

ระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคสำหรับการกำหนดตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุด
ในการออกแบบบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูป



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Particle swarm optimization approach for minimum connection placement
in prefabricated modular housing design



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคสำหรับการกำหนดตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุด ในการออกแบบบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูป
โดย	น.ส.ฉมลวรรณ สุวรรณศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนต์ไชย ธนาพรวิจิตรดี)

ฉมฉวรรม สวรรมศรึ : ระเป็ยบวธีการเรียนรูกุ่มอนุภาคสำหรับการกำหนดตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุด ในการออกแบบบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูป. (Particle swarm optimization approach for minimum connection placement in prefabricated modular housing design) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เสวกชัย ตั่งอร่ามวงค์

ที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปได้รับความนิยมมากขึ้นในหลายประเทศด้วยการก่อสร้างที่รวดเร็วและประหยัดพื้นที่ที่ใช้สำหรับเตรียมการก่อสร้าง เทคโนโลยีการก่อสร้างสำเร็จรูปนี้มีข้อได้เปรียบในด้านความสามารถในการจัดเก็บและสามารถขนส่งไปยังสถานที่ต่างๆ ได้ง่าย ด้วยความหลากหลายของโครงสร้างโครงข้อแข็งทั่วไป ที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปจะประกอบด้วยชุดแผงเหล็กสำเร็จรูปน้ำหนักเบาที่มีการออกแบบการเชื่อมต่ออย่างแม่นยำ (เนื้อตและสลักเกลียว และ/หรือ การเชื่อม) ต้นทุนการก่อสร้างและระยะเวลาที่ใช้ในการประกอบติดตั้งมีความสัมพันธ์กับจำนวนของการเชื่อมต่อที่มีการออกแบบไว้ ในงานวิจัยนี้นำเสนอระเบียบวิธีการเรียนรูกุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization: CLPSO) ในการหาตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต่อการประกอบที่อยู่อาศัยโมดูลาร์แบบกึ่งแยกส่วนภายใต้แรงกระทำที่กำหนดและข้อกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ AISC-LRFD การเชื่อมต่อต่างๆ ใช้การผสมผสานรูปแบบการเชื่อมต่อที่ถูกออกแบบไว้หารูปแบบโดยกำหนดตำแหน่งที่เป็นไปได้ไว้ล่วงหน้า พฤติกรรมของโครงสร้างจะถูกอธิบายด้วยเงื่อนไขความสอดคล้องของระยะกระจัดที่เปลี่ยนไปของแต่ละองศาเสรี (ในระบบสามมิติ) ที่เชื่อมระหว่างจุดที่เชื่อมต่อแต่ละแผงเหล็ก ระเบียบวิธี CLPSO จะกำหนดตัวแปรเงื่อนไขของการเชื่อมต่อที่จุดต่างๆ ทั้งหมด และทำการหาคำตอบการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อในตำแหน่งต่างๆ ที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่ต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำที่สุด การประยุกต์ใช้ CLPSO ดังกล่าวจะนำเสนอผ่านแบบบ้านพักอาศัยของการเคหะแห่งชาติ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370357021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Comprehensive learning particle swarm optimization; Minimum connection placement; Prefabrication; Steel lightweight structures; Modular housing.

Thamonwan Suwannasri : Particle swarm optimization approach for minimum connection placement in prefabricated modular housing design. Advisor: Assoc. Prof. SAWEKCHAI TANGARAMVONG

The modular housing has increasingly gained the popularity among communities in views of its fast construction and minimum site preparation. The prefabrication technology makes it possible for the easy storage and mass logistics to construction sites. At variance with typical frames, the modular house composes a series of prefabricated lightweight steel panels that are assembled through the precisely designed connections (nuts and bolts and/or welding). The total cost and assembly time are proportional to the number of connections predefined. This paper, therefore, proposes a so-called Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) method to determine the minimum placement of connections necessarily required for the assembly of semi-detached modular houses under applied external forces. The limit state design criteria comply with AISC-LRFD specifications. The connections adopt the combination of five specially designed nuts-and-bolts patterns, where their possible locations are predefined. Their behaviors are described by the compatibility conditions of displacements at some specific degrees of freedom (in 3D space) associated with interface nodes of steel panels. The proposed CLPSO approach assigns the binary variables to all connection locations and efficiently determines their optimal placement leading to the minimum construction cost. The applications of the proposed CLPSO method are illustrated through the realistic design of public residential houses managed by National Housing Authority of Thailand.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์.ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอย่างสูงในการให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมถึงการติดตามการทำงานตั้งแต่แรกเริ่มตลอดจนถึงการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เสมอมา ผู้วิจัยขอขอบคุณในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรอื่นที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวก พี่อานัติ สุธา และพี่ Thu Huynh Van นิสิตปริญญาเอกสาขาโครงสร้าง ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรม วิเคราะห์ผลต่างๆ และให้คำแนะนำในการปรับแก้งานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนการศึกษาศึกษาวิศวกรรมโยธา 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวถึง ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา ทั้งในเวลาราชการและนอกเวลาราชการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

ธมลวรรณ สุวรรณศรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ระบบการก่อสร้างอาคารระบบโมดูลาร์.....	4
2.1.1 โครงข้อแข็งเหล็กในโครงสร้างโมดูลาร์.....	6
2.2 ระบบการเชื่อมต่อสำหรับโครงสร้างระบบโมดูลาร์	7
2.2.1 การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล (Inter-Module Connection).....	8
2.2.2 การเชื่อมต่อภายในโมดูล (Intra-Module Connection).....	12
2.2.3 การเชื่อมต่อโมดูลกับฐานราก (Module to Foundation)	12
2.3 การออกแบบข้อต่อสำหรับโครงสร้างระบบโมดูลาร์.....	12

2.3.1 คุณสมบัติด้านรูปร่างและการออกแบบชิ้นส่วนข้อต่อ.....	13
2.3.2 แบบจำลองการเชื่อมต่อเพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลข	15
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	17
2.4.1 วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method)	17
2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการรวมสติฟเนสโดยตรงแบบเชิงเส้น (Linear analysis)	19
2.4.3 รูปแบบการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเส้นตรง	23
2.5 การออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม (Structural Optimization).....	27
2.5.1 Overview	27
2.5.2 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับพิจารณาการเชื่อมต่อของโครงสร้างโครงข้อแข็ง	28
2.5.3 วิธีการเชิงกำหนดและวิธีการค้นหาแบบสุ่มตามโอกาส (Deterministic Methods and Stochastic Search Methods).....	29
2.5.4 อัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติก.....	29
2.5.5 Particle Swarm Optimization: PSO	30
2.5.6 Comprehensive Particle Swarm Optimization: CLPSO	33
บทที่ 3 การกำหนดเงื่อนไข และขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหา	35
3.1 ที่พักอาศัยระบบพาเนล (Panel Systems) โครงเหล็กกล้าวาล์วไนซ์	35
3.2 ออกแบบประเภทของการเชื่อมต่อเบื้องต้น	36
3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
3.3.1 ชนิดของไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
3.3.2 Boundary Conditions.....	45
3.3.3 ขนาดของโครงสร้างบ้านพักอาศัยระบบพาเนลผนังโครงเหล็ก	46
3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	47
3.3.5 คุณสมบัติของวัสดุ	47

3.3.6	แรงกระทำบนโครงสร้าง	48
3.4	การวิเคราะห์โครงสร้างชั้นสูงของบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปเพื่อหาคำตอบการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อที่เหมาะสม	49
3.5	การออกแบบการแก้ปัญหาด้วย อัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม Comprehensive Particle Swarm Optimization: CLPSO	49
3.6	การกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม	52
3.6.1	การออกแบบตัวแปร	57
3.6.2	การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย	57
3.6.3	เงื่อนไขข้อจำกัด	58
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์การวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม	60
4.1	กระบวนการวิเคราะห์ออกแบบสำหรับแก้ไขปัญหาการวางตำแหน่งข้อต่อที่เหมาะสมสำหรับบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป	60
4.2	ผลการกำหนดการวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดสำหรับการออกแบบบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป	61
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	73
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 Connection Type Summary (Lacey, Chen et al. 2018).....	7
ตารางที่ 2 การตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับแรงกระทำใน DOFs สำหรับการเชื่อมต่อใน แนวตั้ง (Chua, Liew et al. 2020)	9
ตารางที่ 3 การตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับแรงกระทำใน DOFs.....	10
ตารางที่ 4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่างโมดูล (Lacey, Chen et al. 2018).....	11
ตารางที่ 5 การทำงานของการเชื่อมต่อแต่ละประเภท	36
ตารางที่ 6 เงื่อนไขการเชื่อมต่อแต่ละ DOFs ของการเชื่อมต่อที่ขั้วต่อ.....	41
ตารางที่ 7 เงื่อนไขการเชื่อมต่อลักษณะต่างๆ.....	42
ตารางที่ 8 คุณสมบัติของวัสดุ (DuraGal March 2002)	47
ตารางที่ 9 การรวมแรงกรณีต่างๆ.....	49
ตารางที่ 10 ต้นทุนของการเชื่อมต่อลักษณะต่างๆ	56
ตารางที่ 11 ความสามารถในการรับแรงของวัสดุที่กำหนดสำหรับหน้าตัดโครงสร้าง (Mechanical Engineer Partnership).....	58
ตารางที่ 12 สรุปผลการวิเคราะห์การวางตำแหน่งของข้อต่อในโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูป.....	69
ตารางที่ 13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์.....	70

สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 หน่วยปริมาตรโมดูลโครงเหล็ก (Liew, Chua et al. 2019)	5
รูปที่ 2 ระบบโมดูลโครงเหล็ก (Gatheeshgar, Poologanathan et al. 2021)	5
รูปที่ 3 ประเภทการเชื่อมต่อในโครงสร้างระบบโมดูลาร์	7
รูปที่ 4 (ก) ข้อต่อแบบเดิม (ข) ข้อต่อระหว่างโครงสร้างโมดูลเหล็ก	13
รูปที่ 5 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมดูล	14
รูปที่ 6 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ต้องการพื้นที่ทำงานเพื่อเชื่อมต่อ	14
รูปที่ 7 แบบจำลองการเชื่อมต่อเพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลข	16
รูปที่ 8 Nodal displacements ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสามมิติ (Katsikadelis 2020)	18
รูปที่ 9 ระบบพิกัดเฉพาะขององค์ประกอบ (วิริธเกยูรวงศ์ 2543)	20
รูปที่ 10 ระบบพิกัดรวมขององค์ประกอบ (วิริธเกยูรวงศ์ 2543)	20
รูปที่ 11 แกนต่างๆ และแรงที่กระทำต่อองค์ประกอบในระบบพิกัดรวม (วิริธเกยูรวงศ์ 2543)	21
รูปที่ 12 ระดับการวิเคราะห์โครงสร้าง (Wood 1980)	23
รูปที่ 13 ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมในการปรับโครงสร้างอย่างเหมาะสม (Sigmund 2000)	28
รูปที่ 14 แผนผังการแก้ปัญหาอย่างเหมาะสมและตัวอย่างอัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติก (Mutegi and Nnamdi 2022)	30
รูปที่ 15 การอัปเดตตำแหน่ง และความเร็ว (Perez and Behdinin 2007)	32
รูปที่ 16 ตัวอย่างของที่พักอากาศสำเร็จรูประบบพานาเลโครงเหล็กกลวไนซ์	35
รูปที่ 17 ประเภทของการเชื่อมต่อ	36
รูปที่ 18 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE A	37
รูปที่ 19 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE B	38
รูปที่ 20 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE C	38

รูปที่ 21 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE D	39
รูปที่ 22 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE E.....	39
รูปที่ 23 การผสมผสานการใช้งานของการเชื่อมต่อ Type A ถึง E	40
รูปที่ 24 ตัวอย่างจำลอง Zero-length line element ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเบื้องต้น.....	40
รูปที่ 25 ตัวอย่างการเชื่อมต่อสองโหนดด้วย Zero-length line element และเงื่อนไขการเชื่อมต่อ TYPE A ผสม TYPE D	41
รูปที่ 26 แบบจำลองที่พักอาศัยสำเร็จรูประบบพาเนลโครงเหล็กกล้าวาล์นซ์.....	44
รูปที่ 27 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองหนึ่งในสี่ของบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป.....	45
รูปที่ 28 แบบจำลองด้านหน้าบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป.....	45
รูปที่ 29 แบบจำลองด้านข้างของบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป.....	45
รูปที่ 30 โมดูลพาเนลผนังสำเร็จรูปของโครงสร้าง	46
รูปที่ 31 ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลผนังเริ่มต้นของที่พักอาศัยสำเร็จรูป	46
รูปที่ 32 Flowchart of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) (Cao, Zhang et al. 2018).....	51
รูปที่ 33 ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อให้กับแต่ละโหนด	52
รูปที่ 34 การแบ่งส่วนพิจารณาเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ	53
รูปที่ 35 แสดงการกำหนดประเภทย่อยของรูปแบบการเชื่อมต่อ.....	53
รูปที่ 36 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ: กรณีที่ 1... 54	54
รูปที่ 37 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ: กรณีที่ 2... 55	55
รูปที่ 38 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ: กรณีที่ 3... 55	55
รูปที่ 39 กระบวนการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์อย่างเหมาะสม	61
รูปที่ 40 แบบจำลองโครงสร้างบ้านพักโมดูลาร์สำเร็จรูปด้วยการกำหนดการเชื่อมต่อที่มุมของโมดูล	61
รูปที่ 41 แบบจำลองแสดงผลวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 1	63
รูปที่ 42 การลู่เข้าหาคำตอบและแบบวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 1	63

รูปที่ 43 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของการเชื่อมต่อที่ใช้ในแต่ละประเภท: กรณีที่ 1..... 63

รูปที่ 44 ผลการตรวจสอบกำลังขึ้นส่วนโครงสร้าง: กรณีที่ 1 64

รูปที่ 45 ผลการตรวจสอบการกระจัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง: กรณีที่ 1..... 64

รูปที่ 46 แบบจำลองแสดงผลวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 2 65

รูปที่ 47 การลู่เข้าหาคำตอบและแบบวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 2 65

รูปที่ 48 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของการเชื่อมต่อที่ใช้ในแต่ละประเภท: กรณีที่ 2..... 65

รูปที่ 49 ผลการตรวจสอบกำลังขึ้นส่วนโครงสร้าง: กรณีที่ 2 66

รูปที่ 50 ผลการตรวจสอบการกระจัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง: กรณีที่ 2..... 66

รูปที่ 51 แบบจำลองแสดงผลวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 3 67

รูปที่ 52 การลู่เข้าหาคำตอบและแบบวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 3 67

รูปที่ 53 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของการเชื่อมต่อที่ใช้ในแต่ละประเภท: กรณีที่ 3..... 67

รูปที่ 54 ผลการตรวจสอบกำลังขึ้นส่วนโครงสร้าง: กรณีที่ 3 68

รูปที่ 55 ผลการตรวจสอบการกระจัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง: กรณีที่ 3..... 68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การพัฒนารูปแบบการก่อสร้างที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน ด้วยข้อได้เปรียบด้านการก่อสร้างที่รวดเร็ว การจัดการพื้นที่สำหรับการก่อสร้างได้มีประสิทธิภาพ ประหยัดต้นทุน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีการก่อสร้างด้วยวัสดุสำเร็จรูป (Prefabrication) ส่งเสริมการก่อสร้างที่อยู่ที่มีความต้องการกำลังผลิตจำนวนมาก (Mass Production) การควบคุมการผลิตที่ได้มาตรฐาน (Standardization) และความแม่นยำ (Precision) ของชิ้นส่วนประกอบอาคาร โดยระบบโมดูลาร์ (Modular system) เป็นระบบที่ใช้หลักการพิกัดแผนผังที่ได้รับการออกแบบหน่วยพิกัดมูลฐาน (Basic Modular) และขนาดมาตรฐานของวัสดุที่ผลิตทางอุตสาหกรรม โดยพิกัดแผนผังโมดูลมีค่าเป็นผลคูณของหน่วยพิกัดมูลฐานในลักษณะของหน่วยคูณพิกัดโมดูล (Multi Modular) การออกแบบลักษณะนี้ช่วยให้สามารถวางแผนการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปจากโรงงานและขั้นตอนการประกอบติดตั้งชิ้นส่วนประกอบอาคารต่างๆ ได้ สามารถลดระยะเวลาและจำนวนแรงงานที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร รวมถึงลดการสูญเสียของวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการก่อสร้างอาคาร

การพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างอาคารด้วยวัสดุสำเร็จรูประบบโมดูลาร์มีการพัฒนาด้านความสามารถในการขนส่งด้วยรถบรรทุกคอนเทนเนอร์ขนาดมาตรฐาน เพื่อให้สามารถขนส่งชิ้นส่วนประกอบอาคารที่ผลิตสำเร็จรูปจากโรงงานไปสู่สถานที่ก่อสร้างสำหรับการประกอบติดตั้งให้ได้ปริมาณชิ้นส่วนโครงสร้างจำนวนมากขึ้น นอกจากนี้เทคโนโลยีการก่อสร้างระบบนี้จำเป็นต้องพิจารณาและวิเคราะห์ชิ้นส่วนข้อต่อที่มีจำนวนมากขึ้นจากการแยกวัสดุโครงสร้างเป็นระบบพิกัดแผนผังโมดูลย่อย ดังนั้นเพื่อยังคงข้อได้เปรียบของการเลือกใช้เทคโนโลยีการก่อสร้างนี้ ผู้นำของชิ้นส่วนโครงสร้าง ขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้าง และการออกแบบการเชื่อมต่ออย่างแม่นยำ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบโครงสร้างระบบโมดูลาร์สำเร็จรูป

การออกแบบโครงสร้างที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป ต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยส่วนมากของโครงการคือต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูป และต้นทุนด้านแรงงานในการประกอบติดตั้ง ดังนั้นการ

เลือกหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างอย่างเหมาะสม การออกแบบให้ชิ้นส่วนโครงสร้างและลักษณะข้อต่อมีรูปแบบที่ซ้ำกัน จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับต้นทุนของโครงการ

ในการออกแบบโครงสร้างที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปที่มีน้ำหนักเบา ผู้ออกแบบอาจทำการสุ่มเลือกหน้าตัดของชิ้นส่วนและการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างชิ้นส่วนโมดูลแล้วทำการวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างนั้นอาจมีจำนวนการเชื่อมต่อที่มากเกินไปจนการใช้งานจริง ซึ่งทำให้เกิดเป็นค่าใช้จ่ายวัสดุส่วนเกิน เพื่อลดปริมาณวัสดุเชื่อมต่อส่วนเกินนี้ แนวคิดการใช้อัลกอริทึมซึ่งเป็นการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) จึงเป็นวิธีที่นำเสนอมาใช้ออกแบบได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้การกำหนดตำแหน่งของการเชื่อมต่อเป็นปัญหาแบบไม่ราบเรียบ (Non-Smooth Problem) การเลือกใช้อัลกอริทึมจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อออกแบบหาตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต่อการประกอบที่อยู่อาศัยโมดูลาร์แบบกึ่งแยกส่วน ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดและข้อกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ AISC-LRFD

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต่อการประกอบที่อยู่อาศัยโมดูลาร์แบบกึ่งแยกส่วน ภายใต้แรงกระทำที่กำหนด และสอดคล้องกับมาตรฐาน AISI S100-2016 & ANSI/AISC 360-16
2. เพื่อหาคำตอบของการวางตำแหน่งข้อต่อที่เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง (Discrete Function) อย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพ
3. เพื่อใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) และเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยประมาณ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผ่านแบบบ้านพักอาศัยของการเคหะแห่งชาติ โดยส่วนประกอบของชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นวัสดุชนิดเหล็กกล่อง (Rectangular Hollow Section)
2. การวิเคราะห์โครงสร้างที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สอดคล้องตามมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC-LRFD) 360-16 และ American Iron and Steel Institute (AISI-LRFD) S100-16

3. พิจารณาพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) และผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นแบบเชิงเส้น (Geometric Linearity Analysis)
4. ไม่คำนึงผลจากความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และความโค้งงอ (Crookedness)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาเทคโนโลยีการก่อสร้างอาคารด้วยวัสดุสำเร็จรูประบบโมดูลาร์ ศึกษารูปแบบและเทคนิคการเชื่อมต่อในระบบการก่อสร้างแบบโมดูลาร์

ศึกษาแบบโครงสร้างตัวอย่างของการเคหะแห่งชาติ โดยแบบได้ระบุหน้าตัดที่ใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมด และได้มีการออกแบบลักษณะของแต่ละโมดูลแผงผนังเหล็กแล้ว ทำการศึกษาและออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลแผงผนังเหล็กเบื้องต้น เพื่อกำหนดรูปแบบและประเภทของการเชื่อมต่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต่อการประกอบที่อยู่อาศัยดังกล่าว
2. พิจารณาเงื่อนไขการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ และการผสมผสานการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ

นำรูปแบบการเชื่อมต่อที่ได้ออกแบบไว้มากำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่หนดโดยแสดงเป็นการเชื่อมโยงในแต่ละองศาเสรี (DOFs) ของการเชื่อมต่อแต่ละประเภท และนำมากำหนดเป็นตัวแปรเพื่อใช้ทดสอบการทำงานของ การเชื่อมต่อ
3. ออกแบบตัวแปรสำหรับกำหนดตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เป็นไปได้

ออกแบบกรณีการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ ที่เป็นไปได้ในแต่ละกรณี โดยคำนึงถึงความต้องการการผลิตชิ้นส่วนแผ่นผนังเหล็กที่มีรูปแบบซ้ำกัน
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วย PYTHON และเขียนโปรแกรมตามที่ออกแบบไว้
5. ทำการทดสอบเงื่อนไขการออกแบบต่างๆ ผ่านโปรแกรมที่เขียนด้วย PYTHON
6. ประเมินและตรวจสอบผลลัพธ์ วิเคราะห์และสรุปผลการออกแบบการวางตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เหมาะสม

ผลลัพธ์แสดงเป็นการทำงานของ การเชื่อมต่อแต่ละประเภทสำหรับตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขของแต่ละกรณี นำผลลัพธ์มาตรวจสอบจำนวนการเชื่อมต่อแต่ละประเภทและตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานอีกครั้ง แล้วแสดงผลเป็นตารางเปรียบเทียบในแต่ละกรณีศึกษา

บทที่ 2

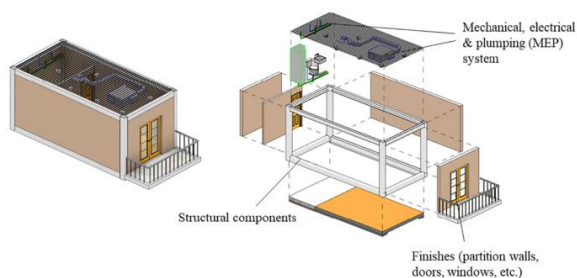
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการก่อสร้างอาคารระบบโมดูลาร์

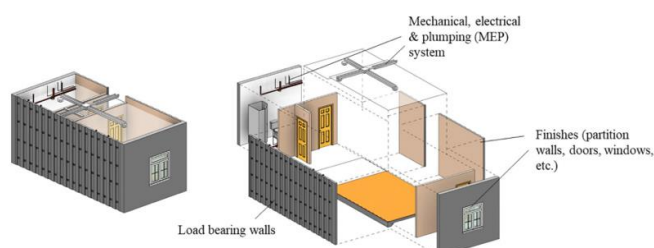
เทคโนโลยีการก่อสร้างในรูปแบบโมดูลาร์ของโครงสร้างเหล็กมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของการก่อสร้างอาคาร ทั้งด้านความปลอดภัย ความแข็งแรงของโครงสร้าง ความสามารถในการต้านทานความร้อน การใช้วัสดุน้ำหนักเบา ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการลดการสูญเสียของทรัพยากรระหว่างดำเนินการก่อสร้าง โครงสร้างอาคารแบบโมดูลาร์แยกส่วนได้รับความสนใจและมีการพัฒนามากขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพของโครงสร้างขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อภายในโมดูล ตลอดจนการพิจารณาและวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างต่อเงื่อนไขการรับแรงต่างๆ ตามมาตรฐานการออกแบบในปัจจุบัน

การก่อสร้างรูปแบบโมดูลาร์มีความแตกต่างจากรูปแบบการก่อสร้างทั่วไปเนื่องจากการก่อสร้างนอกสถานที่ (Off-site construction) ที่มีการควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยโรงงาน และจะดำเนินการเฉพาะการประกอบติดตั้งและการตกแต่งที่สถานที่ก่อสร้าง ทั้งนี้รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ เป็นส่วนสำคัญของการออกแบบระบบโมดูลาร์ที่ผู้ออกแบบจำเป็นต้องออกแบบให้มีความแม่นยำเพื่อให้โครงสร้างสามารถประกอบติดตั้งได้อย่างถูกต้อง ด้วยการดำเนินการรูปแบบดังกล่าวทำให้กระบวนการก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อได้เปรียบของการก่อสร้างรูปแบบโมดูลาร์แบบแยกส่วนคือการก่อสร้างสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว มีคุณภาพที่ดีอย่างสม่ำเสมอ สามารถลดต้นทุนแรงงานได้ กระบวนการก่อสร้างมีความปลอดภัยและยั่งยืน วัสดุที่ใช้สำหรับเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถเป็นได้ทั้งเหล็ก ไม้ คอนกรีต หรือวัสดุอื่นๆ อย่างไรก็ตามโครงสร้างเหล็กเป็นตัวเลือกที่มีข้อได้เปรียบด้านความแข็งแรง ความยั่งยืน และมีน้ำหนักเบา (Gatheeshgar, Poologanathan et al. 2021)

โดยทั่วไปหน่วยโมดูลสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบตามการพิจารณาการรับแรงอัด ได้แก่ หน่วยโมดูลเสามุม และหน่วยโมดูลผนังรับน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 1 สำหรับหน่วยโมดูลเสามุม น้ำหนักบรรทุกจะถ่ายโอนผ่านเสามุมและเสาภายในโครงสร้าง สำหรับหน่วยโมดูลผนังรับน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกจะถูกถ่ายโอนผ่านโครงสร้างแผ่นผนัง ซึ่งมักออกแบบให้มีค้ำยันภายในโครงผนังเป็นระยะ 300 มิลลิเมตร หรือ 600 มิลลิเมตร (Lawson, Ogden et al. 2012)



(ก) ระบบโมดูลาร์ประเภทเสามุม

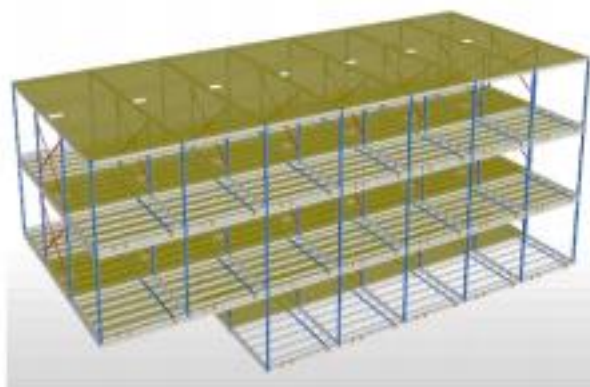


(ข) ระบบโมดูลาร์ประเภทผนังรับน้ำหนัก

รูปที่ 1 หน่วยปริมาตรโมดูลโครงสร้างเหล็ก (Liew, Chua et al. 2019)

นอกจากนี้ยังมีหน่วยโมดูลประเภทอื่นๆ เช่น หน่วยโมดูลแผ่นผนัง หน่วยโมดูลทางลาด หน่วยโมดูลบันได และอื่นๆ แต่ทั่วไปจะเป็นโมดูลสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน่วยโมดูลเสามุมจะมีข้อได้เปรียบด้านพื้นที่ โดยสามารถออกแบบให้มีพื้นที่เปิดโล่งได้อย่างกว้างขวาง หน่วยโมดูลต่างๆ สามารถนำมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นอาคารที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นได้ทั้งในแนวระดับและแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2 โดยการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลช่วยให้สามารถวางหน่วยปริมาตรโมดูลในแนวตั้งได้สูงถึง 25 ชั้นโดยเพิ่มความแข็งแรงของอาคารด้วยโครงสร้างแกนกลางที่ทำจากคอกกริตหรือเหล็ก (Lawson, Ogden et al. 2012)

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2 ระบบโมดูลโครงสร้างเหล็ก

(Gatheeshgar, Poologanathan et al. 2021)

2.1.1 โครงข้อแข็งเหล็กในโครงสร้างโมดูลาร์

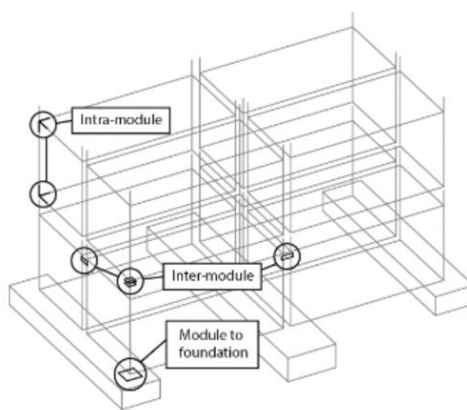
ข้อได้เปรียบหลักของการก่อสร้างอาคารแบบโมดูลาร์คือสามารถผลิตสำเร็จจากโรงงานได้ และโมดูลโครงสร้างถูกออกแบบให้สามารถประกอบติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็วที่สถานที่ก่อสร้าง เหล็กนับเป็นตัวเลือกวัสดุที่ดีในการก่อสร้างแบบแยกส่วน เนื่องจากเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโมดูลสำเร็จรูปที่โรงงานและมีน้ำหนักเบาสะดวกต่อการขนส่งไปยังไซต์งานเพื่อประกอบติดตั้ง เหล็กมวลเบาเหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอาคารในแนบราบ (Liew, Chua et al. 2019)

การก่อสร้างระบบโมดูลาร์ด้วยโครงสร้างโครงเหล็กมีข้อดีดังนี้:

1. ระยะเวลาการก่อสร้างและจำนวนแรงงานที่ใช้ลดลง
อาคารโมดูลาร์โครงเหล็กสามารถลดระยะเวลาและจำนวนแรงงานที่ใช้ในไซต์งานได้ เนื่องจากมีการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จจากโรงงาน เหลือเพียงงานประกอบติดตั้งที่ไซต์งาน จากงานวิจัยพบว่าอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 20-60% จากการก่อสร้างด้วยระบบการก่อสร้างนอกสถานที่ (Krug et al., 2013)
2. ชิ้นส่วนโครงสร้างมีคุณภาพที่ดีอย่างสม่ำเสมอ
โมดูลโครงเหล็กถูกผลิตสำเร็จรูปในโรงงานที่มีการควบคุมคุณภาพ จึงมีข้อดีด้านความแม่นยำ ความสามารถของวัสดุทั้งความทนทานในระยะยาว ทนความร้อนสูง และความแข็งแรงสูงเทียบกับน้ำหนัก และโครงสร้างโมดูลาร์โครงเหล็กสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างด้วยการผลิตโมดูลสำเร็จรูปที่มีลักษณะซ้ำกันที่ละจำนวนมากได้
3. การประกอบ การติดตั้ง และการรื้อถอนโครงสร้าง
การเชื่อมต่อแต่ละโมดูลโครงเหล็กสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วด้วยการเชื่อมต่อแบบสลักเกลียวและน็อต ทำให้อาคารที่ออกแบบในรูปแบบโมดูลาร์สามารถถอดประกอบและเคลื่อนย้ายไปยังสถานที่อื่นในภายหลังได้
4. ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงสร้างโมดูลาร์เหล็ก ไม้ และคอนกรีต พบว่าการรีไซเคิลโครงสร้างเหล็กสามารถประหยัดพลังงานในการก่อสร้างอาคารได้ 50-80% นอกจากนี้การใช้วัสดุเหล็กยังมีน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างเบากว่าประมาณ 20-35% เมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีต กล่าวคือการใช้เหล็กสามารถช่วยลดการสูญเสียวัสดุผ่านการก่อสร้างนอกสถานที่ได้ ซึ่งช่วยให้โครงสร้างมีความยั่งยืนโดยรวมมากขึ้น (Liew, Chua et al. 2019) (Kamali and Hewage 2016)

2.2 ระบบการเชื่อมต่อสำหรับโครงสร้างระบบโมดูลาร์

การเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบโครงสร้างโครงข้อแข็งมีความสำคัญต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างหรือเสถียรภาพของโครงสร้าง การเชื่อมต่อในระบบการก่อสร้างโมดูลาร์สามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่ การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล (Inter-module connection) การเชื่อมต่อภายในโมดูล (Intra-module connection) และการเชื่อมต่อโมดูลกับฐานราก (Module to foundation connection) แสดงดังรูปที่ 3 ตารางที่ 1 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการเชื่อมต่อแต่ละรูปแบบ (Lacey, Chen et al. 2018)



รูปที่ 3 ประเภทการเชื่อมต่อในโครงสร้างระบบโมดูลาร์

ตารางที่ 1 Connection Type Summary (Lacey, Chen et al. 2018)

Type	Sub-Type	Advantage	Disadvantage
Inter-module	Bolted	reduce workload	pulling force on the bolt may cause holes
	Welded	strong, no slip, flexible to weld	increase throughput, corrosive, indestructible
	Composite (Concrete-Steel)	strong, no slip, compact	increase the amount of work, cannot be dismantled
Intra-module	Bolted	various sizes, can be dismantled	Get less moment and spin, less toughness

Type	Sub-Type	Advantage	Disadvantage
	Welded	suitable for production in the factory	must be designed to bear axial moment and force
Module to foundation	Chain/cable/keeper plate	low cost	restrictions in low rise buildings, tensile requirements
	Site weld to base plate	stiff joints	increase throughput, steel may be damaged
	Base plate – cast in anchor bolts	durable	location of joints, erosion
	Base plate embedded in concrete	strong and high toughness	location of joints, increase the welding work





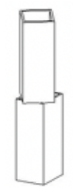
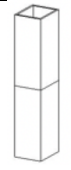
2.2.1 การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล (Inter-Module Connection)

การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การเชื่อมต่อในแนวนอนระหว่างสองโมดูลที่อยู่ติดกัน และการเชื่อมต่อในแนวตั้งระหว่างสองโมดูลที่ซ้อนกัน การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลโดยทั่วไปจะใช้การเชื่อมต่อแบบ Bolt-Nut เนื่องจากสามารถรองรับการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ซับซ้อนได้ดีกว่า และสามารถถอดประกอบและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเนื่องจากแต่ละโมดูลมีความเป็นอิสระต่อกัน องค์ประกอบของโครงสร้างส่วนต่างๆ ที่ออกแบบให้รับแรงจะต้องมีการเชื่อมต่อไม่ให้แยกจากกันภายใต้แรงกระทำที่กำหนด และเพื่อให้แรงกระทำต่างๆ ถูกถ่ายโอนระหว่างโมดูล แรงที่กระทำในองศาเสรีต่างๆ (Degree of Freedoms, DOFs) ต่อโหนดที่มีการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลสามารถแสดงการตอบสนองโครงสร้างได้ดังตารางที่ 2 สำหรับการเชื่อมต่อในแนวตั้งและตารางที่ 3 สำหรับการเชื่อมต่อในแนวนอน

การเชื่อมต่อในแนวตั้ง (Vertically Connection)

การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ซ้อนกัน เสาเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัด สามารถเพิ่มขึ้นส่วนแท่งเหล็กในเสาเพื่อให้ช่วยรับแรงดึงได้ การเชื่อมต่อแท่งเหล็กกับเสามีหลายวิธี เช่น การต่อแท่งเหล็กและเหล็กเส้นอัดแรง หรือการใช้เหล็กกล่อง หรือการใช้แกนเกลียว ในส่วนของการเชื่อมต่อในแนวตั้งนี้ ความแข็งแรงในการหมุนมีน้อยมากเนื่องจากผลจองการยึดในแนวแกน ในการรับแรงด้านข้างที่ทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างโมดูลด้านบนและด้านล่างจะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนข้อต่อ ตัวอย่างชิ้นส่วนเชื่อมต่อ เช่น Shear key หรือ Shear box (Chua, Liew et al. 2020)







ตารางที่ 2 การตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับแรงกระทำใน DOFs สำหรับการเชื่อมต่อในแนวตั้ง (Chua, Liew et al. 2020)

Rotation DOFs	Translation DOFs	Remark
 x-x rotation (major axis)	 x-direction shear	ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างระหว่างโมดูล
 y-y rotation (minor axis)	 y-direction shear	
 z-z rotation		เกิดจากตัวชิ้นส่วนโครงสร้าง ไม่ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างระหว่างโมดูล
	 z-direction axial	มีการถ่ายโอนแรงระหว่างโมดูล













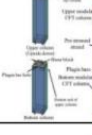
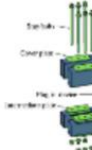
การเชื่อมต่อในแนวนอน (Horizontally Connection)

ในการต้านทานแรงกระทำด้วยการเชื่อมต่อในแนวนอน จะพิจารณาแรงตามแนวแกนและแรงเฉือนโดยพิจารณาความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของชิ้นส่วน การเชื่อมต่อมักใช้แบบสลักเกลียวเนื่องจากง่ายต่อการติดตั้งและถอดแยกชิ้นส่วน หรืออาจใช้แผ่นเหล็กประกบแล้วใช้สลักเกลียว หรือออกแบบข้อต่อรูปแบบใหม่

ตารางที่ 3 การตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับแรงกระทำใน DOFs สำหรับการเชื่อมต่อในแนวนอน (Chua, Liew et al. 2020)

Rotation DOFs	Translation DOFs
 <p>x-x rotation</p>	 <p>x-direction axial</p>
 <p>y-y rotation</p>	 <p>y-direction shear</p>
 <p>z-z rotation</p>	 <p>z-direction shear</p>
<p>Remark: เกิดจากความคลาดเคลื่อน ในการผลิต</p>	<p>Remark: เกิดจากการถ่ายโอนแรงกระทำ ด้านข้างระหว่างโมดูลที่อยู่ติดกัน</p>

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่างโมดูล (Lacey, Chen et al. 2018)

Type	Illustration	Description	Numerical / Experimental Study
HC		Tie plate, connecting hollow or open steel section columns	-
HC		In-situ concrete encased bolted cleat, connecting open steel section beams	-
HC		Bolted side plate, connecting hollow steel sections (HSS)	Numerical – Load-displacement (F-d) and moment-rotation (M-θ)
VC		Site weld end plate (one side), connecting HSS	-
VC		Bolted end plate, connecting HSS with access hole, or open angle section columns	-
VC		Lifting plate shear key, connecting HSS	-
VC		Bolted connection, connecting open steel section beams	Numerical – F-d in 1-direction (compression) and M-θ in 2-directions
VC		Bolted end plate (bolts on two sides), connecting HSS	Numerical – F-d and M-θ
VC/HC		Complex bolted end plate, connecting HSS	Numerical and experimental – F-d in 1-direction (shear)
VC/HC		Bolted connection plate, connecting HSS	Numerical – M-θ in 1-direction, cyclic loading
VC/HC		Steel bracket welded to corner columns	Numerical and experimental – Shear and simply supported
VC/HC		Steel bracket, bolted or welded to floor and ceiling beams	Numerical and experimental – M-θ in 1-direction, cyclic loading
VC/HC		Pre-tensioned connection of columns (Composite steel-concrete)	Numerical and experimental – Simply supported, static and cyclic loading
VC/HC		Bolted interior steel connection	Numerical and experimental – Lateral loading of beam-column assembly, static and cyclic loading

2.2.2 การเชื่อมต่อภายในโมดูล (Intra-Module Connection)

การเชื่อมต่อภายในโมดูลมักใช้วิธีการเชื่อมและแบบสลักเกลียว หรืออาจใช้เป็นสลักเกลียวร่วมกับแผ่นเหล็กและเหล็กฉากหรือแผ่นเหล็กทาบ อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อภายในโมดูลต้องพิจารณาความสามารถในการหมุนและความเหนียวของการเชื่อมต่อนั้น การเชื่อมต่อสามารถเสริมความแข็งแรงด้วยการเชื่อมชิ้นส่วนเหล็กให้เป็นโครงข้อแข็งได้ เนื่องจากการเชื่อมช่วยให้ชิ้นส่วนโครงเหล็กไม่เกิดการหมุน การออกแบบลักษณะนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของแรงตามแนวแกน โดยสามารถวิเคราะห์เชิงเส้นได้ สำหรับลักษณะดังกล่าว (Annan, Youssef et al. 2009)

2.2.3 การเชื่อมต่อโมดูลกับฐานราก (Module to Foundation)

ฐานรากสำหรับการติดตั้งโครงสร้างโมดูลเหล็กสามารถเป็นฐานรากคอนกรีตหรือฐานรากคอนกรีตคอนกรีตสำเร็จรูป เสาเข็มสามารถใช้เป็นเสาเข็มคอนกรีตหรือเสาเข็มเหล็ก การตัดสินใจเลือกใช้ฐานรากขึ้นอยู่กับสภาพดินที่แตกต่างกันของสถานที่ติดตั้งโครงสร้างระบบฐานรากแต่ละระบบมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ข้อควรพิจารณาหลักคือความแข็งแรงในการเชื่อมต่อและความต้านทานการกัดกร่อน รวมไปถึงการพิจารณาผลกระทบจากแรงกระทำด้านข้างเพิ่มเติม เนื่องจากอาจทำให้โครงสร้างเกิดการเลื่อนหรือพลิกคว่ำ นอกจากนี้การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลกับฐานรากควรมีแผ่นเหล็กทาบเพื่อปิดหน้าการเชื่อมต่อ (Park, Moon et al. 2016)

2.3 การออกแบบข้อต่อสำหรับโครงสร้างระบบโมดูลาร์

มีหลายงานวิจัยศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างโมดูลาร์และประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของข้อต่อของเสา-คาน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์และการออกแบบแบบเดิมที่มีอยู่ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา โดยทั่วไปการศึกษาเหล่านี้สรุปได้ว่าการออกแบบอาคารเหล็กโมดูลาร์ (MSB) ด้วยวิธีการแบบเดิมมีการอนุรักษ์มากเกินไปในบางกรณี กล่าวคือมีจำนวนของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างมากเกินไปการใช้งานหรือวิธีการเหล่านี้ไม่ได้คาดการณ์การตอบสนองของโครงสร้างแบบแยกส่วนตามความเป็นจริง การศึกษาวิจัยจำนวนมากได้เน้นย้ำถึงความจำเป็นในแนวทางการออกแบบที่ถูกต้องมากขึ้นสำหรับการสร้างแบบแยกส่วน (Baghdadi, Heristchian et al. 2021)

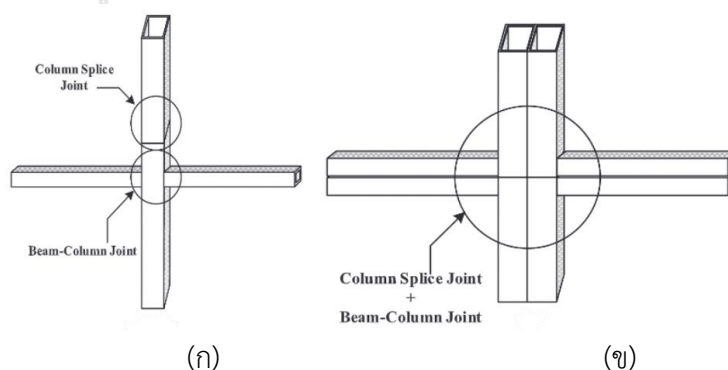
มีการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างโมดูลของโครงสร้าง พบว่าผลกระทบหลักเกิดจากสติฟเนสของการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลาร์ (IMC), ความสูงทั้งหมด และประเภทโครงข้อแข็ง (Lacey,

Chen et al. 2018) ประสิทธิภาพโดยรวมของโครงสร้างโมดูลาร์ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและความสอดคล้องของการเชื่อมต่อภายในโมดูล (Annan, Youssef et al. 2009) การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่อยู่ติดกันมีบทบาทอย่างมากต่อความสมบูรณ์ เสถียรภาพ และความทนทานโดยรวมของระบบอาคารแบบแยกส่วน เมื่อออกแบบ IMCs เป้าหมายหลักประการหนึ่งคือการออกแบบให้โครงสร้างมีความเรียบง่ายและบรรลุข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ

นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยได้พยายามศึกษาประสิทธิภาพโดยรวมของโครงสร้างแบบโมดูลาร์ และการเชื่อมต่อแบบสลักเกลียว อีกทั้งยังมีการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ได้รับการพัฒนาออกแบบให้ใช้งานได้จริงมากขึ้นและใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในการประกอบต่อของโครงสร้างแบบแยกส่วน

2.3.1 คุณสมบัติด้านรูปร่างและการออกแบบชิ้นส่วนข้อต่อ

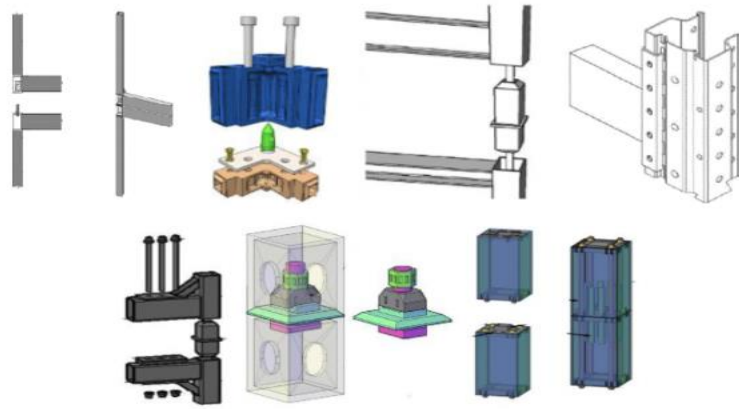
ในโครงสร้างเหล็กทั่วไป ส่วนของเสาที่ต่อจากฐานของชั้นแรกขึ้นไปมักเชื่อมต่อกับวิธีการต่างๆ แบบดั้งเดิม เช่น การต่อประกอบ การใช้แผ่นฐานทาบบิด และการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) ตำแหน่งของรอยต่อจะถูกกำหนดไว้ที่ด้านล่างหรือเหนือจุดของคานเพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อน อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อดังกล่าวยากต่อการก่อสร้างจริงโดยเฉพาะเมื่อโมดูลต่อกันสี่โมดูล จึงมีการเชื่อมต่อที่พัฒนาการเชื่อมต่อในรูปแบบ 4(ข) เพื่อความสะดวกต่อการเชื่อมต่อแต่ละโมดูลนั้นคือ Inter-Module Connection (IMC) ที่ได้รับการพัฒนาในหลายรูปแบบ ตัวอย่างการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 นำเสนอการเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อโครงสร้างที่เราคาดคิดต่างกัน ซึ่งออกแบบโดยพิจารณาหลักการถ่ายโอนน้ำหนักและความสอดคล้องทางเรขาคณิต



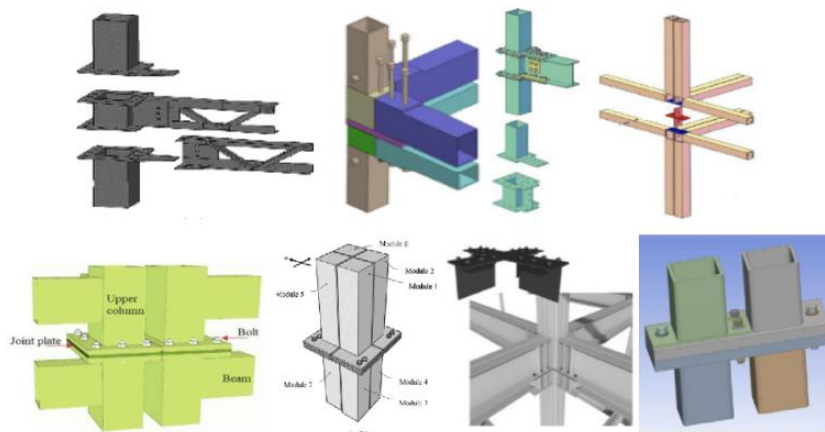
รูปที่ 4 (ก) ข้อต่อแบบเดิม (ข) ข้อต่อระหว่างโครงสร้างโมดูลเหล็ก

การเชื่อมต่อแบบสลักเกลียวสามารถติดตั้งได้ง่ายแต่ต้องใช้พื้นที่ทำงานมาก แสดงดังรูปที่ 5 และอาจทำให้เกิดการสั่นระหว่างชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อจากความคลาดเคลื่อนของรู หรืออาจมีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วน สำหรับการเชื่อมต่อแบบสลักเกลียวหรือแบบเชื่อมที่

เพิ่มงานในไซต์ก่อสร้าง แสดงดังรูปที่ 6 ลักษณะการเชื่อมต่อส่งผลอย่างมากต่อกลไกการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้าง



รูปที่ 5 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมดูล



รูปที่ 6 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่ต้องการพื้นที่ทำงานเพื่อเชื่อมต่อ

นอกจากนี้ความสะดวกและความรวดเร็วในการก่อสร้างอาคารเหล็กแบบโมดูลาร์ขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมต่อโมดูลที่ง่ายและรวดเร็วโดยไม่กระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้าง รูปร่างลักษณะของการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถโดยรวมและเสถียรภาพของระบบโครงสร้างแบบแยกส่วน การใช้สลักเกลียวเพื่อเชื่อมต่อโมดูลที่อยู่ติดกันเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพและใช้งานง่าย

ในการพิจารณาออกแบบการเชื่อมต่อร่วมกับตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดของชิ้นส่วนและประเภทของวัสดุ ความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิต จะมีอิทธิพลต่อลักษณะการหมุนของการเชื่อมต่อ ทั้งจุดครากและความสามารถในการรับแรงสูงสุดจะลดลงเนื่องจากรูที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน ทั้งนี้การเพิ่มความหนาของชิ้นส่วนสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ 15 เปอร์เซ็นต์ (Gusella, Arwade et al. 2019) จากการศึกษางานวิจัยของ Alshareef ในปี 2018

(Najla'a 2018) พบว่าการเพิ่มจำนวนและขนาดของรูมีผลอย่างมากต่อการรับน้ำหนักและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนโครงสร้าง

การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลในอุดมคติคือมีรูปร่างลักษณะที่เรียบง่าย และการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน เพื่อให้สามารถประกอบและถอดแยกชิ้นส่วนได้ง่าย พร้อมทั้งมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด อย่างไรก็ตามในการก่อสร้างจริง การเชื่อมต่อนี้สามารถตอบสนองความต้องการได้เพียงไม่กี่ข้อ ดังนั้นการคำนึงถึงความเรียบง่ายของการเชื่อมต่อและประสิทธิภาพการทำงานต้องได้รับการพัฒนาในงานวิจัยในอนาคตสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลของโครงสร้างแบบแยกส่วน

2.3.2 แบบจำลองการเชื่อมต่อเพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลข

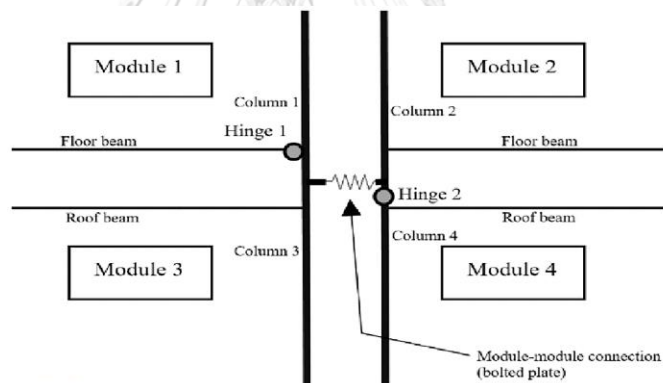
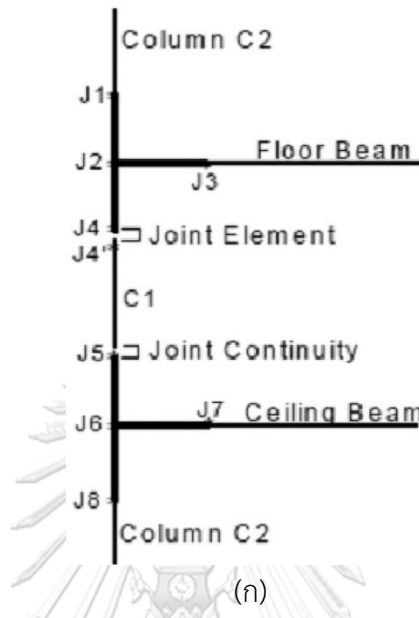
การแบ่งโครงสร้างจริงออกเป็นส่วนต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้เป็นการเชื่อมต่อแบบ Semi-Rigid Connection ผลลัพธ์การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการเชื่อมต่อประกอบไปด้วยแบบจำลองของโครงสร้างโครงข้อแข็งแบบแยกส่วน ข้อกำหนดจะกำหนดสติฟเฟสและกำลังของการเชื่อมต่อแบบ semi-rigid การตอบสนองของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามรูปแบบการเชื่อมต่อซึ่งไม่สามารถแบ่งประเภทได้ชัดเจนเนื่องจากความหลากหลายและความเฉพาะของการออกแบบข้อต่อ การคาดการณ์สติฟเฟสและกำลังของชิ้นส่วนรวมไปถึงการตอบสนองของโครงสร้างอาจถูกประเมินค่าสูงไปหรือต่ำไปจากการกำหนดที่ไม่แม่นยำ

ในปี 2009 งานวิจัยศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของโครงสร้างแบบโมดูลโดยกำหนดการเชื่อมต่อแบบไม่แข็งเส้นในแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อศึกษาการตอบสนองโดยรวมของโครงสร้าง รูปที่ 7(ก) แสดงการจำลองการเชื่อมต่อด้วยสติฟเฟสที่ต่างกัน (Annan, Youssef et al. 2008)

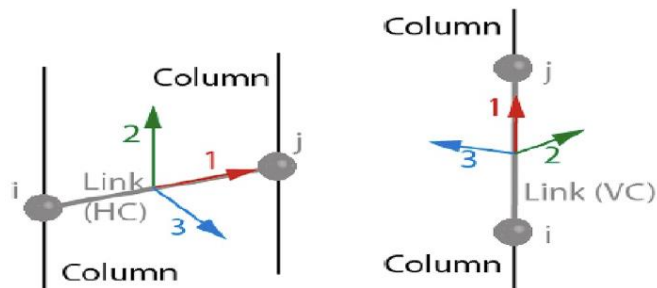
ปี 2016 ในการศึกษาการเชื่อมต่อในแนวตั้งและแนวนอนโดยจำลองการเชื่อมต่อและใช้สติฟเฟสสปริงดังรูปที่ 7(ข) แบบจำลองเสนอตำแหน่ง hinge เนื่องจาก plastic yield และ equivalent shear stiffness ในการจำลองการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลในแนวนอน (Gunawardena 2016)

ในปี 2018 มีการพัฒนาแบบจำลองโครงข้อแข็งในสองมิติ แสดงดังรูปที่ 7(ค) พิจารณาเพียงการเชื่อมต่อในแนวตั้ง แบบจำลองประกอบด้วยชิ้นส่วนแข็งเกร็งที่มีการเชื่อมต่อเสาคาน และข้อต่อแบบหมุน เพื่อให้สามารถหมุนได้โดยการเชื่อมเพียงด้านเดียว (Lacey, Chen et al. 2018)

มีการพัฒนาการจำลองแบบการเชื่อมต่อหลากหลาย ทั้งนี้ต้องพิจารณารูปแบบการทดลองและผลลัพธ์ที่ต้องการสำหรับการวิเคราะห์ และต้องตรวจสอบผลลัพธ์เพื่อชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจและมีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 แบบจำลองการเชื่อมต่อเพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลข

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการปริพันธ์ รูปแบบของปัญหาคือการแจกแจงตัวแปรในระบบสามมิติ โดเมนของตัวแปรนำเสนอเป็นรูปแบบของการประกอบกันของชุดตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element mesh) ปัญหาที่มีความต่อเนื่องจะถูกเปลี่ยนรูปแบบเป็นปัญหาไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่ต่อเนื่องโดยใช้ค่า unknown nodal values (Nikishkov 2004) วิธีนี้สามารถใช้แก้ปัญหาทางฟิสิกส์หรือวิศวกรรมศาสตร์ และอื่นๆ

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมทริกซ์สติฟเนส (Stiffness Matrix) มักใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนประกอบที่เชื่อมระหว่างข้อต่อ (Node) ถ้ามีแรงกระทำระหว่างความยาวชิ้นส่วน จะต้องทำการแบ่งชิ้นส่วนดังกล่าวออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ให้เกิดโหนดระหว่างชิ้นส่วนขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าในตำแหน่งนั้น สำหรับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดเมนโครงสร้างจะแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆอย่างง่าย ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถอธิบายเป็นโดเมนของโครงสร้างมี DOF แบบอนันต์ในขณะที่โดเมนของแบบจำลองมี DOF จำกัด ดังนั้นเราจึงสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างที่ตอบสนองต่อแรงกระทำโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

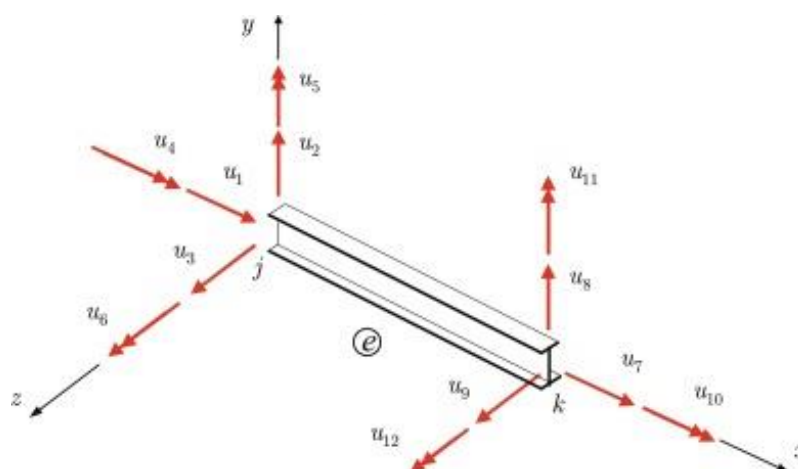
2.4.1 วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการสติฟเนส (Stiffness Method หรือ Matrix Stiffness Method หรือ Displacement Method หรือ Equilibrium Method) เป็นวิธีการที่กำหนดตัวแปรเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของข้อต่อ (nodal displacement) ของโครงสร้าง วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างดีเทอร์มิเนตทางสถิต (Statically Determinate Structure) และโครงสร้างอินดีเทอร์มิเนตทางสถิต (Statically Indeterminate Structure) โดยอัลกอริทึมมีขั้นตอนเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งได้ สมการพื้นฐานของ Matrix Stiffness Method สามารถหาได้จากสมการสมดุล (Equilibrium equation) สมการความสอดคล้อง (Compatibility equation) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด (force-displacement relationship)

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อน การใช้คอมพิวเตอร์จึงถูกนำมาช่วยวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการรวมสติฟ

เนสโดยตรงนี้เป็นวิธีการสังเคราะห์สติฟเนสของโครงสร้างทั้งระบบจากสติฟเนสขององค์ประกอบย่อย วิธีดังกล่าวเป็นพื้นฐานส่วนหนึ่งที่ใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการพิจารณาสติฟเนสของโครงสร้างโครงข้อแข็งสามมิติ ระบบแกนคาร์ทีเซียน (x, y, z) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดข้อมูลทางเรขาคณิตของโครงสร้าง และเพื่อแสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของข้อต่อต่างๆ ของทั้งระบบหรือที่เรียกว่า Global Coordinate System ในโครงสร้างอาคารสามมิติ ข้อต่อ 1 จุดมี 6 องศาเสรี ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ในแนวแกน x, y และ z และการหมุนรับแกน x, y และ z แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 Nodal displacements ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสามมิติ (Katsikadelis 2020)

แต่ละองค์ประกอบจะมีสติฟเนสขององค์ประกอบย่อยนั้นแสดงเป็น Local Stiffness Matrix ซึ่งกำหนดผ่านแนวแกนของชิ้นส่วนองค์ประกอบหรือเรียกว่า Local Coordinate System และนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงในชิ้นส่วนและการกระจัดที่ข้อต่อ องค์ประกอบชิ้นส่วนสามมิตินี้มีการเปลี่ยนแปลงของแรงและตำแหน่งของข้อต่อรวมทั้งหมด 12 ส่วนแสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณา Local Stiffness Matrix จะสามารถเขียนสติฟเนสของแต่ละองค์ประกอบในรูปแบบเดียวกันได้โดยไม่ต้องคำนึงการวางแนวของชิ้นส่วนทำให้ง่ายต่อการคำนวณโครงสร้างขนาดใหญ่

เนื่องจาก Local Coordinate System เป็นระบบพิกัดเฉพาะประจำของแต่ละชิ้นส่วนองค์ประกอบที่ไม่ได้มีการวางแนวของชิ้นส่วนในทิศทางเดียวกันจึงไม่สามารถรวมสติฟเนสโดยตรงได้ จำเป็นต้องนิยามแรงและการเปลี่ยนแปลงของแต่ละชิ้นส่วนใน Global Coordinate System ด้วยการแปลงปริมาณเวกเตอร์ (Transformation of Vector Value) ก่อนนำเวกเตอร์ของแต่ละชิ้นส่วนมารวมกัน กล่าวคือมีการเปลี่ยนรูปแบบเมทริกซ์

ของชิ้นส่วนสามมิติเพื่อแปลงค่าระหว่าง Local Coordinate System และ Global Coordinate System

นอกจากนี้จะต้องพิจารณาเงื่อนไขความสอดคล้อง (Compatibility conditions) ของการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วต่อของชิ้นส่วนโครงสร้าง และต้องพิจารณาเงื่อนไขความสมดุลที่ขั้วต่อต่างๆ ของโครงสร้าง เพื่อนำเงื่อนไขมาใช้ร่วมกับการรวมผลสตีฟเนสของแต่ละชิ้นส่วนองค์ประกอบ การรวมสตีฟเนสจะต้องถูกต้องตามตำแหน่งและโคออร์ดิเนตของกันและกัน เมื่อทำการรวมสตีฟเนสโดยตรงแล้วเราจะสามารถหาแรงภายในของแต่ละชิ้นส่วนทั้งใน Local Coordinate System และ Global Coordinate System รวมไปถึงแรงปฏิกิริยาที่รองรับโครงสร้างนั้น

2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการรวมสตีฟเนสโดยตรงแบบเชิงเส้น (Linear analysis)

ในการวิเคราะห์ โครงสร้างโครงข้อแข็ง (Frame) ด้วยวิธีสตีฟเนส ตัวแปรเริ่มต้นที่ไม่ทราบค่าคือ การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacements) ซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนที่ (translation) และการหมุน (rotation) ที่ขั้วต่อขององค์ประกอบ ซึ่งจะต้องใช้สมการสมดุลของแรงที่จุดต่อ (nodal force equilibrium equations) ซึ่งประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์สตีฟเนส (stiffness coefficients), การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อ (nodal displacements) และแรงกระทำ (applied forces) เขียนสมการได้ดังนี้

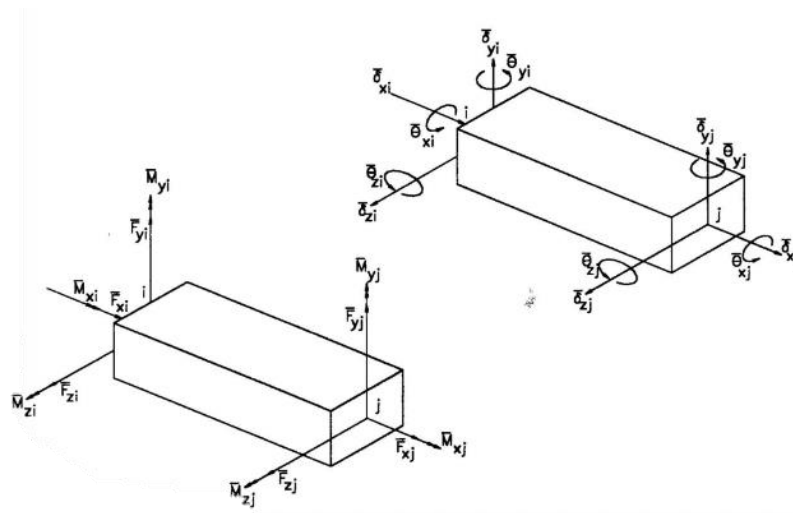
$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

โดยที่ $[K]$ คือเมทริกซ์สตีฟเนสทั้งหมดของโครงสร้างในระบบพิกัดรวม

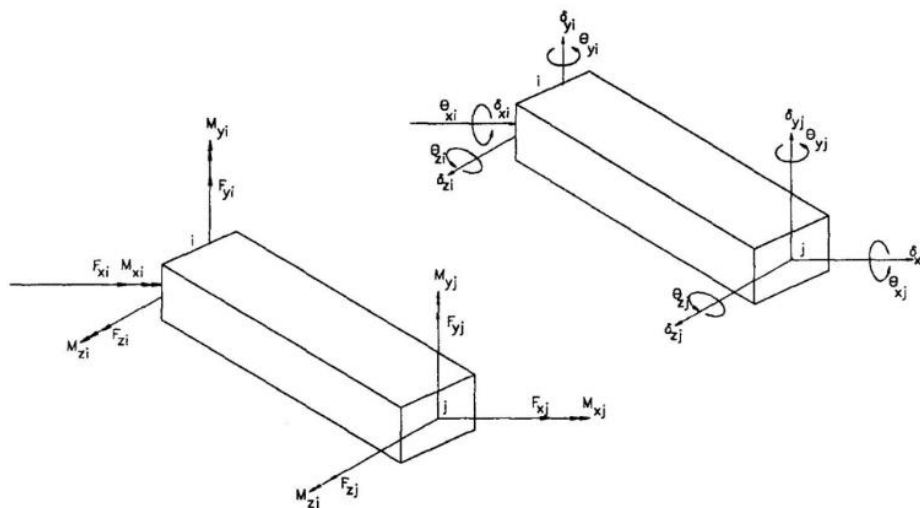
$\{\delta\}$ คือการเคลื่อนที่ของขั้วต่อ

$\{F\}$ คือแรงกระทำที่ขั้วต่อ

$[K]$ คือผลรวมของเมทริกซ์สตีฟเนสของชิ้นส่วน (element stiffness matrices) ในระบบพิกัดรวม โดยการหาค่าเมทริกซ์สตีฟเนสของชิ้นส่วนในระบบพิกัดรวมจะต้องใช้ค่าเมทริกซ์สตีฟเนสของชิ้นส่วนในระบบพิกัดเฉพาะที่ โดยการเปลี่ยนระบบพิกัดด้วยการใช้เมทริกซ์แปลงพิกัด (coordinate transformation matrix)



รูปที่ 9 ระบบพิกัดเฉพาะขององค์ประกอบ (วิธีเกยูรวงศ์ 2543)



รูปที่ 10 ระบบพิกัดรวมขององค์ประกอบ (วิธีเกยูรวงศ์ 2543)

เมทริกซ์สติเฟนเนสของแต่ละชิ้นส่วนองค์ประกอบสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$[K_n] = \left(\frac{AE}{L}\right)_n \begin{bmatrix} [S] & [-S] \\ [-S] & [S] \end{bmatrix} \quad (2)$$

และ
$$[S] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่ $[K_n]$ คือเมทริกซ์สติเฟนเนสของชิ้นส่วนองค์ประกอบระบบพิกัดเฉพาะ

A คือพื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วนองค์ประกอบ

E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชิ้นส่วนองค์ประกอบ

θ คือมุมระหว่างแกนในระบบพิกัดเฉพาะที่ของชิ้นส่วนองค์ประกอบ
กับแกนในระบบพิกัดรวม

การหาเมทริกซ์สติเฟเนสทั้งหมดของโครงสร้างในระบบพิกัดรวมสามารถคำนวณได้
จากการรวมเมทริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนองค์ประกอบระบบพิกัดเฉพาะทั้งหมดดังนี้

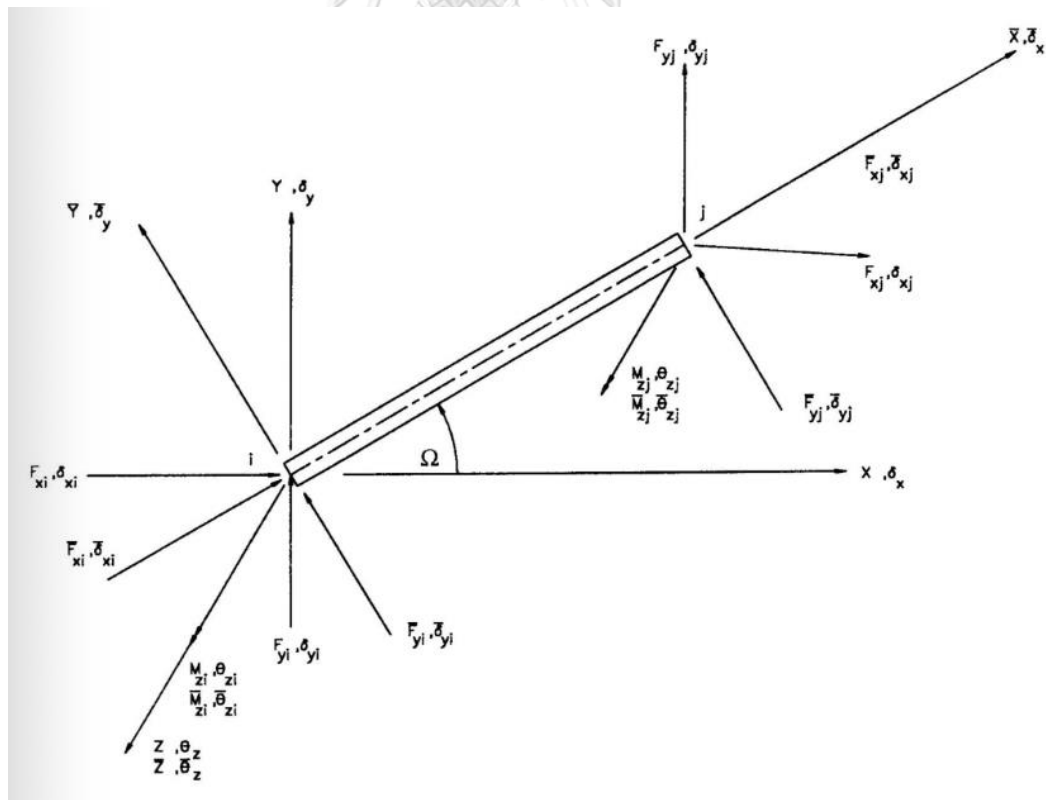
$$[K] = L_{n=1}^{NE} [K_n] \quad (4)$$

โดยที่ $[K]$ คือเมทริกซ์สติเฟเนสทั้งหมดของโครงสร้าง

NE คือจำนวนชิ้นส่วนองค์ประกอบ

L คือการรวมกันของเมทริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนองค์ประกอบ
ระบบพิกัดเฉพาะตามแต่ละ Degree of Freedom ของแต่ละ
ชิ้นส่วนองค์ประกอบ

เมทริกซ์สติเฟเนสสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างโครงข้อแข็งสามมิติสามารถพิจารณาได้
เป็นชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสองมิติและไม่รวมการเปลี่ยนรูปจากแรงบิดได้ โดยตัดแฉกและหลัก
ของเมทริกซ์สติเฟเนสสมบูรณ์ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสามมิติที่ไม่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ
ออกไป ซึ่งจะเหลือแรงภายนอกที่กระทำกับชิ้นส่วนแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แกนต่างๆ และแรงที่กระทำต่อองค์ประกอบในระบบพิกัดรวม (วิธีทฤษฎีวงรี 2543)

โดยที่	X, Y	คือแกนระบบพิกัดรวม
	\bar{X}, \bar{Y}	คือแกนระบบพิกัดเฉพาะ
	$F_{xi}, F_{yi}, M_{zi}, F_{xj}, F_{yj}, M_{zj}$	คือแรงภายนอกที่มากระทำกับชิ้นส่วนองค์ประกอบในแนวแกนระบบพิกัดรวมที่ข้อต่อ i และ j ตามลำดับ
	$\bar{F}_{xi}, \bar{F}_{yi}, \bar{M}_{zi}, \bar{F}_{xj}, \bar{F}_{yj}, \bar{M}_{zj}$	คือแรงภายนอกที่มากระทำกับชิ้นส่วนองค์ประกอบในแนวแกนระบบพิกัดเฉพาะที่ข้อต่อ i และ j ตามลำดับ
	$\delta_{xi}, \delta_{yi}, \theta_{zi}, \delta_{xj}, \delta_{yj}, \theta_{zj}$	คือการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนองค์ประกอบในแนวแกนระบบพิกัดรวมที่ข้อต่อ i และ j ตามลำดับ
	$\bar{\delta}_{xi}, \bar{\delta}_{yi}, \bar{\theta}_{zi}, \bar{\delta}_{xj}, \bar{\delta}_{yj}, \bar{\theta}_{zj}$	คือการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนองค์ประกอบในแนวแกนระบบพิกัดเฉพาะที่ข้อต่อ i และ j ตามลำดับ

ซึ่งจะได้เมทริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนองค์ประกอบดังนี้

$$[k_e^m] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

และ $[k_e] = L_{n=1}^{NE} [k_e^m]$ (6)

โดยที่	$[k_e^m]$	คือเมทริกซ์สติเฟเนสโครงสร้างแบบเชิงเส้นของแต่ละชิ้นส่วนองค์ประกอบ
	$[k_e]$	คือเมทริกซ์สติเฟเนสโครงสร้างแบบเชิงเส้นของทั้งโครงสร้าง
	A	คือพื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วนองค์ประกอบ
	E	คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชิ้นส่วนองค์ประกอบ
	L	คือการรวมกันของเมทริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนองค์ประกอบระบบพิกัดเฉพาะตามแต่ละ Degree of Freedom ของแต่ละชิ้นส่วนองค์ประกอบ
	I	คือโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนองค์ประกอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงของชิ้นส่วนจะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงคือ $[K_c][D]=[P]$

จากการวิเคราะห์ที่ไม่พิจารณาผลของ Geometrical Nonlinearity และ Material Nonlinearity ถ้าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงของชิ้นส่วนมากขึ้นจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้าง นอกจากนี้ถ้าวัสดุมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่ปลอดภัยคือจะให้กำลังของโครงสร้างสูงเกินไป หรือให้การเคลื่อนตัวของโครงสร้างต่ำเกินไป

เสถียรภาพของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับ Linear Elastic Analysis คือ Eigen Value Analysis หรือก็คือ Linear Buckling Analysis โดยจะได้ค่า Eigen Vector เป็นการโก่งเดาะในแต่ละโหมด และ Eigen Value คือสัมประสิทธิ์ของแรงอ้างอิง ผลคูณของค่าทั้งสองคือ Elastic Critical Load ($P_{cr,linear}$) ซึ่งเทียบเท่ากับค่าที่ได้จาก Euler Buckling Load อย่างไรก็ตามถ้าระบบโครงสร้างมีความไม่เชิงเส้น จะให้ค่าการวิเคราะห์ที่สูงเกินจริง ค่าที่ได้จากวิธีนี้จึงเป็น Upper Bound Buckling Capacity

2. 2nd Order Elastic Analysis หรือ P-Delta Analysis

เป็นวิธีที่พิจารณาผลของ Geometrical Nonlinearity $[K_g]$ แต่ไม่พิจารณาผลของ Material Nonlinearity $[K_m]$ กล่าวคือพิจารณาผลของการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ทำให้ค่าสติฟเนสของโครงสร้าง $[K_c]$ เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่ง $[K_g]$ จะมีผลของแรงในแนวแกนเข้ามา ทำให้สติฟเนสของโครงสร้างสูงหรือแข็งแกร่งขึ้น เมื่อมีแรงอัดหรือแรงดึงเกิดขึ้นในโครงสร้าง จะทำให้สติฟเนสของโครงสร้างโดยรวมลดลง

เนื่องจากสติฟเนสของโครงสร้างขึ้นกับแรงในแนวแกนของชิ้นส่วน ทำให้สติฟเนสมีค่าไม่คงที่ตามแรงแนวแกนที่เปลี่ยนไป ซึ่งสติฟเนสสามารถประมาณได้หลายวิธี โดย P-Delta Analysis คือการคำนวณสติฟเนสของโครงสร้างด้วยแรงในแนวแกนที่มาจาก 1st Order Elastic Analysis หรือ Linear Elastic Analysis หากคำนวณสติฟเนสของโครงสร้างด้วยแรงในแนวแกนที่เปลี่ยนไป จะต้องคำนวณรอบจนกว่าจะลู่เข้าหาคำตอบ ซึ่งจะการวิเคราะห์นั้นว่า Large Deflection Analysis

เสถียรภาพของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับ P-Delta Analysis จะได้น้อยกว่า Eigen Value Analysis เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบโครงสร้าง โดยจะให้ค่าการวิเคราะห์ที่เรียกว่า Elastic Stability Limit

โครงสร้างที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะเป็นโครงสร้างซึ่งมีสมบัติคือ

- a. มีความไม่สมบูรณ์ก่อนถูกแรงกระทำ เช่น โครงสร้างที่ถูกตัดขึ้นเพื่อการแอนตัว

- b. ไวต่อพีเดลต้า (P- Δ effect) ซึ่งเป็นโมเมนต์ที่ทำให้โครงสร้างเสียเสถียรภาพ
- c. มีชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ไวต่อ P- δ effect ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเสียเสถียรภาพ

3. 1st Order Inelastic Analysis หรือ Plastic Analysis หรือ Plastic Mechanism Analysis

เป็นวิธีที่ไม่พิจารณาผลของ Geometrical Nonlinearity [K_g] แต่พิจารณาผลของ Material Nonlinearity [K_m] กล่าวคือไม่คำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ทำให้เกิดโมเมนต์เพิ่มขึ้น แต่จะพิจารณาผลของความไม่เชิงเส้นของวัสดุที่ทำให้เกิด Plastic Hinge ในระบบโครงสร้าง ค่ากำลังของระบบโครงสร้างที่ได้จะเรียกว่า Plastic Limit Load

โครงสร้างที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะเป็นโครงสร้างซึ่งมีสมบัติคือ

- a. มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (plastic deformation) เกิดขึ้นได้ เช่น โครงสร้างเหล็ก เป็นต้น
- b. มีการแตกหรือการคืบ (creep) เกิดขึ้นได้ เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- c. มี inelastic interaction ของแรงในแนวแกน แรงดัด แรงเฉือน และแรงบิด

4. 2nd Order Inelastic Analysis หรือ Nonlinear Structural Analysis

เป็นวิธีที่พิจารณาผลของ Geometrical Nonlinearity [K_g] และผลของ Material Nonlinearity [K_m] ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงของชิ้นส่วนจะเป็นความสัมพันธ์คือ $[K_c + K_g + K_m][D]=[P]$

วิธีนี้จะต้องอัปเดตสติเฟนสของโครงสร้างทุกระดับของแรงกระทำ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความไม่เชิงเส้นจะต้องแบ่งแรงกระทำทีละน้อยเพื่อ Track Load Path โดยทำได้หลายวิธี เช่น วิธี Pure Incremental Method, Newton-Raphson หรือ Arc-Length และผลลัพธ์ที่ได้คือ Load Path Dependent

เสถียรภาพของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับ Nonlinear Structural Analysis ผลที่ได้คือ Inelastic Critical Load ($P_{cr, nonlinear}$) ซึ่งเทียบเท่ากับค่าที่ได้จะต่ำกว่า Eigen Value Analysis หรือ Linear Buckling Analysis โดย Buckling Capacity ที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น

โครงสร้างที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะเป็นโครงสร้างซึ่งมีสมบัติคือ

- a. มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกเกิดขึ้นร่วมกับ P- Δ และ P- δ effect
- b. มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของจุดเชื่อมต่อ

- c. มี panel zone deformation
 - d. มีโครงสร้างรองรับที่มีผลต่อกำลังและความแกร่งของโครงสร้างโดยรวม
5. Local Failure หรือ Local Buckling

พฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อน ทำให้ทั้งระบบเกิดการวิบัติก่อนที่ระบบโครงสร้างจะเสียหาย (K.Kurojjanawong, 2021)

สรุปคือในการพิจารณาโครงสร้างที่มีแรงกระทำแนวตั้ง และแรงกระทำในแนวนอน โครงสร้างจะมีการตอบสนองต่อแรงกระทำดังกล่าวได้หลายรูปแบบดังที่แสดงในรูปที่ 12 โดย First-order (linear) elastic analysis จะไม่พิจารณาผลของ non-linearity และจะแสดงการตอบสนองของโครงสร้างในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกบริการได้ดี ในส่วนของ Second-order elastic analysis จะพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการเปลี่ยนตำแหน่งในการเขียนสมการความสมดุลของโครงสร้าง ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์หาการเสียเสถียรภาพของโครงสร้างเนื่องจาก $P-\Delta$ effect และ $P-\delta$ effect แต่การวิเคราะห์นี้จะไม่พิจารณาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นตรงของวัสดุ (material non-linearity) โดยที่หากโครงสร้างถูกกระทำโดยแรงกระทำจนถึงจุด bifurcation แล้ว โครงสร้างจะเข้าสู่สภาวะหลังวิกฤต (post-critical state) ซึ่งโครงสร้างจะตอบสนองต่อแรงกระทำได้หลายรูปแบบ

ใน first-order inelastic analysis เราจะพิจารณาเป็นสมการความสมดุลโดยใช้รูปร่างของโครงสร้างที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพื่อให้เราได้เห็นพฤติกรรมแบบ elastic-plastic ของโครงสร้าง โดยการวิบัติจะเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกทุกพลาสติก (plastic limit load) แต่เมื่อโครงสร้างเสียเสถียรภาพจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการมีพฤติกรรมแบบ elastic-plastic ก็จะต้องทำการวิเคราะห์หา Inelastic critical load และในส่วนของ second-order inelastic analysis เราจะพิจารณาเป็นสมการความสมดุลของโครงสร้างโดยใช้รูปร่างของโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว ซึ่งเราจะพิจารณาเป็น geometric and material non-linearity analysis เพื่อดูการตอบสนองของโครงสร้าง วิธีนี้เราจะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง โดยโครงสร้างจะเสียเสถียรภาพที่จุด inelastic stability limit ดังรูป (Seangatith 2001)

2.5 การออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม (Structural Optimization)

2.5.1 Overview

การออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมมีเป้าหมายเพื่อให้ชิ้นส่วนโครงสร้างมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ที่ต่ำที่สุดที่เหมาะสมต่อการใช้งานนั้น กล่าวคือพิจารณาความสามารถในการรับแรง การโก่งตัว ความเค้นสูงสุด รวมไปถึงปริมาตร น้ำหนัก และขนาดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมนี้สามารถกำหนดจุดประสงค์ได้หลายรูปแบบเช่นการปรับประสิทธิภาพด้านขนาด รูปร่าง ค่าโครง หรือวัสดุ ทั้งนี้เพื่อให้โครงสร้างใช้ทรัพยากรน้อยที่สุดอย่างเหมาะสม และยังสามารถรับแรงและใช้งานตามเงื่อนไขที่กำหนดและข้อกำหนดมาตรฐานได้อย่างปลอดภัย รวมไปถึงพิจารณาร่วมกับเงื่อนไขข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ต้นทุนการก่อสร้าง การบำรุงรักษา และการขนย้าย การออกแบบหรือเพิ่มประสิทธิภาพนี้สามารถกำหนดเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$$

$$W(X)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad (j = 1, m)$$

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad (i = 1, n)$$

โดยที่ $W(X)$ คือฟังก์ชันจุดประสงค์, $g_j(x)$ คือฟังก์ชันเงื่อนไข, X_i^L, X_i^U คือขอบล่างและขอบบนของตัวแปร X_i

การออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักดังนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพด้านขนาด (Size Optimization)

การกำหนดตัวแปรเป็นขนาดของโครงสร้าง เพื่อหาขนาดของโครงสร้างที่เล็กที่สุดอย่างเหมาะสมโดยที่ค่าโครงของโครงสร้างยังเหมือนเดิม

2. การเพิ่มประสิทธิภาพด้านวัสดุ (Material Optimization)

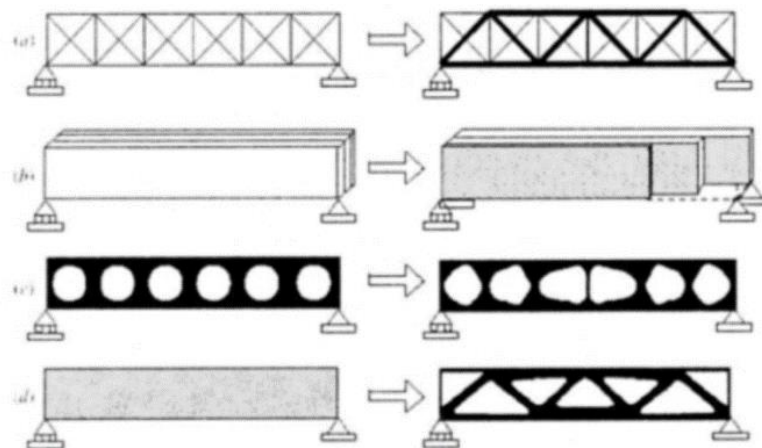
การกำหนดตัวแปรเป็นประเภทและขนาดหน้าตัดของวัสดุในชั้นต่างๆ หรือการปรับแกนหมุนของวัสดุ ความหนา หรือลำดับการซ้อนกันของวัสดุ เพื่อหาวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างอย่างเหมาะสม

3. การเพิ่มประสิทธิภาพด้านรูปร่าง (Shape Optimization)

การกำหนดตัวแปรเป็นแรงหรืออื่นๆ โดยมีเป้าหมายเพื่อหารูปร่างของโครงสร้างที่สามารถตอบสนองต่อแรงกระทำที่กำหนดได้อย่างเหมาะสม เช่น การเปลี่ยนพิกัดภายในชิ้นส่วนแต่ไม่เปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของชิ้นส่วน

4. การเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยี (Topology Optimization)

การกำหนดตัวแปรเป็นแรงหรืออื่นๆ มีเป้าหมายเป็นการปรับเปลี่ยนจำนวนและตำแหน่งของโครงสร้าง โดยไม่กำหนดเค้าโครงของโครงสร้างไว้ล่วงหน้า แต่มีการกำหนดตำแหน่งของข้อต่อที่เป็นไปได้และเงื่อนไขขอบเขต



รูปที่ 13 ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมในการปรับโครงสร้างอย่างเหมาะสม

(Sigmund 2000)

นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างยังสามารถออกแบบเป็นจุดประสงค์อื่นๆ ได้ ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่การใช้ทรัพยากรอย่างเหมาะสมและลดต้นทุนในการก่อสร้าง

2.5.2 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับพิจารณาการเชื่อมต่อของโครงสร้างโครงข้อแข็ง

การเพิ่มประสิทธิภาพด้านจำนวนการเชื่อมต่อที่เหมาะสมในโครงสร้างโครงข้อแข็ง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นฟังก์ชันที่ไม่ราบเรียบ (Non-smooth Function) และเป็นฟังก์ชันคอนเวกซ์ (Convex Function) มีหลายงานวิจัยมุ่งพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสม โดยส่วนมากจะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้วิธีการเชิงตัวเลข เนื่องจากยังไม่มีวิธีการสรุปว่าอัลกอริทึมใดดีที่สุด การเลือกใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ ซึ่งต้องพิจารณาประสิทธิภาพการคำนวณ ระยะเวลาที่ใช้ประมวลผล ความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ ความสามารถในการใช้งาน ความเรียบง่าย และความเป็นไปได้ของผลลัพธ์

2.5.3 วิธีการเชิงกำหนดและวิธีการค้นหาแบบสุ่มตามโอกาส (Deterministic Methods and Stochastic Search Methods)

วิธีการเชิงกำหนด (Deterministic Methods) เช่น การเขียนโปรแกรมเชิงเส้น, การเขียนโปรแกรมไม่เชิงเส้น, การเขียนโปรแกรมไม่เชิงเส้นแบบผสม เหล่านี้เป็นเครื่องมือทั่วไปในการแก้ปัญหาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอย่างเหมาะสม โดยสามารถให้ค่าที่ดีที่สุด (Global Optimum) และค่าที่ดีที่สุดของระบบโดยประมาณ Approximately Global Optimum) และยังสามารถออกแบบการให้คำตอบได้อย่างหลากหลาย เช่น สามารถหาคำตอบการออกแบบเค้าโครงหรือรูปร่างของโครงสร้างที่ตัวแปรมีความต่อเนื่องโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Programming Methods)

อย่างไรก็ตาม การกำหนดตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เหมาะสมของโครงสร้าง มีการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ ที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งมีความไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากการเชื่อมต่อระบุเป็นจำนวนและตำแหน่ง การใช้วิธีออกแบบโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาที่มีความไม่ต่อเนื่องทำให้อัลกอริทึมมีความซับซ้อนมากขึ้น หรืออาจทำให้ประสิทธิภาพในการหาคำตอบน้อยลง

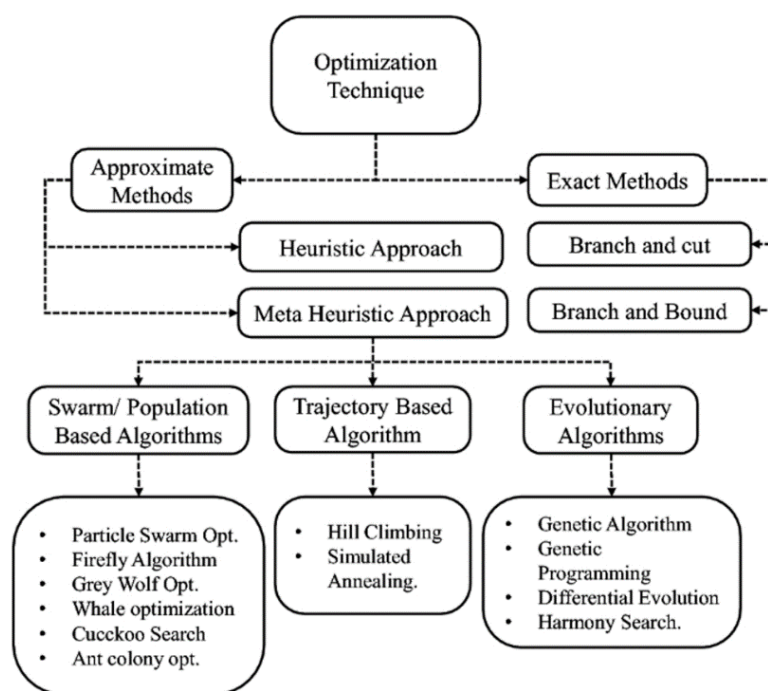
วิธีการค้นหาแบบสุ่มตามโอกาส (Stochastic Search Methods) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยจะเป็นอัลกอริทึมที่มีการพัฒนาจากการเลียนแบบปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ระบบภูมิคุ้มกัน การถ่ายทอดทางพันธุกรรม หรือการอาหารของฝูงสัตว์ ดังนั้นการใช้อัลกอริทึมรูปแบบวิธีการค้นหาแบบสุ่มตามโอกาสจึงเหมาะสมในการใช้แก้ปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรม

2.5.4 อัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติก

อัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาอย่างเหมาะสมทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็นอัลกอริทึมที่ให้คำตอบแบบแน่นอน (Exact Methods) และอัลกอริทึมที่ให้คำตอบโดยประมาณ (Approximate Methods) อัลกอริทึมที่ให้คำตอบโดยประมาณ สามารถแบ่งออกได้เป็นอัลกอริทึมแบบฮิวริสติก (Heuristic Approach) และ อัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติก (Meta Heuristic Approach)

อัลกอริทึมฮิวริสติกสามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่แน่นอนได้ และสามารถหาคำตอบได้ในทุกกรณีที่มีโอกาสในการเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ประสบการณ์ การแก้ปัญหา การเจอคำตอบ และการเรียนรู้ของตัวอัลกอริทึม สำหรับอัลกอริทึมเมตา-ฮิวริสติกที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เป็นอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่ขั้นตอนการหาคำตอบที่ไม่เป็นวิธีการเชิงกำหนดได้ เช่น การถ่ายทอดทางพันธุกรรม

การเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างหลักให้เหมาะสมทั้งในด้านของชิ้นส่วนโครงสร้างและอื่นๆ เป็นสิ่งที่วิศวกรโครงสร้างให้ความสำคัญ การพัฒนาการใช้อัลกอริทึมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง เทคนิคเมตา-ฮิวริสติกมีความสามารถในการแก้ปัญหาสำหรับการออกแบบโครงสร้างและหาคำตอบของปัญหาที่ไม่ต่อเนื่องได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 14 แผนผังการแก้ปัญหาอย่างเหมาะสมและตัวอย่างอัลกอริทึมแบบเมตา-ฮิวริสติก

(Mutegi and Nnamdi 2022)

2.5.5 Particle Swarm Optimization: PSO

อัลกอริทึมแบบแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) เป็นอัลกอริทึมที่จำลองพฤติกรรมการเดินทางหาอาหารของฝูงนก โดยพิจารณาว่าพฤติกรรมหาอาหารของนกจะขึ้นกับความสามารถของตัวมันเอง หรือการสังเกตและความร่วมมือจากพฤติกรรมของนกตัวอื่นๆ ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่ง ‘นก’ แต่ละตัวจะใช้แทน ‘อนุภาค’ (Particle) โดยแต่ละอนุภาคจะมีค่าฟิตเนส (Fitness value) ที่บอกถึงระยะห่างของอนุภาคกับแหล่งอาหาร และความเร็ว (Velocity) ของตัวมันเอง ซึ่งจะกำหนดค่าพีเบสต์ (Pbest) คือตำแหน่งแหล่งอาหารก่อนหน้านี้ที่ดีที่สุดซึ่งจะให้ค่าฟิตเนสที่ดีที่สุดของตัวมันเอง และ ค่าจีเบสต์ (Gbest) คือตำแหน่งแหล่งอาหารที่ดีที่สุดที่ค้นพบโดยประชากร

(Population) ทั้งหมดในกลุ่มฝูง การออกไปหาอาหารของนกแต่ละตัวที่ได้อาหารกลับมา เปรียบเทียบเป็นการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างที่ได้รับคำตอบทางกายภาพมา (Physical Part) โดยเวลาในการออกไปหาอาหารเปรียบได้กับเวลาในการประมวลผลหาคำตอบ สำหรับนกที่ไม่ได้บินกลับมาจะเปรียบเหมือนกับการประมวลผลที่หาคำตอบไม่ได้

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อัลกอริทึมวิธีกุ่มอนุภาคได้ถูกศึกษาและใช้งานในการแก้ปัญหาอย่างหลากหลาย การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างทั้งการแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึมแบบแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกุ่มอนุภาคอย่างเดียว หรือการผสมผสานอัลกอริทึมอื่นร่วมด้วย มีงานวิจัยที่น่าสนใจดังนี้

ปี 2009 (Kaveh and Talatahari 2009) ได้มีการศึกษาการแก้ปัญหาการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างโครงถัก (Truss) ซึ่งมีตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากการเลือกหน้าตัดของโครงสร้างโครงถัก จึงใช้อัลกอริทึมวิธีกุ่มอนุภาคแบบรวมกันที่ไม่ตอบโต้ (Particle Swarm Optimization Passive Congregation: PSOPC), วิธีกุ่มอนุภาคฝูงมด (Ant Colony Optimization: ACO) และวิธีกุ่มอนุภาคฮาร์โมนี (Harmony Search: HS) ร่วมกันในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

มีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้อัลกอริทึมวิธีกุ่มอนุภาค (PSO) ในการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างโครงถักขนาดใหญ่ (Dogan, Hasancebi et al. 2009) โดยเป็นการออกแบบโครงสร้างเหล็กสอดคล้องตามมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC) ซึ่งปัญหาการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดหลายปัญหามักจะเป็นการออกแบบโครงสร้างเหล็ก เช่น การเลือกขนาดเหล็กจากชุดของขนาดเหล็กตามมาตรฐานซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาออกแบบตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องได้ จึงมีการปรับเปลี่ยนชุดตัวแปรการออกแบบโดยจะจัดเรียงเป็นลำดับจากน้อยไปมาก และหมายเลขลำดับนั้นจะถูกพิจารณาเป็นตัวแปรการออกแบบ ดังนั้นในทุกขั้นตอนของการออกแบบจะมีการสร้างหมายเลขลำดับโดยอัลกอริทึม กล่าวคือค่าตัวแปรของการออกแบบจะถูกนำมาจากชุดของขนาดเหล็กตามมาตรฐาน

การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกุ่มอนุภาค (PSO) ได้ถูกพิสูจน์มาจากสมการจลศาสตร์ (Kinematic Equation) โดยการใช้เวกเตอร์เพื่ออัปเดตตำแหน่งปัจจุบันของแต่ละอนุภาคในฝูง เวกเตอร์ความเร็วถูกอัปเดตจะขึ้นอยู่กับ "หน่วยความจำ" ที่ได้รับจากอนุภาคแต่ละอนุภาค ซึ่งแต่ละอนุภาคจะได้รับความรู้เช่นเดียวกันจากฝูงทั้งหมด กล่าวคือตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะมีการปรับปรุงตามพฤติกรรมทางสังคมเพื่อปรับให้เหมาะกับสภาพแวดล้อม

โดยการกลับมายังพื้นที่ที่มีแนวโน้มที่จะค้นพบคำตอบก่อนหน้านี้ และการค้นหาตำแหน่งที่ดีที่สุดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ตัวเลขตำแหน่ง x ของอนุภาค i ที่การวนซ้ำ $k + 1$ จะได้รับการอัปเดตดังนี้

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \quad (7)$$

เมื่อ v_{k+1}^i คือเวกเตอร์ความเร็วที่อัปเดตแล้วและสอดคล้องกัน Δt คือเวลาที่ใช้ในขั้นตอน โดยทั่วไปมักจะถือว่ามีความเอกภาพ (Shi & Eberhart, 1998a) จะได้ว่า

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1r_1 \frac{(p_k^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2r_2 \frac{(p_k^g - x_k^i)}{\Delta t} \quad (8)$$

โดยที่ v_k^i เป็นเวกเตอร์ความเร็วที่ทำซ้ำครั้งที่ k

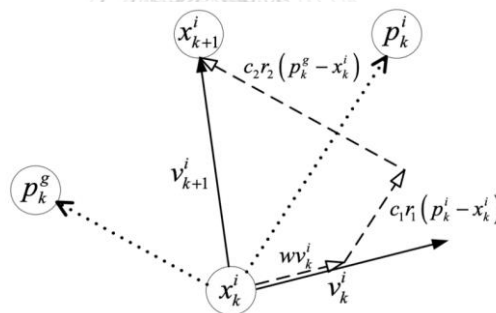
p_k^i เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคที่ i ที่การทำซ้ำครั้งที่ k

p_k^g เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคทั้งหมด ที่การทำซ้ำครั้งที่ k

w เป็นตัวคูณความเฉื่อยของอนุภาค

x_k^i เป็นตำแหน่งของอนุภาค i ที่การทำซ้ำครั้งที่ k

x_{k+1}^i เป็นตำแหน่งของอนุภาค i ที่การทำซ้ำครั้งที่ $k + 1$ ซึ่งคือตำแหน่งที่ถูกอัปเดต



รูปที่ 15 การอัปเดตตำแหน่ง และความเร็ว (Perez and Behdinan 2007)

ในการออกแก้ปัญหากับวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) เริ่มต้นกลุ่มอนุภาคจะถูกสุ่มให้กระจายทั่วทั้งพื้นที่การออกแบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสุ่มหาตำแหน่งเริ่มต้นและเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นของแต่ละอนุภาคทั่วพื้นที่การออกแบบดังนี้

$$x_0^i = x_{min} + r_3(x_{max} - x_{min}) \quad (9)$$

$$v_0^i = \frac{x_{min} + r_4(x_{max} - x_{min})}{\Delta t} \quad (10)$$

เมื่อ x_{max} และ x_{min} คือขอบขอบเขตการออกแบบบนและล่างตามลำดับ และ r_3, r_4 แทนตัวเลขที่จะถูกสุ่มในช่วง $[0,1]$

สำหรับน้ำหนักเริ่มต้น มีบทบาทสำคัญในพฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบ ดังนั้นในช่วงแรกจะมีการสุ่มตัวแปรของน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งเป็นการลดในเชิงเส้นตรงในแต่ละการวนซ้ำ

$$w_{k+1} = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} iter_{current} \quad (11)$$

เมื่อค่า $(w_{max}, w_{min}) = (0.4, 0.9)$

2.5.6 Comprehensive Particle Swarm Optimization: CLPSO

จากการศึกษาการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) หลากหลายแบบนั้น จะมีความยุ่งยากของการลู่เข้าหาคำตอบก่อนการครบกำหนดเวลา (Premature Convergence) สำหรับการแก้ปัญหาหลายรูปแบบ (Multimodal Problems) นอกจากนั้นการจำกัดขอบเขตการเรียนรู้เพียงแค่ค่าจีเบสต์ (Gbest) อาจจะเป็นการตัดสินใจที่ไม่มีเหตุผลเพียงพอ เพราะการเรียนรู้เพียงจากแค่ค่าจีเบสต์ (Gbest) แม้จะเป็นค่าล่าสุด ก็อาจทำให้คำตอบนั้นคลาดเคลื่อนจากจุดที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม (Global Optimum) ไปมาก นอกจากนั้นอนุภาคอาจถูกติดจุด และได้รับคำตอบเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optimum)

ในปี 2006 (Liang, Qin et al. 2006) ได้พัฒนากลยุทธ์วิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization : CLPSO) ที่มีวิธีการเรียนรู้แบบใหม่ที่ครอบคลุมตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนหน้านี้ของอนุภาคอื่นๆ เพื่อเป็นแบบอย่างที่ต้องเรียนรู้จากอนุภาคนั้นๆ และแต่ละมิติของอนุภาคสามารถเรียนรู้ได้จากตัวอย่างที่แตกต่างกัน ทำให้อนุภาคมีแบบอย่างมากขึ้นในการเรียนรู้และพื้นที่ที่มีศักยภาพที่จะบินได้มากขึ้น กล่าวคืออัลกอริทึมแบบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) ค่าพีเบสต์ (Pbest) ของอนุภาคอื่นๆ สามารถถูกใช้เป็นแบบอย่างเพื่อเป็นแนวทางในการบินของอนุภาคนั้นๆ และแต่ละมิติ (Dimension) ของแต่ละอนุภาคสามารถเรียนรู้จากค่าพีเบสต์ (Pbest) ของมิติที่สอดคล้องกันของอนุภาคอื่นได้ การทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงกลยุทธ์วิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) เพื่อใช้ประโยชน์จากข้อมูลในกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และคาดการณ์ว่าจะสามารถแก้ปัญหากลุ่มอนุภาคของการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ได้ นอกจากนั้นยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีกลุ่มอนุภาคอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่เกิดขึ้นหลายรูปแบบที่มีความซับซ้อน

ในปี 2009 (Mahadevan and Kannan 2010) ได้แก้ปัญหการจ่ายพลังงานแบบรีแอกทีฟ (Reactive Power Dispatch : RPD) ด้วย ด้วยการแก้ปัญหาที่เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง ไม่เป็นเชิงเส้น และมีความไม่แน่นอนที่ทำให้การหาคำตอบมีความซับซ้อนและมีหลายค่าที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local Optimum) พบว่าวิธีการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม CLPSO สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมกว่า และสามารถให้คำตอบที่มีการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า จึงสรุปได้ว่า CLPSO สามารถหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องเรื่องการลู่เข้าหาคำตอบก่อนครบกำหนดเวลา (Premature convergence) ของอัลกอริทึมดั้งเดิมได้

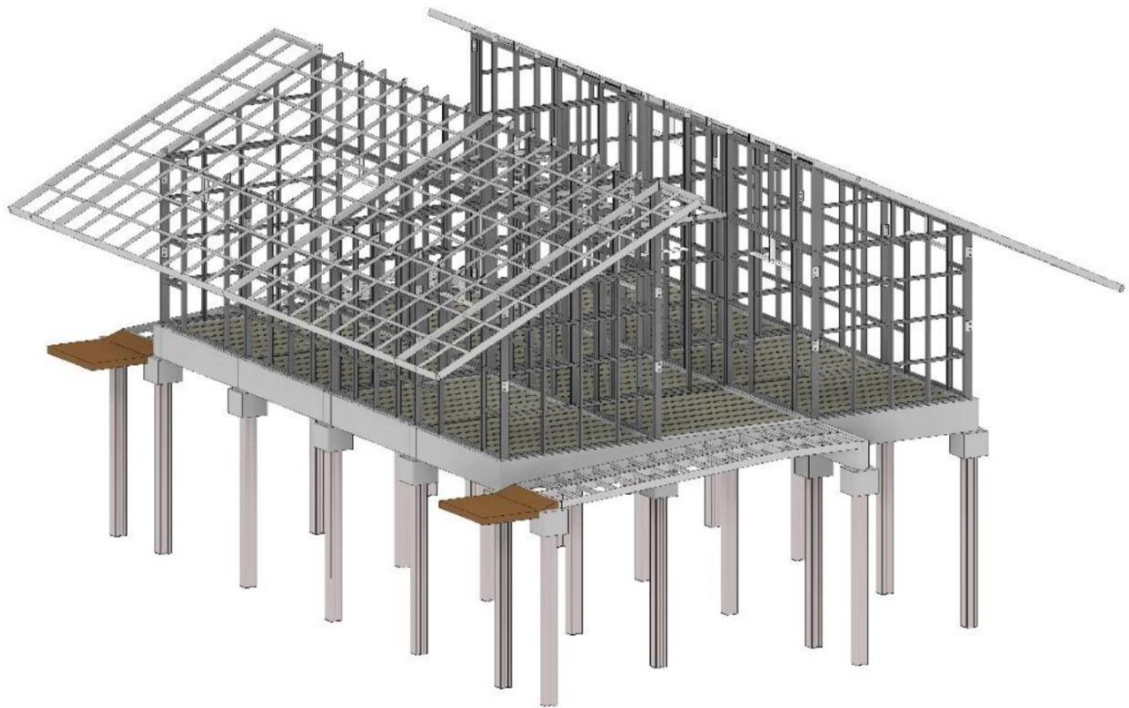


บทที่ 3

การกำหนดเงื่อนไข และขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหา

3.1 ที่พักอาศัยระบบพานอล (Panel Systems) โครงเหล็กกล้าวาไนซ์

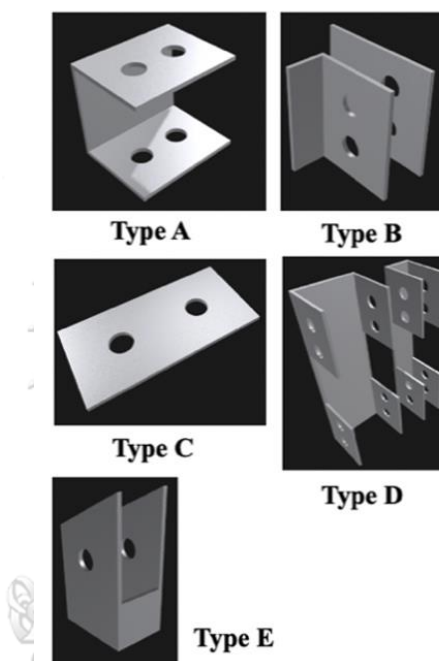
ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาที่อยู่อาศัยระบบพานอลผนัง (Panel Systems) โครงเหล็กกล้าวาไนซ์ซึ่งออกแบบโดยใช้ระบบโมดูลาร์ เป็นแบบจำลองที่ตอบสนองต่อการก่อสร้างที่อยู่อาศัยที่ต้องการกำลังผลิตจำนวนมาก คุณภาพได้มาตรฐาน และมีความแม่นยำ เนื่องจากเป็นระบบโมดูลพานอลเป็นระบบที่ขึ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมดถูกผลิตสำเร็จรูปจากโรงงานและขนส่งมาที่สถานที่หน้างานเพื่อทำการประกอบติดตั้ง ขึ้นส่วนทั้งหมดจึงสามารถควบคุมคุณภาพได้อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้โมดูลพานอลมีรูปแบบที่ซ้ำกันได้ รวมถึงการออกแบบการเชื่อมต่อให้มีรูปแบบที่สามารถใช้ซ้ำได้ทั้งโครงสร้าง เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการผลิต ระยะเวลา และต้นทุนในการผลิต ตัวอย่างแบบโครงสร้างบ้านพักอาศัยระบบพานอล (Panel Systems) โครงเหล็กกล้าวาไนซ์ แสดงให้เห็นด้วยแบบจำลองของการเคหะแห่งชาติ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ตัวอย่างของที่พักอาศัยสำเร็จรูประบบพานอลโครงเหล็กกล้าวาไนซ์

3.2 ออกแบบประเภทของการเชื่อมต่อเบื้องต้น

การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลส่วนประกอบโครงสร้างสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทหลัก ได้แก่ การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล (Inter-module Connection) การเชื่อมต่อภายในโมดูล (Intra-module Connection) การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลกับฐานราก (Module to foundation Connection) ในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอการเชื่อมต่อห้าประเภท Type A ถึง E แสดงดังรูปที่ 17 ซึ่งจะใช้เป็นรูปแบบการเชื่อมต่อหลัก การใช้งานของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 17 ประเภทของการเชื่อมต่อ
ตารางที่ 5 การทำงานของการเชื่อมต่อแต่ละประเภท

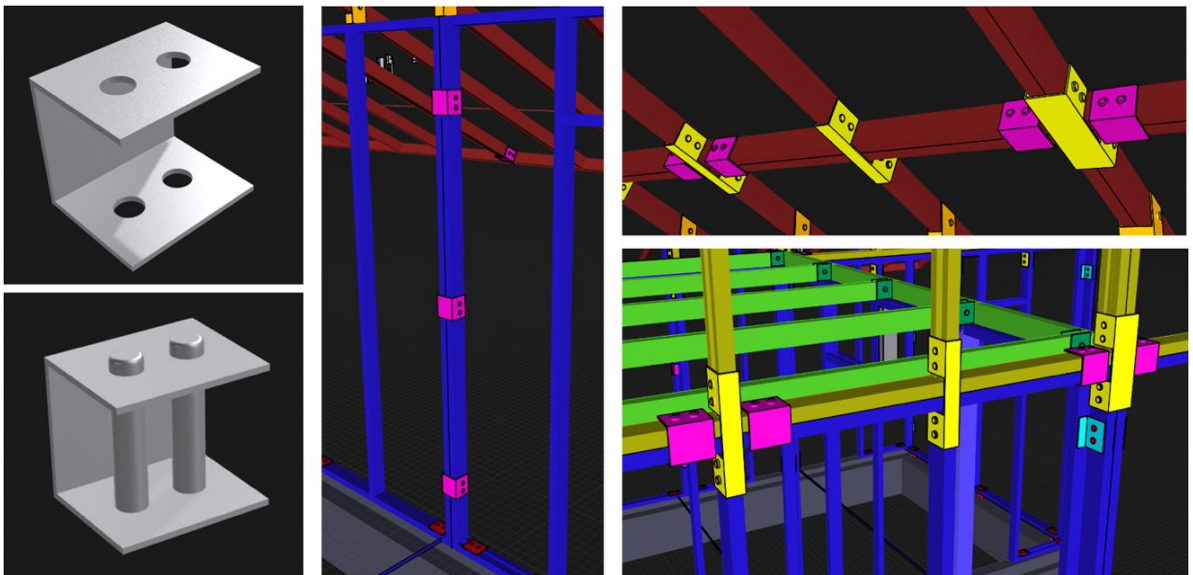
ประเภทการเชื่อมต่อ	การใช้งาน
Type A	เชื่อมต่อแผ่นผนังในแนวระนาบ
Type B	เชื่อมต่อแผ่นผนังทำมุมฉาก
Type C	เชื่อมต่อแผ่นผนังร่วมกับ Type B
Type D	เชื่อมต่อแผ่นผนังบนล่าง เชื่อมต่อชิ้นส่วนหลังคา
Type E	เชื่อมต่อแผ่นผนังกับหลังคา

ในการออกแบบการเชื่อมต่อเบื้องต้น สลักเกลียวและชิ้นส่วนข้อต่อมีรายละเอียดดังนี้

- bolt ใช้ ASTM - A325 , ขนาด Dia.16 mm
- กำลังรับแรงดึง (Tensile strength) 3080 kg/cm^2
- กำลังรับแรงกด (Compressive strength) 1470 kg/cm^2
- กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) 1170 kg/cm^2 พร้อมแหวนรอง
- แผ่นเหล็ก (Steel plate) ความหนา 6 mm
- ข้อต่อ, 4-6 mm
- ขนาดรูเจาะ, Dia. $16+1.5 \text{ mm}$
- ระยะห่างระหว่างรูเจาะไม่น้อยกว่า 6 cm
- ระยะห่างของรูเจาะกับขอบไม่ต่ำกว่า 2.7 cm

การเชื่อมต่อแต่ละประเภทจะถูกกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน โดยจะกำหนดตามความสามารถในการเชื่อมต่อและความสอดคล้องที่ข้อต่อที่เชื่อมต่อของแต่ละองศาเสรี (DOFs) ดังนี้

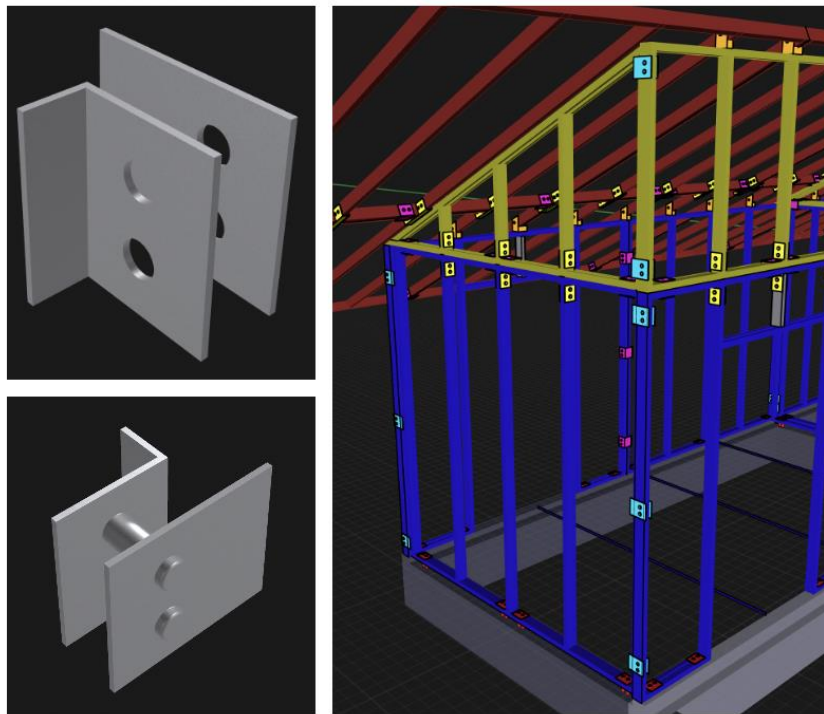
1. ข้อต่อ TYPE A - เชื่อมต่อแผ่นผนังในแนวระนาบ



รูปที่ 18 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE A

Restraints in Joint Local Directions: การหมุนรอบแกน x

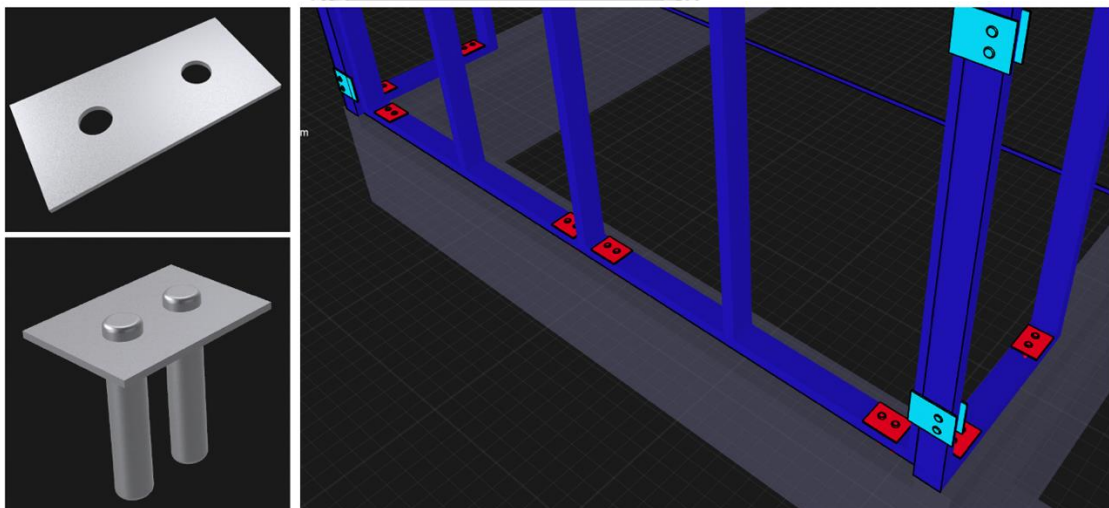
2. ข้อต่อ TYPE B - เชื่อมต่อแผ่นผนังทำมุมฉาก



รูปที่ 19 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE B

Restraints in Joint Local Directions: การหมุนรอบแกน x และแกน z

3. ข้อต่อ TYPE C – เชื่อมต่อแผ่นผนังกับคานคอนกรีต, เชื่อมต่อแผ่นผนังร่วมกับ Type B

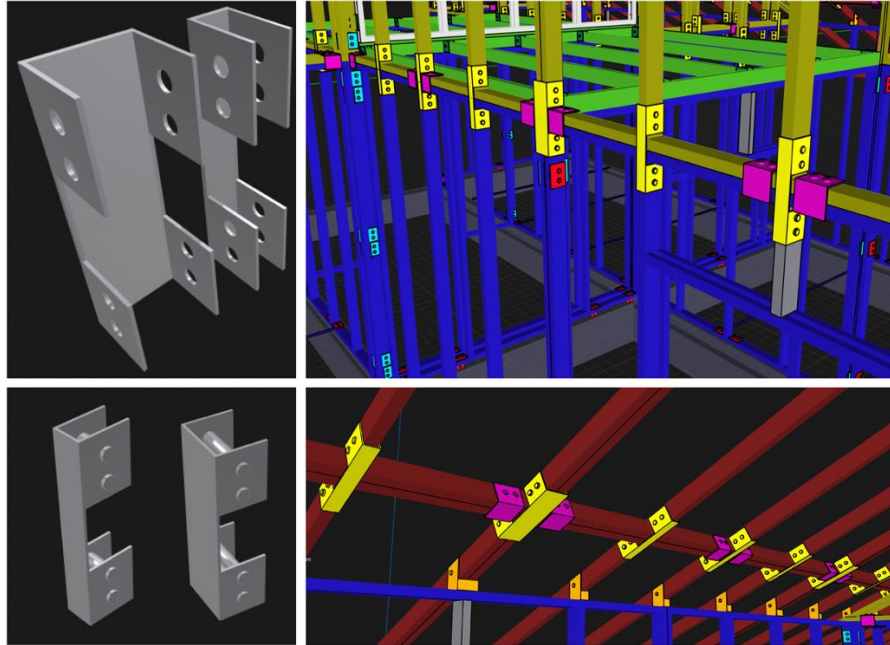


รูปที่ 20 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE C

Restraints in Joint Local Directions: การเคลื่อนที่ในแนวแกน x, y และ z

การหมุนรอบแกน y และแกน z

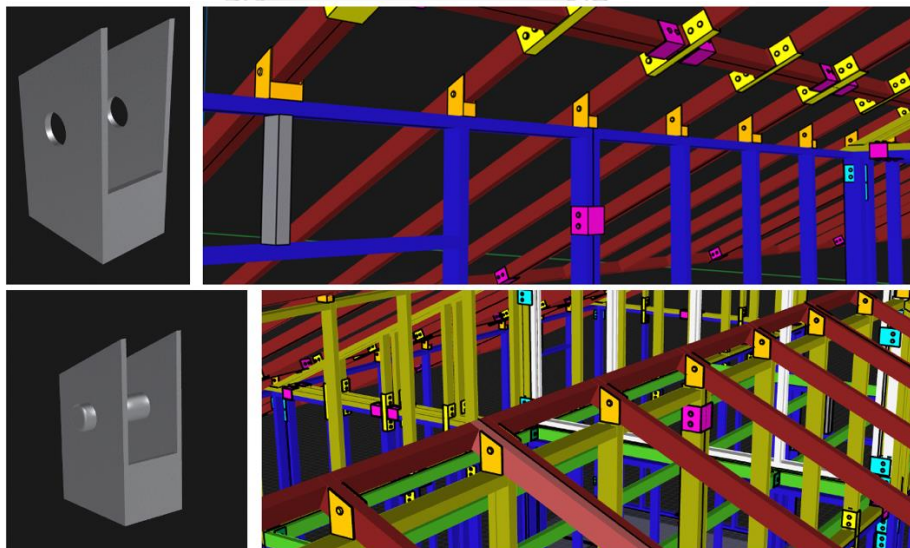
4. ข้อต่อ TYPE D – เชื่อมต่อแผ่นผนังบนล่าง, เชื่อมต่อชิ้นส่วนหลังคา



รูปที่ 21 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE D

Restraints in Joint Local Directions: การหมุนรอบแกน y

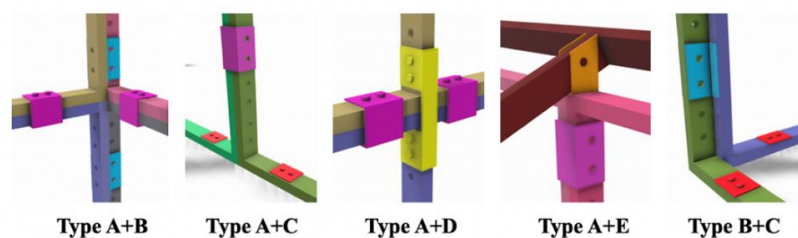
5. ข้อต่อ TYPE E - เชื่อมต่อแผ่นผนังกับหลังคา



รูปที่ 22 ตัวอย่างการใช้ข้อต่อ TYPE E

Restraints in Joint Local Directions: การหมุนรอบแกน y และแกน z

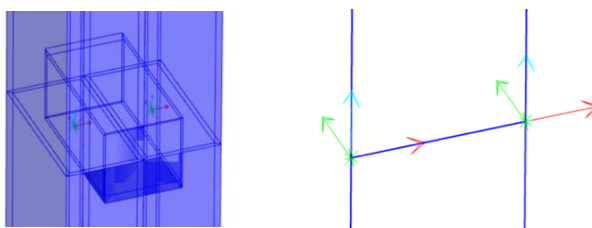
ในการเชื่อมต่อโครงสร้างสำเร็จรูปนอกจากห้าประเภทการเชื่อมต่อที่ได้นำเสนอไป รูปที่ 23 แสดงการผสมผสานการใช้งานการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ การเชื่อมต่อทั้งหมดนี้จะถูกกำหนดตำแหน่งไว้ล่วงหน้าในโครงสร้างบ้านพักอาศัยระบบพานελโครงเหล็ก การเชื่อมต่อแต่ละชุดจะกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน



รูปที่ 23 การผสมผสานการใช้งานของการเชื่อมต่อ Type A ถึง E

เนื่องจากโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนโมดูลสำเร็จรูปเชื่อมต่อกัน ทำให้แบบจำลองโครงสร้างมีข้อต่อ (node) ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่ใช่จุดเดียวกัน ในการเชื่อมต่อระหว่างโหนดนี้จะถูกจำลองโดยการใช้ zero-length line elements แสดงดังรูปที่ 24 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมระหว่างโหนดสองโหนดที่อยู่ใกล้กันมาก กล่าวคือความยาวของชิ้นส่วนมีค่าใกล้ศูนย์ ทำให้ค่า stiffness ของชิ้นส่วนมีค่าเข้าใกล้อนันต์ ส่งผลให้ชิ้นส่วนดังกล่าวทำหน้าที่เชื่อมสองโหนดเสมือนเป็น Rigid joint ทั้งนี้เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลทางกายภาพและระยะกระจัดที่เปลี่ยนไปของสองโหนดที่มีการเชื่อมต่อกัน

ในการวิเคราะห์โครงสร้างโมดูลพานελผนังโครงเหล็ก zero-length line elements จะถูกกำหนดจำนวนขั้นต่ำที่ใช้ในการเชื่อมต่อโครงสร้างโมดูลพานελแต่ละโมดูลเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำโครงสร้างบ้านโมดูลสำเร็จรูปไปวิเคราะห์หาการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ ให้เหมาะสมที่สุด



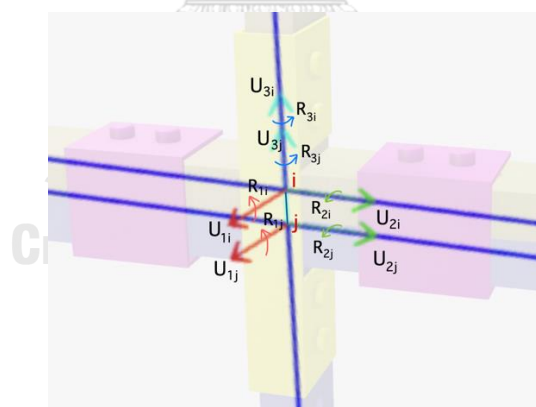
รูปที่ 24 ตัวอย่างจำลอง Zero-length line element ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเบื้องต้น

การใส่การเชื่อมต่อประเภทต่างๆ ในโครงสร้างจะมีการสร้างเงื่อนไขการเชื่อมต่อเพื่อให้เกิดความสอดคล้องที่แต่ละ DOF ของสองโหนดที่เชื่อมต่อกัน ในงานวิจัยนี้จะจำลองการเชื่อมต่อของสองโหนดนั้นๆ ด้วยการใช้ zero-length line element สำหรับการสร้างความสอดคล้องในการเกิดการกระจัด ($U_{1i} = U_{1j}$, $U_{2i} = U_{2j}$, $U_{3i} = U_{3j}$) และใช้การกำหนดการรับแรงที่ DOF ต่างๆ ของแต่ละ

ลักษณะการเชื่อมต่อที่สองโหนดที่มีการเชื่อมต่อกันให้เหมือนกัน ทั้งนี้เพื่อสร้างเงื่อนไขการทำงานที่แต่ละ DOF ของสองโหนดให้สอดคล้องกัน เงื่อนไขการทำงานของข้อต่อที่ออกแบบไว้ห้าประเภทและการเชื่อมต่อที่ผสมผสานกันห้าประเภทแสดงดังตารางที่ 6 โดย T และ F ที่กำหนดในแต่ละ DOF หมายถึงการกำหนดให้ DOF นั้นมีการรับแรงและไม่รับแรงตามลำดับ ในการสร้างความสอดคล้องจากการเชื่อมต่อดังกล่าวจะแสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อสองโหนดด้วยข้อต่อ TYPE A ผสม TYPE D แสดงดังรูปที่ 25 อย่างไรก็ตามเงื่อนไขการเชื่อมต่อในตารางที่ 6 ต้องพิจารณาแนวแกนในการใส่ข้อต่อที่ต่างออกไปซึ่งจะต้องกำหนดเป็นประเภทย่อยของข้อต่อแต่ละลักษณะในการวิเคราะห์ปัญหา

ตารางที่ 6 เงื่อนไขการเชื่อมต่อแต่ละ DOFs ของการเชื่อมต่อที่ข้อต่อ

TYPE	DOF					
	U_1	U_2	U_3	R_1	R_2	R_3
A	F	F	F	T	F	F
B	F	F	F	T	F	T
C	T	T	T	F	T	T
D	F	F	F	F	T	F
E	F	F	F	F	T	T
A+B	F	F	F	T	F	T
A+C	T	T	T	T	T	T
A+D	F	F	F	T	T	F
A+E	F	F	F	T	T	T
B+C	T	T	T	T	T	T



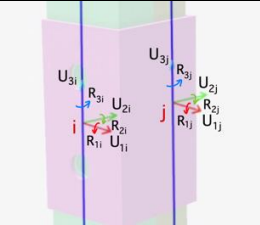
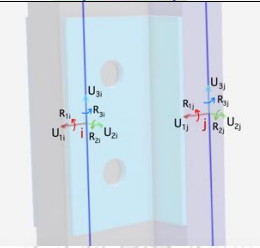
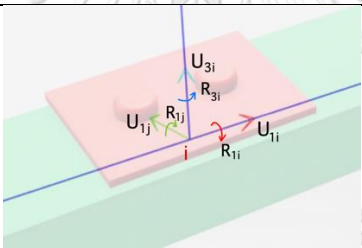
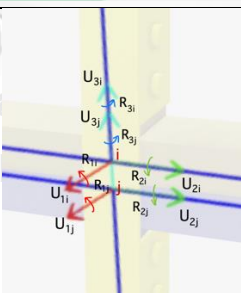
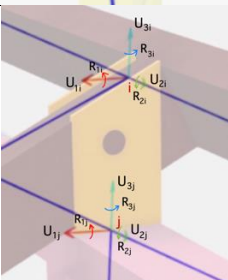
รูปที่ 25 ตัวอย่างการเชื่อมต่อสองโหนดด้วย Zero-length line element และเงื่อนไขการเชื่อมต่อ

TYPE A ผสม TYPE D

จากรูปที่ 25 จะได้ว่าโหนด i และโหนด j มีการเชื่อมต่อกันด้วย Zero-length line element และมีการใส่เงื่อนไขที่กำหนดที่สองโหนดด้วยเงื่อนไข TYPE A+D จากตารางที่ 6 ทั้งสองโหนด จะได้ว่าโหนดสองโหนดนี้มีความสอดคล้องกันของการกระจัดและมีเงื่อนไขการทำงานที่ DOF R_1 และ R_2 สอดคล้องกัน ซึ่งก็คือการเชื่อมต่อชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยข้อต่อ TYPE A ผสม TYPE D นั้นเอง

จากการใช้ zero-length line element และเงื่อนไขการทำงานของการเชื่อมต่อลักษณะต่างๆ ในตารางที่ 6 แสดงภาพชัดเจนสำหรับการใส่การเชื่อมต่อต่างๆ ในโครงสร้างแรกเริ่มดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เงื่อนไขการเชื่อมต่อลักษณะต่างๆ

TYPE	ภาพตัวอย่าง	เงื่อนไขการเชื่อมต่อ
A		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{1i} = R_{1j}$
B		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{1i} = R_{1j}$ $R_{3i} = R_{3j}$
C		$U_{1i} = U_{1j} = 0$ $U_{2i} = U_{2j} = 0$ $U_{3i} = U_{3j} = 0$ $R_{2i} = R_{2j}$ $R_{3i} = R_{3j}$
D		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{2i} = R_{2j}$
E		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{2i} = R_{2j}$ $R_{3i} = R_{3j}$

TYPE	ภาพตัวอย่าง	เงื่อนไขการเชื่อมต่อ
A+B		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{1i} = R_{1j}$ $R_{2i} = R_{2j}$ $R_{3i} = R_{3j}$
A+C		$U_{1i} = U_{1j} = 0$ $U_{2i} = U_{2j} = 0$ $U_{3i} = U_{3j} = 0$ $R_{1i} = R_{1j}$ $R_{2i} = R_{2j}$ $R_{3i} = R_{3j}$
A+D		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{1i} = R_{1j}$ $R_{2i} = R_{2j}$
A+E		$U_{1i} = U_{1j}$ $U_{2i} = U_{2j}$ $U_{3i} = U_{3j}$ $R_{1i} = R_{1j}$ $R_{2i} = R_{2j}$ $R_{3i} = R_{3j}$
B+C		$U_{1i} = U_{1j} = 0$ $U_{2i} = U_{2j} = 0$ $U_{3i} = U_{3j} = 0$ $R_{1i} = R_{1j}$ $R_{2i} = R_{2j}$ $R_{3i} = R_{3j}$

อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ปัญหา ที่ตำแหน่งโหนดต่างๆ ในโครงสร้างสามารถใส่เงื่อนไขการเชื่อมต่อที่กำหนดไว้ได้ กล่าวคือนอกจากสามารถพิจารณาการเชื่อมต่อในรูปแบบเริ่มต้น ยังสามารถออกแบบเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับตำแหน่งต่างๆ การออกแบบตัวแปรและกรณีวิเคราะห์ปัญหาจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.6

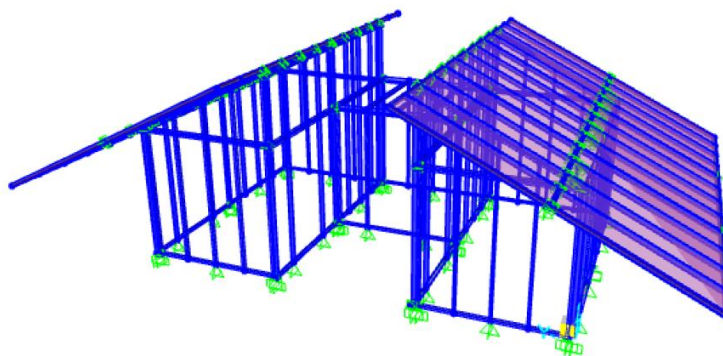
3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 ชนิดของไฟไนต์เอลิเมนต์

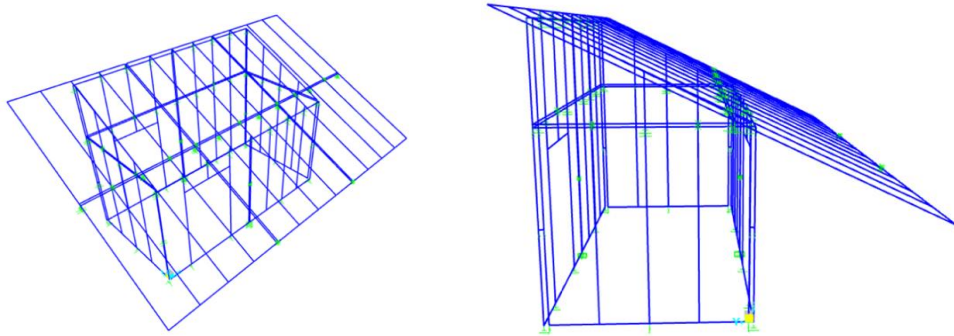
การแบ่งชิ้นส่วนเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งองค์ประกอบชิ้นส่วนได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ แบ่งชิ้นส่วนแบบเชิงเส้นสองมิติ, แบ่งชิ้นส่วนแบบระนาบสองมิติ, แบ่งชิ้นส่วนสามมิติ และการแบ่งชิ้นส่วนแบบพิเศษโดยการกำหนดขอบเขตเอง

ในการพิจารณาโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้การแบ่งชิ้นส่วนองค์ประกอบแบบ Frame element ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งจะมี Degree of Freedoms จำนวน 12 ค่า ได้แก่การเคลื่อนที่และการหมุนของชิ้นส่วน โดยการแบ่งแต่ละชิ้นส่วนจะประกอบด้วยข้อต่อ (Node) จำนวนสองข้อต่อ และหนึ่งองค์ประกอบชิ้นส่วนเส้นตรง เพื่อวิเคราะห์ปัญหาให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อยให้ได้จำนวนมากที่สุด

โครงสร้างบ้านพักอาศัยสำเร็จรูประบบพานελโครงเหล็กกล้าวไนซ์ประกอบไปด้วยโมดูลพานελผนังโครงเหล็กหลายโมดูลแสดงดังรูปที่ 26 เนื่องจากโครงสร้างมีความสมมาตรทั้งสองแกน จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองหนึ่งในสี่ของบ้านด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 27



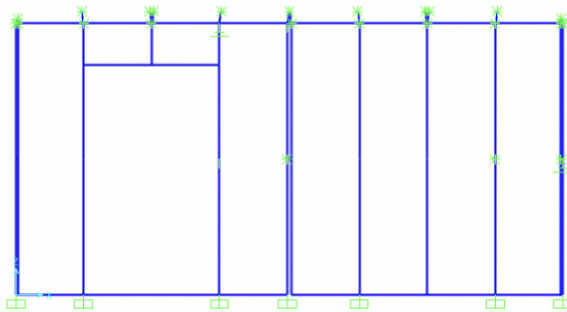
รูปที่ 26 แบบจำลองที่พักอาศัยสำเร็จรูประบบพานελโครงเหล็กกล้าวไนซ์



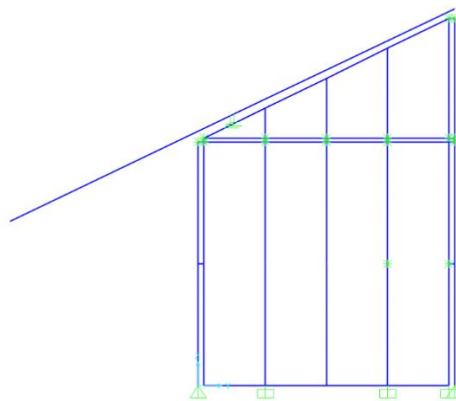
รูปที่ 27 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองหนึ่งในสี่ของบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป

3.3.2 Boundary Conditions

โครงสร้างที่อยู่อาศัยนี้ออกแบบให้วางบนฐานรากสำเร็จรูปและคานสำเร็จรูปซึ่งจะไม่พิจารณาในการออกแบบ เงื่อนไขขอบเขตของการเชื่อมต่อของโมดูลพาเนลผนังโครงเหล็กกับฐานรากสำเร็จรูปจะกำหนดให้ถูกเชื่อมต่อด้วยการเชื่อมต่อ Type C ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อที่ยึดไม่ให้เกิดการเลื่อนในทุกแนวแกน และต้านทานโมเมนต์ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผนัง สำหรับการเชื่อมต่อประเภทอื่นๆ จะถูกกำหนดเป็นตัวแปรทั้งหมด สำหรับโครงสร้างที่ถูกกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น แสดงแบบจำลองดังรูปที่ 28 และ 29



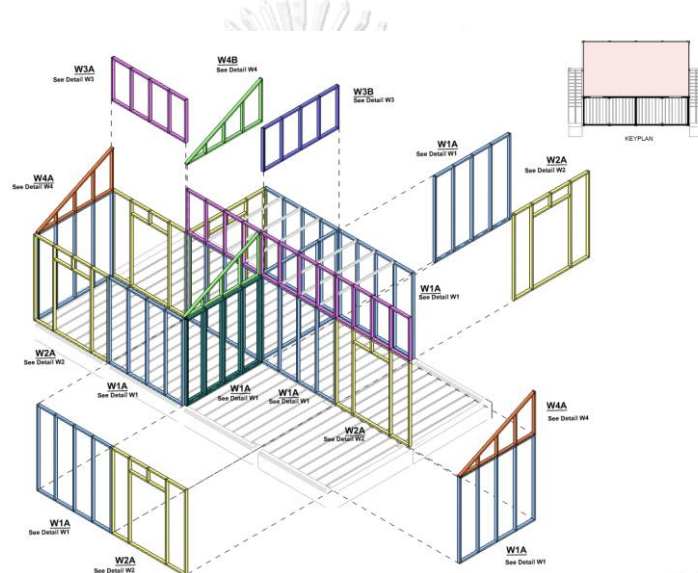
รูปที่ 28 แบบจำลองด้านหน้าบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป



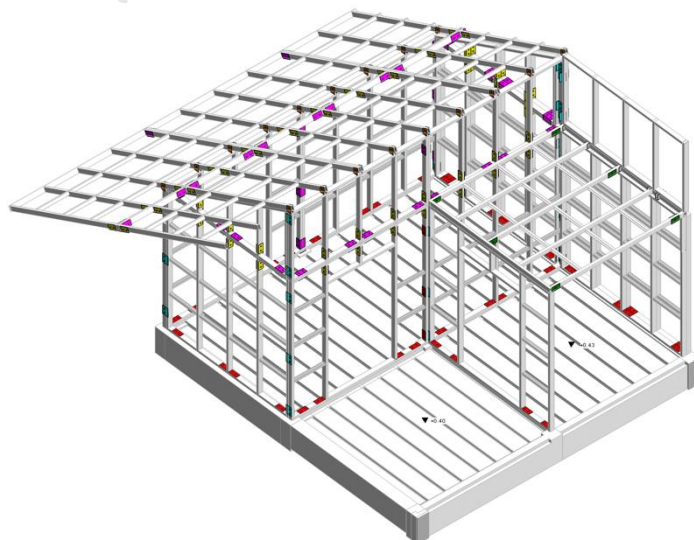
รูปที่ 29 แบบจำลองด้านข้างของบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป

3.3.3 ขนาดของโครงสร้างบ้านพักอาศัยระบบพานลผนังโครงเหล็ก

โครงสร้างตัวอย่างประกอบจากโมดูลพานลผนังที่ผลิตขึ้นสำเร็จรูปโดยแต่ละโมดูลใช้เหล็กกล่องขนาด 38×76 มิลลิเมตร² ความหนา 2.3 มิลลิเมตร ทั้งหมดถูกเชื่อมให้เป็นแผงผนังขนาดไม่เกิน 2.4×2.4 เมตร² (รูปที่ 30) เพื่อให้สามารถขนส่งด้วยรถบรรทุกทุกขนาดมาตรฐานได้ อย่างไรก็ตามแม้ส่วนประกอบโมดูลพานลผนังและการเชื่อมต่อจะถูกออกแบบรูปลักษณะที่ซ้ำกันเพื่อให้สามารถผลิตได้ที่ละจำนวนมาก แต่การเชื่อมต่อยังถูกกำหนดให้มีจำนวนมากเกินความจำเป็น (รูปที่ 31) ดังนั้นการพัฒนาประสิทธิภาพของโครงสร้างนี้มุ่งเน้นการกำหนดตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดในการประกอบต่อบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูปดังกล่าว



รูปที่ 30 โมดูลพานลผนังสำเร็จรูปของโครงสร้าง



รูปที่ 31 ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลผนังเริ่มต้นของที่พักอาศัยสำเร็จรูป

3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปในสามมิติ จะทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแบบจำลองโครงสร้างผ่านซอฟต์แวร์ SAP2000 ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เพื่อลดระยะเวลาของการวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างโดยใช้การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้าง แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นใน SAP2000 สามารถเข้าถึงและสื่อสารด้วยโค้ด PYTHON ผ่านฟังก์ชัน Application Programming Interface (API) และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึม Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) โดยใช้คุณสมบัติของการเชื่อมต่อและแรงกระทำตามข้อกำหนดมาตรฐาน AISI-LRFD (Construction 2001) อัลกอริทึม CLPSO จะหาค่าของตัวแปรและเปรียบเทียบผลลัพธ์การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเงื่อนไขแต่ละกรณีและพัฒนาคำตอบเพื่อลู่เข้าหาคำตอบในการวางตำแหน่งของข้อต่อที่น้อยที่สุดของโครงสร้างอย่างเหมาะสม

3.3.5 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของวัสดุ (DuraGal March 2002)

คุณสมบัติ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
Yield Strength of Cold-formed Steel (Grade SGC490)	F_y	300	MPa
Modulus of Elasticity	E	210000	MPa
Shear Modulus	G	80000	MPa
Density	ρ	7850	kg/m ³
Poisson's Ratio	ν	0.3	-

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปในโครงการวิจัยนี้ ชิ้นส่วนโครงสร้างเลือกใช้วัสดุ Rectangular Hollow Section (RHS) เนื่องจากเป็นประเภทของเหล็กที่เหมาะสมกับโครงสร้างโมดูลผนังรับน้ำหนัก สำหรับชิ้นส่วนข้อต่อใช้แผ่นเหล็กที่มีความหนา 4-6 มิลลิเมตร

3.3.6 แรงกระทำบนโครงสร้าง

แรงกระทำบนโครงสร้างที่อยู่อาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปจะออกด้วยวิธีการ AISC-LRFD โดยแรงกระทำทั้งหมด ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load), น้ำหนักบรรทุกจร (Live load), น้ำหนักบรรทุกจรเนื่องจากหลังคา (Roof Live Load) และแรงกระทำด้านข้าง (lateral load) ในการรวมแรงต่างๆ จะถูกกำหนดไว้ในการออกแบบ ซึ่งจะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติในซอฟต์แวร์ SAP2000

- **น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load)**

น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างโมดูลาร์โครงสร้างเหล็ก ซึ่งจะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติในซอฟต์แวร์ SAP2000 นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักของแผ่นเมทัลชีท 0.15 kN/m^2 ซึ่งกระทำบนหลังคาของโครงสร้าง

- **น้ำหนักบรรทุกจร (Live load)**

น้ำหนักบรรทุกจรคือน้ำหนักเกิดขึ้นหรือมีอยู่หรือมีการเปลี่ยนแปลงบนอาคาร เช่น มีคนทำงานประกอบชิ้นส่วนสำหรับอาคารโมดูลาร์ ตามข้อกำหนดของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร น้ำหนักขั้นต่ำสำหรับโครงสร้างหลังคามีค่าเท่ากับ 0.5 kN/m^2

- **น้ำหนักบรรทุกจรเนื่องจากหลังคา (Roof Live Load)**

โครงสร้างโมดูลาร์เนลผนังโครงสร้างนี้รองรับโครงสร้างโมดูลาร์เนลหลังคา ดังนั้นจึงมีน้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคา จากมาตรฐาน ASCE 7-10 และ MBMA-2012 น้ำหนักของแรงกระทำบนหลังคาสามารถลดทอนตามความลาดชันและความกว้างของพื้นที่หลังคาได้ น้ำหนักสูงสุดกำหนดให้มีค่า 0.96 kN/m^2 (20 psf) และน้ำหนักสามารถลดทอนได้ไม่ต่ำกว่า 0.58 kN/m^2 (12 psf) งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ด้วยการกำหนดน้ำหนักบรรทุกจรเนื่องจากหลังคามีค่าเท่ากับ 0.88 kN/m^2 (18.24 psf)

- **แรงกระทำด้านข้าง (lateral load)**

แรงกระทำด้านข้างที่จะพิจารณาในงานวิจัยนี้หมายถึงแรงลม ในการคำนวณแรงลมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร กำหนดว่าในการคำนวณการออกแบบโครงสร้างอาคารจะต้องคำนึงถึงแรงลมด้วย ในการคำนวณแรงลมของอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 10 เมตร แรงลมจะเท่ากับ 0.5 kN/m^2

การวิเคราะห์โครงสร้างนี้รวมแรงอ้างอิงตามมาตรฐานของAISC ด้วยวิธี LRFD ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การรวมแรงกรณีต่างๆ

Case	Load Combination
1	1.4D
2	1.2D + 1.6L + 0.5L _r
3	1.2D + 1.6L _r + 0.5W
4	1.2D + 1.0L + 0.5L _r + 1.0W

โดยที่ D = Dead Load, L = Live Load, L_r = Roof Live Load, W = Wind Load

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างชั้นสูงของบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปเพื่อหาคำตอบการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อที่เหมาะสม

ซอฟต์แวร์ SAP2000 สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุและการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลกระทบของแรงกระทำบนโครงสร้างและการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อต่างๆ ซอฟต์แวร์จะทำการวิเคราะห์โดยการคำนวณและติดตามการเปลี่ยนแปลงของแต่ละชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยเงื่อนไขที่เปลี่ยนไปส่งผลให้พฤติกรรมของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงและสมการมีการปรับเปลี่ยนทุกรอบการคำนวณ โดยซอฟต์แวร์จะคำนวณลูปและอัปเดตเมทริกซ์สติเฟเนสจนกว่าจะสามารถแก้ไขปัญหาได้ เมื่อจำนวนรอบในการคำนวณมากขึ้น คำตอบจะลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการวิเคราะห์ผลซ้ำและการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ตรวจสอบจะสามารถเทียบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

3.5 การออกแบบการแก้ปัญหาด้วย อัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม

Comprehensive Particle Swarm Optimization: CLPSO

สำหรับการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) อนุภาคเรียนรู้จากตัวอย่างเดียวในแต่ละมิติของสำหรับการทำซ้ำสองถึงสามครั้งแทนที่จะเรียนรู้จากสองตัวอย่างคือ ค่าพีเบสต์ และ ค่าจีเบสต์ ในการวนซ้ำทั้งหมดในของวิธีการกลุ่มอนุภาคเดิม รวมทั้งอนุภาคในทุกมิติจะเรียนรู้จากค่าพีเบสต์ที่แตกต่างกันของมิติที่อื่นสำหรับการทำซ้ำสองถึงสามครั้งร่วมด้วย

เนื่องจากในระหว่างกระบวนการค้นหา นั้นจะไม่สามารถทราบได้ว่ามิติไหนของค่าพีเบสต์ของอนุภาคหนึ่งๆ นั้นจะดีหรือไม่ดี ดังนั้นแต่ละมิติของอนุภาคจึงมีโอกาสเท่าเทียมกันที่จะเรียนรู้จากอนุภาคอื่นๆ แต่ละอนุภาคจึงจะมีการอัปเดตความเร็วที่แตกต่างกันดังนี้

$$v_{jd}^{(k+1)} = w \times v_{jd}^{(k)} + rand \times (Pbest_{(fi)d} - x_{jd}) \quad (12)$$

ที่ $Pbest_{(fi)d}$ สามารถเป็นค่าพีเบสต์ของอนุภาคนั้นๆ เอง หรือสามารถเป็นค่าของอนุภาคอื่นได้ ซึ่งสำหรับแต่ละอนุภาค บางมิติค่าพีเบสต์ของอนุภาคอื่นๆ จะถูกสุ่มเลือกตามความน่าจะเป็น (ค่าพีซี : Pc) โดยถูกนิยามไว้ว่าเป็นความน่าจะเป็นในการเรียนรู้ทางสังคม ที่จะเรียนรู้จากในขณะที่มีมิติอื่นๆ

$$w_k = \frac{(w_0 - 0.2) \times (\max_iter - k)}{\max_iter} + 0.2 \quad (13)$$

ฟังก์ชันน้ำหนัก w_k ถูกกำหนดโดยการรวบรวมขั้นตอนที่ทำให้เกิดการค้นหาแบบสม่าเสมอในระยะเริ่มต้นและการค้นหาในท้องเฉพาะที่ในระยะหลัง w_k คือฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักสำหรับการวนซ้ำ k ครั้งในระหว่างกระบวนการหาคำตอบ ความเร็วของแต่ละอนุภาคจะเป็นไปตามสมการนี้

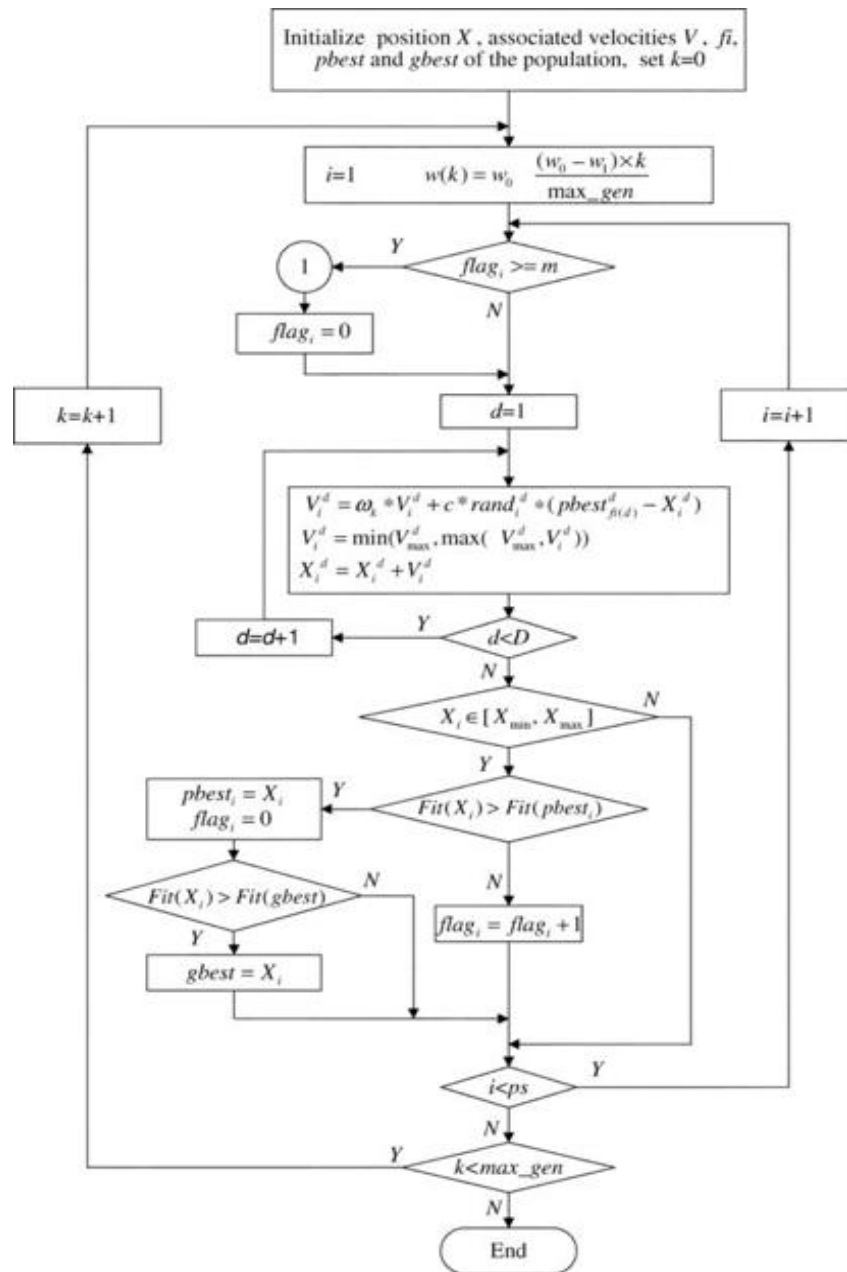
$$v_{id}^{(k)} = \min(v_d^{max}, \max(-v_d^{max}, v_{id})) \quad (14)$$

โดยที่ $v_{max} = 0.25(x_{max} - x_{min})$

x_{max} และ x_{min} คือค่าขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรที่กำหนด

รูปที่ 32 แสดงผังงานของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม

เพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหาย่างเหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดจำนวนการเชื่อมต่อของโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปนี้ จำกำหนดตัวแปรเริ่มต้นคือการทำงานของการทำงานของการเชื่อมต่อที่แต่ละ DOF ของแต่ละตำแหน่งที่ทำการเชื่อมต่อ โดย x_{min} และ x_{max} จะมีค่าเป็น ‘ศูนย์’ และ ‘หนึ่ง’ สำหรับการไม่ทำงาน (False) และการทำงาน (True) ของเงื่อนไขในแต่ละ DOF ของการเชื่อมต่อตามลำดับ



① :Insert the flowchart in Fig. 1 here.

ps : population size

k : generation counter from 1 to max_gen

d : dimension

w : inertia weight ($w_0=0.9, w_1=0.4$)

$flag_i$: the number of generations the i^{th} particle has not improved its own $pbest$.

max_gen : maximum generations

i : particle's id counter from 1 to ps

X_i^d : i^{th} particle's d^{th} dimension's value

$c=1.49445$ m : refreshing gap

32 Flowchart of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO)

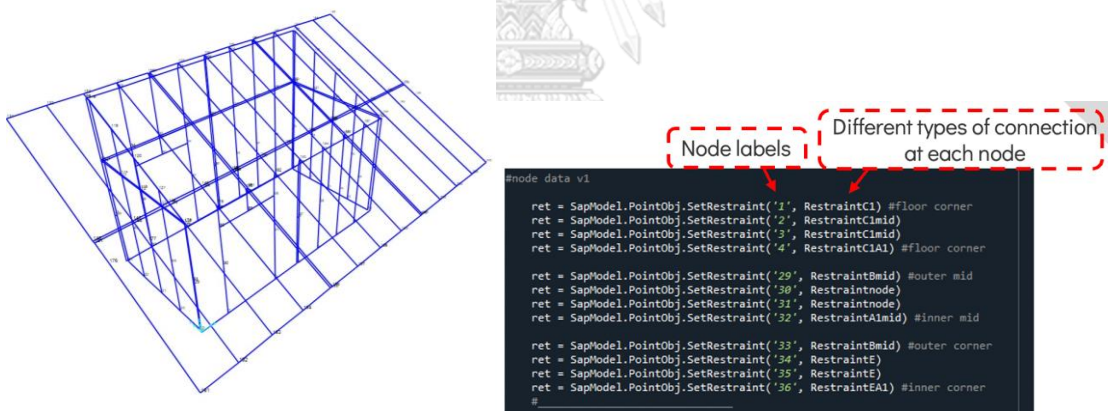
(Cao, Zhang et al. 2018)

3.6 การกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อน้อยที่สุดอย่างเหมาะสม

การเชื่อมต่อที่เสนอในหัวข้อ 3.2 จะถูกออกแบบการวางในตำแหน่งเริ่มต้นที่ได้รับการออกแบบโดยวิศวกรที่มีประสบการณ์ กล่าวคือโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปนั้นจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกมาตรฐานได้อย่างปลอดภัย แต่อาจใช้วัสดุได้ไม่เต็มประสิทธิภาพหรือใช้วัสดุมากเกินไป ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการก่อสร้างโดยตรง งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อวางตำแหน่งของข้อต่อเหล่านั้นอย่างเหมาะสม

เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างโดยรวม และคำนึงถึงพื้นฐานความต้องการการผลิตซ้ำ จึงจะกำหนดตัวแปรในการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปแบบซ้ำกัน กล่าวคือในการกำหนดเงื่อนไขของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างโมดูลจะถูกกำหนดอย่างสมมาตร

ก่อนการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อ จะต้องกำหนดตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อให้กับโหนดแต่ละโหนด ซึ่งสามารถกำหนดให้การเชื่อมต่อแต่ละรูปแบบลักษณะอยู่ในตำแหน่งโหนดที่ต้องการได้ ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อให้กับแต่ละโหนดแสดงดังรูปที่ 33 จากการทำหนดนี้เองจะสามารถกำหนดการเชื่อมต่อภายในโครงสร้างให้มีความสมมาตรได้



รูปที่ 33 ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อให้กับแต่ละโหนด

การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อที่ได้กล่าวไป จะกำหนดให้เป็นตัวแปรการทำงานที่แต่ละ DOF ของแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อ ในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อจะมีเงื่อนไขการทำงานในแต่ละ DOF จำนวน 6 DOFs ประกอบด้วย Translation modes (U_1 , U_2 , U_3) และ Rotation modes (R_1 , R_2 , R_3)

การกำหนดเงื่อนไขการทำงานของการเชื่อมต่อที่มี 6 DOFs ผู้วิจัยได้แบ่งส่วนดังรูปที่ 34 เพื่อพิจารณาออกแบบกรณีการวิเคราะห์เงื่อนไขการเชื่อมต่อ

TYPE	DOF					
	U ₁	U ₂	U ₃	R ₁	R ₂	R ₃
A	F	F	F	T	F	F
B	F	F	F	T	F	T
C	T					T
D	F					T
E	F					F
A+B	F					T
A+C	T					T
A+D	F					F
A+E	F					T
B+C	T					T

กำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อตามที่ได้ออกแบบในแต่ละกรณี

Translation modes Rotation modes

รูปที่ 34 การแบ่งส่วนพิจารณาเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ

ในส่วน **Translation modes** เงื่อนไขการเชื่อมต่อที่ DOF ส่วน translation จะกำหนดให้เป็น False เพื่อแสดงว่าโหนดที่ตำแหน่งนั้นสามารถเกิดการกระจัดได้ ยกเว้นรูปแบบการเชื่อมต่อที่ตำแหน่ง base ของโครงสร้าง (มีการใช้ TYPE C หรือ A+C หรือ B+C ยึดต่อในลักษณะ supports) เงื่อนไขการเชื่อมต่อที่ DOF ส่วน translation จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรซึ่งสามารถให้ผลลัพธ์เป็น 'True (1)' คือที่ DOF ของการเชื่อมต่อรูปแบบนั้น 'ทำงาน' กล่าวคือมีการยึดต่อกับฐานรากไม่เกิด translation หากตัวแปรให้ผลลัพธ์เป็น 'False (0)' คือที่ DOF ของการเชื่อมต่อรูปแบบนั้น 'ไม่ทำงาน' จะได้ว่าไม่มีการเชื่อมต่อตั้งกล่าวที่ตำแหน่งนั้น

ในส่วน **Rotation modes** จะกำหนดเป็นตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อตามที่ได้ออกแบบเพื่อพิจารณาวิเคราะห์การออกแบบการวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดสำหรับกรณีต่างๆ โดยหากตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อนั้นให้ผลลัพธ์เป็น 'True (1)' คือที่ DOF ของการเชื่อมต่อรูปแบบนั้น 'ทำงาน' กล่าวคือมีมุมในการหมุนเท่ากัน หากตัวแปรให้ผลลัพธ์เป็น 'False (0)' คือที่ DOF ของการเชื่อมต่อรูปแบบนั้น 'ไม่ทำงาน' จะได้ว่ามุมในการหมุนอิสระจากกัน

และจากการออกแบบตัวแปรการวางตำแหน่งของข้อต่อลักษณะต่างๆ ให้มีความสมมาตร การวางข้อต่อที่ตำแหน่งต่างๆ จึงถูกกำหนดตัวแปรย่อยเพิ่มเติม เช่น โหนดที่มุมของโมดูลกับโหนดกลางชิ้นส่วนโครงสร้างจะมีตัวแปรต่างกัน แสดงตัวอย่างตัวแปรย่อยดังรูปที่ 35

TYPE	Code
A	#restraintA1mid = [False, False, False, bool(x[0]), bool(abs(x[0]) - abs(x[0])), bool(abs(x[0]) - abs(x[0]))]
B	#restraintB = [False, False, False, bool(x[1]), bool(abs(x[1]) - abs(x[1])), bool(x[1])]
C	#restraintC1 = [bool(x[2]), bool(x[2]), bool(x[2]), bool(abs(x[2]) - abs(x[2])), bool(x[2]), bool(x[2])]
D	#restraintC2 = [bool(x[3]), bool(x[3]), bool(x[3]), bool(x[3]), bool(abs(x[3]) - abs(x[3])), bool(x[3]), bool(x[3])]
E	#restraintD2 = [False, False, False, bool(x[4]), bool(abs(x[4]) - abs(x[4])), bool(abs(x[4]) - abs(x[4]))]
A+B	#restraintD4 = [False, False, False, bool(x[5]), bool(abs(x[5]) - abs(x[5])), bool(x[5]), bool(x[5])]
A+C	#restraintE = [False, False, False, bool(abs(x[6]) - abs(x[6])), bool(x[6]), bool(x[6])]
A+D	#restraintD4A3 = [False, False, False, bool(x[7]), bool(x[7]), bool(abs(x[7]) - abs(x[7]))]
A+E	#restraintD1A2 = [False, False, False, bool(abs(x[8]) - abs(x[8])), bool(x[8]), bool(x[8])]
B+C	#restraintEA1 = [False, False, False, bool(x[9]), bool(x[9]), bool(x[9])]
	#restraintA2B = [False, False, False, bool(x[10]), bool(abs(x[10]) - abs(x[10])), bool(x[10])]
	#restraintD2A2 = [False, False, False, bool(x[11]), bool(abs(x[11]) - abs(x[11])), bool(x[11])]
	#restraintA2A2 = [False, False, False, bool(x[12]), bool(abs(x[12]) - abs(x[12])), bool(x[12])]
	#restraintD3A2 = [False, False, False, bool(abs(x[13]) - abs(x[13])), bool(x[13]), bool(x[13])]
	#restraintC1A1 = bool(x[14]), bool(x[14]), bool(x[14]), bool(x[14]), bool(x[14]), bool(x[14])]
	#restraintA1mid = [False, False, False, bool(abs(x[15]) - abs(x[15])), bool(abs(x[15]) - abs(x[15])), bool(x[15])]
	#restraintBmid = [False, False, False, bool(x[16]), bool(abs(x[16]) - abs(x[16])), bool(x[16])]
	#restraintC1mid = [bool(x[17]), bool(x[17]), bool(x[17]), bool(abs(x[17]) - abs(x[17])), bool(x[17]), bool(x[17])]
	#restraintC2mid = [bool(x[18]), bool(x[18]), bool(x[18]), bool(x[18]), bool(abs(x[18]) - abs(x[18])), bool(x[18]), bool(x[18])]
	#restraintD1tri = [False, False, False, bool(abs(x[19]) - abs(x[19])), bool(x[19]), bool(x[19])]
	#restraintD3tri = [False, False, False, bool(x[20]), bool(abs(x[20]) - abs(x[20])), bool(x[20])]
	#restraintE2 = [False, False, False, bool(abs(x[21]) - abs(x[21])), bool(x[21]), bool(x[21])]
	#restraintA1r = [False, False, False, bool(x[22]), bool(abs(x[22]) - abs(x[22])), bool(abs(x[22]) - abs(x[22]))]
	#restraintnode = [False, False, False, False, False, False]

รูปที่ 35 แสดงการกำหนดประเภทย่อยของรูปแบบการเชื่อมต่อ

จากที่กล่าวมาผู้วิจัยได้ออกแบบกรณีการวิเคราะห์เงื่อนไขการเชื่อมต่อดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์ห่อแบบโดยพิจารณาการทำงานของการทำงานของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทจากรูปแบบการวางตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนด โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนของการเชื่อมต่อจากรูปแบบเริ่มต้นให้น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม

การออกแบบตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อสำหรับกรณีนี้จะอิงตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 6 หัวข้อ 3.2 โดยตัวแปรการเชื่อมต่อนี้จะถูกออกแบบให้ตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรเดียว แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 36 จากที่กล่าวมาจะได้ว่าภายในตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อถูกกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อสำหรับกรณีที่ 1 มีทั้งหมด 23 ตัวแปร ได้ว่าถ้าตัวแปรหนึ่งมีค่าตอบเป็น True หรือแปลงเป็น 1 จะได้ว่ามีการเชื่อมต่อรูปแบบนั้น Active ในตำแหน่งที่กำหนด

(กรอบเขียว) รูปแบบการเชื่อมต่อขึ้นกับตัวแปรเดียว เมื่อตัวแปรนั้นให้คำตอบใดๆ จะส่งผลกับ DOF อื่นๆในรูปแบบการเชื่อมต่อเดียวกัน

```

-----case1-----23 variables
#RestraintA1mid = False ,False ,False ,bool(x[0]) ,bool(abs(x[0])-abs(x[0])) ,bool(abs(x[0])-abs(x[0])) x[0]
#RestraintB = False ,False ,False ,bool(x[1]) ,bool(abs(x[1])-abs(x[1])) ,bool(abs(x[1])-abs(x[1])) x[1]
#RestraintC1 = bool(x[2]) ,bool(x[2]) ,bool(x[2]) ,bool(abs(x[2])-abs(x[2])) ,bool(x[2]) ,bool(x[2])
#RestraintC2 = bool(x[3]) ,bool(x[3]) ,bool(x[3]) ,bool(abs(x[3])-abs(x[3])) ,bool(abs(x[3])-abs(x[3])) ,bool(x[3])
#RestraintD2 = False ,False ,False ,bool(x[4]) ,bool(abs(x[4])-abs(x[4])) ,bool(abs(x[4])-abs(x[4]))
#RestraintD4 = False ,False ,False ,bool(x[5]) ,bool(abs(x[5])-abs(x[5])) ,bool(abs(x[5])-abs(x[5]))
#RestraintE = False ,False ,False ,bool(abs(x[6])-abs(x[6])) ,bool(x[6]) ,bool(x[6])
#RestraintD4A3 = False ,False ,False ,bool(x[7]) ,bool(x[7]) ,bool(abs(x[7])-abs(x[7]))
#RestraintD1A2 = False ,False ,False ,bool(abs(x[8])-abs(x[8])) ,bool(x[8]) ,bool(x[8])
#RestraintE41 = False ,False ,False ,bool(x[9]) ,bool(x[9]) ,bool(x[9])
#RestraintA2B = False ,False ,False ,bool(abs(x[10])-abs(x[10])) ,bool(abs(x[10])-abs(x[10])) ,bool(x[10])
#RestraintD2A2 = False ,False ,False ,bool(abs(x[11])-abs(x[11])) ,bool(abs(x[11])-abs(x[11])) ,bool(x[11])
#RestraintA1A2 = False ,False ,False ,bool(x[12]) ,bool(abs(x[12])-abs(x[12])) ,bool(x[12])
#RestraintD3A2 = False ,False ,False ,bool(abs(x[13])-abs(x[13])) ,bool(x[13]) ,bool(x[13])
#RestraintC1A1 = bool(x[14]) ,bool(x[14]) ,bool(x[14]) ,bool(x[14]) ,bool(x[14]) ,bool(x[14])
#RestraintA2 = False ,False ,False ,bool(abs(x[15])-abs(x[15])) ,bool(abs(x[15])-abs(x[15])) ,bool(x[15])
#RestraintBmid = False ,False ,False ,bool(x[16]) ,bool(abs(x[16])-abs(x[16])) ,bool(x[16])
#RestraintC1mid = bool(x[17]) ,bool(x[17]) ,bool(x[17]) ,bool(abs(x[17])-abs(x[17])) ,bool(x[17]) ,bool(x[17])
#RestraintC2mid = bool(x[18]) ,bool(x[18]) ,bool(x[18]) ,bool(x[18]) ,bool(abs(x[18])-abs(x[18])) ,bool(x[18])
#RestraintD1tri = False ,False ,False ,bool(abs(x[19])-abs(x[19])) ,bool(x[19]) ,bool(x[19])
#RestraintD3tri = False ,False ,False ,bool(x[20]) ,bool(abs(x[20])-abs(x[20])) ,bool(abs(x[20])-abs(x[20]))
#RestraintE2 = False ,False ,False ,bool(abs(x[21])-abs(x[21])) ,bool(x[21]) ,bool(x[21])
#RestraintA1r = False ,False ,False ,bool(x[22]) ,bool(abs(x[22])-abs(x[22])) ,bool(abs(x[22])-abs(x[22])) x[22]
#Restraintnode = [False,False,False,False,False]

```

Translation modes

Rotation modes

รูปที่ 36 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ: กรณีที่ 1

- วิเคราะห์ห่อแบบโดยจำกัดการเกิดประเภทของการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ คือตัวแปรจะถูกกำหนดให้มีผลลัพธ์ของการเกิดประเภทการเชื่อมต่ออย่างจำกัด โดยการกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อนี้จะอิงจากเงื่อนไขของแต่ละประเภทการเชื่อมต่อจากกรณีที่ 1 เพียงแต่ไม่บังคับให้แต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อขึ้นอยู่กับตัวแปรเดียว กล่าวคือตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อในแต่ละ DOF จะมีบางตัวแปรถูกกำหนดซ้ำกัน ทั้งนี้เพื่อจำกัดการเกิดประเภทของการเชื่อมต่อตามตัวแปรที่กำหนด แต่ให้อิสระของประเภทการเชื่อมต่อที่แต่ละตำแหน่ง จะได้ว่ากำหนัดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อนี้มีทั้งหมด 44 ตัวแปรแสดงดังรูปที่ 37 การเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ อาจมีรูปแบบการเชื่อมต่อที่แตกต่างจากรูปแบบเริ่มต้น ซึ่งการวิเคราะห์นี้มีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนการเชื่อมต่อและหารูปแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อแต่ละประเภทที่ตำแหน่งต่างๆ อย่างเหมาะสม

ออกแบบตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่ DOF ต่างๆ อิงตามกรณีที่ 1 คือตามตารางที่ 6 แต่ไม่ได้กำหนดให้รูปแบบการเชื่อมต่อขึ้นกับตัวแปรเดียว จะได้ว่ามีบาง DOF ตัวแปรซ้ำกัน การซ้ำกันนี้ทำให้มีบางรูปแบบถูกกำหนดตัวแปรลักษณะเหมือนกัน(กรอบเขียว) ซึ่งเป็นการจำกัดการเกิดประเภทการเชื่อมต่อ

```

#-----case2-----44 variables
#RestraintA1mid = [False, False, False, bool(x[0]), bool(x[1]), bool(x[1])]
#RestraintB = [False, False, False, bool(x[2]), bool(x[3]), bool(x[2])]
#RestraintC1 = [bool(x[4]), bool(x[4]), bool(x[4]), bool(x[5]), bool(x[4]), bool(x[4])]
#RestraintC2 = [bool(x[6]), bool(x[6]), bool(x[6]), bool(x[6]), bool(x[7]), bool(x[6])]
#RestraintD4 = [False, False, False, bool(x[8]), bool(x[9]), bool(x[9])]
#RestraintD5 = [False, False, False, bool(x[10]), bool(x[11]), bool(x[11])]
#RestraintE = [False, False, False, bool(x[12]), bool(x[13]), bool(x[13])]
#RestraintD4A3 = [False, False, False, bool(x[14]), bool(x[14]), bool(x[15])]
#RestraintD1A2 = [False, False, False, bool(x[16]), bool(x[17]), bool(x[17])]
#RestraintEA1 = [False, False, False, bool(x[18]), bool(x[18]), bool(x[18])]
#RestraintA2B = [False, False, False, bool(x[19]), bool(x[20]), bool(x[19])]
#RestraintD2A2 = [False, False, False, bool(x[21]), bool(x[22]), bool(x[21])]
#RestraintA1A2 = [False, False, False, bool(x[23]), bool(x[24]), bool(x[23])]
#RestraintD3A2 = [False, False, False, bool(x[25]), bool(x[26]), bool(x[26])]
#RestraintC1A1 = [bool(x[27]), bool(x[27]), bool(x[27]), bool(x[27]), bool(x[27]), bool(x[27])]
#RestraintA2 = [False, False, False, bool(x[28]), bool(x[28]), bool(x[29])]
#RestraintBmid = [False, False, False, bool(x[30]), bool(x[31]), bool(x[30])]
#RestraintC1mid = [bool(x[32]), bool(x[32]), bool(x[32]), bool(x[33]), bool(x[32]), bool(x[32])]
#RestraintC2mid = [bool(x[34]), bool(x[34]), bool(x[34]), bool(x[34]), bool(x[35]), bool(x[34])]
#RestraintD1tri = [False, False, False, bool(x[36]), bool(x[37]), bool(x[37])]
#RestraintD3tri = [False, False, False, bool(x[38]), bool(x[39]), bool(x[38])]
#RestraintE2 = [False, False, False, bool(x[40]), bool(x[41]), bool(x[41])]
#RestraintA1r = [False, False, False, bool(x[42]), bool(x[43]), bool(x[43])]
#Restraintnode = [False, False, False, False, False, False]
    
```

(กรอบเขียว) ภายในตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่ออาจมีตัวแปรเงื่อนไขการทำงาน ของ DOF ที่ถูกกำหนดซ้ำกัน โดยการกำหนดตัวแปรซ้ำนี้จะอิงจากกรณีที่ 1

Translation modes Rotation modes

รูปที่ 37 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ: กรณีที่ 2

3. วิเคราะห์ออกแบบโดยไม่จำกัดการเกิดประเภทของการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ คือตัวแปรจะถูกกำหนดให้มีผลลัพธ์ของการเกิดประเภทการเชื่อมต่ออย่างอิสระ การออกแบบการวิเคราะห์นี้ตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อในแต่ละ DOF จะถูกกำหนดขึ้นไม่ซ้ำกัน นอกจากนี้ยังให้อิสระของประเภทการเชื่อมต่อที่แต่ละตำแหน่ง กล่าวคือการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ อาจมีรูปแบบการเชื่อมต่อที่แตกต่างจากเริ่มต้น และเกิดเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่หลากหลายมากขึ้นเพื่อหารูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุด ภายในตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อจะกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อดังรูปที่ 38 มีทั้งหมด 80 ตัวแปร ซึ่งการวิเคราะห์นี้มีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนการเชื่อมต่อและหารูปแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นใหม่ในตำแหน่งต่างๆ อย่างเหมาะสม

```

#-----case3-----80 variables
#RestraintA1mid = [False, False, False, bool(x[0]), bool(x[1]), bool(x[2])]
#RestraintB = [False, False, False, bool(x[3]), bool(x[4]), bool(x[5])]
#RestraintC1 = [bool(x[6]), bool(x[7]), True, bool(x[8]), bool(x[9]), bool(x[10])]
#RestraintC2 = [bool(x[11]), bool(x[12]), True, bool(x[13]), bool(x[14]), bool(x[15])]
#RestraintD2 = [False, False, False, bool(x[16]), bool(x[17]), bool(x[16])]
#RestraintD4 = [False, False, False, bool(x[19]), bool(x[20]), bool(x[21])]
#RestraintE = [False, False, False, bool(x[22]), bool(x[23]), bool(x[24])]
#RestraintD4A3 = [False, False, False, bool(x[25]), bool(x[26]), bool(x[27])]
#RestraintA1A2 = [False, False, False, bool(x[28]), bool(x[29]), bool(x[30])]
#RestraintEA1 = [False, False, False, bool(x[31]), bool(x[32]), bool(x[33])]
#RestraintA2B = [False, False, False, bool(x[34]), bool(x[35]), bool(x[36])]
#RestraintD2A2 = [False, False, False, bool(x[37]), bool(x[38]), bool(x[39])]
#RestraintA1A2 = [False, False, False, bool(x[40]), bool(x[41]), bool(x[42])]
#RestraintD3A2 = [False, False, False, bool(x[43]), bool(x[44]), bool(x[45])]
#RestraintC1A1 = [bool(x[46]), bool(x[47]), bool(x[48]), bool(x[49]), bool(x[50]), bool(x[51])]
#RestraintA2 = [False, False, False, bool(x[52]), bool(x[53]), bool(x[54])]
#RestraintBmid = [False, False, False, bool(x[55]), bool(x[56]), bool(x[57])]
#RestraintC1mid = [bool(x[58]), bool(x[59]), True, bool(x[60]), bool(x[61]), bool(x[62])]
#RestraintC2mid = [bool(x[63]), bool(x[64]), True, bool(x[65]), bool(x[66]), bool(x[67])]
#RestraintD1tri = [False, False, False, bool(x[68]), bool(x[69]), bool(x[70])]
#RestraintD3tri = [False, False, False, bool(x[71]), bool(x[72]), bool(x[73])]
#RestraintE2 = [False, False, False, bool(x[74]), bool(x[75]), bool(x[76])]
#RestraintA1r = [False, False, False, bool(x[77]), bool(x[78]), bool(x[79])]
#Restraintnode = [False, False, False, False, False, False]
    
```

(กรอบเขียว) ภายในตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อจะกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการทำงาน ของ DOF อย่างอิสระ (กรอบเหลือง) ในกรณีที่การเชื่อมต่อนั้นอยู่ตำแหน่ง base ตัวแปรที่ DOF สำหรับ U_z จะถูกกำหนดเป็น True เพื่อยึดโครงสร้างกับฐานราก

Translation modes Rotation modes

รูปที่ 38 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อภายในแต่ละตัวแปรรูปแบบการเชื่อมต่อ: กรณีที่ 3

Remark: การออกแบบตัวแปรสำหรับกรณีที่ 2 และ 3 นี้เป็นกรณีศึกษาเพื่อใช้ในการออกแบบลักษณะการเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูป ซึ่งคำตอบอาจให้จำนวนตำแหน่งการเชื่อมต่อที่มากขึ้นจากความหลากหลายของประเภทและลักษณะการเชื่อมต่อที่เหมาะสม เนื่องจากในการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ จะต้องพิจารณาลักษณะของการเชื่อมต่อของโครงสร้าง ดังนั้นคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์จะต้องนำไปพิจารณาออกแบบข้อต่อเพื่อให้มีลักษณะที่เหมาะสมในการใช้งานที่ตำแหน่งนั้นๆ

อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้ การนำเสนอผลลัพธ์สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 จะมีการนำลักษณะการเชื่อมต่อที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อ 3.2 มาพิจารณาตามความเหมาะสมและใส่ข้อต่อตามผลลัพธ์ที่ได้ในตำแหน่งต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของอัลกอริทึมในการลดการวางตำแหน่งของข้อต่อ

จากความต้องการออกแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อที่น้อยที่สุดเพื่อช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างสำหรับแบบโครงสร้างและลักษณะการเชื่อมต่อที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.2 เนื่องจากมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ถูกออกแบบไว้สำหรับแต่ละตำแหน่งแล้ว ดังนั้นจะพิจารณาผลลัพธ์จากกรณีศึกษาแรกเป็นหลัก โดยที่ราคาของการเชื่อมต่อลักษณะต่างๆ อ้างอิงราคากรมบัญชีกลางปี 2565 ซึ่งแสดงข้อมูลได้ดังนี้

ตารางที่ 10 ต้นทุนของการเชื่อมต่อลักษณะต่างๆ

ลักษณะข้อต่อหลัก	ค่าวัสดุ	
	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
TYPE A	ข้อต่อ	47.00
	Bolt	98.00
TYPE B	ข้อต่อ	41.00
	Bolt	98.00
TYPE C	ข้อต่อ	14.00
	Bolt	98.00
TYPE D	ข้อต่อ	180.00
	Bolt	196.00
TYPE E	ข้อต่อ	30.00
	Bolt	49.00

ผู้วิจัยจะนำข้อมูลจากตารางที่ 10 ไปร่วมสรุปผลกับคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ออกแบบในกรณีที่ 1 สำหรับการวางตำแหน่งของข้อต่อที่น้อยที่สุดเพื่อช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างในการออกแบบบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูปตัวอย่าง

3.6.1 การออกแบบตัวแปร

ในการวิเคราะห์การวางตำแหน่งของข้อต่อที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบที่อยู่อาศัยระบบพาเนลผนัง (Panel Systems) โครงเหล็กกล้าวาลไนซ์ กำหนดให้ตัวชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นวัสดุเหล็กมวลเบาชุบสังกะสีหน้าตัด RHS 38 mm. x 76 mm. ความหนา 2.3 mm. ซึ่งเป็นขนาดหน้าตัดมาตรฐานตามตลาดวัสดุก่อสร้าง ในการหาตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เหมาะสมเป็นปัญหาที่ไม่ต่อเนื่อง การออกแบบการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อที่เหมาะสมคือการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งถือเป็นปัญหาที่ไม่ราบรื่น (Non-Smooth Problem) การรวมกันของแรงถูกกำหนดไว้ในการออกแบบและการวิเคราะห์โครงสร้างบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป

3.6.2 การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย

จากที่กล่าวถึงเงื่อนไขการเชื่อมต่อและกรณีการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 และ 3.6 ตามลำดับ ผู้วิจัยได้ออกแบบตัวแปรเป็นการทำงานของเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละ DOFs ของการเชื่อมต่อแต่ละประเภท เพื่อให้ได้คำตอบเป็นเงื่อนไขการเชื่อมต่อ (ประเภทการเชื่อมต่อ) สำหรับการวางในตำแหน่งต่างๆ ที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม กล่าวคือฟังก์ชันเป้าหมายคือผลรวมของจำนวนของการทำงานของเงื่อนไขการเชื่อมต่อสำหรับแต่ละ DOFs ของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทที่น้อยที่สุด

$$\text{Minimize } C(x) = \sum_{i=1}^{nv} x_i \quad : \quad x_i = \begin{cases} 1 & : \text{when restraint is active} \\ 0 & : \text{when restraint is not active} \end{cases} \quad (15)$$

โดยที่ $C(x)$ คือจำนวนเงื่อนไขที่ทำงานทั้งหมดของการเชื่อมต่อ

nv คือจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่พิจารณาในแต่ละกรณี

x_i คือการทำงานของเงื่อนไขที่กำหนดในการเชื่อมต่อแต่ละประเภท

สำหรับกรณีที่ 1 เพื่อวิเคราะห์หาการวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างตัวอย่างที่มีการออกแบบลักษณะการเชื่อมต่อของแต่ละประเภทไว้แล้วนั้น จึงจะมีการออกแบบตัวแปรเงื่อนไขการเชื่อมต่อแต่ละประเภทให้ขึ้นอยู่กับตัวแปรเดียว เพื่อให้ได้คำตอบว่าการเชื่อมต่อนั้นทำงานหรือไม่

3.6.3 เงื่อนไขข้อจำกัด

ในการออกแบบการเชื่อมต่อของโครงสร้างอย่างเหมาะสม ต้องกำหนดข้อจำกัดด้านกำลังของวัสดุและข้อจำกัดในการใช้งานของวัสดุ เพื่อความเสถียรภาพของโครงสร้าง

- ข้อจำกัดด้านของวัสดุ

เนื่องจากโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบการวางตำแหน่งของข้อต่ออย่างเหมาะสมเป็นโครงเหล็กมวลเบาประกอบจากเหล็กกล้าในซึ่ที่มีหน้าตัดเป็นเหล็กกล่อง (RHS) ขนาด 38 mm. x 76 mm. x 2.3 mm. สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนจะรับแรงในแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด จะมีการกำหนดค่าที่ยอมรับได้อย่างปลอดภัยจากการออกแบบตามความสามารถในการรับแรงของชิ้นส่วนดังตารางที่ 11 และข้อจำกัดด้านกำลังของวัสดุจะเป็นไปตามข้อกำหนด AISI S100-2016 & ANSI/AISC 360-16 (AISI 2016) ดังนี้

$$\lambda_i^\sigma = \frac{|\sigma_i|}{\sigma_i^a} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

ตารางที่ 11 ความสามารถในการรับแรงของวัสดุที่กำหนดสำหรับหน้าตัดโครงสร้าง
(Mechanical Engineer Partnership)

Strength constraints	Value (kN, kN-m)
Axial force (A_n)	93.37
Shear force in x-direction (V_{nx})	82.16
Shear force in y-direction (V_{ny})	40.08
Torsion (T_n)	2.87
Moment about major-axes (M_{nx})	5.14
Moment about major-axes (M_{ny})	2.83

เมื่อ A_n คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนระบุ, V_{nx} และ V_{ny} , คือ ความสามารถในการรับแรงเฉือนระบุในแกนหลักและแกนรองตามลำดับ, T_n คือ ความสามารถในการรับแรงบิดระบุ, M_{nx} และ M_{ny} , คือความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดรอบแกนหลักและแกนรองตามลำดับ

- ข้อจำกัดด้านการใช้งาน

ในการกำหนดข้อจำกัดความสามารถในการใช้งานจะแสดงเป็นข้อจำกัดการเกิดเคลื่อนที่ของจุดข้อต่อขององค์ประกอบชิ้นส่วนหรือระยะการโก่งตัว โดยจะพิจารณาชิ้นส่วนวิกฤตของโครงสร้าง ข้อจำกัดที่กำหนดประกอบด้วยอัตราส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้างโครงข้อแข็งสัมพันธ์ (frame drift ratio) Δ/H และอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ (inter-story drift ratio) d/H ที่เกิดขึ้นภายใต้การรวมของแรงกระทำที่กำหนดในการออกแบบ โดยพิจารณา ดังนี้

$$\begin{cases} \lambda_i^d = \frac{|\Delta^*|}{\Delta_u} - 1 \leq 0 \\ \lambda_j^d = \frac{|d^*|}{d_u} - 1 \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้างโครงข้อแข็งสัมพันธ์ Δ^* ต้องมีค่าการกระจัดในแนวนอนที่กำหนดตามมาตรฐาน Δ_u ซึ่งมีค่าเท่ากับ $H/120$ และอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์สูงสุด d^* จะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ d_u ที่กำหนดตามมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ $H/360$ โดยที่ H คือความยาวของโครงข้อแข็ง

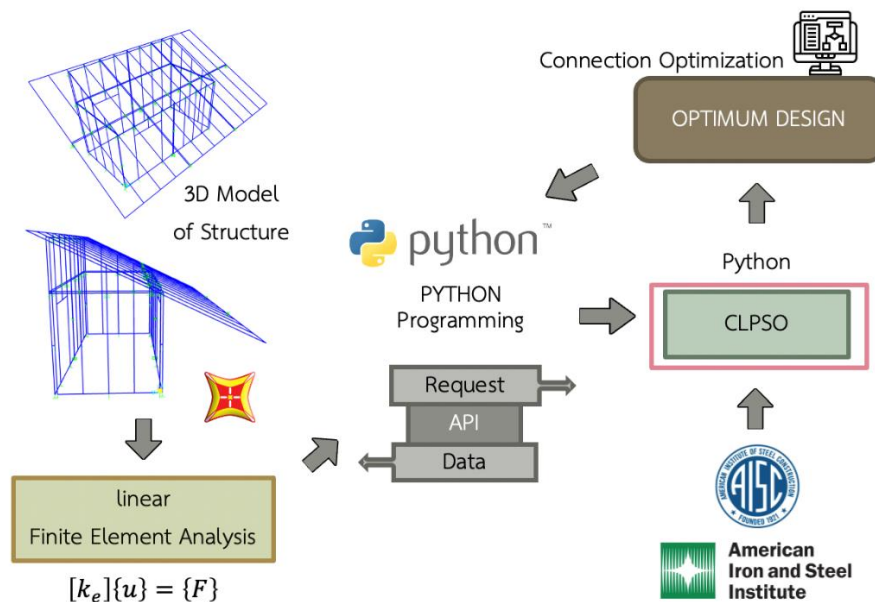
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์การวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม

4.1 กระบวนการวิเคราะห์ออกแบบสำหรับแก้ไขปัญหาการวางตำแหน่งข้อต่อที่เหมาะสมสำหรับบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการในการแก้ปัญหาอย่างเหมาะสมของการกำหนดการวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดในการออกแบบโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปด้วยการใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) โดยการกำหนดตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เป็นไปได้และกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันตามความสอดคล้องของ Degree of Freedom สำหรับแต่ละประเภทการเชื่อมต่อที่ขั้วต่อต่างๆ การวิเคราะห์ออกนี้ทำผ่านตัวอย่างโครงสร้างบ้านพักอาศัยสำเร็จรูประบบพาเนลโครงเหล็กที่ขึ้นส่วนประกอบทั้งหมดประกอบจากวัสดุเหล็กกล่องมวลเบา (Rectangular Hollow Section, RHS) การเชื่อมต่อห้าประเภทและการผสมผสานการเชื่อมต่อห้าประเภทถูกนำเสนอให้เป็นรูปแบบการเชื่อมต่อเริ่มต้นที่พิจารณา

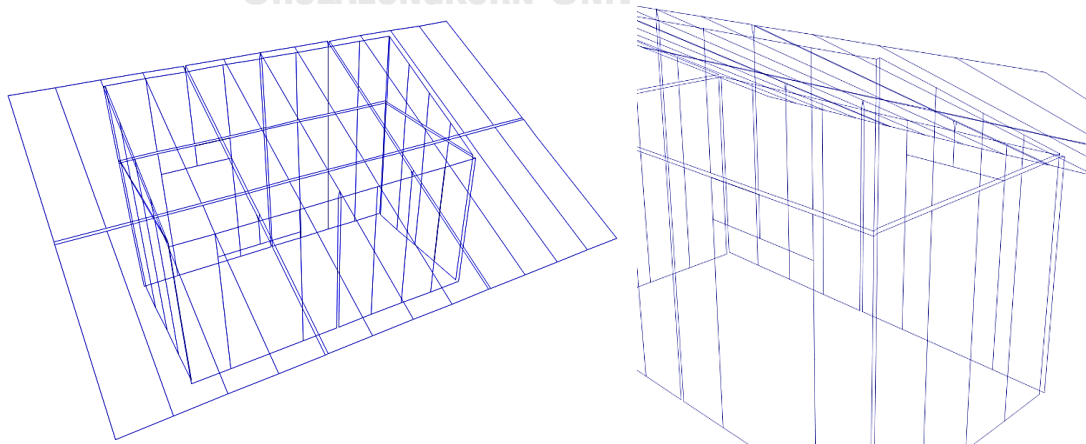
การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์ในการกำหนดการวางตำแหน่งของข้อต่อที่น้อยที่สุดในการออกแบบโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปอย่างเหมาะสม ได้แสดงผลในซอฟต์แวร์ SAP2000 โดยเข้ารหัสด้วย PYTHON ที่แสดงอินเตอร์เฟซโดยตรงผ่านฟังก์ชัน Application Programming Interface (API) และใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์มาพัฒนาสมการและผลลัพธ์ด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) อัลกอริทึม CLPSO จะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างมาสุ่มตัวแปรค่าตอบเพื่อเปรียบเทียบและพัฒนาค่าตอบให้ลู่ออกค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด คือตำแหน่งการเชื่อมต่อของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทในตำแหน่งที่กำหนดให้สามารถเชื่อมต่อได้ภายในโครงสร้าง โดยจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขข้อบังคับที่กำหนด การวิเคราะห์ทั้งหมดแรงกระทำบนโครงสร้างและเงื่อนไขข้อบังคับจะถูกกำหนดให้เป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบมาตรฐาน AISC-LRFD โดยผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ได้จากทุกกรณีจะถูกนำมาวิเคราะห์ซ้ำเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความผิดพลาดที่ยอมรับได้ กระบวนการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์อย่างเหมาะสม แสดงดังรูปที่ 39



รูปที่ 39 กระบวนการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์อย่างเหมาะสม

4.2 ผลการกำหนดการวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดสำหรับการออกแบบบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูป

จากที่กล่าวไปในบทที่ 3 การกำหนดตัวแปรเงื่อนไขต่างๆ ทั้งน้ำหนักบรรทุก คุณสมบัติวัสดุ และเงื่อนไขการเชื่อมต่อในกรณีต่างๆ จะถูกกำหนดด้วยภาษา PYTHON และแสดงผลในซอฟต์แวร์ SAP2000 โดยแบบจำลองที่จะวิเคราะห์การเชื่อมต่อในทุกกรณีจะมีการกำหนดการเชื่อมต่อแต่ละโมดูลพานลที่มุมของโมดูลทั้งหมด ซึ่งถือเป็นจำนวนการเชื่อมต่อขั้นต่ำเริ่มแรก แสดงดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 แบบจำลองโครงสร้างบ้านพักโมดูลาร์สำเร็จรูปด้วยการกำหนดการเชื่อมต่อที่มุมของโมดูล

การวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบสำหรับปัญหานี้คือต้องการจำนวนการเชื่อมต่อที่น้อยที่สุดสำหรับการออกแบบบ้านโมดูลาร์สำเร็จรูป รวมไปถึงเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับตำแหน่งต่างๆ เนื่องจากทั้งโครงสร้างถูกออกแบบด้วยขนาดวัสดุที่กำหนดไว้แล้ว ในที่นี้จะไม่พิจารณาวิเคราะห์ขนาดหน้าตัดของโครงสร้างที่เหมาะสมแต่จะพิจารณาการออกแบบข้อต่อที่ใช้ในโครงสร้าง ผลลัพธ์การวิเคราะห์จะต้องให้โครงสร้างที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ AISC-LRFD โดย CLPSO ได้ถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง ตัวแปรที่กำหนดให้เป็นไปได้คือการทำงานของงานการเชื่อมต่อนั้น ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เป็น '1' หรือ '0' สำหรับการ 'ทำงาน' หรือ 'ไม่ทำงาน' ที่แต่ละ DOF ของการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ ตามลำดับ ทั้งนี้โครงสร้างส่วนที่ไม่ได้กำหนดให้สามารถมีการเชื่อมต่อได้ถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นโครงข้อแข็ง

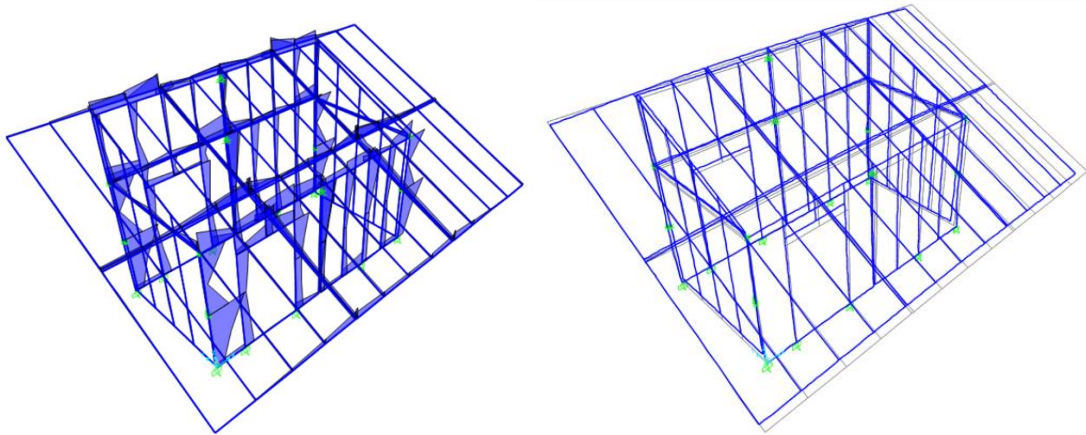
กำหนดเงื่อนไขเพื่อวิเคราะห์ผลสำหรับการออกแบบแต่ละกรณีที่กำหนดในหัวข้อ 3.6 ดังนี้

1. พิจารณาการทำงานของงานการเชื่อมต่อแต่ละประเภทจากรูปแบบการวางตำแหน่งเริ่มต้นที่ **กำหนด** เพื่อลดจำนวนของการเชื่อมต่อจากรูปแบบเริ่มต้นให้น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม : ตัวแปรในกรณีนี้จะถูกออกแบบให้เป็นการทำงานของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทที่ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปแบบการวางการเชื่อมต่อเริ่มต้น มีตัวแปรทั้งหมด 23 ตัวแปร
2. พิจารณาการเชื่อมต่อโดย **จำกัดการเกิดประเภทของการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ** ตัวแปรจะถูกกำหนดอิงจากเงื่อนไขของประเภทการเชื่อมต่อที่นำเสนอในหัวข้อ 3.2 และให้อิสระของประเภทการเชื่อมต่อที่แต่ละตำแหน่ง ทั้งนี้เพื่อลดจำนวนการเชื่อมต่อและหารูปแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อแต่ละประเภทที่ตำแหน่งต่างๆ อย่างเหมาะสม : ตัวแปรที่ออกแบบสำหรับการทำงานในแต่ละ DOF ที่กำหนดในแต่ละประเภทการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ มีทั้งหมด 44 ตัวแปร
3. พิจารณาการเชื่อมต่อโดย **ไม่จำกัดการเกิดประเภทของการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ** ตัวแปรจะถูกกำหนดให้มีผลลัพธ์ของการเกิดประเภทการเชื่อมต่ออย่างอิสระ และมีอิสระของประเภทการเชื่อมต่อที่แต่ละตำแหน่ง ทั้งนี้เพื่อลดจำนวนการเชื่อมต่อและหารูปแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นใหม่ในตำแหน่งต่างๆ อย่างเหมาะสม : ตัวแปรที่ออกแบบสำหรับการทำงานในแต่ละ DOF ที่กำหนดในแต่ละประเภทการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ มีทั้งหมด 80 ตัวแปร

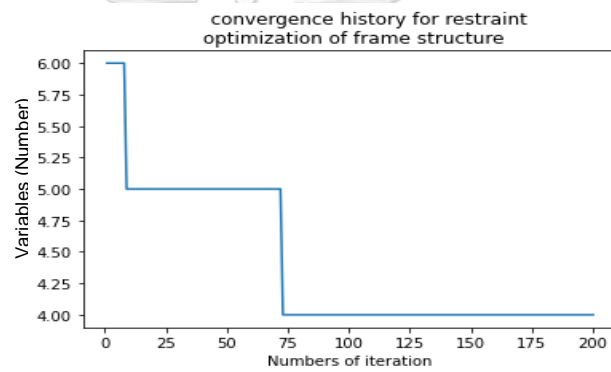
Remark: ในการนำเสนอผลลัพธ์สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 จะนำลักษณะการเชื่อมต่อที่นำเสนอในหัวข้อ 3.2 มาพิจารณาตามความเหมาะสมและใส่ข้อต่อตามผลลัพธ์ที่ได้ในตำแหน่งต่างๆ

จากการวิเคราะห์เงื่อนไขทั้งหมดสำหรับแต่ละกรณี ได้ผลลัพธ์ของการกำหนดตำแหน่งของข้อต่อแต่ละประเภทที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนดดังนี้

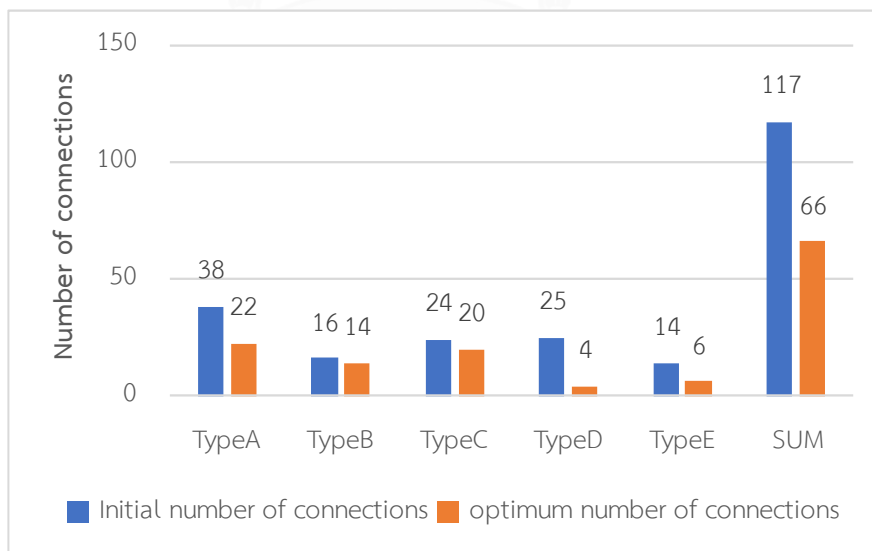
Case1 : 23 variables



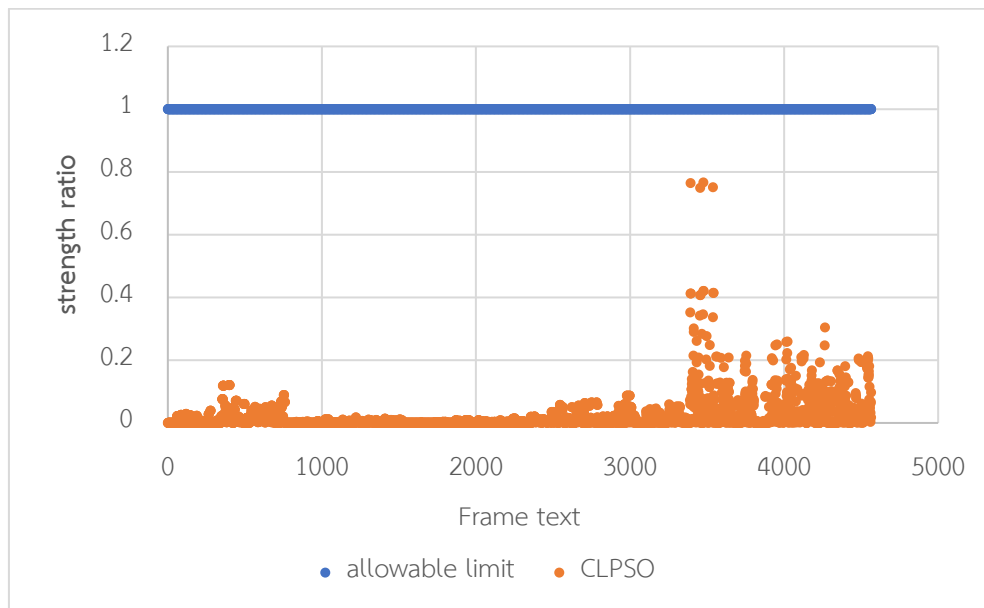
รูปที่ 41 แบบจำลองแสดงผลวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 1



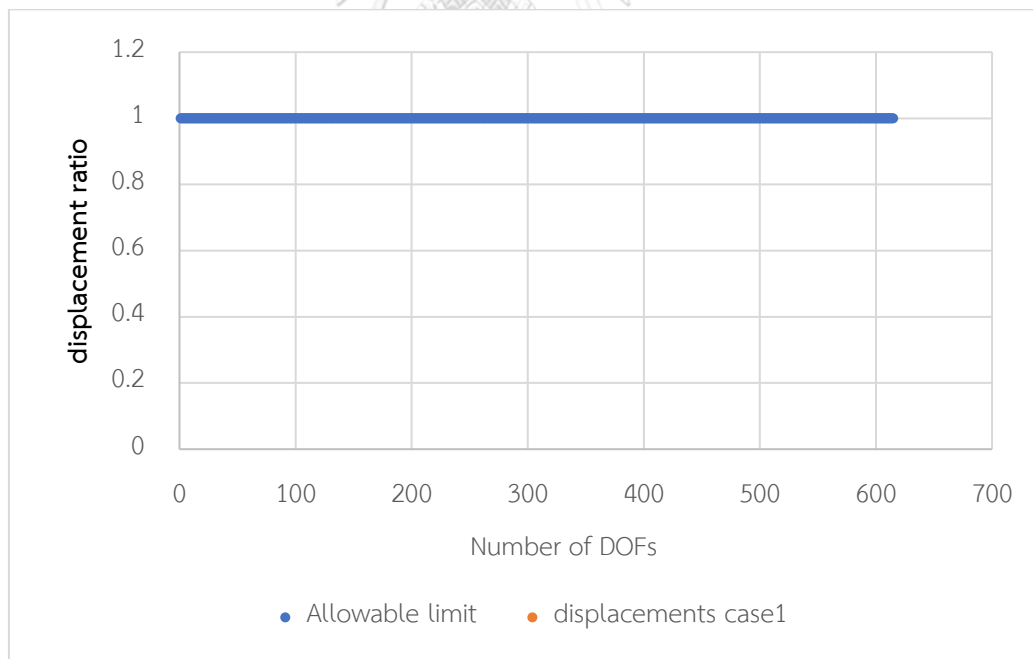
รูปที่ 42 การลู่เข้าหาคำตอบและแบบวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 1



รูปที่ 43 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของการเชื่อมต่อที่ใช้ในแต่ละประเภท: กรณีที่ 1

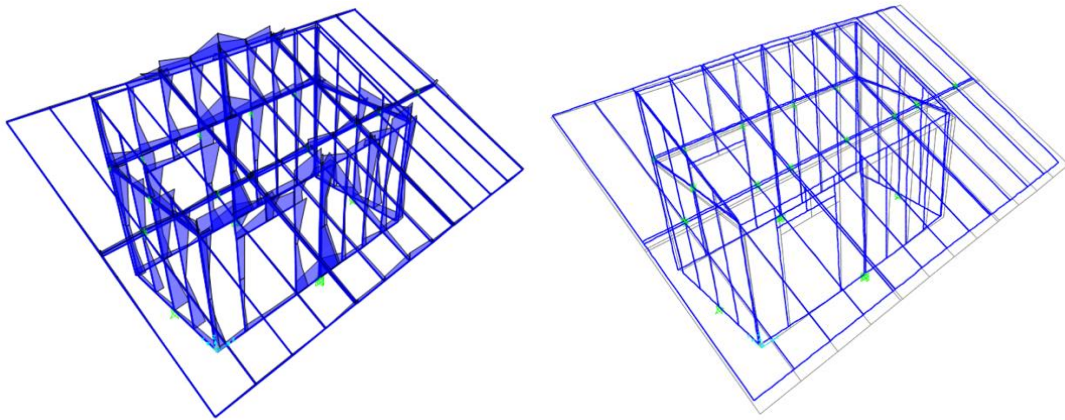


รูปที่ 44 ผลการตรวจสอบกำลังชิ้นส่วนโครงสร้าง: กรณีที่ 1

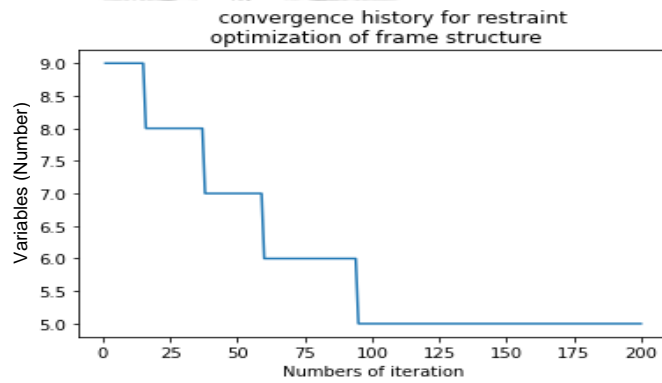


รูปที่ 45 ผลการตรวจสอบการกระจัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง: กรณีที่ 1

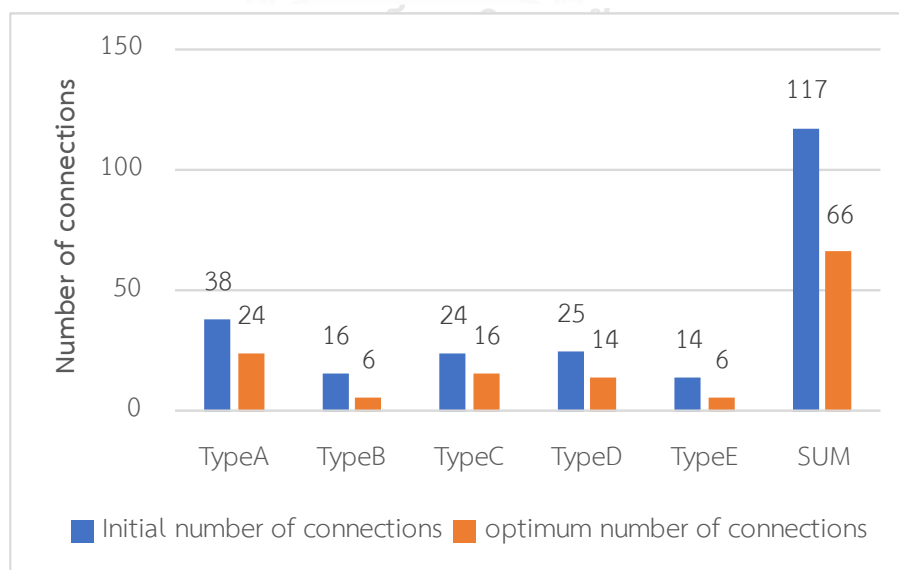
Case2 : 44 variables



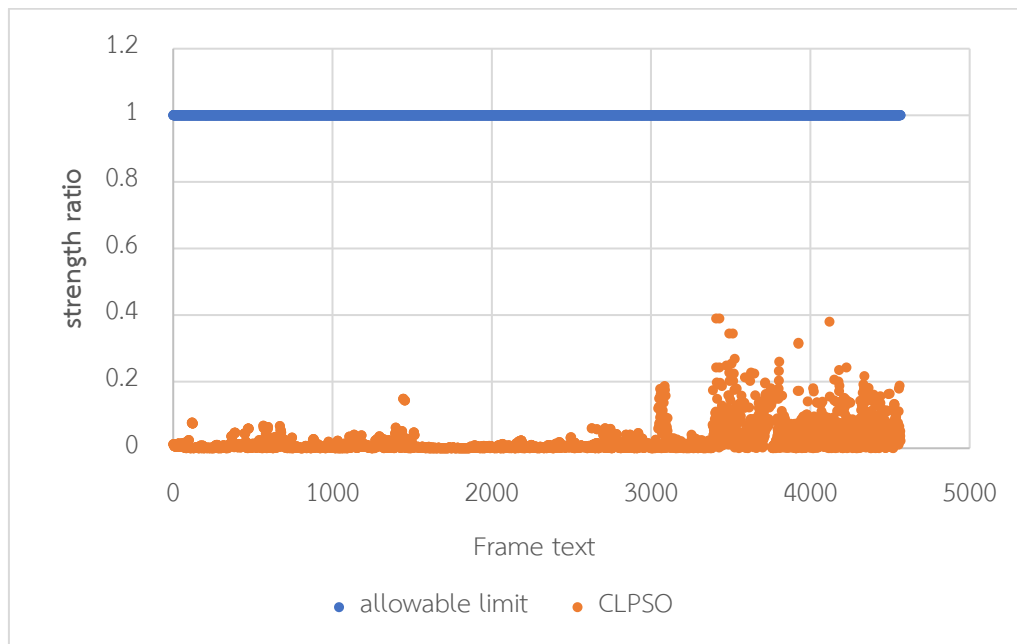
รูปที่ 46 แบบจำลองแสดงผลวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 2



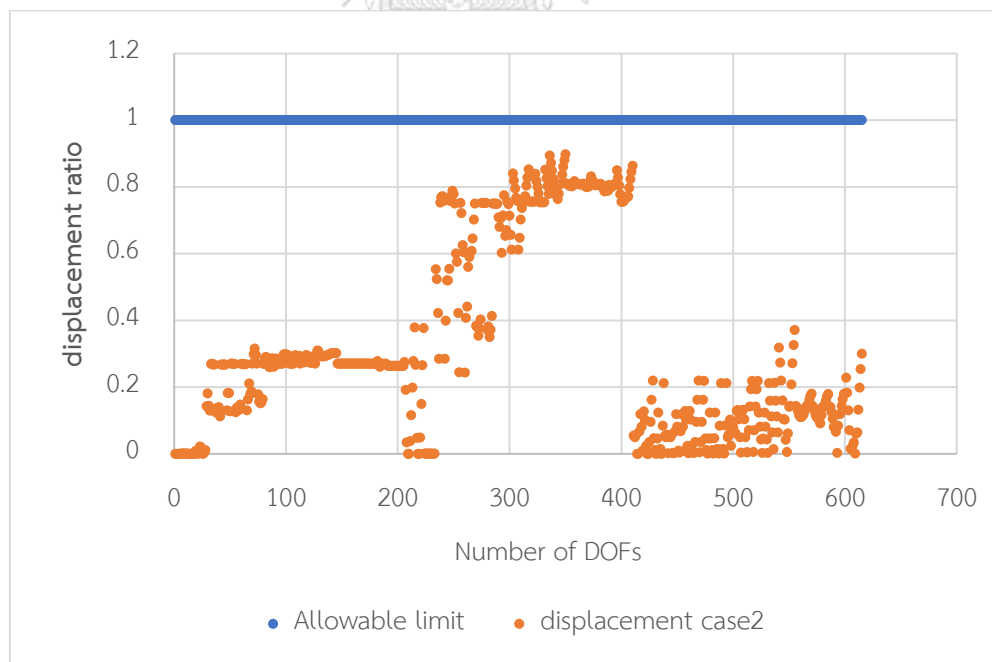
รูปที่ 47 การดูเข้าหาคำตอบและแบบวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 2



รูปที่ 48 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของการเชื่อมต่อที่ใช้ในแต่ละประเภท: กรณีที่ 2

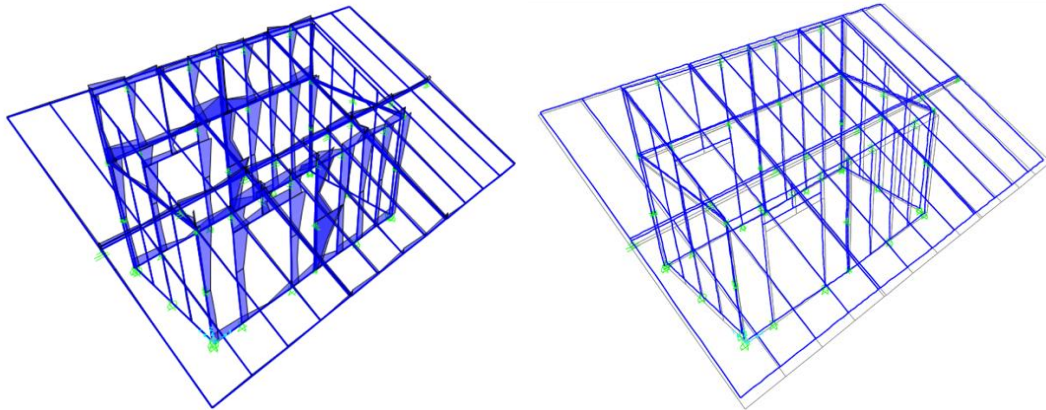


รูปที่ 49 ผลการตรวจสอบกำลังชิ้นส่วนโครงสร้าง: กรณีที่ 2

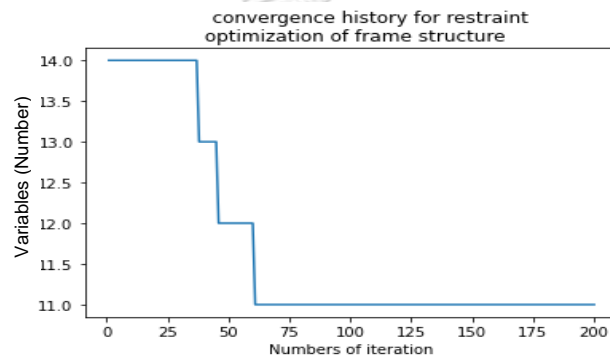


รูปที่ 50 ผลการตรวจสอบการกระจัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง: กรณีที่ 2

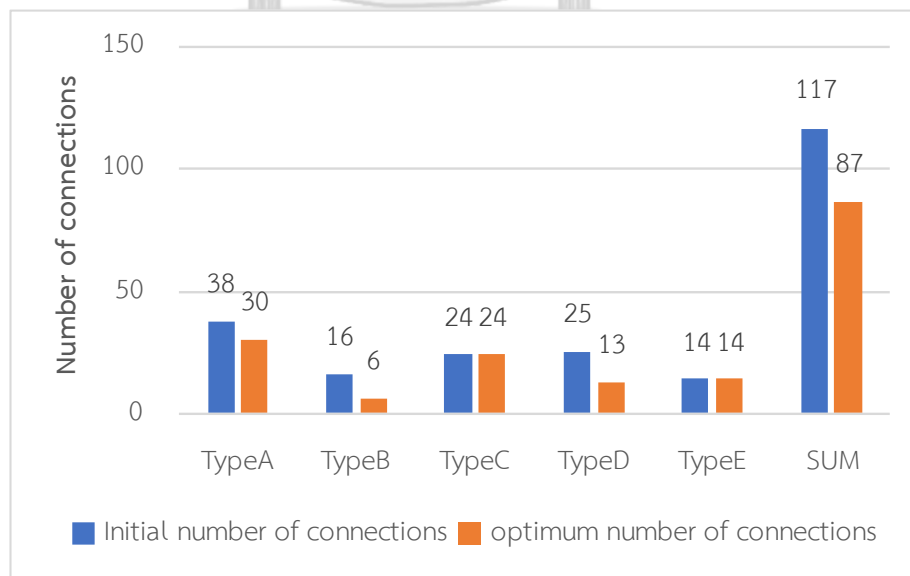
Case3 : 80 variables



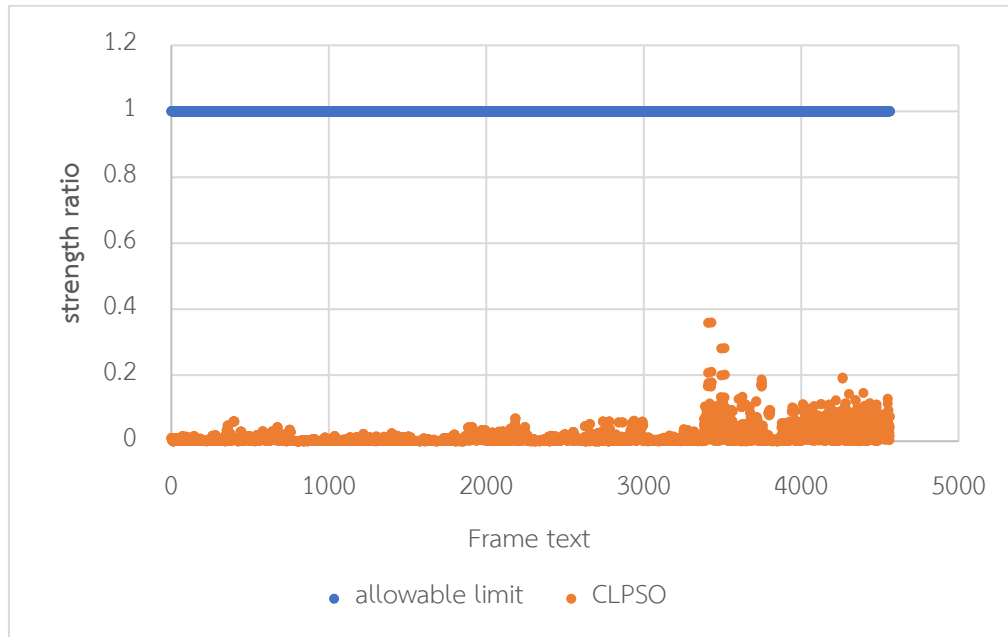
รูปที่ 51 แบบจำลองแสดงผลวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 3



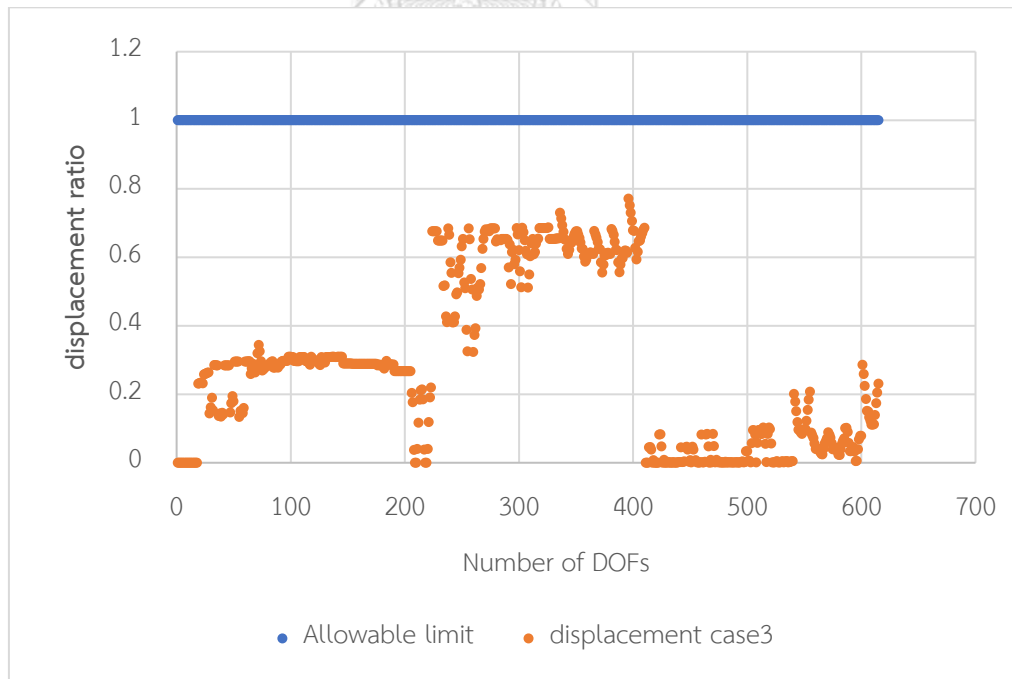
รูปที่ 52 การดูเข้าหาคำตอบและแบบวิเคราะห์โครงสร้าง: กรณีที่ 3



รูปที่ 53 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบของการเชื่อมต่อที่ใช้ในแต่ละประเภท: กรณีที่ 3



รูปที่ 54 ผลการตรวจสอบกำลังชิ้นส่วนโครงสร้าง: กรณีที่ 3



รูปที่ 55 ผลการตรวจสอบการกระจัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง: กรณีที่ 3

จากการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี เมื่อนำผลลัพธ์มาพิจารณาประเภทและลักษณะการเชื่อมต่อที่เหมาะสมในแต่ละตำแหน่ง จำนวนการเชื่อมต่อแต่ละประเภทและต้นทุนสำหรับข้อต่อแต่ละประเภทที่คำนวณโดยใช้ตารางที่ 10 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนการเชื่อมต่อโดยรวมน้อยลงทุกกรณีเมื่อเทียบกับจำนวนการเชื่อมต่อเริ่มต้น และต้นทุนสำหรับข้อต่อโดยรวมมีค่าลดลงจากต้นทุนแรกในทุกกรณี แต่เนื่องจากผลลัพธ์สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 นำลักษณะการเชื่อมต่อที่นำเสนอในหัวข้อ 3.2 มาพิจารณาใส่ข้อต่อตามความเหมาะสมที่ตำแหน่งต่างๆ ทำให้ต้นทุนมีค่าตามความต้องการวางตำแหน่งของการเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์เงื่อนไขการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 สามารถนำไปออกแบบข้อต่อลักษณะอื่นที่เหมาะสมได้เพื่อลดต้นทุนของข้อต่อ

เนื่องจากรูปแบบการเชื่อมต่อที่สามารถทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงกระทำและเป็นไปตามเงื่อนไขข้อจำกัดที่กำหนดสามารถมีได้หลายรูปแบบ การวิเคราะห์ผลแต่ละครั้งจะให้ผลลัพธ์ของรูปแบบการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันเล็กน้อยส่งผลให้จำนวนการเชื่อมต่อแต่ละประเภทในการวิเคราะห์แต่ละรอบต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าผลรวมของการเชื่อมต่อทั้งหมดจะน้อยลงในทุกการวิเคราะห์ผลสำหรับทุกกรณี

ตารางที่ 12 สรุปผลการวิเคราะห์การวางตำแหน่งของข้อต่อในโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูป

Case	Result		Remark				Total Cost (Baht)
	SUM	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	
original	117	38	16	24	25	14	20928.00
1	66	22	14	20	4	6	9354.00
2	66	24	6	16	14	6	11844.00
3	87	30	6	24	13	14	13844.00

ทำการตรวจสอบผลลัพธ์สำหรับทุกกรณีโดยการวิเคราะห์โครงสร้างอีกครั้งโดยการนำรูปแบบการเชื่อมต่อที่ได้มาใส่เป็นเงื่อนไขในการวิเคราะห์โครงสร้าง ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างแสดงดังตารางที่ 13 จะได้ว่าโครงสร้างมีการใช้งานมากขึ้นและสามารถรับแรงตามข้อกำหนดมาตรฐานได้อย่างปลอดภัยและพฤติกรรมของโครงสร้างเป็นไปตามข้อจำกัดด้านกำลังวัสดุและข้อจำกัดด้านการใช้งานที่กำหนด โดยความคลาดเคลื่อนของระยะการกระจัดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากซึ่งถือว่ายอมรับได้ สรุปได้ว่าการออกแบบการวิเคราะห์นี้สามารถลดจำนวนการเชื่อมต่อของโครงสร้างได้ และสามารถแสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เหมาะสมของการเชื่อมต่อแต่ละประเภทได้

ตารางที่ 13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์

Case	Result									
	Max U ₁ (mm.)	Max U ₂ (mm.)	Max U ₃ (mm.)	Max Axial (kN)	Max Shear2 (kN)	Max Shear3 (kN)	Max Torsional (kN-m)	Max Moment2 (kN-m)	Max Moment3 (kN-m)	Max SVM (MPa)
original	5.26	5.59	4.27	3.84	1.13	1.49	0.104	0.645	0.332	89.87
1	7.87	23.7	20.4	4.82	1.94	2.86	0.247	0.998	0.542	176.81
2	8.00	22.8	9.42	6.31	5.93	2.62	0.309	1.102	0.901	144.33
3	8.74	19.6	7.26	5.56	1.94	2.73	0.177	1.078	0.537	186.75



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์การกำหนดตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดในการออกแบบโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่าผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ออกแบบด้วยการใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) โดยกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันตามความสอดคล้องของ Degree of Freedom สำหรับแต่ละประเภทการเชื่อมต่อที่ขั้วต่อต่างๆ ซึ่งเป็นการกำหนดแบบไม่ต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือมีการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมตามจำนวนรอบการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือการเชื่อมต่อมีจำนวนที่น้อยลงในทุกกรณี โดยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) จะถูกโปรแกรมและสื่อสารระหว่างภาษาคอมพิวเตอร์ PYTHON ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ด้วยฟังก์ชัน API เพื่อเข้าถึงแบบจำลองในซอฟต์แวร์ SAP2000 และติดตามผลการวิเคราะห์และออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่ายภายในโปรแกรมที่ใช้เข้ารหัส ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลอง, กำหนดข้อมูลและเงื่อนไขต่างๆ ได้ รวมไปถึงกำหนดตัวแปรสำหรับการคำนวณซ้ำสำหรับอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการคำตอบการกำหนดการวางตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ผลด้วยอัลกอริทึม CLPSO แสดงผลที่มีความน่าเชื่อถือโดยให้คำตอบของการวางตำแหน่งการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและให้จำนวนที่น้อยลงอย่างชัดเจนในทุกกรณี โดยคำตอบจะลู่เข้าหาจำนวนเงื่อนไขที่ทำงานในแต่ละ DOF ของการเชื่อมต่อที่น้อยที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการกำหนดการวางตำแหน่งข้อต่อที่น้อยที่สุดในการออกแบบโครงสร้างโมดูลาร์สำเร็จรูปด้วยวิธีดังกล่าวโดยมีเงื่อนไขข้อจำกัดด้านกำลังวัสดุและเงื่อนไขข้อจำกัดด้านการใช้งานตามข้อกำหนดของ AISC-LRFD ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดด้วยวิธี CLPSO ซึ่งถูกใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นสูงแบบเชิงเส้นตรง ให้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่มีจำนวนการวางตำแหน่งข้อต่อน้อยลงจากรูปแบบการเชื่อมต่อเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกรณีที่ 1 จะได้จำนวนการวางข้อต่อที่น้อยที่สุดสำหรับลักษณะการเชื่อมต่อที่กำหนด และสำหรับกรณีที่ 2 และ 3 สามารถให้การวางข้อต่อที่น้อยที่สุดสำหรับเงื่อนไขการเชื่อมต่อต่างๆ สรุปได้ว่าการวิเคราะห์ออกแบบการเชื่อมต่อด้วยวิธี CLPSO สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีตัวแปรไม่ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สามารถนำมาแสดงผลเป็นประเภทการเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต่างๆ ที่มีความเหมาะสมได้ในหลายรูปแบบ รูปแบบการเชื่อมต่อของโครงสร้างที่แตกต่างกันสามารถนำไปประเมินผลหรือพิจารณาต่อร่วมกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ต้นทุนของการเชื่อมต่อแต่ละประเภท รวมไปถึงจำนวนสลักเกลียวและนัตที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อแต่ละประเภท ทั้งนี้เพื่อเลือกรูปแบบการวางตำแหน่งของข้อต่อที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมในการออกแบบบ้านพักอาศัยโมดูลาร์สำเร็จรูปสำหรับแต่ละโครงการได้

เพื่อลดจำนวนการเชื่อมต่อในโครงสร้าง นักออกแบบสามารถกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ตามข้อกำหนดการออกแบบหรืออื่นๆ อัลกอริทึมการเรียนรู้ของกลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) เป็นวิธีการที่สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องได้ สำหรับงานวิจัยนี้อัลกอริทึม CLPSO สามารถให้คำตอบในการกำหนดการวางตำแหน่งการเชื่อมต่อขั้นต่ำสำหรับการประกอบบ้านโมดูลาร์ภายใต้เกณฑ์การออกแบบตามข้อกำหนดมาตรฐาน AISC-LRFD ได้อย่างเหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

1. พิจารณาขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมดรวมกับการพิจารณาจำนวนชิ้นส่วนข้อต่อ เพื่อให้ได้รูปแบบของโครงสร้างโดยรวมที่ประหยัดต้นทุนและเหมาะสมที่สุด
2. กำหนดประเภทการเชื่อมต่อให้มีความหลากหลายและมีรูปร่างลักษณะชัดเจนเพื่อคำนวณปริมาณวัสดุที่ใช้ และนำไปใช้คำนวณต้นทุนการเชื่อมต่อแต่ละประเภทเพื่อใช้พิจารณา ร่วมกันสำหรับการวางข้อต่อที่น้อยที่สุดอย่างเหมาะสม
3. กำหนดตัวแปรเงื่อนไขเพิ่มเติมสำหรับชิ้นส่วนพิเศษ (zero-length member) ที่ใช้ในการสร้างเงื่อนไขการเชื่อมต่อ (connectivity conditions) โดยกำหนดให้มีความอิสระเพื่อให้ อัลกอริทึมพิจารณาชิ้นส่วนดังกล่าวหลังวิเคราะห์ผลการเชื่อมต่อภายในโครงสร้าง
4. พัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบและความแม่นยำของคำตอบที่เหมาะสม

บรรณานุกรม

AISI, S. (2016). "100." North American specification for the design of cold-formed steel structural members, AISI Standard, Washington, DC.

Annan, C., et al. (2009). "Effect of directly welded stringer-to-beam connections on the analysis and design of modular steel building floors." Advances in Structural Engineering **12**(3): 373-383.

Annan, C., et al. (2008). "Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings." Journal of Earthquake Engineering **13**(1): 1-21.

Baghdadi, A., et al. (2021). "Connections placement optimization approach toward new prefabricated building systems." Engineering Structures **233**: 111648.

Cao, Y., et al. (2018). "Comprehensive learning particle swarm optimization algorithm with local search for multimodal functions." IEEE transactions on evolutionary computation **23**(4): 718-731.

Chua, Y., et al. (2020). "Modelling of connections and lateral behavior of high-rise modular steel buildings." Journal of Constructional Steel Research **166**: 105901.

Construction, A. I. o. S. (2001). Manual of steel construction: load & resistance factor design, Amer Inst of Steel Construction.

Dogan, E., et al. (2009). "A refinement of discrete particle swarm optimization for large-scale truss structures."

Gatheeshgar, P., et al. (2021). Development of affordable steel-framed modular buildings for emergency situations (Covid-19). Structures, Elsevier.

Gunawardena, T. (2016). "Behaviour of prefabricated modular buildings subjected to lateral loads." Department of Infrastructure Engineering.

Gusella, F., et al. (2019). "Influence of mechanical and geometric uncertainty on rack connection structural response." Journal of Constructional Steel Research **153**: 343-355.

Kamali, M. and K. Hewage (2016). "Life cycle performance of modular buildings: A critical review." Renewable and sustainable energy reviews **62**: 1171-1183.

Katsikadelis, J. T. (2020). Dynamic analysis of structures, Academic press.

Kaveh, A. and S. Talatahari (2009). "A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables." Journal of Constructional Steel Research **65**(8-9): 1558-1568.

Lacey, A. W., et al. (2018). Structural response of modular building subjected to earthquake loading. 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures.

Lacey, A. W., et al. (2018). "Structural response of modular buildings—an overview." Journal of Building Engineering **16**: 45-56.

Lawson, R. M., et al. (2012). "Application of modular construction in high-rise buildings."

Journal of architectural engineering **18**(2): 148-154.

Liang, J. J., et al. (2006). "Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions." IEEE transactions on evolutionary computation **10**(3): 281-295.

Liew, J., et al. (2019). Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. Structures, Elsevier.

Mahadevan, K. and P. Kannan (2010). "Comprehensive learning particle swarm optimization for reactive power dispatch." Applied soft computing **10**(2): 641-652.

Mutegi, M. A. and N. I. Nnamdi (2022). "Optimal Placement of FACTS Devices Using Filter Feeding Allogenic Engineering Algorithm." Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy **7**(1): 1-18.

Najla'a, H. (2018). "Impact of Holes on the Buckling of RHS Steel Column." Journal of University of Babylon for Engineering Sciences **26**(5): 209-226.

Nikishkov, G. (2004). "Introduction to the finite element method." University of Aizu: 1-70.

Park, K.-S., et al. (2016). "Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system." Engineering Structures **110**: 244-257.

Perez, R. E. and K. Behdinan (2007). "Particle swarm approach for structural design optimization." Computers & Structures **85**(19-20): 1579-1588.

Seangatith, S. (2001). "Structural Analysis." 3.

Sigmund, O. (2000). "Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials." Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 358(1765): 211-227.

Wood, R. (1980). Matrix structural analysis, William McGuire and Richard H. Gallagher, Wiley, New York, 1979, Wiley Online Library.

วิวิธเกียรรวงศ์, ส. (2543). "การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีแมทริกซ์." 184.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฉมลวรรณ สุวรรณศรี
วัน เดือน ปี เกิด	05 ตุลาคม 2541
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2560



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY