

วิธีการโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการออกแบบช่วงต้น

สำหรับระบบโครงสร้างเอ๊าท์ริกเกอร์ในอาคารสูง

METHODOLOGY FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF
EARLY DESIGN PROCESS FOR OUTRIGGER STRUCTURAL SYSTEM IN
HIGH-RISE BUILDINGS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

METHODOLOGY FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF
EARLY DESIGN PROCESS FOR OUTRIGGER STRUCTURAL SYSTEM IN
HIGH-RISE BUILDINGS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ACADEMIC YEAR 2020

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ วิธีการโทปอโลยีเหมาะที่สุดในกระบวนการออกแบบช่วงต้น
สำหรับระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ในอาคารสูง
METHODOLOGY FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF EARLY DESIGN
PROCESS FOR OUTRIGGER STRUCTURAL SYSTEM IN HIGH-RISE BUILDINGS

นักศึกษา รัชชัย ไชยสาร รหัสประจำตัว 60010447
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อำพน	จรัสจรวงเกียรติ	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ผศ.ดร.อัญญาวิทย์	สุจรีตพงศ์	
ดร.ณัฐดนัย	สินสมุทรผดุง	
รศ.สุวัฒน์	ธีรเศรษฐ์	
อาจารย์ทรงกลด	แช่อึ้ง	

วันเดือนปีที่สอบ 26 พฤษภาคม 2564

สถานที่สอบ สอบออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(..... ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร.....)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการออกแบบช่วงต้น สำหรับระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ในอาคารสูง

ธวัชชัย ไชยสาร รหัสประจำตัว 60010447

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอาคารสูงมีความสำคัญมากในพื้นที่ที่จำกัด เพื่อให้การสร้างอาคารเข้ากับยุคสมัยและตอบสนองตามความต้องการของสถาปนิก วิศวกรโครงสร้างจำเป็นต้องพัฒนาระบบโครงสร้างอาคารที่เป็นระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ (outrigger structural system) ซึ่งเป็นระบบที่มีปัญหาด้านการออกแบบที่ซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของเอ้าท์ริกเกอร์ (outrigger) ทำให้ในอดีตต้องใช้เวลาในการออกแบบและต้นทุนสูง ดังนั้นการศึกษาจึงมุ่งเน้นไปที่การใช้วิธีการโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุด (topology optimization) สำหรับระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ด้วยซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering นอกจากนั้นการศึกษายังได้มีการทดลองที่แสดงให้เห็นว่า 3 วิธีสำหรับการตอบสนองต่อโครงสร้างที่เหมาะสมแตกต่างกัน โดยทำการศึกษาจากกลุ่มตัวอย่างที่มีการกำหนดรูปทรงระบบโครงสร้างอาคาร แรงกระทำกับอาคารตามมาตรฐาน ASCE 7-10 และกระบวนการออกแบบและทดลอง การศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปต่อยอดในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมที่สุดตามความต้องการของคนในอุตสาหกรรมในอนาคตได้

คำสำคัญ: โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุด, ระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์, กระบวนการออกแบบช่วงต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

METHODOLOGY FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF EARLY DESIGN PROCESS FOR OUTRIGGER STRUCTURAL SYSTEM IN HIGH-RISE BUILDINGS

Mr. Thawatchai Chaiyasan Student ID. 60010447

Advisors Asst. Prof. Dr. Arthit Petchsasithon

Academic Year 2020

Abstract

High-rise buildings are important in densely populated areas, and people have higher expectations for architecture, so a structural system must be developed by a construction engineer. One of the structural systems for efficiently controlling excessive drift due to lateral load is outrigger structural system. Outrigger location optimization is one of design problems for this structural system, which is a complex high-rise structure. The problems took a long time and a lot of money to solve in the past. As a result, the focus of this research has been on a design method for optimal outrigger placement using Altair Engineering's software's topology optimization. Besides that, study has revealed that 3 materials respond differently to the structural optimization. The shape structure system, wind loading distribution according to ASCE 7-10, and early design process of the sample group to be studied are all determined by the researcher. This project can be developed and applied in the design of a product to improve the lives of people in the industry in the future.

Keywords: topology optimization, outrigger structural system, early design process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^{||} and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ และช่วยตอบคำถามด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร อาจารย์ที่ปรึกษา ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้จนประกอบเป็นองค์ความรู้ทางวิศวกรรมที่ช่วยให้การแก้ปัญหาของการวิจัยอย่างเหมาะสม

ขอขอบพระคุณบุคลากรจากบริษัท ซินเท็ค คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) ที่ให้คำแนะนำแนวทางการออกแบบอาคารสูง

ขอขอบคุณนางสาวศิริประภา บุญทน ที่ให้คำแนะนำในการเขียนบทความภาษาไทย และนายเจษฎาวัฒน์พรไพโรจน์ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคในการออกแบบ และเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจทุกคน

สุดท้ายขอขอบพระคุณผู้ปกครองที่ช่วยให้เงินสนับสนุน และบูรพาจารย์ที่เคยอบรมสั่งสอน รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน



ธวัชชัย ไชยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^{III}and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญกราฟ.....	XI
สารบัญแผนภาพ.....	XII
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
บทที่ 2	3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3	21
ระเบียบวิธีการวิจัย.....	21
3.1 นิยามปัญหา.....	22
3.2 ตั้งวัตถุประสงค์และสมมติฐานการทดลอง	22
3.3 กำหนดตัวแปรการทดลอง.....	22

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	29
4.1 ผลการทดลอง	31
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	33
บทที่ 5	49
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการวิจัย	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก.....	54
การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของซอฟต์แวร์.....	54
ภาคผนวก ข.....	59
รายการคำนวณแรงลมมาตรฐาน ASCE 7-10	59
ภาคผนวก ค.....	79
แปลนแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง	79
ภาคผนวก ง	87
การตั้งค่าในซอฟต์แวร์	87
ภาคผนวก จ.....	96
ผลการทดลอง	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^vand cite the document when use.

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	22
ตารางที่ 3.2 แบบจำลองที่มีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันออกไป	23
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ finite element	31
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ topology optimization	32
ตารางที่ 4.3 ค่าตัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่เหมาะสม	33
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งของระบบเอาทริกเกอร์ที่เหมาะสม	36
ตารางที่ 4.5 ปริมาตรระบบเอาทริกเกอร์ที่เหมาะสม	36
ตารางที่ 4.6 ค่าการเปรียบเทียบกรณีที่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้	40
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีที่มีค่าซ้ำกันของการเปรียบเทียบ	41
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ในกรณีหาค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบได้	42
ตารางที่ 4.9 ค่าการเปรียบเทียบกรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้	45
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบได้	46
ตารางที่ ข.1 ประเภทความเสี่ยงของอาคารและโครงสร้างอื่น ๆ สำหรับน้ำท่วม, ลม, หิมะ, แผ่นดินไหว, และ ลูกเห็บ	63
ตารางที่ ข.2 (Table 26.6-1): Wind directionality factor, K_d	64
ตารางที่ ข.3 Topographic Multipliers for Exposure C	65
ตารางที่ ข.4 (Table 26.11-1.)	67
ตารางที่ ข.5 (Table 27.3-1) velocity pressure exposure coefficient, K_z และ K_h	68
ตารางที่ ข.6 (Table 26.9-1) Terrain Exposure Constants ในหน่วยเมตรริก	69
ตารางที่ ข.7 (Figure 27.4-1(cont.)) ค่าสัมประสิทธิ์ความดันผนัง (wall pressure coefficients), C_p	71
ตารางที่ ข.8 แรงกระทำสำหรับด้านที่ลมเข้าปะทะ	75
ตารางที่ ข.9 แรงกระทำด้านข้างต่อ 1 node ที่ถูกตั้งค่าในซอฟต์แวร์	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^{VI} and cite the document when use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	หนึ่งในการแก้ปัญหาแรกเริ่มที่ถูกลำเสนอเพื่อแก้ปัญหา structural topology optimization.....	5
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างปัญหา sizing optimization.....	7
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างปัญหา shape optimization	7
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างปัญหา topology optimization	8
รูปที่ 2.5	กราฟการลดลงของความแข็งของวัสดุที่เป็น intermediate density ใน SIMP technique.....	10
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างปัญหาการหาความเหมาะสมที่ถูกสร้างขึ้นและผลลัพธ์ของ topology optimization....	11
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างการวนซ้ำแต่ละครั้งของ topology optimization	11
รูปที่ 2.8.....		12
ก.	ความทะเยอทะยานของสถาปัตยกรรมของ Bionic Tower	12
ข.	แนวคิด braced outrigger structural system ถูกประยุกต์ใช้กับ Bionic Tower.....	12
ค.	ผลของการศึกษา topology optimization โดยพิจารณาจากภายนอกของ Bionic Tower ตาม designable domain	12
รูปที่ 2.9	โครงสร้างโครงถักตามเหตุผลที่ถูกแนะนำสำหรับตัวยึด	13
	ในผลลัพธ์ของการศึกษา topology optimization	13
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างโครงสร้างที่มีการใช้ระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์.....	14
รูปที่ 2.11	การตอบสนองโครงสร้างของระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์.....	14
รูปที่ 2.12	อาคารประเภท framed-tube system	15
รูปที่ 2.13	อาคาร Tour de la Bourse และ outrigger layout on plan.....	16
รูปที่ 2.14	Tour de la Bourse อยู่ระหว่างการก่อสร้าง	16
รูปที่ 2.15	อาคารตลาดหลักทรัพย์หรือ Tour De La Bourse.....	17
	ในเมืองในเมืองมอนทรีออล, axonometric view	17
รูปที่ 2.16	140 William Street (ซ้าย) และ U.S. Bank Center (ขวา).....	18
รูปที่ 2.17	การถ่ายแรงใน conventional outrigger system.....	19
รูปที่ 2.18	การถ่ายแรงจาก core สู่ floor diaphragms.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.19 การถ่ายแรงจาก floor diaphragms สู่อ่างผ่าน belt truss	19
รูปที่ ก.1 กำหนดพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ	55
รูปที่ ก.2 แสดงค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดสังเกตในแต่ละการวนซ้ำ.....	56
รูปที่ ก.3 แสดงค่ามวลในแต่ละการวนซ้ำ.....	56
รูปที่ ก.4 แบบจำลองสามมิติที่ได้จากการดำเนินการโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด	57
รูปที่ ก.5 วิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จากการดำเนินการโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด	57
รูปที่ ข.1 แผนผังของกระบวนการกำหนดแรงลมรวมไปถึงแผนผังเพิ่มเติมและหมายเหตุผู้ใช้ถูกจัดไว้เพื่อ การเริ่มต้นของแต่ละ chapter สำหรับขั้นตอนหรือวิธีการโดยละเอียดเพิ่มเติมสำหรับการกำหนดแรงลม.....	61
รูปที่ 2.20 (Fig 26.8-1) Topographic factor, K_{zt}	65
รูปที่ ข.2 (Figure 27.4-1) external pressure coefficients, C_p	70
รูปที่ ข.3 (Figure 27.4-8) กรณีการออกแบบแรงลมในแต่ละกรณี	72
รูปที่ ข.4 ทิศทางของลมที่กระทำกับอาคาร	73
รูปที่ ค.1 แผน elevation (ตัดส่วนแสดงส่วนล่างและส่วนบนของอาคาร).....	80
รูปที่ ค.2 แผนการวางตำแหน่งเสา	80
รูปที่ ค.3 แผนของผนังรับแรงเฉือน (core wall).....	81
รูปที่ ค.4 แผนพื้น	81
รูปที่ ค.5 รูปตัด A-A แสดงความหนาของพื้น	82
รูปที่ ค.6 ขอบเขตของการออกแบบระบบเอ๊าท์ริกเกอร์	82
รูปที่ ค.7 รูปตัด B-B แสดงความลึกและความกว้างเอ๊าท์ริกเกอร์	82
รูปที่ ค.8 รูปตัด C-C แสดงส่วนการขยายหน้าตัดเสา	83
รูปที่ ค.9 แสดงจุดสังเกตอยู่ที่ตำแหน่งบนสุดของแบบจำลอง.....	83
รูปที่ ค.10 แบบจำลองเสาและผนังรับแรงเฉือน	84
รูปที่ ค.11 แบบจำลองพื้น	85
รูปที่ ค.12 แบบจำลองระบบเอ๊าท์ริกเกอร์.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ง.1 แบ่งกลุ่มแบบจำลองโครงสร้าง	88
รูปที่ ง.2 กำหนดค่าวัสดุของ m-1.....	88
รูปที่ ง.3 กำหนดคุณสมบัติของให้กับวัสดุ m-1	89
รูปที่ ง.4 กำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุให้กับ Outriggers	89
รูปที่ ง.5 แสดงการ mesh ของส่วนประกอบที่เป็น Outriggers.....	90
รูปที่ ง.6 แสดงการ mesh ของส่วนประกอบที่เป็น Core and columns.....	90
รูปที่ ง.7 กำหนดทิศเครื่องหมายของแรง	91
รูปที่ ง.8 แรงกระทำกับโครงสร้างที่พื้น	91
รูปที่ ง.9 การตั้งค่า Load Step.....	91
รูปที่ ง.10 การกำหนดของหน้าสัมผัสของส่วนประกอบ.....	92
รูปที่ ง.11 ระบายการออกแบบ	92
รูปที่ ง.12 optimization responses ในตัวแปร mass	93
รูปที่ ง.13 optimization responses ในตัวแปร displacement.....	93
รูปที่ ง.14 แสดงจุดสังเกตที่ได้กำหนดไว้บนสุดของแบบจำลอง	93
รูปที่ ง.15 การกำหนดค่า optimization constraints ของแบบจำลอง	94
รูปที่ ง.16 เป้าหมายของ topology optimization.....	94
รูปที่ ง.17 ข้อความแสดงสถานะการคำนวณของ topology optimization.....	94
รูปที่ ง.18 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ในแต่ละการวนซ้ำของ displacement (ซ้าย)	95
และการลู่เข้าหาคำตอบ (ขวา)	95
รูปที่ จ.1 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 1	97
รูปที่ จ.3 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 3	99
รูปที่ จ.4 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 4	100
รูปที่ จ.5 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 5	101
รูปที่ จ.6 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 6	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ จ.7 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 7	103
รูปที่ จ.8 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 8	104
รูปที่ จ.9 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 9	105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^xand cite the document when use.

สารบัญกราฟ

หน้า

กราฟที่ 4.1 แสดงค่าการโก่งตัวของแต่ละแบบจำลอง	34
กราฟที่ 4.2 แผนภาพแสดงตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมของแต่ละแบบจำลอง	35
กราฟที่ 4.3 แสดงปริมาตรของระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง.....	37
กราฟที่ 4.4 ความเค้นสูงสุดของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง.....	38
กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบ	43
กับร้อยละค่าการดัดตัวของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ	43
ต่อร้อยละค่าการดัดตัวของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น.....	43
กราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบ เอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบต่อปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น	43
กราฟที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบ เอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบต่อปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น	44
กราฟที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบ	47
กับร้อยละค่าการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ	47
ต่อร้อยละค่าการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น	47
กราฟที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบ เอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบต่อปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น	47
กราฟที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบ เอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบต่อปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น	48
กราฟที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านเข้าปะทะลมกับชั้นของอาคาร	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^{XI} and cite the document when use.

สารบัญแผนภาพ

	หน้า
แผนภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการพัฒนากระบวนการออกแบบ.....	21
แผนภาพที่ 3.2 การทดลอง.....	25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content,^{XII} and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อสังหาริมทรัพย์ที่แพงที่สุดในโลกอยู่ที่เกาะฮ่องกง มีการซื้อขายตารางเมตรละ 30 ล้านบาท ซึ่งมีราคาแพงกว่าอสังหาริมทรัพย์ที่แพงที่สุดในประเทศไทยถึง 30 เท่า [1] สาเหตุที่ทำให้อสังหาริมทรัพย์บนเกาะฮ่องกงมีราคาแพง เนื่องจากเกาะฮ่องกงเป็นศูนย์กลางทางการเงินที่ใหญ่แห่งหนึ่งของโลก นอกจากนี้เกาะฮ่องกงมีจำนวนประชากรประมาณ 7.5 ล้านคน แต่มีพื้นที่ 1,100 ตารางกิโลเมตร เป็นพื้นที่ที่อยู่อาศัยเพียง 77 ตารางกิโลเมตรเท่านั้น จึงทำให้เกิดการก่อสร้างอสังหาริมทรัพย์ที่เป็นอาคารสูงเพื่อรองรับจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น การสร้างอาคารสูงเป็นการใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามหลักเศรษฐศาสตร์ ซึ่งนอกจากจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและความประหยัดในการก่อสร้าง ยังต้องคำนึงถึงการออกแบบที่สวยงามเพื่อตอบสนองความต้องการด้านสถาปัตยกรรมในยุคปัจจุบัน เพื่อทำพื้นที่ดินแห่งนั้นเป็นที่นิยมและมีความสำคัญให้กับประเทศ วิศวกรโครงสร้างจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบโครงสร้างที่ใช้กับอาคารสูงตามความต้องการในการออกแบบรูปทรงอาคารของสถาปนิก หนึ่งในระบบโครงสร้างที่มีความนิยมในปัจจุบันคือ ระบบโครงสร้างเอ้าทริกเกอร์ (outrigger structural system) [2]

อาคารสูงที่มีการใช้ระบบโครงสร้างเอ้าทริกเกอร์โดยปกติทำหน้าที่หลักคือ ลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างอันเนื่องมาจากแรงกระทำทางด้านข้าง ระบบโครงสร้างนี้ประกอบด้วย เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือน และระบบเอ้าทริกเกอร์ (outrigger system) ลักษณะของเอ้าทริกเกอร์ (outrigger) เป็นเหมือนคานที่มีความแข็งแรงมาก เป็นที่รู้จักกันว่าอาคารสูงที่ใช้ระบบโครงสร้างนี้มีปัญหาด้านการออกแบบที่มีความซับซ้อนมาก ในอดีตมีการศึกษา การใช้งานระบบเอ้าทริกเกอร์ให้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากความยากในการออกแบบระบบโครงสร้าง ทำให้การศึกษานั้นจำเป็นต้องใช้เวลา ทีมออกแบบ อุปกรณ์และคอมพิวเตอร์ราคาสูง แต่ในปัจจุบันซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาให้สามารถทำงานบนคอมพิวเตอร์ระดับผู้ใช้ทั่วไปได้ ซอฟต์แวร์ดังกล่าวเป็นการสร้างแบบจำลองโครงสร้างซึ่งมีส่วนช่วยให้การออกแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีการโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุด (topology optimization) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการออกแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมที่สุด [3] ทำให้นักออกแบบที่ขาดความรู้และประสบการณ์สามารถเรียนรู้การออกแบบให้เหมาะสมและง่ายมากขึ้น

หนึ่งในซอฟต์แวร์ที่สามารถออกแบบโครงสร้างโดยใช้วิธีการโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุดได้คือ ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering ซึ่งเป็นที่นิยมในการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย [4] เพื่อ

แก้ปัญหาด้านการออกแบบในอดีต ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering ซึ่งจะใช้วิธีการโทโปโลยีที่เหมาะสมที่สุดเข้ามาช่วยในการออกแบบระบบโครงสร้างเอ้าทริกเกอร์ และมีการเสนอแนวทางการขึ้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นการใช้ซอฟต์แวร์ขั้นพื้นฐานที่ทำให้การออกแบบระบบโครงสร้างในครั้งนี้

จะเป็นการออกแบบช่วงต้นที่แสดงให้เห็นถึงการใช้สอยพื้นที่ในอาคาร ซึ่งเป็นการประมาณตำแหน่งและจำนวนของเอ้าทริกเกอร์ เพื่อให้การแก้ปัญหามีความชัดเจนและเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้นจึงมีการเสนอทำการทดลองการเปลี่ยนชนิดวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่เป็นตัวกำหนดรูปทรงของโครงสร้าง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเสนอใช้วิธีการ topology optimization เข้ามาช่วยในการออกแบบระบบโครงสร้างเอ้าทริกเกอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering ให้สามารถออกแบบระบบโครงสร้างพื้นฐานในกระบวนการออกแบบช่วงต้นให้เหมาะสมที่สุดตามขอบเขตของการวิจัย

1.2.2 เพื่อทดลองการเปลี่ยนชนิดวัสดุของระบบโครงสร้างว่ามีผลต่อตำแหน่งและปริมาตรระบบเอ้าทริกเกอร์และความเค้นของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมอย่างไร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 เป้าหมายของการหาความเหมาะสมจะกำหนดให้มีเพียงเป้าหมายเดียว (single objective optimization) คือ เพื่อออกแบบระบบโครงสร้างเอ้าทริกเกอร์ให้มีการใช้วัสดุน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ผลลัพธ์ที่ต้องการจากการออกแบบกำหนดให้พิจารณาตามตัวชี้วัดดังนี้

- (1) ระบบโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือนและระบบเอ้าทริกเกอร์ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขบังคับในซอฟต์แวร์
- (2) ระบบโครงสร้างต้องสามารถรับแรงด้านข้างได้
- (3) ระบบโครงสร้างต้องมีค่าการโก่งตัวไม่เกินตามที่กำหนด
- (4) ระบบโครงสร้างหลังการออกแบบต้องสามารถก่อสร้างได้จริง

1.4.2 การออกแบบการทดลองโดยกำหนดตัวแปรหลักและตัวแปรเสริมที่ช่วยให้การทดลองการออกแบบสามารถทำได้ ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ และรูปทรงของระบบโครงสร้างถูกกำหนดโดยผู้วิจัย และมีการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบให้เหมาะสมที่สุดแต่จะไม่ลงลึกรายละเอียดในอัลกอริทึมของซอฟต์แวร์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้ ระยะแรก ทำการศึกษาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงศึกษารวบรวมกรณีเกี่ยวกับการออกแบบระบบโครงสร้างเอ้าทริกเกอร์ในอาคารสูงและการใช้งานเบื้องต้นของซอฟต์แวร์ ซึ่งซอฟต์แวร์หลักที่ใช้ คือ HyperMesh Optistruct และ HyperView ระยะที่สอง ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาและออกแบบการทดลองว่าอยากให้ซอฟต์แวร์ทำอะไรหรืออยากให้ซอฟต์แวร์ออกแบบระบบโครงสร้างอย่างไร โดยมีการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในวิธีการ topology optimization และอาจจะมีการลองผิดลองถูก เพื่อให้ได้มาซึ่งกระบวนการออกแบบและทดลอง ระยะสุดท้าย ดำเนินการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลและนำเสนอต่อไป

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 Mathematical Optimization

หลักการพื้นฐานของการหาสิ่งที่เหมาะสมที่สุดคือ การหาทางออกที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ภายใต้สถานการณ์ที่กำหนด ยกตัวอย่างเช่น การค้นหาเส้นทางที่เร็วที่สุดเมื่อใช้ระบบขนส่งมวลชนหรือในกรณีของการหาโครงสร้างที่เหมาะสมซึ่งเป็นการศึกษาการใช้วัสดุให้เหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดบางประการ กล่าวคือการพิจารณาและตัดสินใจโดยผู้โดยสารหรือวิศวกรจากประสบการณ์และความรู้เกี่ยวกับเรื่องนั้น ๆ

โดยปกติแล้วเป้าหมายของการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ถูกแบ่งเป็นมากที่สุด (Maximum) หรือน้อยที่สุด (Minimum) เช่น ต้องการเวลาน้อยที่สุดหรือต้องการความแข็งแรงมากที่สุด เพื่อให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดย ‘ส่วนที่ดีที่สุด’ จากวิธีหาคำตอบซึ่งขึ้นอยู่กับกลุ่มของตัวแปรที่ใช้ออกแบบ (design variables) นั้นจำเป็นต้องแสดงด้วยค่าตัวเลข โดยทั่วไปจะถูกทำด้วยฟังก์ชันของตัวแปรที่ใช้ออกแบบซึ่งเรียกว่า “cost function”

ในทางคณิตศาสตร์ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะถูกกำหนดให้ค่าต่ำที่สุดของ cost function (ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นมากที่สุดทำได้โดยการกลับค่าต่ำที่สุด (negative function)) ภายใต้ข้อจำกัด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\text{หา } x = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_3 \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \text{ที่ทำให้ฟังก์ชัน } f(x) \text{ มีค่าน้อยที่สุด} \\ \text{โดยที่ } \begin{cases} g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{array} \right.$$

เมื่อ x เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรเสริมที่ใช้ในการออกแบบ (design parameters) และ $f(x)$ คือ cost function $g_i(x)$ และ $h_j(x)$ ถูกเรียกว่า “inequality constraint function” และ “equality constraint function” ตามลำดับ ทั้งสองคือ ฟังก์ชันข้อจำกัด (constraints) ของปัญหา สิ่งนี้ถูกเรียกว่า “constrained optimization problem”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.2 Multi Criteria Optimization

ในหลายกรณีมีหลายวัตถุประสงค์ (multiple objectives) ที่จะต้องนำมาพิจารณา ยกตัวอย่างปัญหาการเลือกซื้อรถยนต์ เช่น ต้องการซื้อรถที่มีประสิทธิภาพ ราคาถูกและประหยัดน้ำมัน เห็นได้ชัดว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะหารถที่ดีที่สุดในทุก ๆ ด้าน ในความเป็นจริงแล้วรถยนต์ที่มีสมรรถภาพสูงนั้นไม่ได้มีราคาถูกหรือประหยัดน้ำมัน

แนวคิดที่นิยมใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) กับ multiple objectives คือ ความเหมาะสมแบบพาเรโต (Pareto optimality) ปัญหาจะถูกแก้ได้ก็ต่อเมื่อคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ไม่ทำให้ค่าใด ๆ ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective functions) ลดลงและต้องไม่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งคำตอบที่ได้จะถูกเรียกว่า “Pareto optimal” กลุ่มคำตอบของการค้นหาค่าตอบเหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (pareto optimal solutions) ถูกเรียกว่า “Pareto front” สำหรับกรณีของสองวัตถุประสงค์ (two objectives) สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายโดยแผนภาพสองมิติ จากข้อมูลที่น่าสนใจของ Pareto front มีคำถามเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยน (trade-off) ระหว่างวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไปว่า “การตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างวัตถุประสงค์สามารถบรรลุเป้าหมายได้อย่างไร”

วิธีการหนึ่งในการหาค่าตอบ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายเกณฑ์ (multi-criteria optimization problem) คือ สเกลาร์ไลเซชัน (scalarization) กล่าวคือ ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ (multiple objective functions) กลายเป็นฟังก์ชันสเกลาร์ (scalar function) ของตัวแปรที่ใช้ออกแบบซึ่งวิธีสเกลาร์ไลเซชันที่ง่ายที่สุดคือ วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (weighted sum method)

$$\min_x \sum_{k=1}^p w_k f_k(x)$$

เมื่อ f_1, \dots, f_k เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์

โดยการเปลี่ยนน้ำหนัก w_k อาจพบคำตอบที่เหมาะสมของพาเรโตที่แตกต่างกันออกไป

ϵ -constraint method เป็นอีกหนึ่งวิธีคือ ให้พิจารณาหนึ่งในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่านั้นและให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหลือเป็นข้อบังคับ (constraining)

$$\min_x f_i(x)$$

$$\text{โดยที่ } f_j(x) \leq \epsilon_k, k = 1, \dots, p, k \neq j$$

จากนั้นการหาค่าตอบด้วยค่าที่แตกต่างกันออกไปบนเงื่อนไข (constraints) ϵ_k

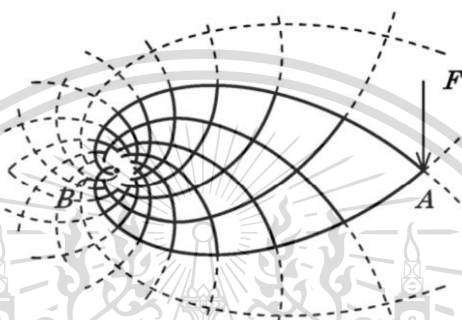
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.3 Structural Optimization

การกำหนดแบบโครงสร้าง (structural optimization) คือ การให้ความสนใจเกี่ยวกับประโยชน์ที่เกิดขึ้นมากที่สุดจากการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ภายใต้จุดประสงค์ที่ถูกกำหนดและเพื่อจะบอกว่าโครงสร้างไหนดีที่สุด แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ sizing optimization shape optimization และ topology optimization ในการประยุกต์ใช้ topology optimization กับโครงสร้างแสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุดของจำนวน (number) ตำแหน่ง (location) รูปร่าง (shape) และขนาด (size) จากช่องเปิด (openings) ภายใต้ความต่อเนื่อง (continuum) แรกเริ่มปัญหา topology optimization ถูกพัฒนาและนำเสนอโดย Michell แสดงดังรูป



รูปที่ 2.1 หนึ่งในกรแก้ปัญหาแรกเริ่มที่ถูกนำเสนอเพื่อแก้ปัญหา structural topology optimization [5]

1) Optimization Formulation

การกำหนดแบบโครงสร้างจำเป็นต้องมีการกำหนดเกณฑ์หาความเหมาะสม (optimization formulation) รวมไปถึง design variable response constraint และ objective function

(1) *Design Variable* คือ ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเป็นตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบของการแก้ปัญหาปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นตัวแปรอะไรก็ได้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ได้ทำการตรวจสอบ จำนวนตัวแปรนี้อาจมีความแตกต่างกันไปตั้งแต่หนึ่งถึงหลายล้านตัวแปร และคุณสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้างขึ้นอยู่กับตัวแปรนี้

(2) *Response* คือ การตอบสนองเป็นค่าสังเกตที่ใช้วัดผลในการทดลอง และอาจเป็นค่าที่ถูกเรียกมาใช้ซ้ำ ๆ รูปแบบโดยทั่วไปของการตอบสนอง เช่น การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุ ความเครียด มวลและการปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ (compliance) โดย การตอบสนองจะเป็นตัวที่ใช้วัดผลหรือประเมินค่าประสิทธิภาพของคุณสมบัติของโครงสร้างว่ามีปริมาณหรือคุณภาพมากน้อยเพียงใด

(3) *Objective Function* คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อาจเป็นฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดและฟังก์ชันที่ให้คำตอบใช้ในการตัดสินใจการออกแบบนั้นดีเพียงใด ในการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการกำหนดเกณฑ์หาความเหมาะสมที่สุด โดยทั่วไปจะเป็นปัญหาการหาค่าน้อยสุด ด้วยเหตุผลนี้ต้องยอมให้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงตัวเดียวต่อการกำหนดเกณฑ์หาความเหมาะสมที่สุด และ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ถึงแม้ว่าจะเป็นฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์จะถูกทำให้เป็นฟังก์ชันที่มีหลายการตอบสนอง ยกตัวอย่างโดยทั่วไป รูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ มวลและการปฏิบัติตามกฎเกณฑ์บางอย่าง เป็นต้น

(4) *Constraint* คือ ข้อกำหนดของแต่ละตัวแปรที่ใช้ออกแบบและในบางกรณี อาจจะมีข้อจำกัดของการตอบสนอง โดยในตัวแปรที่ใช้ออกแบบและการตอบสนองทั้งสองอาจจะถูกกำหนดขอบเขต (boundary) ซึ่งมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ข้อกำหนดถูกใช้กับตัวแปรที่ใช้ออกแบบและการตอบสนองเพื่อให้มั่นใจว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้างอยู่ในขอบเขตที่ยอมให้ใช้ตามข้อกำหนด ยกตัวอย่างรูปแบบโดยทั่วไปของข้อกำหนดคือ ค่ามากที่สุดที่ยอมให้มวล ค่ามากที่สุดที่ยอมให้ความเครียด และค่ามากที่สุดที่ยอมให้เปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุ หรือค่าน้อยสุดที่ยอมให้มวล ค่าน้อยสุดที่ยอมให้ความเครียด และค่าน้อยสุดที่ยอมให้เปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่ามากที่สุดเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนด



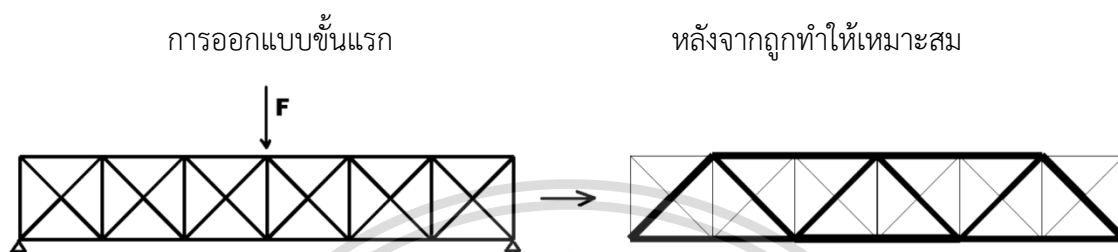
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) การแบ่งประเภทของ Structural Optimization มี 3 ประเภท ดังนี้

(1) *Sizing Optimization* โดยทั่วไปประเภทนี้เป็นการหาความเหมาะสมของขนาด ยกตัวอย่างเช่น ตัวแปรที่ใช้ออกแบบคือ ความหนาหรือความบางของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยลักษณะความหนาของแผ่นหรือพื้นที่หน้าตัดของแท่งซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะถูกปรับขนาดให้เหมาะสม เป็นประเภทที่หาความเหมาะสมง่ายที่สุดที่ถูกนำไปใช้ในการออกแบบในขั้นตอนระยะสุดท้าย สามารถยกตัวอย่างแสดงดังรูป



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างปัญหา *sizing optimization* [6]

จากรูปเป็นตัวอย่างที่ดีในการแสดงให้เห็นถึงการกำหนดเกณฑ์หาความเหมาะสมที่สุด โดยในรูปด้านซ้ายจะมีการแสดง พื้นที่หน้าตัด, ความยาว และจำนวน ของแท่งวัสดุ และรูปด้านขวาเกิดจากการออกแบบใหม่ตามการปฏิบัติตามกฎเกณฑ์บางอย่างของโครงสร้างและถูกแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด โดยมีการเพิ่มหรือลดขนาดของแต่ละแท่งวัสดุดังปรากฏในรูป

(2) *Shape Optimization* เป็นประเภทที่หาความเหมาะสมของรูปร่าง โดยตัวแปรที่ใช้ออกแบบจะอยู่ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันรูปร่างตามขอบเขตของโครงสร้าง จะไม่สามารถสร้างขอบเขตใหม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณี 2 มิติจะไม่สามารถสร้างรูใหม่ได้ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.3 โดยแสดงถึงฟังก์ชันรูปร่างและฟังก์ชันมวลที่น้อยที่สุด พร้อมด้วยการพิจารณาถึงค่าระดับความเครียดให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม



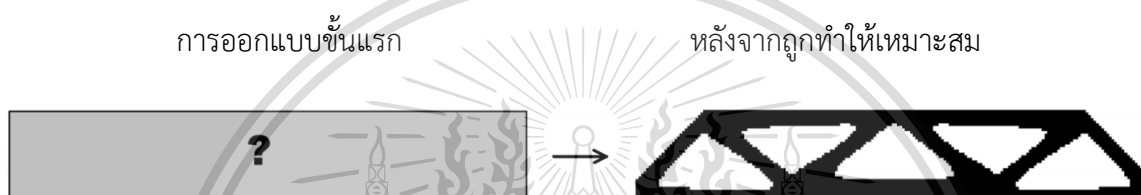
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างปัญหา *shape optimization* [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(3) *Topology Optimization* ถูกใช้ในอย่างกว้างขวางใน structural optimization โดยพื้นฐานแล้วประเภทนี้เป็นประเภทที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการหาความเหมาะสมของการแก้ปัญหา structural optimization ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเราใช้ topology optimization ต้องการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางวัสดุ โดยการที่ยอมให้วางวัสดุที่หนักได้ในพื้นที่ตามขอบเขต หรือยอมให้กำจัดวัสดุส่วนไหนก็ได้ในพื้นที่ตามขอบเขต ในทางทฤษฎีแล้วตัวแปรที่ใช้ออกแบบใน topology optimization มีค่าไม่ต่อเนื่อง (discrete value) และทุกจุดในพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบเป็นตัวแปรที่ใช้ออกแบบหมายความว่ารูปร่างของโครงสร้างใด ๆ สามารถออกแบบได้ทั่วทุกส่วนในขอบเขตของพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบ แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ไม่ได้ เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบจะต้องถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ เพื่อทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element ,FE) และคำนวณ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างปัญหา topology optimization [6]

จากรูปเป็นการออกแบบขั้นแรกเริ่มที่มีแรงกระทำและรูปด้านล่างแสดงถึงผลลัพธ์สุดท้ายของการหาความเหมาะสมโดยแสดงเส้นทางของแรงกระทำที่เหมาะสมที่สุดเพื่อความแข็งแรงสูงสุดตามเงื่อนไขบางอย่าง

จากโดเมนที่ใช้ออกแบบ (design domain) ที่กำหนดจุดประสงค์คือ เพื่อค้นหาการกระจายตัวของวัสดุและช่องว่างที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะแก้ปัญหาโดเมนที่ใช้ออกแบบจะถูกแยกออก โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method ,FEM) และแบ่งโดเมนที่ใช้ออกแบบออกเป็นเอลิเมนต์ที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete elements) หรือเมช (mesh) ผลของปัญหาจะแก้โดยใช้ optimization methods เพื่อหาว่าเอลิเมนต์ใดเป็นวัสดุและเอลิเมนต์ใดไม่เป็นวัสดุ จากการแก้ปัญหาข้างต้นถูกเรียกว่า “ปัญหา 0-1” โดยที่มีเอลิเมนต์อยู่และไม่มีเอลิเมนต์อยู่ซึ่งเป็นปัญหาจำนวนเต็มที่มีสองสถานะที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละเอลิเมนต์หรือสิ่งเหล่านี้เรียกว่า ISE topology (isotropic solid หรือ empty elements)

จำนวนของการผสมผสานที่แตกต่างกัน (different combination) เท่ากับ 2^N เมื่อ N คือจำนวนของเอลิเมนต์ โดยปกติแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model ,FE-model) สามารถให้ผลออกมาเป็นเอลิเมนต์จำนวนนับแสนเอลิเมนต์ได้อย่างง่ายดาย ในทางปฏิบัติแล้วปัญหานี้ไม่สามารถแก้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระบวนการแก้ปัญหาการหาความเหมาะสมที่สุด ด้วย ISE topology โดยหลักประกอบด้วย 2 วิธี คือขั้นตอนวิธีเชิงความหนาแน่น (density method) และขั้นตอนวิธีเชิงทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenization method) ในกระบวนการ density method ที่ใช้ penalization ปกติจะถูกเรียกว่า SIMP method โดยจะกล่าวในงานวิจัยนี้ วิธีการอื่น ๆ ซึ่งจะไม่มีการศึกษาเพิ่มเติมรวมไปถึงวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) หรือขั้นตอนวิธีฮิวริสติก (heuristic method) เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการในหาความเหมาะสม (evolutionary structural optimization, ESO) ซึ่งผู้วิจัยชื่อ Rozvany [7] ชี้ให้เห็นว่า ปัจจุบัน ESO มีการศึกษาแบบ heuristic อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ซึ่งเป็นวิธีค่อนข้างไร้ประสิทธิภาพ ไร้ระเบียบวิธีการและขาดความเป็นเหตุเป็นผล บางครั้งไม่น่าเชื่อถือ มีเส้นโค้งบรรจบที่สับสนวุ่นวายและทำให้ ESO แทบไม่เคยถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม

ก. SIMP Technique ในงานวิจัยครั้งนี้จะกล่าวถึงเพียง Topology Optimization technique ที่เป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดและเป็นวิธีการที่มีการใช้มากที่สุดคือ Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) เป็นการหาความเหมาะสมของรูปร่างโครงสร้าง โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของวัสดุภายใต้โดเมนที่ใช้ออกแบบ โดยส่วนมากโดเมนที่ใช้ออกแบบจะถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ระหว่างการใช้ Finite Elements Analysis technique เพื่อหาพฤติกรรมของโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ เพื่อให้เห็นภาพแนวคิดนี้มากขึ้น สามารถยกตัวอย่างเปรียบเทียบให้เข้าใจดังนี้ หน้าจอโทรทัศน์เปรียบเสมือนพื้นที่ที่ต้องการออกแบบโดยมีขอบเขตตามขอบจอโทรทัศน์ และในขั้นตอนการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element, FE) จะทำให้หน้าจอขนาดใหญ่แต่มีพิกเซลขนาดเล็กจำนวนมากและพิกเซลเปรียบเสมือนวัสดุชิ้นเล็ก ๆ จะทำให้สามารถสร้างภาพของโครงสร้างที่ได้รับการหาความเหมาะสมแล้ว โดยการเปิดและปิดแต่ละพิกเซล จะเห็นได้ว่า SIMP technique เกี่ยวข้องกับการใช้ Finite Elements Analysis technique ของพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ ตามมาด้วยการหาความเหมาะสมของค่าความหนาแน่นในแต่ละ FE ภายใต้การแบ่งเอลิเมนต์ (meshing model) จะได้โครงสร้างที่ 1 ที่ถูกเปลี่ยนค่าความหนาแน่นในแต่ละเอลิเมนต์ และจากโครงสร้างที่ 1 จะถูกหาความเหมาะสมอีกครั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการหาความเหมาะสมของรูปร่างโครงสร้างและจะได้โครงที่ 2 และจะถูกหาความเหมาะสมอีกครั้ง หรือกล่าวได้ว่าขั้นตอนดังกล่าวจะถูกทำซ้ำ ๆ จนทำให้เข้าใกล้ค่าคำตอบมากที่สุดหรือตามขอบเขตของความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด

เป็นเรื่องน่ายินดีที่มีการพัฒนาการออกแบบสิ่งที่ถูกเรียกว่า “0-1” โดยการแบ่งและจัดสรรพื้นที่ที่ต้องการออกแบบให้มีทั้งส่วนที่ทึบและส่วนที่ว่างเปล่า และมีความพยายามในการแก้ปัญหา 0-1 อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวเป็นสิ่งที่ทำไม่ได้หากไม่มีการกำหนดจำนวนของ FE และมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจำลองพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ ใน SIMP technique แก้ปัญหาโดยการระบุหรือกำหนดตัวแปร โดยการกำหนดวัสดุในแต่ละ FE ให้เป็นตัวแปรที่ใช้ออกแบบแบบต่อเนื่อง จากเดิมที่เป็นตัวแปรที่ใช้ออกแบบแบบไม่ต่อเนื่อง ทำให้สามารถใช้ขั้นตอนวิธีโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (mathematical programming methods) ซึ่งช่วยในการแก้ปัญหาจากเดิมให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วัสดุที่เป็นความหนาแน่นตรงกลาง (intermediate density) เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นที่อยู่ระหว่างทึบและว่างเปล่าหรือไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นทึบหรือช่องว่าง (ในตอนแรกกำหนดให้มีความเป็นไปได้ของวัสดุได้เพียง 2 ค่า คือ 0 เป็นว่างเปล่าและ 1 เป็นทึบ) โดยปกติแล้วเนื่องจาก intermediate density ไม่สามารถหาความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างที่อยู่ในโลกแห่งความเป็นจริงได้ เพื่อหลีกเลี่ยงวัสดุดังกล่าว ในขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบ Penalization ซึ่งเป็นการลดค่าความแข็งของวัสดุดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ใน SIMP technique โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของวัสดุกับความหนาแน่นดังสมการ

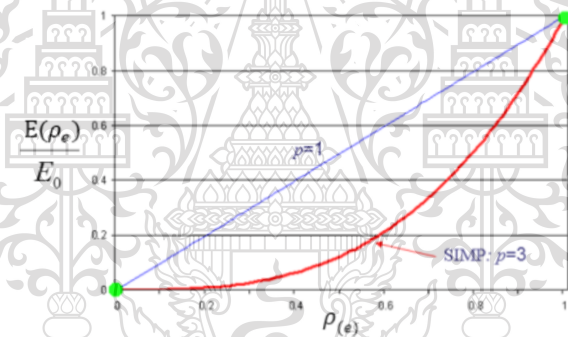
$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสของยัง

ρ_e คือ density factor ที่มีความสัมพันธ์กับ elements (e)

E_0 คือ โมดูลัสของยังที่ถูกกำหนดค่าในตอนแรก

P คือ ค่า Penalty factor



รูปที่ 2.5 กราฟการลดลงของความแข็งของวัสดุที่เป็น intermediate density ใน SIMP technique [8]

ข. Sensitivity Analysis ในการหาความเหมาะสมจะมีกระบวนการวนซ้ำ (iterative process) ในกระบวนการนี้ ตัวแปรที่ใช้ออกแบบจะถูกเปลี่ยนค่าไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจะแก้ปัญหาของการหาความเหมาะสมได้สำเร็จ ในกระบวนการวนซ้ำ sensitivity analysis จะเป็นตัวตัดสินว่าตัวแปรที่ใช้ออกแบบในแต่ละตัวจะถูกเปลี่ยนค่าอย่างไร และในการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรการตอบสนองถูกคำนวณตามตัวแปรที่ใช้ออกแบบจะได้ผลลัพธ์เป็น 2 อย่างคือ ข้อมูลและจำนวนที่มีลักษณะและค่ามากหรือน้อยเพียงใดโดยขึ้นอยู่กับค่าการเพิ่มหรือลดค่าของแต่ละตัวแปรที่ใช้ออกแบบที่ได้รับการเปลี่ยนค่าจากกระบวนการวนซ้ำ มีคำอธิบายเชิงลึกในทางคณิตศาสตร์สามารถเข้าไปอ่านตามรายงานที่แนะนำได้ที่

“Klarbring, Anders; W.Christensen, Peter; An Introduction to Structural Optimization, ISBN 978-1-4020-866-6, 2009”

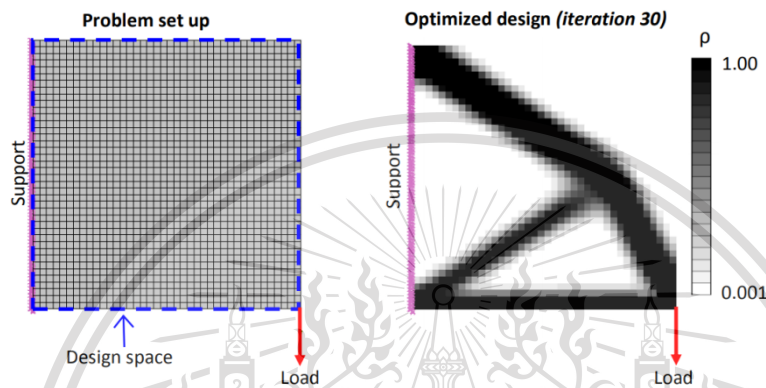
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

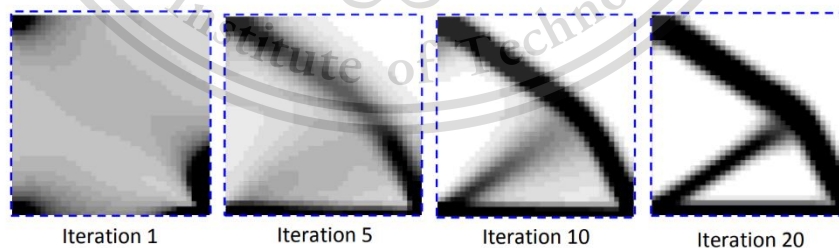
ค. *Compliance* โดยปกติแล้วจะมีการตอบสนองของความแข็งเกร็ง (stiffness) ของโครงสร้างในการหาความเหมาะสมงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Altair OptiStruct จะมีการใช้ compliance ซึ่งสามารถอธิบายความหมายสั้น ๆ ได้ว่า compliance คือ พลังงานความเครียด (strain energy) ของโครงสร้างและถูกนำไปพิจารณา โดยจะมีค่าแปรผกผันกันกับความแข็งของโครงสร้าง ดังนั้น จะมีการกำหนดให้ compliance มีค่าน้อยที่สุดเพื่อที่จะให้ stiffness มีค่ามากที่สุด

ง. ยกตัวอย่าง *Topology Optimization*



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างปัญหาการหาความเหมาะสมที่ถูกสร้างขึ้นและผลลัพธ์ของ *topology optimization* [9]

จากภาพฟังก์ชันวัตถุประสงค์ถูกกำหนดเป็นค่าน้อยที่สุดตาม compliance ของโครงสร้าง โดยมีตัวแปรที่ใช้ออกแบบคือ วัสดุที่ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปด้านซ้ายและในรูปด้านขวาความี constraint เป็น equilibrium constraint และมีการยอมให้มีวัสดุมากที่สุดเท่ากับ 30% ของพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการวนซ้ำแต่ละครั้งของ *topology optimization* [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

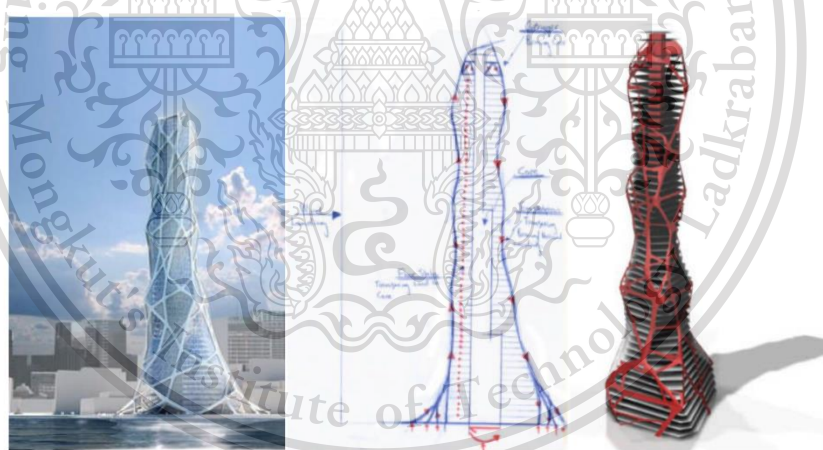
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.4 Topology Optimization ในการออกแบบอาคารสูง

การหาความเหมาะสมของโครงสร้างอาคารสูงที่มีความซับซ้อน

เพื่อให้ได้เห็นภาพมากขึ้นมีตัวอย่างของกลุ่มวิศวกรรมโยธาที่มีการใช้ topology optimization ในการออกแบบโครงสร้างอาคารสูงที่มีความซับซ้อนทางเรขาคณิต จึงมีการเสนอของหอคอยที่ตอบสนองความต้องการทางด้านสถาปัตยกรรมแบบ “freeform” โดย Bionic Tower เป็นการเสนองานสถาปัตยกรรมสำหรับหอคอยสูงใน Abu Dhabi ดังแสดงในรูปที่ 2.8ก. โครงการนี้ถูกพัฒนาจนถึงปี 2007 การจัดเรียงของ braced outrigger structural system และถูกเลือกให้ใช้กับ Bionic Tower ดังแสดงในรูปที่ 2.8ข. โดยที่แกนของโครงสร้างถูกทำให้มีความมั่นคงและแข็งแรงโดยชุดของ structural elements ตามขอบนอกสุดของอาคาร แกนกลางถูกเชื่อมกับ external bracing elements โดยโครงถักที่อยู่จุดยอดของหอคอย outrigger-braced ถูกใช้ตามความตั้งใจของสถาปัตยกรรมของโครงสร้างที่มองเห็นได้จากภายนอก และเป็นวิธีแก้ปัญหสำหรับหอคอยที่มีความสูงนี้ แกนกลางถูกเชื่อมกับเสาที่อยู่ขอบนอกสุดของอาคารโดยชุดโครงถักในแนวนอน จากการศึกษา topology optimization โดยการคิดแรงกระทำทางด้านข้าง ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบผิวนอกของหอคอยและโครงถักที่เชื่อมกับขอบนอกของผิวได้



ก.

ข.

ค.

รูปที่ 2.8

ก. ความทะเยอทะยานของสถาปัตยกรรมของ *Bionic Tower*

ข. แนวคิด *braced outrigger structural system* ถูกประยุกต์ใช้กับ *Bionic Tower*

ค. ผลของจากการศึกษา *topology optimization* โดยพิจารณาจากภายนอกของ *Bionic Tower* ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า *designable domain* [10]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แม้ว่าจะมีรูปร่างที่แปลกประหลาดอย่างมากแต่ก็พบว่าแต่ละส่วนของเส้นทางการรับน้ำหนัก (load paths) ของโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถระบุได้จากผลลัพธ์ของ topology optimization ดังแสดงในรูปที่ 2.8ค. การตรวจสอบอย่างละเอียดของโครงถักที่กำลังเชื่อมต่อกันของแกนกลางกับผิวนอกในรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าโครงถักที่มีเหตุผลอย่างสมเหตุสมผลซึ่งมีความคล้ายคลึงกันอย่างมากกับวิธีแก้ปัญหาที่พบเห็นได้ในวรรณกรรมที่เกี่ยวกับโครงร่างของโครงถัก (truss layouts) นอกจากนี้ความสวยงามของรูปแบบโครงสร้างยังเข้ากันได้ดีกับความตั้งใจแรกเริ่มทางสถาปัตยกรรมแบบ “freeform” ของสถาปนิกและลูกค้า



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโครงถักตามเหตุผลที่ถูกแนะนำสำหรับตัวยึด
ในผลลัพธ์ของการศึกษา *topology optimization* [10]

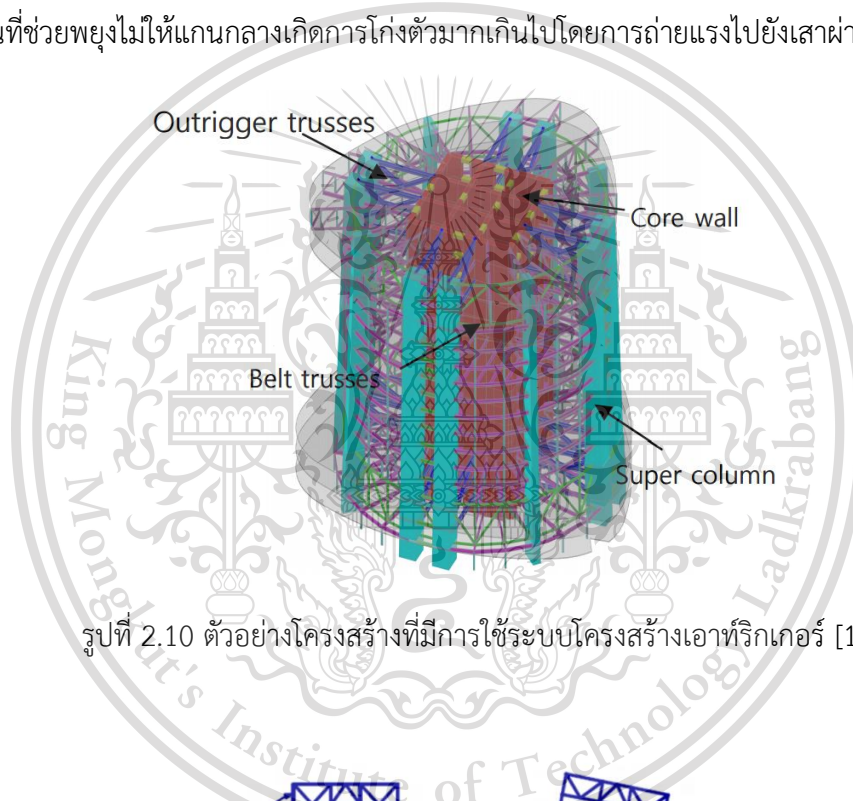
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

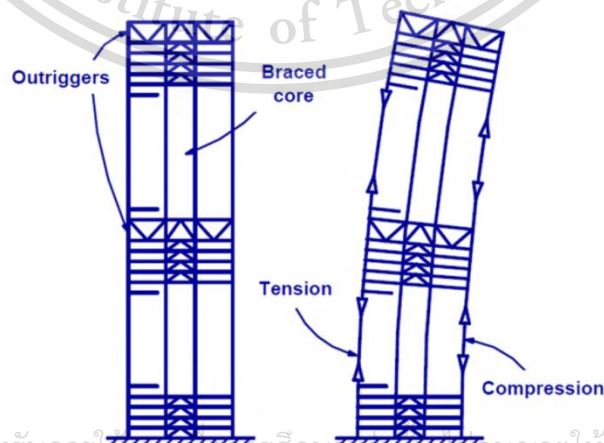
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.5 Outrigger Structural System

ระบบนี้เป็นระบบโครงสร้างต้านทานการรับน้ำหนักด้านข้าง โดยทั่วไปโครงสร้างประกอบไปด้วยแกนกลาง (core) หรือที่ถูกรเรียกว่า “ผนังรับแรงเฉือน” ที่อยู่ตรงกลางของตัวอาคารและมีเอ้าท์ริกเกอร์ (outrigger) ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างแกนกลางกับเสาขนาดใหญ่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 และที่เพิ่มขึ้นมาคือ belt trusses ทำหน้าที่เชื่อมเสาแต่ละต้น ระบบโครงสร้างชนิดนี้เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพมากและถูกใช้เป็นหนึ่งในระบบโครงสร้างที่ทำหน้าที่ลดการโก่งตัวของอาคารสูงจากแรงกระทำทางด้านข้างอันเนื่องจากแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว ระบบโครงสร้างนี้สามารถลดความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดจากแรงกระทำเหล่านั้นได้ การตอบสนองโครงสร้างของระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ (outrigger structural system) ขึ้นอยู่กับแรงดึงและแรงอัดของเสาที่อยู่ล้อมรอบ อาจกล่าวได้ว่าเสาเปรียบเสมือนขาที่อยู่ล้อมรอบโดยมีเอ้าท์ริกเกอร์เป็นเหมือนแขนที่ช่วยพยุงไม่ให้แกนกลางเกิดการโก่งตัวมากเกินไปโดยการถ่ายแรงไปยังเสาผ่านเอ้าท์ริกเกอร์



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างโครงสร้างที่มีการใช้ระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ [11]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้ให้ด้วยใจดี และต้องอ้างถึงชื่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

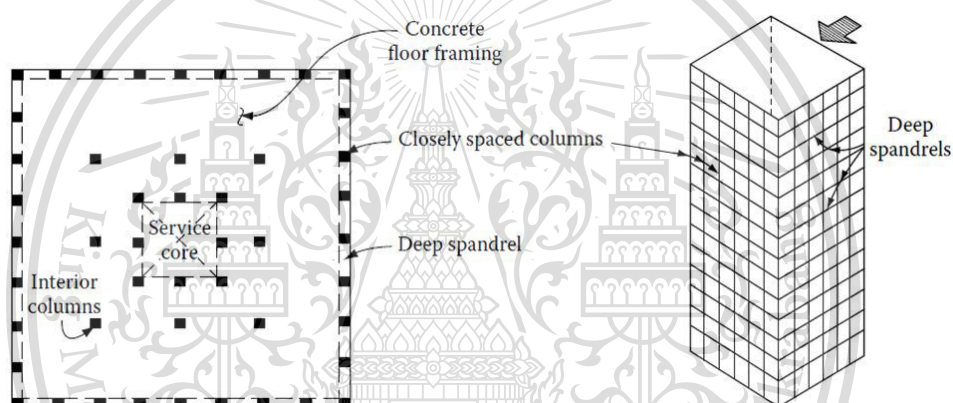
รูปที่ 2.11 การตอบสนองโครงสร้างของระบบโครงสร้างเอ้าท์ริกเกอร์ [12]

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(1) ประวัติและความเป็นมาของระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ในอาคารสูง

นับตั้งแต่มีการพัฒนา bundled-tube frame systems ที่เป็นระบบโครงสร้างที่ใช้กับอาคารสูง 100 ชั้นขึ้นไป ต่อมาในปี 1960 และ 1970 ข้อเสียของระบบโครงสร้าง bundled-tube frame systems ถูกพัฒนาและแก้ไขใหม่เป็น outrigger structural system ยกตัวอย่างสิ่งก่อสร้างที่มีความสูงเช่น World Trade Center Twin Towers ในเมืองนครนิวยอร์กและ Willis Tower ในเมืองชิคาโก โดยมีเสาล้อมรอบอาคาร (closely spaced columns) และมี deep spandrel ซึ่งเป็นเหมือนคานกลีค ดังรูปที่ 2.12 โดยทั้งสองถูกเชื่อมเข้ากับ โครงข้อแข็งรอบอาคาร (external frames) โครงข้อแข็งเหล่านี้รับแรงด้านข้างเกือบทั้งหมด โดยที่ core ของอาคารแทบจะไม่มีรับแรงทางด้านข้าง แม้ว่าโครงสร้าง framed-tube system จะมีประสิทธิภาพมากและแข็งแรงกว่า outrigger structural system แต่เสาของโครงสร้าง Framed-tube system มีระยะห่างที่ใกล้กันส่งผลต่อความสวยงามและในบางครั้งไม่ตอบโจทย์การใช้งานทางด้านสถาปัตยกรรมในอาคารสูง



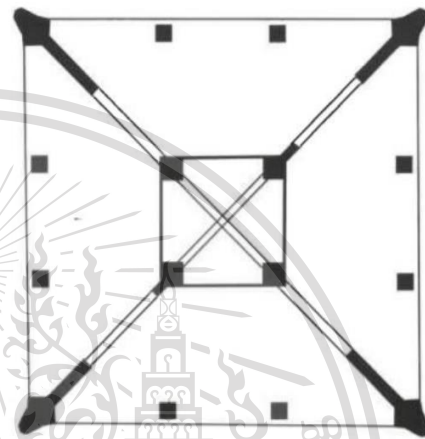
รูปที่ 2.12 อาคารประเภท framed-tube system [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

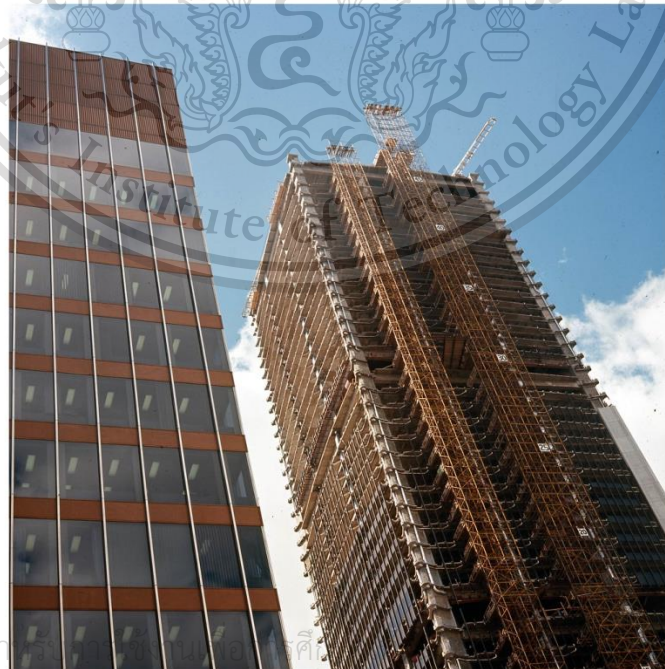
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตัวอย่างของอาคารยุคแรกที่ใช้ outrigger structural system ที่มีความสูง 47 ชั้นถูกสร้างเสร็จในปี 1964 ที่มีชื่อว่า Tour De La Bourse ในเมืองมอนทรีออล ประเทศแคนาดา ดังรูปที่ 2.13 อาคารหลังนี้เป็นอาคารคอนกรีตหลังแรกที่ใช้ outrigger structural system การออกแบบอาคารนี้ใช้เสาจำนวนน้อยแต่มีขนาดใหญ่เพื่อการรับน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ โดยที่เสาขนาดใหญ่ถูกวางอยู่ในแต่ละมุมของอาคารโดยมี braced outrigger trusses จำนวน 4 ชั้น ทำหน้าที่เชื่อมต่อเสาขนาดใหญ่กับ core ของอาคาร และในแต่ละด้านของอาคารจะมีเสานขนาดเล็กทำหน้าที่เหมือนระบบการรับแรงย่อย ๆ เพื่อโอนถ่ายแรงไปที่เสาขนาดใหญ่



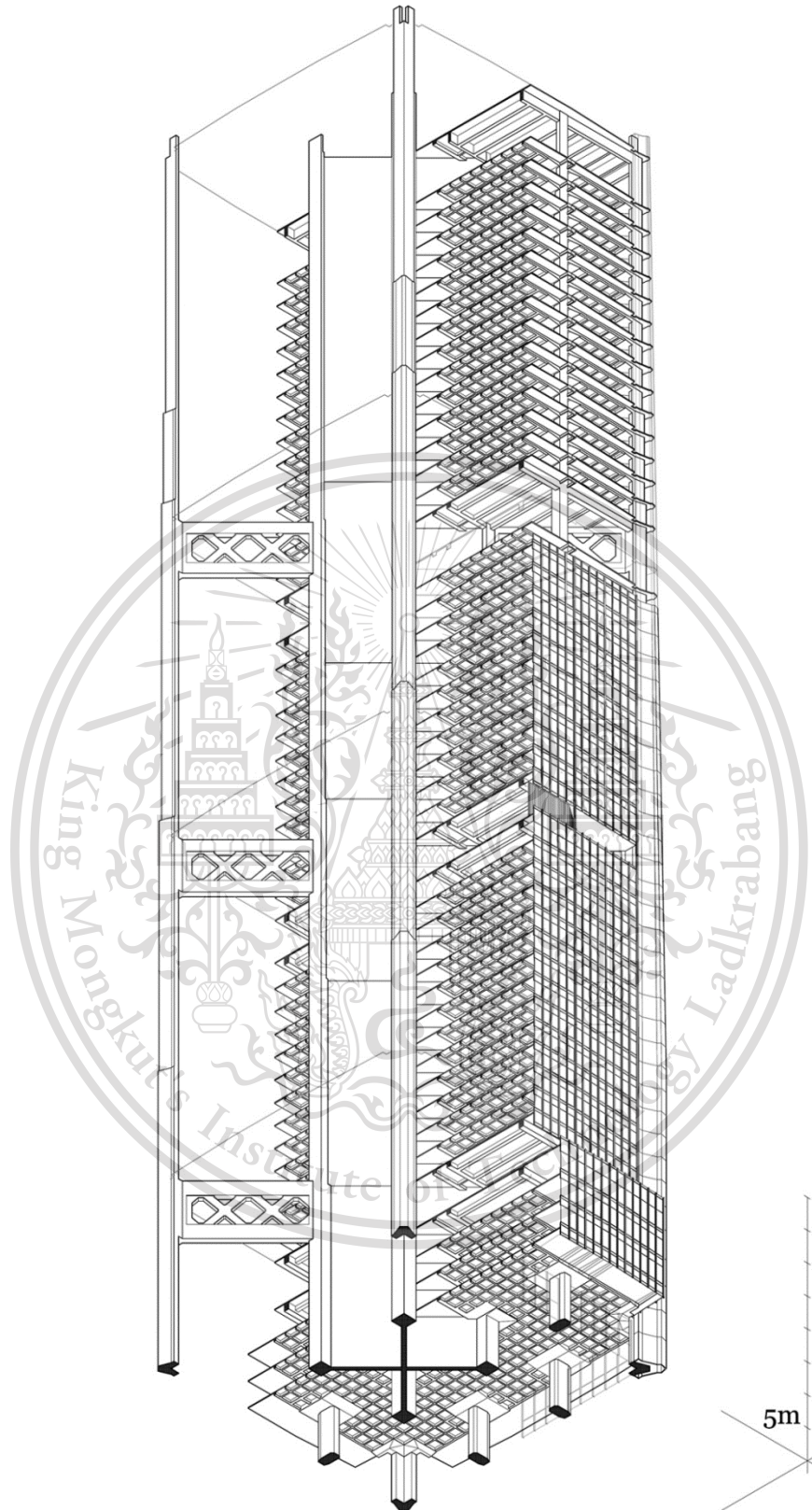
รูปที่ 2.13 อาคาร *Tour de la Bourse* และ *outrigger layout on plan* (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2012)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกมุ่งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.14 *Tour de la Bourse* อยู่ระหว่างการก่อสร้าง (skyscraperpage.com)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2.15 อาคารตลาดหลักทรัพย์หรือ Tour De La Bourse
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในเมืองในเชียงใหม่หรืออล, axonometric view [14]

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ต่อมา steel-framed outrigger system ถูกใช้เป็นครั้งแรกในการออกแบบอาคารความสูง 41 ชั้น ถูกสร้างเสร็จในปี 1972 ที่มีชื่อว่า 140 William Street ในเมืองเมลเบิร์น ประเทศออสเตรเลีย และมีอีกอาคารชื่อ U.S. Bank Centre จำนวน 42 ชั้น ในเมืองมิลวอกี, วิสคอนซิน ในรูปที่ 2.16 การออกแบบทั้งสองอาคารมีความคล้ายกับโครงสร้าง conventional outrigger และ belt trusses ซึ่งวางไว้ที่ตำแหน่งกลางและบนสุดของตัวอาคาร นอกจากนี้ belt trusses ถูกวางไว้ด้านล่างของตัวอาคารเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งระยะห่างของเสา



รูปที่ 2.16 140 William Street (ซ้าย) [15] และ U.S. Bank Center (ขวา) [16]



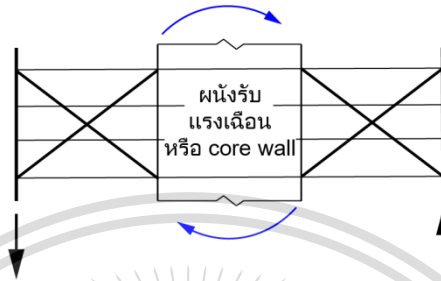
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

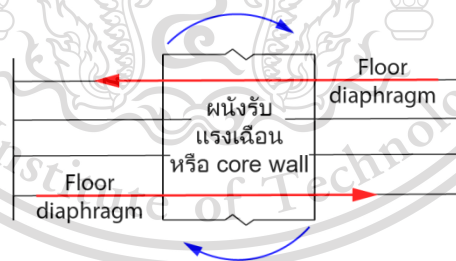
(2) ประเภทของระบบเอ้าท์ริกเกอร์ โดยพื้นฐานแล้วระบบเอ้าท์ริกเกอร์เป็นตัวที่เชื่อมกับ core ของอาคาร สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [17] ดังนี้

ประเภทที่ 1 คือ conventional outrigger system หรือ direct outrigger system เป็นประเภทที่ outrigger trusses ถูกเชื่อมเข้าโดยตรงระหว่าง core กับเสา เพื่อด้านทานการหมุนตัวของ core และแปลงส่วนที่เป็นโมเมนต์ใน core ให้เกิดเป็นแรงคู่ควบที่เสา

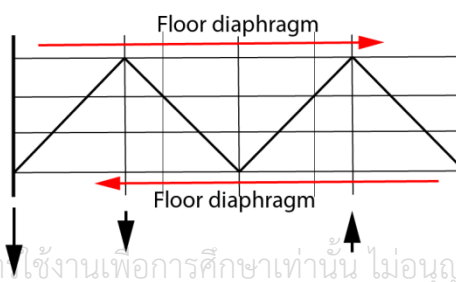


รูปที่ 2.17 การถ่ายแรงใน conventional outrigger system

ประเภทที่ 2 คือ virtual outrigger systems หรือ indirect outrigger และ belt truss systems เป็นประเภทที่มีความหมายตามชื่อที่ว่า “virtual” ที่แปลว่าเสมือนซึ่งเป็นการถ่ายโอนโมเมนต์จาก core ไปยังโครงสร้างที่อยู่รอบ ๆ และไม่มีการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่าง trusses กับ core แนวคิดเบื้องหลังของ virtual outrigger systems เป็นหลักการที่ใช้ในไดอะแฟรมพื้น (floor diaphragms) โดยทำให้โครงสร้างในระนาบมีความแข็งแรงมากเพื่อใช้ระนาบนั้นเป็นตัวกลางทำหน้าที่ถ่ายโอนแรงจาก core ไปยัง trusses



รูปที่ 2.18 การถ่ายแรงจาก core สู่อุปกรณ์ floor diaphragms



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 2.19 การถ่ายแรงจาก floor diaphragms สู่อุปกรณ์ belt truss ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wael Alhaddad และคณะ [18] มีการนำเสนอทฤษฎีและวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้งานวิจัยนี้ โดยได้รับการตรวจสอบในรูปแบบของคู่มือหรือขั้นตอนสำหรับการออกแบบ optimum topology และขนาดของ outrigger and belt-truss system ทั้งในขั้นตอนการออกแบบเริ่มต้นและขั้นสุดท้าย มีการสรุปผลการค้นพบและนำเสนอในลักษณะที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างที่เหมาะสมและการออกแบบขนาดของระบบเอาทริกเกอร์

Farshid Nouri และ Payam Ashtari [19] มีการนำเสนอวิธีการเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมของเอาทริกเกอร์สองตำแหน่งในอาคารสูง 30 ชั้น 40 ชั้น และ 45 ชั้น โดยใช้วิธี genetic algorithm (GA) และสรุปถึงปัจจัยที่มีส่วนที่ทำให้ตำแหน่งที่เหมาะสมของเอาทริกเกอร์เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังพิจารณาระหว่างการลดน้ำหนักของโครงสร้างแบบจำลองกับขีดจำกัดความรู้สึกสบายของสถานะการใช้งาน (serviceability limit state)

Emil Norberg และ Sebastian Lövgren [9] มีการศึกษาเกี่ยวกับ topology optimization ของโครงสร้างด้านหน้ารถ โดยใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของคานและตัวยึดหน้ารถ เพื่อให้ได้โครงสร้างด้านหน้าที่มีความแข็งแรงสูงและเพื่อการขับเคลื่อนที่ดียิ่งขึ้น มีการอธิบายแนวทางต่าง ๆ และจะนำเสนอประสบการณ์ของเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

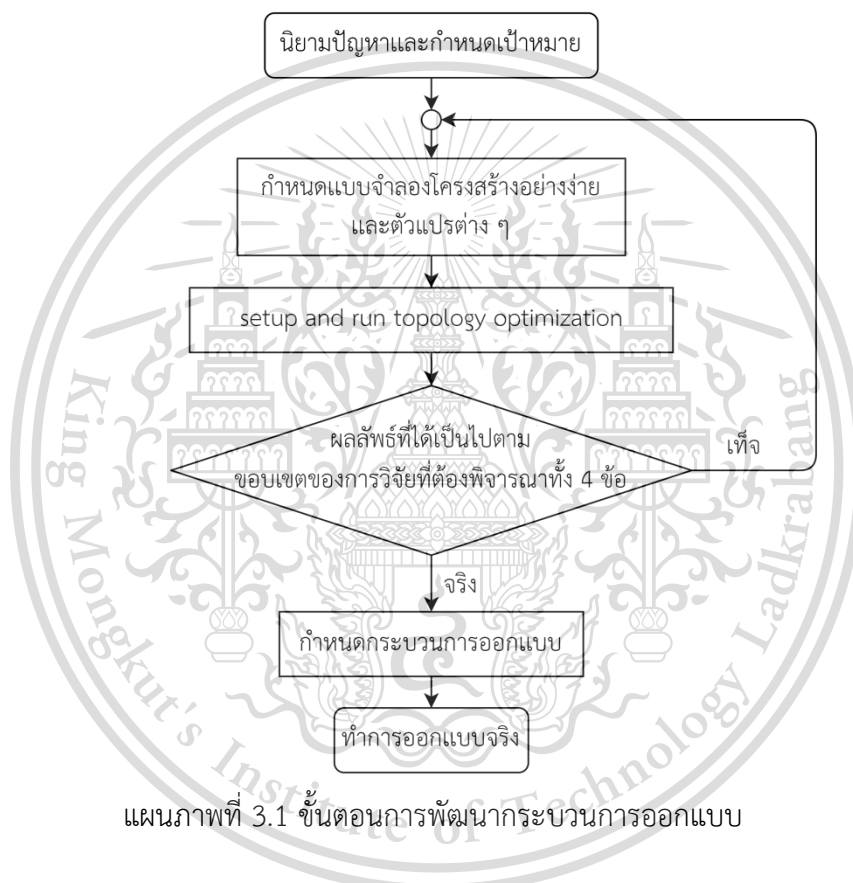
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบระบบโครงสร้างเอาทริกเกอร์ ซึ่งระบบดังกล่าวถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของสถาปนิกในการออกแบบอาคารสูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านการออกแบบ เช่น ใช้เวลานานและต้นทุนการออกแบบสูง ซึ่งผู้วิจัยเสนอแนวทางการแก้ปัญหาโดยใช้ topology optimization เข้ามาช่วยในการออกแบบ โดยผู้วิจัยมีการพัฒนากระบวนการออกแบบ ดังแผนภาพที่ 3.1



กระบวนการออกแบบถูกนำมาใช้ในการทดลองและมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งดำเนินงานวิจัยเชิงทดลองตามวิธีการทางวิทยาศาสตร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. นิยามปัญหาการทดลอง
2. ตั้งวัตถุประสงค์และสมมติฐานการทดลอง
3. กำหนดตัวแปรการทดลอง

4. ออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองตามแบบการทดลองที่วางไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

5. บันทึกผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1 นิยามปัญหา

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบผลิตภัณฑ์คือ วัสดุที่ใช้ การเลือกวัสดุให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงของผลิตภัณฑ์จะทำให้วัสดุนั้นถูกใช้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ เช่น การเลือกวัสดุที่เป็นเหล็กใช้ทำลวดสลิงเพื่อใช้รับแรงดึง ในการออกแบบระบบโครงสร้างขนาดใหญ่มีการใช้วัสดุเป็นจำนวนมากยิ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงวัสดุที่ใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการ วัสดุแต่ละชนิดอาจให้ผลลัพธ์ของการออกแบบรูปทรงโครงสร้างที่เหมาะสมที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น เมื่อสถาปนิกต้องการให้ตำแหน่งเอ้าท์ริกเกอร์อยู่ชั้นใดชั้นหนึ่งของอาคาร วิศวกรจึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมที่ให้ตำแหน่งที่ดีที่สุดของเอ้าท์ริกเกอร์และสอดคล้องกับความต้องการของสถาปนิก เพื่อแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนชนิดวัสดุมีผลทำให้รูปทรงโครงสร้างที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงไปจึงได้มีการทำการทดลองนี้

3.2 ตั้งวัตถุประสงค์และสมมติฐานการทดลอง

3.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

เพื่อทดลองการเปลี่ยนชนิดวัสดุของระบบโครงสร้างว่ามีผลต่อตำแหน่งและปริมาตรระบบเอ้าท์ริกเกอร์และความเค้นของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมอย่างไร

3.2.2 สมมติฐานการทดลอง

การออกแบบที่หาระบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดเหมือนกับการแก้ปัญหาเชิงคณิตศาสตร์ การเปลี่ยนค่าตัวแปรวัสดุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปทรงของระบบโครงสร้างที่เกิดขึ้นหรือมีผลต่อค่าตัวแปรปริมาตร ตำแหน่งเอ้าท์ริกเกอร์ และความเค้นที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ผลการทดลองอาจให้ความสัมพันธ์เชิงตัวเลข

3.3 กำหนดตัวแปรการทดลอง

3.3.1 ตัวแปรต้น

แบบจำลองแต่ละแบบที่มีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งการทดลองต้องการศึกษาวัสดุทั้ง 3 ชนิด โดยในแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างกันดังตาราง ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุชนิดที่	ความหนาแน่น (ton/mm^3)	มอดุลัสของยัง (MPa)	อัตราส่วนของปัวซอง
1	2.4×10^{-9}	20,000	0.20
2	2.4×10^{-9}	20,000	0.25
3	2.4×10^{-9}	10,000	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากขอบเขตงานวิจัยผู้วิจัยกำหนดให้ระบบโครงสร้างประกอบด้วย เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือน และระบบเอทริกเกอร์ และจากตารางที่ 3.1 ซึ่งมีวัสดุอยู่ 3 ชนิด ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองได้มากกว่า 10 แบบจำลอง แต่ผู้วิจัยต้องการทดลองเพียงแค่ 9 แบบจำลอง ดังแสดงในตารางนี้ ตารางที่ 3.2 แบบจำลองที่มีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันออกไป

แบบจำลองที่	เสาและผนังรับแรงเฉือน ใช้วัสดุชนิดที่	ระบบเอทริกเกอร์ ใช้วัสดุชนิดที่	พื้น ใช้วัสดุชนิดที่
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
4	1	2	1
5	2	2	1
6	3	2	1
7	1	3	1
8	2	3	1
9	3	3	1

3.3.2 ตัวแปรตาม

- 1) ปริมาตรของระบบเอทริกเกอร์ที่เปลี่ยนไป
- 2) ตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์ที่เปลี่ยนไป
- 3) ความเค้นที่เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละแบบจำลอง

3.3.3 ตัวแปรควบคุม

- 1) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ ประกอบไปด้วย 2 ซอฟต์แวร์ ดังนี้

ซอฟต์แวร์หลัก: HyperMesh Optistruct และ HyperView

ซอฟต์แวร์ช่วย: SolidWorks

- 2) รูปทรงแบบจำลองของระบบโครงสร้างอาคาร กำหนดให้มีลักษณะคล้ายกับอาคาร

Tour de la Bourse แต่กำหนดให้มีความสูง 400 เมตร ทั้งหมด 50 ชั้น และมีส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างโดยแบ่งเป็น 3 ส่วนประกอบ ดังนี้

(1) เสาและผนังรับแรงเฉือน เสาของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 4 ตารางเมตร ทั้งหมด 4 ต้น อยู่ในแต่ละมุมของอาคาร และผนังรับแรงเฉือนอยู่ตรงกลางเป็นรูปกรอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความหนาเท่ากับ 1 เมตร มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 72 ตารางเมตร

(2) พื้น เป็นพื้นไร้คานมีความหนาเท่ากับ 0.5 เมตร เหมือนกันทุกชั้น

(3) ระบบเอทริกเกอร์ ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเอทริกเกอร์และส่วนเสา

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ขยายเพิ่มเติม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) **แรงกระทำกับระบบโครงสร้าง** กำหนดให้เป็นแรงลมแรงลมตามมาตรฐาน ASCE 7-10 และการคำนวณแรงลมที่กระทำกับแบบจำลองอาคารโดยกำหนดให้เป็นอาคารที่มีการปิดล้อมตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ราบ และใช้ความเร็วลมพื้นฐานเท่ากับ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

4) **ค่าการโก่งตัวของแบบจำลอง** กำหนดให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบที่จุดบนสุดของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ $0.0025H$ (H : ความสูงของอาคาร) และยอมให้คลาดเคลื่อนเท่ากับ $\pm 1\%$

5) **การตั้งค่าพื้นฐานซอฟต์แวร์** ตัวแปรที่ถูกกล่าวถึงในการทดลองนอกเหนือจาก ตัวแปรต้น ตัวแปรตามและตัวแปรเพิ่มเติม ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรควบคุม

3.3.4 **ตัวแปรเพิ่มเติม** จะมีการกำหนดค่า threshold ซึ่งอาจถูกเปลี่ยนค่าตามแต่ละกรณีเพื่อให้ค่าการโก่งตัวเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในตัวแปรควบคุม



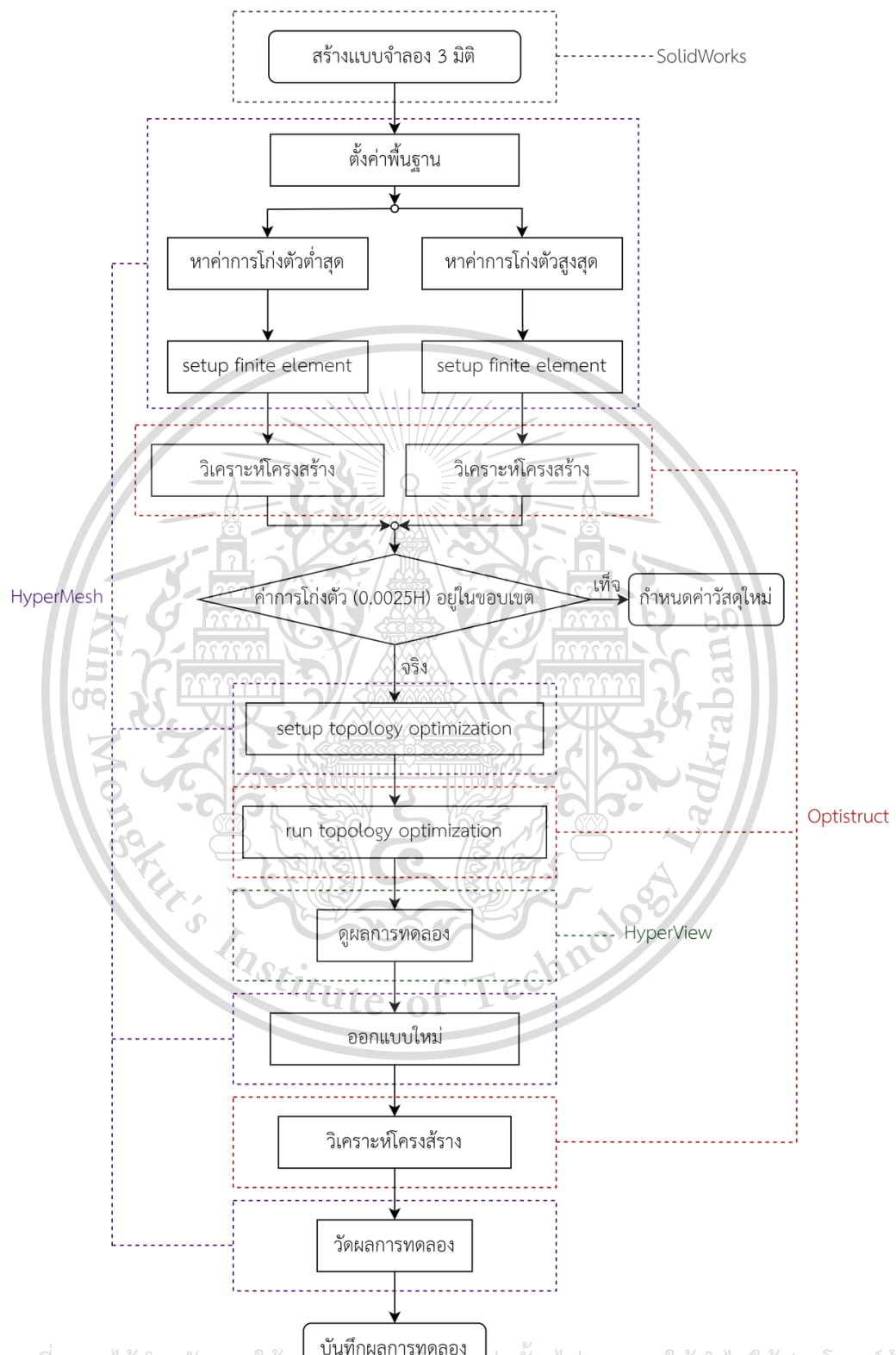
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4 การทดลอง

จากการศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์เบื้องต้นทำให้ได้การทดลองดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และใช้อย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.1 สร้างแบบจำลอง 3 มิติ

สร้างแบบจำลองระบบโครงสร้างอาคารเพื่อใช้ในการทดลองถูกแบ่งเป็น 3 องค์ประกอบหลัก ดังนี้

- 1) แบบจำลองเสาและผนังรับแรงเฉือน
- 2) แบบจำลองพื้น
- 3) แบบจำลองระบบเอ้าท์ริกเกอร์ ซึ่งประกอบด้วย เอ้าท์ริกเกอร์และเสายายเพิ่มเติม

3.4.2 ตั้งค่าพื้นฐาน

- 1) นำไฟล์เข้า นำไฟล์ที่ได้สร้างแบบจำลองเข้ามาในตัวซอฟต์แวร์
- 2) แบ่งกลุ่มแบบจำลองโครงสร้าง แบ่งออกเป็นแบบ 4 กลุ่ม ประกอบด้วย Core and columns Floors Outriggers และ Extended columns
- 3) กำหนดค่าวัสดุ
- 4) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ กำหนดให้มี 6 คุณสมบัติของ 3 วัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 คือส่วนที่ต้องการคงตัวไว้ และส่วนที่ 2 คือส่วนที่ต้องการทำให้เหมาะสม
- 5) กำหนดคุณสมบัติของระบบโครงสร้าง

ส่วนที่ 1 คือส่วนที่ต้องการคงตัวไว้คือ Core and columns และ Floors

ส่วนที่ 2 คือส่วนที่ต้องการทำให้เหมาะสมคือ Outriggers และ Extended columns
- 6) กำหนดขนาดของเอลิเมนต์ ในขั้นตอนการ mesh จะ mesh ทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อให้ทั้ง 4 ส่วนประกอบถูกแยกวิเคราะห์อย่างชัดเจน ทำให้การวิเคราะห์มีความสะดวกและเร็วกว่าการ mesh ภายในครั้งเดียว
- 7) กำหนดแรงกระทำกับโครงสร้าง ฐานรากของโครงสร้างกำหนดเป็นแบบยึดแน่นและพื้นจะเป็นโครงสร้างที่รับแรงกระทำทั้งหมดโดยกำหนดให้แรงกระทำด้านข้างที่ node ของพื้นซึ่งมีทั้งหมด 48 nodes ต่อหนึ่งชั้นในหนึ่งด้าน
- 8) ตั้งค่าการเพิ่มแรงกระทำ เป็นชนิด linear static โดยกำหนดให้ Single Point Constraints, SPC เป็น Load Collectors ที่เป็นของฐานรากแบบยึดแน่น และกำหนดแรงกระทำเป็นเป็น LOAD

3.4.3 หาค่าการโก่งตัว

- 1) หาค่าการโก่งตัวสูงสุด โดยการกำหนดหน้าสัมผัสของแต่ละส่วนประกอบ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะกำหนดให้หน้าสัมผัสของ Core and columns สัมผัสกับ Floors โดยกำหนดให้หน้าสัมผัสที่มีคุณสมบัติชนิดยึดแน่น เสร็จแล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้าง
- 2) หาค่าการโก่งตัวต่ำสุด โดยในขั้นตอนนี้จะกำหนดให้หน้าสัมผัสของ Core and columns สัมผัสกับ Outriggers และ ให้หน้าสัมผัสของ Core and columns สัมผัสกับ Extended columns โดยกำหนดให้หน้าสัมผัสทั้งสองมีคุณสมบัติชนิดยึดแน่น เสร็จแล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.4 Setup and Run Topology Optimization

ก่อนจะทำการดำเนินงานวิเคราะห์ที่มีกำหนดค่าตัวแปรควบคุมในซอฟต์แวร์ดังนี้

1) Design Variables โดยการเลือกคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติส่วนที่ 2 คือ คุณสมบัติของ Extended columns และ Outriggers และกำหนดเพิ่มอีก 2 อย่าง ดังนี้

(1) กำหนดให้มีขนาดเล็ที่สุดของการออกแบบ ซึ่งเป็น minimum member size control (MINDIM) ให้มีขนาดเท่ากับ 7000 mm

(2) กำหนดให้การออกแบบให้มีความสมมาตรในระนาบ ซึ่งต้องการให้ระนาบ yx และระนาบ yz เกิดการสะท้อนบนระนาบให้ได้ผลลัพธ์ของการออกแบบรูปทรงที่มีสัดส่วนเท่ากัน โดยมีจุดกำเนิด $(0,0,0)$ อยู่ที่กึ่งกลางของแบบจำลอง

2) Optimization Responses โดยกำหนดให้มี 2 ตัวแปรคือ mass และ displacement ซึ่งการกำหนดการตอบสนองของ mass เป็นชนิดมวลและมีการวิเคราะห์แบบรวมผลมวลที่ถูกกำหนดเท่านั้น ในที่นี้กำหนดให้ตอบสนองต่อคุณสมบัติของ Outriggers และ Extended columns ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการหาค่า จากตัวแปรควบคุมที่ได้กำหนดไว้คือ การกำหนดค่าการโก่งตัวซึ่งในซอฟต์แวร์นี้จะกำหนดให้จุดสังเกตอยู่ที่ตำแหน่งบนสุดของตัวแบบจำลองและพิจารณาทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งเพียงแกน x แกนเดียวหรือกำหนดให้ degree of freedom มีไว้ 1 ตัว โดยให้เป็น 1 node และให้เป็น dof 1 ซึ่งหมายความว่ากำหนดให้จุดสังเกตมี 1 จุด และตอบสนองหรือพิจารณาที่แกน x ตามลำดับ

3) Optimization Constraint เป็นขั้นตอนที่จะใส่ค่าการโก่งตัว โดยกำหนดมีการตอบสนองต่อ displacement ซึ่งการกำหนดค่าจะถูกใส่ในช่อง upper bound ซึ่งหมายถึงการยอมให้การออกแบบระบบโครงสร้างมีค่าการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ $0.0025H \pm 1\%$

4) Objective จากเป้าหมายในขอบเขตของการวิจัยคือ เพื่อออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ให้มีการใช้วัสดุอย่างเหมาะสม ซึ่งในที่นี้หมายถึงการกำหนดให้มีการตอบสนองต่อมวลและเป้าหมายคือ ต้องการให้มวลมีค่าน้อยที่สุด

5) Setup Opti Control กำหนดค่า discrete (discreteness parameter) ให้มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นค่าแนะนำสำหรับ solids [20] ของแบบจำลองระบบโครงสร้างนี้ เสร็จแล้วใช้คำสั่งดำเนินการวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.5 ตูผลการทดลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องหลังจากที่ซอฟต์แวร์คำนวณโครงสร้างที่เหมาะสม

3.4.6 วัตผลการทดลอง

ก่อนทำการวัตผลการทดลองจะต้องกำหนดรูปทรงโครงสร้างใหม่ที่ได้จากการดำเนินการวิเคราะห์ topology optimization ดังนี้

1) **กำหนดรูปทรงระบบโครงสร้างใหม่** โดยใช้คำสั่ง OSSmooth ซึ่งเป็นการทำให้ได้แบบจำลองถูกปรับให้เรียบหลังจากผ่านกระบวนการทดลอง จากนั้นตั้งค่าให้เป็นประเภท FEA reanalysis และกำหนดให้เป็น iso surcae และปรับค่า threshold ตามที่ต้องการ

2) **วิเคราะห์โครงสร้าง** หาค่าการโก่งตัวสูงสุดของแบบจำลอง ซึ่งถ้าค่าการโก่งตัวสูงสุดไม่ได้เท่ากับ $0.0025H \pm 0.000025H$ ให้ทำการปรับแก้ค่า threshold แล้ววิเคราะห์โครงสร้างใหม่อีกครั้ง

3) **ใช้เครื่องมือ** เพื่อวัดค่าที่ได้จากการทดลองตามตัวแปรตามที่กำหนด

3.4.7 บันทึกผลการทดลอง

ออกแบบตารางบันทึกผลการทดลองแล้วบันทึกผลการทดลอง ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อเสนอใช้วิธีการ topology optimization เข้ามาช่วยในการออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering ให้สามารถออกแบบระบบโครงสร้างพื้นฐานในกระบวนการออกแบบช่วงต้นให้เหมาะสมที่สุดตามขอบเขตของการวิจัย โดยได้นำเสนอแนวทางการใช้ซอฟต์แวร์ไว้ที่บท 3 และพบว่า การใช้ซอฟต์แวร์ HyperMesh Optistruct และ HyperView ซึ่งเป็นของบริษัท Altair Engineering ในการใช้ออกแบบอาคารสูงที่มีรูปทรงที่มีส่วนประกอบหลายอย่างจำเป็นต้องมีซอฟต์แวร์ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ SolidWorks ทำให้การขึ้นรูปทรงโครงสร้างสามมิติทำได้ง่ายและสะดวกกว่าการใช้ HyperMesh เมื่อได้แบบจำลองสามมิติแล้วทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .step แล้วนำไฟล์เข้า HyperMesh เพื่อตั้งค่าทั้งหมดในซอฟต์แวร์ซึ่งได้ผลลัพธ์ตามตัวชี้วัด ดังนี้

(1) ระบบโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือนและระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขบังคับในซอฟต์แวร์

ในขั้นตอนแรกมีการกำหนดรูปทรงระบบโครงสร้างอาคารสูง 50 ชั้น และขึ้นรูปเป็นแบบจำลองสามมิติ ในการวาดหรือการขึ้นรูป เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือนและระบบเอทริกเกอร์ ซึ่งจะทำให้การวาดเอทริกเกอร์ให้มีอยู่ทุก ๆ ระดับชั้นความสูงของอาคาร แต่ในความเป็นจริงต้องการให้มีจำนวนเอทริกเกอร์ 2-4 ชั้นต่ออาคารหรือมากกว่านั้น ขึ้นอยู่กับความสูงของอาคาร เหตุผลที่ต้องวาดทุกระดับชั้นเพราะในกระบวนการ topology optimization จำเป็นต้องมีพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ (design space) ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการออกแบบในกระบวนการดังกล่าว เมื่อตั้งค่าให้ระบบเอทริกเกอร์เป็นพื้นที่ที่ต้องการออกแบบแล้ว ในการวิเคราะห์ topology optimization จะทำการลบส่วนที่ไม่จำเป็นออกให้เหลือเพียงส่วนที่จำเป็น ซึ่งเป็นการกระทำของ direct method [21] ของซอฟต์แวร์ Optistruct ที่ทำงานร่วมกับ SIMP method จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือ ระบบโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือนและระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขบังคับในซอฟต์แวร์

(2) ระบบโครงสร้างต้องสามารถรับแรงด้านข้างได้

มีการกำหนดแรงด้านข้างซึ่งเป็นแรงลมตามมาตรฐาน ASCE 7-10 โดยซอฟต์แวร์สามารถตั้งค่าและกำหนดแรงกระทำให้กับแบบจำลองได้ หลังจากแบ่งอิลิเมนต์ (mesh) ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการแบ่งอิลิเมนต์แบบจำลองเป็น 2 ชนิด คือ CHEXA และ CPENTA ทั้งหมด 166674 และ 8776 อิลิเมนต์ ตามลำดับ จากนั้น

ทำการกำหนดให้แรงลมกระทำที่แต่ละ node ของพื้น และกำหนดค่าพร้อมระบุทิศของแรง ทำให้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(3) ระบบโครงสร้างต้องมีค่าการโก่งตัวไม่เกินตามที่กำหนด

ในการตั้งค่า topology optimization ของซอฟต์แวร์ HyperMesh สามารถกำหนดขอบเขตการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดสังเกตได้ ซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้จุดกึ่งกลางบนสุดของแบบจำลองเป็นจุดสังเกตโดยตั้งค่าให้ซอฟต์แวร์ตอบสนองต่อจุดดังกล่าวและกำหนดค่ามากที่สุดที่ยอมให้เคลื่อนตัว ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบอาคารมีค่าการโก่งตัวอยู่ในขอบเขตที่กำหนด

(4) ระบบโครงสร้างหลังการออกแบบต้องสามารถก่อสร้างได้จริง

ในการออกแบบรูปทรงที่เหมาะสมของซอฟต์แวร์สามารถตั้งค่าให้ได้ผลลัพธ์ที่มีขนาดและความสมมาตรได้ โดยกำหนดขนาดเล็กสุดและระนาบสมมาตรที่ต้องให้ผลจากการออกแบบเป็นไปอย่างที่ต้องการ กล่าวคือ ในการออกแบบอาคารสูงที่มีระบบเอทริกเกอร์ไม่ต้องการให้เอทริกเกอร์มีขนาดเล็กจนทำให้ต้องใช้เอทริกเกอร์จำนวนหลายชั้นเพื่อต้านทานแรงด้านข้าง และไม่ต้องการให้รูปทรงเอทริกเกอร์มีความซับซ้อนมากจนเกินไปจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดระนาบสมมาตรทำให้ภายในชั้นหนึ่งของอาคารมีคานหรือเอทริกเกอร์ที่มีรูปทรงเหมือนกันในแต่ละด้าน

จะเห็นได้ว่าตัวชี้วัดทั้ง 4 ข้อดังกล่าว ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering สามารถใช้ในการออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ให้เหมาะสมได้ตามขอบเขตที่ผู้วิจัยต้องการศึกษา

ในบทนำมีการกล่าวถึงเวลาที่ใช้ในการออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ ซึ่งในกระบวนการออกแบบในช่วงต้นของผู้วิจัย แบบจำลองที่ 1 ซอฟต์แวร์ OptiStruct 2019.1 ใช้เวลาในการวิเคราะห์ topology optimization ทั้งหมด 1 ชั่วโมง 56 วินาที ด้วยคอมพิวเตอร์ Windows 10 64bit, Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz, RAM 16(2400) และ ROM NVMe Samsung MZVLW256 (Read 2800 MB/s, Write 1100 MB/s) ซึ่งมี topology design elements ทั้งหมด 111600 อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยหรือวัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อทดลองการเปลี่ยนชนิดวัสดุของระบบโครงสร้างว่ามีผลต่อตำแหน่งและปริมาตรระบบเอาทริกเกอร์และความเค้นของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมอย่างไร ซึ่งได้ดำเนินการทดลองแล้วให้ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง

การทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ได้ให้ข้อมูล 2 ส่วน ดังนี้

4.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ finite element

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ finite element

แบบจำลองที่	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (mm)	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (mm)	ค่าการโก่งตัวที่กำหนด (mm)	ค่าการโก่งตัวที่ได้จริง (mm)	ความคลาดเคลื่อนของค่าการโก่งตัว (%)	ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น (MPa)
1	1494.06	202.923	1000	992.156	0.784	21.76
2	1487.98	202.571	1000	994.242	0.576	24.80
3	2484.74	237.836	1000	1007.08	0.708	25.86
4	1494.06	202.938	1000	1004.02	0.402	39.86
5	1487.98	202.684	1000	993.208	0.679	23.34
6	2484.74	236.381	1000	1000.19	0.019	33.63
7	1494.06	316.983	1000	1001.36	0.136	11.79
8	1487.98	316.397	1000	1006.76	0.676	11.76
9	2484.74	401.310	1000	993.028	0.697	24.21

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าการโก่งตัวที่ได้จริงมีความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล (personal errors) โดยเกิดจากการปรับค่า threshold ซึ่งปรับค่าดังกล่าวเพื่อให้ระบบโครงสร้างเปลี่ยนแปลงรูปทรงเล็กน้อย และได้ปริมาตรที่เหมาะสมที่ทำให้แบบจำลองมีค่าการโก่งตัวตามที่กำหนด ซึ่งกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนของค่าการโก่งตัวไม่เกิน $\pm 1\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ topology optimization

หลังจากที่ได้ระบบโครงสร้างที่มีรูปทรงที่เหมาะสมและมีค่าการโก่งตัวตามที่กำหนด จะทำการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ topology optimization

แบบจำลองที่	ปริมาตรเอทริกเกอร์ (mm ³)	มวลเอทริกเกอร์ (ton)	จำนวนชั้นเอทริกเกอร์	ความสูงของเอทริกเกอร์ในแต่ละชั้น (story)	ปริมาตรเสายายเพิ่มเติม (mm ³)	ความสูงเสายายเพิ่มเติม (story)
1	2.645e+12	6346.896	3	24,25,26	3.410e+11	2.0
2	2.510e+12	6023.872	3	23,24,25	2.676e+11	2.5
3	2.015e+12	4834.908	4	18,20,21,22	5.672e+12	20.5
4	2.395e+12	5747.208	3	23,24,25	2.711e+11	3.0
5	2.537e+12	6088.690	3	23,24,25	2.704e+11	2.5
6	2.083e+12	5000.159	4	18,20,21,22	5.701e+12	20.5
7	3.777e+12	9064.304	3	19,20,21	1.166e+12	5.5
8	3.758e+12	9019.138	3	19,20,21	1.153e+12	5.5
9	4.496e+12	10789.217	6	15,16,17,24,25,26	7.658e+12	23.0

จากตารางที่ 4.2 ข้อมูลถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาตรเอทริกเกอร์ มวลเอทริกเกอร์และปริมาตรเสายายเพิ่มเติม และข้อมูลที่ได้จากการประมาณด้วยตา ซึ่งประกอบไปด้วย จำนวนชั้นเอทริกเกอร์ ความสูงเอทริกเกอร์ในแต่ละชั้นและความสูงเสายายเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้เป็นเพียงข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างจากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนชนิดวัสดุ โดยนำเอาข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบกันเองในแต่ละแบบจำลอง ตัวอย่าง การวิเคราะห์ข้อมูลถูกแบ่งเป็น 2 การวิเคราะห์ ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ภาพรวมของข้อมูลที่ได้

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลนี้จะนำเอาข้อมูลดิบมาแปลงเป็นแผนภาพเพื่อให้ดูง่ายขึ้น โดยแบ่งข้อมูลเป็น 4 ตัวแปร ดังนี้

(1) ค่าการโก่งตัวของระบบโครงสร้าง

หนึ่งในจุดประสงค์หลักของระบบเอาทริกเกอร์คือ ด้านทานการรับน้ำหนักด้านข้าง ซึ่งผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่า หลังจากเพิ่มระบบเอาทริกเกอร์เข้าไปให้กับระบบโครงสร้างเดิมที่ประกอบไปด้วย เสา ผนังรับแรงเฉือนและพื้น ทำให้ระบบโครงสร้างเกิดการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างเดิม ดังสมการ

$$\text{ร้อยละการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่กำหนด, } N_C = \frac{\delta_{\max} - \delta_C}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริง, } N_R = \frac{\delta_{\max} - \delta_R}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \times 100$$

และ

$$\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าการดัดตัวกลับ} = \frac{|N_R - N_C|}{N_C} \times 100$$

เมื่อ δ_{\max} คือ ค่าการโก่งตัวสูงสุด

δ_{\min} คือ ค่าการโก่งตัวต่ำสุด

δ_C คือ ค่าการโก่งตัวที่กำหนด

δ_R คือ ค่าการโก่งตัวที่ได้จริง

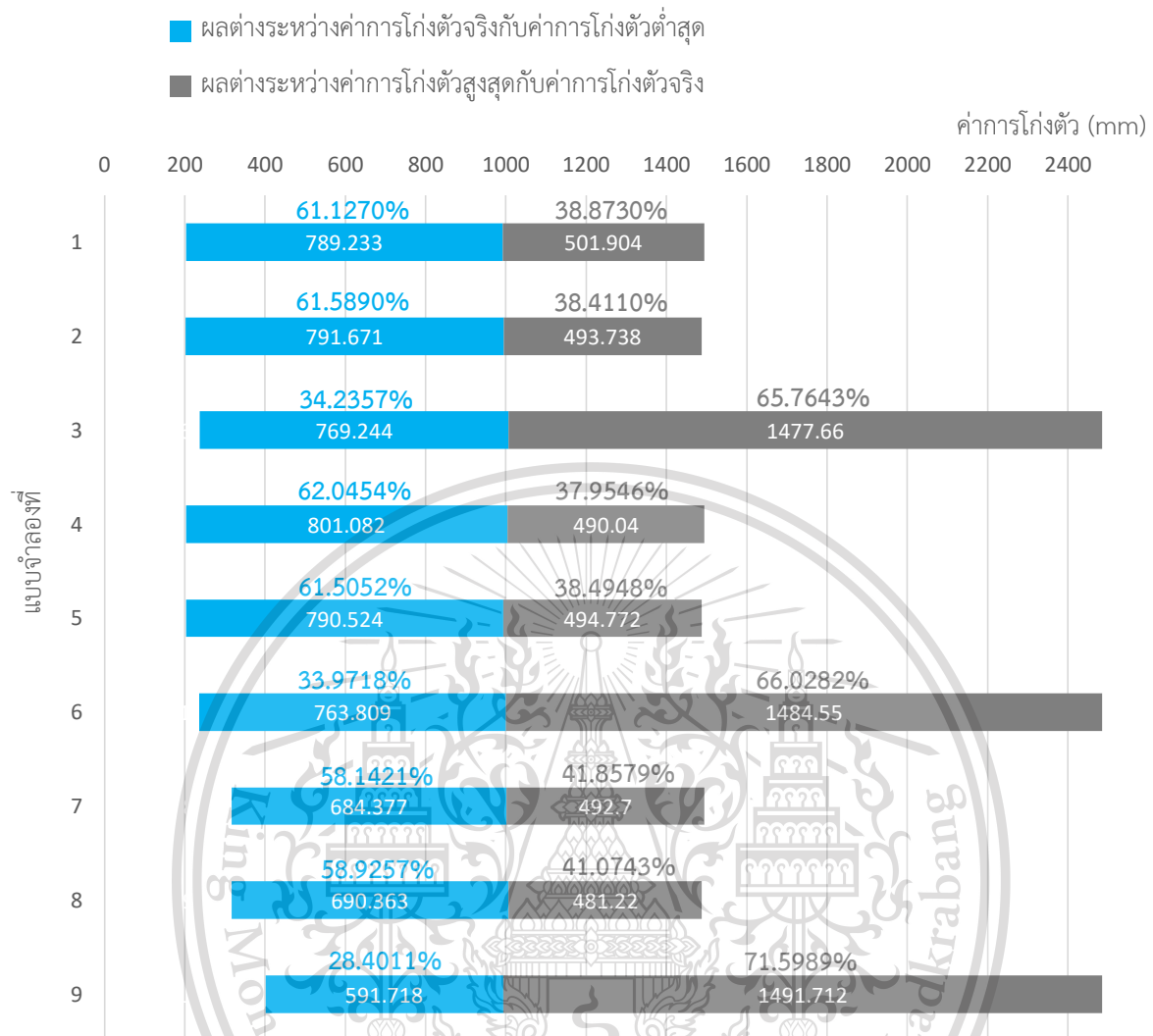
ตารางที่ 4.3 ค่าดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่เหมาะสม

แบบจำลองที่	ร้อยละการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่กำหนด	ร้อยละการดัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริง	ร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าการดัดตัวกลับ
1	38.2655	38.8730	1.5877
2	37.9630	38.4110	1.1800
3	66.0794	65.7643	0.4769
4	38.2659	37.9546	0.8137
5	37.9664	38.4948	1.3919
6	66.0366	66.0282	0.0128
7	41.9735	41.8579	0.2753
8	41.6513	41.0743	1.3853
9	71.2642	71.5989	0.4696

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตรัฐบาลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่หรือใช้ข้อมูลนี้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของข้อมูล

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



กราฟที่ 4.1 แสดงค่าการโก่งตัวของแต่ละแบบจำลอง

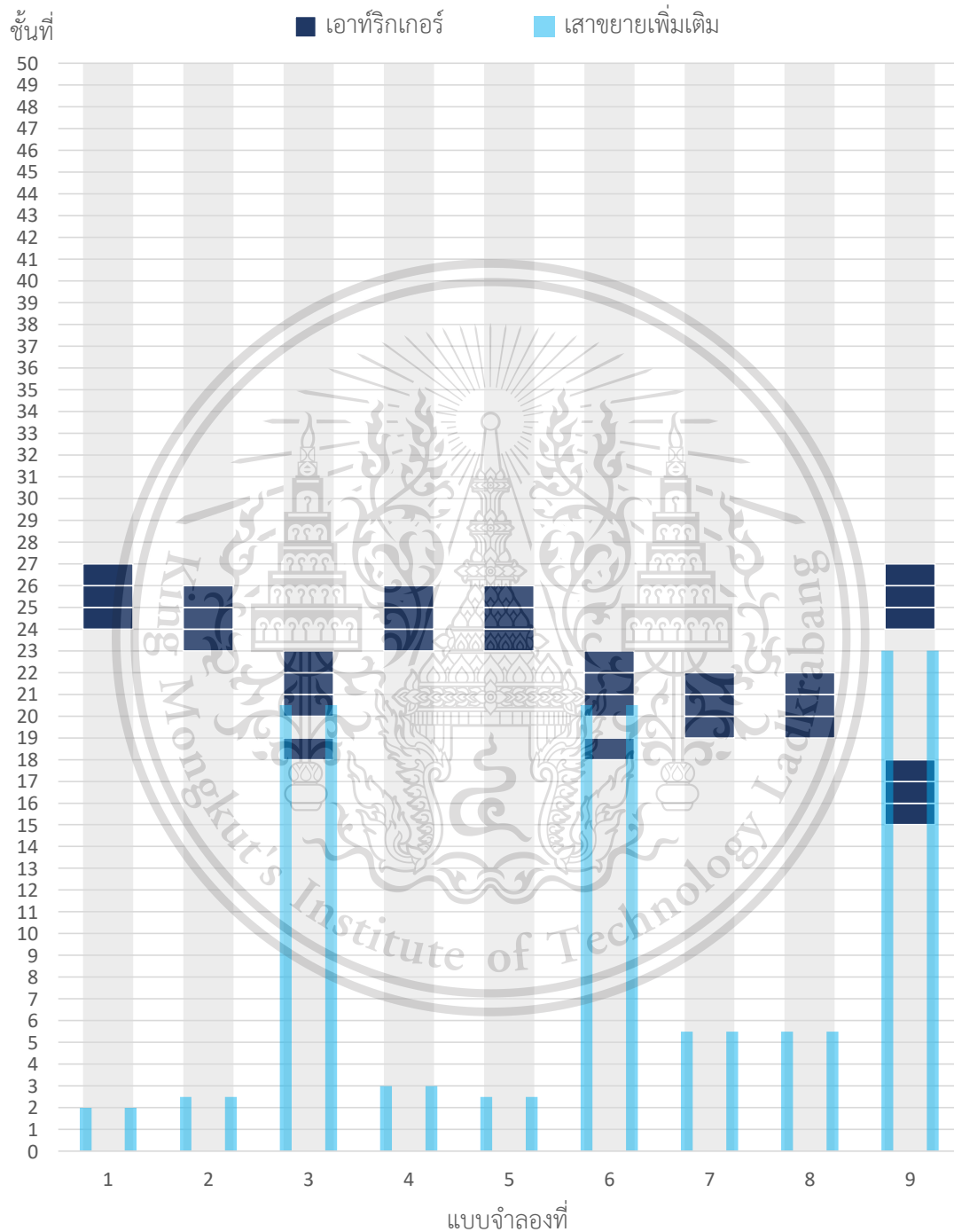
จากกราฟที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ในทางปฏิบัติจริง แบบจำลองที่ 9 (ประกอบไปด้วย เสา ผนัง รับแรงเฉือนและระบบเอทริกเกอร์ที่ใช้วัสดุชนิดที่ 3 ซึ่งมีค่ามอดุลัสของยังและอัตราส่วนปัวซอง 10,000 MPa และ 0.20 ตามลำดับ) มีค่าการดัดตัวกลับที่สูงที่สุดเท่ากับ $71.5989 \pm 0.4696\%$ ในขณะที่แบบจำลองที่ 4 (ประกอบไปด้วย เสาและผนังรับแรงเฉือนที่ใช้วัสดุชนิดที่ 1 ซึ่งมีค่ามอดุลัสของยังและอัตราส่วนปัวซอง 20,000 MPa และ 0.20 ตามลำดับ และระบบเอทริกเกอร์ที่ใช้วัสดุชนิดที่ 2 ซึ่งมีค่ามอดุลัสของยังและอัตราส่วนปัวซอง 20,000 MPa และ 0.25 ตามลำดับ) มีค่าการดัดตัวกลับที่ต่ำที่สุดเท่ากับ $37.9546 \pm 0.8137\%$ ในขณะที่ตารางที่ 4.3 แบบจำลองที่มีค่าการดัดตัวกลับที่สูงที่สุดคือ แบบจำลองที่ 9 และแบบจำลองที่มีค่าการดัดตัวกลับที่ต่ำที่สุดคือ แบบจำลองที่ 2 ซึ่งหากดูจากค่าความคลาดเคลื่อนแล้วแบบจำลองที่ 1 2 4 และ 5 มีค่าความดัดกลับที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ มีเพียงค่าอัตราส่วนของปัวซองที่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละระบบโครงสร้างของแบบจำลอง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(2) ตำแหน่งระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสม

การเปลี่ยนชนิดของวัสดุส่งผลให้ระบบเอทริกเกอร์มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งให้เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ จากตารางที่ 4.2 สามารถเขียนเป็นแผนภาพอธิบายอย่างง่ายดังแสดง



กราฟที่ 4.2 แผนภาพแสดงตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมของแต่ละแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกราฟที่ 4.2 สามารถอธิบายและชี้ให้เห็นถึงผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนวัสดุของระบบโครงสร้างในแนวดิ่ง (เสาและผนังรับแรงเฉือน) และระบบเอทริกเกอร์ (เอทริกเกอร์และเสายขยายเพิ่มเติม) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กรณี ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสม

กรณี	ส่งผลให้
เมื่อลดค่ามอดูลัสของยังของระบบโครงสร้างในแนวดิ่งเป็น 0.5 เท่าของโครงสร้างเดิม	จำนวนเอทริกเกอร์เพิ่มขึ้นและจำเป็นต้องมีเสายขยายเพิ่มเติมเข้ามาช่วยในการรับแรง
เมื่อลดค่าลดค่ามอดูลัสของยังของระบบเอทริกเกอร์เป็น 0.5 เท่าของโครงสร้างเดิม	ตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์เปลี่ยนไป
เมื่อลดอัตราส่วนของปัวซองของระบบโครงสร้างในแนวดิ่งเป็น 0.4 เท่าของโครงสร้างเดิม	ตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์สูงขึ้นหนึ่งชั้น
เมื่อลดอัตราส่วนของปัวซองของระบบเอทริกเกอร์เป็น 0.4 เท่าของโครงสร้างเดิม	ตำแหน่งของระบบเอทริกเกอร์สูงขึ้นหนึ่งชั้นแต่เสายขยายเพิ่มเติมมีความสูงลดลงหนึ่งชั้น

(3) ปริมาตรระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสม

จากตารางที่ 4.2 ได้นำข้อมูลมาเปลี่ยนหน่วยจากลูกบาศก์มิลลิเมตรเป็นลูกบาศก์เมตรและเนื่องจากตารางที่ 3.1 วัสดุแต่ละชนิดมีค่าความหนาแน่นเท่ากันทั้งหมด จึงสามารถเปรียบเทียบปริมาตรได้โดยตรง ดังแสดง

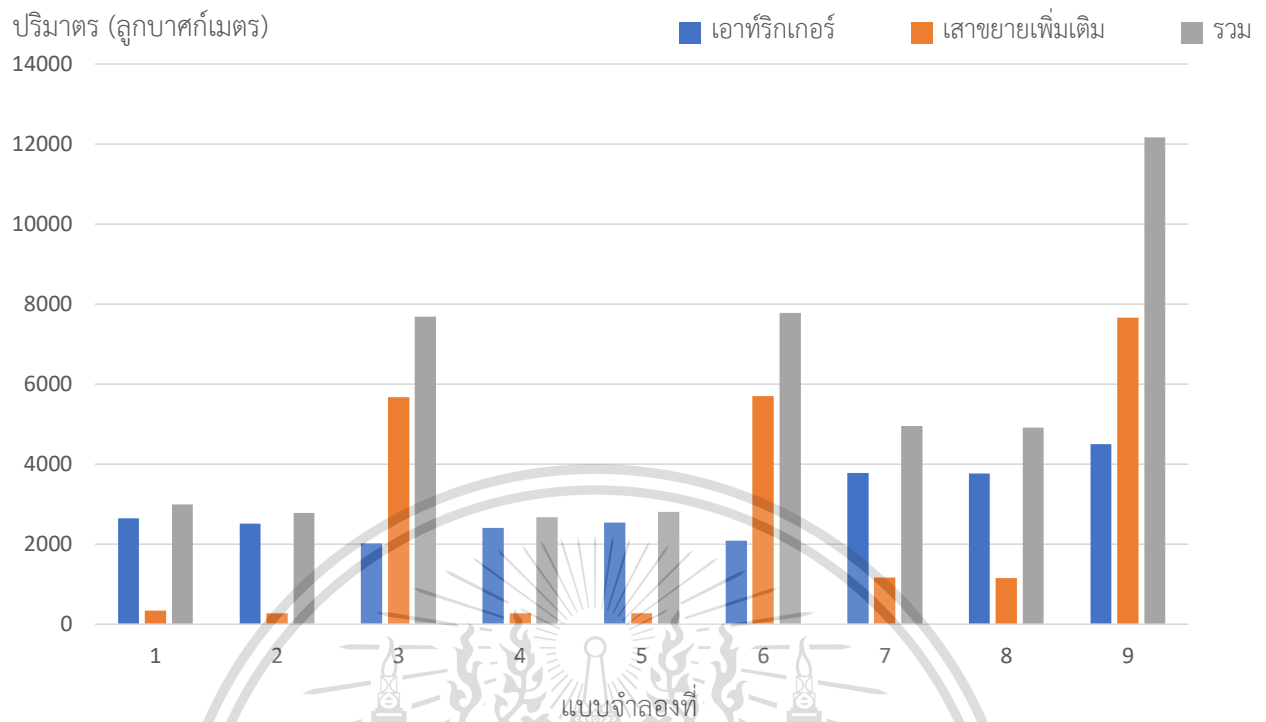
ตารางที่ 4.5 ปริมาตรระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสม

แบบจำลองที่	ปริมาตรเอทริกเกอร์ (m^3)	ปริมาตรเสายขยายเพิ่มเติม (m^3)	ปริมาตรรวม (m^3)
1	2650	341	2991
2	2510	268	2778
3	2020	5670	7690
4	2400	271	2671
5	2540	270	2810
6	2080	5700	7780
7	3780	1170	4950
8	3760	1150	4910
9	4500	7660	12160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



กราฟที่ 4.3 แสดงปริมาณของระบบเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง

จากตารางที่ 4.5 แบบจำลองที่มีการใช้ปริมาณมากที่สุดคือ แบบจำลองที่ 9 ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 12160 ลูกบาศก์เมตร และแบบจำลองที่มีการใช้ปริมาณน้อยที่สุดคือ แบบจำลองที่ 4 ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 2671 ลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่าทั้งสองแบบจำลองเป็นค่าที่มากที่สุดและน้อยที่สุดซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการตัดกลับดังที่ได้กล่าวไว้ใต้กราฟที่ 4.1

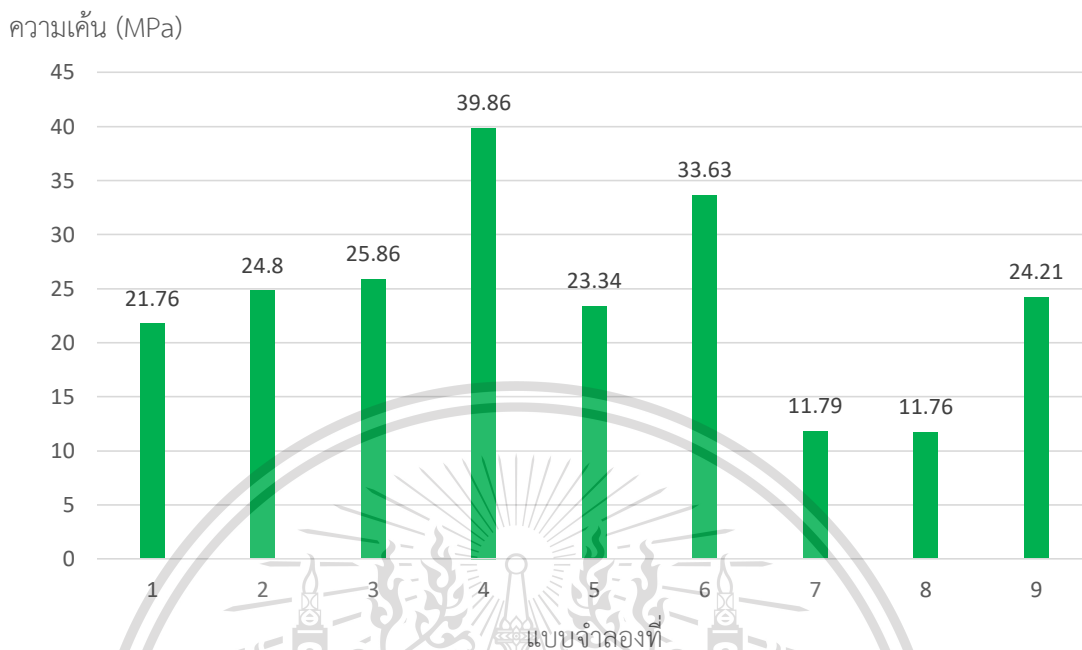
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(4) ความเค้นสูงสุดของระบบโครงสร้างที่เหมาะสม

จากตารางที่ 4.2 สามารถนำค่าความเค้นมาสร้างกราฟแผนภูมิแท่งดังแสดง



กราฟที่ 4.4 ความเค้นสูงสุดของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง

จากกราฟที่ 4.4 แบบจำลองที่มีความเค้นสูงสุดที่สูงที่สุดคือ แบบจำลองที่ 4 มีค่าเท่ากับ 39.86 MPa และแบบจำลองที่มีความเค้นสูงสุดที่ต่ำที่สุดคือ แบบจำลองที่ 8 มีค่าเท่ากับ 11.79 MPa โดยค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดลองเป็นความเค้นชนิด Von mises stress ซึ่งมักจะใช้ค่านี้ในการเปรียบเทียบกับค่า Yield stress ของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ในการออกแบบระบบโครงสร้างของแบบจำลองที่ 4 จะต้องใช้วัสดุที่มีค่า Yield stress มากกว่า 39.86 MPa จึงจะทำให้ระบบโครงสร้างไม่เกิดความเสียหายที่จุดใดจุดหนึ่งของระบบโครงสร้างนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.2 การวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบในแต่ละแบบจำลอง

จากตารางที่ 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 และ 4.3 สามารถวิเคราะห์การเปรียบเทียบทั้งหมด 5 ตัวแปร เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น โดยทำการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในแต่ละแบบจำลอง ดังนี้

$\frac{E_j}{E_i}$ คือ อัตราส่วนระหว่างมอดูลัสของยังของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับมอดูลัสของยังของแบบจำลองตั้งต้น

$\frac{V_j}{V_i}$ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนของปัวซองของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของปัวซองของแบบจำลองตั้งต้น

$\frac{V_j}{V_i}$ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น

$\frac{\sigma_j}{\sigma_i}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นของแบบจำลองตั้งต้น

$\frac{N_j}{N_i}$ คือ อัตราส่วนระหว่างร้อยละการตัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับร้อยละการตัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น โดยมีค่าความ

คลาดเคลื่อนร้อยละการตัดตัวกลับ, $\Delta = \pm \frac{N_j}{N_i} \sqrt{\left(\frac{\Delta n_j}{N_j}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_i}{N_i}\right)^2}$

เมื่อ i คือ แบบจำลองตั้งต้น

j คือ แบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ

N_i คือ ร้อยละการตัดตัวของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น

N_j คือ ร้อยละการตัดตัวของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ

Δn_i คือ ร้อยละการคลาดเคลื่อนของค่าการโก่งตัวที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น

Δn_j คือ ร้อยละการคลาดเคลื่อนของค่าการโก่งตัวที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ

จากตัวแปรและค่าที่ได้จากการทดลองสามารถแบ่งลักษณะการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(1) กรณีที่หาค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบได้ ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.6 ค่าการเปรียบเทียบกรณีที่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

การเปรียบเทียบที่	i	j	เสาและผนังรับแรงเฉือน		ระบบเอาทริกเกอร์		$\frac{N_j}{N_i}$	$\pm\Delta$	$\frac{V_j}{V_i}$	$\frac{\sigma_j}{\sigma_i}$
			$\frac{E_j}{E_i}$	$\frac{v_j}{v_i}$	$\frac{E_j}{E_i}$	$\frac{v_j}{v_i}$				
1	2	3	0.5	0.8	1	1	1.712	0.054	2.768	1.043
2	5	6	0.5	0.8	1	1	1.715	0.062	2.769	1.441
3	8	9	0.5	0.8	1	1	1.743	0.060	2.477	2.059
4	1	3	0.5	1	1	1	1.692	0.070	2.571	1.188
5	4	6	0.5	1	1	1	1.740	0.037	2.913	0.844
6	7	9	0.5	1	1	1	1.711	0.016	2.457	2.053
7	1	7	1	1	0.5	1	1.077	0.045	1.655	0.542
8	2	8	1	1	0.5	1	1.069	0.049	1.767	0.997
9	3	9	1	1	0.5	1	1.089	0.011	1.581	0.936
10	5	8	1	1	0.5	0.8	1.067	0.053	1.747	0.504
11	6	9	1	1	0.5	0.8	1.084	0.007	1.563	0.720
12	4	7	1	1	0.5	0.8	1.103	0.025	1.853	0.296
13	1	4	1	1	1	1.25	0.976	0.045	0.893	1.832
14	2	5	1	1	1	1.25	1.002	0.048	1.012	0.586
15	3	6	1	1	1	1.25	1.004	0.007	1.012	1.300
16	1	2	1	1.25	1	1	0.988	0.050	0.929	1.140
17	4	5	1	1.25	1	1	1.014	0.043	1.052	0.586
18	7	8	1	1.25	1	1	0.981	0.034	0.992	0.997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณของ 3 แถวแรก (การเปรียบเทียบ 1-3) สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเปลี่ยนค่ามอดุลัสของยังของเสาและผนังรับแรงเฉือน และเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของปัวซองของเสาและผนังรับแรงเฉือนในอัตรา 0.5 และ 0.8 เท่าของค่าเดิม ตามลำดับ จะส่งผลให้การตัดกลับ ปริมาตร และความเค้นมีอัตราเปลี่ยนไปเฉลี่ย 1.723 ± 0.062 , 2.671 และ 1.514 เท่าของค่าเดิม ตามลำดับ และสามารถหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของข้อมูลอื่น ๆ ที่ซ้ำกัน ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีที่มีค่าซ้ำกันของการเปรียบเทียบ

การเปรียบเทียบที่	เสาและผนังรับแรงเฉือน		ระบบเอทริกเกอร์		ค่าเฉลี่ย	$\frac{V_j}{V_i}$	$\frac{\sigma_j}{\sigma_i}$	$\frac{N_j}{N_i}$	$\pm\Delta$
	$\frac{E_j}{E_i}$	$\frac{\nu_j}{\nu_i}$	$\frac{E_j}{E_i}$	$\frac{\nu_j}{\nu_i}$					
1-3	0.5	0.8	1	1	ค่าเฉลี่ย	2.671	1.514	1.723	0.062
					S.D.	0.168	0.512	0.017	
4-6	0.5	1	1	1	ค่าเฉลี่ย	2.647	1.362	1.714	0.070
					S.D.	0.237	0.623	0.024	
7-9	1	1	0.5	1	ค่าเฉลี่ย	1.668	0.825	1.078	0.049
					S.D.	0.094	0.247	0.010	
10-12	1	1	0.5	0.8	ค่าเฉลี่ย	1.721	0.507	1.085	0.053
					S.D.	0.147	0.212	0.018	
13-15	1	1	1	1.25	ค่าเฉลี่ย	0.972	1.239	0.994	0.048
					S.D.	0.069	0.625	0.016	
16-18	1	1.25	1	1	ค่าเฉลี่ย	0.991	0.908	0.994	0.050
					S.D.	0.062	0.288	0.017	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.7 การนำกลุ่มตัวอย่างมาหาอัตราส่วนของตัวแปรต่าง ๆ พบว่า ในการเลือกชนิดวัสดุในการออกแบบระบบโครงสร้าง ถ้าลดค่ามอดูลัสของยังของเสาและผนังรับแรงเฉือนจาก 20,000 เป็น 10,000 MPa หรือลดลงเป็น 0.5 เท่าของค่าเดิม และลดค่าอัตราส่วนของปัวซองของเสาและผนังรับแรงเฉือนจาก 0.25 เป็น 0.20 หรือลดลงเป็น 0.8 เท่าของค่าเดิม จะส่งผลให้ต้องเพิ่มปริมาตรที่ใช้ในการออกแบบระบบเอทริกเกอร์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.671 เท่าของค่าเดิม จึงจะทำให้ระบบโครงสร้างใหม่มีค่าการโก่งตัวเท่าเดิม นอกจากนั้นยังมีความเค้นเพิ่มขึ้นเป็น 1.514 เท่าของค่าเดิม และยังเพิ่มค่าการตัดตัวกลับเป็น 1.723 ± 0.062 เท่าของค่าเดิม ในขณะที่การเพิ่มค่าอัตราส่วนของปัวซองของระบบเอทริกเกอร์จาก 0.20 เป็น 0.25 หรือเพิ่มขึ้นเป็น 1.25 เท่าของค่าเดิม ส่งผลให้ปริมาตรที่ใช้ในการออกแบบระบบเอทริกเกอร์ลดลงโดยเฉลี่ยเป็น 0.972 เท่าของค่าเดิม และมีค่าอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนชนิดของวัสดุระบบโครงสร้างดังตารางที่ 4.7 และชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนชนิดของวัสดุทำให้มีค่าอัตราส่วนมากที่สุดและน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ทำค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบได้

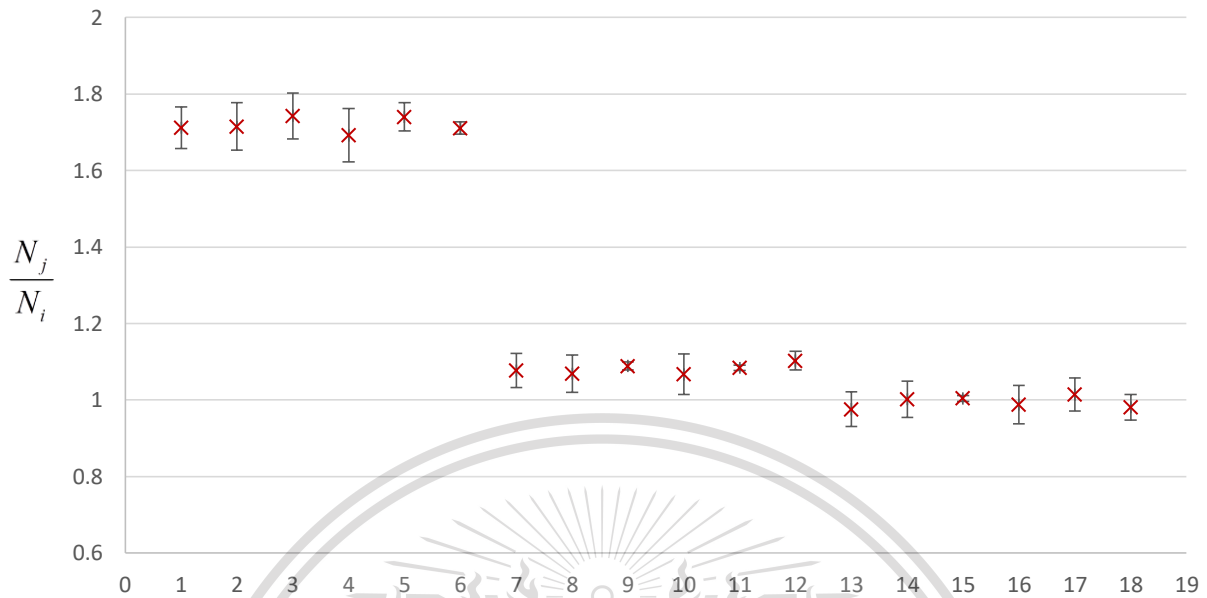
กรณี	ส่งผลให้
เมื่อลดค่ามอดูลัสของยังและอัตราส่วนของปัวซองของระบบโครงสร้างในแนวตั้งเป็น 0.5 และ 0.8 เท่าของโครงสร้างเดิม ตามลำดับ	ปริมาตรเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 2.671 เท่าของค่าเดิม
เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของปัวซองของระบบเอทริกเกอร์เป็น 1.25 เท่าของโครงสร้างเดิม	ปริมาตรลดลงโดยเฉลี่ยเป็น 0.972 เท่าของค่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

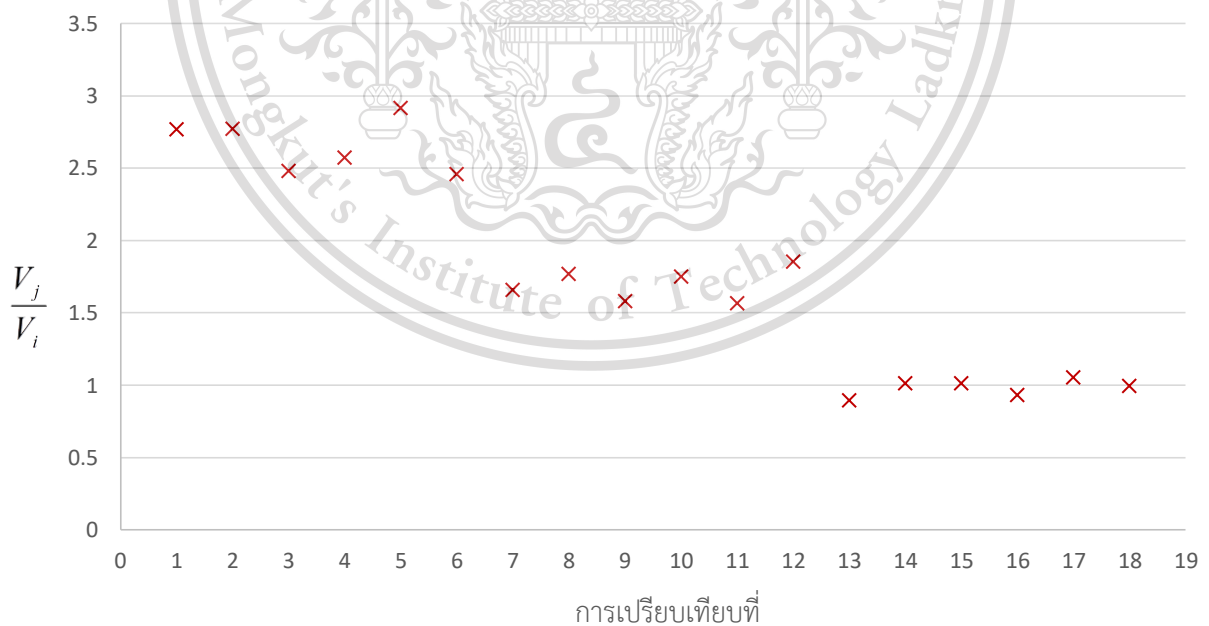
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.6 สามารถนำไปการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ทั้งหมด 3 กราฟดังนี้



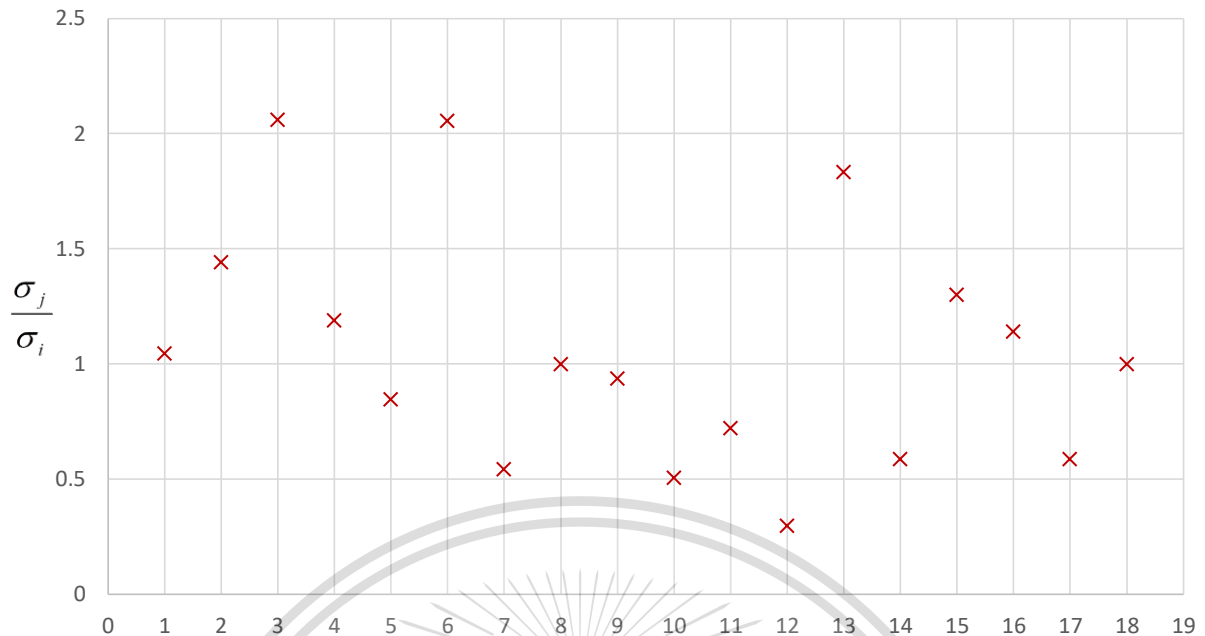
การเปรียบเทียบที่
 กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบ
 กับร้อยละการตัดตัวของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ
 ต่อร้อยละการตัดตัวของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น



กราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลด้านการค้า
 เอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบต่อปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



การเปรียบเทียบที่

กราฟที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น

จากกราฟที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟไปในทิศทางเดียวกันและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสของยังส่งผลให้ค่า $\frac{N_j}{N_i}$ และ $\frac{V_j}{V_i}$ มีการเพิ่มหรือลด โดยมีลักษณะกราฟที่เกาะกลุ่มกัน ในขณะที่กราฟที่ 4.7 มีลักษณะกราฟที่การกระจายกันของกลุ่มตัวอย่างเมื่อเทียบกับกราฟที่ 4.5 และ 4.6 อาจกล่าวได้ว่า ตัวแปรความเค้นสูงสุดของกลุ่มตัวอย่างนี้มีความเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนชนิดวัสดุแต่ไม่สามารถบอกได้ว่าค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(2) กรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบได้ ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.9 ค่าการเปรียบเทียบกรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

การเปรียบเทียบที่	i	j	เสาและผนังรับแรงเฉือน		ระบบเอาทริกเกอร์		$\frac{N_j}{N_i}$	$\pm\Delta$	$\frac{V_j}{V_i}$	$\frac{\sigma_j}{\sigma_i}$
			$\frac{E_j}{E_i}$	$\frac{v_j}{v_i}$	$\frac{E_j}{E_i}$	$\frac{v_j}{v_i}$				
1	5	9	0.5	0.8	0.5	0.8	1.860	0.068	4.327	1.037
2	2	9	0.5	0.8	0.5	1	1.864	0.059	4.377	2.059
3	4	9	0.5	1	0.5	0.8	1.886	0.042	4.553	0.607
4	1	9	0.5	1	0.5	1	1.842	0.076	4.066	1.113
5	2	6	0.5	0.8	1	1.25	1.719	0.053	2.801	1.441
6	1	6	0.5	1	1	1.25	1.699	0.069	2.601	1.545
7	5	7	1	0.8	0.5	0.8	1.087	0.040	1.762	0.505
8	2	7	1	0.8	0.5	1	1.090	0.034	1.782	0.351
9	1	8	1	1.25	0.5	1	1.057	0.056	1.642	0.540
10	4	8	1	1.25	0.5	0.8	1.082	0.043	1.838	0.295
11	2	4	1	0.8	1	1.25	0.988	0.037	0.961	1.541
12	1	5	1	1.25	1	1.25	0.990	0.054	0.939	1.073
13	6	7	2	1	0.5	0.8	0.634	0.004	0.636	0.351
14	6	8	2	1.25	0.5	0.8	0.622	0.021	0.631	0.350
15	3	8	2	1.25	0.5	1	0.625	0.022	0.638	0.455
16	3	7	2	1	0.5	1	0.636	0.006	0.644	0.456
17	3	5	2	1.25	1	1.25	0.585	0.022	0.365	0.903
18	3	4	2	1	1	1.25	0.577	0.013	0.347	1.541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า การเปรียบเทียบที่ 3 มีการลดค่ามอดูลัสของยังของ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และระบบเอ้าทริกเกอร์เป็น 0.5 เท่าของค่าเดิม และลดค่าอัตราส่วนของปัวซองของระบบเอ้าทริกเกอร์เป็น 0.8 เท่าของค่าเดิม ส่งผลให้ค่าการดัดกลับและปริมาตรระบบเอ้าทริกเกอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1.886 ± 0.042 และ 4.553 เท่าของค่าเดิม ตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวมีค่าอัตราส่วนมากที่สุดที่สุทธองลงมาคือ การเปรียบเทียบที่ 2 และ 1 ตามลำดับ และสามารถชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนชนิดของวัสดุทำให้มีค่าอัตราส่วนมากที่สุดและน้อยที่สุด ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบได้

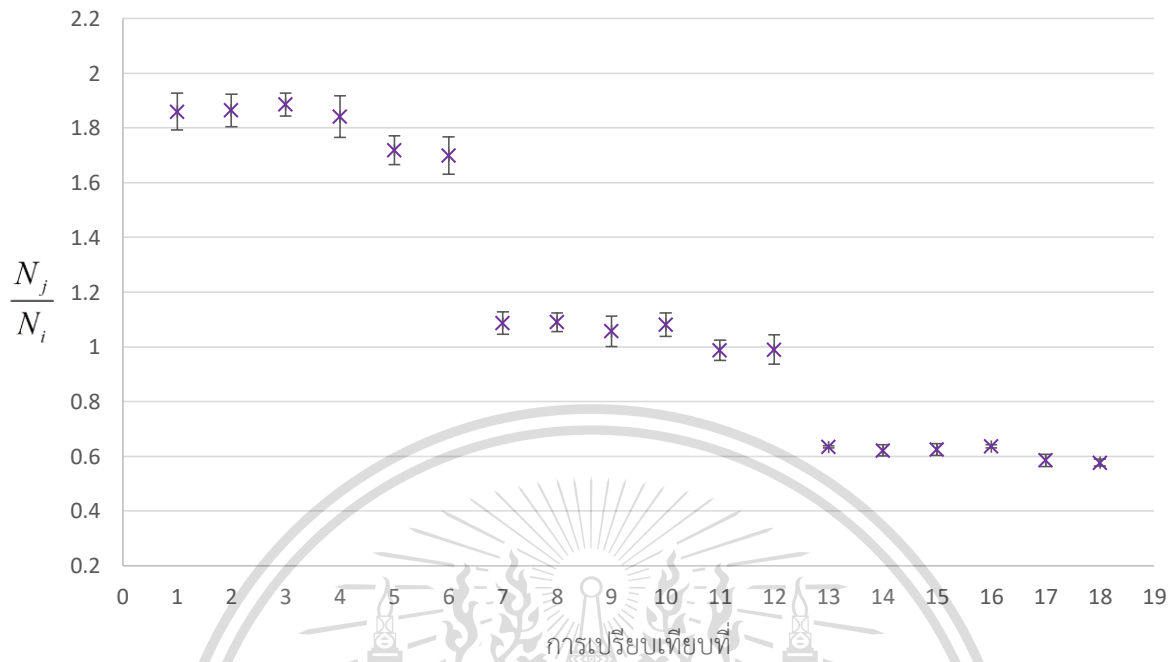
กรณี	ส่งผลให้
เมื่อลดค่ามอดูลัสของยังของระบบโครงสร้างในแนวตั้งเป็น 0.5 เท่าของโครงสร้างเดิม และลดค่ามอดูลัสของยังและอัตราส่วนของปัวซองของระบบเอ้าทริกเกอร์เป็น 0.5 และ 0.8 เท่าของโครงสร้างเดิม ตามลำดับ	ปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็น 4.553 เท่าของโครงสร้างเดิม
เมื่อเพิ่มค่ามอดูลัสของยังของระบบโครงสร้างในแนวตั้งเป็น 2 เท่าของโครงสร้างเดิม และเพิ่มอัตราส่วนของปัวซองของระบบเอ้าทริกเกอร์เป็น 1.25 เท่าของค่าเดิม	ปริมาตรลดลงเป็น 0.347 เท่าของโครงสร้างเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

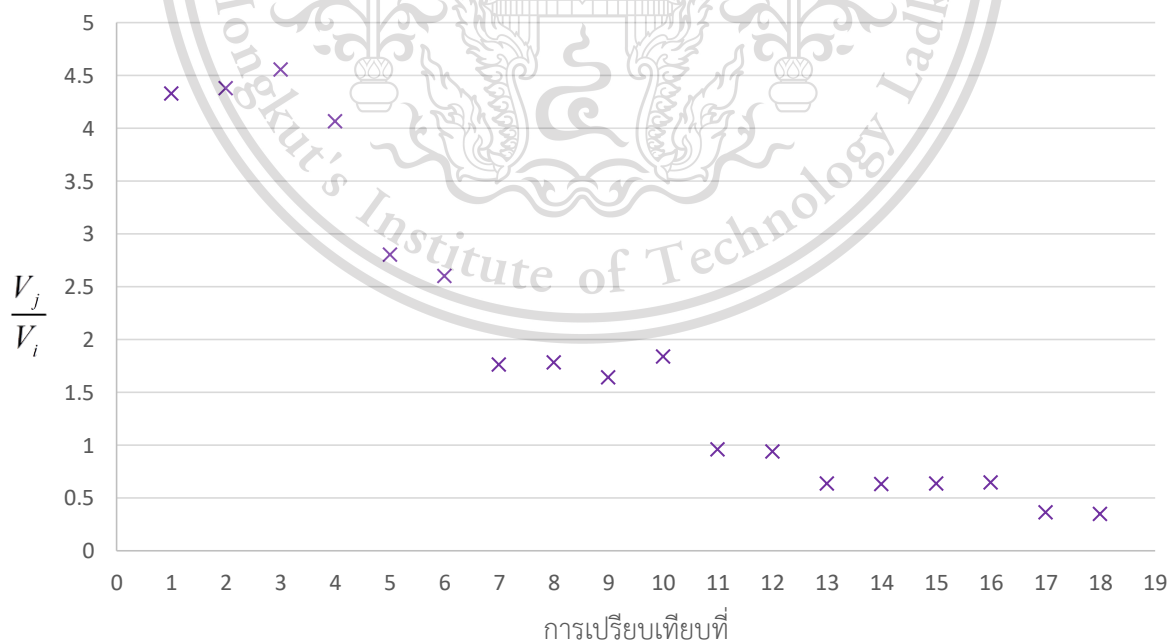
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.9 สามารถนำไปการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ทั้งหมด 3 กราฟดังนี้



กราฟที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบ

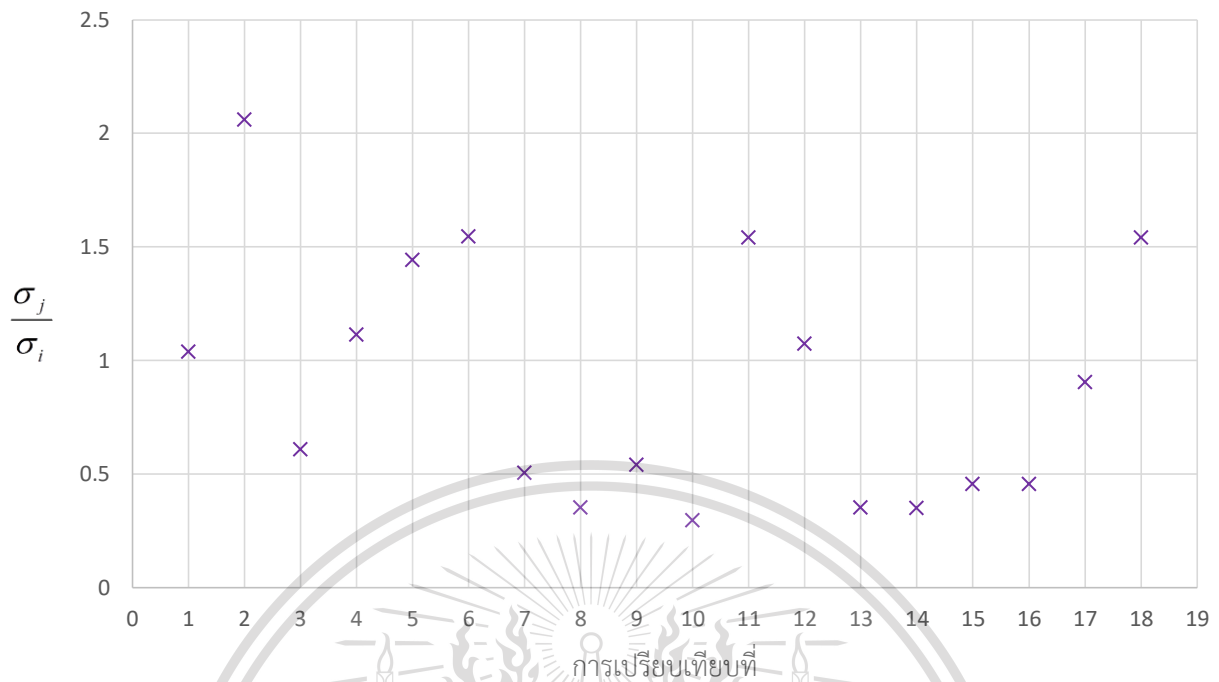
กับร้อยละการตัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับร้อยละการตัดตัวกลับของระบบโครงสร้างที่ได้จริงของแบบจำลองตั้งต้น



เอกสารที่กราฟที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาณรวมของระบบบนการคำนวณว่า เอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้นไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



กราฟที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับปริมาตรรวมของระบบเอทริกเกอร์ของแบบจำลองตั้งต้น

จากกราฟที่ 4.9 4.10 และ 4.11 มีแนวโน้มของกลุ่มตัวอย่างที่มีลักษณะคล้ายกับกราฟ 4.5 4.6 และ 4.5 และจากตารางที่ 4.8 และ 4.10 จะเห็นได้ว่าการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงความเค้นสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดวัสดุด้วยเหตุผลว่า ความเค้นสูงสุดมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละกรณี ไม่สามารถกำหนดทิศทางได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 เพื่อเสนอใช้วิธีการ topology optimization เข้ามาช่วยในการออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering ให้สามารถออกแบบระบบโครงสร้างพื้นฐานในกระบวนการออกแบบช่วงต้นให้เหมาะสมที่สุดตามขอบเขตของการวิจัย เพื่อให้เป็นรูปธรรมมากขึ้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการใช้ซอฟต์แวร์โดยสร้างข้อกำหนดสามารถสรุปได้เป็น 3 ข้อหลัก ดังนี้

(1) กำหนดกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นอาคารความสูง 400 เมตร ทั้งหมด 50 ชั้น มีรูปทรงลักษณะคล้ายกับอาคาร Tour de la Bourse และสร้างแบบจำลองสามมิติที่เป็นระบบโครงสร้างพื้นฐานประกอบไปด้วย เสา พื้น ผนังรับแรงเฉือนและระบบเอทริกเกอร์ ด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks

(2) กำหนดแรงกระทำกับอาคารเป็นแรงลมตามมาตรฐาน ASCE 7-10 และค่าขีดจำกัดความรู้สึกสบายของสถานะการใช้งาน (serviceability limit state) เท่ากับ 1 : 400

(3) กำหนดกระบวนการ topology optimization โดยตั้งค่า วิเคราะห์และแสดงผล ด้วยซอฟต์แวร์ HyperMesh Optistruct และ HyperView ตามลำดับ

ข้อกำหนดดังกล่าวทำให้ซอฟต์แวร์ของบริษัท Altair Engineering สามารถบรรลุเป้าหมายในการออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์ให้มีการใช้วัสดุน้อยที่สุดและสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัยซึ่งได้ผลลัพธ์ตามตัวชี้วัดและพบว่า หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดผลลัพธ์คือ การตั้งค่าซอฟต์แวร์ให้มีการควบคุมการออกแบบที่ส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ของขนาดและความสมมาตรของรูปทรงตรงตามความต้องการ ซึ่งการตั้งค่าดังกล่าวทำให้การออกแบบระบบโครงสร้างเอทริกเกอร์แตกต่างจากการออกแบบผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ในอุตสาหกรรม

5.1.2 เพื่อทดลองการเปลี่ยนชนิดวัสดุของระบบโครงสร้างว่ามีผลต่อตำแหน่งและปริมาตรระบบเอทริกเกอร์และความเค้นของระบบโครงสร้างที่เหมาะสมอย่างไร โดยศึกษาจากการเปรียบเทียบของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 9 แบบจำลอง ซึ่งมีการทดลองเปลี่ยนวัสดุของระบบโครงสร้างในแนวตั้ง (เสาและผนังรับแรงเฉือน) และระบบเอทริกเกอร์ (เอทริกเกอร์และเสาขยายเพิ่มเติม) จากผลการทดลองในการออกแบบช่วงต้นพบว่า หากเริ่มต้นด้วยการกำหนดให้ระบบโครงสร้างในแนวตั้งให้มีค่าความแข็งแรงต่ำทำให้ไม่สามารถต้านทานแรงด้านข้างได้จึงจำเป็นต้องมีการเสริมความแข็งแรงของระบบโครงสร้างในแนวตั้งโดยใช้เสาขยายเพิ่มเติมและเพิ่มเอทริกเกอร์ในชั้นที่เหมาะสมหรือจำเป็นต้องเพิ่มปริมาตรวัสดุในการก่อสร้างเพื่อต้านทานแรงด้านข้าง และหากเลือกวัสดุที่แข็งมากจะทำให้ตำแหน่งของเอทริกเกอร์ที่เหมาะสมมีระดับความสูงที่สูงกว่าวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อย และวัสดุที่แข็งมากจะใช้ปริมาตรในการออกแบบระบบเอทริกเกอร์น้อยกว่าวัสดุที่มีค่าความ

แข็งต่ำ แต่ค่าความแข็งของวัสดุที่มากไม่สามารถบอกได้ว่าระบบโครงสร้างที่เหมาะสมจะมีค่าความเค้นสูงสุดมากกว่าหรือน้อยกว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งน้อย เพราะค่าความเค้นสูงสุดขึ้นอยู่กับแบบจำลองในแต่ละกรณีซึ่งมีค่าแตกต่างกันออกไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าวัสดุมากกว่า 3 ชนิด เพื่อความแม่นยำของข้อมูลที่ได้

5.2.2 ควรศึกษาแบบจำลองที่มีรูปทรงอื่น ๆ ซึ่งมีขนาดของระบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ผลข้อมูลได้หลากหลายทิศทาง

5.2.3 ควรลดขนาดของการแบ่งแบบจำลอง (mesh) เพื่อเพิ่มโดเมนของคำตอบหรือลดค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่เหมาะสม

5.2.4 ควรศึกษาและทดลองซอฟต์แวร์อื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ravenscroft, “Zaha Hadid Architects reveals design for skyscraper on world’s most expensive site,” 2020. <https://bit.ly/3n05xH2>.
- [2] M. M. Ali and K. S. Moon, “Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects,” *Archit. Sci. Rev.*, vol. 50, no. 3, pp. 205–223, 2007, doi: 10.3763/asre.2007.5027.
- [3] O. Yuksel, “An Overview on Topology Optimization Methods Employed in Structural Engineering,” *Kirklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, pp. 159–175, Dec. 2019, doi: 10.34186/klujes.606666.
- [4] U. Schramm, “Topology Optimization and the Lessons of History,” 2020. <https://bit.ly/32uDdmD>.
- [5] J. J. Kingman, K. D. Tsavdaridis, and V. V. Toropov, “Applications of topology optimization in structural engineering,” *Civ. Eng. Sustain. Resil. Int. Conf.*, 2014, [Online]. Available: <http://eprints.whiterose.ac.uk/80988/>.
- [6] A. Olason and D. Tidman, “Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process,” *Chalmers Univ. Technol.*, 2010.
- [7] G. I. N. Rozvany, “A Critical Review of Established Methods of Structural Topology Optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 37, no. 3, pp. 217–237, 2009, doi: 10.1007/s00158-007-0217-0.
- [8] “2019 SOLIDWORKS Help - SIMP Method for Topology Optimization.” <https://bit.ly/3sDgkbg>.
- [9] S. Lövgren and E. Norberg, “Topology Optimization of Vehicle Body Structure for improved Ride & Handling,” Linköping University, 2011.
- [10] J. Kingman, K. Tsavdaridis, and V. Toropov, “Applications of Topology Optimisation in Structural Engineering,” *White Rose Res.*, pp. 24–27, 2014, [Online]. Available: <http://eprints.whiterose.ac.uk/80988/>.
- [11] Civilax, “Outriggers in Tall Buildings,” 2018. <https://bit.ly/3x74bii>.
- [12] P. Mhatre, “Outrigger Structural System – A Review and Comparison of the Structural System,” 2018. <https://bit.ly/3tCrwpT>.

[13] U. Obinna, “Types of Structural Systems for Tall Building,” 2020. <https://bit.ly/3gqm85x>.
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [14] G. Capurso and I. Giannetti, “‘Reconstructive Re-Drawings’ and ‘Reconstructive Models’ for History of Construction. the Experience of SIXXI Research,” vol. 5, no. 1, pp. 36–46, 2019.
- [15] “140 William Street.” <https://bit.ly/3efPvoo>.
- [16] “U.S. Bank Center.” <https://bit.ly/3tuOI9z>.
- [17] N. Shah and P. N. G. Gore, “Comparative Study on Conventional Outrigger and Virtual Outrigger on RC High Rise Structure under Earthquake Load,” vol. 4, no. 5, pp. 97–104, 2018.
- [18] W. Alhaddad, Y. Halabi, H. Xu, and H. Lei, “Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II - Guideline for Optimum Topology and Size Design,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, no. February, 2020, doi: 10.1155/2020/2589735.
- [19] F. Nouri and P. Ashtari, “Weight and topology optimization of outrigger-braced tall steel structures subjected to the wind loading using GA,” *Wind Struct. An Int. J.*, vol. 20, no. 4, pp. 489–508, 2015, doi: 10.12989/was.2015.20.4.489.
- [20] Altair Forum User, “MINDIM and DISCRETE,” 2015. <https://bit.ly/3xcaql2>.
- [21] S. Yang, L. Yan, and C. Qi, “An adaptive multi-step varying-domain topology optimization method for spot weld design of automotive structures,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 59, no. 1, pp. 291–310, 2019, doi: 10.1007/s00158-018-2068-2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ก

การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของซอฟต์แวร์ โดยมีการทดลองให้ซอฟต์แวร์หาพื้นที่หน้าตัดของวัสดุในการรับแรงดึง มีการกำหนดค่าหลักที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

- วัสดุรับแรงดึง 840000 N
- ค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 210000 MPa
- วัสดุมีความยาวเริ่มต้นเท่ากับ 500 mm และยอมให้มีการเสียรูปซึ่งยืดได้ไม่เกิน 20 mm

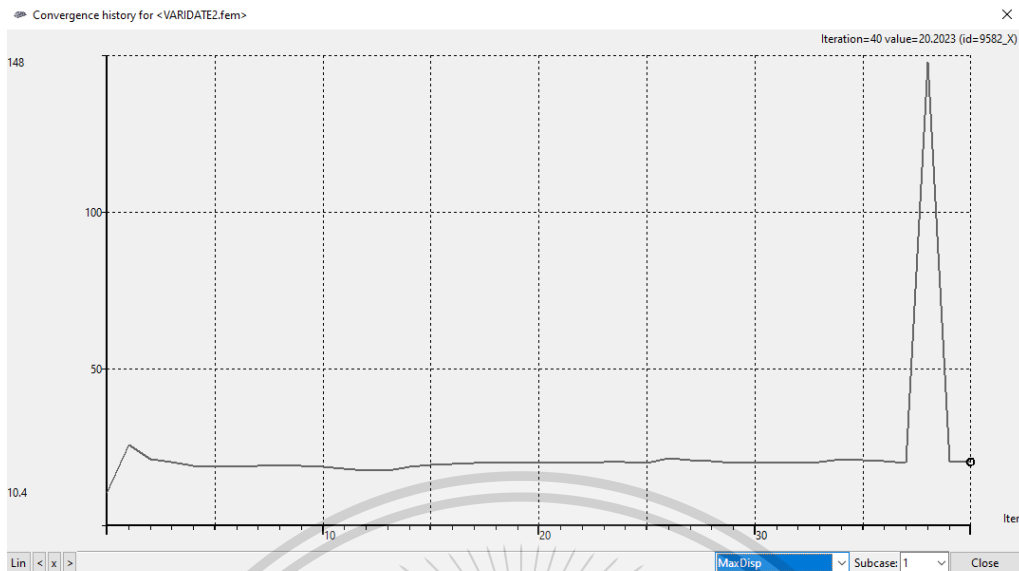


รูปที่ ก.1 กำหนดพื้นที่ที่ต้องการออกแบบ

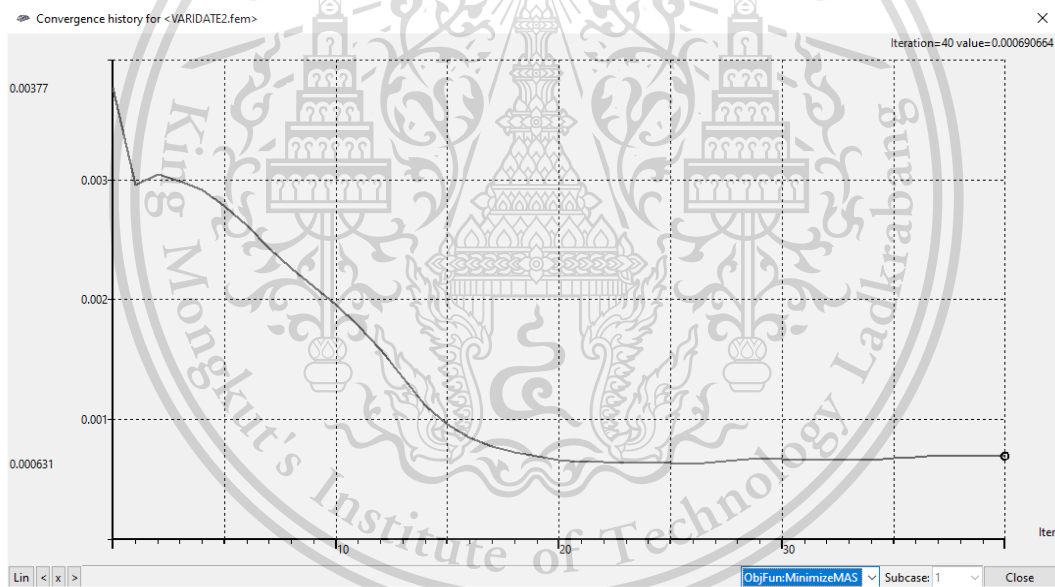
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก.2 แสดงค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดสังเกตในแต่ละการวนซ้ำ

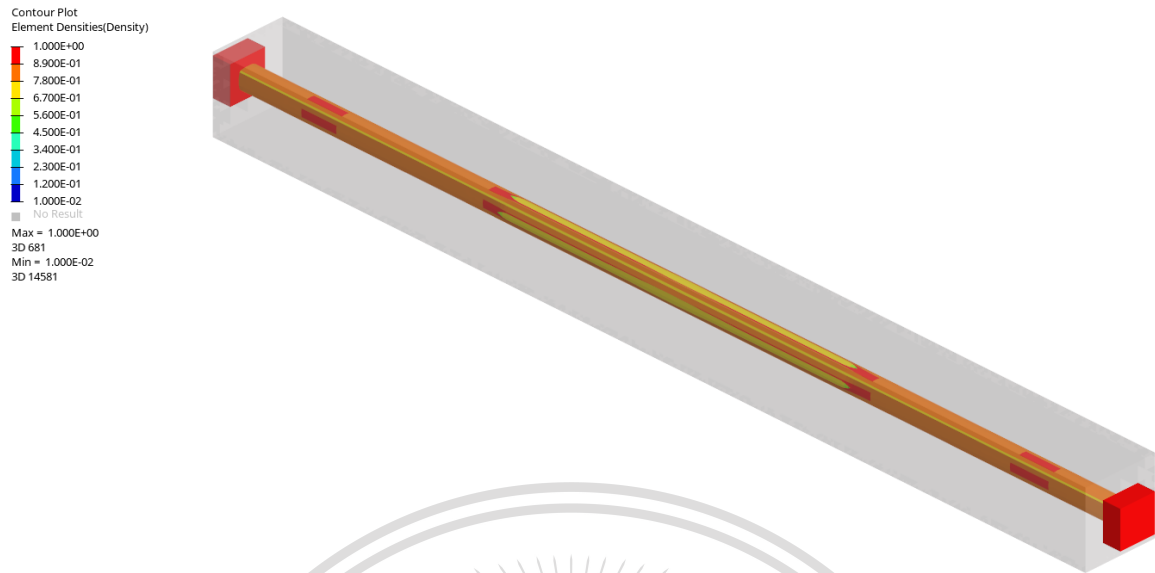


รูปที่ ก.3 แสดงค่ามวลในแต่ละการวนซ้ำ

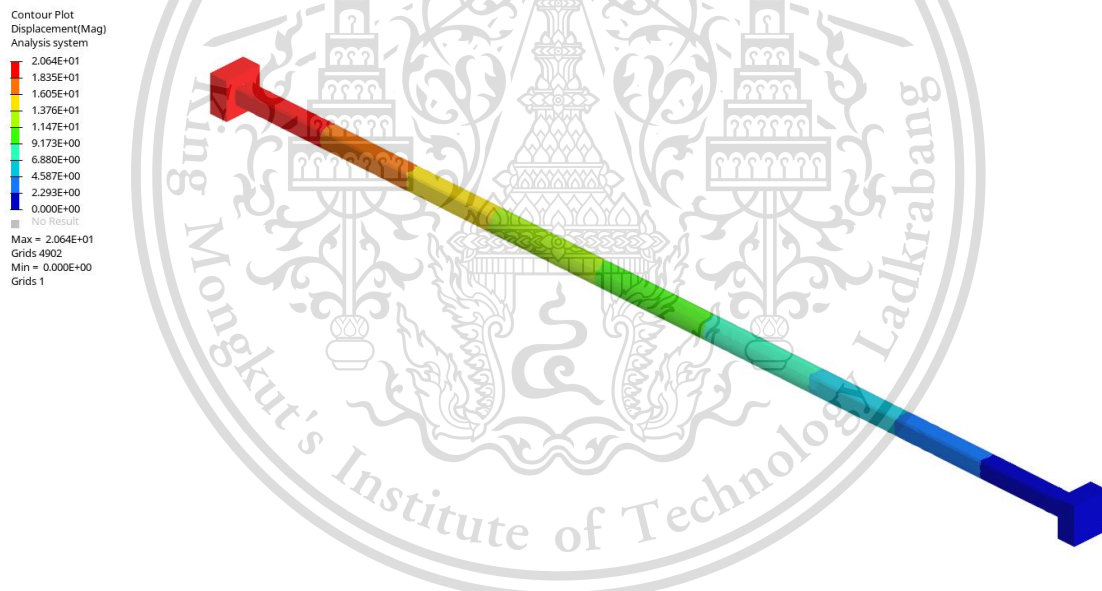
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก.4 แบบจำลองสามมิติที่ได้จากการดำเนินการโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด



รูปที่ ก.5 วิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จากการดำเนินการโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์ซึ่งมีการปรับค่า threshold ทำให้ได้หน้าตัดเฉลี่ยเท่ากับ 98.095 mm² และวัสดุมีการเสียรูปเท่ากับ 20.631 mm และสามารถเทียบผลการทดสอบกับการคำนวณจากสมการ ดังนี้

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

และ
$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

แทนตัวแปร
$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{l - l_0}{l_0}}$$

แทนค่าตัวแปร
$$210000 = \frac{\frac{840000}{A}}{\frac{520 - 500}{500}}$$

แก้สมการจะได้
$$A = 100 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นจากการตรวจสอบพบว่า ค่าคำตอบได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงโดยมีรูปทรงที่มีเส้นทางการถ่ายแรงของวัสดุเป็นไปตามสมมติฐานอย่างง่ายของฟิสิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ข

รายการคำนวณแรงลมมาตรฐาน ASCE 7-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การคำนวณแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างกรณีใช้มาตรฐาน ASCE 7-10

Permitted procedures ซึ่งการออกแบบแรงลมสำหรับอาคารและโครงสร้างอื่น ๆ รวมถึง Main Wind-Force Resisting System (MWFRS), ส่วนประกอบ และลักษณะการปิดล้อมผิวอาคาร (cladding elements) ของอาคารนั้น จะต้องพิจารณาโดยใช้ขั้นตอนหรือวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งตามที่ระบุไว้ในส่วนต่อไปนี้มีแผนผังของกระบวนการโดยรวมสำหรับการกำหนดแรงลมรวมไปถึงการอ้างอิงถึงบท (chapter) ในแต่ละหัวข้อ (section) ดังแสดงในรูปที่ 21

ระบบต้านทานแรงลมหลัก (main wind-force resisting system, MWFRS) ใน MWFRS จะถูกกำหนดโดยใช้หนึ่งในขั้นตอนหรือวิธีการตามประเภทต่อไปนี้:

1 วิธีการ Directional Procedure เป็นการพิจารณาแรงลมหลักของระบบต้านทานแรงบนอาคารที่มีความสูงทั้งหมด ตามที่ระบุไว้ใน chapter 27 สำหรับอาคารที่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในนั้น

2 วิธีการ Envelope procedure เป็นการพิจารณาแรงลมหลักของระบบต้านทานแรงบนอาคารเตี้ย (low-rise buildings) ตามที่ระบุไว้ในบทที่ chapter 28 สำหรับอาคารที่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในนั้น

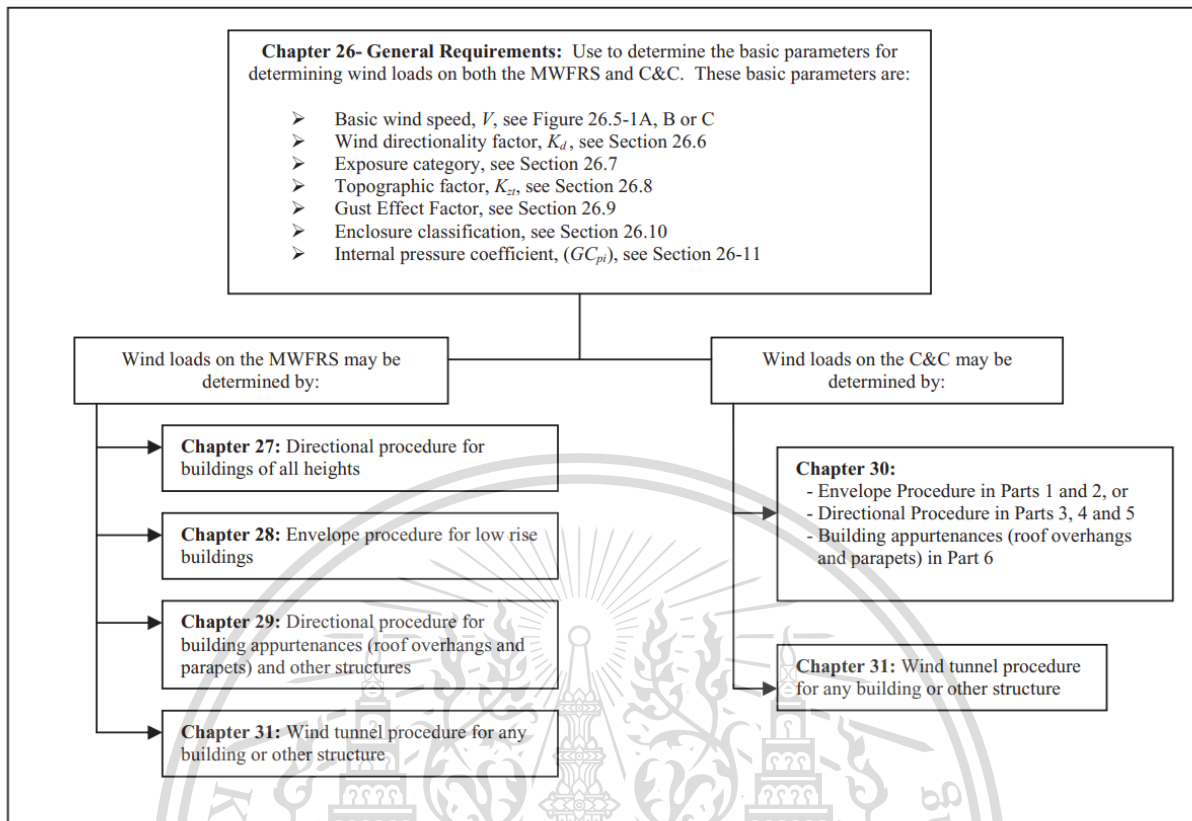
3 วิธีการ Directional Procedure for Building Appurtenances เป็นการพิจารณาแรงลมหลักของระบบต้านทานแรงสำหรับการก่อสร้างสิ่งต่าง ๆ บนชั้นดาดฟ้าและอุปกรณ์บนชั้นดาดฟ้า เช่น ป้ายโฆษณา และเสาอากาศ ตามที่ระบุไว้ใน chapter 29

4 วิธีการ Wind Tunnel Procedure เป็นการพิจารณาแรงลมหลักของระบบต้านทานแรงสำหรับอาคารทั้งหมดและโครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมดตามที่ระบุไว้ใน chapter 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.1 แผนผังของกระบวนการการกำหนดแรงลมรวมไปถึงแผนผังเพิ่มเติมและหมายเหตุผู้จัดไว้เพื่อการเริ่มต้นของแต่ละ *chapter* สำหรับขั้นตอนหรือวิธีการโดยละเอียดเพิ่มเติมสำหรับการกำหนดแรงลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการ Directional Procedure ซึ่งเป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้โดยสอดคล้องกับอาคารที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาตามที่มีการระบุไว้ใน chapter 27 ในมาตรฐาน ASCE 7-10 และได้ทำการสรุปข้อกำหนดต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อวิจัยดังนี้

1) ขอบเขต (Section 27.1)

(1) ประเภทอาคาร (Section 27.1.1)

ใน Chapter นี้จะใช้กับการหาแรงลมของ MWFRS บนอาคารที่มีลักษณะเป็นอาคารที่มีการปิดล้อม (enclosed buildings), อาคารที่มีการปิดล้อมบางส่วนของอาคาร (partially enclosed buildings) และอาคารเปิดโล่ง (open buildings) โดยอาคารเหล่านั้นจะใช้วิธี Directional Procedure และวิธีนี้ใช้ได้กับทุกความสูงของอาคารที่มีความสูงต่าง ๆ โดยมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ใช้กับอาคารที่มีความสูงทั้งหมดที่จำเป็นต้องแยกแรงลมที่ใช้กับผนังด้านที่ลมเข้าปะทะ (windward walls), ผนังด้านอับลม (leeward walls) และเป็นผนังด้านข้าง (side walls) พิจารณาผนังเหล่านั้นของอาคารเพื่อประเมินแรงภายใน MWFRS members อย่างเหมาะสม และส่วนที่ 2 ใช้กับอาคารที่ใช้ในการออกแบบพิเศษโดยการกำหนดให้เป็น diaphragm buildings ที่ปิดล้อมตามที่ระบุไว้ใน section 26.2 โดยมีความสูง ≤ 160 ฟุต (48.8 เมตร)

(2) ข้อกำหนด (Section 27.1.2)

อาคารที่มีการออกแบบแรงลมตาม chapter นี้จะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขทั้งหมดดังต่อไปนี้ คือ อาคารดังกล่าวเป็นอาคารหรือโครงสร้างรูปทรงปกติตามที่กำหนดไว้ใน section 26.2 และอาคารต้องไม่มีลักษณะตอบสนองดังนี้ เป็นลมในลักษณะการไหลแบบไขว้กัน (across-wind loading), ลมในลักษณะการไหลแบบสั่นหรือแบบวน (Vortex shedding) และลมไหลแบบไม่คงที่ (instability) เนื่องจากการที่ลมไม่มีที่ตั้งแน่นอนหรือไม่ไหลตามช่องหรือลมมีสิ่งกีดขวาง ลมเหล่านั้นจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ

(3) ข้อจำกัด (Section 27.1.3)

ข้อตกลงของ chapter นี้จะคำนึงถึงผลกระทบของ load magnification ที่เกิดจากลมพัดที่ความเร็วคงตัวค่าหนึ่งเป็นเวลานานของ along-wind ซึ่งเป็นลมในทิศทางเดียวกับกระแสลมของอาคารที่สามารถยืดหยุ่นได้ (flexible buildings) อาคารที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของ section 27.1.2 หรือมีรูปทรงหรือลักษณะการตอบสนองที่ผิดปกติจะต้องได้รับการออกแบบโดยใช้เอกสารที่ได้รับการยอมรับซึ่งแสดงถึงผลกระทบจากแรงลมดังกล่าวหรือจะใช้ขั้นตอน wind tunnel ที่ระบุไว้ใน chapter 31

(4) การบังลม (Section 27.1.4)

จะต้องไม่มีการลดลงของ ความดันจลน์ (velocity pressure) อันเนื่องมาจาก shielding ซึ่งเป็นการบังลมที่เห็นได้ชัดซึ่งอาจเป็นอาคารและโครงสร้างอื่น ๆ หรือภูมิประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) **ขั้นตอนการคำนวณแรงลมที่กระทำกับโครงสร้าง** โดยวิธี Directional Procedure มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) กำหนดประเภทความเสี่ยงของอาคารหรือโครงสร้างอื่น ๆ

ตารางที่ ข.1 ประเภทความเสี่ยงของอาคารและโครงสร้างอื่น ๆ สำหรับน้ำท่วม, ลม, หิมะ, แผ่นดินไหว, และ ลูกเห็บ

การใช้งานหรือจำนวนห้องพักของอาคารและโครงสร้าง	ประเภทความเสี่ยง
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่แสดงถึงความเสี่ยงต่ำต่อชีวิตมนุษย์ในกรณีที่เกิดการวิบัติ	I
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมดยกเว้นที่ระบุไว้ในประเภทความเสี่ยงที่ I, III และ IV	II
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ เมื่อเกิดการวิบัติแล้วอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงอย่างมากต่อชีวิตมนุษย์ อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่รวมอยู่ในประเภทความเสี่ยงที่ IV ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบทางเศรษฐกิจอย่างมาก และ/หรือ การหยุดชะงักของการดำเนินชีวิตของชีวิตพลเรือนในแต่ละวันในกรณีที่เกิดการวิบัติ อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่รวมอยู่ในประเภทความเสี่ยงที่ IV (รวมถึงแต่ไม่จำกัดเพียง โรงงานผลิตและแปรรูป, คลังเก็บสินค้า, มีการใช้หรือกำจัดสารดังกล่าวเช่น เชื้อเพลิงอันตราย, สารเคมีอันตราย, ของเสียอันตราย, หรือวัตถุระเบิด) ที่มีสารพิษหรือสารระเบิดที่มีปริมาณเกินปริมาณที่กำหนดของหน่วยงานที่มีอำนาจในการควบคุมและปริมาณสารมากพอที่จะเป็นภัยคุกคามต่อสาธารณสุขหากปล่อยสารออกมา	III
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่กำหนดให้เป็นสิ่งอำนวยความสะดวกที่จำเป็น อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ เมื่อเกิดการวิบัติแล้วอาจก่อให้เกิดอันตรายอย่างมากต่อชุมชน อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ (รวมถึงแต่ไม่จำกัดเพียง โรงงานผลิตและแปรรูป, คลังเก็บสินค้า, มีการใช้หรือกำจัดสารดังกล่าวเช่น เชื้อเพลิงอันตราย, สารเคมีอันตราย, หรือของเสียอันตราย) ที่มีสารพิษในปริมาณสูงมากพอที่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดของหน่วยงานที่มีอำนาจในการควบคุมที่จะเป็นอันตรายต่อสาธารณสุขหากปล่อยสารออกมาและสารที่มากพอที่จะเป็นภัยคุกคามต่อสาธารณสุขหากปล่อยสารออกมา ¹ อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่จำเป็นซึ่งรักษาไว้ของฟังก์ชันการทำงานสำหรับโครงสร้าง ประเภทความเสี่ยงที่ IV	IV

¹อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีสารพิษ, เป็นพิษสูง, หรือสารที่ระเบิด จะต้องมีความเหมาะสมสำหรับการจัดประเภทที่ประเภทความเสี่ยงต่ำหากสามารถแสดงให้เห็นถึงความพึงพอใจของหน่วยงานที่มีอำนาจในการควบคุมโดยการประเมินจากความอันตรายตามที่ได้อธิบายไว้ใน Section 1.5.2 ว่าด้วยการปล่อยสารนั้นสอดคล้องกับความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับประเภทความเสี่ยงนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(2) กำหนดความเร็วลมพื้นฐาน (basic wind speed: V) ซึ่งเป็นความเร็วลมกระโชกหรือสภาวะลมแรงที่ 33 ฟุต (10 เมตร) เหนือพื้นดินในประเภทการเปิดรับลม (exposure category) C โดยทั่วไปประเภท C เป็นพื้นที่เปิดโล่งที่มีสิ่งกีดขวางกระจัดกระจายสูงน้อยกว่า 30 ฟุต หรือ 9.1 เมตร (ดูใน section 26.7.3) ตามที่กำหนดใน section 26.5.1

(3) กำหนดพารามิเตอร์แรงลม (wind load parameters)

ก. Wind directionality factor, K_d ดูในตารางที่ 3 (Table 26.6-1)

ตารางที่ ข.2 (Table 26.6-1): Wind directionality factor, K_d

ชนิดโครงสร้าง	Directionality Factor K_d *
อาคาร	
Main Wind Force Resisting System	0.85
Components and Cladding	0.85
หลังคาโค้ง (arched roofs)	0.85
ปล่องไฟ, แท็งก์น้ำ และโครงสร้างที่คล้ายกัน	
Square	0.90
Hexagonal	0.95
Round	0.95
ผนังทึบ, โครงสร้างทึบที่ตั้งอยู่อย่างอิสระ (เช่น เทพีเสริภาพ) และป้ายขนาดใหญ่หรือกันสาดที่ติดกับอาคารหรือโครงสร้างอื่น ๆ	0.85
Open Signs and Lattice Framework	0.85
Trussed Towers (เช่น เสาสายไฟแรงสูง)	
สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยม	0.85
หน้าตัดอื่น ๆ	0.95

* Directionality Factor K_d ได้รับการสอบเทียบ (calibrate) กับการรวมกันของแรงที่ระบุไว้ใน Chapter 2 และ factor นี้จะใช้ได้เฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับการรวมกันของแรงที่ระบุไว้ใน sections 2.3 และ 2.4

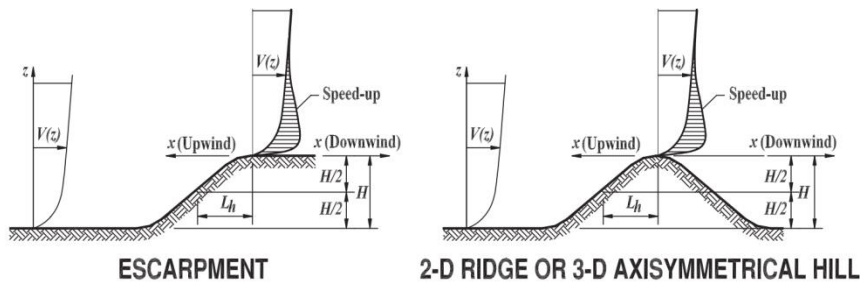
ข. ประเภทการเปิดรับลมสำหรับทิศทางลมแต่ละครั้งที่พิจารณา การเปิดรับลมจะขึ้นอยู่กับความไม่เรียบของพื้นผิวดิน (Surface Roughness) อันเนื่องมาจากธรรมชาติ, ภูมิประเทศ, พืชพันธุ์ และการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้าง โดยประกอบไปด้วย 3 แบบคือ แบบที่ 1 Surface Roughness B: พื้นที่ในเมืองและชานเมืองพื้นที่ป่าหรือภูมิประเทศอื่น ๆ ที่มีสิ่งกีดขวางที่เว้นระยะห่างกันจำนวนมากโดยมีขนาดของที่อยู่อาศัยแบบครอบครัวเดียวหรือใหญ่กว่า แบบที่ 2 Surface Roughness C: ภูมิประเทศโล่งมีสิ่งกีดขวางกระจัดกระจายโดยทั่วไปมีความสูงน้อยกว่า 30 ฟุต (9.1 เมตร) หมาดหมุ่นี้รวมถึงประเภทที่เปิดโล่งและทุ่งหญ้า และแบบที่ 3 Surface Roughness D: พื้นที่ราบไม่มีสิ่งกีดขวางและผิวน้ำ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค. Topographic factor, K_{zt} ดูในรูปที่ 4 (Figure 26.8-1)

$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$ เมื่อ K_1 , K_2 , และ K_3 ได้มาจากในรูปที่ 22 (Fig 26.8-1)



รูปที่ 2.20 (Fig 26.8-1) Topographic factor, K_{zt}

ตารางที่ ข.3 Topographic Multipliers for Exposure C

H / L_h	K_1 Multiplier			x / L_h	K_2 Multiplier		z / L_h	K_3 Multiplier		
	2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill		2-D Escarp.	All Other Cases		2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	0.10	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04
							0.90	0.07	0.11	0.03
							1.00	0.05	0.08	0.02
							1.50	0.01	0.02	0.00
							2.00	0.00	0.00	0.00

- หมายเหตุ: 1. สำหรับค่า H / L_h , x / L_h และ z / L_h ที่มีค่าเกินเหนือจากที่แสดงไว้อนุญาตให้เทียบบัญญัติไตรยางค์
 2. สำหรับ $H / L_h > 0.5$, ให้สมมติว่า $H / L_h = 0.5$ สำหรับหาค่า K_1 และแทนค่า $2H$ สำหรับ L_h เพื่อหาค่า K_2 และ K_3
 3. Multipliers ถูกตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าลมเข้าใกล้เนินเขาหรือทางลาดชันตามทิศทางของความชันสูงสุด
 4. ตัวแปร:

H : ความสูงของเนินเขาหรือทางลาดชันโดยความสูงยึดตามทางทวนลม หน่วยฟุตหรือเมตร
 L_h : ระยะทางขึ้นไปบนยอดเขาถึงจุดที่ความแตกต่างของระดับความสูงของพื้นดินอยู่ที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของเนินเขา หน่วยฟุตหรือเมตร
 K_1 : Factor เพื่อพิจารณารูปร่างของลักษณะภูมิประเทศและผลกระทบของความเร็วขึ้นสูงสุด
 K_2 : Factor เพื่อพิจารณาสำหรับการลดความเร็วด้วยระยะทางขึ้นหรือลงของยอด
 K_3 : Factor เพื่อพิจารณาการลดความเร็วด้วยความสูงเหนือภูมิประเทศในท้องถิ่น
 x : ระยะทาง (ขึ้นหรือลง) จากยอดไปยังพื้นที่ก่อสร้าง หน่วยฟุตหรือเมตร
 z : ความสูงเหนือพื้นผิวดิน ณ บริเวณอาคาร หน่วยฟุตหรือเมตร
 μ : Horizontal attenuation factor

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันฯ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สืบย้อนกลับที่ห้ามมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

γ : Height attenuation factor.

ง. *Gust-Effect Factor, G* เป็นการพิจารณาถึงผลกระทบต่อลมกระโชก (gust-effect) สำหรับอาคารแบบแข็งเกร็ง (rigid building) หรือโครงสร้างอื่น ๆ ได้รับอนุญาตให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.85

ฉ. การจำแนกการปิดล้อมของอาคาร (enclosure classification)

ก) อาคารเปิดโล่ง (open buildings): อาคารที่มีผนังเปิดอย่างน้อย 80 เปอร์เซ็นต์ เงื่อนไขนี้แสดงสำหรับแต่ละผนังโดยสมการ $A_0 \geq 0.8A_g$ โดยที่

A_0 = พื้นที่ทั้งหมดของช่องเปิดในผนังที่ได้รับความดันบวกภายนอก (positive external pressure)

A_g = พื้นที่รวมของผนังที่ระบุมไว้ใน A_0

ข) อาคารที่มีการปิดล้อมบางส่วนของอาคาร (partially enclosed buildings) : อาคารที่เป็นไปตามเงื่อนไขทั้งสองต่อไปนี้ 1. พื้นที่ทั้งหมดของช่องเปิดในผนังที่ได้รับความดันบวกภายนอกมากกว่าผลรวมของพื้นที่เปิดในยอดคองเกลือของกรอบอาคาร (building envelope) (ผนังและหลังคา) มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และ 2. พื้นที่ทั้งหมดของช่องเปิดในผนังที่รับความดันบวกภายนอกเกิน (0.37 ตารางเมตร) หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนังนั้นแล้วแต่อันไหนจะมีค่าน้อยกว่า และเปอร์เซ็นต์ของช่องเปิดในยอดคองเกลือของกรอบอาคารไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ เงื่อนไขเหล่านี้แสดงโดยสมการต่อไปนี้:

$$1. A_0 > 1.1A_{0i}$$

$$2. A_0 > 4 \text{ m}^2 (0.37 \text{ m}^2) \text{ หรือ } > 0.01A_g \text{ แล้วแต่อันไหนจะมีค่าน้อยกว่า และ}$$

$$A_{0i} / A_{gi} \leq 0.20$$

เมื่อ

A_0, A_g = ระบุมไว้ในอาคารเปิดโล่ง

A_{0i} = ผลรวมของพื้นที่ของช่องเปิดในกรอบอาคาร(ผนังและหลังคา) ไม่รวม A_0

A_{gi} = ผลรวมของพื้นที่ผิวรวมของกรอบอาคาร(ผนังและหลังคา) ไม่รวม A_g

ค) อาคารที่มีการปิดล้อม (enclosed buildings) : เป็นอาคารที่ไม่ได้จัดอยู่ในประเภทเปิดหรือปิดบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จ. ค่าสัมประสิทธิ์ความดันภายใน, GC_{pi} , อยู่ในตารางที่ 5 (Table 26.11-1)

ตารางที่ ข.4 (Table 26.11-1.)

ประเภทการปิดล้อมของอาคาร	(GC_{pi})
อาคารเปิดโล่ง	0.00
อาคารที่มีการปิดล้อมบางส่วน	+0.55 -0.55
อาคารที่มีการปิดล้อม	+0.18 -0.18

หมายเหตุ:

1. เครื่องหมายบวกและลบมีความหมายว่าความดันมีทิศทางเข้าสู่และออกจากพื้นผิวภายใน (internal surfaces) ตามลำดับ
2. ค่าของ (GC_{pi}) ให้ใช้กับ q_z หรือ q_z ตามที่ระบุ
3. จะต้องพิจารณาสองกรณีเพื่อกำหนดข้อกำหนดแรงวิกฤติ (critical load requirements) สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสม
 - (i) ค่าบวกของ (GC_{pi}) นำไปใช้กับพื้นผิวภายในทั้งหมด
 - (ii) ค่าลบของ (GC_{pi}) นำไปใช้กับพื้นผิวภายในทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(4) กำหนดค่า velocity pressure exposure coefficient, K_z หรือ K_h ดูในตารางที่ 6 (Table 27.3-1) หมายเหตุ: K_h เป็นค่าคงที่และคำนวณสำหรับความสูงเฉลี่ยของอาคาร (h = ความสูงหลังคาเฉลี่ยของอาคารหรือความสูงของโครงสร้างอื่น ๆ ยกเว้นความสูงของชายคาจะใช้สำหรับมุมหลังคา θ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10° ในหน่วยฟุตหรือเมตร) ในขณะที่ K_z มีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความสูงที่วัดจากฐานของอาคาร (z = ความสูงเหนือระดับพื้นดิน ในหน่วยฟุตหรือเมตร)

ตารางที่ ข.5 (Table 27.3-1) velocity pressure exposure coefficient, K_z และ K_h

Height above Ground level, z		Exposure		
ft	(m)	B	C	D
0-15	(0-4.6)	0.57	0.85	1.03
20	(6.1)	0.62	0.90	1.08
25	(7.6)	0.66	0.94	1.12
30	(9.1)	0.70	0.98	1.16
40	(12.2)	0.76	1.04	1.22
50	(15.2)	0.81	1.09	1.27
60	(18.0)	0.85	1.13	1.31
70	(21.3)	0.89	1.17	1.34
80	(24.4)	0.93	1.21	1.38
90	(27.4)	0.96	1.24	1.40
100	(30.5)	0.99	1.26	1.43
120	(36.6)	1.04	1.31	1.48
140	(42.7)	1.09	1.36	1.52
160	(48.8)	1.13	1.39	1.55
180	(54.9)	1.17	1.43	1.58
200	(61.0)	1.20	1.46	1.61
250	(76.2)	1.28	1.53	1.68
300	(91.4)	1.35	1.59	1.73
350	(106.7)	1.41	1.64	1.78
400	(121.9)	1.47	1.69	1.82
450	(137.2)	1.52	1.73	1.86
500	(152.4)	1.56	1.77	1.89

หมายเหตุ:

1. ค่า velocity pressure exposure coefficient, K_z สามารถหาได้จากตารางหรืออาจหาได้จากสูตรดังนี้

$$\text{สำหรับ } 15 \text{ ft} \leq z \leq z_g$$

$$K_z = 2.01(z/z_g)^{2/\alpha}$$

z_g = ความสูงที่กำหนดของชั้นขอบเขตบรรยากาศที่ใช้ในมาตรฐานนี้

$$\text{สำหรับ } z \leq 15 \text{ ft}$$

$$K_z = 2.01(15/z_g)^{2/\alpha}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. α และ z_g มีค่าในตาราง Table 26.9.1

3. อนุญาตให้เทียบบัญญัติไตรยางสำหรับการหาค่าที่อยู่ระหว่างความสูง z

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. ประเภทการเปิดรับลม (exposure category) ถูกกำหนดใน section 26.7

ตารางที่ ข.6 (Table 26.9-1) Terrain Exposure Constants ในหน่วยเมตริก

Exposure	α	z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	l (ft)	\bar{e}	z_{min} (m)*
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.14
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5.0	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

* z_{min} = ความสูงต่ำสุดที่ใช้เพื่อให้แน่ใจว่าความสูงที่เท่ากัน \bar{z} มากกว่า $0.6h$ หรือ z_{min} สำหรับอาคารที่มี $h \leq z_{min}$ ทำให้ \bar{z} จะถูกนำมาเป็น z_{min}

(5) หาค่าความดันจลน์ (velocity pressure), q_z หรือ q_h จากสมการข้างล่างนี้

$$q_h = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2$$

โดยที่:

q_z = ความดันจลน์คำนวณที่ความสูง z หน่วย (N/m²)

q_h = ความดันจลน์คำนวณที่ความสูงหลังค่าเฉลี่ย h , หน่วย (N/m²)

K_z = velocity pressure exposure coefficient

K_{zt} = topographic factor

K_d = wind directionality factor

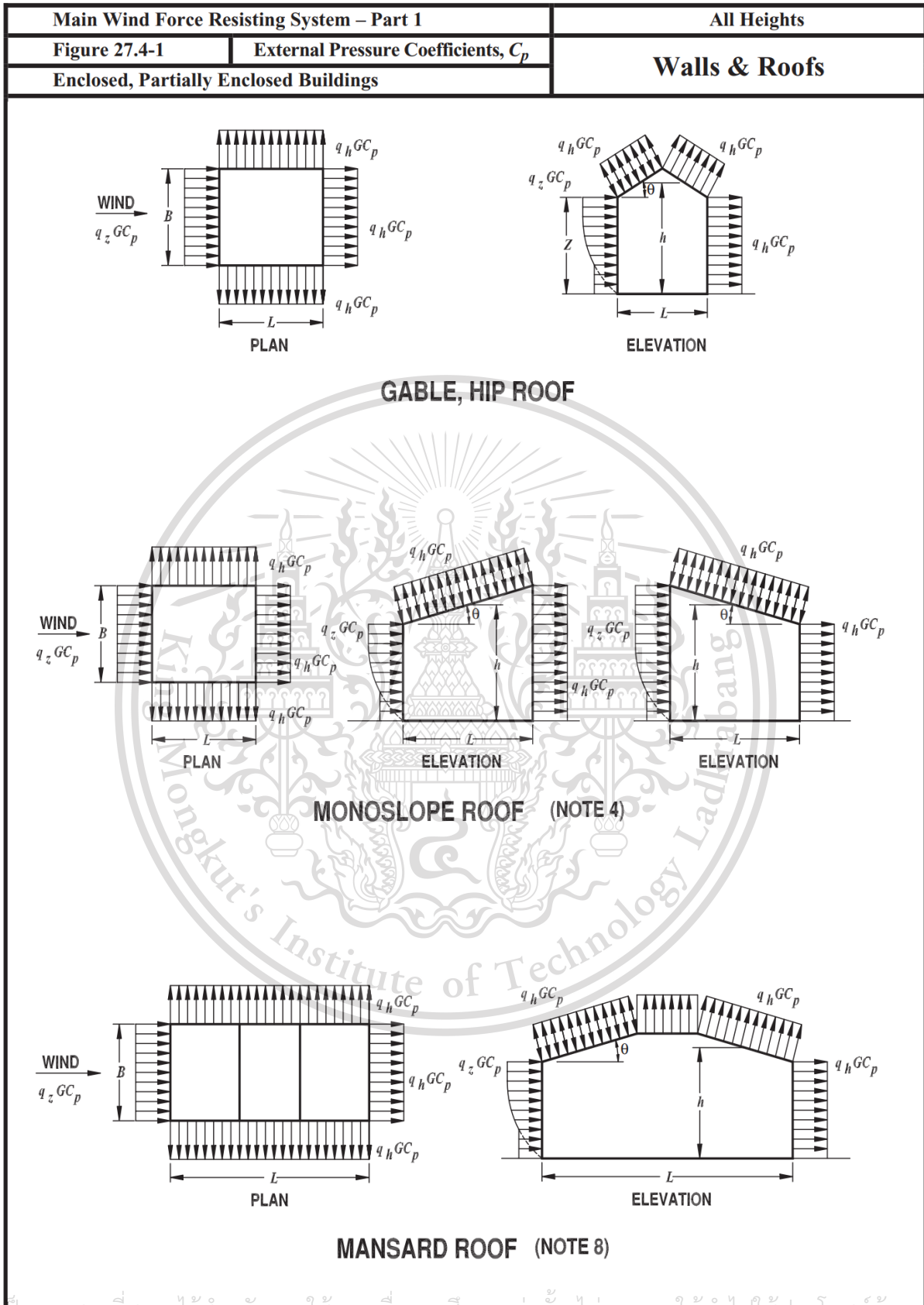
V = ความเร็วลมพื้นฐาน หน่วย (m/s)

(6) กำหนดค่า external pressure coefficients, C_p ในรูปที่ 23 (Figure 27.4-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.7 (Figure 27.4-1(cont.)) ค่าสัมประสิทธิ์ความดันผนัง (wall pressure coefficients), C_p

ค่าสัมประสิทธิ์ความดันผนัง, C_p			
พื้นผิว	L / B	C_p	ใช้กับ
ผนังด้านที่ลมเข้าปะทะ	ทุกค่า	0.8	q_z
ผนังด้านอับลม	0-1	-0.5	q_h
	2	-0.3	
	4	-0.2	
ผนังด้านข้าง	ทุกค่า	-0.7	q_h

B = ขนาดแนวนอน (horizontal dimension) ของอาคารโดยวัดตั้งฉากกับ wind direction

L = ขนาดแนวนอน (horizontal dimension) ของอาคารโดยวัดขนานกับ wind direction

(7) หาค่าความดันลม (wind pressure), p บนผิวของอาคาร (แบบปิดล้อมและแบบปิดล้อมบางส่วน) จากสมการ

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi})$$

$q = q_z$ สำหรับผนังด้านที่ลมเข้าปะทะหาค่าที่ความสูง z เหนือพื้นดิน

$q = q_h$ สำหรับผนังด้านอับลม ผนังด้านข้างและหลังคาหาค่าที่ความสูง h

$q_i = q_h$ สำหรับผนังด้านอับลม ผนังด้านข้างและหลังคาของ enclosed buildings และสำหรับหาค่า negative internal pressure ใน partially enclosed buildings

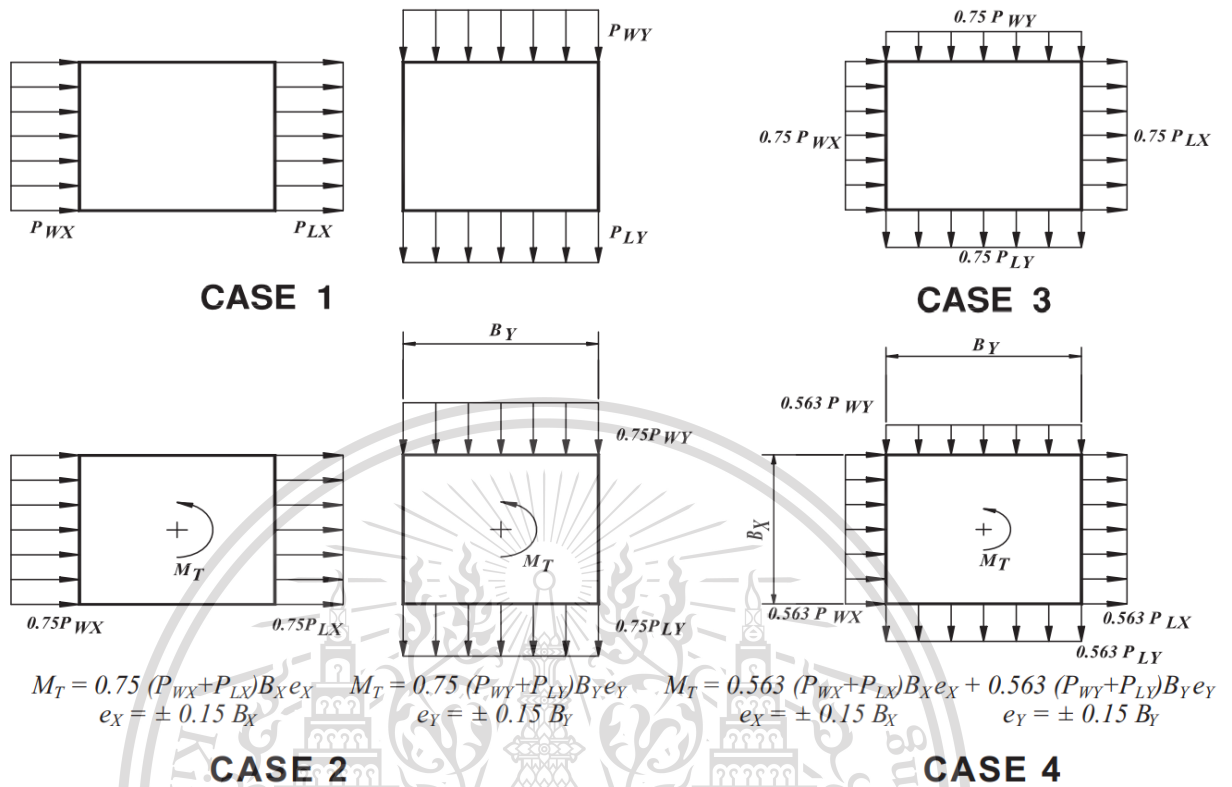
$q_i = q_h$ สำหรับหาค่า positive internal pressure ใน partially enclosed buildings ที่ความสูง z ถูกกำหนดให้เป็นระดับช่องเปิดสูงสุด (level of the highest opening) ในอาคารที่อาจจะส่งผลต่อ positive internal pressure สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่มีลมพัดแรง กระจกที่ไม่ทนต่อแรงกระแทกให้ถือเป็นการเปิดตาม section 26.10.3 สำหรับหาค่า positive internal pressure q_i อาจได้รับการพิจารณาอย่างระมัดระวังที่ความสูง $h(q_i = q_h)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบแรงลมในแต่ละกรณีดังแสดงใน Figure 27.4-8



รูปที่ ข.3 (Figure 27.4-8) กรณีการออกแบบแรงลมในแต่ละกรณี

กรณีที่ 1. แบบเต็มของการออกแบบความดันลม (full design wind pressure) กระทำบนพื้นที่ที่คาดการณ์ไว้ซึ่งตั้งฉากกับแกนหลักแต่ละแกนของโครงสร้างโดยพิจารณาแยกกันตามแกนหลัก

กรณีที่ 2. สามส่วนสี่ (0.75) ของการออกแบบความดันลม (Three quarters of the design wind pressure) กระทำบนพื้นที่ที่คาดการณ์ไว้ซึ่งตั้งฉากกับแกนหลักแต่ละแกนของโครงสร้างร่วมกับโมเมนต์บิดตามที่แสดงโดยพิจารณาแยกกันสำหรับแกนหลักแต่ละแกน

กรณีที่ 3. แรงลมตามที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 แต่ถือว่ามีแรงกระทำพร้อมกันที่ 75% ของค่าที่ระบุไว้

กรณีที่ 4. แรงลมตามที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 2 แต่ถือว่ามีแรงกระทำพร้อมกันที่ 75% ของค่าที่ระบุไว้

หมายเหตุ:

1. การออกแบบความดันลมสำหรับหน้าด้านที่ลมเข้าปะทะ (windward faces) และหน้าด้านอับลม (leeward faces) จะต้องถูกกำหนดตามข้อกำหนด 27.4.1 และ 27.4.2 สำหรับการให้แรงกระทำกับความสูงทั้งหมด

2. แผนภาพแสดงรูปด้านของอาคาร

3. ตัวแปร:

P_{WX}, P_{WY} : การออกแบบแรงดันของหน้าด้านที่ลมเข้าปะทะกระทำในแนวแกนหลัก x, y ตามลำดับ

P_{LX}, P_{LY} : การออกแบบแรงดันของหน้าด้านอับลมกระทำในแนวแกนหลัก x, y ตามลำดับ

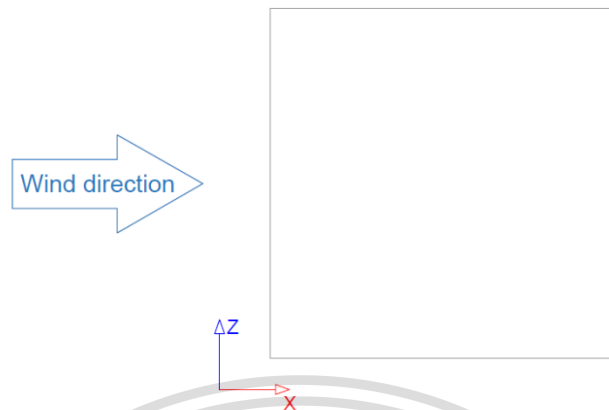
$e(e_x, e_y)$: ความเยื้องศูนย์กลางสำหรับแกนหลัก x, y ของโครงสร้างตามลำดับ

M_T : โมเมนต์บิดต่อความสูงหนึ่งหน่วยกระทำกับอาคารโดยมีทิศแกนแนวตั้งของอาคาร

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รายการคำนวณแรงลม



รูปที่ ข.4 ทิศทางของลมที่กระทำกับอาคาร

เสียงประเภทที่ IV

- (1) ประเภทความเสี่ยงของอาคาร จากตารางที่ 3 ให้อาคารที่ใช้คำนวณเป็นความเสี่ยงประเภทที่ IV
- (2) ความเร็วลมพื้นฐาน ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 km/hr
- (3) พารามิเตอร์แรงลม

- $K_d = 0.85$ (ตารางที่ 2.4)
- ประเภทการเปิดรับลม (exposure category) ให้เป็นประเภท D
- $K_{zt} = 1.0$ (Topographic factor สำหรับพื้นที่ราบ)
- $G = 0.85$ สำหรับอาคารแบบแข็งเกร็ง
- อาคารที่มีการปิดล้อม
- $GC_{pi} = \pm 0.18$ (ตารางที่ 2.6)

(4) Velocity Pressure Exposure Coefficient, K_h และ K_z

$$K_h = 2.01(h/z_g)^{2/\alpha}$$

$$K_z = 2.01(z/z_g)^{2/\alpha}$$

$$h = 400 \text{ m}$$

$$z_g = 213.36$$

$$\alpha = 11.5 \text{ (ตารางที่ 8 Exposure D)}$$

ดังนั้น $K_h = 2.242$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(5) หาค่าความดันจลน์ (velocity pressure), q_z และ q_h

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } q_h &= 0.613 K_h K_{zt} K_d V^2 \\ &= 0.613(2.242)(1.0)(0.85) \left[\frac{100,000}{60 \times 60} \right]^2 = 901.38 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } q_z &= 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 \\ &= 0.613(K_z)(1.0)(0.85) \left[\frac{100,000}{60 \times 60} \right]^2 = 402.05 K_z \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

(6) กำหนดค่า External Pressure Coefficients, C_p

สำหรับ $L/B = \frac{50}{50} = 1$ (ตารางที่ 9)

- ผนังด้านที่ลมเข้าปะทะ: $C_p = 0.8$
- ผนังด้านอับลม: $C_p = -0.5$
- ผนังด้านข้าง: $C_p = -0.7$

(7) หาค่าความดันลม (wind pressure), p และแรงกระทำกับพื้น, V

$$V = p \times A; A = \text{พื้นที่ต่อหนึ่งชั้น} = 50 \times 8 \text{ m}^2$$

สำหรับด้านอับลม:

$$p = q_h GC_p - q_i (GC_{pi}) = 901.38(0.85)(-0.5) - 901.38(0.85)(\pm 0.18) = -521.00 \text{ N/m}^2 \text{ (Max)}$$

$$V = -521.00 \times 400 = -208.40 \text{ kN ต่อหนึ่งชั้น}$$

สำหรับผนังด้านข้าง:

$$p = q_h GC_p - q_i (GC_{pi}) = 901.38(0.85)(-0.7) - 901.38(0.85)(\pm 0.18) = -674.23 \text{ N/m}^2 \text{ (Max)}$$

$$V = -674.23 \times 400 = -269.69 \text{ kN ต่อหนึ่งชั้น}$$

สำหรับด้านที่ลมเข้าปะทะ:

$$p = q_z GC_p - q_i (GC_{pi}) \text{ และ } q_i = q_h = 901.38$$

$$p = q_z(0.85)(0.8) - (901.38)(0.85)(\pm 0.18) = (0.68)q_z + 137.91 \text{ N/m}^2 \text{ (Max)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.8 แรงกระทำสำหรับด้านที่ลมเข้าปะทะ

ชั้น	z	K_z	q_z	p	V (kN)
0	2	0.892	358.729	381.845	76.37
1	8	1.136	456.533	448.352	179.34
2	16	1.281	515.021	488.124	195.25
3	24	1.375	552.649	513.712	205.48
4	32	1.445	581.003	532.992	213.20
5	40	1.502	603.993	548.625	219.45
6	48	1.551	623.452	561.857	224.74
7	56	1.593	640.392	573.376	229.35
8	64	1.630	655.437	583.607	233.44
9	72	1.664	669.002	592.831	237.13
10	80	1.695	681.373	601.244	240.50
11	88	1.723	692.762	608.988	243.60
12	96	1.749	703.325	616.171	246.47
13	104	1.774	713.184	622.875	249.15
14	112	1.797	722.435	629.166	251.67
15	120	1.819	731.155	635.096	254.04
16	128	1.839	739.408	640.708	256.28
17	136	1.859	747.245	646.037	258.41
18	144	1.877	754.710	651.113	260.45
19	152	1.895	761.840	655.962	262.38
20	160	1.912	768.667	660.604	264.24
21	168	1.928	775.217	665.058	266.02
22	176	1.944	781.514	669.340	267.74
23	184	1.959	787.579	673.464	269.39
24	192	1.973	793.430	677.443	270.98
25	200	1.988	799.083	681.287	272.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

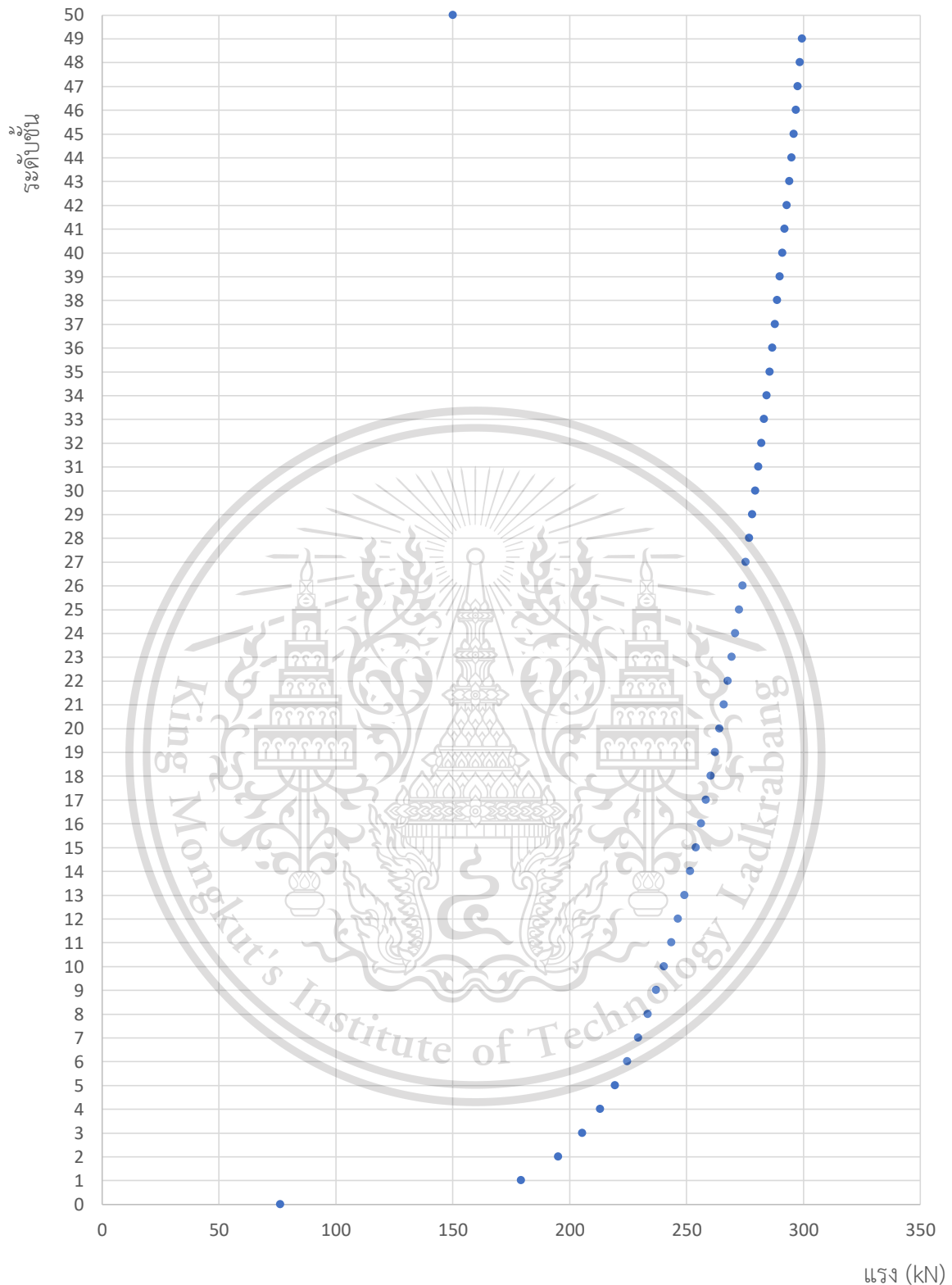
ตารางที่ ข.8(ต่อ) แรงกระทำสำหรับด้านที่ลมเข้าปะทะ

ชั้น	z	K_z	q_z	P	V (kN)
26	208	2.001	804.553	685.006	274.00
27	216	2.014	809.851	688.608	275.44
28	224	2.027	814.989	692.103	276.84
29	232	2.039	819.978	695.495	278.20
30	240	2.052	824.827	698.792	279.52
31	248	2.063	829.544	702.000	280.80
32	256	2.075	834.137	705.123	282.05
33	264	2.086	838.613	708.167	283.27
34	272	2.097	842.978	711.135	284.45
35	280	2.107	847.239	714.032	285.61
36	288	2.118	851.400	716.862	286.74
37	296	2.128	855.466	719.627	287.85
38	304	2.138	859.443	722.331	288.93
39	312	2.147	863.334	724.977	289.99
40	320	2.157	867.144	727.568	291.03
41	328	2.166	870.876	730.106	292.04
42	336	2.175	874.533	732.593	293.04
43	344	2.184	878.119	735.031	294.01
44	352	2.193	881.637	737.423	294.97
45	360	2.201	885.090	739.771	295.91
46	368	2.210	888.479	742.076	296.83
47	376	2.218	891.809	744.340	297.74
48	384	2.226	895.080	746.564	298.63
49	392	2.234	898.296	748.751	299.50
50	398	2.240	900.672	750.367	150.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



กราฟที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านเข้าปะทะลมกับชั้นของอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.9 แรงกระทำด้านข้างต่อ 1 node ที่ถูกตั้งค่าในซอฟต์แวร์

	ด้านลมเข้าปะทะ	ด้านอับลม	ด้านข้างซ้าย	ด้านข้างขวา
ชั้น	V_x (N)	V_x (N)	V_z (N)	V_z (N)
0	1591	2171	2810	-2810
1	3,736	4,342	5,619	-5,619
2	4,068	4,342	5,619	-5,619
3	4,281	4,342	5,619	-5,619
4	4,442	4,342	5,619	-5,619
5	4,572	4,342	5,619	-5,619
6	4,682	4,342	5,619	-5,619
7	4,778	4,342	5,619	-5,619
8	4,863	4,342	5,619	-5,619
9	4,940	4,342	5,619	-5,619
10	5,010	4,342	5,619	-5,619
11	5,075	4,342	5,619	-5,619
12	5,135	4,342	5,619	-5,619
13	5,191	4,342	5,619	-5,619
14	5,243	4,342	5,619	-5,619
15	5,293	4,342	5,619	-5,619
16	5,339	4,342	5,619	-5,619
17	5,384	4,342	5,619	-5,619
18	5,426	4,342	5,619	-5,619
19	5,466	4,342	5,619	-5,619
20	5,505	4,342	5,619	-5,619
21	5,542	4,342	5,619	-5,619
22	5,578	4,342	5,619	-5,619
23	5,612	4,342	5,619	-5,619
24	5,645	4,342	5,619	-5,619
25	5,677	4,342	5,619	-5,619

	ด้านลมเข้าปะทะ	ด้านอับลม	ด้านข้างซ้าย	ด้านข้างขวา
ชั้น	V_x (N)	V_x (N)	V_z (N)	V_z (N)
26	5,708	4,342	5,619	-5,619
27	5,738	4,342	5,619	-5,619
28	5,768	4,342	5,619	-5,619
29	5,796	4,342	5,619	-5,619
30	5,823	4,342	5,619	-5,619
31	5,850	4,342	5,619	-5,619
32	5,876	4,342	5,619	-5,619
33	5,901	4,342	5,619	-5,619
34	5,926	4,342	5,619	-5,619
35	5,950	4,342	5,619	-5,619
36	5,974	4,342	5,619	-5,619
37	5,997	4,342	5,619	-5,619
38	6,019	4,342	5,619	-5,619
39	6,041	4,342	5,619	-5,619
40	6,063	4,342	5,619	-5,619
41	6,084	4,342	5,619	-5,619
42	6,105	4,342	5,619	-5,619
43	6,125	4,342	5,619	-5,619
44	6,145	4,342	5,619	-5,619
45	6,165	4,342	5,619	-5,619
46	6,184	4,342	5,619	-5,619
47	6,203	4,342	5,619	-5,619
48	6,221	4,342	5,619	-5,619
49	6,240	4,342	5,619	-5,619
50	3126	2171	2810	-2810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

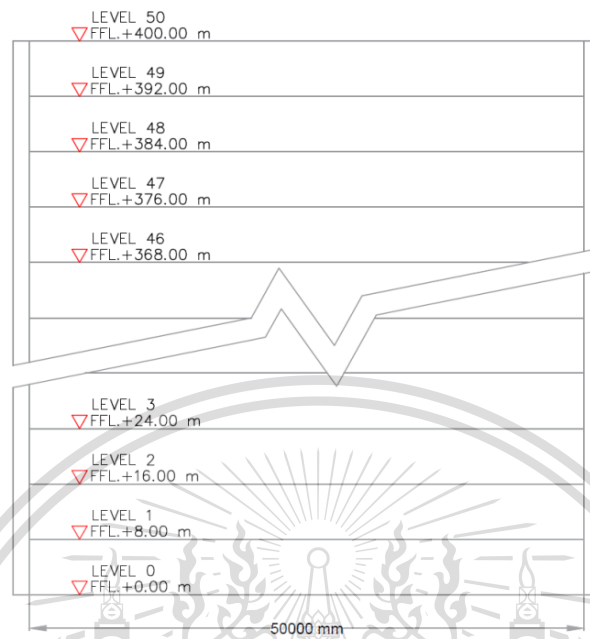
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



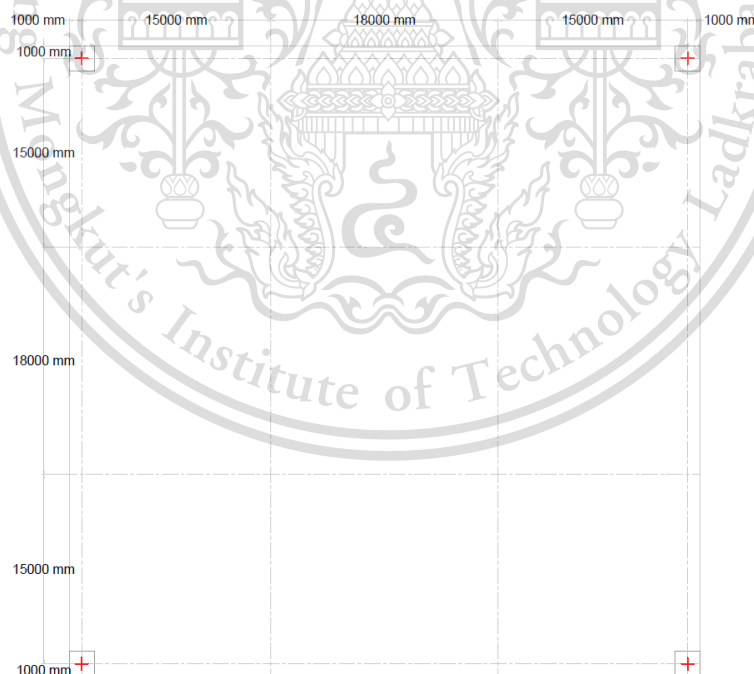
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.1 แผน elevation (ตัดส่วนแสดงส่วนล่างและส่วนบนของอาคาร)

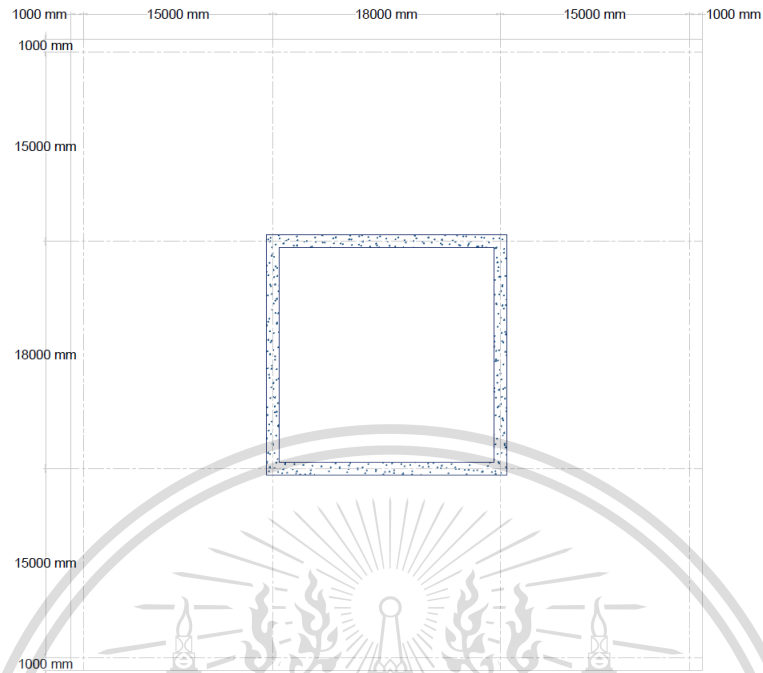


รูปที่ ค.2 แผนการวางตำแหน่งเสา

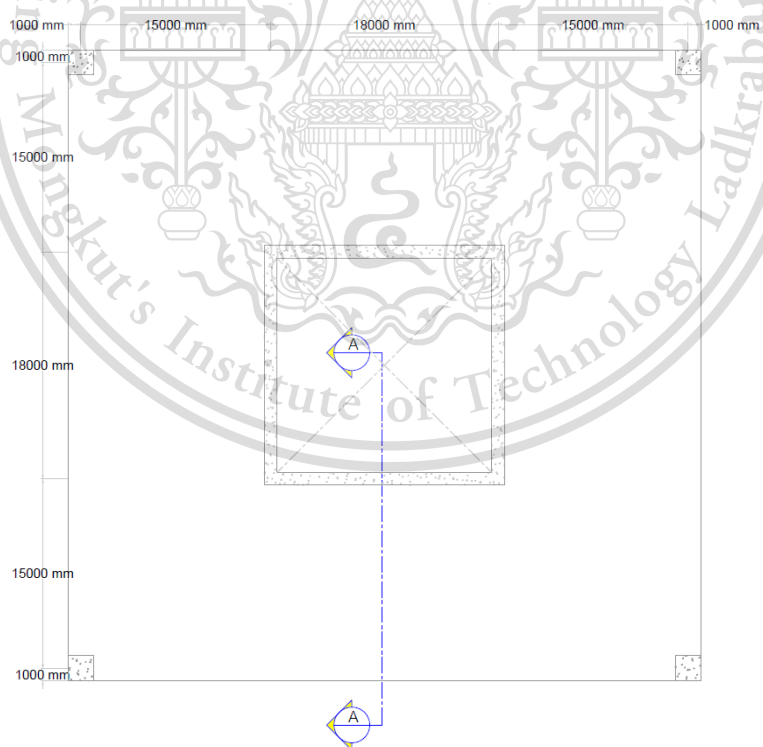
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.3 แพลนของผนังรับแรงเฉือน (core wall)

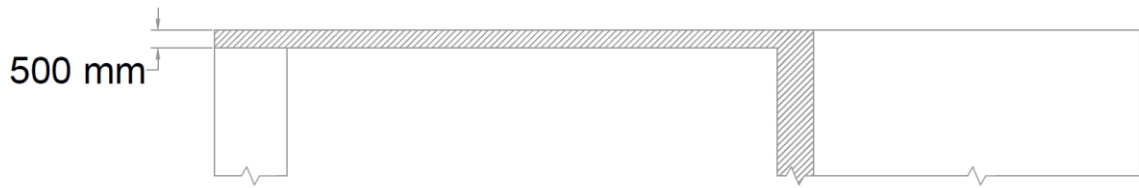


รูปที่ ค.4 แพลนพื้น

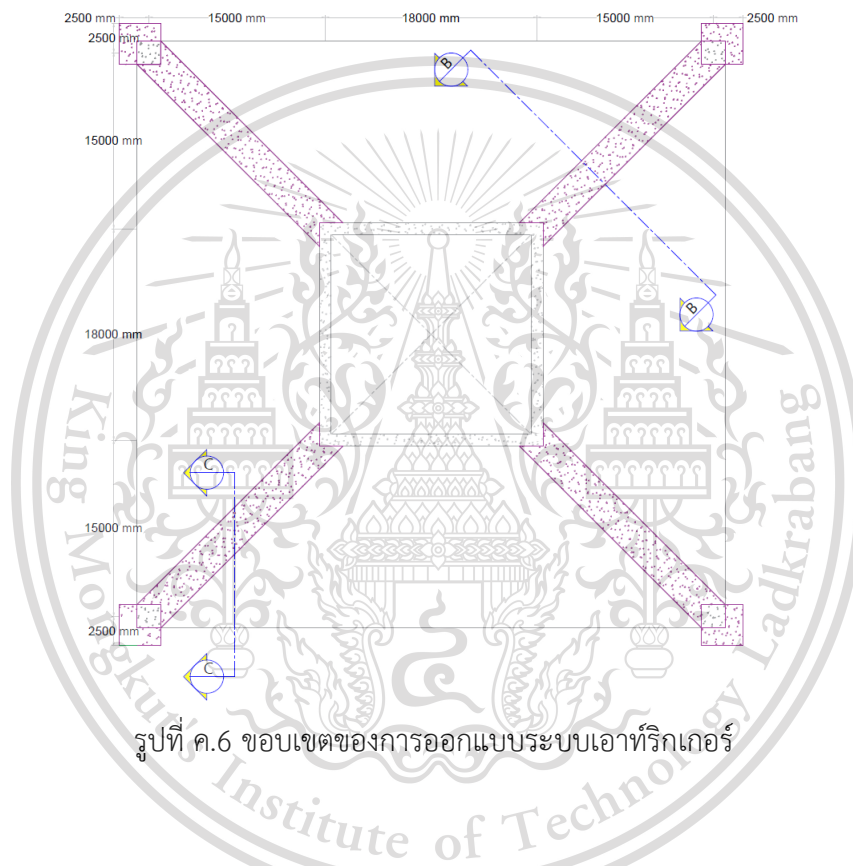
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

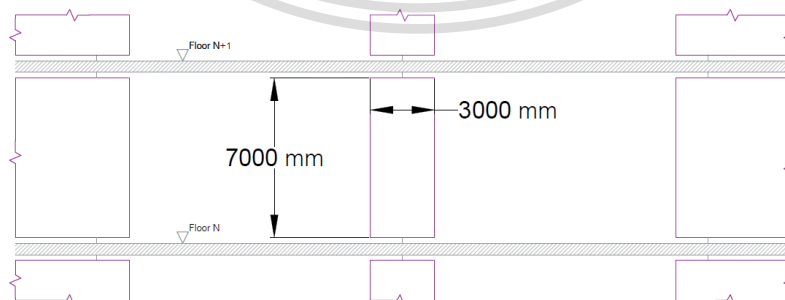
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.5 รูปตัด A-A แสดงความหนาของพื้น



รูปที่ ค.6 ขอบเขตของการออกแบบระบบเอทริกเกอร์

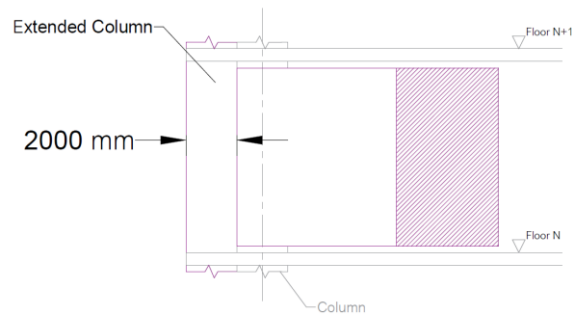


รูปที่ ค.7 รูปตัด B-B แสดงความลึกและความกว้างเอทริกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.8 รูปตัด C-C แสดงส่วนการขยายหน้าตัดเสา

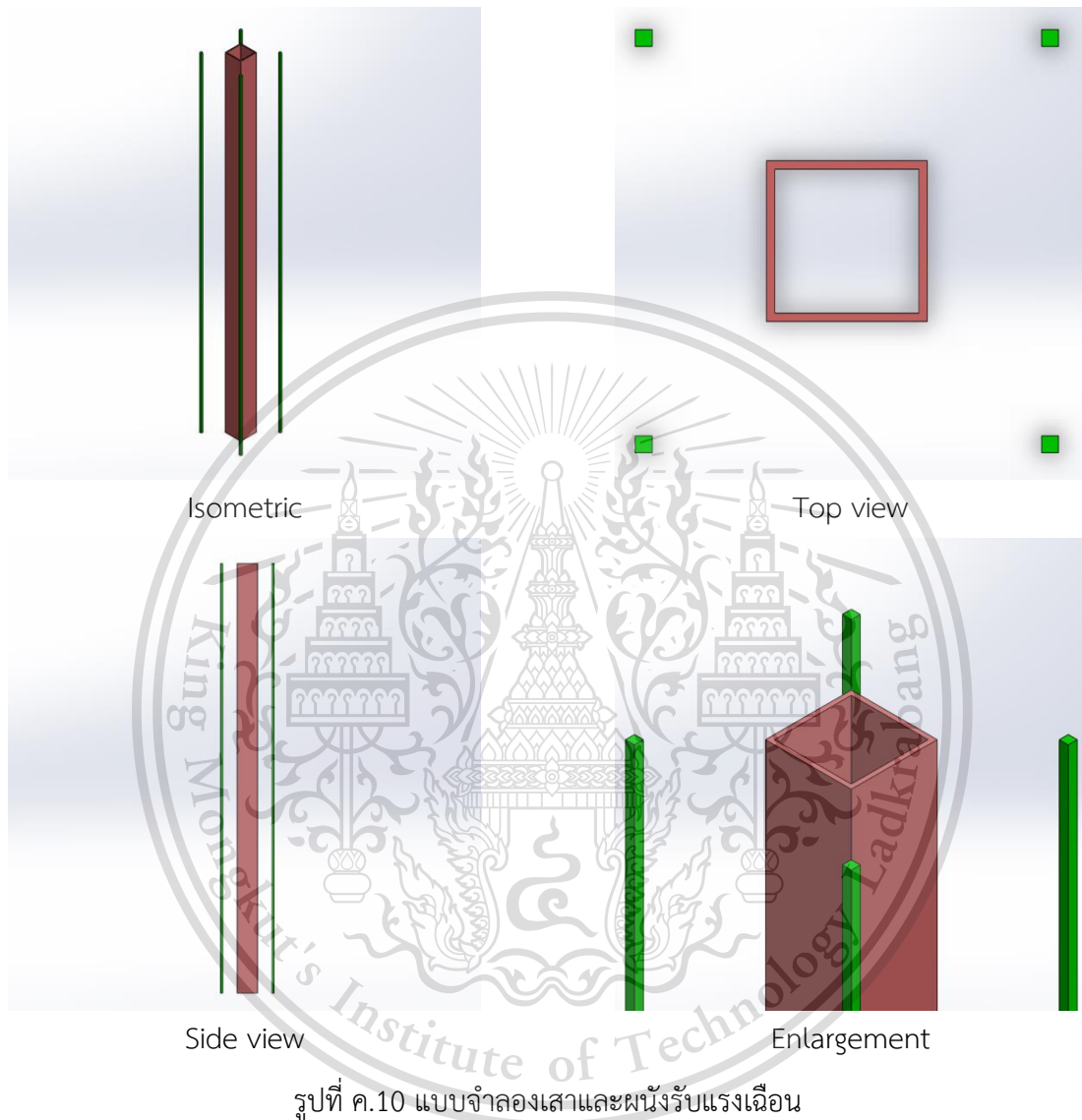


รูปที่ ค.9 แสดงจุดสังเกตอยู่ที่ตำแหน่งบนสุดของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

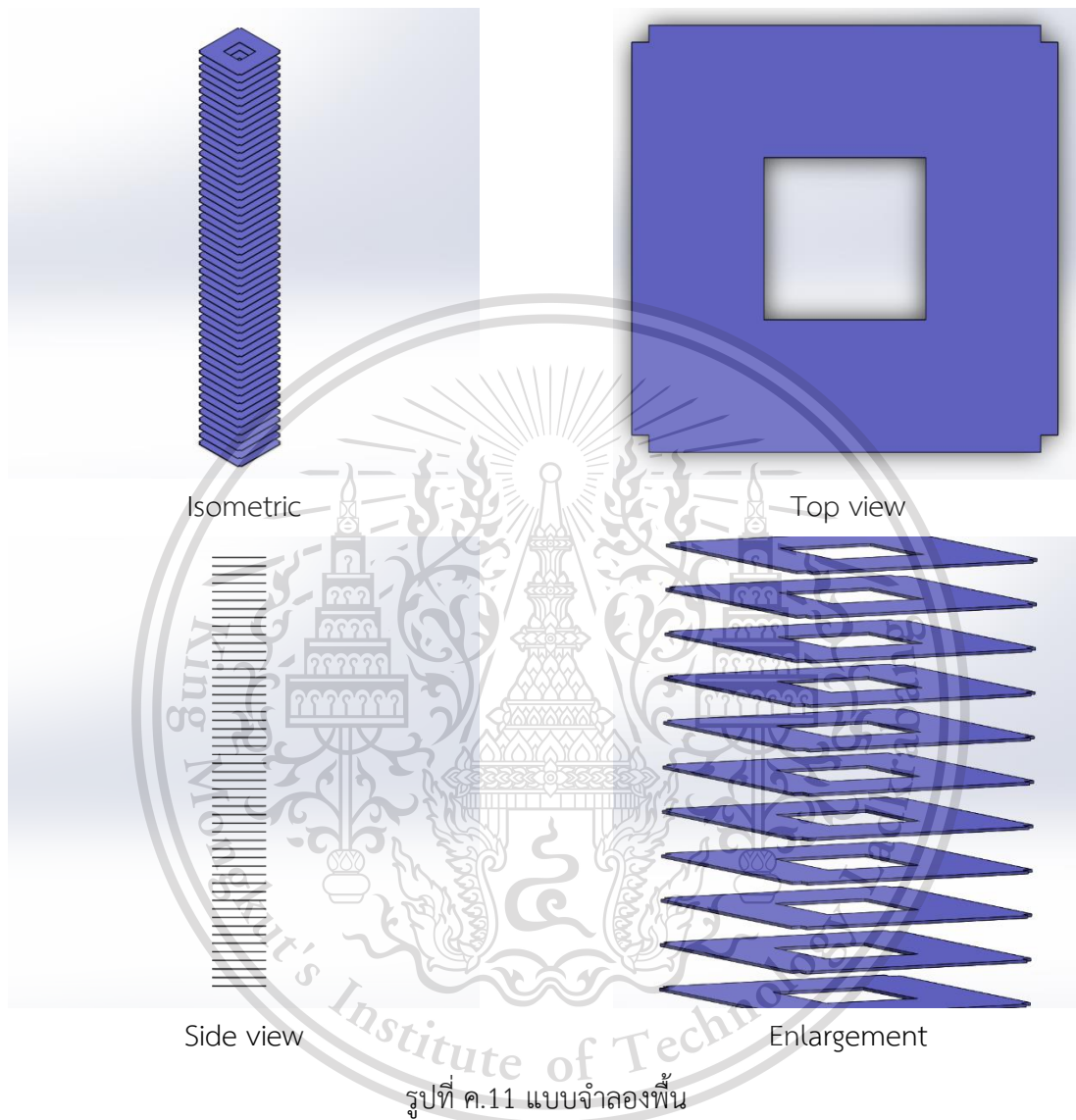


รูปที่ ค.10 แบบจำลองเสาและผนังรับแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

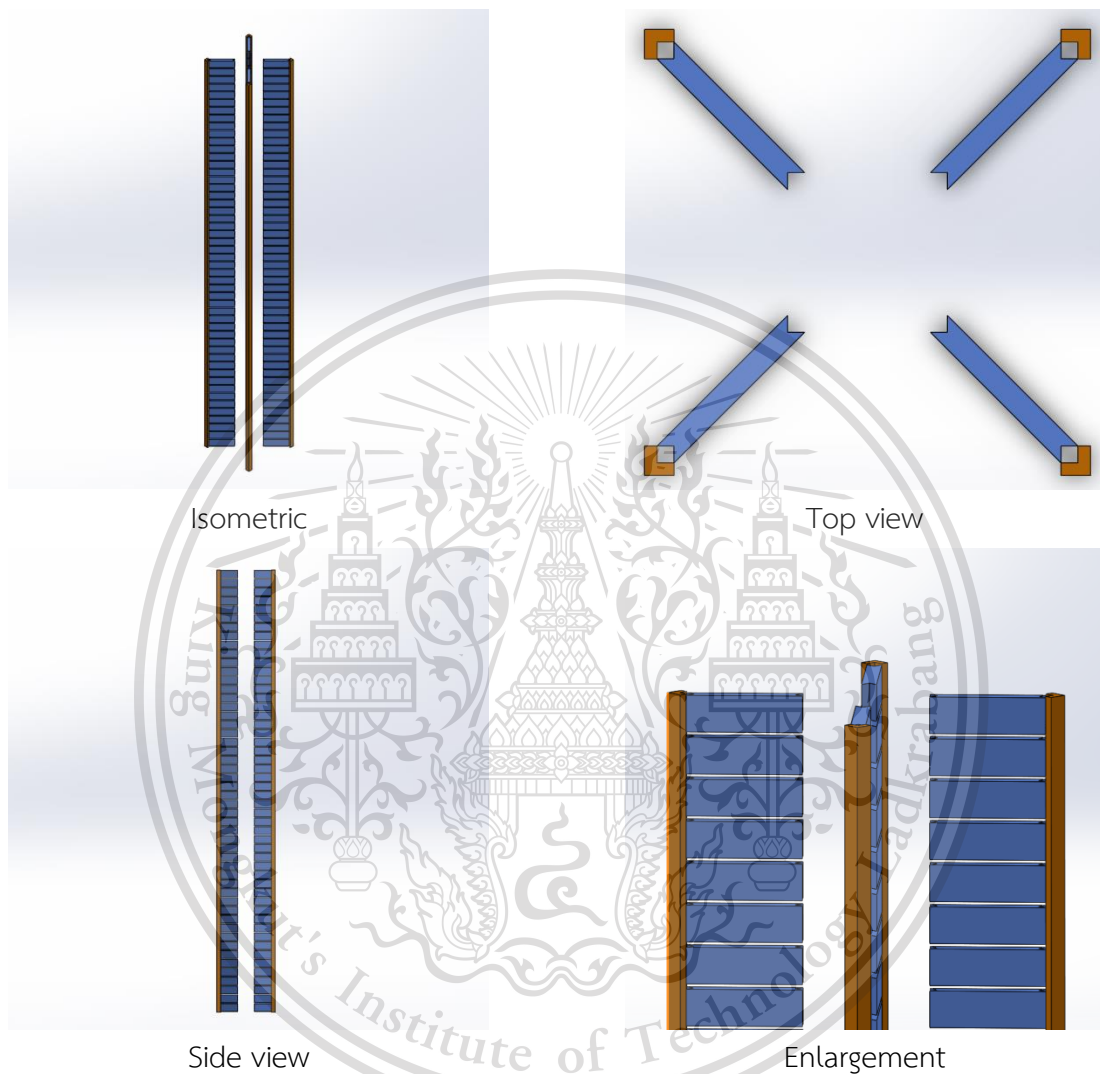
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.12 แบบจำลองระบบเอทริกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

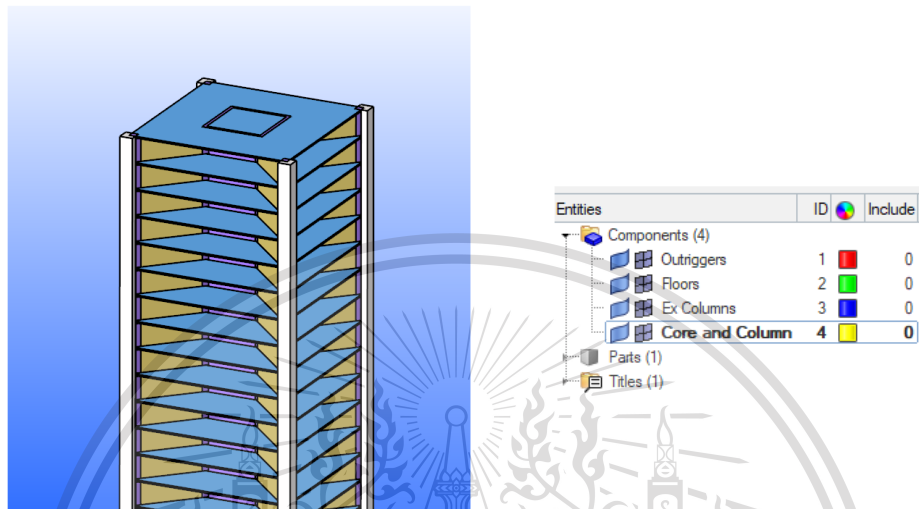
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



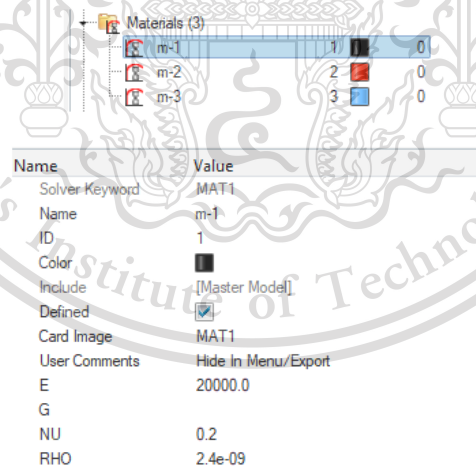
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ง.1 แบ่งกลุ่มแบบจำลองโครงสร้าง



รูปที่ ง.2 กำหนดค่าวัสดุของ $m-1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Properties (6)			
Freeze_prop_1	1	Red	0
Optimize_prop_1	2	Blue	0
Freeze_prop_2	3	Red	0
Optimize_prop_2	4	Blue	0
Freeze_prop_3	5	Red	0
Optimize_prop_3	6	Blue	0

Name	Value
Solver Keyword	PSOLID
Name	Freeze_prop_1
ID	1
Color	Red
Include	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image	PSOLID
Material	(1) m-1
User Comments	Hide In Menu/Export
CORDM options	BLANK
ISOP	
FCTN	
HOURGLS_OPT	<input type="checkbox"/>
PSOLIDX	<input type="checkbox"/>

รูปที่ ง.3 กำหนดคุณสมบัติของให้กับวัสดุ $m-1$

Components (4)			
Outriggers	1	Red	0
Floors	2	Green	0
Ex Columns	3	Blue	0
Core and Columns	4	Yellow	0

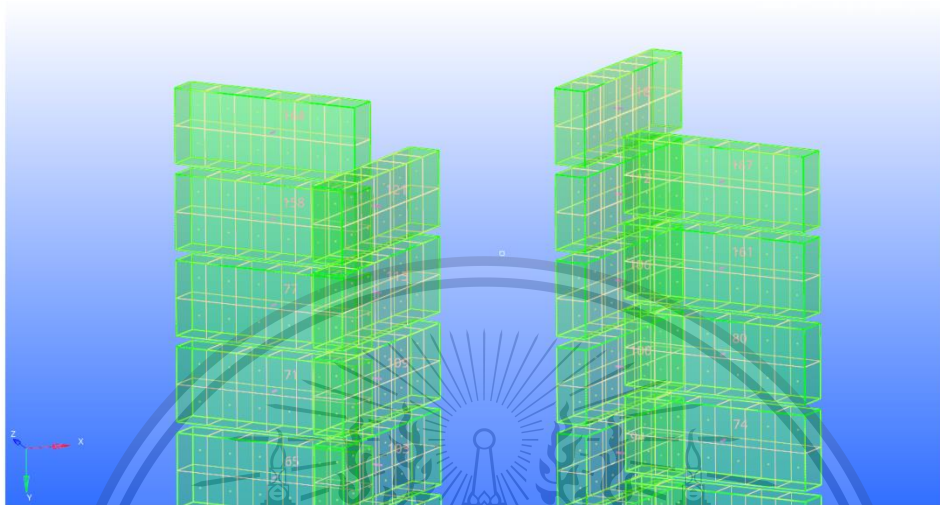
Name	Value
Name	Outriggers
ID	1
Color	Red
FE style	Grid
Geometry style	Mesh
Include	[Master Model]
Property	(5) Optimize_prop-1
Material	(1) m-1

รูปที่ ง.4 กำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุให้กับ *Outriggers*

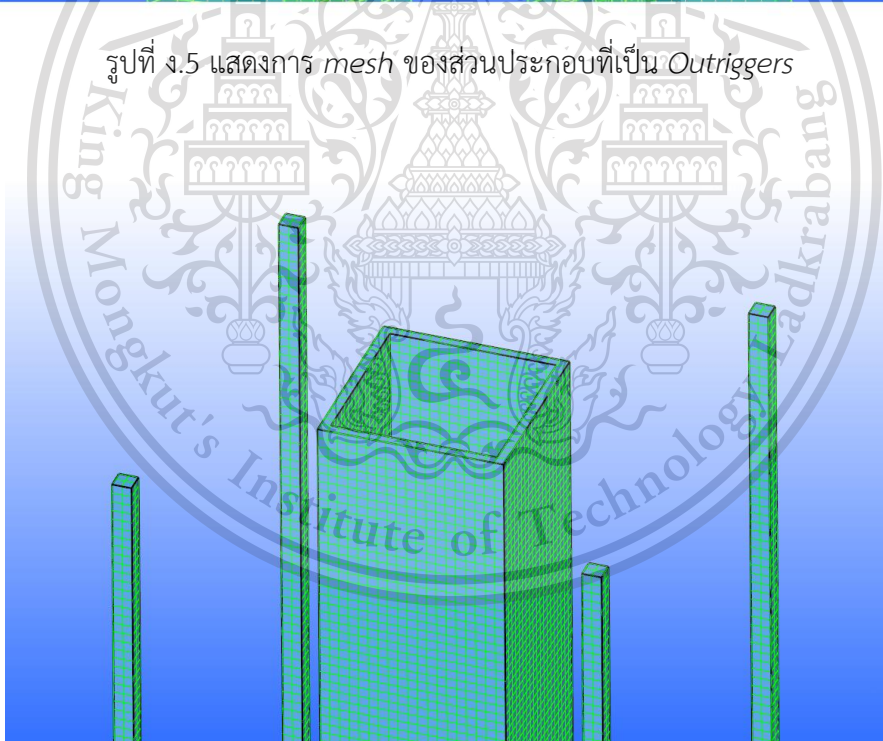
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ง.5 แสดงการ *mesh* ของส่วนประกอบที่เป็น *Outriggers*

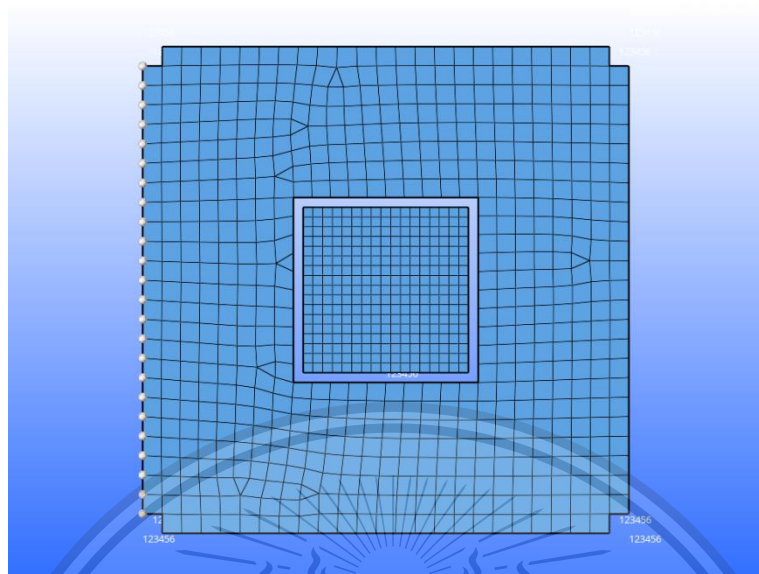


รูปที่ ง.6 แสดงการ *mesh* ของส่วนประกอบที่เป็น *Core and columns*

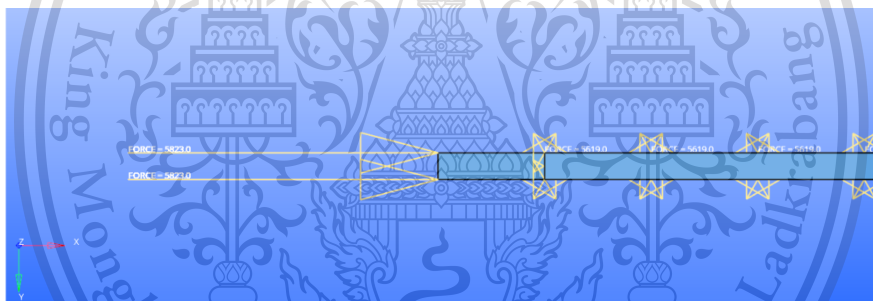
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

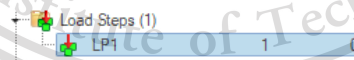
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ๗.7 กำหนดทิศเครื่องหมายของแรง



รูปที่ ๗.8 แรงกระทำกับโครงสร้างที่พื้น



Name	Value
Solver Keyword	SUBCASE
Name	LP1
ID	1
Include	[Master Model]
User Comments	Hide In Menu/Export
Subcase Definition	
Analysis type	Generic
SPC	(2) Fixed support
LOAD	(1) Wind load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในองค์กรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ๗.9 การตั้งค่า Load Step

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

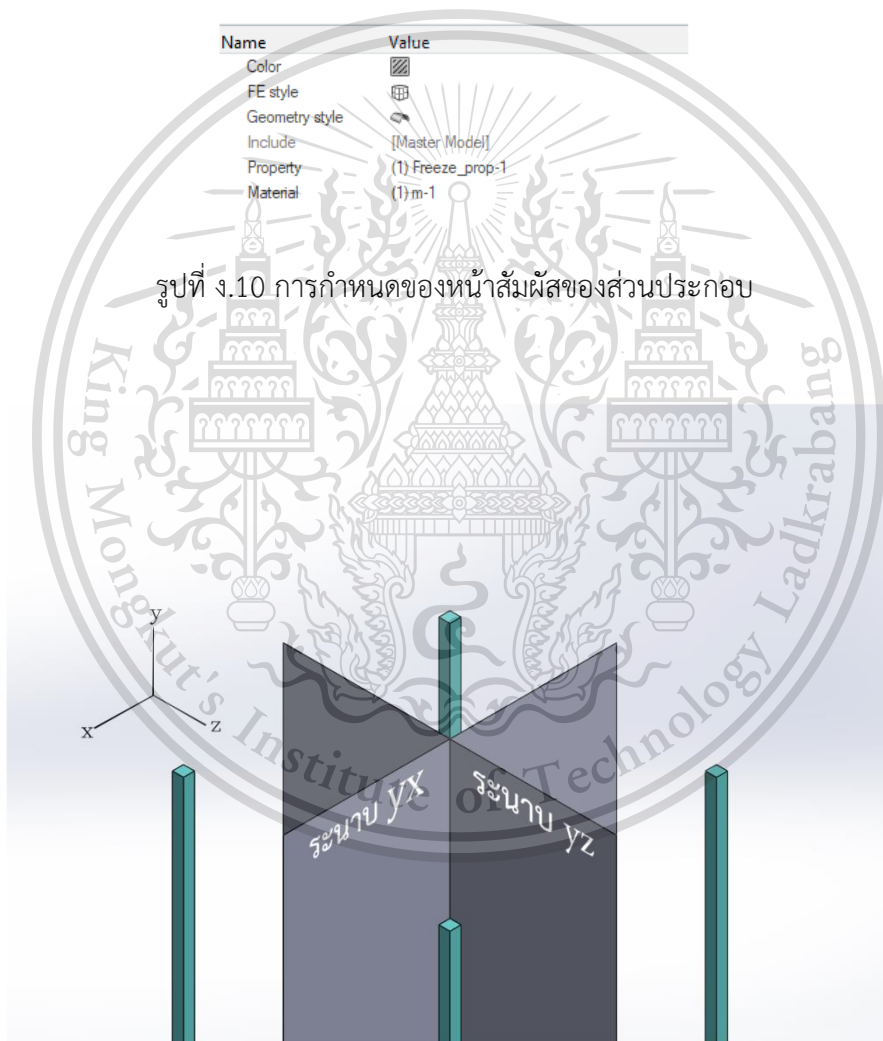
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Components (4)		
Outriggers	1	
Floors	2	
Ex Columns	3	
Core and Columns	4	
Sets (2)		
Set_Core and Columns	1	
Set_Floors	2	

Entities	ID	Type	Slave
Set_Core and Columns_Set_Floors	1	CONTACT	Set_Floors

Name	Value
Color	
FE style	
Geometry style	
Include	[Master Model]
Property	(1) Freeze_prop-1
Material	(1) m-1

รูปที่ ง.10 การกำหนดของหน้าสัมผัสของส่วนประกอบ

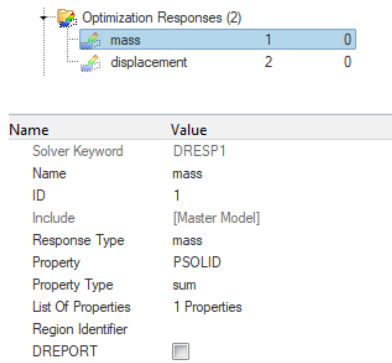


รูปที่ ง.11 ระนาบการออกแบบ

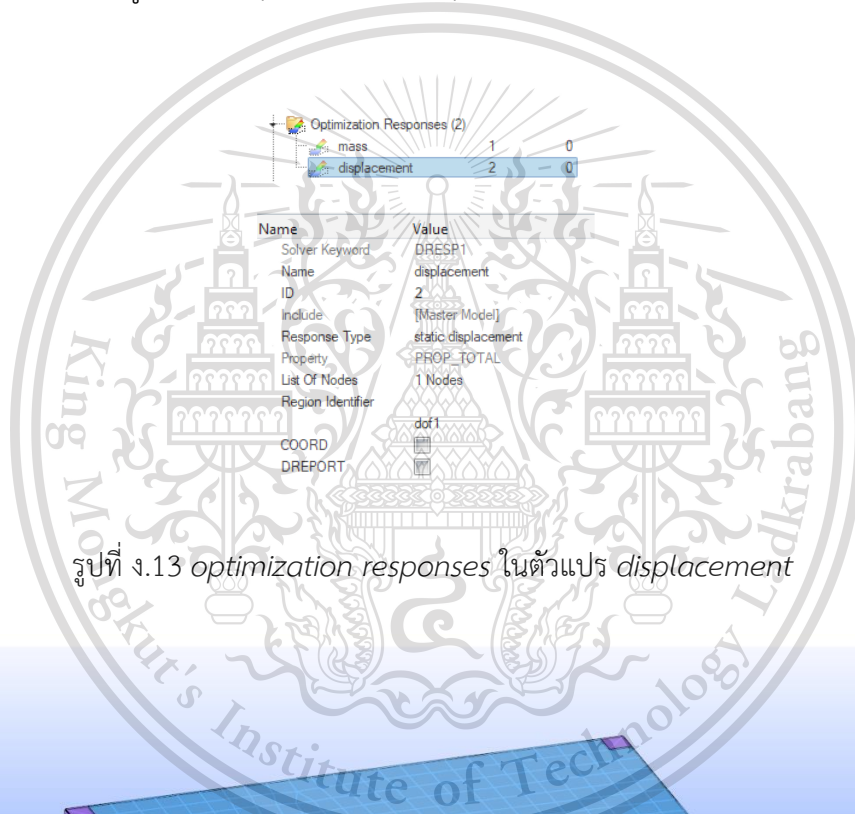
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

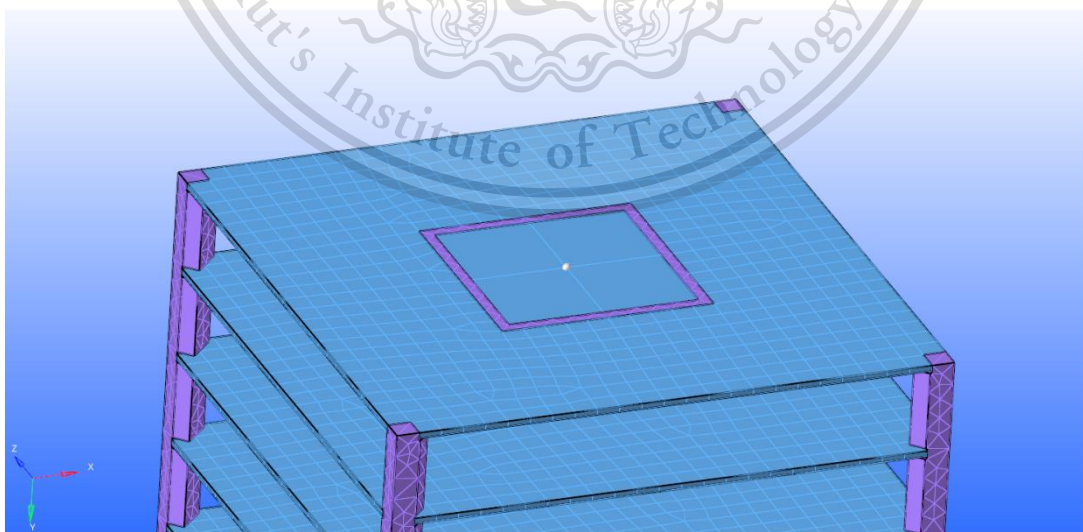
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ง.12 optimization responses ในตัวแปร mass



รูปที่ ง.13 optimization responses ในตัวแปร displacement



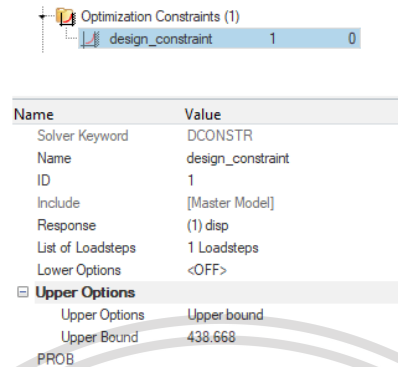
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ง.14 แสดงจุดสังเกตที่ได้กำหนดไว้บนสุดของแบบจำลอง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

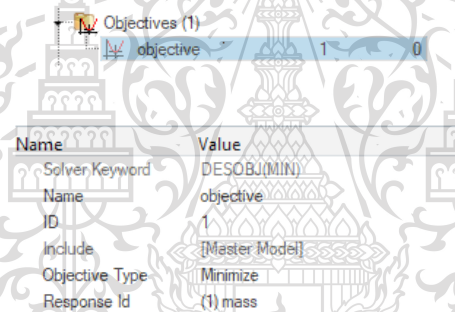
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Name	Value
Solver Keyword	DCONSTR
Name	design_constraint
ID	1
Include	[Master Model]
Response	(1) disp
List of Loadsteps	1 Loadsteps
Lower Options	<OFF>
Upper Options	
Upper Options	Upper bound
Upper Bound	438.668
PROB	

รูปที่ ง.15 การกำหนดค่า *optimization constraints* ของแบบจำลอง



Name	Value
Solver Keyword	DESOBJ(MIN)
Name	objective
ID	1
Include	[Master Model]
Objective Type	Minimize
Response Id	(1) mass

รูปที่ ง.16 เป้าหมายของ *topology optimization*

```

Message log:
Messages for the job:

OPTIMIZATION HAS CONVERGED.

FEASIBLE DESIGN (ALL CONSTRAINTS SATISFIED).

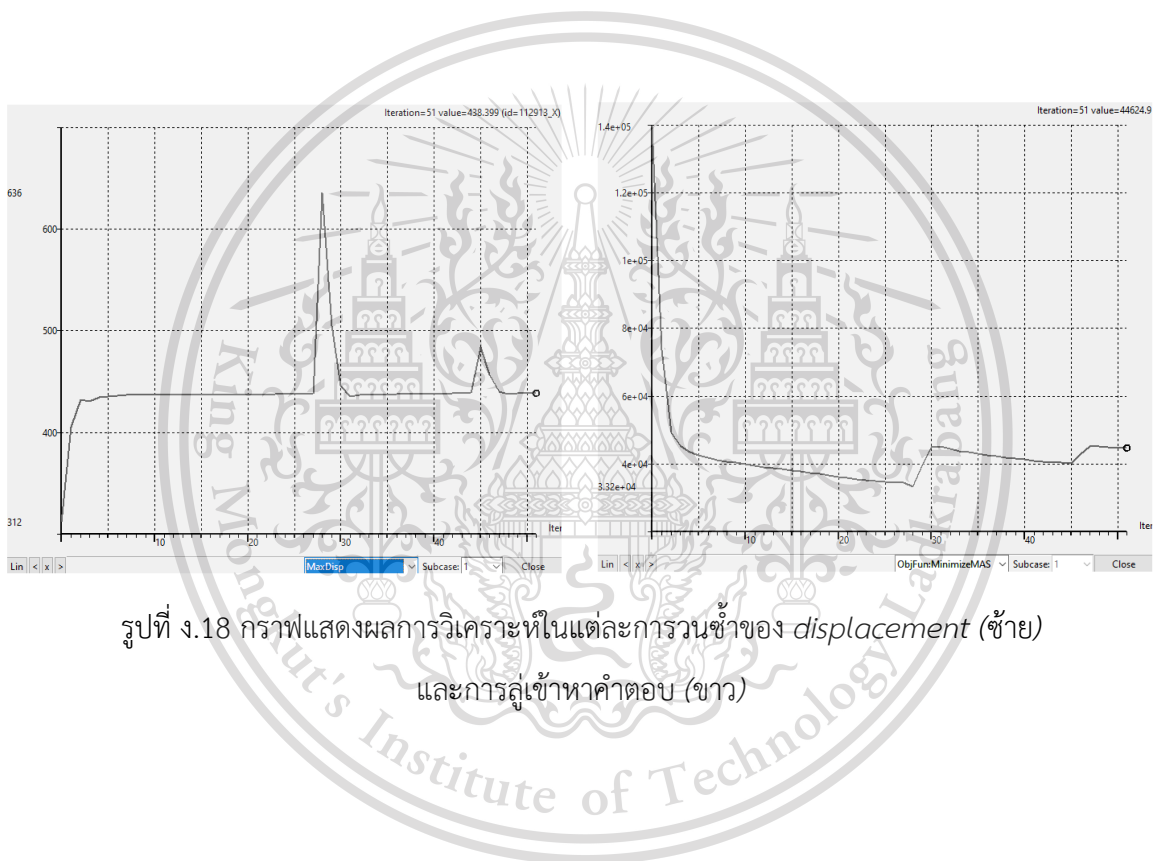
```

รูปที่ ง.17 ข้อความแสดงสถานะการคำนวณของ *topology optimization*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 18 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ในแต่ละการวนซ้ำของ *displacement* (ซ้าย)
และการลู่เข้าหาคำตอบ (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

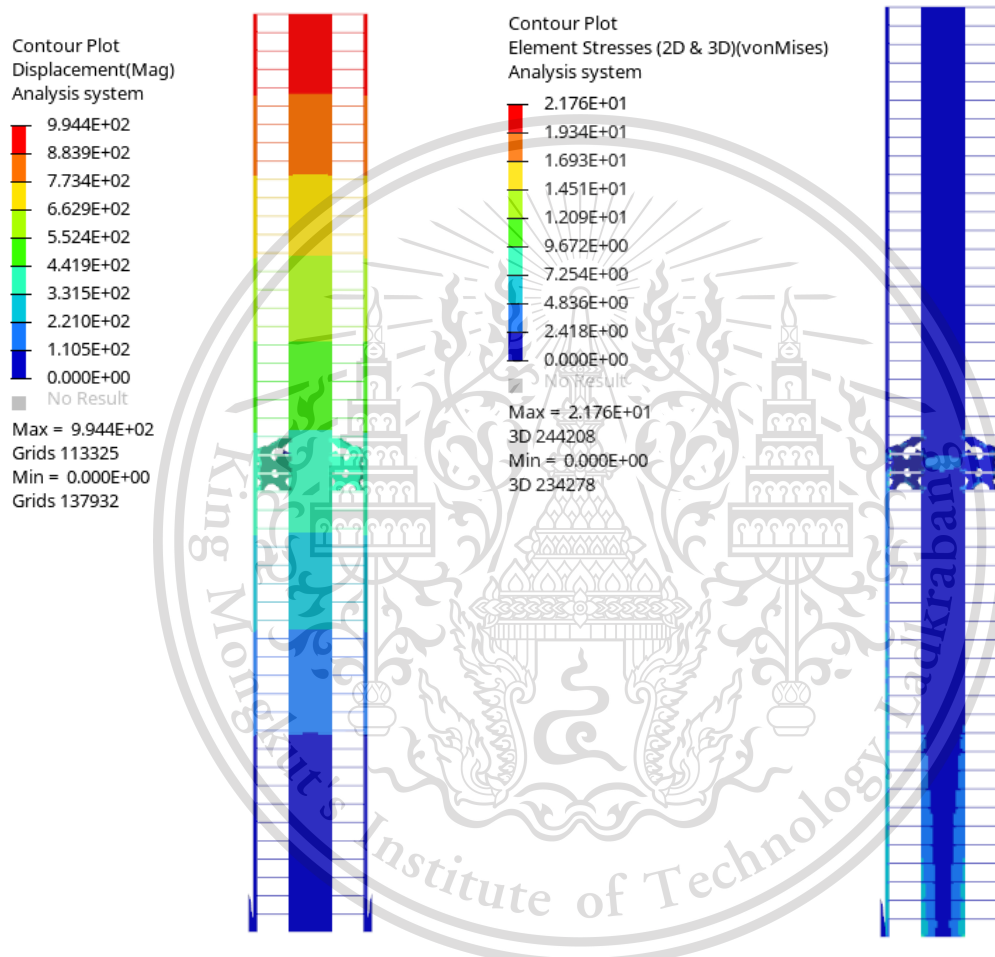
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

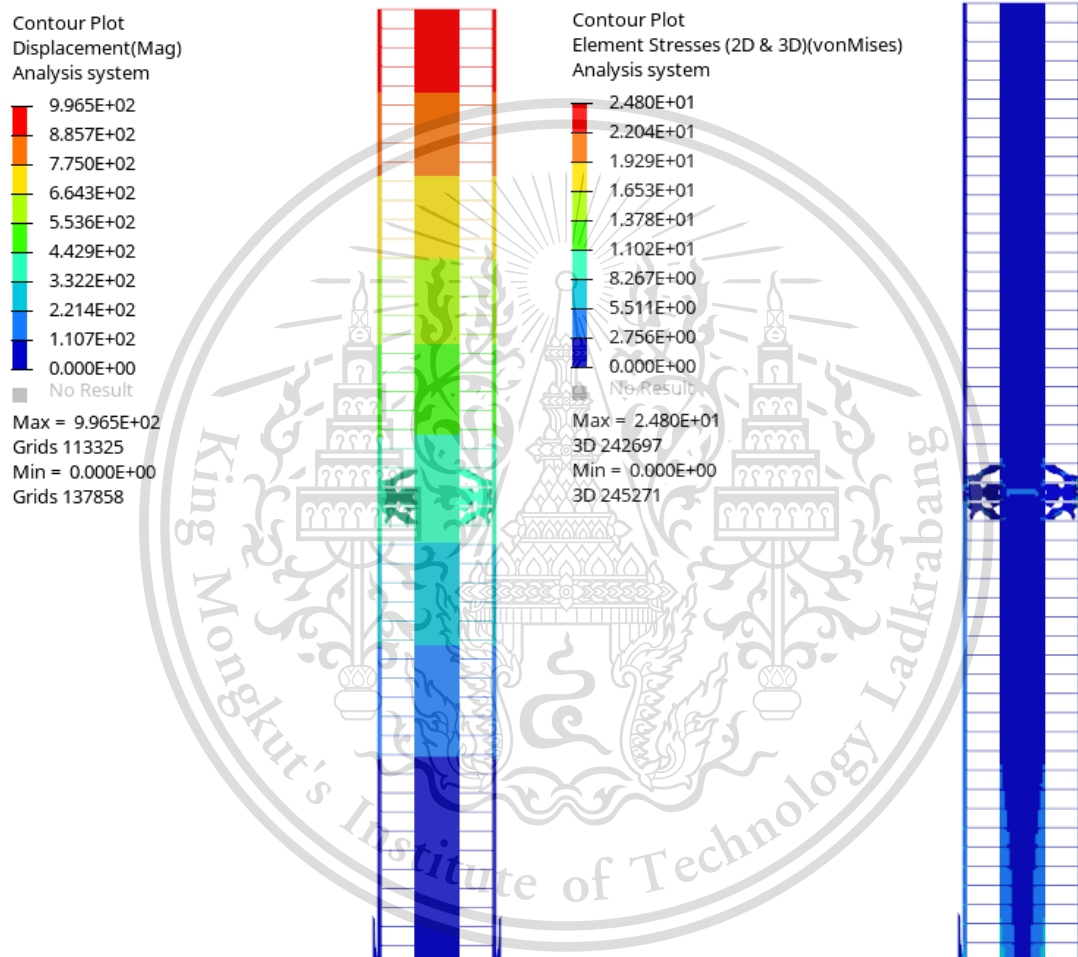


รูปที่ จ.1 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

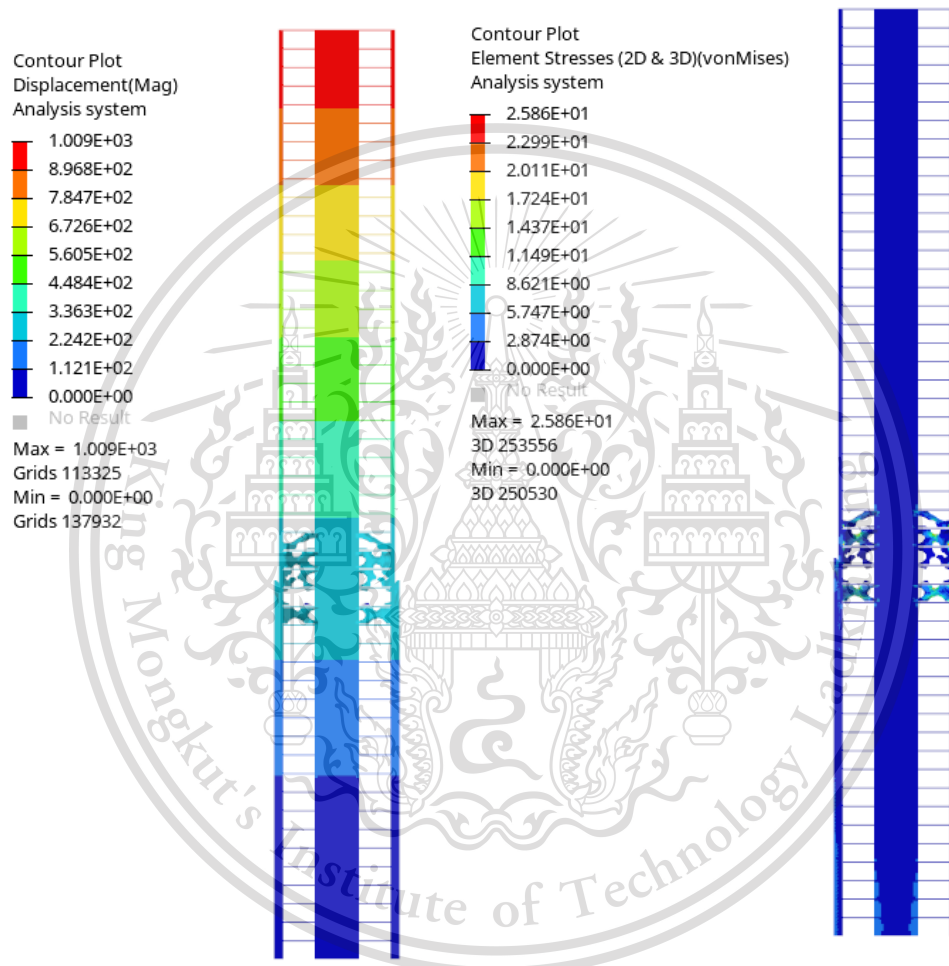


รูปที่ จ.2 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

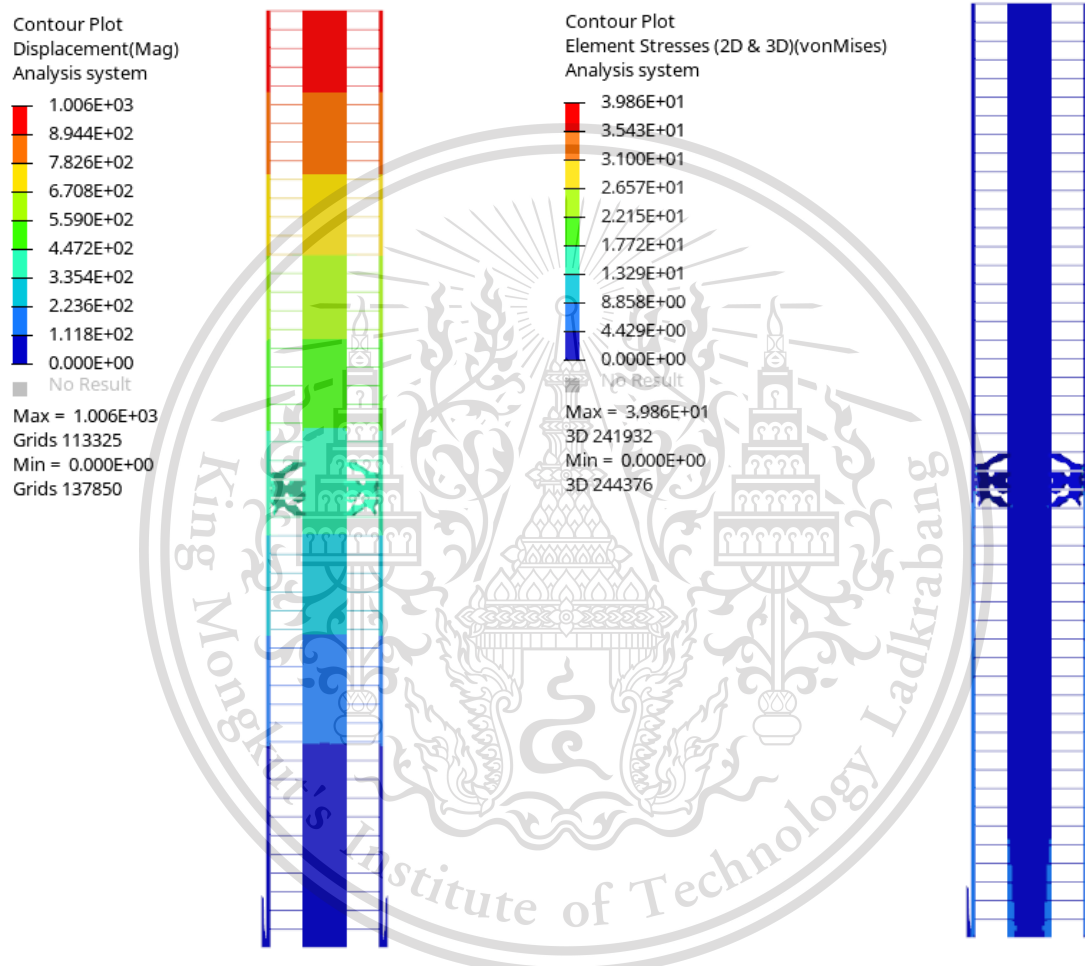


รูปที่ จ.3 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

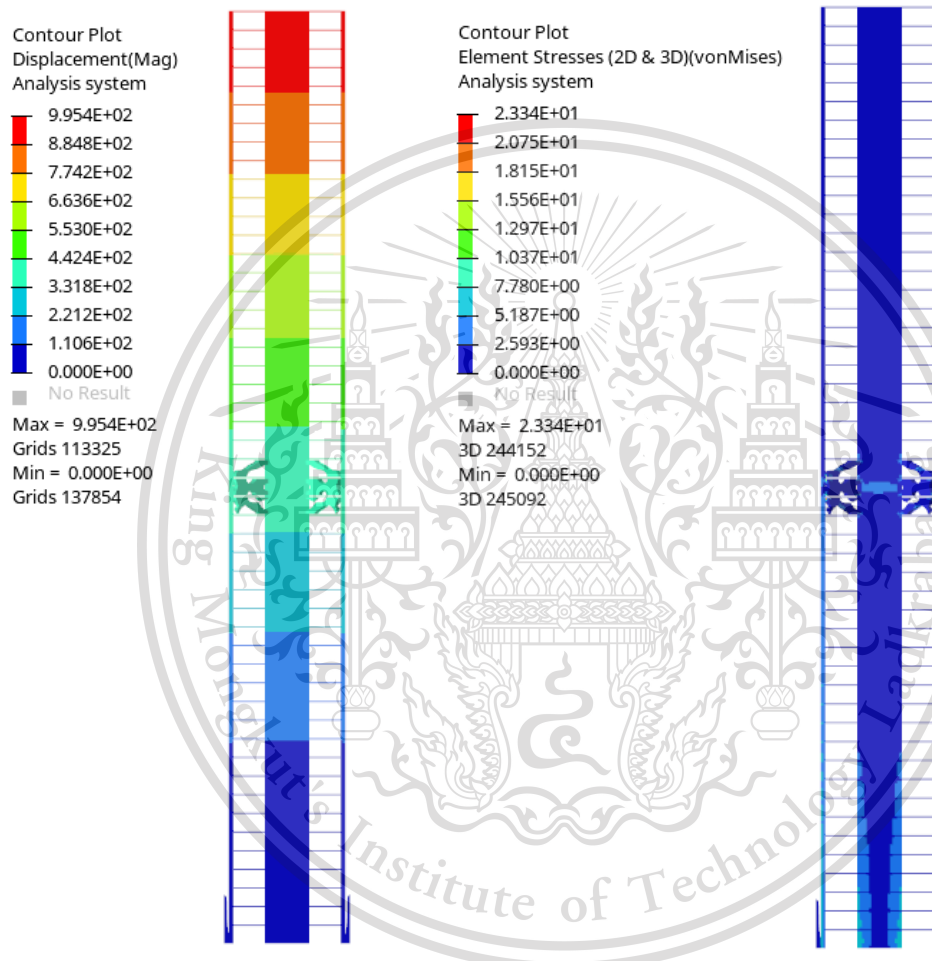


รูปที่ จ.4 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

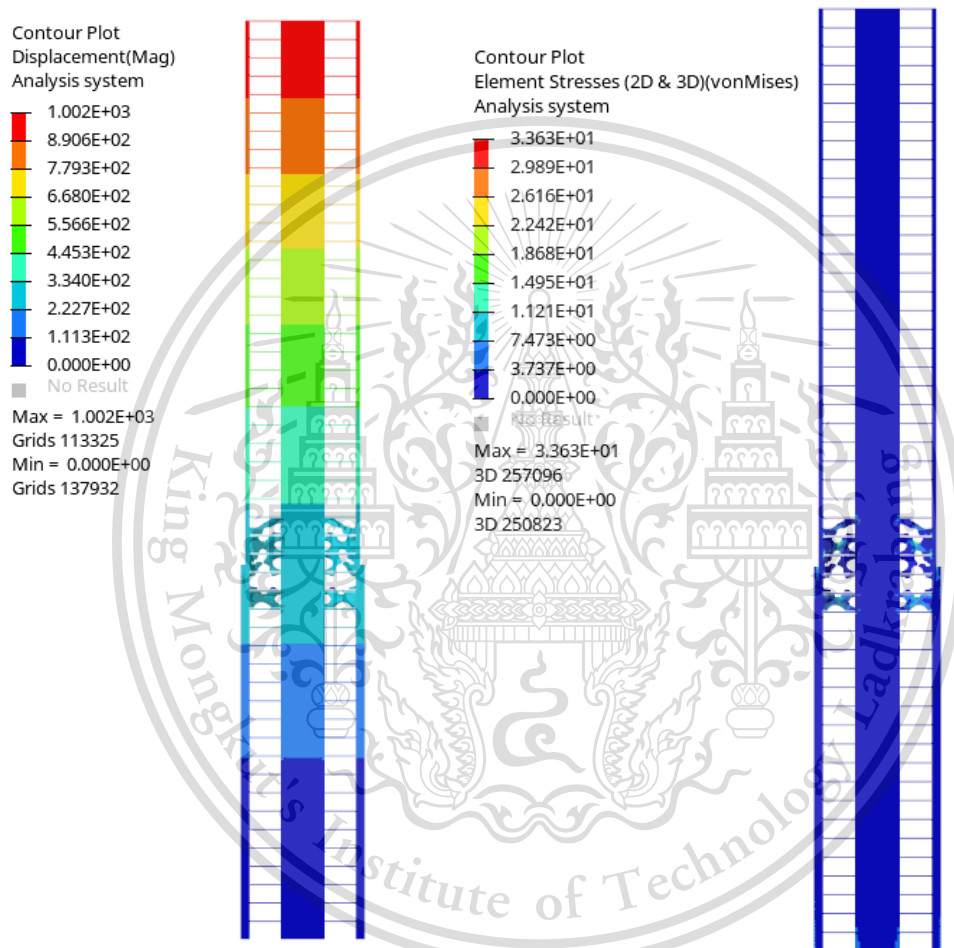


รูปที่ จ.5 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

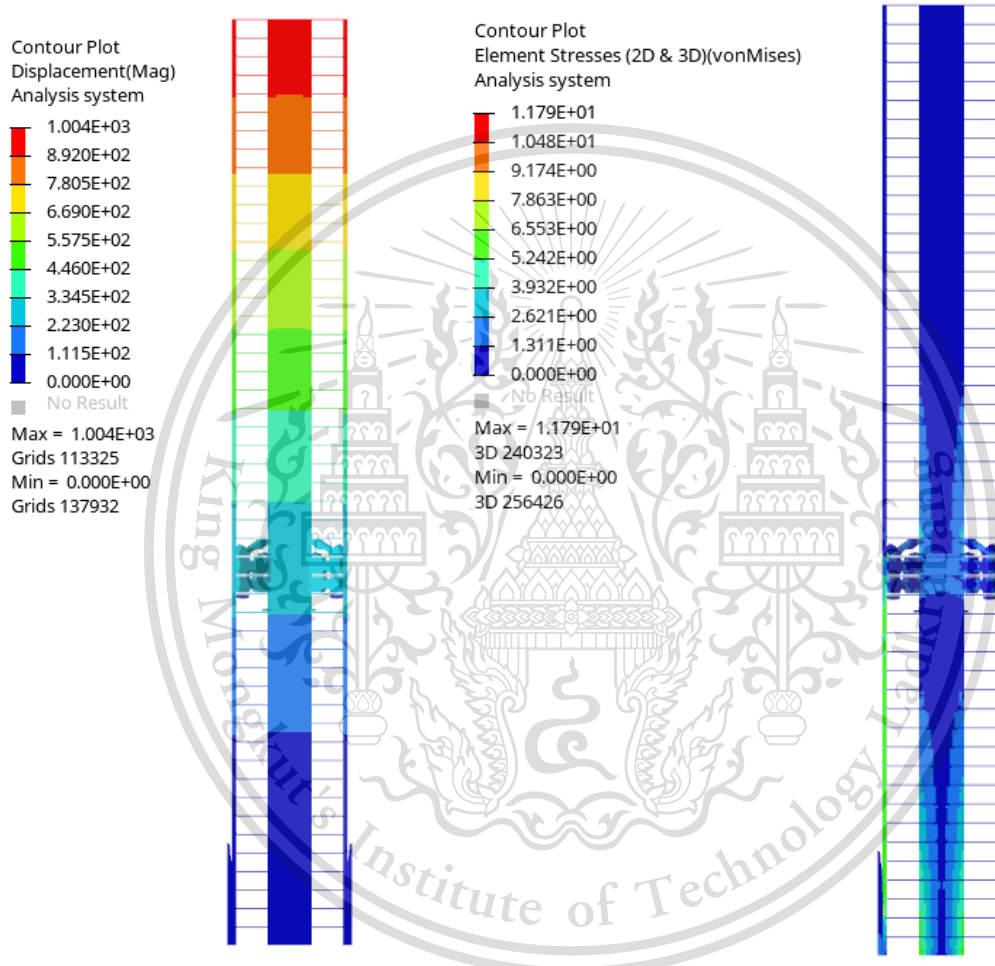


รูปที่ จ.6 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

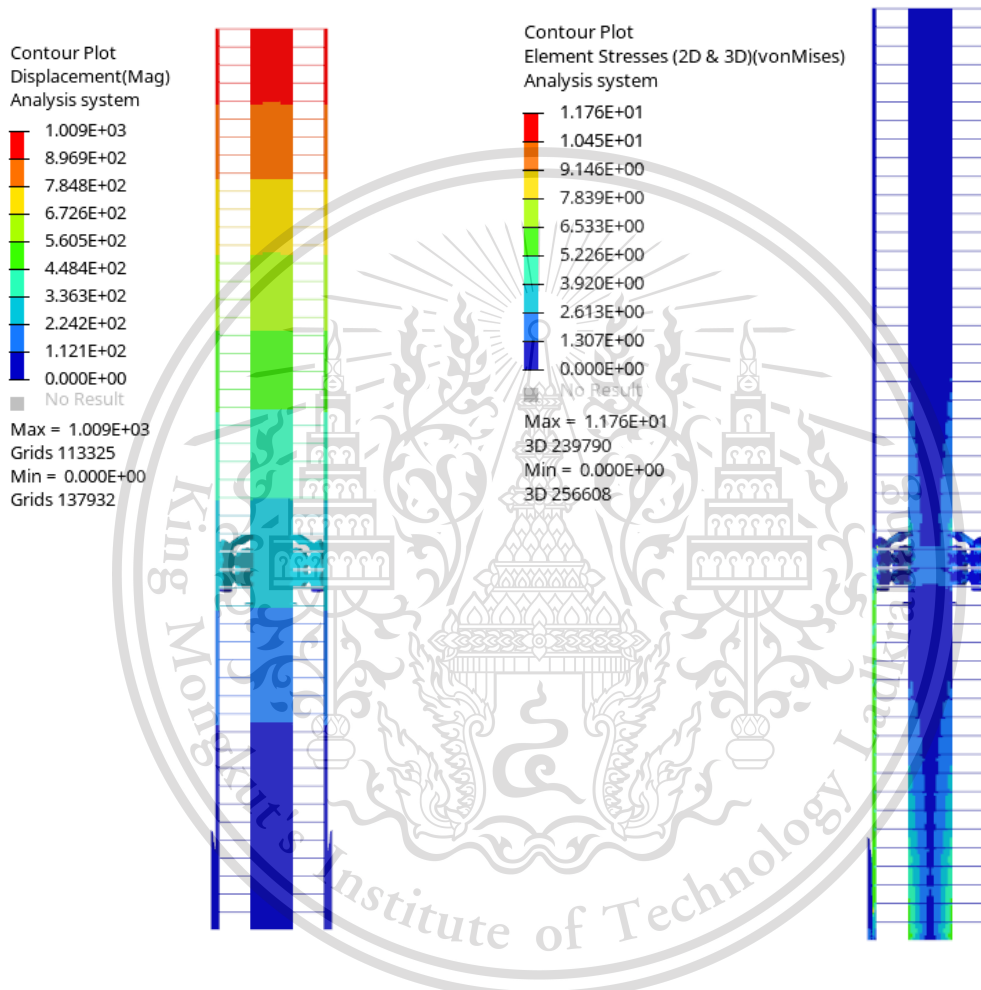


รูปที่ จ.7 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

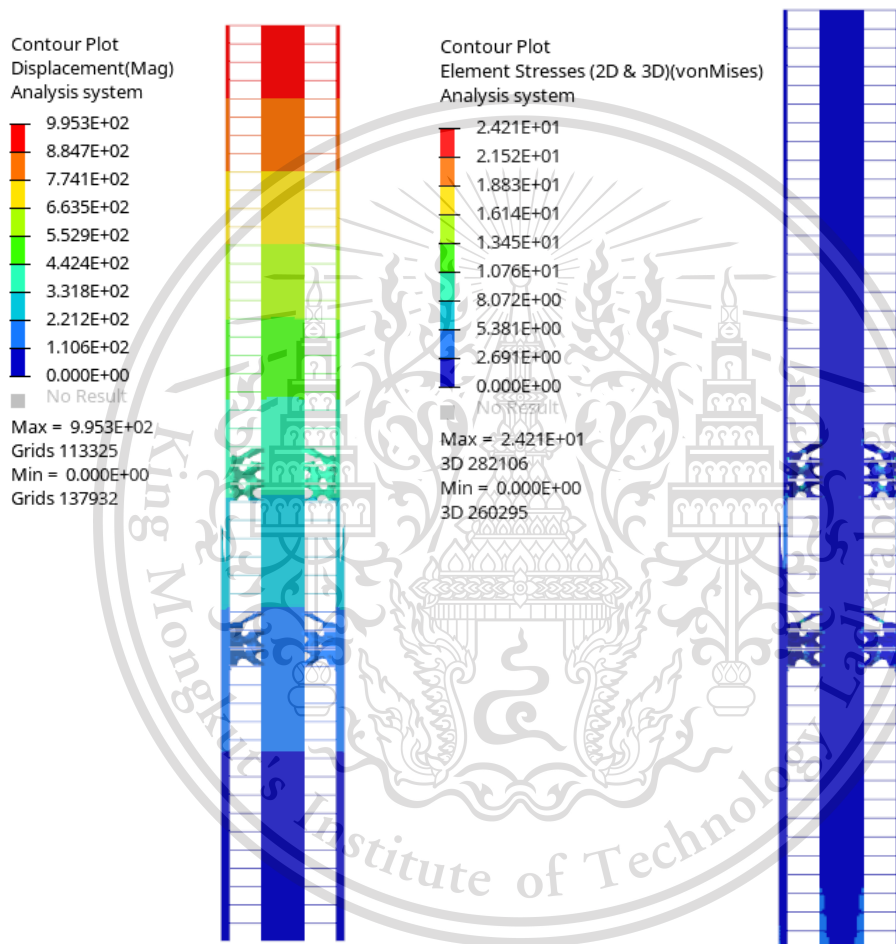


รูปที่ จ.8 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ จ.9 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.