การออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพของโครงสร้างนั่งร้านเหล็ก ด้วยวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม
Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization of Constructional Scaffolding Structures

นางสาว ธมลวรรณ สุวรรณศรี, นางสาว นพศมน นพเกตุ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์[3]

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

บทความเสนอการออกแบบที่ปลอดภัยและเหมาะสมที่สุดโดยกระบวนการ Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) ภายใต้แรงกระทำและข้อกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ AISC-LRFD 2016 Specifications กระบวนการออกแบบ CLPSO ถูกพัฒนามาจากวิธีการเรียนรู้แบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) ซึ่งอัลกอริทึม CLPSO สามารถเขียนได้และใช้ผ่านการสื่อสารกันระหว่างภาษาทางคอมพิวเตอร์ภายใน Microsoft Visual Basic Application และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ (FEM) ด้วยฟังก์ชัน Open Application Programming Interface (OAPI) ที่ช่วยทำให้เราเข้าถึงแบบจำลองในโปรแกรม SAP2000 และติดตามผลการวิเคราะห์และออกแบบได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบนี้ ให้ขนาดของโครงสร้างนั่งร้านที่ใช้วัสดุที่เบาที่สุด โดยมีความเค้นสูงสุดและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดของชิ้นส่วนในแต่ละกลุ่มอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด กล่าวคือโครงสร้างมีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัย สรุปได้ว่าผลของการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างด้วยวิธี CLPSO เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในแก้ไขปัญหาที่มีตัวแปรไม่ต่อเนื่อง และการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: การออกแบบโครงสร้างของนั่งร้านอย่างเหมาะสมที่สุด; วิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม; วิธีการเรียนรู้แบบกลุ่มอนุภาค; ขนาดของโครงสร้างนั่งร้านที่ใช้วัสดุที่เบาที่สุด

Abstract

The paper proposes the optimal design based on the development of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) to safety determine the minimum sizes of steel members employed for the scaffolding structure supporting forces during the construction stages. The CLPSO is developed from Particle Swarm Optimization (PSO) and encoded within the Microsoft Visual Basic Application having a direct interface with some commercial finite element analysis (FE) and design software, called SAP2000, through Open Application Programming Interface (OAPI) . A transparent with the computed designing results provide the sizes of the scaffolding structure with the lightest materials, for which the components in each design group works effectively under the conditions specified. In essence, the structure is strong enough and has safely bearing capacity. In conclusion, the proposed CLPSO mothed and computer programming framework is the robust design technique for solving problems with discontinuous variables and optimum design structure.

Key words: Optimum Design; Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO); Particle Swarm Optimization (PSO); The lightest materials structure

1. บทนำ

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบโครงสร้างอย่างประหยัดจะขึ้นอยู่กับการเลือกหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับราคาของวัสดุ นั่งร้านเป็นเพียงโครงสร้างชั่วคราวที่ผลิตมาจากชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กที่จะถูกติดตั้งในขั้นตอนการก่อสร้างและจะมีการรื้อออกเมื่อเสร็จสิ้นการใช้งาน ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างโดยปกติจะทำการวิเคราะห์แรงกระทำบนชิ้นส่วนแล้วจึงสุ่มเลือกหน้าตัดของแต่ละชิ้นส่วนมาตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแต่ละชิ้นส่วนนั้น วิธีการดังกล่าวคือวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งผลการออกแบบที่ได้จะก่อให้เกิดค่าใช้จ่าย

ส่วนเกิน และจำเป็นต้องใช้วิศกรที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ ดังนั้นจึงมีการนำแนวคิดการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization : CLPSO) ที่นำมาใช้ออกแบบโครงสร้างนั่งร้านเหล็กที่เหมาะสมที่สุด มีความสมเหตุสมผล มีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่เหมาะสมให้กับโครงสร้างนั่งร้านแบบท่อเหล็กกลม (Circular Hollow Steel Tube Scaffolding) โดยใช้อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการหาวิเคราะห์หาคำตอบการออกแบบโครงสร้างที่เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง และไม่เป็นเชิงเส้น โดยการออกแบบนี้ใช้วัสดุเฉพาะแบบเหล็กกลมกลวงขึ้นรูปเย็น (Cold-formed Steel Hollow, CHS) และออกแบบโครงสร้างเหล็กสอดคล้องตามมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC-LRFD) 360-16 และAmerican Iron and Steel Institute (AISI-LRFD) S1000-16 ด้วยการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์และเทคนิควิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการหาคำตอบโดยประมาณ โดยจะพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic) และ ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในสมการความสมดุล (Geometric Non-linearity analysis) รวมทั้ง P–Δ effect แต่ไม่คำนึงผลจากความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และ ความโค้งงอบิดเบี้ยว (Crookedness) และกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงรูปของวัสดุ (Deformation) แรงเฉือน (Shear) และ แรงบิด (Torsion) มีค่าน้อย จนถือว่าไม่มีความสำคัญ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นั่งร้านแบบท่อและข้อต่อ

นั่งร้านแบบท่อและข้อต่อ (tube-and-coupler scaffold) เป็นประเภทที่สามารถปรับการใช้งานได้หลากหลายประเภท เหมาะสำหรับใช้งานเป็นนั่งร้านสำหรับการทำงานและนั่งร้านแบบโครงค้ำยัน ในการออกแบบระบบนั่งร้านประเภทนี้จะต้องดำเนินการโดยวิศวกรเท่านั้น โดยจะระบุการยึดต่อของส่วนประกอบต่าง ๆ อย่างละเอียดในแบบรูป

2.2 โครงสร้างค้ำยันโครงข้อแข็ง

ค้ำยันคือชิ้นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงสร้างเหล็ก โดยตัวค้ำยันจะทำหน้าที่หลักคือช่วยให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทางแรงด้านข้างหรือการกระทำที่ทำให้เกิดการโยกตัวด้านข้าง เช่น แรงลมและแรงสั่นสะเทือน โดยหลักการในการออกแบบค้ำยันจะคล้ายกับการออกแบบโครงถัก (Truss) คือมีรูปแบบของโครงสร้างในลักษณะรูปทรงสามเหลี่ยมและมักจะออกแบบให้เป็นชิ้นส่วนรับแรงในแนวแกนเท่านั้น

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์คือเทคนิควิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการปริพันธ์ รูปแบบของปัญหาจะเป็นการกระจายตัวของตัวแปรในระบบสามมิติ วิธีนี้สามารถนำมาใช้แก้ไขปัญหาทางฟิสิกส์ หรือทางวิศวกรรม

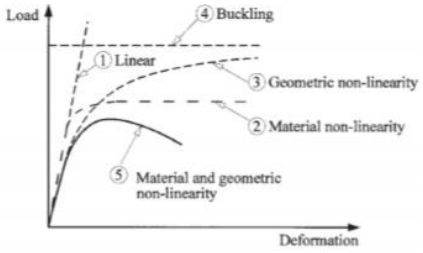
2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสติฟเนส

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Stiffness method (Displacement method หรือ Equilibrium method) เป็นวิธีที่จะใช้การเปลี่ยนตำแหน่งที่ node (nodal displacement) ของโครงสร้างเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง statically determinate และแบบ statically indeterminate ได้ นอกจากนั้นยังให้ผลลัพธ์ของแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งโดยตรง โดยสมการพื้นฐานจอง matrix stiffness method สามารถหาได้จาก สมการความสมดุล (equilibrium equation), สมการความสอดคล้อง (compatibility equation) และความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนตำแหน่ง (force-displacement relationship) ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่หรือโครงสร้างที่ยุ่งยาก จะต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ในการช่วยสังเคราะห์ข้อมูล วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) เป็นวิธีการสังเคราะห์สติฟเนสของโครงสร้างทางระบบจากสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย ๆ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีการสติฟเนสโดยตรง จะพิจารณาโครงสร้างว่าส่วนประกอบต่าง ๆ ที่นำมาต่อกันตรงขั้วต่อ (Node) มีแรงกระทำอย่างไร โดยที่แรงกระทำนั้นจะต้องกระทำที่ขั้วต่อเท่านั้น หากมีแรงกระทำระหว่างช่วงความยาวของชิ้นส่วน หรือในกรณีที่ต้องการทราบค่าการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างความยาวของชิ้นส่วน ก็จะต้องแบ่งชิ้นส่วนนั้นออกตรงบริเวณที่มีแรงมากระทำหรือตรงจุดที่ต้องการทราบค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง

2.2.2 Second-Order Geometry Effects

โครงสร้างเกือบทุกประเภทจะมีการตอบสนองต่อแรงกระทำแบบไม่เชิงเส้นตรง (nonlinear) รวมถึงความแข็งแรงของโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปถึงแม้ว่าวัสดุจะแสดงพฤติกรรมในลักษณะเชิงเส้นตรงก็ตาม ดังนั้นเราจึงควรพิจารณาโครงสร้างแบบ Second-Order Geometry Effects แบบไม่เชิงเส้นตรง ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงแบบต่าง ๆ (White & Hajjar, 2534)

การพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic) และผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในสมการความสมดุล ซึ่งเรียกว่า geometric non-linearity analysis โครงสร้างที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะเป็นโครงสร้างซึ่งมีสมบัติคือ มีความไม่สมบูรณ์ก่อนถูกแรงกระทำ, มีชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ไวต่อ P–Δ effect และ P–δ effect ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเสียเสถียรภาพ

2.4 การออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมที่สุด (Structural Optimization)

การออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมที่สุด คือการออกแบบที่ใช้ทรัพยากรอย่างน้อยที่สุด โดยที่ยังคงเงื่อนไขและวัตถุประสงค์ตามกำหนด นั่นคือการออกแบบที่มีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ (Constrains) อาทิ เสถียรภาพ ความคงทน ค่าใช้จ่ายการก่อสร้าง การบำรุงรักษา เวลาก่อสร้าง ขนาดขององค์อาคาร และการขนย้าย ในการออกแบบโครสร้างเฟรม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ (Constrains Function) จะเป็นฟังก์ชันแบบไม่ราบเรียบ (Non-smooth Function) ซึ่งในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจึงมีอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดพัฒนาขึ้นมาหลากหลาย โดยอัลกอริทึมส่วนมากจะมีพื้นฐานอยู่บนวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method)

2.4.1 อัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติก

การเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเหล็กเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญของวิศวกรโครงสร้าง และเทคนิคเมตา-ฮิวริสติกเป็นอัลกอริทึมที่ใช้กลยุทธ์ในการชี้นำไปสู่ขั้นตอนการหาคำตอบ สามารถช่วยลดระยะเวลาในการหาคำตอบของโครงสร้างขนาดใหญ่ สามารถหาคำตอบของปัญหาที่ซับซ้อนได้ จึงมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสำหรับการออกแบบโครงข้อแข็งเหล็กอย่างเหมาะสมที่สุด

2.4.2 อัลกอริทึมแบบแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO)

การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นอัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติกด้วยวิธีการค้นหาแบบสุ่มตามโอกาส (Stochastic Search Methods) โดยจำลองพฤติกรรมการหาอาหารของฝูงนก การออกไปหาอาหารของนกแต่ละตัวที่ได้อาหารมาเปรียบได้กับการได้คำตอบทางกายภาพมา (Physical Part) สำหรับการประมวลผลที่หาคำตอบไม่ได้เปรียบเสมือนนกที่โดนล่าไป โดยธรรมชาติของนกนั้นจะเรียนรู้เส้นทางการเดินทางเพื่อหลีกเลี่ยงการถูกล่า และหาแหล่งอาหารที่ดี ตามประสบการณ์ของตน ซึ่งเปรียบกับคำตอบที่ดีที่สุดก่อนหน้า (Pbest) พิจารณาร่วมกับนกตัวอื่นจากในฝูง เปรียบกับคำตอบที่ดีที่สุดจากทั้งหมด (Gbest) ดังนั้นอัลกอริทึมนี้จึงขึ้นอยู่กับจำนวนประชากร (Population Base)

2.4.3 อัลกอริทึมแบบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization : CLPSO)

สำหรับการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) พิจารณาค่าพีเบสต์ (Pbest) ของอนุภาคอื่น เพิ่มเติมจากวิธีกลุ่มอนุภาคที่เรียนรู้จากพีเบสต์ของตัวเอง และจีเบสต์ (Gbest) เพื่อเป็นแบบอย่างที่ต้องเรียนรู้จากอนุภาคใด ๆ และแต่ละมิติของอนุภาคสามารถเรียนรู้ได้จากตัวอย่างที่แตกต่างกันทำให้อนุภาคมีแบบอย่างมากขึ้นในการเรียนรู้ และสามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลในกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนั้นช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีกลุ่มอนุภาค อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่เกิดขึ้นหลายรูปแบบที่มีความซับซ้อนอย่างการลู่เข้าหาคำตอบก่อนการครบกำหนดเวลา (Premature Convergence) ที่เป็นปัญหาของวิธีกลุ่มอนุภาค

2.4.4 PSO vs CLPSO

เมื่อเราเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หาคำตอบโดยการเปรียบเทียบระยะเวลาในการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดในฟังก์ชันทดสอบซึ่ง $f(x_1,x_2)=0$ ของแต่ละอัลกอริทึมภายใต้การควบคุมจำนวนรอบในการวิเคราะห์หาคำตอบให้มีค่าเท่ากัน โดยตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าของอัลกอริทึมในการกำหนดจำนวนอนุภาค 10 อนุภาคในการวิเคราะห์คำตอบวนซ้ำ 200 รอบ ดังนี้

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ด้วย PSO และ CLPSO

	Iteration	N	$f(x_1,x_2)$	x_1	x_2
PSO	200	10	0.010127	0.899397	0.808676
CLPSO	200	10	$2.349.10^{-7}$	1.000414	1.000802

จะเห็นได้ชัดเจนว่าอัลกอริทึม PSO ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็น CLPSO นั้นมีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เร็วขึ้นเมื่อกำหนดให้จำนวนอนุภาคในการทดสอบและจำนวนรอบในการวนซ้ำเท่ากัน ในรายงานวิจัยฉบับนี้จึงจะทำการออกแบบโครงสร้างนั่งร้านเหล็กด้วยการวิเคราะห์หาคำตอบที่ดีที่สุดของตัวแปรหน้าตัดที่ไม่ต่อเนื่องด้วยอัลกอริทึม CLPSO

3. การกำหนดเงื่อนไขและขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหา

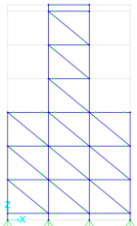
3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์

3.1.1 ชนิดของไฟไนท์เอเลเมนต์

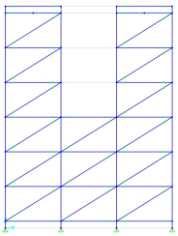
ในการพิจารณานั่งร้านเหล็กในโครงงานนี้ เราจะใช้การแบ่งชิ้นส่วนแบบ Beam Element ในการวิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อแข็ง ซึ่งมี Degree Of Freedom (DOF) จำนวนหกค่า กล่าวคือการเคลื่อนที่และการหมุนของชิ้นส่วนนั้น โดยชิ้นส่วนที่ถูกแบ่งนี้จะประกอบไปด้วยจุดข้อต่อ (Node) จำนวนสองจุด และส่วนที่เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงจำนวนหนึ่งชิ้น สามารถนำมาประกอบเป็นโครงสร้างสามมิติได้

3.1.2 Boundary Conditions

ในโครงสร้างโครงข้อแข็งทั่วไปมักจะใช้ฐานรองรับแบบยึดแน่น (fixed support) เพื่อช่วยลดโมเมนต์ดัด (bending moment) ในชิ้นส่วนโครงสร้างโครงข้อแข็ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้นทุนในการสร้างฐานรากของฐานรองรับแบบยึดแน่นนั้นมากกว่าฐานรองรับแบบยึดหมุน (pinned support) และโครงสร้างโครงข้อแข็งที่ศึกษานี้เป็นนั่งร้านเหล็ก เราจึงเลือกใช้ฐานรองรับแบบยึดหมุน แล้วเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างด้วยค้ำยัน (bracing) จากที่กล่าวมาเราจึงได้จำลองแบบนั่งร้านเหล็กดังรูปที่ 2-3



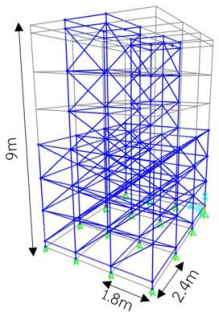
รูปที่ 2 แบบจำลองด้านหน้าของโครงสร้างนั่งร้าน



รูปที่ 3 แบบจำลองด้านข้างของโครงสร้างนั่งร้าน

3.1.3 ขนาดสัดส่วนของโครงสร้างนั่งร้านเหล็ก

โครงสร้างนั่งร้านเหล็กในโครงงานวิจัยฉบับนี้เป็นนั่งร้านเหล็กแบบท่อและข้อต่อโดยมีความสูงของนั่งร้านแต่ละชั้น 1.5 เมตร ต่อขึ้นทั้งหมด 6 ชั้น รวมเป็นความสูง 9 เมตร ความกว้างด้านหน้ามี 3 ช่วงยาวช่วงละ 1.8 เมตร ความยาวด้านยาวมี 3 ช่วง ยาวช่วงละ 2.4 เมตร แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขนาดสัดส่วนของนั่งร้านเหล็ก

3.1.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์

เราใช้ซอฟต์แวร์ SAP2000 ซึ่งง่ายต่อการเข้าถึงในการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดเพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลของโครงสร้าง โดยซอฟต์แวร์จะวิเคราะห์แบบเชิงเส้นตรง (Linear static) หรือการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างเมื่อได้รับแรงกระทำ และวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear static)

3.1.5 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

คำอธิบาย	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
Yield Strength of Cold-formed hollow Steel มอก.107 (Grade SS490)	F_y	315	MPa
Modulus of Elasticity	E	210000	MPa
Shear Modulus	G	81000	MPa
Density	ρ	7850	Kg/m^3
Poisson's Ratio	ν	0.3	-

โดยที่การวิเคราะห์โครงสร้างนั่งร้านเหล็กในโครงงานวิจัยนี้ เราได้ใช้ตารางเหล็กเฉพาะแบบเหล็กกลวงขึ้นรูปเย็น (Cold-formed Steel Hollow, CHS) ในการออกแบบ ซึ่งมีทั้งหมด 69 รายการ เนื่องจากเป็นประเภทของเหล็กที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างนั่งร้านเหล็ก

3.2 เงื่อนไขการกำหนดน้ำหนักหรือแรงกระทำบนโครงสร้าง

แรงที่กระทำบนโครงสร้างนั่งร้านเหล็กนี้จะออกแบบด้วยวิธีการ LRFD ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) โดยจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของตัววัสดุเองซึ่งจะถูกคำนวณอัตโนมัติภายในซอฟต์แวร์ และน้ำหนักบรรทุกของโครงถักสำหรับโครงหลังคาซึ่งมีค่า 7.2 kN เข้าไปบริเวณทุก Node บนสุดของโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) โดยมีค่า 0.15 kN/m^2 กระทำบนพื้นที่ของโครงสร้างนั่งร้านด้านบนสุด ในการวิเคราะห์โครงสร้างนี้เราได้พิจารณา Notional load คือแรงที่กำหนดขึ้นมาเพื่อชดเชยความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง มีค่าเป็นสัดส่วนร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งมีค่า $N_i = 0.002\alpha Y_i$ ซึ่งน้ำหนักดังกล่าวจะถูกพิจารณาอัตโนมัติโดยซอฟต์แวร์ SAP2000 โดยเราจะจัดให้เป็นแรงประเภทแรงกระทำด้านข้าง เกิดขึ้นในแนวราบทั้งสองแนวแกน

3.2.1 Combination Load

การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างจะอ้างอิงมาตรฐานของ Load combinations จาก AISC ด้วยวิธี LRFD แสดงดังตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 การรวมแรงด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ

Case	การรวมแรง
1	$1.4D + N_x$
2	$1.4D - N_x$
3	$1.4D + N_y$
4	$1.4D - N_y$
5	$1.2D + 1.6L + N_x$
6	$1.2D + 1.6L - N_x$
7	$1.2D + 1.6L + N_y$
8	$1.2D + 1.6L - N_y$
9	$1.2D + 1.6L + N_x + N_y$
10	$1.2D + 1.6L - N_x - N_y$
11	$D + L$

3.3 การกำหนดเงื่อนไขในปัญหาการออกแบบของโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

3.3.1 การกำหนดตัวแปร

เนื่องจากหน้าตัดและขนาดของชิ้นส่วนมีค่าแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการออกแบบหน้าตัดของวัสดุนี้จึงมีความไม่ต่อเนื่อง (discrete structural optimization) ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบไม่ราบเรียบ (Non-Smooth Problem)

3.3.2 การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)

เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างนั่งร้านนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาเลือกวัสดุที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดในการประกอบเป็นนั่งร้านเพื่อค้ำยันโครงสร้าง และตัวแปรขนาดของวัสดุมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เราสามารถสร้างฟังก์ชันเป้าหมายได้ดังนี้

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

โดยที่ $W(x)$ คือน้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้างโครงข้อแข็ง, ng คือจำนวนกลุ่มทั้งหมดของขนาดหน้าตัดที่ไม่ทราบค่าในโครงสร้างโครงข้อแข็ง,

mk คือจำนวนสมาชิกทั้งหมดในกลุ่มที่ i, A_i คือขนาดของหน้าตัดในกลุ่มที่ i, L_i และ ρ_i คือความยาวของชิ้นส่วนที่ j ในกลุ่มที่ i และความหนาแน่นของเหล็กตามลำดับ

3.3.3 เงื่อนไขข้อจำกัด

ในการคำนวณหาน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดจะต้องพิจารณาเงื่อนไขข้อจำกัดในด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง และการนำไปใช้งานของโครงสร้าง ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการการออกแบบ ดังนี้

$$Subject\ to\ g_t(x) = \begin{cases} \lambda_j^{\sigma} \le 0\ ; j = 1, \dots, nc \\ \lambda_r^{d} \le 0\ ; r = 1, \dots, ns \end{cases} \quad (2)$$

โดยที่ nc คือจำนวนของ คาน-เสา ในกลุ่มที่ และ ns คือจำนวนชั้นของโครงสร้าง

การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างจะอ้างอิงมาตรฐานของ Load combinations จาก AISC ด้วยวิธี LRFD มีมาตรฐานด้านกำลังวัสดุดังนี้

$$\lambda_j^{\sigma} = \frac{|\sigma_j|}{\sigma_j^a} - 1 \le 0, S_s = \frac{|\sigma_j|}{\sigma_j^a} \quad (3)$$

เมื่อ σ_j คือความเค้นของชิ้นส่วนที่ j ในกลุ่มที่ i และ

$$\sigma_j = \left(\frac{P_u}{\phi P_n}\right) + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right)\ ;\ \frac{P_u}{\phi P_n} \ge 0.2$$

$$\sigma_j = \left(\frac{P_u}{2\phi P_n}\right) + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right)\ ;\ \frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$$

เมื่อ P_u คือกำลังในแนวแกนที่ใช้พิจารณา (Required axial strength), P_n คือกำลังรับน้ำหนักระบุ (nominal axial strength), M_{ux} และ M_{uy} คือขนาดของโมเมนต์ในแนวแกนหลักและแนวแกนรองตามลำดับ, M_{nx} และ M_{ny} คือกำลังรับโมเมนต์ระบุในแนวแกนหลักและแนวแกนรองตามลำดับ, ϕ คือแฟกเตอร์ทอนกำลัง โดยที่ $\phi_c = \phi_t = \phi = 0.9$ สำหรับแรงอัด แรงดึง และแรงดัด ตามลำดับ

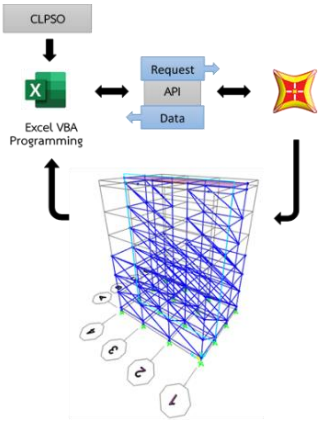
นอกจากนั้นยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานคือ

$$\begin{cases} \lambda_j^{\sigma} = \frac{|\Delta^*|}{\Delta_{ru}} - 1 \le 0\ , S_d = \frac{|\Delta^*|}{\Delta_{ru}} \text{ และ } |\Delta^*| < \Delta_{ru} \\ \lambda_r^{d} = \frac{|d^*|}{d_{ru}} - 1 \le 0\ , S_d = \frac{|d^*|}{d_{ru}} \text{ และ } |d^*| < d_{ru} \end{cases} \quad (4)$$

สำหรับชิ้นส่วนเสา Δ^* และ d^* คืออัตราการเคลื่อนตัวของโครงสร้างโครงข้อแข็งสัมพัทธ์ และระยะเคลื่อนตัวมากที่สุดในชั้น r, Δ_{ru} และ d_{ru} คือการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ยอมรับได้ และการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ยอมรับได้, S_d คือแฟกเตอร์ระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบ สำหรับชิ้นส่วนคาน $d^* = d_j$ คือระยะเคลื่อนตัวมากสุดในแนวตั้งของชิ้นส่วนที่ j ในกลุ่มที่ i, d_{ru} คือการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ยอมรับได้ และ S_d คือแฟกเตอร์ระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

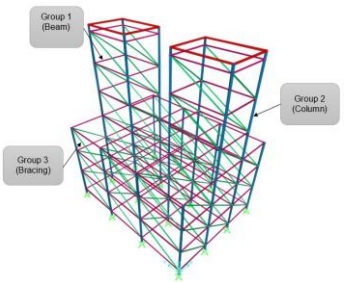
4. ผลการออกแบบโครงสร้างนั่งร้านเหล็ก

เราได้ทำการออกแบบโครงสร้างโดยการดำเนินการจะถูกวิเคราะห์วนรอบอัตโนมัติโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ในการวิเคราะห์ผลใช้วิธีการ CLPSO และกำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ ด้วยการเขียนโค้ดในการสื่อสารกับแบบจำลองผ่านทาง Microsoft Visual Basic Application ภายในโปรแกรม Microsoft Excel แล้วจึงติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปของโครงสร้างในแต่ละกรณีที่หน้าตัดของแต่ละกลุ่มมีขนาดต่าง ๆ ผ่านการวิเคราะห์ผลใน SAP2000 โดยการสื่อสารระหว่าง Microsoft Visual Basic Application และ SAP2000 ได้มีตัวเชื่อมหรือตัวแปรสารเรียกว่า Open Application Programming Interface (OAPI) ซึ่ง OAPI จะเป็นตัวช่วยดึงข้อมูลผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างใน SAP2000 ออกมา กระบวนการทำงานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กระบวนการการทำงานของการวิเคราะห์โครงสร้างนั่งร้านเหล็ก

เราได้แบ่งกลุ่มของโครงสร้างออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของคาน (Gr.1), กลุ่มของเสา (Gr.2) และกลุ่มของค้ำยัน (Gr.3) แสดงดังรูปที่ 6 กำหนดน้ำหนักบรรทุกและคุณสมบัติวัสดุต่าง ๆ เราได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างนั่งร้านเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000 แล้วทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นตรง

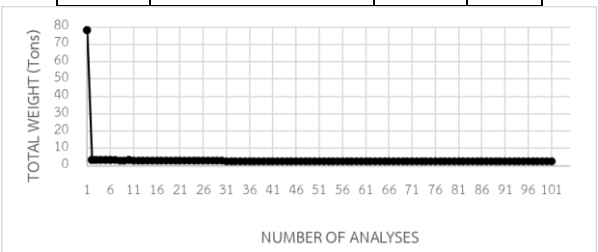


รูปที่ 6 การแบ่งกลุ่มของโครงสร้างนั่งร้านเหล็ก

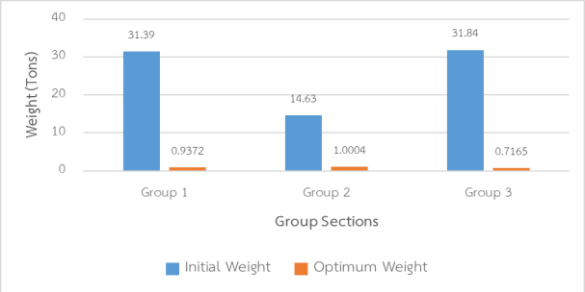
เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อออกแบบโครงสร้างนั่งร้านเหล็กที่เหมาะสมในการใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ได้ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 7-9 ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหน้าตัดของโครงสร้างนั่งร้านเหล็ก

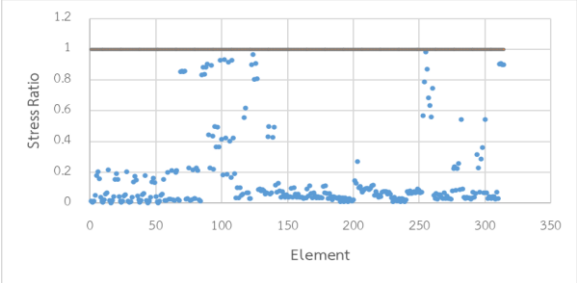
Group	Name of Section	Ratio	S_{Max}
Gr.1	CHS42,7(1.1/4")x2,5	0.62	1.0
Gr.2	CHS101,6(3.1/2")x3,2	0.04	0.7
Gr.3	CHS60,5(2")x2,3	0.78	0.9



รูปที่ 7 การลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของการวิเคราะห์โครงสร้าง



รูปที่ 8 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของวัสดุที่ใช้ในกลุ่มต่าง ๆ



รูปที่ 9 อัตราส่วนความเค้นในชิ้นส่วนโครงสร้าง

ด้วยการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีการ CLPSO จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้โปรแกรมคำนวณเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยวนรอบการวิเคราะห์ทั้งหมด 100 ครั้ง พบว่าน้ำหนักของโครงสร้างนั่งร้านเหล็กลดลงอย่างมีนัยสำคัญ วัสดุที่นำมาใช้ในส่วนของโครงสร้างกลุ่มคาน โครงสร้างกลุ่มเสา และโครงสร้างของค้ำยันคือเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็น CHS42,7(1.1/4")x2,5 , CHS101,6(3.1/2")x3,2 และ CHS60,5(2")x2,3 ตามลำดับ จากกราฟ Stress Ratio ได้ว่าค่าของความเค้นสูงสุดและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดของชิ้นส่วนในแต่ละกลุ่มอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าว เป็นการออกแบบโครงสร้างนั่งร้านเหล็กที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ออกแบบหน้าตัดโครงสร้างนั่งร้านเหล็กสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า การวิเคราะห์ผลด้วยอัลกอริทึม CLPSO จะช่วยจัดหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เหมาะสมได้โดยการพิจารณาตัวแปรหน้าตัดที่กำหนดแบบไม่ต่อเนื่อง ผลที่ได้จะลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดตามจำนวนรอบการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอัลกอริทึม CLPSO สามารถเขียนได้และใช้ผ่านการสื่อสารกันระหว่างภาษาทางคอมพิวเตอร์ภายใน Microsoft Visual Basic Application และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอเลเมนต์ (FEM) ด้วยฟังก์ชัน OAPI ซึ่งการสื่อสารระหว่างกันด้วยฟังก์ชัน OAPI ดังกล่าว จะช่วยทำให้เราเข้าถึงแบบจำลองในโปรแกรม SAP2000 และติดตามผลการวิเคราะห์และออกแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ได้อย่างง่าย ทั้งยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขข้อมูลต่าง ๆ ในแบบจำลองและสามารถกำหนดการวนซ้ำการคำนวณวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่ดีที่สุด

ดังนั้นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างนั่งร้านเหล็กด้วยการวิเคราะห์ออกแบบวนซ้ำโดยมีเงื่อนไขกำลังของวัสดุและความสามารถในการนำไปใช้งานตามข้อกำหนดของ AISC-LRFD ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดด้วยวิธี CLPSO ซึ่งถูกใช้วิเคราะห์พร้อมกับการวิเคราะห์โครงสร้างขั้นสูง ได้แก่ การพิจารณาโครงสร้างแบบ Second-Order Geometry Effects แบบไม่เชิงเส้นตรง จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าน้ำหนักรวมของโครงสร้างที่ได้หลังจากการออกแบบมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักการออกแบบเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าผลของการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างด้วยวิธี CLPSO เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาที่มีตัวแปรไม่ต่อเนื่อง และการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

ในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต อัลกอริทึมที่ใช้สามารถพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ในด้านของความแม่นยำและความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบได้ นอกจากนั้นในการพิจารณาส่วนของข้อต่อของโครงสร้างสามารถทำได้โดยการปรับวิธีวิเคราะห์และกำหนดตัวแปรต่าง ๆ เพิ่มเติม และการแบ่งกลุ่มของโครงสร้างที่มากขึ้น จะส่งผลให้ได้ผลการวิเคราะห์หน้าตัดที่แตกต่างกันมากขึ้น ในโครงสร้างนั่งร้านเหล็กนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้โดยการถอดส่วนค้ำยันออกบางส่วน และการวิเคราะห์แบบไดนามิกเพื่อพิจารณาโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวหรืออื่น ๆ เพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจในการทำงานตั้งแต่แรกเริ่มตลอดจนถึงการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เสมอมา รวมถึงบุคลากรอื่นที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวก พี่ Thu Huynh Van นิสิตปริญญาเอกสาขาโครงสร้าง ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลต่าง ๆ และให้คำแนะนำในการปรับแก้งานวิจัย ทั้งในเวลาราชการและนอกเวลาราชการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] มหาดไทย, กระทรวง. กรมโยธาธิการและผังเมือง, “นั่งร้าน”, *มาตรฐานการติดตั้งและการตรวจสอบโครงร้างนั่งร้าน.*, 2562, หน้า 10-15.

[2] สิทธิชัย แสงอาทิตย, “ทฤษฎีโครงสร้างชั้นสูง”, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545, หน้า5-1 ถึง 5-4.

[3] American Institute of Steel Construction (AISC), “Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)”, 2010.

[4] Thu Huynh Van and Sawekchai Tangaramvong, “ANALYSIS AND OPTIMUM DESIGN OF COLD-FORMED STEEL ARCH STRUCTURES”, Chulalongkorn University, 2018.

[5] Jing J. Liang, A. Kai Qin, Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, and S. Baskar. “Evaluation of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer”. Nanyang Technological University, 2006.

[6] Ruben E. Perez and Kamran Behdinan. “Particle Swarm Optimization in Structural Design”. *Swarm Intelligence.* pp. 373-394. University of Toronto, n.d.