

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STRUCTURE ANALYSIS OF AUTOMATED PEOPLE MOVER
USING FINITE ELEMENT METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRUCTURE ANALYSIS OF AUTOMATED PEOPLE MOVER
USING FINITE ELEMENT METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นายกิตติธัช	พิงโพธิ์สภ	59010114
นายธงไชย	มณีทอง	59010542
นางสาวพิชญา	บุญปู่	59010963
ผศ.ดร มนต์ศักดิ์	พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติภายในท่าอากาศยานสุวรรณภูมินั้น มีแผนในการให้บริการขนส่งผู้โดยสารตลอด 24 ชั่วโมง ดังนั้นโครงสร้างของตู้โดยสาร ต้องมีความสามารถในการรับภาระต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะให้บริการโดยไม่เกิดความเสียหาย โครงการนี้จึงทำการศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างของตู้โดยสารระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ด้วยการสร้างแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ รุ่น Airval โดยทำการศึกษาดูด้วยกัน 2 เงื่อนไข คือ ภาระการให้บริการสูงสุด (Maximum operating Load) และ การเคลื่อนที่ในทางโค้ง (Driving in curve) ซึ่งอ้างอิงกับมาตรฐาน EN 12663-1 ในโครงการนี้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง เพื่อประเมินค่าตัวประกอบความปลอดภัย ซึ่งผลลัพธ์จากการวิเคราะห์พบว่า ในสภาวะการให้บริการสูงสุดมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 1.85 และ ในสภาวะเคลื่อนที่ในทางโค้งมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 1.17

คำหลัก; ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ, โครงสร้างของตู้โดยสาร, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STRUCTURE ANALYSIS OF AUTOMATED PEOPLE MOVER USING FINITE ELEMENT METHOD

Kittituch Phungphosop 59010114
Thongchai Maneethong 59010542
Phitchaya Boonpoo 59010963
Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn Advisor
Year 2019

ABSTRACT

The Automated People Mover (APM) at Suvarnabhumi Airport aims to provide transportation service for passenger 24 hours a day. Therefore, the car body structure must be capable of supporting the entire loads while operating without causing damage. Consequently, this project aims to evaluate a structure strength of the APM car body. However, in this project, the resemble of the APM Airval car structure was approximately constructed. In the strength analysis, there are two loading cases which are the maximum operating load and the driving in curve according to EN 12663-1 were utilized. Finite Element Method (FEM) was utilized to determine the structure strength in term of safety factor. The analyzed results indicated that, under the maximum operating load condition, the safety factor was 1.85 and, in case of the driving in curve condition, it was 1.17.

Keywords; Automated People Mover, Car body structure, Finite Element Method

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการให้คำปรึกษา ความเอาใจใส่ และการให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ โดยเสมอมาจาก ผศ.ดร มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว รวมถึงไปถึงการให้คำชี้แนะถึงข้อบกพร่องที่ต้องปรับปรุงของโครงการนี้ จากคณะกรรมการอาจารย์ผู้คุมสอบ ซึ่งต้องขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ศิษย์เก่าและเพื่อน ๆ ในหลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางทางทุกคนที่ให้คำปรึกษา ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางรางที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดซึ่งเป็นแรงผลักดันที่ทำให้พวกข้าพเจ้ามีวันนี้ ซึ่งก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูพวกข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาและการสนับสนุนอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายกิตติธัช

พิงโพธิ์สภ

นายธงไชย

มณีทอง

นางสาวพิชญา

บุญปุ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ความหมายของระบบขนส่งอัตโนมัติ	4
2.3 คำจำกัดความของมวล (Definition of masses).....	4
2.3.1 มวลของตู้โดยสารในการให้บริการ: m_1	5
2.3.2 ภาระจากผู้โดยสาร.....	6
2.3.3 ภาระจากผู้โดยสารในสภาพภาระออกแบบ AW1	6
2.3.4 ภาระจากผู้โดยสารในสภาพภาระสูงสุด AW2	6
2.3.5 ภาระจากผู้โดยสารในเงื่อนไขภาระของความเสียหาย AW3	6
2.3.6 ภาระจากผู้โดยสารในเงื่อนไขภาระความล้มเหลว AWF	6
2.3.7 ภาระจากผู้โดยสารในเงื่อนไขภาระ AWn	6
2.4 ความเค้น ความเครียดและการเสียรูป (Stress, Strain and Deformation).....	7
2.4.1 ความเค้น	7
2.4.2 ความเครียดและการเสียรูป (Strain and Deformation).....	8
2.5 กฎของฮุก และอัตราส่วนของปัวซอง (Hooke's law and Poisson's ratio)	10
2.5.1 กฎของฮุก (Hooke's law).....	10
2.5.2 อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio).....	10
2.6 ความเค้น - ความเครียด ในพิกัด 3 มิติ.....	12
2.7 ความเค้นระนาบ (Plane Stress).....	14
2.8 การวัดค่าความเครียดจากตัววัดความเครียดที่ติดตั้งบนผิวของวัตถุ.....	14
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship).....	15
2.10 หลักเกณฑ์ของ von Mises (The von Mises Criterion).....	18
2.11 ความเค้นอนุญาตของโครงสร้างภาระแบบคงที่.....	19
2.11.1 ความเค้นคราก หรือ ความเค้นพิสูจน์ (Yield strength or Proof strength).....	19

สารบัญ(ต่อ)

2.11.2 ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate strength).....	19
2.12 ตัวประกอบยกโค้งสมมูล (Equivalent Cant Factor).....	20
2.13 เจจวัดความเครียด.....	20
2.13.1 การติดตั้งเจจวัดความเครียด (installation of strain gage).....	21
2.13.2 วงจรหวีดส์โตนบรีจ (Wheatstone bridge).....	23
2.14 ทฤษฎีบทไฟไนต์เอลิเมนต์	25
2.14.1 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	25
2.14.2 ขั้นตอนในระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 การออกแบบโครงสร้างของตู้โดยสาร.....	28
3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำแบบจำลอง	31
3.3 การตั้งเงื่อนไขเริ่มต้น (Definition of Conditions).....	31
3.3.1 ภาระการให้บริการสูงสุด (Maximum operating Load).....	31
3.3.2 การเคลื่อนที่ในทางโค้ง (Driving in curve)	32
3.4 ความเค้นอนุญาตของวัสดุที่ใช้	33
3.5 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS	33
3.6 การออกแบบการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลอง	47
3.6.1 แนวทางในการติดตั้งเจจวัดความเครียดและการวัดหาค่าความเค้น.....	47
3.6.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	49
3.6.3 วิธีการคำนวณค่าความเค้นจากเจจวัดความเครียด	50
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	52
4.1 ผลการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง.....	52
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	53
4.3 เปรียบเทียบตัวประกอบความปลอดภัยจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับค่ามาตรฐาน	57
4.4 ออกแบบการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลองด้วย.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปการวิจัย	58
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย	58
5.3 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มวลที่เกี่ยวข้องของตัวรถ.....	7
3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมชนิด EN AW 6005A T6 ในรูปร่างแบบผนังบาง.....	31
3.2 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมชนิด EN AW 6005A T6 ในรูปร่างแบบผนังบาง.....	31
3.3 ความเค้นอนุญาตของวัสดุที่ใช้.....	33
4.1 เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover; APM).....	4
2.2 ลักษณะของแรงชนิดต่าง ๆ.....	8
2.3 ตัวแปรต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับความเครียดเชิงเส้น.....	9
2.4 ตัวแปรต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับความเครียดเฉือน	9
2.5 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ตามกฎของฮุก	10
2.6 ชิ้นงานหดตัวในทิศทางแกน y และ z เมื่อมีความเค้นมากระทำในทิศทางแกน x	11
2.7 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในพิกัด 3 มิติ.....	12
2.8 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในพิกัด 3 มิติ.....	13
2.9 ระนาบความเค้น (Plane Stress).....	14
2.10 ตำแหน่งการวางเกจวัดความเครียดแบบโรเซตต์ (Rosette Strain Gauge).....	15
2.11 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	16
2.12 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก.....	17
2.13 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุ (ก) วัสดุเปราะ (ข) วัสดุเหนียว	18
2.14 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการยกโค้ง.....	20
2.15 ส่วนประกอบของเกจวัดความเครียด	21
2.16 ขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด	22
2.17 วงจรหิวต์สไตน์บริจ	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.2 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ.....	28
3.3 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ ในมุมมองด้านใต้.....	28
3.4 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ มุมมองด้านหน้า.....	29
3.5 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ มุมมองด้านข้าง.....	29
3.6 ชิ้นส่วนประกอบแบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ	30
3.7 ชิ้นส่วนประกอบแบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ	30
3.8 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกรณีภาระการให้บริการสูงสุด.....	32
3.9 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกรณีภาระการเคลื่อนที่ในทางโค้ง.....	32
3.10 หน้าต่างโปรแกรม ANSYS Workbench.....	34
3.11 หน้าต่างแถบ Engineering Data.....	34
3.12 แถบ Toolbox ในหน้าต่างแถบ Engineering Data	35
3.13 ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ทำการเพิ่มลงใน Engineering Data.....	35
3.14 วิธีการนำเข้าไฟล์แบบจำลองที่จะใช้ลงในโปรแกรม.....	36
3.15 วิธีการเลือกไฟล์แบบจำลองที่จะนำเข้าในโปรแกรม.....	36
3.16 วิธีการเปิดแถบการตั้งค่าต่าง ๆ ของแบบจำลองที่จะใช้.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 หน้าต่าง Static Structural – Mechanical.....	37
3.18 วิธีการเพิ่มค่ามวลกระจายที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง	38
3.19 วิธีการตั้งค่าการเพิ่มค่ามวลกระจายที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง	38
3.20 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักผู้โดยสาร	39
3.21 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านหน้า	39
3.22 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านหลัง	40
3.23 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านบนหลังคา	40
3.24 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านขวา	41
3.25 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านซ้าย.....	41
3.26 วิธีการตั้งค่าการเพิ่ม Boundary Condition ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง	42
3.27 ขนาดและทิศทางของ Standard Earth Gravity ที่กระทำต่อแบบจำลอง	42
3.28 บริเวณที่เลือกสำหรับ Fixed Support ทั้ง 4 จุด	43
3.29 ขนาดและทิศทางของค่าความเร่งหนีศูนย์กลางที่กระทำต่อแบบจำลอง.....	43
3.30 บริเวณที่เลือกสำหรับจุดรองรับที่ไม่มี การเคลื่อนที่ทั้ง 3 จุด.....	44
3.31 บริเวณที่เลือกสำหรับจุดรองรับที่ถูกเคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากการเข้าโค้ง.....	44
3.32 วิธีการเพิ่มผลลัพธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่ได้จากการ Simulation.....	45
3.33 วิธีการ Meshing ขึ้นงาน.....	45
3.34 ผลลัพธ์ของการ Meshing ด้วยขนาด Element Size 200 mm.	46
3.35 ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจากการ Simulation ด้วยขนาด Element size 200 mm.....	46
3.36 แสดงตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปมากที่สุด	48
3.37 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดบนชิ้นงานจำลอง.....	49
3.38 แสดงตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauges) บนชิ้นงานจำลอง	50
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้นสูงสุดกับขนาด Element size.....	52
4.2 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการ Meshing ด้วยขนาด Element size เท่ากับ 24 mm.....	53
4.3 ค่า Equivalent Stress ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง จากเงื่อนไขภาระการให้บริการสูงสุด	54
4.4 ค่า Maximum Equivalent Stress ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองจากเงื่อนไขภาระการให้บริการสูงสุด .	55
4.5 ค่า Equivalent Stress ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง จากเงื่อนไขการเคลื่อนที่ในทางโค้ง	56
4.6 ค่า Maximum Equivalent Stress ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยการนำเทคโนโลยีของยานพาหนะที่ใช้ในระบบขนส่งทางรางรูปแบบต่าง ๆ จากต่างประเทศมาปรับใช้ให้เหมาะสมกับการให้บริการ ซึ่งรวมไปถึงระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover ; APM) ซึ่งในอนาคตจะมีการนำมาใช้ขนส่งผู้โดยสารภายในท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นแห่งแรกของประเทศไทย โดยจะนำมาใช้ขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารผู้โดยสารหลักกับอาคารผู้โดยสารรอง

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัตินั้นจะใช้ระบบอัตโนมัติสัญญาณควบคุมรถด้วยระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด ซึ่งจะมีระดับของความอัตโนมัติ (Grade of Automation ; GoA) อยู่ที่ระดับ 4 ซึ่งจะไม่มีพนักงานควบคุมรถ ในกรณีที่เกิดเหตุที่ไม่คาดคิดกับโครงสร้างของตัวรถ ก็จะไม่สามารถควบคุมสถานการณ์เฉพาะหน้าได้ ดังนั้นโครงสร้างของตู้โดยสารนั้น จะต้องมีความแข็งแรง สามารถรับภาระจากน้ำหนักของผู้โดยสารและสัมภาระได้โดยที่ไม่เกิดการเสียรูปจนทำให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นโครงงานเล่มนี้จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างหลักของตัวรถที่ใช้ในระบบขนส่งอัตโนมัติ ด้วยกัน 2 เงื่อนไข คือ ภาระการให้บริการสูงสุด (Maximum operating Load) และ การเคลื่อนที่ในทางโค้ง (Driving in curve) ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการเสียรูปของโครงสร้างของตู้โดยสารที่เกิดขึ้น และศึกษาแนวทางการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าความเค้นจริงที่เกิดขึ้น สำหรับใช้ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลที่เกิดขึ้นจริงบนชิ้นงาน

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างหลักของตัวรถเนื่องจากภาระที่มากระทำ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการติดตั้งเกจวัดความเครียด เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าความแข็งแรงบนชิ้นงานจริง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 แบบจำลองที่ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์สามารถใช้เป็นแบบจำลองเทียบกับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ รุ่น AIRVAL ได้
- 1.3.2 ความแข็งแรงของโครงสร้างของตัวรถที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีตัวประกอบความปลอดภัยสอดคล้องกับมาตรฐาน EN12663-1 ที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

- 1.4.1 วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material)
- 1.4.2 การเชื่อมต่อเป็นแบบไม่ค้ำึงถึงขนาดรอยเชื่อม
- 1.4.3 การเสียรูปเป็นแบบยืดหยุ่น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1.5.1 ทำการจำลองการแข็งแรงของโครงสร้างตัวรถระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ
- 1.5.2 จัดทำชิ้นงานแบบจำลองโครงสร้างตัวรถระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติโดยใช้ 3D Printing

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาเกี่ยวกับหัวข้อโครงงาน
- 1.6.2 ศึกษาการคำนวณภาระต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างของตัวรถระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติเมื่อมีการรับภาระให้บริการสูงสุด และเมื่อมีการเคลื่อนที่ในทางโค้ง
- 1.6.3 ศึกษาทฤษฎีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ
- 1.6.4 นำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาเทียบกับตัวประกอบความปลอดภัยตามมาตรฐาน EN12663-1
- 1.6.5 จัดทำชิ้นงานจำลองโครงสร้างของตัวรถระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ โดยใช้ 3D Printing
- 1.6.6 ออกแบบการทดสอบการวัดค่าความเครียดที่วัดจากการทำชิ้นงานจำลอง

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างตู้โดยสารของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาระต่าง ๆ ที่กระทำกับโครงสร้างของตัวรถ คุณสมบัติของวัสดุของตัวรถ การวิเคราะห์การเสีรูปร่างที่เกิดขึ้น รวมถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Belete Jirru ในปี 2015 [1] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองและการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวรถไฟฟ้า ด้วยหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอธิบายว่ารถไฟที่วิ่งไปตามรางรถไฟเป็นระบบที่มีความซับซ้อนทางด้านระบบพลวัตและสถิตมากที่สุดในงานวิศวกรรม เนื่องจากลักษณะที่แตกต่างกันไปของล้อและรางรถไฟ โครงสร้างของตัวรถไฟโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย Shells, Center sill, Under frame, และ Beam การกระทำใดๆต่อชิ้นส่วนดังกล่าวจะทำให้ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างทางด้านสถิตศาสตร์ (Statics) และพลศาสตร์ (Dynamics) ของโครงสร้างตัวรถ ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างส่วนกลางคือการได้รับน้ำหนักบรรทุกสถิต (Static load) และ น้ำหนักบรรทุกพลวัต (Dynamic load) โดยจุดประสงค์ของการศึกษานี้คือ การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวรถไฟ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาความแข็งแรงและความสะดวกในการใช้งาน โดยโครงสร้างตัวรถไฟของรถไฟรุ่นใหม่จะได้รับการออกแบบให้โครงสร้างมีน้ำหนักที่เบา เพื่อลดน้ำหนักของตัวรถไฟ และพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถไฟ ในขณะเดียวกันตัวรถไฟจะถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงที่จะเป็นไปได้เพื่อที่จะทนต่อภาระต่าง ๆ ได้ ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นการโก่งตัวสูงสุดเกิดขึ้นช่วงกึ่งกลางของความยาวและส่วนที่เลือกในองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปของตัวรถไฟ นอกจากนั้นภาระโหลดแบบต่าง ๆ และความถี่แบบต่าง ๆ จะใช้โปรแกรม ANSYS ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ โดยจะวิเคราะห์ความถี่ที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับช่วงความถี่ที่เกิดจากการนั่งรถไฟของมนุษย์ในแนวตั้ง (แกน Z) ของตัวรถไฟ ซึ่งพบว่ารถไฟมีความถี่อยู่ที่ 5.8482 Hz โดยช่วงความถี่ของมนุษย์ที่อยู่บนรถไฟจะอยู่ในช่วง 1.264 – 11.04 Hz ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการเกิดความถี่นี้

S.S. Harak, S.C. Sharma, และ S.P. Harsha ในปี 2014 [2] ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงพลวัตของรถไฟบรรทุกสินค้าโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอธิบายถึงการพัฒนารถไฟบรรทุกสินค้าโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการสร้างต้นแบบรถไฟบรรทุกสินค้า โดยที่ตัวบรรทุกจะเป็นประเภท “BOXN25” ตามแบบรถไฟของอินเดีย รถไฟบรรทุกสินค้าประกอบไปด้วยโครงสร้างตัวรถ และ 2 โบกี้ ในการสร้างโมเดลของรถไฟบรรทุกสินค้านั้นจะใช้โปรแกรม SOLIDWORKS วาดแบบเรขาคณิตขึ้นมา และนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรม ANSYS ระดับความถี่ของรถไฟบรรทุกสินค้านั้นเป็นแบบหลายระดับความถี่จึงมีการปรับเทียบกับระบบที่มีระดับความถี่แบบไม่จำกัด (โครงสร้างต่อเนื่อง) ผลของการศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงพลวัตของรถไฟบรรทุกสินค้าโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมของโครงสร้างรถไฟบ่งชี้ว่าหากมีความถี่ในการกระตุ้นจากภายนอกเนื่องจากความผิดปกติในแนวตั้งของโปรไฟล์ราง และถ้าความถี่นั้นตรงกับความถี่โมดัลของระบบ ดังนั้นความไม่แน่นอนของรถไฟบรรทุกสินค้าจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับความถี่ของรถไฟโดยสาร แสดงให้เห็นว่าสินค้าที่รับภาระอยู่ในรถไฟบรรทุกสินค้าสามารถรับความถี่ได้ต่ำ ดังนั้นความถี่ในการกระตุ้นเนื่องจากความผิดปกติของรางในแนวตั้งสามารถทำให้สินค้าที่บรรทุกอยู่ในรถไฟบรรทุกสินค้าสามารถพลิกคว่ำได้

2.2 ความหมายของระบบขนส่งอัตโนมัติ

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover; APM) นั้นเป็นการขนส่งอัตโนมัติโดยไร้คนขับอย่างเต็มรูปแบบ ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยรางนำในทางวิ่งของระบบ APM สามารถนับรวมกับเทคโนโลยีที่เรียกว่า ระบบขนส่งมวลชนแบบนำทางอัตโนมัติ (Automated Guideway Transit; AGT), รถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail), รถไฟแมกเลฟความเร็วต่ำ โดยจะต้องเป็นระบบอัตโนมัติ ความแตกต่างระหว่างระบบ APM และเทคโนโลยีการขนส่งอื่น ๆ คือ APM นั้นไม่ต้องการคนขับและตัวยานพาหนะนั้นไม่ต้องรับกับความแออัดบนท้องถนน ในปัจจุบันระบบ APM ส่วนใหญ่จะเริ่มมีการนำมาใช้ในสนามบินหลาย ๆ ที่



รูปที่ 2.1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover; APM)

(รูปจาก: <https://www.skyscrapercity.com/threads/samut-prakan-suvarnabhumi-airport-2nd-phase.1079995/page-78#post-143362726>)

2.3 คำจำกัดความของมวล (Definition of masses)

ภาระที่กระทำต่อโครงสร้างผู้โดยสารที่เกิดขึ้นนั้น โดยส่วนใหญ่่นั้นเป็นผลมาจากมวลของโครงสร้างตัวรถและมวลของผู้โดยสาร ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละสถานะตามจำนวนของผู้โดยสารในขณะนั้น สำหรับการกำหนดค่าภาระที่เกิดจากมวลของผู้โดยสาร จะถูกแบ่งออกเป็น AW_x โดยในแต่ละสถานะน้ำหนักของที่นั่งสูงสุดจะถูกนำมาคำนวณด้วยเสมอ ในระหว่างการให้บริการของยานพาหนะการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกผู้โดยสารที่แตกต่างกันจะเป็นตัวกำหนดภาระทางกลและสามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้ ตามมาตรฐาน ASCE 21-08:

- ยานพาหนะเปล่า (AW0): ยานพาหนะอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน แต่ไม่มีผู้โดยสารอยู่ภายใน
- น้ำหนักออกแบบหรือภาระออกแบบ (AW1): น้ำหนักของยานพาหนะเมื่อรับภาระของน้ำหนักในการออกแบบ (56% ของการกระจายน้ำหนักบรรทุกของผู้โดยสาร 4 คนต่อตารางเมตร)
- ภาระสูงสุดในการให้บริการ (AW2): จำนวนผู้โดยสารสูงสุดที่อนุญาตให้ยานพาหนะขนส่งได้ (3% ของการกระจายน้ำหนักบรรทุกของผู้โดยสาร 6 คนต่อตารางเมตร)
- น้ำหนักหรือภาระแตกหัก (AW3): ค่าศัพท์หนึ่งที่มีกับน้ำหนักสูงสุดของยานพาหนะด้วยน้ำหนักบรรทุกพิเศษ (1% ของการกระจายน้ำหนักบรรทุกของผู้โดยสาร 7.2 คนต่อตารางเมตร)
- ภาระความล้มแบบสมมูล (AWf): ความหนาแน่นของผู้โดยสารของค่ากำหนดนี้ จะถูกคำนวณเพื่อหาความเสียหายสมมูลทั้งหมดในสภาวะความล้ม ที่เท่ากับความเสียหายสะสมที่เกิดขึ้นจากภาระที่เป็นไปได้กำหนดค่าและทั้งหมดในระหว่างที่ให้บริการ 3.54 คนต่อตารางเมตร นอกจากนี้ยังมี การกำหนดค่า AWn ที่มีผู้โดยสาร 5 คนต่อตารางเมตร เพื่อเป็นแสดงการกระจายน้ำหนักบรรทุกผู้โดยสารอย่างแม่นยำยิ่งขึ้นในระหว่างอายุการใช้งานของตัวรถ การกำหนดค่านี้แสดงถึงร้อยละ 40 ของน้ำหนักบรรทุกรายวันของยานพาหนะ ความหนาแน่นของผู้โดยสารที่สูงขึ้นควรเกิดขึ้นเฉพาะในระย่น้อยกว่าร้อยละ 4 ของระยะทาง ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำหนด AW2 และ AW3

โดยสัญกรณ์ AWx โดยทั่วไปหมายถึงน้ำหนักของยานพาหนะทั้งหมดรวมกับน้ำหนักของผู้โดยสาร ในการกำหนดค่า AWx เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนมวลของผู้โดยสาร, แคร่รถ และผู้โดยสารจะแตกต่างกัน สัญกรณ์ m_{i_AWx} ใช้เพื่อแสดงน้ำหนักของผู้โดยสารที่กำหนดค่า AWx เท่านั้น โดยน้ำหนักพร้อมตัวเลขห้อย 3 (m_3) แสดงถึงมวลของน้ำหนักบรรทุกปกติตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน EN 12663 - 1 (กำหนดค่า AW1, AW2, AWn และ AWf) และน้ำหนักพร้อมตัวเลขห้อย 4 (m_4) หมายถึงมวลของน้ำหนักบรรทุกพิเศษตามที่ระบุไว้ใน EN 12663 - 1 ซึ่งสอดคล้องกับการกำหนดค่า AW3 ของผู้โดยสาร สัญกรณ์นี้ก็คล้ายกับมาตรฐาน EN 12663 - 1 และสัญกรณ์ AWx สอดคล้องกับมาตรฐาน ASCE 21-08

2.3.1 มวลของผู้โดยสารในการให้บริการ: m_1

มวลของผู้โดยสารในการให้บริการ (m_1) สำหรับวัตถุประสงค์ในการออกแบบแสดงให้เห็นถึงตัวผู้โดยสารที่มีอุปกรณ์ครบครัน (เงื่อนไขน้ำหนักอุปกรณ์หรือ AW0) ประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งหมดของตัวรถ และมวลของตัวป้องกันการสั่นทุติยภูมิสำหรับแคร่ ความแตกต่างระหว่างมวลของตัวรถที่สภาวะพร้อมใช้งาน (พร้อมอุปกรณ์) และมวลของโครงสร้างโลหะของตัวรถ (ใช้สำหรับการคำนวณระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) คือ การกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วโครงสร้างโลหะของตัวรถทั้งหมด โดยการเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างหลัก

2.3.2 ภาระจากผู้โดยสาร

แรงที่เกิดจากผู้โดยสารจะถูกนำเข้าสู่โครงสร้างโดยแรงกระจายทางพื้นผิวสำหรับผู้โดยสารที่ยืนอยู่และโดยภาระแบบจุด ซึ่งกระทำในจุดศูนย์กลางของผู้โดยสารที่นั่ง ซึ่งน้ำหนักของผู้โดยสารแต่ละคนคือ 72.6 กิโลกรัม ตามมาตรฐาน ASCE 21-08

ภาระเนื่องจากผู้โดยสารที่ยืนอยู่จะถูกนำไปใช้กับโครงสร้างยานพาหนะดังนี้:

- ภาระในแนวตั้งถูกนำไปใช้เป็นการดันที่พื้นผิว (แรงโน้มถ่วงบวกความเร่งตามแนวตั้ง) บนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องพื้น
- ภาระตามยาวหรือภาระด้านข้าง ถูกนำไปใช้เป็นการกระจายบนพื้นผิว ในพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับพื้นและหลังคา ร้อยละ 80 ของน้ำหนักบรรทุกทุกเหล่านี้อาจถูกนำไปใช้ในระดัความสูงของพื้น และร้อยละ 20 จะถูกนำไปใช้ในระดัความสูงของหลังคา นี่คือการกระจายที่สมจริง ซึ่งเกิดจากการภาระความเร่งแบบพลศาสตร์ของมวลผู้โดยสารที่ยืนอยู่ในสภาพการให้บริการแบบปกติ

2.3.3 ภาระจากผู้โดยสารในสภาพภาระออกแบบ AW1: m_3 AW1

สำหรับเงื่อนไขภาระออกแบบ AW1 จะมีการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกผู้โดยสาร 4 คนต่อตารางเมตร เงื่อนไขภาระ AW1 ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างผู้โดยสาร

2.3.4 ภาระจากผู้โดยสารในสภาพภาระสูงสุด AW2: m_3 AW2

สำหรับเงื่อนไขการรับน้ำหนักสูงสุดของผู้โดยสารหนึ่งคน โดยจะพิจารณาผู้โดยสารที่นั่งและยืน 6 คนต่อตารางเมตร (มวล m_3 AW2 มีค่าเทียบเท่า AW2)

2.3.5 ภาระจากผู้โดยสารในเงื่อนไขภาระของความเสียหาย AW3: m_4 AW3

สำหรับเงื่อนไขภาระของความเสียหายของผู้โดยสารหนึ่งคน โดยพิจารณาผู้โดยสารที่นั่งและยืนอยู่ (7.2 คนต่อตารางเมตร) เงื่อนไขภาระ AW3 ใช้สำหรับตรวจสอบภาระในกรณีพิเศษ

2.3.6 ภาระจากผู้โดยสารในเงื่อนไขภาระความล้มเหลว AWf: m_3 AWf

ความหนาแน่นของผู้โดยสารในรูปแบบนี้ถูกคำนวณเพื่อหาค่าความเสียหายสมมูลรวมที่น้ำหนักบรรทุกคงที่ในรูปแบบของความล้มเหลว ซึ่งเท่ากับความเสี่ยงสะสมที่เกิดจากการค่าน้ำหนักบรรทุกรูปแบบต่าง ๆ ทั้งหมดที่เป็นไปได้ ในระหว่างการให้บริการ ความหนาแน่นของผู้โดยสารคือ 3.54 คนต่อตารางเมตร สภาวะโหลด AW2 นั้นคล้ายคลึงกับน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบ m_3 ตามที่ใช้ใน EN 12663 - 1

2.3.7 ภาระจากผู้โดยสารในเงื่อนไขภาระ AWn: m_3 AWn

ความหนาแน่นของผู้โดยสารของค่ากำหนดนี้มีค่าคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ ผู้โดยสาร 5 คนต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 มวลที่เกี่ยวข้องของตัวรถ

Load of configuration	AW0	AWf	AW1	AWn	AW2	AW3
No. of passengers	0	80	87	120	130	186
No. of seats - option	24	24	24	8	8	0
Passenger load (m_3AWx)	0 kg	5786 kg	6306 kg	8724 kg	9353 kg	
Exceptional passenger load (m_{4AW3})						13482 kg
Car body mass ($m_1 + m_{3AWx}$)	13400 kg	19186 kg	19706 kg	20919 kg	22548 kg	
Exceptional Car body mass ($m_1 + m_{4AW3}$)						24708 kg

2.4 ความเค้น ความเครียดและการเสียรูป (Stress, Strain and Deformation)

2.4.1 ความเค้น

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักคิดค่าความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน ซึ่งค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

โดยที่

σ คือ ความเค้น (Pa)

P คือ แรงภายนอกที่มากระทำ (N)

A คือ พื้นที่ภาพตัดขวางที่แรงกระทำ (m^2)

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

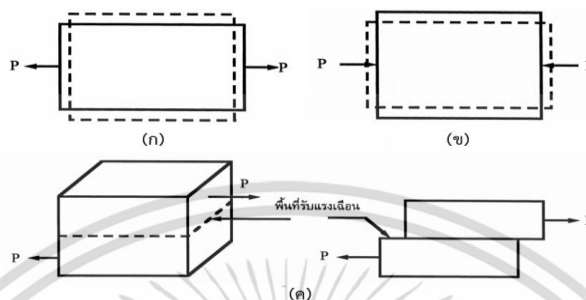
- **ความเค้นแรงดึง (Tensile stress)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.2 ก
- **ความเค้นแรงอัด (Compressive stress)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.2 ข
- **ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress, τ)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางขนานกับพื้นที่หน้าตัด เพื่อให้วัสดุเกิดการขาดออกจากกันตามแนวเดียวกับทิศทางของแรง ดังรูปที่ 2.2 ค ซึ่งค่าความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ τ คือ ความเค้น (Pa)
 V คือ แรงเฉือนที่มากระทำ (N)
 A คือ พื้นที่ภาพตัดขวางที่แรงกระทำ (m^2)

ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะของแรงชนิดต่าง ๆ

(ก) แรงดึง (Tension force) (ข) แรงอัด (Compression force) (ค) แรงเฉือน (Shear force)
 (รูปจาก: <https://sp1supachai.files.wordpress.com/2011/07/stress1.pdf>)

2.4.2 ความเครียดและการเสียรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อเกิดแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุ ซึ่งการเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- การเสียรูปแบบอีลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเสียรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำอะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้
- การเสียรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเสียรูปที่ปลดแรงกระทำแล้ว วัสดุยังคงลักษณะตามที่ถูกเปลี่ยน โดยอะตอมที่เคลื่อนตัวไปแล้วจะไม่เคลื่อนตัวกลับไป ณ ตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีลักษณะเสียรูปทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับความเค้นที่มากระทำ ว่ามีขนาดเท่าไร หากมีค่าไม่เกินพิกัดการคืนรูป วัสดุนั้นจะเกิดการคืนรูปแบบอีลาสติก แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดที่พบในวัสดุโพลิเมอร์ เรียกว่าความเครียดกึ่งอีลาสติก ซึ่งเมื่อปราศจากแรงกระทำต่อวัสดุ วัสดุจะมีการคืนรูปแต่จะไม่คืนรูปเป็นเหมือนลักษณะก่อนการเสียรูป

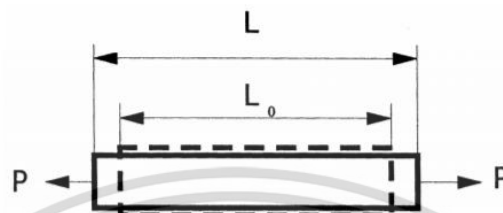
การวัดค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- **ความเครียดตั้งฉาก (Normal strain, ϵ)** เป็นการยืดตัว (Elongation) หรือการหดตัว (Contraction) ของส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมอนุภาค 2 อนุภาคที่เราสนใจบนวัตถุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของส่วนของเส้นตรงนั้น ภายใต้การกระทำของแรง ดังรูปที่ 2.3 ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

โดยที่ ε คือ ความเครียดเชิงเส้น
 ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป (m)
 L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นงาน (m)



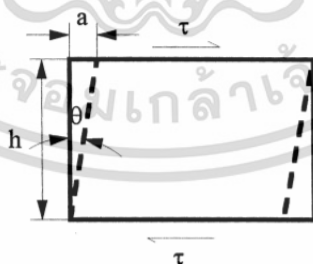
รูปที่ 2.3 ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ความเครียดเชิงเส้น

(รูปจาก: <https://sp1supachai.files.wordpress.com/2011/07/stress1.pdf>)

- ความเครียดเฉือน (Shear strain, γ) เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนของเส้นตรงสองเส้น ที่เริ่มต้นทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน ภายใต้การกระทำของแรงที่มีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังรูปที่ 2.4 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.4)$$

โดยที่ $\gamma = \tan \theta \approx \theta$ (เรเดียน)
 θ คือ มุมที่เปลี่ยนไป (เรเดียน)
 a คือ ระยะที่ระนาบเคลื่อนที่ (m)
 h คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (m)



รูปที่ 2.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ความเครียดเฉือน

(รูปจาก: <https://sp1supachai.files.wordpress.com/2011/07/stress1.pdf>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กฎของฮุก และอัตราส่วนของปัวซอง (Hooke's law and Poisson's ratio)

2.5.1 กฎของฮุก (Hooke's law)

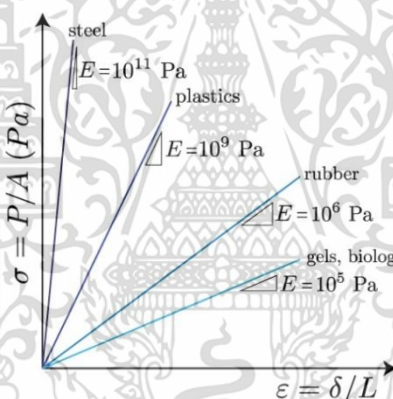
โครงสร้างในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะต้องออกแบบให้มีการเสียรูปน้อยมาก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุส่วนใหญ่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์นี้เรียกว่า "กฎของฮุก" หรือ "กฎของความยืดหยุ่น" เป็นไปตามสมการ

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

โดยที่

- σ คือ ค่าความเค้นตั้งฉากตามแนวแกน (Pa)
- ε คือ ค่าความเครียดตามแนวแกน
- E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Pa)

จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด กราฟที่ได้จะเป็นกราฟเชิงเส้น ค่าความชันของกราฟดังกล่าวจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งเรียกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ Young's Modulus)



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ตามกฎของฮุก
(รูปจาก: <https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-strain/>)

อย่างไรก็ตาม กฎของฮุกนั้นได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน ถ้าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนเกิดขึ้นบนระนาบแล้ว จะมีความสัมพันธ์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.6)$$

โดยที่

- τ คือ ค่าความเค้นเฉือน (Pa)
- γ คือ ค่าความเครียดเฉือน (เรเดียน)
- G คือ ค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Pa)

2.5.2 อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

อัตราส่วนของปัวซอง คือ อัตราส่วนความเครียดในแนวด้านข้างต่อความเครียดในแนวด้านยาวของวัตถุ โดยค่าอัตราส่วนของปัวซองเป็นปริมาณที่ไม่มีมิติ ค่าทั่วไปของอัตราส่วนของปัวซองสำหรับวัสดุเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าเบี่ยงเบนจากการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

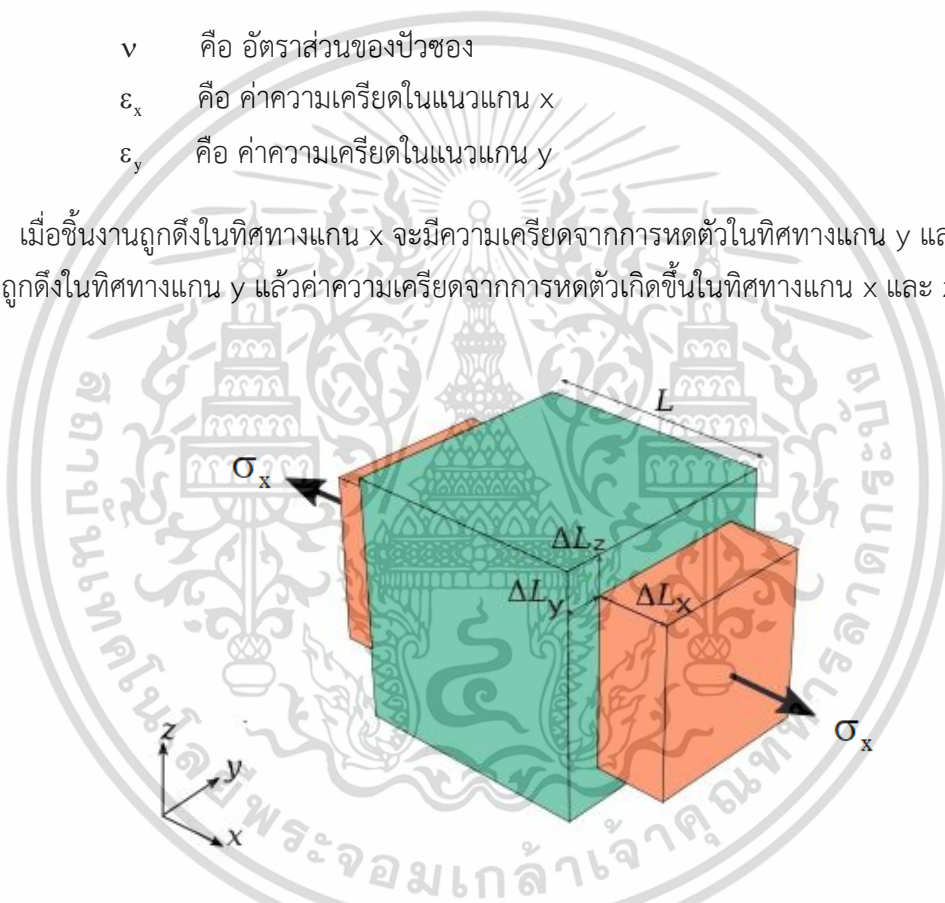
วิศวกรรมทั่วไปจะแสดงอยู่ด้านในของวัสดุ สำหรับวัสดุในอุดมคติที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปด้านข้างเมื่อยืดหรือบีบอัด อัตราส่วนของปัวซองจะเท่ากับ 0 ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับอัตราส่วนของปัวซอง คือ 0.5 โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq \nu \leq 0.5$

เมื่อมีการวิเคราะห์มากกว่าหนึ่งมิติ จะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างทิศทาง ซึ่งทำได้โดยใช้ค่าอัตราส่วนของปัวซอง โดยทั่วไปอัตราส่วนของปัวซองคือค่าของการหดหรือขยายตัวตามขวางเมื่อเทียบกับทิศทางการเคลื่อนที่ สำหรับวัสดุที่ถูกดึงในทิศทางในแกน x อัตราส่วนของปัวซองจะมีค่าเป็น

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (2.7)$$

โดยที่ ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง
 ϵ_x คือ ค่าความเครียดในแนวแกน x
 ϵ_y คือ ค่าความเครียดในแนวแกน y

เมื่อชิ้นงานถูกดึงในทิศทางแกน x จะมีความเครียดจากการหดตัวในทิศทางแกน y และ z ซึ่งถ้าชิ้นงานถูกดึงในทิศทางแกน y แล้วค่าความเครียดจากการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางแกน x และ z



รูปที่ 2.6 ชิ้นงานหดตัวในทิศทางแกน y และ z เมื่อมีความเค้นมากระทำในทิศทางแกน x
 (รูปจาก: https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio)

สำหรับวัสดุในพิกัด 3 มิติ ค่าอัตราส่วนของปัวซองที่มีทิศทางตั้งฉาก จะมีค่าเท่ากัน ถ้ามีแรงมากระทำในทิศทางแกน x ค่าความเครียดในแนวแกน y กับ z จะมีค่าเท่ากับ

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu \epsilon_x \quad (2.8)$$

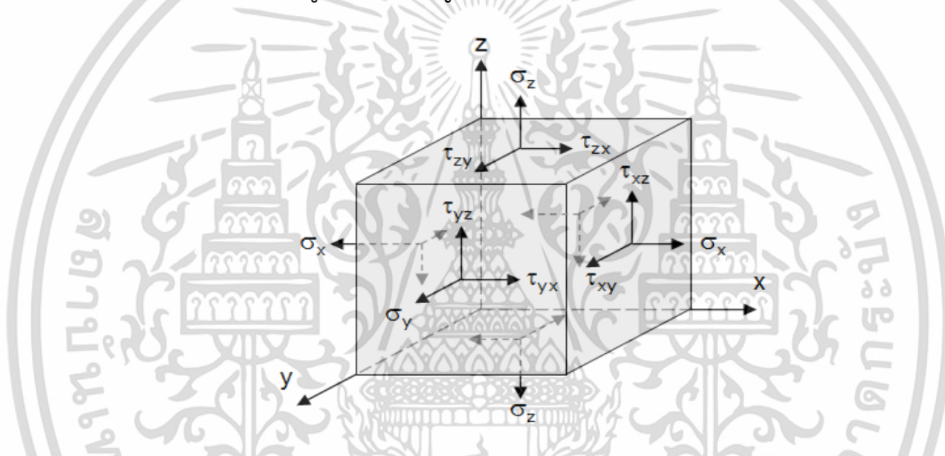
ค่าโมดูลัสของแรงเฉือนมีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวซอง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.9)$$

2.6 ความเค้น - ความเครียด ในพิกัด 3 มิติ

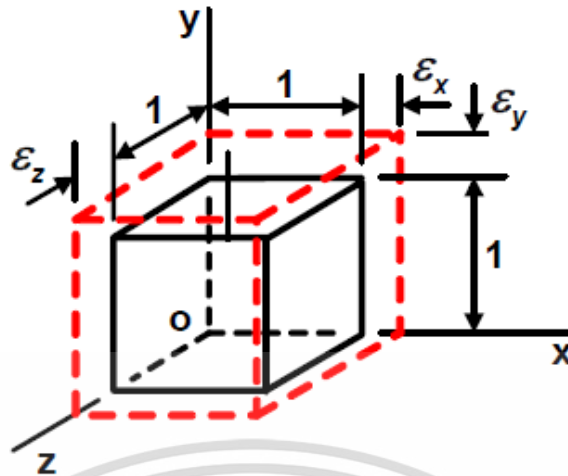
แรงในระบบแกนตั้งฉากที่จุดใดๆ บนวัตถุ สภาวะของหน่วยแรง (state of stress) ที่เกิดขึ้นที่ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนวัตถุจะหาได้โดยการตัดวัตถุรอบๆ ตำแหน่งดังกล่าวให้เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ โดยให้ด้านของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนานไปกับระนาบต่างๆ ของระบบแกนตั้งฉาก x , y , และ z จากนั้น ใช้ นิยามของหน่วยแรง สร้างสมการของหน่วยแรงที่กระทำที่ด้านต่างๆ ของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic Volume Element) สภาพทั่วไปของความเค้นที่ตำแหน่งใดๆ สามารถแทนได้ด้วยความเค้น ประกอบกันเก้าความเค้น สามความเค้นเป็นความเค้นตั้งฉากกระทำที่จุดกึ่งกลางบนผิวลูกบาศก์ σ_x , σ_y และ σ_z ซึ่งมีทิศทางไปทางแกน x , y และ z ตามลำดับ อีกหกความเค้นเป็นความเค้นเฉือน τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xz} ซึ่งกระทำบนผิวทั้ง 6 ด้านของลูกบาศก์ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความเค้นที่เพิ่มขึ้นบนชิ้นงานในพิกัด 3 มิติ

(รูปจาก: https://www.slideshare.net/msheer/ch-1-stress-and-strain?from_action=save)

ในการพิจารณาถึงสภาวะของความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดๆหนึ่ง เราจะทำการพิจารณาสภาวะของความเครียดที่เกิดขึ้นบน เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic Volume Element) เล็ก ๆ ที่ล้อมรอบจุดนั้น โดยทั่วไปแล้วสภาวะของความเครียดบน เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ จะประกอบไปด้วยความเครียดทั้งหมด 6 ค่า คือความเครียดตั้งฉาก ϵ_x , ϵ_y และ ϵ_z และความเครียดเฉือน γ_{xy} , γ_{yz} และ γ_{xz} ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในพิกัด 3 มิติ

(รูปจาก: <https://www.engineering.com/Blogs/tabid/3207/ArticleID/148/categoryId/11/Transformation-of-Strains.aspx>)

จากกฎของฮุก สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในระบบ 3 มิติได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

โดยที่ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ คือ ค่าความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (Pa)

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ คือ ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดในระนาบ xy, yz และ xz ตามลำดับ (Pa)

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ คือ ค่าความเครียดตั้งฉากในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ คือ ค่าความเครียดเฉือนที่เกิดในระนาบ xy, yz และ xz ตามลำดับ

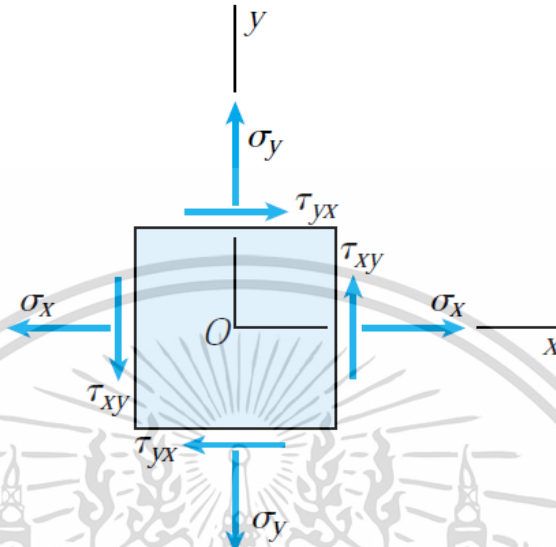
E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Pa)

ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ความเค้นระนาบ (Plane Stress)

ในกรณีปัญหาแผ่นบางหรือตำแหน่งบนผิวอิสระ ถือว่าไม่มีแรงกระทำในแนวแกน Z ทำให้ความเค้นเกิดในเพียงแค่ 3 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความเค้นระนาบ (Plane Stress)

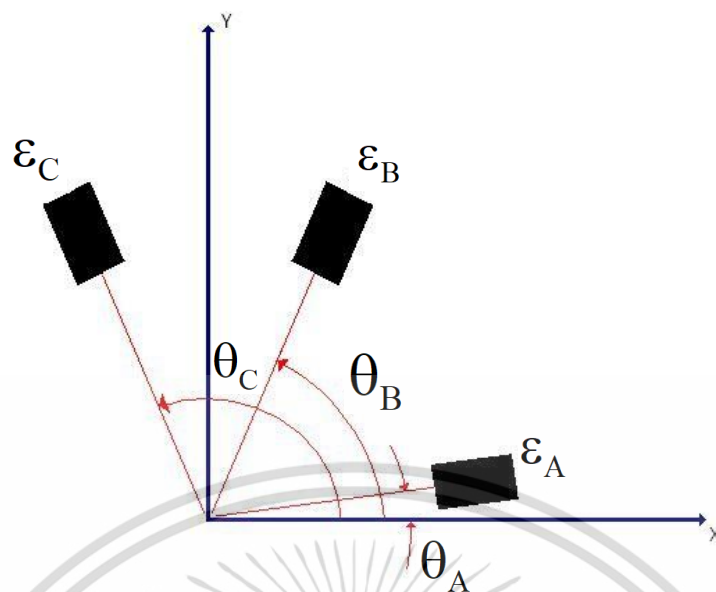
(รูปจาก: Mechanic of Materials 6th edition, James M. Gere)

ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ตามกฎของฮุกได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

2.8 การวัดค่าความเครียดจากตัววัดความเครียดที่ติดตั้งบนผิวของวัตถุ

ค่าความเค้นตึงฉากที่เกิดขึ้นในชิ้นงานภายใต้แรงที่มากระทำสามารถวัดค่าได้โดยใช้ตัววัดความเครียด ซึ่งความเค้นตึงฉากที่เกิดขึ้นนั้นจะวัดจากการวัดและการคำนวณโดยใช้สมการการเปลี่ยนแปลงความเครียด



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งการวางเกจวัดความเครียดแบบโรเซต (Rosette Strain Gauge)

(รูปจาก: <https://forums.ni.com/t5/Example-Code/Rosette-Strain-Gauge-Calculation-VI/ta-p/3996262?profile.language=en>)

พิจารณาการติดตั้งตัววัดความเครียดดังรูปที่ 2.10 จะพบว่าตัววัดความเครียดแต่ละตัวจะทำมุมใด ๆ เทียบกับแกน x และ y ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเครียดตั้งฉากและค่าความเครียดเฉือนได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากตัววัดความเครียดทั้งสาม ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$\varepsilon_A = \varepsilon_x \cos^2 \theta_A + \varepsilon_y \sin^2 \theta_A + \gamma_{xy} \sin \theta_A \cos \theta_A \quad (2.12)$$

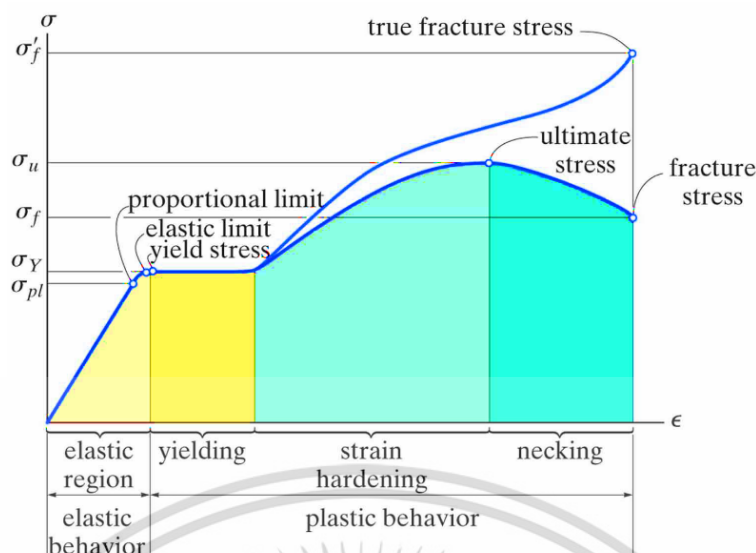
$$\varepsilon_B = \varepsilon_x \cos^2 \theta_B + \varepsilon_y \sin^2 \theta_B + \gamma_{xy} \sin \theta_B \cos \theta_B \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_C = \varepsilon_x \cos^2 \theta_C + \varepsilon_y \sin^2 \theta_C + \gamma_{xy} \sin \theta_C \cos \theta_C \quad (2.14)$$

2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

(รูปจาก: [https://encrypted-](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQmcXNbiUaBMci1EQlVjeAbE4xnWkKTy1B_DuJDxil_2_FXLXHJv16srkXMuXg&s=10)

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQmcXNbiUaBMci1EQlVjeAbE4xnWkKTy1B_DuJDxil_2_FXLXHJv16srkXMuXg&s=10](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQmcXNbiUaBMci1EQlVjeAbE4xnWkKTy1B_DuJDxil_2_FXLXHJv16srkXMuXg&s=10))

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (รูปที่ 2.11) เราพบว่า เมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุดนี้เรียกว่าพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

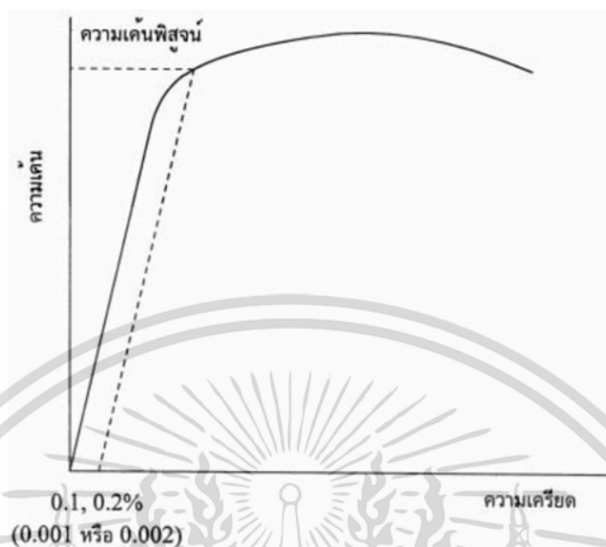
เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ จุดนี้เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น

ที่จุดซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปร่างพลาสติก จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress หรือ Yield Strength) ค่าความเค้นครากนี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 2.12

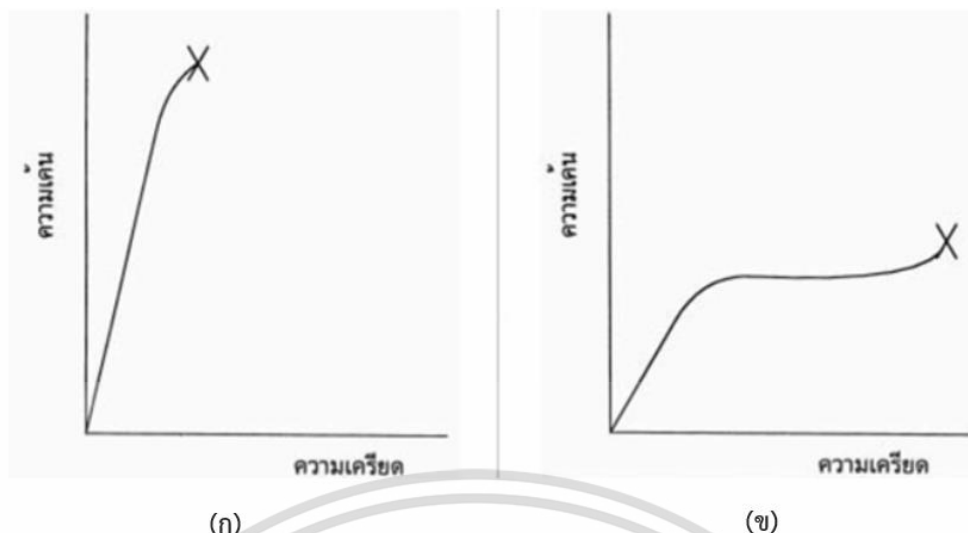


รูปที่ 2.12 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก

(รูปจาก: <http://www.rmutphysics.com/charud/metal/1/Mechanical%20Properties.htm>)

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกด้วยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่าค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้นอกจากนี้ ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง

ที่จุดสุดท้ายของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว จะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2.13 ก ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุเหนียว (Ductile Materials) จะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.13 ข



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุ (ก) วัสดุเปราะ (ข) วัสดุเหนียว
(รูปจาก: <http://www.rmutphysics.com/charud/metal/1/Mechanical%20Properties.htm>)

2.10 หลักเกณฑ์ของ von Mises (The von Mises Criterion)

ในปี 1913 Richard von Mises ได้เสนอทฤษฎีที่ใช้ทำนายการแตกหักของโลหะเหนียวว่า วัสดุจะเริ่มเกิดการเสียหายแบบถาวรถ้าพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Distortion energy) ภายในวัสดุภายใต้ภาระต่างๆไปเท่ากับพลังงานแปรรูปที่เกิดขึ้น ณ จุดคราก (Yield point) ของเอลิเมนต์ซึ่งถูกทำการทดสอบแรงดึงของวัสดุเดียวกัน ซึ่งทฤษฎีของ von Mises จะพิจารณาความเค้นทุกทิศทางที่กระทำกับวัสดุตามสมการ

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]} \quad (2.15)$$

โดยที่ σ_{vonMises} คือ ค่าความเค้นของ von Mises ณ จุดใดๆในวัสดุ (Pa)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ คือ ค่าความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ ณ จุดใดๆในวัสดุ (Pa)

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ คือ ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดในระนาบ xy, yz และ xz ตามลำดับ ณ จุดใดๆในวัสดุ (Pa)

จากทฤษฎีจะพบว่าวัสดุจะเริ่มเกิดการครากเมื่อค่าความเค้นของ von Mises มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength)

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_{\text{Yield}} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 ความเค้นอนุญาตของโครงสร้างภาระแบบคงที่ (Permissible stress of statically loaded structures)

ตามมาตรฐาน EN 12663 – 1 [3] ได้ให้หลักการหาค่าความเค้นอนุญาตของโครงสร้างภาระแบบคงที่ ซึ่งค่าความเค้นอนุญาตของโครงสร้างภาระแบบคงที่นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเค้นคราก ความเค้นพิสูจน์ และความเค้นสูงสุดที่น้อยที่สุด ของวัสดุที่เลือกตามที่กำหนดไว้ในรายละเอียดของวัสดุ

ตามมาตรฐาน EN 12663 – 1 มีค่าความเค้นอนุญาต (σ_{perm}) ที่จะพิจารณา 2 ชนิด คือ

2.11.1 ความเค้นคราก หรือ ความเค้นพิสูจน์ (Yield strength or Proof strength)

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_{yield\ or\ proof}}{F.S._1} \quad (2.17)$$

โดยที่ σ_{perm} คือ ค่าความเค้นอนุญาต (Pa)
 $\sigma_{yield\ or\ proof}$ คือ ค่าความเค้นคราก หรือ ความเค้นพิสูจน์ (Pa)
 $F.S._1$ คือ ตัวประกอบความปลอดภัยที่สัมพันธ์กับค่าความเค้นคราก หรือ ความเค้นพิสูจน์

ค่าของ $F.S._1$ ตามมาตรฐาน EN 12663 – 1 มีค่าเท่ากับ 1

2.11.2 ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate strength)

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_{ultimate}}{F.S._2} \quad (2.18)$$

โดยที่ σ_{perm} คือ ค่าความเค้นอนุญาต (Pa)
 $\sigma_{ultimate}$ คือ ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Pa)
 $F.S._2$ คือ ตัวประกอบความปลอดภัยที่สัมพันธ์กับค่าภาระที่ทำให้เกิดความเสียหาย

ข้อกำหนดนี้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายแบบฉับพลันเมื่อค่าภาระสูงสุดที่ออกแบบไว้มีค่าเกินกำหนด ซึ่งสามารถจัดการได้โดยจำกัดค่าความเค้นสูงสุดในแต่ละส่วนโดยใช้ตัวประกอบความปลอดภัย

ค่าของ $F.S._2$ ตามมาตรฐาน EN 12663 – 1 มีค่าเท่ากับ 1.3

ซึ่งในโครงการฉบับนี้ ได้เลือกใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่สัมพันธ์กับค่าความเค้นคราก หรือ ความเค้นพิสูจน์ ($F.S._1$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

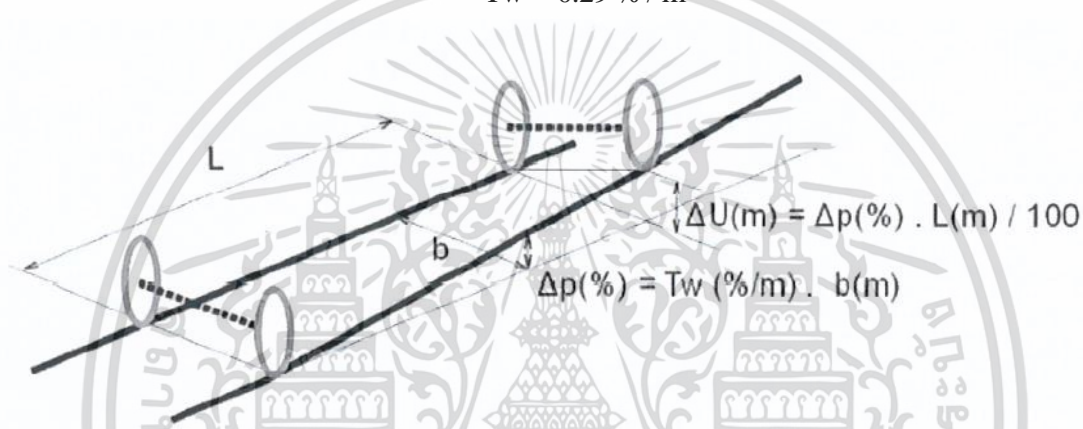
2.12 ตัวประกอบยกโค้งสมมูล (Equivalent Cant Factor)

ค่าตัวประกอบยกโค้งสมมูล เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าระยะการยกขึ้นของล้อข้างหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นจากการบิดของทาง (Track twist)

จากข้อกำหนด ค่าความลาดเอียงสูงสุด (Maximum Super elevation) มีค่าเท่ากับ 10% และค่าความชันสูงสุด (Maximum Gradient) ถูกจำกัดอยู่ที่ 0.55%/m สำหรับโค้งที่มีรัศมีโค้งมากกว่า 60 เมตร ค่าความชันจะมีค่าลดลงเนื่องจากข้อจำกัดของการกระตุกในแนวด้านข้าง (Lateral Jerk) ซึ่งค่าการกระตุกในแนวด้านข้างสูงสุดถูกจำกัดอยู่ที่ 0.06 g/s

ซึ่งจากข้อกำหนด ค่าของการบิด (Twist, Tw) ที่ใช้มีค่าเท่ากับ

$$Tw = 0.29 \% / m$$



รูปที่ 2.14 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการยกโค้ง

จากรูปที่ 2.14 ค่า Δp (%) คือค่าความชันของทางข้างหนึ่งที่ถูกยก เป็นผลคูณระหว่างค่าการยกโค้ง Tw (%/m) กับค่าความกว้างของทาง b (m) ส่วนค่า ΔU (m) คือค่าความสูงของล้อข้างหนึ่งที่ถูกยกขึ้น เป็นผลคูณระหว่างค่าความยาวของตัวรถ หรือระยะห่างระหว่างโบกี้รถไฟ L (m) กับค่าความชันของทางข้างหนึ่งที่ถูกยก Δp (%)

2.13 เกจวัดความเครียด

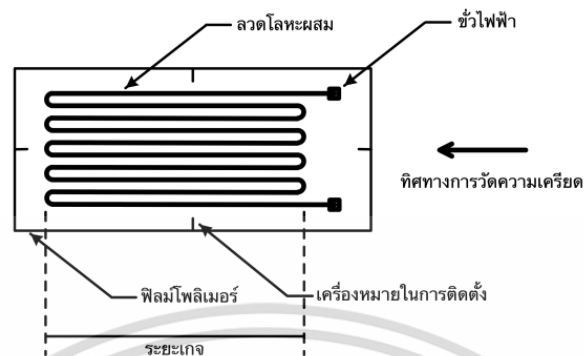
เกจวัดความเครียด (strain gage) คือเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain) ของวัสดุที่คิดค้นโดย เอ็ดเวิร์ด อี ซิมมอนส์ และ อาร์เทอร์ ซี รูค ในปี ค.ศ. 1938 เป็นส่วนประกอบสำคัญของโหลดเซลล์ (Load cell) ในเครื่องชั่งน้ำหนัก (weigher)

เกจวัดความเครียดจะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็ก ขดเป็นรูปร่างต่างๆ อยู่บนแผ่นฉนวน หรือแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบลวดโลหะ

หลักการของเกจวัดความเครียด คือ เมื่อเกจวัดความเครียดถูกแรงกระทำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป (ยืด หด บิด งอ) ทำให้ความต้านทานของวัสดุนั้นเปลี่ยนไปตามแรงที่กระทำ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้จะใช้การต่อวงจร Wheatstone bridge เพื่อหาความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเกจวัดความเครียด

(รูปจาก: http://www.chaosuan.me.engr.tu.ac.th/chaosuan2/E-learning_files/อุปกรณ์วัดความเครียด.pdf)



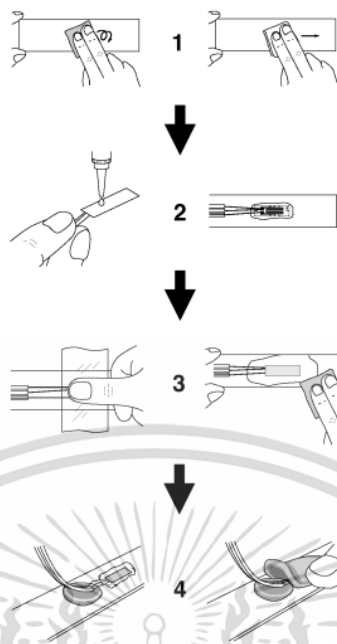
รูปที่ 2.16 เกจวัดความเครียดแบบโรเซตสามแนวแกน

(รูปจาก: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000300401)

2.13.1 การติดตั้งเกจวัดความเครียด (installation of strain gage)

การติดตั้งเกจวัดความเครียดที่ดีประกอบด้วย 3 หลักการ คือ ขนาดและทิศทางของความเครียดของวัสดุต้องสามารถถ่ายทอดไปยังเกจวัดความเครียดได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และรักษาความสามารถในการวัดความเครียดได้ในช่วงเวลาที่ต้องการ โดยขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียดแสดงได้ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการติดตั้งเงจวัดความเครียด

รูปจาก: http://www.chaosuan.me.engr.tu.ac.th/chaosuan2/E-learning_files/อุปกรณ์วัดความเครียด.pdf

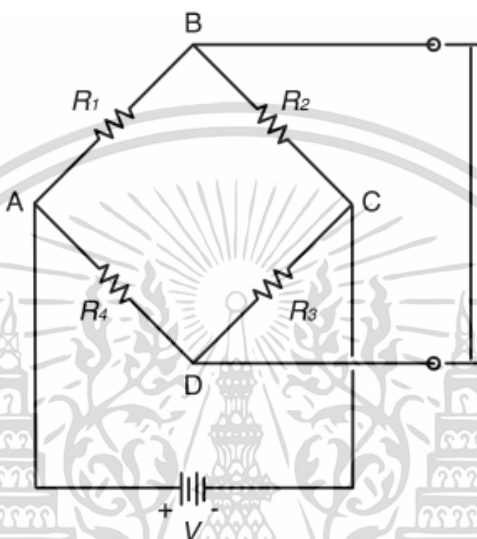
พื้นผิวของวัสดุต้องมีความหยาบที่เหมาะสม เพื่อให้กาวสามารถยึดเงจวัดความเครียดเข้ากับวัสดุได้ดี การเพิ่มความหยาบของผิวในกรณีที่ผิววัสดุเรียบสามารถทำได้โดยขัดด้วยกระดาษทราย นอกจากนี้สิ่งสกปรกต่าง ๆ บนผิว เช่น เศษวัสดุ ฝุ่น คราบน้ำมัน สารเคมี สี อาจส่งผลให้เงจวัดความเครียดไม่สามารถยึดติดกับผิววัสดุได้อย่างสมบูรณ์ การทำความสะอาดผิวสามารถทำได้โดยการขัด ใช้สารเคมี เช่น อะซิโตน แอลกอฮอล์ ล้างด้วยน้ำสะอาด และทำให้แห้ง

กาวที่ใช้ติดตั้งเงจวัดความเครียดต้องเป็นกาวที่มีความแข็งแรงสูง ทนทาน และสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุได้ทันที ดังนั้นกาวที่ใช้สำหรับติดตั้งเงจวัดความเครียดจึงขึ้นกับชนิดของวัสดุ โดยการติดตั้งต้องวางตำแหน่งเงจวัดความเครียดให้อยู่ในทิศทางของความเครียดที่ต้องการวัด การใช้กาวต้องทาลงบนส่วนล่างของฟิล์มโพลีเมอร์ โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสม มีปริมาณเพียงพอที่จะยึดเงจวัดความเครียดกับผิววัสดุได้อย่างแข็งแรง แต่ไม่มากเกินไปจนส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ นอกจากนี้การกระจายของกาวต้องสม่ำเสมอและทั่วถึงทุกส่วนของเงจวัดความเครียด ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้แผ่นโพลีเมอร์พิเศษกดเงจวัดความเครียดให้แนบติดกับผิววัสดุจนกระทั่งกาวแข็งตัว โดยแผ่นโพลีเมอร์นี้มีสมบัติไม่ติดกาว กาวติดตั้งเงจวัดความเครียดอาจเสื่อมสภาพจากความชื้นได้ ดังนั้นภายหลังจากที่กาวแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว เงจวัดความเครียดควรถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพื่อป้องกันความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.2 วงจรหวิดส์โตนบริจ (Wheatstone bridge)

การวัดกาเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าพฤติกรรมของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพื่อใช้คำนวณความเครียด (strain) นั้นกระทำไดยาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในการใช้เกจวัดความเครียดจึงวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ที่เกิดขึ้นในวงจรหวิดส์โตนบริจ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้สะดวกกว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 วงจรหวิดส์โตนบริจ

รูปจาก: http://www.chaosuan.me.engr.tu.ac.th/chaosuan2/E-learning_files/อุปกรณ์วัดความเครียด.pdf

โดยความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B และความต่างศักย์ระหว่างจุด C และ D คำนวณได้จาก

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V \quad (2.19)$$

$$V_{CD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V \quad (2.20)$$

- โดยที่ V_{AB} คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B (V)
 V_{CD} คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด C และ D (V)
 V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร (V)
 R คือ ค่าตัวต้านทาน (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความต่างศักย์ระหว่างจุด B และ D เป็น

$$E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD}$$

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot V \quad (2.21)$$

สำหรับวงจรสมดุลง $E = 0$ ดังนั้น $R_1 R_3 = R_2 R_4$

ถ้าความต้านทานไฟฟ้าของ R_1, R_2, R_3, R_4 ในรูปที่ 2.17 เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเป็น $R_1 + \Delta R_1, R_2 + \Delta R_2, R_3 + \Delta R_3, R_4 + \Delta R_4$ การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) สามารถคำนวณได้จาก

โดยที่

$$\Delta E = \frac{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 & R_2 + \Delta R_2 \\ R_4 + \Delta R_4 & R_3 + \Delta R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2 & 0 \\ 0 & R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4 \end{vmatrix}} \cdot V = \frac{A}{B} \cdot V$$

ดังนั้น

$$A = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot R_1 R_3$$

$$B = \frac{R_1 R_3 (R_1 + R_2)^2}{R_1 R_2}$$

$$\Delta E = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot V$$

$$\Delta E = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot V \quad (2.22)$$

$$\Delta E = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot K_s \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot V$$

โดยที่ $r = \frac{R_2}{R_1}$

K_s = ค่าคงที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับความเครียดหรือเกจเฟคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 ทฤษฎีบทไฟไนต์เอลิเมนต์ [4]

2.14.1 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ (approximate solution) สำหรับปัญหาที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลักซึ่งคือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหาโดยคร่าว ๆ เนื่องจากปัญหาทางวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ รวมทั้งศาสตร์อื่น ๆ มักถูกล้อมคลุมด้วย องค์ประกอบทั้งสามนี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกประยุกต์นำไปใช้แก้ปัญหาค้นหาหลาย ทำให้นิยมใช้กันโดยแพร่หลาย ก่อให้เกิดซอฟต์แวร์เป็นจำนวนมากเช่นกัน

แนวคิดหลักของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโดเมน (Domain) ของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ (element) ย่อย ๆ จากนั้นจึงสร้างการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านี้ ก่อนนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์มารวมกัน เพื่อก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงบนระบบสมการใหญ่เพื่อแก้หาผลลัพธ์

2.14.2 ขั้นตอนในระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการแก้ปัญหภายในซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนนี้เริ่มจากการสร้างโดเมนรูปร่างของปัญหา ซึ่งอาจประกอบไปด้วยพื้นผิวขอบตรง ขอบโค้ง ฯลฯ ซอฟต์แวร์ส่วนใหญ่จึงมีวิธีการสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีขั้นตอนจำเพาะในตัวเอง จากนั้นซอฟต์แวร์จะแบ่งโดเมนรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ เอลิเมนต์เหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาตัวไม่รู้ค่า (unknown)

ขั้นตอนที่ 2 เอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่เกิดอาจเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าหากเป็นปัญหาใน 2 มิติ เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอาจประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มุมทั้งสาม หรือ 6 จุดต่อ คือที่มุมทั้งสามและที่จุดกึ่งกลางของด้านทั้งสามด้วย จำนวนจุดต่อเหล่านี้มีผลโดยตรงสู่ลักษณะการกระจายตัวของผลลัพธ์บนเอลิเมนต์นั้นๆ ที่เรียกว่าฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation functions) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 6 จุดต่อ มีฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ที่ซับซ้อนกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 3 จุดต่อ ดังนั้น จึงให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงมากกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามก็ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเพราะจำนวนจุดต่อบ่งบอกจำนวนไม่รู้ค่าของปัญหานั้นมีมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน โดเมนของปัญหาในระบบ 3 มิติ อาจถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ทรงตันย่อย ๆ เช่น รูปทรงลูกบาศก์คล้ายลูกเต๋า แต่ละด้านไม่ขนานกัน เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ อาจประกอบไปด้วย 8 จุดต่อที่มุมทั้ง 8 หรือ 20 จุดต่อหากมีจุดต่อที่กึ่งกลางของเส้นขอบด้วย

ขั้นตอนที่ 3 ประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นเป็นสมการทางพีชคณิต (algebraic equations) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทำบวก ลบ คูณ และหารตัวเลขเป็นจำนวนมาก จึงสามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ได้ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ ซึ่งมีฟังก์ชันการประมาณภายในที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากทุกเอลิเมนต์มารวมกันขึ้นเป็นระบบสมการทางพีชคณิต (system of algebraic equations) ขนาดใหญ่ การรวมสมการจากเอลิเมนต์ย่อยเข้าด้วยกันต้องทำอย่างเหมาะสม เปรียบเสมือนการประกอบตัวต่อ (jigsaw puzzle) ขึ้นเป็นรูปภาพใหญ่ ตัวต่อแต่ละตัวจำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง จึงจะนำมาสู่ภาพใหญ่ที่ถูกต้องสมบูรณ์ขึ้นมาได้

ขั้นตอนที่ 5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเข้ากับระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่แล้วจึงแก้ปัญหาผลลัพธ์ที่จุดต่อต่าง ๆ ขั้นตอนนี้จัดว่าใช้เวลาในการคำนวณมากโดยเฉพาะหากเป็นปัญหาขนาดใหญ่ซึ่งอาจประกอบไปด้วยหลายแสนหรือหลายล้านสมการ หรือเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นซึ่งระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่เช่นนี้ ต้องถูกแก้ซ้ำแล้วซ้ำอีกหลายครั้ง

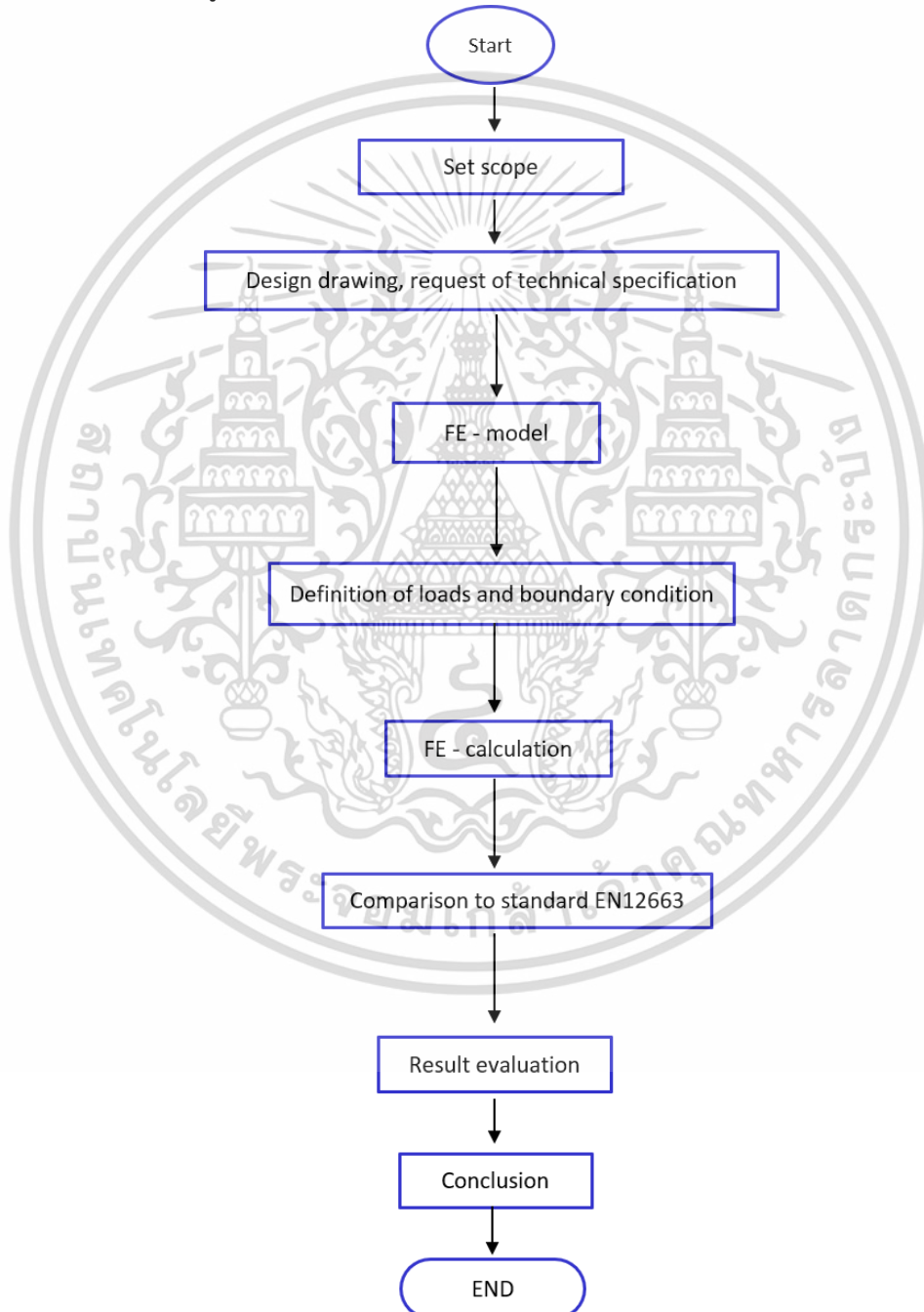
ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ผลลัพธ์ที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 แล้ว ค่าอื่น ๆ ที่มีความสำคัญเช่นกันจึงสามารถหาตามมาได้ ทำให้หารแก้ปัญหาที่สำเร็จสิ้นโดยสมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อได้ค่าการเสียรูป (displacement) ตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้างแล้ว ก็สามารถคำนวณหาค่าความเครียด (strains) และค่าความเค้น (stresses) ที่เกิดขึ้นตามมาได้ ตามลำดับ

จากขั้นตอนทั้ง 6 ดังอธิบายข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีกระบวนการที่เป็นขั้นตอนอย่างชัดเจน ให้ผลลัพธ์โดยสมบูรณ์ และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาโดยทั่วไปได้ โดยองค์ประกอบที่สำคัญของปัญหาคือสมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างปัญหา ได้ถูกจัดการดูแลโดยครบถ้วนในขั้นตอนที่ 3, 5 และ 1 ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้ จะประกอบไปด้วย ขั้นตอนในการออกแบบแบบจำลองของโครงสร้างตู้โดยสาร เงื่อนไขของภาระที่กระทำต่อโครงสร้างตู้โดยสารในแต่ละกรณี วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการออกแบบการทดสอบบนชิ้นงานจำลอง โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1

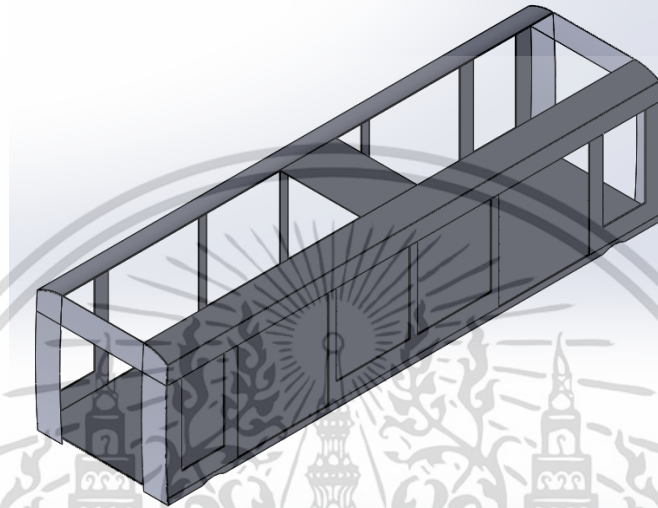


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

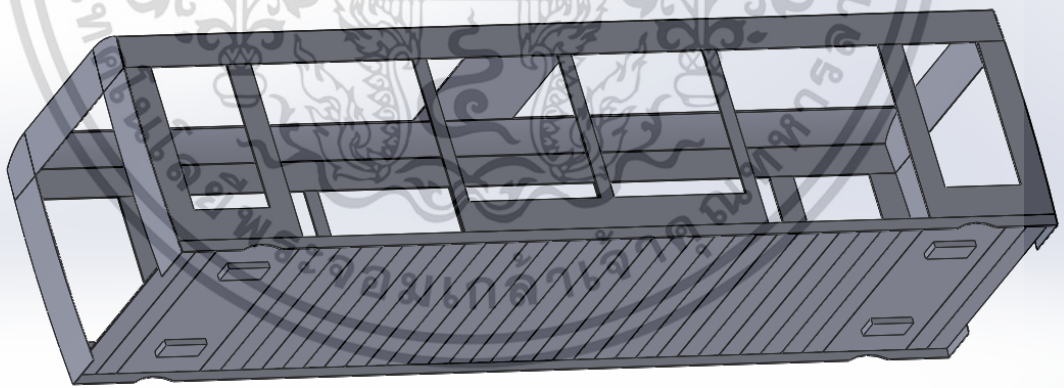
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบโครงสร้างของตู้โดยสาร

ในการออกแบบโครงสร้างของตู้โดยสาร จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ AutoCAD และ SOLIDWORKS ในการออกแบบ โดยให้ความสำคัญคล้ายคลึงกับระบบขนส่งอัตโนมัติ รุ่น Airval ที่จะนำมาใช้ในการขนส่งผู้โดยสารที่ทำอากาศยานสุวรรณภูมิ ให้มากที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดรูปร่างในมุมมองต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

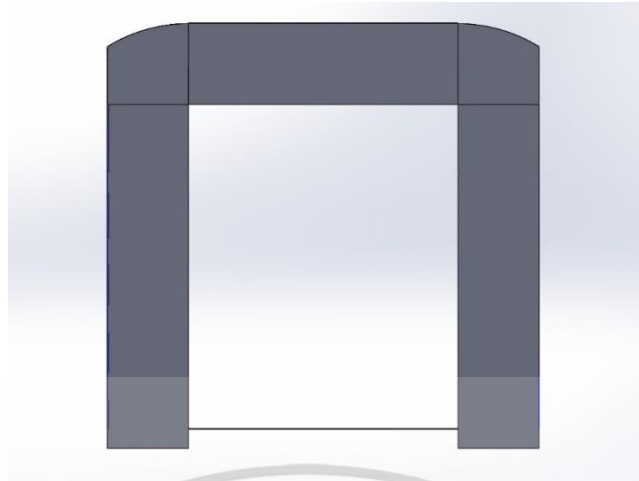


รูปที่ 3.2 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ

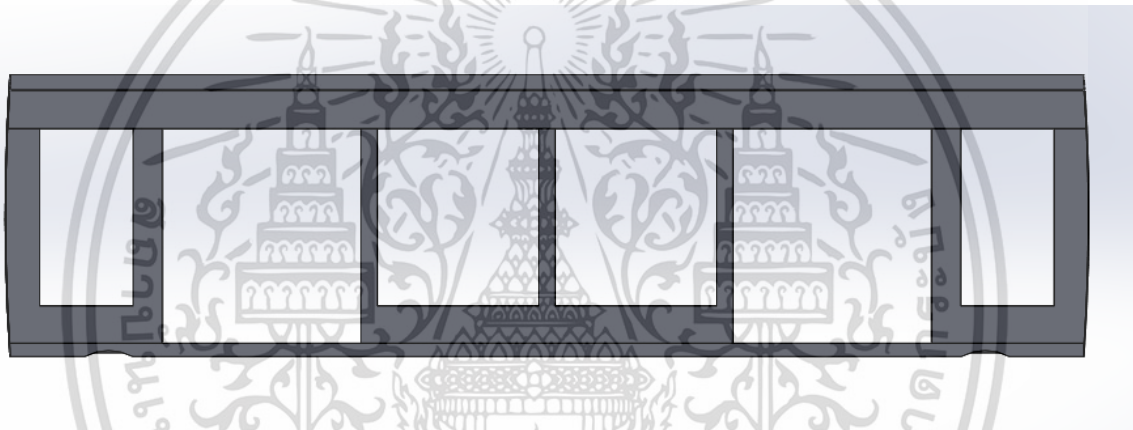


รูปที่ 3.3 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ ในมุมมองด้านใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ มุมมองด้านหน้า

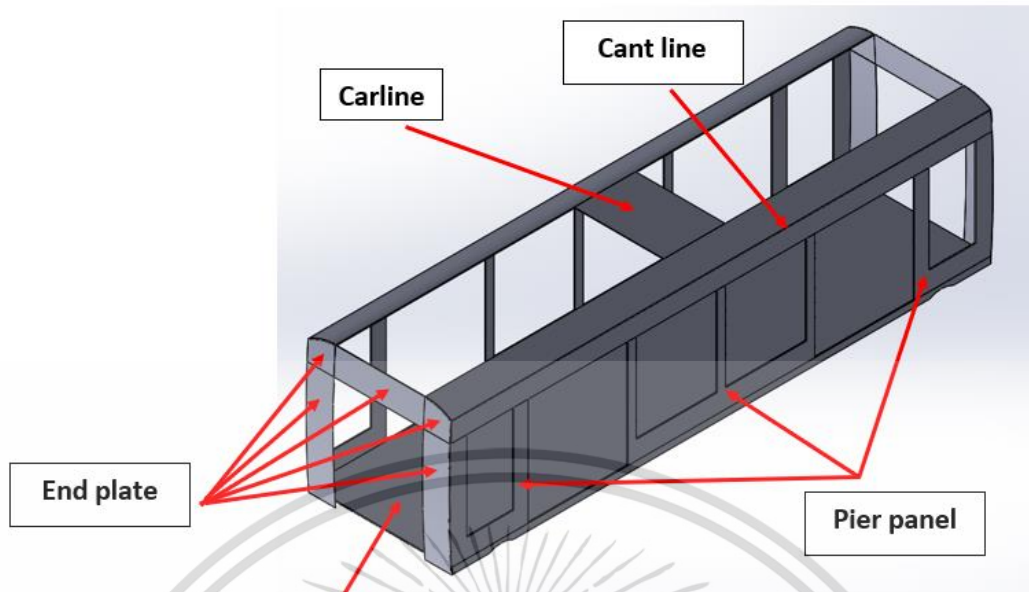


รูปที่ 3.5 แบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ มุมมองด้านข้าง

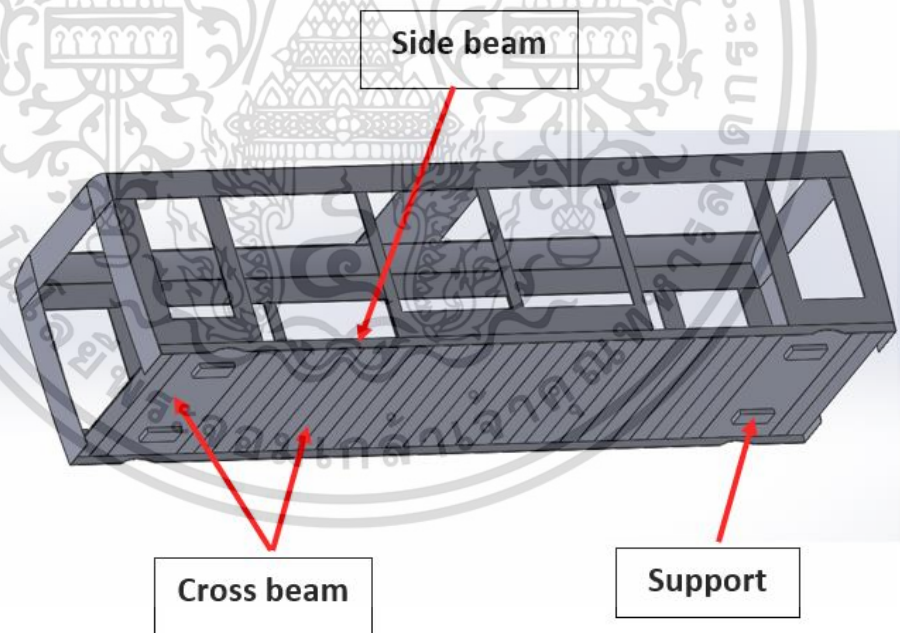
ซึ่งโครงสร้างของตัวรถที่ทำการออกแบบนั้นจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนทั้งหมด 62 ชิ้น แสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ได้แก่

1. แผ่นเชื่อมปิดคาน (End Plate) 2 ชุด (10 ชิ้น)
2. แผ่นพื้น (Floorboard) 1 ชิ้น
3. คานหลังคา (Carline) 1 ชิ้น
4. คานเอียง (Cant line) 2 ชิ้น
5. แผงเสา (Pier panel) 6 ชิ้น
6. คานขวาง (Cross beam) 36 ชิ้น
7. คานด้านข้าง (Side beam) 2 ชิ้น
8. จุดรองรับ (Support) 4 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนประกอบแบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ



รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนประกอบแบบจำลองโครงสร้างของตัวรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำแบบจำลอง

ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างตัวรถ APM จำลองนั้นประกอบด้วยวัสดุที่เป็นโลหะเพียงชนิดเดียว คือ อลูมิเนียม ชนิด EN AW 6005A T6 โดยมีคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุทางกายภาพและกลศาสตร์ ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมชนิด EN AW 6005A T6 ในรูปร่างแบบผนังบาง

คุณสมบัติทางกายภาพ	
ความหนาแน่น	270 g/cm. ³
จุดหลอมเหลว	605 °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	24 ×10 ⁻⁶ 1/K
โมดูลัสความยืดหยุ่น	70 GPa
ค่าการนำความร้อน	188 W/m.
ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า	0.034 ×10 ⁻⁶ Ω · m
อัตราส่วนปัวซอง	0.3

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมชนิด EN AW 6005A T6 ในรูปร่างแบบผนังบาง

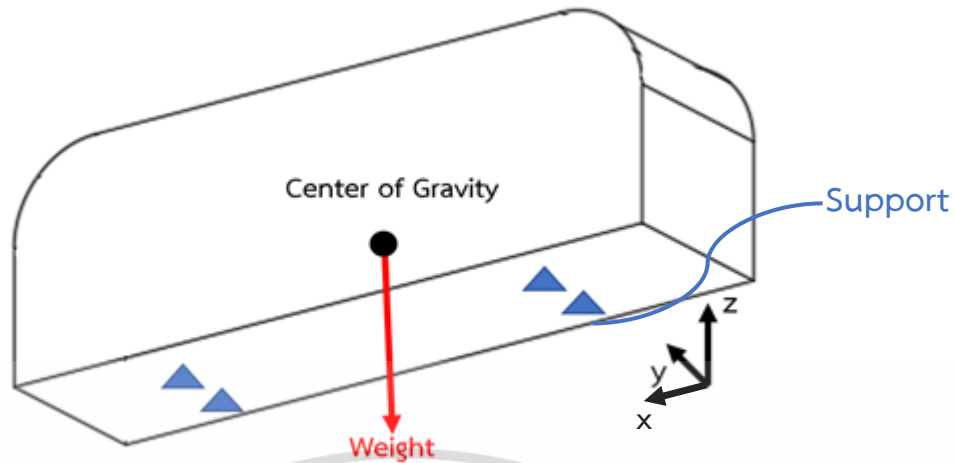
คุณสมบัติทางกล	
ความเค้นพิสูจน์	215 MPa
ความเค้นแรงดึงสูงสุด	260 MPa
ความแข็งบริเนลล์	85 HB

3.3 การตั้งเงื่อนไขเริ่มต้น (Definition of Conditions)

ในการวิเคราะห์แบบจำลองนั้น จะต้องกำหนดภาระที่เกิดจากผู้โดยสารและปัจจัยอื่น ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างตัวรถในทิศทางต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับสถานะของตัวรถในขณะนั้น โดยงานวิจัยเล่มนี้จะศึกษาสถานะของตัวรถด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ ภาระการให้บริการสูงสุด (Maximum operating Load) และ การเคลื่อนที่ในทางโค้ง (Driving in curve)

3.3.1 ภาระการให้บริการสูงสุด (Maximum operating Load)

ในกรณีนี้จะมีภาระจากน้ำหนักของผู้โดยสารที่กระทำกับโครงสร้างตัวรถ ณ จุดศูนย์กลางในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกรณีการให้บริการสูงสุด

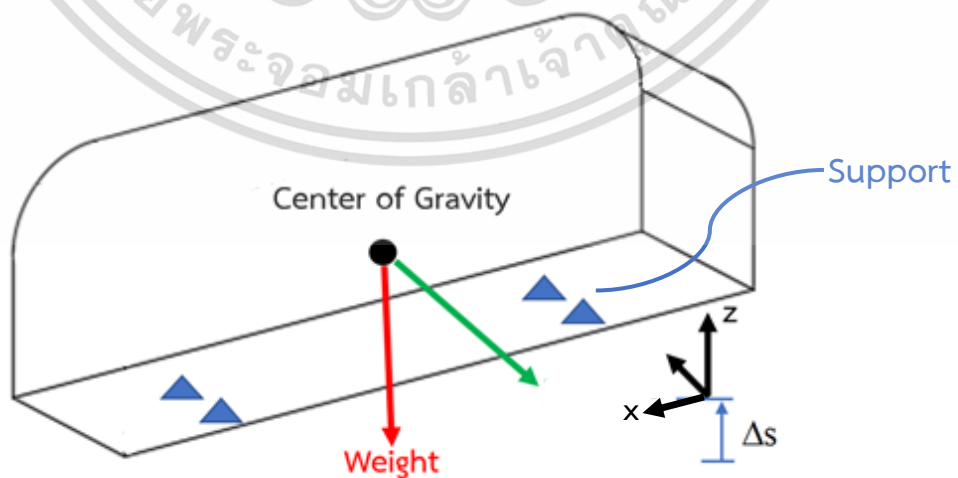
จากรูปมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$\text{Weight} = 1.3(m_1 + m_{4AW3}) \cdot g \quad (3.1)$$

โดยที่
 Weight คือ ภาระที่เกิดจากมวลโครงสร้างตัวรถและมวลของผู้โดยสาร (N)
 $m_1 + m_{4AW3}$ คือ มวลของโครงสร้างตัวรถและผู้โดยสารในเงื่อนไขพิเศษ
 g คือ ความเร่งโน้มถ่วง

3.3.2 การเคลื่อนที่ในทางโค้ง (Driving in curve)

ในกรณีนี้จะกล่าวถึงในกรณีที่ตัวรถเข้าโค้ง ล้อทางฝั่งที่ขึ้นพื้นที่การยกโค้งก่อนจะยกตัวขึ้นเป็นระยะ Δs แค่นี้เพียงล้อเดียว ทำให้โครงสร้างตัวรถเกิดการบิดตัว นอกจากนั้นจะมีภาระจากน้ำหนักของผู้โดยสารที่กระทำกับโครงสร้างตัวรถ ณ จุดศูนย์กลาง ในแนวตั้ง และภาระจากความเร่งหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการเข้าโค้งของตัวรถกระทำกับโครงสร้างตัวรถ ณ จุดศูนย์กลาง ในแนวด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกรณีการเคลื่อนที่ในทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$\text{Weight} = [(m_1 + m_{3AW2}) \cdot g] \quad (3.2)$$

$$F_y = (m_1 + m_{3AW2}) \cdot a_y$$

โดยที่	Weight	คือ ภาระที่เกิดจากมวลโครงสร้างตัวรถและมวลของผู้โดยสาร (N)
	F_y	คือ ภาระที่เกิดจากความเร่งหนีศูนย์กลางขณะเข้าโค้ง (N)
	$m_1 + m_{3AW2}$	คือ มวลของโครงสร้างตัวรถและผู้โดยสารในเงื่อนไข AW2 (kg)
	g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง m/s^2
	a_y	คือ ความเร่งในทิศทางแกน $y = 1.6 m/s^2$
	Δs	คือ ระยะความสูงที่ล้อถูกยกขึ้นไป มีค่าเท่ากับ 47.56 mm.

3.4 ความเค้นอนุญาตของวัสดุที่ใช้

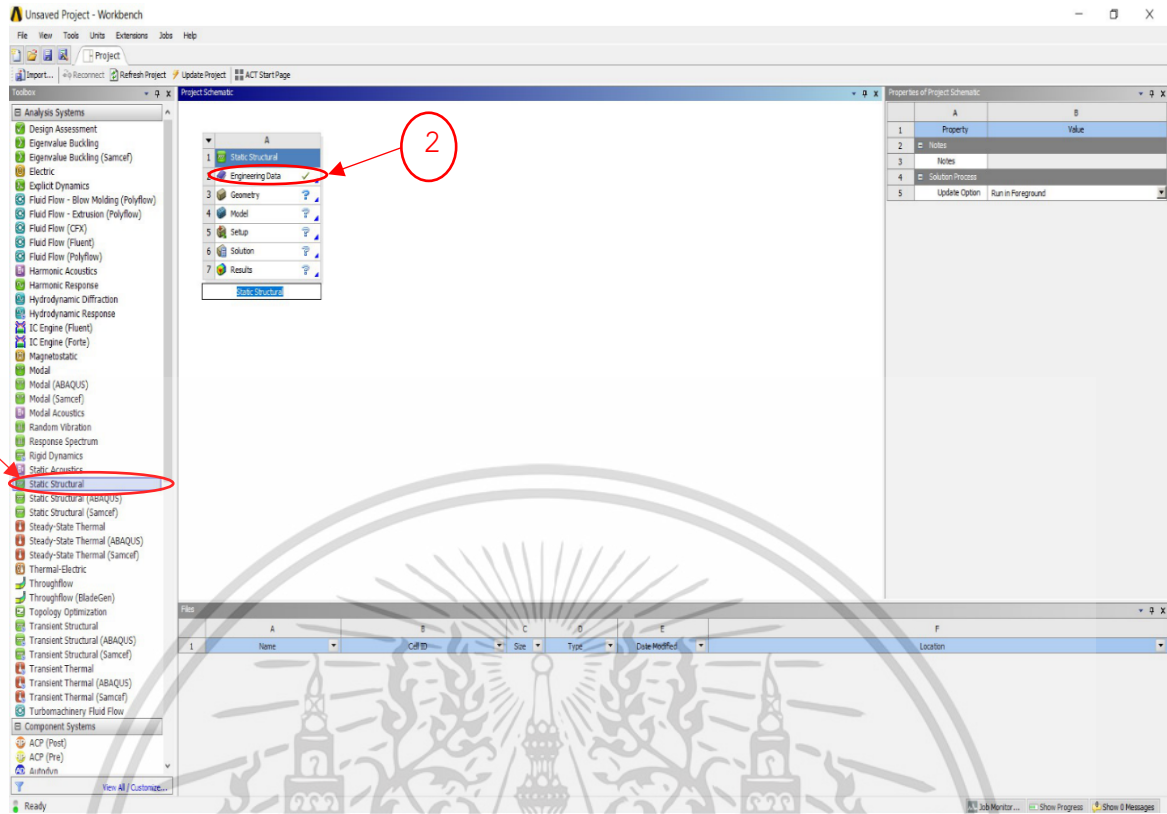
ตามมาตรฐาน EN 12663 - 1 ซึ่งได้กำหนดตัวประกอบความปลอดภัย (Safety of factor) ของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นโครงสร้างของผู้โดยสารนั้น สามารถคำนวณหาค่าความเค้นอนุญาตได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ความเค้นอนุญาตของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ความเค้นพิสูจน์ σ_{proof} [MPa]	ความเค้น แรงดึงสูงสุด $\sigma_{ultimate}$ [MPa]	ความเค้นอนุญาต σ_{perm} [MPa] ตามเงื่อนไขตัวประกอบความปลอดภัย	
			F.S. ₁ =1	F.S. ₂ =1.3
EN AW 6005A T6	215	260	215	200

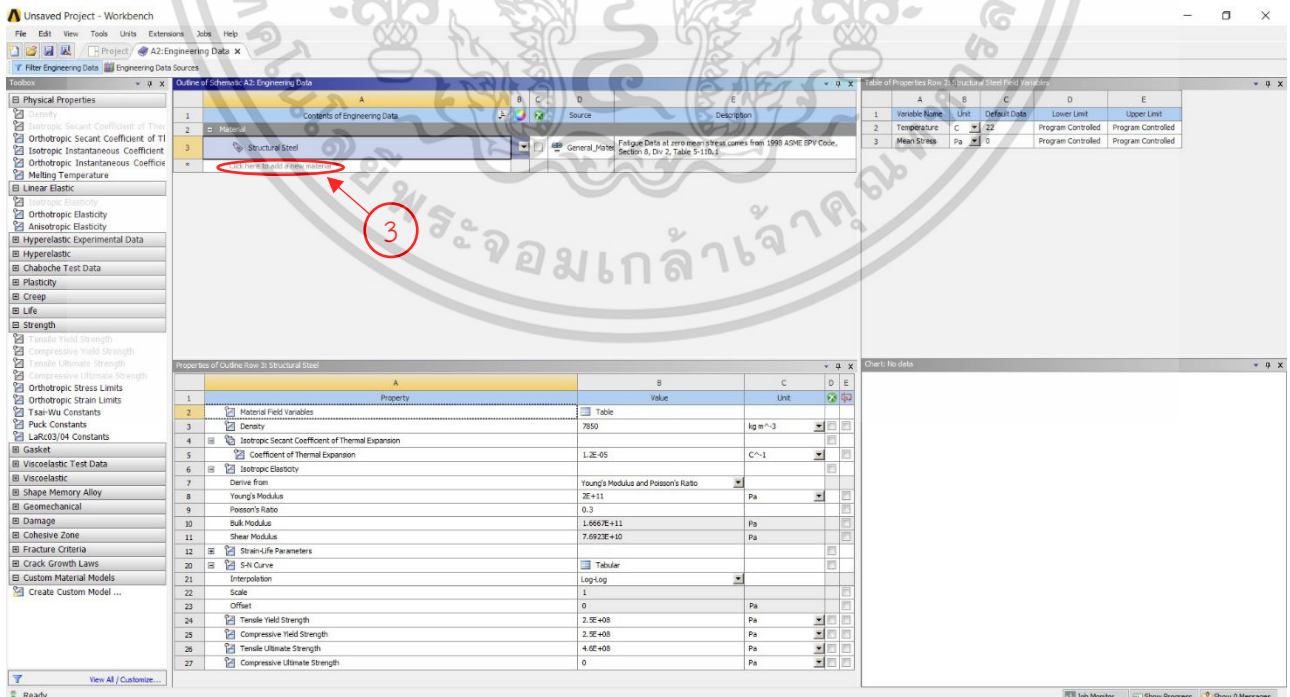
3.5 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS

3.5.1 เปิดโปรแกรม ANSYS Workbench แล้วเลือกฟังก์ชัน Static structure (หมายเลข 1) ดังรูปที่ 3.10 หลังจากนั้นทำการเลือกประเภทของวัสดุที่จะใช้ในแบบจำลอง โดยเลือกที่ Engineering data (หมายเลข 2)



รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรม ANSYS Workbench

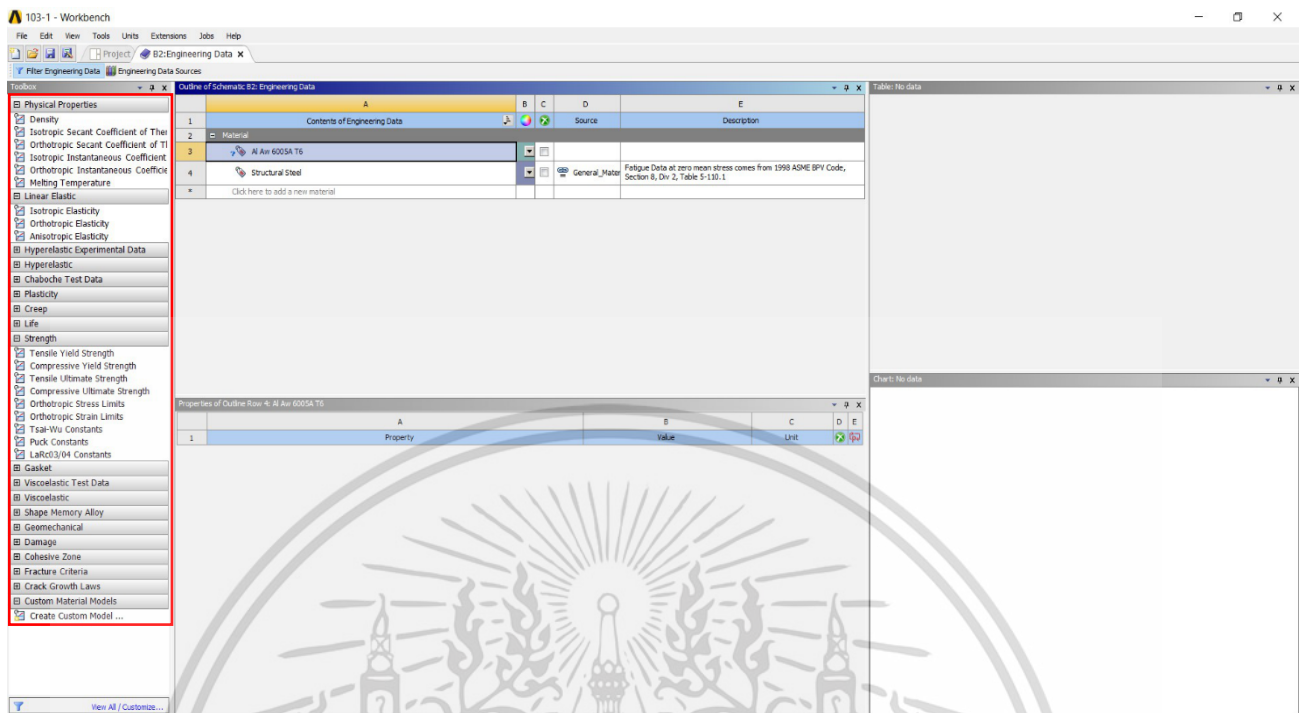
3.5.2 เมื่อทำการเลือกที่ Engineering Data จะได้หน้าต่างดังรูปที่ 3.11 เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองนั้นไม่มีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรม ANSYS จึงทำการเพิ่มข้อมูลโดยพิมพ์ชื่อวัสดุลงในช่อง Click here to add a new material (หมายเลข 3)



รูปที่ 3.11 หน้าต่างแถบ Engineering Data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโอกาสที่ระบุไว้เท่านั้น เมื่อผู้ยูสเซอร์เห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 หลังจากนั้นจะทำการเลือกคุณสมบัติที่ใช้จากทางกล่องเครื่องมือด้านซ้าย ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แถบ Toolbox ในหน้าต่างแถบ Engineering Data

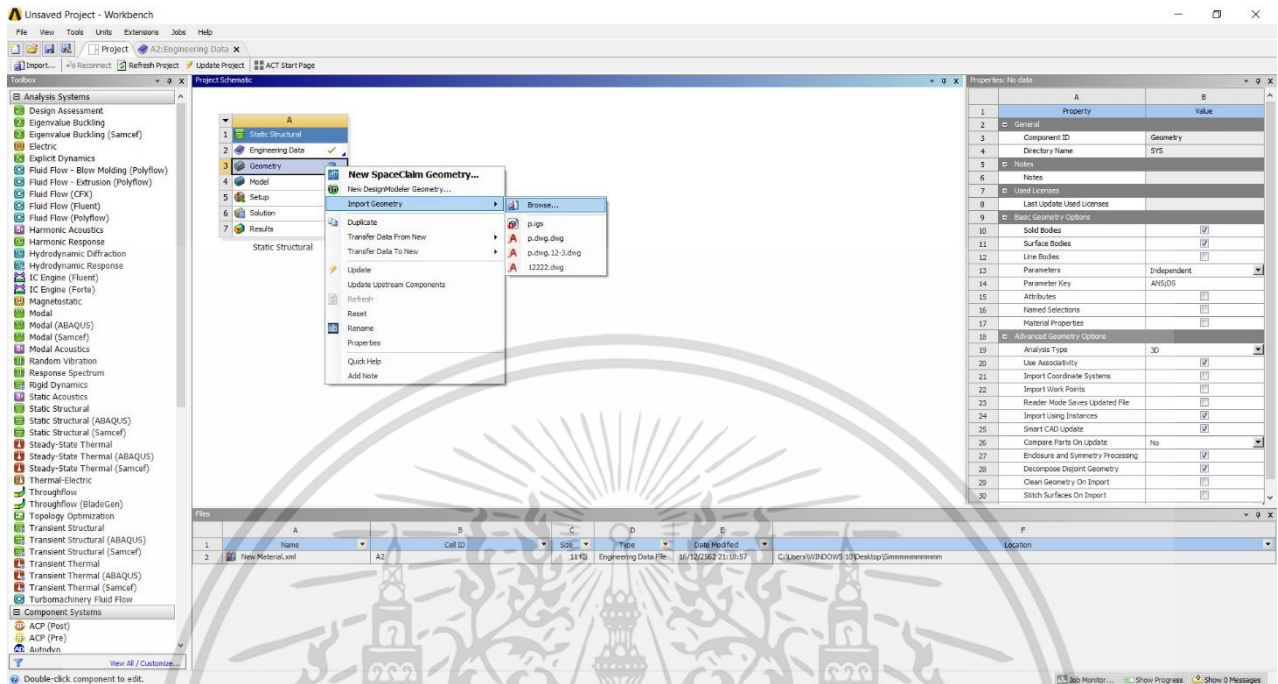
3.5.4 เมื่อทำการเลือกคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้แล้วจะได้ดังรูปที่ 3.13

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	2700	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2.4E-05	C ⁻¹
Coefficient of Thermal Expansion	605	C
Melting Temperature		
Isotropic Elasticity	Derive from: Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	7E+10	Pa
Poisson's Ratio	0.3	
Bulk Modulus	5.8333E+10	Pa
Shear Modulus	2.6923E+10	Pa
Tensile Yield Strength	215	Pa
Tensile Ultimate Strength	260	Pa

รูปที่ 3.13 ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ทำการเพิ่มลงใน Engineering Data

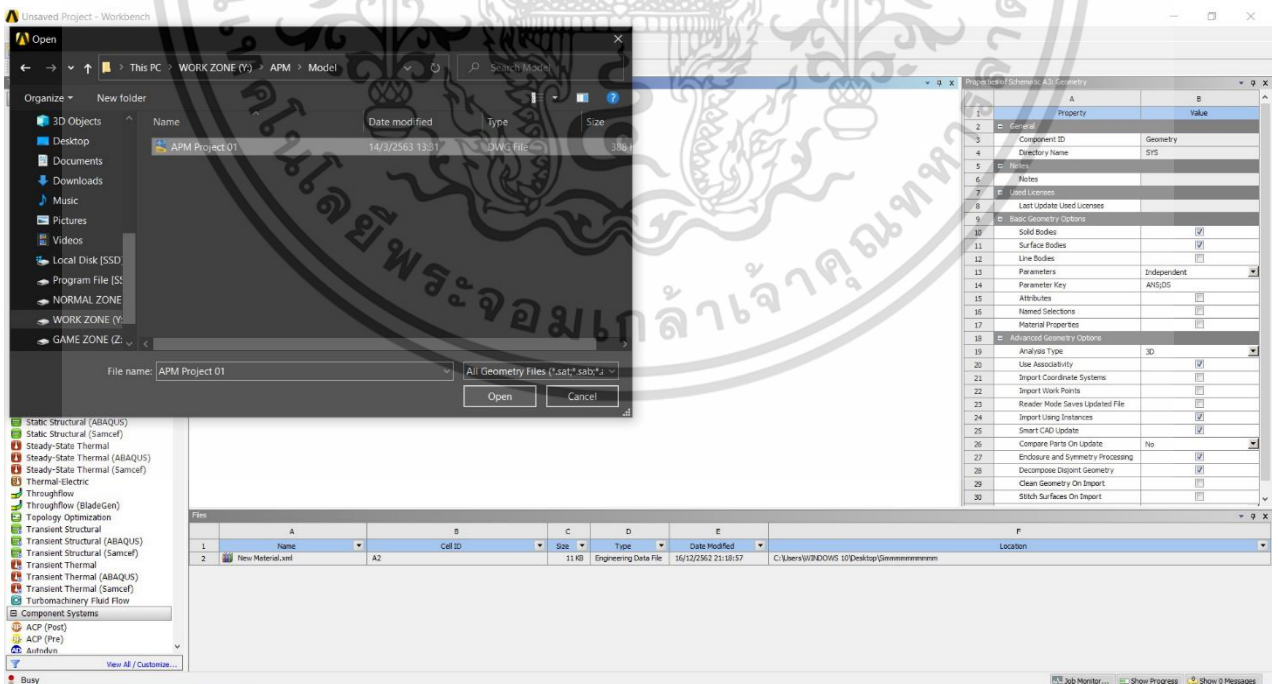
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 ทำการนำข้อมูลของไฟล์งาน 3D Model เข้าสู่ ANSYS โดยการคลิกขวาที่ Geometry เลือก Import geometry > Browse... ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วิธีการนำเข้าไฟล์แบบจำลองที่จะใช้ลงในโปรแกรม

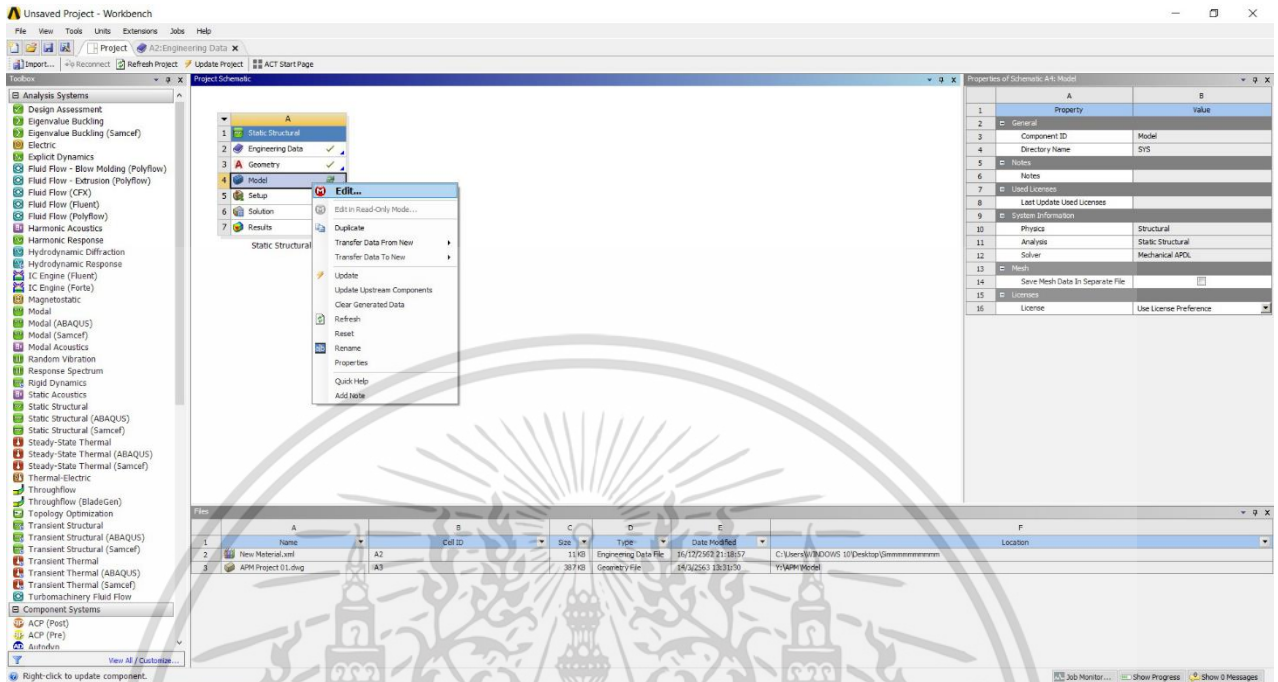
3.5.6 เลือก File model ที่ใช้ > Open ดังแสดงในรูปที่ 3.15



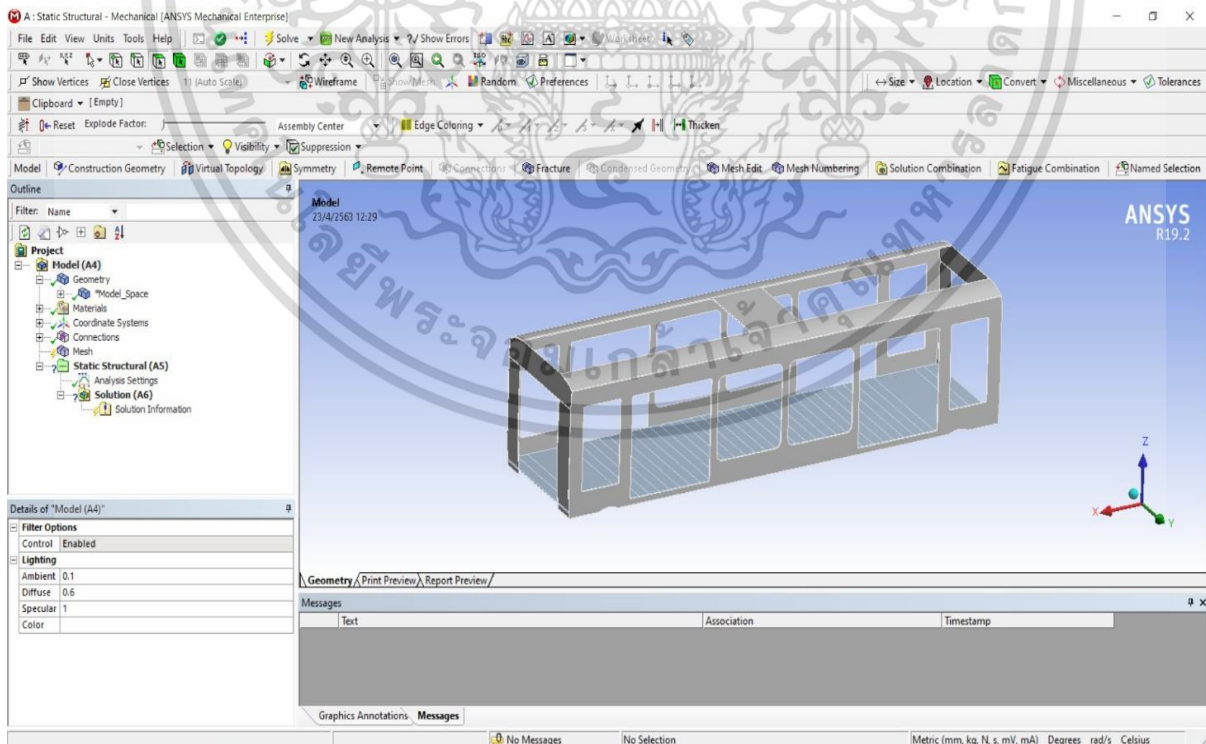
รูปที่ 3.15 วิธีการเลือกไฟล์แบบจำลองที่จะนำเข้าไปในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.7 เริ่มทำการตั้งค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์แบบจำลองโดยทำการคลิกขวาที่ Model > Edit ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งจะได้หน้าดังรูปที่ 3.17



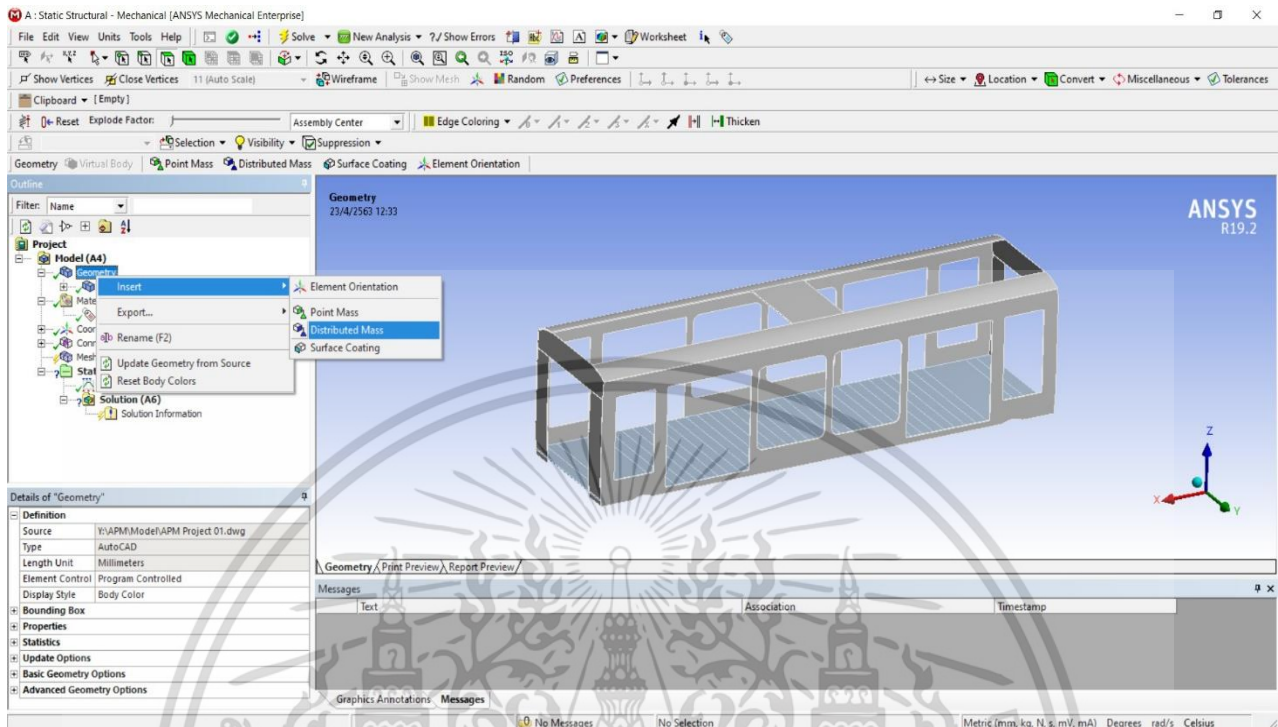
รูปที่ 3.16 วิธีการเปิดแถบการตั้งค่าต่าง ๆ ของแบบจำลองที่จะใช้



รูปที่ 3.17 หน้าต่าง Static Structural – Mechanical

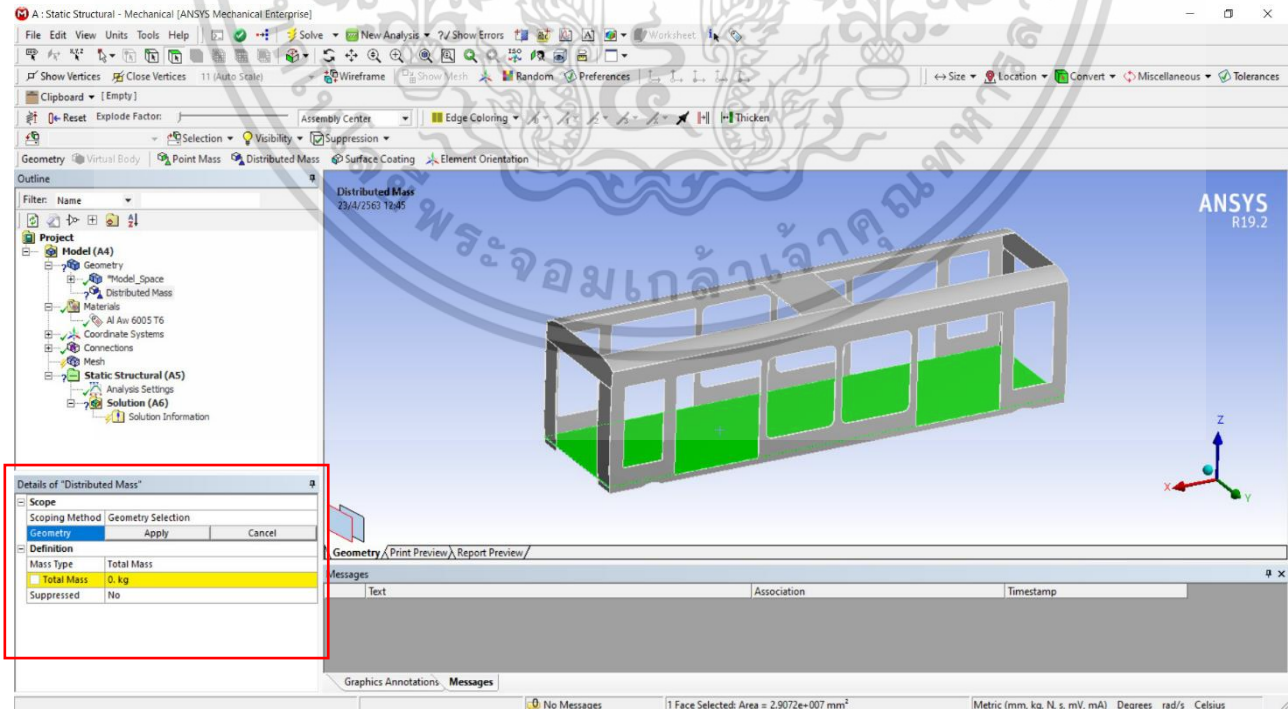
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.8 ทำการเพิ่มค่ามวลกระจายที่เกี่ยวข้อง โดยการคลิกขวาที่ Geometry > Insert > Distributed mass ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วิธีการเพิ่มค่ามวลกระจายที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง

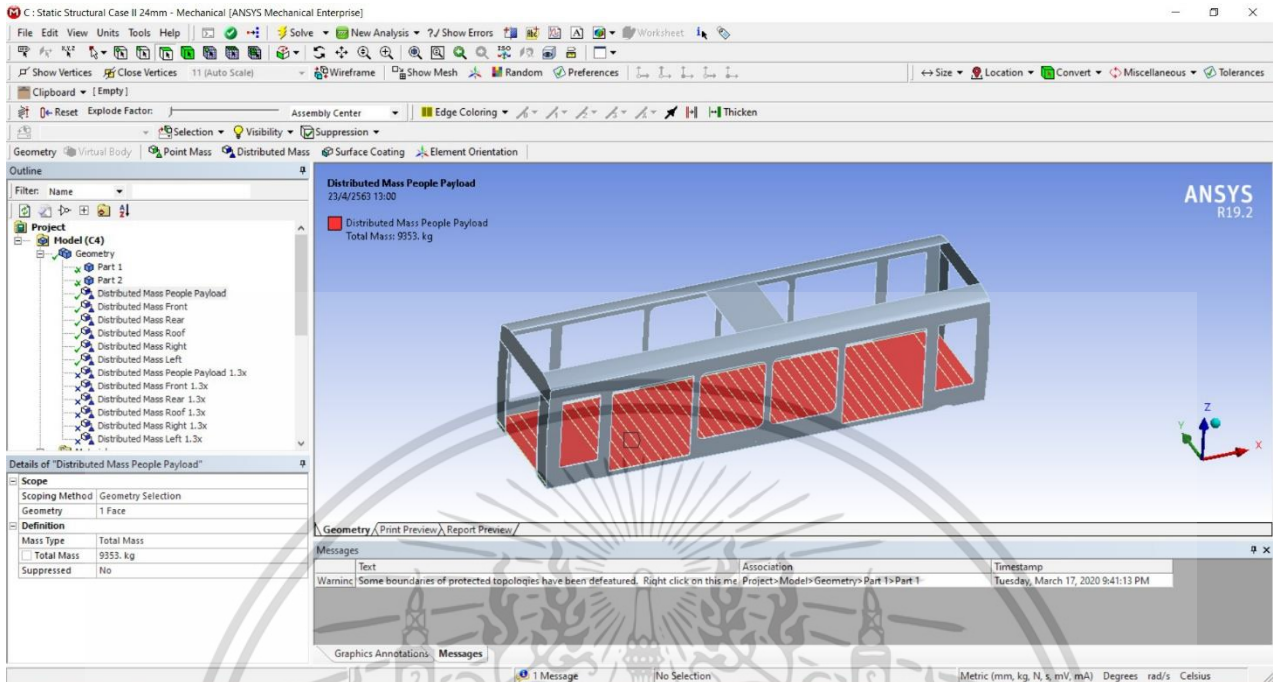
3.5.9 เลือกพื้นที่ที่จะใส่มวลกระจาย กด Apply ในคำสั่ง Mass type เลือก Total mass ใส่ค่ามวลที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.19 จนถึงรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.19 วิธีการตั้งค่าการเพิ่มค่ามวลกระจายที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง

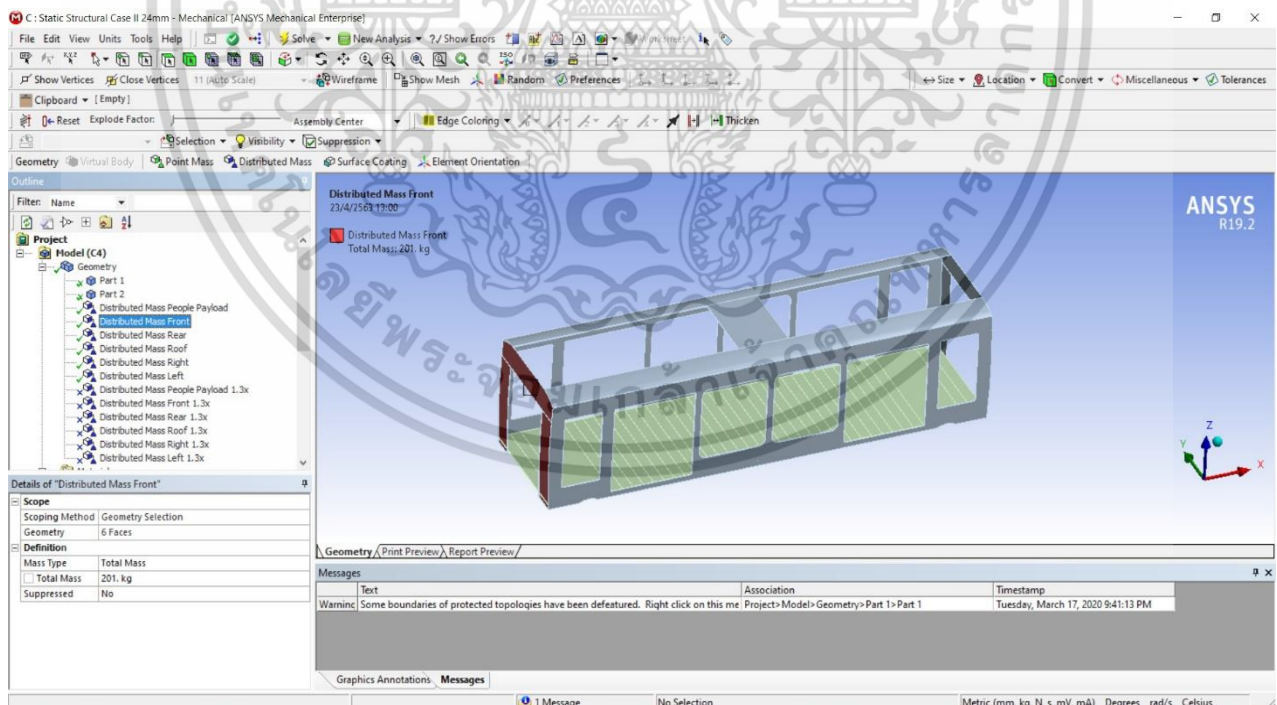
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- People Payload distributed mass = 9,353 kg



รูปที่ 3.20 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักผู้โดยสาร

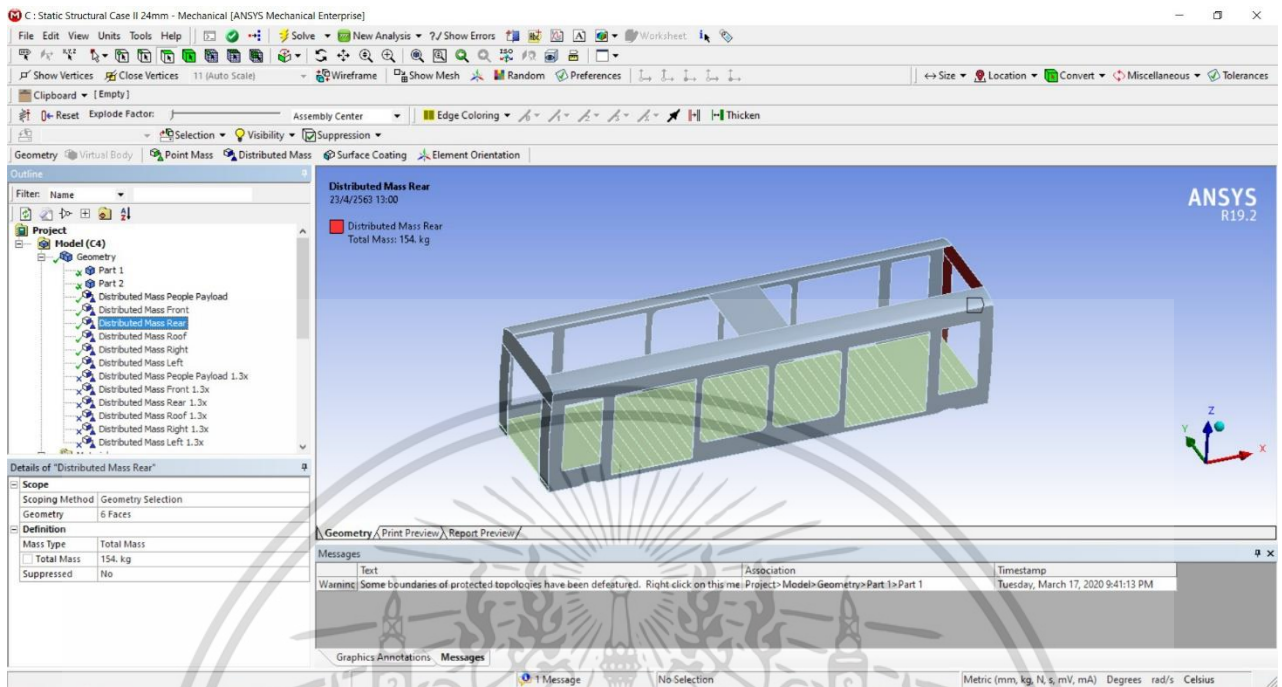
- Front distributed mass = 201 kg



รูปที่ 3.21 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงชิ้นงานด้านหน้า

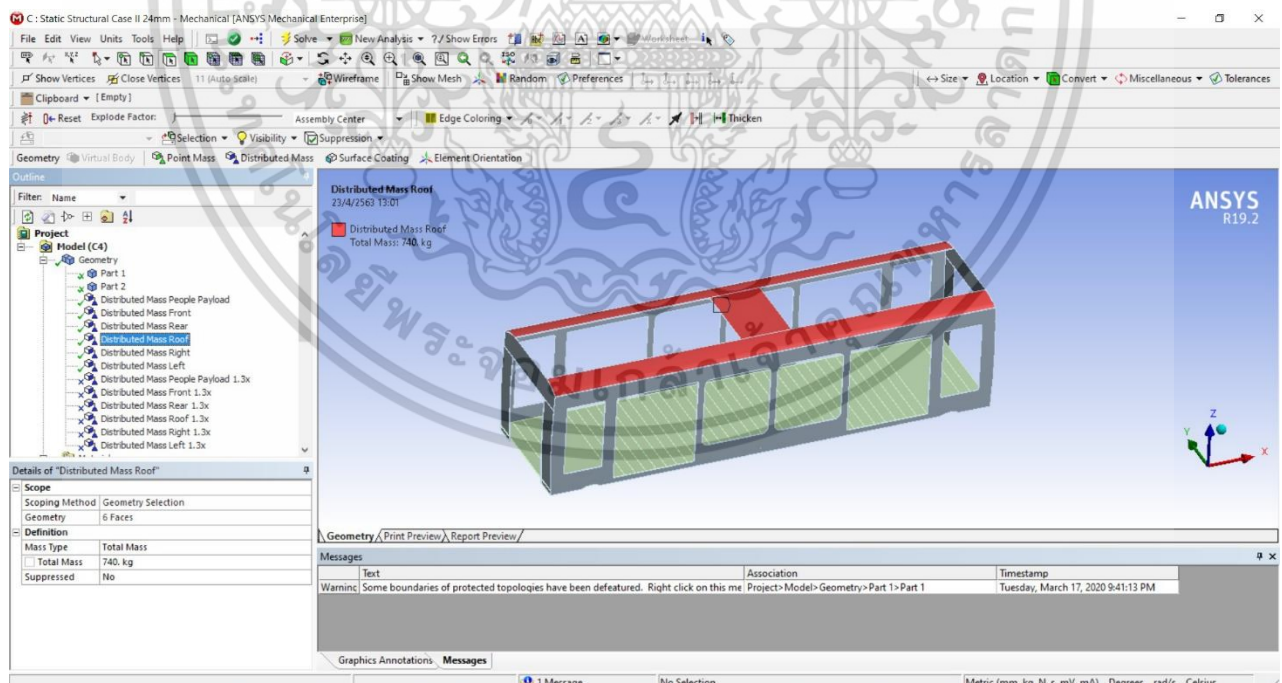
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rear distributed mass = 154 kg



รูปที่ 3.22 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านหลัง

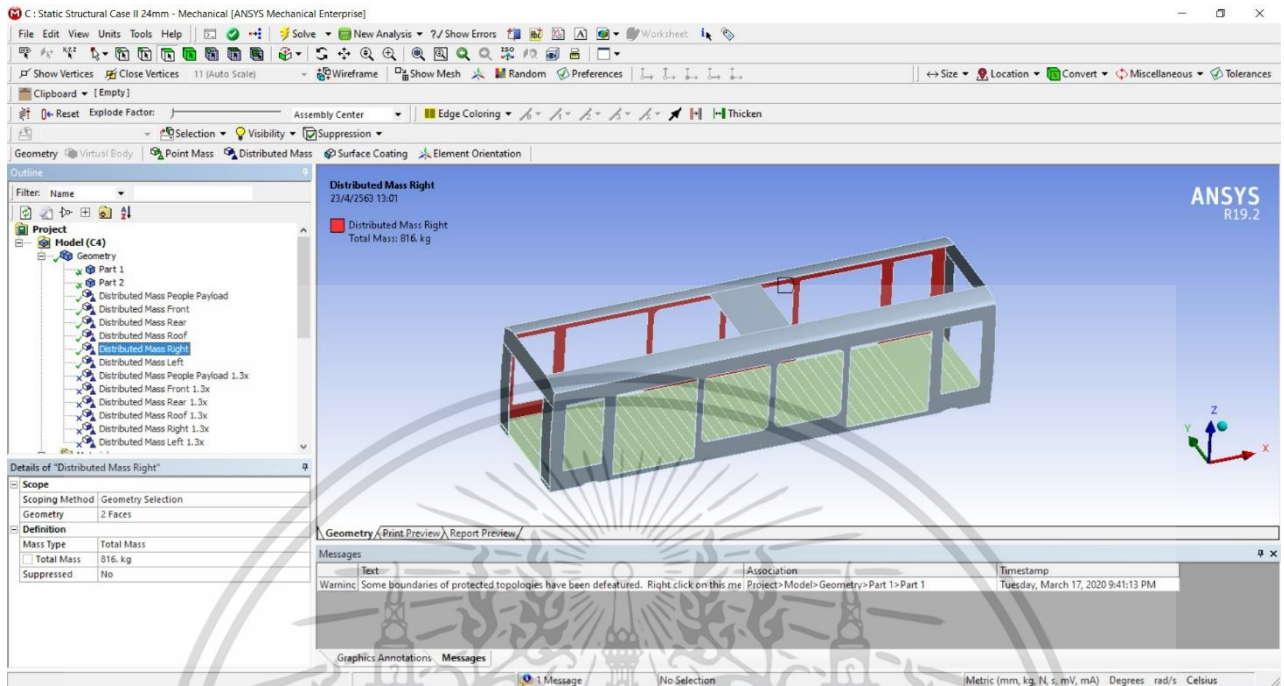
- Roof distributed mass = 740 kg



รูปที่ 3.23 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านบนหลังคา

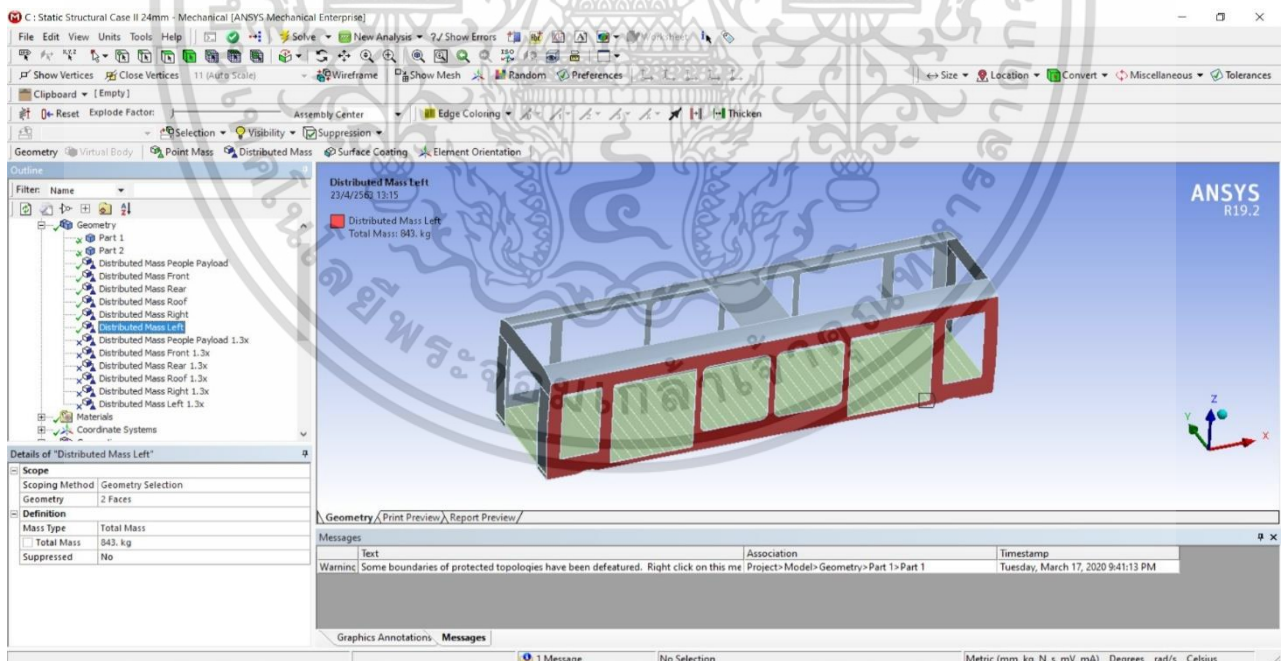
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Right distributed mass = 816 kg



รูปที่ 3.24 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านขวา

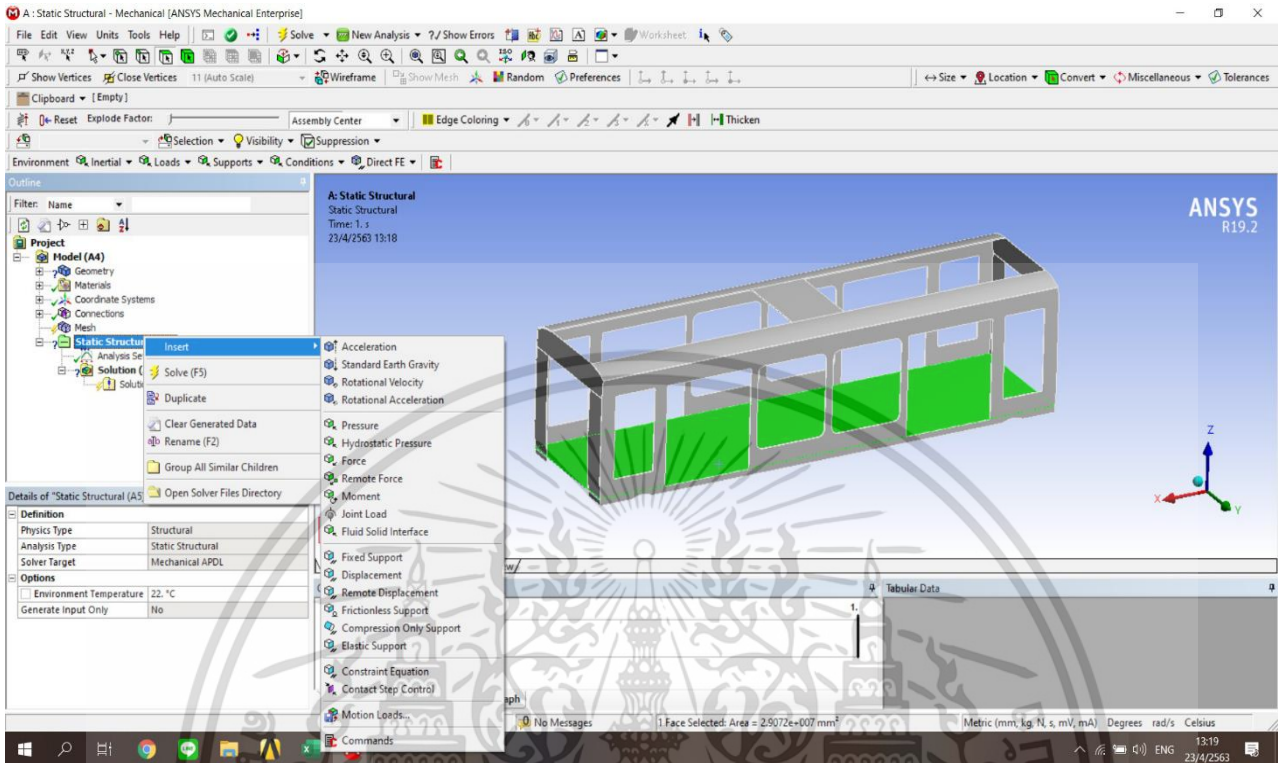
- Left distributed mass = 843 kg



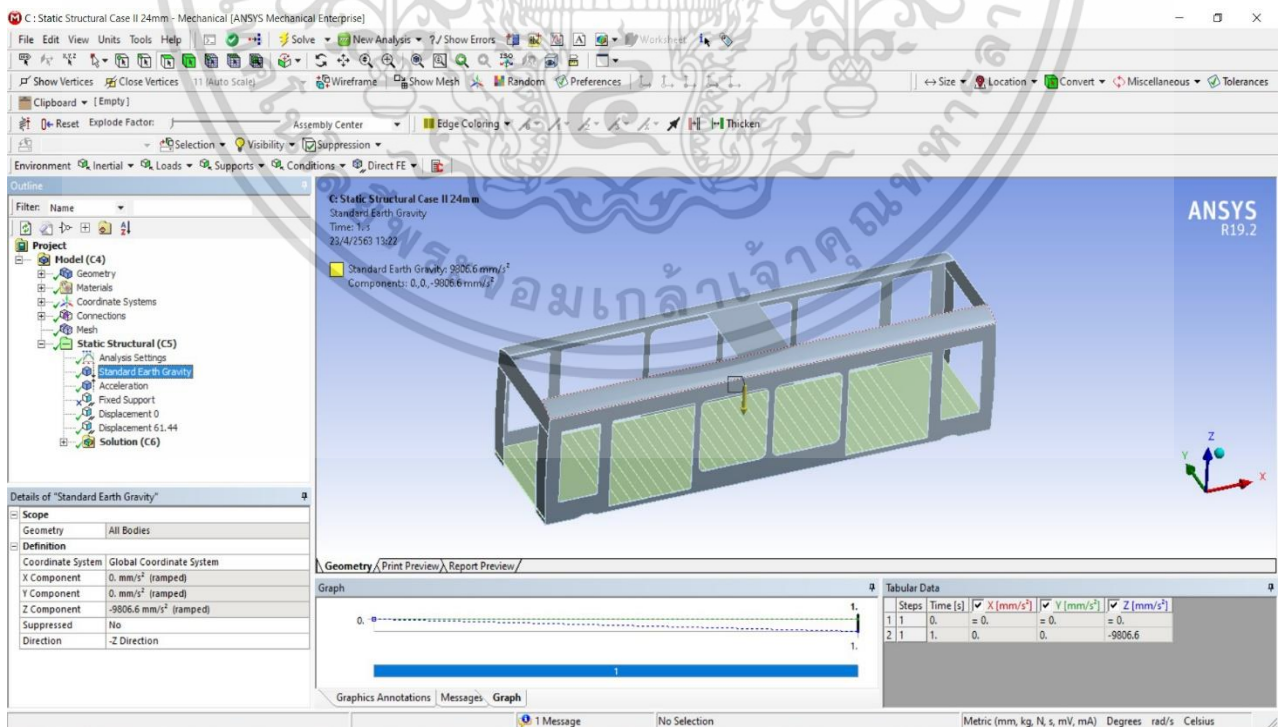
รูปที่ 3.25 บริเวณที่รับผลจากมวลกระจายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ถ่วงขึ้นงานด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.10 ทำการเพิ่ม Boundary Condition โดยคลิกขวาที่ Static structural > Insert แล้วค่าที่ต้องการที่จะเพิ่ม ดังรูป 3.26



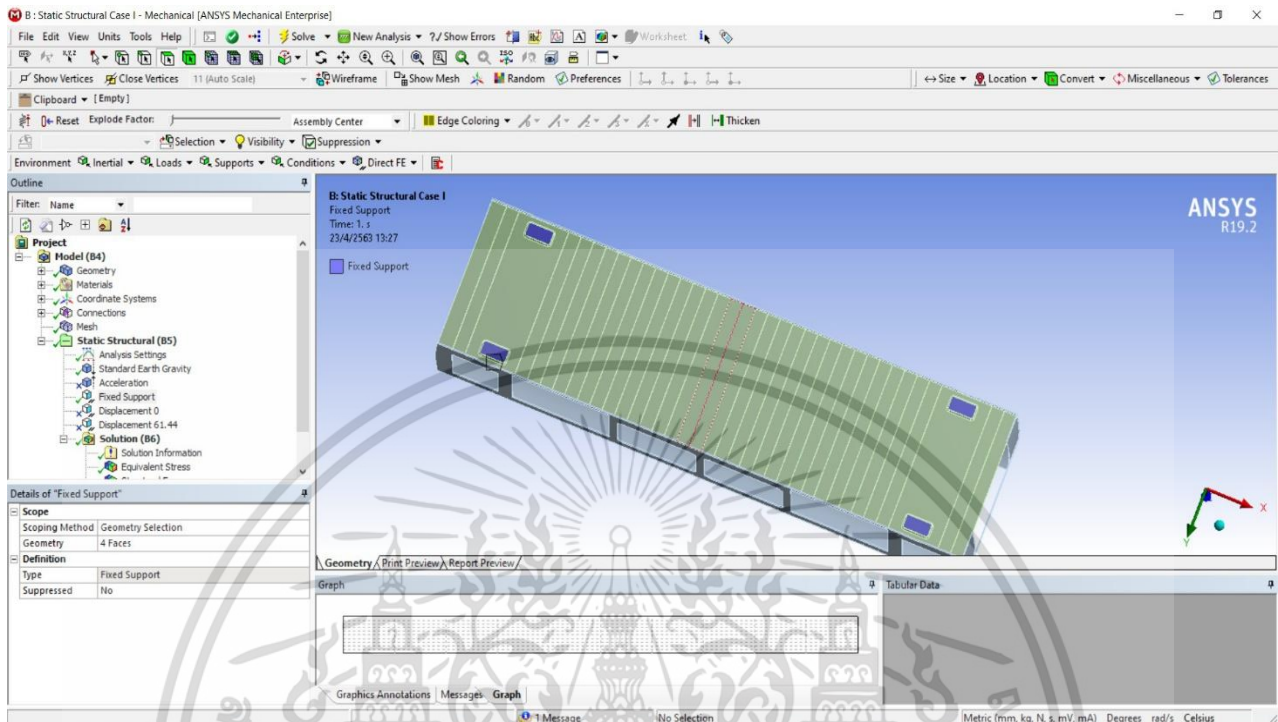
รูปที่ 3.26 วิธีการตั้งค่าการเพิ่ม Boundary Condition ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง - Standard Earth Gravity



รูปที่ 3.27 ขนาดและทิศทางของ Standard Earth Gravity ที่กระทำต่อแบบจำลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ กรณีที่ 1 ภาระการให้บริการสูงสุด มี Boundary Condition ดังนี้

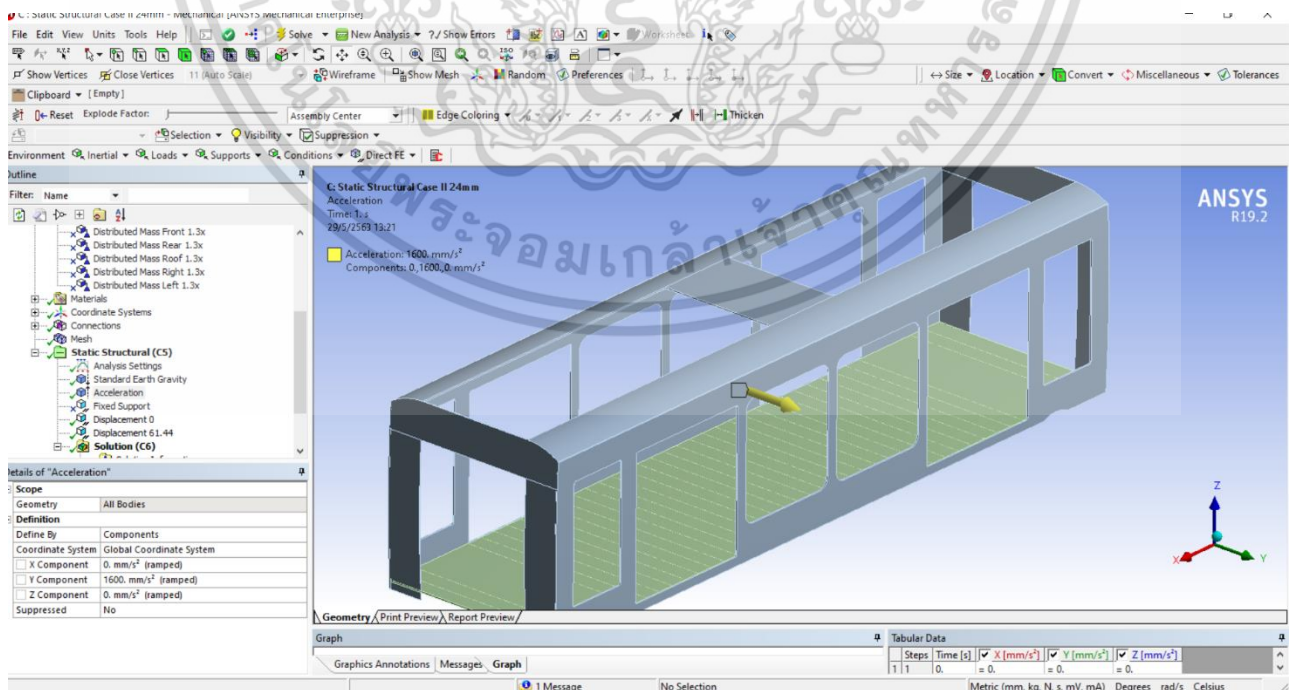
- Fixed Support 4 จุด



รูปที่ 3.28 บริเวณที่เลือกสำหรับ Fixed Support ทั้ง 4 จุด

สำหรับ กรณีที่ 2 การเคลื่อนที่ในทางโค้ง มี Boundary condition ดังนี้

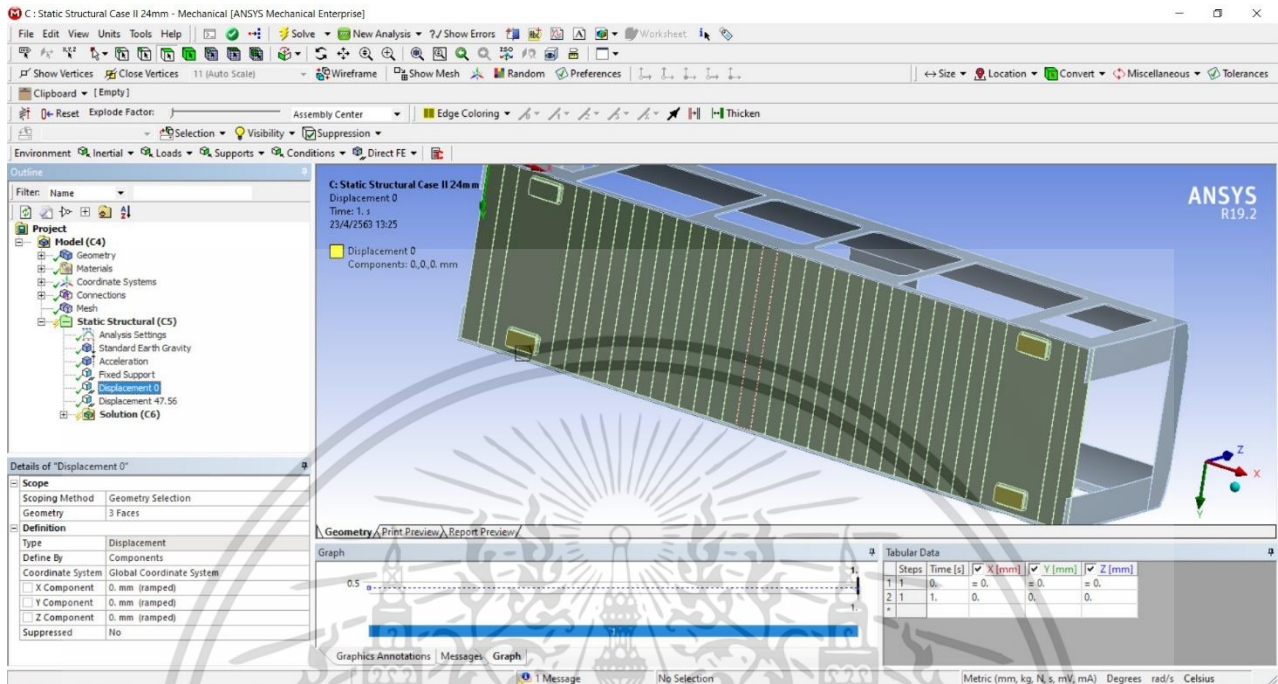
- ค่าความเร่งหนีศูนย์กลาง = $(0, 1.6, 0) \text{ m/s}^2$



รูปที่ 3.29 ขนาดและทิศทางของค่าความเร่งหนีศูนย์กลาง ที่กระทำต่อแบบจำลอง

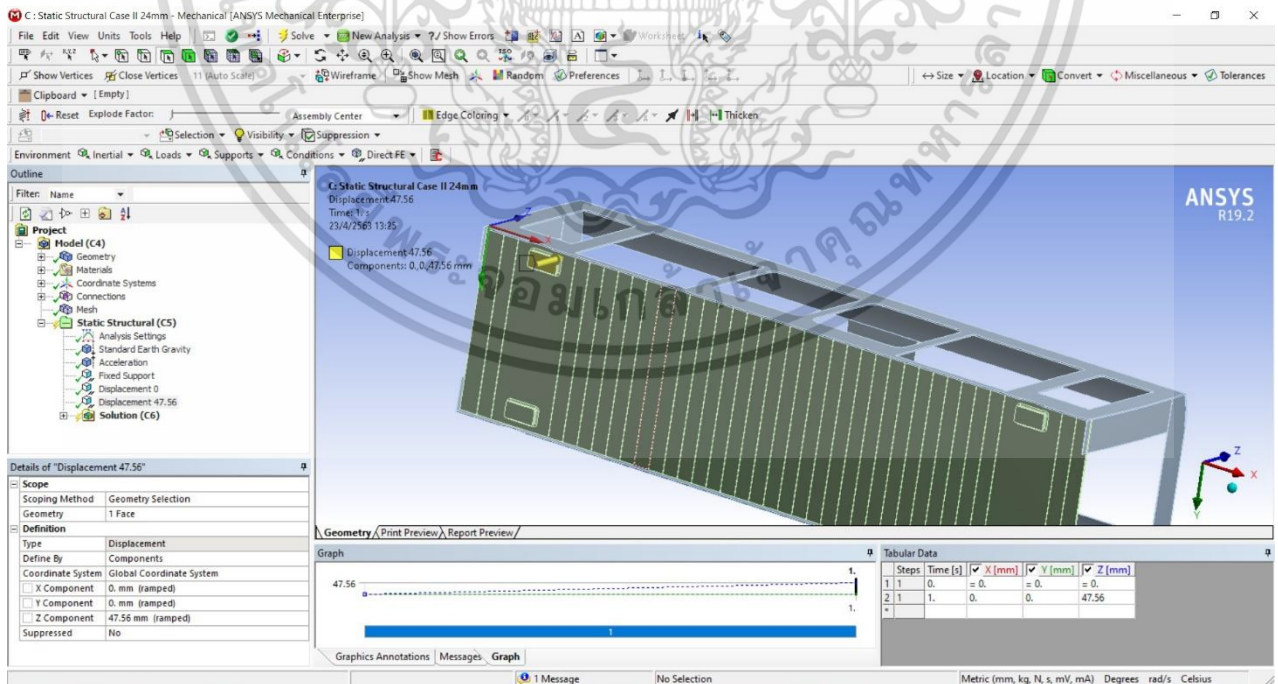
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะเวลาเคลื่อนที่สำหรับจุดรองรับที่ไม่มีการเคลื่อนที่ มีค่าเท่ากับ (0, 0, 0) mm. ทั้ง 3 จุด ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 บริเวณที่เลือกสำหรับจุดรองรับที่ไม่มีการเคลื่อนที่ทั้ง 3 จุด

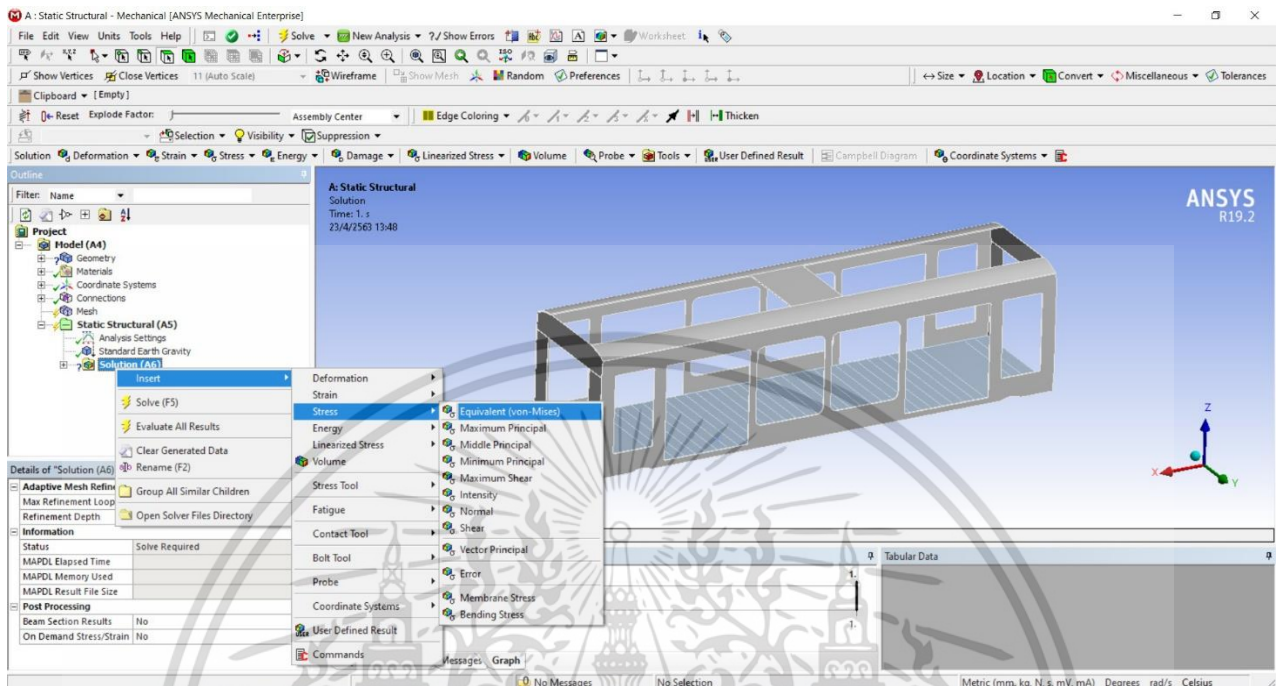
- ระยะเวลาเคลื่อนที่สำหรับจุดรองรับที่ถูกเคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากการเข้าโค้ง มีค่าเท่ากับ (0, 0, 47.56) mm. ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 บริเวณที่เลือกสำหรับจุดรองรับที่ถูกเคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากการเข้าโค้ง

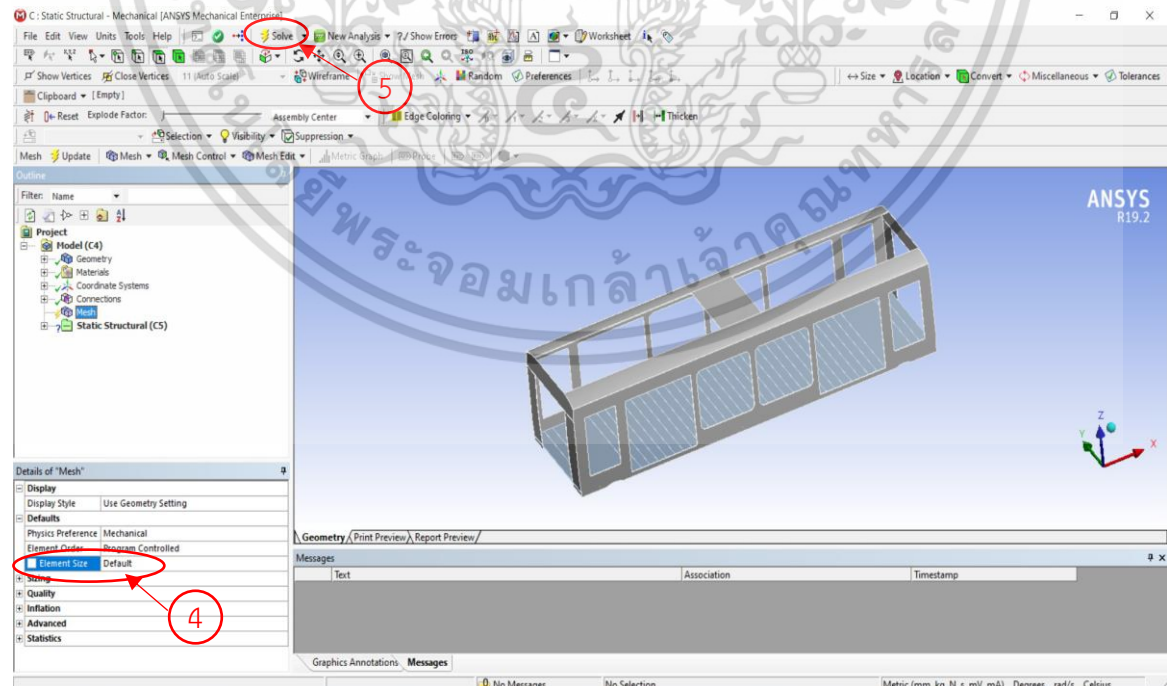
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.11 ทำการเพิ่มผลลัพธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยคลิกขวาที่ Simulation > Insert > Stress > Equivalent (von-Mises) ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 วิธีการเพิ่มผลลัพธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่ได้จากการ Simulation

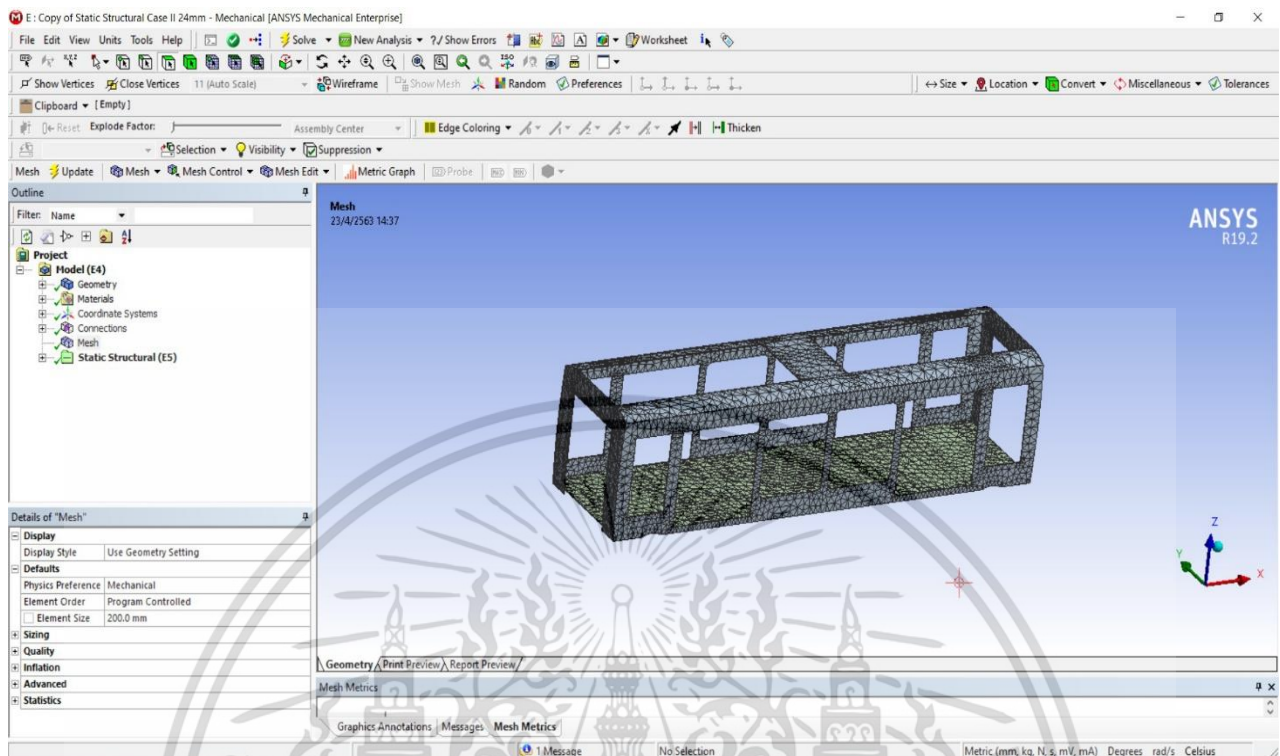
3.5.12 ทำการ Meshing ขึ้นงาน โดยคลิกที่คำสั่ง Mesh ซึ่งในช่องขนาดของ Element Size พิมพ์ขนาดที่ต้องการ (หมายเลข 4) หลังจากนั้นกดที่คำสั่ง Solve (หมายเลข 5) ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 วิธีการ Meshing ขึ้นงาน

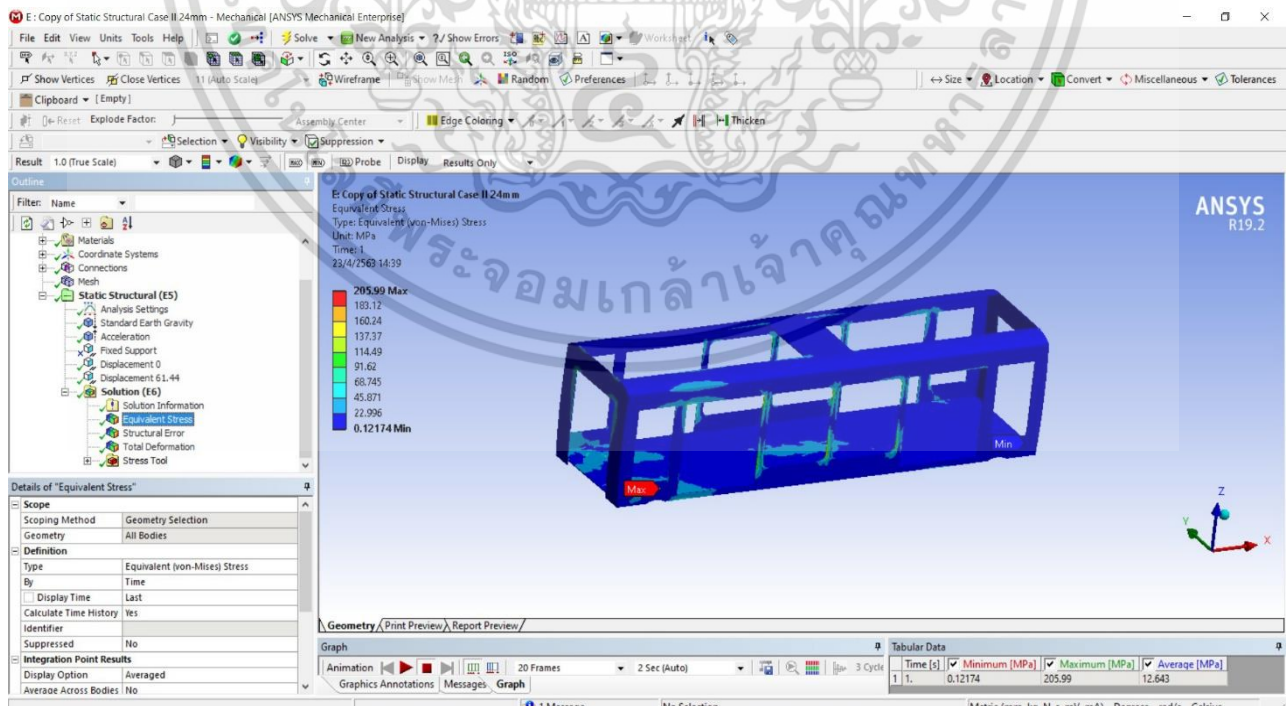
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลลัพธ์ของการ Meshing ด้วยขนาด Element Size 200 mm.



รูปที่ 3.34 ผลลัพธ์ของการ Meshing ด้วยขนาด Element Size 200 mm.

3.5.13 ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการ Simulation โดยการเลือก Equivalent Stress ในคำสั่ง Solution ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจากการ Simulation ด้วยขนาด Element size 200 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.14 ทำการลดค่าขนาดของเอลิเมนต์ที่ทำในข้อ 3.5.12 ให้เล็กลง และพิจารณาค่าค่าความเค้น ณ จุดที่สนใจที่เกิดขึ้นว่ามีพฤติกรรมการลู่เข้าหรือไม่ ด้วยการลดขนาดเอลิเมนต์ลงไปเรื่อย ๆ ถ้าหากเกิดพฤติกรรมการลู่เข้าของค่าความเค้น ณ จุดที่สนใจ จะนำค่าที่เกิดขึ้นไปใช้ในการอ้างอิงผลลัพธ์ของการ Simulation

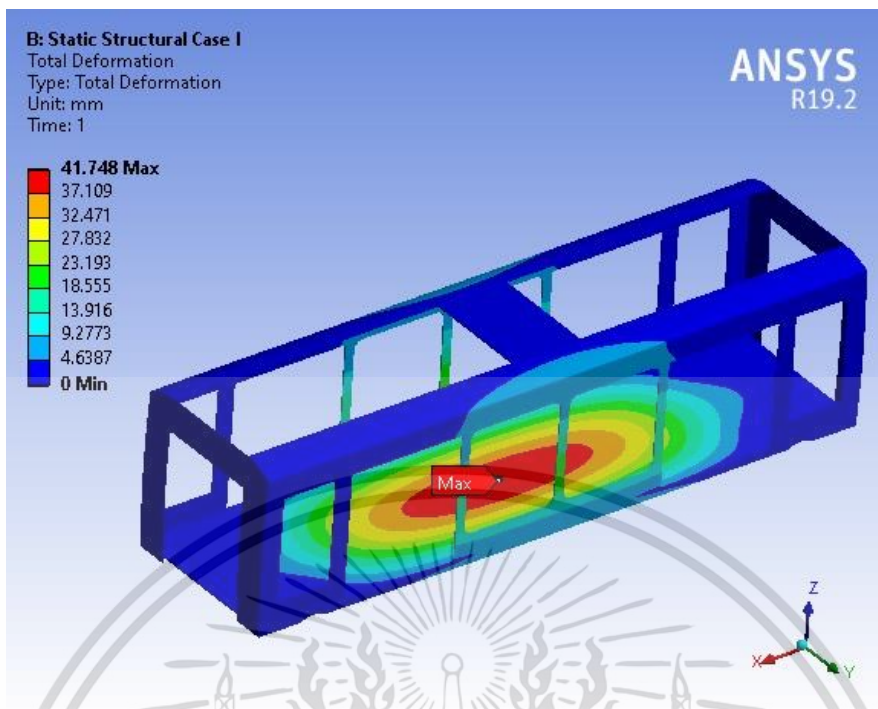
3.6 การออกแบบการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลอง

หากต้องการทราบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด จะต้องมีการทำการทดสอบจริงบนชิ้นงาน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น แต่ถ้าเราทดสอบบนชิ้นงานจริงนั้น ในกรณีที่เกิดขึ้นจริง เกิดขึ้นนั้นจะต้องมีการสร้างแบบจำลองในขนาดที่ย่อส่วนลงมาตามอัตราส่วนจากขนาดของจริง เพื่อให้เหมาะสมในการทำการทดสอบ ซึ่งในโรงงานฉบับนี้จะมีการสร้างแบบจำลอง 3D Printing ด้วยอัตราส่วน 1:20 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการออกแบบการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลองเท่านั้น

ในการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลองนั้น จะต้องทำการหนดภาระและเงื่อนไขขอบต่าง ๆ ที่กระทำกับตัวแบบจำลองให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในโรงงานเล่มนี้ จะเลือกพิจารณาเพียงแค่เงื่อนไขภาระการให้บริการสูงสุด เนื่องจากในเงื่อนไขนี้มีภาระที่เกิดจากน้ำหนักของผู้โดยสารเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทำให้ง่ายในการนำวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์นั้น จะเลือกใช้เกจวัดความเครียด เพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของแบบจำลองเมื่อมีการให้บริการกับชิ้นงาน แล้วนำค่าความเครียดที่วัดได้มาทำการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจำลอง หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.6.1 แนวทางในการติดตั้งเกจวัดความเครียดและการวัดหาค่าความเค้น

ในการติดตั้งเกจวัดความเครียดบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบนั้น สามารถพิจารณาหาจุดติดตั้งได้โดยการสังเกตพฤติกรรมการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจุดที่เหมาะสมในการติดตั้งนั้นจะต้องมีลักษณะของพื้นผิวที่ง่ายต่อการติดตั้งเกจวัดและมีพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นวัสดุที่เห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อทำการออกแบบชิ้นงานจริง แล้วนำมาทำการทดสอบ ไม่จำเป็นต้องทำการใส่ภาระให้กับชิ้นงานเพื่อให้เกิดการเสียรูปในทุกชิ้นส่วน ทำให้เกิดความสะดวกในการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งพฤติกรรมการเสียรูปของแบบจำลองโครงสร้างตัวรถตามเงื่อนไขการให้บริการสูงสุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นไปตามรูปที่ 3.36

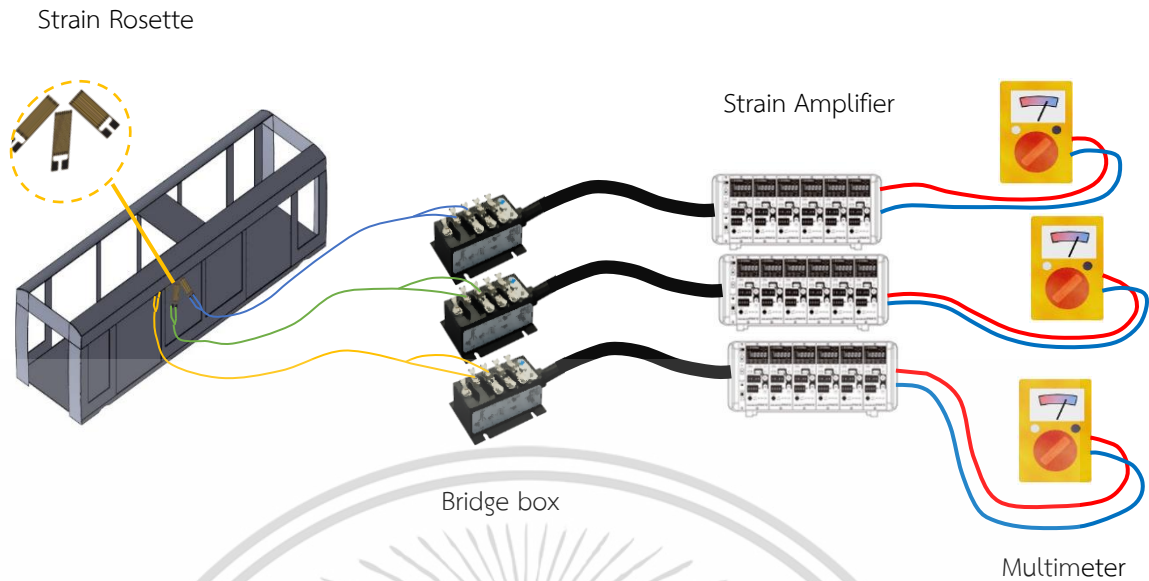


รูปที่ 3.36 แสดงตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปมากที่สุด

จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของตัวรถจะเกิดพฤติกรรมการเสียรูปมากที่สุด บริเวณชิ้นส่วนที่พื้นของตัวรถ ซึ่งมีพื้นผิวที่เรียบ เหมาะกับการติดตั้งเกจวัดความเครียด

เมื่อทราบพื้นที่ในการติดตั้งเกจวัดความเครียดแล้ว การหาความเครียดภายในวัตถุนั้นสามารถทำได้โดยการกำหนดให้พื้นของโครงสร้างของตัวรถเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ๆ จากทฤษฎีความเค้นในระบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งในกรณีเงื่อนไขภาระการให้บริการสูงสุด นั้นจะมีภาระที่เกิดจากน้ำหนักของผู้โดยสารและสัมภาระมากระทำกับโครงสร้างของตัวรถในแนวแกน Z หรือแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แต่เราจะพิจารณาให้มีเพียงความเค้นระนาบเท่านั้น เนื่องจากเอลิเมนต์ของตัววัสดุพื้น จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียด เนื่องจากความเค้นในแนวแกน X ,Y และความเค้นเฉือนในระนาบ XY ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ในการติดตั้งเกจวัดความเครียดบนพื้นของโครงสร้างตัวรถนั้น จะต้องทำการติดตั้งเพื่อให้วัดค่าได้ทั้ง 3 แนวแกน ซึ่งจะเรียกว่าการวางเกจวัดความเครียดแบบโรเซต ดังแสดงในรูปที่ 2.10 แล้วต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.37



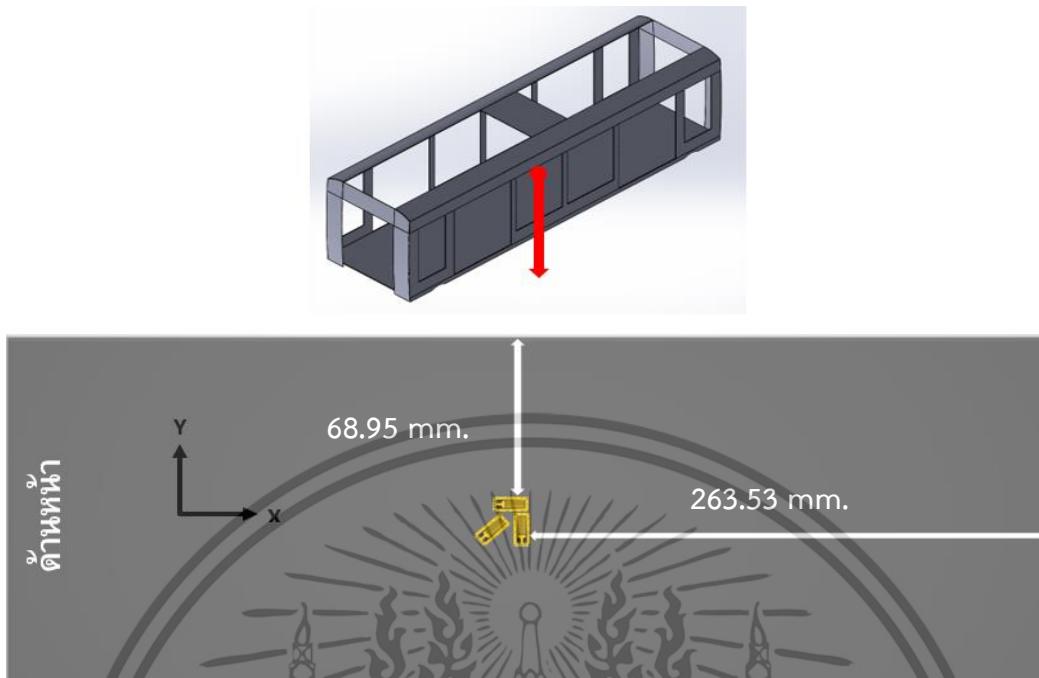
รูปที่ 3.37 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดบนชิ้นงานจำลอง

โดยค่าที่วัดออกมาได้ด้วยเกจวัดความเครียดในแต่ละแนวแกน จะมีค่าเป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาหาค่าความเครียดได้จาก สมการที่ 2.22 แล้วใช้ กฎของฮุค (Hooke's law) ในสมการที่ 2.11 เปลี่ยนค่าความเครียดที่ได้ให้เป็นความเค้นในแต่ละแนวแกน หลังจากนั้นทำการรวมค่าความเค้นที่ได้ด้วย ทฤษฎีของ von Mises ตามสมการที่ 2.15

3.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งแบบจำลองของโครงสร้างของตัวรถและทำการใส่ภาระและเงื่อนไขขอบให้สอดคล้องตามเงื่อนไขการให้บริการสูงสุด
2. ติดตั้งเกจวัดความเครียด 3 ตัว ที่ผ่านการสอบเทียบเรียบร้อยแล้ว ลงบนพื้นของตัวแบบจำลองโครงสร้าง ณ ตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 3.38 โดยจัดให้เกจวัดความเครียดให้อยู่ในรูปแบบโรเซต ดังนี้
 - เกจวัดความเครียดทำมุม 0 องศา กับแกน X
 - เกจวัดความเครียดทำมุม 45 องศา กับแกน X
 - ตัวเกจวัดความเครียดทำมุม 90 กับองศา แกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 แสดงตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauges) บนชิ้นงานจำลอง

3. เชื่อมต่อเกจวัดความเครียดทั้ง 3 ตัว เข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
4. นำค่าที่วัดออกมาได้คำนวณหาค่าความเค้นของ von Mises แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.6.3 วิธีการคำนวณค่าความเค้นจากเกจวัดความเครียด

จากการออกแบบการทดสอบ ได้ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดแบบโรเซตสามเอลิเมนต์ ซึ่งการวัดและคำนวณค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถทำได้ดังนี้

1. ทำการต่อเกจวัดความเครียดแต่ละตัวเข้ากับวงจรหวิดสโตนบริจ โดยทำการต่อวงจรเป็นวงจรควอเตอร์บริจ (Quarter-Bridge) ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากการทดสอบสามารถคำนวณเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้ตามสมการ

$$V_o = \frac{1}{4} K_s \cdot \epsilon \cdot V_s \quad (3.3)$$

โดยที่	ΔE	คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบ (V)
	K_s	คือ ค่าเกจแฟคเตอร์
	ϵ	คือ ค่าความเครียดที่ได้จากวงจร
	V_s	คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร (V)

2. ค่าความเครียดที่ได้จากวงจรหวิดสโตนบริจของเกจวัดความเครียดแต่ละตัว สามารถคำนวณหาค่า

ความเครียดในแนวแกน x, y และระนาบ xy ได้จากสมการความสัมพันธ์ของความเครียดที่วัดได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกจวัดความเครียดแบบโรเซต ในการออกแบบการทดสอบในครั้งนี้ ได้ติดตั้งเกจวัดความเครียดทั้งสามตัวให้มีทิศทางทำมุม 0, 45 และ 90 องศา กับแนวแกน x ซึ่งสมการ (2.8) ถึง (2.10) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\varepsilon_A = \varepsilon_x \quad (\text{มุม } 0 \text{ องศา}) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_B = \frac{1}{2} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \gamma_{xy}) \quad (\text{มุม } 45 \text{ องศา}) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_C = \varepsilon_y \quad (\text{มุม } 90 \text{ องศา}) \quad (3.6)$$

3. หลังจากได้ค่าความเครียดในแนวแกน x, y และระนาบ xy แล้ว สามารถคำนวณหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน x, y และระนาบ xy ได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของฮุกในระนาบความเค้น ดังสมการที่ 2.7

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

4. หลังจากได้ค่าความเค้นในแนวแกน x, y และระนาบ xy จากความสัมพันธ์ในระนาบความเค้น สามารถคำนวณหาค่าความเค้นจากหลักเกณฑ์ของ von - Mises ได้ดังสมการต่อไปนี้

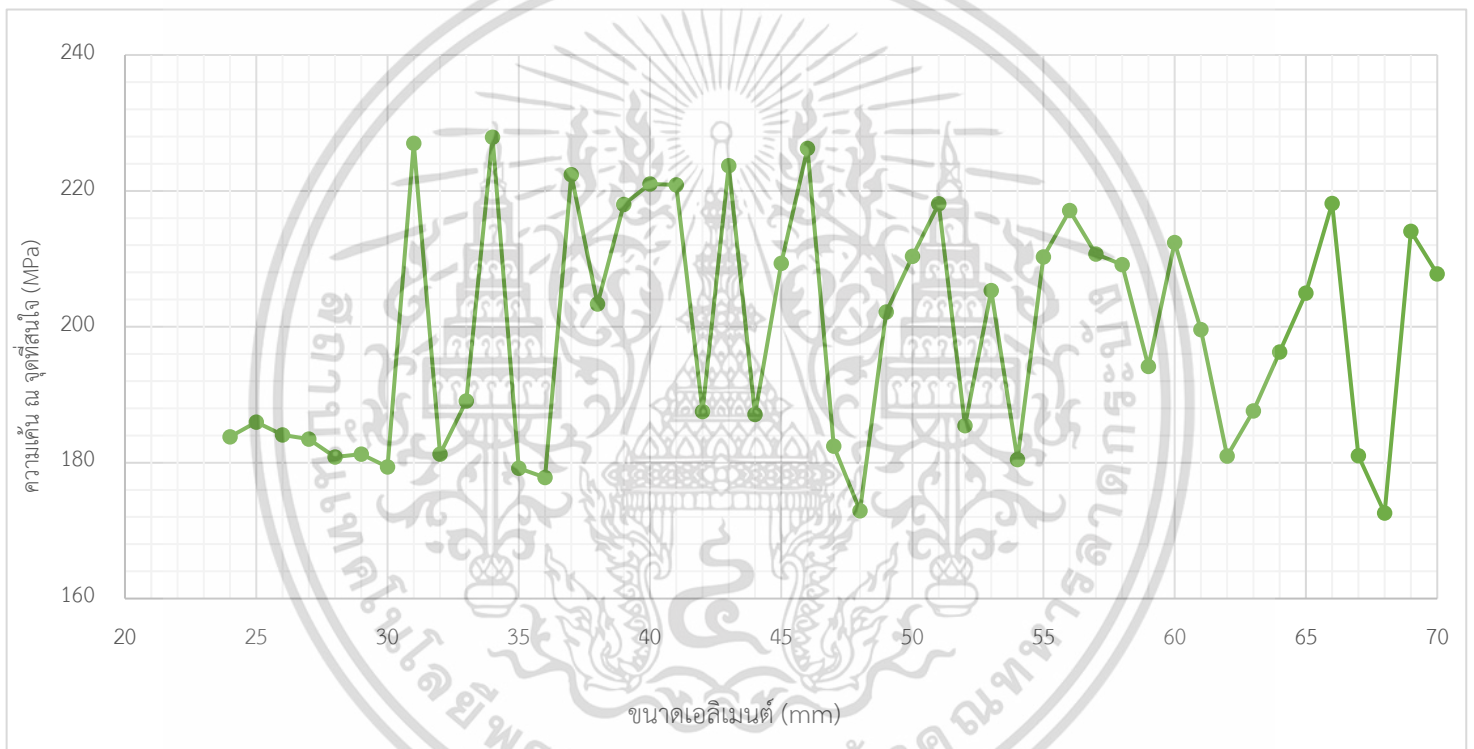
$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2) + 3\tau_{xy}^2} \quad (3.7)$$

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

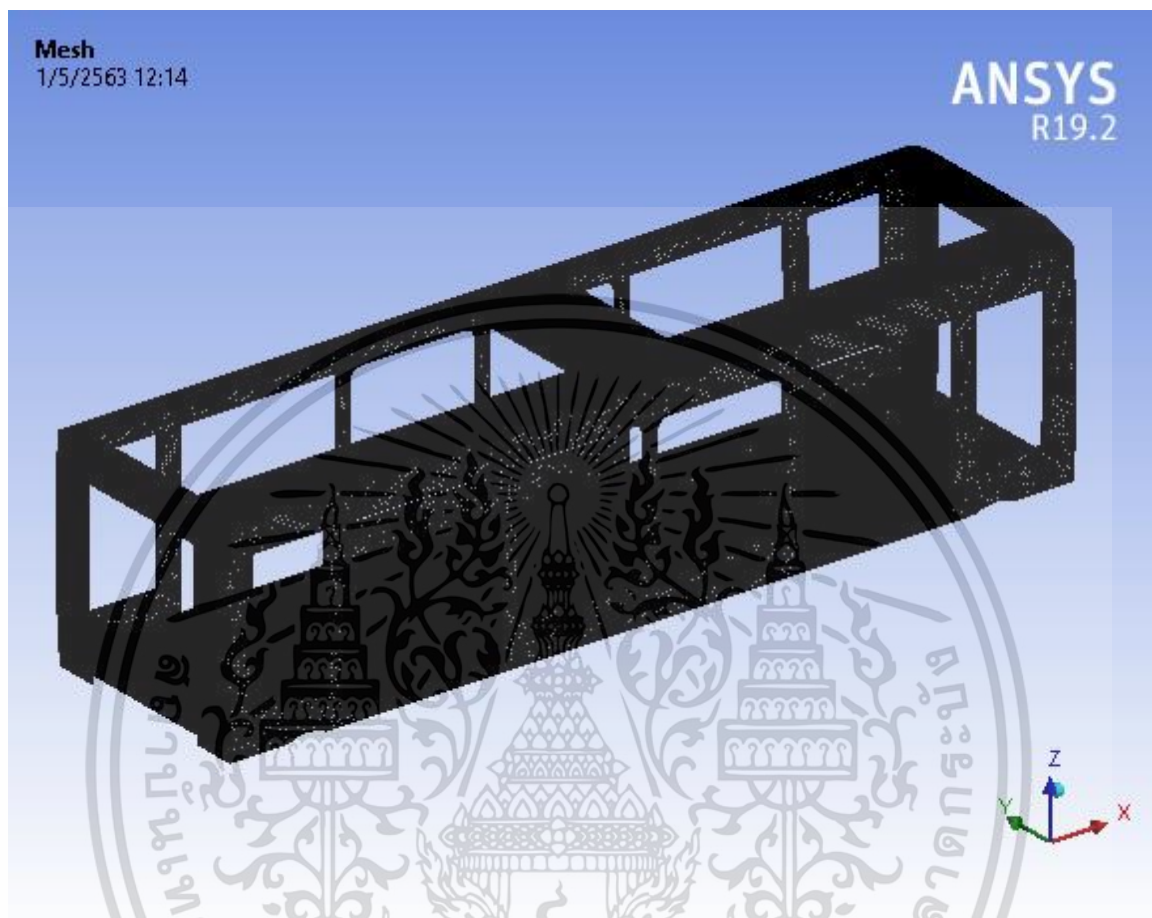
จากการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง ค่าความเค้น ณ จุดที่สนใจ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ในขนาดต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของการวิเคราะห์กรณีที่ 2 การเคลื่อนที่ในทางโค้ง เนื่องจากกรณีที่ 2 เป็นกรณีที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายสูงกว่ากรณีที่ 1 จึงเลือกใช้กรณีที่ 2 เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเลือกขนาดเอลิเมนต์



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้น ณ จุดที่สนใจ กับ ขนาดเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการลดขนาดของเอลิเมนต์ลง จะเห็นว่าในช่วงขนาด 24 - 30 mm. ค่าความเค้นของ von Misses ณ จุดที่สนใจมีพฤติกรรมลู่เข้า จึงเลือกใช้ค่าที่ 24 mm. ทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีจำนวน Node เท่ากับ 940,541 nodes และมีจำนวน Element เท่ากับ 476,216 elements



รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการ Meshing ด้วยขนาด Element size เท่ากับ 24 mm.

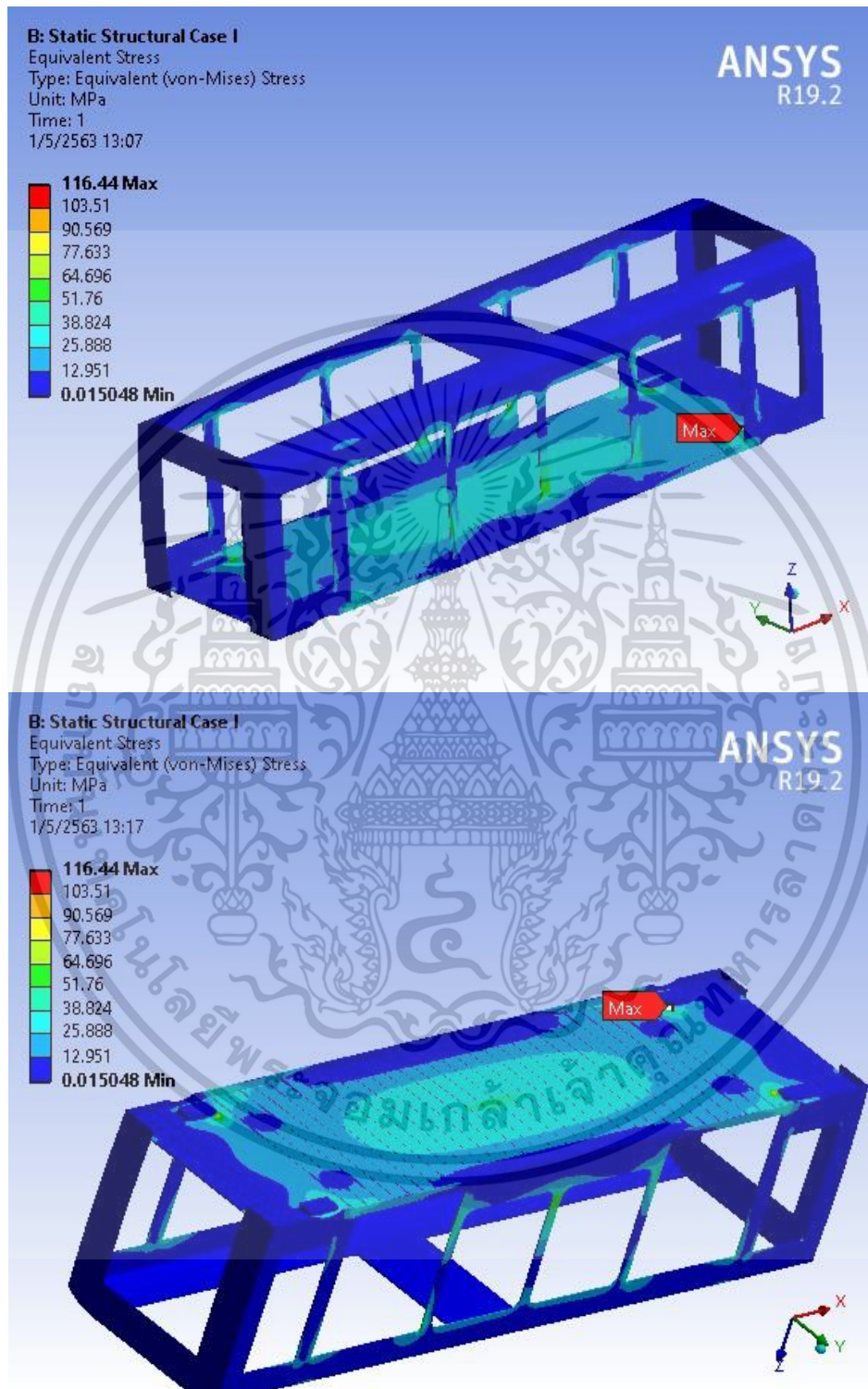
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS จะได้ค่าความเค้นของ von Misses ที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 ภาระการให้บริการสูงสุด จะเกิดค่าความเค้นของ von Mises บนแบบจำลอง ดังรูปที่

4.3

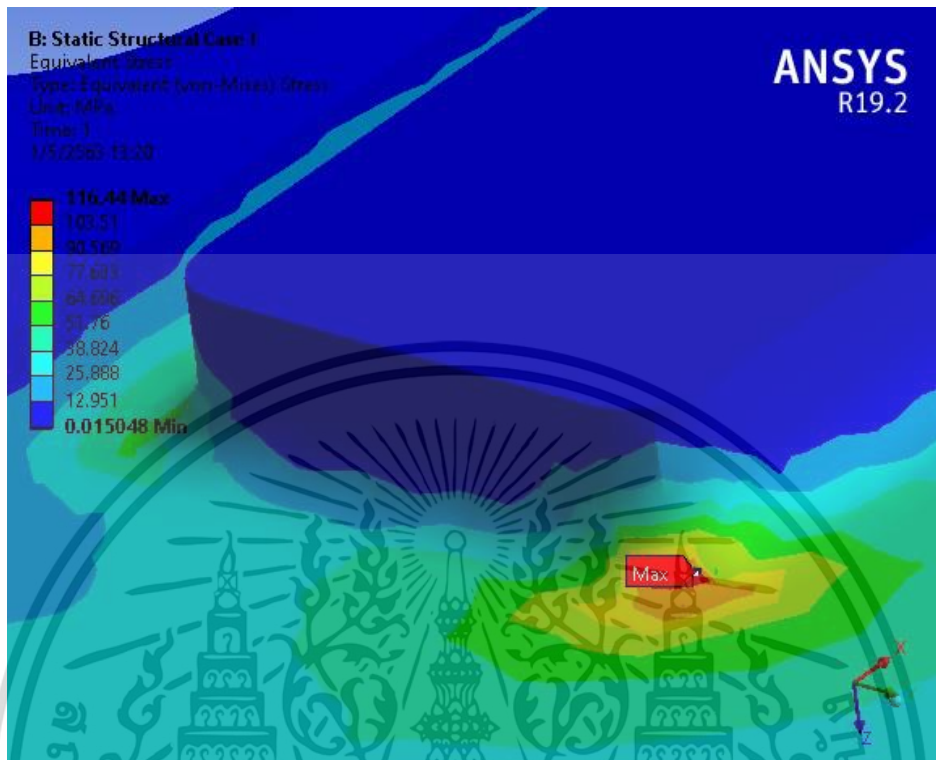


รูปที่ 4.3 ค่าความเค้นของ von Mises ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง จากเงื่อนไขภาระการให้บริการสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 116.44 MPa ซึ่งบริเวณที่เกิดขึ้น ดังรูปที่

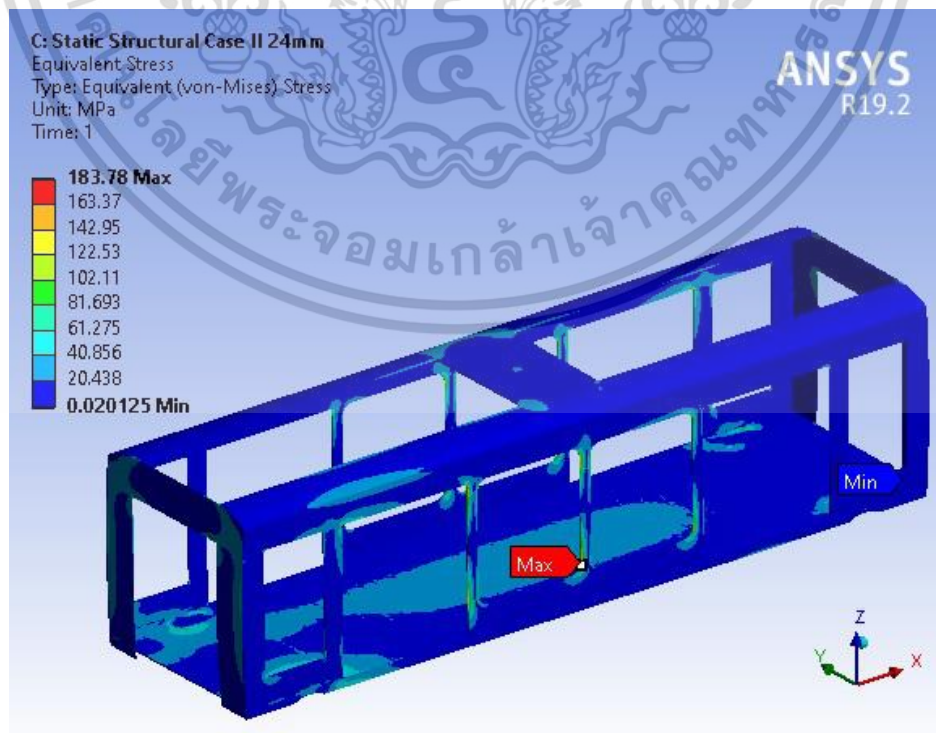
4.4



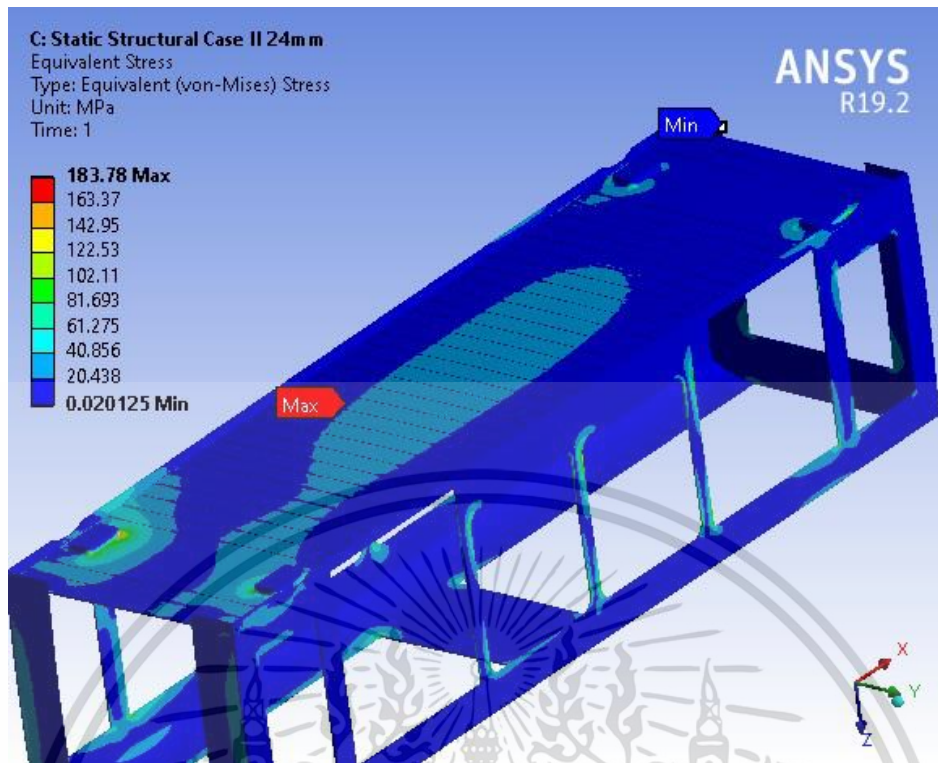
รูปที่ 4.4 ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง จากเงื่อนไขภาระการให้บริการสูงสุด

กรณีที่ 2 การเคลื่อนที่ในทางโค้ง จะเกิดค่าความเค้นของ von Mises บนแบบจำลอง ดังรูปที่

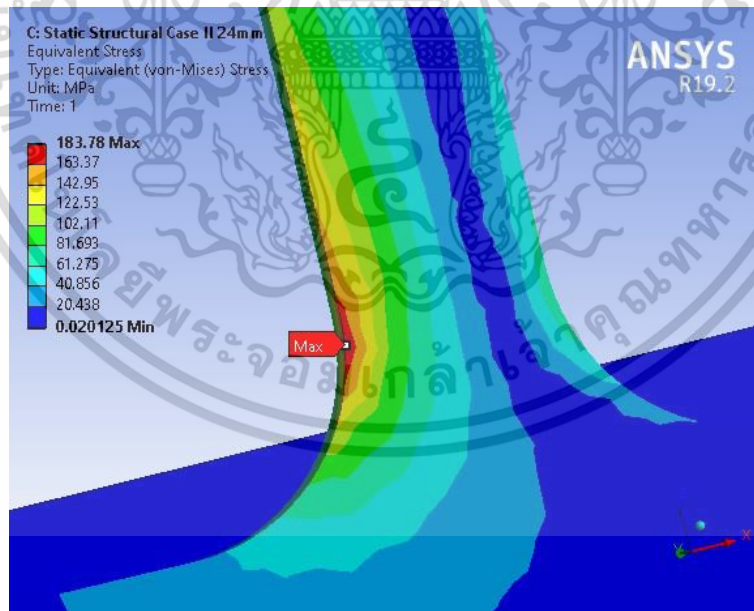
4.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าความเค้นของ von Mises ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง จากเงื่อนไขการเคลื่อนที่ในทางโค้ง ซึ่งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 183.78 MPa บริเวณดังรูป 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองจากเงื่อนไขการเคลื่อนที่ในทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เปรียบเทียบตัวประกอบความปลอดภัยจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับค่ามาตรฐาน

จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ซึ่งจากคุณสมบัติความเค้นของวัสดุของตัวรถที่ใช้สามารถคำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor) ที่เกิดขึ้นได้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี

กรณี	ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น [MPa]	ความเค้นของวัสดุ [MPa]	ตัวประกอบความปลอดภัย
ภาระการให้บริการสูงสุด	116.44	215	1.85
การเคลื่อนที่ในทางโค้ง	183.78	215	1.17

เนื่องจากวัสดุที่ใช้ของตัวรถเป็นวัสดุเหนียวจึงใช้ค่าความเค้นคราก ในการคำนวณตัวประกอบความปลอดภัย จากตารางข้างต้นจะพบว่าตัวประกอบความปลอดภัยที่คำนวณได้นั้นมีค่ามากกว่าตัวประกอบความปลอดภัยที่กำหนดในมาตรฐาน EN12663-1 แสดงว่าแบบจำลองตัวรถที่สร้างขึ้นนั้นมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการให้บริการจริง

4.4 ออกแบบการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลองด้วย

จากการศึกษาแนวทางการทดสอบจริงด้วยชิ้นงานจำลองนั้น สามารถทำโดยการติดตั้งเกจวัดความเครียดแบบโรเซ็ต 1 ชุด บริเวณพื้นผิวตรงกลางของวัสดุชิ้นแผ่นพื้น โดยมีระยะจากขอบด้านขวาของแผ่นพื้นถึงเกจวัดความเครียดสำหรับวัดค่าในแนวแกน X 263.53 mm. และมีระยะจากขอบด้านหลังของแผ่นพื้นถึงเกจวัดความเครียดสำหรับวัดค่าในแนวแกน Y 68.95 mm. เพื่อวัดหาค่าความเครียด หลังจากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแผ่นพื้นพื้น แล้วไปเปรียบเทียบกับความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์โครงสร้างของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างผู้โดยสารระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) และการศึกษาแนวทางการติดตั้งเกจวัดความเครียด เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าความแข็งแรงบนชิ้นงานจริงนั้น สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของแบบจำลองผู้โดยสารด้วยโปรแกรม ANSYS ผลการวิเคราะห์พบว่า กรณีที่ 1 ภาระการให้บริการสูงสุด มีค่าความเค้นสูงสุด 116.44 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อนำมาคำนวณตัวประกอบความปลอดภัยจะมีค่าเท่ากับ 1.85 และกรณีที่ 2 การเคลื่อนที่ในทางโค้ง มีค่าความเค้นสูงสุด 183.78 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อนำมาคำนวณตัวประกอบความปลอดภัยจะมีค่าเท่ากับ 1.17 ซึ่งในการคำนวณตัวประกอบความปลอดภัย จากตารางข้างต้นจะพบว่าตัวประกอบความปลอดภัยที่คำนวณได้นั้นมีค่ามากกว่าตัวประกอบความปลอดภัยที่กำหนดในมาตรฐาน EN12663-1 แสดงว่าแบบจำลองตัวรถที่สร้างขึ้นนั้นมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการให้บริการจริง จากผลการผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบความปลอดภัยของเงื่อนไขการเคลื่อนที่ในทางโค้งนั้นมีค่าน้อยกว่าภาระการให้บริการสูงสุดเนื่องจากโครงสร้างของตัวรถนั้นถูกบิดงอจากการยกโค้งและมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการเคลื่อนที่ในทางโค้งมากกระทำกับโครงสร้างของตัวรถในแนวด้านข้าง
2. ในการทดสอบจริงบนชิ้นงานจำลองนั้น สามารถทำได้โดยการติดตั้งเกจวัดความเครียดแบบโรเซต 1 ชุด บริเวณพื้นผิวตรงกลางของวัสดุชิ้นแผ่นพื้นของแบบจำลอง แล้ววัดค่าออกมาเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ว่าความแข็งแรงของโครงสร้างตัวรถนั้นเป็นไปตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือไม่

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

แบบจำลองที่ใช้ในการทำวิจัยนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย ซึ่งออกแบบให้มีเพียงความคล้ายคลึงกับ APM Airval เพียงเท่านั้น ซึ่งอาจจะมีรายละเอียดของจำนวนชิ้นส่วนและขนาดที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากจำนวนและขนาดของชิ้นส่วนมีข้อมูลไม่เพียงพอ เมื่อทำการ Simulation โดยใช้ Boundary condition ตามที่กำหนดโดยมาตรฐานทำให้ผลลัพธ์ที่คำนวณมาได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปคือ

5.3.1 หากต้องการความต้องการความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ จะต้องมีข้อมูลของแบบจำลองตัวรถที่ใกล้เคียงกับแบบตัวรถของจริงมากที่สุด

5.3.2 สามารถยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ด้วย การสร้างจำลองขึ้นมาทดสอบจริงโดยการใช้ Strain gauge แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Belete Jirru. (2015). **Modeling and Structural Analysis of railway Vehicle body with Finite Element method.**
- [2] S.S.Harak, S.C.Sharma, S.P.Harsha. (2014). **Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method.**
- [3] EN 12663-1(2015-03) : “**Railway applications, Structural requirements of railway vehicle bodies – Part 1 : Locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons)**”
- [4] ปราโมทย์ เตชะอำไพ, เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล. **การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโต๊ะช่างแอนซีเอส.** กรุงเทพมหานคร : Green Life Printing Hou



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

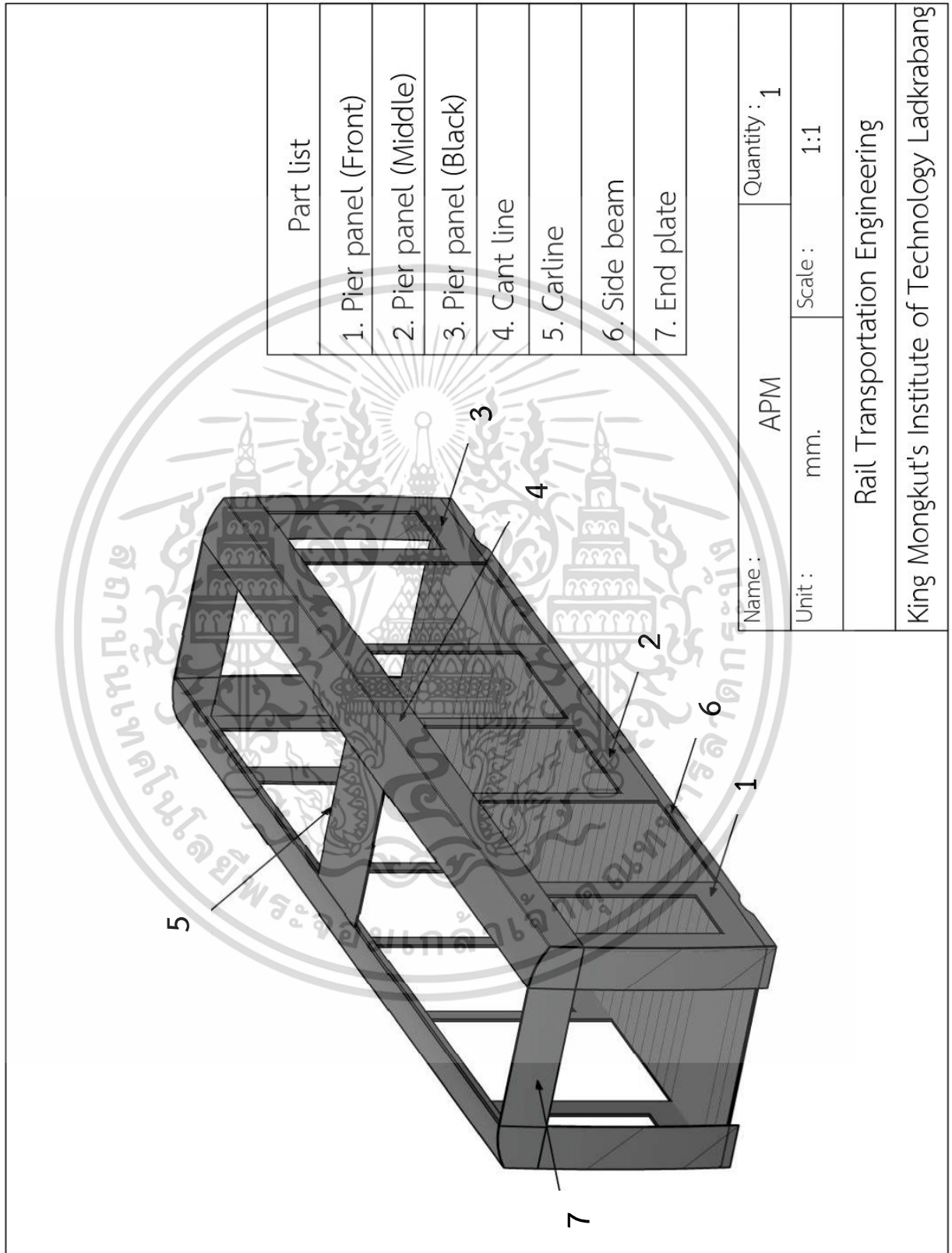


ภาคผนวก

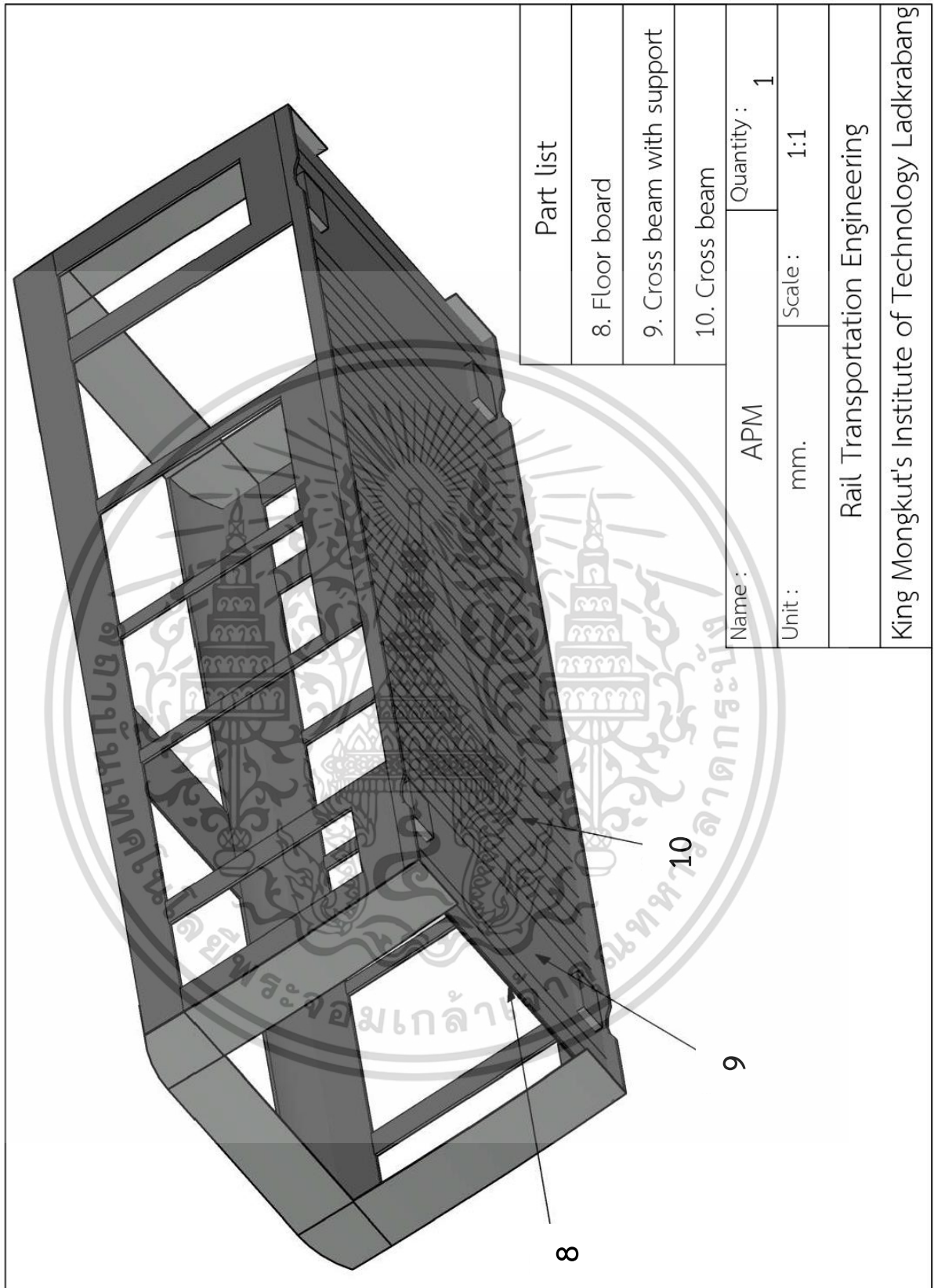
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

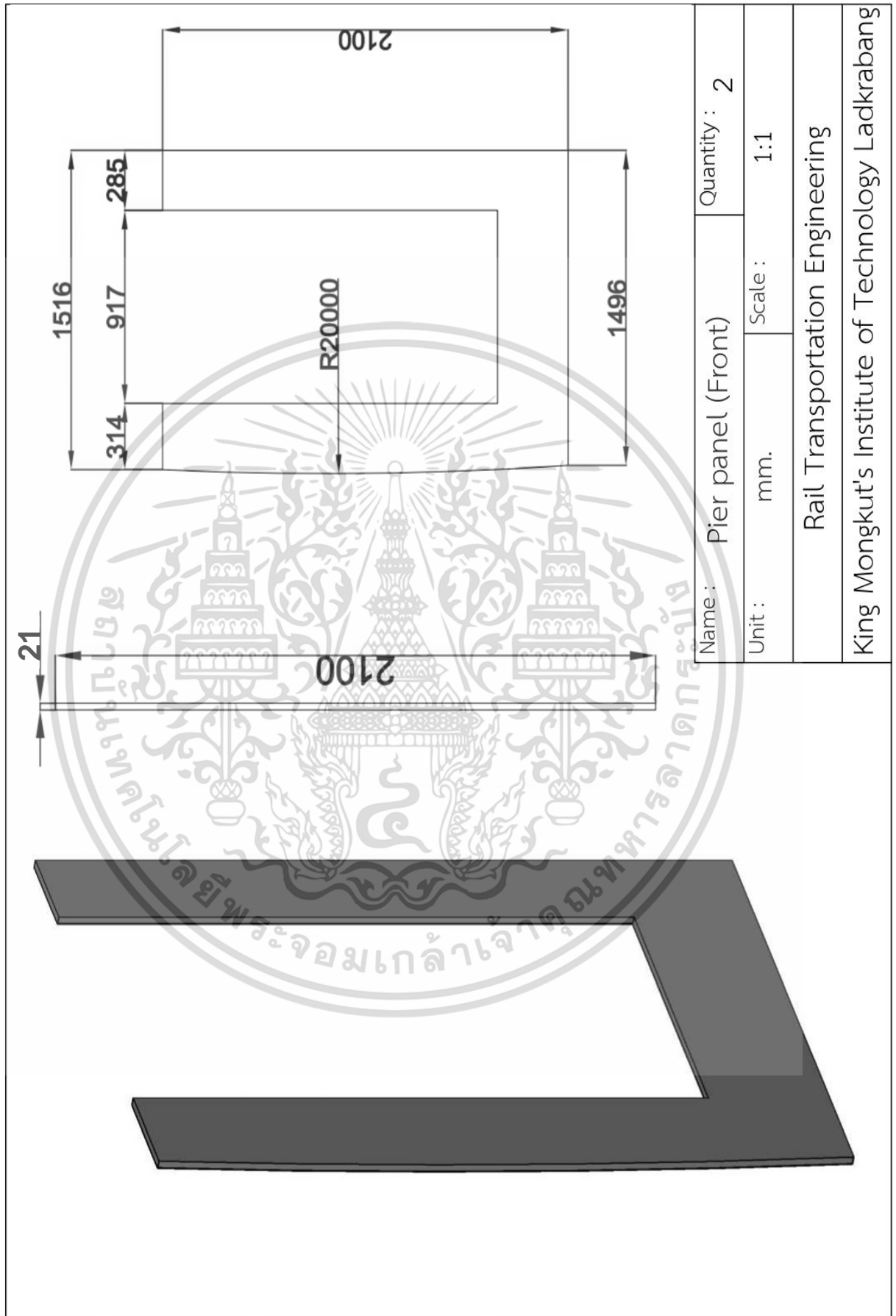
แบบชิ้นส่วนโครงสร้างตัวรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ



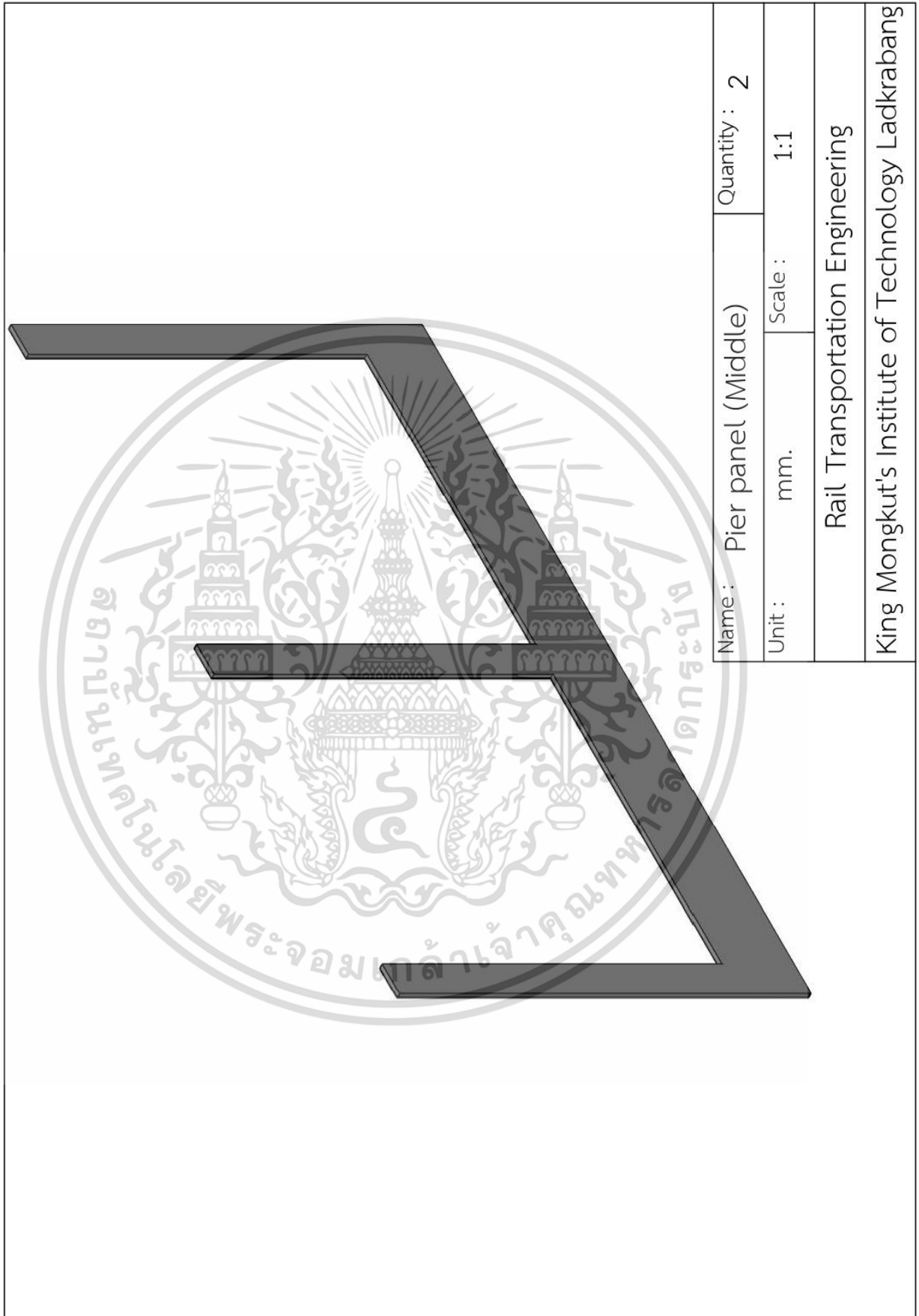
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



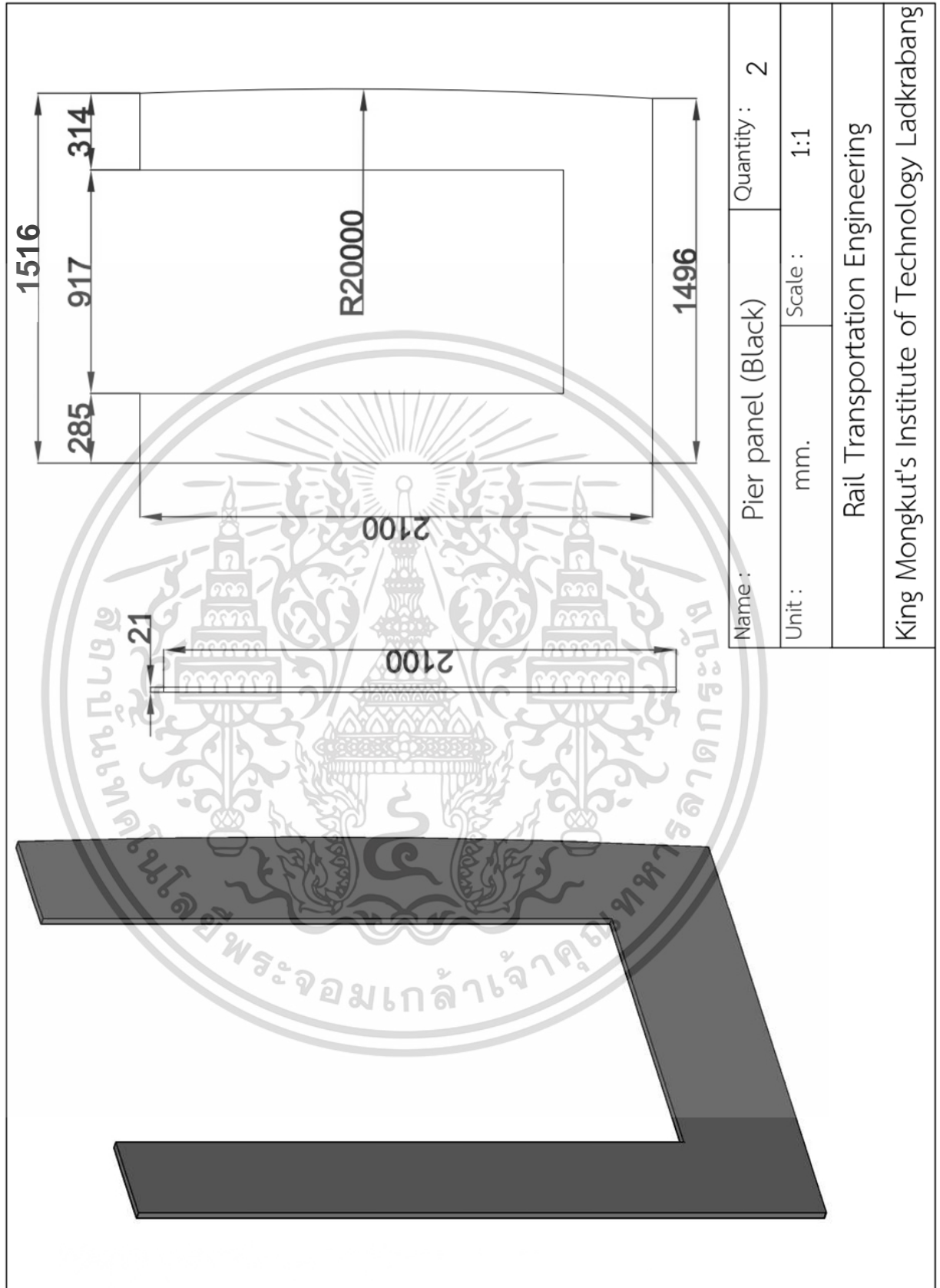
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



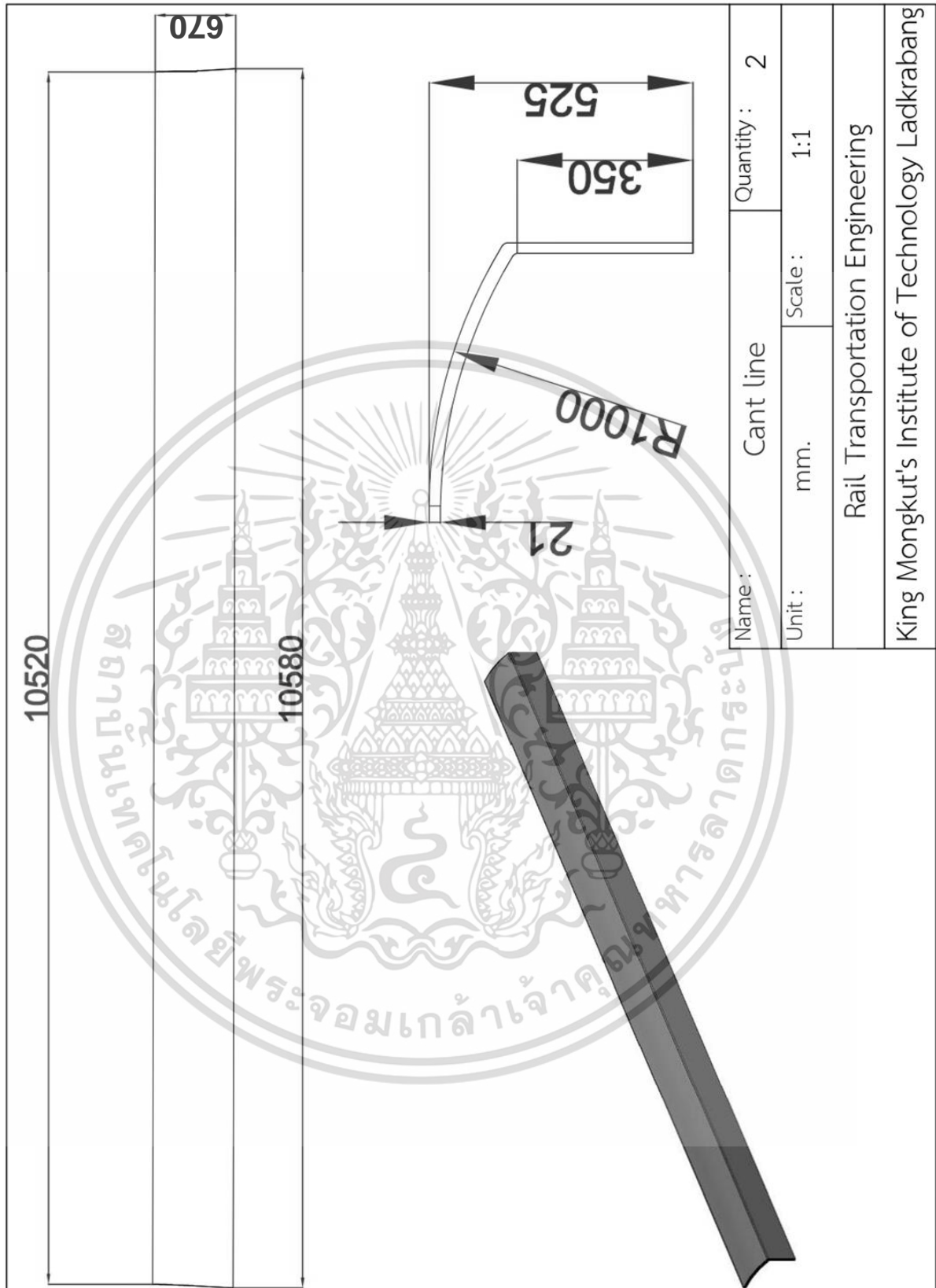
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



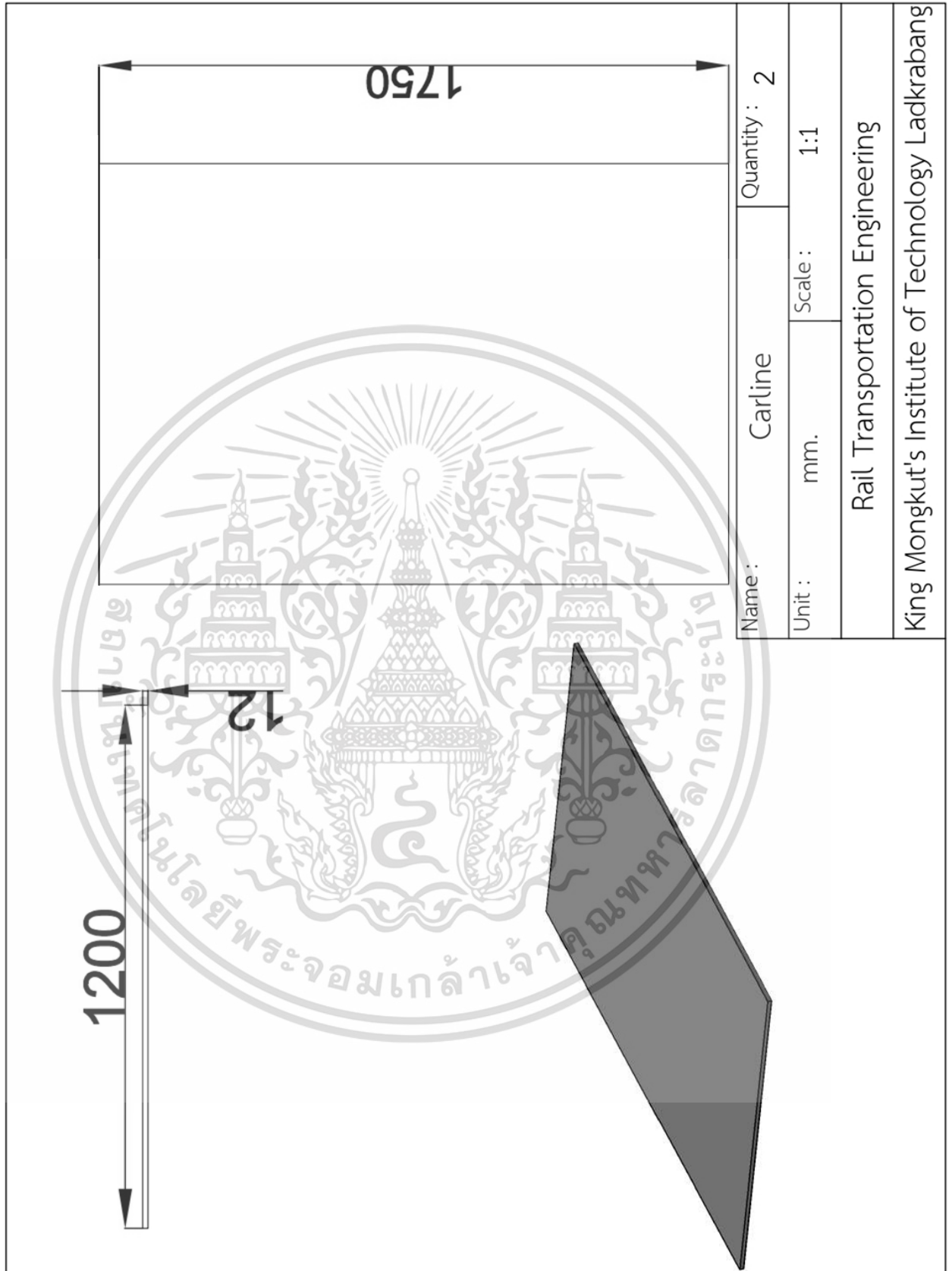
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



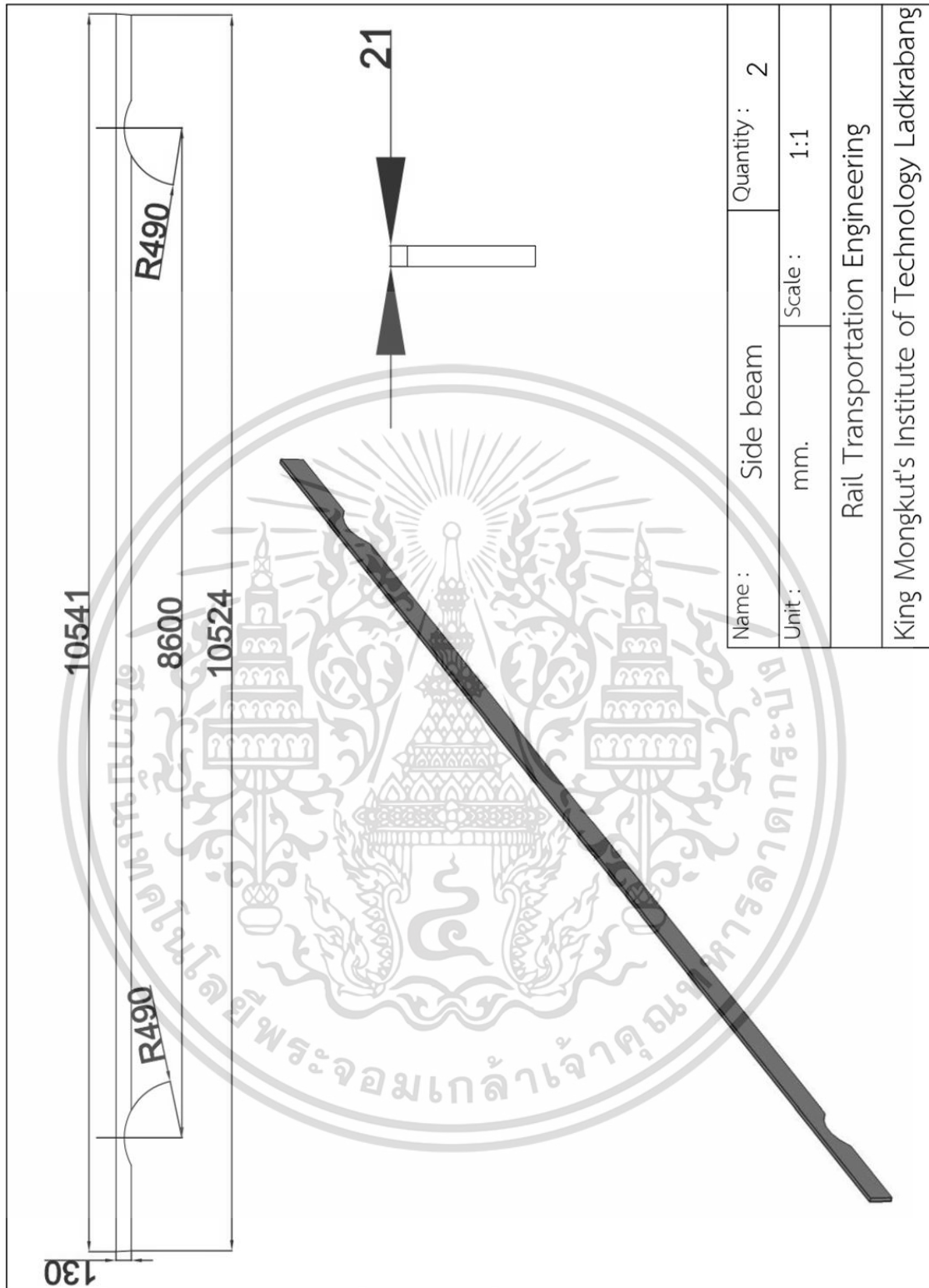
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



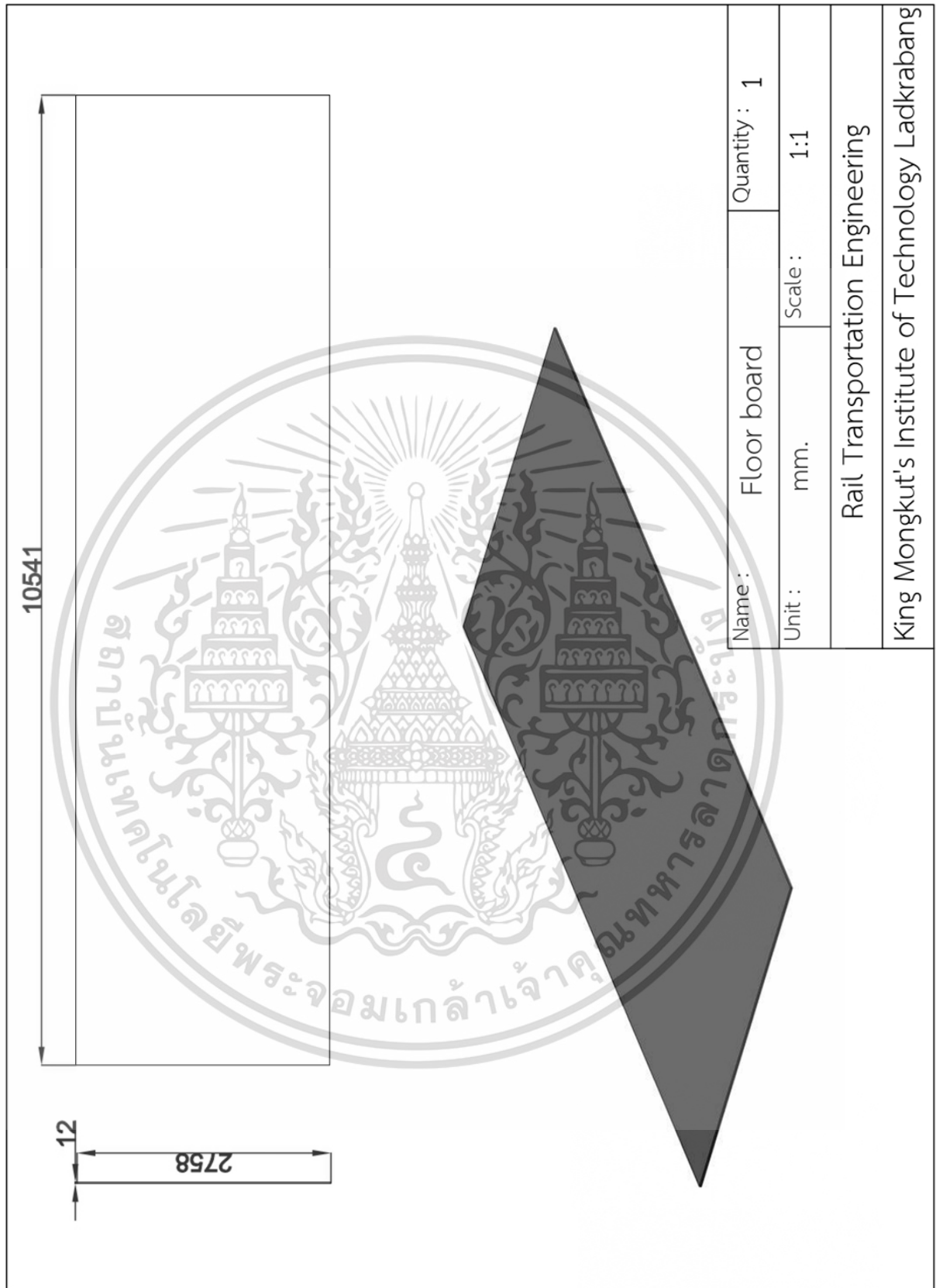
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



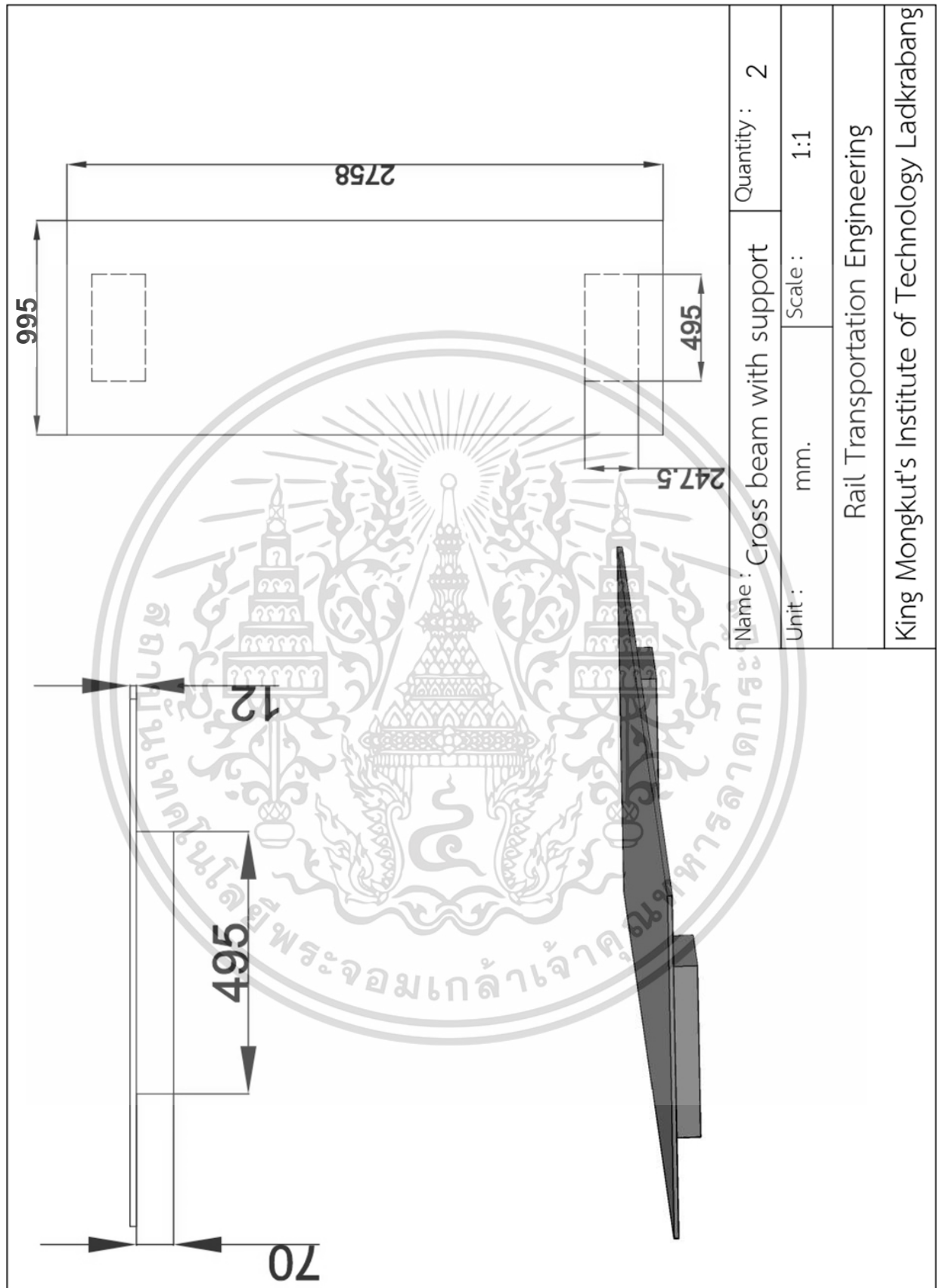
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้