

การออกแบบแคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

DESIGN OF MINIATURE ELECTRIC LOCOMOTIVE BOGIE FRAME



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2563

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

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

DESIGN OF MINIATURE ELECTRIC LOCOMOTIVE BOGIE FRAME



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลใดๆที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2020

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

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

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563

สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบแคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

DESIGN OF MINIATURE ELECTRIC LOCOMOTIVE BOGIE FRAME

ผู้จัดทำ

1. นาย วิทวัส เวียงคำ รหัสประจำตัว 60010935
2. นางสาว สุชาดา วันนาต๊ะ รหัสประจำตัว 60011082
3. นาย อธิพรรณวัฒน์ จำนงประโคน รหัสประจำตัว 60011133



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

การออกแบบแครร์รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

นาย วิทวัส	เวียงคำ	60010935
นางสาว สุชาดา	วันนาดีบ	60011082
นาย อธิพรรณวัฒน์	จำนงประโคน	60011133
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์	พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ระบบขนส่งทางรางเป็นระบบขนส่งขนาดใหญ่ซึ่งมีทั้งขนส่งผู้โดยสารและขนส่งสินค้า แครร์รถจักรเป็นส่วนประกอบสำคัญของรถไฟที่มีหน้าที่ในการบรรทุกตู้รถส่วนบน ชุดล้อ และระบบสำคัญอื่นๆ เช่น ระบบฉุดลาก และระบบกันสะเทือน ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบแครร์รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กที่วิ่งบนรางขนาด 12 นิ้ว รัศมีความโค้ง 16 เมตร และน้ำหนักรวมตู้รถ 2 ตัน ซึ่งเป็นไปตามกฎการแข่งขันของโครงการ Railway Challenge ในการออกแบบการรับภาระกระทำกับแครร์รถจักรไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน EN13749 และการวิเคราะห์ความแข็งแรงแครร์รถจักรทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Abaqus และทำการหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโครงสร้างแครร์รถจักรไฟฟ้า โดยคำนวณจากค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ AISI 1010 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์มีดังนี้ กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ในทางโค้ง มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 3.85 กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 4.10 กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 4.02

คำสำคัญ: แครร์รถจักรไฟฟ้า, Railway Challenge, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Design of Miniature Electric Locomotive Bogie Frame

Witthawat	Wiangkham	60010935
Suchada	Wannatib	60011082
Athipannawat	Jamnongprakhon	60011133
Asst.Prof.Dr. Monsak	Pimsarn	Advisor
		Year 2020

ABSTRACT

Rail transportation is a massive system of both passenger and freight. Bogie frame is an important component of a train that is function of carrying an upper car-body, a wheelset, and others important system, such as, traction system, and suspension system. This senior project aims to design of miniature electric locomotive bogie frame that runs on 12 inches track gauge, 16-meter curve radius and the total weight of the car is two tons that follow competition rules of railway challenge. In designing of miniature electric locomotive bogie frame according to EN13749 standard and strength analysis by finite element method by using Abaqus program. and determine factor of safety of the electric locomotive bogie frame ,calculated with the mechanical properties of AISI 1010 steel. The results of the analysis were as follows: Case 1, transversal and track twist has a factor of safety 3.85. Case 2, longitudinal has a factor of safety 4.10 and Case 3, Collision has a factor of safety 4.02.

Keywords: Locomotive bogie, Railway Challenge, Finite element.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทางคณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณพี่ ยศพล หวังศิริมงคล รุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Abaqus และให้คำปรึกษาในเรื่องโครงร่างเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนทั้งเครื่องมือต่าง ๆ และงบประมาณในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของคณะผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้สนับสนุนและคอยให้กำลังใจจนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี



นาย วิทวัส
นางสาว สุชาดา
นาย อธิพรรณวัฒน์

เวียงคำ
วันนาตีบ
จำนงประโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินการ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ.....	4
2.3.1 ประเภทของรถไฟ.....	4
2.3.2 ส่วนประกอบของรถไฟ.....	5
2.3.3 ส่วนประกอบของโครงกระดูก.....	6
2.3.4 ประเภทของโครงกระดูกแต่ละประเภทโดยจำแนกตามมาตรฐาน EN13479	7
2.4 มาตรฐาน EN13479	7
2.5 การแข่งขัน Railway Challenge.....	12
2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.6.1 การโค้งตัวของคาน.....	13
2.6.2 กฎของฮุก	15
2.6.3. ทฤษฎีการเลือกวัสดุ.....	17
2.6.4 ค่าตัวประกอบความปลอดภัย.....	19
2.6.5 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในระบบสามมิติ.....	19
2.6.6 ทฤษฎีความเสียหายของ von Mises	21
2.6.7 สลักเกลียว.....	22
2.6.8 สปริงกิ้ง.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 24

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

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

2.6.9 เพลลา	26
บทที่ 3 วิธีการออกแบบและการทดสอบ	28
3.1 บทนำ	28
3.2 การออกแบบแครร์ถจักรไฟฟ้าตามกฎหมายของ Railway Challenge	28
3.2.1 ปัจจัยในการออกแบบแครร์ถจักรไฟฟ้า	28
3.2.2 เครื่องมือ	29
3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบแครร์ถจักรไฟฟ้า	30
3.3 การวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์	35
3.3.1 เครื่องมือ	35
3.3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	35
3.3 การประกอบชิ้นส่วน	48
3.3.1 การประกอบตลับลูกปืนกับเพลลา	48
3.3.2 การประกอบลิ้มกับเพลลา	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง	50
4.1 บทนำ	50
4.2 ผลการทดลอง	50
4.2.1 ผลของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำกับแครร์ถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ ตามมาตรฐาน EN13749	50
4.2.2 ผลของการจำลองของแครร์ถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ ในแต่ละกรณี ตามมาตรฐาน EN13749	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1 บทนำ	57
5.2 สรุปผลการทดลอง	57
5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น	58
5.4 ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก : แบบส่วนประกอบโครงแครร์ถจักรไฟฟ้า	62
ภาคผนวก ข : การตรวจสอบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารภาคผนวก ค : การออกแบบสปริงกดสำหรับตุ้มล้อ

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

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
ภาคผนวก จ : การออกแบบลิ้ม	100
ภาคผนวก ฉ : การออกแบบเพลลา	103
ภาคผนวก ช : การเลือกแบร์ริง	106
ภาคผนวก ซ : ตารางราคา	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่และการเสียรูปของแควร์รถจักรไฟฟ้า	8
ตารางที่ 2.2 แสดงแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อแควร์รถจักรไฟฟ้า ในแต่ละกรณี	11
ตารางที่ 2.3 แสดงประเภทของปลายสปริง.....	25
ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบเงื่อนไขกับข้อมูลจากการออกแบบ	33
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติเชิงของวัสดุประเภทเหล็กหล่อ (CAST IRON) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (LOW ALLOY STEEL).....	34
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าของแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อโครงแควร์รถจักรไฟฟ้า ในแต่ละกรณี	36
ตารางที่ 3.4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง	38
ตารางที่ 3.5 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว	38
ตารางที่ 3.6 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน	39
ตารางที่ 4.1 แสดงผลของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำกับแควร์รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ ตามมาตรฐาน EN13749	51
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแควร์รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้เหล็กหัวแดง S45C.....	52
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเค้นอนนิสและค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแควร์รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ สำหรับกรณีที่ 1	52
ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุ AISI 1010 และ ASTM A842 GRADE 250 กับเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุ.....	53
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแควร์รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 1 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010	53
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแควร์รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 2 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010	55
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแควร์รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 3 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010	56
ตารางที่ ข.1 แสดงผลการจำลองของท่อนที่จุด A	86
ตารางที่ ข.2 แสดงผลการจำลองของท่อนที่จุด B	87
ตารางที่ ค.1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของลวดแบบ HARD-DRAWN WIRE A227.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้าที่

ตารางที่ ซ.1 แสดงราคาของสินค้าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายจราจรไฟฟ้า.....	107
--	-----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของรถไฟ.....	6
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของโครงกระดูก.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงระบบพิกัดของแคร่รถจักรไฟฟ้า.....	8
รูปที่ 2.4 แสดงประเภทและทิศทางของแรงที่กระทำบนแคร่รถจักรไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2.5 การโค้งงอของคานจากโมเมนต์ดัด.....	13
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัด.....	14
รูปที่ 2.7 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว.....	15
รูปที่ 2.8 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะ.....	16
รูปที่ 2.9 ความเครียดในระบบสามมิติ.....	16
รูปที่ 2.10 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและราคา.....	18
รูปที่ 2.11 แสดงวัสดุในกลุ่มโลหะและโลหะผสม.....	18
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากทฤษฎีของ VON MISES และการเปลี่ยนรูปพลังงาน.....	21
รูปที่ 2.13 แสดงองค์ประกอบของสลักเกลียว.....	22
รูปที่ 2.14 แสดงตัวแปรความแข็งแรงของชิ้นงานที่ถูกยึด.....	23
รูปที่ 2.15 แสดงแรงกระทำบนสปริงกวด.....	24
รูปที่ 3.1 แสดงการหาระยะระหว่างล้อของแคร่รถจักรไฟฟ้าสูงสุด (MAXIMUM BOGIE WHEELBASE).....	30
รูปที่ 3.2 แสดงการหาระยะ AC และ CE.....	31
รูปที่ 3.3 แสดงภาพเขียนแบบของแคร่รถจักรไฟฟ้า.....	33
รูปที่ 3.4 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ.....	37
รูปที่ 3.5 แสดงโครงกระดูกจักรไฟฟ้าก่อนทำการ PARTITION.....	37
รูปที่ 3.6 แสดงโครงกระดูกจักรไฟฟ้าหลังทำการ PARTITION.....	38
รูปที่ 3.7 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีที่ 1 (1).....	39

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 3.8 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีที่ 1 (2) โดยใช้ประโยชน์จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....

ไม่ว่ารูปที่ 3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีที่ 2.....

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

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีที่ 3	41
รูปที่ 3.11 แสดงการแบ่ง MESH แบบหยาบ.....	41
รูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองของกรณีที่ 1.....	42
รูปที่ 3.13 แสดงบริเวณที่สนใจจุดแรกของผลการจำลองกรณีที่ 1	42
รูปที่ 3.14 แสดงบริเวณที่สนใจจุดที่สองของผลการจำลองกรณีที่ 1.....	43
รูปที่ 3.15 แสดงผลการจำลองของกรณีที่ 2.....	43
รูปที่ 3.16 แสดงบริเวณที่สนใจจุดแรกของผลการจำลองกรณีที่ 2	44
รูปที่ 3.17 แสดงบริเวณที่สนใจจุดที่สองของผลการจำลองกรณีที่ 2.....	44
รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลองของกรณีที่ 3.....	45
รูปที่ 3.19 แสดงบริเวณที่สนใจจุดแรกของผลการจำลองกรณีที่ 3	45
รูปที่ 3.20 แสดงบริเวณที่สนใจจุดที่สองของผลการจำลองกรณีที่ 3.....	46
รูปที่ 3.21 แสดงการแบ่ง MESH ที่ละเอียดขึ้น	46
รูปที่ 3.22 แสดงการแบ่ง MESH ที่ละเอียดขึ้นในบริเวณตรงกลางของด้านข้างโครงแคร์รถจักรไฟฟ้า.....	47
รูปที่ 3.23 แสดงการแบ่ง MESH ที่ละเอียดขึ้นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง.....	47
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นวอนมิสและจำนวน ELEMENT ของการรับภาระทั้ง 3 กรณี ของเหล็กหัวแดง S45C	51
รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 1.....	54
รูปที่ 4.3 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 1.....	54
รูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 2.....	55
รูปที่ 4.5 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 2.....	55
รูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 3.....	56
รูปที่ 4.7 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 3.....	56
รูปที่ ข.1 โจทย์ตัวอย่างหน้า 233 จากหนังสือ SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN 9 TH EDITION.....	83
รูปที่ ข.2 แสดงการใส่โหลดลงไปบนชิ้นงานและทำการ COUPLING.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ ข.3 แสดงการสร้าง MESH บนชิ้นงาน.....	85
รูปที่ ข.4 แสดงค่าลู่อเข้าของความเค้นวอนมิสเซส ที่จุด A และ B	87
รูปที่ ค.1 แสดงสปริงที่ใช้สำหรับดุมล้อ	92
รูปที่ ง.1 แสดงสลักเกลียวสำหรับดุมล้อ ขนาด M10 X 1.5.....	93
รูปที่ ง.2 แสดงแหวนอีแปะ ขนาด M10	93
รูปที่ ง.3 แสดงแป้นเกลียวขนาด M10.....	94
รูปที่ ง.4 แสดงแผนภาพ FREE-BODY DIAGRAM ของสลักเกลียว	96
รูปที่ ง.5 แสดงสลักเกลียวสำหรับยึดโครงแคร้ ขนาด M10 X 1.5.....	99
รูปที่ จ.1 แสดงลิ้มสำหรับล้อและเพลลา	101
รูปที่ จ.2 แสดงลิ้มสำหรับจานเบรกและเพลลา.....	102
รูปที่ ฉ.1 แสดง FREE-BODY DIAGRAM ของบ่าเพลลา.....	103
รูปที่ ฉ.2 แสดง FREE-BODY DIAGRAM ของบริเวณกลางเพลลา.....	104
รูปที่ ช.1 แสดงขนาดของแบริ่งตุ๊กตา วัสดุเหล็กหล่อ	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันระบบขนส่งทางรางถือเป็นระบบที่มีการพัฒนาและเติบโตอย่างก้าวหน้า ซึ่งประเทศไทยของเรานั้นก็ได้มีการผลักดันให้เกิดการพัฒนาในด้านของระบบขนส่งทางรางเช่นกัน โดยปัจจุบันนี้ระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยถือเป็นอีกหนึ่งการคมนาคมหลักของประเทศ ดังนั้นทางกลุ่มของเราจึงมีความสนใจที่จะมีส่วนร่วมในการพัฒนาระบบรางของประเทศ โดยเข้าร่วมการแข่งขัน Railway Challenge และทำการศึกษางานวิจัยเรื่องเกี่ยวกับระบบรางในส่วนของแครร์รถจักรไฟฟ้า

การออกแบบแครร์รถจักรไฟฟ้า เราจะการออกแบบให้มีขนาดความยาวและความกว้างตามกฎของการแข่งขัน Railway Challenge และจัดหาวัสดุที่เหมาะสม สำหรับการตรวจสอบและวิเคราะห์ความแข็งแรงนั้น เราจะทำ การตรวจสอบและวิเคราะห์ความแข็งแรงตามมาตรฐาน EN13749 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้แครร์รถจักรไฟฟ้าของเรามีความแข็งแรงเป็นไปตามข้อกำหนดของโครงการ Railway Challenge

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบแครร์รถจักรไฟฟ้าเพื่อเข้าร่วมโครงการ Railway Challenge
2. เพื่อศึกษาการรับแรงทางสถิตยศาสตร์ของแครร์รถจักรไฟฟ้า
3. เพื่อทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแครร์รถจักรไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อได้รับแรงตามมาตรฐาน EN13749

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ออกแบบแครร์รถจักรไฟฟ้าตามกฎของการแข่งขัน Railway Challenge
2. เพื่อทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแครร์รถจักรไฟฟ้าเมื่อมีการรับน้ำหนักตามมาตรฐาน EN13749

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเข้าร่วมโครงการ Railway challenge
2. เพื่อนำโครงรถจักรไฟฟ้าไปศึกษาและพัฒนาต่อได้

1.5 วิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาข้อกำหนดและกฎระเบียบของการแข่งขัน Railway Challenge
2. ออกแบบโครงรถจักรไฟฟ้าตามเกณฑ์ที่กำหนด
3. ออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบช่วงล่าง
4. ใช้โปรแกรมเขียนแบบทำการสร้างแบบจำลองของโครงรถจักรไฟฟ้าสามมิติ
5. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ
6. วิเคราะห์แรงในสภาวะสถิตยศาสตร์ที่กระทำต่อโครงรถจักรไฟฟ้า กรณีสภาวะการใช้งานแบบไม่ปกติ ตามมาตรฐาน EN 13749
7. ใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทดสอบหาค่าความเค้นของโครงรถจักรไฟฟ้าจำลอง ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี ตามมาตรฐาน EN 13749
8. คำนวณตัวประกอบความปลอดภัยแต่ละกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองของโครงแคร์ มีความจำเป็นที่ต้องมีความเข้าใจพื้นฐานในเรื่องความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ ส่วนประกอบของรถไฟ ส่วนประกอบของโครงแคร์ การสร้างแบบจำลองมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อชิ้นงาน ค่าความเค้น ค่าความเครียด ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น การเสีรูปของวัสดุ การวิเคราะห์และการพิจารณาผล การเลือกวัสดุ ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- CEN (European Committee for Standardization) ได้ศึกษาประเภท อายุการใช้งาน ระยะทางวิ่งโดยเฉลี่ยต่อปี ระยะทางทั้งหมด การบำรุงรักษา และข้อกำหนดทางเทคนิคอื่นๆของแคร์รถจักรไฟฟ้า และภาระที่จำเป็นสำหรับการออกแบบแคร์รถจักรไฟฟ้า เช่น สภาพการใช้งานแบบปกติและไม่ปกติ เพื่อให้ได้คำอธิบายที่ถูกต้องของวัตถุประสงค์ และคุณภาพในการออกแบบ ตามมาตรฐาน EN15663, EN15085 และ EN15827

- G.Mancini , A.Cera ได้ศึกษามาตรฐาน EN 13749 ที่ออกโดยหน่วยงานมาตรฐานยุโรป เพื่อกำหนดลักษณะการออกแบบที่สมบูรณ์ของแคร์รถจักรไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการประเมินขั้นตอนการออกแบบ การตรวจสอบและข้อกำหนดด้านคุณภาพการผลิต รวมถึงการกำหนดสมมติฐานเกี่ยวกับภาระและความล้มตลอดจนการคำนวณ วิธีการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าสถิต ความล้าของแคร์รถจักรไฟฟ้า

- Jakkrachai S. , Pattara T. และ Yodsapol W. ได้ออกแบบและพัฒนารถไฟโดยสารแบบย่อส่วน โดยมีข้อกำหนดคือรับภาระ 300 กิโลกรัม และเป็นไปตามมาตรฐาน EN 13749 ซึ่งมีรูปแบบการรับภาระของแคร์รถจักรไฟฟ้า 3 กรณี ได้แก่ 1) รับภาระจากน้ำหนักกดลงบนแคร์รถไฟและบนส่วนรองรับผู้โดยสารขณะรถไฟหยุดนิ่ง 2) รับภาระจากน้ำหนักกดลงบนแคร์รถไฟและบนส่วนรองรับผู้โดยสารขณะรถไฟโคลงตัว 3) รับภาระจากน้ำหนักกดลงบนแคร์รถไฟและบนส่วนรองรับผู้โดยสารขณะรถไฟกำลังเข้าโค้ง และคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ

รถไฟเป็นกลุ่มของยานพาหนะโดยเคลื่อนที่ตามรางเพื่อการขนส่งสินค้าหรือเดินทางของผู้คน โดยกำเนิดขึ้นครั้งแรกที่ประเทศอังกฤษเมื่อประมาณสามร้อยปีที่แล้ว โดยได้มีการพัฒนาและปรับปรุงจนมาถึงปัจจุบัน

องค์ประกอบของการเดินรถไฟที่สำคัญประกอบด้วย

- ทางรถไฟ โดยส่วนใหญ่คือมีรางเหล็ก 2 เส้นขนาดกันไปและมีไม้หมอนรองรางอยู่ด้านล่างรางโดยจะยึดติดกันด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวรางโดยขนาดความกว้างของรางรถไฟจะมีหลายขนาดเช่น 1 เมตร, 1.067 เมตร, 1.435 เมตร, 1.520 เมตร, 1.524 เมตร, 1.6 เมตร และอื่นๆ โดยการใช้แต่ขนาดแตกต่างกันไปภูมิภาคและมาตรฐานแต่ละพื้นที่ที่อ้างอิง
- รถจักรไฟฟ้า มีไว้เพื่อทำหน้าที่ลากจูงรถไฟคันอื่นๆ ให้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยประเภท เช่นรถจักรไฟฟ้าไอน้ำ โดยอาศัยแรงดันสูงจากไอน้ำที่ได้จากการต้มน้ำให้เดือดมาดันลูกสูบเพื่อให้รถเคลื่อนที่โดยในปัจจุบันไม่นิยมใช้, รถจักรไฟฟ้าดีเซล สามารถแบ่งย่อยได้อีกสองประเภทคือ รถรถจักรไฟฟ้าดีเซลการกลและรถจักรไฟฟ้าดีเซลไฟฟ้า, รถจักไฟฟ้า
- รถพ่วง คือรถที่ถูกลากจูงโดยรถจักรไฟฟ้าโดยใช้ในรูปแบบที่ต่างกันเช่นถ้าใช้ในการโดยสารของคนจะเรียกว่ารถโดยสาร ถ้าใช้ในการขนส่งสินค้าจะเรียกว่ารถสินค้า
- ระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ คือเป็นตัวกลางในการสื่อสารที่แนะนำ เตือน หรือบังคับว่าควรทำอะไรเพื่อความปลอดภัยในการเดินทาง โดยประกอบด้วย สัญญาณ (Signal), ประแจกล(Switching device), ตอนทางสะดวก(Block section), วงจรไฟตอน(Track Circuit) ,เครื่องกั้นถนน (Level Crossing protection device) ,ระบบบังคับล้อค สัม พันธ์ (Interlocking device), ATP(Automatic Train Protection), CTC (Centralized Traffic Control)
- สถานีรถไฟ,ป้ายหยุดรถ,ที่หยุดรถ คือสถานที่ในการขนส่งสินค้าขึ้นลงหรือที่ขึ้น-ลงของผู้โดยสาร

2.3.1 ประเภทของรถไฟ

รถไฟมีหลายประเภทแบ่งโดยใช้เกณฑ์ต่างๆเช่น ลักษณะการใช้งาน ความเร็วในการบริการ จำนวน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นประโยชน์ในการค้า
 ความจุโดยสาร ขนาดความกว้างของราง เป็นต้นโดยในไทยจะแบ่งแยกประเภทของรถไฟได้ดังนี้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

- รถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางหลักในเมือง คือรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการผู้โดยสารในเส้นทางรถไฟฟ้ามวลชนในเมือง
- รถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระบบรอง คือรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการผู้โดยสารในเส้นทางรถไฟฟ้ามวลชนระบบรองเช่น รถไฟฟ้ารางเบา และรถไฟรางเดี่ยว
- รถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางชานเมืองคือ รถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการผู้โดยสารในแนวเส้นทางรถไฟชานเมือง
- รถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระหว่างเมือง คือรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการขนส่งสินค้าและผู้โดยสารใน แนวเส้นทางรถไฟระหว่างเมือง โดยสามารถแบ่งประเภทของรถไฟย่อยลงได้อีกตามข้อกำหนดของการรถไฟแห่งประเทศไทย คือรถไฟสำหรับระบบขนส่งสินค้าระหว่างเมือง , รถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง (Intercity Passenger Rail, IPR) , รถไฟความเร็วสูงปานกลาง (Intercity Rapid-speed Passenger Rail, IRPR) , รถไฟความเร็วสูง (Intercity High-speed Passenger Rail, IHPR)

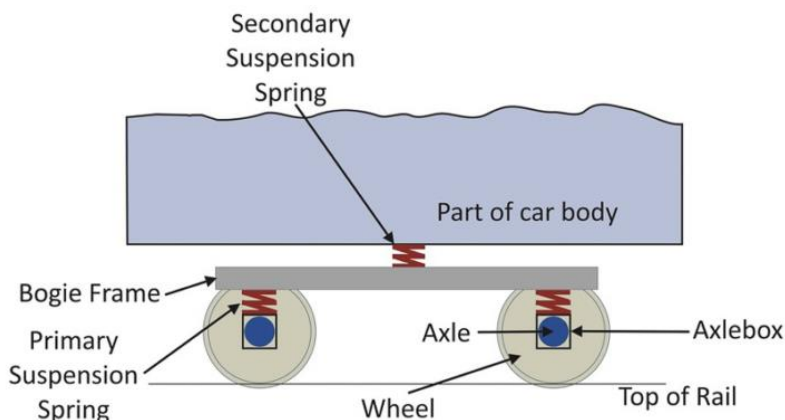
2.3.2 ส่วนประกอบของรถไฟ

รถจักรไฟฟ้าหรือรถพ่วงประกอบไปด้วยหลายส่วนโดยส่วนหลักๆที่พบบ่อยคือ ส่วนของตัวรถ (part of car body) ขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน เช่น ใช้เป็นหัวรถจักรไฟฟ้าในการควบคุมการขับเคลื่อนคือรถจักรไฟฟ้าหรือตู้ผู้โดยสารใช้ในการรองรับผู้โดยสารหรือสิ่งของในการขนส่งคือรถพ่วง ส่วนของระบบกันการสั่นสะเทือนทุติยภูมิ (secondary suspension) ทำหน้าที่ในการป้องกันการสั่นสะเทือนที่จะเกิดขึ้นในส่วนบนหรือใช้ในการปรับระยะความสูงต่ำของส่วนบน ส่วนโครงแคร่ (bogies frame) ทำหน้าที่รองรับภาระที่เกิดจากน้ำหนักกดจากส่วนบนและติดตั้งชิ้นส่วนอื่นๆ ส่วนระบบกันการสั่นสะเทือนปฐมภูมิ (primary suspension) ทำหน้าที่ลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากล้อและรางสัมผัสกัน ส่วนล้อ (wheel) ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากแคร่ไปยังรางและเคลื่อนที่โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสนใจเพียงโครงแคร่เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

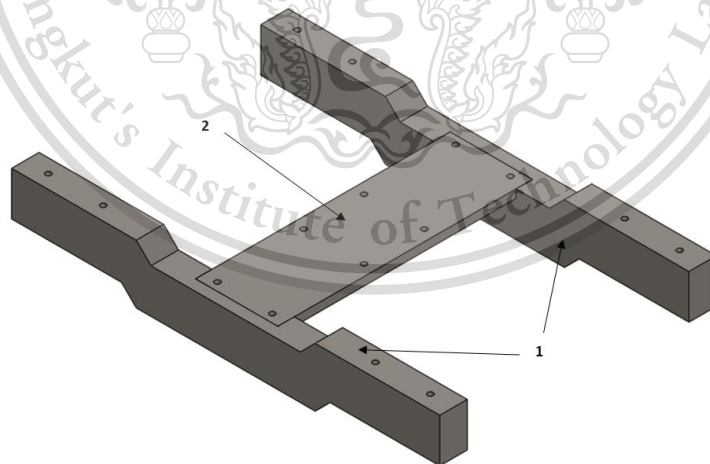


รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของรถไฟ

(รูปจาก: www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/bogies.html)

2.3.3 ส่วนประกอบของโครงแคร่

โครงแคร่คือชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับชุดล้อและเชื่อมกับตัวยานพาหนะด้านบน ทำหน้าที่รองรับภาระต่างๆ ทั้งจากน้ำหนักด้านบนและแรงที่มากระทำในสภาวะต่าง ๆ โดยอาจจะมียอดประกอบของระบบอื่น ๆ ติดตั้งในตัวชิ้นโครงแคร่ด้วย เช่น ชุดล้อ (wheelset), ตัวส่งกำลัง (traction motor), ชุดเกียร์ (gearbox unite), แดมเปอร์(damper), ชุดกระบอกเบรก (brake cylinder), ระบบกันการสั่นสะเทือนปฐมภูมิ (primary suspension(springs)), ระบบกันการสั่นสะเทือนทุติยภูมิ (secondary suspension(air bag)), ชุดเกียร์(gearbox unite) ตัวบังเพลาล้อ(axle box cover)



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของโครงแคร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คานด้านข้าง

2. คานด้านตัดขวาง

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

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

2.3.4 ประเภทของโครงข่ายแต่ละประเภทโดยจำแนกตามมาตรฐาน EN13479

ประเภทที่ 1 โครงข่ายสำหรับรถไฟเส้นทางหลัก,รถไฟระหว่างเมือง,รถไฟความเร็วสูง ทั้งโครงข่ายที่มีต้นกำลังและไม่มีต้นกำลัง

ประเภทที่ 2 โครงข่ายสำหรับรถไฟชานเมือง ทั้งโครงข่ายที่มีต้นกำลังและไม่มีต้นกำลัง

ประเภทที่ 3 โครงข่ายสำหรับรถไฟในเมือง,รถด่วน ทั้งโครงข่ายที่มีต้นกำลังและไม่มีต้นกำลัง

ประเภทที่ 4 โครงข่ายรถไฟรางเบา, แทรม

ประเภทที่ 5 โครงข่ายรถไฟสินค้าที่มีระบบกันการสั่นสะเทือนชั้นเดียว

ประเภทที่ 6 โครงข่ายรถไฟสินค้าที่มีระบบกันการสั่นสะเทือนสองชั้น

ประเภทที่ 7 เครือข่ายรถไฟ

2.4 มาตรฐาน EN13749

มาตรฐาน EN13749 เป็นมาตรฐานในการออกแบบโครงข่ายรถไฟของยุโรป ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในเดือนพฤษภาคม ปี 2005 จุดประสงค์ของมาตรฐานนี้ คือ เพื่อที่จะนิยามกระบวนการการออกแบบโครงข่ายรถไฟอย่างมีเหตุผล โดยได้กล่าวถึงกระบวนการการออกแบบ วิธีการประเมินค่า การตรวจสอบความถูกต้อง และคุณภาพของการผลิตที่ต้องการ

การออกแบบโครงข่ายรถไฟตามมาตรฐาน EN13749 นั้น แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างในสภาวะสถิตยศาสตร์ (Static Strength) โดยขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะการรับภาระแบบปกติ (Normal Service Load) และสภาวะการรับภาระแบบไม่ปกติ (Exceptional Load)

2. การวิเคราะห์ความล้าในโครงสร้าง (Fatigue Strength Assessment)

3. การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างในสภาวะสถิตยศาสตร์ (Static Test Assessment)

4. การทดสอบความล้าในโครงสร้าง (Fatigue Test)

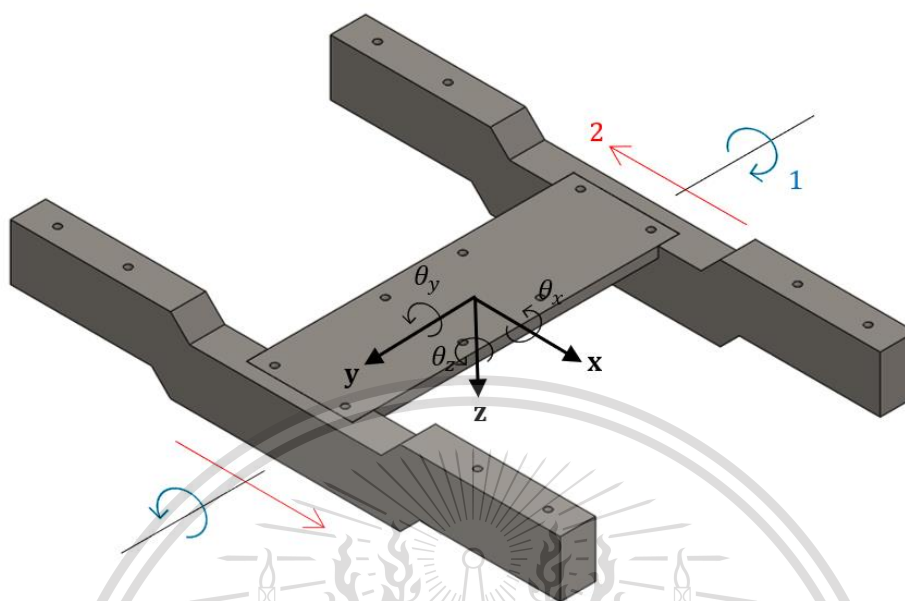
5. การทดสอบบนทางวิ่ง (On-track Test)

โดยในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะทำการออกแบบเจาะจงเฉพาะโครงข่ายของรถจักรไฟฟ้า (Locomotive Bogie) ที่มีสองแคว และสนใจการวิเคราะห์และทดสอบความแข็งแรงเฉพาะในกรณีสภาวะการรับภาระแบบไม่ปกติเท่านั้น ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ในการวิเคราะห์แรงต่าง ๆ นั้น เราจะใช้ระบบพิกัดฉากอ้างอิงทิศทางการเคลื่อนที่ดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงระบบพิกัดของแครร์ถจักรไฟฟ้า

ทิศทาง	ตัวแปร	คำอธิบาย
Longitudinal	x	ทิศตรงตามแนวแกนการเคลื่อนที่
Transverse	y	ทิศแนวด้านข้างตามแนวแกนการเคลื่อนที่
Vertical	z	ทิศแนวตั้งฉากตามแนวแกนการเคลื่อนที่
Roll	θ_x	ทิศการหมุนรอบแนวแกนการเคลื่อนที่
Pitch	θ_y	ทิศการหมุนรอบแนวด้านข้างตามแนวแกนการเคลื่อนที่
Taw	θ_z	ทิศการหมุนรอบแนวตั้งฉากตามแนวแกนการเคลื่อนที่
Twist	1	ระยะการเคลื่อนที่จากการหมุนรอบแนวด้านข้างโครงแครร์
Lozenging	2	แรงเฉือนจากความสัมพันธ์แนวแกนการเคลื่อนที่กับแนวด้านข้าง

ตารางที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่และการเสียรูปของแครร์ถจักรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

การวิเคราะห์ความแข็งแรงในสภาวะสถิตยศาสตร์กรณีการรับภาระแบบไม่ปกติ (Static Strength Assessment in Exceptional Load Case) อาจจะไม่เกิดขึ้นเลยตลอดอายุการใช้งานของโครงแคร์ การวิเคราะห์ในกรณีนี้ขึ้น เพื่อต้องการทราบว่าโครงแคร์นั้นจะต้องสามารถรับแรงได้โดยไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) โดยแรงทั้งหมดที่เราจะต้องพิจารณานั้น มีดังนี้

1. แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)

เป็นโหลดที่เกิดจากน้ำหนักของห้วงรถจักรไฟฟ้ากระทำกับระบบรองรับ(ทุติยภูมิ) เป็นขนาด 1.4 เท่าของแรงโน้มถ่วงในแนวตั้ง โดยจะกระทำบริเวณด้านข้างทั้งสองด้านของแคร์ของ รถจักรไฟฟ้า โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$F_{z1max} = F_{z2max} = \frac{F_{zmax}}{2} = \frac{1.4g(M_v - 2m^+)}{4} \quad (2-1)$$

โดยที่

M_v คือ มวลของรถจักรไฟฟ้า (กิโลกรัม)

m^+ คือ มวลของแคร์และชุดล้อซึ่งไม่รวมกับมวลของสปริงของระบบรองรับ(ทุติยภูมิ) (กิโลกรัม)

2. แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)

แรงประเภทนี้เกิดจากการสัมผัสกันของล้อและรางในการวิ่งบนทางโค้ง ซึ่งแรงนี้จะมาจากแต่ละปลายเพลาล้อทั้ง 4 ด้าน กระทำกับแคร์ของรถจักรไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่

C_1 คือ มวลของคนขับรถไฟ (80 กิโลกรัม)

n_a คือ จำนวนเพลาล้อของแคร์หนึ่งคัน (2 เพลา)

n_b คือ จำนวนแคร์ในหนึ่งตู้รถไฟ (2 แคร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3. แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load)

เกิดจากแรงกระทำในแนวตั้งและการวิ่งบนทางโค้ง อันเนื่องมาจาก $\mu = 0.4$

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

4. แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision)

เกิดจากแรงโน้มถ่วงตามแนวยาว สำหรับโครงแคร่รถไฟที่มีตัวขับเคลื่อนจะมีขนาดเท่ากับ 3 เท่าของแรงโน้มถ่วงตามแนวยาว และ 5 เท่าสำหรับโครงแคร่ที่ไม่มีตัวขับเคลื่อน ซึ่งแรงนี้จะกระทำที่จุดศูนย์กลางมวลของแคร่

5. แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)

เป็นแรงที่เกิดจากการบิดของราง สำหรับแคร่ของรถจักรไฟฟ้านั้นจะต้องสามารถรับแรงกระทำจากการบิดของราง 1 % โดยในการพิจารณานั้นเราจะให้ล้อหนึ่งล้อมีการยกตัวขึ้นเป็นระยะ ΔZ และสำหรับแคร่ของรถลากจะต้องพิจารณาโดยใช้ยานพาหนะเปล่าและจำลองในสถานการณ์การทรงที่ความเร็วต่ำ

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

ในการคำนวณทางสถิติศาสตร์กรณีการรับภาระแบบไม่ปกติ แรงที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถแบ่งได้ 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 คือ การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง โดยมีแรงกระทำในแนวตั้ง, แรงกระทำในแนวด้านข้าง และแรงกระทำจากการบิดตัวของราง

กรณีที่ 2 คือ การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว โดยมีแรงกระทำในแนวตั้ง และแรงกระทำในแนวยาว

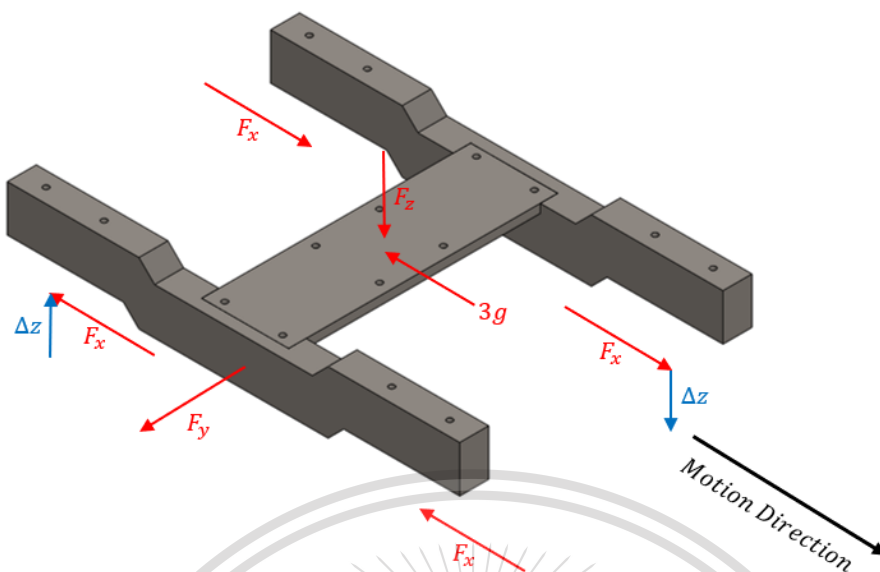
กรณีที่ 3 คือ การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน โดยมีแรงกระทำในแนวตั้ง และแรงจากการชนในแนวยาว

กรณีที่ 4 คือ การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟทรงที่ความเร็วต่ำ โดยมีแรงกระทำในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.4 แสดงประเภทและทิศทางของแรงที่กระทำบนแคร่รถจักรไฟฟ้า

แรงแต่ละประเภทที่กระทำ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)	✓	✓	✓	✓
แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)	✓			
แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load)		✓		
แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision)			✓	
แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)	✓			
Unloading of one wheel				✓

ตารางที่ 2.2 แสดงแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อแคร่รถจักรไฟฟ้า ในแต่ละกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาร์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยในปฏิญญาฉบับนี้เราสนใจแค่การออกแบบแคร่รถจักรไฟฟ้า เราจึงพิจารณาเพียงสามกรณี ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.5 การแข่งขัน Railway Challenge

ต้นแบบของการแข่งขันจากประเทศอังกฤษ

การแข่งขัน Railway Challenge ถูกจัดขึ้นโดย Railway Division เพื่อให้โอกาสกับกลุ่มของคนที่มีความต้องการที่จะท้าทายในอุตสาหกรรมนี้มาแข่งขันกัน แสดงทักษะ ความเชี่ยวชาญ ความรู้ และความเฉลียวฉลาดในด้านธุรกิจ

การจัดการแข่งขันในแต่ละรอบจะเริ่มขึ้นในเดือนตุลาคม และสิ้นสุดลงประมาณเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคมในปีถัดไป ผู้เข้าแข่งขันจะต้องออกแบบและสร้างรถไฟขนาดเล็กที่วิ่งบนรางขนาด 10.25 นิ้ว และต้องเป็นไปตามกฎและรายละเอียดที่ได้กำหนดไว้ โดยการทดสอบนั้นจะจัดขึ้นในช่วงมิถุนายนหรือกรกฎาคมที่ Stapleford Miniature Railway in Leicestershire

การจัดการแข่งขันในไทย

สำหรับการแข่งขัน Railway Challenge ในประเทศไทยนั้น เริ่มขึ้นครั้งแรกเมื่อเดือนตุลาคม ปี 2019 (RWC2020) โดยมีทีมที่เข้าร่วมแข่งขันจากทั้ง 7 มหาวิทยาลัยในไทย ได้แก่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น และมหาวิทยาลัยนเรศวร โดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นเจ้าภาพในการจัดงาน

ปฏิญานินท์เล่มนี้เราจะออกแบบและสร้างแคร่ของรถจักรไฟฟ้าตามกฎและรายละเอียดของการแข่งขัน Railway Challenge 2020 โดยจะต้องออกแบบและสร้างรถไฟขนาดเล็กที่วิ่งบนรางขนาด 10.25 นิ้ว รั้งน้ำหนักสูงสุด 2000 กิโลกรัม ขนาดความสูงของแคร่ไม่เกิน 90 มิลลิเมตร และระยะระหว่างล้อไม่เกิน 660 มิลลิเมตร ตามที่แสดงในภาคผนวก

ข้อกำหนดที่นำมาใช้ในการออกแบบแคร่รถจักรไฟฟ้า

ปฏิญานินท์เล่มนี้เราจะออกแบบและสร้างแคร่รถจักรไฟฟ้าตามกฎและรายละเอียดของการแข่งขัน Railway Challenge 2020 โดยมีข้อกำหนดที่ได้นำมาใช้ในการออกแบบดังนี้

- น้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างรถจักรไฟฟ้า (Maximum vehicle weight) = 2000 กิโลกรัม

- ความกว้างของราง (Track Gauge) = 12 นิ้ว

- รัศมีโค้งต่ำสุด (Minimum horizontal curvature radius) = 16 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

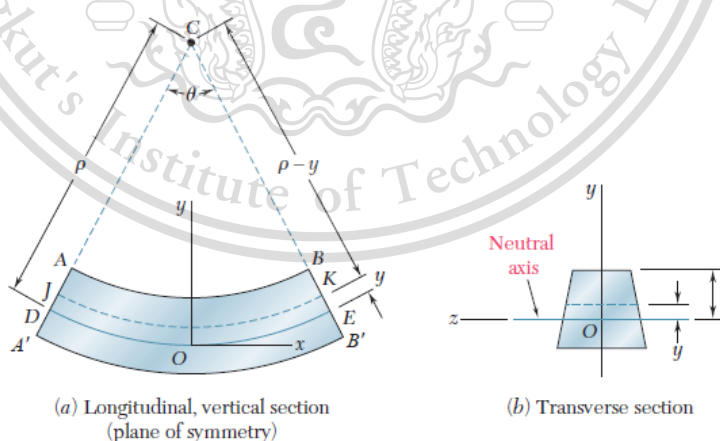
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- การบิดของทางสูงสุด (Maximum track twist gradient) = 6 มิลลิเมตร ต่อ 250 มิลลิเมตร
- มุมลาดของราง (Rail cant) = 4.189×10^{-4} องศา
- เส้นผ่านศูนย์กลางล้อต่ำสุด (Minimum wheel diameter) = 200 มิลลิเมตร
- ความสูงของโครงแคร่สูงสุด (Maximum height of bogie frame) = 90 มิลลิเมตร
- ความกว้างของโครงแคร่สูงสุด (Maximum width of bogie frame) = 660 มิลลิเมตร
- ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง (Back-to-Back) = 288.42 มิลลิเมตร

2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การโค้งตัวของคาน

คานเป็นโครงสร้างที่รับแรงตั้งฉากกับแกนตามยาวของคาน เช่น แรงคงที่หรือแรงที่กระทำบนพื้นที่ขนาดเล็กที่กระทำเป็นจุดใดจุดหนึ่ง แรงกระจายหรือแรงที่กระทำบนพื้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของคานซึ่งอาจกระทำแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ได้ แรงเหล่านี้จะทำให้เกิดแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่หน้าตัดของคานตามระยะต่างๆของคาน ซึ่งเมื่อมีแรงมากระทำต่อคานจะทำให้เกิดการโค้งงอของคาน ทำให้คานไม่อยู่ในสภาพแนวตรงเหมือนตอนที่ยังไม่ได้ถูกแรงมากระทำ ดังนั้นในการออกแบบควรคำนึงถึงการโค้งตัวของคานด้วย



รูปที่ 2.5 การโค้งงอของคานจากโมเมนต์ดัด

(รูปจาก: Mechanics of Materials 6th edition, Ferdinand P. Beer)

เอกสารนี้เป็นแกนสะเทิน (Neutral Axis) คือ เส้นหรือระนาบที่ผ่านจุดเชื่อมต่อของคานหรือแผ่นที่ไม่มี การขยับ การค้ำ หรือการบีบอัด ขณะเกิดการโค้งงอ ไม่ว่าจะเกิดขึ้นที่ใดก็ตาม ยกเว้นที่โมเมนต์ดัดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อคานถูกกระทำด้วยแรงหรือโมเมนต์ดัดจึงทำให้เกิดการโก่งตัวของคานดังรูป สามารถหาค่าของความเค้นได้จาก

$$\epsilon_x = -\frac{y}{\rho} \quad , \quad \epsilon_m = \frac{c}{\rho} \quad , \quad \epsilon_x = -\frac{y}{c}\epsilon_m \tag{2-5}$$

โดยที่

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

จากกฎของฮุก(Hooke's law) สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นได้ ดังนี้

$$\sigma_x = -\frac{y}{c}\sigma_m \tag{2-6}$$

โดยที่

- σ_x คือ ความเคียด ณ แกนใดๆ (นิวตันต่อตารางเมตร)
- σ_m คือ ความเคียดสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัด

(รูปจาก: Mechanics of Materials 6th edition, Ferdinand P. Beer)

เมื่อการโก่งงอที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์ผ่านแกนสะเทินและจุดศูนย์กลางของวัตถุ โดยมีหน้าตัดเป็นรูปใดๆ สามารถหาค่าได้จาก

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad , \quad \sigma_x = -\frac{My}{I} \quad , \quad S = \frac{I}{c} \quad , \quad \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \tag{2-7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดยที่

- M คือ โมเมนต์ที่หน้าตัดใดๆ (นิวตันต่อตารางเมตร)
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (เมตรยกกำลังสี่)
 S คือ โมดูลัสสัดส่วนความยืดหยุ่น (ลูกบาศก์ตารางเมตร)
 E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตันต่อตารางเมตร)

2.6.2 กฎของฮุก

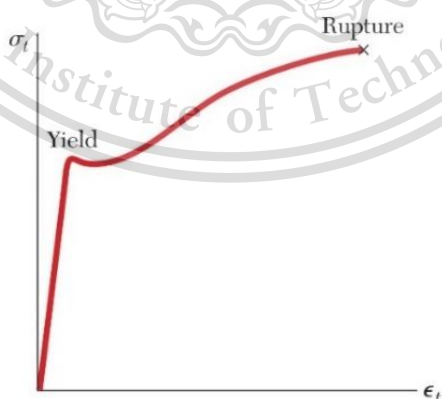
โครงสร้างทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะถูกออกแบบมาให้ต้องเจอกับการเสีรูบ ซึ่งการเสีรูบช่วงที่เป็นเส้นตรงบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นจะเป็นไปตามกฎของฮุก

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-8)$$

โดยที่

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

ในแต่ละชนิดของวัสดุนั้นจะมีค่าการเค้นสูงสุดที่จะสามารถรับแรงได้โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นยังเป็นเส้นตรงนั้นแตกต่างกันไป ช่วงที่เป็นเส้นตรงนี้เรียกว่าช่วงการเสีรูบแบบยืดหยุ่น โดยในวัสดุเหนียวนั้นจะมีจุดครากที่แม่นยำตามที่แสดงในรูปที่ 1 แต่สำหรับวัสดุเปราะจุดครากจะไม่แน่นอน และการหาความเค้นที่แม่นยำทำได้ยาก เนื่องจากแผนภาพความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดนั้นจะเป็นแบบเส้นตรงขาดช่วงตามที่แสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นวัสดุเหล่านี้จึงจะใช้ค่าความเค้นที่มีค่ามากกว่าความเค้นสูงสุดในช่วงเส้นตรงเพียงเล็กน้อยมาคำนวณในกฎของฮุก



รูปที่ 2.7 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว

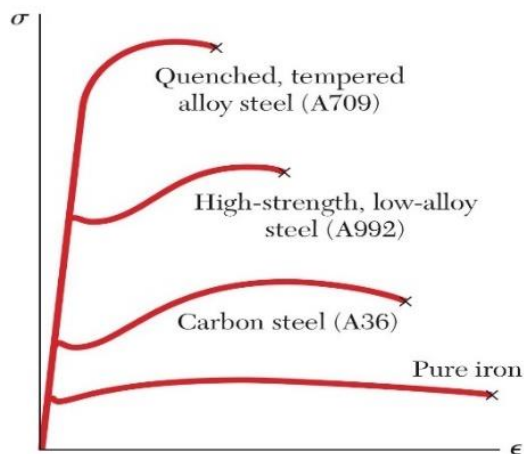
(รูปจาก: Mechanics of Materials 6th edition, Ferdinand P. Beer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

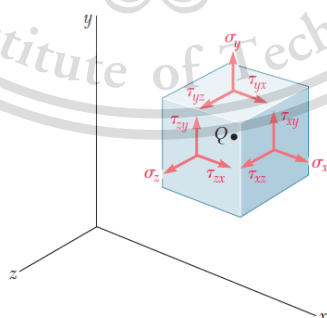


รูปที่ 2.8 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุประเภท (รูปจาก: Mechanics of Materials 6th edition, Ferdinand P. Beer)

จากรูปที่สองนั้นเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเหล็กสี่ชนิด จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก และความเค้นสุดท้ายมีค่าที่แตกต่างกันมาก ๆ แต่อย่างไรก็ตามเหล็กทั้งสี่นี้มีความโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าความแข็งแรงหรือความสามารถในการต้านทานการเสียรูปในช่วงเส้นตรงของทั้งสี่ชนิดนั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นหากเราแทนที่เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงด้วยเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า โครงสร้างนั้นก็จะมีแนวโน้มการรับโหลดสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงจะเท่าเดิม

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เป็นไปตามกฎของฮุกนั้น จะไม่ขึ้นกับทิศทางของโหลด หรือกล่าวได้ว่าเราพิจารณาให้วัสดุนั้นเป็นแบบไอโซโทรปิก

กฎของฮุกในระบบสามมิติ



รูปที่ 2.9 ความเครียดในระบบสามมิติ

(รูปจาก: Mechanics of Materials 6th edition, Ferdinand P. Beer)

เอกสารนี้เป็นผลรวมของความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นในหนึ่งทิศทางนั้น เกิดจากโหลดจากทั้งสามทิศทาง จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า $\epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]\end{aligned}\quad (2-9)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}\end{aligned}\quad (2-10)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

หรือสามารถเขียนได้ในรูปของความแกร่ง

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)]\end{aligned}\quad (2-11)$$

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy}\end{aligned}\quad (2-12)$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz}$$

$$\tau_{zx} = G\gamma_{zx}$$

2.6.3. ทฤษฎีการเลือกวัสดุ

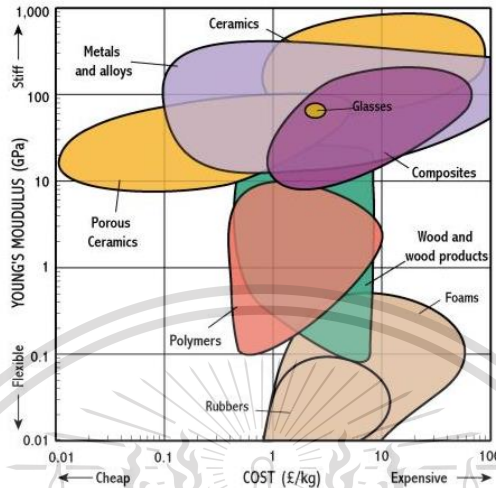
การเลือกวัสดุถือเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญไม่แพ้กับการออกแบบโครงสร้าง หากเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการออกแบบแล้วก็จะช่วยให้โครงสร้างมีความแข็งแรง สามารถใช้งานได้นาน และมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

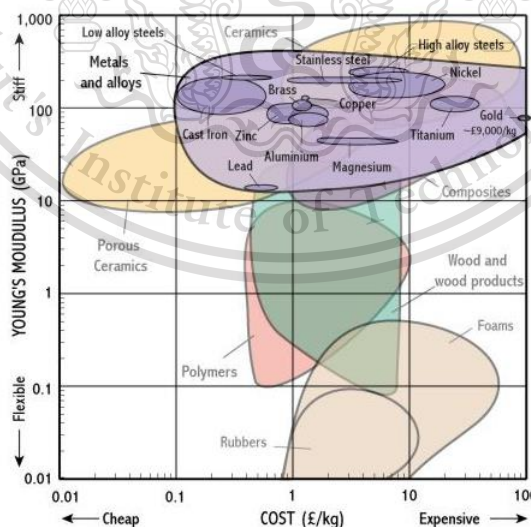
การเลือกวัสดุนั้นสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและราคา หากต้องการวัสดุที่มีราคาถูกและทนต่อการเสียรูปแบบยืดหยุ่น วัสดุที่อยู่บริเวณช่วงช่วงบนซ้ายของแผนภาพเป็นช่วงที่เราต้องการ



รูปที่ 2.10 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและราคา

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

เห็นได้ว่าช่วงช่วงบนนั้นประกอบไปด้วยวัสดุสองกลุ่ม คือ โลหะและโลหะผสม (Metals and alloy) และเซรามิกที่มีรูพรุน (Porous Ceramics) ซึ่งการเลือกว่าจะใช้วัสดุชนิดนั้นไหนนั้นก็ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.11 แสดงวัสดุในกลุ่มโลหะและโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเรา เราได้วางเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการ ไม่อนุญาตให้แก้ไขได้ ประโยชน์ด้านการค้า แต่ถ้าหากเราต้องการวัสดุที่สามารถเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่นได้ดีและมีราคาถูก ช่วงกลางซ้ายของแผนภาพจะเป็นช่วงที่เราสนใจ

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

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

2.6.4 ค่าตัวประกอบความปลอดภัย

การออกแบบชิ้นงานสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือการเสียรูปของวัสดุ เพื่อความแน่ใจว่าวัสดุของชิ้นงานที่ทำการออกแบบนั้นจะสามารถรองรับภาระที่จะมากระทำได้อย่างปลอดภัย ไม่เกิดความเสียหาย ไม่เกิดการเสียรูปเกิดขึ้น จึงต้องมีการพิจารณาค่าความเค้นจากภาระที่มากระทำที่สามารถยอมรับได้ เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุของชิ้นงานเกิดความเสียหายเกิดขึ้นต้องมีค่าไม่เกินค่าของความเค้นของวัสดุที่สามารถรองรับได้ เพื่อป้องกันเกิดการเสียหายของวัสดุของชิ้นงานที่ทำการออกแบบ โดยการพิจารณาค่าตัวประกอบความปลอดภัย (factor of safety: F.S) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่สามารถรองรับได้ของวัสดุ ต่อ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระที่กระทำต่อชิ้นงาน

$$\text{ค่าประกอบความปลอดภัย (F.S)} = \frac{\text{ค่าความเค้นที่สามารถรองรับได้ของวัสดุ}}{\text{ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระที่กระทำต่อชิ้นงาน}} \quad (2-13)$$

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยโดยค่าค่าความเค้นที่สามารถรองรับได้ของวัสดุคือค่าความเค้นที่รองรับได้ของแต่ละชนิดของวัสดุก่อนเกิดการเสียรูปและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระที่กระทำต่อชิ้นงานคือค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณค่าความเค้นทางทฤษฎีความเสียหายของ von Mises

$$\text{ค่าประกอบความปลอดภัย (F.S)} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{von}} \quad (2-14)$$

โดยที่

σ_y คือ ค่าความเค้นที่รองรับได้ของวัสดุ (นิเวศน์ต่อตารางเมตร)

σ_{von} คือ ค่าความเค้นทางทฤษฎีความเสียหายของ von Mises (นิเวศน์ต่อตารางเมตร)

2.6.5 การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในระบบสามมิติ

พิจารณาอนุภาคหนึ่งที่มีมิติเป็น dx, dy และ dz บนระบบคาร์ทีเซียน ดังรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าความเค้นตั้งฉากนั้นมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของอนุภาคในแต่ละด้าน คือ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ และความเค้นเฉือนนั้นมีทิศทางขนานไปกับพื้นผิวของอนุภาค คือ $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

จากสมดุลโมเมนต์ของอนุภาค เราจะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2-15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

และความสัมพันธ์ของการกระจัดของความเครียดคือ

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2-16)$$

โดย u, v, w คือ ค่าการกระจัดตามแนวแกน x, y, และ z ตามลำดับ จะได้ค่าความเครียดเฉือน ดังนี้

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \gamma_{yx}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \gamma_{zy} \quad (2-17)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} = \gamma_{xz}$$

เราสามารถเขียนค่าความเค้นและความเครียดสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad \{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-18)$$

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบไอเซนโทรปิก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจะสามารถเขียนได้ว่า

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2-19)$$

โดยที่ $[D]$ = Constitutive Matrix

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.6.6 ทฤษฎีความเสียหายของ von Mises

ในการพิจารณาการเสียรูปที่เกิดจากความเค้นมากระทำยังชิ้นงานที่ออกแบบ จะใช้การพิจารณาตามหลักของทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของพลังงาน (Distortion energy) โดยใช้การคำนวณค่าความเค้นของวอน มีสเชส (von Mises stress) ในการพิจารณาความเค้นที่ต้องรองรับของวัสดุชิ้นงานว่าจะเกิดความเสียหายของวัสดุชิ้นงานขึ้นหรือการครากของวัสดุชิ้นงานหรือไม่ โดยจะพิจารณาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบพื้นฐานสามด้านตามสมการดังนี้

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

โดยที่

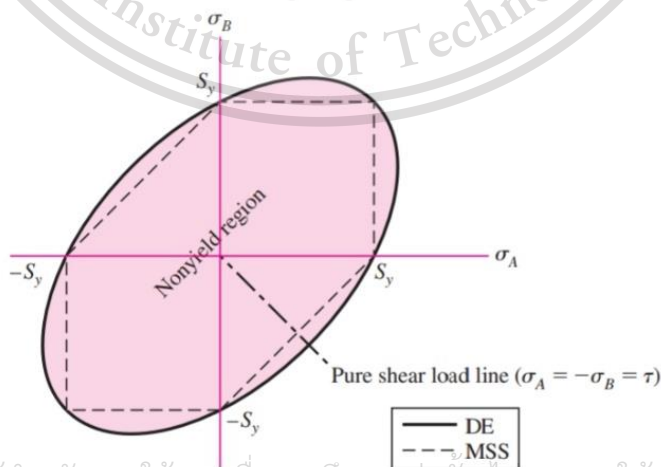
- σ_1 คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน 1 (นิวตันต่อตารางเมตร)
- σ_2 คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน 2 (นิวตันต่อตารางเมตร)
- σ_3 คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน 3 (นิวตันต่อตารางเมตร)

กรณีสำหรับระนาบด้านใด ๆ

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

โดยที่

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

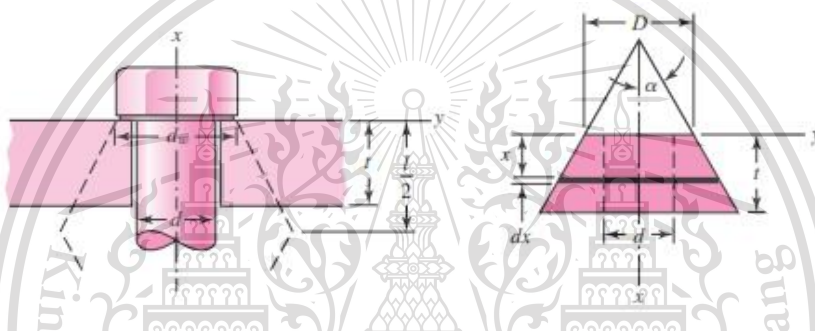
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากทฤษฎีของ von Mises และการเปลี่ยนรูปพลังงาน
 (รูปจาก : Mechanical Engineering Design 9th Edition, Richard G. Budynas)

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

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

- k_d คือ ค่าความแข็งของสลักเกลียวส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (นิวตันต่อเมตร)
- A_d คือ พื้นที่รับแรงของส่วนที่เป็นเกลียว (ตารางเมตร)
- A_t คือ พื้นที่รับแรงของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (ตารางเมตร)
- l_t คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียว (มิลลิเมตร)
- l_d คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียว (มิลลิเมตร)
- E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (นิวตันต่อตารางเมตร)

โดยการออกแบบสลักเกลียวนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงความแข็งของสลักเกลียวแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความแข็งของชิ้นงานที่ถูกยึด (Member Stiffness) อีกด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงตัวแปรความแข็งแรงของชิ้นงานที่ถูกยึด

(รูปจาก : Mechanical Engineering Design, 9th Edition, Richard G. Budynas, P.428)

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

โดยที่

- k_m คือ ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ถูกยึด (นิวตันต่อเมตร)
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของเกลียว (มิลลิเมตร)
- d_w คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนรอง (มิลลิเมตร)

เมื่อมีแรงดึง หรือแรงกดภายนอกกระทำกับสลักเกลียว (P) จะทำให้เกิดแรงที่สลักเกลียว (P_b) และแรงที่งาน (P_m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2-26) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$P_m = P - P_b \quad (2-27)$$

โดยที่

P คือ แรงภายนอกที่มากระทำกับสลักเกลียว (นิวตัน)

P_b คือ แรงที่บริเวณสลักเกลียว (นิวตัน)

P_m คือ แรงที่บริเวณชิ้นงาน (นิวตัน)

ค่าตัวประกอบความปลอดภัยสามารถหาได้จาก

$$n_p = \frac{S_p}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (2-28)$$

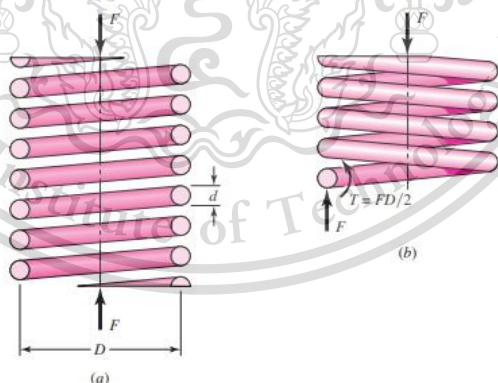
โดยที่

n_p คือ Proof Strength จากตาราง 8-9 Mechanical Engineering Design 9th ed. (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_m คือ Midrange Stress (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_a คือ Alternative Stress (นิวตันต่อตารางเมตร)

2.6.8 สปริงกด



รูปที่ 2.15 แสดงแรงกระทำบนสปริงกด

(รูปจาก : Mechanical Engineering Design 9th Edition, Richard G. Budynas, P.518)

สปริงกดนั้นมีลักษณะเป็นเกลียวลวด ทำหน้าที่รับแรงกด ลดแรงกระแทกและการสั่นสะเทือน สามารถแบ่งประเภทตามชนิดของปลายสปริงได้ทั้งหมด 4 แบบ ซึ่งมีค่าต่าง ๆ ของสปริงแตกต่างกันไป ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Type of Spring Ends				
Term	Plain	Plain and Ground	Squared or Closed	Squared and Ground
End coils, N_e	0	1	2	2
Total coils, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Free length, L_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Solid length, L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Pitch, p	$(L_0 - d)/N_a$	$L_0/(N_a + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_a$	$(L_0 + 2d)/N_a$

ตารางที่ 2.3 แสดงประเภทของปลายสปริง

การเลือกวัสดุ กรรมวิธีในการผลิต และขนาดของลวดที่นำมาใช้ทำสปริงนั้น มีผลต่อความแข็งแรงแรงดึงของสปริง ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (2-29)$$

โดยที่

S_{ut} คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (มิลลิเมตร)

A คือ ค่าคงที่ของชนิดและขนาดของวัสดุ

m คือ ค่าคงที่ของชนิดและขนาดของวัสดุ

เมื่อมีแรงกระทำลงบนสปริง จะทำให้เกิดความเค้นเฉือน ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\tau = K_B \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2-30)$$

โดยที่

τ คือ ความเค้นเฉือน (นิวตันต่อตารางเมตร)

F คือ แรงที่กระทำกับสปริง (นิวตัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ D งามไว้ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสปริง (มิลลิเมตร) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น K_B คือ ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นเฉือน จำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

และเราสามารถหาค่าดัชนีสปริง (C) ได้จากสมการ

$$C = \frac{D}{d} \quad (2-31)$$

สำหรับการออกแบบสปริงกดนั้น มีค่าที่เหมาะสม ดังนี้

$$4 \leq C \leq 12$$

$$3 \leq N_a \leq 15$$

2.6.9 เพลลา

เพลลาเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากโครงแคระด้านบนและถ่ายทอดการรับน้ำหนักลงไปยังล้อที่เชื่อมต่อปลายเพลลาทั้งสองข้างนอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งแผ่นจานเบรกเพื่อใช้ในการหยุดรถหรือลดความเร็วรวมถึงสามารถใช้ในการส่งกำลังในการขับเคลื่อนเช่นการที่มีมอเตอร์ส่งกำลังผ่านโซ่และโซ่ก็ติดตั้งกับเฟืองที่ติดตั้งกับเพลลา ทำให้เพลลาสามารถส่งกำลังที่ได้รับไปยังล้อให้มีกำลังในการขับเคลื่อนได้

ในการที่เพลลารับน้ำหนักนั้นสามารถพิจารณาค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเพลลาได้ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{M_x c}{I_x} = \frac{\frac{F_z}{8} Lc}{\frac{\pi d^4}{64}} \quad (2-32)$$

โดยที่

σ_x คือ ความเค้นการดัดในแนวแกน x (นิวตันต่อตารางเมตร)

M_x คือ ค่าโมเมนต์ (นิวตันเมตร)

c คือ ระยะมากสุดในแนวแกน y (มิลลิเมตร)

I_x คือ second-area moment (เมตร⁴)

F_z คือ แรงในแนวแกน z (นิวตัน)

Lc คือ ระยะระหว่างแรงที่กระทำกับจุดที่ยึดกับล้อ (มิลลิเมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$\tau_{xy} = \frac{4V}{3A} \quad (2-33)$$

โดยที่

τ_{xy} คือ ค่าความเค้นเฉือนที่ทำกับเพลลา (นิวตันต่อตารางเมตร)

V คือ แรงที่กระทำโดยในทิศขนาดกัพื้นที่ (นิวตัน)

A คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเพลลา (ตารางเมตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 3

วิธีการออกแบบและการทดสอบ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งจะเริ่มจากการออกแบบรูปร่างและขนาดของโครงแคร์ตามข้อกำหนด การวิเคราะห์ความแข็งแรงของ แคร์รถจักรไฟฟ้า (Locomotive Bogie) โดยจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Abaqus มาวิเคราะห์ โครงสร้างแคร์รถจักรไฟฟ้า นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเพื่อดูว่ากรณีใดเกิดความเสียหายมากที่สุดนำกรณีดังกล่าวมาวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Abaqus กับวัสดุชนิดต่างๆ เพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ได้ออกแบบไว้

3.2 การออกแบบแคร์รถจักรไฟฟ้าตามกฎของ Railway Challenge

แคร์รถจักรไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่รองรับภาระจากโครงสร้างช่วงบน ส่วนที่สำคัญในระบบช่วงล่าง และยังทำหน้าที่เป็นส่วนที่ใช้ติดตั้งกับอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ในระบบอื่น ๆ อีกด้วย

3.2.1 ปัจจัยในการออกแบบแคร์รถจักรไฟฟ้า

สำหรับการออกแบบแคร์รถจักรไฟฟ้านั้นเราจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลาย ๆ ด้าน โดยสำหรับการออกแบบในปริภูมยานิพนธ์เล่มนี้ มีปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบดังนี้

1. ข้อกำหนดระยะและมุมตามกฎของ Railway Challenge โดยในการออกแบบนี้ใช้ขนาดต่าง ๆ ดังนี้

- เส้นไจภาระโหลด
 - น้ำหนักของภาระและโครงสร้างรถจักรไฟฟ้า (Vehicle weight) = 2000 กิโลกรัม
- เส้นไจเกี่ยวกับทาง
 - ความกว้างของราง (Track Gauge) = 12 นิ้ว หรือ 0.3048 เมตร
 - รัศมีโค้ง (Horizontal curvature radius) = 16 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น - มุมลาดของราง (Rail cant angle) = 2.4 % อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

- เงื่อนไขเกี่ยวกับระยะและขนาดของแคร่รถจักรไฟฟ้า
 - เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (Wheel diameter) = 250 มิลลิเมตร
 - ความสูงของโครงแคร่สูงสุด (Maximum height of bogie frame) = 90 มิลลิเมตร
 - ความกว้างของโครงแคร่สูงสุด (Maximum width of bogie frame) = 660 มิลลิเมตร
 - ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง (Back-to-Back) = 288.42 มิลลิเมตร

2. เงื่อนไขเกี่ยวกับรูปทรงของแคร่รถจักรไฟฟ้า

- มีพื้นที่สำหรับการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ของแต่ละระบบ เช่น การติดตั้งระบบการ
 สั่นสะเทือน ติดตั้งตัวขับเคลื่อนและชุดสายพาน ระบบเบรก ชุดทดกำลัง เป็นต้น

- สามารถรับน้ำหนักและการสั่นสะเทือน ซึ่งทำให้ยากต่อการพลิกคว่ำ
- รูปทรงง่ายต่อการผลิต ไม่ซับซ้อน ประกอบและแยกชิ้นส่วนได้ง่าย

3. เงื่อนไขเกี่ยวกับการรับแรงของแคร่รถจักรไฟฟ้า

- สามารถรับแรงบิด แรงดัด โมเมนต์ และการเกิดความเค้น ความเครียดบนจุดต่าง ๆ ของ
 แคร่รถจักรไฟฟ้า
- ค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 4 ในกรณีที่เกิดความเสียหายมากที่สุด
 ส่วนกรณีอื่น ๆ กำหนดค่าตัวประกอบความปลอดภัยไม่เกิน 5

4. เงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุ

- หาซื้อได้ง่าย
- ราคาถูก

3.2.2 เครื่องมือ

- AutoCAD
- SOLIDWORKS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

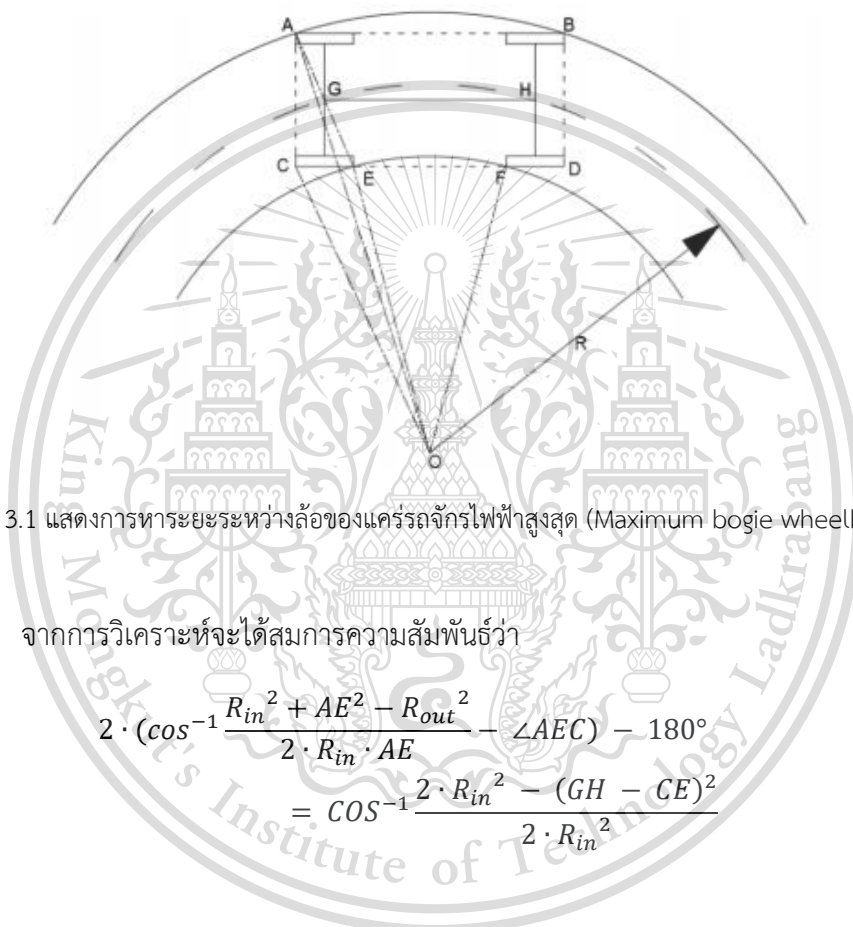
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบแครรถจักรไฟฟ้า

1. กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อเท่ากับ 250 มิลลิเมตร เพื่อที่จะนำไปพิจารณาขนาดของแครรถจักรไฟฟ้าที่สามารถเข้าโค้งได้โดยไม่เกิดการชดกับรางบริเวณทางโค้ง

2. โดยใช้วิธีการทางเรขาคณิตหาระยะระหว่างเพลาส่งสุดท้ายที่จะทำให้เกิดการขัดกันระหว่างล้อกับรางเมื่อรถไฟเข้าโค้ง หรือระยะ GH เพื่อหาขอบเขตของระยะระหว่างเพลาส่งที่เป็นไปได้ เริ่มจากการวาดทางโค้งกว้าง 12 นิ้ว และรัศมีโค้ง 16 เมตร แล้ววาดโครงแคร่ดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงการหาระยะระหว่างล้อของแครรถจักรไฟฟ้าสูงสุด (Maximum bogie wheelbase)

จากการวิเคราะห์จะได้สมการความสัมพันธ์ว่า

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

$$= \cos^{-1} \frac{2 \cdot R_{in}^2 - (GH - CE)^2}{2 \cdot R_{in}^2}$$

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

$$R_{in} = R + \frac{Gauge}{2}$$

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

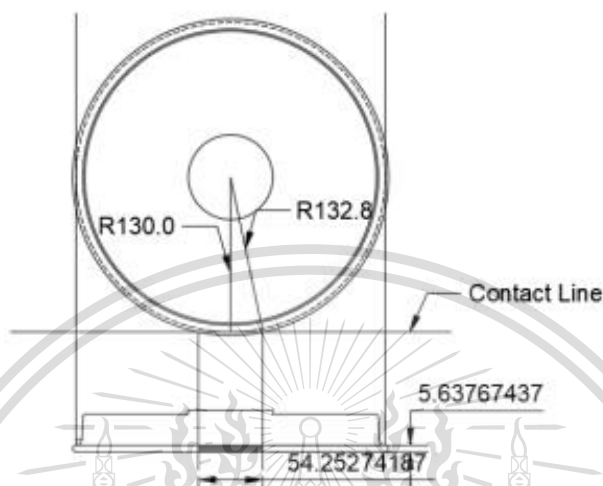
$$\angle AEC = \tan^{-1} \left(\frac{AC}{CE} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ปัญหาในความสัมพันธ์นี้คือ ระยะ AC และ CE ควรมีค่าเป็นเท่าใด เพื่อที่จะหาค่าทั้งสองเรา จึงต้องเขียนแผนภาพของล้อรถไฟขณะที่กำลังสาย เพื่อดูว่าระยะที่ล้อสายเข้าใกล้รางมากที่สุดโดยไม่เกิดการ เกยออกจากรางมีค่าเป็นเท่าใด กำหนดให้ตำแหน่งที่ล้อจะชิดกับรางมากที่สุดก่อนจะเกยออกจากรางอยู่ บริเวณบังใบล้อวัดขึ้นมาจากโคนล้อ 5 มิลลิเมตร นำไปวาดลงในโปรแกรม AutoCAD ได้ดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงการหาระยะ AC และ CE

จากรูป ระยะก่อนที่ล้อจะเกยรางมีระยะ 130 มิลลิเมตรวัดจากจุดศูนย์กลางของล้อ เมื่อฉาย บริเวณที่ล้อสัมผัสกับรางจะได้พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า วัดระยะได้ 54.253 มิลลิเมตร ซึ่งระยะแนวสัมผัสนี้จะเป็น ระยะที่ทำให้ล้อชิดกับรางเมื่อเข้าโค้งหรือระยะ CE นั่นเอง

สำหรับระยะ AC จะเกิดจากผลรวมความหนาของ 2 ภาพฉาย กับระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง จะได้ระยะ AC มีค่าเท่ากับ

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

ทำการแทนค่าลงในสมการที่ 3-1 จะได้ค่าระยะระหว่างเพลาสองเพลาส่งสูงสุดที่จะทำให้เกิดการ ชัดกันระหว่างล้อกับราง มีค่าเท่ากับ

$$GH = 4.318186 \text{ เมตร}$$

จะได้ขอบเขตของระยะระหว่างเพลาคือ มากกว่าสองเท่าของระยะครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าน ศูนย์กลางล้อและน้อยกว่าระยะ GH กล่าวคือ

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

ดังนั้นจึงเลือกออกแบบให้แครรถจักรไฟฟ้ามีขนาดความกว้างเท่ากับ 459.45 มิลลิเมตร มีความยาวเท่ากับ 780 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 80 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นความยาวที่อยู่ในขอบเขต ไม่ว่าจะรถใดของจีน อีพทางรถไฟหนานจิง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ และไม่ทำให้แครรถจักรไฟฟ้านั้นมีขนาดที่ใหญ่เกินไป

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

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

3. การเลือกขนาดของชิ้นส่วนคานด้านข้างและคานด้านตัดขวาง

ชิ้นส่วนคานด้านข้าง

ความกว้าง ทำการออกแบบโดยอ้างอิงจากขนาดของ แบริ่งตุ๊กตาที่สามารถรองรับภาระที่กำหนดได้ ที่จะมีแผ่นรองแบริ่งที่ทำการออกแบบขนาดที่สามารถสวมกับแบริ่งตุ๊กตาได้และรองรับการติดตั้งกับสปริงที่จะติดตั้งระหว่างแผ่นรองแบริ่งกับคานด้านข้างซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33.6126 มิลลิเมตร โดยในการติดตั้งจะติดตั้งโดยการเจาะรูบริเวณด้านใต้ของคานด้านข้างและสวมสปริงเข้าไปยึดการติดตั้งโดยมีน็อตในการยึดติดชิ้นส่วนในการ ออกแบบจึงได้ทำการออกแบบให้ความหนาของคานด้านข้างความหนาขนาดมากกว่า ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของสปริงจึงได้ทำการเลือกระยะความกว้างที่ 50 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดความกว้างของแผ่นรองแบริ่ง ที่มีความกว้าง 49 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเจาะรูเพื่อสวมสปริงโดยเจาะในตำแหน่งกึ่งกลางจะมีระยะเหลือเฟือด้านข้างที่ 8.195 มิลลิเมตร ตามที่ต้องการ

ความยาว ทำการออกแบบโดยอ้างอิงจากระยะระหว่างเพลลา 596 มิลลิเมตร ที่จะทำให้ไม่ตกรางขณะวิ่งและจากการเลือกแบริ่งตุ๊กตาที่สามารถรองรับภาระที่กำหนดได้โดยมีระยะเพิ่มเติมความยาวเพิ่มขึ้นด้านหน้าและหลังจากระยะระหว่างเพลลา 130 มิลลิเมตร และระยะจากการติดตั้งชิ้นส่วนเช่น แผ่นรองแบริ่งและสปริงทำให้เลือกระยะความยาวของคานด้านข้างที่ 780 มิลลิเมตร. เนื่องจากเป็นความยาวที่มากกว่าระยะรวมกันของระยะระหว่างเพลลาและระยะจากการติดตั้งชิ้นส่วนอื่นๆเล็กน้อยจึงเลือกใช้ระยะความยาวดังกล่าว

ความสูง ทำการออกแบบโดยอ้างอิงจาก จากความกว้างของคานด้านข้าง เนื่องจากบริเวณชิ้นส่วนนี้จะเกิดการรับแรงลักษณะความเค้นดัด จึงจำเป็นต้องออกแบบให้ระยะความสูงมีค่ามากกว่าระยะความกว้างของคานด้านข้างหรือเท่ากับตามหลักโมเมนต์ความเฉื่อยและค่านี้อาศัยระยะความลึกที่เจาะเข้าด้านล่างของชิ้นงานเพื่อสวมสปริงลึก 31.61 มิลลิเมตร จากเงื่อนไขข้างต้นทำให้เลือกพิจารณาความสูงที่ 50 มิลลิเมตร ขึ้นไป ซึ่งผ่านตามเงื่อนไขข้างต้น

ชิ้นส่วนคานด้านตัดขวาง

ความกว้าง ทำการออกแบบโดยอ้างอิงจากระยะห่างระหว่างคานด้านข้างทั้งสองข้างซึ่งต้องมีระยะมากพอที่จะวางลงคานด้านข้างและสามารถยึดติดกันด้วยน็อต ได้ จึงเลือกใช้เป็นระยะ 463.9 มิลลิเมตร

ความยาว ทำการออกแบบโดยยึดขนาดกรอบมอเตอร์ด้านล่างและขนาดของ Bolster เป็นหลักโดยขนาดกรอบมอเตอร์ด้านล่างยาว 120 มิลลิเมตรและ Bolster มีความยาว 140 มิลลิเมตร โดยทั้งสองชิ้นส่วนจะยึดติดกันด้วยน็อต จึงเลือกใช้ระยะให้มากกว่าทั้งสองชิ้นส่วนคือ 150 มิลลิเมตร

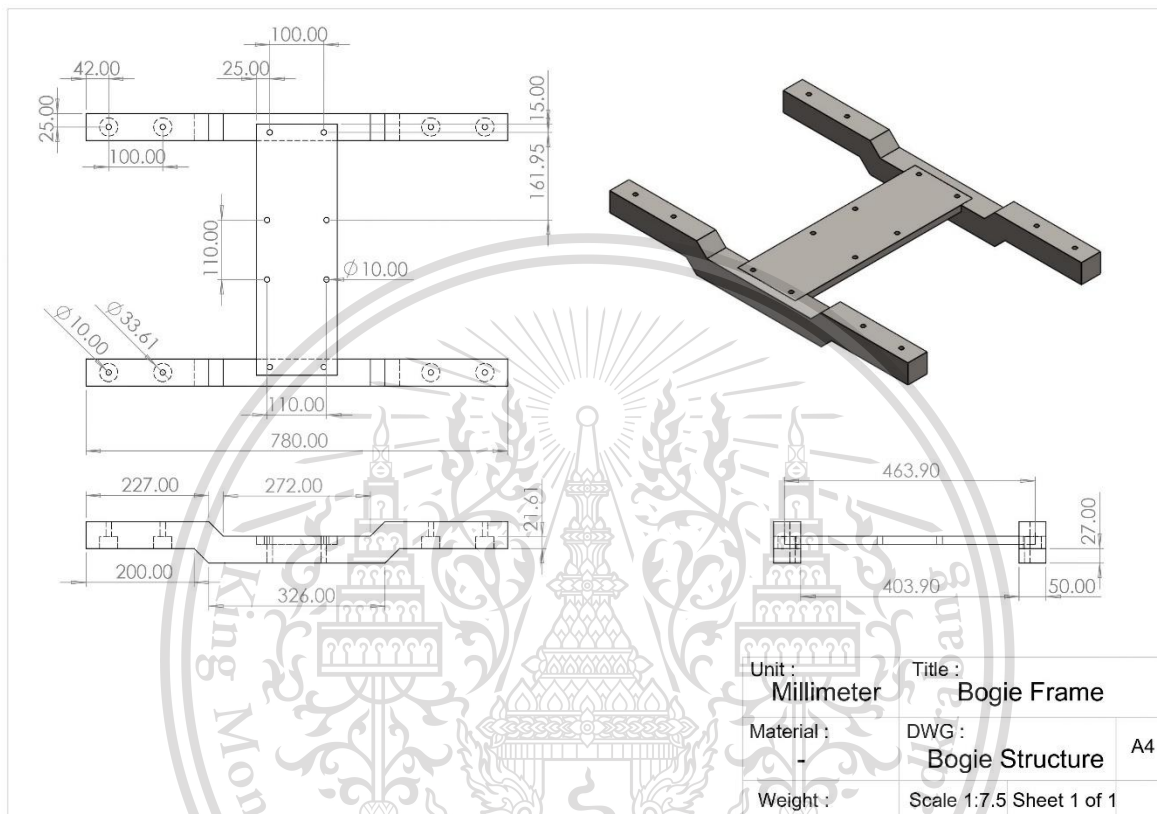
ความสูง ทำการออกแบบโดยพิจารณาจากการที่ไม่มีภาระรับแรงในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดแนวดังกล่าวและต้องมีการเจาะรูเพื่อเพื่อใช้ น็อตในการยึดจึงไม่ใช้ระยะที่มากเกินไปเพื่อให้ง่ายในการเจาะรูจึงใช้ที่ระยะ 15 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

4. ออกแบบรูปทรงของโครงแคร์ในโปรแกรม AutoCAD โดยคำนึงถึงการจัดวางอุปกรณ์ของระบบต่าง ๆ การรับแรงที่มากระทำบนแคร์รถจักรไฟฟ้า ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น และการสั่นสะเทือนขณะวิ่ง โดยทำการออกแบบให้บริเวณช่วงกลางโครงแคร์ต่ำกว่าด้านหน้าและด้านหลังเล็กน้อย เพื่อให้จุดศูนย์กลางมวลของตัวรถต่ำลง ยากต่อการพลิกคว่ำ



รูปที่ 3.3 แสดงภาพเขียนแบบของแคร์รถจักรไฟฟ้า

ปัจจัยการออกแบบแคร์รถจักรไฟฟ้า	ค่าเงื่อนไข	ค่าออกแบบ
น้ำหนักหัวรถจักรไฟฟ้า 1 คัน (กิโลกรัม)	2000	2000
เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (มิลลิเมตร)	ไม่น้อยกว่า 200	250
ความสูงของโครงแคร์ (มิลลิเมตร)	ไม่เกิน 90	มากกว่าหรือเท่ากับ 50
ความกว้างของโครงแคร์ (มิลลิเมตร)	ไม่เกิน 660	459.45
ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง (มิลลิเมตร)	288.42	288.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบเงื่อนไขกับข้อมูลจากการออกแบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

5. การเลือกวัสดุ เนื่องจากเราต้องการวัสดุที่มีราคาถูก รับแรงบิดและแรงดัดได้ดี จากการพิจารณารูปที่ 2.10 ช่วงมีราคาถูกและทนต่อการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเป็นช่วงที่เราต้องการ กล่าวคือช่วงบนซ้ายของแผนภาพ

และจากรูปที่ 2.11 เห็นได้ว่าบริเวณที่เราสนใจนั้นประกอบไปด้วยวัสดุสองกลุ่ม คือ โลหะและโลหะผสม (Metals and alloy) และเซรามิกที่มีรูพรุน (Porous Ceramics)

เนื่องจากเราต้องการผลิตโครงสร้างที่สามารถรับแรงดัดและแรงบิดได้ดี ซึ่งเซรามิกไม่มีคุณสมบัตินี้ เราจึงเลือกใช้วัสดุในกลุ่มของโลหะและโลหะผสม

เมื่อพิจารณาวัสดุในกลุ่มของโลหะและโลหะผสม พบว่ามีวัสดุสองชนิดที่อยู่ในกลุ่มที่เราสนใจ ได้แก่ เหล็กหล่อ (Cast iron) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel) ซึ่งจากหนังสือ Materials Science and Engineering (8th ed.). United States: WILEY มีชนิดของวัสดุที่อยู่ในกลุ่มที่เราเลือกดังนี้

วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ค่าความเค้นคราก (MPa)	มอดุลัสของยัง (GPa)	อัตราส่วน ปัวซอง
เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)				
AISI 1010	7870	180	200000	0.29
AISI 1020	7870	205	200000	0.29
ASTM A36	7850	221	200000	0.27-0.30
ASTM A516 Grade 70	7800	260	200000	0.29
ASTM A633 Grade E	7750	380	205000	0.28
ASTM 656 Grade I	7800	550	200000	0.29
เหล็กหล่อ (Cast Iron)				
ASTM A536 60-40-18	7180	276	169000	0.29
ASTM A536 100-70-03	7180	483	180000	0.275-0.28
ASTM A536 120-90-02	7196	621	164000	0.28
ASTM A842 Grade 250	7500	175	180000	0.29
ASTM A842 Grade 450	7100	315	180000	0.26

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติเชิงของวัสดุประเภทเหล็กหล่อ (Cast iron) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ซึ่งการเลือกวัสดุที่ใช้ทำโครงแคร่รถจักรไฟฟ้านั้น จะเลือกได้เมื่อการจำลองของโบกี้เมื่อใช้วัสดุ นั้น ๆ และมีผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่เรากำหนดไว้

3.3 การวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 เครื่องมือ

- โปรแกรม Abaqus/CAE
- โปรแกรม SOLIDWORKS

3.3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.) **คำนวณแรงที่มากกระทำตามมาตรฐาน EN13749** ซึ่งในปฏิญานินพนธ์เล่มนี้จะพิจารณาแรงที่มากกระทำในกรณีการรับภาระแบบไม่ปกติ (Static Strength Assessment in Exceptional Load Case) ในการคำนวณนั้น ในสมการจะมีค่าตัวแปรต่างๆ โดยได้อ้างอิงและออกแบบตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้โดยจะระบุไว้ต่อไปนี้

M_v	= 2000	กิโลกรัม
m^+	= 58.795	กิโลกรัม
g	= 9.81	เมตรต่อวินาที ²
C_1	= 0 (กรณีไม่มีคนขับ)	
n_a	= 2	เพลลา
n_b	= 2	แคร่
<i>bogie wheelbase</i>	= 288.42	มิลลิเมตร
<i>% track twist</i>	= $\frac{6}{250}$	

m^+ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาพิจารณาอาจไม่เท่ากันขึ้นกับคุณสมบัติของแต่ละวัสดุในการทดสอบเริ่มแรกเลือกใช้วัสดุ เหล็กหัวแดงเกรด s45c ในการคำนวณตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1. แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)

$$F_{z1max} = F_{z2max} = \frac{F_{zmax}}{2} = \frac{1.4g(M_v - 2m^+)}{4} = 6463.25 \text{ นิวตัน}$$

2. แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)

$$F_y = \frac{(M_v + C_1)g}{6n_a n_b} = 817.5 \text{ นิวตัน}$$

3. แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load)

$$F_{x1} = \frac{\mu}{4} \times \frac{M_v g}{n_a} = 981 \text{ นิวตัน}$$

4. แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision)

$$\text{Longitudinal Collision} = 3m^+ g = 1730.34 \text{ นิวตัน}$$

5. แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)

$$\Delta Z = \frac{\% \text{ track twist} \times \text{bogie wheelbase}}{100} = 14.3044 \text{ มิลลิเมตร}$$

แรงแต่ละประเภทที่กระทำ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load)	6463.25 นิวตัน	6463.25 นิวตัน	6463.25 นิวตัน
แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Transverse Load)	817.5 นิวตัน	-	-
แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Load)	-	981 นิวตัน	-
แรงจากการชนในแนวยาว (Longitudinal Collision)	-	-	1730.34 นิวตัน
แรงกระทำจากการบิดตัวของราง (Track Twist)	14.3 มิลลิเมตร	-	-

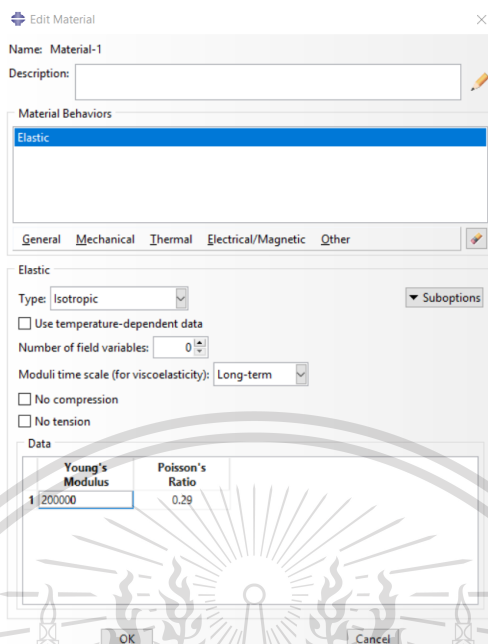
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าของแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อโครงแคร่รถจักรไฟฟ้า ในแต่ละกรณี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

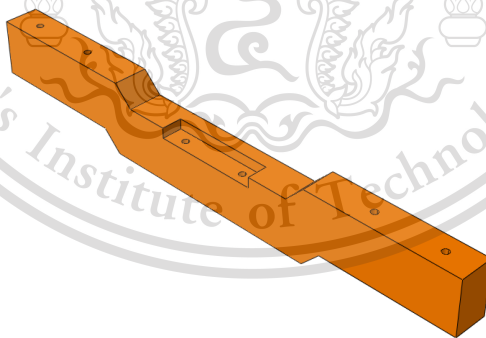
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง



รูปที่ 3.4 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

3.) การแบ่งชิ้นงานออกเป็น ส่วน ๆ (Partition) บริเวณข้อต่อ , บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างและบริเวณรูเจาะต่าง ๆ ที่คาดว่าจะมีความเข้มข้นของความเค้นสูง (High Stress Concentration) เพื่อให้การจัดเรียงเอลิเมนต์ในขั้นตอนของการ mesh นั้นเป็นระเบียบ

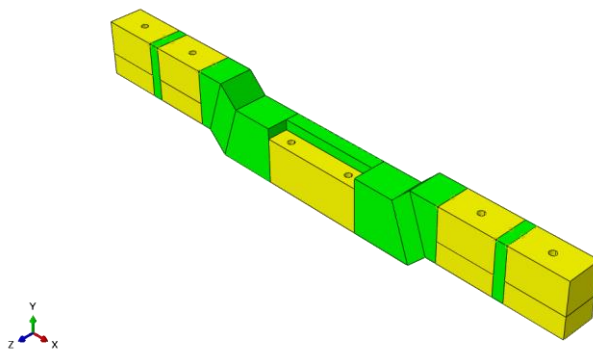


รูปที่ 3.5 แสดงโครงแคร์รด์จักรไฟฟ้าก่อนทำการ Partition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.6 แสดงโครงเครื่องจักรไฟฟ้าหลังทำการ Partition

4.) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแต่ละกรณี

กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง

ชนิดของแรง	เงื่อนไขขอบเขต	ตำแหน่งและทิศทางของแรง
F_z	ยึดฐาน 2 มุมที่อยู่เคียงกัน แล้วกำหนดให้ 2 ฝั่งที่เหลือมีการกดลงและยกขึ้นตามระยะ ΔZ	ใส่แรงลงไปบริเวณจุดที่รองรับภาระส่วนบน ในทิศทางตามแนวแกน Z หรือบริเวณกลางของโครงเครื่องจักรไฟฟ้าด้านข้าง
F_y		กระทำบริเวณด้านข้างของโครงเครื่องจักรไฟฟ้า ฝั่งด้านนอกที่มีการเลี้ยวโค้ง ซึ่งแรงนี้มีทิศทางตามแนวแกน +Y หรือ -Y หรือทิศชี้ออกจากโครงเครื่องจักรไฟฟ้า
ΔZ		กดและยกฐานที่ไม่ถูกยึดขึ้นไปเป็นระยะ ΔZ

ตารางที่ 3.4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง

กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว

ชนิดของแรง	เงื่อนไขขอบเขต	ตำแหน่งและทิศทางของแรง
F_z	ยึดฐานทั้ง 4 ด้าน	ใส่แรงลงไปบริเวณจุดที่รองรับภาระส่วนบน ในทิศทางตามแนวแกน Z หรือบริเวณกลางของโครงเครื่องจักรไฟฟ้าด้านข้าง
F_x		แรงกระทำบริเวณปลายเพลาล้อทั้ง 4 ด้านในทิศทางตามแนวแกน +X และ -X ซึ่งแรงกระทำบนล้อฝั่งเดียวกันจะกระทำในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 3.5 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

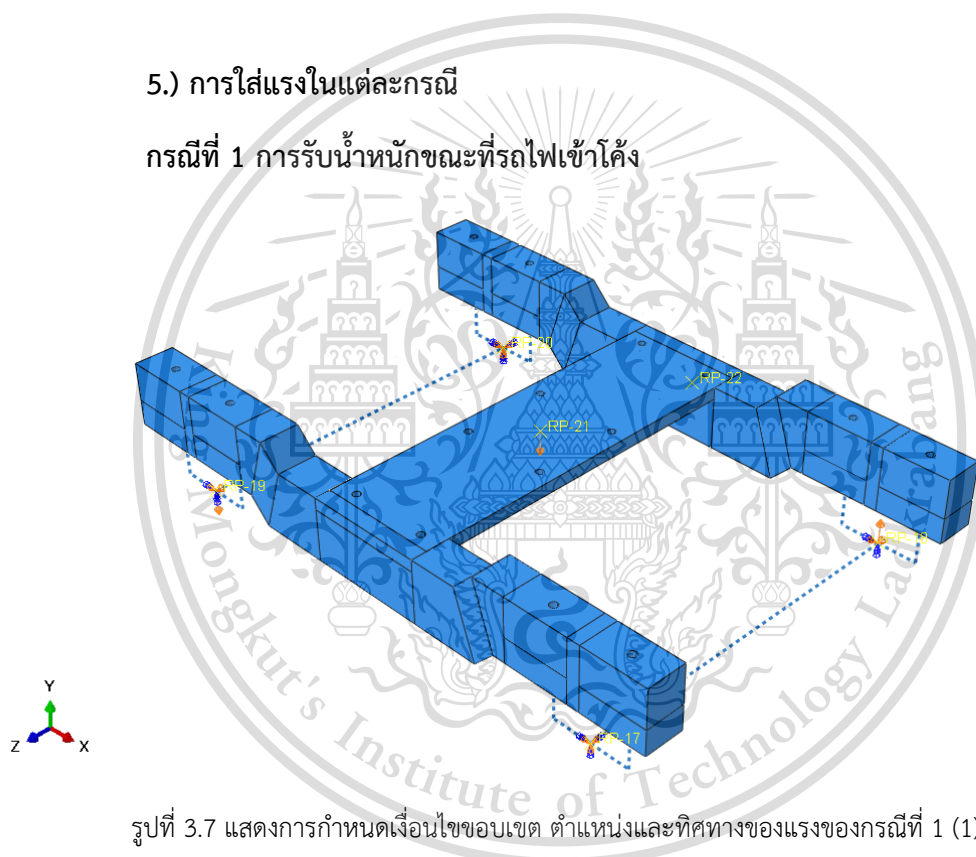
กรณีศึกษาที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน

ชนิดของแรง	เงื่อนไขขอบเขต	ตำแหน่งและทิศทางของแรง
F_z	ยึดฐานทั้ง 4 ด้าน	ใส่แรงลงไปบริเวณจุดที่รองรับภาระส่วนบน ในทิศทางตามแนวแกน Z หรือบริเวณกลางของโครงแคร่รถจักรไฟฟ้าด้านข้าง
Longitudinal Collision		ใส่แรงลงไปบริเวณที่จุดศูนย์กลางมวลของโครงแคร่รถจักรไฟฟ้า ในทิศทางตามแนวแกน X หรือ -X

ตารางที่ 3.6 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน

5.) การใส่แรงในแต่ละกรณี

กรณีศึกษาที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง

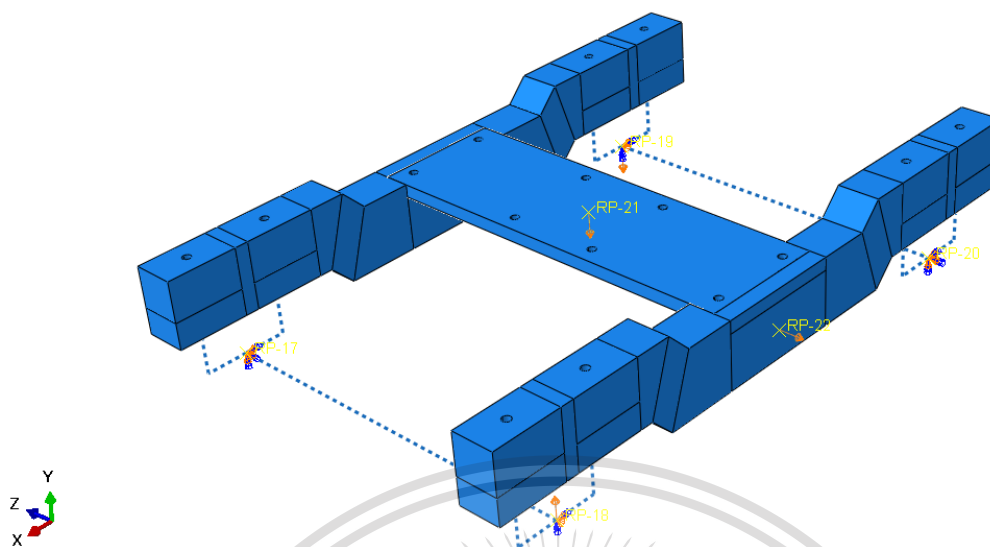


รูปที่ 3.7 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีศึกษาที่ 1 (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

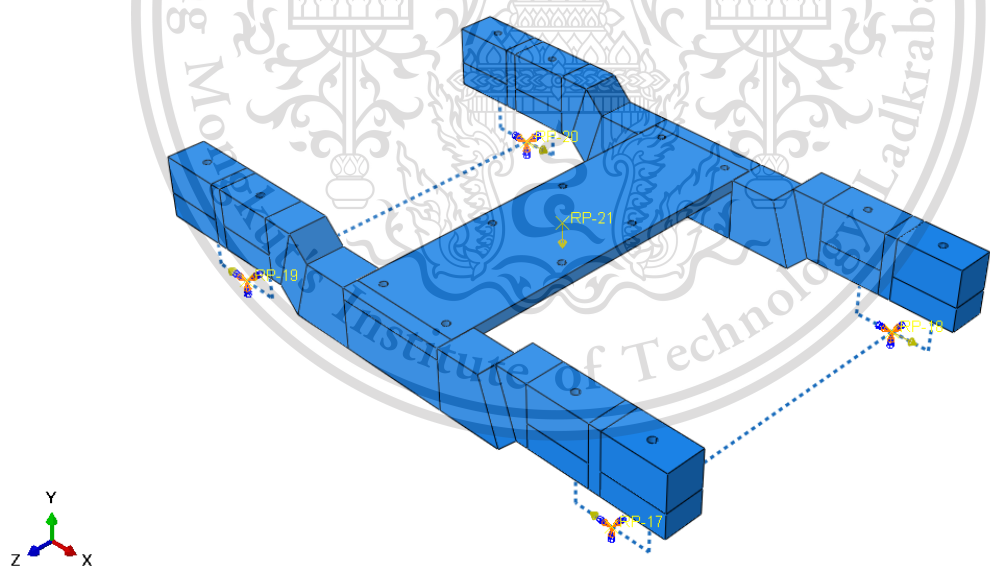
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 3.8 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีที่ 1 (2)

กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว



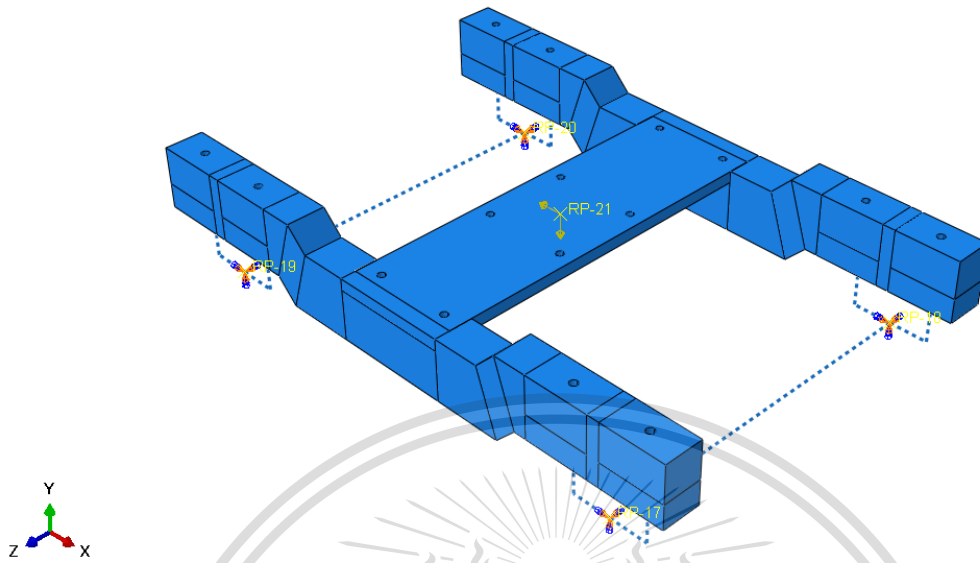
รูปที่ 3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

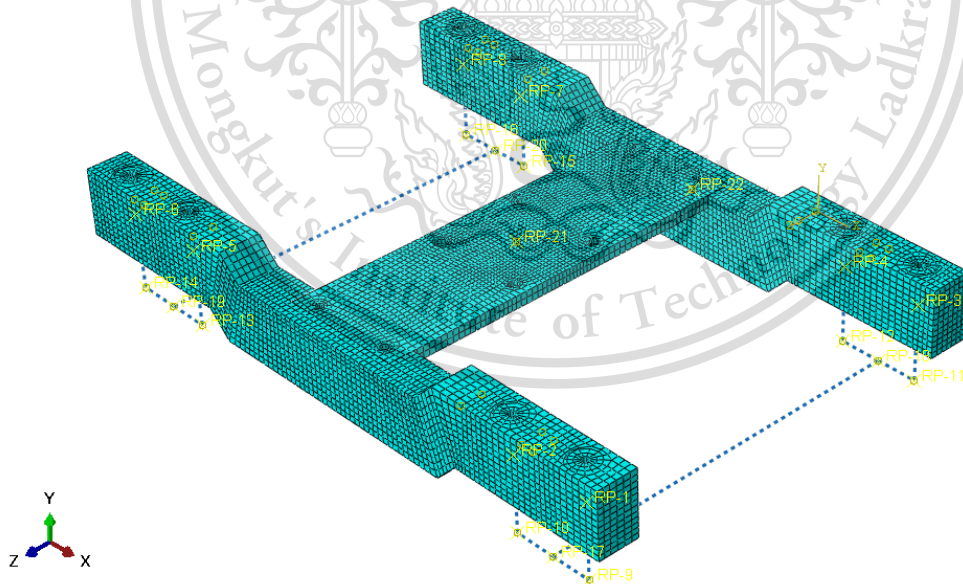
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กรณีศึกษาที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน



รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่งและทิศทางของแรงของกรณีศึกษาที่ 3

6.) แบ่ง Mesh แบบหยาบ โดยใช้ mesh แบบสี่เหลี่ยม เนื่องจากทำให้ชิ้นงานมีความต่อเนื่อง



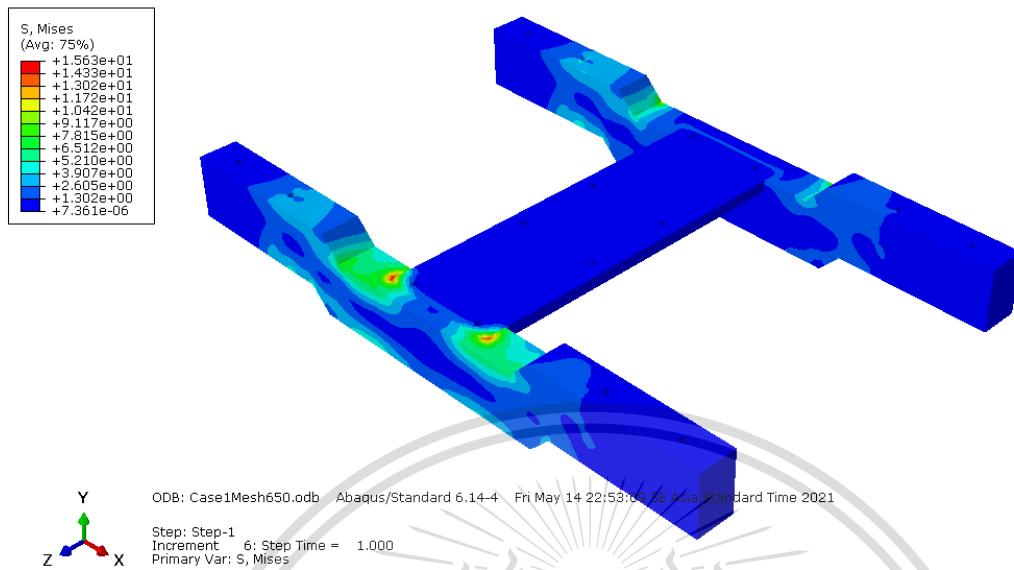
รูปที่ 3.11 แสดงการแบ่ง mesh แบบหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 7.) การจำลอง (Simulation) เพื่อหาจุดที่สนใจในแต่ละกรณี หรือจุดที่มีความเค้น von Mises สูง
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม สิ่งที่จะต้องทำคือให้ข้อมูลเปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

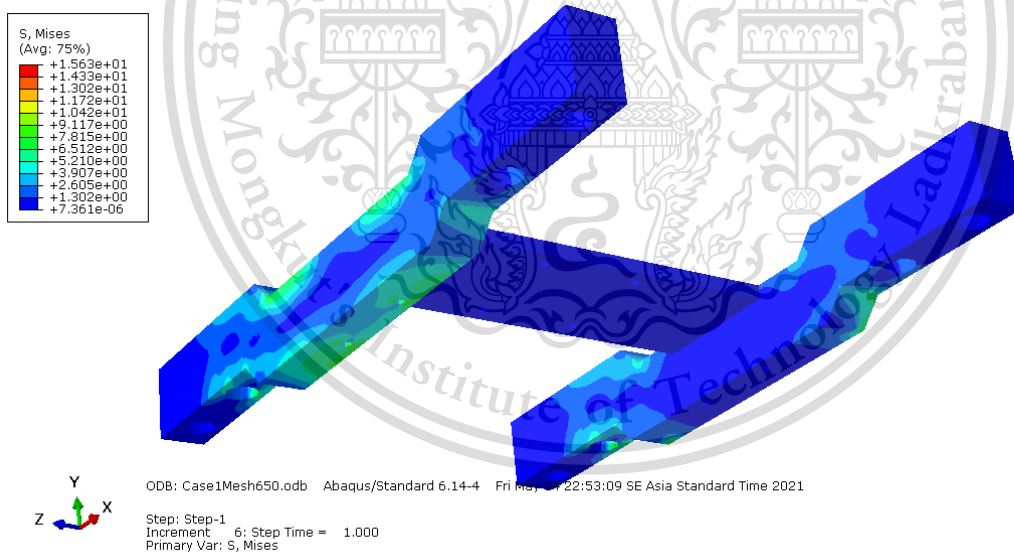
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

กรณีศึกษาที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง



รูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองของกรณีศึกษาที่ 1

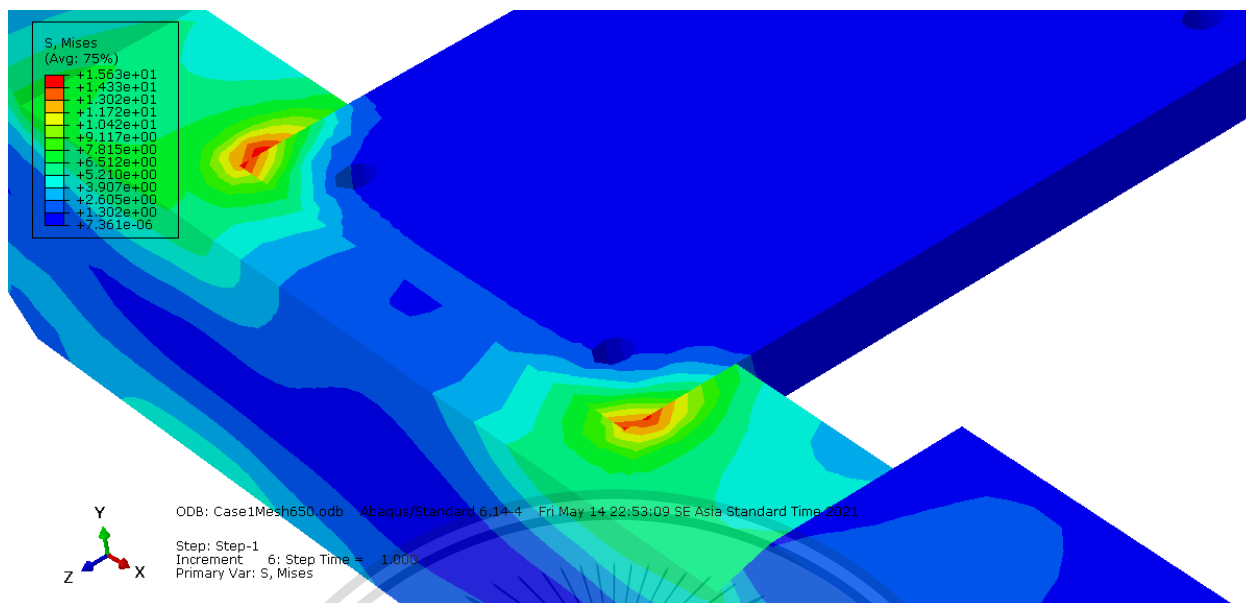


รูปที่ 3.13 แสดงบริเวณที่สนใจจุดแรกของผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

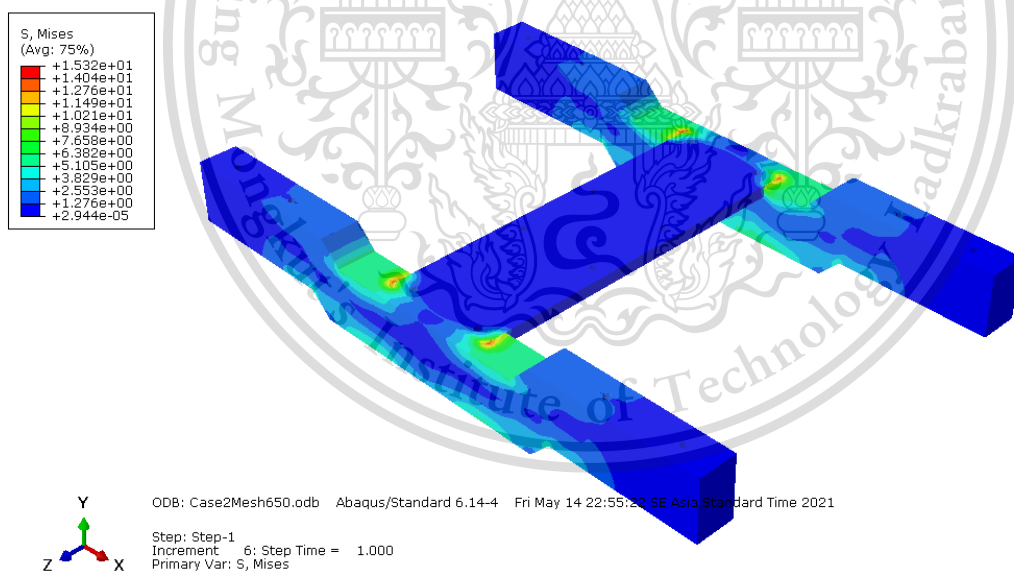
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 3.14 แสดงบริเวณที่สนใจจุดที่สองของผลการจำลองกรณีที่ 1

กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว

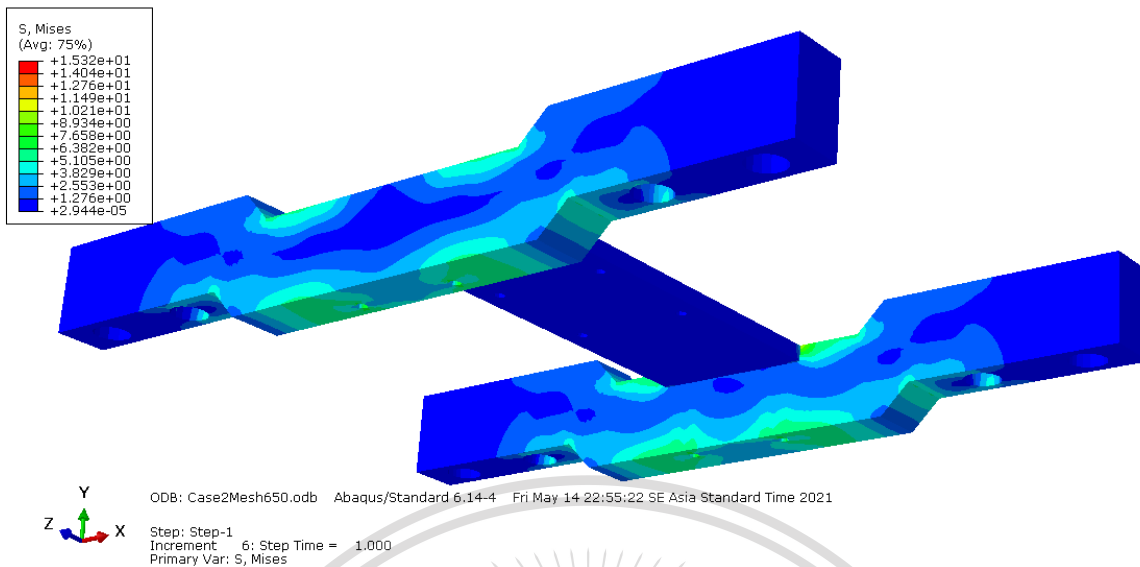


รูปที่ 3.15 แสดงผลการจำลองของกรณีที่ 2

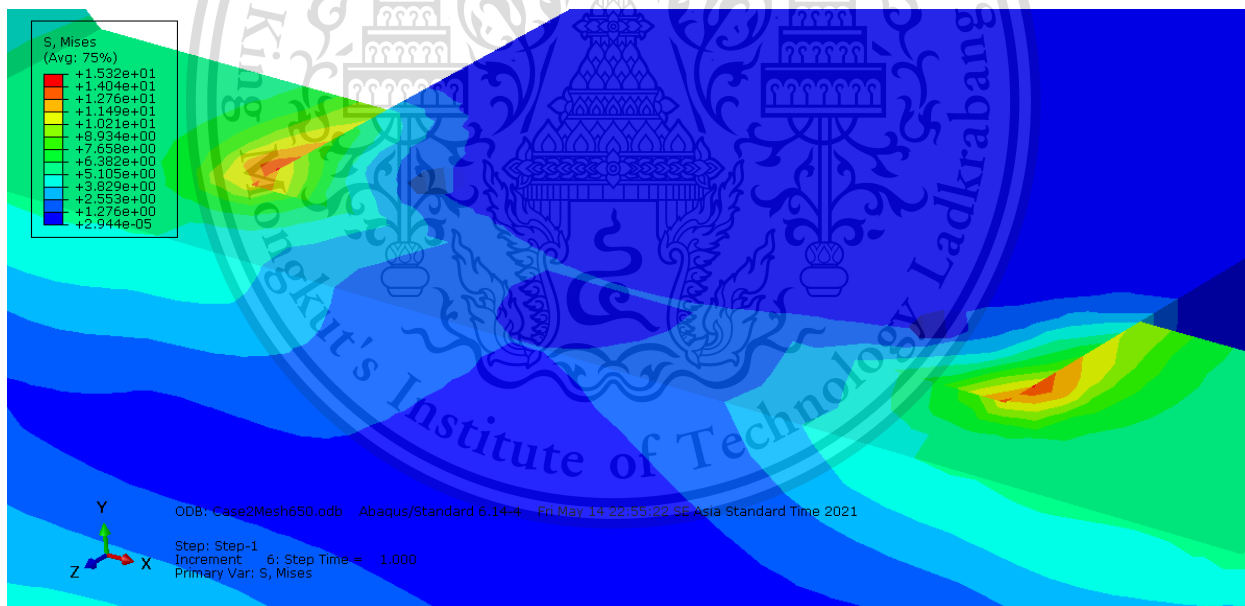
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.16 แสดงบริเวณที่สนใจจุดแรกของผลการจำลองกรณีที่ 2



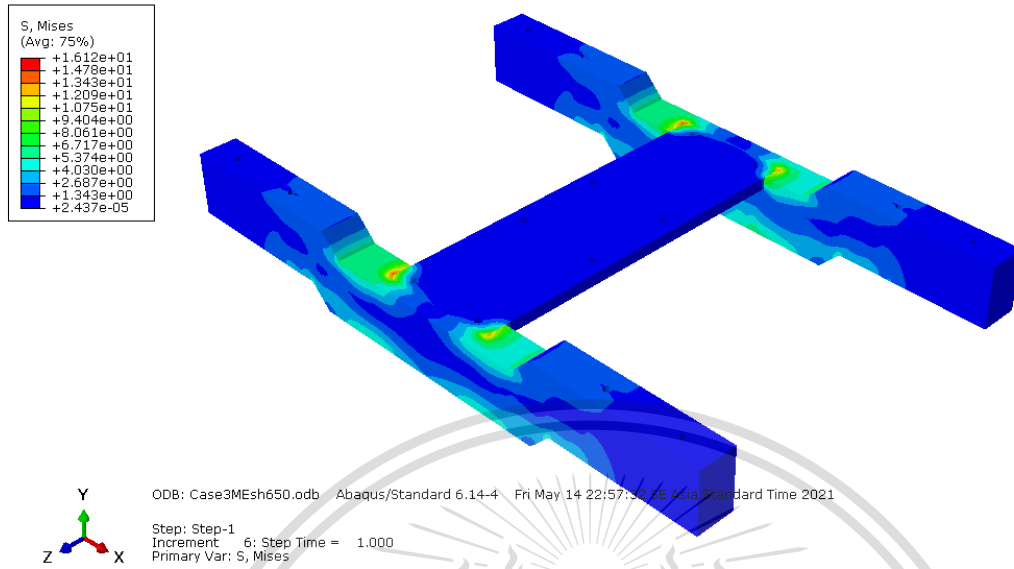
รูปที่ 3.17 แสดงบริเวณที่สนใจจุดที่สองของผลการจำลองกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

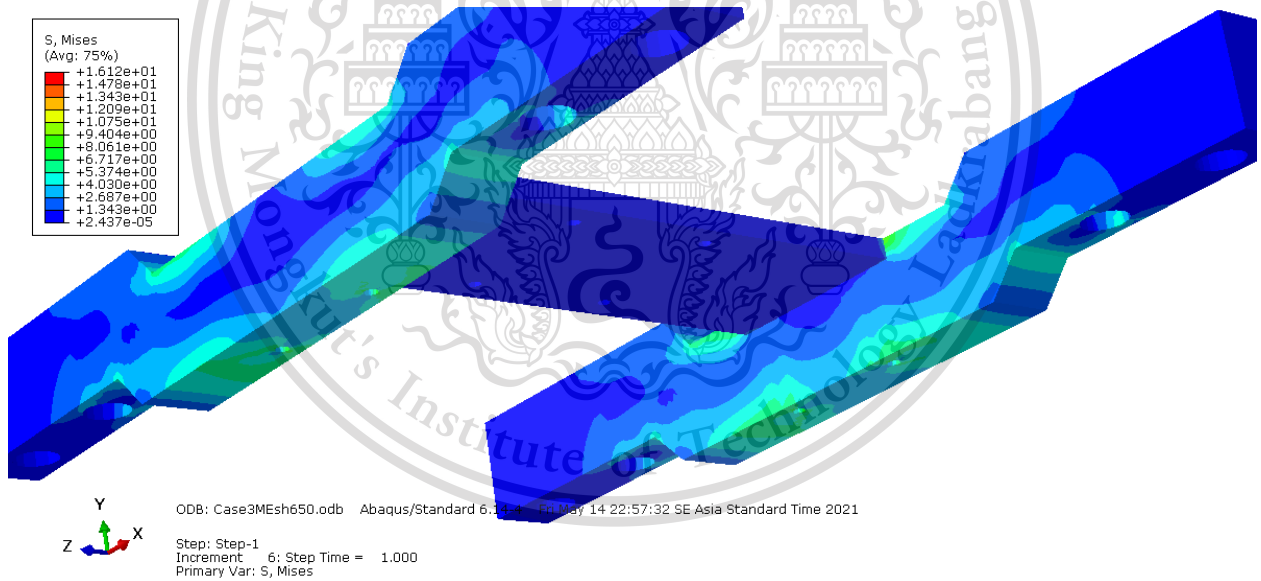
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

กรณีศึกษาที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน



รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลองของกรณีศึกษาที่ 3

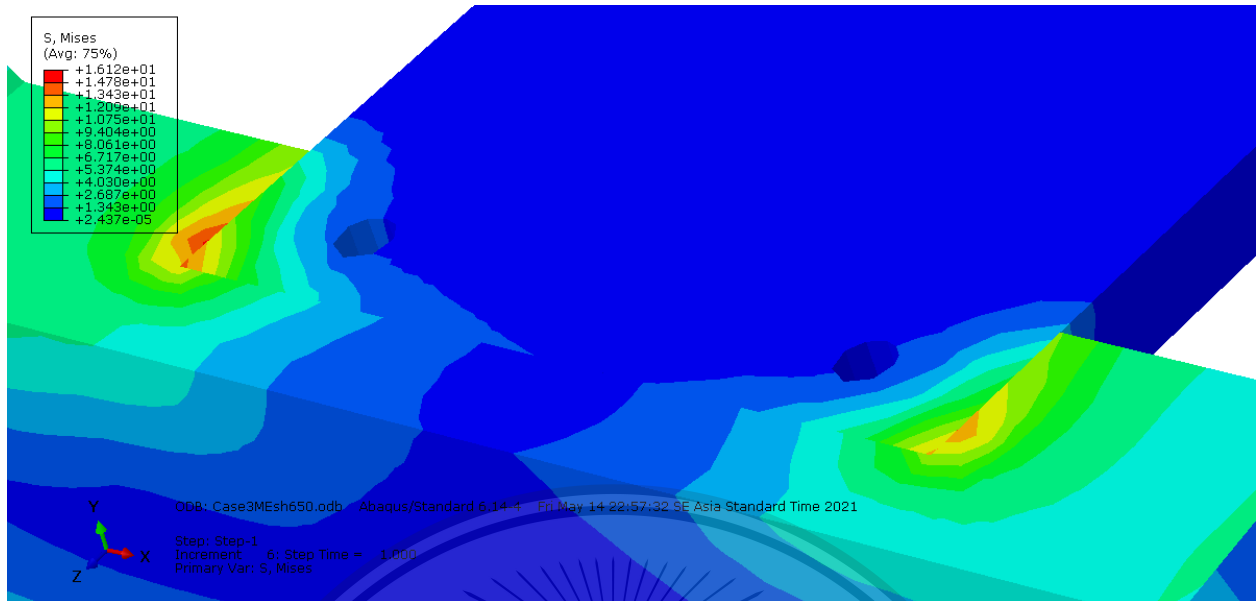


รูปที่ 3.19 แสดงบริเวณที่สนใจจุดแรกของผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

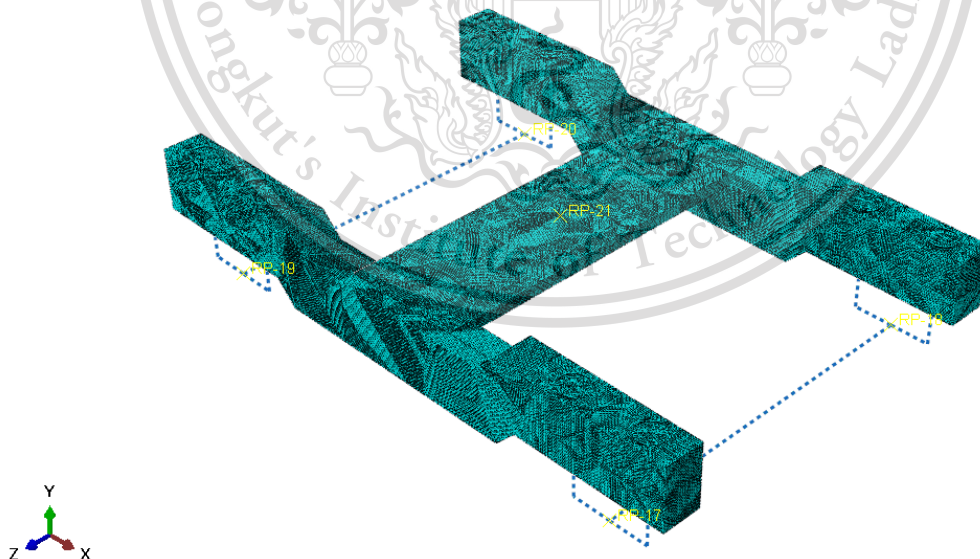
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 3.20 แสดงบริเวณที่สนใจจุดที่สองของผลการจำลองกรณีที่ 3

8.) แบ่ง Mesh แบบละเอียด จากการจำลองในแต่ละกรณี พบว่า บริเวณที่มีความเค้นวอนมิสเสส (von Mises Stress) สูงนั้น เป็นบริเวณเดียวกันทั้งสามกรณี จึงกำหนดให้มีการแบ่ง mesh 2 บริเวณ คือบริเวณตรงกลางของด้านข้างโครงแคร่รถจักรไฟฟ้า และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

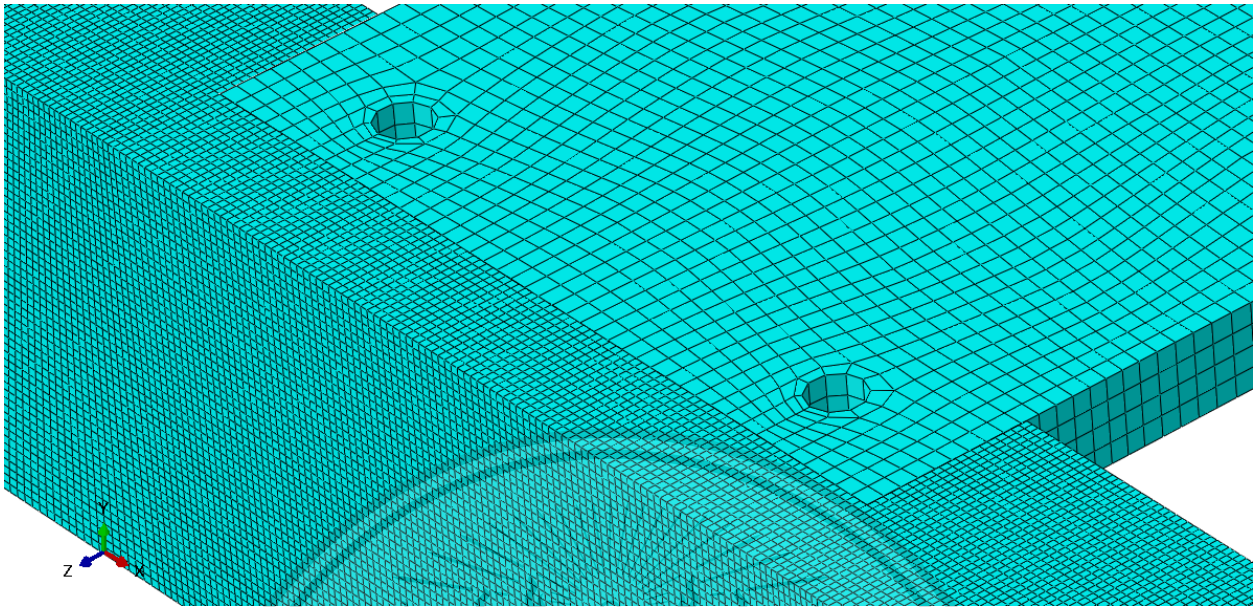


รูปที่ 3.21 แสดงการแบ่ง mesh ที่ละเอียดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.22 แสดงการแบ่ง mesh ที่ละเอียดขึ้นในบริเวณตรงกลางของด้านข้างโครงเครื่องจักรไฟฟ้า



รูปที่ 3.23 แสดงการแบ่ง mesh ที่ละเอียดขึ้นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

จากผลลัพธ์พบว่าบริเวณที่ได้รับ ความเสียหายมากที่สุดแต่ละกรณีคือบริเวณเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถทำการแบ่ง mesh ที่ละเอียดโดยใช้โมเดลเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... 9.) การจำลองเพื่อหาค่าลู่เข้า (Convergent) เนื่องจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม อาจเกิดการแกว่งของผลลัพธ์ที่ได้ จึงต้องเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์เพื่อหาค่าของ ความเค้นวอนมิสเชส (von Mises Stress) ที่แม่นยำ

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

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

10.) หาค่าตัวประกอบความปลอดภัย(Factor of safety)ของวัสดุตัวอย่าง โดยนำค่าความเค้นวอนมิสเสส (von Mises Stress) ของวัสดุตัวอย่างที่ได้มาคำนวณในสมการที่ 2-10

11.) หากกรณีที่มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยน้อยที่สุด ในการพิจารณาความแข็งแรงนั้น หลังจากเราทราบว่ากรณีใดคือกรณีที่มีความเสียหายเกิดมากที่สุดเพื่อนำไปพิจารณาในการเลือกวัสดุต่อไป

12.) พิจารณาหาวัสดุที่เหมาะสม หลังจากเราทราบว่ากรณีใดคือกรณีที่พบความเสียหายมากที่สุดแล้วให้นำกรณีนั้นนำมาพิจารณาอีกรอบโดยกำหนดให้จำนวน mesh เท่ากันในการคำนวณแต่ละวัสดุ โดยเปลี่ยนเป็นวัสดุที่จะพิจารณาให้ครบตามที่คัดเลือกและสนใจโดยคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวัสดุแต่ละชนิด

13.) เลือกวัสดุที่เหมาะสม หลังจากทราบค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวัสดุในแต่ละชนิดเลือกวัสดุที่ทำให้มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหากมีวัสดุที่ทำให้มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์หลายชนิดจะเลือกจากคุณสมบัติของวัสดุ ลักษณะการใช้งาน และความยากง่ายในการหาแหล่งซื้อ

14.) หาค่าตัวประกอบความปลอดภัย(Factor of safety)ของวัสดุที่เหมาะสมในกรณีอื่นๆ หลังจากทราบวัสดุที่เลือกแล้วให้หาค่าลูเข้าและนำมาหาตัวประกอบความปลอดภัยของอีกสองกรณีที่เหลือ

3.3 การประกอบชิ้นส่วน

3.3.1 การประกอบตลับลูกปืนกับเพลลา

ตลับลูกปืนที่เราเลือกใช้เป็นตัวลูกปืนตุ๊กตา ทำจากเหล็กหล่อ น้ำหนักเบา การสวมประกอบตลับลูกปืนตุ๊กตากับเพลลานั้น สามารถทำได้ดังนี้

1. หลังจากติดตั้งล้อ และเฟืองโซ่เข้ากับเพลลาแล้ว จึงทำการติดตั้งเพลลาเข้ากับตลับลูกปืน
2. สวมตลับลูกปืนเข้าไปที่เสื่อตลับลูกปืน โดยให้ตำแหน่งของ locking pin บนตลับลูกปืน ตรงกับตำแหน่งของ filling slot บนเสื่อตลับลูกปืน และให้ตำแหน่งของ grease hole บนตลับลูกปืนตรงกับตำแหน่งของ grease nipple hole บนเสื่อตลับลูกปืน
3. สวมตลับลูกปืนเข้าที่เพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยระวังไม่ให้เพลลาบิด
4. ซัน set-screw ทั้งสองตัว บนตลับลูกปืนให้แน่น โดยใช้ประแจอัลเลน และประแจทอร์ก
5. ทำให้เหมือนกันทั้งสองฝั่งของเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.2 การประกอบลิ้มกับเพลลา

การประกอบลิ้มสวมอัด เพื่อประกอบล้อ เฟืองโซ่ และจานเบรกเข้ากับเพลลานั้น มีวิธีการดังนี้

1. การประกอบลิ้มสำหรับล้อและเพลลา

- 1.นำลิ้มที่ออกแบบไว้ นำลงไป ในช่องใส่ลิ้มที่ออกแบบไว้บนเพลลา ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.45 มิลลิเมตร
- 2.นำล้อสวมประกอบกับกับลิ้มและเพลลาที่ประกอบกันเสร็จแล้ว โดยให้ลิ้มสวมเข้าไปในรอยบากของล้อ
- 3.สวมอัดล้อเข้ากับเพลลาให้แน่น

2. การประกอบลิ้มสำหรับจานเบรก เฟืองโซ่ และเพลลา

- 1.นำลิ้มที่ออกแบบไว้ นำลงไป ในช่องใส่ลิ้มที่ออกแบบไว้บนเพลลา ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48.00 มิลลิเมตร
- 2.นำจานเบรก และเฟืองโซ่ สวมประกอบกับกับลิ้มและเพลลาที่ประกอบกันเสร็จแล้ว โดยให้ลิ้มสวมเข้าไปในรอยบากของล้อ
- 3.สวมอัดจานเบรก และเฟืองโซ่เข้ากับเพลลาให้แน่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

หลังจากทราบวิธีการทดลองและวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงค่าของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำกับแคร่รถจักรไฟฟ้า ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวัสดุชนิดต่าง ๆ และผลการจำลองของวัสดุที่เลือกสำหรับทั้ง 3 กรณี

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำกับแคร่รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ ตามมาตรฐาน EN13749

จากการคำนวณแรงกรณีการรับภาระแบบไม่ปกติตามมาตรฐาน EN13749 เมื่อเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำโครงแคร่นั้น ได้ผลลัพธ์ดังนี้

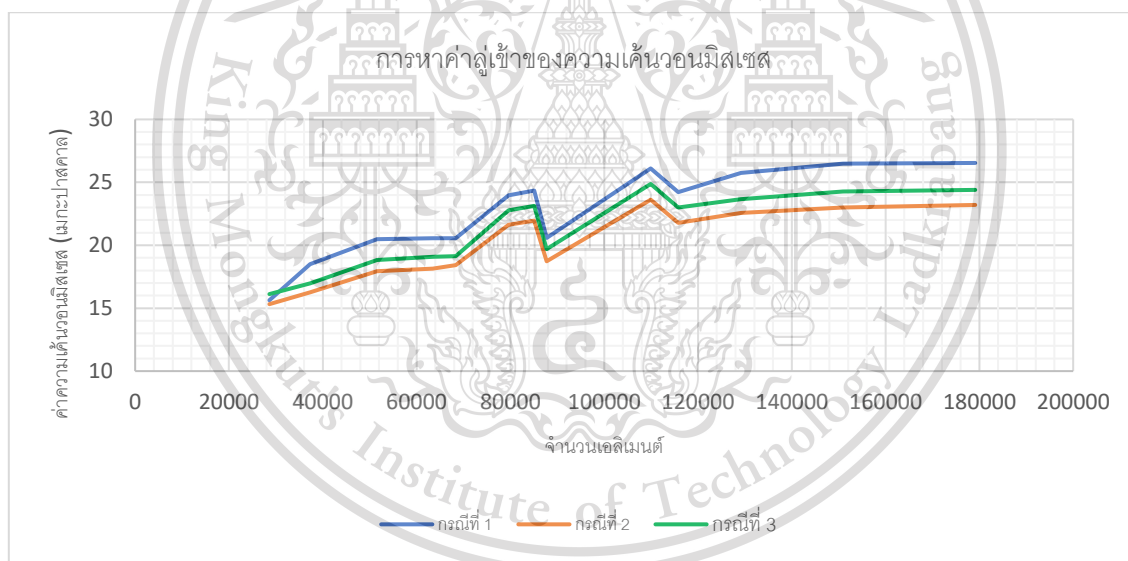
วัสดุ	แรง				
	F_z (นิวตัน)	F_y (นิวตัน)	F_x (นิวตัน)	$3m^+g$ (นิวตัน)	ΔZ (มิลลิเมตร)
เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)					
AISI 1010	6609.60	817.5	981	1103.16	14.304
AISI 1020	6609.60	817.5	981	1103.16	14.304
ASTM A36	6610.25	817.5	981	1100.35	14.304
ASTM A516 Grade 70	6611.89	817.5	981	1093.35	14.304
ASTM A633 Grade E	6613.52	817.5	981	1086.34	14.304
ASTM 656 Grade I	6611.89	817.5	981	1093.35	14.304
เหล็กหล่อ (Cast Iron)					
ASTM A536 60-40-18	6632.16	817.5	981	1006.44	14.304

วัสดุ	F _z (นิวตัน)	F _y (นิวตัน)	F _x (นิวตัน)	3m ⁺ g (นิวตัน)	ΔZ (มิลลิเมตร)
ASTM A536 100-70-03	6632.16	817.5	981	1006.44	14.304
ASTM A536 120-90-02	6631.64	817.5	981	1008.68	14.304
ASTM A842 Grade 250	6621.70	817.5	981	1051.29	14.304
ASTM A842 Grade 450	6634.78	817.5	981	995.22	14.304

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำกับเครื่องจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ ตามมาตรฐาน EN13749

4.2.2 ผลของการจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ ในแต่ละกรณี ตามมาตรฐาน EN13749

จากวัสดุตัวอย่างที่เลือกมา คือ เหล็กหัวแดง s45c ซึ่งมีค่าความเค้นครากของวัสดุเท่ากับ 310 MPa จะได้ผลการจำลองดังแผนภาพและตารางด้านล่าง



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นอนนิสและจำนวน element ของการรับภาระทั้ง 3 กรณี ของเหล็กหัวแดง s45c

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเริ่มเกิดการลู่ออกของความเค้นอนนิสที่ 150,000 เอลิเมนต์ ค่าตัวประกอบความปลอดภัยสามารถหาได้จากสมการที่ 2-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

	กรณีที่ 1 รถไฟเข้าโค้ง	กรณีที่ 2 รถไฟโคลงเคลง	กรณีที่ 3 รถไฟเกิดการชน
ค่าตัวประกอบความปลอดภัย	11.68	13.12	12.47

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแคร่รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้เหล็กหัวแดง s45c

จะเห็นได้ว่า กรณีที่ 1 มีค่าความเค้นวอนมึนมากที่สุด ทำให้กรณีนี้มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยน้อยที่สุด ดังนั้น สำหรับวัสดุที่ได้เลือกไว้ จะทำการคำนวณแค่กรณีที่ 1 และหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ 150,000 เอลิเมนต์เท่านั้น ได้ผลลัพธ์ดังนี้

วัสดุ	ความเค้นวอนมึน (MPa)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
AISI 1010	46.79	3.85
AISI 1020	46.79	4.38
ASTM A36	46.84	4.72
ASTM A516 Grade 70	46.79	5.56
ASTM A633 Grade E	47.01	8.08
ASTM 656 Grade I	46.79	11.75
ASTM A536 60-40-18	46.66	5.92
ASTM A536 100-70-03	47.15	10.24
ASTM A536 120-90-02	46.93	13.23
ASTM A842 Grade 250	46.77	3.74
ASTM A842 Grade 450	47.56	6.62

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเค้นวอนมึนและค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแคร่รถจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ สำหรับกรณี
ที่ 1

จากตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่ามีวัสดุสองชนิดที่มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยอยู่ในช่วงที่กำหนด ได้แก่ AISI 1010 และ ASTM A842 Grade 250 จึงนำวัสดุทั้งสองมาเปรียบเทียบตามเงื่อนไขเกี่ยวกับการค้า
ไม่ว่า การเลือกวัสดุที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2.1 ปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุ AISI 1010 และ ASTM A842 Grade 250 กับเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุ

จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าวัสดุ AISI 1010 นั้นสามารถหาซื้อได้ง่าย และมีราคาที่ถูกกว่า ASTM A842 Grade 250 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่กำหนดไว้ เราจึงเลือก AISI 1010 เป็นวัสดุในการทำเครื่องจักรไฟฟ้า

4.2.3 ผลการจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุ AISI1010 ในแต่ละกรณีตามมาตรฐาน EN13749

จากการจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุ AISI1010 ของทั้งสามกรณี ได้ผลลัพธ์ว่ามีจุดที่เกิดความเค้นวอนมีสสูงสุดบนโครงเครื่องจักรไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี ดังนี้

1. กรณีการรับภาระแบบที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง มีความเค้นวอนมีสสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณมุมของคานด้านข้างด้านใน ที่ติดกับคานด้านตัดขวาง ซึ่งความเค้นวอนมีสสูงสุด และค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าตามตารางที่แสดง

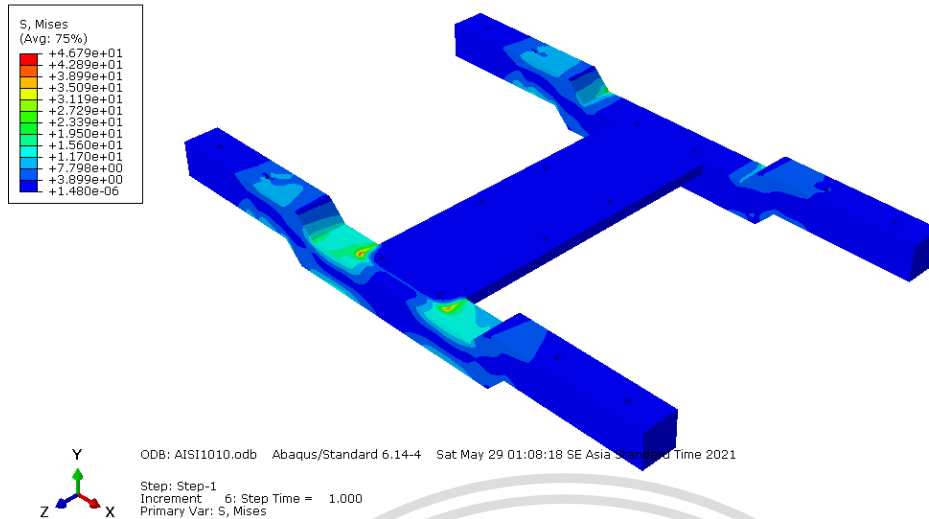
	ความเค้นวอนมีส (เมกะปาสคาล)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
กรณีที่ 1 รถไฟเข้าโค้ง	46.79	3.85

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของเครื่องจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 1 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010

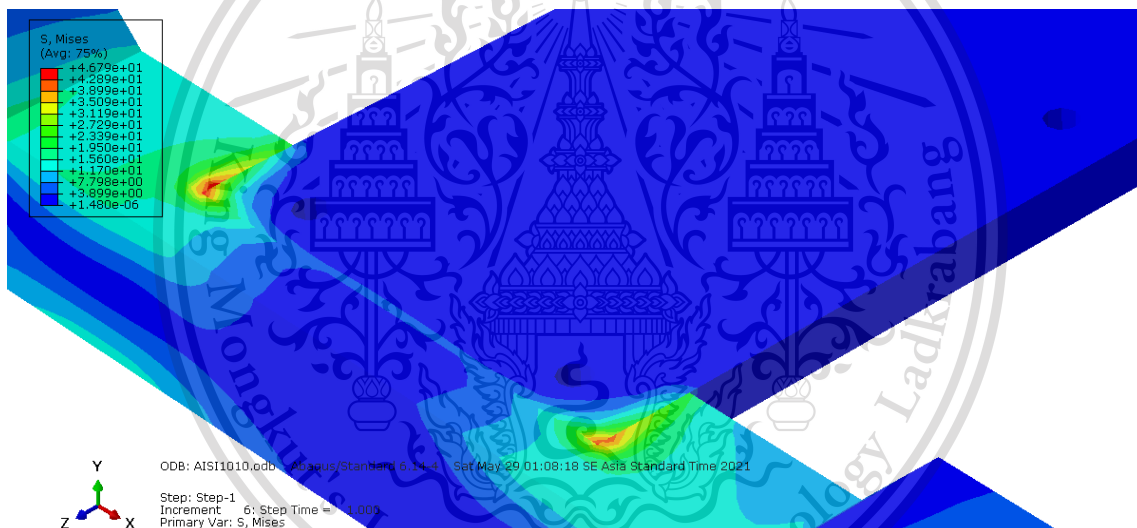
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 1



รูปที่ 4.3 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 1

2. กรณีการรับภาระแบบที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว มีความเค้นวอนมิสสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณมุมของคานด้านข้างด้านใน ที่ติดกับคานด้านตัดขวาง เช่นเดียวกับกรณีการรับภาระแบบที่ 1 ซึ่งความเค้นวอนมิสสูงสุด และค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าตามตารางที่แสดง

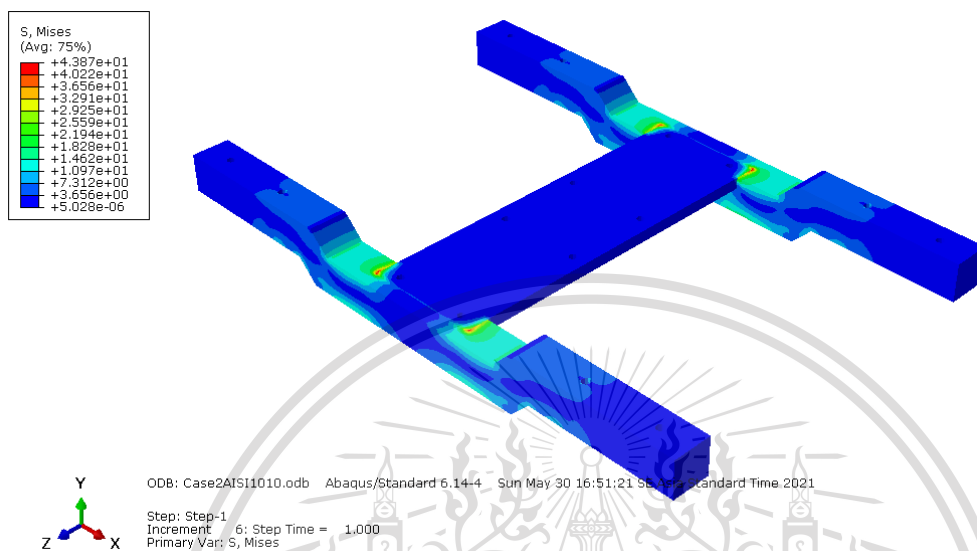
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

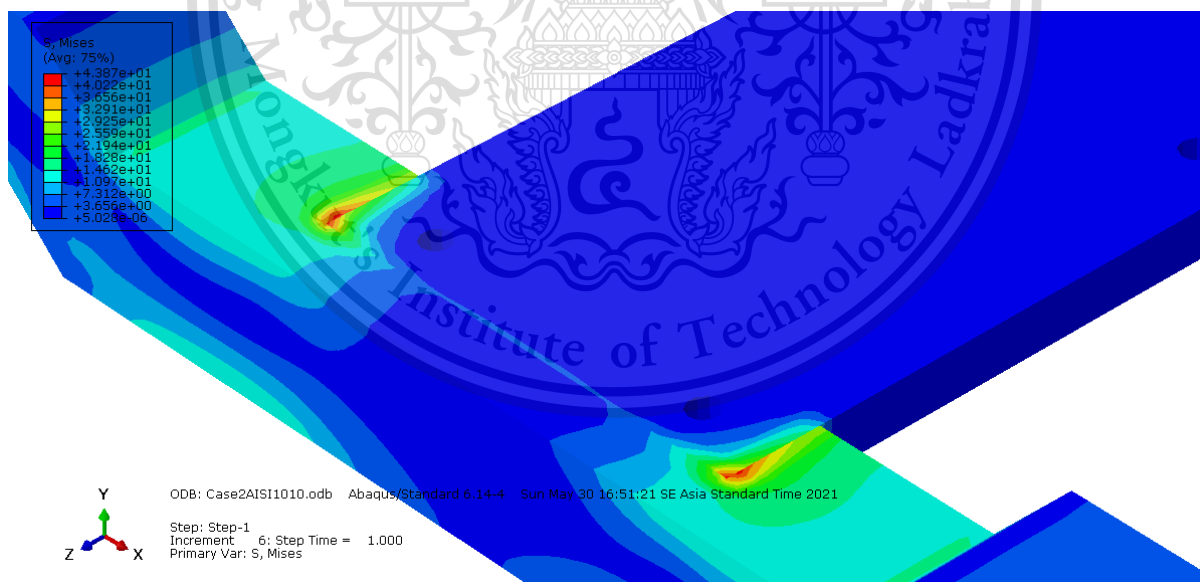
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

	ความเค้นวอนมิสเซส (เมกะปาสคาล)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
กรณีที่ 2 รถไฟโคลงตัว	43.87	4.10

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแคร่รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 2 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010



รูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 2



รูปที่ 4.5 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

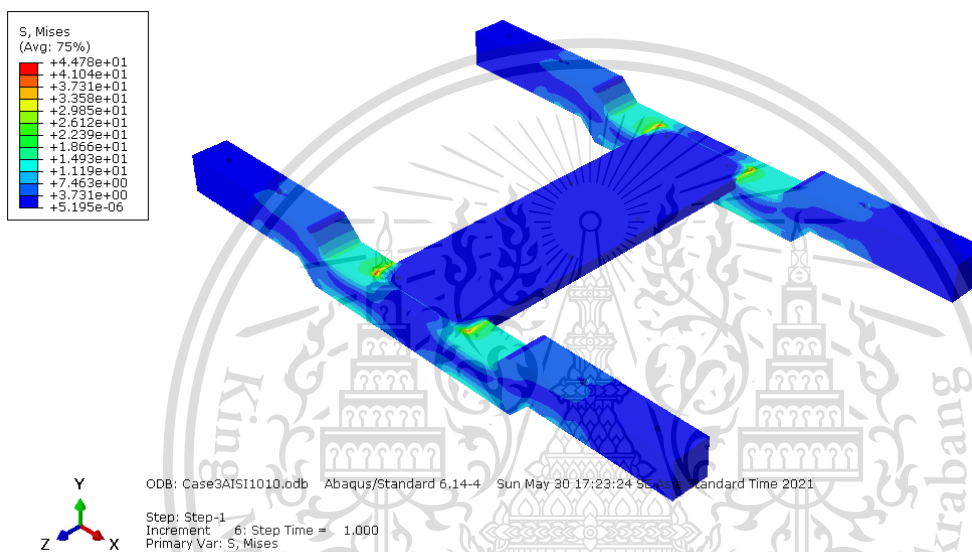
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

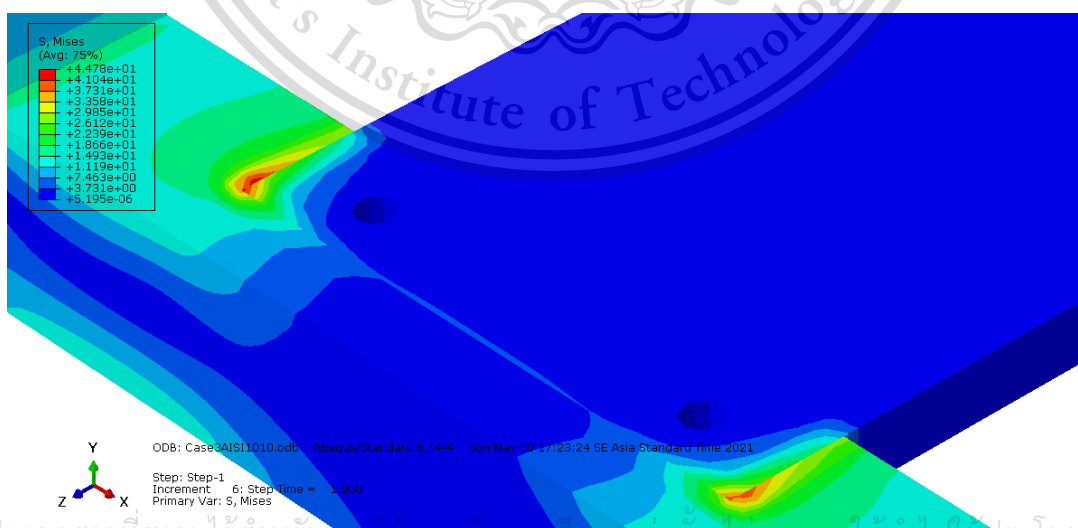
3. กรณีการรับภาระแบบที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน มีความเค้นวอนมิสสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณมุมของคานด้านข้างด้านใน ที่ติดกับคานด้านตัดขวางเช่นเดียวกันกับกรณีการรับภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ซึ่งความเค้นวอนมิสสูงสุด และค่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าตามตารางที่แสดง

	ความเค้นวอนมิสเซส (เมกะปาสคาล)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
กรณีที่ 3 รถไฟเกิดการชน	44.78	4.02

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าตัวประกอบความปลอดภัยของแคร่รถจักรไฟฟ้า กรณีรับภาระแบบที่ 3 เมื่อใช้วัสดุ AISI1010



รูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองของการรับภาระแบบที่ 3



รูปที่ 4.7 แสดงบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของการรับภาระแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเขตที่เปลี่ยนแปลงได้ และต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อทราบถึงผลการทดลองด้วยวิธีการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมจำลองแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงเคร่รถจักรไฟฟ้านี้ต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. ในการออกแบบเคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กออกแบบให้มีขนาด ความกว้างของคานด้านข้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 780 มิลลิเมตร ความสูง 50 มิลลิเมตร ความกว้างของเคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กรวม 459.45 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 250 มิลลิเมตร ระยะระหว่างล้อทั้งสองข้าง 288.42 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่น้อยที่สุดที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์และชิ้นส่วนอื่นๆได้ตามการออกแบบ และอยู่ในข้อกำหนดระยะและกฎของ Railway Challenge และเลือกใช้เหล็ก AISI 1010 เนื่องจากมีค่าความเค้นครากของวัสดุที่ทำให้มีค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่มีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 4 ในกรณีที่เกิดความเสียหายมากที่สุดและมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยระหว่าง 1.5 ถึง 5 ในกรณีอื่นๆซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนด

2. จากการศึกษาการรับแรงของเคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กตามมาตรฐาน 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 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน มีความปลอดภัยรองลงมา และ กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง มีความปลอดภัยน้อยที่สุดในทั้ง 3 กรณีและทั้งสามกรณีเกิดค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละกรณีเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนของคานด้านข้างกับคานด้านตัดขวางที่สัมผัสกันเช่นเดียวกันทุกกรณี

3. จากการทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์เมื่อได้รับแรงตามมาตรฐาน EN13749 โดยเลือกใช้เหล็ก AISI 1010 พบว่า กรณีที่ 1 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเข้าโค้ง ในการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลอง ความละเอียดมากที่สุดที่ Mesh ขนาด 3.6 มีจำนวน 150956 เอลิเมนต์ เกิดค่าความเค้นสูงสุด 46.79 เมกะปาสคาล กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว ในการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลอง ความละเอียดมากที่สุดที่ Mesh ขนาด 3.6 มีจำนวน 150956 เอลิเมนต์ เกิดค่าความเค้นสูงสุด 43.87 เมกะปาสคาล กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน

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

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

ในการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลอง ความละเอียดมากที่สุดที่ Mesh ขนาด 3.6 มีจำนวน 150956 เอลิเมนต์ เกิดค่าความเค้นสูงสุด 44.78 เมกะปาสคาล และจากค่าความเค้นสูงสุดที่ได้นำไปหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยจากค่าคุณสมบัติของวัสดุ ความเค้นครากของเหล็ก AISI 1010 มีค่า 180 เมกะปาสคาล พบว่ากรณีที่ 1 การรับภาระขณะที่รถไฟเข้าโค้ง มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 3.85 กรณีที่ 2 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟโคลงตัว มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 4.10 กรณีที่ 3 การรับน้ำหนักขณะที่รถไฟเกิดการชน มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 4.02

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. ไม่สามารถทำการทดลองผ่านโปรแกรมจำลองได้อย่างละเอียดมาก ๆ เนื่องจาก ซีดจำกัดทางด้านอุปกรณ์ที่จำกัด ทำให้ในการทดลองผ่านโปรแกรมจำลองเมื่อทำการทดลองในค่าความละเอียดมากถึงค่าหนึ่ง โปรแกรมจำลองไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ถึงขีดจำกัด
2. เนื่องจากการเกิดโรคระบาดเกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่ให้บริการภายในภาควิชาได้ ทำให้เกิดปัญหาข้างต้นที่กล่าวก่อนหน้าและทำให้ต้องปรับรูปแบบการดำเนินงานและขอบเขตในการดำเนินงาน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในการดำเนินงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์ คอมพิวเตอร์ ในการทดลองผ่านโปรแกรมต่าง ๆ นั้นควรมีการเตรียมอุปกรณ์สำรองหรือจัดเตรียมวิธีการที่จะแก้ไขปัญหา ในกรณีที่มีเหตุติดขัดหรือเหตุสุดวิสัยเกิดขึ้นซึ่งไม่สามารถใช้อุปกรณ์ชิ้นหลักได้
2. ในการออกแบบแคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กทางคณะผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างในสถานะสถิตยศาสตร์ในสถานะการรับภาระแบบไม่ปกติเท่านั้นจึงเสนอให้มีการจัดทำแคร่รถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กขึ้นงานจริงเพื่อทดสอบในขั้นตอนอื่นๆเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบความแม่นยำเช่น การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างในสถานะสถิตยศาสตร์ การทดสอบบนทางวิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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] Jakkachai 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] Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston, Jr., John T. DeWolf, David F. Mazurek. (2012). Mechanics of Materials (6th ed.). United States: McGraw-Hill.
- [6] William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch. (2010). Materials Science and Engineering (8th ed.). United States: WILEY
- [7] IMechE. (n.d.). Railway Challenge. Retrieved 20 October 2020, from <https://www.imeche.org/events/challenges/railway-challenge>
- [8] Department of Engineering, University of Cambridge. (n.d.). Young's Modulus – Cost. Retrieved 24 September 2020, from http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/stiffness-cost/NS6Chart.html
- [9] Office of Transport and Traffic Policy and Planning (Ministry of Transport, Thailand). (2018). Standard for Train structure. Retrieved 24 November 2020, from http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/ProjectOTP/2560/Project06/ManualStandard.pdf
- [10] Teerasawat Chukeaw. (2014). Type of locomotive. Retrieved 24 November 2020, from <https://sites.google.com/site/rthfi2557/prapheth-khxng-rth-cakr>
- [11] Phairoj Watthana. (2015). Signaling System. Retrieved 24 November 2020, from <http://inside.eng.psu.ac.th/images/stories/document/rail/4.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

[12] Yoshinori Hagio, Masanori SAWADA, Satoshi Tokunaga, Kazuhiko Futagawa. (2012). Bogie frame for railway vehicles. Retrieved 24 November 2020, from <https://patents.google.com/patent/US9469313>

[13] Tosaphol Ratniyomchai, Ekarong Sukjit, Chaiyut Sumpavakup 2020). STI Railway Challenge. Retrieved 31 May 2021, from <https://sites.google.com/view/sti-railway-challenge>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

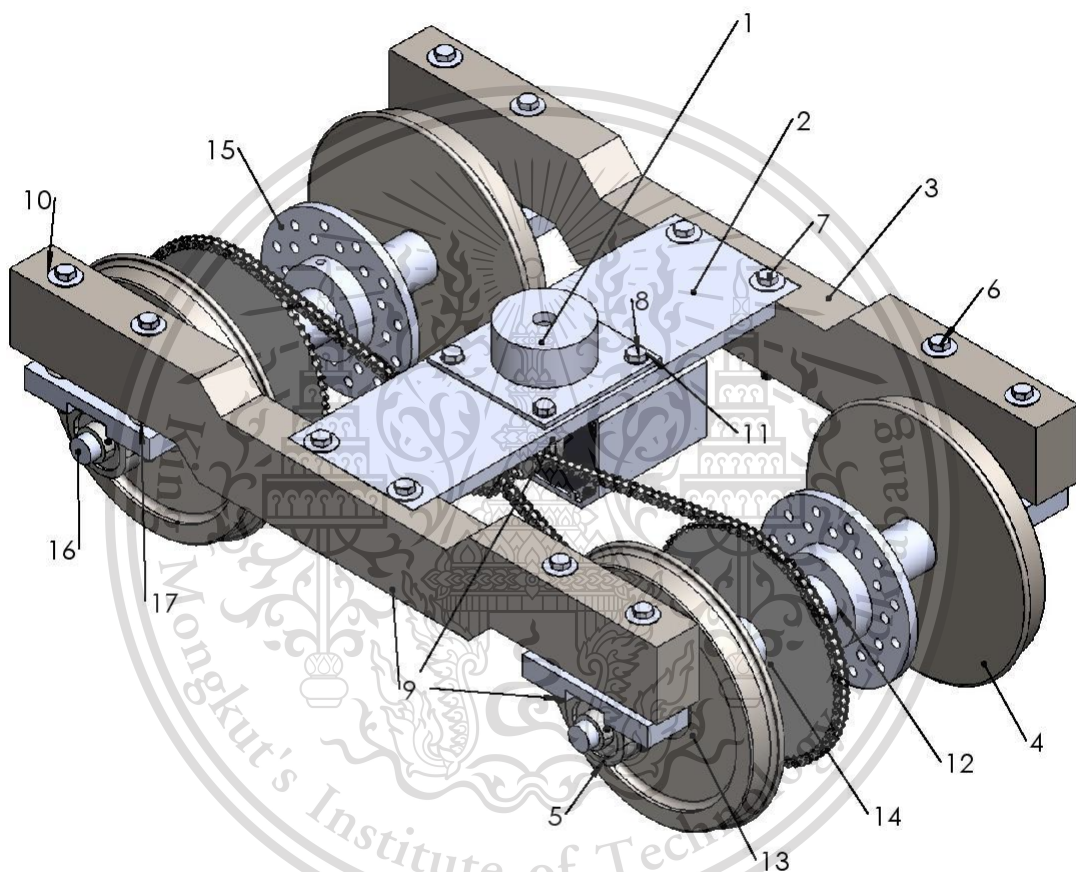


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

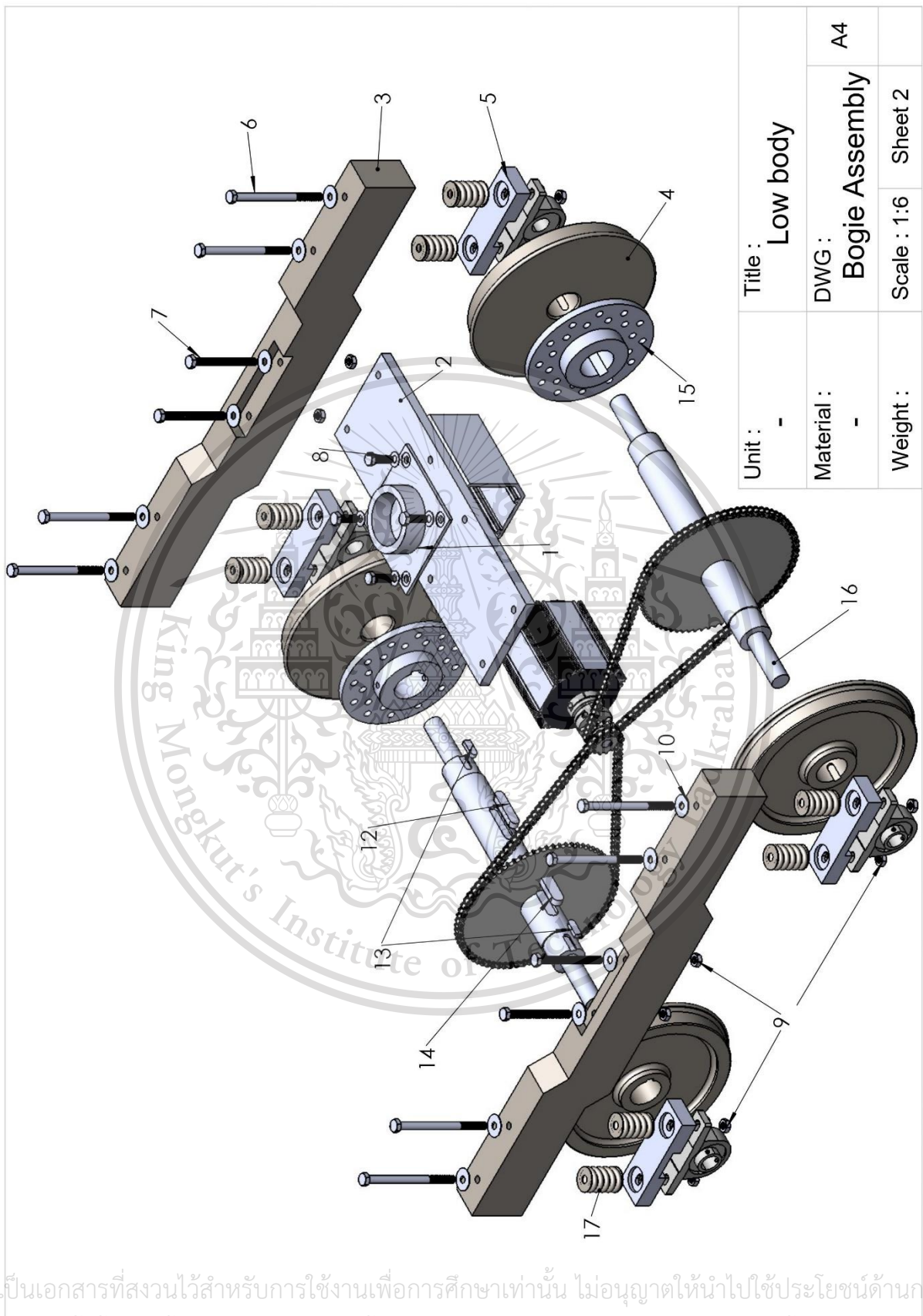
Title :	Low Body	Material :	-	Drawing NO. :	-	Unit :	-
Drawing :	Bogie Assembly	Weight :	-	Scale :	1 : 5	Sheet :	1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



Unit :	-	Title :	Low body
Material :	-	DWG :	Bogie Assembly
Weight :	-	Scale :	1:6
		Sheet :	Sheet 2
			A4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title : Low Body	Material : -	Drawing NO. : -	Unit : -
Drawing : -	Weight : -	Scale : -	Sheet : 3

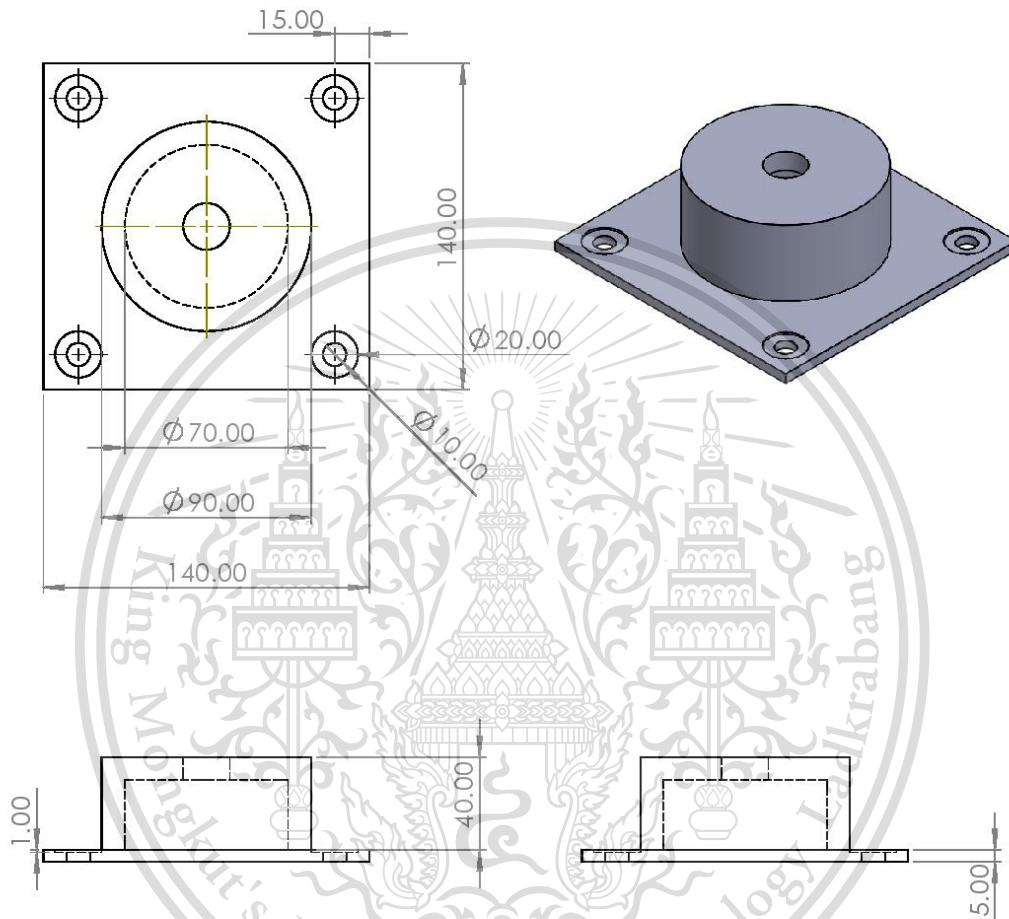
Number	Item
1	Bolster
2	Cross Frame & Motor Case
3	Side Frame
4	Wheel
5	Bearing Support
6	Bolt (at Spring)
7	Bolt (at Side Frame)
8	Bolt (at Bolster)
9	Nut
10	Washer (at Spring)
11	Washer (at Bolster)
12	Key (at Disc Brake)
13	Key (at Wheel)
14	Key (at Sprocket)
15	Disc Brake
16	Shaft
17	Spring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	-	Drawing NO. :	1	Unit :	Millimeter
Drawing :	Bolster	Weight :	-	Scale :	1 : 2.5	Sheet :	4

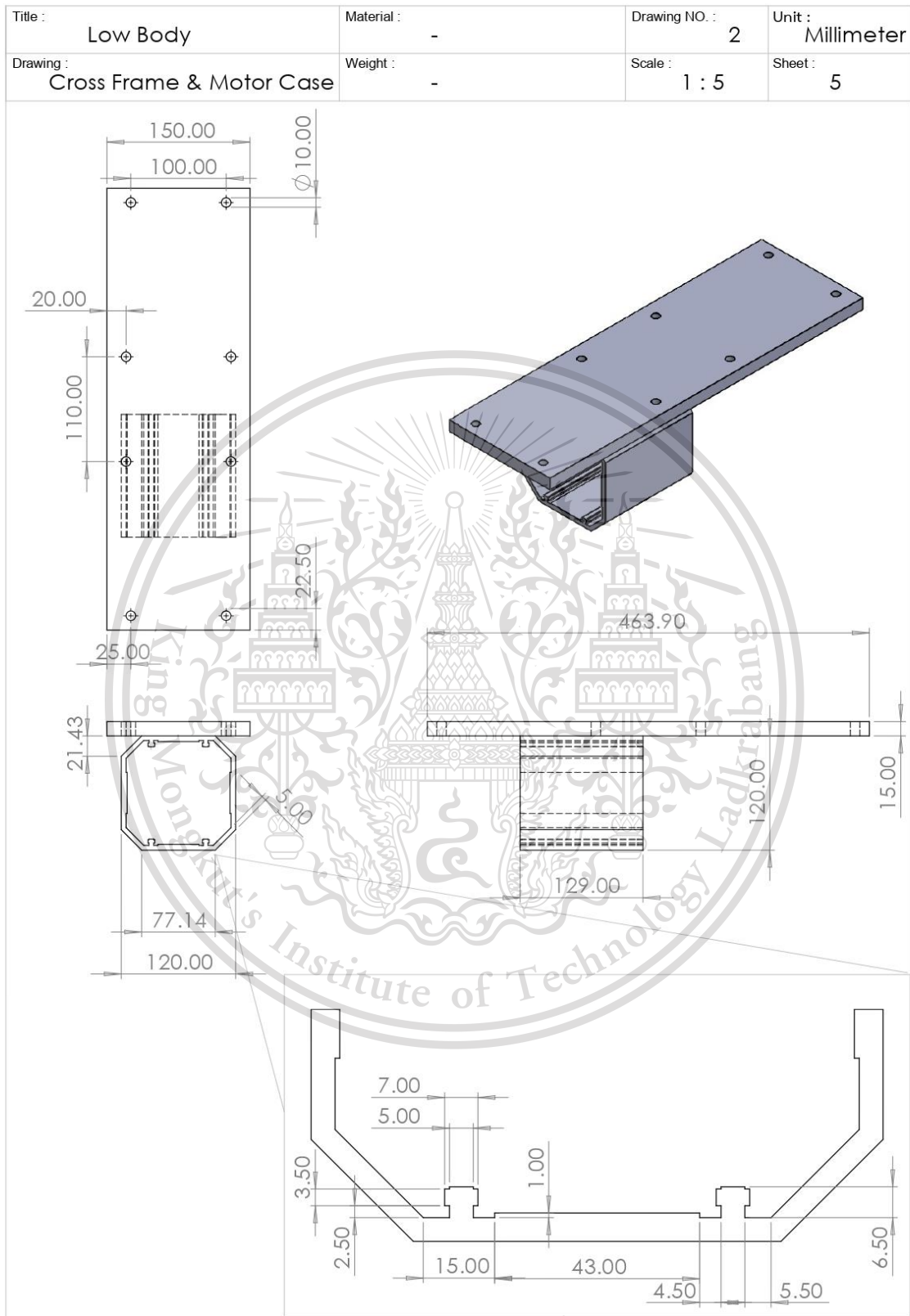


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



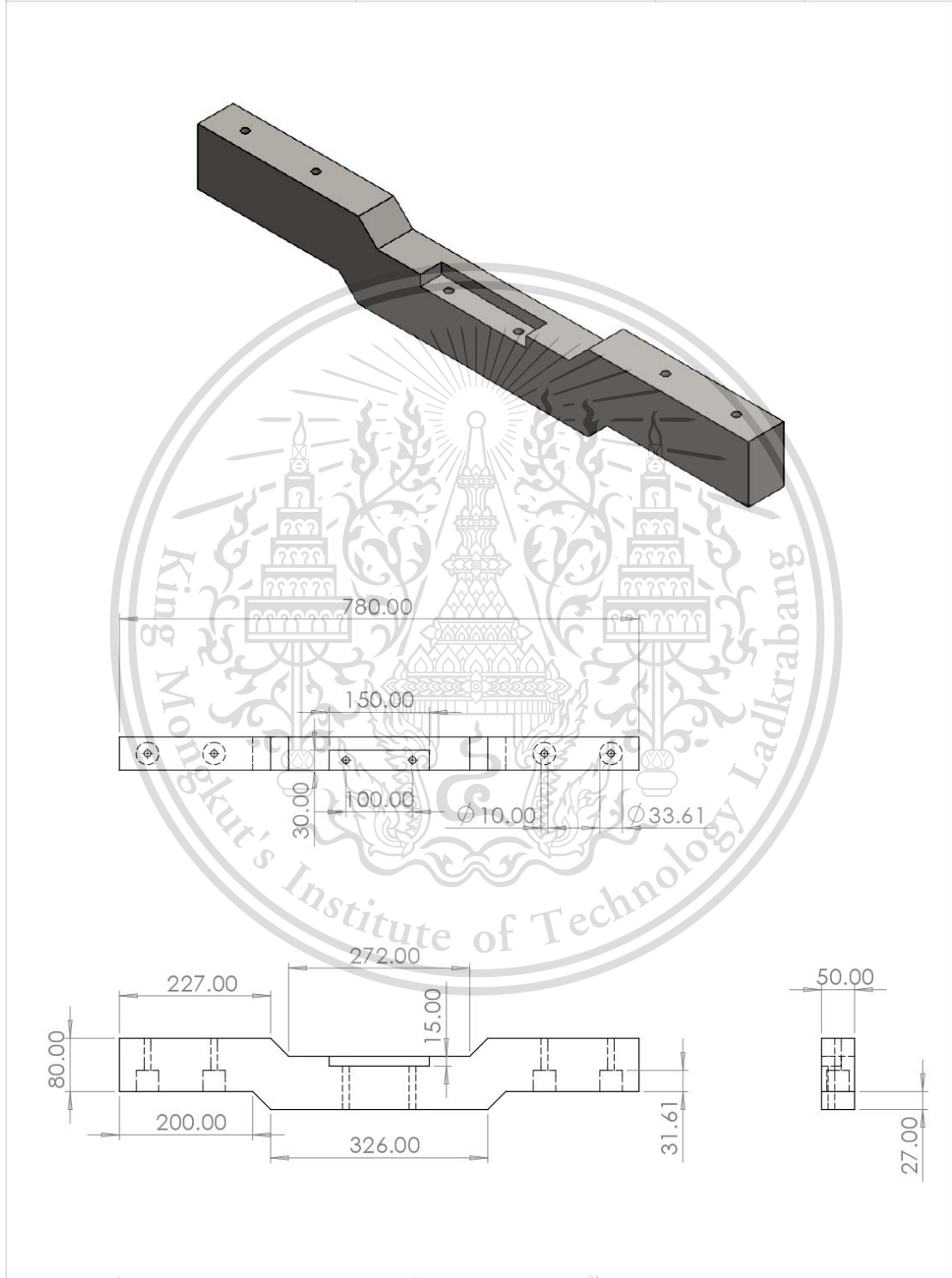
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	-	Drawing NO. :	3	Unit :	Millimeter
Drawing :	Side Frame	Weight :	-	Scale :	1 : 5	Sheet :	6

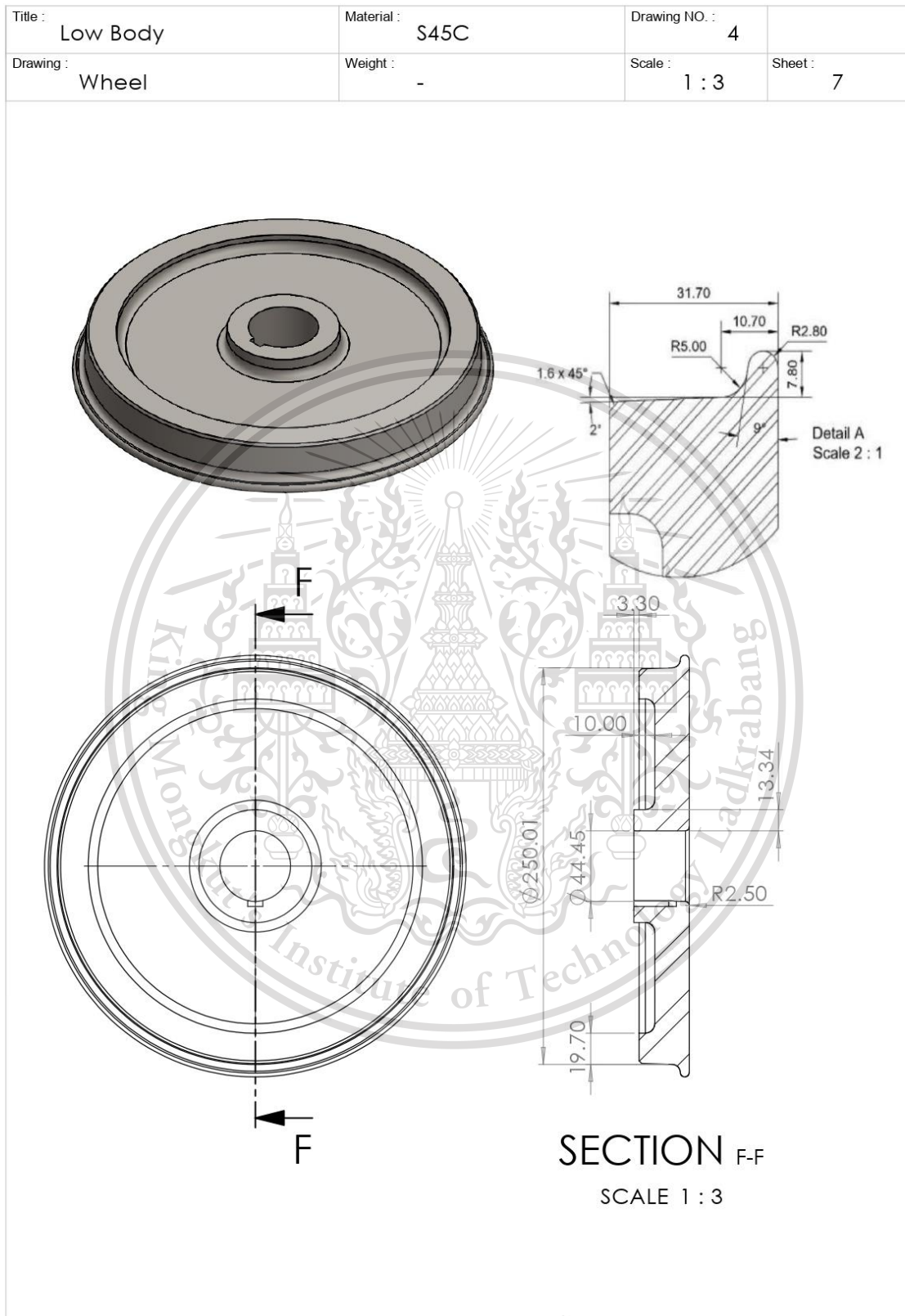


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



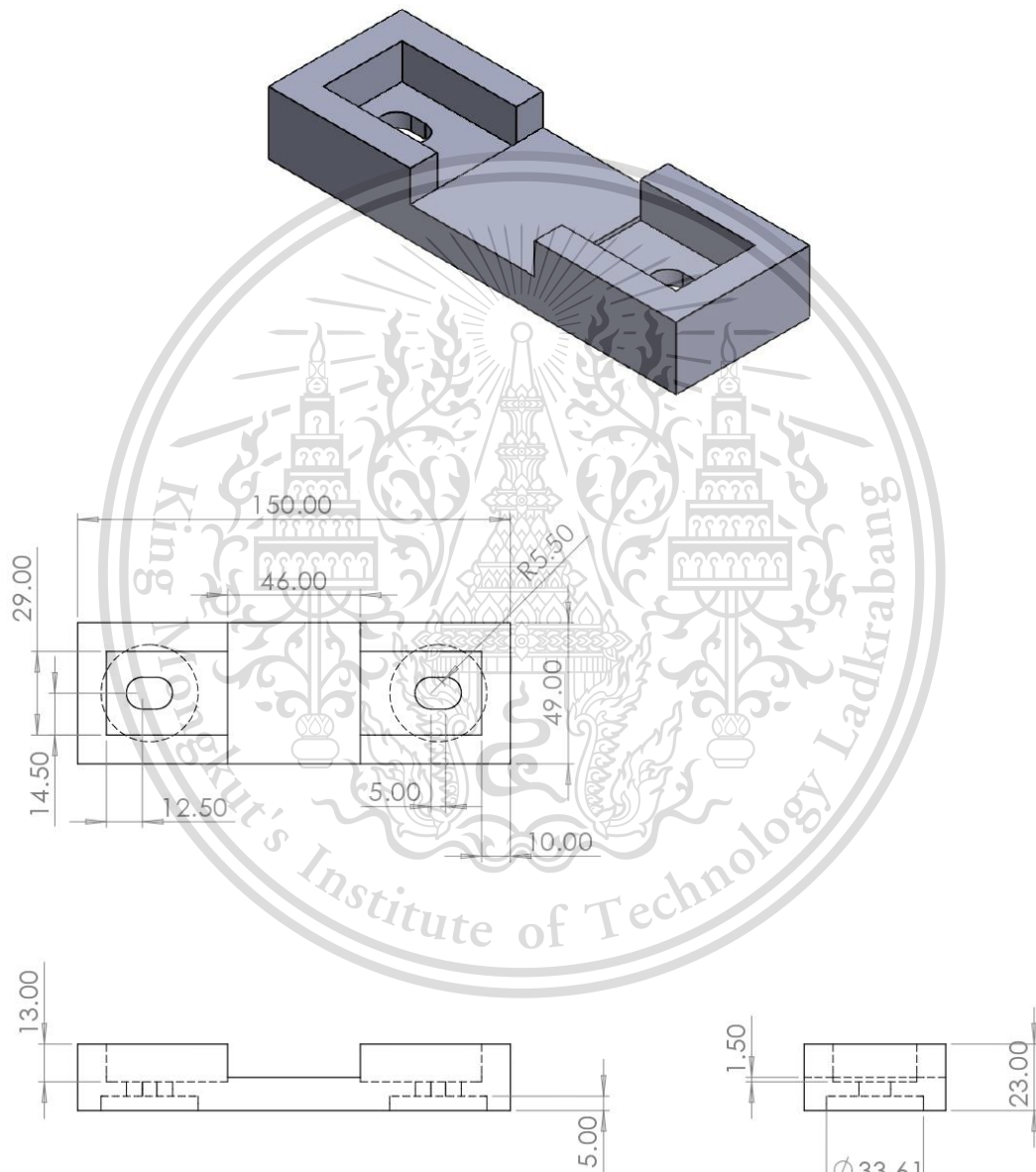
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	-	Drawing NO. :	5	Unit :	Millimeter
Drawing :	Bearing Support	Weight :	-	Scale :	1 : 1.5	Sheet :	8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	Steel (Zinc)	Drawing NO. :	6	Unit :	Millimeter
Drawing :	Bolt M10 x 1.5 140 mm	Weight :	-	Scale :	1 : 1	Sheet :	9



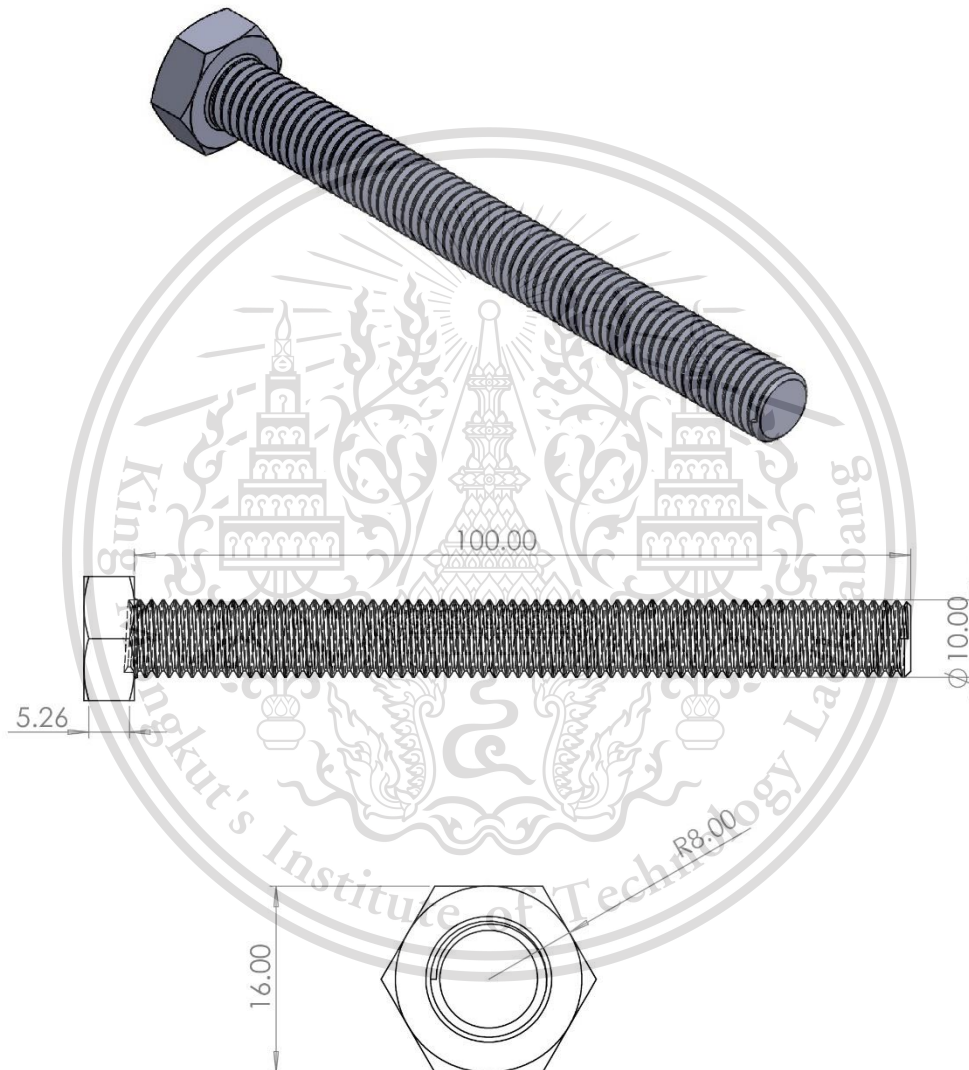
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	Steel (Zinc)	Drawing NO. :	7	Unit :	Millimeter
Drawing :	Bolt M10 x 1.5 100 mm	Weight :	-	Scale :	1 : 1	Sheet :	10



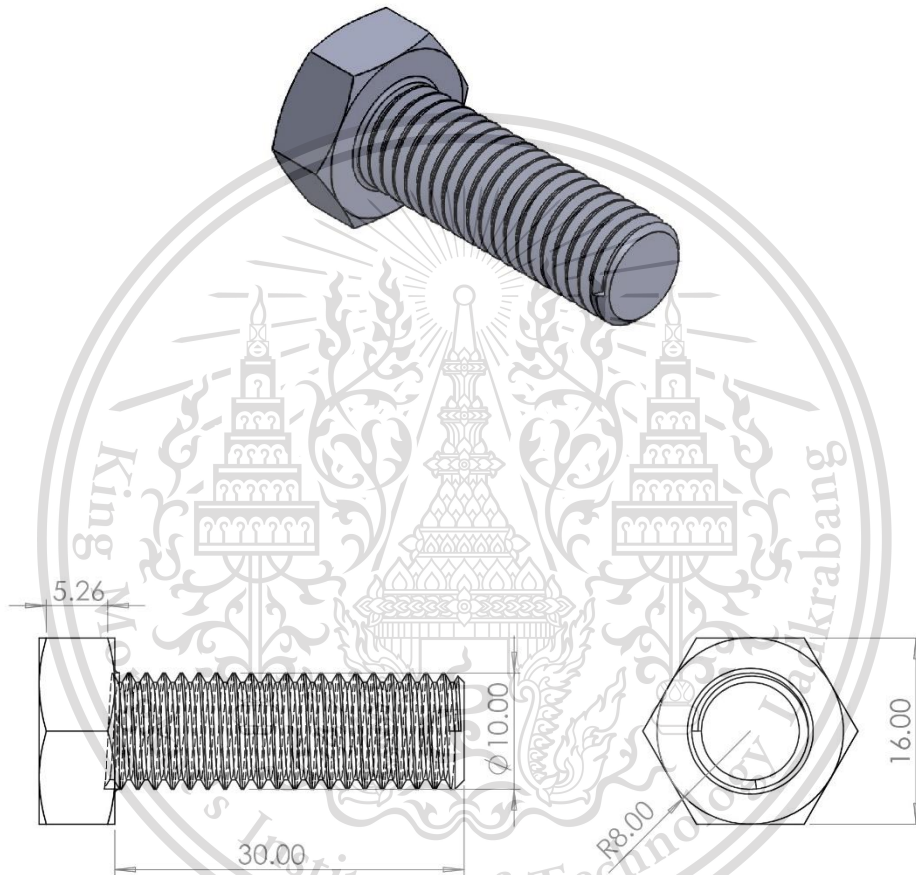
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	Steel (Zinc)	Drawing NO. :	8	Unit :	Millimeter
Drawing :	Bolt M10 x 1.5 30 mm	Weight :	-	Scale :	2 : 1	Sheet :	11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	Steel (Zinc)	Drawing NO. :	9	Unit :	Millimeter
Drawing :	Nut M10 x 1.5	Weight :	-	Scale :	2 : 1	Sheet :	12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	Steel (Zinc)	Drawing NO. :	10	Unit :	Millimeter
Drawing :	Washer M10	Weight :	-	Scale :	2 : 1	Sheet :	13

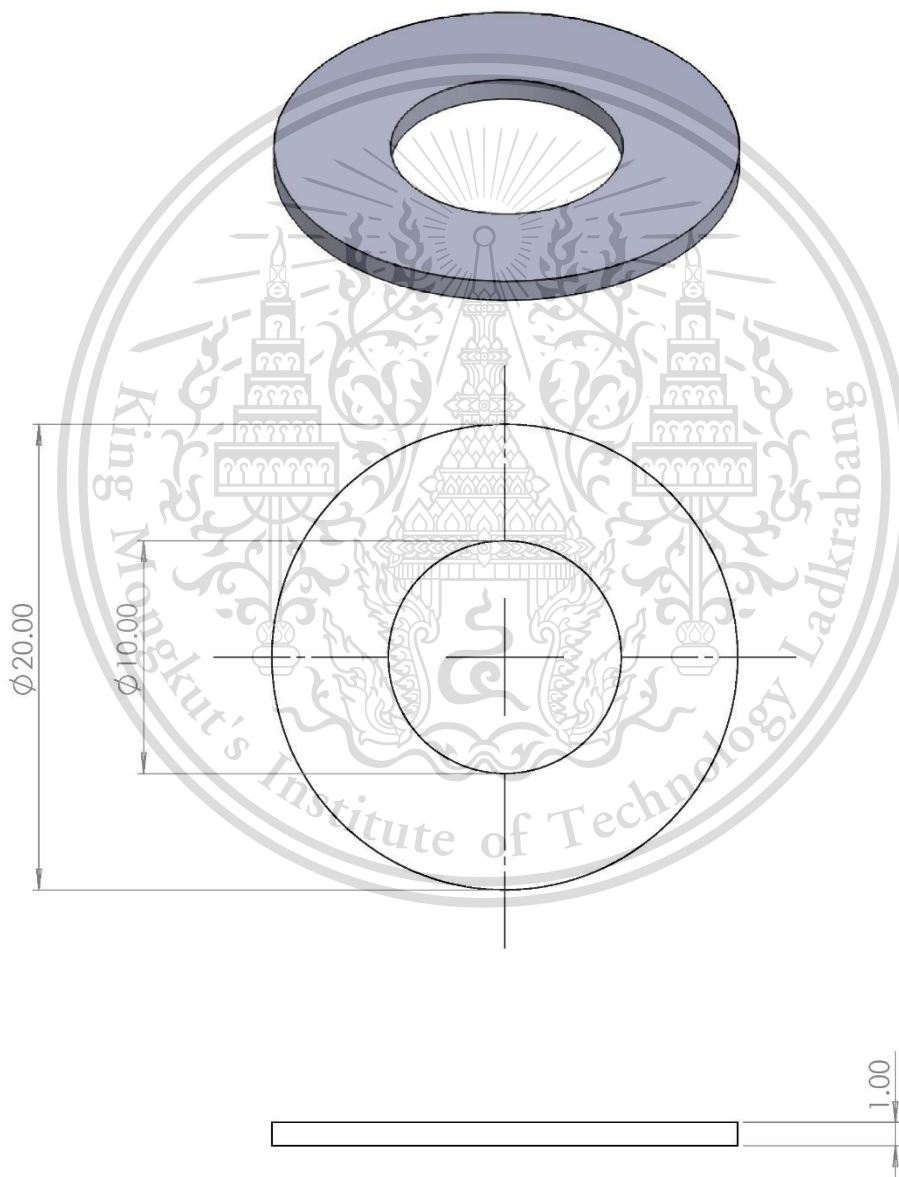


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	Steel (Zinc)	Drawing NO. :	11	Unit :	Millimeter
Drawing :	Washer M10 , Bolster	Weight :	-	Scale :	4 : 1	Sheet :	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	S45C	Drawing NO. :	12	Unit :	Millimeter
Drawing :	Key Disc Brake	Weight :	-	Scale :	2 : 1	Sheet :	15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	S45C	Drawing NO. :	13	Unit :	Millimeter
Drawing :	Key Wheel	Weight :	-	Scale :	2 : 1	Sheet :	16



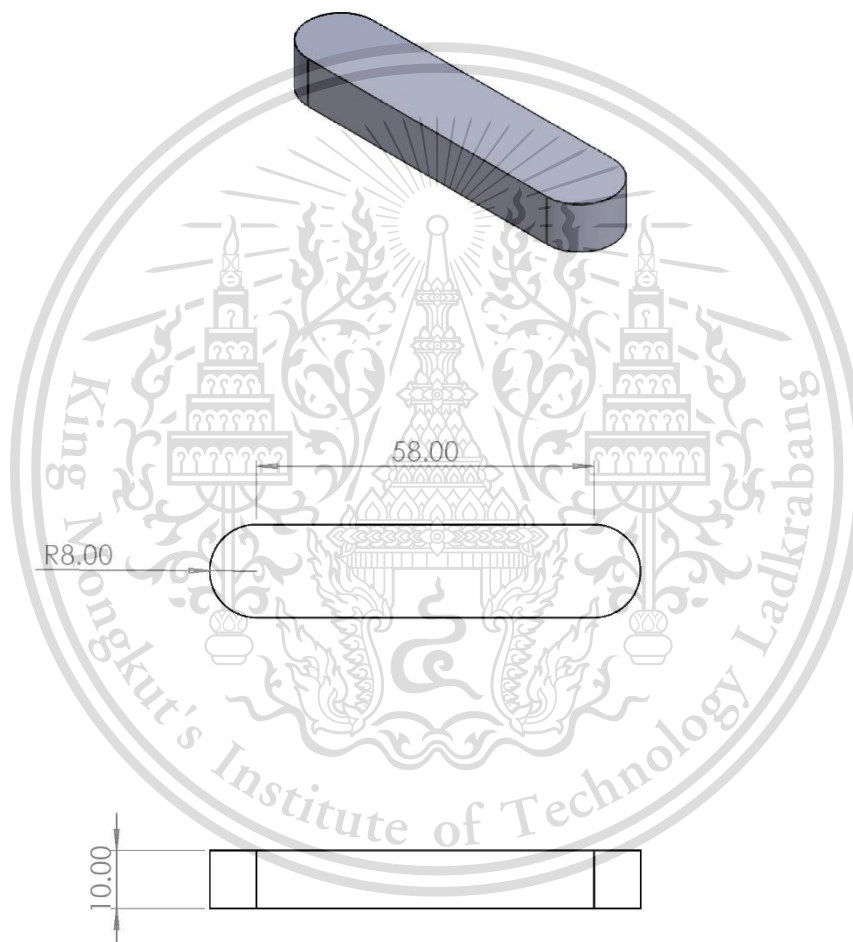
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	S45C	Drawing NO. :	14	Unit :	Millimeter
Drawing :	Key Sprocket	Weight :	-	Scale :	1 : 1	Sheet :	17



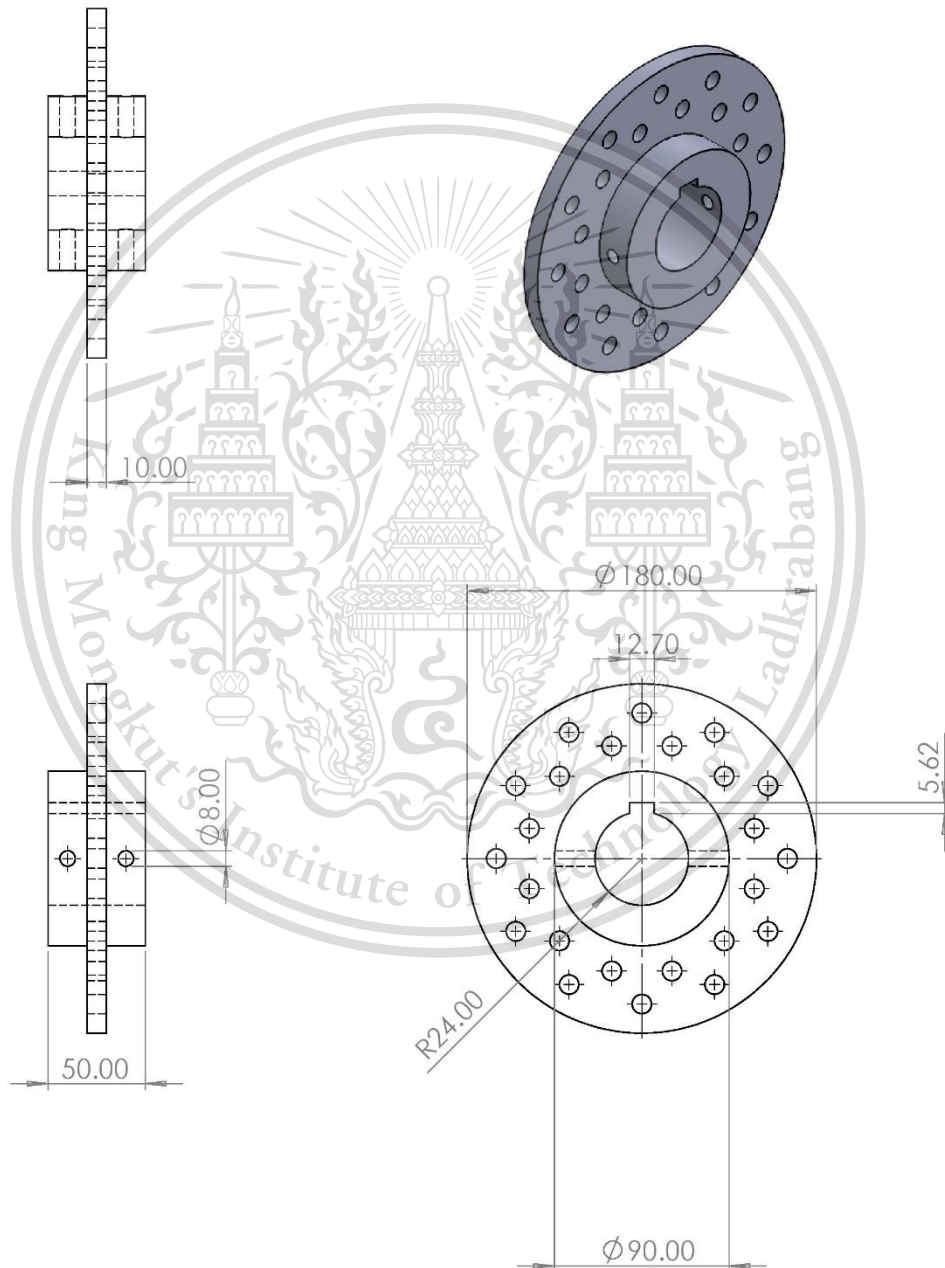
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	-	Drawing NO. :	15	Unit :	Millimeter
Drawing :	Disc Brake	Weight :	-	Scale :	1 : 3	Sheet :	18



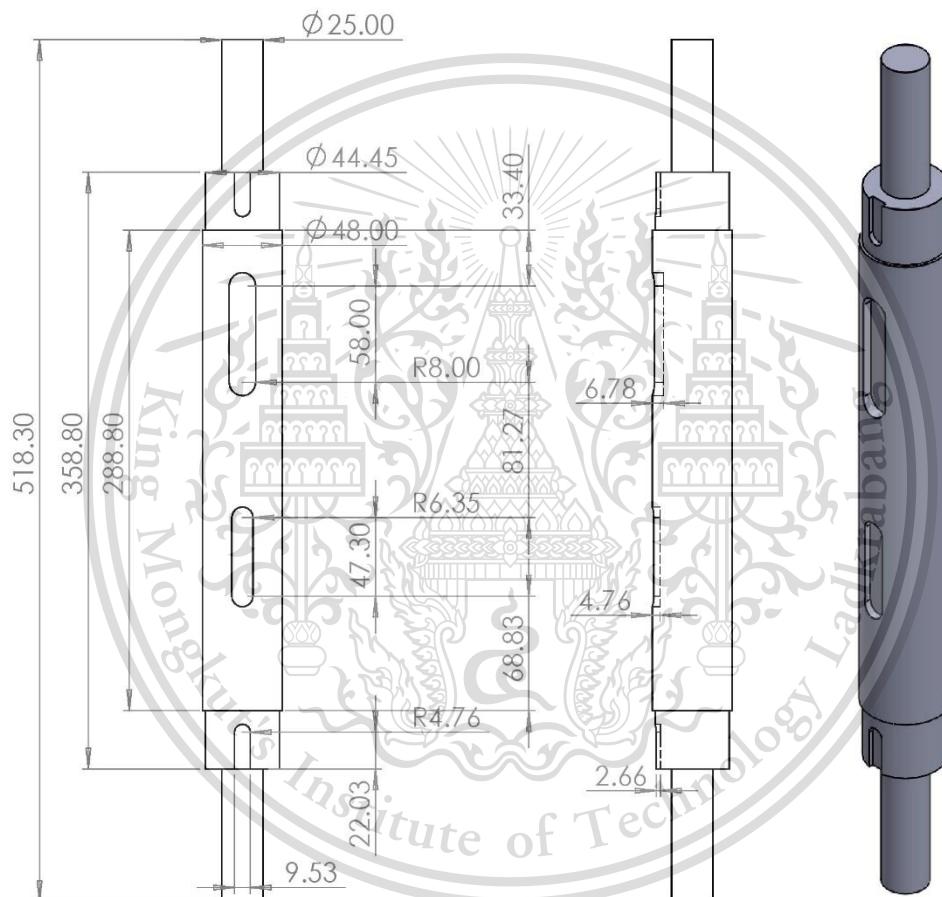
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	S45C	Drawing NO. :	16	Unit :	Millimeter
Drawing :	Shaft	Weight :	-	Scale :	1 : 3	Sheet :	19



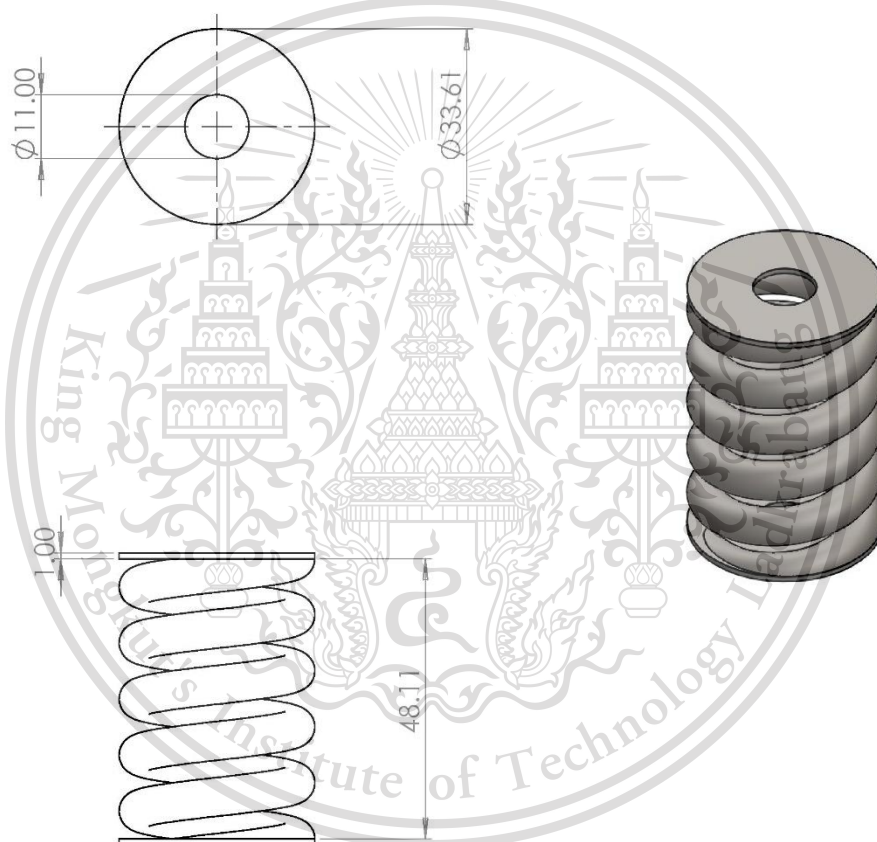
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Title :	Low Body	Material :	S45C	Drawing NO. :	17	Unit :	Millimeter
Drawing :	Spring	Weight :	-	Scale :	1 : 1	Sheet :	20



$d = 6.6675 \text{ mm}$
 $D = 26.9451 \text{ mm}$
 $OD = 33.6126 \text{ mm}$
 $L_s = 43.10972 \text{ mm}$
 $L_0 = 48.10972 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

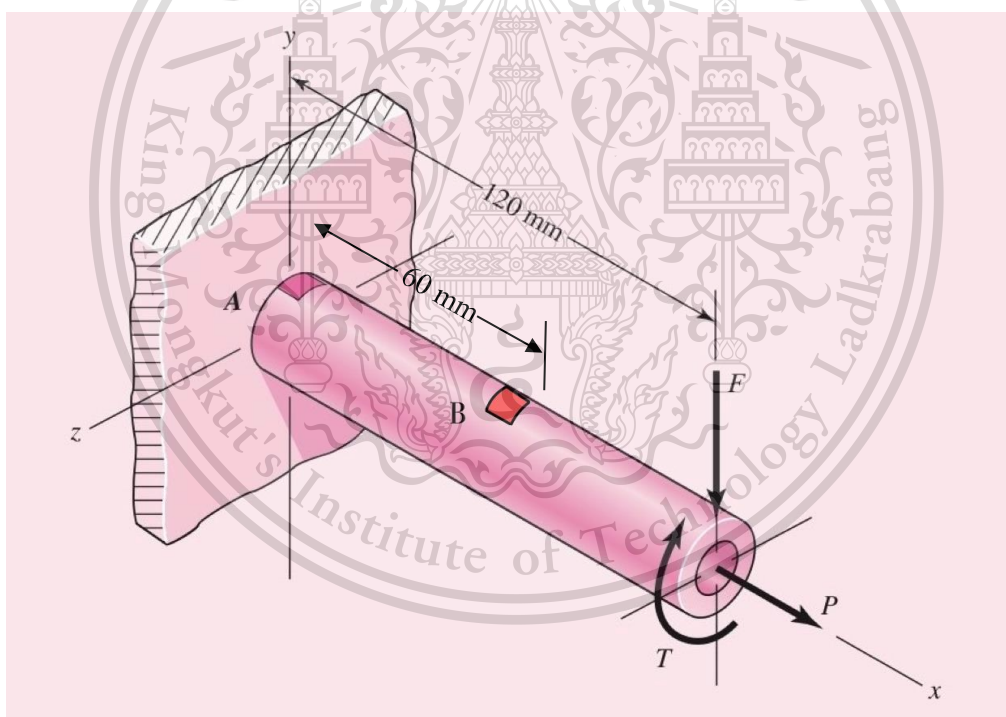
ภาคผนวก ข

การตรวจสอบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองนั้นมีความถูกต้องแม่นยำ จึงทำการนำโจทย์ตัวอย่างที่ 5-4 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design 9th Edition มาทำการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วนำค่าความเค้นวอนมิสเสสจากโจทย์ตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับค่าลู่อื่นของความเค้นวอนมิสเสสที่ได้จากโปรแกรม

จากโจทย์ตัวอย่างในหนังสือ

EXAMPLE 5-4 The cantilevered tube shown in Fig. 5-17 is to be made of 2014 aluminum alloy treated to obtain a specified minimum yield strength of 276 MPa. We wish to select a stock-size tube from Table A-8 using a design factor $n_d = 4$. The bending load is $F = 1.75$ kN, the axial tension is $P = 9.0$ kN, and the torsion is $T = 72$ N · m. What is the realized factor of safety?



รูปที่ ข.1 โจทย์ตัวอย่างหน้า 233 จากหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design 9th Edition
(รูปจาก: Shigley's Mechanical Engineering Design 9th Edition, Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett, p. 233)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทำการหาค่าความเค้นวอนมิสเสสที่จุด A และ จุด B

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
จากสมการ $\sigma' = [\sigma_x^2 + 3\tau_{zx}^2]$ (ข-1)

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

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

$$\text{โดย} \quad \sigma_x = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} = \frac{P}{A} + \frac{L(F)(\frac{d_o}{2})}{I} \quad (\text{ข-2})$$

$$\text{และ} \quad \tau_{zx} = \frac{Tr}{J} = \frac{72(\frac{d_o}{2})}{J} \quad (\text{ข-3})$$

ค่า A, I และ J สำหรับท่อขนาด 42x5 สามารถหาได้จากตารางที่ A-8 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design 9th Edition โดย $A = 5.809 \times 10^{-4}$ เมตร, $I = 10.130 \times 10^{-8}$ เมตร และ $J = 20.255 \times 10^{-8}$

ที่จุด A : $L = 120$ มิลลิเมตร

จากสมการที่ (ข-2) :

$$\sigma_x = \frac{9 \times 10^3}{5.809 \times 10^{-4}} + \frac{(120 \times 10^{-3})(1.75 \times 10^3)(\frac{42 \times 10^{-3}}{2})}{10.130 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma_x = 59.02726 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

และสมการที่ (ข-3) :

$$\tau_{zx} = \frac{72(\frac{42 \times 10^{-3}}{2})}{20.255 \times 10^{-8}}$$

$$\tau_{zx} = 7.46482 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

แทนค่า σ_x และ τ_{zx} ในสมการที่ (ข-1) :

$$\sigma' = [59.02726^2 + 3(7.46482)^2]$$

$$\sigma' = 60.42672 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

ที่จุด B : $L = 60$ มิลลิเมตร

จากสมการที่ (ข-2) :

$$\sigma_x = \frac{9 \times 10^3}{5.809 \times 10^{-4}} + \frac{(60 \times 10^{-3})(1.75 \times 10^3)(\frac{42 \times 10^{-3}}{2})}{10.130 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma_x = 37.26023 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

และสมการที่ (ข-3) :
$$\tau_{zx} = \frac{72 \left(\frac{42 \times 10^{-3}}{2} \right)}{20.255 \times 10^{-8}}$$

$$\tau_{zx} = 7.46482 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

แทนค่า σ_x และ τ_{zx} ในสมการที่ (ข-1) :

$$\sigma' = [37.26023^2 + 3(7.46482)^2]$$

$$\sigma' = 39.43977 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

นำข้อมูลจากโจทย์ตัวอย่างข้างต้นมาเขียนลงในโปรแกรม จากนั้นทำการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวัดค่าความเค้นวอนมิสเซสบนชิ้นงานที่จุด A และ จุด B



รูปที่ ข.2 แสดงการใส่โหลดลงไปบนชิ้นงานและทำการ Coupling



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

นำผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสูตรเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน

จากการจำลองของท่อที่จุด A ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ขนาดของ Mesh	จำนวนเอลิเมนต์	ความเค้นวอนมิสเซส (MPa)	%ความคลาดเคลื่อน
0.004	840	48.38	19.9404
0.0035	1088	48.54	19.6757
0.003	2880	57.46	4.9148
0.0025	4224	57.52	4.8155
0.002	10800	60.86	0.7116
0.0015	18240	61.34	1.5059
0.0014	28896	64.24	6.3048
0.0013	32384	64.39	6.5530
0.0012	38400	64.56	6.8343
0.0011	56680	67.23	11.2527
0.001	69600	67.55	11.7822

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการจำลองของท่อที่จุด A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

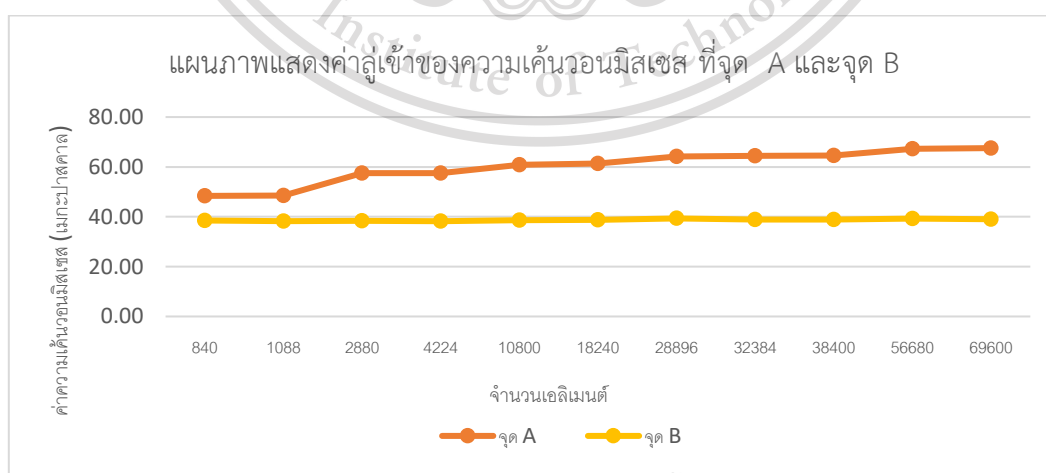
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการจำลองของท่อที่จุด B ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ขนาดของ Mesh	จำนวนเอลิเมนต์	ความเค้นวอนมิสเชส (MPa)	%ความคลาดเคลื่อน
0.004	840	38.46	2.4842
0.0035	1088	38.30	2.8899
0.003	2880	38.32	2.8392
0.0025	4224	38.22	3.0927
0.002	10800	38.68	1.9264
0.0015	18240	38.72	1.8250
0.0014	28896	39.34	0.2530
0.0013	32384	38.87	1.4446
0.0012	38400	38.87	1.4446
0.0011	56680	39.25	0.4812
0.001	69600	39.06	0.9629

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการจำลองของท่อที่จุด B

นำข้อมูลจากทั้งสองตารางมาเขียนเป็นแผนภาพแสดงค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเชสของทั้งสองจุด
ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากตารางแสดงผลการจำลอง จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นวอนมิสเสสจากทั้งวิธีการคำนวณและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้น วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จึงถือว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง

และจากกราฟแสดงค่าคู่เข้าของความเค้นวอนมิสเสสที่จุด A และจุด B จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นวอนมิสเสสที่จุด A นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าจุด B และมีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่า อาจมีสาเหตุ ดังนี้

1. ที่จุด A มีค่าความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) ที่สูงกว่าจุด B เมื่อนำเอาผลการทดลองจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเทียบกับการคำนวณจากสูตรซึ่งไม่มีการคำนึงถึงความเข้มข้นของความเค้นเลย จึงทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงกว่าจุด B ที่มีค่าความเข้มข้นของความเค้นต่ำกว่า
2. ผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จุด A นั้น มีผลของการเสียรูปของบริเวณที่ยึดติดด้วย จึงมีค่าความเค้นวอนมิสเสสที่คลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณค่อนข้างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ภาคผนวก ค

การออกแบบสปริงกดสำหรับดุมล้อ

การออกแบบสปริงรับแรงกดสำหรับดุมล้อ ที่มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย (n_s) เท่ากับ 1.2 สามารถทำได้ ดังนี้

ทำการหาแรงที่กระทำกับสปริง 1 ตัว

$$\begin{aligned} F &= \frac{m_v}{n} g \\ &= \frac{2000}{16} \times 9.81 \\ &= 1226.25 \quad \text{นิวตัน} \end{aligned}$$

โดย	F	คือ	แรงที่กระทำกับสปริง (นิวตัน)
	m_v	คือ	น้ำหนักของหัวรถจักรไฟฟ้า (กิโลกรัม)
	n	คือ	จำนวนสปริงที่ใช้ใน 1 ตัว
	g	คือ	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาที ²)

เลือกวัสดุเป็น Hard-Drawn Wire A227 เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถใช้ในวงขนาดและอุณหภูมิที่ต้องการได้ ซึ่งมีค่า $m = 0.190$ และ $A = 1783 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^m$

ทำการ Trial-and-Error เพื่อหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่สามารถใช้งานได้

ที่ $d = 6.6675$ มิลลิเมตร:

หาค่า Shear Yield Strength

$$\begin{aligned} S_{sy} &= 0.45 \left(\frac{A}{d^m} \right) \\ &= 0.45 \left(\frac{1783}{6.6675^{0.190}} \right) \\ &= 559.514 \quad \text{เมกะปาสคาล} \end{aligned}$$

หาค่าดัชนีสปริง (Spring Index)

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{S_{sy}}{n_s} \\ &= \frac{559.514}{1.34} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$\begin{aligned}
 &= 411.407 \\
 \beta &= \frac{8(1+\xi)F_{max}}{\pi d^2} \\
 &= \frac{8(1+0.15)(1226)}{\pi(6.6675)^2} \\
 &= 80.761 \\
 C &= \frac{2\alpha-\beta}{4\beta} + \sqrt{\left(\frac{2\alpha-\beta}{4\beta}\right)^2 - \frac{3\alpha}{4\beta}}
 \end{aligned}$$

แทนค่า α และ β จะได้ว่า

$$C = 4.256$$

ค่าดัชนีสปริงที่ยอมรับได้นั้นคือช่วง $4 \leq C \leq 12$ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงนำไปหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) จากสมการ

$$\begin{aligned}
 D &= C \times d \\
 &= 4.256 \times 6.6675 \\
 &= 28.377 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

หาค่ารัศมีวงนอกของสปริง (OD) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 OD &= D + d \\
 &= 28.377 + 6.6675 \\
 &= 35.044 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

และหาค่ารัศมีวงในของสปริง (ID) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 ID &= D - d \\
 &= 28.377 - 6.6675 \\
 &= 21.710 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

หาค่า Stress Correcting Factor (K_B) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 K_B &= \frac{4C+2}{4C-3} \\
 &= \frac{4(4.256)+2}{4(4.256)-3} \\
 &= 1.356
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หาค่าความเค้นสูงสุด ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{8K_BFD}{\pi d^3} \\ &= \frac{8 \times 1.356 \times 1226 \times 28.377}{\pi (6.6675)^3} \\ &= 466.262 \quad \text{เมกะปาสคาล}\end{aligned}$$

หาค่าขดลวดทำงาน (Active Coils) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}N_a &= \frac{Gd^4y}{8D^3F} \\ &= \frac{78600(6.6675)^4(5)}{8(28.377)^3(1226)} \\ &= 3.466\end{aligned}$$

ค่าขดลวดทำงานที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง $3 \leq N_a \leq 15$ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นอยู่ในช่วงที่ต้องการ จึงนำไปหาค่าต่าง ๆ ต่อไป

เนื่องจากเราเลือกเป็นสปริงที่มีปลายเป็นแบบ Square-and-ground end ทำให้สามารถหาค่าจำนวนขดลวดทั้งหมด (N_t) ค่า Solid length (L_s) และค่า Free Length (L_0) ของสปริงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}N_t &= N_a + 2 \\ &= 3.466 + 2 \\ &= 5.466 \\ L_s &= d(N_t + 1) \\ &= 6.6675(5.466 + 1) \\ &= 43.110 \quad \text{มิลลิเมตร} \\ L_0 &= y + L_s \\ &= 5 + 43.110 \\ &= 48.110 \quad \text{มิลลิเมตร}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หาค่าต่าง ๆ ด้วยวิธีข้างต้นกับลวดแบบ Hard-Drawn Wire A227 ที่ขนาดต่าง ๆ ได้ผลลัพธ์ตามตารางด้านล่างนี้

ขนาดลวด (มิลลิเมตร)	ดัชนี สปริง (C)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางวง นอกของสปริง (OD , มิลลิเมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง สปริง (D, มิลลิเมตร)	จำนวน ขดลวด ทำงาน (N_a)	จำนวน ขดลวด ทั้งหมด (N_t)	Solid Length (L_s , มิลลิเมตร)	Free Length (L_0 , มิลลิเมตร)
6.6675	4.256	35.044	28.377	3.466	5.466	43.110	48.110
7.1882	5.152	44.223	37.035	2.106	4.106	36.703	41.703
7.7724	6.198	55.946	48.173	1.308	3.308	33.484	38.484
8.4074	7.393	70.562	62.155	0.834	2.834	32.232	37.232
9.1948	8.965	91.627	82.432	0.511	2.511	32.286	37.286
9.9822	10.641	116.120	106.217	0.332	2.332	33.261	38.261
10.922	12.777	150.476	139.554	0.210	2.210	35.057	40.057
11.7094	14.682	183.628	171.918	0.148	2.148	36.864	41.864
12.446	16.558	218.527	206.081	0.110	2.110	38.705	43.705

ตารางที่ ค.1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของลวดแบบ Hard-Drawn Wire A227

จากตารางที่ ค.1 พบว่า ขนาดลวดที่มีค่าดัชนีสปริง และค่าขดลวดทำงานอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ขดลวดขนาด 6.6675 มิลลิเมตร ดังนั้น ขนาดลวดสปริงแบบ Square-and-Ground end ที่ทำจากวัสดุ Hard-Drawn Wire A227 ที่มีความสามารถในการรับโหลดได้ 1226 N แล้วสปริงยุบตัวลงไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 1.2 ที่เราเลือกใช้ คือ ขนาด 6.6675 มิลลิเมตร



รูปที่ ค.1 แสดงสปริงที่ใช้สำหรับตุ้มล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ภาคผนวก ง

การออกแบบสลักเกลียว

ง.1 การออกแบบสลักเกลียวสำหรับคัมล้อ

ต้องการออกแบบสลักเกลียว แป้นเกลียว และแหวน สำหรับใส่ในรูขนาด 11 มิลลิเมตร มีความยาวมากกว่า 116.5 มิลลิเมตร สามารถทำได้ ดังนี้

เลือกรูปแบบสลักเกลียว: สลักเกลียวหัวหกเหลี่ยม (Hex Bolt) แบบเกลียวหยาบ ขนาด M10 x 1.5 แบบเกลียวบางส่วน มีความสูงของหัวสลัก (H_b) เท่ากับ 6.85 มิลลิเมตร และมีความกว้าง (W_b) เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ดังรูป



รูปที่ ง.1 แสดงสลักเกลียวสำหรับคัมล้อ ขนาด M10 x 1.5

เลือกแหวนรอง: แหวนอีแปะ ขนาด M10 ความหนา (t) เท่ากับ 2.8 มิลลิเมตรดังรูป

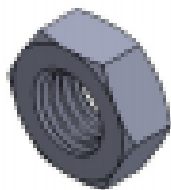
รูปที่ ง.2 แสดงแหวนอีแปะ ขนาด M10

เลือกแป้นเกลียว: แป้นเกลียวหัวหกเหลี่ยม ขนาด M10 มีความสูงของแป้น (H_n) เท่ากับ 8.4 มิลลิเมตร และมีความกว้าง (W_n) เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ ง.3 แสดงแป้นเกลียวขนาด M10

คำนวณหาความยาวสลักเกลียวที่ต้องการ:

หาความยาวสลักเกลียวที่ใช้อยู่จับชิ้นงาน (l);

$$\begin{aligned} l &= \text{ความสูงชิ้นงานที่อยู่ระหว่างเกลียว} + t \\ &= 116.5 + 2.8 \\ &= 119.3 \end{aligned}$$

มิลลิเมตร

หาความยาวสลักเกลียว (L);

$$\begin{aligned} L &= l + H_n \\ &= 119.3 + 8.4 \\ &= 127.7 \end{aligned}$$

มิลลิเมตร

ปรับค่าให้เป็นไปตามมาตรฐานความยาว ดังนั้น หาความยาวสลักเกลียว จะมีค่าเท่ากับ 140 มิลลิเมตร

หาความยาวช่วงที่เป็นเกลียว (L_T);

$$\begin{aligned} L_T &= 2d + 12 \\ &= 2(10) + 12 \\ &= 32 \end{aligned}$$

มิลลิเมตร

หาความยาวช่วงที่ไม่เป็นเกลียว (l_d);

$$\begin{aligned} l_d &= L - L_T \\ &= 140 - 32 \\ &= 108 \end{aligned}$$

มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หาความยาวช่วงที่เป็นเกลียวที่ยึดจับชิ้นงาน (l_t) ;

$$\begin{aligned} l_t &= l - l_d \\ &= 119.3 - 108 \\ &= 11.3 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

พื้นที่ของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (A_d) ;

$$\begin{aligned} A_d &= \frac{\pi d^2}{4} \\ &= \frac{\pi(10)^2}{4} \\ &= 78.540 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

เนื่องจากเป็นสลักเกลียวแบบเกลียวหยาบ ขนาด M10 x 1.5 วัสดุเป็นเหล็ก ;

$$\begin{aligned} \text{Tensile Stress Area } (A_t) &= 61.2 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร} \\ \text{Minor-Diameter Area } (A_r) &= 56.3 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร} \end{aligned}$$

หาค่าความแข็งของสลักเกลียว 1 ตัว (Fastener Stiffness, k_b) ;

$$\begin{aligned} k_b &= \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \\ &= \frac{(78.540 \times 10^{-6})(61.2 \times 10^{-6})(200 \times 10^9)}{(78.540 \times 10^{-6} \times 11.3 \times 10^{-3}) + (61.2 \times 10^{-6} \times 108 \times 10^{-3})} \\ &= 128.227 \quad \text{เมกะนิวตันต่อเมตร} \end{aligned}$$

พิสูจน์ว่าขนาดสลักเกลียวที่เลือกมานั้นสามารถใช้งานได้ โดยคำนวณเมื่อรถการเบรกด้วยความหน่วงสูงสุด (d_{acc}) เท่ากับ 1.3 m/s^2 ตามข้อกำหนดของการแข่งขัน Railway Challenge จะได้แรงจากการเบรกเท่ากับ

$$\begin{aligned} F &= \frac{m d_{acc}}{n} \\ &= \frac{2000(1.3)}{16} \\ &= 162.5 \quad \text{นิวตัน} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

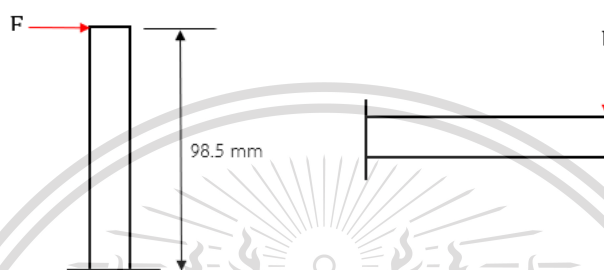
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดย F คือ แรงเบรก (นิวตัน)

d_{acc} คือ ความหน่วงสูงสุด (เมตรต่อวินาที²)

n คือ จำนวนสลักเกลียวใน 1 คู่

กำหนดให้ เมื่อเบรกด้วยความหน่วงสูงสุดจะมีแรงกระทำกับสลักเกลียว ดังรูป



รูปที่ ง.4 แสดงแผนภาพ Free-body Diagram ของสลักเกลียว

การหาค่าแรงเฉือนสูงสุด และโมเมนต์คัตสูงสุดที่กระทำกับสลักเกลียว

$$[\uparrow \Sigma F_y = 0]; \quad R_A - 162.5 = 0$$

$$R_A = 162.5 \quad \text{นิวตัน}$$

$$[\curvearrowright \Sigma M_A = 0]; \quad R_A(0) + 162.5(0.0985) - M_A = 0$$

$$M_A = 16.006 \quad \text{นิวตันเมตร}$$

ตัดคานเพื่อหาแรงเฉือนสูงสุด และโมเมนต์คัตสูงสุด

$$[\uparrow \Sigma F_y = 0]; \quad 162.5 - V = 0$$

$$V = 162.5 \quad \text{นิวตัน}$$

$$[+ \Sigma M = 0]; \quad 162.5(0.082) + V(0) - M = 0$$

$$M = 16.006 \quad \text{นิวตันเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จะได้แรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 162.5 นิวตัน และโมเมนต์ดัดสูงสุดเท่ากับ 16.006 นิวตันเมตร

หาค่าพื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียวจากความเค้นตึงฉากที่ยอมรับได้ โดยค่าความเค้นตึงฉากที่ยอมรับได้ (σ_{all}) ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 420 เมกะปาสคาล

$$\sigma_{all} = \frac{Mc}{I}$$

$$420 \times 10^6 = \frac{(16.006)(r)}{0.25\pi(r)^4}$$

$$r = 3.647 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$d = 7.295 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

หาค่าพื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียวจากความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ ค่าความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ (τ_{all}) ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 345 เมกะปาสคาล

$$\tau_{all} = \frac{3V_{max}}{2A}$$

$$345 \times 10^6 = \frac{3(162.5)}{2\pi(r)^2}$$

$$r = 0.474 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$d = 0.948 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

จะเห็นว่าพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดที่สามารถรับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดจากการเบรกได้นั้น มีค่าเท่ากับ 7.295 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าที่เราออกแบบไว้

ดังนั้นสลักเกลียวที่ทำจากเหล็ก Class 8.8 ขนาด M10 x 1.5 ที่มีความยาว 140 มิลลิเมตร สามารถใช้งานได้

ง.2 การออกแบบสลักเกลียวสำหรับยึดโครงเคร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เลือกสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมขนาด M10 x 1.5 ความหนาแหวนรอง 2.8 มิลลิเมตร ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หาค่าความแข็งของสลักเกลียว จากสมการ

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d}$$

$$= 7.981 \times 10^6 \quad \text{นิวตันต่อเมตร}$$

โดย $L = 100$ มิลลิเมตร

$l_t = 26$ มิลลิเมตร

$A_d = 3.09118$ ตารางมิลลิเมตร

$A_t = 58$ ตารางมิลลิเมตร

$l_d = L - l_t = 77$ มิลลิเมตร

$l = 80 + 2.7 = 82.7$ มิลลิเมตร

$l_t = l - l_d = 82.7 - 74 = 8.7$ มิลลิเมตร

$E = 200$ จิกะปาสคาล

หาค่าความแข็งของชิ้นงาน จากสมการ

$$k_m = \frac{0.5774 \pi E d}{2 \ln \left(5 \frac{0.5774 l + 0.5 d}{0.5774 l + 2.5 d} \right)}$$

$$= 0.934 \times 10^6 \quad \text{นิวตันต่อเมตร}$$

โดย $E = 200$ จิกะปาสคาล

$d = 10$ มิลลิเมตร

$l = 82.7$ มิลลิเมตร

หาค่า Fraction of external load carried by bolt (C) ได้จากสมการ

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

$$= \frac{7.981}{7.981 + 0.934}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หาค่าแรง Preload (F_i) ได้จากสมการ

$$F_i = 0.75A_tS_p$$

$$= 26.10 \quad \text{กิโลนิวตัน}$$

โดย $A_t = 58$ ตารางมิลลิเมตร

$S_p = 600$ เมกะปาสคาล, สำหรับสลักเกลียว Grade 8.8

หาค่า yielding factor of safety (n_p) ได้จากสมการ

$$n_p = \frac{S_p A_t}{C \left(\frac{P_{total}}{N} \right) + F_i}$$

$$= 7.246$$

โดย $N = 4$

$P_{total} = 9800$ นิวตัน



รูปที่ 5.5 แสดงสลักเกลียวสำหรับยึดโครงเคร่า ขนาด M10 x 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ภาคผนวก จ

การออกแบบลิ้ม

จ.1 การออกแบบลิ้มสำหรับล้อและเพลลา

เพลลาบริเวณที่ติดตั้งล้อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 44.45 มิลลิเมตร จากตารางที่ 7-6 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design (9th ed.). พบว่าในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาที่ได้ ออกแบบไว้ นั้น หน้าตัดของลิ้มที่เหมาะสม คือ กว้าง 9.525 มิลลิเมตร สูง 6.350 มิลลิเมตร

คำนวณหาแรงที่กระทำกับลิ้ม (F) จากสมการ

$$F = \frac{T}{r}$$

$$= \frac{5}{22.225 \times 10^{-3}}$$

$$= 224.972 \quad \text{นิวตัน}$$

โดย T คือ ทอร์กที่เกิดจากมอเตอร์ (นิวตันเมตร)

r คือ รัศมีเพลลา (เมตร)

คำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือน (S_{sy}) จากสมการ

$$S_{sy} = 0.577S_y$$

$$= 0.577(310)$$

$$= 178.87 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

โดย S_y คือ ค่าความแข็งแรงครากของวัสดุ (เมกะปาสคาล)

หาค่าความยาวของลิ้มที่จะสามารถต้านแรงเฉือนได้ โดยใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย(n) เท่ากับ 2

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl}$$

$$\frac{178.87 \times 10^6}{2} = \frac{224.972}{(9.525 \times 10^{-3})l}$$

$$l = 3.961 \times 10^{-4} \quad \text{เมตร}$$

และหาค่าความยาวของลิ้มที่จะสามารถต้านการชน

$$\frac{S_y}{n} = \frac{F}{tl/2}$$

$$\frac{310 \times 10^6}{2} = \frac{224.972}{(9.525 \times 10^{-3})l/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

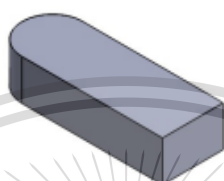
$$l = 3.048 \times 10^{-4} \quad \text{เมตร}$$

เนื่องจากความยาวที่ได้มีค่าน้อยมาก เราจึงเลือกใช้ความยาวของลิ่มเท่ากับ 31.55 มิลลิเมตร ดังนั้นจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl}$$

$$\frac{178.87 \times 10^6}{n} = \frac{224.972}{(9.525 \times 10^{-3})(28.575 \times 10^{-3})}$$

$$n = 216.4$$



รูปที่ จ.1 แสดงลิ่มสำหรับล้อและเพลลา

จ.2 การออกแบบลิ่มสำหรับจานเบรกและเพลลา

เพลลาบริเวณที่ติดตั้งล้อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 48.00 มิลลิเมตร จากตารางที่ 7-6 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design (9th ed.). พบว่าในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาที่ได้ ออกแบบไว้ นั้น หน้าตัดของลิ่มที่เหมาะสม คือ กว้าง 12.70 มิลลิเมตร สูง 9.525 มิลลิเมตร

คำนวณหาแรงที่กระทำกับลิ่ม (F) จากสมการ

$$F = \frac{md_{acc}}{4}$$

$$= \frac{2000 \times 1.3}{4}$$

$$= 650 \quad \text{นิวตัน}$$

โดย m คือ มวลของรถจักรไฟฟ้า (กิโลกรัม)

d_{acc} คือความหน่วง (เมตรต่อวินาที²)

คำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือน (S_{sy}) จากสมการ

$$S_{sy} = 0.577S_y$$

$$= 0.577(310)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ล็อกทั้งหมดมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย S_y คือค่าความแข็งแรงครากของวัสดุ (เมกะปาสกาล)

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

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

หาค่าความยาวของลิ่มที่สามารถต้านแรงเฉือนได้โดยใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย (n) เท่ากับ 2

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl}$$

$$\frac{178.87 \times 10^6}{2} = \frac{650}{(12.70 \times 10^{-3})l}$$

$$l = 5.723 \times 10^{-4} \quad \text{เมตร}$$

และหาค่าความยาวของลิ่มที่สามารถต้านการชน

$$\frac{S_y}{n} = \frac{F}{tl/2}$$

$$\frac{310 \times 10^6}{2} = \frac{650}{(12.70 \times 10^{-3})l/2}$$

$$l = 6.604 \times 10^{-4} \quad \text{เมตร}$$

เนื่องจากความยาวที่ได้มีค่าน้อยมาก เราจึงเลือกใช้ความยาวของลิ่มเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ดังนั้นจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl}$$

$$\frac{178.87 \times 10^6}{n} = \frac{650}{(12.70 \times 10^{-3})(60 \times 10^{-3})}$$

$$n = 209.609$$

รูปที่ จ.2 แสดงลิ่มสำหรับงานเบรกและเฟลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

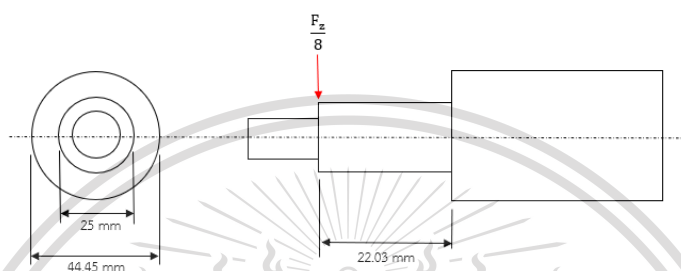
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

ภาคผนวก ฉ

การออกแบบเพลลา

การออกแบบบ่าของเพลลา



รูปที่ ฉ.1 แสดง Free-body Diagram ของบ่าเพลลา

จากแผนภาพ Free-body Diagram เราทราบว่า

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

แรงที่กดต่อ 1 โครงแคร์ (F_z) เท่ากับ

$$F_z = \frac{mg}{2} = \frac{2000 \times 9.81}{2} = 9810 \quad \text{นิวตัน}$$

ดังนั้น

$$\sigma_x = \frac{\frac{9810}{8} (35 \times 10^{-3}) (22.225 \times 10^{-3})}{\frac{\pi (44.45 \times 10^{-3})^4}{64}} = 4.978 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หาค่าความเค้นเฉือนที่กระทำกับเพลลา

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{F_z}{8} \\
 &= \frac{9810}{8} \\
 &= 1226.25 \quad \text{นิวตัน} \\
 \tau_{xy} &= \frac{4 \times 1226.25}{\frac{3\pi(44.45 \times 10^{-3})^4}{64}} \\
 &= 8.532 \quad \text{จิกะปาสคาล}
 \end{aligned}$$

หาค่าความเค้นวอนมิส

$$\begin{aligned}
 \sigma_{von} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x + \sigma_y)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(4.978)^2 + (4.978)^2 + 6(8.532 \times 10^3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= 160.065 \quad \text{เมกะปาสคาล}
 \end{aligned}$$

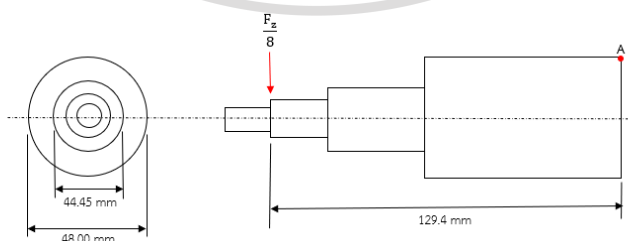
ค่าความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration, k_t) สามารถหาได้จากตาราง A-15 ในหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design (9th ed.).

$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x = (2.1)(4.978) = 10.4538 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

หาค่าตัวประกอบความปลอดภัย

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{375 \times 10^6}{160.065 \times 10^6} = 2.343$$

การออกแบบตรงกลางของเพลลา



รูปที่ ๒ แสดง Free-body Diagram ของบริเวณกลางเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

คำนวณที่จุด A ซึ่งรับความเสียหายก่อน

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

$$\sigma_x = \frac{\frac{9810}{8}(129.4 \times 10^{-3})(24 \times 10^{-3})}{\frac{\pi(48.00 \times 10^{-3})^4}{64}}$$

$$= 14.615 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

$$\tau_{xy} = \frac{4 \times 1226.25}{3 \frac{\pi(48 \times 10^{-3})^4}{64}}$$

$$= 6.274 \quad \text{จิกะปาสคาล}$$

หาค่าความเค้นวอนมิส

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

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(14.615)^2 + (14.615)^2 + 6(6.274 \times 10^3)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 137.970 \quad \text{เมกะปาสคาล}$$

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

หาค่าตัวประกอบความปลอดภัย

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{375 \times 10^6}{137.970} = 2.718$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

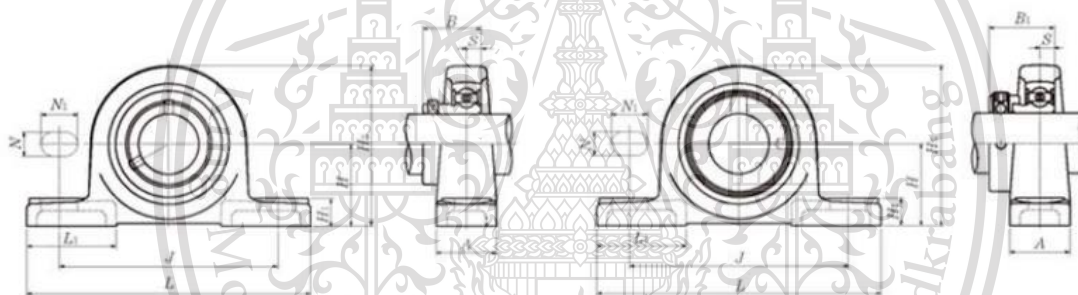
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข การเลือกแปรง

จากการออกแบบเพลามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และติดตั้งได้เหมาะสมกับองค์ประกอบที่มีของโครงเครารถจักรไฟฟ้า จึงเลือกแปรงตุ๊กตา สำหรับการเลือกวัสดุของแปรงตุ๊กตา มีวัสดุให้เลือกหลายอย่างเช่น เหล็กหล่อ สแตนเลส เหล็กกล้า เป็นต้น แต่ละวัสดุก็จะมีค่าการรับโหลดที่แตกต่างกันไป และจากการตรวจสอบราคาของแปรงตุ๊กตาพบว่าแบบสแตนเลสนั้นมีราคาค่อนข้างสูง จึงเลือกใช้วัสดุเป็นเหล็กหล่อที่ราคาไม่ได้สูงมาก แต่ตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการ คือสามารถรับโหลดแบบไดนามิกได้ 14,000 นิวตัน และโหลดแบบคงที่ได้ 7,850 นิวตัน ซึ่งโหลดที่ใช้นั้นใช้มากที่สุดอยู่ที่ 6463.25 นิวตัน (ต่อ 1 แคร่)

ASPB形
円筒穴形、止ねじ式

AELPB形
円筒穴形、偏心カラー式



軸径 12~40mm

軸径 mm	ユニットの呼び番号			寸 法													
	ASPB形	AELPB形	CSPB・LLU形	H	L	J	A	N	M	H ₁	H ₂	L ₁	B	B ₁	B ₂	S	
12	ASP201	AELPB201	—	30.2	114	87	25	11	16	12	57	38	22	28.6	—	6	6.5
15	ASP202	AELPB202	—	30.2	114	87	25	11	16	12	57	38	22	28.6	—	6	6.5
17	ASP203	AELPB203	CSPB203LLU	30.2	114	87	25	11	16	12	57	38	22	28.6	12	6	6.5
20	ASP204	AELPB204	CSPB204LLU	33.3	125	97	27	11	16	13	65	40	25	31	14	7	7.5
25	ASP205	AELPB205	CSPB205LLU	36.5	130	100	29	11	16	13	71	42	27	31	15	7.5	7.5
30	ASP206	AELPB206	CSPB206LLU	42.9	156	120	33	14	21	14	83	52	29	35.7	16	8	9
35	ASP207	AELPB207	CSPB207LLU	47.6	165	127	35	14	21	16	93	52	34	38.9	17	8.5	9.5
40	ASP208	AELPB208	CSPB208LLU	50.8	184	140	37	14	22	18	102	52	38	43.7	18	9	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ข.1 แสดงขนาดของแปรงตุ๊กตา วัสดุเหล็กหล่อ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ภาคผนวก ซ

ตารางราคา

รายการ	ผู้ผลิต	Model	ราคา/ชิ้น	จำนวน	ราคารวม
คานดัดขวางและกรอบมอเตอร์	-	-	ยังไม่ได้เสนอราคา	1	-
คานด้านข้าง	สั่งทำ	-	3,000	2	6,000
ล้อ	สั่งทำ	-	2,350	4	9,400
เพลลา	สั่งทำ	-	1,350	2	2,700
แผ่นรองแบร์ริง	-	-	ยังไม่ได้เสนอราคา	4	-
ลิมล้อ	-	-	ยังไม่ได้เสนอราคา	4	-
ลิมจานเบรก	-	-	ยังไม่ได้เสนอราคา	2	-
ลิมเฟืองโซ่	-	-	ยังไม่ได้เสนอราคา	2	-
Bolster	-	-	ยังไม่ได้เสนอราคา	1	-
ตลับลูกปืน + เสือตลับลูกปืน	NTN	ASPB205	622.66	4	2,490.64
สปริงกด	fastenal	99841720	505.83	8	4,046.64
สลักเกลียว M10 x 1.5 140 mm	RS PRO	RS Stock No.: 917-3188	44	8	352
สลักเกลียว M10 x 1.5 100 mm	RS PRO	RS Stock No.: 508-1076	72	4	288
แหวนรอง M10 ทหนา 2.2 mm	Bolt Depot - Fastener Shopping Made Easy	Prod. # 4530	2.50	16	40
แป้นเกลียว M10	RS PRO	RS Stock No.: 527-628	5	16	80
สลักเกลียว M10 x 1.5 ยาว 30	RS PRO	RS Stock No.: 520-289	23	4	92

ตารางที่ ซ.1 แสดงราคาของสินค้าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงแคร์รถจักรไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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