

การออกแบบโครงโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก
DESIGN OF THE SMALL ELECTRIC LOCOMOTIVE BOGIE FRAME



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF THE SMALL ELECTRIC LOCOMOTIVE BOGIE FRAME



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DESIGN OF BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL
TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบโครงโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

DESIGN OF THE SMALL ELECTRIC LOCOMOTIVE BOGIE FRAME

ผู้จัดทำ

1. นาย พศวัต ทองขาวแก้ว รหัสนักศึกษา 62010606
2. นาย วสุธา ชายหาด รหัสนักศึกษา 62010812
3. นาย อีรฟาน มะลี รหัสนักศึกษา 62011074



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโครงโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

นาย พศวัต	ทองกาวแก้ว	62010606
นาย วสุธา	ชายหาด	62010812
นาย อีรฟาน	มะลี	62011074
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์	พิมसार	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2565		

บทคัดย่อ

การขนส่งด้วยระบบรางเป็นระบบขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญที่นานาประเทศทั่วโลกกำลังให้ความสำคัญในการพัฒนา ซึ่งตามมาด้วยการแข่งขันของอุตสาหกรรมระบบรางด้วยเช่นกัน ซึ่งโบกี้คือหนึ่งในส่วนประกอบสำคัญของรถไฟที่รองรับส่วนบนของตัวรถไฟกับรางรถไฟ รวมถึงเป็นตำแหน่งสำคัญที่ติดตั้งอุปกรณ์หลายอย่างเอาไว้ ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเพื่อโครงโบกี้สำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถวิ่งบนทางรถไฟขนาด 12 นิ้ว และมีรัศมีความโค้ง 16 เมตร ตามข้อกำหนดของกฎการแข่งขัน Railway Challenge ซึ่งโบกี้ที่ออกแบบได้อ้างอิงตามมาตรฐาน EN13749 และสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโบกี้ทำด้วยการจัดระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys และ SOLIDWORKS ใช้ค่าคุณสมบัติเชิงกลของ AISI 1010 คำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้ใน 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะรถไฟเคลื่อนที่เข้าทางโค้งมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ 11.4 กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการโคลงตัวมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ 11.3 และ กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชนมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ 13.7

Design of The Small Electric Locomotive Bogie Frame

Possawat	Thongkaokaew	62010606
Wasutha	Chaihard	62010812
Irfan	Malee	62011074
Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn		Advisor
Year 2022		

ABSTRACT

Rail transportation is a large and important transport system that many countries around the world are focusing on developing nowadays. Also, the rail industries are growing as well. The bogie is one of the key components of the train that supports the top part and the track. It has many important devices which have been installed. The purpose of this thesis is to design a bogie frame for a small electric locomotive that can run on a 12-inch track and has a curvature radius of 16 meters to the requirements of the Railway Challenge competition rules. According to standard EN 13749, bogie strength is going to be analyzed by using Ansys and SOLIDWORKS programs with finite element method. The bogie safety factor will calculate by the mechanical properties values of AISI 1010 in 3 cases, case 1 curve riding has a factor of safety of 11.4 , case 2 the load while the train is wobbly has a factor of safety of 11.3 and case 3 the load while the train collides has a factor of safety of 13.7

Keyword : Locomotive bogie, Railway Challenge, Finite Element

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จะต้องสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอพระคุณความช่วยเหลือ คำแนะนำ และการให้คำปรึกษา ในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทางคณะผู้ทำการวิจัยขอกราบขอพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่อดีตนักศึกษาวิศวกรรมขนส่งทางรางทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและคอยสอนเกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม Ansys และ SOLIDWORKS

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และงบประมาณในการดำเนินการจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้

พศวัต ทองกาวแก้ว
วสุธา ชายหาด
อิรฟาน มะลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินการ.....	2
บทที่ 2	3
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ.....	4
2.3.1 ประเภทของรถไฟ	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ส่วนประกอบของรถไฟ.....	5
2.3.3 ส่วนประกอบของโบกี้.....	6
2.4 มาตรฐาน EN13749	7
2.4.1 แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)	8
2.4.2 แรงที่กระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load).....	8
2.4.3 แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load).....	9
2.4.4 แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision).....	9
2.4.5 แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist).....	9
2.5 การแข่งขัน Railway Challenge	11
ต้นแบบการแข่งขันจากประเทศอังกฤษ.....	11
การจัดการแข่งขันในประเทศไทย.....	11
ข้อกำหนดที่นำมาใช้สำหรับออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า.....	12
2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.6.1 กฎของฮุก.....	12
2.6.2 กฎของฮุกในระบบสามมิติ	14
2.6.2 การโก่งตัวของคาน	15
2.6.3 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในระบบสามมิติ.....	18
2.6.4 ค่าตัวประกอบความปลอดภัย	19
2.6.5 ทฤษฎีความเสียหายของ von Mises.....	20
2.6.6 สลักเกลียว.....	21
3.1 บทนำ	27
3.2 การออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าตามกฎการแข่งขัน Railway Challenge	27
3.2.1 ปัจจัยในการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า	27

3.2.2 เครื่องมือ	28
3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า	29
3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบความล้าของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า	33
3.3 การวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์	38
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้	38
3.3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys	38
3.3.5 การกำหนดแรงและเงื่อนไขในแต่ละกรณี	42
3.3.6 การทำแบบจำลองหรือ Simulation	45
3.3.7 การจำลองเพื่อหาค่าลู่เข้าของ (Convergent)	48
3.3.8 การหาค่า Safety Factor	48
3.3.9 หาค่า Safety Factor ที่มีค่าความปลอดภัยน้อยที่สุด	48
3.3.10 การเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุด	48
3.3.11 หาค่า Safety Factor ที่เหมาะสมกับกรณีอื่นๆ	48
3.4 การประกอบชิ้นส่วน	49
3.4.1 การทำ Swing Arm	49
3.4.2 การประกอบ Bearing กับเพลลาและล้อ	49
บทที่ 4	50
ผลการทดลอง	50
4.1 บทนำ	50
4.2 ผลการทดลอง	50
4.2.2 ผลของการจำลองของแครร์รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่างๆ ในแต่ละกรณี ตามมาตรฐาน EN13749	51
4.2.3 ผลการจำลองของแครร์รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุ AISI1010 ในแต่ละกรณีตามมาตรฐาน EN13749	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5	62
สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ.....	62
5.1 บทนำ	62
5.2 สรุปผลการทดลอง	62
5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	63
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก.....	66
แบบส่วนประกอบโครงเคร่ารถจักรไฟฟ้า.....	66
ภาคผนวก ข.....	98
การตรวจสอบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	98
ภาคผนวก ค.....	104
การเลือกแปรง	104
การออกแบบแปรง.....	104
ภาคผนวก ง	106
การออกแบบสปริงกดสำหรับคูล้อ.....	106
ภาคผนวก จ.....	107
การออกแบบเพลลา	107

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของรถไฟ.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของโบกี้.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงระบบพิกัดของโบกี้รถจักรไฟฟ้า.....	7
รูปที่ 2.4 แสดงประเภทและทิศทางของแรงที่กระทำบนโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า.....	10
รูปที่ 2.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว.....	13
รูปที่ 2.6 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละคุณภาพของเหล็ก.....	14
รูปที่ 2.7 ความเครียดในระบบสามมิติ.....	14
รูปที่ 2.8 การโค้งงอของคานจากโมเมนต์ดัด.....	16
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด.....	17
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นของทฤษฎี von Mises.....	21
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของสลักเกลียว.....	21
รูปที่ 2.12 ตัวแปรความแข็งแรงของชิ้นงานที่ถูกยึด.....	23
รูปที่ 2.13 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับราคา.....	25
รูปที่ 2.14 แสดงวัสดุในช่วงกลุ่มโลหะและโลหะผสม.....	26
รูปที่ 3.1 แสดงการหาระยะระหว่างล้อของโบกี้รถจักรไฟฟ้าสูงสุด (Maximum bogie wheelbase).....	29
รูปที่ 3.2 แสดงการหาระยะ AC และ CE.....	30
รูปที่ 3.3 แสดงภาพเขียนแบบของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงกระทำในแนวตั้งและแนวตามขวางระหว่างการทดสอบ.....	35
รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำในแนวตั้งและแนวตามขวางตามเวลา.....	37
รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ.....	40
รูปที่ 3.7 แสดงการแบ่ง Mesh แบบ Hex Dominant.....	40
รูปที่ 3.8 แสดงการแบ่ง Mesh แบบ Hex Dominant.....	41
รูปที่ 3.9 แสดงการแบ่ง Mesh แบบ Hex Dominant บริเวณที่มีความซับซ้อนของชิ้นงานบริเวณที่มีความซับซ้อนของชิ้นงานมากก็จะแบ่ง Mesh ได้ยากมากขึ้น.....	41

รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงกรณีที่ 1	42
รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงในกรณีที่ 1 อีกมุมมองหนึ่ง.....	43
รูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงในกรณีที่ 2	44
รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงในกรณีที่ 3	45
รูปที่ 3.14 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้งในกรณีที่ 1	45
รูปที่ 3.15 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้งในกรณีที่ 1	46
รูปที่ 3.16 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะโคลงเคลง.....	46
รูปที่ 3.17 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะโคลงเคลง.....	47
รูปที่ 3.18 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน	47
รูปที่ 3.19 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน	48
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพัลส์กับความเค้นวอนมิสเซสในกรณีที่ 1.....	52
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพัลส์กับความเค้นวอนมิสเซสในกรณีที่ 2.....	53
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพัลส์กับความเค้นวอนมิสเซสในกรณีที่ 3.....	55
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นวอนมิสและจำนวน element ของการรับภาระทั้ง 3 กรณีของ เหล็กหัวแดง s45c	56
รูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 1.....	58
รูปที่ 4.6 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 1	59
รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 2.....	60
รูปที่ 4.8 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 2	60
รูปที่ 4.9 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 3.....	61
รูปที่ 4.10 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 3.....	61
รูปที่ ข.1 โจทย์ปัญหา 5-36.....	98
รูปที่ ข.2 แสดงการใส่โหนดลงไปในชิ้นงาน	100
รูปที่ ข.3 แสดงการยึดบริเวณที่ทำการยึดหรือ Fix Support ไว้	100
รูปที่ ข.4 แสดงการสร้าง Mesh บนชิ้นงาน.....	100
รูปที่ ข.5 แสดงค่าการลู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซส ที่จุด A และจุด B	103

รูปที่ ค.1 โมเดลของแบริ่ง.....	104
รูปที่ ค.2 ข้อมูลของแบริ่งที่ใช้ในการเลือก.....	105
รูปที่ ง.1 สปริง.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง 2.1 แสดงตัวแปรต่างๆ และพิกัดที่ใช้ในการบอกทิศทางต่างๆ ของโบกี้.....	8
ตาราง 2.2 แสดงแรงแต่ละประเภทที่กระทำแควร์รถจักรไฟฟ้า ในแต่ละกรณี.....	11
ตาราง 3.1 แสดงการเปรียบเทียบเงื่อนไขกับข้อมูลจากการออกแบบ	32
ตาราง 3.2 แสดงคุณสมบัติเชิงวัสดุประเภทเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)	33
ตาราง 3.3 แสดงค่าของแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อโบกี้ในแต่ละกรณี.....	39
ตาราง 3.4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขแรงใน กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้ง	42
ตาราง 3.5 แสดงการกำหนดเงื่อนไขแรงใน กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะโคลงเคลง.....	43
ตาราง 3.6 แสดงการกำหนดเงื่อนไขแรงใน กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน	44
ตาราง 4.1 แสดงผลของแรงประเภทต่างๆ ที่กระทำกับโบกี้เมื่อใช้วัสดุต่างๆ ตามมาตรฐาน EN13749	50
ตาราง 4.3 ผลลัพธ์การคำนวณหาค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซส.....	53
ตาราง 4.4 ผลลัพธ์การคำนวณหาค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซส	54
ตาราง 4.5 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้เหล็กหัวแดง s45c.....	56
ตาราง 4.6 แสดงค่าความเค้นวอนมิสและค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่างๆ สำหรับกรณีที่ 1	57
ตาราง 4.7 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุ AISI 1010 และ ASTM A842 Grade 250 กับเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือก วัสดุ.....	57
ตาราง 4.8 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 1 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010	58
ตาราง 4.9 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 2 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.10 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแควร์รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 3 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010	61
ตาราง ข.1 แสดงผลการจำลองของท่อที่จุด A	101
ตาราง ข.2 แสดงผลการจำลองของท่อที่จุด B.....	102
ตาราง ง.1 ตารางข้อมูลสปริง	106



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การขนส่งระบบรางเป็นการขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูง และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนานาประเทศทั่วโลก เพื่อเพิ่มศักยภาพในการขนส่งด้วยระบบรางในประเทศไทย กระทรวงคมนาคมและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องก็ได้ออกนโยบายและแผนที่มีมุ่งเน้นการผลักดันการสนับสนุนเดินหน้าพัฒนาระบบขนส่งทางรางให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และยังรวมถึงที่กำลังอยู่ระหว่างก่อสร้างอีกนับไม่ถ้วน โดยการเข้าร่วมการแข่งขัน Railway Challenge คือหนึ่งในการผลักดันด้านอุตสาหกรรมผู้สร้างรถไฟที่มีการแข่งขันสูง จากการทำกรวิจัยและพัฒนารถไฟของตนเองให้มีจุดเด่นในการนำเสนอขายแก่ผู้ให้บริการเส้นทางรถไฟทั่วโลก

โครงการสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กถูกออกแบบให้มีขนาดความกว้าง และความยาวตามกฎการแข่งขัน Railway Challenge โดยโบกี้ที่ทำการออกแบบในปฏิญญาพนธ์เล่มนี้ได้แรงบันดาลใจมาจากโบกี้รุ่น SF 500 ของบริษัท SIEMENS เป็นโบกี้ที่ใช้ในรถไฟความเร็วสูง Intercity Express ของประเทศเยอรมนีมีรู้จักกันในนาม ICE ที่ให้บริการโดย Deutsche Bahn โดยโบกี้ SF500 ถูกออกแบบมาใช้กับ ICE4 หรือก็คือ Intercity Express รุ่นที่ 4 นั่นเอง ซึ่งเป็นรถไฟความเร็วสูงรุ่นล่าสุดของเยอรมัน โบกี้รุ่นนี้มีการออกแบบแบบโมดูลาร์ซึ่งหมายความว่า สามารถออกแบบให้สามารถใช้กับโบกี้ที่ต้องการติดตั้งระบบขับเคลื่อนเพื่อใช้เป็นรถต้นกำลังในการลากจูงของขบวนรถไฟ หรือสามารถออกแบบให้ไม่มีระบบขับเคลื่อนเพื่อใช้สำหรับตู้ที่เป็นรถต่อพ่วง และให้ความสบายสะดวกสบายแก่ผู้โดยสารภายในขบวนรถแถมยังมีรูปลักษณะที่ทันสมัยอีกด้วย ซึ่งสำหรับการออกแบบโบกี้ที่ใช้เข้าร่วมการแข่งขัน Railway Challenge นั้นจะต้องคำนึงให้หัวรถจักรที่สร้างขึ้นสามารถตอบโจทย์ใกล้เคียงกับรถไฟที่ใช้ให้บริการจริง โดยในส่วนของวัสดุที่นำมาใช้สร้างโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้านั้นจะทำการวิเคราะห์ และตรวจสอบความแข็งแรงด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ได้ตามมาตรฐาน EN13749 เหมือนกับรถไฟของจริง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบโครงโบกี้สำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน Railway Challenge
2. เพื่อวิเคราะห์แรงทางสถิตยศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับโบกี้
3. เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงในการรับน้ำหนักของโบกี้การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ได้ตามมาตรฐาน EN13749

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. การออกแบบโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กตามเกณฑ์การแข่งขัน Railway Challenge
2. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กในการรับน้ำหนักตามมาตรฐาน EN13749

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อสร้างโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน Railway Challenge
2. สามารถนำโบกี้ที่ทำการออกแบบไปพัฒนาและต่อยอดต่อไปได้

1.5 วิธีการดำเนินการ

1. ศึกษากฎระเบียบและเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินการแข่งขัน Railway Challenge
2. ทำการออกแบบโบกี้หัวของรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก
3. ทำการออกแบบอุปกรณ์และตำแหน่งการจัดวางระบบช่วงล่างของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดย่อส่วน
4. เขียนแบบจำลองโปรแกรมสามมิติของโบกี้
5. ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุจากทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้อง
6. ทำการวิเคราะห์แรงภายใต้สภาวะสถิตยศาสตร์จากการรับน้ำหนักของโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก ในกรณีที่ใช้สภาวะการใช้งานผิดปกติ ตามมาตรฐาน EN13749
7. ทำการวิเคราะห์ และทดสอบหาค่าความเค้นของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี ตามมาตรฐาน EN13749
8. ทำการคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแต่ละกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การออกแบบและการวิเคราะห์โบกี้สำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก จำเป็นที่ต้องใช้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับรถไฟ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองของโบกี้ด้วยการใช้มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่นำมาทำโบกี้ เพื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับแรงที่กระทำต่อโบกี้ ได้แก่ วิเคราะห์ค่าความเครียด วิเคราะห์ค่าความเค้น วิเคราะห์ความเสียหายและการเสียรูปของวัสดุ ซึ่งจะได้กล่าวในบทนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- CEN (European Committee for Standardization) ศึกษาและตั้งมาตรฐานกลางจากอายุการใช้งาน ระยะทางวิ่งเฉลี่ยต่อปี ระยะทางทั้งหมด การซ่อมบำรุง และข้อกำหนดทางเทคนิคที่สำคัญกับโครงสร้างรถไฟ ครอบคลุมถึงภาระที่จำเป็นในการค้ำึงถึงการออกแบบโบกี้หัวรถจักร อันได้แก่ สภาวะการใช้ปกติและสภาวะการใช้งานไม่ปกติ ตามคุณภาพในการออกแบบ ด้วยมาตรฐาน EN15663, EN15085 และ EN15827

- G.Mancini, A.Cera ศึกษาและวิจัยมาตรฐาน EN13749 ของยุโรป เพื่อกำหนดลักษณะการออกแบบให้กับโบกี้หัวรถจักรที่สมบูรณ์ โดยประเมินขั้นตอนการออกแบบ การตรวจสอบ และข้อกำหนดคุณภาพของการผลิต และรวมถึงกำหนดสมมุติฐานที่เกี่ยวข้องอย่างภาระและความล้าของวัสดุ วิธีการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าสถิต

- Jakkrachai S., Pattara T. และ Yodsapol W. ได้ออกแบบและพัฒนารถไฟขนาดเล็ก โดยมีกำหนดการรับภาระอยู่ที่ 300 กิโลกรัม และอยู่ภายใต้มาตรฐาน EN13749 ซึ่งรูปแบบการรับภาระของโบกีนี้นั้นมีอยู่ทั้ง 3 กรณี ได้แก่ 1) รับภาระน้ำหนักจากตู้รถไฟที่ตกลงบนโบกี้ขณะที่รถไฟหยุดนิ่ง 2) รับภาระน้ำหนักจากตู้รถไฟที่ตกลงบนโบกี้ขณะที่รถไฟเกิดการโคลงตัว 3) รับภาระน้ำหนักจากตู้รถไฟที่ตกลงบนโบกี้ขณะที่รถไฟกำลังเข้าทางโค้ง และคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัย

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ

องค์ประกอบของการเดินรถไฟที่สำคัญประกอบด้วย

- ทางรถไฟ ซึ่งประกอบด้วยรางสองรางวางตั้งฉากบนหมอนรองทางรถไฟ โดยการวางระยะระหว่างรางจะเป็นตัวกำหนด ขนาดความกว้างทางรถไฟ (Track gauge) หรือ เกจ (Gauge) โดยวัดจากหัวรางด้านในข้างหนึ่งถึงหัวรางด้านในอีกข้างหนึ่ง โดยขนาดความกว้างที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Standard Gauge มีขนาดความกว้าง 1,435 มิลลิเมตร ใช้ในรถไฟความเร็วสูง รถไฟฟ้าในระบบ MRT และ BTS เป็นต้น ส่วนรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย หรือ ร.ฟ.ท. ใช้ขนาดเป็น Meter Gauge มีขนาดความกว้าง 1,000 มิลลิเมตร
- รถจักร รถที่มีกำลังและระบบขับเคลื่อนในตัวเองทำหน้าที่ลากจูงรถพ่วง
- รถพ่วง รถสำหรับบรรทุกผู้โดยสาร เรียกว่า รถโดยสาร หรือรถสำหรับบรรทุกสินค้า เรียกว่า รถสินค้า
- ระบบอาณัติสัญญาณ เป็นระบบที่ใช้การในการควบคุมในการเดินรถไฟเพื่อความปลอดภัย เพิ่มความเร็วและมีประสิทธิภาพในการเดินรถ
- สถานีรถไฟ และป้ายหยุดรถ เป็นจุดจอดสำหรับรับส่งผู้โดยสาร หรือรับส่งสินค้า

2.3.1 ประเภทของรถไฟ

ระบบขนส่งทางสามารถจำแนกประเภทโดยแบ่งตามบทบาทและพื้นที่การให้บริการได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ระบบขนส่งทางเพื่อเป็นระบบขนส่งมวลชนในเขตเมือง (Urban Rail) (Metro) ระบบรถไฟที่มีขอบเขตการให้บริการในพื้นที่เมืองและอาณาบริเวณโดยรอบของเมือง

กลุ่มที่ 2 ระบบขนส่งทางเพื่อเดินทางระยะไกลระหว่างเมือง (Inter-city Rail) ระบบรถไฟระหว่างเมือง คือรถไฟทั่วไปที่มีการขนส่งระหว่างเมืองมีบริการหลากหลายประเภทเดินทางร่วมกันบนเส้นทาง มีทั้งขบวนรถไฟโดยสารและรถสินค้า มีบริการในรูปแบบต่างๆด้วยการปรับเวลาและจำนวนสถานีที่จอดปลายทาง ได้แก่ ขบวนรถไฟธรรมดา ขบวนรถเร็ว ขบวนรถด่วน และขบวนรถด่วนพิเศษ โดยขึ้นอยู่กับการจัดสรรของผู้ให้บริการ

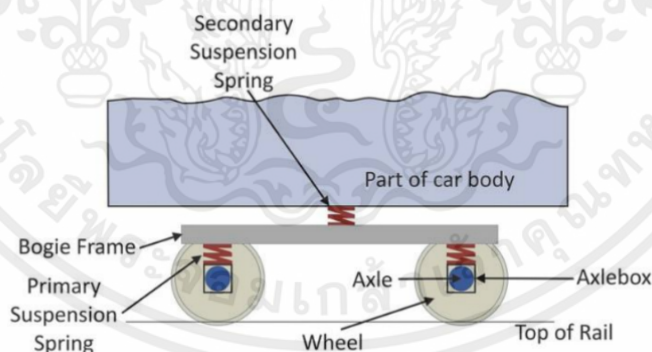
กลุ่มที่ 3 ระบบขนส่งทางรางที่เป็นความเร็วสูง (High Speed Rail) ทำหน้าที่ขนส่งผู้โดยสารด้วยระยะทางไกลระหว่างเมือง เพื่อเชื่อมโยงเมืองขนาดใหญ่เข้าด้วยกันโดยการลดระยะเวลาในการเดินทาง และเพื่อเป็น

การพัฒนาเมืองแบบกระจายความเจริญออกไปตามเมืองจนเกิดเป็นเมืองใหญ่ที่ใกล้กันและมีปริมาณการเดินทางระหว่างเมืองสูงมาก

ระบบขนส่งทางรางทั้งสามประเภทดังกล่าวทำหน้าที่ในการพัฒนาระบบเศรษฐกิจและพื้นที่ให้บริการที่แตกต่างกัน จึงมีการออกแบบที่แตกต่างกันด้วย

2.3.2 ส่วนประกอบของรถไฟ

หัวรถจักรหรือรถพ่วงประกอบไปด้วยหลายส่วน ได้แก่ ตัวรถหรือตัวถัง (Car body) โดยการออกแบบจะขึ้นอยู่กับประเภทของรถและการนำไปใช้งาน เช่นในกรณีที่ใช้สำหรับลากจูงรถพ่วงอย่างตู้โดยสารยาวๆหรือตู้สินค้าก็จะใช้เป็นตัวรถจักรที่มีระบบขับเคลื่อนในตัวเองโดยตัวถังจะถูกออกแบบให้สำหรับติดตั้งเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้กับมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีกำลังสูง ส่วนต่อมาได้แก่ระบบกันสะเทือนจะมี 2 ส่วนได้แก่ ระบบกันการสั่นสะเทือนปฐมภูมิ (Primary Suspension) ทำหน้าที่ลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากล้อและรางสัมผัสกัน และระบบกันการสั่นสะเทือนทุติยภูมิ (Secondary Suspension) ทำหน้าที่ป้องกันการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในส่วนบนรวมถึงการปรับความสูงต่ำของส่วนตัวรถในขณะที่ผู้โดยสารเข้าออกขบวนรถ ในส่วนของโครงโบกี้ (Bogie Frame) จะทำหน้าที่รองรับภาระที่เกิดจากน้ำหนักที่ถูกกดจากส่วนบนและน้ำหนักจากอุปกรณ์ต่างๆที่ถูกติดตั้งอยู่ที่โบกี้ และส่วนของล้อ (Wheel) จะทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากโบกี้ไปที่รางและทำให้รถไฟเคลื่อนที่ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสนใจเฉพาะส่วนของโครงโบกี้เท่านั้น

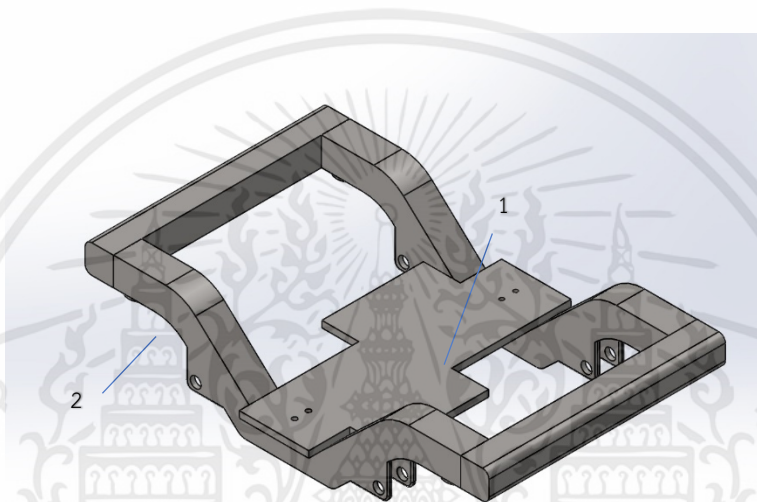


รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของรถไฟ

(รูปจาก: railway-technical.com)

2.3.3 ส่วนประกอบของโบกี้

โครงโบกี้เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับกับชุดล้อกับส่วนของตัวถังของรถไฟ ที่ทำหน้าที่รองรับภาระต่างๆจากน้ำหนักด้านบน รวมถึงรับแรงที่เข้ามากระทำภายใต้สภาวะต่างๆ โดยโบกี้จะมีระบบอื่นๆที่ติดตั้งอยู่ด้วยได้แก่ ชุดล้อ (Wheelset) มอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor) ชุดเกียร์ (Gearbox Unit) แดมเปอร์ (Damper) ชุดกระบอกเบรก (Brake Cylinder) ระบบกันการสั่นสะเทือนปฐมภูมิ (Primary Suspension) และระบบกันการสั่นสะเทือนทุติยภูมิ (Secondary Suspension)



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของโบกี้

1. คานด้านตัดขวาง
2. คานด้านข้าง

2.3.4 ประเภทของโบกี้แต่ละประเภทโดยจำแนกตามมาตรฐาน EN13479

ประเภทที่ 1 โบกี้สำหรับรถไฟทางไกล รถไฟระหว่างเมือง รถไฟความเร็วสูง ทั้งโบกี้ที่มีระบบขับเคลื่อนและไม่มีระบบขับเคลื่อน

ประเภทที่ 2 โบกี้สำหรับรถไฟชานเมือง ทั้งแคร่ล้อที่มีระบบขับเคลื่อนและไม่มีระบบขับเคลื่อน

ประเภทที่ 3 โบกี้สำหรับรถไฟในเมือง (Metro) ทั้งแคร่ล้อที่มีระบบขับเคลื่อนและไม่มีระบบขับเคลื่อน

ประเภทที่ 4 โบกี้รถไฟรางเบาอย่างรถรางหรือแตรม

ประเภทที่ 5 โบกี้ตู้รถไฟสินค้าที่มีระบบกันการสั่นสะเทือนชั้นเดียว

ประเภทที่ 6 โบกี้ตู้รถไฟสินค้าที่มีระบบกันการสั่นสะเทือนสองชั้น

ประเภทที่ 7 โบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

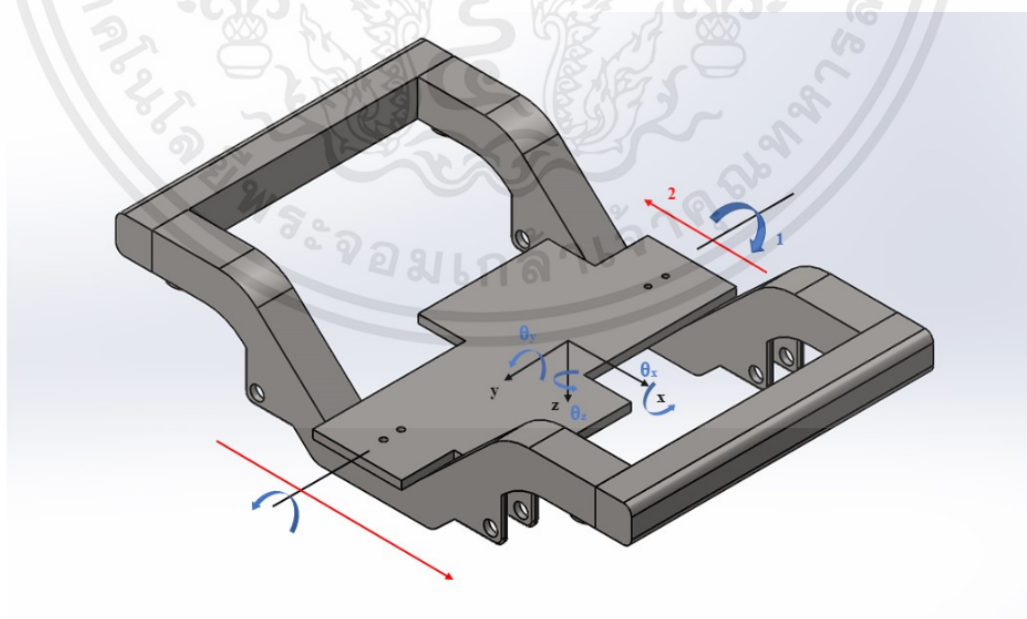
2.4 มาตรฐาน EN13749

มาตรฐาน EN13749 ใช้สำหรับการออกแบบโบกี้ของรถไฟในยุโรป ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในคริสต์ทศวรรษ 2005 โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่นิยามกระบวนการการออกแบบโบกี้รถไฟ การประเมินค่าและความต้องถูกต้องที่ตรงตามมาตรฐาน รวมถึงคุณภาพที่ทำการผลิต

มาตรฐาน EN13749 นั้นมี 5 ขั้นตอนในการออกแบบโบกี้ของรถไฟ

1. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างภายใต้สภาวะสถิตยศาสตร์ (Static Strength) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 สภาวะได้แก่ สภาวะการรับภาระแบบปกติ (Normal Service Load) และ สภาวะการรับภาระแบบไม่ปกติ (Exceptional Load)
2. การวิเคราะห์ความล้าในโครงสร้าง (Fatigue Strength Assessment)
3. การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างภายใต้สภาวะสถิตยศาสตร์ (Static test Assessment)
4. การทดสอบความล้าในโครงสร้าง (Fatigue Test)
5. การทดสอบบนทางวิ่ง (On-track Test)

โดยในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ จะทำการออกแบบในส่วนของโบกี้สำหรับหัวรถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive Bogie) ซึ่งมี 2 โบกี้ โดยทำการวิเคราะห์และทดสอบความแข็งแรงเฉพาะในกรณีภายใต้สภาวะการรับภาระแบบไม่ปกติเท่านั้นในการวิเคราะห์แรงต่างๆด้วยระบบพิกัดฉากอ้างอิงทิศทางการเคลื่อนที่ดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงระบบพิกัดของโบกี้รถจักรไฟฟ้า

ทิศทาง	ตัวแปร	คำอธิบาย
Longitudinal	x	ทิศตามแนวการเคลื่อนที่
Transverse	y	ทิศแนวด้านข้างตามแนวการเคลื่อนที่
Vertical	z	ทิศแนวตั้งฉากตามแนวการเคลื่อนที่
Roll	θ_x	ทิศการหมุนรอบตามแนวการเคลื่อนที่
Pitch	θ_y	ทิศการหมุนรอบแนวด้านข้างตามแนวการเคลื่อนที่
Taw	θ_z	ทิศการหมุนรอบแนวตั้งฉากตามแนวการเคลื่อนที่
Twist	1	ระยะการเคลื่อนที่จากการหมุนรอบแนวด้านข้างโบกี้
Lozenging	2	แรงเฉือนจากความสัมพันธ์แนวการเคลื่อนที่กับแนวด้านข้าง

ตาราง 2.1 แสดงตัวแปรต่างๆ และพิกัดที่ใช้ในการบอกทิศทางต่างๆ ของโบกี้

ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโบกี้ภายใต้สภาวะสถิตยศาสตร์กรณีการรับแรงไม่ปกติ (Static strength Assessment In Exceptional Load Case) ซึ่งมีโอกาสที่อาจจะไม่เกิดกรณีนี้ขึ้นเลยกับโครงสร้างของโบกี้ตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งในการวิเคราะห์กรณีนี้นั้น จำเป็นต้องทราบว่าโครงโบกี้สามารถรับแรงได้โดยไม่มีการเสียรูปแบบถาวรเกิดขึ้น (Permanent Deformation) โดยแรงทั้งหมดที่ต้องพิจารณานั้น มีดังนี้

2.4.1 แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)

โหลดที่เกิดจากน้ำหนักของหัวรถจักรไฟฟ้าที่กระทำกับส่วนรองรับซึ่งมีขนาดเป็น 1.4 เท่าของแรงโน้มถ่วงในแนวตั้ง ซึ่งกระทำบริเวณทั้งสองด้านของแคร่รถจักรไฟฟ้า โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$F_{z1\max} = F_{z2\max} = \frac{F_{z\max}}{2} = \frac{1.4g(M_v - 2m^+)}{4} \quad (2-1)$$

โดยที่

M_v คือ มวลของหัวรถจักรไฟฟ้า (กิโลกรัม)

m^+ คือ มวลของแคร่และชุดล้อซึ่งไม่รวมกับมวลของสปริงของระบบรองรับ (หุติยภูมิ) (กิโลกรัม)

2.4.2 แรงที่กระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)

จากการสัมผัสกันของล้อและรางในการวิ่งบนทางโค้งทำให้เกิดแรงประเภาที่ขึ้น โดยถูกส่งมาจากแต่ละปลายเพลลาทั้ง 4 ด้าน กระทำกับโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ

$$F_y = \frac{(M_v + C_1)g}{6n_a n_b} \quad (2-2)$$

โดยที่

- C_1 คือ มวลของคนขับรถไฟ (80 กิโลกรัม)
 n_a คือ จำนวนเพลาล้อของโบกี้หนึ่งคัน (2 เพลลา)
 n_b คือ จำนวนโบกี้ในหนึ่งตู้รถไฟ (2 แคร)

2.4.3 แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load)

เกิดจากแรงกระทำในแนวดิ่งและการวิ่งบนทางโค้งกระทำต่อโครงโบกี้ อันเนื่องมาจาก $\mu = 0.4$ โดยคำนวณได้จากสมการ

$$F_{x1} = \frac{\mu}{4} \times \frac{M_v g}{n_a} \quad (2-3)$$

2.4.4 แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision)

เกิดจากแรงโน้มถ่วงตามแนวยาว โบกี้ของหัวรถจักรที่มีที่ระบบขับเคลื่อนจะมีขนาดเป็น 3 เท่าของแรงโน้มถ่วงตามแนวยาว และเป็น 5 เท่าสำหรับโบกี้ของตู้รถไฟที่ไม่มีระบบขับเคลื่อน แรงนี้จะกระทำกับที่จุดศูนย์กลางมวลของแคร่รถไฟ

2.4.5 แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)

เกิดจากการบิดของทาง ซึ่งโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้านั้นต้องสามารถรับแรงจากการกระทำของการบิดของทางเป็น 1% โดยพิจารณาซึ่งให้ล้อหนึ่งมีการยกตัวขึ้นเป็นระยะ ΔZ และสำหรับโบกี้ของตู้สำหรับลากจูงจะทำการพิจารณาเป็นพาหนะเปล่า และทำการจำลองสถานการณ์การตรวงที่ความเร็วต่ำ โดยใช้สมการ

$$\Delta Z = \frac{\% \text{track twist} \times \text{bogie wheelbase}}{100} \quad (2-4)$$

ในการคำนวณทางสถิติศาสตร์ในกรณีการรับภาระแบบไม่ปกติ สามารถแบ่งแรงข้างต้นได้เป็น 4 กรณี ดังนี้

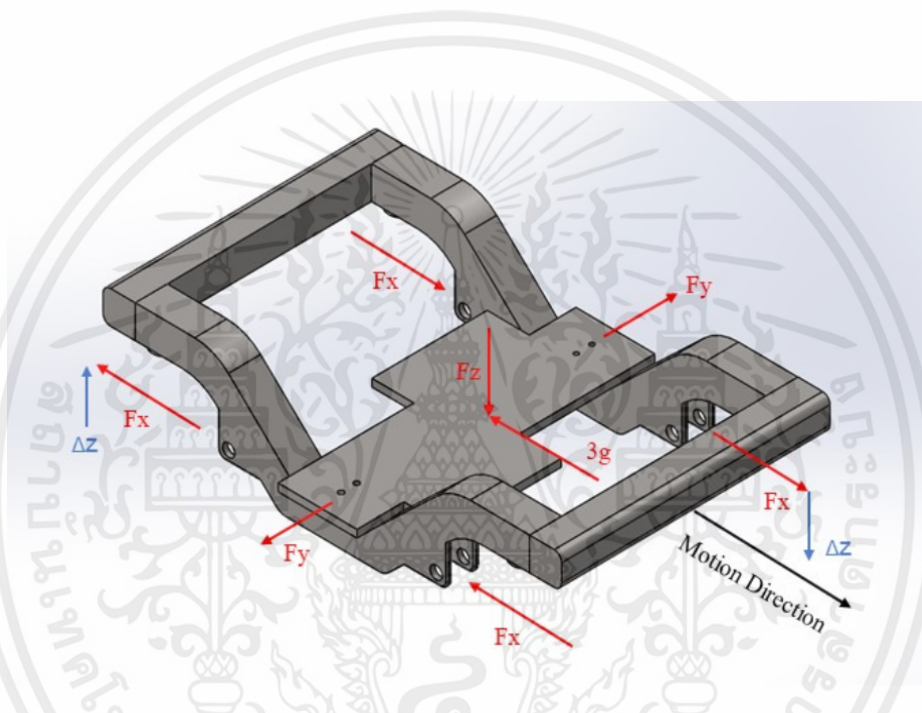
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้งจะมีแรงกระทำในแนวตั้ง แรงกระทำในแนวด้านข้าง และแรงกระทำจากการบิดตัวของทางรถไฟ

กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัวจะมีแรงกระทำในแนวตั้ง และแรงกระทำในแนวยาว

กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชนจะมีแรงกระทำในแนวตั้ง และแรงจากการชนในแนวยาว

กรณีที่ 4 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟกรางที่ความเร็วต่ำจะมีแรงกระทำในแนวตั้ง



รูปที่ 2.4 แสดงประเภทและทิศทางของแรงที่กระทำบนโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

แรงแต่ละประเภทที่กระทำ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)	✓	✓	✓	✓
แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)	✓			
แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load)		✓		
แรงจากการชนในแนวยาว			✓	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Longitudinal Collision)				
แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)	✓			
Unloading of one wheel				✓

ตาราง 2.2 แสดงแรงแต่ละประเภทที่กระทำแก่รถจักรไฟฟ้าในแต่ละกรณี

ในปฏิญญาฉบับนี้ จะคำนึงถึงการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าสำหรับเข้าแข่งขัน Railway Challenge จึงพิจารณาเพียงแรงในสามกรณีแรกเท่านั้น

2.5 การแข่งขัน Railway Challenge

ต้นแบบการแข่งขันจากประเทศอังกฤษ

การแข่งขัน Railway Challenge จัดตั้งครั้งแรกโดย Railway Division เพื่อให้ทีมที่เข้าร่วมแข่งขันจากมหาวิทยาลัยต่างๆทั้งในและต่างประเทศ ตลอดจนผู้สำเร็จการศึกษาที่ทำงานในอุตสาหกรรมทั่วโลก ได้เข้ามาแสดงศักยภาพ ทดสอบความรู้ความสามารถในการออกแบบ ภายใต้การแข่งขันอุตสาหกรรมระบบรางที่ทำหายโดยใช้ทักษะทางเทคนิคในสภาพแวดล้อมจริง รวมถึงการวางแผนโมเดลเชิงธุรกิจวัดทักษะความเฉียบแหลมของผู้เข้าชิง

รอบการแข่งขันประจำปีนั้นจะเริ่มต้นขึ้นในเดือนตุลาคม จนสุดสิ้นในปลายเดือนมิถุนายนหรือต้นเดือนกรกฎาคมของปีถัดไป โดยผู้เข้าร่วมการแข่งขันต้องออกแบบและสร้างหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก (10¼" gauge) ตามข้อกำหนดทางเทคนิคของการแข่งขัน โดยช่วงของการทดสอบจะถูกจัดขึ้นในช่วงเดือนมิถุนายนหรือกรกฎาคมที่ Stapleford Miniature Railway ใน Leicestershire

การจัดการแข่งขันในประเทศไทย

การแข่งขัน Railway Challenge ในประเทศไทยเริ่มต้นขึ้นครั้งแรกเมื่อเดือนตุลาคม ปี 2019 (RWC2020) โดยมีทีมที่เข้าร่วมการแข่งขันจาก 7 มหาวิทยาลัยในประเทศไทย ได้แก่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และมหาลัทธิวิทยาลัยนเรศวร โดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นเจ้าภาพในการจัดครั้งนั้น โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้คว่ำชัยชนะและเป็นแชมป์การแข่งขัน Railway Challenge ของครั้งแรกประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญาพนธ์เล่มนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่อของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก ภายใต้กฎเกณฑ์และข้อกำหนดของรายการการแข่งขัน Railway Challenge 2022 ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญได้แก่ รถไฟที่ใช้เข้าแข่งขันต้องวิ่งบนขนาดทาง 12 นิ้ว รั้งน้ำหนักได้สูงสุด 1000 กิโลกรัม ระยะระหว่างล้อไม่เกิน 660 มิลลิเมตร

ข้อกำหนดที่นำมาใช้สำหรับออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

ปริญาพนธ์เล่มนี้จะมีการออกแบบและสร้างโบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าภายใต้ข้อกำหนดของ Railway Challenge ดังต่อไปนี้

- น้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างหัวรถจักรไฟฟ้า (Maximum Vehicle Weight) เป็น 2000 กิโลกรัม
- ความกว้างของทางรถไฟ (Track Gauge) เป็น 12 นิ้ว
- รั้งมีโค้งต่ำสุด (Minimum Horizontal Curvature Radius) เป็น 16 เมตร
- การบิดของทางสูงสุด (Maximum Track Twist Gradient) เป็น 6 มิลลิเมตร ต่อ 250 มิลลิเมตร
- มุมลาดของราง (Rail Cant) เป็น 4.189×10^{-4} องศา
- เส้นผ่านศูนย์กลางล้อต่ำสุด (Minimum Wheel Diameter) เป็น 200 มิลลิเมตร
- ความกว้างของโบกี้สูงสุด (Maximum Width of Bogie Frame) เป็น 660 มิลลิเมตร
- ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง (Back-to-Back) เป็น 288.42 มิลลิเมตร

2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 กฎของฮุก

กฎของฮุกนั้นเป็นเพียงการประมาณ ในความเป็นจริงนั้นวัสดุจะเสียสภาพเมื่อถูกยืดหรือหดถึงจุดๆ หนึ่ง นอกจากนี้วัสดุหลายประเภทนั้นยังเบี่ยงเบนไปจากกฎของฮุกเมื่อระยะยืดมีค่ามากกว่าระดับหนึ่ง

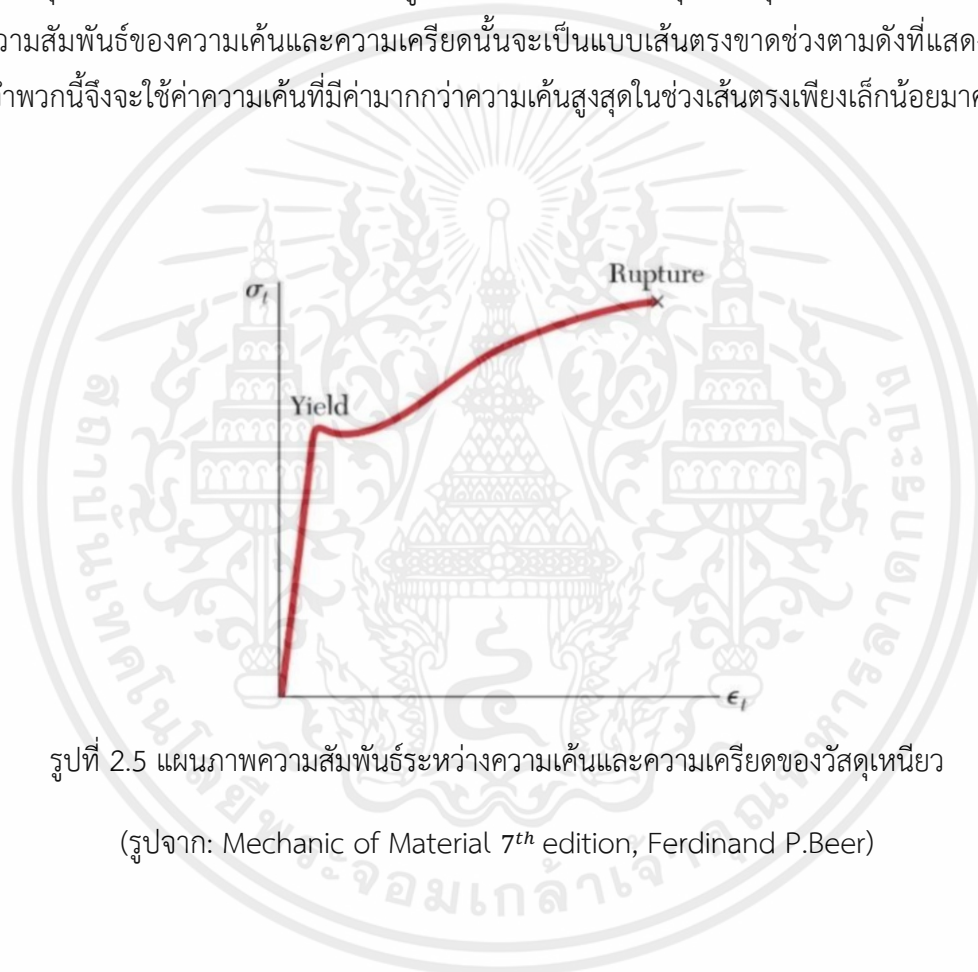
$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-5)$$

โดยที่

- σ คือ ค่าความเค้น (ปาสคาล)
- ε คือ ค่าความเครียด (ปริมาณไร้หน่วย)
- E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (ปาสคาล)

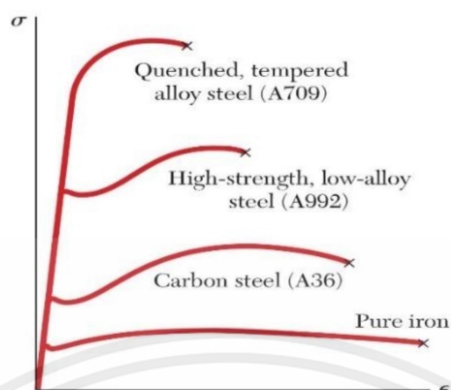
ในทฤษฎีความยืดหยุ่นของฮุกกล่าวว่า ความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นนั้นแปรผันตรงกับความเค้นที่กระทำต่อวัสดุนั้น อย่างไรก็ตามความเค้นและความเครียดนั้นมีหลายองค์ประกอบ ค่าคงที่ของการแปรผันนั้นจะไม่ใช่แค่ตัวเลขตัวเดียว แต่เป็นปริมาณเทนเซอร์สามารถแสดงได้ด้วย

เมทริกซ์โดยทั่วไปของฮุกสามารถใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้และในแต่ละชนิดของวัสดุนั้นจะมีค่าการเค้นสูงสุดที่จะสามารถรับแรงได้โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียดนั้นยังเป็นเส้นตรงนั้นแตกต่างกันไป ช่วงที่เป็นเส้นตรงนี้เรียกว่าช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น โดยในวัสดุเหนียวนั้นจะมีจุดครากที่แม่นยำตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 แต่สำหรับวัสดุเปราะจุดครากจะไม่แน่นอน เนื่องจากแผนภาพความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดนั้นจะเป็นแบบเส้นตรงขาดช่วงตามดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้นวัสดุจำพวกนี้จึงจะใช้ค่าความเค้นที่มีค่ามากกว่าความเค้นสูงสุดในช่วงเส้นตรงเพียงเล็กน้อยมาคำนวณในกฎของฮุก



รูปที่ 2.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว

(รูปจาก: Mechanic of Material 7th edition, Ferdinand P.Beer)

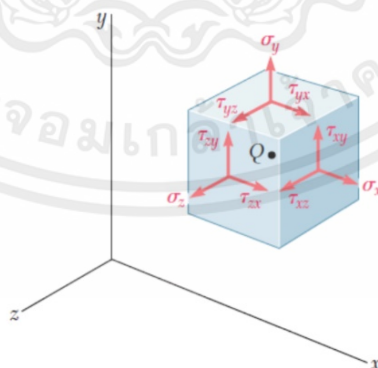


รูปที่ 2.6 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละคุณภาพของเหล็ก

(รูปจาก: Mechanics of Materials 7th edition, Ferdinand P. Beer)

จากรูปที่ 2.5 นั้นเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเหล็กของแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นดึงสูงสุด ความเค้น จุดคราก และความเค้นสุดท้ายจะมีค่าที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามเหล็กแต่ละชนิดนี้มีความโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เท่ากัน ดังนั้นหากเราแทนที่เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงด้วยเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า โครงสร้างนั้นก็ จะมีความจุในการรับโหลดสูงขึ้น แต่ค่าความแกร่งจะเท่าเดิมค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เป็นไปตามกฎของฮุกนั้น จะไม่ขึ้นกับทิศทางของ โหลด หรือกล่าวได้ว่าเราพิจารณาให้วัสดุนี้เป็นแบบไอโซโทรปิก

2.6.2 กฎของฮุกในระบบสามมิติ



รูปที่ 2.7 ความเครียดในระบบสามมิติ

(รูปจาก: Mechanics of Materials 7th edition, Ferdinand P. Beer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของผลรวมความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นในหนึ่งทิศทางนั้น จากโหนดทั้งสามทิศทางเป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\quad (2-6)$$

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}\end{aligned}\quad (2-7)$$

หรือสามารถเขียนได้ในอีกรูปหนึ่งได้ว่า

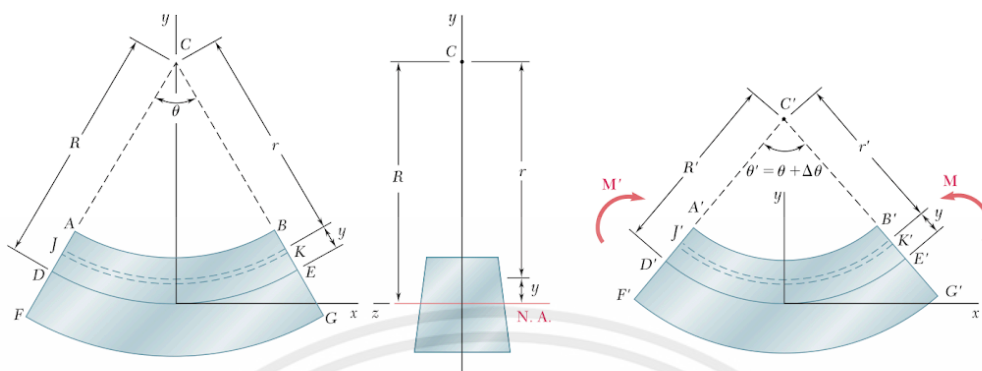
$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)]\end{aligned}\quad (2-8)$$

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= G\gamma_{xy} \\ \tau_{yz} &= G\gamma_{yz} \\ \tau_{zx} &= G\gamma_{zx}\end{aligned}\quad (2-9)$$

2.6.2 การโก่งตัวของคาน

คานเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับโมเมนต์ ดัดและแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากแรงภายนอกที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกบนคานนั้น เมื่อคานได้รับน้ำหนักหรือแรงภายนอกกระทำ คานก็จะเกิดการแอ่นลงหรือโก่งงอทำให้คานไม่อยู่ในแนวตรงเหมือนตอนแรกที่ยังไม่ได้รับน้ำหนัก ฉะนั้นในการคำนวณและออกแบบคานที่รับน้ำหนักจะต้องคำนึงถึงการโก่งของคานด้วย นอกเหนือไปจากความเค้นดัดและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การโค้งงอของคานจากโมเมนต์ดัด

(รูปจาก: Mechanics of Material 7th edition, Ferdinand P.Beer)

แกนสะเทิน (Neutral Axis) คือ เส้นหรือระนาบที่ผ่านจุดเชื่อมต่อของคานหรือแผ่นที่ไม่มีการขยาย หรือการบีบอัด ขณะเกิดการโค้งงอ

เมื่อคานถูกกระทำด้วยแรงหรือโมเมนต์ดัดจึงทำให้เกิดการโค้งตัวของคานดังรูป สามารถหาค่าของ ความเค้นได้จาก

$$\epsilon_x = -\frac{y}{\rho} \quad \epsilon_m = \frac{c}{\rho} \quad \epsilon_x = -\frac{y}{c}\epsilon_m \quad (2-10)$$

โดยที่

- ϵ_x คือ ความเค้น ณ แกนใดๆ
- ϵ_m คือ ความเค้นสูงสุด
- y คือ ระยะห่างระหว่างแกนใดๆกับแกนสะเทิน (เมตร)
- c คือ ระยะห่างที่มากที่สุดจากแกนสะเทิน (เมตร)
- ρ คือ รัศมีความโค้งของการโค้งงอเทียบกับแกนสะเทิน (เมตร)
- θ คือ มุมความโค้งของการโค้งงอ (องศา)

จากกฎของฮุก (Hooke's law) สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นได้ ดังนี้

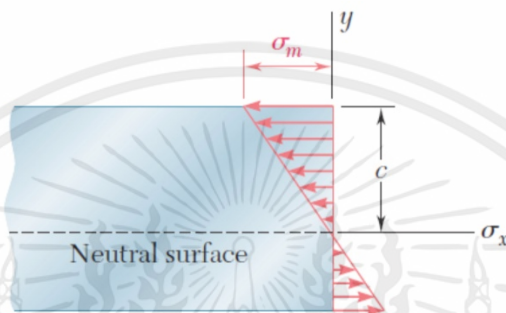
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_x = -\frac{y}{c}\sigma_m \quad (2-11)$$

โดยที่

σ_x คือ ความเค้นดัด ณ แกนใดๆ (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_m คือ ความเค้นดัดสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด

(รูปจาก: Mechanics of Material 7th edition, Ferdinand P.Beer)

เมื่อการโก่งงอที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์ผ่านแกนสะเทินและจุดศูนย์กลางของวัตถุโดยมีหน้าตัดเป็นรูปใดๆ สามารถหาค่าได้จาก

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad \sigma_x = -\frac{My}{I} \quad \frac{1}{\rho} = -\frac{M}{EI} \quad S = \frac{I}{c} \quad (2.12)$$

โดยที่

M คือ โมเมนต์ที่หน้าตัดใดๆ (นิวตันต่อตารางเมตร)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (เมตรยกกำลังสี่)

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตันต่อตารางเมตร)

S คือ มอดูลัสสัดส่วนความยืดหยุ่น (ลูกบาศก์ตารางเมตร)

2.6.3 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในระบบสามมิติ

พิจารณาอนุภาคหนึ่งที่มีมิติเป็น d_x , d_y และ d_z บนระบบพิกัดฉากคาร์ทีเซียน ดังรูปที่ 2.x โดยความเค้นตั้งฉากนั้นจะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของอนุภาคในแต่ละด้าน คือ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ และความเค้นเฉือนนั้นมีทิศทางขนานไปกับพื้นผิวของอนุภาค คือ $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

จากสมดุลโมเมนต์ของอนุภาค จะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2-13)$$

ความสัมพันธ์ของการกระจัดของความเครียดคือ

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2-14)$$

เมื่อ u, v, w คือ ค่าการกระจัดตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \gamma_{yx} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} = \gamma_{xz} \end{aligned} \quad (2-15)$$

และสามารถนำไปเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad \{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-16)$$

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบไอเซนโทรปิก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจะสามารถ เขียนได้ว่า

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2-17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $[D] = \text{Constitutive Matrix}$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

2.6.4 ค่าตัวประกอบความปลอดภัย

การออกแบบชิ้นงานจะต้องมีค่าเผื่อไว้สำหรับการออกแบบ เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุของชิ้นงานที่ทำ การออกแบบนั้นจะสามารถรองรับภาระที่จะมากระทำไม่ให้มากเกินไปเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย ไม่เกิดการเสียรูปเกิดขึ้น จึงต้องมีการพิจารณาค่าความเค้นจากภาระที่มากระทำที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุของชิ้นงานเกิดความเสียหายเกิดขึ้น ภาระต้องมีค่าไม่เกินค่าของความเค้นของวัสดุที่สามารถรองรับได้

โดยค่าตัวประกอบความปลอดภัย (factor of safety: F.S) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่สามารถรองรับได้ของวัสดุ ต่อ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระที่กระทำต่อชิ้นงาน

$$\text{ค่าประกอบความปลอดภัย (F.S)} = \frac{\text{ค่าความเค้นที่สามารถรองรับได้ของวัสดุ}}{\text{ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระที่กระทำต่อชิ้นงาน}} \quad (2-18)$$

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยโดยใช้ค่าความเค้นที่รองรับได้ของวัสดุแต่ละชนิดก่อนเกิดการเสียรูปและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระที่กระทำต่อชิ้นงานคือค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณค่าความเค้นทางทฤษฎีความเสียหาย ของ von Mises เป็นไปตามสมการ

$$\text{ค่าประกอบความปลอดภัย (F.S)} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{von}}} \quad (2-19)$$

โดยที่

σ_y คือ ค่าความเค้นที่รองรับได้ของวัสดุ (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_{von} คือ ค่าความเค้นทางทฤษฎีความเสียหาย von Mises (นิวตันต่อตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 ทฤษฎีความเสียหายของ von Mises

ในการพิจารณาการเสียรูปที่เกิดจากความเค้นมากระทำยังชิ้นงานที่ออกแบบ โดยใช้การพิจารณาตามหลักของทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของพลังงาน (Distortion energy) ทำนายว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อ distortion strain energy per unit volume ของจุดใด ๆ มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า distortion strain energy per unit volume ที่ได้จากการทดสอบ Tension-test ของวัสดุชนิดเดียวกับวัสดุที่พิจารณาขณะเกิดการคราก อาจเรียกทฤษฎีนี้ว่าค่าความเค้นของ วอน มิสเซส (von Mises stress) มาพิจารณาความเค้นที่ต้องรองรับของวัสดุชิ้นงานว่าวัสดุจะเกิดความเสียหายหรือเกิดการครากของวัสดุหรือไม่ โดยจะพิจารณาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบพื้นฐานสามด้านเป็นไปตามสมการ

$$\sigma' = \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (2-20)$$

โดยที่

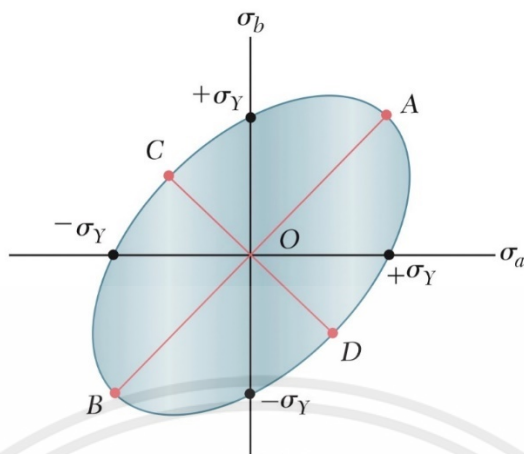
- σ_1 คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนที่ 1 (นิวตันต่อตารางเมตร)
- σ_2 คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนที่ 2 (นิวตันต่อตารางเมตร)
- σ_3 คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนที่ 3 (นิวตันต่อตารางเมตร)

ในกรณีสำหรับระนาบพิกัด x y

$$\sigma' = \left(\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)^{1/2} \quad (2-21)$$

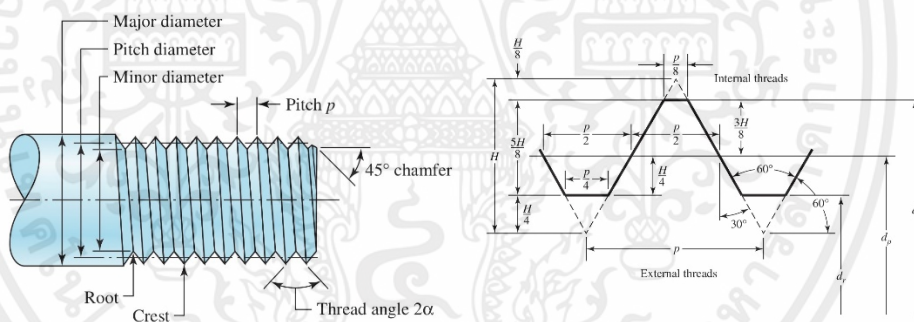
โดยที่

- σ_x คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน x (นิวตันต่อตารางเมตร)
- σ_y คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน y (นิวตันต่อตารางเมตร)
- τ_{xy} คือ คือ ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับผิวตั้งฉากแกน x และขนาดกับแกน y (นิวตันต่อตารางเมตร)



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นของทฤษฎี von Mises
(รูปจาก: Mechanics of Materials 7th edition, Ferdinand P. Beer)

2.6.6 สลักเกลียว



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของสลักเกลียว

(รูปจาก : Mechanical Engineering Design 10 Edition, Richard G. Budynas, P.403)

สลักเกลียวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดวัตถุระหว่างวัตถุสองชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เป็นการเชื่อมต่อแบบไม่ถาวรและสามารถถอดประกอบออกมาได้ โดยที่สลักเกลียวมีองค์ประกอบคือ

- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางสูงสุด (Major diameter) (มิลลิเมตร)
- d_r คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางต่ำสุด (Minor diameter) (มิลลิเมตร)
- d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดและต่ำสุด (Pitch diameter) (มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p คือ ระยะห่างระหว่างเกลียว (มิลลิเมตร)

สามารถหาค่าความแข็งของสลักเกลียว (Fastener Stiffness) ทั้งส่วนที่เป็นเกลียว (Threaded Portion) และ ส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (Unthreaded Portion) ได้จากสมการ

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (2-22)$$

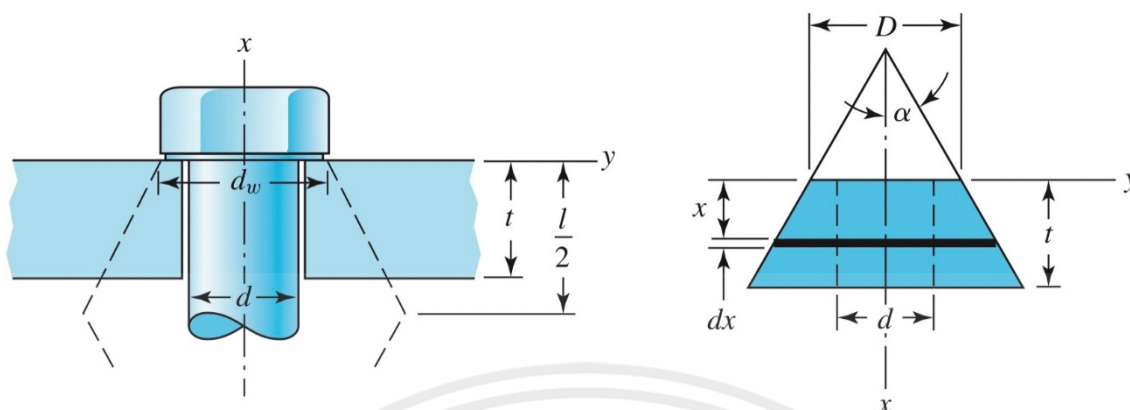
$$k_t = \frac{A_t}{l_t} \quad (2-23)$$

$$k_d = \frac{A_d}{l_d} \quad (2-24)$$

โดยที่

k_b	คือ ค่าความแข็งของสลักเกลียว (นิวตันต่อเมตร)
k_t	คือ ค่าความแข็งของสลักเกลียวตรงส่วนที่เป็นเกลียว (นิวตันต่อเมตร)
k_d	คือ ค่าความแข็งของสลักเกลียวตรงส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (นิวตันต่อเมตร)
A_t	คือ พื้นที่รับแรงของส่วนที่เป็นเกลียว (ตารางเมตร)
A_d	คือ พื้นที่รับแรงของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (ตารางเมตร)
l_t	คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียว (มิลลิเมตร)
l_d	คือ ความยาวของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (มิลลิเมตร)
E	คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (นิวตันต่อตารางเมตร)

ในการออกแบบสลักเกลียวนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงความแข็งของสลักเกลียวแล้วยังต้องคำนึงถึง ความแข็งของชิ้นงานที่ถูกยึด (Member Stiffness) อีกด้วย



รูปที่ 2.12 ตัวแปรความแข็งแรงของชิ้นงานที่ถูกยึด

(รูปจาก : Mechanical Engineering Design 10 Edition, Richard G. Budynas, P.428)

$$k_m = \frac{\pi E d \tan \alpha}{2 \ln \frac{(\tan \alpha + d_w - d)(d_w + d)}{(\tan \alpha + d_w + d)(d_w - d)}} \quad (2-25)$$

โดยที่

k_m คือ ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ถูกยึด (นิวตันต่อเมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของเกลียว (มิลลิเมตร)

d_w คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนรอง (มิลลิเมตร)

เมื่อมีแรงดึง หรือ แรงกดภายนอกมากกระทำกับสลักเกลียว (P) จะทำให้เกิดแรงที่สลักเกลียว (P_b) และแรงที่งาน (P_m)

$$P_b = \frac{k_b P}{k_b + k_m} \quad (2.26)$$

$$P_m = P - P_b \quad (2.27)$$

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (2.28)$$

โดยที่

P คือ แรงภายนอกที่กระทำกับสลักเกลียว (นิวตัน)

P_b คือ แรงที่บริเวณสลักเกลียว (นิวตัน)

- P_m คือ แรงที่บริเวณชิ้นงาน (นิวตัน)
 C คือ เศษส่วนของแรงภายนอกที่กระทำกับสลักเกลียว (ปริมาณไร้หน่วย)

สูตรคำนวณหาค่าความประกอบความปลอดภัยคือ

$$n_p = \frac{S_p}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (2.29)$$

โดยที่

- n_p คือ Proof Strength (นิวตันต่อตารางเมตร)
 σ_m คือ Midrange Stress (นิวตันต่อตารางเมตร)
 σ_a คือ Alternative Stress (นิวตันต่อตารางเมตร)

2.6.7 เพลลา

เพลลาเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากตัวโครงแคร์ด้านบนแล้วถ่ายทอนน้ำหนักไปสู่ล้อที่เชื่อมยังปลายเพลลาทั้งสองข้าง และเป็นตัวส่งกำลังในการขับเคลื่อนผ่านตัวมอเตอร์ส่งกำลังผ่านโซ่ที่ติดตั้งกับเฟืองบริเวณเพลลา ทำให้เพลลาสามารถส่งกำลังที่ได้รับไปยังล้อให้ขับเคลื่อนได้ รวมถึงมีการติดตั้งแผ่นจานเบรกเพื่อใช้ในการหยุดหรือลดความเร็วของตัวรถตรงบริเวณเพลลาในการที่เพลลารับน้ำหนักนั้นสามารถพิจารณาหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเพลลาได้ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{M_{xc}}{I_x} = \frac{F_z L_c}{\frac{\pi d^4}{64}} \quad (2.30)$$

โดยที่

- σ_x คือ ความเค้นการดัดในแนวแกน x (นิวตันต่อตารางเมตร)
 M_x คือ ค่าโมเมนต์ในแนวแกน x (นิวตันเมตร)
 c คือ ระยะมากสุดในแนวแกน y (มิลลิเมตร)
 I_x คือ second-area moment ในแนวแกน x (เมตร⁴)
 F_z คือ แรงในแนวแกน z (นิวตัน)
 L_c คือ ระยะระหว่างแรงที่กระทำกับจุดที่ยึดกับล้อ (มิลลิเมตร)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา (เมตร)

$$\tau_{xy} = \frac{4V}{3A} \quad (2-31)$$

โดยที่

τ_{xy} คือ ค่าความเค้นเฉือนที่กระทำกับเพลลา (นิวตันต่อตารางเมตร)

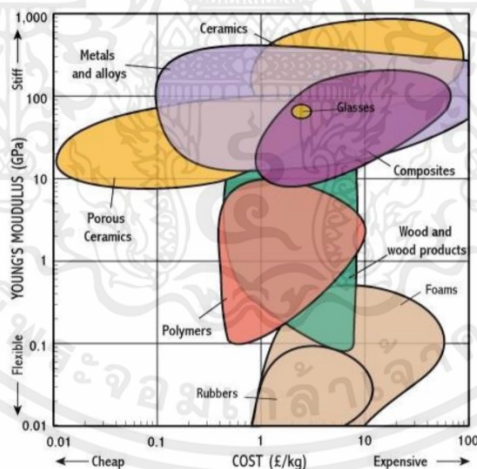
V คือ แรงที่กระทำโดยทิศขนานกับพื้นที่ (นิวตัน)

A คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเพลลา (ตารางเมตร)

2.6.8 ทฤษฎีการเลือกวัสดุ

การเลือกวัสดุถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ หากเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการออกแบบจะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

การเลือกวัสดุนั้นสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและ ราคา หากต้องการวัสดุที่มีราคาถูกและทนต่อการเสียรูปแบบยืดหยุ่น

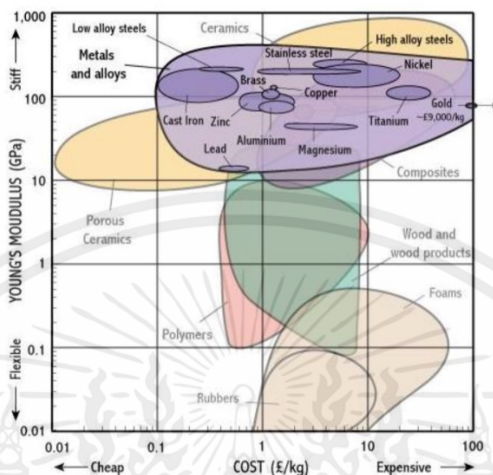


รูปที่ 2.13 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับราคา

(รูปจาก: http://www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/stiffness-cost/NS6Chart.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ว่าช่วงที่เราสนใจประกอบไปด้วยวัสดุสองกลุ่ม คือ โลหะและโลหะผสม (Metals and alloy) และ เซรามิกที่มีรูพรุน (Porous Ceramics) ซึ่งการเลือกว่าจะใช้วัสดุชนิดไหนนั้น ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานว่าจะใช้ในรูปแบบไหน



รูปที่ 2.14 แสดงวัสดุในช่วงกลุ่มโลหะและโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการออกแบบและการทดสอบ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานของการออกแบบโบกี้สำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยเริ่มจากการออกแบบรูปร่างภายนอกและให้ได้ขนาดโบกี้ตามข้อกำหนดการแข่งขัน ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโบกี้ โดยใช้การจัดระเบียบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Ansys เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า และนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบมาดูว่ากรณีใดเกิดความเสียหายมากที่สุด โดยนำกรณีดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยใช้การจัดระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Ansys กับวัสดุชนิดต่างๆ เพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสม โดยมี Safety Factor ตามที่ออกแบบไว้

3.2 การออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าตามกฎการแข่งขัน Railway Challenge

โบกี้ของหัวรถจักรไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญที่จะรองรับภาระของโครงสร้างส่วนบน และยังเป็นส่วนที่สำคัญของระบบช่วงล่าง รวมถึงเป็นส่วนที่ติดตั้งอุปกรณ์ของระบบอื่นๆที่ใช้ในหัวรถจักรไฟฟ้าด้วย

3.2.1 ปัจจัยในการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

ในการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง สำหรับการออกแบบโบกี้ในปริภูมียนิพนธ์เล่มนี้ มีปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงในการออกแบบดังนี้

1. ข้อกำหนดระยะและมุมตามกฎการแข่งขัน Railway Challenge ในการออกแบบนี้ใช้ขนาดต่างๆ ตามเงื่อนไขดังนี้

- เงื่อนไขภาระโหลด

- น้ำหนักของภาระและโครงสร้างหัวรถจักรไฟฟ้า (Vehicle weight) = 1000 กิโลกรัม

- เงื่อนไขเกี่ยวกับทาง

- ความกว้างของขนาดทาง (Track Gauge) = 12 นิ้ว หรือ 0.3048 เมตร

- รัศมีทางโค้ง (Horizontal curvature radius) = 16 เมตร

- การบิดของทาง (track twist gradient) = 6 มิลลิเมตร ต่อ 250 มิลลิเมตร

- มุมลาดของราง (Rail cant angle) = 2.4 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เงื่อนไขเกี่ยวกับระยะและขนาดของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

- เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (Wheel diameter) = 250 มิลลิเมตร
- ความกว้างของโบกี้สูงสุด (Maximum width of bogie frame) = 660 มิลลิเมตร
- ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง (Back-to-Back) = 288.42 มิลลิเมตร

2. เงื่อนไขเกี่ยวกับรูปทรงของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

- มีพื้นที่สำหรับการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ของแต่ละระบบ เช่น ติดตั้งระบบการกันสั่นสะเทือน ติดตั้งระบบขับเคลื่อนและชุดสายพาน ระบบเบรก ชุดทดกำลัง เป็นต้น
- สามารถรองรับน้ำหนักและการสั่นสะเทือน ซึ่งทำให้ยากต่อการพลิกคว่ำ
- รูปทรงง่ายต่อการผลิต ไม่มีความซับซ้อนในประกอบและแยกชิ้นส่วน

3. เงื่อนไขเกี่ยวกับการรับแรงของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

- สามารถรับแรงบิด แรงดัด โมเมนต์ และการเกิดความเค้น ความเครียดบนจุดต่าง ๆ ของ โบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า
- ค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 4 ในกรณีที่เกิดความเสียหายมากที่สุดส่วนในกรณีอื่น ๆ กำหนดค่าตัวประกอบความปลอดภัยไม่เกิน 5

4. เงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุ

- หาซื้อได้ง่าย
- ราคาถูก
- คุณภาพดี

3.2.2 เครื่องมือ

- AutoCAD
- SOLIDWORKS
- Ansys

3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

1. กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ ตามข้อกำหนดของ Railway Challenge เท่ากับ 250 มิลลิเมตรเพื่อที่จะนำไปพิจารณาขนาดของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าที่สามารถเข้าโค้งได้โดยไม่เกิดการชดกับบรางในทางโค้ง

2. ใช้วิธีการทางเรขาคณิตหาระยะระหว่างเพลาส่งสุดท้ายที่จะทำให้เกิดการชดกักระหว่างล้อกับรางเมื่อรถไฟเข้าทางโค้ง ตามวิทยานิพนธ์ของรุ่นพี่ที่คำนวณมาแล้ว คือระยะ GH เพื่อหาขอบเขตของระยะระหว่างเพลาส่งที่เป็นไปได้ โดยเริ่มจากการวาดทางโค้งกว้าง 12 นิ้ว และมีรัศมีทางโค้ง 16 เมตร จากนั้นทำการวาดโครงโบกี้ดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงการหาระยะระหว่างล้อของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าสูงสุด (Maximum bogie wheelbase)

จากการวิเคราะห์จะได้สมการความสัมพันธ์ว่า

$$\begin{aligned} 2 \cdot \left(\cos^{-1} \frac{R_{in}^2 + AE^2 - R_{out}^2}{2 \cdot R_{in} \cdot AE} - \angle AEC \right) - 180^\circ \\ = \cos^{-1} \frac{2 \cdot R_{in}^2 - (GH - CE)^2}{2 \cdot R_{in}^2} \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\text{โดย } R_{in} = R - \frac{\text{Gauge}}{2}$$

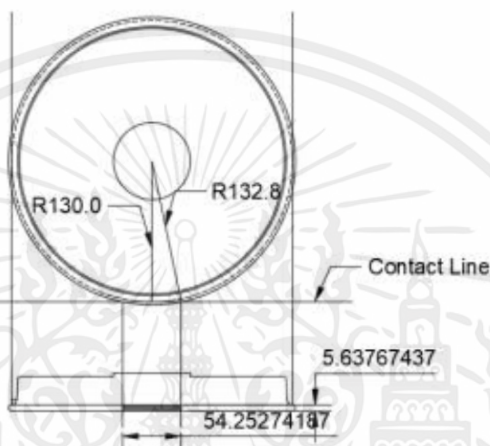
$$R_{out} = R + \frac{\text{Gauge}}{2}$$

$$AE = \sqrt{AC^2 + CE^2}$$

$$\angle AEC = \tan^{-1} \left(\frac{AC}{CE} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปัญหาในความสัมพันธ์นี้ คือ ระยะ AC และ CE นั้นควรมีค่าเป็นเท่าใดเพื่อที่จะหาค่าทั้งสองดังนั้นก็
ต้องเขียนแผนภาพของล้อรถไฟขณะที่กำลังสายเพื่อดูว่าระยะที่ล้อเกิดการสายเข้าใกล้รางมากที่สุดโดยไม่เกิดการ
เกยออกจากรางนั้นมีค่าเป็นเท่าใดซึ่งกำหนดให้ตำแหน่งที่ล้อจะชิดกับรางมากที่สุดก่อนจะที่เกยออกจากรางอยู่
บริเวณบังใบล้อโดยวัดขึ้นมาจากโคนล้อขึ้นมา 5 มิลลิเมตร นำไปวาดลงในโปรแกรม AutoCAD ได้ดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงการหาระยะ AC และ CE

จากรูประยะก่อนที่ล้อจะเกยรางมีระยะ 130 มิลลิเมตรวัดจากจุดศูนย์กลางของล้อ เมื่อฉายภาพบริเวณที่
ล้อสัมผัสกับรางจะได้พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยวัดระยะได้เป็น 54.253 มิลลิเมตร ซึ่งระยะแนวสัมผัสนี้จะเป็นระยะ
ที่ทำให้ล้อขัดกับรางเมื่อเข้าทางโค้งหรือระยะ CE นั้นเองสำหรับระยะ AC จะเกิดจากผลรวมความหนาของ 2 ภาพ
ฉาย กับระยะระหว่างของล้อทั้งสองข้าง จะทำให้ได้ระยะ AC มีค่าเท่ากับ

$$AC = (2 \times 5.6375) + 288.42 = 299.695 \text{ มิลลิเมตร}$$

ทำการแทนค่าลงไปในสมการที่ 3-1 จะได้ค่าระยะระหว่างเพลาสองเพลาส่งสุดที่จะทำให้เกิดการขัดกันระหว่างล้อ
กับราง มีค่าเท่ากับ

$$GH = 4.318186 \text{ เมตร}$$

จะได้ขอบเขตของระยะระหว่างเพลาคือ มากกว่าสองเท่าของระยะครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ
และน้อยกว่าระยะ GH กล่าวคือ

$$0.250 \text{ เมตร} < \text{ระยะห่างระหว่างเพลาคือ} < 4.318 \text{ เมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงเลือกออกแบบให้โบกี้หัวรถจักรไฟฟ้ามีขนาดความกว้างเท่ากับ 544.3 มิลลิเมตร มีความยาวเท่ากับ 930 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 215 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขนาดเสกัลที่อิงมาจากขนาดโบกี้ของจริงจาก BOGIE SF500 ที่ใช้ในรถไฟความเร็วสูง ICE ของบริษัท SIEMENS เป็นขนาดที่ไม่เกินตามข้อกำหนดและไม่เกินขนาดที่รุ่นพี่ได้คำนวณขนาดตัวหัวรถจักรขนาดเล็กไว้

3. การเลือกขนาดของชิ้นส่วนคานด้านข้างและคานด้านตัดขวาง

ชิ้นส่วนคานด้านข้าง

ขนาดความยาวโครงโบกี้ ออกแบบโดยอิงจากขนาดที่เหมาะสมและสวยงามพอที่จะสามารถออกแบบ Swing Arm ให้มีเสกัลและขนาดที่เหมาะสมได้และที่สำคัญต้องไม่เกินเกณฑ์ที่ Rail Challenge ซึ่งมีขนาด 930 มม. กำหนดตัวโครงโบกี้มีความหนา 65 มม. ซึ่งสามารถรองรับสปริงและ Spring Unit ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. เพื่อใช้ใน Swing Arm ตามการคำนวณของกลุ่มความเสถียรและความนุ่มนวลในการเคลื่อนที่ของโบกี้หัวรถจักรขนาดเล็กโดยโครงโบกี้ที่ทำจากเหล็กตันซึ่งมั่นใจในความแข็งแรงได้ดี

ขนาดความกว้างหัวรถจักรขนาดเล็ก ออกแบบให้มีขนาดเท่าความยาวระหว่างเพลลาในส่วนที่เป็นฐานรองล้อซึ่งมีขนาด 518 มม. เพื่อไม่ให้ตกรางแต่ในส่วนข้างบนออกแบบอยู่ขนาด 544.43 มม. ซึ่งเป็นขนาดที่รองรับระบบทั้งหมดที่อยู่ภายในรถไฟได้

ความสูงโครงโบกี้ ออกแบบโดยเน้นเพื่อให้รองรับกับขนาดความสูงของ Swing Arm และขนาดความยาวสปริงขนาด 100 ม. และระยะยึดหดสปริงที่มีระยะประมาณ 10 มม. ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดนี้โครงโบกี้มีความสูงอยู่ที่ 215 มม. จากระยะต่ำสุดของโครงโบกี้ถึงระยะสูงสุดของโครงโบกี้

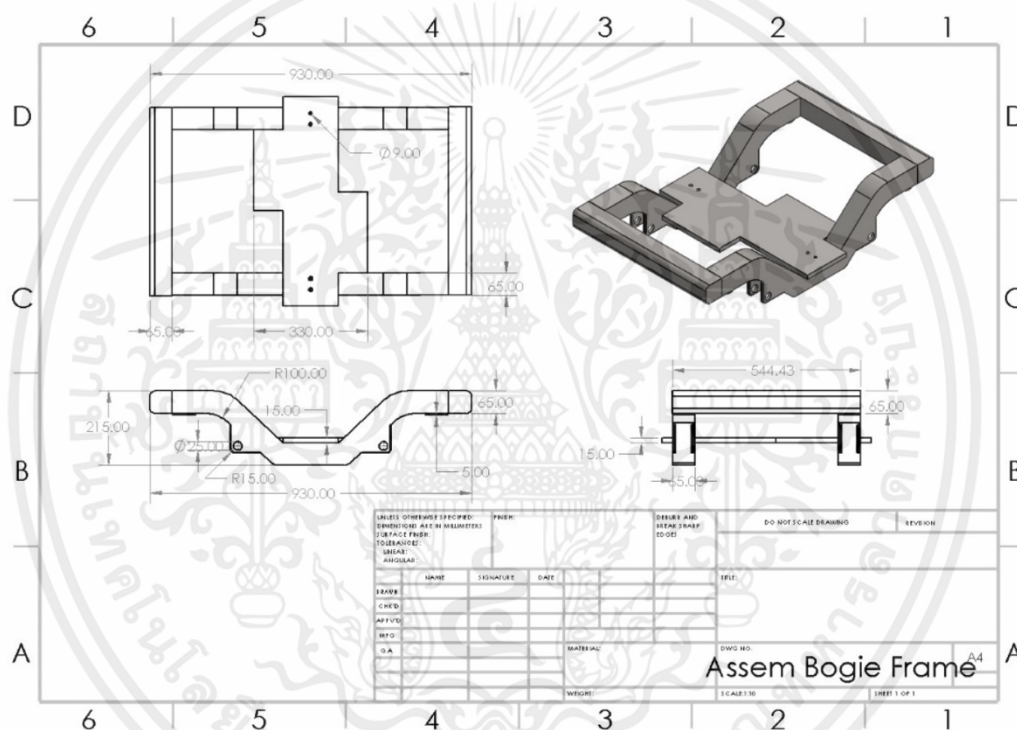
ชิ้นส่วนคานด้านตัดขวาง

ความกว้างของด้านตัดขวาง ออกแบบให้ขนาดเท่ากับส่วนที่เว้าของโครงโบกี้ที่มีลักษณะเป็นรูปตัวยูเป็นแผ่นตรงขนาด 160 มม. และรองรับการติดตั้งระบบ Air Suspension หรือ Secondary Suspension ซึ่งมีส่วนช่วยในการลดการสั่นสะเทือนนอกเหนือจากสปริง

ความยาวของด้านตัดขวาง ออกแบบให้รองรับการติดตั้งระบบ Air Suspension หรือ Secondary Suspension ด้วยเช่นกันและนอกจากนี้รวมไปถึงระบบเบรกและการติดตั้งระบบขับเคลื่อนด้วยซึ่งต้องมีขนาดที่สามารถรองรับได้ซึ่งมีขนาดความยาวอยู่ที่ 544.43 มม. และนอกจากนี้ด้านบนของ Secondary Suspension ยังมีการติดตั้ง Bolster เพื่อรองรับติดตั้งและเชื่อมต่อกับตัว Car Body

ความสูงของแผ่นที่รองรับ ทำการออกแบบโดยพิจารณาจากการที่ไม่มีการรับแรงในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดแนว ดังกล่าวและต้องมีการเจาะรูเพื่อเพื่อใช้ น็อตในการยึดจึงไม่ใช่ระยะที่มากเกินไปเพื่อให้่ายในการเจาะรู

3. ออกแบบรูปทรงของโบกี้ในโปรแกรม SOLIDWORKS โดยเน้นความสวยงามของตัวโครงโบกี้ให้เหมือนกับรถไฟความเร็วสูงและสามารถใช้งานได้จริงสามารถรับแรง การสั่นสะเทือนขณะวิ่งที่มากกระทำต่อตัวโบกี้ขณะวิ่งได้สามารถจัดวางอุปกรณ์ที่อยู่ตามระบบต่าง เช่น ระบบป้อนลม ระบบขับเคลื่อน ระบบเบรก เป็นต้น



รูปที่ 3.3 แสดงภาพเขียนแบบของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

ปัจจัยการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า	ค่าเงื่อนไข	ค่าออกแบบ
น้ำหนักหัวรถจักรไฟฟ้า 1 คัน (กิโลกรัม)	1000	1000
เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (มิลลิเมตร)	ไม่น้อยกว่า 200	250
ความกว้างของโบกี้ (มิลลิเมตร)	ไม่เกิน 660	544
ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง (มิลลิเมตร)	288	288

ตาราง 3.1 แสดงการเปรียบเทียบเงื่อนไขกับข้อมูลจากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเลือกวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ จุดประสงค์หลักคือต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงทนรับแรงบิดและแรงดัดได้ดีต่อการจัดหาและมีราคาที่ถูก

เนื่องจากเราต้องการผลิตโครงสร้างที่สามารถรับแรงบิดและแรงดัดได้ดี จึงเลือกใช้วัสดุในกลุ่มของ โลหะ (Metals) และโลหะผสม (Metals and alloy)

เมื่อพิจารณาวัสดุในกลุ่มโลหะและโลหะผสม พบว่ามีวัสดุที่น่าสนใจและสามารถจัดหาได้ง่าย คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel) ซึ่งอ้างอิงจากหนังสือ Materials Science and Engineering An Introduction tenth edition

AISI/SAE or ASTM	Density g/cm ³	Yield Strength MPa	Modulus of Elasticity GPa	Poisson Ratio
เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)				
A36	7.85	220-250	207	0.30
1010	7.85	180	207	0.30
1020	7.85	210	207	0.30
4140	7.85	417	207	0.30
4340	7.85	472	207	0.30
A516 Grade 70	7.85	260	207	0.30

ตาราง 3.2 แสดงคุณสมบัติเชิงวัสดุประเภทเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)

ซึ่งวัสดุที่เลือกใช้ในการทำโครงครั้นนั้นจะอ้างอิงตามตารางข้างต้นโดยการนำวัสดุนั้นๆ ไปใช้ในแบบจำลองของโครงโบกี้ และทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบความล้าของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

ในการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเราต้องคำนึงถึงความล้าของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบว่าสามารถใช้งานได้ยาวนานมากน้อยเพียงใด โดยเราจะใช้มาตรฐาน EN 13749 มาใช้ในการทดสอบความล้าของวัสดุว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

ตามมาตรฐานการทดสอบความล้าบนโครงโบกี้จะประกอบไปด้วยการทดสอบหลักและการทดสอบเพิ่มเติม โดยที่การทดสอบหลักมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าความแข็งแรงของเฟรมเพียงพอสำหรับน้ำหนักบรรทุก

หลักที่กระทำกับเฟรม ซึ่งมีแรงที่ก่อให้เกิดความเครียดในโครงสร้างเฟรมประกอบไปด้วยแรงกระทำในแนวตั้ง
แรงตามขวางและการบิดของราง

แรงกระทำในแนวตั้งเป็นไปตามสมการ

ส่วนของเสาดาค

$$F_{z1}=F_{z2}=F_z/2 \quad (3-2)$$

ส่วนของกึ่งเสาดาค

$$F_{z1qs}=F_{z2qs}=\pm \alpha F_z/2 \quad (3-3)$$

ส่วนของไดนามิก

$$F_{z1d}=F_{z2qd}=\pm \beta F_z/2 \quad (3-4)$$

และในแนวตามขวางเป็นไปตามสมการ

ส่วนของกึ่งเสาดาค

$$F_{y1qs}=F_{y2qs}=\pm 0.063(F_z+m^+g) \quad (3-5)$$

ส่วนของไดนามิก

$$F_{y1d}=F_{y2qd}=\pm 0.063(F_z+m^+g) \quad (3-6)$$

เมื่อทำการแทนค่าแรงตามสมการจะได้ว่า

แรงกระทำในแนวตั้ง

ส่วนเสาดาค

$$F_{z1}=F_{z2}=\frac{F_z}{2}=2647.55 \text{ N}$$

ส่วนของกึ่งเสาดาค

$$F_{z1qs}=F_{z2qs}=\frac{\pm \alpha F_z}{2}=\pm 0.1(2647.55)=\pm 264.755 \text{ N}$$

ส่วนของไดนามิก

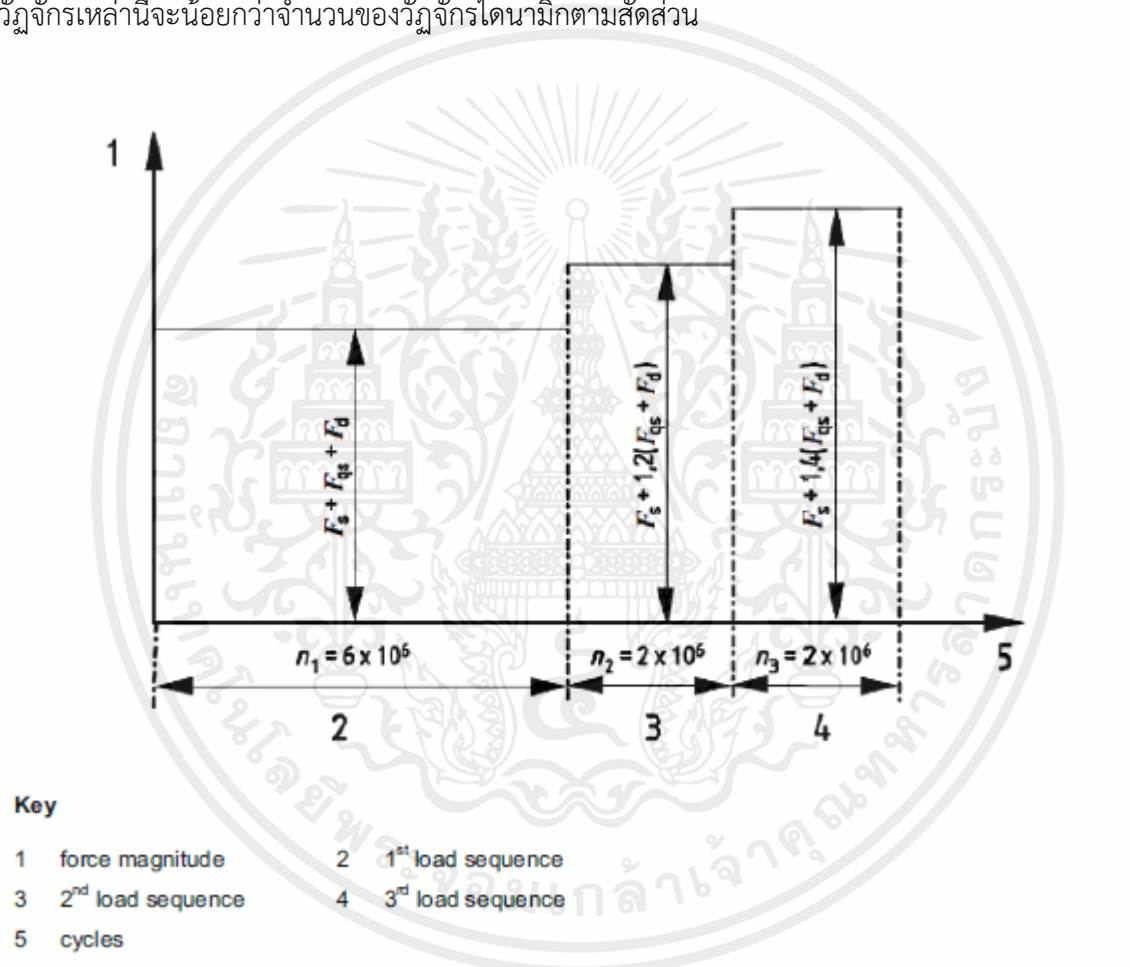
$$F_{z1d}=F_{z2qd}=\frac{\pm \beta F_z}{2}=\pm 0.2(2647.55)=\pm 529.51 \text{ N}$$

แรงตามแนวตามขวาง

$$\text{ส่วนของกึ่งสถาดิก} \quad F_{y1qs}=F_{y2qs}=\pm 0.063(F_z+m^+g)=\pm 368.958 \text{ N}$$

$$\text{ส่วนของไดนามิก} \quad F_{y1d}=F_{y2d}=\pm 0.063(F_z+m^+g)=\pm 368.958 \text{ N}$$

โดยปกติแล้ววัฏจักรของโหลดกึ่งสถาดิกจะถูกย้อนกลับทุกๆ 10 ถึง 20 ของวัฏจักรไดนามิกและจำนวนของวัฏจักรเหล่านี้จะน้อยกว่าจำนวนของวัฏจักรไดนามิกตามสัดส่วน



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงกระทำในแนวตั้งและแนวตามขวางระหว่างการทดสอบ

โปรแกรมการทดสอบความล้าประกอบไปด้วยสามขั้นตอน

โดยครั้งแรกจะประกอบด้วยวัฏจักร 6×10^6 รอบของการใช้แรงกระทำในแนวตั้งกับแนวตามขวาง ในส่วนของแรงบิดจะมีวัฏจักรอยู่ที่ 0.6×10^6 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่สองประกอบด้วยวัฏจักร 2×10^6 รอบของการใช้แรงกระทำในแนวตั้งกับแนวตามขวาง ที่ได้มาจากแรงที่ใช้สำหรับขั้นตอนแรก โดยส่วนของสถิติยังคงเดิมและในส่วนของกึ่งสถิติกับไดนามิกจะคูณด้วย 1.2 จากนั้นในส่วนของการบิดจะคูณ 1.2 สำหรับ 0.2×10^6 รอบ

ครั้งที่สามจะเหมือนกับครั้งที่สอง แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของ 1.2 จะเปลี่ยนเป็น 1.4 แทน

ในส่วนที่หนึ่งที่มีวัฏจักร 6×10^6 รอบจะได้ว่า

- แรงกระทำในแนวตั้ง $F_{z1}=0.5(F_{zs}+F_{zsq}+F_{zd})=1720.9075 \text{ N}$

- แรงตามแนวตามขวาง $F_y=F_{yq}+F_{yd}=737.916 \text{ N}$

ในส่วนที่สองที่มีวัฏจักร 2×10^6 รอบจะได้ว่า

- แรงกระทำในแนวตั้ง $F_{z1}=0.5(F_{zs}+1.2F_{zsq}+1.2F_{zd})=1800.334 \text{ N}$

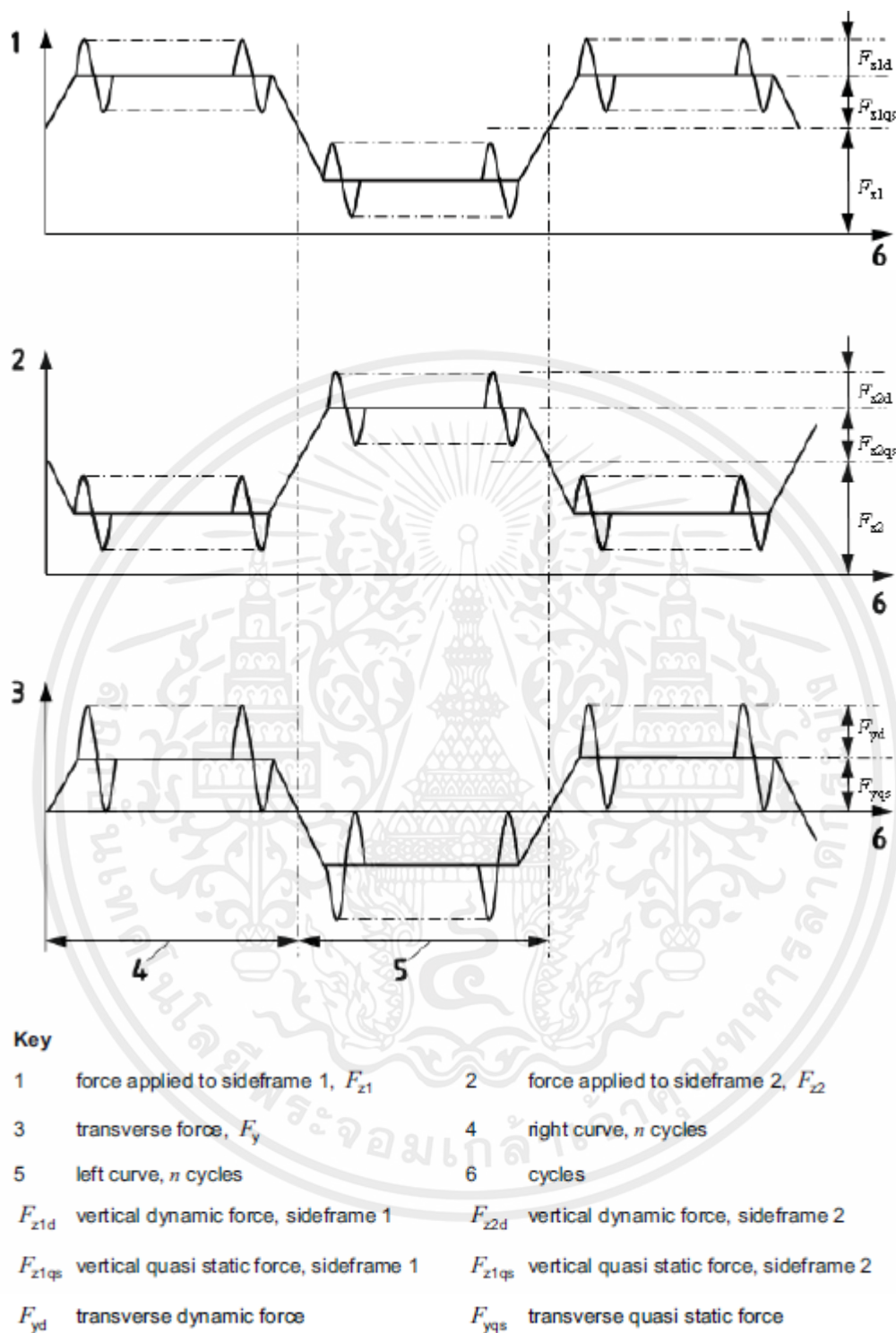
- แรงตามแนวระดับ $F_y=1.2(F_{yq}+F_{yd})=885.4992 \text{ N}$

ในส่วนที่สามที่มีวัฏจักร 2×10^6 รอบจะได้ว่า

- แรงกระทำในแนวตั้ง $F_{z1}=0.5(F_{zs}+1.4F_{zsq}+1.4F_{zd})=1879.7605 \text{ N}$

- แรงตามแนวระดับ $F_y=1.4(F_{yq}+F_{yd})=1033.0824 \text{ N}$

ส่วนประกอบไดนามิกของแรงในแนวตั้งและแนวขวางจะถูกนำไปใช้ในเฟสที่ความถี่เดียวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการจำลองของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนโครงโบกี้เช่นเดียวกับส่วนประกอบกึ่งสถิติที่ความถี่ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในทิศทางโค้ง โดยปกติแล้วทิศทางโค้งจะเปลี่ยนสลับกันทุกๆสิบถึงยี่สิบรอบของไดนามิกคอมโพเนนต์ หลักการของการทดสอบเหล่านี้แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของแรงต่างๆ



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวตามขวางตามเวลา

3.3 การวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้

- โปรแกรม SOLIDWORKS

- Ansys

3.3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys

1.) คำนวณแรงที่มากระทำตามมาตรฐาน EN13749 ซึ่งในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะพิจารณาแรงที่มากระทำในกรณีที่มีการรับภาระแบบไม่ปกติ (Static Strength Assessment in Exceptional Load case) มาใช้ในการคำนวณ โดยจะมีการใช้ตัวแปรในการอ้างอิงและออกแบบตามเงื่อนไข ดังนี้

M_v	=	1000	กิโลกรัม
m^+	=	114.45	กิโลกรัม
g	=	9.81	เมตรต่อวินาที ²
C_1	=	0	กิโลกรัม (ไม่มีคนขับ)
n_a	=	2	เพลลา
n_b	=	2	แคร่
<i>bogie wheelbase</i>	=	288	มิลลิเมตร
<i>% track twist</i>	=	6/250	(จากสนามแข่ง) กิโลกรัม

1. แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)

$$F_{z1\max} = F_{z2\max} = \frac{F_{z\max}}{2} = \frac{1.4g(M_v - 2m^+)}{4} = 2647.55 \text{ N}$$

2. แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)

$$F_y = \frac{(M_v + C_1)g}{6n_a n_b} = 408.75 \text{ N}$$

3. แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal load)

$$F_{x1} = \frac{\mu}{4} \times \frac{M_v g}{n_a} = 490.5 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision)

$$\text{Longitudinal Collision} = 3m^+g = 3368.35 \text{ N}$$

5. แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)

$$\Delta Z = \frac{\% \text{track twist} \times \text{bogie wheelbase}}{100} = 14.304 \text{ มิลลิเมตร}$$

แรงที่กระทำในแต่ละกรณี	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
แรงกระทำในแนวตั้ง Vertical Load	2647.55 N	2647.55 N	2647.55 N
แรงกระทำในแนวข้าง Transverse Load	408.75 N	-	-
แรงกระทำในแนวยาว Longitudinal Load	-	490.5 N	-
แรงจากการชนแนวยาว Longitudinal Collision	-	-	3368.35 N
แรงที่เกิดจากการบิดตัวของราง Track Twist	17.4 mm	-	-

ตาราง 3.3 แสดงค่าของแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อโบกี้ในแต่ละกรณี

การวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยโปรแกรม Ansys

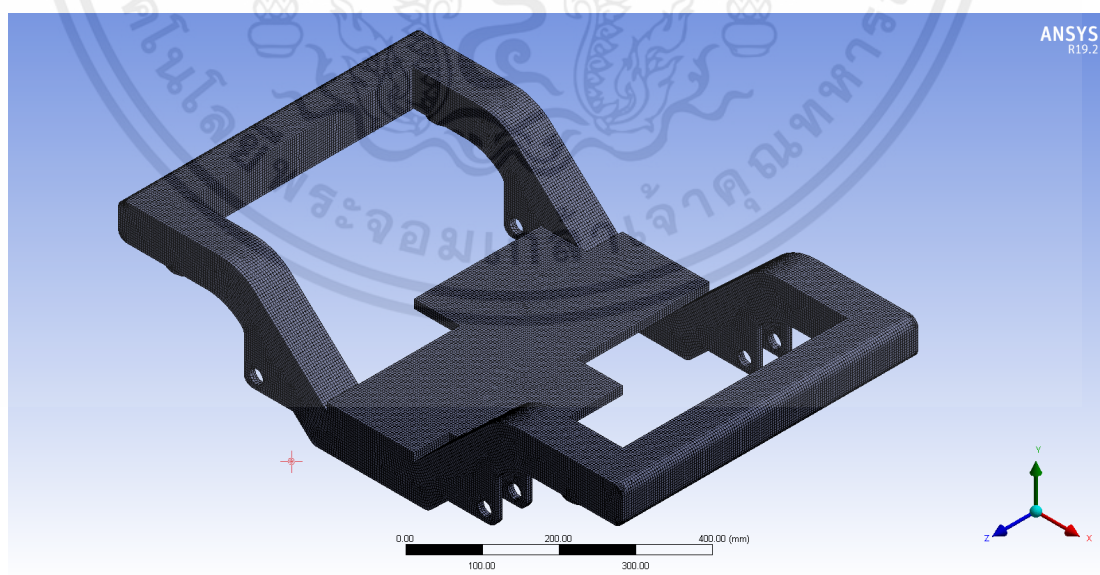
3.3.3 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความหนาแน่น อัตราส่วนปัวซอง

A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source		Description
2	Material			
3	p45c	Ger		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: p45c				
A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	490	MPa	
25	Tensile Ultimate Strength	686	MPa	
26	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

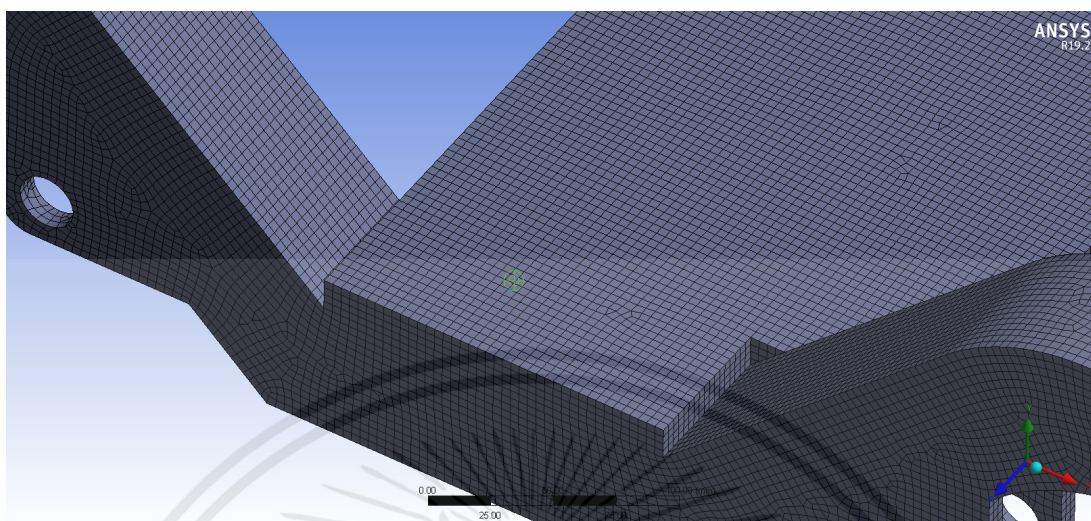
รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

3.3.4 การทำแบ่ง Mesh โดยใช้ mesh ชนิด Hex Dominant หรือ Mesh สี่เหลี่ยมสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือและเทคนิคตามที่โปรแกรม Ansys กำหนดมาขั้นตอนนี้อถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งเนื่องจากถ้าทำการแบ่ง Mesh ไม่ดีเท่าที่ควรผลลัพธ์ที่ได้ก็จะไม่มีความแม่นยำ.

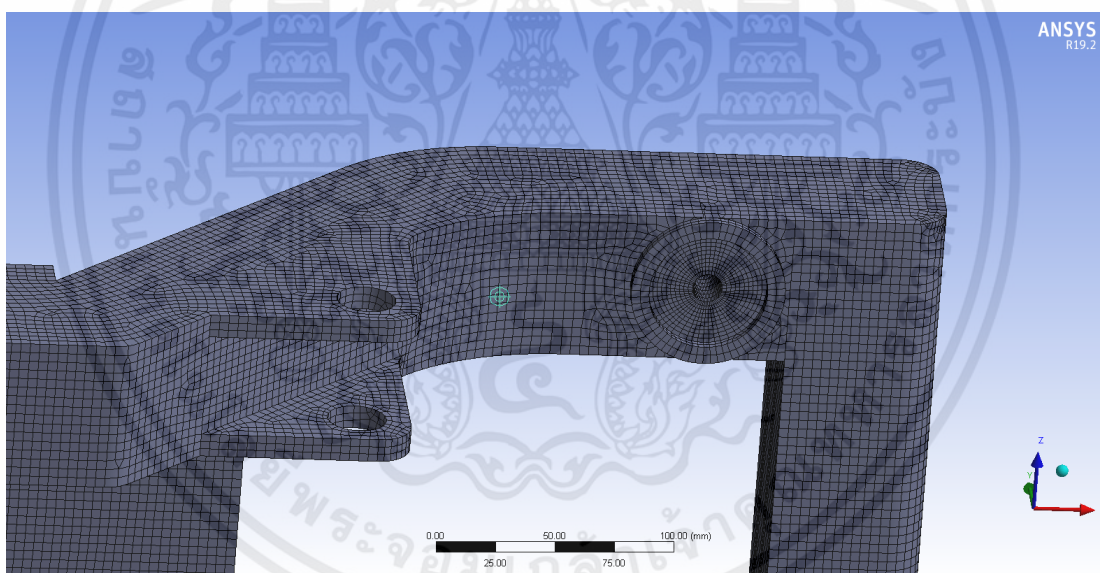


รูปที่ 3.7 แสดงการแบ่ง Mesh แบบ Hex Dominant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงการแบ่ง Mesh แบบ Hex Dominant



รูปที่ 3.9 แสดงการแบ่ง Mesh แบบ Hex Dominant บริเวณที่มีความซับซ้อนของชิ้นงานบริเวณที่มีความซับซ้อนของชิ้นงานมากก็จะแบ่ง Mesh ได้ยากมากขึ้น

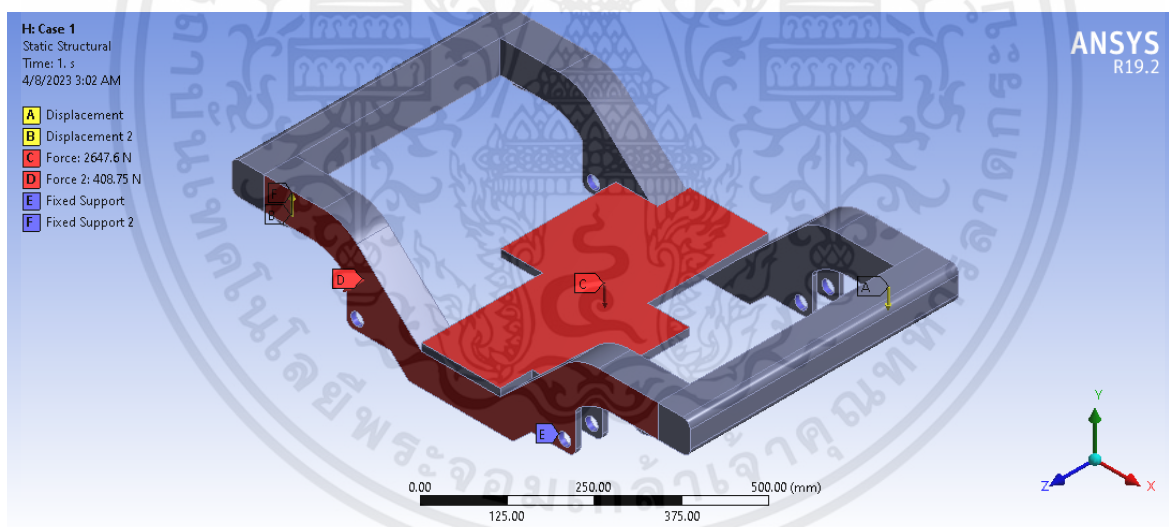
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การกำหนดแรงและเงื่อนไขในแต่ละกรณี

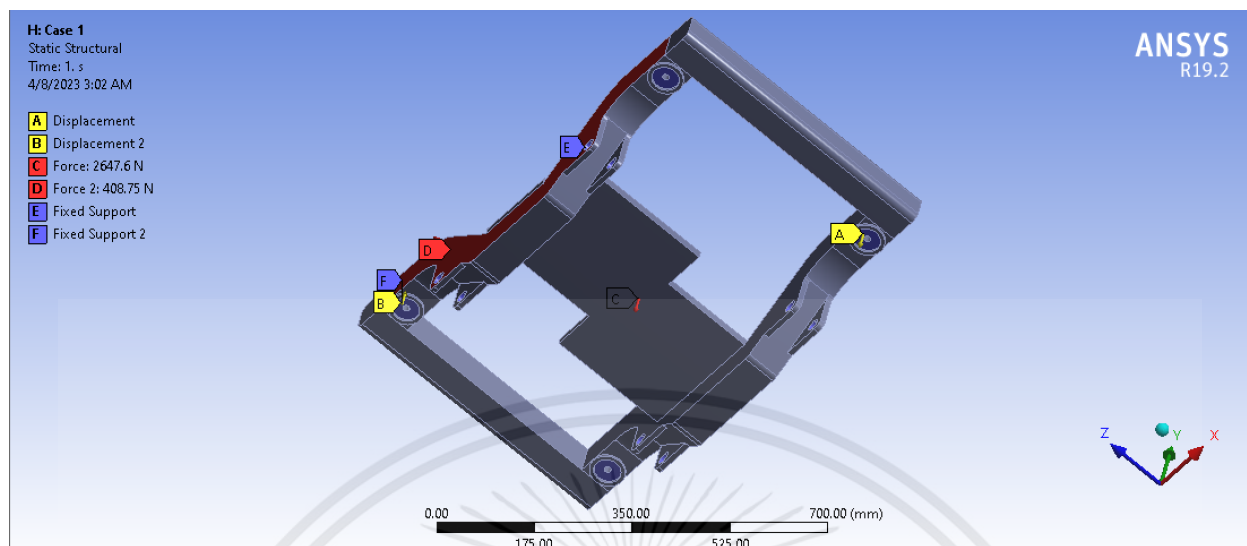
กรณีที่ 1 Riding Curve หรือ การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้ง

ชนิดของแรง	เงื่อนไขขอบเขต	ตำแหน่งและทิศทาง
F_z	ยึดฐาน 2 มุมที่อยู่ด้านตรงข้าม แนวเดียวกันและกำหนดฐานด้านที่	ใส่แรงลงไปบนฐานที่รองรับน้ำหนักตัวรถ Car Body
F_y	เหลือให้มีการกระจัดยกขึ้นเป็น	แรงที่กระทำบริเวณด้านข้างของโครงโบกี้ ซึ่งมีทิศชี้ออกจากโครงโบกี้ในทิศที่มีการ เลี้ยวโค้งในแนวแกน +Y หรือ -Y
Δz	Δz	ฐานที่ไม่ได้ถูกยึดขึ้นไปเป็นระยะ Δz

ตาราง 3. 4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขแรงใน กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้ง



รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงกรณีที่ 1

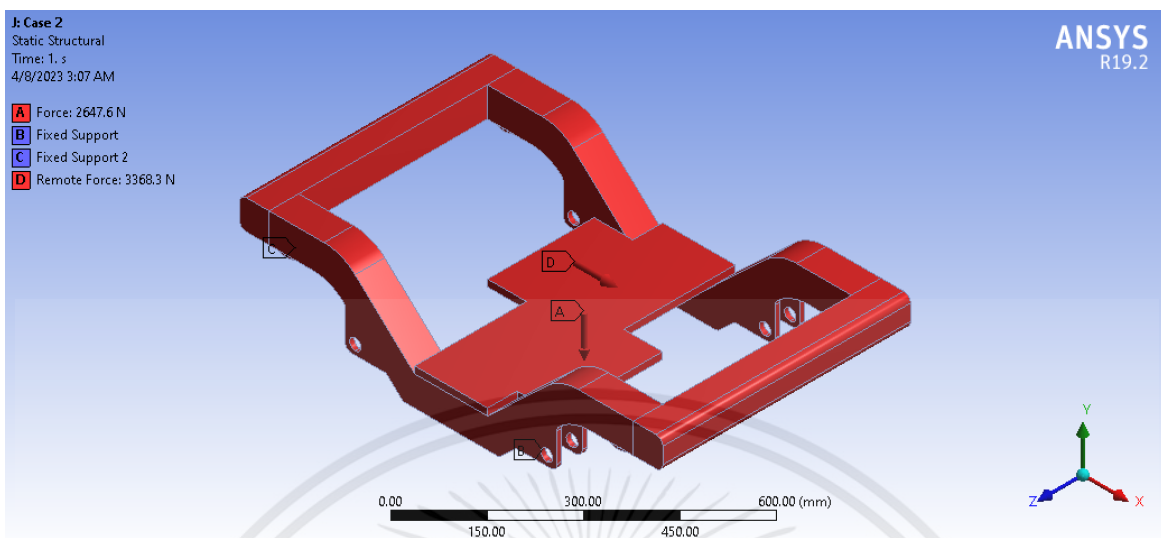


รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงในกรณีที่ 1 อีกมุมมองหนึ่ง

กรณีที่ 2 Wobbly หรือการรับน้ำหนักของโปกี้ขณะโคลงเคลง

ชนิดของแรง	เงื่อนไขขอบเขต	ตำแหน่งและทิศทาง
F_z	ยึดฐานทั้ง 4 และด้านยึด	ใส่แรงลงไปบนฐานที่รองรับน้ำหนักตัวรถ Car Body
F_x	คานบริเวณปลายทั้ง 2 ด้าน ของโปกี้	แรงที่กระทำต่อปลายเพลลาบริเวณล้อทั้ง 4 ใน ทิศแกน +X และ -X ถ้าล้อฝั่งเดียวกันจะมีแรง ในทิศเดียวกัน

ตาราง 3.5 แสดงการกำหนดเงื่อนไขแรงใน กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักของโปกี้ขณะโคลงเคลง

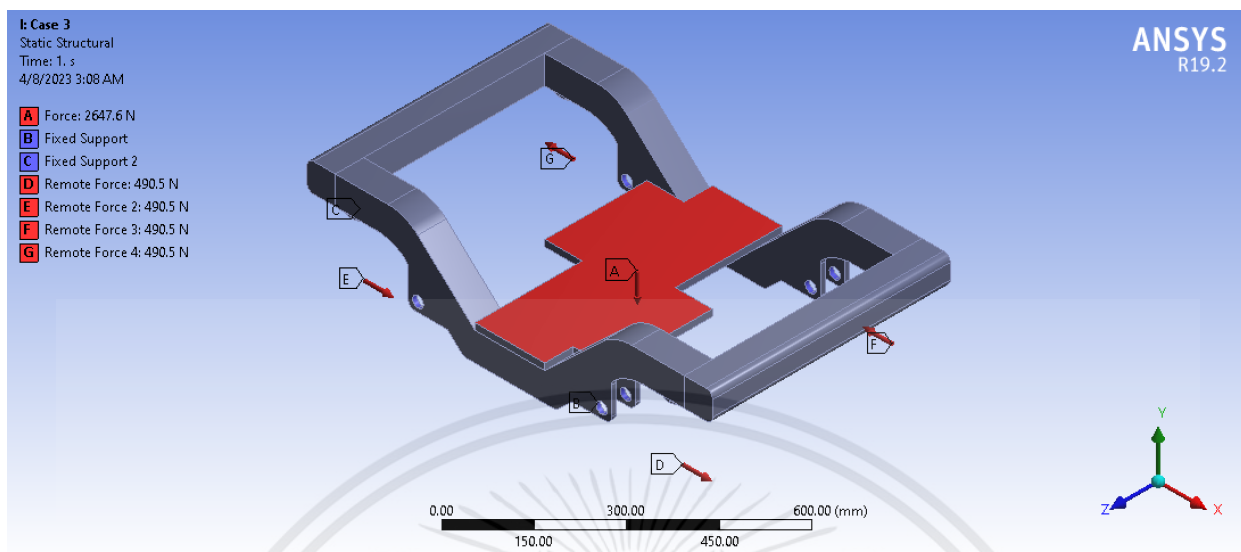


รูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงในกรณีที่ 2

กรณีที่ 3 Collision หรือ การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน

ชนิดของแรง	เงื่อนไขขอบเขต	ตำแหน่งและทิศทาง
F_z	ยึดฐานทั้ง 4 และด้านยึด	ใส่แรงลงไปบนฐานที่รองรับน้ำหนักตัวรถ Car Body
Longitudinal Collision	คานบริเวณปลายทั้ง 2 ด้านของโบกี้	ใส่แรงลงไปตรงจุดศูนย์กลางมวลหรือ Center of Mass ในทิศทางตามแนวแกน +X หรือ -X

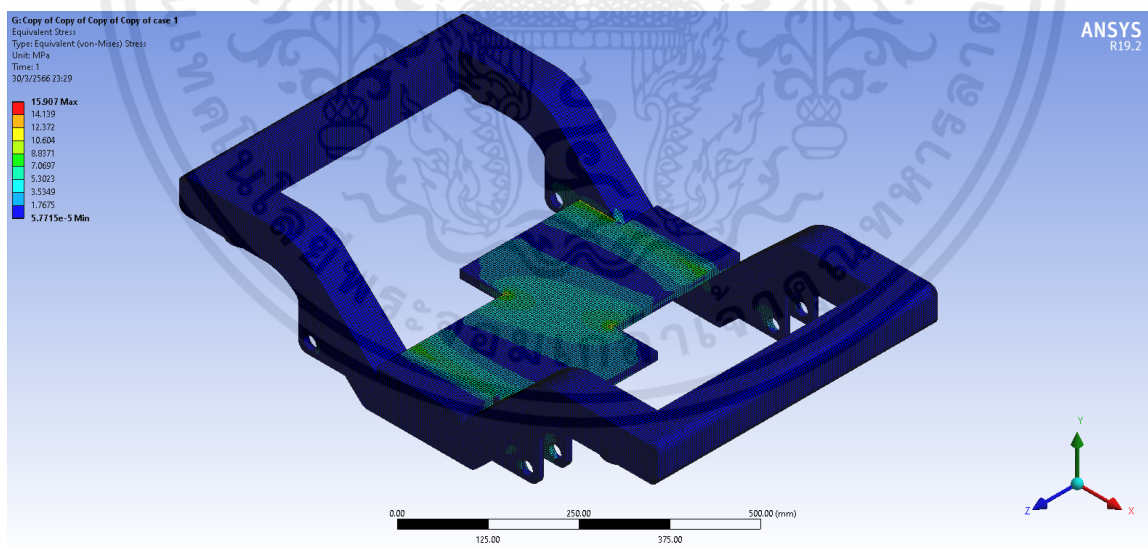
ตาราง 3.6 แสดงการกำหนดเงื่อนไขแรงใน กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งและทิศทางของแรงในกรณีที่ 3

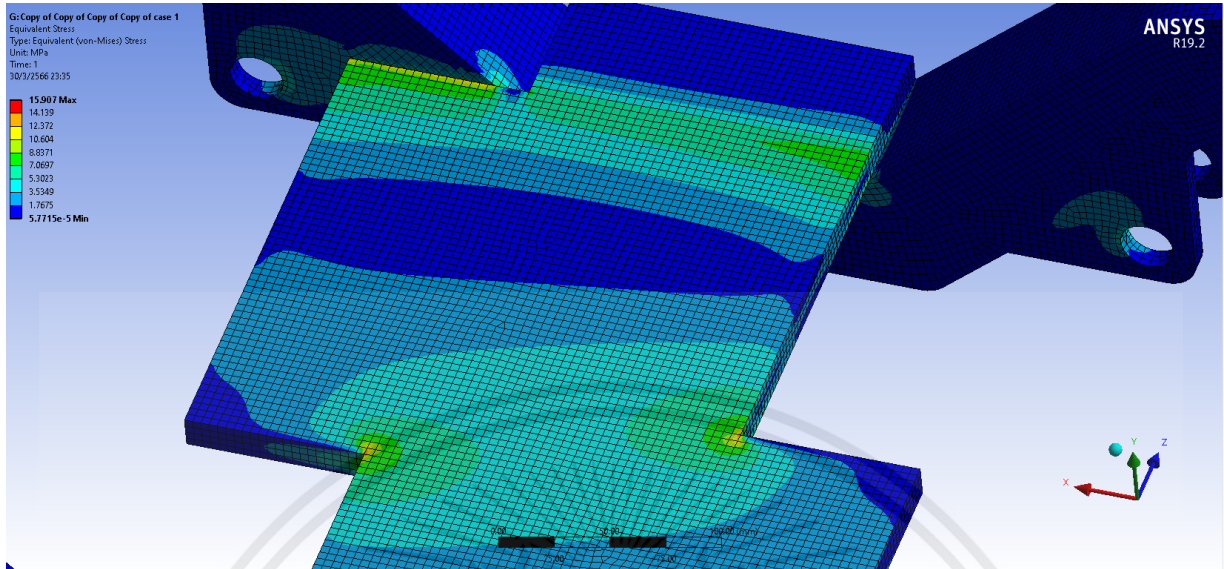
3.3.6 การทำแบบจำลองหรือ Simulation เพื่อคำนวณหาจุดต่างๆ บนโบกี้ในแต่ละกรณีและหาจุดที่มีความเค้นวอนมิสเสส (Von Mises Stress) มากน้อยเท่าไรหรือบริเวณใดที่รับภาระแรงสูงสุด

กรณีที่ 1 Riding Curve หรือ การรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้ง

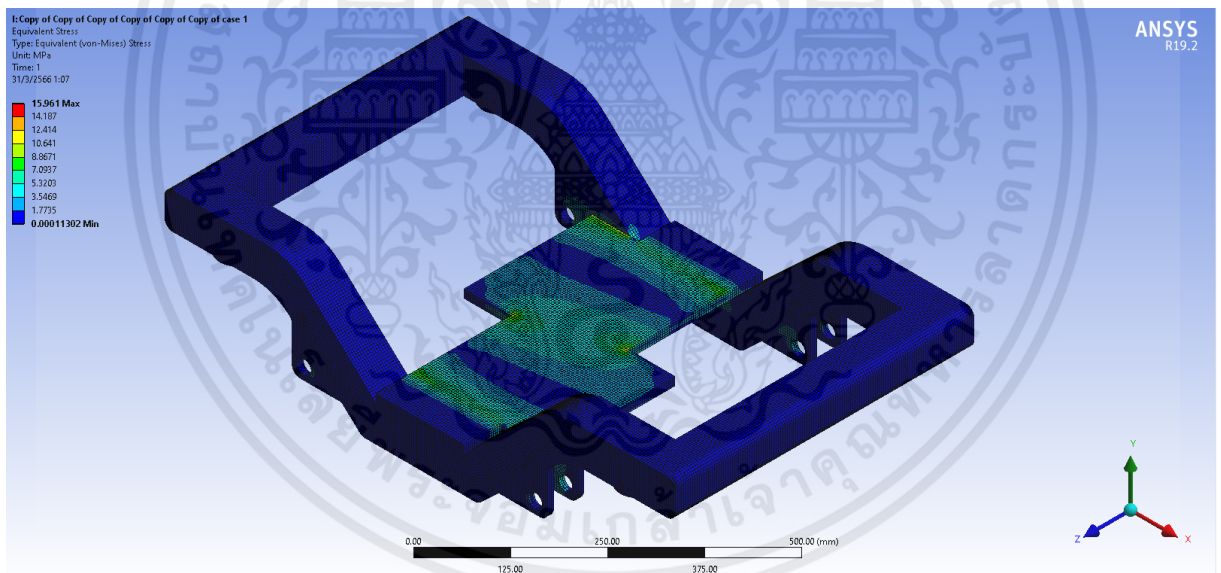


รูปที่ 3.14 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้งในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

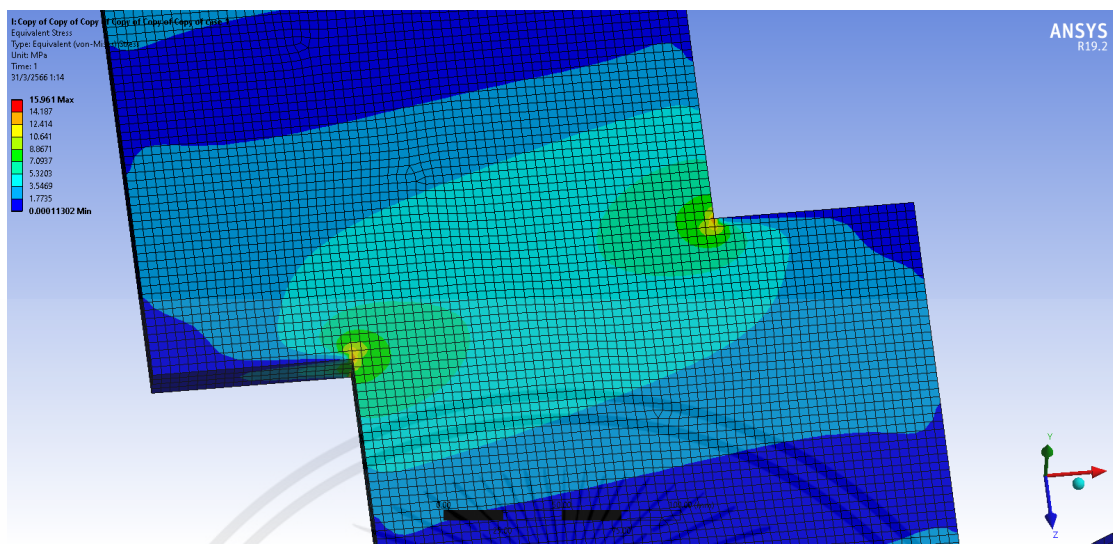


รูปที่ 3.15 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเข้าโค้งในกรณีที่ 1
กรณีที่ 2 Wobbly หรือการรับน้ำหนักของโบกี้โคลงเคลง



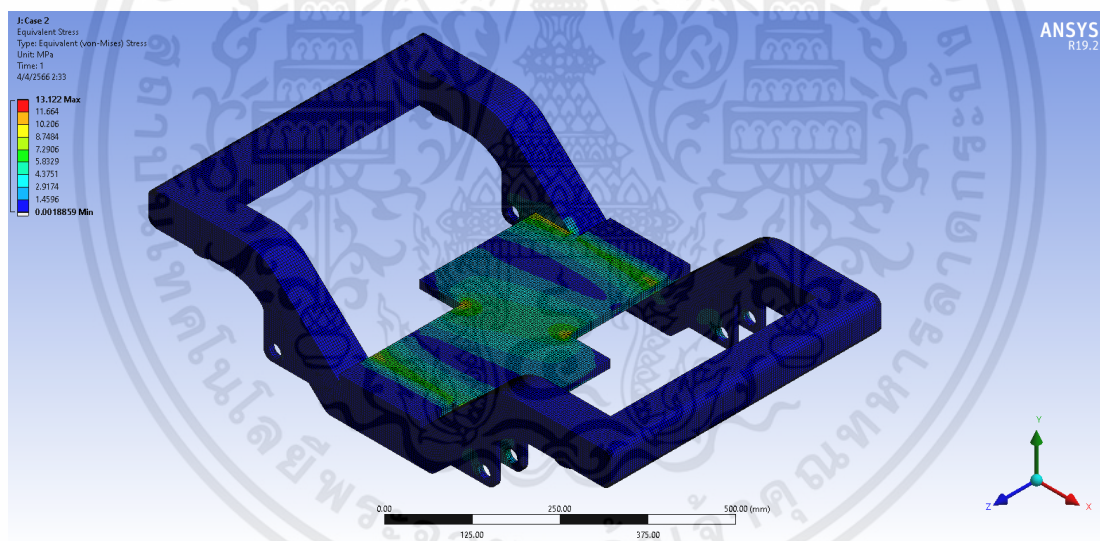
รูปที่ 3.16 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะโคลงเคลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



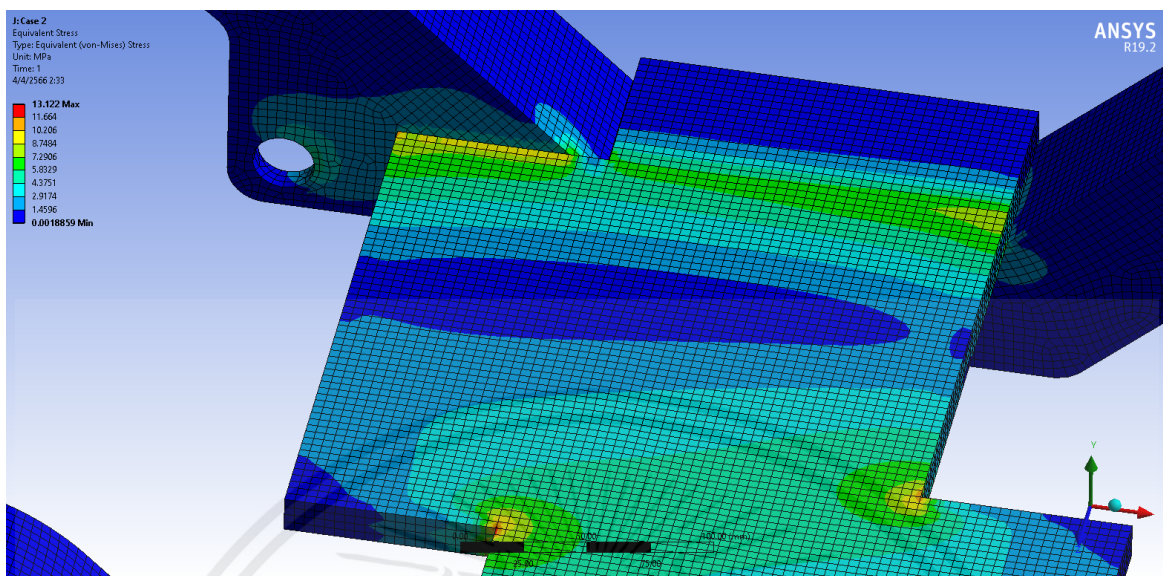
รูปที่ 3.17 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะโคลงเคลง

กรณีที่ 3 Collision หรือการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน



รูปที่ 3.18 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบกี้ขณะเกิดการชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงผลจากการทำแบบจำลองการรับน้ำหนักของโบลท์ขณะเกิดการชน

3.3.7 การจำลองเพื่อหาค่าลู่เข้าของ (Convergent)

เนื่องจากการจำลอง Finite Element โดยการใช้โปรแกรม Ansys อาจเกิดการแกว่งของผลลัพธ์ที่ได้ จึงต้องทำการลดขนาดของอิเลเมนต์ลงเรื่อยๆ หรือเพิ่มจำนวนอิเลเมนต์เพื่อหาค่าลู่เข้าของความเค้นวอนมิสเสส (von Mises Stress) ที่แม่นยำที่สุด

3.3.8 การหาค่า Safety Factor หรือค่าตัวประกอบความปลอดภัย โดยการใช้ค่าความเค้นวอนมิสเสส (von Mises Stress) ของวัสดุที่ใช้มาคำนวณในสมการที่ 2-19

3.3.9 หาค่า Safety Factor ที่มีค่าความปลอดภัยน้อยที่สุด เพื่อใช้ในการคำนวณหากรณีที่เกิดความเสียหายมากที่สุดเพื่อใช้ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุด

3.3.10 การเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุด หลังจากทราบแล้วว่ากรณีใดคือกรณีที่พบความเสียหายมากที่สุดแล้วให้นำกรณีนั้นมาพิจารณาอีกรอบโดยที่ขนาดอิเลเมนต์ที่ทำการจำลองมีขนาดเท่ากันทุกประการในแต่ละวัสดุโดยเปลี่ยนเป็นวัสดุที่พิจารณาให้ครบตามที่คัดเลือกและสนใจโดยคำนวณค่า Safety Factor ของวัสดุแต่ละชนิด

3.3.11 หาค่า Safety Factor ที่เหมาะสมกับกรณีอื่นๆ หลังจากทราบวัสดุที่ใช้แล้วนำมาหาค่า Safety Factor ที่เหลืออีก 2 กรณี

3.4 การประกอบชิ้นส่วน

3.4.1 การทำ Swing Arm

ทำการตัดแผ่นเหล็กขนาดที่ออกแบบไว้เจาะรูเพื่อเป็นที่ยึดกับ Bearing ซึ่งจะสวมในลักษณะหงายหน้า และทำการตัดแผ่นเหล็กอีกแผ่นหนึ่งประกบกับแผ่นด้านบนเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมกับตัวบ็อกซ์ก็จะได้แผ่น Swing Arm ตามที่ต้องการหลังจากนั้นทำการเชื่อมกับท่อหรือเหล็กที่เจาะเป็นรูทำการใส่ Bush เข้าไปในท่อนั้นเพื่อเอาไว้รองรับการหมุนของ Swing Arm จากนั้นใส่ Hinge Pin จากบริษัท Misumi ขนาดเข้าไปเพื่อเป็นข้อต่อระหว่าง Swing Arm และตัวบ็อกซ์จากนั้นสวมตัวรองสปริงและ Spring Unit เข้าไปในร่องที่ทำไว้เพื่อทำเป็นฐานรองสปริงก็จะได้ Swing Arm ตามที่ต้องการ

3.4.2 การประกอบ Bearing กับเพลลาและล้อ

Bearing และ Housing ที่เลือกเป็นของบริษัท Misumi มีวิธีการประกอบดังนี้

1. หลังจากประกอบ Swing Arm เสร็จและติด Bearing ได้ Swing Arm เสร็จแล้วทำกับติด Bearing และยึดติดกับร่องที่ทำไว้
2. ทำการสวมเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มม. เข้าไปใน Bearing นั้นด้วยความระมัดระวัง
3. สวมล้อเข้าไปในเพลลาให้สุด
4. ทำการล็อกเพลลาด้วยตัวล็อกที่ติดกับ Housing ให้แน่น
5. ทำให้เหมือนกันทั้ง 2 ฝั่ง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

หลังจากทราบวิธีการทดลองและวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงค่าของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำกับโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวัสดุชนิดต่างๆ และผลการจำลองของวัสดุที่เลือกสำหรับทั้ง 3 กรณี

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลของแรงประเภทต่างๆ ที่กระทำกับโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่างๆ ตามมาตรฐาน EN13749

จากการคำนวณแรงกรณีการรับภาระแบบไม่ปกติตามมาตรฐาน EN13749 เมื่อเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงโบกี้ขึ้นได้ผลลัพธ์ดังนี้

วัสดุ	แรง				
	F _z (นิวตัน)	F _y (นิวตัน)	F _x (นิวตัน)	3m+g (นิวตัน)	ΔZ (มิลลิเมตร)
เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)					
AISI 1010	2647.55	408.75	490.5	3368.35	0.175
AISI 1020	2647.55	408.75	490.5	3368.35	0.175
ASTM A36	2647.55	408.75	490.5	3368.35	0.175
ASTM A516 Grade 70	2652.56	408.75	490.5	3346.90	0.175
ASTM A633 Grade E	2657.56	408.75	490.5	3325.44	0.175
ASTM 656 Grade I	2652.56	408.75	490.5	3346.90	0.175
เหล็กหล่อ (Cast Iron)					
ASTM A536 60-40-18	2722.64	408.75	490.5	3046.53	0.175
ASTM A536 100-70-03	2712.63	408.75	490.5	3089.44	0.175
ASTM A536 120-90-02	2712.63	408.75	490.5	3089.44	0.175
ASTM A842 Grade 250	2722.64	408.75	490.5	3046.53	0.175
ASTM A842 Grade 450	2722.64	408.75	490.5	3046.53	0.175

ตาราง 4.1 แสดงผลของแรงประเภทต่างๆ ที่กระทำกับโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่างๆ ตามมาตรฐาน EN13749

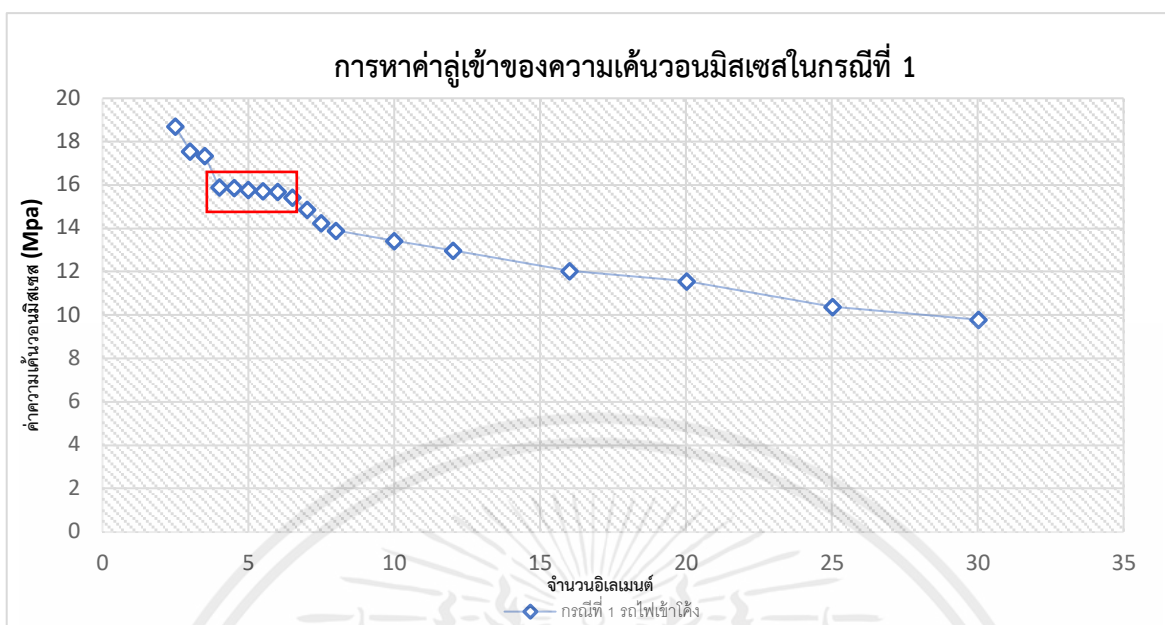
4.2.2 ผลของการจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่างๆ ในแต่ละกรณี ตามมาตรฐาน EN13749

จากวัสดุตัวอย่างที่เลือกมาคือ เหล็กหัวแดง s45c ซึ่งมีค่าความเค้นครากของวัสดุเท่ากับ 490 MPa จะได้ผลการจำลองดังแผนภาพและตารางด้านล่างตามแต่ละกรณีตามมาตรฐาน EN13749

กรณีที่ 1 รถไฟเข้าโค้ง

Von Mises (Mpa)	Element Size (mm)	Element Number	Nodes
9.79	30	8918.00	21666
10.39	25	9566.00	23155
11.57	20	11514.00	27101
12.03	16	15794.00	36406
12.98	12	25770.00	56600
13.43	10	661660.00	146303
13.89	8	109568.00	230327
14.23	7.5	125204.00	262294
14.87	7	147170.00	307056
15.43	6.5	169796.00	366063
15.698	6	205387.00	441738
15.709	5.5	253976.00	539018
15.763	5	319872.00	680937
15.879	4.5	369745.00	886305
15.907	4	412418.00	1236025
17.34	3.5	798236.00	1659987
17.56	3	1106938.00	2384168
18.69	2.5	1821500.00	3896405

ตาราง 4.2 ผลลัพธ์การคำนวณหาค่าลู่เข้าของความเค้นวอนมิสเชส



รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอีเลเมนต์กับความเค้นวอนมิสเซลในกรณีที่ 1 เพื่อหาค่าลู่เข้าตามที่แสดงในกรอบสีแดง

จากกราฟในกรณีที่ 1 รถไฟเข้าโค้งสังเกตได้ว่าค่าความเค้นวอนมิสเซลที่ประมาณ 15.9 MPa ที่ขนาดอีเลเมนต์เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ที่จำนวนอีเลเมนต์เท่ากับ 412,418 ตัว มีค่าที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ

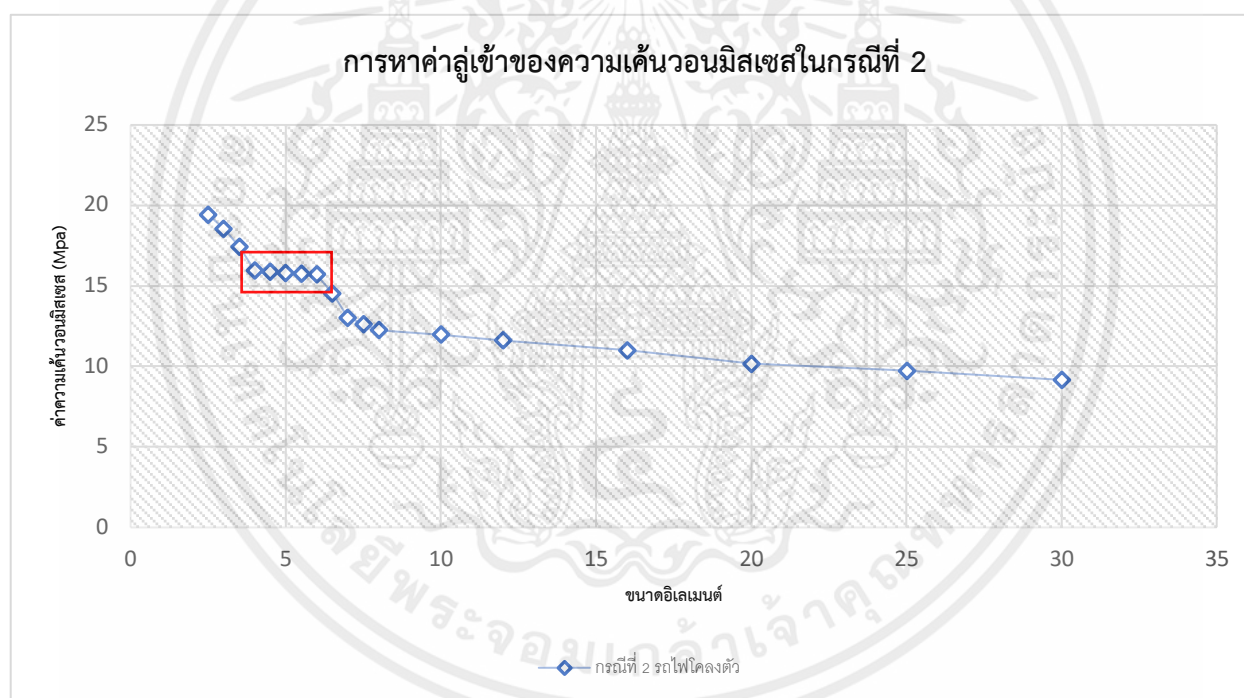
กรณีที่ 2 รถไฟโคลงตัว

Von Mises (MPa)	Element Size (mm)	Element Number	Nodes
9.1635	30	8918.00	21666
9.7299	25	9566.00	23155
10.173	20	11514.00	27101
10.998	16	15794.00	36406
11.626	12	25770.00	56600
11.969	10	661660.00	146303
12.253	8	109568.00	230327
12.623	7.5	125204.00	262294
13.019	7	147170.00	307056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14.543	6.5	169796.00	366063
15.711	6	205387.00	441738
15.754	5.5	253976.00	539018
15.792	5	319872.00	680937
15.895	4.5	369745.00	886305
15.964	4	412418.00	1236025
17.432	3.5	798236.00	1659987
18.563	3	1106938.00	2384168
19.437	2.5	1821500.00	3896405

ตาราง 4.3 ผลลัพธ์การคำนวณหาค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซล



รูป 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิเลเมนต์กับความเค้นวอนมิสเซลในกรณีที่ 2 เพื่อหาค่าคู่เข้าตามที่แสดงในกรอบสีแดง

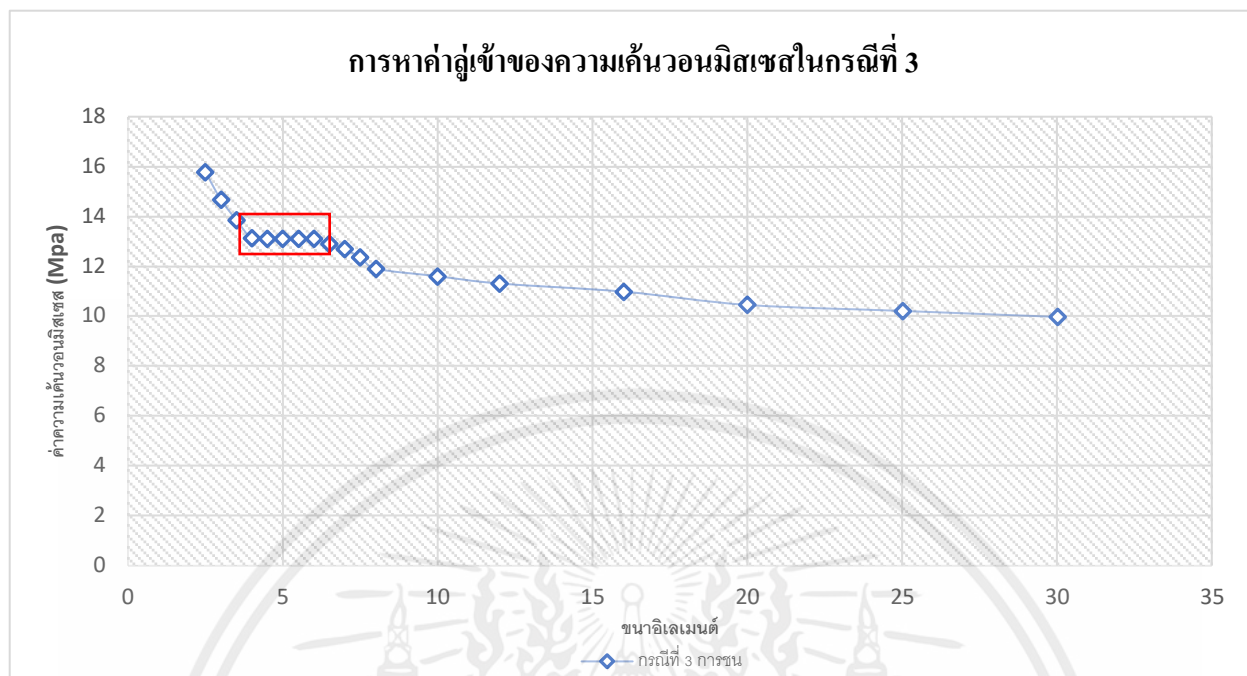
จากกราฟในกรณีที่ 2 รถไฟเข้าโคลงตัวสังเกตเห็นว่าค่าความเค้นวอนมิสเซลที่ประมาณ 16.0 MPa ที่ขนาดอิเลเมนต์เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ที่จำนวนอิเลเมนต์เท่ากับ 412,418 ตัว มีค่าที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 3 การชน

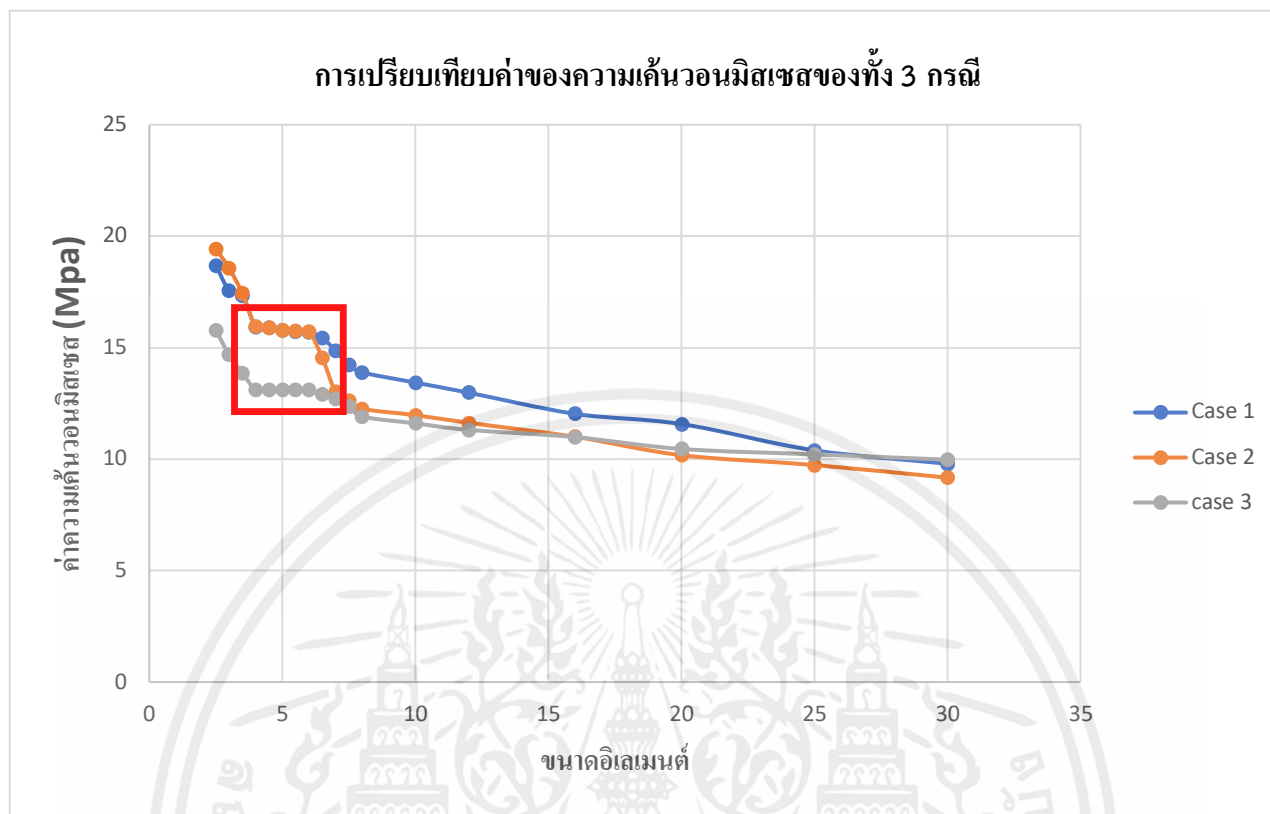
Von Mises (Mpa)	Element Size (mm)	Element Number	Node
9.973	30	8918.00	21666
10.213	25	9566.00	23155
10.453	20	11514.00	27101
10.986	16	15794.00	36406
11.311	12	25770.00	56600
11.603	10	661660.00	146303
11.907	8	109568.00	230327
12.353	7.5	125204.00	262294
12.696	7	147170.00	307056
12.904	6.5	169796.00	366063
13.093	6	205387.00	441738
13.099	5.5	253976.00	539018
13.103	5	319872.00	680937
13.109	4.5	369745.00	886305
13.124	4	412418.00	1236025
13.854	3.5	798236.00	1659987
14.674	3	1106938.00	2384168
15.78	2.5	1821500.00	3896405

ตาราง 4.4 ผลลัพธ์การคำนวณหาค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซส



รูป 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิเลเมนต์กับความเค้นวอนมิสเซลในกรณีที่ 2 เพื่อหาค่าคู่เข้าตามที่แสดงในกรอบสีแดง

จากกราฟในกรณีที่ 3 รถไฟเข้าโคลงตัวสังเกตได้ว่าค่าความเค้นวอนมิสเซลที่ประมาณ 13.1 MPa ที่ขนาดอิเลเมนต์เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ที่จำนวนอิเลเมนต์เท่ากับ 412,418 มีค่าที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นวอนมิสและจำนวน element ของการรับภาระทั้ง 3 กรณีของ เหล็กหัวแดง s45c

จากกราฟจะเห็นได้ว่ากราฟเริ่มเกิดการลู่เข้าของค่าความเค้นวอนมิสที่จำนวนอิลเมนต์ประมาณ 6 มิลลิเมตร แต่ค่าตัวประกอบความปลอดภัยจะหาที่ขนาด 4 มิลลิเมตร เพราะเป็นค่าสุดท้ายก่อนที่จะค่าความเค้นวอนมิสจะทำการลู่ออกและมีค่าที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ และเพื่อความละเอียดของผลลัพธ์ที่มากขึ้นเพราะยิ่งจำนวนอิลเมนต์น้อยจะยิ่งทำให้ผลลัพธ์มีความละเอียดมากขึ้นซึ่งค่าตัวประกอบความปลอดภัยสามารถหาได้จากสมการที่ (2-18)

	กรณีที่ 1 รถไฟเข้าโค้ง	กรณีที่ 2 รถไฟโคลงเคลง	กรณีที่ 3 รถไฟเกิดการชน
ค่าตัวประกอบความปลอดภัย	26.4	26.3	32.0

ตาราง 4.5 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้เหล็กหัวแดง s45c

จะเห็นได้ว่า กรณีที่ 1 มีค่าความเค้นวอนมิสมากที่สุดทำให้กรณีนี้มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยน้อยที่สุด ดังนั้นสำหรับวัสดุที่ได้เลือกไว้ จะทำการคำนวณแค่กรณีที่ 1 และหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ขนาดอิลเมนต์เท่ากับ 4 มิลลิเมตร เท่านั้นได้ผลลัพธ์ดังนี้

วัสดุ	ความเค้นวอนมิสเซล (MPa)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
AISI 1010	15.829	11.371
AISI 1020	15.829	12.950
ASTM A36	15.907	13.893
ASTM A516 Grade 70	15.854	16.399
ASTM A633 Grade E	16.707	22.744
ASTM 656 Grade I	16.375	33.587
ASTM A536 60-40-18	15.904	17.350
ASTM A536 100-70-03	15.904	30.363
ASTM A536 120-90-02	15.732	39.473
ASTM A842 Grade 250	15.598	11.219
ASTM A842 Grade 450	16.217	19.424

ตาราง 4.6 แสดงค่าความเค้นวอนมิสและค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่างๆ สำหรับกรณีที่ 1

จากตารางที่ 4.5 เห็นได้ว่ามีวัสดุสองชนิดที่มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยอยู่ในช่วงที่กำหนด ได้แก่ AISI 1010 และ ASTM A842 Grade 250 จึงนำวัสดุทั้งสองมาเปรียบเทียบตามเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2.1

เงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุ	AISI 1010	ASTM A842 Grade 250
หาซื้อง่าย	สามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า หาซื้อได้ในวัสดุประเทศไทย	หาซื้อได้ยากกว่า ส่วนใหญ่ใช้ในต่างประเทศ
ราคาถูก	14,000 – 18,000 บาทต่อตัน	15,500 – 31,000 บาทต่อตัน

ตาราง 4.7 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุ AISI 1010 และ ASTM A842 Grade 250 กับเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุ

จากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าวัสดุ AISI 1010 นั้นสามารถหาซื้อได้ง่าย และมีราคาที่ถูกลงกว่า ASTM A842 Grade 250 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่กำหนดไว้จึงทำการเลือก AISI 1010 เป็นวัสดุในการทำโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า

4.2.3 ผลการจำลองของแครงรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุ AISI1010 ในแต่ละกรณีตามมาตรฐาน

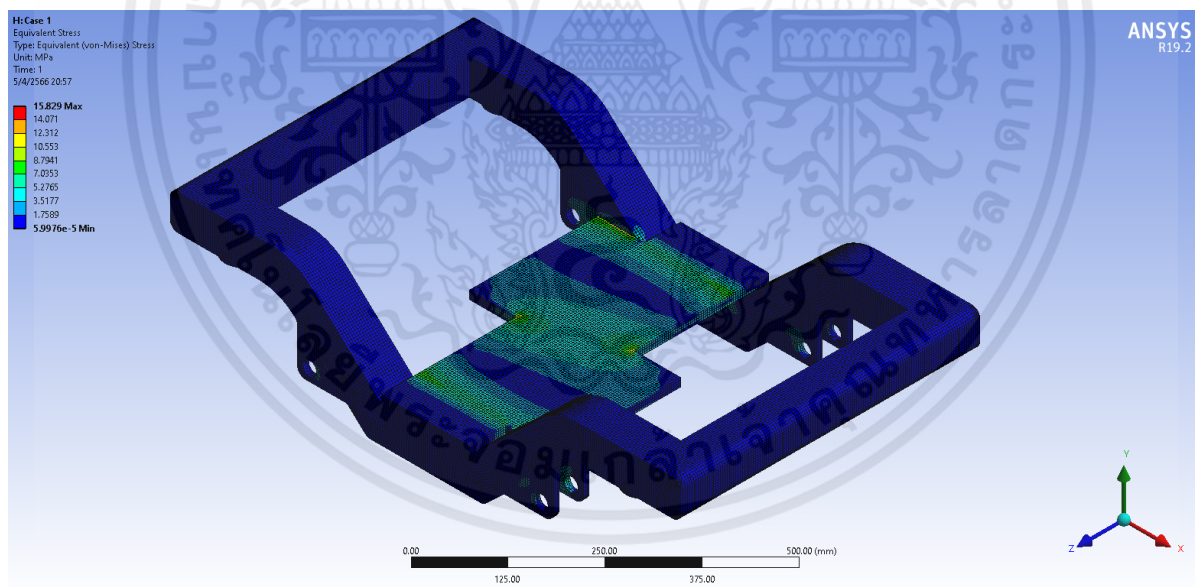
EN13749

จากการจำลองโบกี้ห้วงรถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุ AISI1010 ของทั้งสามกรณี ได้ผลลัพธ์ว่า มีจุดที่เกิดความเค้นวอนมิตสูงสุดบนโครงแครงรถจักรไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี ดังนี้

1. กรณีการรับภาระแบบที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง มีความเค้นวอนมิตสูงสุด เกิดขึ้นบริเวณมุมของคานด้านข้างด้านใน ที่ติดกับคานด้านตัดขวาง ซึ่งความเค้นวอนมิตสูงสุด และค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าตามตารางที่แสดง

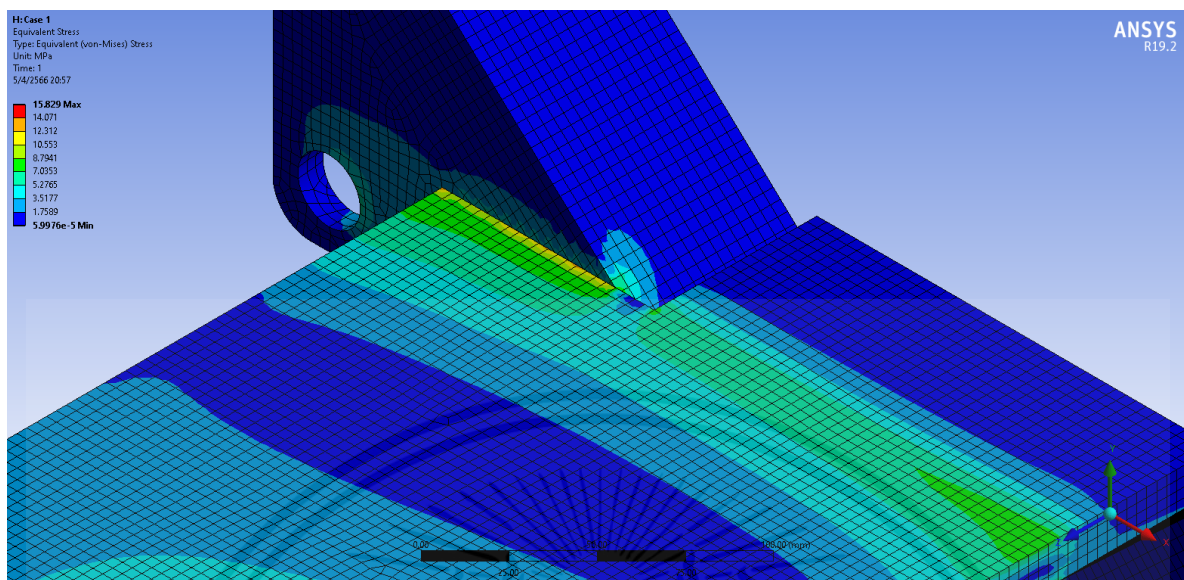
	ความเค้นวอนมิตเซส (เมกะปาสคาล)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
กรณีที่ 1 รถไฟเข้าโค้ง	15.8	11.4

ตาราง 4.8 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้ห้วงรถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 1 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010



รูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

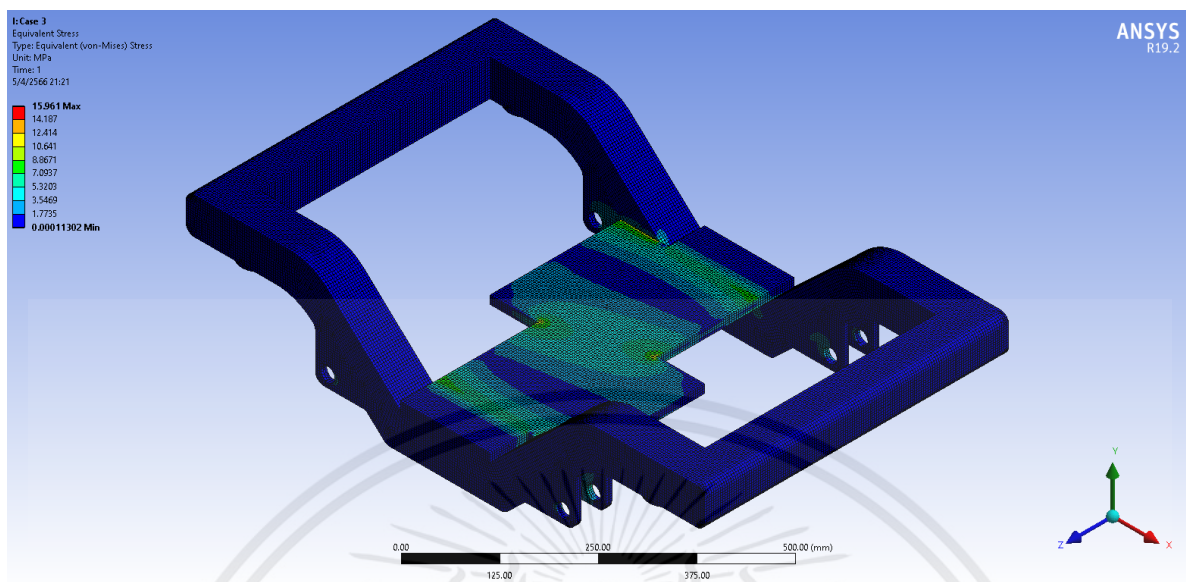


รูปที่ 4.6 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 1

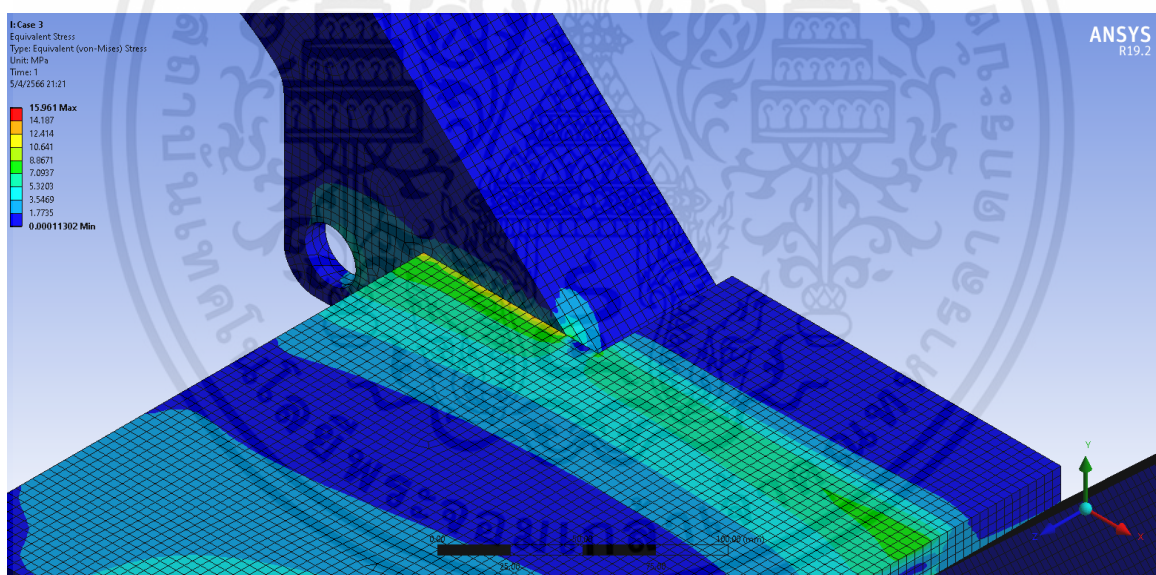
2. กรณีการรับภาระแบบที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว มีความเค้นวอนมิตสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณมุมของคานด้านข้างด้านใน ที่ติดกับคานด้านตัดขวาง เช่นเดียวกับกรณีการรับภาระแบบที่ 1 ซึ่งความเค้นวอนมิตสูงสุด และค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าตามตารางที่แสดง

	ความเค้นวอนมิตเซส (เมกะ ปาสคาล)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
กรณีที่ 2 รถไฟโคลงตัว	16.0	11.3

ตาราง 4.9 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้า
กรณีรับภาระแบบที่ 2 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010



รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 2



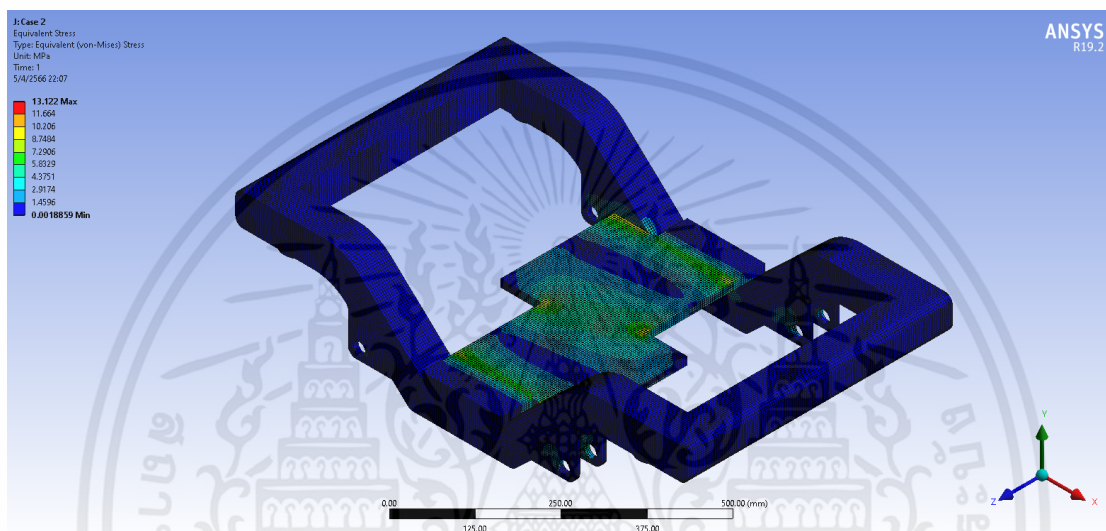
รูปที่ 4.8 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 2

3. กรณีการรับภาระแบบที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน มีความเค้นวอนมีสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณมุมของคานด้านข้างด้านใน ที่ติดกับคานด้านตัดขวางเช่นเดียวกันกับกรณีการรับภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ซึ่งความเค้นวอนมีสูงสุด และค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าตามตารางที่แสดง

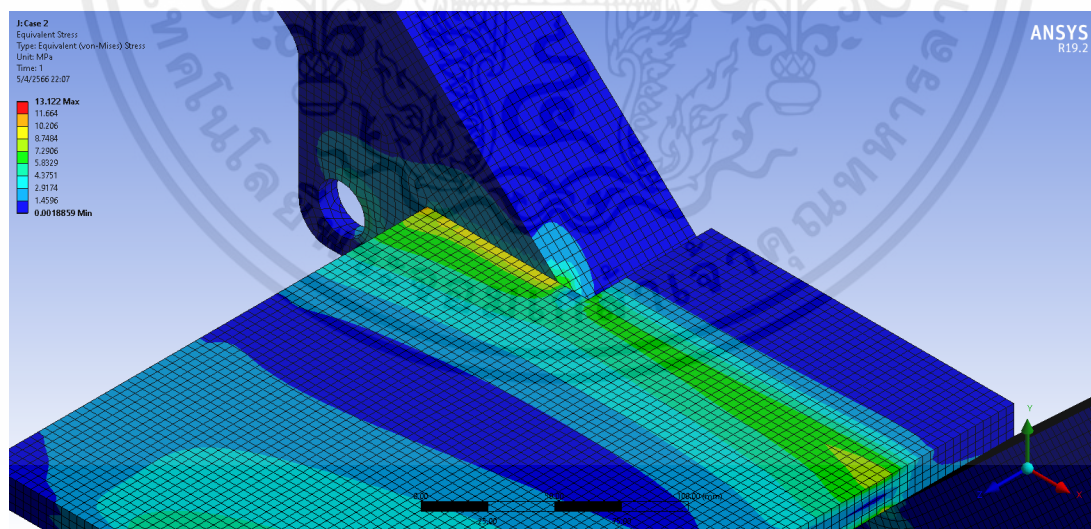
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ความเค้นวอนมิสเชส (เมกะ ปาสคาล)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
กรณีที่ 3 รถไฟเกิดการชน	13.1	13.7

ตาราง 4.10 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแคร่รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 3 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010



รูปที่ 4.9 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 3



รูปที่ 4.10 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อทราบถึงผลการทดลองด้วยวิธีการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมจำลองแล้ว ในบท นี้ จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงเคร่รถจักรไฟฟ้านี้ ต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. ในการออกแบบโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กออกแบบให้มีขนาด ความกว้างของคานด้านข้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 930 มิลลิเมตร ความสูง 215 มิลลิเมตร ความกว้างของเคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กรวม 544 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 250 มิลลิเมตร ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง 288 มิลลิเมตร ซึ่ง เป็นขนาดที่น้อยที่สุดที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์และชิ้นส่วนอื่นๆได้ตามการออกแบบ และอยู่ในข้อกำหนดระยะ และกฎของ Railway Challenge และเลือกใช้เหล็ก AISI 1010 เนื่องจากมีค่าความเค้นครากของวัสดุที่ทำให้ มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่มีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 12 ในกรณีที่เกิดความเสียหายมากที่สุดและมีค่าตัว ประกอบความปลอดภัยระหว่าง 1.5 ถึง 12 ในกรณีอื่นๆ ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนด

2. จากการศึกษาการรับแรงของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กตามมาตรฐาน EN13749 พบว่า กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง ความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุด กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว เกิดความเค้นน้อยที่สุด กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน เกิดความเค้นน้อยกว่า กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง แต่มากกว่า กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว กล่าวคือ กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว มีความปลอดภัยมากที่สุด กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟ เกิดการชน มีความปลอดภัยรองลงมา และ กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง มีความปลอดภัย น้อยที่สุดในทั้ง 3 กรณีและทั้งสามกรณีเกิดค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละกรณีเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน ของคานด้านข้างกับคานด้านตัดขวางที่สัมผัสกันเช่นเดียวกันทุกกรณี

3. จากการทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ เมื่อได้รับแรงตามมาตรฐาน EN13749 โดยเลือกใช้เหล็ก AISI 1010 พบว่า กรณีที่ 1 การรับน้ำหนัก ขณะที่รถไฟเข้าโค้ง ในการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลอง ความละเอียดมากที่สุดที่ Mesh ขนาด 4 ที่มีจำนวน 412,418 เอลิเมนต์ เกิดค่าความเค้นสูงสุด 15.8 เมกะปาสคาล กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟ โคลงตัว ในการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลอง ความละเอียดมากที่สุดที่ Mesh ขนาด 4 มีจำนวน 412,418 เอลิเมนต์ เกิดค่าความเค้นสูงสุด 13.1 เมกะปาสคาล กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชนในการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลอง ความละเอียด

มากที่สุดที่ Mesh ขนาด 4 มีจำนวน 412,418 เอลิเมนต์ เกิดค่าความเค้นสูงสุด 16.0 เมกะปาสคาล และจากค่าความเค้นสูงสุดที่ได้นำไปหาค่าตัวประกอบ ความปลอดภัยจากค่าคุณสมบัติของวัสดุ ความเค้นครากของเหล็ก AISI 1010 มีค่า 180 เมกะปาสคาล พบว่า กรณีที่ 1 การรับภาระขณะที่รถไฟเข้าโค้ง มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 11.4 กรณีที่ 2 การรับน้ำหนัก ขณะที่รถไฟโคลงตัว มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 11.3 กรณีที่ 3 การรับน้ำหนัก ขณะที่รถไฟเกิดการชน มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 13.7

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. ไม่สามารถทำการทดลองผ่านโปรแกรมจำลองได้อย่างละเอียดมาก ๆ เนื่องจาก ซีดจำกัดทางด้านอุปกรณ์ที่จำกัด ทำให้ในการทดลองผ่านโปรแกรมจำลองเมื่อทำการทดลองในค่าความละเอียดมากถึงค่าหนึ่ง โปรแกรมจำลองไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ถึงขีดจำกัด

2. เนื่องจากการเกิดโรคระบาดเกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่ให้บริการ ภายในภาควิชาได้ ทำให้เกิดปัญหาข้างต้นที่กล่าวก่อนหน้าและทำให้ต้องปรับปรุงแบบการดำเนินงานและ ขอบเขตในการดำเนินงาน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในการดำเนินงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์ คอมพิวเตอร์ ในการทดลองผ่านโปรแกรม ต่างๆ นั้นควรมีการเตรียมอุปกรณ์สำรองหรือจัดเตรียมวิธีการที่จะแก้ไขปัญหา ในกรณีที่มีเหตุติดขัดหรือเหตุสุดวิสัยเกิดขึ้นซึ่งไม่สามารถใช้อุปกรณ์ชิ้นหลักได้

2. ในการออกแบบแคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กทางคณะผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างในสถานะสถิตยศาสตร์ในสถานะการรับภาระแบบไม่ปกติเท่านั้นจึงเสนอให้มีการจัดทำแคร่รถจักร ไฟฟ้าขนาดเล็กขึ้นงานจริงเพื่อทดสอบในขั้นตอนอื่นๆ เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบความแม่นยำเช่น การ ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างในสถานะสถิตยศาสตร์ การทดสอบบนทางวิ่ง

บรรณานุกรม

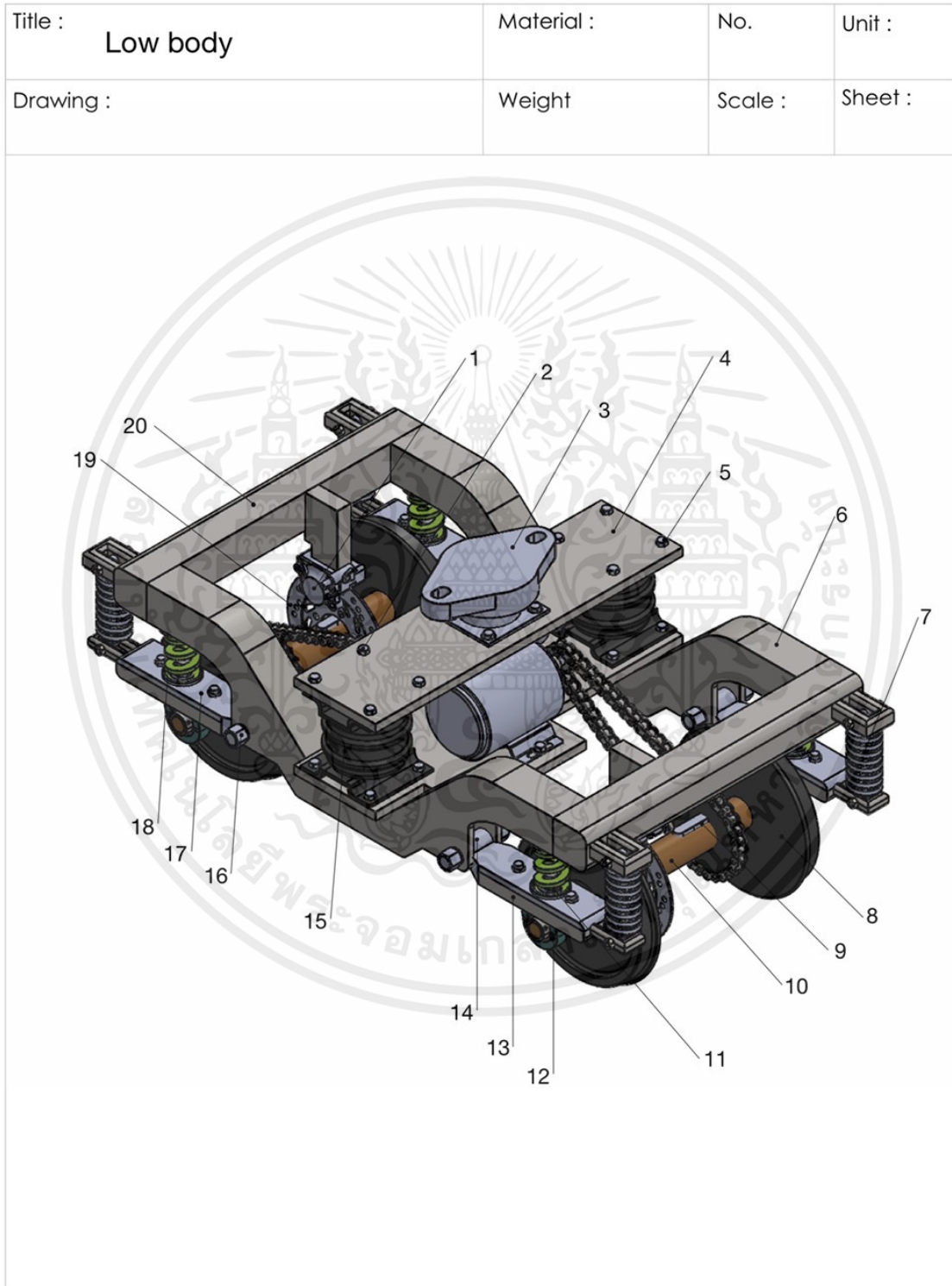
- [1] CEN (European Committee for Standardization). (2011). Railway application – Wheelsets and bogies – Method of specifying the structural requirements of bogie frames. Brussels.
- [2] G.Mancini, A.Cera. Design of Railway Bogies in Compliance with New EN13749 European Standard.
- [3] Jakkrachai S., Pattara T. และ Yodsapol W. (2017). Design and Development of Passenger Train Scaled Model. Bangkok. King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.
- [4] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. (2011). Shigley’s Mechanical Engineering Design (9th ed.). United States: McGraw-Hill.
- [5] William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch. (2010). Materials Science and Engineering (8th ed.). United States: WILEY
- [6] IMechE. (n.d.). Railway Challenge. Retrieved 13 September 2022, from <https://www.imeche.org/events/challenges/railway-challenge>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

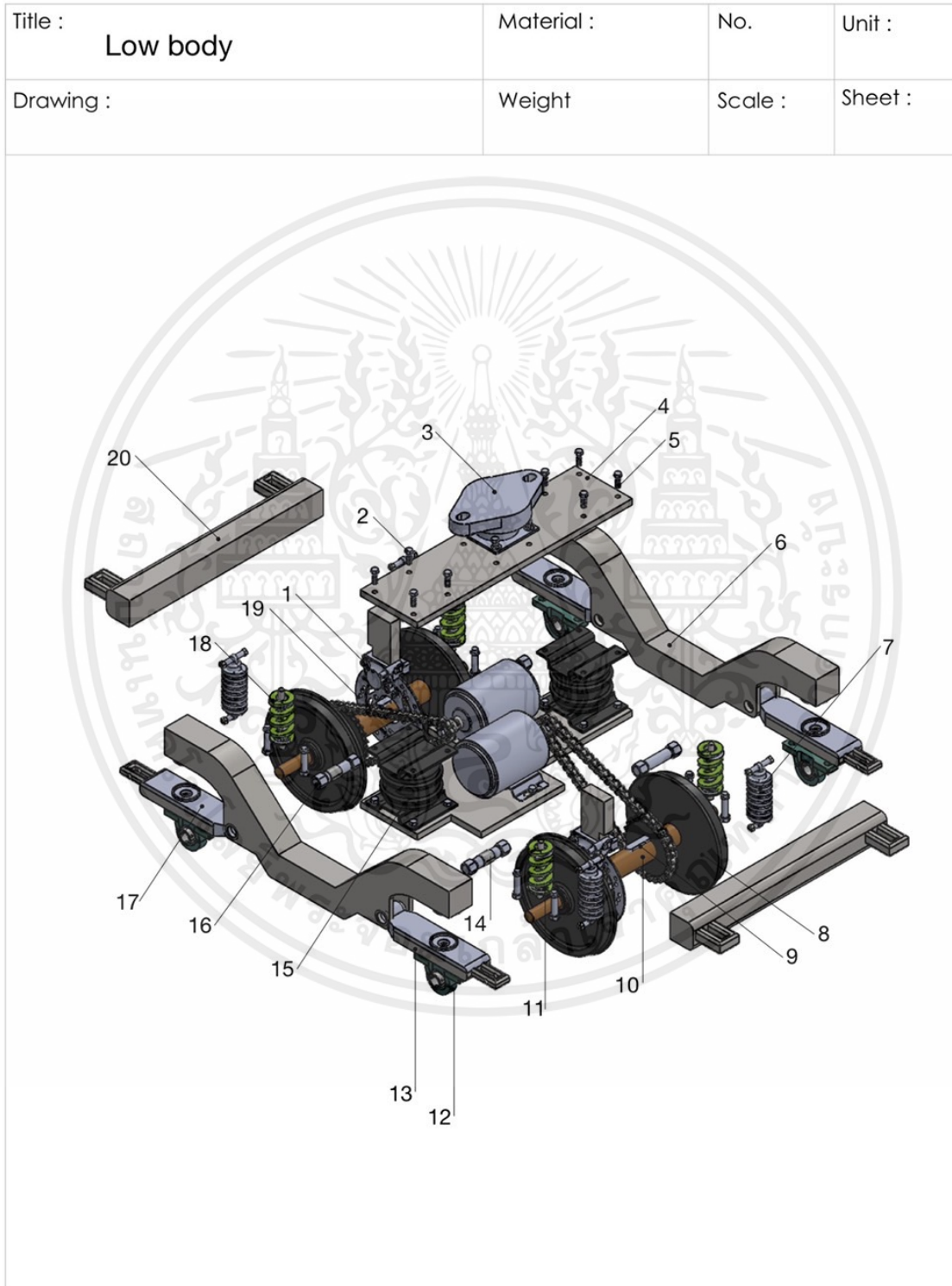


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

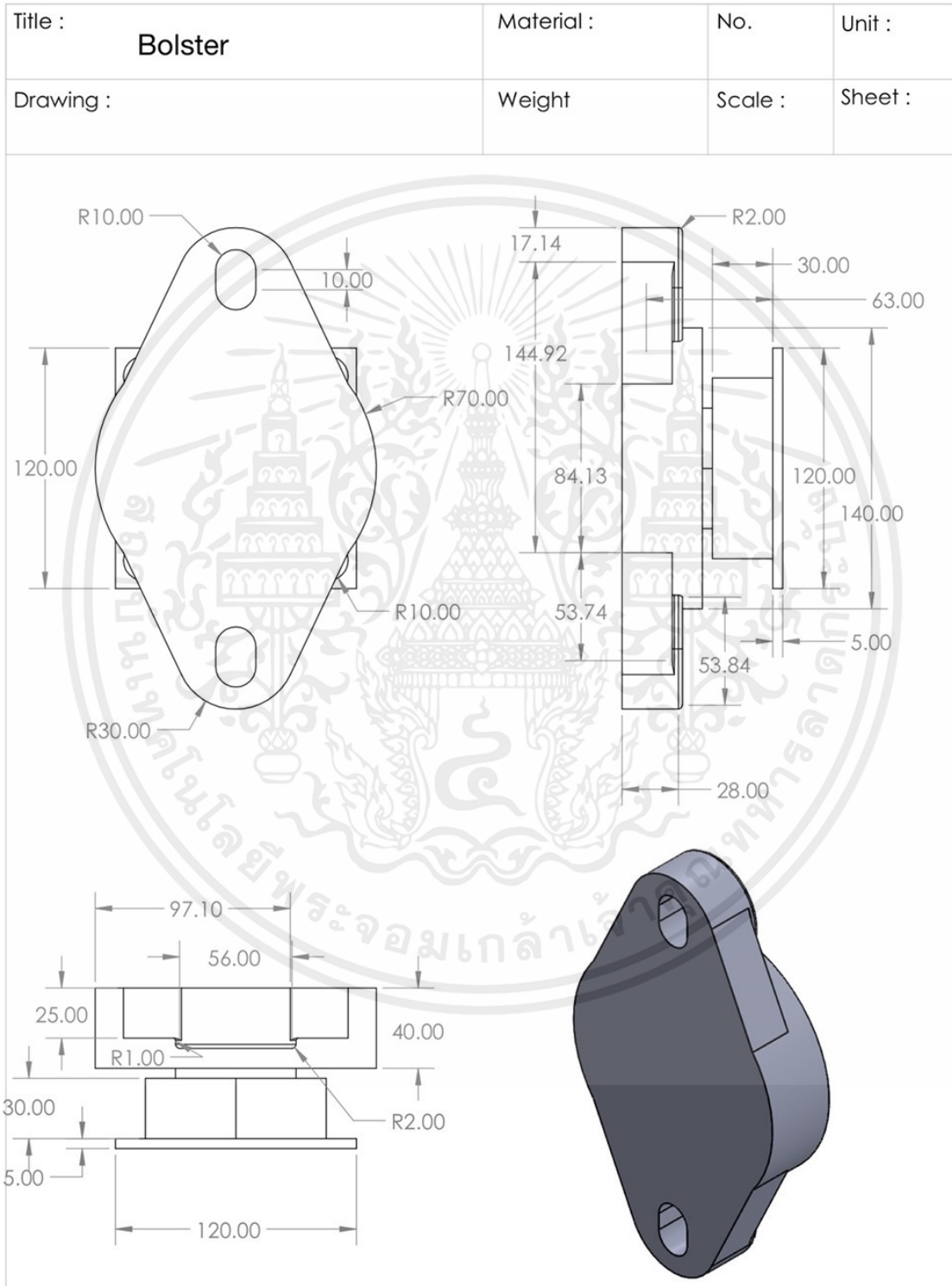
Title :	Low body	Material :	No.	Unit :
Drawing :		Weight	Scale :	Sheet :

Number	Item
1	Caliper
2	Bolt
3	Bolster
4	Upper Base
5	Nut
6	Side Bogie Frame
7	Choke
8	Wheel
9	Key
10	Shaft
11	Spring Unit
12	Bearing
13	Swing arm Under
14	Bush
15	Secondary Suspension
16	Hinge Pin
17	Swing arm Upper
18	Spring
19	Disc Brake
20	Bogie Frame

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

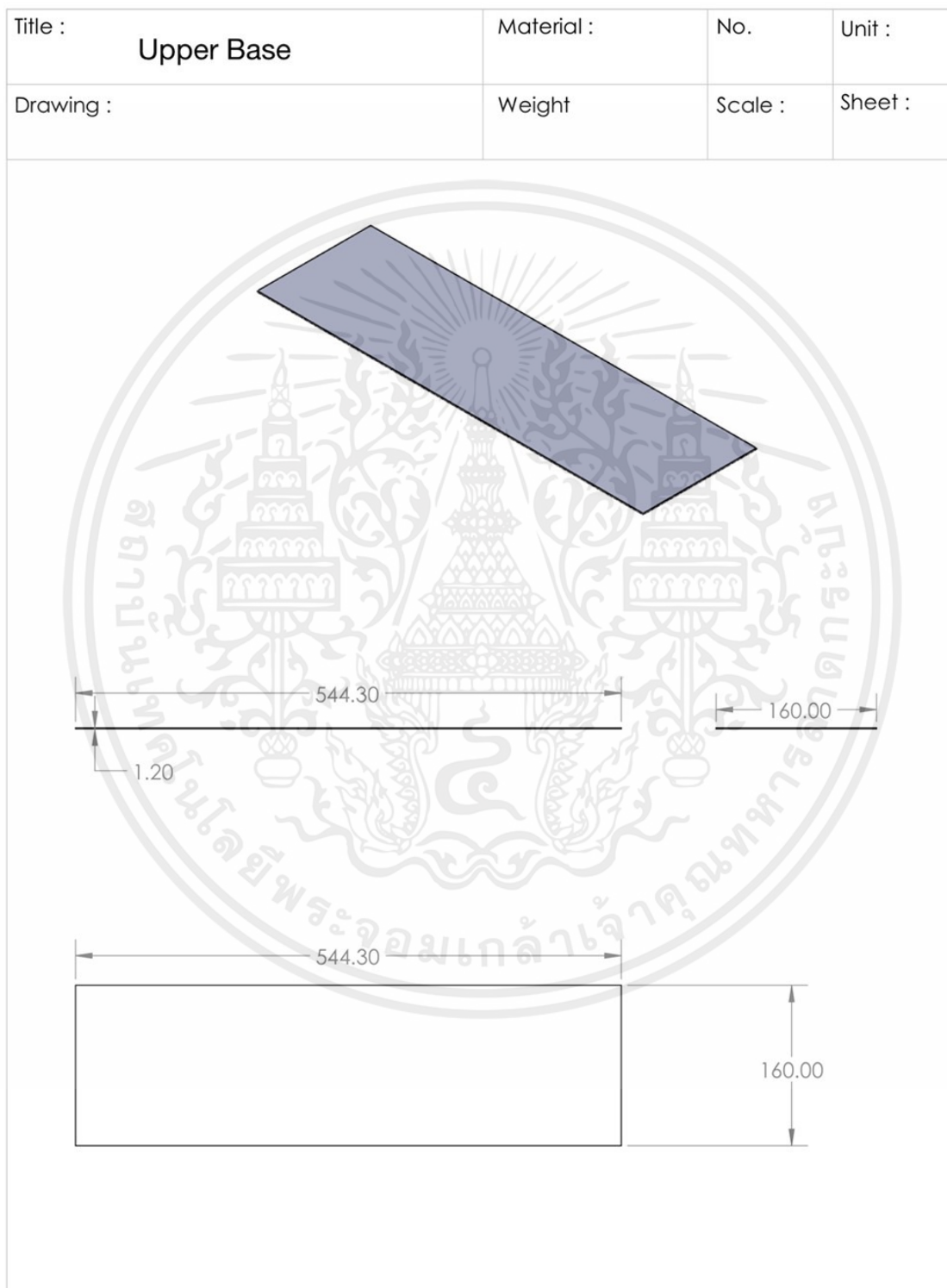


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

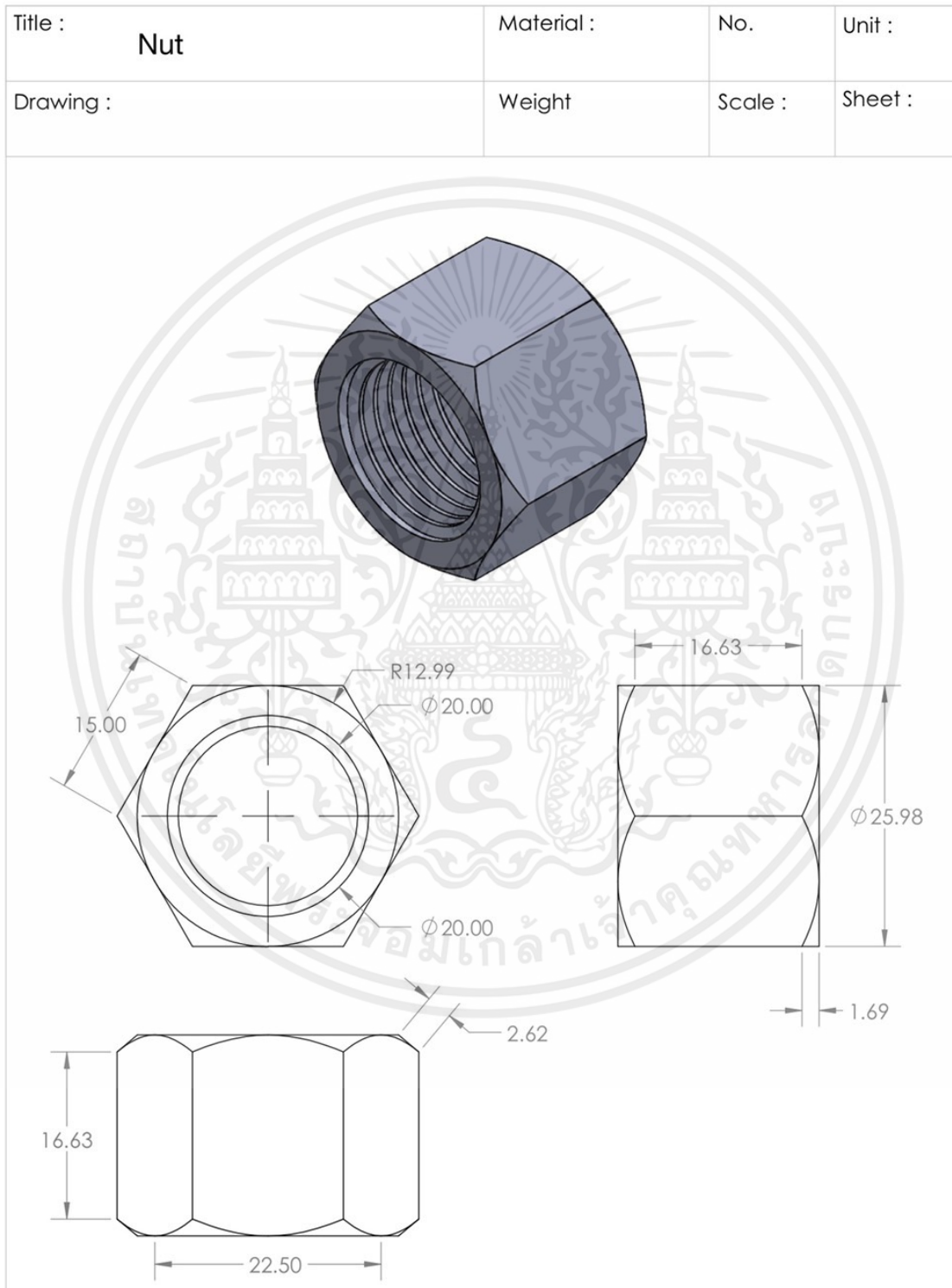


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

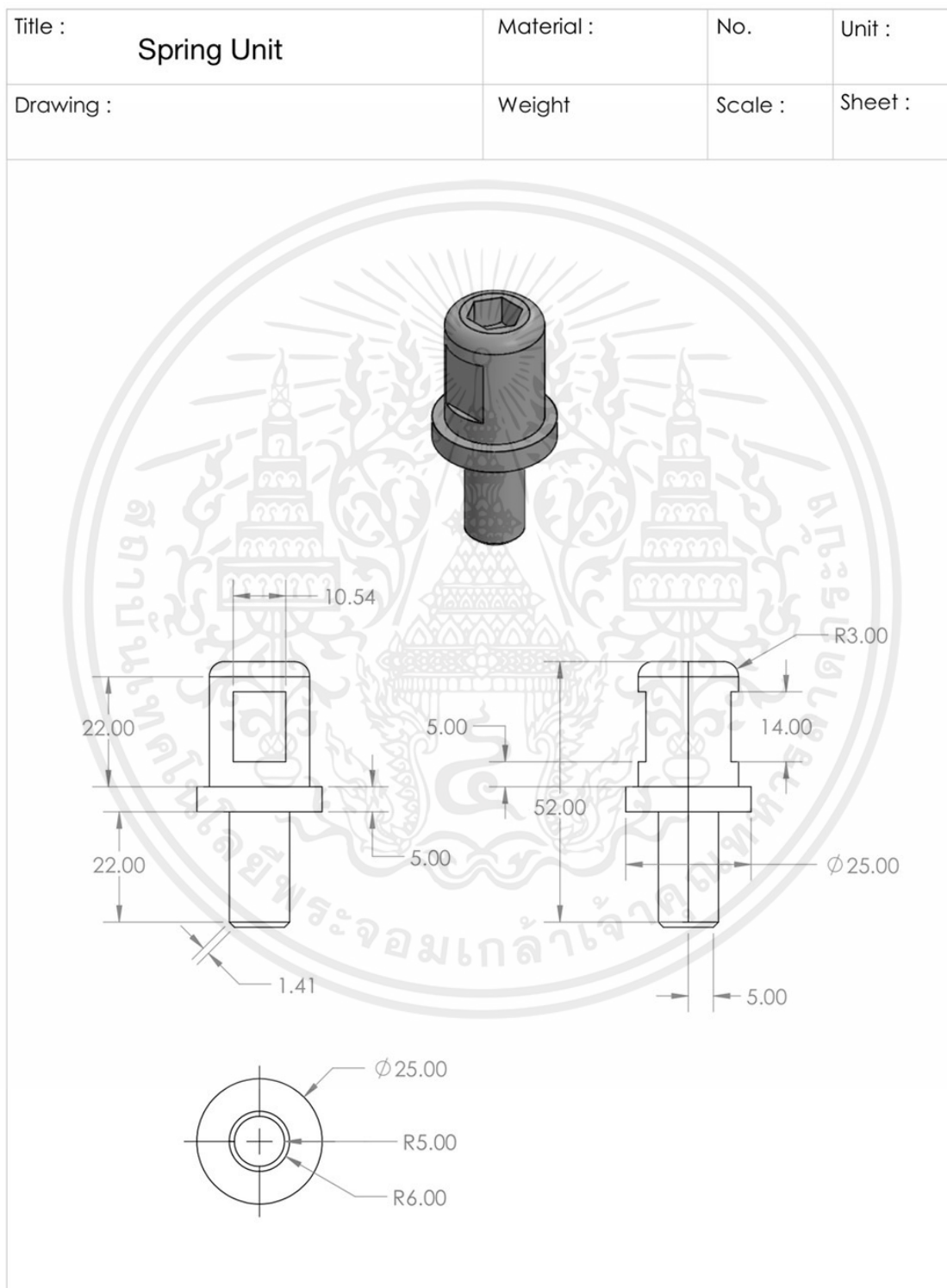
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



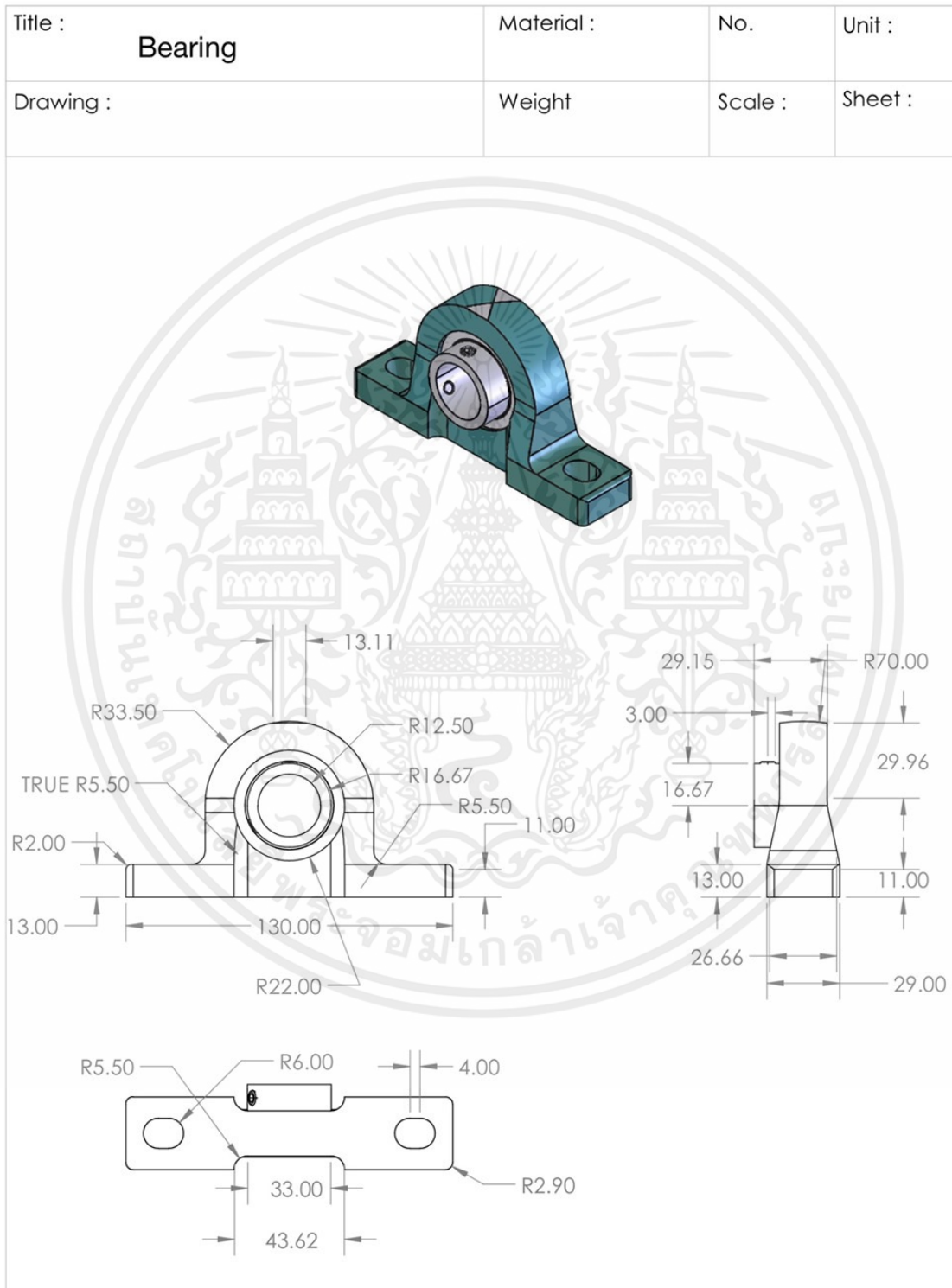
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



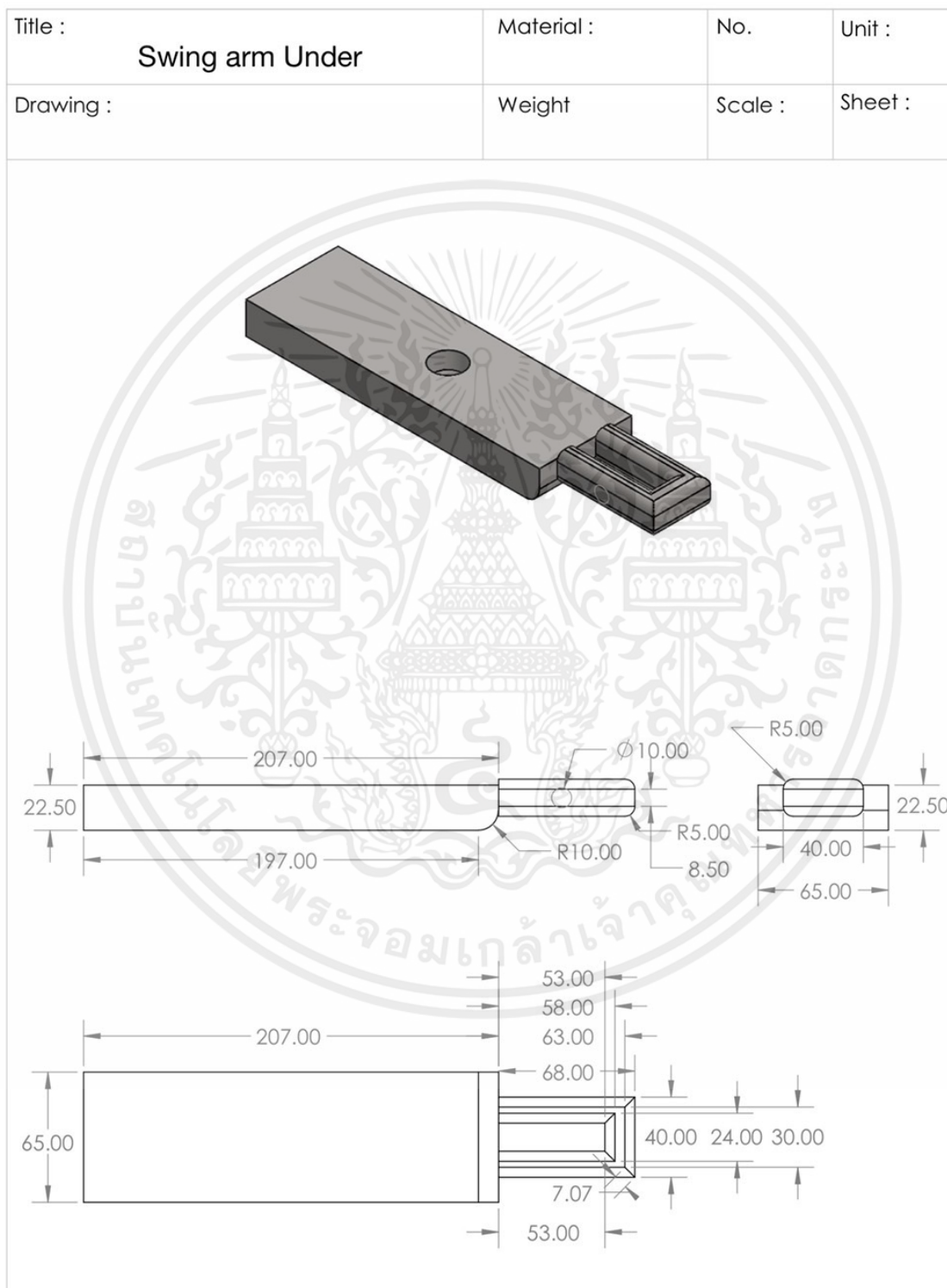
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



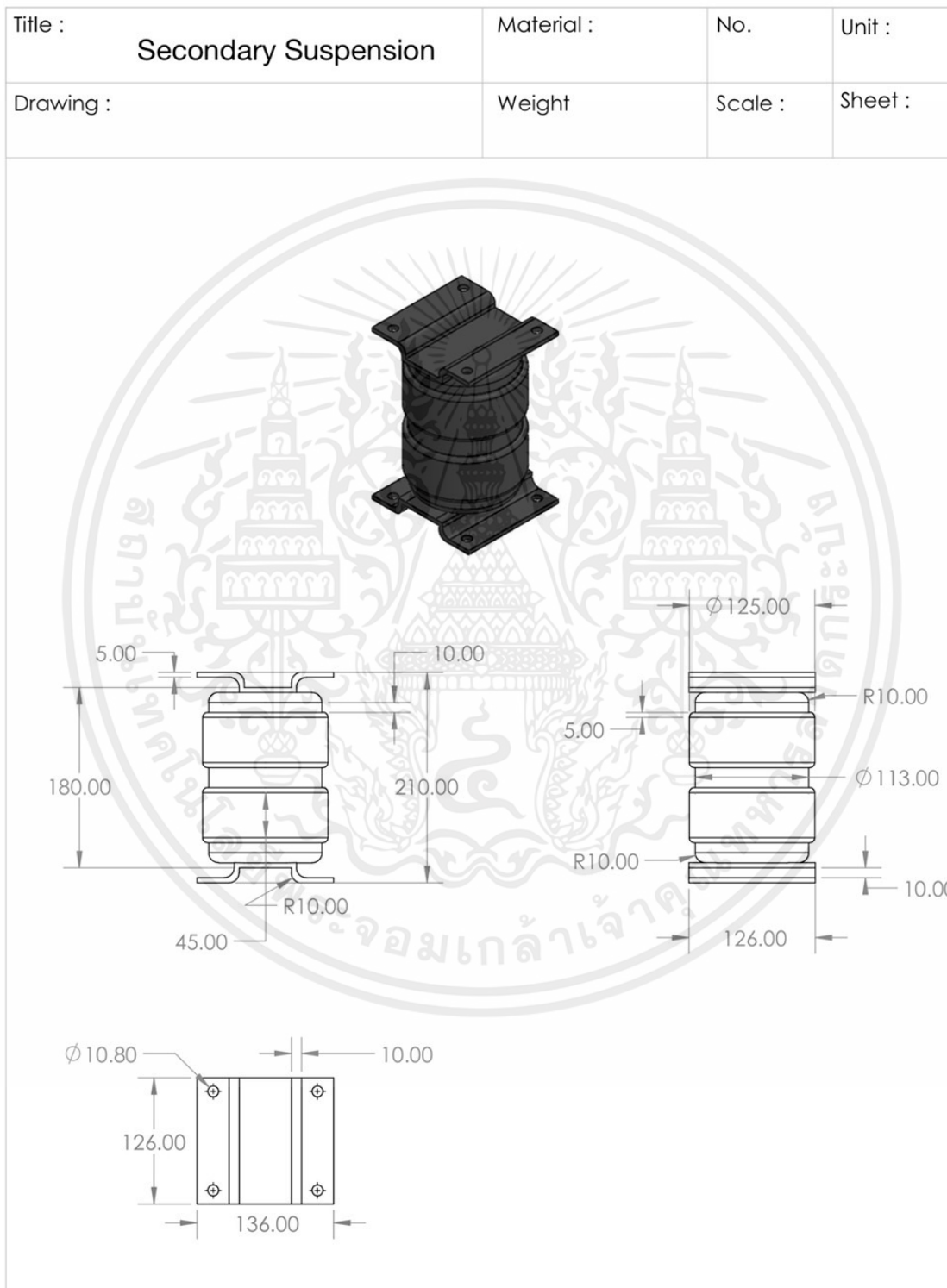
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

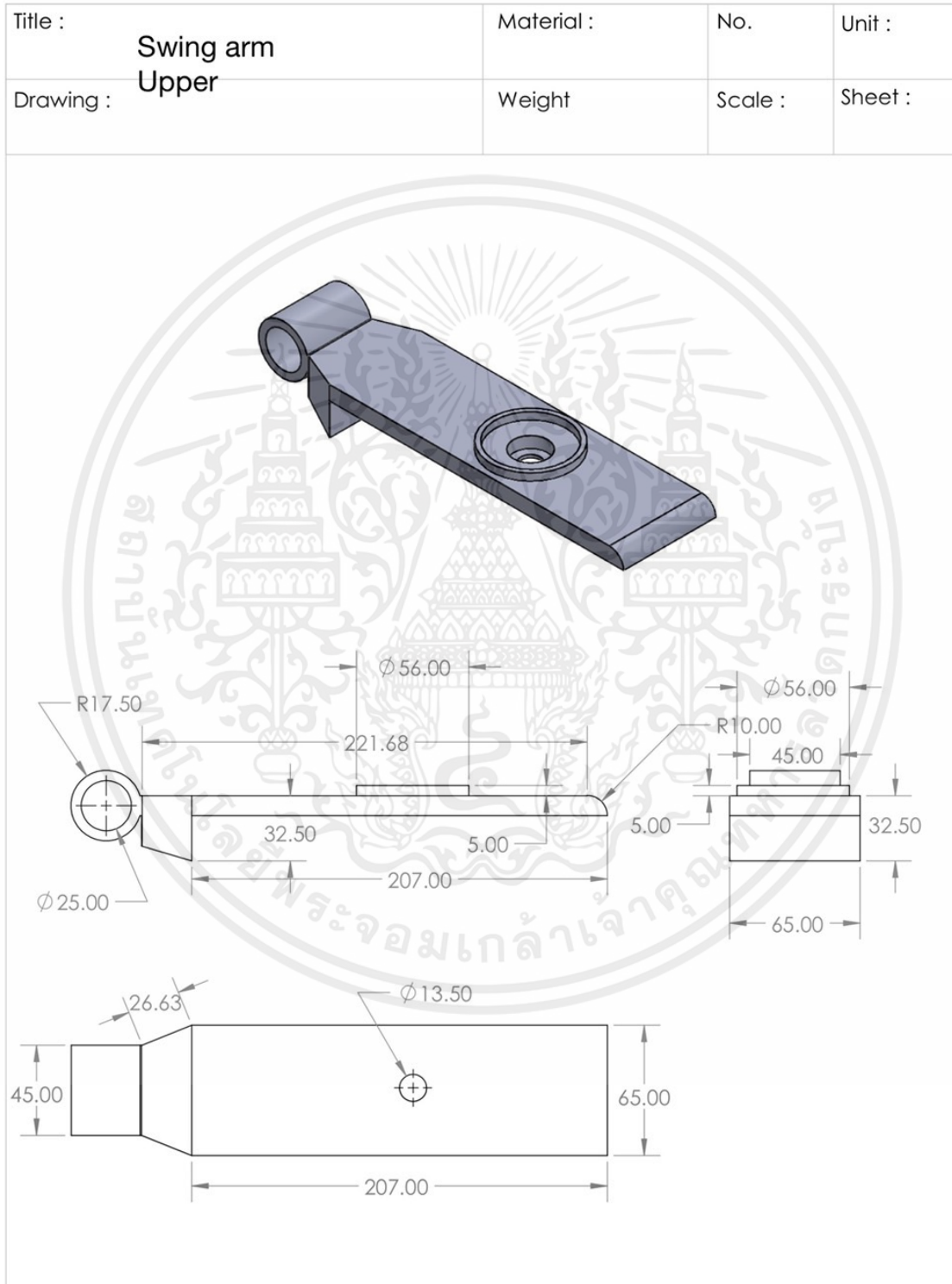


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

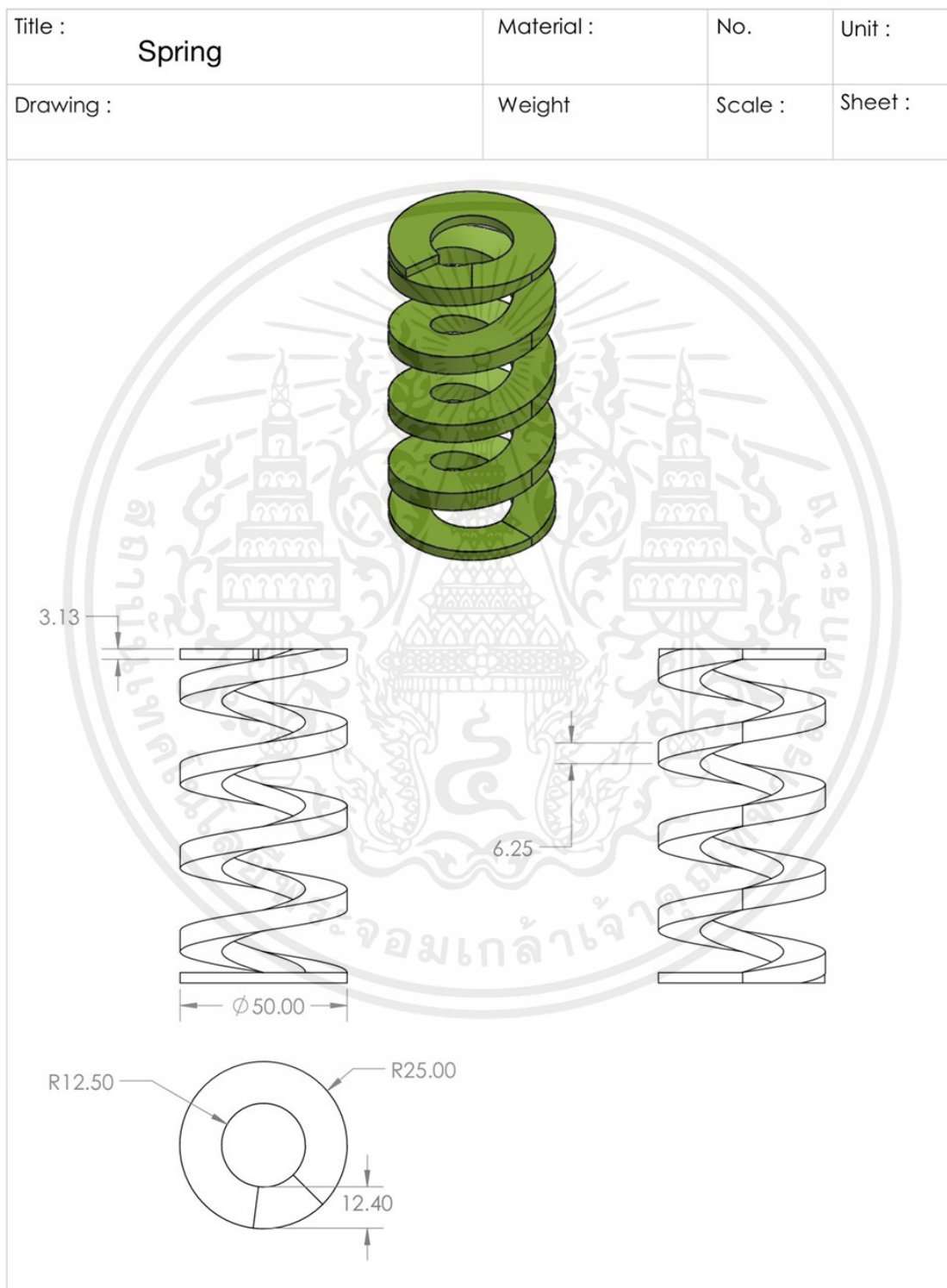
Title :	Hinge Pin	Material :	No.	Unit :
Drawing :		Weight	Scale :	Sheet :



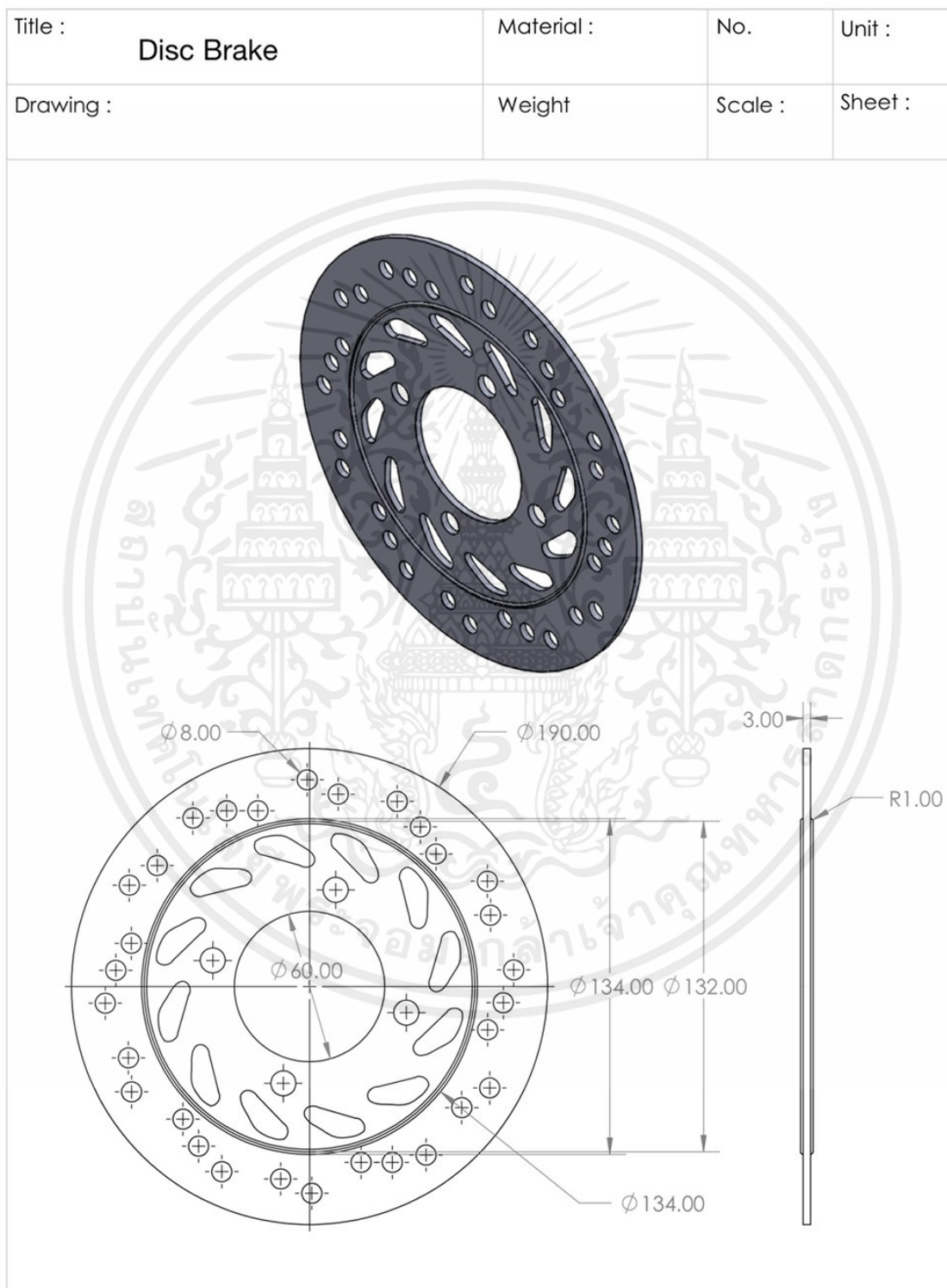
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



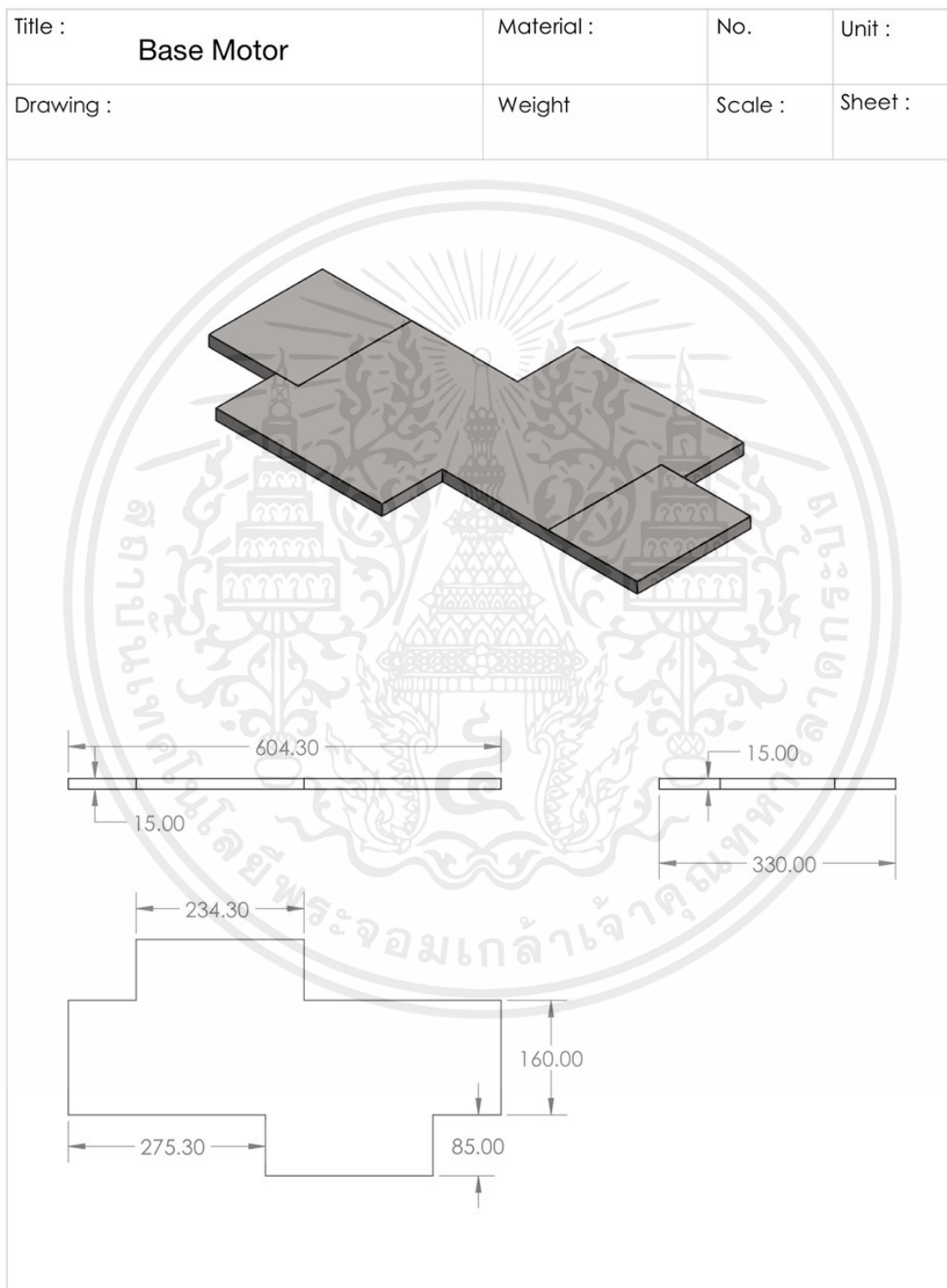
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

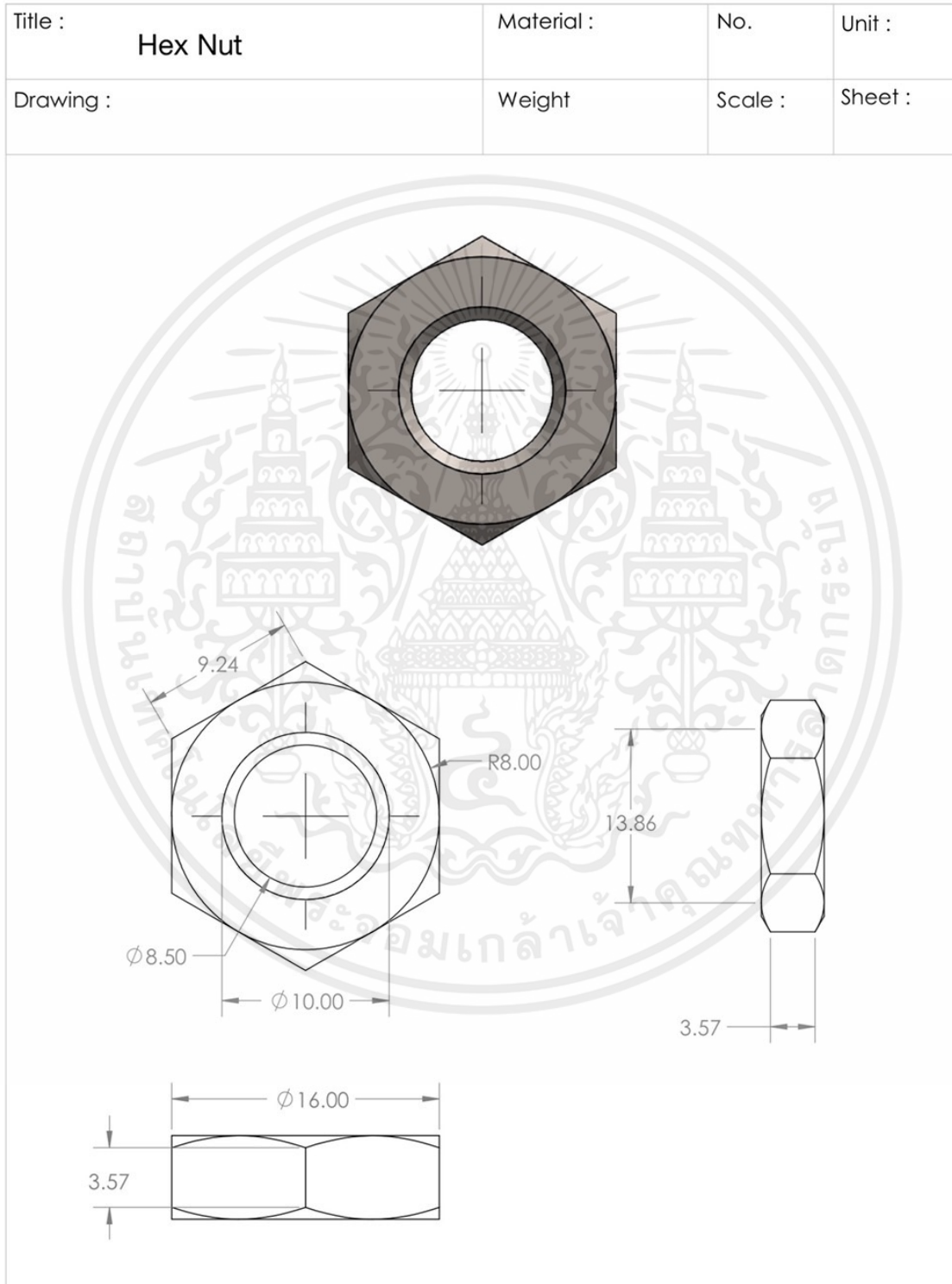


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

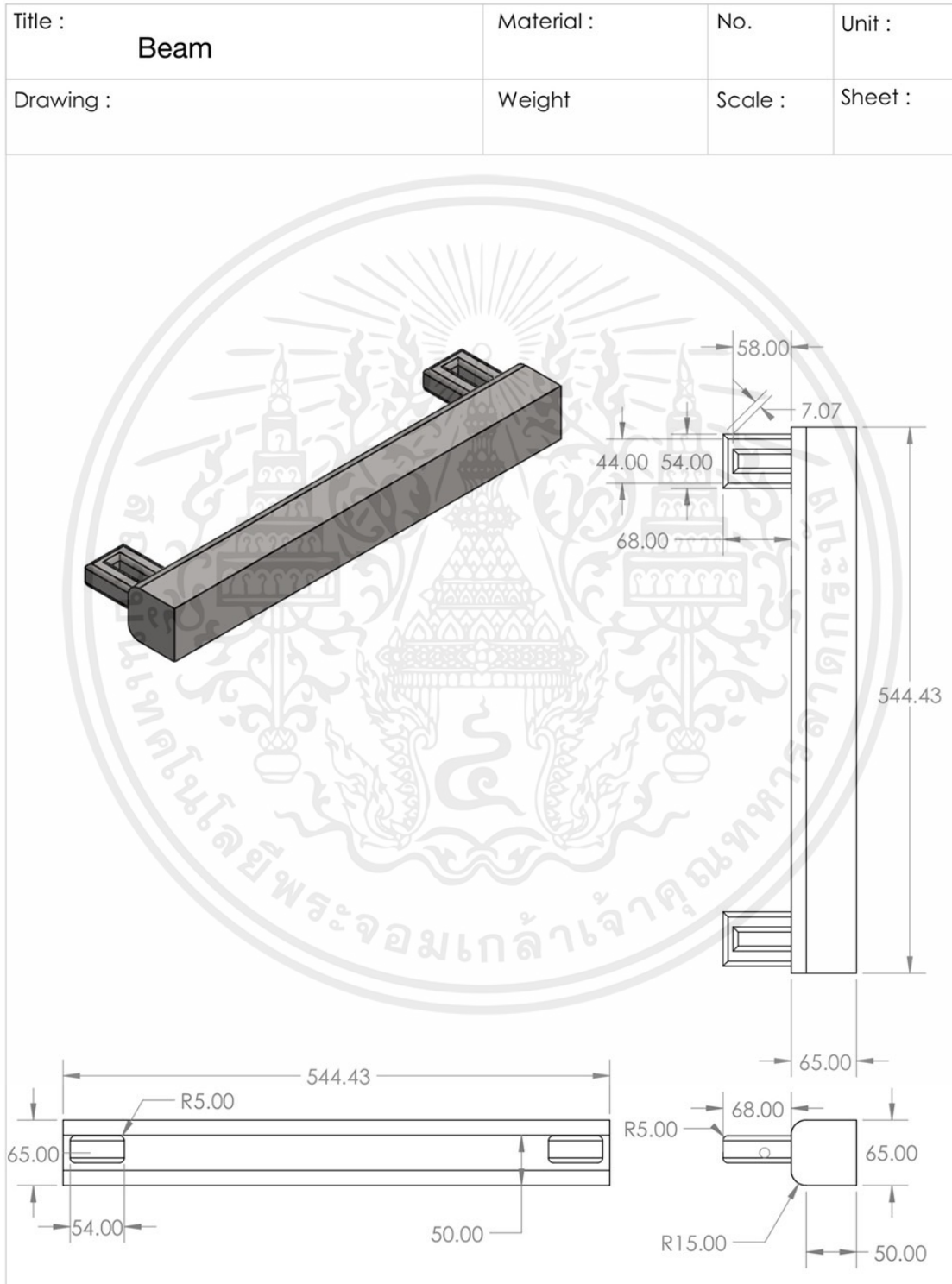
Title :	Hex Screw	Material :	No.	Unit :
Drawing :		Weight	Scale :	Sheet :



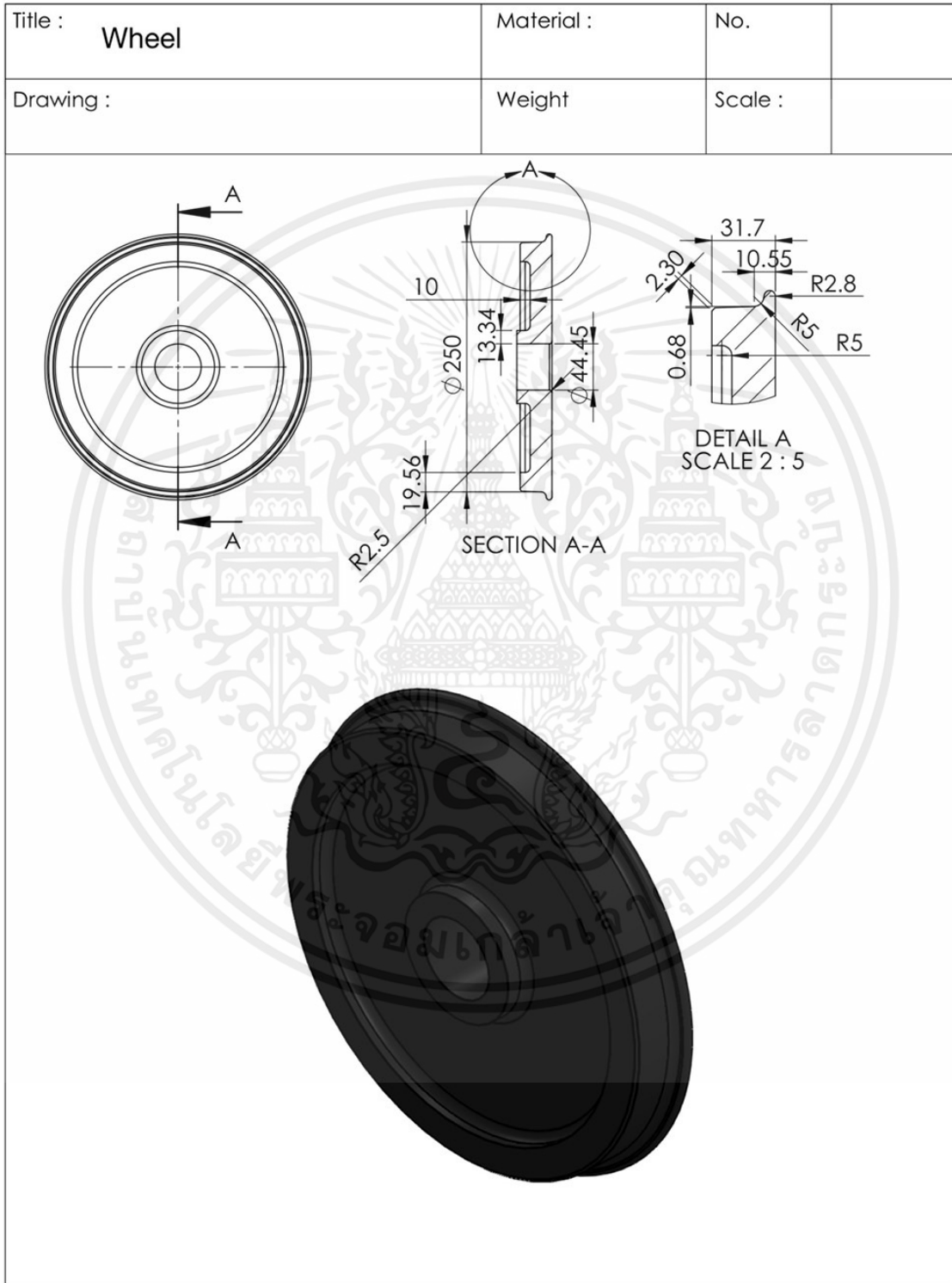
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



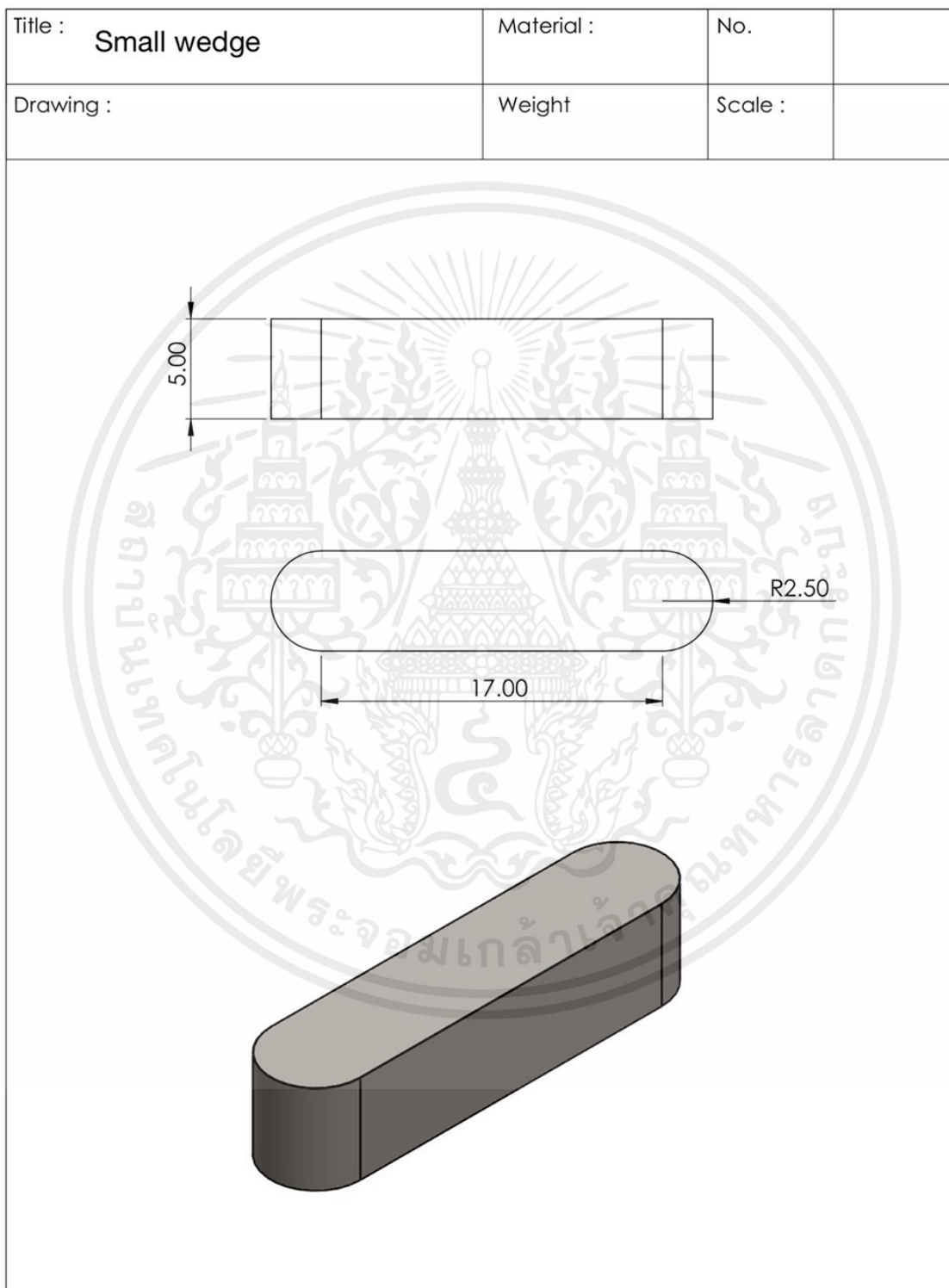
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



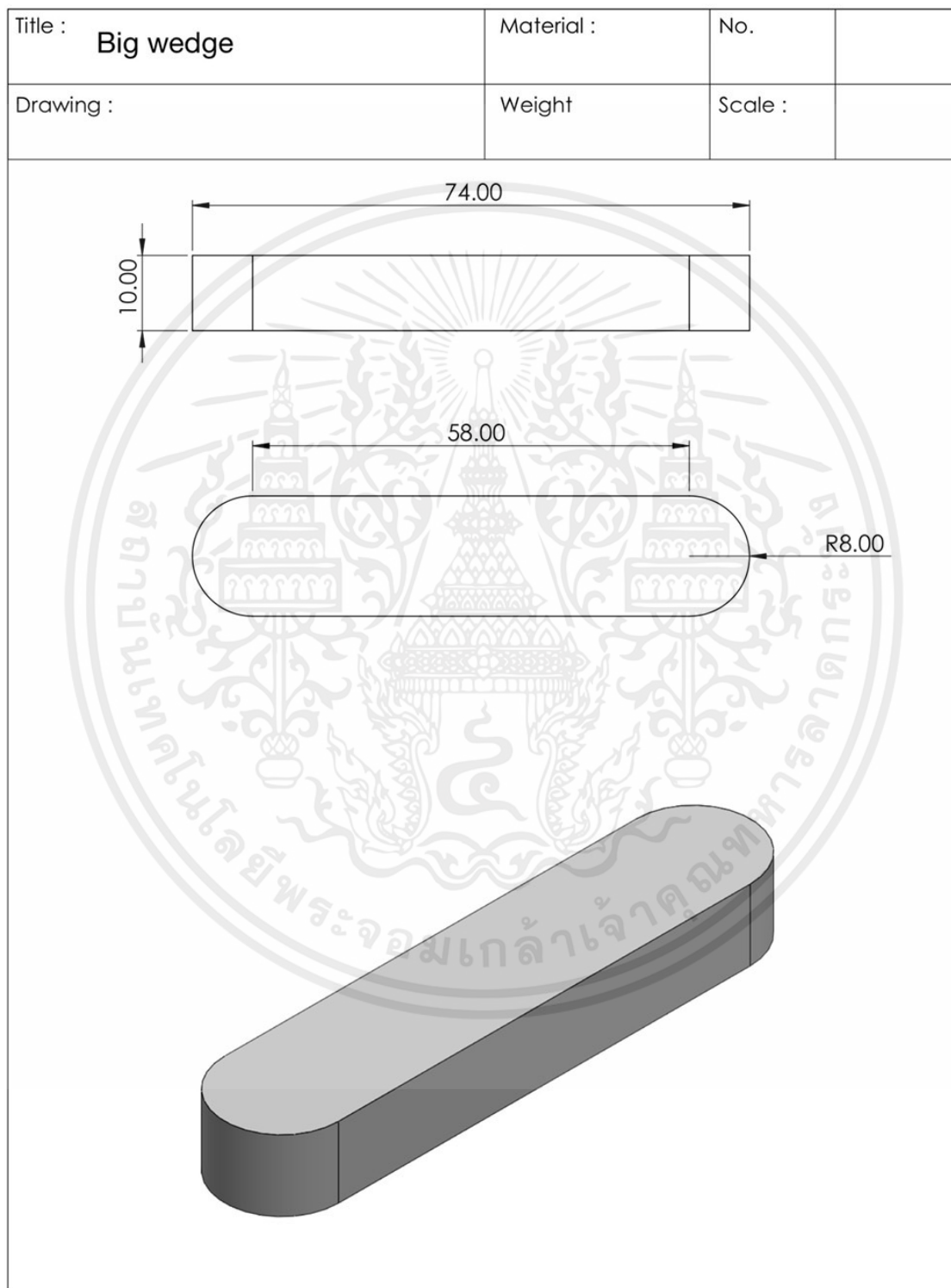
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



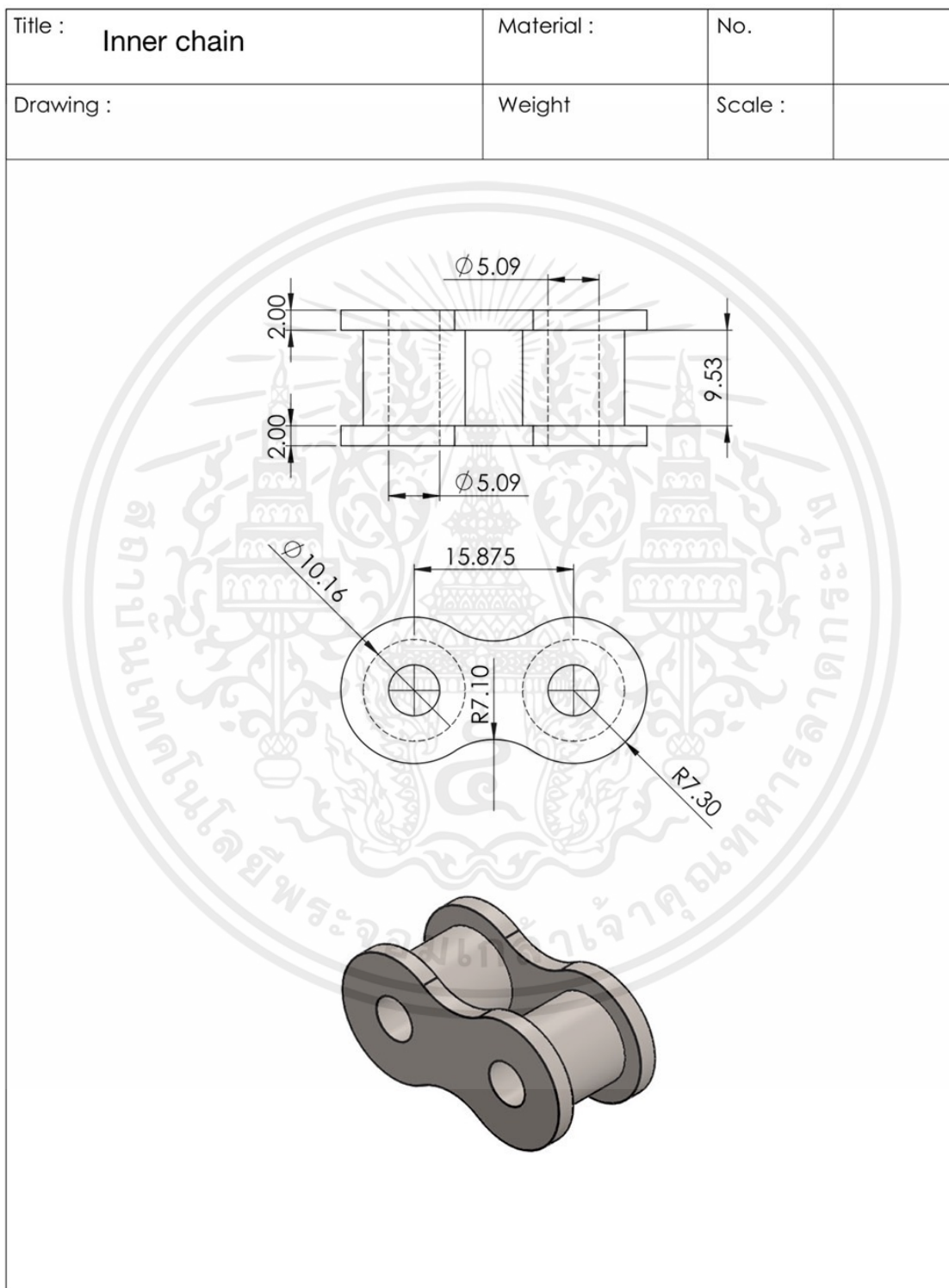
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



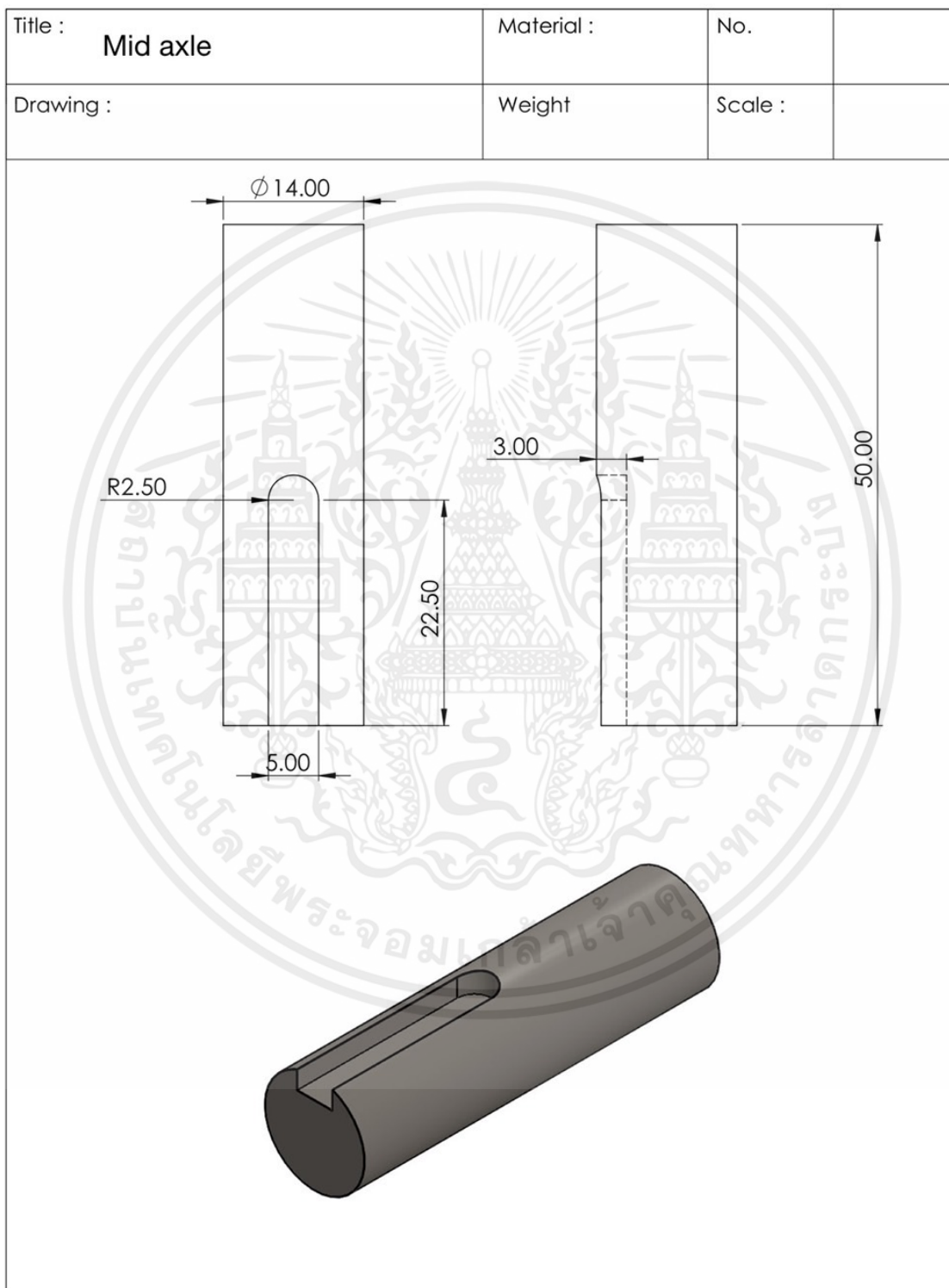
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



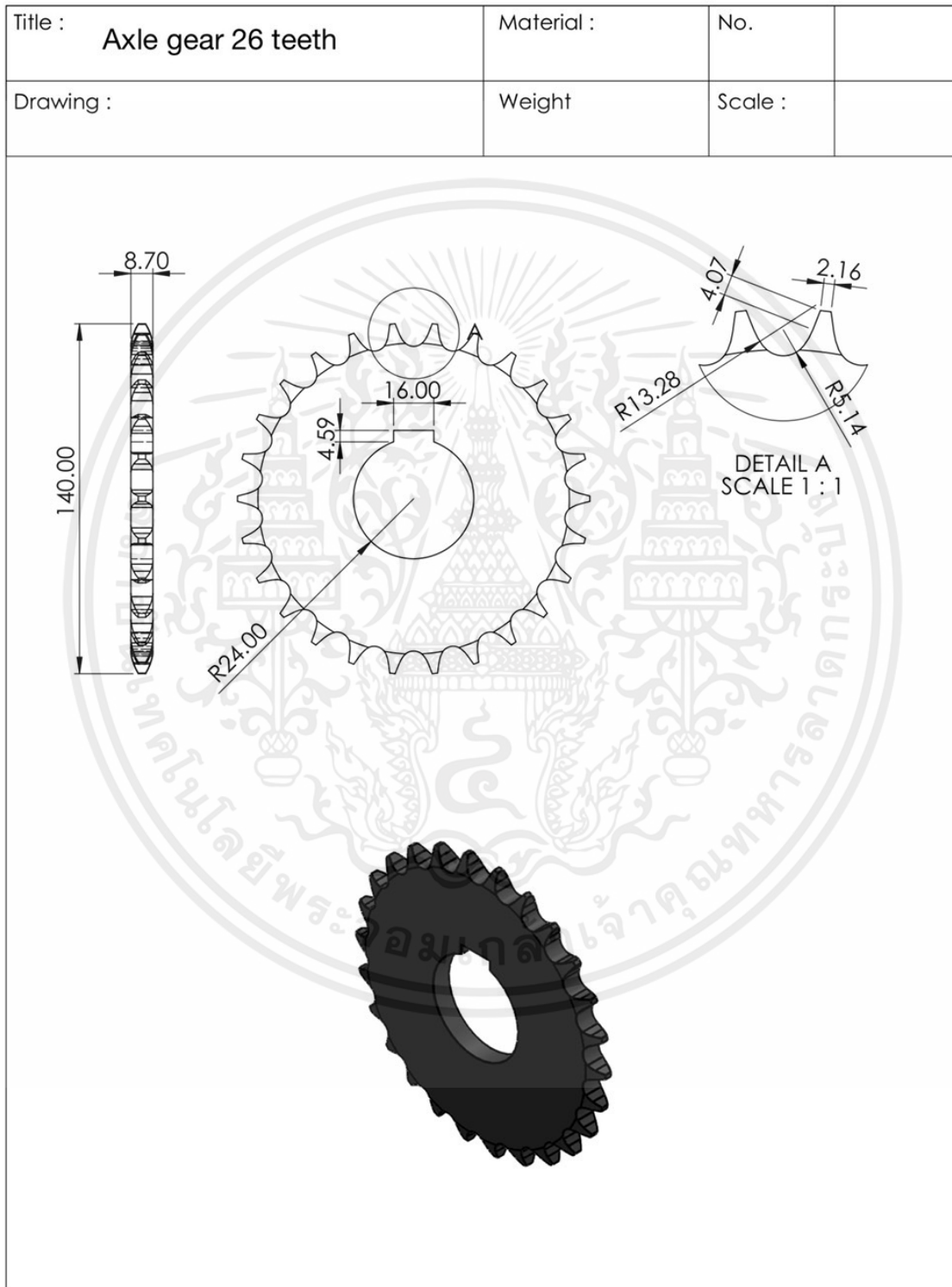
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



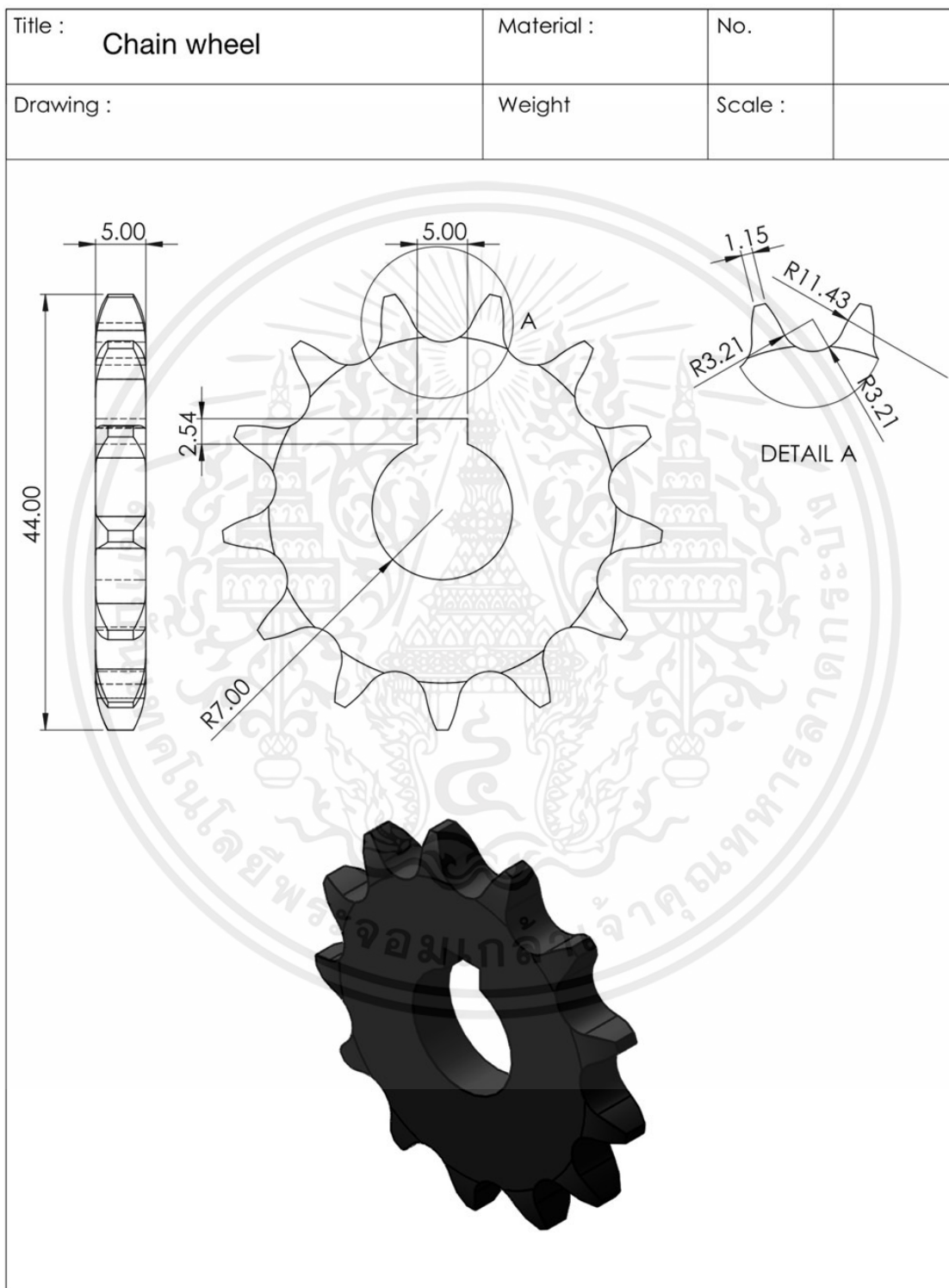
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



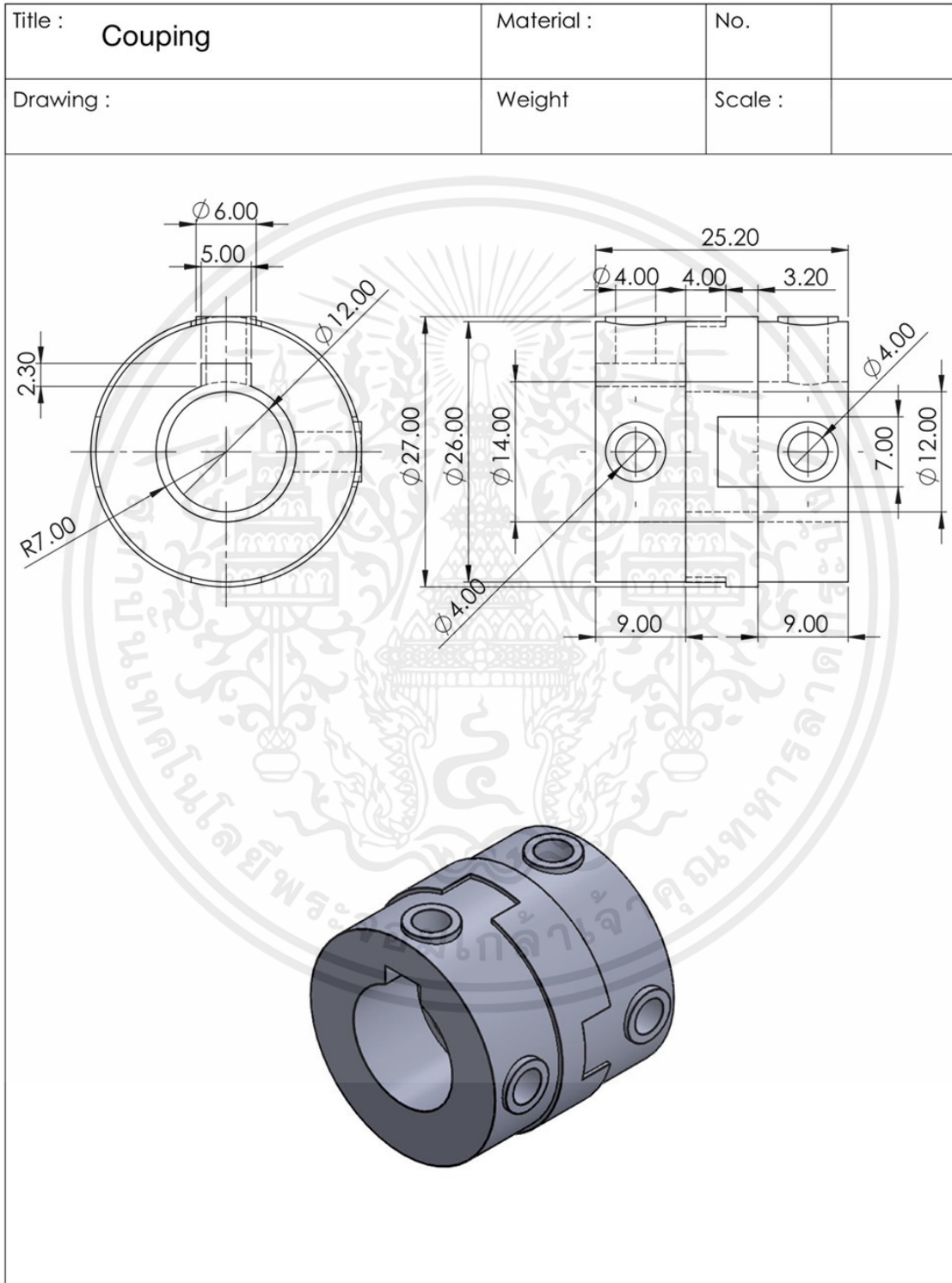
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



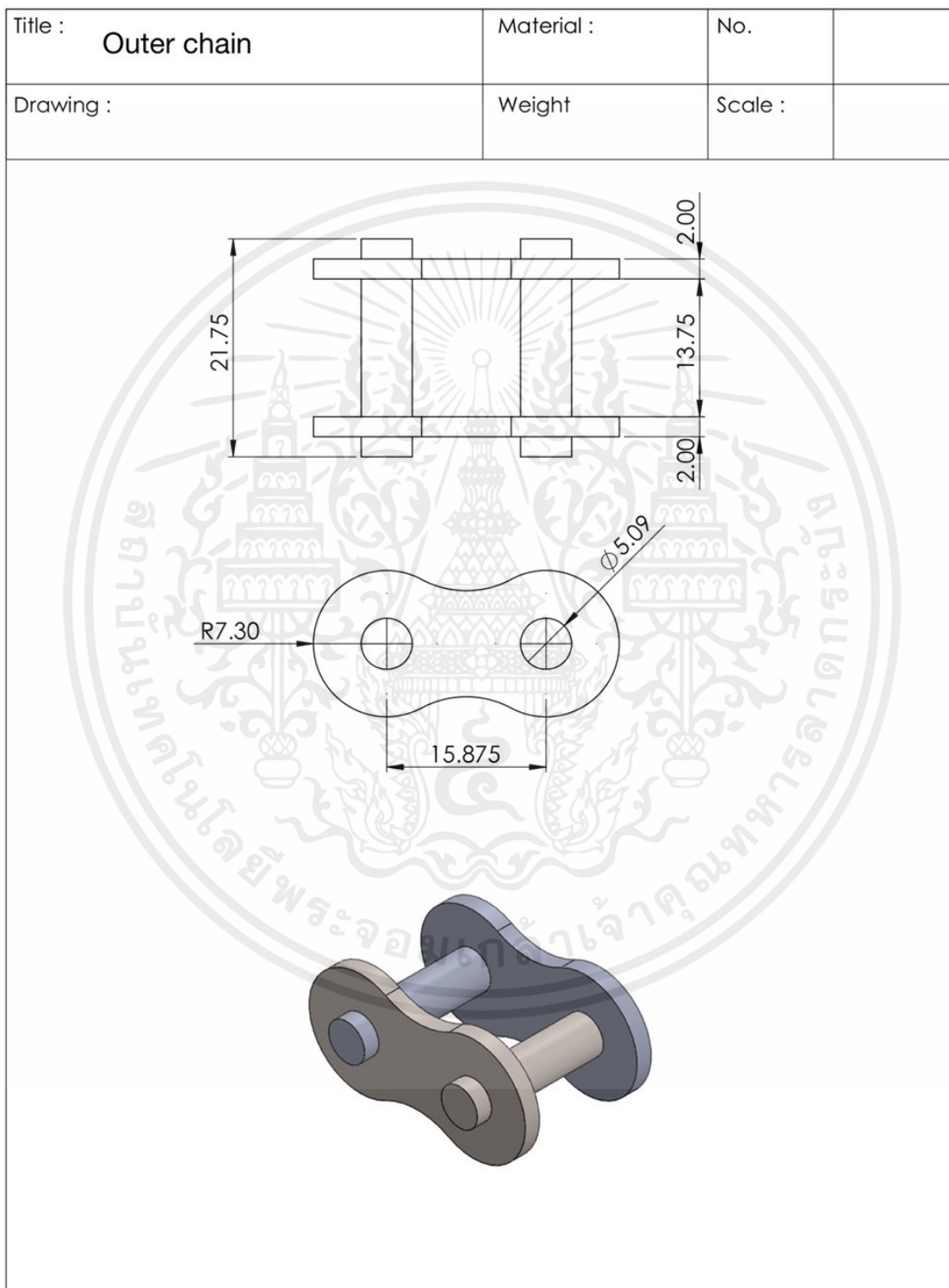
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



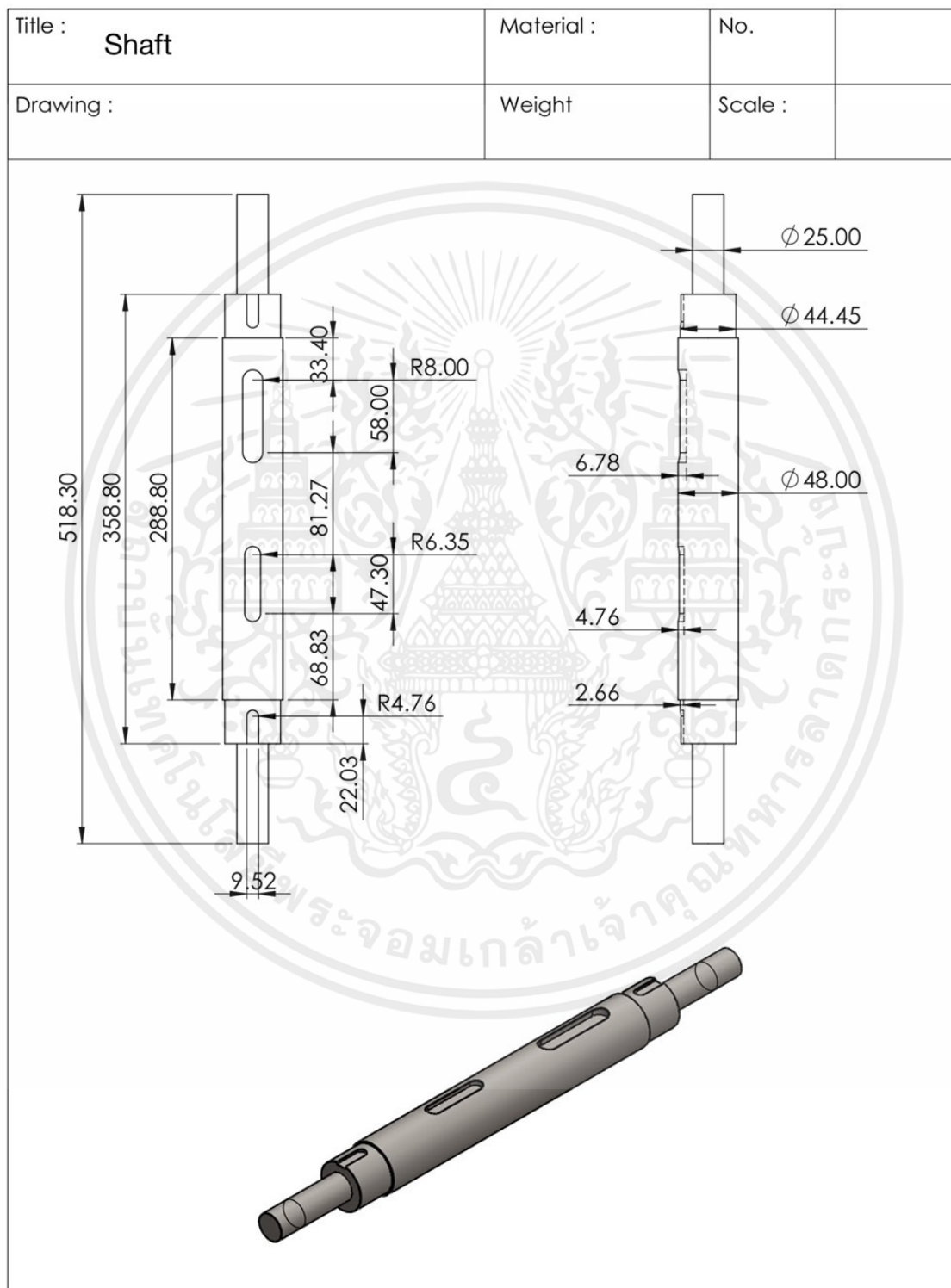
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

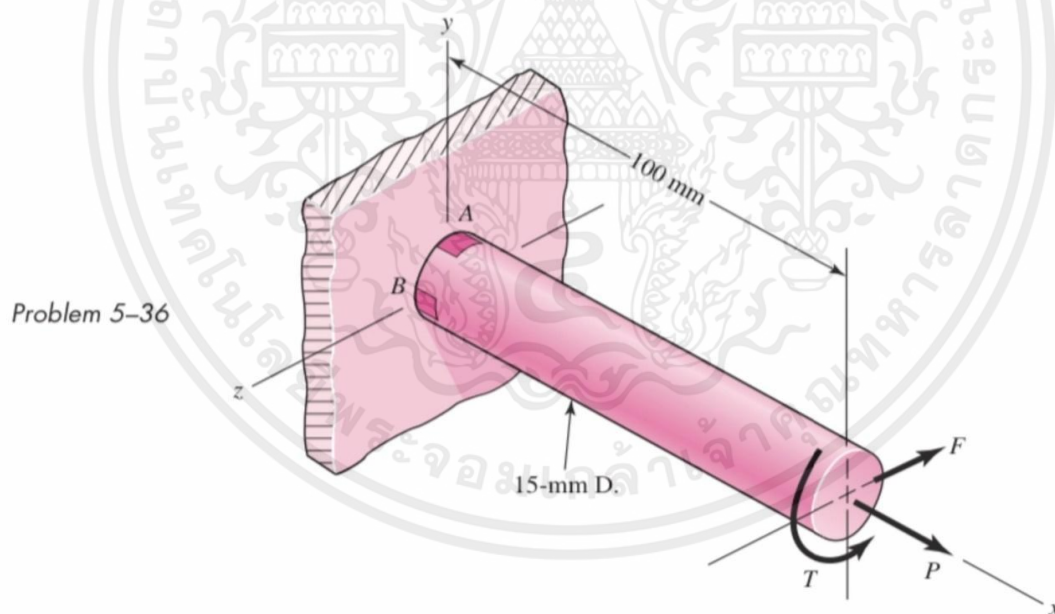
การตรวจสอบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองนั้นมีความถูกต้องแม่นยำจึงทำการนำโจทย์ตัวอย่างที่ 5-36 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design 10th Edition

ทำการจำลองโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วนำค่าความเค้นวอนมิสเสสจากโจทย์ตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับค่าลู่เข้าของความเค้นวอนมิสเสสที่ได้จากโปรแกรม

จากโจทย์ตัวอย่างในหนังสือ

- 5-36** This problem illustrates that the factor of safety for a machine element depends on the particular point selected for analysis. Here you are to compute factors of safety, based upon the distortion-energy theory, for stress elements at *A* and *B* of the member shown in the figure. This bar is made of AISI 1006 cold-drawn steel and is loaded by the forces $F = 0.55 \text{ kN}$, $P = 4.0 \text{ kN}$, and $T = 25 \text{ N} \cdot \text{m}$.



รูปที่ ข.1 โจทย์ปัญหา 5-36

(รูปจาก: หนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design 10th Edition, Richad G. Budynas and J.Keith Nisbebett, p.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าอนมิสเชสที่จุด A และ B

จากสมการ $\sigma' = [\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2]^{1/2}$ (ข-1)

โดย $\sigma_x = \frac{4P}{\pi d^2}$ (ข-2)

และ $\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3}$ (ข-3)

ที่จุด A: จากสมการที่ ข-2 :

$$\sigma_x = \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{4(4)10^3}{\pi(0.015^2)} = 22.6(10^6) = 22.6 \text{ MPa}$$

และสมการที่ ข-3

$$\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3} + \frac{4V}{3A} = \frac{16(25)}{\pi(0.015^3)} + \frac{4(0.55)(10^3)}{3(\pi/4)(0.015^2)} = 41.9(10^6) = 41.9 \text{ MPa}$$

จะได้ว่า

$$\sigma' = [22.6^2 + 3(41.9^2)]^{1/2} = 76 \text{ MPa}$$

ที่จุด B: จากสมการที่ ข-2 :

$$\sigma_x = \frac{4P}{\pi d^3} + \frac{32Fl}{\pi d^2} = \frac{4(4)10^3}{\pi(0.015^2)} + \frac{32(0.55)10^3(0.1)}{\pi(0.015^3)} = 189(10^6) = 189 \text{ MPa}$$

และสมการที่ ข-3

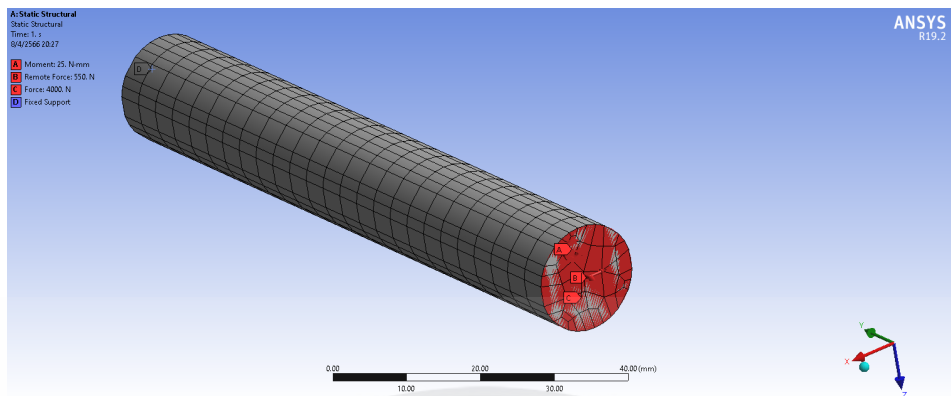
$$\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16(25)}{\pi(0.015^3)} = 37.7(10^6) = 37.7 \text{ MPa}$$

จะได้ว่า

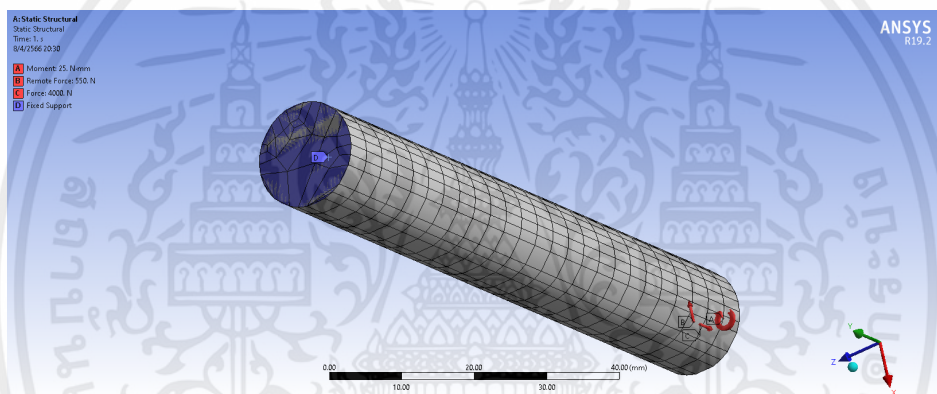
$$\sigma' = [189^2 + 3(37.7^2)]^{1/2} = 200 \text{ MPa}$$

นำข้อมูลจากโจทย์ตัวอย่างข้างต้นมาเขียนลงในโปรแกรม จากนั้นทำการจำลองโดยการใช้อีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวัดค่าความเค้นวินมิสเชสบนชิ้นงานที่จุด A และจุด B

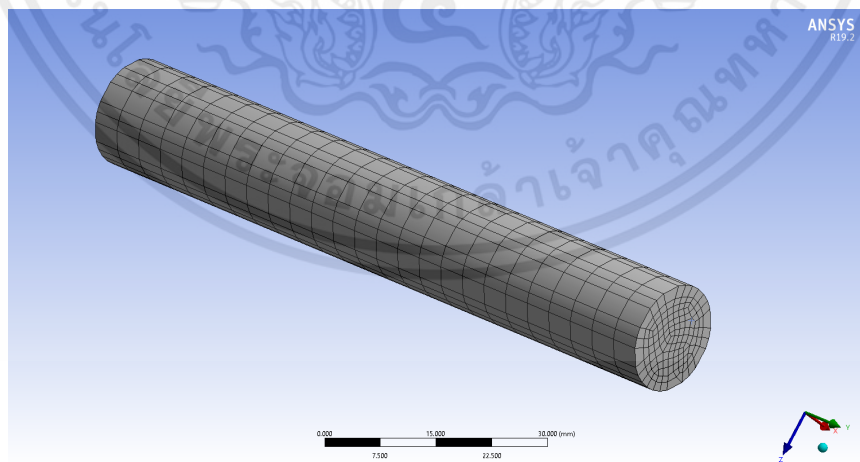
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แสดงการใส่โหลดลงไปบนชิ้นงาน



รูปที่ ข.3 แสดงการยึดบริเวณที่ทำการยึดหรือ Fix Support ไว้



รูปที่ ข.4 แสดงการสร้าง Mesh บนชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสูตรเพื่อหาค่าความคลาด

เคลื่อนจากการจำลองของท่อที่จุด A ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ขนาดของ Mesh (mm)	ขนาดของเอลิเมนต์	ความเค้นวอนมิสเชส (MPa)	%ความคลาดเคลื่อน
5	2325	58.539	-22.975
4	2333	62.386	-17.91315789
3	2383	64.541	-15.07763158
2	2544	63.805	-16.04605263
1	3077	62.615	-17.61184211
0.9	3253	61.865	-18.59868421
0.5	5698	65.784	-13.44210526
0.1	8265	72.546	-4.544736842
0.09	10876	73.654	-3.086842105
0.05	16523	74.698	-1.713157895
0.01	20456	75.659	-0.448684211
0.009	24623	75.874	-0.165789474
0.001	36582	75.938	-0.081578947
0.0009	45136	75.965	-0.046052632
0.0001	75862	78.457	3.232894737

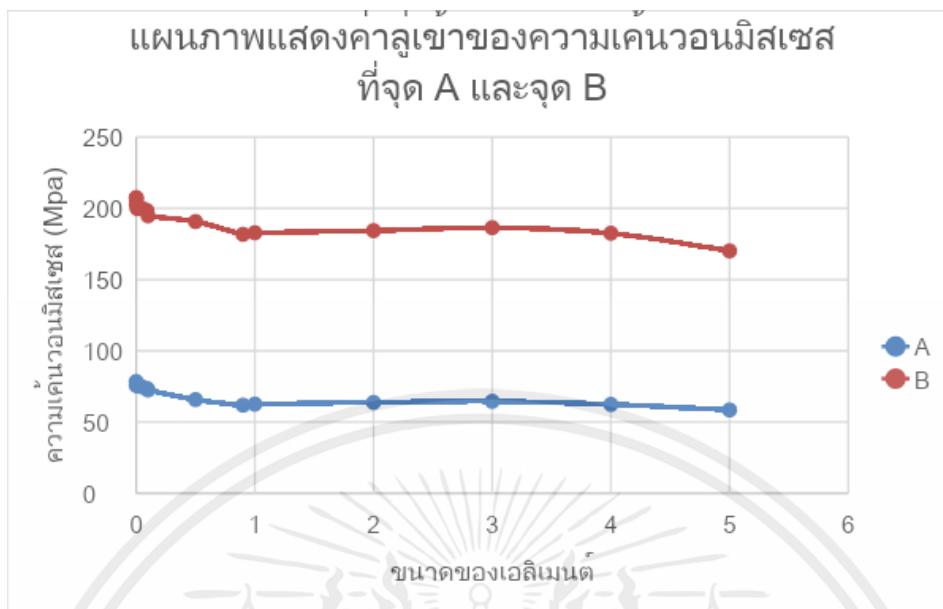
ตารางที่ ข.1 แสดงผลการจำลองของท่อที่จุด A

จากการจำลองของท่อที่จุด B ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ขนาดของ Mesh (mm)	ขนาดของเอลิเมนต์	ความเค้นวอนมิสเซส (Mpa)	%ความคลาดเคลื่อน
5	2325	170.07	-14.965
4	2333	182.46	-8.77
3	2383	186.38	-6.81
2	2544	184.31	-7.845
1	3077	182.79	-8.605
0.9	3253	181.71	-9.145
0.5	5698	190.658	-4.671
0.1	8265	194.674	-2.663
0.09	10876	198.478	-0.761
0.05	16523	199.879	-0.0605
0.01	20456	199.987	-0.0065
0.009	24623	199.997	-0.0015
0.001	36582	202.795	1.3975
0.0009	45136	206.786	3.393
0.0001	75862	207.457	3.7285

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการจำลองของท่อที่จุด B

นำข้อมูลจากทั้งสองตารางมาเขียนเป็นแผนภาพแสดงค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซส ที่จุด A และจุด B



รูปที่ ข.5 แสดงค่าการลู่เข้าของความเค้นวอนมิสเซส ที่จุด A และจุด B

จากตารางแสดงผลการจำลองจะเห็นว่าค่าความเค้นวอนมิสเซสจากทั้งวิธีการคำนวณและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันดังนั้นวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จึงถือว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง

ภาคผนวก ค

การเลือกแบริ่ง

การออกแบบแบริ่ง

ในการออกแบบแบริ่งที่ติดตั้งระหว่างเพลาคำนึงถึงแรงที่ตัวรถถ่ายสู่เพลามานผ่านแบริ่ง และคำนึงถึงวิธีการติดตั้งตัว Housing Bearing เพื่อให้ง่ายต่อการถอดประกอบสำหรับการแข่งขันโดยเพียงแค่ทำการขันสกรูเข้าไปในรูฐานแบริ่งกับ Swing Arm ก็สามารถติดตั้งได้แล้ว



รูปที่ ค.1 โมเดลของแบริ่ง

Part Number		H	L	L ₁	A	d ₁	d	t	H ₁	B	S	Basic Load Rating (kN)		Set Screw		Mass (g)	
Type	D											Cr (Dynamic)	Cor (Static)	M ₁	Tightening Torque (N • cm)		Axial Load Capacity (N)
PDRCP	12	30.2	114	87	25	16	12	12	57	22.0	6	9.55	4.8	M5x0.8	240	476	390
	15	30.2	114	87	25	16	12	12	57	22.0	6	9.55	4.8	M5x0.8	240	476	380
	17	30.2	114	87	25	16	12	12	57	22.0	6	9.55	4.8	M5x0.8	240	476	360
	20	33.3	125	97	27	16	12	13	64	24.7	7	12.8	6.6	M5x0.8	250	1280	480
	25	36.5	130	100	29	16	12	13	70	27.0	7.5	14.0	7.9	M6x0.75	490	1400	590
	30	42.9	156	120	33	21	14	15	83	30.3	8	19.6	11.3	M6x0.75	490	1960	700

Unit, Type	[Bearing Unit] Ball Bearing Units	Bearing Unit, Type	Pillow Blocks
Shaft Bore Dia. D(Ø)	25	Unit Body Material	[Cast Iron] FC200
Bearing Inner Dia. Shape	Set Screw	Type of Pillow Blocks	[Lightweight] Compact
Bearing Material	[Steel] SUJ2	Mounting Height H(mm)	36.5
Surface Treatment	Not Provided	Basic Load Rating Cr (Dynamic)(N)	14000
Basic Load Rating Cor (Static)(N)	7900	-	-

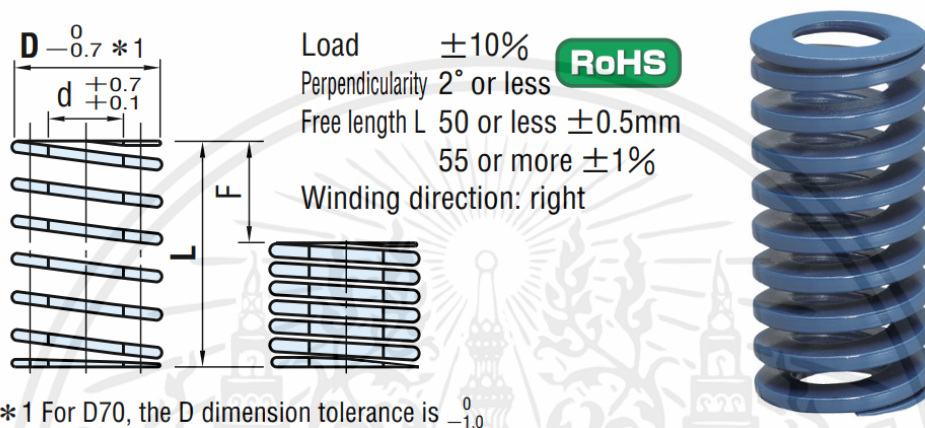
รูปที่ ค.2 ข้อมูลของแบริ่งที่ใช้ในการเลือก

จากการออกแบบเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และติดตั้งได้เหมาะสมกับองค์ประกอบที่มีของโครงโบกี้หัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก จึงทำการเลือกแบริ่งรุ่น PDRCB25-SET เนื่องจากพิจารณาจากขนาดของเพลลาที่สวมเป็นหลัก และสามารถรับโหลดที่หนักแบบคงที่ได้อยู่ที่ 7900 นิวตันซึ่งเกินโหลดสูงสุดที่อยู่ในโครงโบกี้ตามที่ได้คำนวณมาแล้วในบทที่ 3

ภาคผนวก ง

การออกแบบสปริงกดสำหรับตุ้มล้อ

การออกแบบสปริงรับแรงกดสำหรับตุ้มล้อ ช่วงค่านิจสปริงที่ต้องการ $35 \leq k \leq 38$ N/mm และระยะยุบที่เหลือหลังรับน้ำหนักของตัวรถจักรยานไฟฟ้าอยู่ที่ 145-165 mm โดยหนักสูงสุดที่รับได้ 250 kg ต่อหนึ่งตัว



รูปที่ ง.1 สปริง

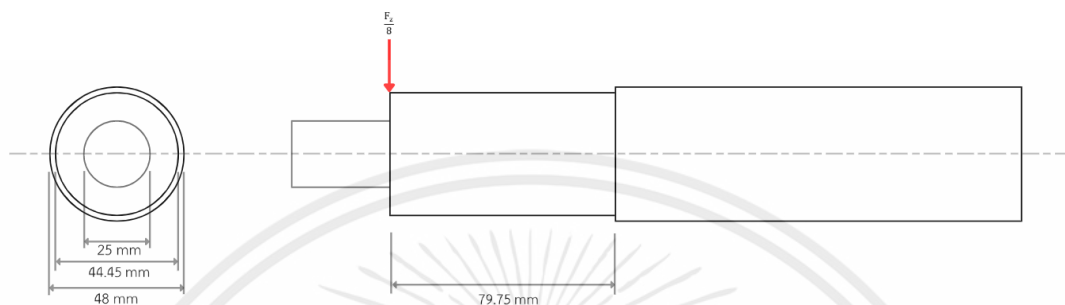
สามารถเลือกชิ้นงานออกมาได้ตั้งรูปและตารางที่ ค.1

SHL50-225	
วัสดุ	ลวดชุบน้ำมัน
ค่านิจสปริง (k)	36.8 N/mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D)	50 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d)	25 mm
ความยาวสปริงเมื่อไม่มีโหลด (L)	225 mm
ระยะยุบที่น้ำหนัก 250 kg (F)	66.6 mm

ตาราง ง.1 ตารางข้อมูลสปริง

ภาคผนวก จ
การออกแบบเพลลา

การออกแบบบ่าเพลลา



จากแผนภาพ Free-body diagram

$$\sigma_x = \frac{M_{xc}}{I_x} = \frac{\frac{F_z L_c}{8}}{\frac{\pi d^4}{64}}, \quad \sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = \frac{4V}{3A}, \quad \tau_{yz} = 0, \quad \tau_{xz} = 0$$

แรงที่กดต่อ 1 โครงแคร์ (F_z) เท่ากับ

$$F_z = \frac{mg}{2}$$

$$F_z = \frac{2800 \times 9.81}{2}$$

$$F_z = 13734 \text{ N}$$

ดังนั้น

$$\sigma_x = \frac{\frac{13734}{8} (79.75 \times 10^{-3}) (24 \times 10^{-3})}{\frac{\pi (48 \times 10^{-3})^4}{64}}$$

$$\sigma_x = 12.61 \text{ เมกะปาสคาล}$$

หาค่าความเค้นเฉือนที่กระทำกับเพลลา

$$V = \frac{F_z}{8}$$

$$V = \frac{13734}{8}$$

$$V = 1716.75 \text{ N}$$

$$\tau_{xy} = \frac{4 \times 1716.75}{3 \frac{\pi(48 \times 10^{-3})^4}{64}}$$

$$\tau_{xy} = 8.784 \text{ จิกะปาสคาล}$$

หาค่าความเค้นวอนมิส

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x + \sigma_y)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(12.61)^2 + (12.61)^2 + 6(8.784 \times 10^3)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{von} = 162.822 \text{ เมกะปาสคาล}$$

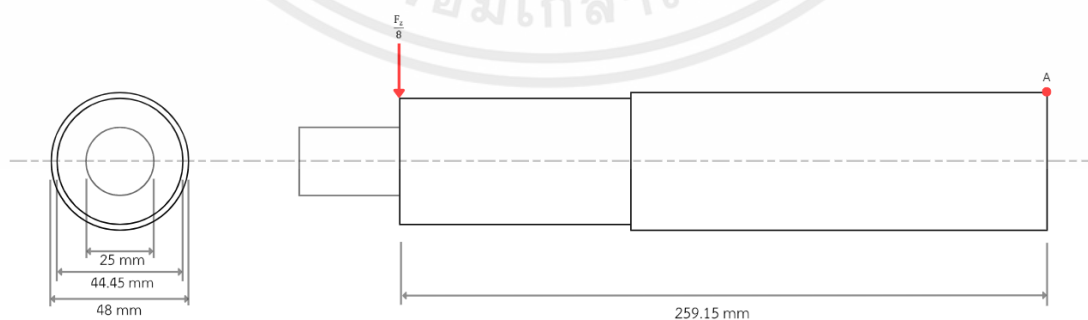
$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x = (2.1)(12.61) = 26.481 \text{ เมกะปาสคาล}$$

โดย k_t หรือ ค่าความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) สามารถหาได้จากตาราง A-15 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design (9th ed.)

หาค่าตัวประกอบปลอดภัย

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{530 \times 10^6}{162.822 \times 10^6} = 3.255$$

การออกแบบตรงกลางของเพลลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณที่จุด A ซึ่งรับความเสียหายก่อน

$$\sigma_x = \frac{M_x c}{I_x}, \quad \sigma_y = 0, \quad \sigma_z = 0$$

$$\sigma_x = \frac{\frac{13734}{8} (259.15 \times 10^{-3})(24 \times 10^{-3})}{\frac{\pi(48 \times 10^{-3})^4}{64}}$$

$$\sigma_x = 40.976 \text{ เมกะปาสคาล}$$

$$\tau_{xy} = \frac{4 \times 1716.75}{3 \frac{\pi(48 \times 10^{-3})^4}{64}}$$

$$\tau_{xy} = 8.784 \text{ จิกะปาสคาล}$$

หาค่าความเค้นวอนมิส

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(40.976)^2 + (40.976)^2 + 6(8.784 \times 10^3)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{von} = 167.42 \text{ เมกะปาสคาล}$$

$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x = (2.1)(40.976) = 86.05 \text{ เมกะปาสคาล}$$

โดย k_t หรือ ค่าความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) สามารถหาได้จากตาราง A-15 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design (9th ed.)

หาค่าตัวประกอบปลอดภัย

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{530 \times 10^6}{167.42 \times 10^6} = 3.16$$