตามที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.1 เพื่อลดขนาดของประชากรลง รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณอีกด้วย โดยในการศึกษานี้ผู้ศึกษาได้แบ่งกลุ่มของเหล็กออกเป็น 7 กลุ่ม ตัวแปรที่ได้จะเป็น $x_1$,$x_1$,$x_3$,$x_4$,$x_5$,$x_6$ และ $x_7$

3) ขอบเขตสูงสุด ต่ำสุด ในการแก้ปัญหา

เนื่องจากหน้าตัดเหล็กที่มีตามท้องตลาดนั้นมีจำนวนมาก หากผู้ศึกษาให้ตัวแปรของผู้ศึกษาทั้ง 7 ตัวแปรทำการค้นหาคำตอบโดยใช้หน้าตัดเหล็กทั้งหมดที่มี จะทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบนั้นนานจนเกินไป ดังนั้นผู้ศึกษาเลยต้องมีวิธีการมาช่วยลดระยะเวลาในส่วนนี้ลง โดยการกำหนดให้แต่ละตัวแปรนั้นมีพื้นที่ในการค้นหา (search space) ที่พื้นที่ภายในจะมีหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของ เมมเบอร์ ในกลุ่มนั้น เช่น หากตัวแปร $x_1$ เป็นกลุ่มเหล็กที่มีความยาวมาก พื้นที่ในการค้นหาก็จะประกอบไปด้วยเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดปานกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ เป็นต้น และผู้ศึกษาจะใช้ตัวเลข index ของหน้าตัดแต่ละชนิดมาใช้ในการกำหนดขอบเขตในขั้นตอนการเขียน code

**ตารางที่ 4.1** พื้นที่ในการค้นหาคำตอบของเหล็กกลุ่ม 1 หรือตัวแปร $x_1$

| Group1 | Section |
|---|---|
| 1 | HL150X150X18 |
| 2 | HL150X150X15 |
| 3 | HL150X150X12 |
| 4 | HL150X150X10 |
| 5 | HL120X120X15 |
| 6 | HL120X120X12 |
| 7 | HL120X120X10 |
| 8 | HL120X120X8 |
| 9 | HL100X100X15 |
| 10 | HL100X100X12 |
| 11 | HL100X100X10 |

เมื่อผู้ศึกษาได้กำหนดข้อมูลที่สำคัญแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการเขียนโค้ดใน Microsoft visual basic application เพื่อใช้ในการสั่งการกระบวนการทำซ้ำด้วย วิธีซีแอลพีเอสโอ และใช้ในการติดต่อสั่งการระหว่าง Excel และซอฟท์แวร์ SAP2000 แต่ในการศึกษานี้จะไม่ลงรายละเอียดในส่วนของขั้นตอนการเขียน

*4.3 ผลจากการหาค่าที่ดีที่สุดในการออกแบบและอภิปราย*

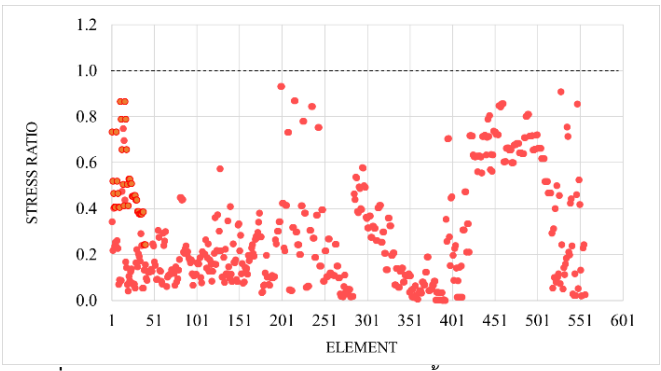
ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูงนี้จะใช้วิธีการทำซ้ำด้วยซีแอลพีเอสโอ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือออกแบบให้น้ำหนักโครงสร้างมีค่าน้อยที่สุด โดยใช้จำนวนพาร์ทิเคิล = 20 ตัว จำนวนรอบการทำซ้ำ = 50 รอบ และจำนวนการทำงาน (Run) = 2 ดังนั้นจะทำให้เกิดการทำซ้ำทั้งหมด = 100 รอบ

จากวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีซีแอลพีเอสโอโดยใช้จำนวนพาร์ทิเคิล = 20 และจำนวนรอบการทำซ้ำ = 100 รอบ จะได้ว่า หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 1 คือ HL150X150X15, หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 2 คือ HL120X120X8, หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 3 คือ HL80X80X8, หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 4 คือ HL60X60X8, หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 5 คือ HL120X120X8, หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 6 คือ HL60X60X10, หน้าตัดสำหรับกลุ่มที่ 7 คือ HL90X90X6 ซึ่งทำให้ได้ค่าน้ำหนักทั้งโครงสร้างอยู่ที่ 13.425 ตัน

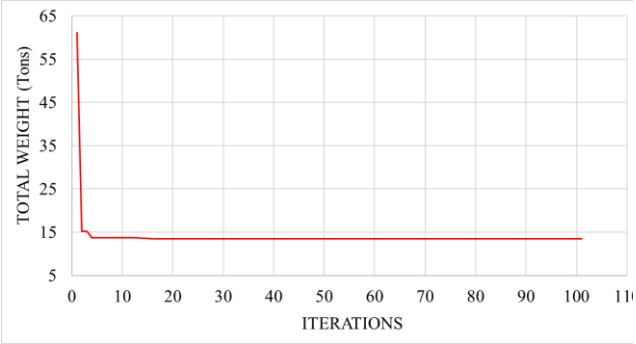
**ตารางที่ 4.2** ผลลัพธ์จากการออกแบบโครงสร้าง

| The best solution found is | | |
|---|---|---|
| f(x*)= | 13.452-(Tons) | Ratio |
| at position | | |
| x5*= | HL120X120X8 | 0.75 |
| x4*= | HL60X60X8 | 0.93 |
| x3*= | HL80X80X8 | 0.58 |
| x2*= | HL120X120X8 | 0.71 |
| x1*= | HL150X150X15 | 0.86 |
| x6*= | HL60X60X10 | 0.91 |
| x7*= | HL90X90X6 | 0.86 |

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะได้ว่าไม่มีเมมเบอร์ชิ้นใดที่มีค่าอัตราส่วนความเครียดเกิน 1.0 เลย ถือว่าผ่านเงื่อนไขในการออกแบบตามประมวล AISC-LRFD 2016 และจากภาพที่ 4.5 จะพบว่าคำตอบเริ่มมีการลู่เข้าเมื่อเริ่มการทำซ้ำในรอบที่ 15 โดยประมาณ




**รูปที่ 4.4** อัตราส่วนความเครียดสำหรับเมมเบอร์ทั้งหมดในโครงสร้าง




**รูปที่ 4.5** ประวัติการลู่ข้าวของคำตอบ

## 5. ข้อสรุปและแนวทางการศึกษาในอนาคต

### *5.1 ข้อสรุป*

1) ในการแก้ปัญหาหาค่าที่ที่สุดของโครงสร้างต่างๆ วิธีการดั้งเดิมนั้นมีขีดจำกัดในการหาคำตอบของปัญหาที่มีตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นวิธีพีเอสโอจึงได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากใช้งานง่าย ประมวลผลเร็ว และสามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ แต่ก็ยังคงมีข้อด้อยในเรื่องของการลู่เข้าคำตอบที่เร็วเกินไป และการถูกดึงดูดเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ ผู้ศึกษาจึงได้เลือกใช้วิธีซีแอลพีเอสโอ ที่สามารถให้ผลคำตอบที่ดีกว่า รวมถึงลู่เข้าคำตอบได้เร็วกว่าวิธีพีเอสโอ

2) กระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริทึมซีแอลพีเอสโอนั้นสามารถเขียนโค้ดได้ไม่ยาก สามารถใช้ภาษาของคอมพิวเตอร์ได้หลากหลายภาษา เช่น Java script หรือ C++ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถเขียนให้ตัวโค้ดของผู้ศึกษาสามารถสื่อสาร สั่งการและทำงานร่วมกับซอฟท์แวร์อื่นๆได้ เช่น SAP2000 เป็นต้น โดยกระบวนการนี้ผู้ศึกษาจะเรียกว่าการสื่อสาร OPAI ซึ่งจะช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถเข้าถึงตัวโมเดลและสามารถควบคุมการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างได้ง่ายยิ่งขึ้น รวมไปถึงการส่งผ่านข้อมูลระหว่างซอฟท์แวร์ 2 ตัวได้อีกด้วย

3) การประยุกต์ใช้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้อัลกอลิทึมซีแอลพีเอสโอร่วมกับ SAP2000 มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างเสาไฟฟ้าแรงสูงนั้นพบว่าสามารถใช้งานได้จริง เพราะเมื่อเทียบกับขนาดเหล็กที่ใช้ก่อสร้างจริงนั้น พบว่าใช้ขนาดหน้าตัดที่ใกล้เคียงกัน แต่ยังมิได้มีความแตกต่างมากนัก เนื่องจากในขั้นตอนการหาคำตอบที่ดีที่สุดของการศึกษานี้ มีการจัดกลุ่มเมมเบอร์ให้เป็น 7 กลุ่ม ทำให้การออกแบบยังไม่ได้มีความละเอียดมากพอ รวมไปถึงจำนวนรอบการทำซ้ำที่ผู้ศึกษาทำเพียง 100 รอบ และใช้จำนวนพาร์ทิเคิลเพียง 20 ตัวเท่านั้น หากต้องการให้คำตอบนั้นมีค่าที่ดีมากขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบการทำซ้ำและจำนวนพาร์ทิเคิลให้มากขึ้นได้ รวมไปถึงการเพิ่มจำนวนตัวแปรและเพิ่มพื้นที่ในการค้นหาคำตอบของพาร์ทิเคิลให้มากกว่าที่ใช้ในการศึกษานี้ได้

### *5.2 แนวทางศึกษาต่อในอนาคต*

1) ในปัจจุบันอัลกอริทึมที่สามารถใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้นั้นมีอยู่จำนวนมาก มิใช่เพียงแต่พีเอสโอหรือซีแอลพีเอสโอเท่านั้น เช่น Evolutionary structural optimisation (ESO) หรือ Mixed ESO-PSO เป็นต้น ซึ่งอัลกอรึทึมเหล่านี้ต่างก็มีข้อดี ข้อเสีย และประสิทธิภาพในการใช้งานแตกต่างกันไป ดังนั้นการศึกษาอัลกอรึทึมต่างๆที่เกี่ยวข้องและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบก่อสร้างได้ก็ถือเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปที่น่าสนใจ

2) เนื่องจากในการศึกษานี้ผู้ศึกษายังมิได้พูดถึงรายละเอียดในการเขียนโค้ดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพราะเนื้อหาในส่วนนั้นค่อนข้างที่จะต้องใช้เวลานานในการศึกษาและฝึกฝน ในการศึกษาต่อไปผู้ศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่รายละเอียดการเขียนโค้ดคอมพิวเตอร์เช่น Java Script หรือ C++ เป็นต้น เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถนำหลักการหาคำตอบที่ดีที่สุดนี้มาปรับใช้ในการทำงานจริงได้ในอนาคต

3) เทคโนโลยี ณ ปัจจุบันมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างต่างๆนั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการพยายามทำให้โปรแกรมหลายๆโปรแกรมสามารถทำงานร่วมกันได้ ดังนั้น การศึกษาซอฟท์แวร์เหล่านี้ก็จะช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถเลือกซอฟต์แวร์ที่เหมาะสมมาใช้กับวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดและทำให้การวิเคราะห์นั้นออกมามีประสิทธิภาพและทำงานได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ก่อนอื่นผู้ศึกษาอยากจะขอกล่าวขอบคุณบุคคลผู้ซึ่งเป็นคนจุดประกายให้ผู้ศึกษาสนใจและอยากที่จะมาทำปริญญานิพนธ์ในเรื่องนี้ ซึ่งก็คืออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ ท่านเป็นผู้ที่มอบทั้งความรู้ คำแนะนำ และแรงบันดาลใจในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ขึ้นมา ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จไม่ได้เลยหากไม่มีคำแนะนำและแรงบันดาลใจจากท่าน

บุคคลต่อมาที่อยากขอบคุณก็คือรุ่นพี่ปริญญาเอกที่เป็นทั้งผู้สอนและที่ปรึกษาในข้อมูลเชิงลึกของปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ก็คือ Mr. Thu Huynh Van ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาเอกที่กำลังศึกษาในเรื่องเดียวกับที่ผู้ศึกษาทำในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ความรู้และความเข้าใจส่วนใหญ่ในตัวทฤษฎี และข้อมูลเชิงลึกที่นำมาเขียนในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ส่วนใหญ่ล้วนมาจากการสอนและการให้คำแนะนำจากรุ่นพี่ท่านนี้

สุดท้ายนี้ผู้ศึกษาขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้โอกาสพวกผู้ศึกษาในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกทั้งในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้งาน เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานราชการที่เกี่ยวข้องกับการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ด้วย ผู้ศึกษา

ตั้งใจทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นอย่างมาก โดยหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยและบุคคลอื่นที่ได้อ่านปริญญานิพนธ์เล่มนี้**เอกสารอ้างอิง**


[1] Thu Huynh Van. (2018). *Analysis and optimum design of cold-formed steel arch structures.*

[2] Wikipedia. (2020). Nondeterministic algorithm. Retrieved May 16, 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Nondeterministic_algorithm

[3] Kenneth M. Leet, Chia-Ming Uang, Joel T. Lanning & Anne M.Gilbert. (2018). *Fundamentals_of_Structural_Analysis_5th_Edition*.

[4] Ramm E., Maute K., Schwarz S. (1998). "Conceptual design by structural optimization", *In: Proceedings of the Euro–C 1998 Conference on Computational Modelling of Concrete (eds. Borst R. de et al.)*, Badgastein, Austria.

[5] Sachin Desale, Akhtar Rasool, Sushil Andhale, & priti Rane. (2015). *Heuristic and Meta-Heuristic Algorithms and Their Relevance to the Real World : A Survey*

[6] พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์. (2554, มกราคม-มิถุนายน). "การพัฒนาวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาทิเคิลสวอมออปทิไมเซชั่นด้วยการเลียนแบบโครงสร้างการเรียนรู้ทางสังคมแบบหลากหลาย", *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี).* 3(5): หน้า 14-22.

[7] พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์. (2557, มกราคม-มิถุนายน). "การอธิบายขั้นตอนการทำงานของวิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชันผ่านตัวอย่าง", *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี).* 6(11): หน้า 78-87.

[8] Kennedy, J.; & Eberhart, R.C. (1995). Particle Swarm Optimization. *In IEEE International Conference onNeural Network.* pp. 1942-1948. New Jersey.

[9] Shi, Y., & Eberhart, R. C. (1998). *Parameter selection in particle swarm optimization.* Paper presented at the International conference on evolutionary programming.

[10] Fourie, P., & Groenwold, A. A. (2002). The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, 23(4), 259-267.

[11] Li, L., Huang, Z., Liu, F., & Wu, Q. (2007). A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures. *Computers & structures*, 85(7-8), 340-349.

[12] Li, L., Huang, Z., & Liu, F. (2009). A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables. *Computers & structures*, 87(7-8), 435-443.

[13] J. J. Liang, A. K. Qin, Student Member, IEEE, Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, Senior Member, *IEEE, andS. Baskar. (2006).* "Comprehensive Learning Particle Swarm Optimiser for Global Optimisation of Multimodal Functions*". IEEE transactions on evolutionary computation*, 10(3): 281-295

[14] นายธนพัทธ์ ทองชั้น. (2017). *ขั้นตอนวิธีการค้นหาความบรรสานสำหรับปัญหาค่าเหมาะที่สุดหลายวัตถุประสงค์: ทฤษฎีการประยุกต์ใช้และกรณีศึกษา*

[15] K. Mahadevan a,*, P.S. Kannanb. (2009). "Comprehensive learning particle swarm optimization for reactive power dispatch". *Applied Soft Computing*, 641-652.

[16] Wikipedia. (2020). Test functions for optimization. Retrieved May 16, 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Test_functions_for_optimization

[17] American Institute of Steel Construction, 2016. Specification for Structural Steel Buildings. American National Standard ANSI/AISC 360-16, 620 pages.

[18] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 2016. American Society of Civil Engineers Standard ASCE/SEI 7-16