



รูปแบบเหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงถักหลังคาเหล็ก



โดย
พันธะ จิวลักษณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2567



OPTIMUM PATTERN FOR STEEL ROOF TRUSS DESIGN

BY

PANTANA JIVALUCK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR

THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

COLLEGE OF ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL, RANGSIT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2024

วิทยานิพนธ์เรื่อง

รูปแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบโครงถักหลังคาเหล็ก

โดย

พันธนะ จิวาลักษณ์

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2567

รศ.ดร.ตระกูล อารัมรักษ์
ประธานกรรมการสอบ

ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ
กรรมการ

ผศ.ดร.วินัย อวยพรประเสริฐ
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ศ. ดร.สื้อจิตต์ เพ็ชรประธาน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
29 พฤศจิกายน 2567

Thesis entitled

OPTIMUM PATTERN FOR STEEL ROOF TRUSS DESIGN

by

PANTANA JIVALUCK

was submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Rangsit University
Academic Year 2024

Assoc. Prof. Trakool Aramsaks, Ph.D.
Examination Committee Chairperson

Asst. Prof. Ankana Punlor, D.Eng.
Member

Asst. Prof. Winai Ouypornprasert, Dr.techn.
Member and Advisor

Approved by Graduate School

(Prof. Suejit Pechprasarn, Ph.D.)
Dean of Graduate School
November 29, 2024

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. วินัย อวยพรประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณกรมพลศึกษาที่กรุณาในการให้ข้อมูลแบบมาตรฐานโรงยิมเอนกประสงค์ สำหรับการดำเนินการวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และที่สำคัญขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจนสมาชิกในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยมาตลอด

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอรับไว้และขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

พันธนะ จิวาลักษณ์

ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University

6406089 : พันธนะ จิวลักษณ์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : รูปแบบเหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงถักหลังคาเหล็ก
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.วินัย อวยพรประเสริฐ

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาหารูปแบบและความสูงต่อความยาวช่วงที่เหมาะสมสำหรับโครงถักหลังคาเหล็ก รวมถึงการออกแบบหาโครงถักเบาสุดของรูปแบบโครงถักที่ศึกษา เพื่อให้ได้โครงถักรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ซึ่งการวิเคราะห์จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับทางพฤติกรรมโครงสร้างตามมาตรฐาน วสท.1015-40 วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Allowable Stress Design, ASD) ทำการเปรียบเทียบรูปแบบโครงถักหลังคาที่นิยมจำนวน 4 ตัวอย่าง คือ รูปแบบเพรตต์ แบบโฮว์ แบบพัด และ แบบฟังก์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงการปรับค่าของคำตอบที่ลู่เข้าหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันและส่งผลให้ขนาดชิ้นส่วน โครงถักมีน้ำหนักที่เบาลง จากผลการวิจัยครั้งนี้พบว่า รูปแบบเหมาะสมสำหรับโครงถักหลังคาเหล็กภายใต้ฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดทางด้านน้ำหนัก คือ โครงถักรูปแบบพัด โดยอัตราส่วนความยาวต่อความลึกที่เหมาะสมที่สุดของโครงถักแต่ละรูปแบบอยู่ในช่วง 6.4 ถึง 9.4 เมื่อพิจารณาการออกแบบน้ำหนักรวมชิ้นส่วนโครงถักเบาสุดของโครงถักรูปแบบเพรตต์ตามมาตรฐานกรมพลศึกษาพบว่าน้ำหนักโครงสร้างลดลงร้อยละ 29 ดังนั้นโครงถักรูปแบบเบาสุดที่ได้จากศึกษาจึงอาจเป็นทางเลือกในการใช้งาน โดยมีต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำกว่า

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 104 หน้า)

คำสำคัญ: โครงถักหลังคา, สถานะขีดจำกัด, การหาค่าเหมาะสม

6406089 : Pantana Jivaluck
 Thesis Title : Optimum Pattern for Steel Roof Truss Design
 Program : Master of Engineering Program in Civil Engineering
 Thesis Advisor : Asst.Prof. Winai Ouypornprasert, Dr.techn.

Abstract

The aim of this paper was to study the optimal pattern and height-to-length ratio for steel roof trusses, including designing the lightest truss of all shapes studied to achieve a suitable truss for construction. The analysis was conducted under structural constraints in accordance with the Engineering Institute of Thailand (EIT) 1015-40 standards, using the Allowable Stress Design (ASD) method by comparing four popular types of roof truss comprising Pratt, Howe, Fan, and Fink. The solutions showed that the adjustments of the parameters converging to the minimum point of the function resulted in lighter weight structures. The optimum pattern for steel roof truss under the limit state function was the Fan truss, with the optimal length-to-depth ratio for each type ranging from 6.4 to 9.4. The determination of the design of the lightest Pratt truss in compliance with the standards of the Department of Physical Education revealed a 29% reduction in structural weight. Therefore, the optimal truss design obtained from this study might offer an alternative outcome for lower cost of construction.

(Total 104 pages)

Keywords: Roof Truss, Limit State Function, Optimization

Student's Signature Thesis Advisor's Signature

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและประเด็นปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2	
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา	5
2.2 ส่วนประกอบและรูปแบบของโครงถักหลังคา	7
2.3 การวิเคราะห์โครงถัก	8
2.3.1 การวิเคราะห์ที่จุดต่อ	9
2.3.2 การวิเคราะห์หาการแอ่นตัวของโครงข้อหมุนโดยวิธีงานเสมือน	10
2.4 หลักการออกแบบหาจุดเหมาะสมสุด	12
2.4.1 การกำหนดฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด	12
2.4.2 การกำหนดเงื่อนไขขีดจำกัด	13
2.5 การหาค่าเหมาะสมสุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัดระบบไม่เชิงเส้น	16
2.5.1 ปัญหาเงื่อนไขแบบเท่ากับ	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ปัญหาเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ	17
2.5.3 การหาค่าต่ำสุดด้วยวิธีลากรางจ์	18
2.5.4 เงื่อนไข Karush Khun Tucker	20
บทที่ 3	22
ระเบียบวิธีการวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	22
3.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุด	22
3.2.1 การกำหนดรูปแบบโครงถัก	23
3.2.2 การหาแรงลัพธ์ภายในชิ้นส่วนโดยการวิเคราะห์ที่จุดต่อ	24
3.2.3 การสร้างฟังก์ชันสถานะปิดจำกัด	26
3.2.4 การสร้างเงื่อนไขปิดจำกัดและเงื่อนไขตัวแปรออกแบบ	27
3.2.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยฟังก์ชันสำเร็จรูป	28
3.3 สรุปลำดับขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุด	30
บทที่ 4	32
ผลการศึกษาและการวิจารณ์ผล	
4.1 การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของโครงถักแบบมาตรฐาน	32
4.2 ผลวิเคราะห์รูปแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักหลังคาเหล็กที่ศึกษา	38
4.2.1 น้ำหนักเบาสุดของรูปแบบโครงถักมาตรฐาน	38
4.2.2 รูปแบบเหมาะสมที่สุดของโครงถักหลังคาเหล็ก 4 รูปแบบ	39
4.3 การตัดเสน้น้อยสุดของโครงถักหลังคาเหล็ก	40
บทที่ 5	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุป	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	45
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก แบบมาตรฐาน โรงเรียนเอกชนประเภทประถมศึกษา	48
ภาคผนวก ข ผลการคำนวณแรงลัพธ์ภายในและเงื่อนไขการแอ่นตัว	72
ประวัติผู้วิจัย	104



สารบัญตาราง

หน้า	
	ตารางที่
27	3.1 สมการเงื่อนไขขีดจำกัด
33	4.1 ค่าแรงลัพธ์ภายในชิ้นส่วนสูงสุดของกลุ่มชิ้นส่วน
34	4.2 ค่าแรงลัพธ์เสมือนสูงสุดของกลุ่มชิ้นส่วน
34	4.3 สมการเงื่อนไขการแอ่นตัวของโครงถัก
35	4.4 เงื่อนไขขีดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้าง
36	4.5 ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัดทางด้านน้ำหนัก
37	4.6 ผลลัพธ์ค่าตัวแปรออกแบบเหมาะสมที่สุด
38	4.7 ผลเปรียบเทียบน้ำหนักเบาสุดและความสูงเหมาะสมที่สุดโครงถักมาตรฐาน
39	4.8 ผลเปรียบเทียบน้ำหนักเบาสุดและความสูงเหมาะสมที่สุดของโครงถัก 4 รูปแบบ
40	4.9 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบเพรตต์
41	4.10 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบโฮว์
41	4.11 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบพัค
42	4.12 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบฟังก์



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	8
2.3	8
2.4	9
2.5	11
2.6	17
2.7	17
2.8	18
2.9	20
2.10	20
3.1	23
3.2	24
3.3	25
3.4	29
3.5	29
3.6	30
3.7	31
4.1	32
4.2	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและประเด็นปัญหา

โครงถักหลังคาเป็นโครงข้อหมุนที่นิยมใช้สำหรับอาคารที่มีช่วงยาว เช่น อาคารโกดัง อาคารโรงงานอุตสาหกรรม หอประชุม หรืออาคารโรงยิมเนกประสงค์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาแต่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มาก โดยขั้นตอนทั่วไปของการออกแบบนั้น ผู้ออกแบบจะเลือกรูปแบบและหน้าตัดของเหล็กขึ้นมาก่อนแล้วนำมาตรวจสอบว่าสามารถรับแรงได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ ซึ่งวิธีการนี้จะคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อให้ผลออกมาประหยัดและสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย การหาค่าเหมาะสม (Optimization) จึงถูกนำมาใช้กับการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างและประหยัดทรัพยากร

ในอดีตที่ผ่านมาการออกแบบโครงถักหลังคาเพื่อให้ได้น้ำหนักเบาที่สุดอาจต้องอาศัยการลองถูกลองผิดขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบหรืออาจใช้หลักปฏิบัติตามข้อแนะนำการออกแบบโครงสร้างเหล็ก (Fisher, 1993) ที่แนะนำไว้ว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความลึกโครงถักควรอยู่ในช่วง 15 ถึง 20 อย่างไรก็ตามสัดส่วนความสูงที่แนะนำอาจไม่เหมาะสมที่สุดกับช่วงความยาวที่ผู้ออกแบบต้องการ ดังนั้นจึงมีการศึกษาความสูงที่เหมาะสมในการออกแบบโครงถักหลังแบบแปดตัวของช่วงความยาว 10 ถึง 30 เมตร ซึ่งได้ค่าความสูงโครงหลังคาที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40 ถึง 80 เซนติเมตร (มงคล จิรวรรณ, 2543) รวมถึงผลกระทบของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อคำตอบที่ดีที่สุด เรียกว่าการวิเคราะห์ความไว (Sensitive Analysis) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ในรูปแบบของคาน Timoshenko (ปณัศชัย เชษฐโชติศักดิ์, 2554) พบว่าสัดส่วนความยาวต่อความสูงของโครงหลังคาที่ใช้ออกแบบเพื่อให้ได้น้ำหนักเบาที่สุดมีค่าไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความยาว จำนวนช่อง และความลาดเอียงของหลังคา โดยควรมีการกำหนดจำนวนช่องให้มีค่าน้อยที่สุด แต่จะต้องไม่ทำให้ระยะช่วงของแปมากเกินไปจนแปรับน้ำหนักวัสดุหลังคาไม่ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการกำหนดจำนวนช่องให้น้อยลงนั้นทำให้จำนวนชิ้นส่วนค้ำยันแนวแท่งและแนวคั้งน้อยลงด้วย ซึ่งมีผลสำคัญกับน้ำหนักโครงถักโดยตรง จึงน่าสนใจที่จะทำการศึกษารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการ

ออกแบบโครงถักหลังคาเหล็กที่มีการจัดเรียงชิ้นส่วนค้ำยันโดยมีองศา ระยะห่าง และจำนวนชิ้นส่วนแตกต่างกัน เพื่หาน้ำหนักโครงสร้างที่เบาสุด

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบโครงถักหลังคาเหล็กดังต่อไปนี้

- 1.2.1 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักหลังคาเหล็ก
- 1.2.2 ความสูงเหมาะสมต่อความยาวช่วงโครงถักหลังคาเหล็ก
- 1.2.3 น้ำหนักรวมชิ้นส่วนโครงถักเบาสุดของรูปแบบโครงถักที่ศึกษา

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ประหยัดวัสดุและต้นทุนก่อสร้างโครงการโดยเฉพาะโครงการขนาดใหญ่
- 1.3.2 ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงถักหลังคาของโครงการอื่นๆ ในอนาคต
- 1.3.3 ใช้เป็นแนวทางประยุกต์ใช้กับโครงถักประเภทอื่น เช่น โครงถักสะพาน โครงถักเสาไฟฟ้า เป็นต้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษามีขอบเขตดังต่อไปนี้

- 1.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นแบบคิเทอมินเททางสถิต (Statically Determinate Structure) โดยจุดรองรับโครงถักด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุน (Pinned Support) และอีกด้านหนึ่งเป็นแบบล้อเลื่อน (Roller Support)
- 1.4.2 การออกแบบโครงถักเหล็กใช้วิธีอีลาสติก (Elastic Design Methods) มาตรฐานวสท. 1015-40 ใช้หลักการออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Allowable Stress Design, ASD) มีเงื่อนไขพิจารณาการบิดดัดนี้

1.4.2.1 ไม่พิจารณาการบิดออกจากกระนาบของโครงสร้าง (Wrapping) และการบิดของชิ้นส่วน (Torsional Deformation)

1.4.2.2 โครงถักมีการค้ำยันทางด้านข้างอย่างเพียงพอเพื่อป้องกันการโก่งเดาะด้านข้าง (Lateral buckling)

1.4.3 เลือกใช้รูปแบบในการวิเคราะห์โครงถักหลังคาที่นิยม 4 รูปแบบ คือ โครงถักแบบแพรตต์ (Pratt) แบบโฮว์ (Howe) แบบพัด (Fan) และ แบบฟังก์ (Fink)

1.4.4 โครงถักใช้ความยาวช่วง 30 เมตร เป็นความยาวช่วงโครงถักมาตรฐานสำหรับโรงยิมอเนกประสงค์ขนาดความจุ 1000 ที่นั่ง โดยไม่พิจารณาส่วนยื่นของชายคา

1.4.5 ระยะห่างระหว่างโครงถัก 5 เมตร

1.4.6 ระยะห่างแปในแนวระดับ 1.25 เมตร

1.4.7 ความยาวชิ้นส่วนโครงถักคำนวณตามแนวเซนทรอยด์แต่ละชิ้นส่วนที่ต่อกัน ณ จุดศูนย์กลางของรอยต่อชิ้นส่วนนั้น

1.4.8 ใช้เหล็กต่อมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 107-2533 ชั้นคุณภาพ HS 41 ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงถัก

1.4.9 ความลาดเอียงของโครงหลังคาไม่เกิน 18 องศา ซึ่งเป็นหลังคาทรงแบน (Flat Roof) โดยไม่เกิดผลของแรงลม

1.4.10 น้ำหนักบรรทุกจะกระทำที่จุดต่อโครงถักรับแรงในแนวแกนเท่านั้น

1.4.11 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการคำนวณมีดังต่อไปนี้

น้ำหนักบรรทุกจร = 30 กก./ตร.ม. (กฎกระทรวง ฉบับที่ 6)

น้ำหนักเมทัลชีต = 4.1 กก./ตร.ม. (ความหนา 0.4 มม.)

น้ำหนักแป = 4.06 กก./ตร.ม. (เหล็กทรงน้ำ 100x50x20x2.3 มม.)

น้ำหนักโครงถักโดยประมาณ = 10 กก./ตร.ม.

รวมน้ำหนัก = 48 กก./ตร.ม.

ดังนั้นใช้น้ำหนักลงจุดต่อ = $48 \times 5 \times 1.25 = 300$ กก.

1.5 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

Fisher (1993) ได้เสนอแนะหลักการเบื้องต้นสำหรับออกแบบโครงถักให้ประหยัด แนะนำสัดส่วนระหว่างความยาวช่วงต่อความลึกโครงถัก 15 ถึง 20 โดยความลึกโครงถักไม่ควรเกิน 4.2 เมตร และความยาวโครงถักไม่ควรเกิน 30 เมตร ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการขนส่ง

มงคล จิรวรรณ (2543) ได้ทำการออกแบบหาความสูงที่เหมาะสมในโครงหลังคาเหล็กแบบเพรตต์เพื่อให้ได้น้ำหนักเบาที่สุด โดยแต่ละช่วงความยาวความสูงของโครงถักจะถูกใช้เป็นพารามิเตอร์แปรเปลี่ยน หลังจากนั้นนำผลแต่ละช่วงความยาวมาพิจารณาเพื่อศึกษาผลที่เกิดจากช่วงความยาวที่เพิ่มขึ้นกับพฤติกรรมของการลู่เข้าจุดเหมาะสม

ปณัศย์ชัย เชษฐโชติศักดิ์ (2554) นำเสนอการออกแบบสัดส่วนความยาวต่อความลึกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข้อหมุน ซึ่งมีสมการวัตถุประสงค์คือน้ำหนักของโครงข้อหมุนหลังการวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในและการแอ่นตัวโดยใช้แบบจำลอง Timoshenko และพิจารณาเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรพารามิเตอร์รวมถึงผลกระทบของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีผลต่อคำตอบที่ดีที่สุด

สิทธิศักดิ์ อันสนั่น (2563) ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอิลาสติก ซึ่งแรงต่างๆที่คำนวณน้ำหนักภายใต้บรรทุกประลัยจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความต้านทานระบุขององค์อาคารคูณกับตัวคูณความต้านทาน ซึ่งในการออกแบบวิศวกร โครงสร้างอาจสับสนหน้าตัดของเหล็กขึ้นมาแล้วนำมาตรวจสอบว่าสามารถรับแรงได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบอย่างเหมาะสมโดยใช้ เมตาฮิวริสติกอัลกอริทึม (Metaheuristic Algorithm) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ



บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

Fisher (1993) ได้เสนอแนะหลักการเบื้องต้นสำหรับออกแบบโครงถักให้ประหยัด แนะนำสัดส่วนระหว่างความยาวช่วงต่อความลึกโครงถัก 15 ถึง 20 โดยความลึกโครงถักไม่ควรเกิน 4.2 เมตรและความยาวโครงถักไม่ควรเกิน 30 เมตร ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการขนส่ง

Frans และ Arfiadi (2014) ได้ทำการศึกษาการออกแบบโครงถักหลังคาให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด ส่วนสำคัญที่จะทำให้น้ำหนักโครงสร้างเบาคือการปรับขนาด รูปทรง และการเชื่อมโยงของชิ้นส่วน โดยใช้วิธีทางพันธุกรรมเข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาการปรับโครงสร้างและกำหนดตำแหน่งของโหนดการเชื่อมโยงเพื่อหารูปทรงโครงถักที่เหมาะสมที่สุด

Kumar และ Singh (2016) ทำการศึกษาเปรียบเทียบโครงหลังคาของแต่ละช่วงความยาว และพิจารณาเปลี่ยนความชันหลังคา โดยใช้โปรแกรม STAAD PRO V8i ทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง เพื่อหาความชันของโครงถักหลักคาที่เหมาะสมของแต่ละช่วงความยาวที่ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักน้อยที่สุด

Mirajkar (2017) ได้เปรียบเทียบการใช้หน้าตัดเหล็กท่อ เหล็กกล่องจัตุรัสและเหล็กกล่องแบนสำหรับโครงถักหลังคาแบบพัดโดยใช้วิธีภาวะสุดขีด พบว่าเหล็กท่อบีมีสัดส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงกว่าเหล็กกล่องจัตุรัสและเหล็กกล่องแบน ทำให้การเลือกใช้หน้าตัดเหล็กท่อประหยัดที่สุด

Khandelwal, Gajurel, Sah, Giree และ Dhakal (2020) ได้ศึกษาเปรียบเทียบรูปทรงของโครงถักสามรูปแบบและพิจารณาแบ่งตามช่วงความยาวโดยให้ค่าความชันของโครงหลังคาคงที่ โดยใช้โปรแกรม STAAD PRO V8i ทำการวิเคราะห์และออกแบบชิ้นส่วน เพื่อหารูปแบบโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

Anum, Abubakar, Adeke และ Ufe (2021) ได้พัฒนาโปรแกรมการหาจุดเหมาะสมที่สุดใน การออกแบบลดน้ำหนักของโครงถักโดยใช้เงื่อนไข Karush-Kuhn-Tucker (KKT) เพื่อแก้ปัญหา ข้อจำกัดแบบไม่เชิงเส้น โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์เกี่ยวกับน้ำหนัก การ โกงตัว และความเค้น ของชิ้นส่วน

สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์ (2532) ได้พัฒนาวิธีการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับ โครงถักระนาบ โดยวิเคราะห์ปรับขนาดชิ้นส่วนโครงสร้างในช่วงที่เป็นไปได้และสร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์แก้ตัวแปร โดยวิธีซิมเพล็กซ์ ซึ่งการทำงานจะทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบเข้าสู่จุด เหมาะสม

มงคล จิรวรรณ (2543) ได้ทำการออกแบบหาความสูงที่เหมาะสมในโครงหลังคาเหล็ก แบบแปรรัดเพื่อให้ได้น้ำหนักเบาที่สุด โดยแต่ละช่วงความยาวความสูงของโครงถักจะถูกใช้เป็น พารามิเตอร์แปรเปลี่ยน หลังจากนั้นนำผลแต่ละช่วงความยาวมาพิจารณาเพื่อศึกษาผลที่เกิดจากช่วง ความยาวที่เพิ่มขึ้นกับพฤติกรรมของการลู่เข้าจุดเหมาะสม

ถ้ำไพร และฉัตรพันธ์ (2552) ได้ประยุกต์วิธีออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมที่สุดโดย วิธีคำนวณเชิงพันธุกรรมมาใช้กับโครงข้อหมุนหลังคา และคำนึงถึงการก่อสร้างจริงซึ่งใช้มาตรฐาน การออกแบบวิธีควบคุมความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก

ปณัศย์ชัย เชษฐโชติศักดิ์ (2554) นำเสนอการออกแบบสัดส่วนความยาวต่อความลึกที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข้อหมุน ซึ่งมีสมการวัตถุประสงค์คือน้ำหนักของโครงข้อหมุนหลังคา วิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในและการแอ่นตัวโดยใช้แบบจำลอง Timoshenko และพิจารณาเกี่ยวกับ ผลกระทบของตัวแปรพารามิเตอร์รวมถึงผลกระทบของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีผลต่อคำตอบที่ดีที่สุด

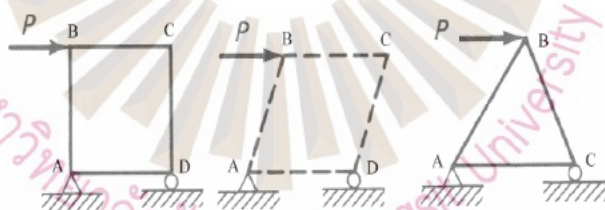
สุนิสสา ทองศรี และทักษิณ เทพชาตรี (2554) ได้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาคำนวณ ออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด สำหรับโครงถักเหล็กในระนาบที่มีพฤติกรรมเชิงเส้นด้วยวิธีวิวิธิก โดยคำนึงถึงผลของการ โกงเดาะเฉพาะที่และอัตราส่วนความขะลุศ การออกแบบองค์อาคารเหล็ก มีทั้งวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) และวิธีควบคุมความต้านทานและน้ำหนัก บรรทุก (Load And Resistance Factor Design, LRFD) ตามมาตรฐาน AISC 2010

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามีการใช้วิธีการออกแบบหาค่าเหมาะสมที่สุดของโครงถักอย่างแพร่หลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนึงถึงการออกแบบให้สอดคล้องกับการก่อสร้างจริง โดยนำผลลัพธ์ที่ได้มาพิจารณาเลือกใช้ตามขนาดเหล็กมาตรฐานรวมถึงการตัดชิ้นส่วนต่อเหล็กในงานตัดประกอบให้เหลือเศษน้อยที่สุดมาพิจารณาร่วมด้วย

2.2 ส่วนประกอบและรูปแบบของโครงถักหลังคา

โครงถักเป็นการนำเอาชิ้นส่วนมาประกอบขึ้นเป็นรูปโครงสร้างแบบต่างๆ โดยยึดปลายทั้งสองของชิ้นส่วนต่างๆ ให้ยึดติดกันและสามารถถ่ายแรงให้กันได้ด้วยการเชื่อมหรือการใช้หมุดย้ำ โครงสร้างที่นิยมทำเป็นโครงถัก เช่น โครงสร้างสะพาน โครงหลังคา ฯลฯ

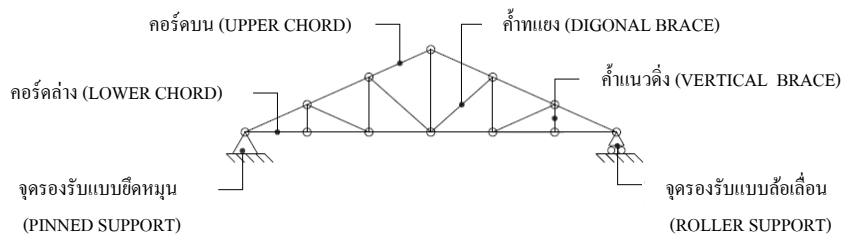
รูปทรงพื้นฐานของโครงถักคือรูปสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนอย่างน้อย 3 ชิ้น ซึ่งโครงถักลักษณะแบบนี้จะทำให้เกิดการถ่ายแรงลงฐานรองรับโดยไม่เกิดการเซด้านข้าง (Side sway) จึงถือได้ว่าโครงถักลักษณะนี้มีเสถียรภาพ ส่วนโครงถักที่เป็นโครงถักที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมเมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้โครงถักเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้จัดได้ว่าเป็นโครงถักที่ไม่มีเสถียรภาพดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เสถียรภาพของโครงถัก

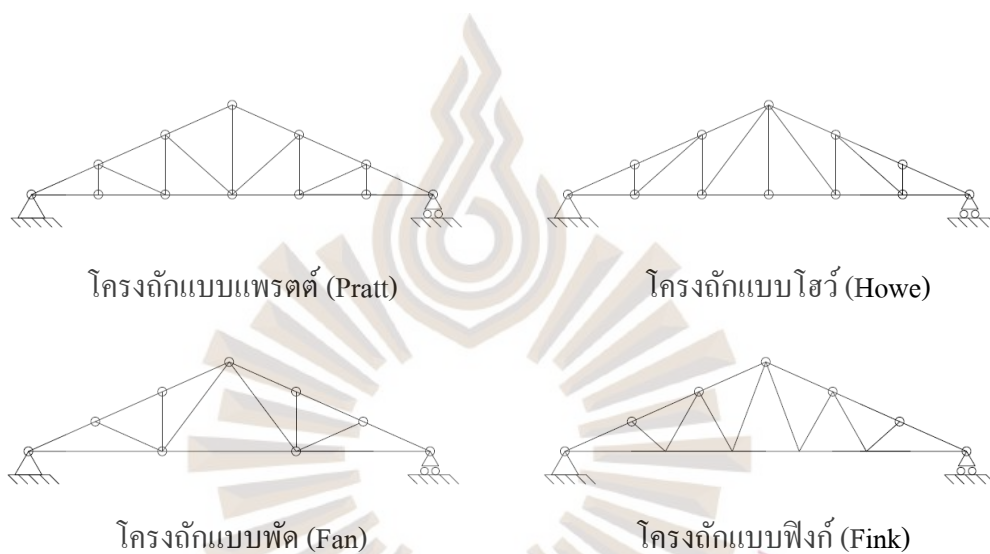
ที่มา: สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2561

โครงถักหลังคาสามารถแบ่งส่วนประกอบได้ 4 ส่วนหลักคือ ชิ้นส่วนคอร์ดบน ชิ้นส่วนคอร์ดล่าง ชิ้นส่วนค้ำยันแท่ง และชิ้นส่วนค้ำยันแนวคังดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยสามารถนำชิ้นส่วนดังกล่าวมาออกแบบเป็นลักษณะโครงถักที่ต้องการ จากการศึกษาที่มีรูปแบบโครงถักหลังคาที่นิยมใช้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบโครงถัก

ที่มา: ผู้วิจัย



รูปที่ 2.3 รูปแบบโครงถักหลังคาที่นิยม

ที่มา: ผู้วิจัย

2.3 การวิเคราะห์โครงถัก

ในการวิเคราะห์หาแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงถัก มีความจำเป็นที่จะต้องนิยามสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงให้มากที่สุด โดยมีข้อสมมุติฐานดังนี้

สมมุติฐานที่ 1 ชิ้นส่วนทุกชิ้นในโครงถักจะต้องมีความยาวเป็นเส้นตรง

สมมุติฐานที่ 2 แนวเส้นทแยงของแต่ละชิ้นส่วนที่ต่อกันจะพบกันที่จุดศูนย์กลางของรอยต่อของชิ้นส่วน

สมมุติฐานที่ 3 น้ำหนักของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีค่าน้อยมากในการวิเคราะห์จะไม่นำมาเป็นองค์ประกอบในการพิจารณา

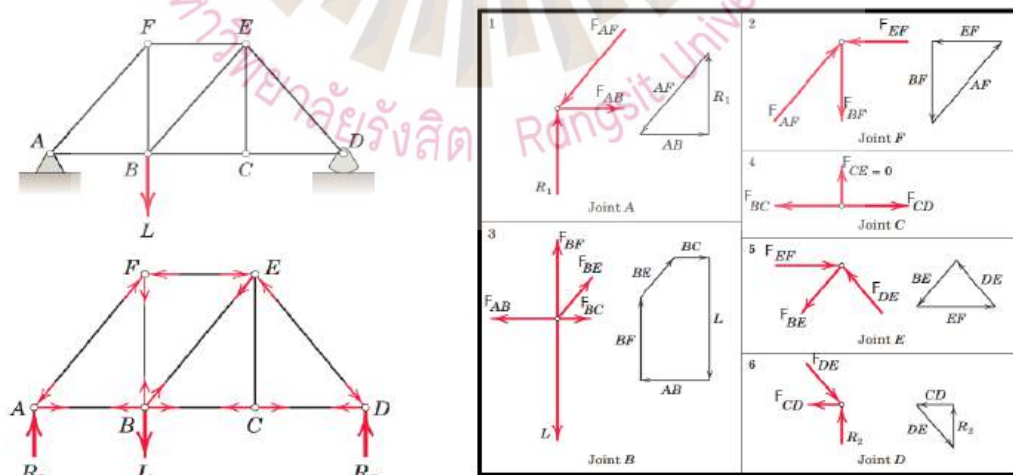
สมมุติฐานที่ 4 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับ โครงถักจะเป็นน้ำหนักแบบน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point Load) ที่ตำแหน่งของข้อต่อ

2.3.1 การวิเคราะห์ที่ข้อต่อ

วิธีนี้หลักการคือ โครงสร้างที่พิจารณาจะต้องอยู่ในสภาพสมดุล เมื่อโครงสร้างมีความสมดุลแล้วจะทำให้จุดเชื่อมต่อในโครงข้อหมุนจะอยู่ในความสมดุลด้วย ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการสมดุลแรง ณ จุดเชื่อมต่อคือ

$$\sum F_x = 0 \text{ และ } \sum F_y = 0 \quad (2-1)$$

การวิเคราะห์โครงข้อหมุนที่ข้อต่อจะเริ่มจากการหาแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับโครงข้อหมุนก่อน จากนั้นจะพิจารณาที่ข้อต่อ ณ จุดรองรับและอาศัยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ ณ จุดแรกไปใช้ในการวิเคราะห์ ณ จุดถัดไปจนครบทั้งโครงสร้าง โดยแต่ละ โครงสร้างจะมีเฉพาะแรงในแนวแกนเท่านั้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์หาแรงภายในโดยวิธีข้อต่อ

ที่มา: Meriam, Kraige, and Bolton, 2017

2.3.2 การวิเคราะห์หาการแอ่นตัวของโครงข้อหมุนโดยวิธีงานเสมือน

หลักการงานเสมือนมีแนวคิดมาจากหลักการของกฎอนุรักษ์พลังงาน กล่าวคือเมื่อมีแรงมากระทำต่อโครงสร้างจะทำให้เกิดงาน ภายนอก (External Work) และจะถูกเปลี่ยนรูปร่างเป็นงานภายใน (Internal Work) หรือพลังงานความเครียด (Strain Energy) ทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ (Displacement) หรือเกิดการแอ่นตัว (Deflection) โดยที่งานเสมือนซึ่งกระทำจากแรงภายนอก (U_e) เท่ากับงานเสมือนภายใน (U_i)

$$U_e = U_i \quad (2-2)$$

หากพิจารณาหาการแอ่นตัวของโครงข้อหมุน โดยวิธีงานเสมือนดังรูปที่ 2.5 เมื่อมีแรงจริงจากภายนอก P กระทำต่อโครงสร้างจะเกิดแรงภายในขึ้นเท่ากับ N และเกิดการเคลื่อนตัว dL ทำการกำหนดทิศทางและขนาดแรงเสมือน 1 หน่วยกระทำที่จุดใดๆ ที่ต้องการทราบการแอ่นตัว Δ ซึ่งแรงเสมือนนี้จะทำให้เกิดแรงเสมือนภายในขึ้นที่จุดต่างๆ ของโครงสร้างเท่ากับ n และเกิดเคลื่อนตัว dl ดังนั้นจากหลักการงานและพลังงานจะได้ว่า

$$1 \cdot \Delta = n \cdot dL \quad (2-3)$$

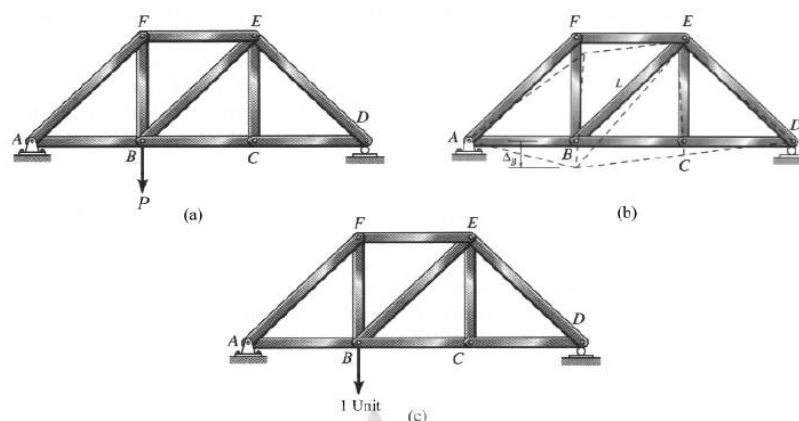
เมื่อ

1 = แรงเสมือนภายนอก 1 หน่วย

Δ = ระยะแอ่นตัวจริงของโครงถัก

n = แรงเสมือนภายในชิ้นส่วน

และ dL = ระยะเคลื่อนตัวจริงภายในชิ้นส่วน



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์หาการแอ่นตัวโดยวิธีงานเสมือน
ที่มา: สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2561

โดยสามารถหาค่า dL จากกฎของโมดูลัส

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{N/A}{dL/L} \quad (2-4)$$

จะได้

$$dL = \frac{NL}{AE} \quad (2-5)$$

แทนค่าในสมการที่ (2-4) จะได้

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \frac{n_i N_i L_i}{A_i E_i} \quad (2-6)$$

เมื่อ

n = แรงในแนวแกนในชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงถักที่เกิดจากแรงเสมือน 1 หน่วย

Δ = ค่าการแอ่นตัวที่จุดต่อของโครงถัก

N = แรงในแนวแกนในชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงถักเนื่องจากแรงกระทำจริง

L = ความยาวของชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน

และ E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำโครงถัก

2.4 หลักการออกแบบหาจุดเหมาะสมสุด

การออกแบบหาจุดเหมาะสมสุดมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาค่าสูงสุด (Maximum) หรือค่าต่ำสุด (Minimum) ของฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด (Limit State Function) โดยอาจมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่เรียกว่า เงื่อนไขขีดจำกัด (Constraints) ไว้ด้วย ดังนั้นการหาจุดเหมาะสมสุดคือการหาคำตอบที่ดีที่สุดในภายใต้ฟังก์ชันและเงื่อนไขออกแบบที่กำหนด โดยมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้

ตัวแปรออกแบบ หมายถึง ตัวแปรที่เป็นคำตอบของการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบจะถูกกำหนดเพื่อใช้อธิบายลักษณะของระบบทางด้านวิศวกรรมอย่างชัดเจน เช่น ขนาด, น้ำหนัก, รูปทรงของวัสดุ โดยการกำหนดตัวแปรออกแบบนั้นต้องเลือกตัวแปรที่ใช้กำหนดในระบบให้ถูกต้องกับโจทย์แต่ละประเภท

ฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด คือ ฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดโดยเราจะต้องทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ติดอยู่ในรูปของตัวแปรออกแบบ เพื่อที่จะทำการหาค่าของตัวแปรที่เป็นจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุด

เงื่อนไขขีดจำกัด คือ เงื่อนไขหรือข้อจำกัดของฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งโดยทั่วไปแล้วเงื่อนไขขีดจำกัดจะแบ่งเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เงื่อนไขที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของการออกแบบ (External Constraints) และเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นโดยผู้ออกแบบระบบ (Internal Constraints)

2.4.1 การกำหนดฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด

สิ่งสำคัญในการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมคือการออกแบบให้น้ำหนักโครงสร้างชิ้นส่วนเบาที่สุด ดังนั้นฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดที่ต้องการก็คือน้ำหนัก ซึ่งสำหรับโครงถักหมายถึงผลรวมน้ำหนักของแต่ละชิ้นส่วน โดยสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดได้เป็น

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = W_{TopChord} + W_{BottomChord} + W_{Digaonal} \quad (2-7)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \text{ฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด} \\ W_{TopChord} &= \text{น้ำหนักชิ้นส่วนคอร์ดบน} \\ W_{BottomChord} &= \text{น้ำหนักชิ้นส่วนคอร์ดล่าง} \\ \text{และ } W_{Diagonal} &= \text{น้ำหนักชิ้นส่วนค้ำยัน} \end{aligned}$$

2.4.2 การกำหนดเงื่อนไขขีดจำกัด

เงื่อนไขขีดจำกัดแบ่งเป็น 2 แบบด้วยกัน คือ เงื่อนไขขีดจำกัดแบบเท่ากับ (Equality Constraints) และเงื่อนไขขีดจำกัดแบบไม่เท่ากับ (Inequality Constraints) โดยส่วนมากเงื่อนไขขีดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้างจะเป็นเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ กล่าวคือชิ้นส่วนของโครงสร้างจะต้องมีค่าออกแบบไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานออกแบบของโครงสร้างที่พิจารณา ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างในงานวิจัยนี้จะยึดตามมาตรฐานหน่วยแรง (Allowable Stress Design ,ASD) โดยจะพิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้างดังต่อไปนี้

1) เงื่อนไขขีดจำกัดทางด้านการรับแรงดึง

องค์อาคารรับแรงดึงที่ทำด้วยเหล็กเหนียวและไม่มีรูเจาะจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมากเมื่อถูกกระทำโดยหน่วยแรงดึงที่สูงมากกว่าจุดคราก ดังนั้นหน่วยแรงครากจึงถูกใช้ในการกำหนดค่าเงื่อนไขขีดจำกัดทางด้านการรับแรงดึงไว้ดังนี้

$$F_t = 0.6F_y \quad (2-8)$$

หรือ

$$P_t \leq 0.6F_y A_g \quad (2-9)$$

โดยที่

$$F_t = \text{หน่วยแรงดึงที่ยอมให้}$$

$$F_y = \text{หน่วยแรงดึงที่จุดคราก}$$

$$P_t = \text{แรงดึงภายในชิ้นส่วน}$$

$$\text{และ } A_g = \text{พื้นที่หน้าตัดสุทธิ}$$

2) เงื่อนไขจำกัดทางด้านการรับแรงอัด

องค์อาคารรับแรงอัดจะเสียเสถียรภาพเกิดโก่งเดาะออกนอกแนวแกนจนวิบัติเมื่อรับแรงอัดเกินค่าวิกฤติ ซึ่งชิ้นส่วนรับแรงอัดเกิดการโก่งเดาะแบ่งเป็นการโก่งเดาะช่วงอีลาสติกที่เป็นลักษณะเสถียรและการโก่งเดาะช่วงอินอีลาสติกสำหรับเสถียรปานกลาง โดยแบ่งที่จุดที่ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะของออยเลอร์เท่ากับ $F_y / 2$ และเรียกจุดนี้ว่าค่า C_c สำหรับเหล็กที่มีค่าจุดคราก 2500 กก./ตร.ซม. จะมีค่า C_c เท่ากับ 128.8 โดยงานวิจัยนี้จะออกแบบให้อยู่ในช่วงอินอีลาสติกเนื่องจากการออกแบบในช่วงอีลาสติกนั้นหน่วยแรงอัดที่ให้มีค่าน้อย ซึ่งค่าตัวคูณลดกำลังวัสดุจะถูกลดลงเหลือต่ำกว่า 0.26 เป็นการเลือกใช้หน้าตัดอย่างไม่คุ้มค่า ดังนั้นเงื่อนไขจำกัดทางด้านการรับแรงอัดที่ยอมรับของช่วงอินอีลาสติก คือ

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}\right]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \quad (2-10)$$

โดยที่

K = สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล กำหนดให้ $K=1$

L = ความยาวชิ้นส่วนรับแรงอัด

r = รัศมีจายเรชัน โดยที่ $r = \sqrt{\frac{R^2}{2}}$

และ C_c = ค่าแบ่งพฤติกรรมการโก่งเดาะ กำหนดให้

3) เงื่อนไขจำกัดทางด้านความชะลูดชิ้นส่วนรับแรงดึง

ชิ้นส่วนรับแรงดึงจะถูกจำกัดด้วยอัตราส่วนความชะลูดเพื่อป้องกันการคดโค้งข้างหรือการแกว่งทางด้านข้างขององค์อาคาร กำหนดให้อัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนรับแรงดึงมีค่าไม่เกิน

$$\frac{L}{r} \leq 240 \quad (2-11)$$

กำหนดให้ $r = \sqrt{\frac{R^2}{2}}$ ดังนั้น

$$\sqrt{\frac{R^2}{2}} \leq \frac{L}{240} \quad (2-12)$$

โดยที่

L = ความยาวชิ้นส่วนรับแรงดึง

r = รัศมีใจเรชัน

และ R = รัศมีท่อเหล็กกลม

4) เงื่อนไขจำกัดทางด้านความชะลูดชิ้นส่วนรับแรงอัด

องค์อาคารรับแรงอัดที่มีความชะลูดมากเกินไปจะทำให้เกิดการโก่งเดาะแนวระนาบ โดยอัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนรับแรงอัดกำหนดไว้ดังนี้

$$\frac{L}{r} \leq 200 \quad (2-13)$$

กำหนดให้ $r = \sqrt{\frac{R^2}{2}}$ ดังนั้น

$$\sqrt{\frac{R^2}{2}} \leq \frac{L}{200} \quad (2-14)$$

โดยที่

L = ความยาวชิ้นส่วนรับแรงอัด

r = รัศมีใจเรชัน

และ R = รัศมีท่อเหล็กกลม

5) เงื่อนไขจำกัดทางด้านการแอ่นตัวของโครงหลังคา

การแอ่นตัวของโครงสร้างมีผลทำให้โครงสร้างสันสะท้อนได้ง่ายและทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกไม่ปลอดภัย สำหรับค่าการแอ่นตัวที่กำหนดไว้สำหรับโครงหลังคา ค่าการแอ่นตัวไม่ควรเกิน

$$\Delta \leq \frac{L}{240} \quad (2-15)$$

โดยที่

Δ = ความยาวชิ้นส่วนรับแรงดึง

L = ความยาวโครงถัก

6) เงื่อนไขจำกัดทางด้านตัวแปรรูปแบบ

ผู้ออกแบบจะต้องทำการกำหนดเงื่อนไขจำกัดทางด้านตัวแปรรูปแบบเพื่อให้เป็นไปตามจุดประสงค์ที่ผู้ออกแบบต้องการพิจารณา สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของตัวแปรคือ

6.1) วัสดุโครงสร้างใช้เหล็กท่อนอก 107-2533 เกรด HS 41

6.2) ขนาดชิ้นส่วนใช้เหล็กท่อนเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ " – 4"

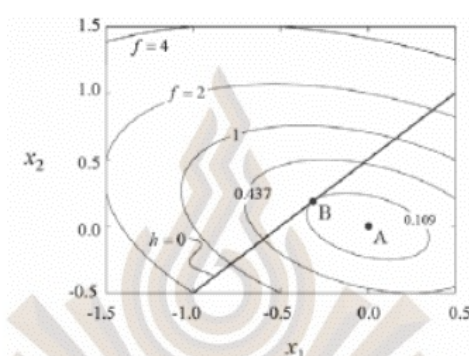
6.3) ความหนาชิ้นส่วนใช้เหล็กท่อนความหนา 2.3 มม. - 4.5 มม.

2.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัดระบบไม่เชิงเส้น

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาที่เป็นระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Unconstrained) ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในด้านวิศวกรรม โดยปกติแล้วปัญหาส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขที่มีองค์ประกอบหลายตัวซึ่งจะพิจารณา สำหรับปัญหาที่เป็นเงื่อนไขแบบเท่ากับจะใช้เทคนิคที่เรียกว่าตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange's Method) ในการแก้ปัญหา และสำหรับปัญหาที่เป็นเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับจะใช้เทคนิคที่เรียกว่าเงื่อนไข Karush Khun Tucker (KKT) ในการแก้ปัญหา

2.5.1 ปัญหาเงื่อนไขแบบเท่ากับ

ปัญหาเงื่อนไขแบบเท่ากับ คำตอบจะต้องอยู่บนเส้น $h=0$ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.6 โดยจุด A เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชันใดๆ และจุด B เป็นจุดต่ำสุดบนฟังก์ชันเงื่อนไขแบบเท่ากับเป็นคำตอบของฟังก์ชันนี้

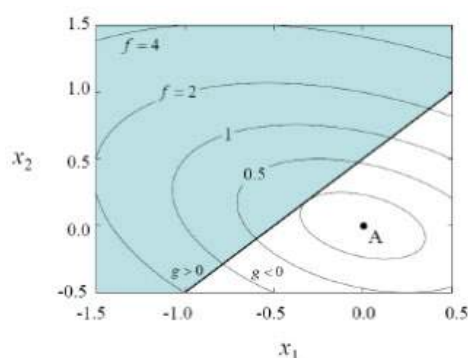


รูปที่ 2.6 จุดต่ำสุดของฟังก์ชันเงื่อนไขแบบเท่ากับ

ที่มา: คุลยโชติ ชลศึกษ์, 2552

2.5.2 ปัญหาเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ

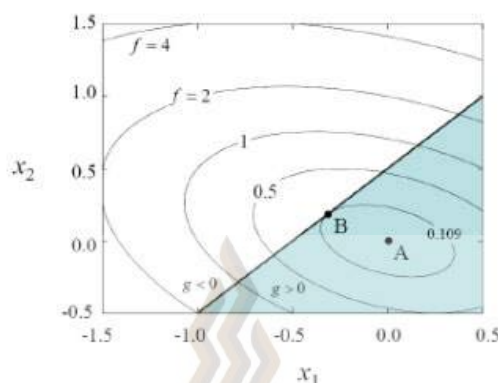
ทำการเขียนกราฟคอนทัวร์ของฟังก์ชันใดๆ และเขียนเงื่อนไขแบบน้อยกว่า โดยเส้นตรงที่แสดง $g=0$ บริเวณแรเงาแสดงถึงส่วนที่ใช้ไม่ได้ $g>0$ และบริเวณที่ใช้ได้ $g<0$ จะไม่แรเงา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ได้ โดยจุดต่ำสุดที่จุด A อยู่ในบริเวณที่ใช้ได้ ซึ่งจะเป็นคำตอบของฟังก์ชันนี้



รูปที่ 2.7 จุดต่ำสุดของฟังก์ชันเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ $g(x) < 0$

ที่มา: คุลยโชติ ชลศึกษ์, 2552

ปัญหาแบบไม่เท่ากับที่มีเครื่องหมายมากกว่า เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 2.8 โดยแรงบริเวณที่ใช้ไม่ได้ พบว่าคำตอบอยู่ที่จุด B ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ $g = 0$



รูปที่ 2.8 จุดต่ำสุดของฟังก์ชันเงื่อนไขแบบไม่เท่ากับ $g(x) > 0$

ที่มา: ดุลยโชติ ชลศึกษ์, 2552

2.5.3 การหาค่าต่ำสุดด้วยวิธีลากรางจ์

วิธีลากรางจ์เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับปัญหาแบบเท่ากับโดยใช้อันดับของฟังก์ชันลำดับที่หนึ่ง ถ้ากำหนดฟังก์ชันที่ต้องการนั้นเป็น $f(x)$ และกำหนดเงื่อนไขแบบเท่ากับ จะได้

$$g(x_1, x_2) = 0 \quad (2-16)$$

โดยที่ x_1 เป็นฟังก์ชันของ x_2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง x_1 และ x_2

$$x_1 = \phi(x_2) \quad (2-17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2-18) สามารถเขียนฟังก์ชันของ x_2 ได้เป็น

$$F(x_2) = f(\phi(x_2), x_2) \quad (2-18)$$

และเงื่อนไขของ x_2 คือ

$$h(x_2) = g(\phi(x_2), x_2) = 0 \quad (2-19)$$

จากสมการที่ (2-19) และ (2-20) สามารถหาคำตอบที่เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชันโดยกำหนดให้อนุพันธ์ของฟังก์ชัน $F(x_2)$ และอนุพันธ์เงื่อนไข $h(x_2)$ เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{dF(x_2)}{dx_2} = \frac{\partial f}{\partial x_2} + \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{d\phi(x_2)}{d(x_2)} = 0 \quad (2-20)$$

$$\frac{dh(x_2)}{dx_2} = \frac{\partial g}{\partial x_2} + \frac{\partial g}{\partial x_1} \frac{d\phi(x_2)}{d(x_2)} = 0 \quad (2-21)$$

จากกฎลูกโซ่สามารถกำหนดได้ว่า

$$\frac{df}{dx_1} - \left(\frac{df/dx_1}{dg/dx_1} \right) \frac{dg}{dx_1} = 0 \quad (2-22)$$

$$\nabla f - \lambda \nabla g = 0 \quad (2-23)$$

$$\lambda = \frac{df}{dg} \quad (2-24)$$

โดยที่ λ เป็นตัวคูณลากรางจ์ ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันลากรางจ์เป็น

$$L(x, \lambda) = f(x) - \lambda g(x) \quad (2-25)$$

และจะได้เงื่อนไขที่จำเป็นจากเกรเดียนของฟังก์ชันลากรางจ์เท่ากับศูนย์

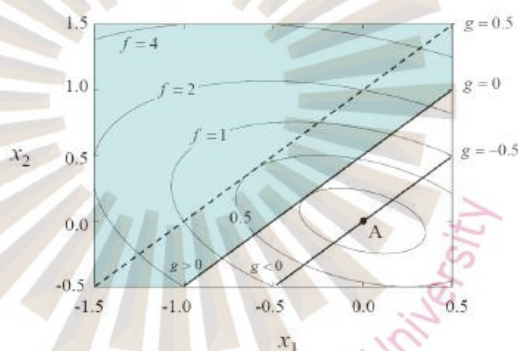
$$\nabla L(x, \lambda) = 0 \quad (2-26)$$

2.5.4 เงื่อนไข Karush Khun Tucker (KKT)

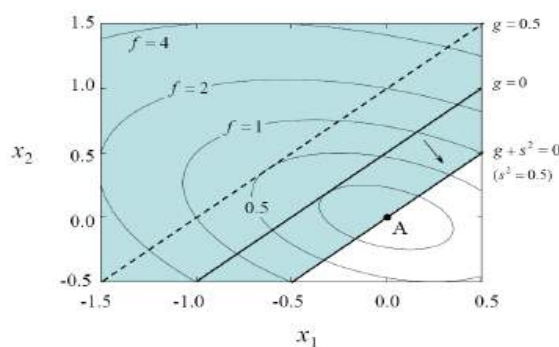
วิธี KKT เป็นการหาคำตอบแบบไม่เท่ากัน เมื่อกำหนดให้หาค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ โดยมีเงื่อนไขการนำตัวแปรที่เรียกว่า Slack Variable (s^2) มาใช้กับเงื่อนไขแบบไม่เท่ากัน เพื่อชดเชยค่าเงื่อนไขให้เป็นศูนย์ในกรณีที่คำตอบอยู่ในบริเวณที่เป็นไปได้จะได้เงื่อนไขคือ

$$g(x) + s^2 = 0 \quad (2-27)$$

การเขียนตัวแปรผ่อนคลายเป็นรูปยกกำลังสอง มีจุดประสงค์เพื่อบังคับให้ค่า s^2 ต้องเป็นบวกเสมอหากจุดที่สนใจอยู่ในบริเวณที่เป็นไปได้ อธิบายดังรูปที่ 2.9 จุดต่ำสุดคือจุด A อยู่ในบริเวณที่ใช้ได้ เมื่อต้องการใช้ฟังก์ชันลากรางจ์มาแก้ปัญหาจึงจำเป็นต้องปรับฟังก์ชัน $g(x)$ ให้ขยับไปในทิศทางดังรูป 2.10 จะเห็นได้ว่าค่า s^2 ต้องเป็นบวก



รูปที่ 2.9 จุดต่ำสุดก่อนชดเชยฟังก์ชันเงื่อนไขแบบไม่เท่ากัน $g(x) < 0$
ที่มา: คลุยโชติ ชลสิทธิ์, 2552



รูปที่ 2.10 จุดต่ำสุดหลังชดเชยฟังก์ชันเงื่อนไขแบบเท่ากับศูนย์ $g(x) + s^2 = 0$
ที่มา: คลุยโชติ ชลสิทธิ์, 2552

สรุปหลักการพิจารณาเงื่อนไขแบบ KKT

1) เงื่อนไขสลับเปลี่ยน $\frac{dL}{ds} = 2us = 0$

2) เปรียบเทียบกรณีที่ข้อจำกัด g ถูกใช้งานและ g ไม่ถูกใช้งานและ
เปรียบเทียบว่าค่าใดต่ำกว่า

3) กรณีที่ $u = 0$ (ข้อจำกัด g ไม่ถูกใช้งาน)

ถ้าค่า $s^2 > 0$ อยู่ในบริเวณที่ใช้ได้ (ขยับไปจุดต่ำกว่าตามเงื่อนไข)

ถ้าค่า $s^2 < 0$ อยู่ในบริเวณที่ใช้ไม่ได้ (ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข)

4) กรณี $s = 0$ (ข้อจำกัด g ถูกใช้งาน)

ถ้าค่า $u > 0$ เกรเดียนฟังก์ชันทิศทางต่ำลง (เป็นไปตามเงื่อนไข)

ถ้าค่า $u < 0$ เกรเดียนฟังก์ชันทิศทางสูงขึ้น (ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข)



บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยคือ เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยที่เครื่องคอมพิวเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 (Microsoft Window 10)
- 2) หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i5-760 2.80 GHz
- 3) หน่วยความจำแรม 4.00 GB
- 4) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในวิเคราะห์การหาคำตอบคือ Mathcad Prime

3.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

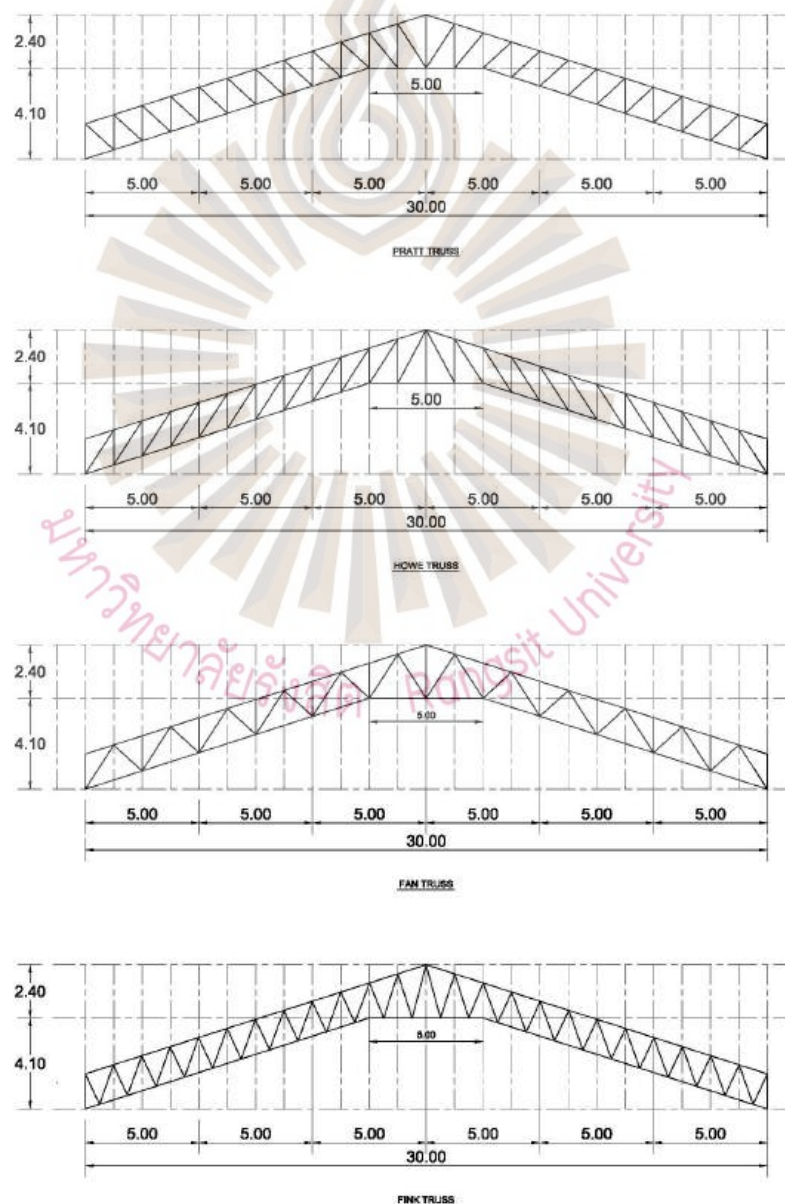
การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของชิ้นส่วนโครงถักที่มีจำนวนตัวแปรและเงื่อนไขจำกัดจำนวนมากอาจทำให้เกิดโอกาสผิดพลาดสูงในการคำนวณ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำเสนอการใช้ซอฟต์แวร์ Mathcad Prime เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาคำตอบ โดยซอฟต์แวร์ดังกล่าวมีฟังก์ชันสำเร็จรูปที่เรียกว่า Solve Block ในการวิเคราะห์หาค่าสูงสุด (Maximization) และค่าต่ำสุด (Minimization) ของฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนสูง อีกทั้งสามารถประมวลผลได้รวดเร็วทำให้ประหยัดเวลาในการหาผลลัพธ์ได้

การหาค่าเหมาะสมที่สุดภายใต้ฟังก์ชันสถานะจำกัด มีขั้นตอนการสร้างสมการและกำหนดตัวแปรเพื่อบำเหน็จการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Mathcad Prime สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

3.2.1 การกำหนดรูปแบบโครงถัก

งานวิจัยนี้อ้างอิงแบบมาตรฐานโรงยิมเนคประสงค์กรมพลศึกษาขนาด 30x50 เมตร โดยโครงถักที่ศึกษามีลักษณะเป็นทรงคอร์ดเอียงขนาน ดังแสดงในภาคผนวก ก

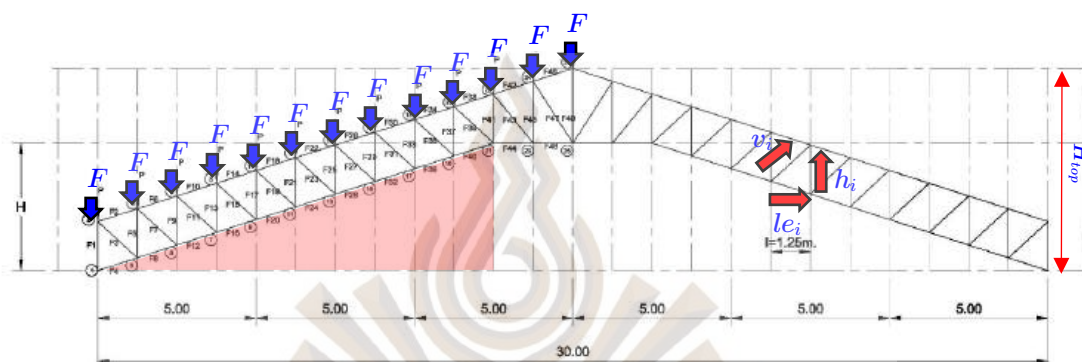
กำหนดรูปแบบโครงถักหลังคาที่นิยมใช้จำนวน 4 รูปแบบ คือ รูปแบบเพรตต์ (Pratt Truss), รูปแบบโฮว์ (Howe Truss), รูปแบบพัด (Fan Truss) และรูปแบบฟิงก์ (Fink Truss) ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบโครงถักที่นิยม 4 รูปแบบ

3.2.2 การหาแรงลัพธ์ภายในชิ้นส่วนโดยการวิเคราะห์ที่จุดต่อ

หลังจากกำหนดขนาดรูปร่างและลักษณะโครงถักที่ต้องการได้แล้ว เริ่มทำการวิเคราะห์หาแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างโดยวิธีการตัดรอบจุดต่อ ออกแบบให้จุดรองรับด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุนและอีกด้านเป็นแบบลื่นเลื่อน ระบุหมายเลขชิ้นส่วนรวมถึงจุดต่อที่ต้องการพิจารณา ทำการใส่แรงกระทำภายนอกตามจุดต่อดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดแรงกระทำภายนอกที่จุดต่อ

ที่มา: ผู้วิจัย

หาความสัมพันธ์ของความยาวชิ้นส่วนระหว่างความสูงในแนวดิ่งและความยาวในแนวราบ เพื่อนำไปใช้หาค่าตัวแปรออกแบบเหมาะสมที่สุดของความสูงโครงถักได้ดังต่อไปนี้

$$le_i = |v_i| \quad (3-1)$$

โดยที่

le_i = ความยาวชิ้นส่วนที่ i

v_i = ขนาดเวกเตอร์ i

กำหนดให้

$$v_i = \begin{bmatrix} l_i \\ h_i \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

โดยที่

v_i = เวกเตอร์ชิ้นส่วนที่ i

l_i = ความยาวชิ้นส่วนที่ i ในแนวแกน x

และ h_i = ความสูงชิ้นส่วนที่ i ในแนวแกน y เทียบค่าสัดส่วนของความสูงโครงถัก (H)

จากนั้นสร้างสมการสมดุลแรงโดยกำหนดทิศทางเวกเตอร์ให้แรงแนวราบมีค่าบวกในทิศทางและเวกเตอร์แรงแนวตั้งมีค่าบวกในทิศขึ้น สร้างสมการให้ครบทุกจุดต่อของโครงถัก โดยพิจารณาตามลำดับการถ่ายแรงภายในของชิ้นส่วนดังสมการ

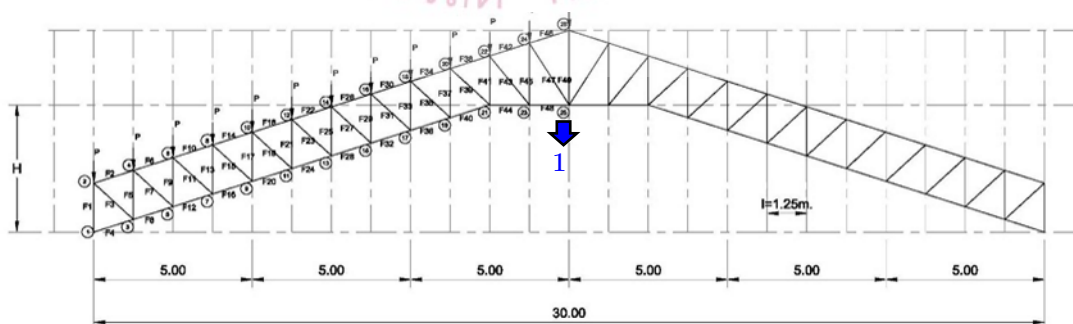
$$\sum P_i \cdot \frac{v_i}{|v_i|} = \sum F \quad (3-3)$$

โดยที่

P_i = แรงภายในชิ้นส่วนที่ i

และ F = แรงกระทำภายนอกบนจุดต่อที่พิจารณา

ในส่วนของการวิเคราะห์หาแรงภายในโดยวิธีงานเสมือนเพื่อนำไปใช้ประกอบการสร้างฟังก์ชันเงื่อนไขจำกัดทางด้านการแอ่นตัวของโครงถัก สามารถใช้หลักการเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์หาแรงภายในชิ้นส่วน โดยทำการกำหนดแรง 1 หน่วยตรงจุดที่ต้องการทราบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การกำหนดแรงกระทำเสมือนที่จุดต่อ

ที่มา: ผู้วิจัย

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หาแรงภายในและแรงเสมือนจะอยู่ในรูปตัวแปร ออกแบบความสูงโครงถัก (H) เพื่อนำไปประกอบการสร้างเงื่อนไขจำกัดในการวิเคราะห์หาค่า ความสูงเหมาะสมต่อไป

3.2.3 การสร้างฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด

การสร้างฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดทางด้านน้ำหนัก ทำได้โดยการคำนวณผลคูณของ ปริมาตรชิ้นส่วนกับความหนาแน่นวัสดุให้อยู่ในรูปของตัวแปรออกแบบ สามารถเขียนสมการหา น้ำหนักรวมของชิ้นส่วนโครงถักได้ดังนี้

$$W = \sum_{i=1}^n 2\rho\pi R_i t_i l_i \quad (3-4)$$

โดยที่

W = น้ำหนักโครงถัก

ρ = ความหนาแน่นเหล็กมีค่า 7,850 กก./ลบ.ม.

R_i = รัศมีชิ้นส่วนเหล็กท่อนที่ i

t_i = ความหนาชิ้นส่วนเหล็กท่อนที่ i

l_i = ความยาวชิ้นส่วนเหล็กท่อนที่ i

และ n = จำนวนเหล็กท่อนทั้งหมด

กำหนดขนาดรัศมีและความหนาของเหล็กท่อนตามเงื่อนไขขอบเขตขีดจำกัดทางด้าน ตัวแปรออกแบบ โดยแบ่งกลุ่มชิ้นส่วนเป็น 3 กลุ่ม คือชิ้นส่วนคอร์ดบน (Top Chord) ,ชิ้นส่วนค้ำยัน (Brace) และชิ้นส่วนคอร์ดล่าง (Bottom Chord) เพื่อนำไปหาค่าเหมาะสมสุดของรัศมีและความหนาจะ ได้

$$f(R_1, t_1, R_2, t_2, R_3, t_3, H) = \rho \left(\sum_{T=1}^n A_T l_T + \sum_{D=1}^n A_D l_D + \sum_{B=1}^n A_B l_B \right) \quad (3-5)$$

กำหนดให้

$$A_i = \sum_{i=1}^n 2\pi R_i t_i l_i \quad (3-6)$$

โดยที่

A_T = พื้นที่หน้าตัดเหล็กชั้นส่วนคอรับ

A_D = พื้นที่หน้าตัดเหล็กชั้นส่วนค้ำยัน

A_B = พื้นที่หน้าตัดเหล็กชั้นส่วนคอรับล่าง

l_T = ความยาวชั้นส่วนคอรับ

l_D = ความยาวชั้นส่วนค้ำยัน

l_B = ความยาวชั้นส่วนคอรับล่าง

และ n = จำนวนเหล็กท่อนของแต่ละกลุ่ม

3.2.4 การสร้างเงื่อนไขขีดจำกัดและเงื่อนไขตัวแปรออกแบบ

การสร้างเงื่อนไขขีดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้างและเงื่อนไขตัวแปรออกแบบในรูปแบบฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัดไม่เท่ากับระบบไม่เชิงเส้น อ้างอิงตามข้อกำหนดการออกแบบวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Allowable Stress Design, ASD) วสท.1015-40 และเลือกใช้ขนาดเหล็กท่อนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 107-2533 ชั้นคุณภาพ HS 41 โดยเลือกค่าแรงลัพธ์ภายในและความยาวชั้นส่วนสูงสุดที่วิเคราะห์ได้มาเป็นตัวแทนในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมการเงื่อนไขขีดจำกัด

เงื่อนไขขีดจำกัด	กลุ่มที่พิจารณา	สมการเงื่อนไขขีดจำกัด
ชั้นส่วนรับแรงอัด	คอรับบน	$P_{1\max} - \sigma_{t\allow} A_1 \leq 0$
ชั้นส่วนรับแรงอัด	ค้ำยัน	$P_{2\max} - \sigma_{t\allow} A_2 \leq 0$
ชั้นส่วนรับแรงดึง	คอรับล่าง	$P_{3\max} - \sigma_{c\allow} A_3 \leq 0$
ชั้นส่วนรับแรงดึง	ค้ำยัน	$P_{4\max} - \sigma_{c\allow} A_4 \leq 0$

ตารางที่ 3.1 สมการเงื่อนไขขีดจำกัด (ต่อ)

เงื่อนไขขีดจำกัด	กลุ่มที่พิจารณา	สมการเงื่อนไขขีดจำกัด
อัตราส่วนความชะลูด การรับแรงอัด	คอร์ดบน	$r_1 - \frac{l_{1\max}}{200} \geq 0$
อัตราส่วนความชะลูด การรับแรงอัด	ค้ำยัน	$r_2 - \frac{l_{2\max}}{200} \geq 0$
อัตราส่วนความชะลูด การรับแรงดึง	คอร์ดล่าง	$r_3 - \frac{l_{3\max}}{240} \geq 0$
อัตราส่วนความชะลูด การรับแรงดึง	ค้ำยัน	$r_2 - \frac{l_{4\max}}{240} \geq 0$
การแอ่นตัวของโครง หลังคา	โครงถัก	$\Delta_{\max} - \frac{L}{240} \leq 0$
ตัวแปรรูปแบบ	รัศมีท่อ	$10mm. \leq R \leq 62.5mm.$
ตัวแปรรูปแบบ	ความหนาท่อ	$2.3mm. \leq t \leq 4.5mm.$
ตัวแปรรูปแบบ	ความสูงโครงถัก	$1.3m. \leq H \leq 4.5m.$

3.2.5 การหาค่าเหมาะสมสุดโดยฟังก์ชันสำเร็จรูป

ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมสุดของตัวแปรที่ต้องการทราบค่าภายใต้ฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดและเงื่อนไขขีดจำกัดที่กำหนด โดยใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูป Solve Block ของซอฟต์แวร์ Mathcad Prime มีวิธีการกำหนดค่าเพื่อใช้งานของฟังก์ชันดังต่อไปนี้

1) กำหนดสมการฟังก์ชันสถานะขีดจำกัดภายใต้ตัวแปรรูปแบบที่ต้องการทราบค่าเหมาะสมสุดและกำหนดค่าคำตอบเริ่มต้นสำหรับทุกค่าตัวแปรรูปแบบในช่อง Guess Value ซึ่งประกอบด้วยค่าความสูงโครงถัก (H) , รัศมีเหล็กท่อกอร์ดบน (R_1), รัศมีเหล็กท่อก้ำยัน (R_2), รัศมีเหล็กท่อกอร์ดล่าง (R_3), ความหนาเหล็กท่อกอร์ดบน (t_1), ความหนาเหล็กท่อก้ำยัน (t_2) และความหนาเหล็กท่อกอร์ดล่าง (t_3) ดังรูป 3.4 เป็นการกำหนดข้อมูลให้ซอฟต์แวร์เริ่มกระบวนการทำซ้ำจนมีค่าลู่เข้า (Convergence) เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด

Guess Values	LIMIT STATE FUNCTION			
	$f(R1, t1, R2, t2, R3, t3, H) = \rho \left(\sum_i A_T I_T + \sum_i A_D I_D + \sum_i A_B I_B \right)$			
	INITIAL GUESS VALUE			
	$R1 := 1 \text{ mm}$	$R2 := 1 \text{ mm}$	$R3 := 1 \text{ mm}$	$H := 1 \text{ m}$
	$t1 := 1 \text{ mm}$	$t2 := 1 \text{ mm}$	$t3 := 1 \text{ mm}$	

รูปที่ 3.4 การกำหนดข้อมูล Guess Value ในฟังก์ชันสำเร็จรูป

ที่มา: ผู้วิจัย

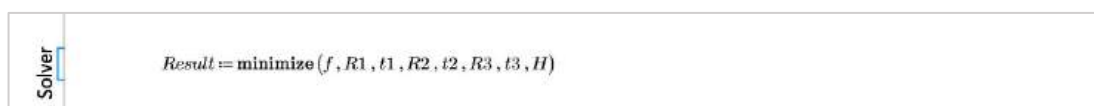
2) ในช่อง Constraints ให้กำหนดค่าสมการเงื่อนไขบังคับในรูปแบบตัวแปรออกแบบที่ได้จากการวิเคราะห์จำนวน 12 เงื่อนไขจากตารางที่ 3.1 เพื่อกำหนดขอบเขตค่าผลลัพธ์ของตัวแปรออกแบบให้เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับดังรูป 3.5

Constraints	CONSTRAINTS	
	$P1_{max} - (\sigma_{allow} \cdot A) \leq 0$	(TOP CHORD COMPRESSION STRESS LIMIT)
	$P2_{max} - (\sigma_{allow} \cdot A) \leq 0$	(DIGONAL COMPRESSION STRESS LIMIT)
	$P3_{max} - (\sigma_{allow} \cdot A) \leq 0$	(BOTTOM CHORD TENSION STRESS LIMIT)
	$P4_{max} - (\sigma_{allow} \cdot A) \leq 0$	(DIGONAL TENSION STRESS LIMIT)
	$r1 - \frac{L}{200} \geq 0$	(TOP CHORD SLENDER RATIO LIMIT)
	$r2 - \frac{L}{200} \geq 0$	(BRACE SLENDER RATIO LIMIT)
	$r3 - \frac{L}{240} \geq 0$	(BOTTOM SLENDER RATIO LIMIT)
	$r4 - \frac{L}{240} \geq 0$	(BRACE SLENDER RATIO LIMIT)
	$\frac{L}{240} - \sum_i \frac{n_i N_i L_i}{A_i E_i} \geq 0$	(TRUSS DEFLECTION LIMIT)
	$62.5 \text{ mm} \geq R1 \geq 10 \text{ mm}$	(PIPE RADIUS LIMIT)
	$62.5 \text{ mm} \geq R2 \geq 10 \text{ mm}$	
	$62.5 \text{ mm} \geq R3 \geq 10 \text{ mm}$	
	$4.5 \text{ mm} \geq t1 \geq 2.3 \text{ mm}$	(PIPE THICKNESS LIMIT)
	$4.5 \text{ mm} \geq t2 \geq 2.3 \text{ mm}$	
	$4.5 \text{ mm} \geq t3 \geq 2.3 \text{ mm}$	
	$5 \text{ m} \geq H \geq 1.3 \text{ m}$	(TRUSS HEIGHT LIMIT)

รูปที่ 3.5 การกำหนดข้อมูล Constraints ในฟังก์ชันสำเร็จรูป

ที่มา: ผู้วิจัย

3) ใช้คำสั่ง Minimize ในช่อง Solver ในการหาคำตอบต่ำสุดของฟังก์ชันสถานะ จิตจำกัดดังรูป 3.6 โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตัวแปรออกแบบที่ทำให้โครงถักหลังคามีน้ำหนักเบา สุดภายใต้เงื่อนไขจิตจำกัด



รูปที่ 3.6 การกำหนดข้อมูล Solver ในฟังก์ชันสำเร็จรูป

ที่มา: ผู้วิจัย

โดยหลังจากได้ผลลัพธ์ที่ทำให้น้ำหนักโครงถักเบาสุดแล้ว ผู้ออกแบบต้องทำการเลือกหน้าตัดชิ้นส่วนให้สอดคล้องกับขนาดเหล็กท่อตามมาตรฐาน มอก. 107-2533 อีกครั้งและนำค่าความสูงเหมาะสมสุดของโครงถักคำนวณหาความยาวชิ้นส่วนจริงแต่ละชั้นที่แปรผันตามความสูงที่เปลี่ยนไป จากนั้นนำความยาวและขนาดเหล็กท่อที่ใช้จริงมาวิเคราะห์หาการตัดเศษน้อยสุดโดยใช้โปรแกรม Optimization Cutting ซึ่งจะคำนวณจากปริมาณโครงถักที่ใช้จริงสำหรับอาคารโรงยิม ขนาดมาตรฐานจำนวน 1 หลัง แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับสรุปผลวิเคราะห์รูปแบบเหมาะสมสุดของโครงถักหลังคาเหล็กต่อไป

3.3 สรุปลำดับขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมสุด

การหาค่าเหมาะสมสุดของฟังก์ชันสถานะจิตจำกัดทางด้านน้ำหนักของโครงถักหลังคาเหล็ก สามารถสรุปผังงานลำดับขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมสุดได้ดังรูปที่ 3.5 โดยสามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรูปแบบโครงถักและค่าตัวแปรที่ต้องการหาค่าเหมาะสมเพื่อนำมาคำนวณหาน้ำหนักเบาสุดของโครงถัก

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์หาแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างโดยวิธีการตัดรอบจุดต่อเพื่อนำไปใช้ประกอบการสร้างฟังก์ชันเงื่อนไขจิตจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้าง

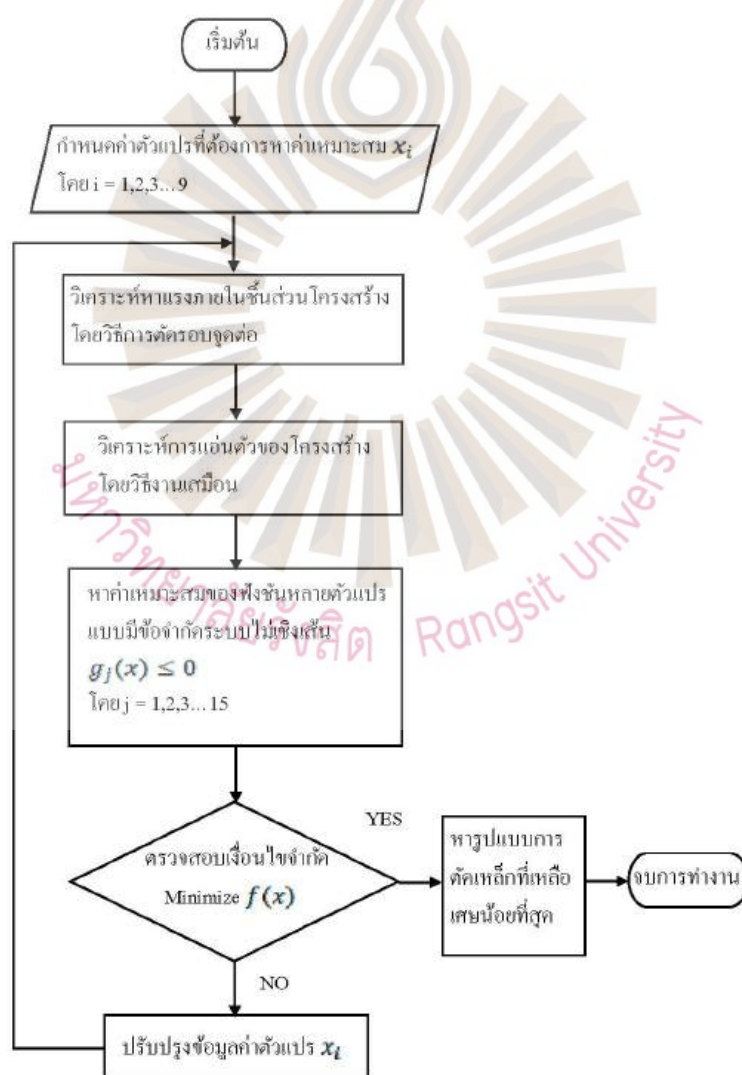
ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์หาแรงภายในโดยวิธีงานเสมือนเพื่อนำไปใช้ประกอบการสร้างฟังก์ชันเงื่อนไขจิตจำกัดทางด้านการแอ่นตัวของโครงถัก

ขั้นตอนที่ 4 สร้างฟังก์ชันสถานะปิดจำกัดทางด้านน้ำหนักและเงื่อนไขปิดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้าง ในรูปแบบฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัดไม่เท่ากับระบบไม่เชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 5 ทำการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมสุดของตัวแปรที่ต้องการทราบค่าภายใต้ฟังก์ชันสถานะปิดจำกัดและเงื่อนไขปิดจำกัดที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 6 นำค่าคำตอบเหมาะสมสุดที่ได้คำนวณหาน้ำหนักเบาสุดและรูปแบบการตัดที่เหลือเศษน้อยสุดของโครงถัก

ขั้นตอนที่ 7 กำหนดรูปแบบโครงถักต้องการพิจารณาเปรียบเทียบและปรับปรุงข้อมูลค่าตัวแปรใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 3.7 ผลงานลำดับขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมสุด

ที่มา: ผู้วิจัย

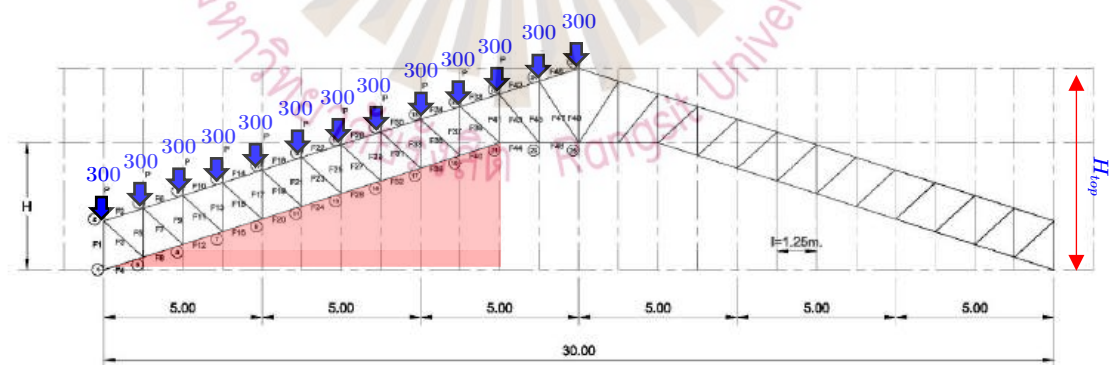
บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิจารณ์ผล

ในบทนี้จะแสดงผลการศึกษางานออกแบบโครงถักหลังคาแบบเหมาะสมที่สุด โดยแสดงผลการวิเคราะห์หาเงื่อนไขจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้างและฟังก์ชันสภาวะจำกัดทางคาน้ำหนักในรูปแบบตัวแปรออกแบบและแสดงผลคำนวณขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนและความสูงเหมาะสม รวมถึงเปรียบเทียบผลวิเคราะห์น้ำหนักเบาสุดของโครงถักหลังคาหลักทั้ง 4 รูปแบบที่นำเสนอตามวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของโครงถักรูปแบบมาตรฐาน

การคำนวณแรงภายในสามารถวิเคราะห์หาแรงลัพธ์ของชิ้นส่วนเพียงครึ่งหนึ่งของโครงถัก เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะสมมาตร (Symmetry) โดยกำหนดหมายเลขจุดต่อและชิ้นส่วนโครงถัก จากนั้นใส่น้ำหนักบรรทุกจร 300 กิโลกรัมลงจุดต่อรับแปของโครงถักดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกำหนดค่าชิ้นส่วนและแรงกระทำที่จุดต่อ

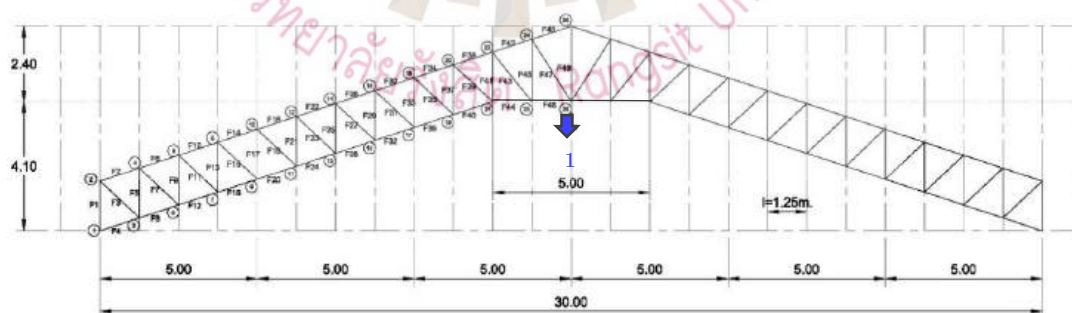
ที่มา: ผู้วิจัย

จากการวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Mathcad Prime ด้วยวิธีสร้างสมการสมดุลแรงและกำหนดทิศทางเวกเตอร์จะได้ค่าแรงลัพธ์ภายในสูงสุดของแต่ละกลุ่มชิ้นส่วนภายใต้รูปแบบตัวแปรที่ต้องการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงลัพท์ภายในชิ้นส่วนสูงสุดของกลุ่มชิ้นส่วน

ประเภท ชิ้นส่วน	หน่วยแรง	ตำแหน่ง	ค่าแรงลัพท์ภายใน
คอร์ดบน	แรงดึงสูงสุด	-	-
	แรงอัดสูงสุด	F46	$13486 kg \cdot \frac{\sqrt{1.6 m ^2 + 0.01 H ^2}}{ m }$
คอร์ดล่าง	แรงดึงสูงสุด	F48	$13478 kg \cdot \frac{\sqrt{1.6 m ^2 + 0.01 H ^2}}{ m }$
	แรงอัดสูงสุด	-	-
ค้ำยัน	แรงดึงสูงสุด	F49	$\frac{2676 H kg }{ m } - 300 kg $
	แรงอัดสูงสุด	F1	$3750 kg $

ทำการกำหนดทิศทางและขนาดแรงเสมือน 1 หน่วยกระทำที่จุดที่ต้องการหาการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางโครงถักดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การกำหนดค่าชิ้นส่วนและแรงกระทำเสมือนที่จุดต่อ

ที่มา: ผู้วิจัย

การหาค่าแรงลัพท์เสมือนสามารถทำได้เช่นเดียวกันกับการหาค่าแรงลัพท์ภายในชิ้นส่วนดังกล่าวข้างต้น จะได้ค่าแรงลัพท์เสมือนสูงสุดของแต่ละกลุ่มชิ้นส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงลัพท์เสมือนสูงสุดของกลุ่มชิ้นส่วน

ประเภทชิ้นส่วน	หน่วยแรง	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน
คอร์คบน	แรงดึงสูงสุด	-	-
	แรงอัดสูงสุด	F46	$3.72 kg \cdot \frac{\sqrt{1.6 m ^2 + 0.01 H ^2}}{ m }$
คอร์คล่าง	แรงดึงสูงสุด	F48	$3.42 kg \cdot \frac{\sqrt{1.6 m ^2 + 0.01 H ^2}}{ m }$
	แรงอัดสูงสุด	-	-
ก้ำยัน	แรงดึงสูงสุด	F49	$3.2 \cdot 10^{-5} kg + \frac{23375 H - 62188 m }{ m }$
	แรงอัดสูงสุด	F1	$0.5 \cdot kg $

เมื่อได้ค่าผลลัพท์แรงภายในของชิ้นส่วนที่พิจารณาแล้ว สามารถสร้างเงื่อนไขจำกัดทางการแอ่นตัวของโครงถักโดยนำค่าแรงภายในและค่าแรงลัพท์เสมือนของกลุ่มชิ้นส่วนแทนค่าลงในสมการที่ (2-6) จะได้รูปแบบเงื่อนไขจำกัดทางการแอ่นตัวของโครงถักดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมการเงื่อนไขการแอ่นตัวของโครงถัก

สมการการแอ่นตัว	เงื่อนไขจำกัดทางการแอ่นตัว
$df_i = 2 \cdot \sum_{i=1}^{49} \left(\frac{N_i \cdot n_i \cdot L_i}{A_i \cdot E} \right)$	$2 \cdot \frac{(3.4 \cdot 10^{-6} m ^2 + 2.1 \cdot 10^{-8} H ^2) \cdot \sqrt{0.01 H ^2 + 1.6 m ^2}}{m^2 \cdot R1 \cdot t1}$ $+ \frac{3.3 \cdot 10^{-8} m \sqrt{1.6 m ^2 + (1.6 m - 0.1 H)^2} \cdot (1.6 m ^2 + (0.1 H - 1.6 m)^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{ m ^3 \cdot (1.5 \cdot 10^{-7} m ^2 - 2.4 \cdot 10^{-8} H ^2 + 2.7 \cdot 10^{-9} \cdot H \cdot m)}{m^2 \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{(2.01 \cdot 10^{-8} H ^2 + 3.2 \cdot 10^{-6} m ^2) \cdot \sqrt{0.01 H ^2 + 1.6 m ^2}}{R3 \cdot t3}$

แทนค่าแรงภายในและความยาวสูงสุดของแต่ละกลุ่มชิ้นส่วนที่พิจารณาลงในสมการเงื่อนไขขีดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขขีดจำกัดทางพฤติกรรมโครงสร้าง

เงื่อนไข ขีดจำกัด	กลุ่มที่ พิจารณา	เงื่อนไข ขีดจำกัด	สมการเงื่อนไขในรูปแบบทั่วไป
การรับแรงอัด	คอร์ดบน	$P1_{\max} - \sigma_{t_{allow}} A_1 \leq 0$	$\frac{13486.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m } - \sigma_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot t1 \leq 0$
การรับแรงอัด	ค้ำยัน	$P2_{\max} - \sigma_{t_{allow}} A_2 \leq 0$	$\frac{2676.0 \cdot H \cdot kg }{ m } - 300.0 \cdot kg - \sigma_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot t2 \leq 0$
การรับแรงดึง	คอร์ดล่าง	$P3_{\max} - \sigma_{c_{allow}} A_3 \leq 0$	$\frac{13478.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m } - \sigma_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot R3 \cdot t3 \leq 0$
การรับแรงดึง	ค้ำยัน	$P4_{\max} - \sigma_{c_{allow}} A2 \leq 0$	$3750.0 \cdot kg - \sigma_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot t2 \leq 0$
ความเค้น การรับแรงอัด	คอร์ดบน	$R1 - \frac{l_1}{200} \geq 0$	$\sqrt{\frac{R1^2}{2}} - \sqrt{\frac{ H ^2}{100} + 1.5625 \cdot m ^2} \geq 0$
ความเค้น การรับแรงอัด	ค้ำยัน	$r2 - \frac{l_2}{200} \geq 0$	$\sqrt{\frac{R2^2}{2}} - \sqrt{\frac{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}{240}} \geq 0$
ความเค้น การรับแรงดึง	คอร์ดล่าง	$r3 - \frac{l_3}{240} \geq 0$	$\sqrt{\frac{R3^2}{2}} - \sqrt{\frac{ H ^2}{100} + 1.5625 \cdot m ^2} \geq 0$
ความเค้น การรับแรงดึง	ค้ำยัน	$r2 - \frac{l_4}{240} \geq 0$	$\sqrt{\frac{R2^2}{2}} - \frac{1.6 \cdot m }{200} \geq 0$
การแอ่นตัว ของโครง หลังคา	โครงถัก	$\Delta - \frac{L}{240} \leq 0$	$2 \cdot \frac{(3.4 \cdot 10^{-6} m ^2 + 2.1 \cdot 10^{-8} H ^2) \cdot \sqrt{0.01 H ^2 + 1.6 m ^2}}{m^2 \cdot R1 \cdot t1} + \frac{3.3 \cdot 10^{-8} m \sqrt{1.6 m ^2 + (1.6 m - 0.1 H)^2} \cdot (1.6 m ^2 + (0.1 H - 1.6 m)^2)}{m \cdot R2 \cdot t2} + \frac{ m ^3 \cdot (1.5 \cdot 10^{-7} m ^2 - 2.4 \cdot 10^{-8} H ^2 + 2.7 \cdot 10^{-9} \cdot H \cdot m)}{m^2 \cdot R2 \cdot t2} + \frac{(2.01 \cdot 10^{-8} H ^2 + 3.2 \cdot 10^{-6} m ^2) \cdot \sqrt{0.01 H ^2 + 1.6 m ^2}}{R3 \cdot t3}$
ตัวแปร ออกแบบ	รัศมีท่อ	R_1, R_2, R_3	$62.5 \text{ mm} \geq R1 \geq 10 \text{ mm}$ $62.5 \text{ mm} \geq R2 \geq 10 \text{ mm}$ $62.5 \text{ mm} \geq R3 \geq 10 \text{ mm}$

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขบังคับทางพฤติกรรมโครงสร้าง (ต่อ)

เงื่อนไข บังคับ	กลุ่มที่ พิจารณา	เงื่อนไข บังคับ	สมการเงื่อนไขในรูปตัวแปรออกแบบ
ตัวแปร ออกแบบ	ความหนา ท่อน	t_1, t_2, t_3	$4.5 \text{ mm} \geq t_1 \geq 2.3 \text{ mm}$ $4.5 \text{ mm} \geq t_2 \geq 2.3 \text{ mm}$ $4.5 \text{ mm} \geq t_3 \geq 2.3 \text{ mm}$
ตัวแปร ออกแบบ	ความสูง โครงถัก	H	$5 \text{ m} \geq H \geq 1.3 \text{ m}$

เมื่อ

 $P_{i\max}$ = แรงภายในสูงสุดของชิ้นส่วนโครงถัก $\sigma_{c\text{ allow}}$ = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ $\sigma_{t\text{ allow}}$ = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ r = รัศมีไจเรชั่นของชิ้นส่วนที่พิจารณา ; $r = \sqrt{\frac{R^2}{2}}$ และ L = ความยาวโครงถัก

จากนั้นสร้างฟังก์ชันสถานะบังคับ โดยนำตัวแปรออกแบบไปแทนในสมการ (3-5)
 กำหนดหาฟังก์ชันสถานะบังคับทางด้านน้ำหนักได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ฟังก์ชันสถานะบังคับทางด้านน้ำหนัก

ชิ้นส่วน	ฟังก์ชันสถานะบังคับทางด้านน้ำหนัก
คอร์ดบน	$150.0 \cdot \rho \cdot R1 \cdot t1 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}$
ค้ำยัน	$2.0 \cdot \rho \cdot (128.0 \cdot R2 \cdot t2 \cdot m + 75.0 \cdot R2 \cdot t2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + -0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2})$
คอร์ดล่าง	$150.0 \cdot \rho \cdot R3 \cdot t3 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}$

โดยที่

R_1 = รัศมีท่อเหล็กชั้นส่วนคอรัคบน

R_2 = รัศมีท่อเหล็กชั้นส่วนค้ำยัน

R_3 = รัศมีเหล็กท่อชั้นส่วนคอรัคล่าง

t_1 = ความหนาท่อเหล็กชั้นส่วนคอรัคบน

t_2 = ความหนาท่อเหล็กชั้นส่วนค้ำยัน

t_3 = ความหนาท่อเหล็กชั้นส่วนคอรัคล่าง

และ H = ความสูงโครงถัก

กำหนดค่า Guess Value , Constrains และฟังก์ชัน Solver ในฟังก์ชันสำเร็จรูป เพื่อทำการวิเคราะห์หาจุดต่ำสุด (Minimize) ของฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด ได้ผลลัพธ์ค่าตัวแปรออกแบบเหมาะสมดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์ค่าตัวแปรออกแบบเหมาะสมสุด

กลุ่มที่พิจารณา	ตัวแปรออกแบบ	ค่าเหมาะสมสุด	หน่วย
คอรัคบน	รัศมีท่อเหล็ก R_1	40.56	มิลลิเมตร
	ความหนาท่อเหล็ก t_1	4.5	มิลลิเมตร
ค้ำยัน	รัศมีท่อเหล็ก R_2	11.31	มิลลิเมตร
	ความหนาท่อเหล็ก t_2	3.87	มิลลิเมตร
คอรัคล่าง	รัศมีท่อเหล็ก R_3	40.53	มิลลิเมตร
	ความหนาท่อเหล็ก t_3	4.5	มิลลิเมตร
ความสูงโครงถัก	ความสูงท้อง H	1.64	เมตร
	ความสูงยอด H_{top}	3.56	เมตร

4.2 ผลวิเคราะห์รูปแบบเหมาะสมสุดสำหรับโครงถักหลังคาเหล็กที่ศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบหาค่าเหมาะสมสุดของโครงถักทั้ง 4 รูปแบบที่ศึกษา โดยใช้หลักการวิเคราะห์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งได้ผลลัพธ์การคำนวณดังภาคผนวก ข

เมื่อได้คำตอบเหมาะสมสุดของรัศมีและความหนาชิ้นส่วนแล้ว นำผลลัพธ์ที่ได้ไปเลือกขนาดหน้าตัดท่อเหล็กให้สอดคล้องตามตารางเหล็กรูปพรรณที่อ้างอิงและคำนวณหาน้ำหนักของโครงถักที่วิเคราะห์อีกครั้ง ทำการเปรียบเทียบขนาดหน้าตัด, ความยาวและน้ำหนักของกลุ่มชิ้นส่วนโครงถักที่พิจารณา ได้ผลเปรียบเทียบน้ำหนักเบาสุดของโครงถักดังต่อไปนี้

4.2.1 น้ำหนักเบาสุดของโครงถักรูปแบบมาตรฐาน

จากการทดลองออกแบบโครงถักที่มีขนาดและความสูงเท่ากันตามแบบมาตรฐานกรมพลศึกษาด้วยซอฟต์แวร์ Mathcad Prime โดยอ้างอิงมาตรฐานที่นำเสนอ ได้ผลการคำนวณขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเท่ากันกับแบบมาตรฐานกรมพลศึกษา

ในส่วนของการเปรียบเทียบน้ำหนักโครงถักหลังคาแบบมาตรฐานที่ออกแบบโดยมาตรฐานกรมพลศึกษาและวิธีหาค่าเหมาะสมสุดได้ผลเปรียบเทียบการออกแบบดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลเปรียบเทียบน้ำหนักเบาสุดและความสูงเหมาะสมสุดโครงถักมาตรฐาน

รูปแบบโครงถัก	วิธีการออกแบบ	ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วน สก.๕ ความหนา (มม.)			ความสูง (ม.)	น้ำหนักโครงถัก (กก.)
		คอร์ดบน	ค้ำยัน	คอร์ดล่าง		
โครงถักมาตรฐาน	มาตรฐานกรมพลศึกษา	114.3x3.8 มม. $A = 13.19 \text{ ซม.}^2$	76.3x3.0 มม. $A = 6.83 \text{ ซม.}^2$	114.3x3.8 มม. $A = 13.19 \text{ ซม.}^2$	6.50	1098.38
โครงถักมาตรฐาน	วิธีหาค่าเหมาะสมสุด	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	42.7x2.3 มม. $A = 2.92 \text{ ซม.}^2$	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	3.60	780.54

จากผลเปรียบเทียบการออกแบบโครงถักรูปแบบมาตรฐาน พบว่าน้ำหนักของโครงถักมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราความสูงต่อระยะแนวราบของโครงถักเข้าสู่จุดที่เหมาะสม

4.2.2 รูปแบบเหมาะสมสุดของโครงถักหลังคาหลัก 4 รูปแบบ

ทำการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมสุดของโครงถักหลังคาทั้ง 4 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบขนาดหน้าตัดชิ้นส่วน, น้ำหนักโครงถักและพิจารณาเลือกใช้ความสูงให้ง่ายต่อการตัดประกอบ แสดงได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลเปรียบเทียบน้ำหนักเบาสุดและความสูงเหมาะสมสุดของโครงถัก 4 รูปแบบ

รูปแบบ โครงถัก	ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วน ศก. x ความหนา (มม.)			ความ สูง (ม.)	น้ำหนัก โครงถัก (กก.)
	คอร์ดบน	ค้ำยัน	คอร์ดล่าง		
แพรตต์	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	42.7x2.3 มม. $A = 2.92 \text{ ซม.}^2$	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	3.60	780.54
โฮว์	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	42.7x2.5 มม. $A = 3.16 \text{ ซม.}^2$	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	3.20	808.74
พัต	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	42.7x2.5 มม. $A = 3.16 \text{ ซม.}^2$	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	3.25	757.13
ฟิงก์	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	42.7x2.3 มม. $A = 2.92 \text{ ซม.}^2$	114.3x3.5 มม. $A = 12.18 \text{ ซม.}^2$	4.70	784.74

4.3 การตัดเศษน้อยสุดของโครงถักหลังคาหลัก

การหาน้ำหนักเบาสุดของโครงถักในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการตัดเหล็กของชิ้นส่วนร่วมด้วย เนื่องจากในการก่อสร้างจริงนั้นต้องทำการวางแผนการตัดเหล็กเพื่อบริหารจัดการวัสดุและบริหารต้นทุนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม Cutting Optimization ช่วยในการจัดรูปแบบการตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กน้อยสุด โดยเลือกพิจารณาเหล็กรูปพรรณความยาวท่อนละ 6 เมตรและคิดจำนวนการตัดเหล็กโครงถักต่ออาคาร 1 หลังขนาด 30x50 เมตร ความยาวช่วงเสาช่วงละ 5 เมตร ทั้งหมด 10 ช่วง คิดเป็นจำนวน 11 โครงถัก ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.9 - 4.12

ตารางที่ 4.9 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบแปดตั้

ความยาว เหล็กต่อ (ม.)	ขนาดเหล็กต่อ	น้ำหนัก/ ม. (กก.)	ปริมาณ (ชิ้น)	ความยาว ชิ้นส่วน (ม.)	น้ำหนัก ชิ้นส่วน (กก.)	น้ำหนัก เศษ (กก.)
6.00	114.3x3.5 มม.	9.58	132	665.81	6378.44	1208.92
รวมเหล็กต่อขนาด 114.3x3.5 มม.				665.81	6378.44	1208.92
6.00	42.7x2.3 มม.	2.29	88	497.64	1139.60	69.52
6.00	42.7x2.3 มม.	2.29	95	449.73	1029.88	275.42
6.00	42.7x2.3 มม.	2.29	1	1.58	3.61	10.13
รวมเหล็กต่อขนาด 42.7x2.3 มม.				948.95	2173.09	355.07
รวมความยาวและน้ำหนักเหล็กต่อที่ใช้				1614.76	8551.53	1563.99

ตารางที่ 4.10 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบไฮว

ความยาว เหล็กต่อ (ม.)	ขนาดเหล็กต่อ	น้ำหนัก/ ม. (กก.)	ปริมาณ (ชิ้น)	ความยาว ชิ้นส่วน (ม.)	น้ำหนัก ชิ้นส่วน (กก.)	น้ำหนัก เศษ (กก.)
6.00	114.3x3.5 มม.	9.58	132	663.70	6358.21	1229.15
รวมเหล็กต่อขนาด 114.3x3.5 มม.				663.70	6358.21	1229.15
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	132	767.71	1903.93	87.92
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	51	241.43	586.76	233.73
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	1	1.58	3.91	16.01
รวมเหล็กต่อขนาด 42.7x2.5 มม.				1010.72	2506.60	337.66
รวมความยาวและน้ำหนักเหล็กต่อที่ใช้				1674.42	8864.80	1460.48

ตารางที่ 4.11 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบพัด

ความยาว เหล็กต่อ (ม.)	ขนาดเหล็กต่อ	น้ำหนัก/ ม. (กก.)	ปริมาณ (ชิ้น)	ความยาว ชิ้นส่วน (ม.)	น้ำหนัก ชิ้นส่วน (กก.)	น้ำหนัก เศษ (กก.)
6.00	114.3x3.5 มม.	9.58	132	664.22	6363.27	1225.36
รวมเหล็กต่อขนาด 114.3x3.5 มม.				664.22	6363.27	1225.36
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	66	391.18	970.13	11.95
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	33	191.53	475.0	16.04
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	40	189.36	469.61	125.59
6.00	42.7x2.5 มม.	2.48	1	1.58	3.91	10.97
รวมเหล็กต่อขนาด 42.7x2.5 มม.				773.65	1918.66	164.54
รวมความยาวและน้ำหนักเหล็กต่อที่ใช้				1437.88	8281.92	1389.90

ตารางที่ 4.12 การตัดชิ้นส่วนให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดของโครงถักรูปแบบฟิงก์

ความยาวต่อเหล็ก (ม.)	ขนาดเหล็กต่อ	น้ำหนัก/ม. (กก.)	ปริมาณ (ชิ้น)	ความยาวชิ้นส่วน (ม.)	น้ำหนักชิ้นส่วน (กก.)	น้ำหนักเศษ (กก.)
6.00	114.3x3.5 มม.	9.58	132	673.73	6454.31	1181.10
รวมเหล็กต่อขนาด 114.3x3.5 มม.				673.73	6454.31	1181.10
6.00	42.7x2.3 มม.	2.29	88	479.95	1401.46	140.30
6.00	42.7x2.3 มม.	2.29	95	449.73	1313.21	351.19
6.00	42.7x2.3 มม.	2.29	7	1.58	4.61	12.91
รวมเหล็กต่อขนาด 42.7x2.3 มม.				931.26	2719.28	504.40
รวมความยาวและน้ำหนักเหล็กต่อที่ใช้				1604.99	8586.90	1576.67

จากการเปรียบเทียบรูปแบบโครงถักเหมาะสมที่สุด น้ำหนักที่เบาสุดของโครงถักคือรูปแบบพัค รูปแบบเพรตต์, รูปแบบฟิงค์ และรูปแบบไฮวตามลำดับ โดยมีผลสรุปและข้อเสนอแนะในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาวิธีหาค่าเหมาะสมเพื่อใช้ออกแบบโครงถักหลังคาเหล็กรูปแบบเหมาะสมทางด้านน้ำหนักจำนวน 4 ตัวอย่าง ประกอบด้วยโครงถักรูปแบบเพรตต์ แบบไฮว แบบพัด และแบบฟิงก์ ซึ่งทำการออกแบบภายใต้เงื่อนไขบังคับทางพฤติกรรมโครงสร้างตามมาตรฐานวสท. 1015-14 ด้วยวิธีใช้หน่วยแรงงาน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Mathcad Prime 9 ในการวิเคราะห์คำตอบ ได้ผลการคำนวณที่แสดงให้เห็นถึงการปรับเปลี่ยนความสูงและแรงลัพท์ภายในเหมาะสมของโครงถักที่ส่งผลให้ขนาดชิ้นส่วนมีน้ำหนักที่เบาลง โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 รูปแบบเหมาะสมสำหรับโครงถักหลังคาเหล็กภายใต้ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัดทางด้านน้ำหนัก คือ โครงถักรูปแบบพัด โดยมีน้ำหนักโครงสร้างเบาสุดต่อการใช้ก่อสร้างอาคาร 1 หลัง คือ 9671.82 กิโลกรัม ตามมาด้วยรูปแบบเพรตต์ แบบฟิงก์ และแบบไฮว โดยมีน้ำหนักโครงถัก 10115.52, 10163.57 และ 10325.28 กิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ น้ำหนักเบาสุดที่คำนวณได้ จะแปรผันตรงกับความยาวรวมของชิ้นส่วนเป็นหลัก เนื่องมาจากการคำนวณหาค่าเหมาะสมทำให้แรงลัพท์ภายในของโครงถักแต่ละรูปแบบเข้าสู่ใกล้จุดต่ำสุดของฟังก์ชัน กล่าวคือ แรงลัพท์มีค่าเข้าใกล้หน่วยแรงที่ยอมให้มากที่สุดแล้ว จึงทำให้ขนาดหน้าตัดของกลุ่มชิ้นส่วนโครงถักที่พิจารณามีขนาดใกล้เคียงกัน

ด้านความสูงเหมาะสมของโครงถักรูปแบบพัด แบบเพรตต์ แบบฟิงก์ และแบบไฮว คือ 3.25, 3.60, 4.70 และ 3.20 เมตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนความยาวต่อความลึกอยู่ในช่วง 6.4 ถึง 9.4 โดยระดับความสูงที่คำนวณได้นั้น มีผลมาจากการเปลี่ยนมุมชิ้นส่วนของโครงถักแต่ละรูปแบบที่ทำให้เกิดแนวแรงลัพท์ภายในเหมาะสมที่ระดับความสูงนี้

โดยหลังจากพิจารณาการตัดเสนอย่อยสุดของชิ้นส่วนร่วมด้วย อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเสตน้ำหนักรวมของชิ้นส่วนของโครงถักทั้ง 4 รูปแบบอยู่ระหว่างร้อยละ 14.1-15.5 ซึ่งผลที่ต่างกันประมาณร้อยละ 1.4 ของอัตราส่วนดังกล่าว ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงถักที่มีน้ำหนักเบาสุด

5.1.2 เมื่อพิจารณาการออกแบบน้ำหนักรวมชิ้นส่วนโครงถักเบาสุดของโครงถักรูปแบบแปดคัตตามแบบมาตรฐานกรมพลศึกษา จะได้น้ำหนักรวมต่อโครงถัก 1 ชิ้นมีค่าเท่ากับ 780.54 กิโลกรัม ถ้าเปรียบเทียบโครงถักที่ออกแบบโดยมาตรฐานกรมพลศึกษาซึ่งมีน้ำหนัก 1098.38 กิโลกรัม จะพบว่าน้ำหนักโครงสร้างลดลงกว่าร้อยละ 29

โดยเหตุผลหลักที่ทำให้น้ำหนักโครงสร้างลดลงเนื่องมาจากการคำนวณหาค่าเหมาะสมสุดของค่าแรงดึงสูงสุดในกลุ่มชิ้นส่วนค้ำยันที่ปรับค่าแรงภายในจาก 10025 กิโลกรัม ลดลงเหลือ 4133 กิโลกรัม หรือลดลงประมาณร้อยละ 58.7 ของค่าแรงดึงสูงสุด ซึ่งค่าแรงลัพท์ที่ลดลงนั้น ทำให้การพิจารณาเลือกใช้ขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนค้ำยันมีขนาดเล็กลง และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ให้น้ำหนักของโครงถักเบาลงตามไปด้วย

จากผลสรุปข้างต้นจะเห็นได้ว่า แนวโน้มความสูงของโครงถักรูปแบบเหมาะสมสุดจะมีระดับที่ลดลง ซึ่งอาจเป็นประเด็นปัญหาของผู้ออกแบบที่มีจุดประสงค์ให้โครงถักหลังคา มีระดับความสูงเทียบเท่าระดับเดิม หรือมีระดับความสูงที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องด้วยเหตุผลทางด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม เช่น การเพิ่มพื้นที่ใช้สอยใต้หลังคา การระบายความร้อนที่ดี เป็นต้น ดังนั้น ถ้าผู้ออกแบบต้องการเลือกใช้โครงถักรูปแบบเหมาะสมสุดเพื่อให้น้ำหนักโครงสร้างเบาลง ผู้ออกแบบสามารถทำการเพิ่มความสูงของเสาอาคาร เพื่อยกระดับของโครงหลังคาขึ้นตามระดับที่ต้องการ

อย่างไรก็ตาม ผลสรุปที่ได้ดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์ของโครงข้อหมุนหลังคาหลักแบบช่วงเดียว ที่มีจุดรองรับปลายด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุน และอีกด้านหนึ่งเป็นแบบล้อเลื่อน โดยโครงถักรับแรงกระทำเฉพาะแนวตั้งเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยขอเสนอข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไปดังนี้

5.2.1 ควรทำการศึกษาโครงถักหลังคาแบบอื่นเพิ่มเติมโดยพิจารณาหลายๆ ช่วงความยาว เพื่อให้ได้รูปแบบโครงหลังคาที่เหมาะสมต่อช่วงความยาวที่ใช้งานมากที่สุด

5.2.2 สำหรับงานวิจัยที่ต้องการออกแบบโครงข้อหมุนประเภทอื่น เช่น โครงถักสะพาน โครงถักเสาไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้ในการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ โครงสร้างแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น สามารถนำหลักการในงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการศึกษาขั้นสูงต่อไป

บรรณานุกรม

- จิตาพร ชีวดีโสภณ. (2561). โครงสร้างพาดช่วงกว้างอาคารสนามกีฬาในร่ม สถาบันอุดมศึกษาในกำกับของรัฐ ในเขตกรุงเทพมหานคร. *สารศาสตร์*, 1(2), 150-167.
- คุลยโชติ ชลศึกษ์. (2552). การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นส่วนทางกล. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ปณัศชัย เชนฐ์โชติศักดิ์. (2548). การวิเคราะห์โครงข้อหมุนหลังคาโดยใช้แบบจำลองคาน Timoshenko. *วิศวกรรมสาร มข*, 32(6), 829-840.
- ปณัศชัย เชนฐ์โชติศักดิ์. (2554). การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข้อหมุนหลังคา. *วิศวกรรมสาร มข*, 38(1), 1-10.
- มงคล จิรวัชรเดช. (2543). ความสูงที่เหมาะสมในการออกแบบโครงหลังคาเหล็ก. *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 7(2), 149-153.
- ถ้าไพร มีทอง. (2552). การออกแบบโครงหลังคาเหล็กอย่างเหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีคำนวณเชิงพันธุกรรม (Master's thesis). สืบค้นจาก <https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/16808>
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (ม.ป.ป.). *ทฤษฎีโครงสร้าง*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สิทธิศักดิ์ อันสนั่น. (2563). การออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมด้วยเมตาฮีวิสติกอัลกอริทึม (Master's thesis). สืบค้นจาก <https://opac.msu.ac.th/home>
- สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์. (2532). การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักระนาบ (Master's thesis). สืบค้นจาก <https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/48827>
- ราชกิจจานุเบกษา. (2533). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง พ.ศ. 2533*. เล่ม 107 ตอนที่ 171 ประกาศใช้ 15 กันยายน 2533.
- Anum, B., Abubakar, J., Adeke, P., Sadiku, S., & Ufe, M. M. (2021). Size optimization of elastic steel trusses using Karush-Kuhn-Tucker conditions based on BS5950. *American Journal of Engineering, Science and Technology*, 11, 86-99.
- Ganesh, S. M. (2017). Cost optimization of a tubular steel truss using limit state method of design. *Journal of Engineering Research and Application*, 7(5), 29-32. doi:10.9790/9622-0705012932.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- James, M. F. (1993). *Industrial buildings roofs to column anchorage*. Wisconsin: American Institute of Steel Construction, Inc.
- Meriam, J. L., Kraige, L. G., & Bolton, J. N. (2017). *Engineering Mechanics: Statics*. NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Richard, F., & Yoyong, A. (2014). Sizing shape and topology optimizations of roof trusses using hybrid genetic algorithms. *Procedia Engineering*, 95, 185-195. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.178.
- Sanjeev, K., Brahmjeet, S., & Bhupinder, S. (2016). Optimization of roof truss using staad pro v8i. *International Journal of Recent Research Aspects*, 3(1), 86-90.
- Upendra, P., & Vivek, G. (2015). Design optimization and rationalization of truss design. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(5), 624-636.
- Vikas, K., Abinash, G., Hemant, S., Roshan, G., & Sarupya D. (2020). Optimal topologies of roof trusses by staad pro. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 9(1), 12893-12901.



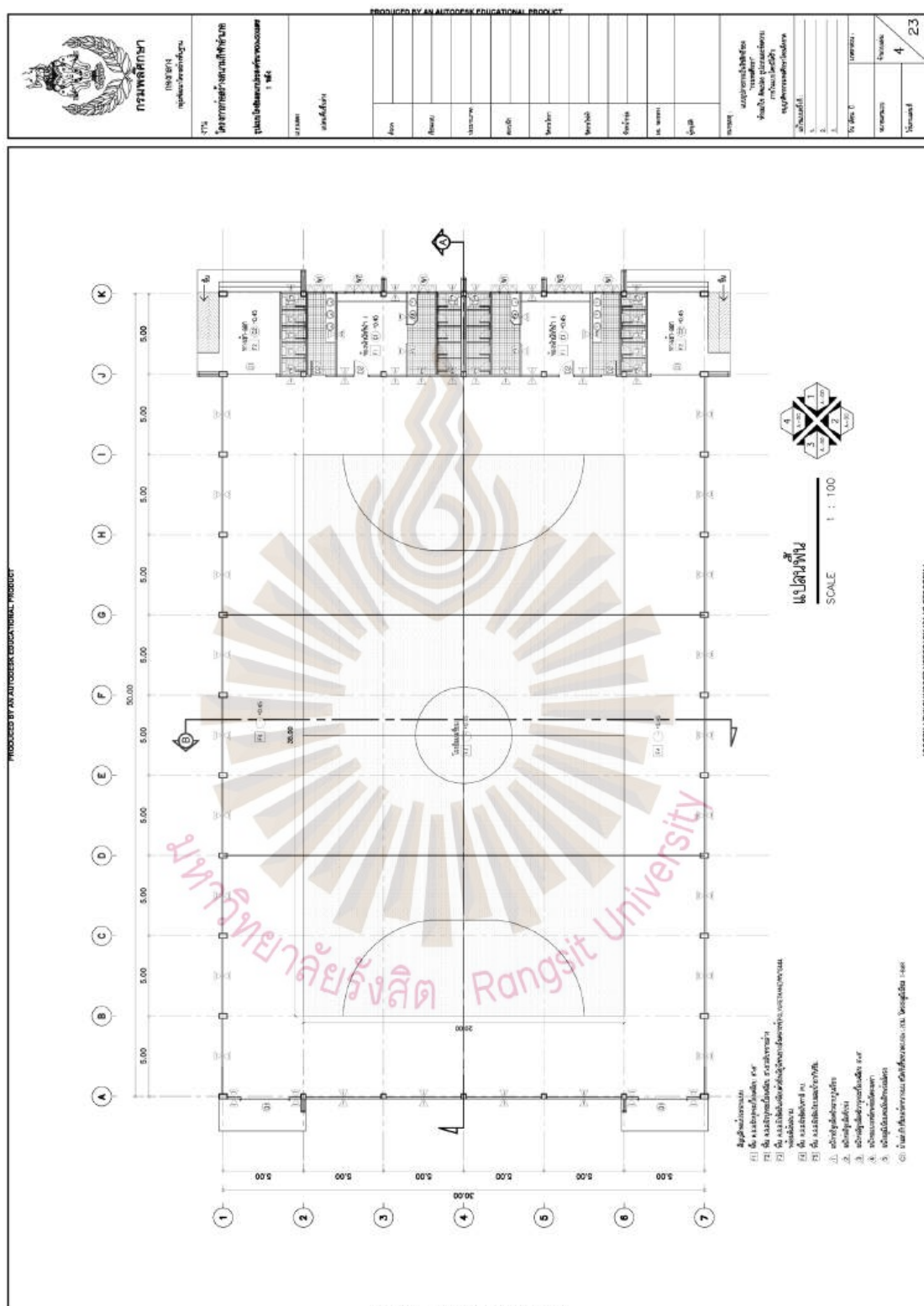
The image features a large, faint watermark of the Rangsit University logo in the background. The logo is a circular emblem with a stylized flame or sunburst at the top, radiating lines around the perimeter, and the university's name in Thai and English at the bottom.

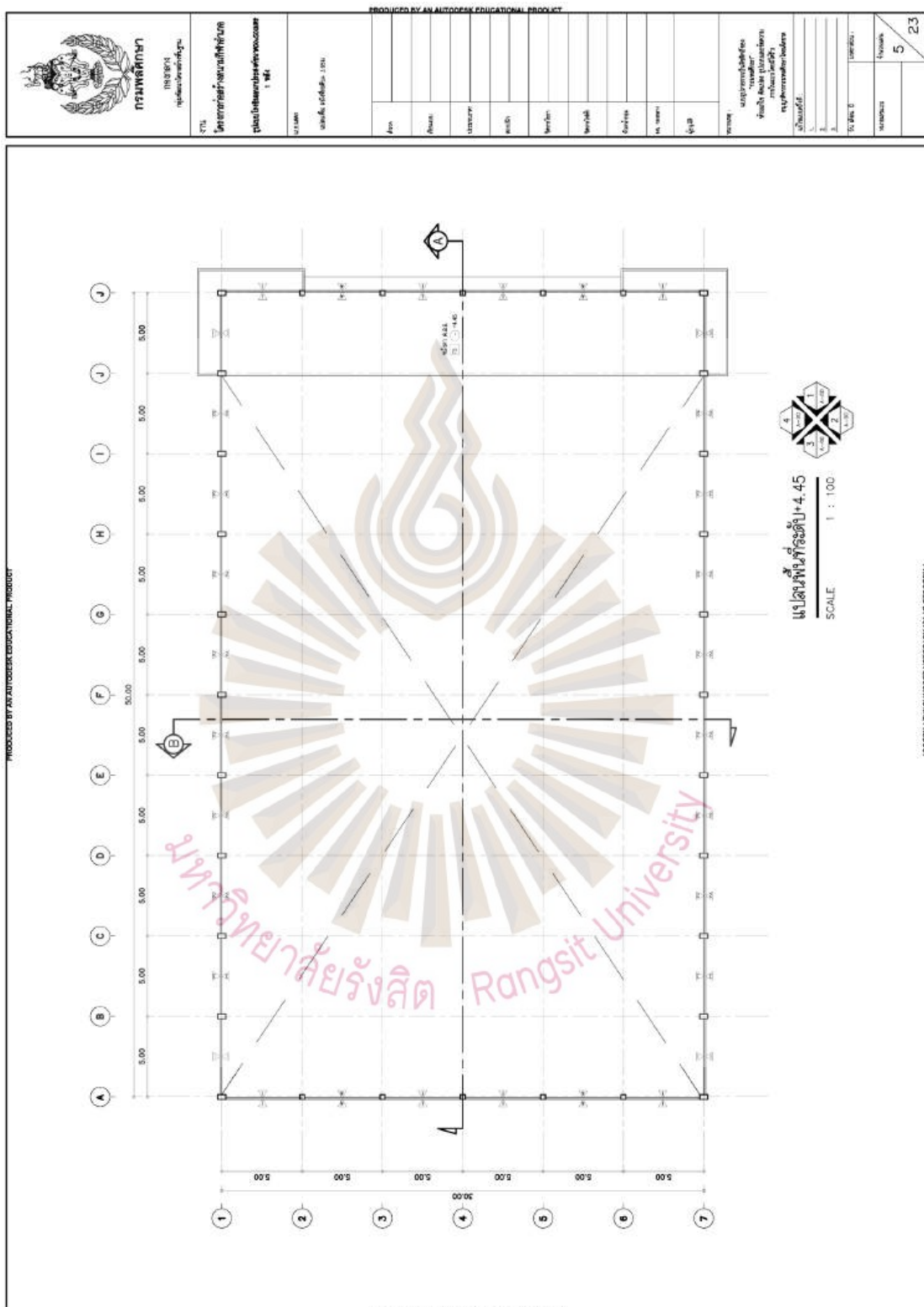
ภาคผนวก ก

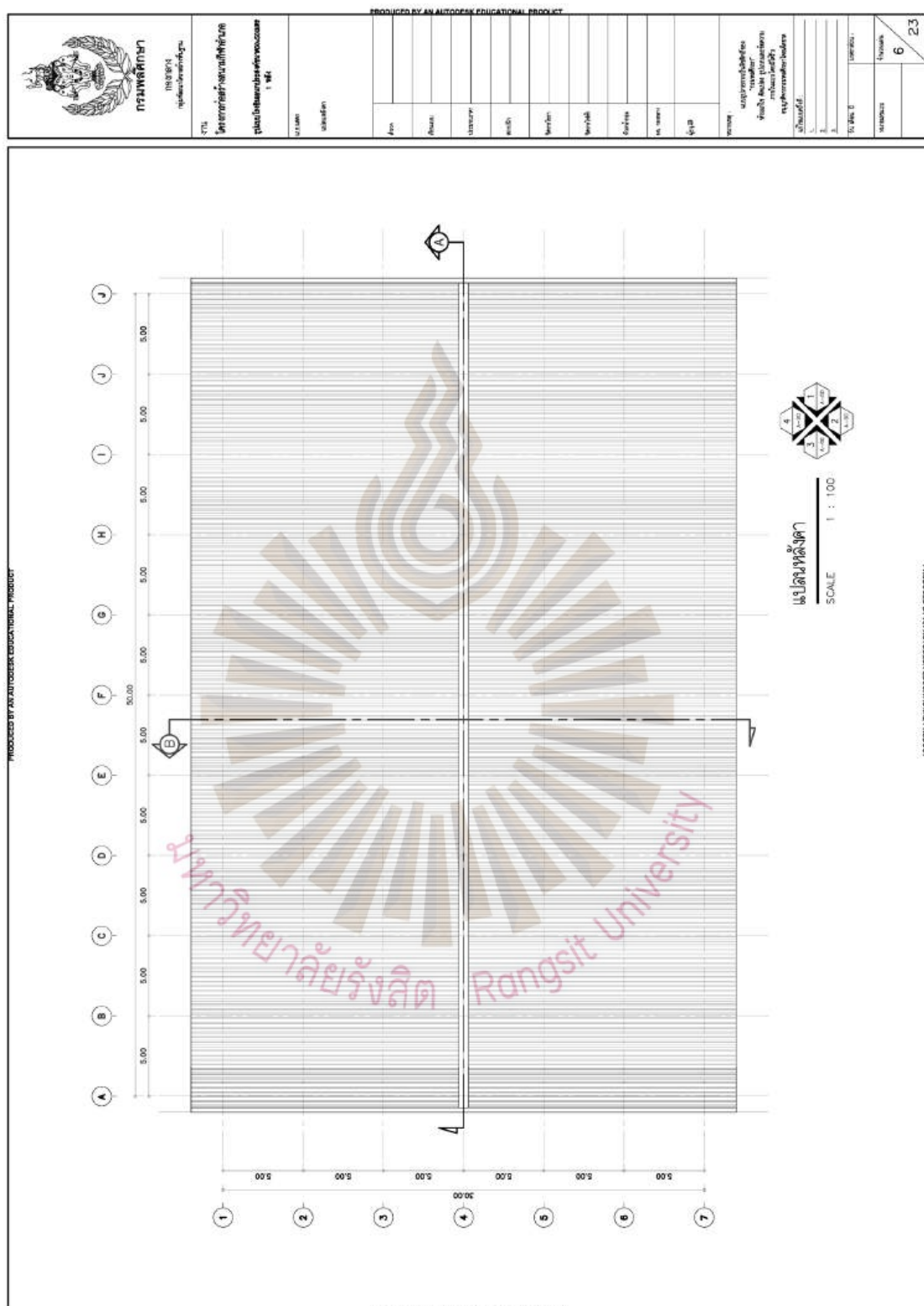
แบบมาตรฐานโรงยิมอเนกประสงค์กรมพลศึกษา

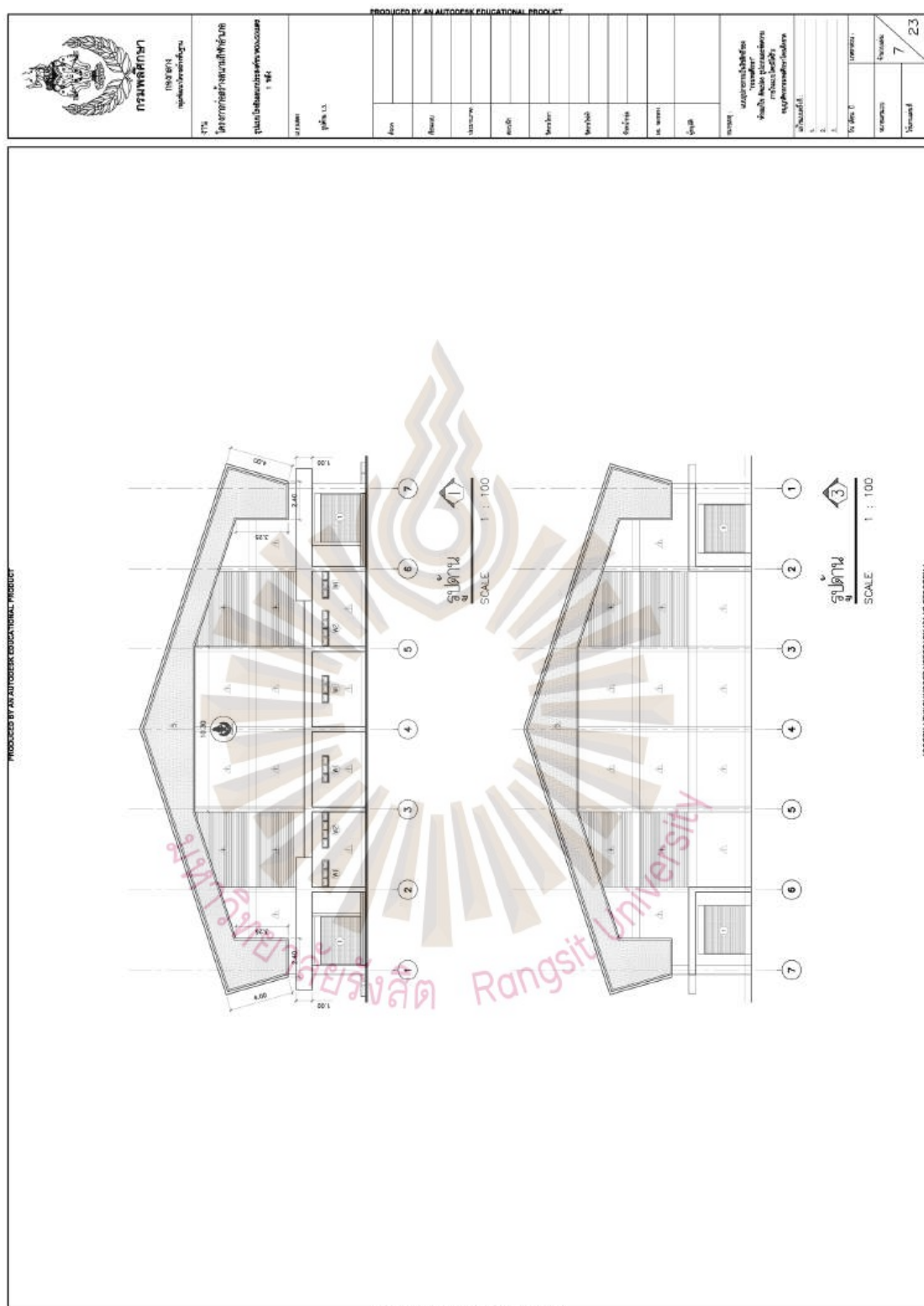
มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University

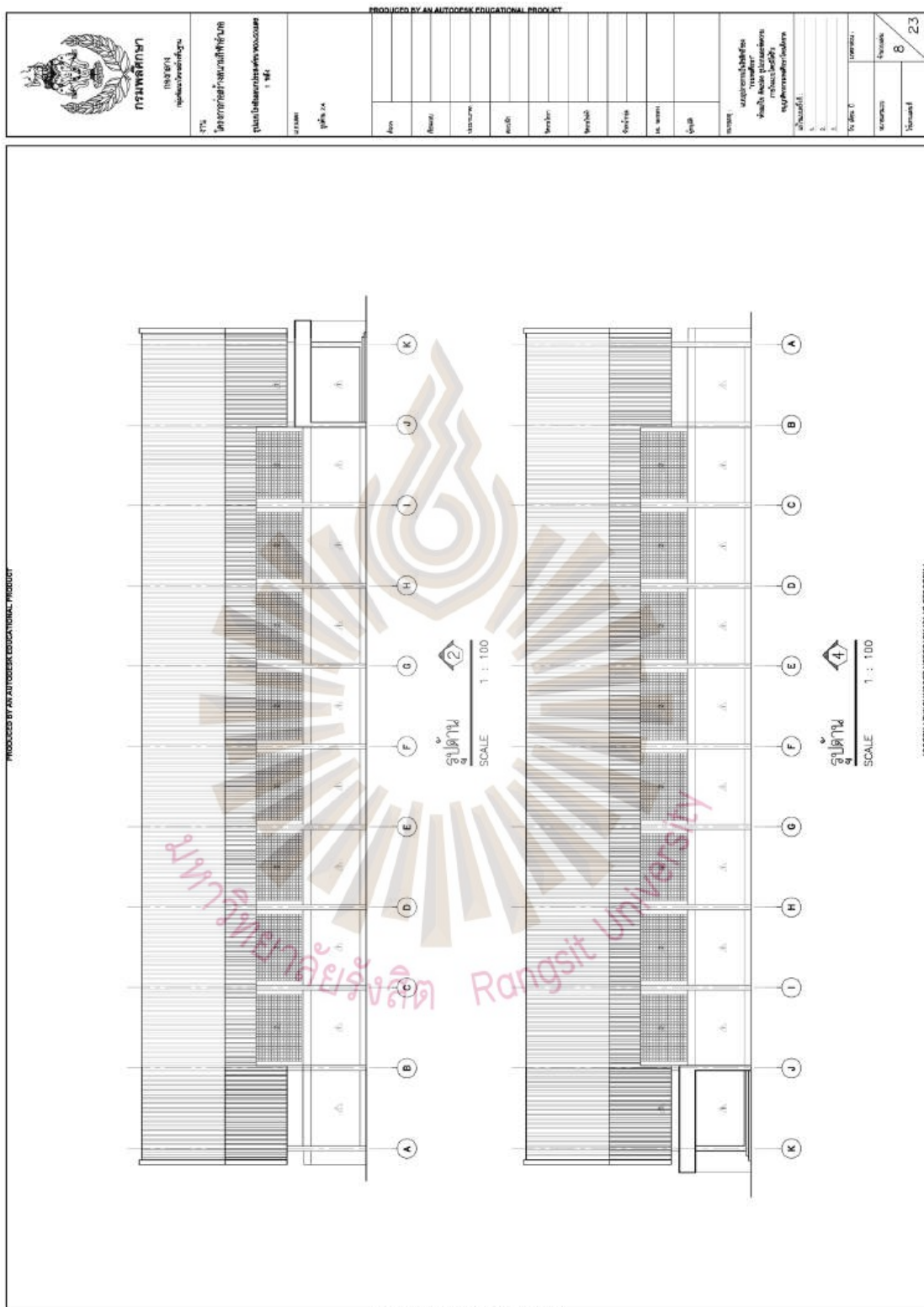
สำหรับแบบ		แบบร่าง	วันที่	แผ่นที่
แผ่นที่	แบบร่าง		23/23	แบบร่าง
1/23	การวัดแบบ			
2/23	แบบร่างแบบ			
3/23	แบบร่างแบบ			
4/23	แบบร่างแบบ			
5/23	แบบร่างแบบ			
6/23	แบบร่างแบบ			
7/23	แบบร่างแบบ			
8/23	แบบร่างแบบ			
9/23	แบบร่างแบบ			
10/23	แบบร่างแบบ			
11/23	แบบร่างแบบ			
12/23	แบบร่างแบบ			
13/23	แบบร่างแบบ			
14/23	แบบร่างแบบ			
15/23	แบบร่างแบบ			
16/23	แบบร่างแบบ			
17/23	แบบร่างแบบ			
18/23	แบบร่างแบบ			
19/23	แบบร่างแบบ			
20/23	แบบร่างแบบ			
21/23	แบบร่างแบบ			
22/23	แบบร่างแบบ			

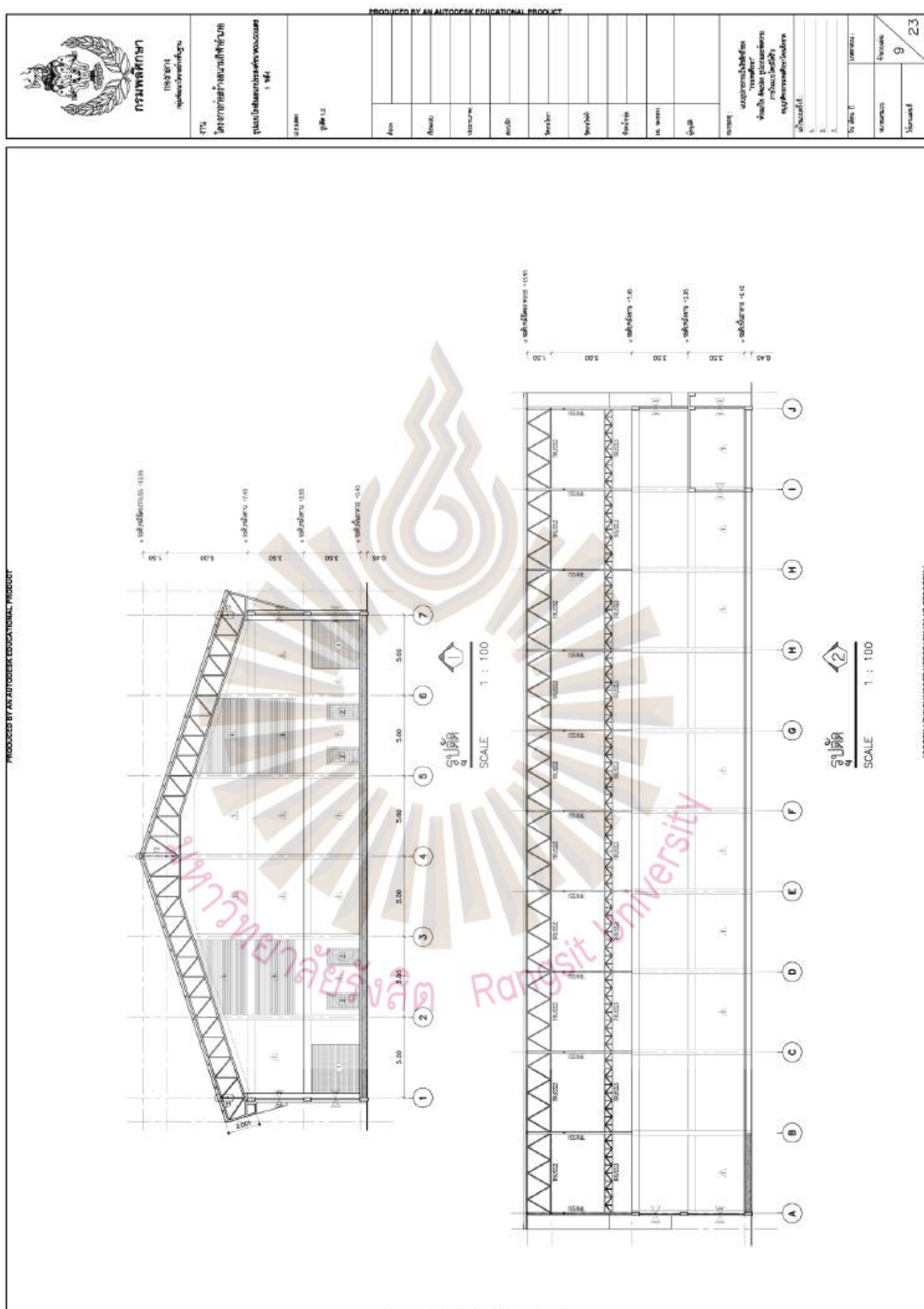


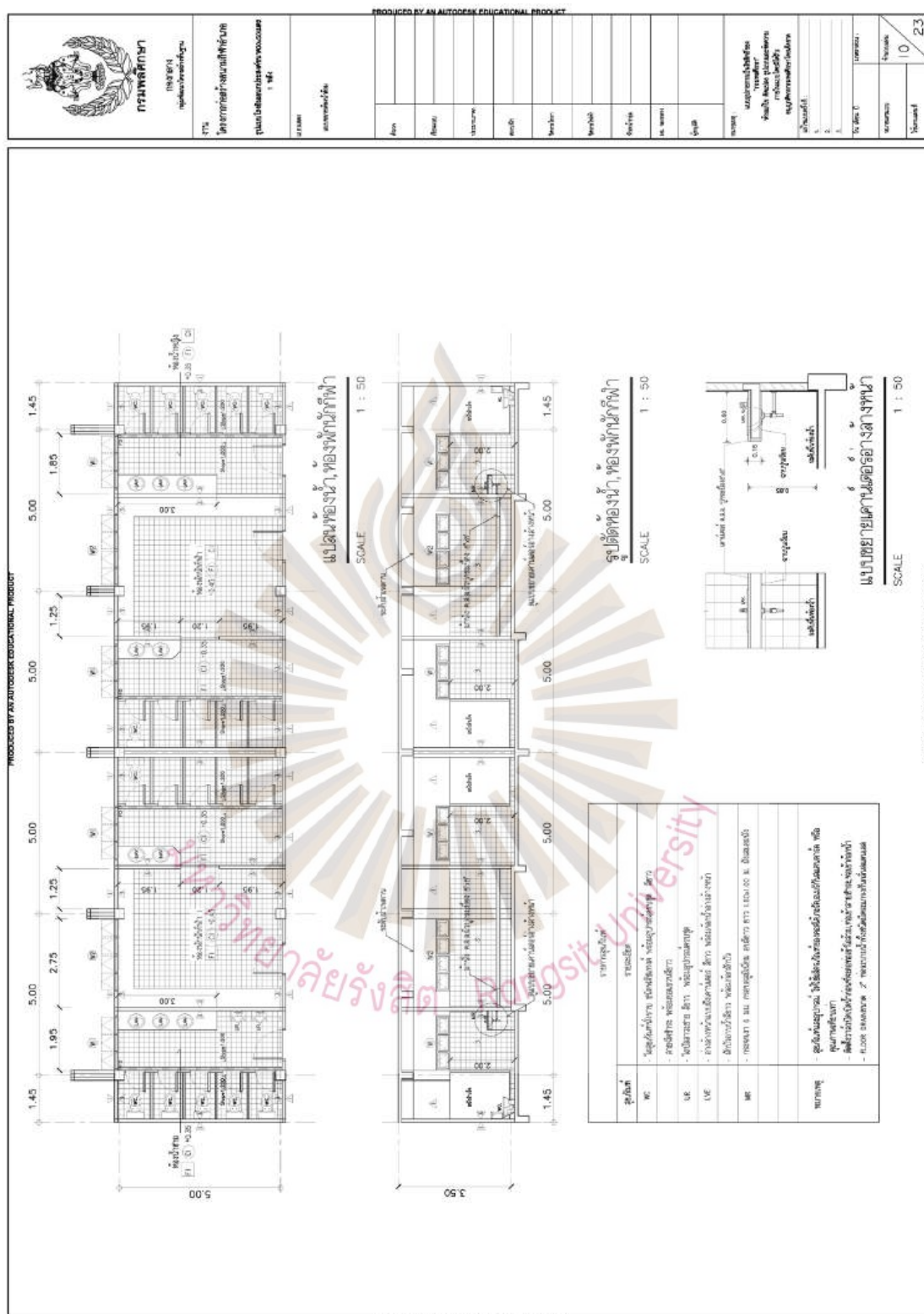


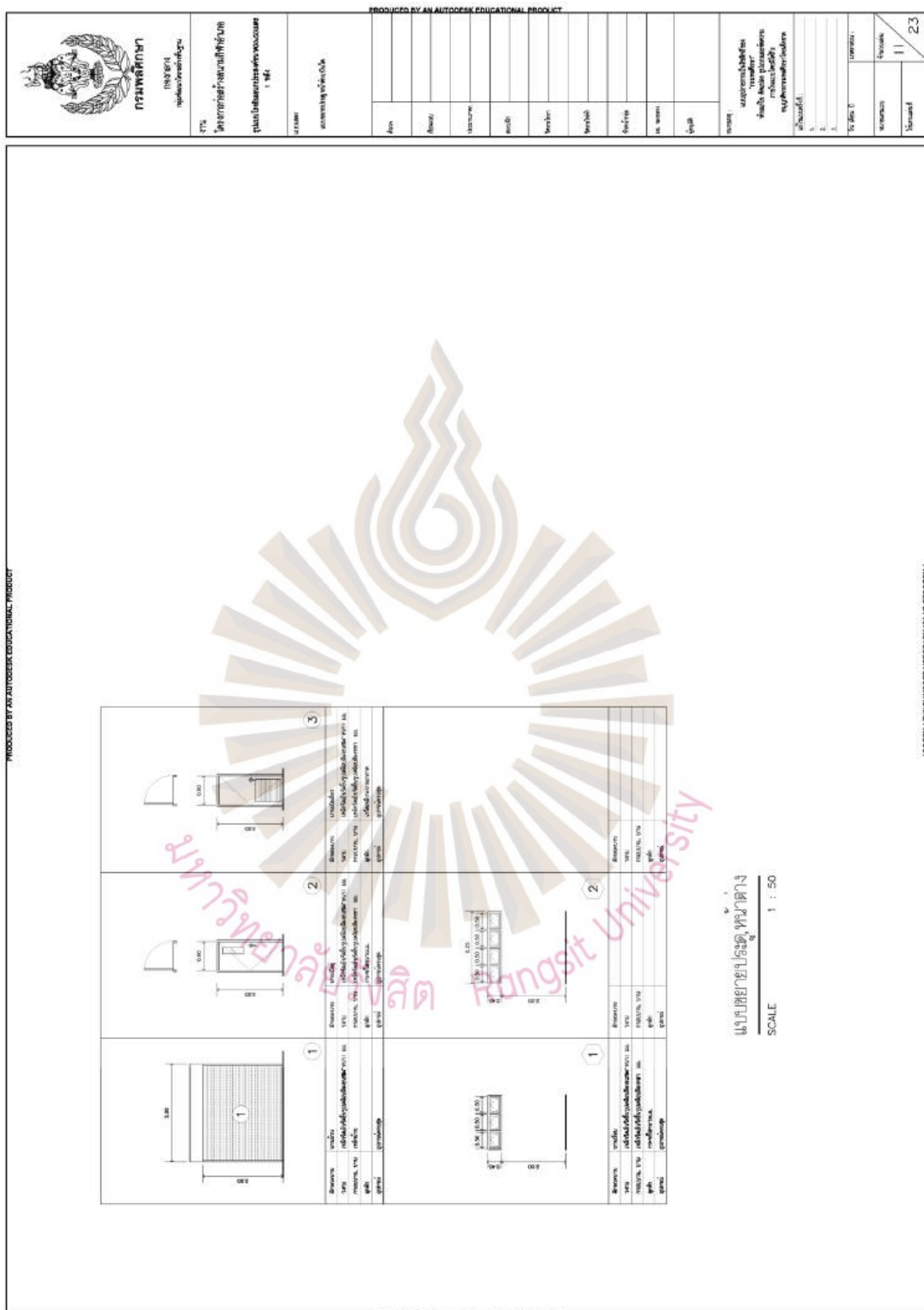


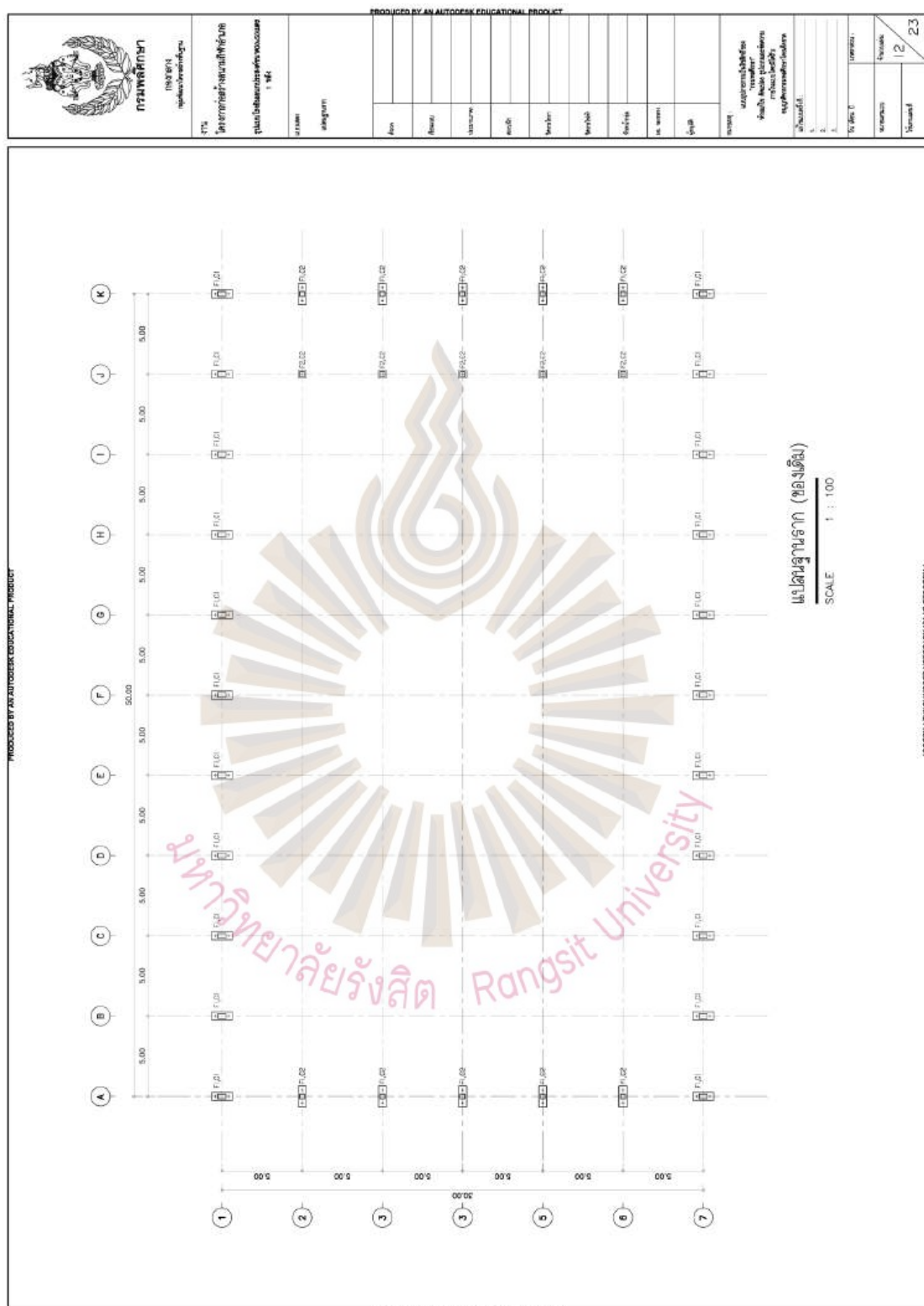


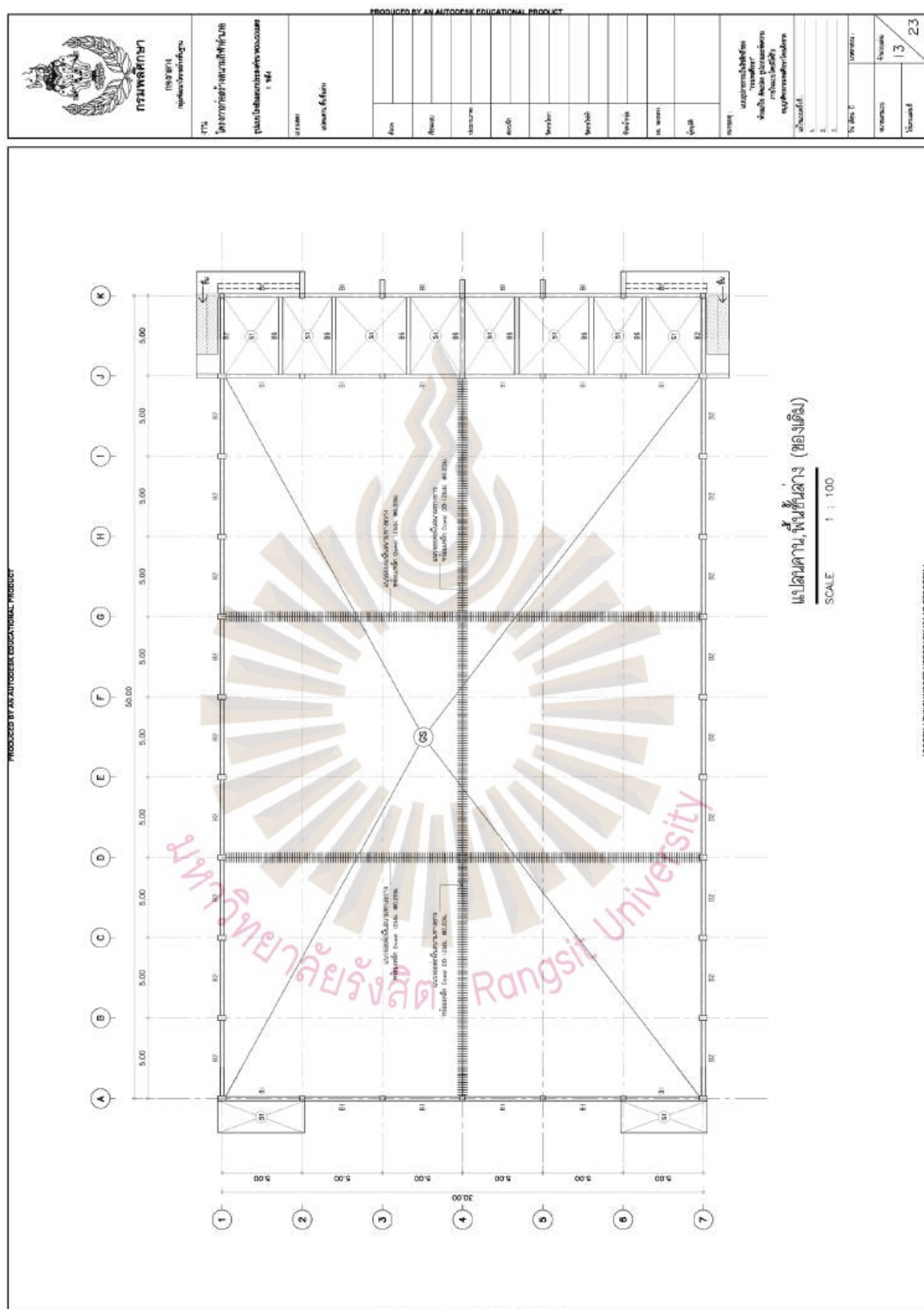


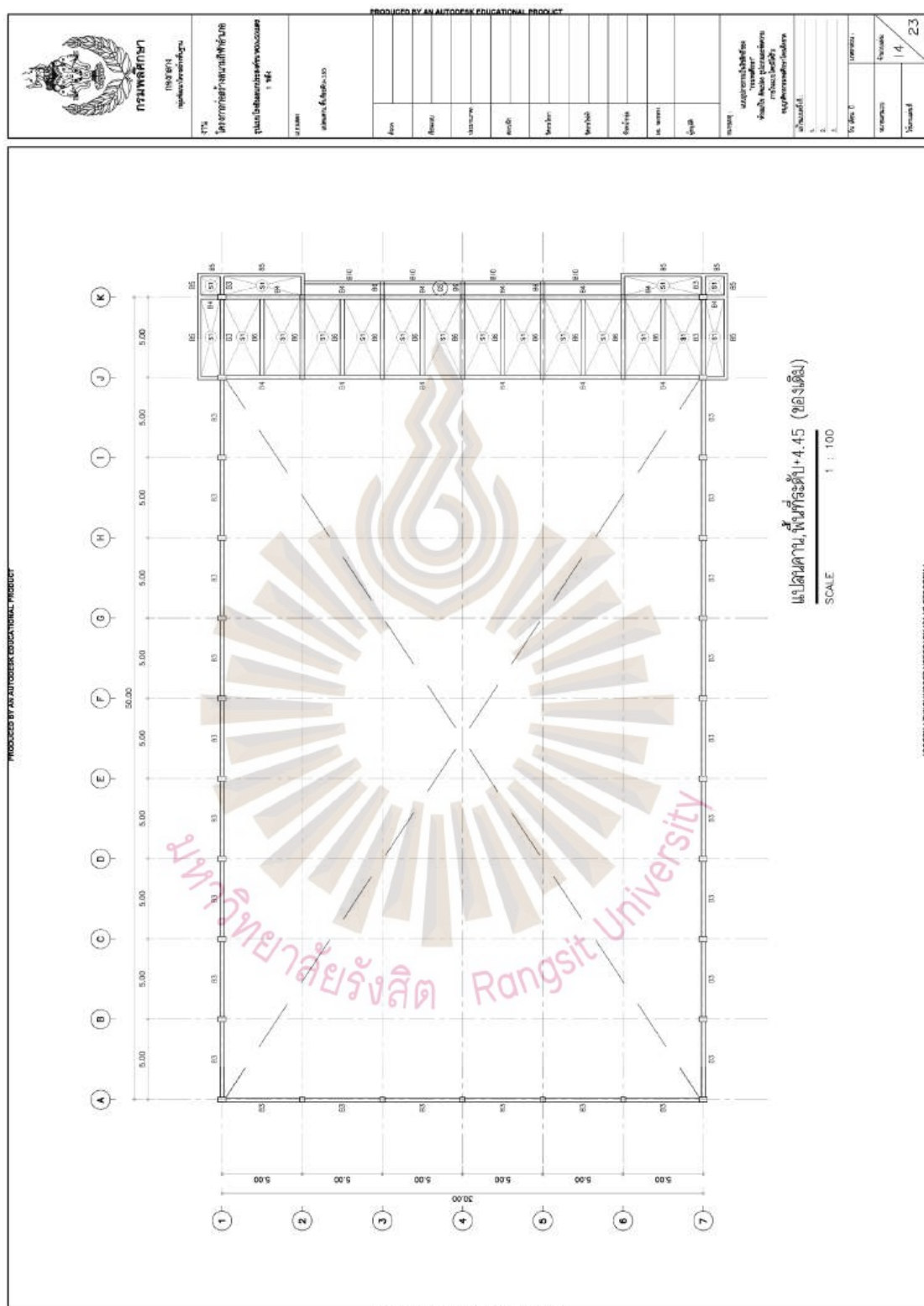


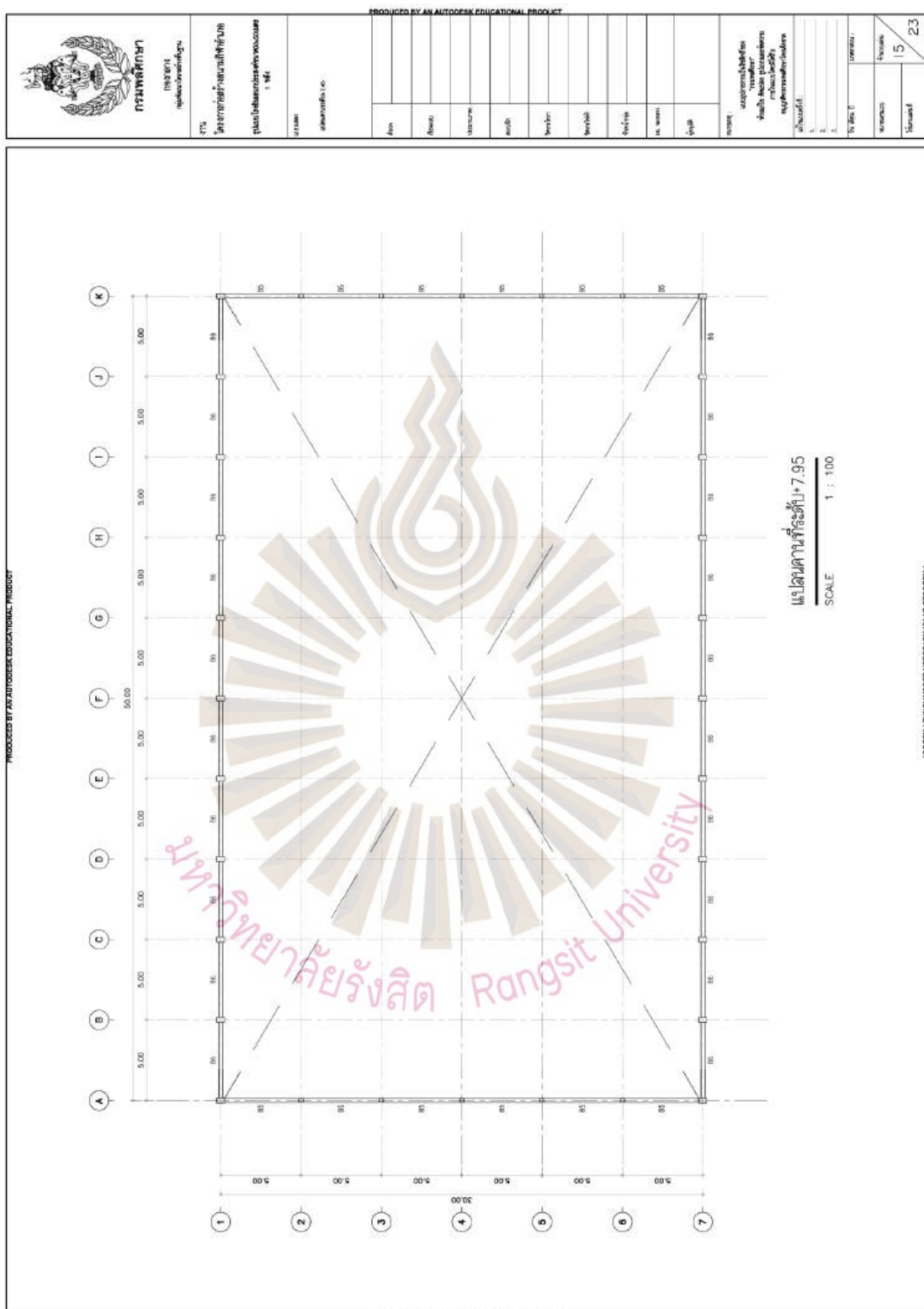


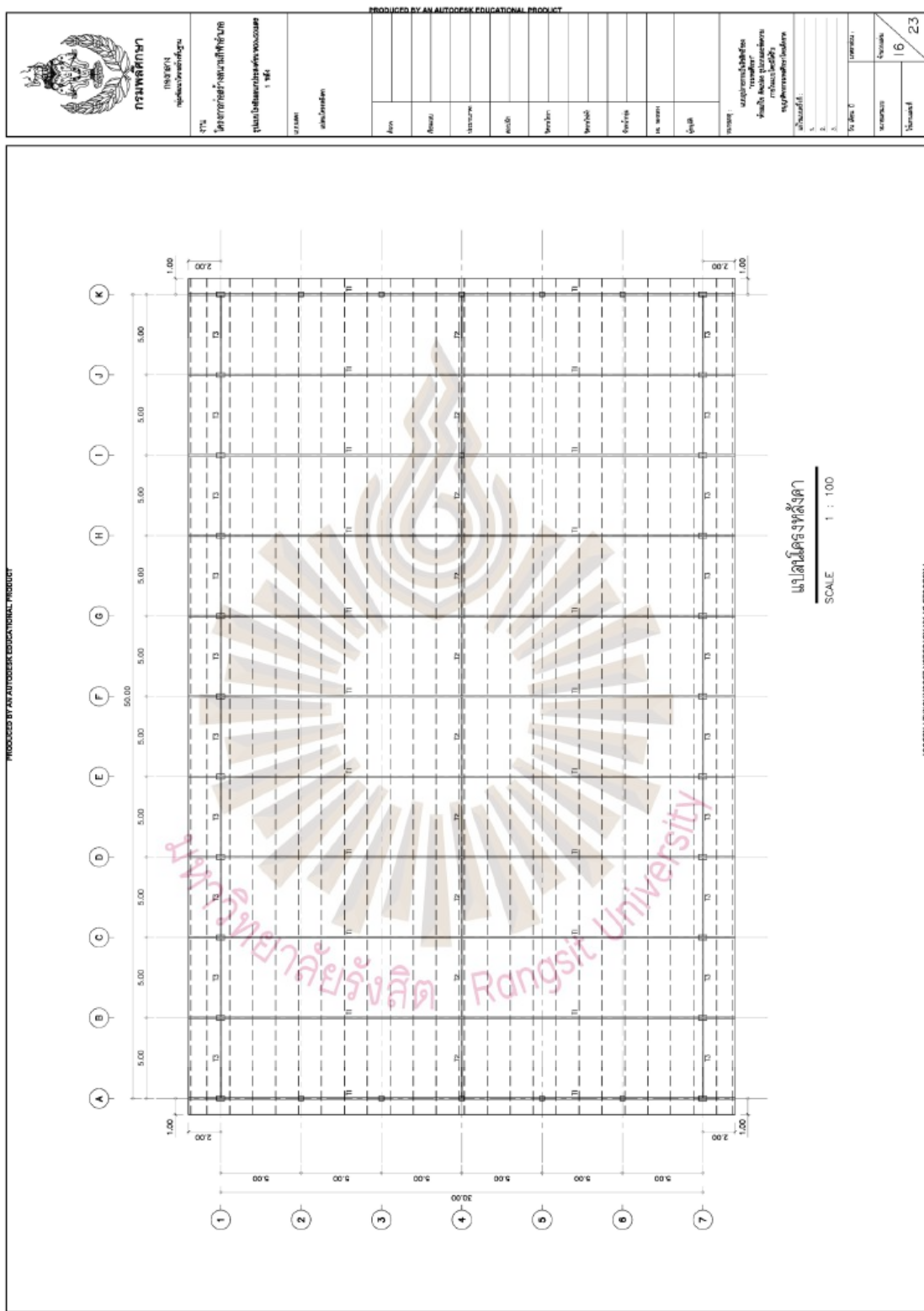












[illegible]

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

47%

วิทยาลัยราชภัฏนครพนม

Rajabhat Nakhon Phanom University

186

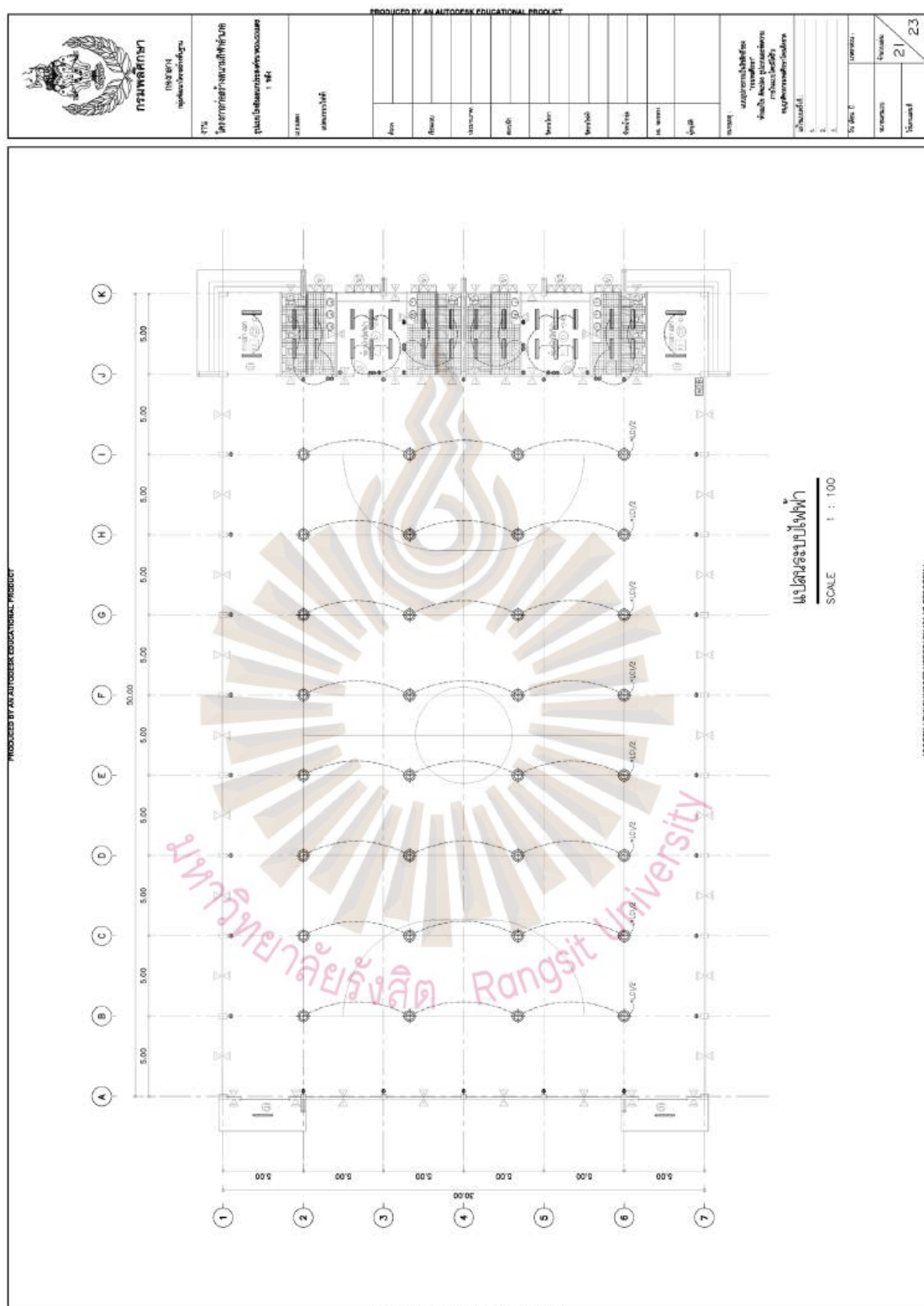
186

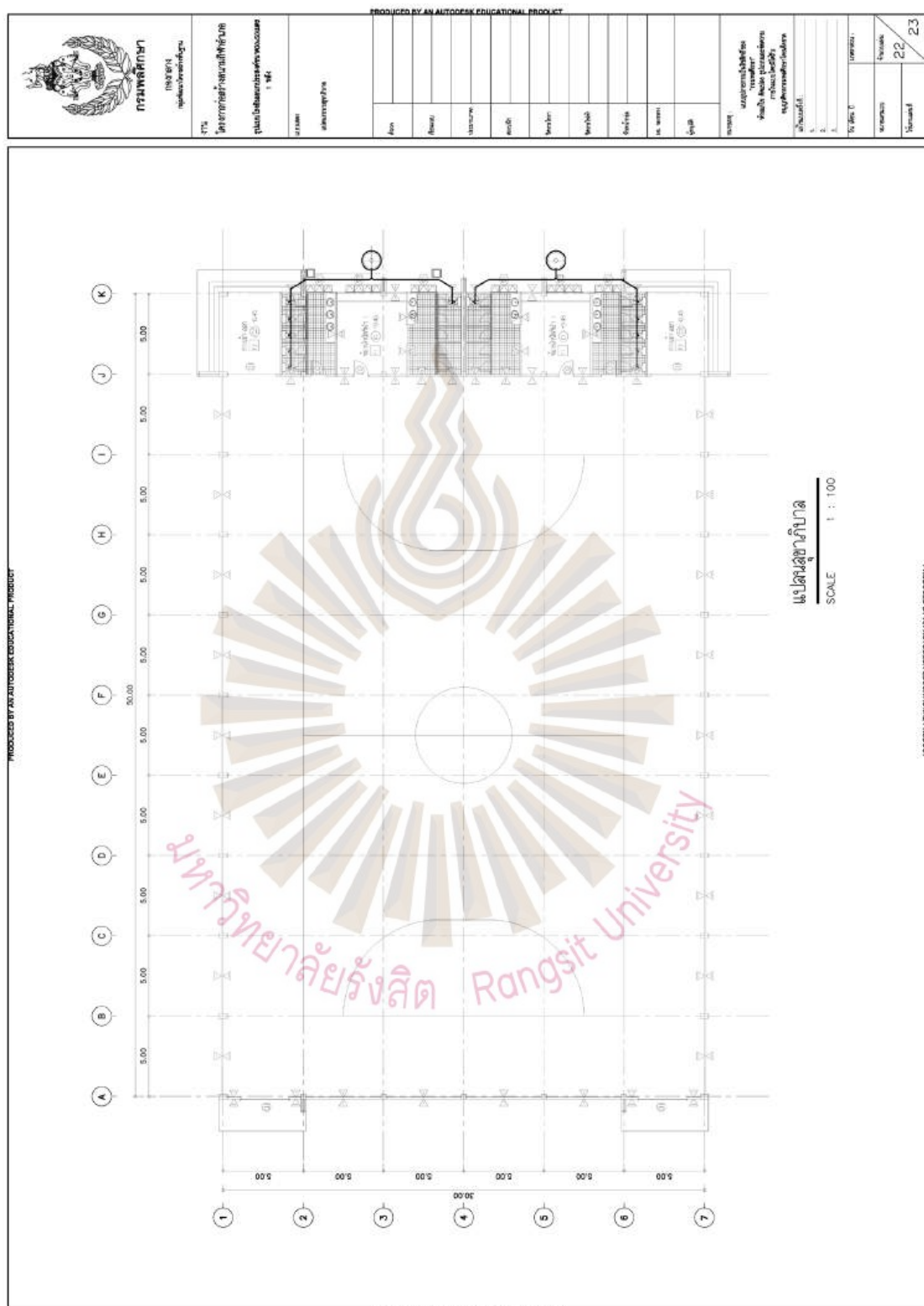
186

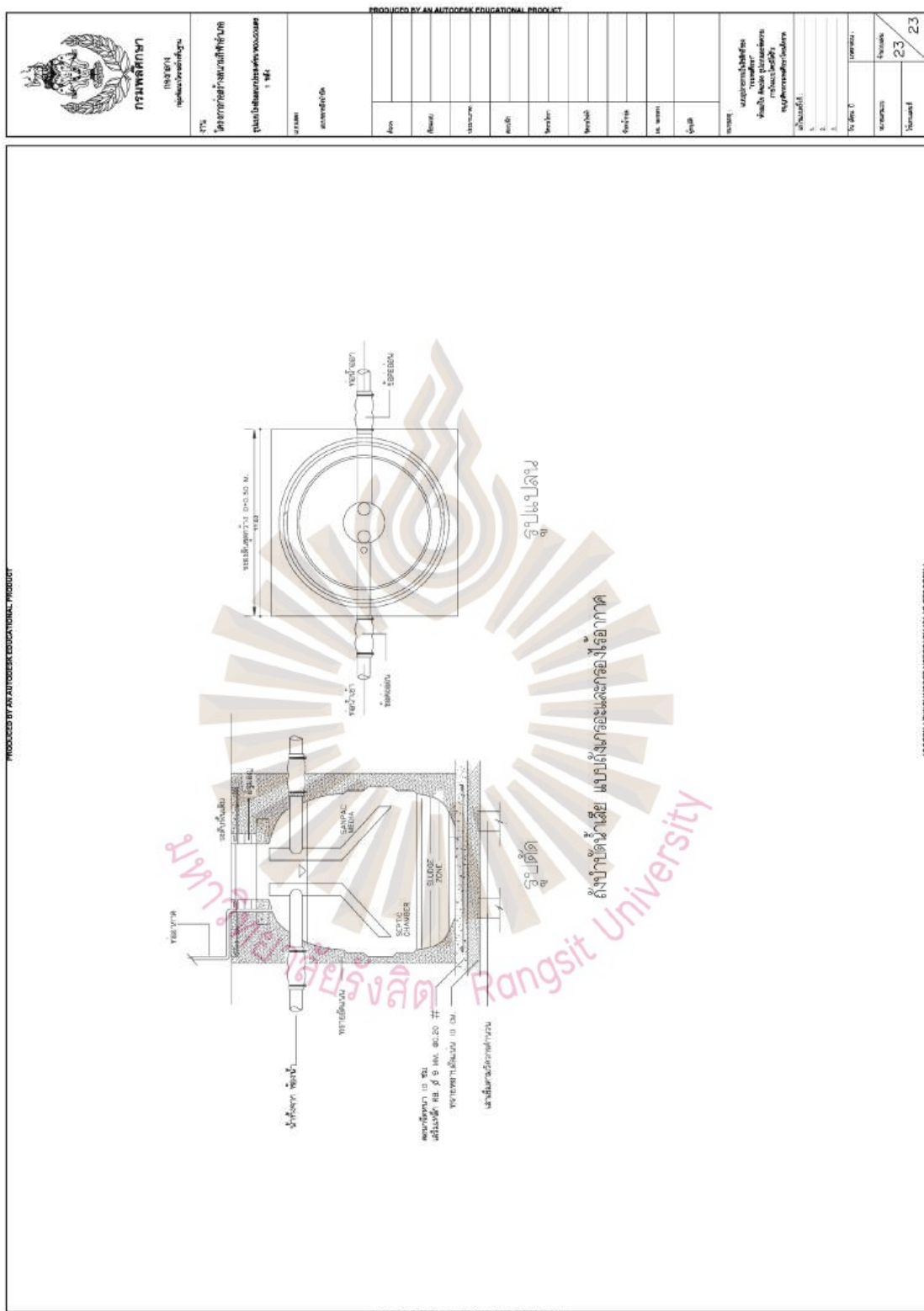
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

B1				B2				B3						
SYMBOL	POSITION	OUT END	CENTER	IN END	SYMBOL	POSITION	OUT END	CENTER	IN END	SYMBOL	POSITION	OUT END	CENTER	IN END
SECTION														
	TOP BAR	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
	CENTER BAR	-	-	-	CENTER BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	CENTER BAR	-	-	-	-
	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
SECTION														
	TOP BAR	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
	CENTER BAR	-	-	-	CENTER BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	CENTER BAR	-	-	-	-
	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
SECTION														
	TOP BAR	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
	CENTER BAR	-	-	-	CENTER BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	CENTER BAR	-	-	-	-
	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
SECTION														
	TOP BAR	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
	CENTER BAR	-	-	-	CENTER BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	CENTER BAR	-	-	-	-
	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	BOTTOM BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
SECTION														
	TOP BAR	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	TOP BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-
	CENTER BAR	-	-	-	CENTER BAR	2-0825	2-0825	2-0825	-	C				

[illegible]







ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณแรงลัพธ์ภายในและเงื่อนไขการแอ่นตัว

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University

ตารางภาคผนวก ข 1. ค่าแรงลัพธ์ภายในของชิ้นส่วนโครงถักรูปแบบแปดคัต

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน
F1	$-6250.0 \cdot kg $	F26	$\frac{18720.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F2	$\frac{3640.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F27	$\frac{18720.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F3	$\frac{3640.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m }}{ m }$	F28	$\frac{17140.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F4	0	F29	$-2714.0 \cdot kg $
F5	$-5745.0 \cdot kg $	F30	$\frac{18720.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F6	$\frac{6960.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F31	$\frac{1400.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m }}{ m }$
F7	$\frac{3320.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m }}{ m }$	F32	$\frac{18820.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F8	$\frac{6960.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F33	$-2209.0 \cdot kg $
F9	$-5240.0 \cdot kg $	F34	$\frac{21180.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F10	$\frac{9940.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F35	$\frac{1080.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m }}{ m }$
F11	$\frac{3000.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m }}{ m }$	F36	$\frac{20200.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F12	$\frac{9960.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F37	$-1704.0 \cdot kg $
F13	$-4735.0 \cdot kg $	F38	$\frac{21946.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน
F14	$\frac{12580.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F39	$\frac{763.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F15	$\frac{2680.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F40	$\frac{21280.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F16	$\frac{9960.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F41	$-1204.0 \cdot kg $
F17	$-4230.0 \cdot kg $	F42	$\frac{22346.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F18	$\frac{14930.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F43	$\frac{446.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F19	$\frac{2360.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F44	$\frac{22063.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F20	$\frac{12680.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F45	$-703.0 \cdot kg $
F21	$-3725.0 \cdot kg $	F46	$\frac{22479.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F22	$\frac{16993.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F47	$\frac{128.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F23	$\frac{2040.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F48	$\frac{22546.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F24	$\frac{15060.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F49	$\frac{ kg \cdot (403.0 \cdot m - 4535.0 \cdot H)}{ m }$
F25	$-3219.0 \cdot kg $		

ตารางภาคผนวก ข 2. ค่าแรงลัพท์ภายในของชิ้นส่วนโครงถักรูปแบบไฮว

แรง ลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน
F1	$-300.0 \cdot kg $	F15	$\frac{1590.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F2	0	F16	$\frac{7492.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F3	$\frac{2160.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F17	$2240.0 \cdot kg $
F4	$\frac{2160.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F18	$\frac{7500.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F5	$3160.0 \cdot kg $	F19	$\frac{1400.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F6	$\frac{2160.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F20	$\frac{8890.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F7	$\frac{1970.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F21	$1940.0 \cdot kg $
F8	$\frac{4130.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F22	$\frac{8900.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F9	$2850.0 \cdot kg $	F23	$\frac{1210.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F10	$\frac{4130.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F24	$\frac{10110.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F11	$\frac{1780.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F25	$1640.0 \cdot kg $
F12	$\frac{5900.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F26	$\frac{10110.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F13	$2550.0 \cdot kg $	F27	$\frac{1020.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน
F14	$\frac{5910.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F28	$\frac{11120.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F29	$1330.0 \cdot kg $	F40	$\frac{12955.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F30	$\frac{11120.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F41	$430.0 \cdot kg $
F31	$\frac{831.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F42	$\frac{12956.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F32	$\frac{11930.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F43	$\frac{268.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F33	$1030.0 \cdot kg $	F44	$\frac{13223.75 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F34	$\frac{11931.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F45	$128.0 \cdot kg $
F35	$\frac{644.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F46	$\frac{13268.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F36	$\frac{12540.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F47	$\frac{80.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F37	$730.0 \cdot kg $	F48	$\frac{13280.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F38	$\frac{12544.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F49	$\frac{ kg \cdot (2666.0 \cdot H - 44.0 \cdot m)}{ m }$
F39	$\frac{456.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$		

ตารางภาคผนวก ข 3. ค่าแรงลัพท์ภายในของชิ้นส่วนโครงถึกรูปแบบพัด

แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน
F1	$300.0 \cdot kg $	F15	$\frac{1393.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F2	0	F16	$\frac{4438.0 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{ m }$
F3	$\frac{2156.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F17	$\frac{10043.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F4	$\frac{1078.0 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{ m }$	F18	$\frac{1203.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F5	$\frac{4125.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F19	$300.0 \cdot kg $
F6	$\frac{1963.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F20	$\frac{10043.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F7	$300.0 \cdot kg $	F21	$\frac{1013.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F8	$\frac{4125.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F22	$\frac{5558.0 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{ m }$
F9	$\frac{1773.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F23	$\frac{11833.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F10	$\frac{2945.0 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{ m }$	F24	$\frac{823.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F11	$\frac{7473.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F25	$300.0 \cdot kg $
F12	$\frac{1583.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F26	$\frac{11833.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F13	$300.0 \cdot kg $	F27	$\frac{636.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน
F14	$\frac{7473.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F28	$\frac{6278.0 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{ m }$
F29	$\frac{12883.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F34	$\frac{6628.0 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{ m }$
F30	$\frac{448.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F35	$\frac{13233.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F31	$300.0 \cdot kg $	F36	$\frac{74.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F32	$\frac{12883.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F37	$\frac{1.0 \cdot kg \cdot (2634.0 \cdot H + 236.0 \cdot m)}{ m }$
F33	$\frac{261.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$		

ตารางภาคผนวก ข 4. ค่าแรงลัพท์ภายในของชิ้นส่วนโครงถึกรูปแบบฟังกั

แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์ภายใน
F1	$3750.0 \cdot kg $	F15	$\frac{1595.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F2	$\frac{1080.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F16	$\frac{5910.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F3	$\frac{2156.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F17	$\frac{1590.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F4	0	F18	$\frac{8221.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F5	$\frac{2156.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F19	$\frac{1403.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F6	$\frac{3141.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F20	$\frac{7500.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F7	$\frac{1969.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F21	$\frac{1403.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F8	$\frac{2156.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F22	$\frac{9533.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F9	$\frac{1969.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F23	$\frac{1213.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F10	$\frac{5026.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F24	$\frac{8900.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F11	$\frac{1782.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F25	$\frac{1213.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F12	$\frac{4130.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F26	$\frac{10643.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F13	$\frac{1782.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F27	$\frac{1023.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์ภายใน
F14	$\frac{6713.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F28	$\frac{10110.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F29	$\frac{1020.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F40	$\frac{12546.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F30	$\frac{11576.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F41	$\frac{459.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F31	$\frac{833.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F42	$\frac{13241.25 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F32	$\frac{11120.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F43	$\frac{271.5 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F33	$\frac{833.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F44	$\frac{12959.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F34	$\frac{12313.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F45	$\frac{271.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F35	$\frac{646.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F46	$\frac{13426.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F36	$\frac{11933.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F47	$\frac{84.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$
F37	$\frac{646.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$	F48	$\frac{13221.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$
F38	$\frac{12876.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{ m }$	F49	$\frac{ kg \cdot (3000.0 \cdot m - 26840.0 \cdot H) \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{ m \cdot (H + 32.0 \cdot m)}$
F39	$\frac{459.0 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{ m }$		

ตารางภาคผนวก ข 5. ค่าแรงลัพท์เสมือนของชิ้นส่วนโครงถักรูปแบบแปดคต

แรง ลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน
F1	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F26	$\frac{2.22 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F2	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F27	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F3	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F28	$\frac{1.92 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F4	0	F29	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F5	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F30	$\frac{2.51 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F6	$\frac{0.64 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F31	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F7	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F32	$\frac{2.22 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F8	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F33	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F9	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F34	$\frac{2.82 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F10	$\frac{0.96 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F35	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F11	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F36	$\frac{2.52 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F12	$\frac{0.64 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F37	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F13	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F38	$\frac{3.12 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F14	$\frac{1.28 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F39	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F15	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F40	$\frac{2.82 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F16	$\frac{0.96 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F41	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F17	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F42	$\frac{3.4 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน
F18	$-\frac{1.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F43	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F19	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F44	$\frac{3.12 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F20	$\frac{1.28 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F45	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F21	$-\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F46	$-\frac{3.72 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F22	$-\frac{1.92 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F47	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F23	$\frac{0.32 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F48	$\frac{3.42 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F24	$\frac{1.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F49	$\frac{0.000032 \cdot kg \cdot m \cdot (-62818.0 \cdot m + 23375.0 \cdot H)}{m^2}$
F25	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$		

ตารางภาคผนวก ข 6. ค่าแรงลัพท์เสมือนของชิ้นส่วนโครงถักรูปแบบโหว้

แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน
F1	0	F18	$\frac{1.24 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F2	0	F19	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F3	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F20	$\frac{1.51 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F4	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F21	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F5	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F22	$\frac{1.51 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F6	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F23	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F7	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F24	$\frac{1.81 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F8	$\frac{0.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F25	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F9	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F26	$\frac{1.81 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F10	$\frac{0.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F27	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F11	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F28	$\frac{2.11 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F12	$\frac{0.93 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F29	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F13	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F30	$\frac{2.11 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F14	$\frac{0.93 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F31	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F15	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F32	$\frac{2.41 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F16	$\frac{1.24 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F33	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F17	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F34	$\frac{2.41 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน
F35	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F43	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F36	$\frac{2.71 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F44	$\frac{3.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F37	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F45	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$
F38	$\frac{2.71 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F46	$\frac{3.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F39	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F47	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F40	$\frac{3.01 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F48	$\frac{3.61 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F41	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F49	$\frac{kg \cdot m \cdot (m - 0.72 \cdot H)}{m^2}$
F42	$\frac{3.01 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$		



ตารางภาคผนวก ข 7. ค่าแรงลัพท์เสมือนของชิ้นส่วนโครงถักรูปแบบพัด

แรง ลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน
F1	0	F18	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F2	0	F19	0
F3	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F20	$\frac{1.8 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F4	$\frac{0.16 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m}$	F21	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F5	$\frac{0.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F22	$\frac{1.09 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m}$
F6	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F23	$\frac{2.42 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F7	0	F24	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F8	$\frac{0.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F25	0
F9	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F26	$\frac{2.4 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F10	$\frac{0.47 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m}$	F27	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F11	$\frac{1.24 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F28	$\frac{1.41 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m}$
F12	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F29	$\frac{3.02 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F13	0	F30	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F14	$\frac{1.2 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F31	0
F15	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$	F32	$\frac{3.0 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F16	$\frac{0.78 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m}$	F33	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2}}{m}$
F17	$\frac{1.82 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F34	$\frac{1.71 \cdot kg \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m}$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน
F35	$\frac{3.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F37	$\frac{0.72 \cdot kg \cdot H \cdot m }{m^2}$
F36	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m}$		



ตารางภาคผนวก ข 8. ค่าแรงลัพท์เสมือนของชิ้นส่วนโครงถักรูปแบบฟิงก์

แรง ลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน	แรงลัพท์	ค่าแรงลัพท์เสมือนภายใน
F1	$\frac{0.5 \cdot kg \cdot m }{m}$	F18	$\frac{1.41 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F2	$\frac{0.16 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F19	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F3	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F20	$\frac{1.24 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F4	0	F21	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F5	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F22	$\frac{1.71 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F6	$\frac{0.47 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F23	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F7	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F24	$\frac{1.51 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F8	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F25	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F9	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F26	$\frac{2.01 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F10	$\frac{0.78 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F27	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F11	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F28	$\frac{1.81 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F12	$\frac{0.62 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F29	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F13	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F30	$\frac{2.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F14	$\frac{1.09 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F31	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F15	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F32	$\frac{2.11 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F16	$\frac{0.93 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F33	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F17	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F34	$\frac{2.61 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$

แรง ลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน	แรงลัพธ์	ค่าแรงลัพธ์เสมือนภายใน
F35	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F43	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F36	$\frac{2.41 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F44	$\frac{3.01 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F37	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F45	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F38	$\frac{2.91 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F46	$\frac{3.51 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F39	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F47	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2}}{m}$
F40	$\frac{2.71 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$	F48	$\frac{3.31 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$
F41	$\frac{0.31 \cdot kg \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m}$	F49	$\frac{7.0 \cdot kg \cdot H \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2}}{m \cdot (32.0 \cdot m + H)}$
F42	$\frac{3.21 \cdot kg \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m}$		

ตารางภาคผนวก ข 9. สมการเงื่อนไขการแอ่นตัวของโครงถักรูปแบบแปดตัว

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
1	$\frac{5.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
2	$\frac{2.0 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
3	$\frac{kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (6.9 \cdot 10^{-8} \cdot m ^2 + 4.3 \cdot 10^{-10} \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
4	$\frac{7.3 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
5	$\frac{1.1 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
6	$\frac{1.5 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
7	$\frac{1.9 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
8	$\frac{2.3 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
9	$\frac{2.7 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
10	$\frac{3.1 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
11	$\frac{3.4 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
12	$\frac{3.8 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot cm ^2 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$
13	$\frac{2.2 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
14	$\frac{2.1 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
15	$\frac{1.9 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
16	$\frac{1.7 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
17	$\frac{1.5 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
18	$\frac{1.3 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
19	$\frac{1.2 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
20	$\frac{9.8 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
21	$\frac{8.0 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
22	$\frac{6.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
23	$\frac{4.4 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
24	$\frac{2.6 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
25	$\frac{2.7 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot H \cdot m ^4}{m^2 \cdot R2 \cdot t2} - \frac{2.4 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot H^2 \cdot m ^3 \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m^2 \cdot R2 \cdot t2 \cdot \sqrt{0.01 \cdot H ^2 + 1.6 \cdot m ^2}}$
26	$\frac{5.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
27	$\frac{4.8 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
28	$\frac{4.3 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
29	$\frac{3.9 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
30	$\frac{3.4 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
31	$\frac{2.9 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
32	$\frac{2.5 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
33	$\frac{2.0 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
34	$\frac{1.6 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
35	$\frac{1.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
36	$\frac{6.5 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
37	$\frac{1.9 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
38	0
39	0
40	$\frac{1.0 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
41	$\frac{2.9 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
42	$\frac{kg \cdot m \cdot (8.7 \cdot 10^{-8} \cdot m ^2 + 5.5 \cdot 10^{-10} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
43	$\frac{8.6 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
44	$\frac{kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (2.0 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
45	$\frac{1.6 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
46	$\frac{2.0 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
47	$\frac{2.4 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
48	$\frac{2.8 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
49	$\frac{3.1 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
$2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$	$2 \cdot \frac{kg \cdot cm ^2 \cdot (2.1 \cdot 10^{-8} \cdot H ^2 + 3.4 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2) \cdot \sqrt{0.01 \cdot H ^2 + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R1 \cdot t1 \cdot m }$ $+ \frac{kg \cdot m ^3 \cdot (1.5 \cdot 10^{-7} \cdot m \cdot m - 2.4 \cdot 10^{-8} \cdot H^2 + 2.7 \cdot 10^{-9} \cdot H \cdot m)}{m^2 \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{3.3 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{kg \cdot (2.0 \cdot 10^{-8} \cdot H ^2 + 3.2 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2) \cdot \sqrt{0.01 \cdot H ^2 + 1.6 \cdot m ^2}}{R3 \cdot t3}$



ตารางภาคผนวก ข 10. สมการเงื่อนไขการแอ่นตัวของโครงถักรูปแบบโหว้

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
1	0
2	$\frac{5.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
3	$\frac{1.9 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
4	$\frac{kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (6.7 \cdot 10^{-8} \cdot m ^2 + 4.2 \cdot 10^{-10} \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
5	$\frac{7.0 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
6	$\frac{1.0 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
7	$\frac{1.4 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
8	$\frac{1.8 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
9	$\frac{2.2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
10	$\frac{2.6 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
11	$\frac{3.0 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
12	$\frac{3.3 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
13	0
14	$\frac{1.9 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
15	$\frac{1.7 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
16	$\frac{1.5 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
17	$\frac{1.4 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
18	$\frac{1.2 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
19	$\frac{9.9 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
20	$\frac{8.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
21	$\frac{6.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
22	$\frac{4.4 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
23	$\frac{2.6 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
24	$\frac{7.8 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m ^4}{m \cdot R2 \cdot t2}$
25	$\frac{1.2 \cdot 10^{-11} \cdot kg \cdot m ^3 \cdot (m - 0.72 \cdot H) \cdot (2666.0 \cdot H - 44.0 \cdot m)}{m^2 \cdot R2 \cdot t2}$
26	$\frac{5.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
27	$\frac{4.6 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
28	$\frac{4.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
29	$\frac{3.7 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
30	$\frac{3.3 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
31	$\frac{2.8 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
32	$\frac{2.4 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
33	$\frac{2.0 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
34	$\frac{1.5 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
35	$\frac{1.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
36	$\frac{6.3 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
37	$\frac{1.9 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
38	0
39	$\frac{9.7 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
40	$\frac{2.8 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
41	$\frac{5.3 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
42	$\frac{8.4 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
43	$\frac{1.2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
44	$\frac{1.5 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
45	$\frac{kg \cdot m \cdot (3.1 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 1.9 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
46	$\frac{2.3 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
47	$\frac{2.7 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
48	$\frac{3.0 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R3 \cdot t3}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
49	$\frac{kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (5.3 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 3.3 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
$2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$	$2 \cdot \frac{1.8 \cdot 10^{-7} \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot R1 \cdot t1}$ $+ \frac{ m ^3 \cdot (-2.3 \cdot 10^{-8}) \cdot H^2 + 3.2 \cdot 10^{-8} \cdot m \cdot H + 3.8 \cdot 10^{-10} \cdot H \cdot m + 1.1 \cdot 10^{-7} \cdot m \cdot m }{m^2 \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{3.2 \cdot 10^{-8} \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{ m \cdot (2.3 \cdot 10^{-6} \cdot m ^2 + 1.4 \cdot 10^{-8} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{0.01 \cdot H ^2 + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$



ตารางภาคผนวก ข 11. สมการเงื่อนไขการแอ่นตัวของโครงถักรูปแบบพัด

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
1	0
2	$\frac{1.9 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
3	$\frac{1.9 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
4	$\frac{7.0 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
5	$\frac{kg \cdot m \cdot (1.1 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 6.8 \cdot 10^{-10} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R1 \cdot t1}$
6	$\frac{1.4 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
7	$\frac{1.4 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
8	$\frac{2.2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
9	$\frac{kg \cdot m \cdot (3.4 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 2.2 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R1 \cdot t1}$
10	$\frac{2.9 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
11	$\frac{2.9 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
12	$\frac{3.6 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
13	0
14	0
15	0
16	0

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
17	0
18	0
19	$\frac{2.0 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot H \cdot m ^4 + 2.3 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot H^2 \cdot m ^3}{m^2 \cdot R2 \cdot t2}$
20	$\frac{5.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
21	$\frac{4.6 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
22	$\frac{4.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
23	$\frac{3.7 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
24	$\frac{3.3 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
25	$\frac{2.8 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
26	$\frac{2.4 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
27	$\frac{1.9 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
28	$\frac{1.5 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
29	$\frac{1.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
30	$\frac{6.1 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
31	$\frac{1.7 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$
32	$\frac{1.3 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot (6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
33	$\frac{1.0 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
34	$\frac{2.6 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
35	$\frac{4.6 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
36	$\frac{kg \cdot m \cdot (4.2 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 2.7 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
37	$\frac{8.6 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot (6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
$2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$	$2 \cdot \frac{ m \cdot (0.0000029 \cdot m ^2 + 1.8 \cdot 10^{-8} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R1 \cdot t1}$ $+ \frac{H \cdot m ^3 \cdot (2.3 \cdot 10^{-8} \cdot H + 2.0 \cdot 10^{-9} \cdot m)}{m^2 \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{1.4 \cdot 10^{-8} \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{1.7 \cdot 10^{-8} \cdot m \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.1 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.1 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{4.2 \cdot 10^{-7} \cdot m \cdot (6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2) \cdot \sqrt{6.2 \cdot m ^2 + 0.04 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$

ตารางภาคผนวก ข 12. สมการเงื่อนไขการแอ่นตัวของโครงถักรูปแบบฟิงก์

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
1	$\frac{1.3 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
2	$\frac{1.1 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
3	$\frac{3.0 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
4	$\frac{5.5 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
5	$\frac{8.8 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
6	$\frac{1.2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
7	$\frac{1.6 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
8	$\frac{kg \cdot m \cdot (3.2 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 2.0 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R1 \cdot t1}$
9	$\frac{2.4 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
10	$\frac{2.8 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
11	$\frac{3.2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
12	$\frac{3.6 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R1 \cdot t1}$
13	$\frac{2.3 \cdot 10^{-8} \cdot kg^2 \cdot m ^3}{R2 \cdot t2 \cdot kg }$
14	$\frac{5.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
15	$\frac{4.6 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
16	$\frac{4.2 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
33	$\frac{2.0 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
34	$\frac{1.5 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
35	$\frac{1.1 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
36	$\frac{6.4 \cdot 10^{-10} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$
37	$\frac{2.3 \cdot 10^{-12} \cdot kg \cdot m \cdot (-2.6 \cdot 10^4 \cdot H + 3 \cdot 10^3 \cdot m) \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2 \cdot (H + 32.0 \cdot m)}$
38	0
39	0
40	$\frac{9.7 \cdot 10^{-9} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
41	$\frac{2.8 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
42	$\frac{kg \cdot m \cdot (8.5 \cdot 10^{-8} \cdot m ^2 + 5.3 \cdot 10^{-10} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
43	$\frac{8.4 \cdot 10^{-8} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
44	$\frac{1.2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
45	$\frac{1.5 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
46	$\frac{1.9 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
47	$\frac{2.3 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2} \cdot (1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2)}{m \cdot R3 \cdot t3}$
48	$\frac{kg \cdot m \cdot (4.3 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 2.7 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$

Member	$\frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$
49	$\frac{kg \cdot m \cdot (4.8 \cdot 10^{-7} \cdot m ^2 + 3.0 \cdot 10^{-9} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{1.6 \cdot m ^2 + 0.01 \cdot H ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$
$2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_i n_i L_i}{A_i E}$	$2 \cdot \frac{ m \cdot (1.9 \cdot 10^{-8} \cdot H ^2 + 0.0000003 \cdot m ^2) \cdot \sqrt{0.01 \cdot H ^2 + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R1 \cdot t1}$ $+ \frac{ m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (9.8 \cdot 10^6 \cdot m ^3 - 7.6 \cdot 10^5 \cdot H \cdot 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2 \cdot (2.5 \cdot 10^{13} \cdot H + 8.0 \cdot 10^{14} \cdot m)}$ $+ \frac{ m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m - 0.05 \cdot H ^2} \cdot (2.5 \cdot 10^7 \cdot 0.05 \cdot H + 1.6 \cdot m ^2 \cdot m - 2.9 \cdot 10^5 \cdot H \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2 \cdot (2.5 \cdot 10^{13} \cdot H + 8.0 \cdot 10^{14} \cdot m)}$ $\frac{4.5 \cdot 10^{-9} \cdot H \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2 \cdot (32.0 \cdot m + H)}$ $+ \frac{3.1 \cdot 10^{-8} \cdot m \cdot \sqrt{0.39 \cdot m ^2 + 1.6 \cdot m + 0.05 \cdot H ^2} \cdot (0.39 \cdot m ^2 + 0.05 \cdot H - 1.6 \cdot m ^2)}{m \cdot R2 \cdot t2}$ $+ \frac{ m \cdot (0.00000023 \cdot m ^2 + 1.4 \cdot 10^{-8} \cdot H ^2) \cdot \sqrt{0.01 \cdot H ^2 + 1.6 \cdot m ^2}}{m \cdot R3 \cdot t3}$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	พันธะ จิวลักษณ์
วัน เดือน ปีเกิด	17 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดอุดรดิตถ์ ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, 2543
ที่อยู่ปัจจุบัน	247/13 หมู่ที่ 2 ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี
สถานที่ทำงาน	WHA Industrial Development Public Company Limited
ตำแหน่ง	รองผู้จัดการนิคมอุตสาหกรรม

