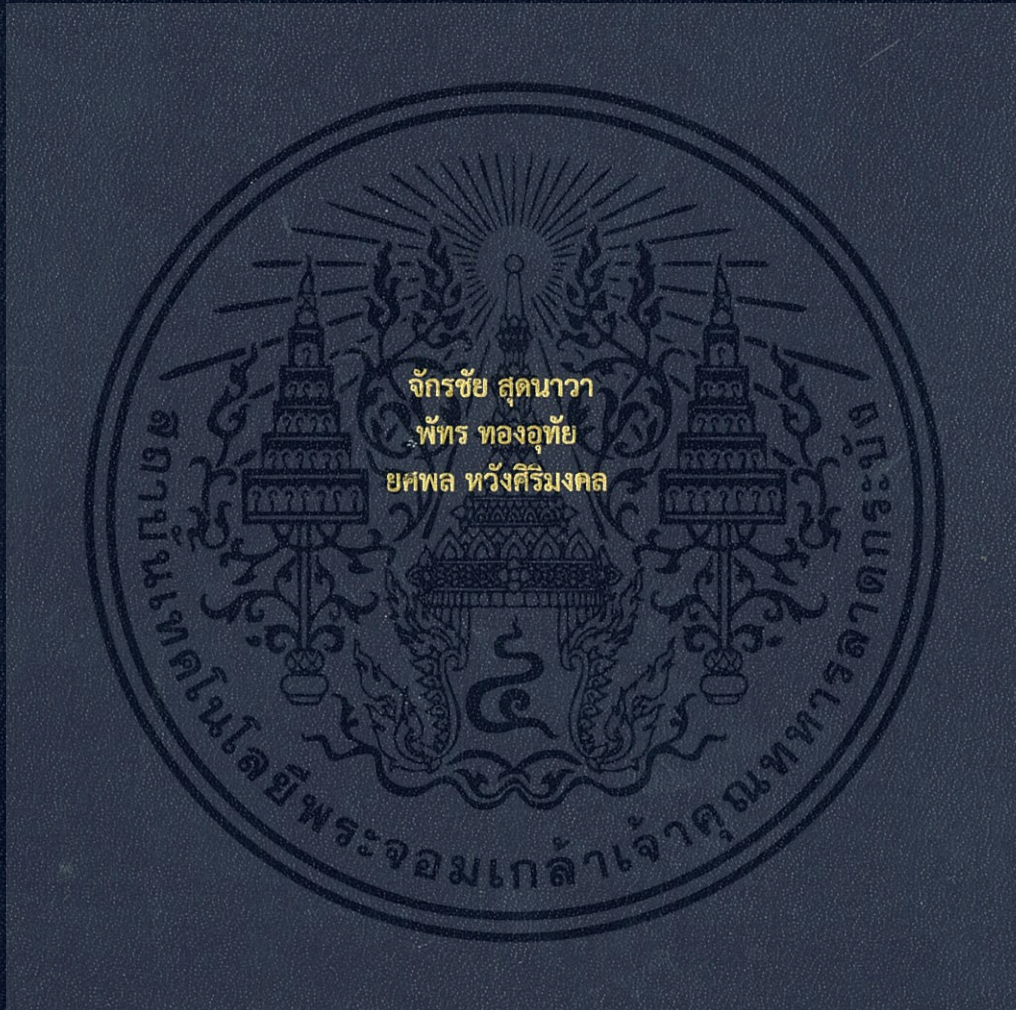


การออกแบบและพัฒนารถไฟโดยสารแบบย่อส่วน
DESIGN AND DEVELOPMENT OF PASSENGER TRAIN SCALED MODEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบและพัฒนารถไฟโดยสารแบบย่อส่วน

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PASSENGER TRAIN SCALED MODEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PASSENGER TRAIN SCALED MODEL



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนารถไฟโดยสารแบบย่อส่วน

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PASSENGER TRAIN SCALED MODEL

ผู้จัดทำ

1. นาย จักรชัย สุนทาวา รหัสประจำตัว 57010155
2. นาย พัทธ ทองอุทัย รหัสประจำตัว 57010878
3. นาย ยศพล หวังศิริมงคล รหัสประจำตัว 57011032



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและพัฒนารถไฟโดยสารแบบย่อส่วน

นาย จักรชัย	สุคนาวา	57010155
นาย พัทธ	ทองอุทัย	57010878
นาย ยศพล	หวังศิริมงคล	57011032
ผศ.ดร มนต์ศักดิ์	พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

รถไฟเป็นระบบขนส่งสาธารณะที่ประกอบด้วยตู้โดยสารที่มีแคร่รถเป็นส่วนประกอบหนึ่งในช่วงล่างของรถไฟ โดยหนึ่งตู้โดยสารจะมีแคร่รถไฟจำนวนสองชุดซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักตู้โดยสาร แคร่รถไฟประกอบด้วยโครงแคร่ ชุดล้อและระบบกันสะเทือนเพื่อใช้ในการบรรทุก ซึ่งจะเห็นว่าแคร่รถไฟเป็นส่วนประกอบสำคัญของรถไฟ ดังนั้นโครงการจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนารถไฟโดยสารแบบย่อส่วนโดยมีข้อกำหนดคือสามารถรับน้ำหนักบรรทุกโดยสารได้ 300 กิโลกรัม ซึ่งการออกแบบแคร่รถไฟเป็นไปตามมาตรฐาน EN 13749 แต่รูปแบบการรับภาระของแคร่รถไฟมีอยู่ 3 กรณีได้แก่ 1) รับภาระจากน้ำหนักโดยสารกดลงบนแคร่รถไฟและลงบนส่วนรองรับผู้โดยสารขณะหยุดนิ่ง 2) รับภาระจากน้ำหนักกดลงแคร่รถไฟและที่ส่วนรองรับผู้โดยสารขณะรถไฟกำลังเข้าโค้ง ในการออกแบบใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวประกอบความปลอดภัยมีค่ามากที่สุด เมื่อแคร่รถไฟมีการรับภาระแบบกรณีที่ 1 และตัวประกอบความปลอดภัยมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแคร่รถไฟมีการรับภาระแบบกรณีที่ 2

คำสำคัญ: แคร่รถไฟ, รถไฟโดยสาร, รถไฟย่อส่วน

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PASSENGER TRAIN SCALED MODEL

Jakkrachai	Sudnawa	57010155
Pattara	Tongauthai	57010878
Yodsapol	Wangsirimongkol	57011032
Asst.Prof.Dr.Monsak	Pimsarn	Advisor
Year 2017		

ABSTRACT

The train is a public transportation system that consists of several passenger cars. Generally, a passenger car is made up of a car body and two bogies. The bogie is a key part of the train as it is responsible for carrying the car body, and consists of a bogie frame, wheelsets and the suspension system. Thus, this project aims to design and develop a scaled model of a passenger train which is capable of carrying a load of 300 kilograms. The design is in accordance with EN 13749 standards but the carrying load on the bogie and car body were tested under 3 conditions stationary, rocking from side to side and entering a curve. In order to analyze the safety factor during the design process, the finite element method was employed and the analyzed results show that the model was safest, highest safety factor, whilst stationary and at its least safe, lowest safety factor, whilst rocking from side to side.

Keywords: Bogie, Passenger car, Train scale model

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และอาจารย์อีกหลายท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ช่วยให้คำแนะนำและการแก้ปัญหาให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่ วีระพงษ์ จันทร์บัว ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้ และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญนั่นคือ บิดา มารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจกันมาตลอด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย จักรชัย สูดนาวา

นาย พัทธ ทองอุทัย

นาย ยศพล หวังศิริมงคล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.3 ทฤษฎี	4
2.3.1 การโก่งของคาน (Deflection of beam)	4
2.3.2 ความเค้นและความเครียดในระบบ 3 มิติ	6
2.3.3 กฎของฮุค (Hooke's Law)	10
2.3.4 การวัดค่าความเครียดจากตัววัดบนความเครียดที่ติดตั้งบนผิวของวัตถุ	13
2.3.5 ความเสียหายของวัสดุและการออกแบบ	14
2.3.6 ตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor)	14
2.3.7 มาตรฐาน EN 13749	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.8 แบริ่ง (Bearing)	19
2.3.9 การออกแบบเพลลา	20
2.3.10 การออกแบบสปริงรับแรงกดสำหรับโหลดการล้า	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	26
3.1 บทนำ	26
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	26
3.3 อุปกรณ์การทดลอง	27
3.3.1 แคร่รถไฟจำลองและตัวถังรถไฟ	27
3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	28
3.3.3 การทดสอบจะพิจารณาการรับภาระแบบต่างๆตามมาตรฐาน EN 13749	31
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงเมื่อทดสอบกับแคร่รถไฟจำลองและส่วนรองรับผู้โดยสารจำลองจริง	32
3.3.5 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error)	36
3.3.6 การสอบเทียบตัววัดความเครียด โดยใช้ทฤษฎีการแอ่นตัวของคาน (Beam theory)	36
บทที่ 4 การทดลองและผลลัพธ์	38
4.1 บทนำ	38
4.2 วิธีการทดลอง	38
4.2.1 การคำนวณผลการทดสอบโดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์	38
4.2.2 การคำนวณผลการทดสอบจากการทดสอบด้วยชุดทดสอบ	39
4.3 ผลการทดลอง	42
4.3.1 การเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของแคร่รถไฟกับผลของโปรแกรมจำลอง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของส่วน รองรับผู้โดยสารกับผลของโปรแกรมจำลอง	44
4.3.3 ผลการทำนายน้ำหนักที่แบบจำลองของแคร่รถไฟที่สามารถรับได้โดยวิธีการจำ ลองโดยโปรแกรมจำลองตามรูปแบบของกรณีรับภาระแบบต่างๆ	45
4.3.4 ผลการทำนายน้ำหนักที่แบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารที่สามารถรับได้ โดยวิธีจำลอง โดยโปรแกรมจำลองตามรูปแบบของกรณีรับภาระแบบต่างๆ	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	72
5.1 บทนำ	72
5.2 สรุปผลการทดลอง	72
5.3 ปัญหาจากการศึกษา	73
5.4 ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง.	74
ภาคผนวก (APPENDIX)	75
ภาคผนวก ก แบบชิ้นส่วนของแคร่รถไฟจำลอง	76
ภาคผนวก ข การคำนวณหาขนาดแบริ่งและการคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงและการออกแบบเพลลา	85
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณค่าความเค้นวอนมิสเสตรงจุดที่ติดตัววัดความเครียด	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าความเครียดของแควร์รถไฟจากการทดลองและการจำลองในโปรแกรมจำลอง	43
4.2 แสดงค่าความเครียดของส่วนรองรับผู้โดยสารจากการทดลองและการจำลองในโปรแกรมจำลอง	44
4.3 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสซของแควร์รถไฟจากการจำลองในโปรแกรมจำลอง.	56
4.4 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสซของส่วนรองรับผู้โดยสารจากการจำลองในโปรแกรมจำลอง	70



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพระยะโคงและเส้นโค้งอีลาสติก	4
2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดัด	5
2.3 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างที่โคงตัวภายใต้โมเมนต์ที่มากระทำ	5
2.4 แสดงความเค้นในระบบ 3 มิติ ที่ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	7
2.5 แสดงความเครียดในระบบ 3 มิติ ที่ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	8
2.6 แสดงความเครียดตั้งฉากในแนวแกน x และ y	9
2.7 แสดงความเครียดในลูกบาศก์ปริมาตรเมื่อรับความเค้นระนาบ	10
2.8 แผนภาพของความเค้น - ความเครียด	10
2.9 แสดงความเค้นในแนวระนาบ	12
2.10 แสดงรูปแบบการติดตั้งตัววัดความเครียดแบบแนวฉากที่มุม 45°	13
2.11 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของโครงเคร่งรถไฟ	15
2.12 แสดงกรณีรับภาระแบบที่ 1	16
2.13 แสดงกรณีรับภาระแบบที่ 2	17
2.14 แสดงกรณีรับภาระแบบที่ 3	18
2.15 แสดงส่วนประกอบของแบร็ง	19
2.16 แสดงเพลลาของล้อรถไฟ.	18
2.17 แสดงตัวอย่างเพลลาที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด	21
2.18 แสดงตัวอย่างกราฟ ความเข้มของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการดัด	22
2.19 แสดงตัวอย่างกราฟ ความเข้มของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการบิด	23
2.20 แสดงการรับโหลดในแนวแกนของสปริงกด	24
2.21 แสดงลักษณะปลายแบบต่างๆของสปริงขดรับแรง	25
2.22 แสดงการคำนวณลักษณะปลายแบบต่างๆของสปริงขดรับแรงกด	26
3.1 แบบจำลองเคร่งรถไฟที่ทำจากโปรแกรมเขียนแบบ	28
3.2 แบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสารที่ทำจากโปรแกรมเขียนแบบ	28
3.3 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของเคร่งรถไฟ กรณีที่ 1	29
3.4 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของเคร่งรถไฟ กรณีที่ 2	30
3.5 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของเคร่งรถไฟ กรณีที่ 3	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แคร่รถไฟจำลอง(Bogie)	33
3.7 ส่วนรองรับผู้โดยสาร(Car Body)	34
3.8 ตัววัดความเครียด (Strain Gauge)	34
3.9 กล่องต่อวงจรบริจ (bridge box)	34
3.10 อุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียด (strain gage amplifier)	34
3.11 มัลติมิเตอร์ (MultiMater)	35
3.12 น้ำหนักมาตรฐาน (standard weight)	35
3.13 แคร่รถไฟจำลองที่ติดตั้งตัววัดความเครียด	35
3.14 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง(Bogie)	36
3.15 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง(Car Body)	36
3.16 แลปการทดลองที่ใช้ปรับค่าตัววัดความเครียด(strain gauge)	37
3.17 แสดงกราฟการสอบเทียบตัววัดความเครียด	38
3.18 กราฟการสอบเทียบค่าจากการคำนวณกับค่าจากการทดลอง	38
4.1 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์	39
4.2 กราฟแสดงการลู่เข้าคำตอบ	40
4.3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดความเครียด(strain gauges) ของแบบจำลองแคร่รถไฟ	42
4.4 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดความเครียด(strain gauges) ของแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร	42
4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียด จากโปรแกรมจำลองและชุดการทดลองของแบบจำลองแคร่รถไฟ	44
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียด จากโปรแกรมจำลองและชุดการทดลองของแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร	46
4.7 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support) ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแคร่รถไฟที่รับน้ำหนัก	47
4.8 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support) ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแคร่รถไฟที่รับน้ำหนัก	51
4.9 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support) ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแคร่รถไฟที่รับน้ำหนัก	54

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)	
ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสาร	58
4.11 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)	
ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสาร	63
4.12 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)	
ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสาร	67



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$F.S.$	ตัวประกอบความปลอดภัย (factor of safety)
M	โมเมนต์ภายในที่หน้าตัดใดๆของคาน (N.m)
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน (m^4)
y	ระยะห่างจากแกนสะเทินตามแนวแกน Y ถึงระยะที่สังเกต (m)
c	ระยะจากแกนสะเทินตามแนวแกน Y ถึงผิวด้านนอกที่ยาวที่สุด (m)
$\sigma(y)$	ค่าความเค้นดัดตามแนวแกน (N/m^2)
ρ	รัศมีโค้งของความยาวคาน (m)
θ	มุมจุดศูนย์กลางโค้งของความยาวคาน
δ	การยืดหรือหดตัวของวัสดุ (m)
σ	ค่าความเค้นตั้งฉากในวัสดุ (N/m^2)
A_0	พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกระทำ (m^2)
F	แรงภายนอกที่มากระทำอยู่ (N)
τ	ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น (N/m^2)
A	พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงเฉือน (m^2)
F	แรงเฉือนที่มากระทำบนพื้นที่รับแรงเฉือน (N)
L	ความยาวเดิมของวัตถุ (m)
ϵ	ความเครียดดัดที่เกิดขึ้น
E	โมดูลัสความยืดหยุ่น (N/m^2)
ν	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ration)
C_0	ความสามารถในการรับโหลดสถิต (Ibf หรือ kN)
n_b	จำนวนของลูกกลิ้งเม็ดกลม
d_b	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเม็ดกลม (m)
C_{10}	อายุการใช้งานของแบริ่งตามความสามารถในการรับโหลด (Ibf หรือ kN)
F_D	โหลดที่แบริ่งรองรับ (Ibf หรือ kN)
n_D	ความเร็วรอบของแบริ่ง (rev/min)
L_R	อายุประเมินของแบริ่งใน 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n_R	ความเร็วประเมิน (rev/min)
S_{ut}	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/m ²)
σ_y	ความเค้นที่จุดครากของวัสดุ (N/m ²)
σ_{von}	ความเค้นวอนมิสเซส (N/m ²)
α	ค่าสัมประสิทธิ์การโคลง (roll coefficient)
β	ค่าสัมประสิทธิ์การกระเด็น (bounce coefficient)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอดีตที่ผ่านมาการพัฒนาของรถไฟไทยมีความล่าช้าและไม่ค่อยก้าวหน้าเท่าที่ควรทั้งๆที่การรถไฟไทยมีมานานกว่า 100 ปีแล้วก็ตาม หากเทียบกับประเทศที่เจริญก้าวหน้าและพัฒนาแล้ว หรือในบางประเทศที่พัฒนารถไฟหลังประเทศไทยแต่ตอนนี้ระบบขนส่งทางรางของประเทศนั้นพัฒนาแซงประเทศไทยไปเยอะแล้วก็ตาม แต่ปัจจุบันในประเทศไทยเริ่มผลักดันและพัฒนา ระบบขนส่งทางรางมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการสร้างโครงการรถไฟสายต่างๆในกรุงเทพมหานครและต่างจังหวัดเนื่องจาก ระบบขนส่งทางรางนั้นช่วยแก้ปัญหาจราจรและอำนวยความสะดวกในการคมนาคม ดังนั้นทางกลุ่มมีความสนใจในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบขนส่งทางราง จึงได้ดำเนินการโดยใช้วิธีวิศวกรรมย้อนรอย ซึ่งวิศวกรรมย้อนรอยคือการศึกษาข้อมูลและลักษณะทางเทคนิคของอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ และทำการผลิตหรือสร้างอุปกรณ์ชิ้นนั้นมาศึกษาเพิ่มเติม โดยเราจะจัดทำวิศวกรรมย้อนรอยโดยสร้างโมเดลของแคร่รถไฟ โดยจำลองขึ้นมาเพื่อจะทำการออกแบบและศึกษาแคร่รถไฟ

การจำลองแคร่ เราจะจำลองโดยการสร้างแบบ 3 มิติจากโปรแกรมเขียนแบบเพื่อวาดรูปทรงจากแคร่แบบจำลองที่ได้มา และนำแบบ 3 มิตินี้ไปทดสอบการรับแรงของโครงแคร่ด้วยโปรแกรมจำลองเพื่อวิเคราะห์ส่วนที่โครงแคร่จะเกิดศูนย์รวมความเค้นที่จะส่งผลให้อาจเกิดความเสียหายเมื่อรับแรงตอนรถไฟกำลังเคลื่อนที่ และในที่สุดท้ายเราจะสร้างแบบจำลองแคร่รถไฟที่ประกอบไปด้วยโครงแคร่ ชุดล้อ และ ระบบกันสะเทือนรถไฟ โดยทำการย่อส่วนลดขนาดลงมาเป็นแบบจำลองรถไฟ เพื่อที่จะสามารถแบบจำลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากโปรแกรมจำลองและสามารถให้คนขึ้นไปนั่งและรถไฟสามารถเคลื่อนที่บนรางขนาดจำลองได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างแคร่รถไฟและหน้าที่ของส่วนประกอบต่างๆของแคร่รถไฟ
2. ศึกษาหลักการรับแรงของแคร่รถไฟ
3. ทำการสร้างแบบจำลองย่อส่วนของแคร่รถไฟ
4. ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงแบบจำลองย่อส่วนแคร่รถไฟด้วยระเบียบไฟไนท์เอลิเมนต์
วิเคราะห์ความแข็งแรงเมื่อมีการรับภาระตามมาตรฐาน EN13749

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ตัวอย่างแคร่รถไฟที่ใช้ศึกษาคือแบบจำลองของแคร่รถไฟขบวนสินค้า รุ่น Y25 wagon bogie
2. ทำการออกแบบแคร่รถไฟจำลองและส่วนรองรับผู้โดยสารจำลองและสามารถรองรับน้ำหนักได้ 300 กิโลกรัม
3. เพื่อทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงแคร่จำลองเมื่อมีการรับภาระน้ำหนักเป็นไปตามมาตรฐาน EN 13749

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อนำแบบจำลองไปพัฒนาต่อในการติดตั้งต้นกำลังในการขับเคลื่อน
2. เพื่อนำแบบจำลองแคร่รถไฟนี้ไปใช้ในการศึกษาได้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาส่วนประกอบของแคร่รถไฟจากแบบจริงและจากแบบจำลองต้นแบบ
2. ศึกษาทฤษฎีความเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำแบบจำลองแคร่รถไฟตามแรงตามกรณีของ EN 13749
3. วาดโครงแคร่และส่วนประกอบอื่นๆด้วยโปรแกรมเขียนแบบจากขนาดของแบบจำลองต้นแบบ
4. ออกแบบและคำนวณค่าจากการรับแรงรูปแบบต่างๆ
5. ศึกษาการใช้โปรแกรมจำลองผลเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของโครงแคร่รถไฟ
6. นำข้อมูลจากการคำนวณมือและผลจากการใช้โปรแกรมจำลองผลมาเปรียบเทียบกับ
7. สร้างแคร่รถไฟจำลอง
8. ทดสอบโครงแคร่จำลองโดยการนำไปวิ่งบนรางขนาดจำลองและให้คนไปนั่ง
9. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในออกแบบและสร้างแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้า จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเรื่องหลักการย่อยส่วนโมเดลเพื่อทำเป็นแบบจำลอง หลักการความเค้นและความเครียดในชิ้นงานที่จะทำให้เกิดความเสียหายในวัสดุ และการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kassner [1] ได้ทำการศึกษาความเสียหายของโครงข่ายไฟฟ้าจากการรับแรงกดของมวลต่างๆซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความล้าของโครงข่ายไฟฟ้าโดยการนำแนวคิดการดำเนินการโดยใช้มาตรฐาน EN13749 [2] และสำหรับช่วงความเค้นที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้า และแรงที่เกิดขึ้นจริงโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลการรับแรงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีความล้า

Moritz G. และ Alfred T. [3] ได้สร้างแบบจำลองของชุดเพลาล้อโดยใช้วิธีการย่อขนาด 1:5 เพื่อให้ง่ายต่อการทดลองแรงบิดของเพลาล้อขณะที่รถไฟทำการเข้าโค้ง โดยใช้หลักการคำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ของคาลเตอร์ จากความสัมพันธ์ของความยาวของเพลาล้อและแรงที่มากระทำกับแบบจำลอง โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบกับผลลัพธ์จากชุดเพลาล้อของจริง

Jakkapaht S, Tachasit S. และ Nopparid L. [4] ได้ทำการศึกษาการกระจายความเค้นบนโครงข่ายไฟฟ้าโดยทำการสร้างแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการย่อยส่วนเพื่อนำมาทดสอบการรับภาระตามมาตรฐาน EN 13749 โดยมีกรณีการรับภาระ 3 กรณีดังนี้ 1) การรับภาระจากน้ำหนักตู้โดยสารกดลงบนโครงข่ายในสภาวะหยุดนิ่ง 2) การรับภาระจากน้ำหนักตู้โดยสารกดลงบนโครงข่ายในสภาวะหยุดนิ่งขณะที่รถไฟมีการโคลงตัว 3) การรับภาระจากน้ำหนักตู้โดยสารกดลงบนโครงข่ายในสภาวะหยุดนิ่งขณะที่รถไฟมีการเคลื่อนที่ในทางโค้ง เพื่อดูความเสียหายที่เกิดขึ้น

2.3 ทฤษฎี

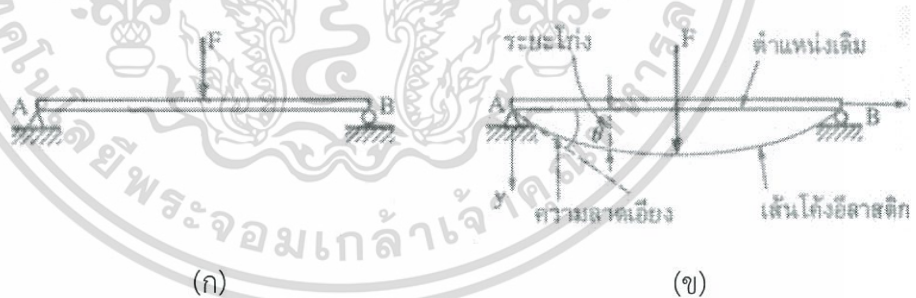
2.3.1 การโก่งของคาน (Deflection of beam)

คานเป็นส่วนโครงสร้างที่นิยมใช้เพื่อรับแรงในลักษณะต่างๆ เช่น แรงคงที่ หรือแรงกระจาย ในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างตามยาวของแนวกาน เมื่อคานรับภาระดังกล่าว ภาระต่างๆย่อมต้องกระจายเข้าไปภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำคานในรูปของแรงเฉือนที่หน้าตัดคานและโมเมนต์ดัดที่หน้าตัดคานที่ระยะต่างๆบนคาน เมื่อคานได้รับน้ำหนักหรือมีแรงภายนอกมากระทำ คานก็จะเริ่มแอ่นตัวลงหรือเกิดการโก่งงอทำให้คานไม่อยู่ในแนวตรงเหมือนสภาพเดิมที่ยังไม่ได้รับน้ำหนัก ดังนั้นในการออกแบบคานจะต้องคำนึงถึงการโก่งตัวของคานด้วย นอกจากความเค้นดัดและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตามปกติ

เส้นโค้งอีลาสติก (Elastic curve) เป็นเส้นที่อยู่ในแนวแกนสะเทินของคานซึ่งแสดงลักษณะการโก่งของคานเมื่อมีแรงภายนอกหรือน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำอยู่บนคานในขณะที่คานยังไม่มีแรงภายนอกหรือน้ำหนักมากระทำบนคาน เส้นโค้งอีลาสติกนี้เป็นเส้นตรงและอยู่ในแนวเดียวกันกับแนวของแกนสะเทิน เมื่อคานรับแรงภายนอกหรือน้ำหนักบรรทุก เส้นโค้งอีลาสติกนี้จะแอ่นหรือโก่งไปจากตำแหน่งลักษณะของการโก่งของคานนี้ขึ้นอยู่กับค่าของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานนั้น

ความลาดเอียง (Slope) ของคานที่จุดใดๆ หมายถึงมุมระหว่างแนวเดิมของคานกับเส้นสัมผัสซึ่งสัมผัสกับ โค้งอีลาสติกที่จุดนั้น

ระยะโก่ง (Deflection) หรือการแอ่นของคานจุดใดๆ หมายถึงระยะในแนวตั้งที่จุดนั้น บนเส้นโค้งอีลาสติกที่ เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม (ก่อนจะรับน้ำหนักนั้น)



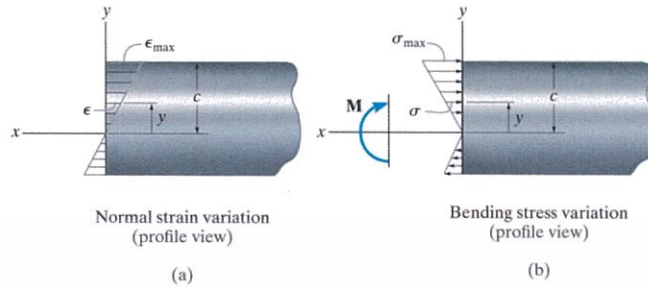
รูปที่ 2.1 แผนภาพระยะโก่งและเส้นโค้งอีลาสติก

(รูปจาก: <http://building.cmtc.ac.th/main/images/stories/jiraporn/Streng%20of%20Material/16.pdf>)

ในการวิเคราะห์คานที่กำลังรับภาระอยู่ไม่ว่าจะเป็นแรงคงที่หรือแรงกระจายทำให้เกิดทั้งความเค้นดัดและความเค้นเฉือนภายในคานที่เกิดระยะต่างๆของคานจะเกิดการแอ่นตัว การคำนวณหาการแอ่นตัวของคานนั้นมีหลายวิธี เช่น วิธีอินทิกรัลสองชั้น หรือ วิธีพื้นที่โมเมนต์ เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และความเค้นที่หน้าตัดขวาง
ใดๆของคานาคำนวณจาก

$$\sigma(y) = -\frac{My}{I} \quad (2.1.1)$$

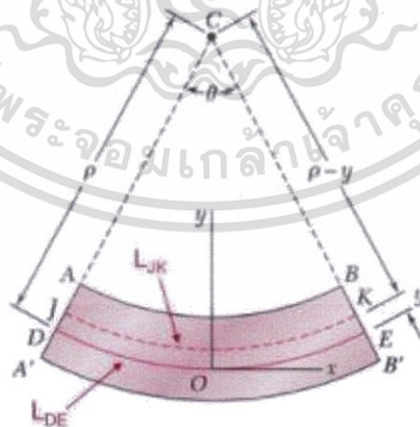


รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดัด

(รูปจาก: <http://slideplayer.com/slide/4655600/>)

โดยที่

- M คือ โมเมนต์ที่หน้าตัดใดๆของคาน ($\frac{N}{m}$)
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน (m^4)
 y คือ ระยะห่างจากแกนสะเทินตามแนวแกน Y ถึงระยะที่สังเกต (m)
 c คือ ระยะจากแกนสะเทินตามแนวแกน Y ถึงผิวด้านนอกที่ยาวที่สุด (m)
 $\sigma(y)$ คือ ค่าความเค้นดัดตามแนวแกนคาน ($\frac{N}{m^2}$)
 ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการดัดสามารถหาได้จากรูปที่ (2.2)



รูปที่ 2.3 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างที่โค้งตัวภายใต้โมเมนต์ที่มากกระทำ

(รูปจาก: <http://www.hkdivedi.com/2017/05/deflection-and-slope-of-simply.html>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ คือ รัศมีโค้งของ DE

θ คือ มุมจุดศูนย์กลางโค้งของ DE

ความยาวของ DE คือ $L_{DE} = \rho\theta$

ความยาวของ JK คือ $L_{JK} = (\rho - y)\theta$

δ คือ การยืดหรือหดตัวของวัสดุ ($\delta = L_{JK} - L_{DE}$)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2.1.2)$$

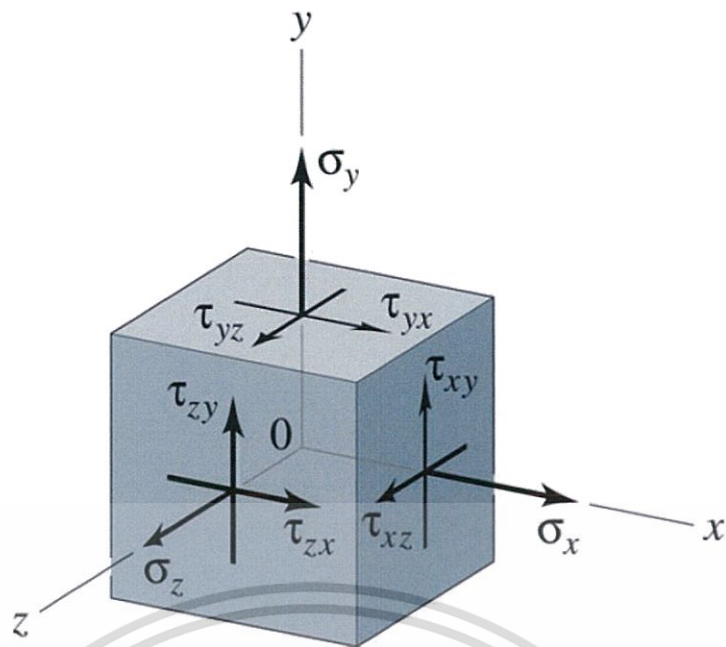
ความเครียดในแนวความยาว ϵ_x บนเส้นโค้ง JK

$$\epsilon_x = \frac{\delta}{L} \rightarrow \epsilon_x = -\frac{y}{\rho} \quad (2.1.3)$$

2.3.2 ความเค้นและความเครียดในระบบ 3 มิติ

ความเค้น (Stress, σ) คือแรงภายนอกที่มากกระทำผ่านจุดศูนย์กลางวงของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ แรงภายนอกที่ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยชนิดของความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

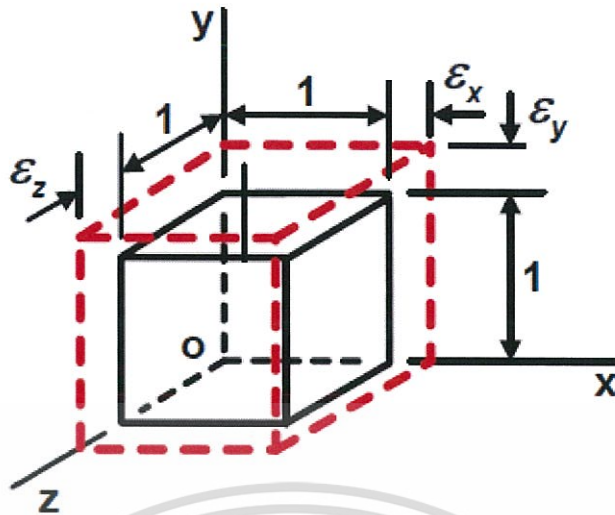
1. ความเค้นดึง (tensile stress) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงดึง โดยแรงดึงจะต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดที่กระทำ
2. ความเค้นอัด (compress stress) จะเกิดขึ้นภายใต้แรงอัด โดยแรงอัดจะต้องกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุนั้น
3. ความเค้นเฉือน (shear stress, τ) เป็นแรงภายนอกที่มากกระทำต่อวัสดุ โดยพยายามทำให้วัสดุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น



รูปที่ 2.4 แสดงความเค้นในระบบ 3 มิติ ที่ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

(รูปจาก: <https://www.slideshare.net/ShaheryarAhmad1/mechanics-of-solids-stress-transformation-in-3d>)

แรงในระบบแกนตั้งฉากที่จุดใดๆ บนวัตถุสถานะของหน่วยแรง (state of stress) ที่เกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งในวัตถุจะหาได้โดยการตัดวัตถุรอบๆ จุดดังกล่าวให้เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์โดยให้ด้านของส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนานไปกับระนาบต่างๆ ของระบบแกนตั้งฉาก x , y , และ z จากนั้นใช้นิยามของหน่วยแรง เขียนสมการของหน่วยแรงที่กระทำที่ด้านต่างๆ ของส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) สภาพทั่วไปของความเค้นที่จุดใดๆ O สามารถแทนได้ด้วยความเค้นประกอบกันกับความเค้น สามความเค้นเป็นความเค้นตั้งฉากกระทำบนผิวหน้าลูกบาศก์เล็กๆ ที่จุดกึ่งกลาง O คือ σ_x , σ_y และ σ_z มีทิศทางไปทางแกน x , y และ z ตามลำดับ อีกสามความเค้นเป็นความเค้นเฉือน τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{zx} กระทำบนผิวหน้าเดียวกันดัง รูปที่ 2.4 โดยสามารถพิจารณาความเค้นด้วยกฎของฮุกในระบบ 3 มิติ



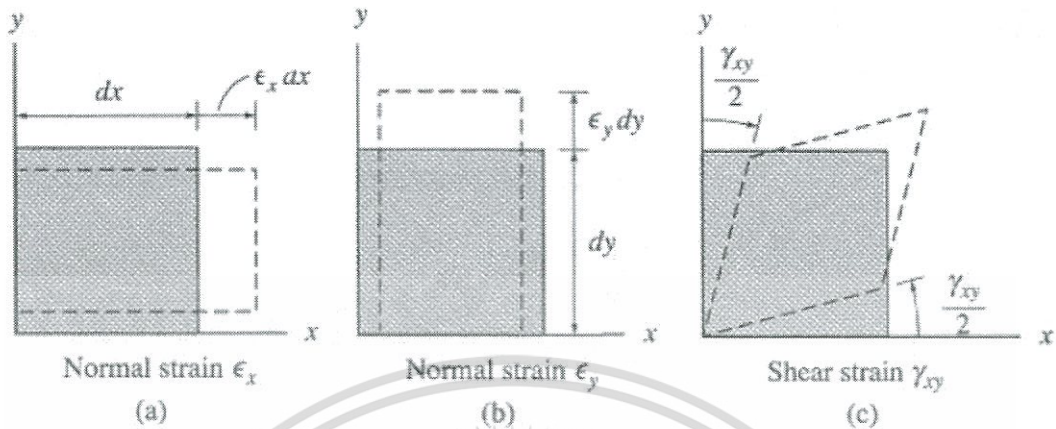
รูปที่ 2.5 แสดงความเครียดในระบบ 3 มิติ ที่ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

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

ในการพิจารณาถึงสถานะของความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดๆหนึ่ง เราจะทำการพิจารณาสถานะของความเครียดที่เกิดขึ้นบน ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) เล็กๆที่ล้อมรอบจุดนั้น โดยทั่วไปแล้วสถานะของความเครียดบน ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) จะประกอบไปด้วยความเครียดทั้งหมด 6 ค่า คือความเครียดตั้งฉาก ϵ_x , ϵ_y , และ ϵ_z และความเครียดเฉือน γ_{xy} , γ_{yz} และ γ_{zx} ซึ่งเป็นอิสระต่อกันความเครียดทั้ง 6 ค่านี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการวางตัว ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับหน่วยแรง ในการทดสอบวัสดุ เราจะวัดค่าของความเครียดเหล่านี้ได้โดยใช้ตัววัดความเครียด (strain gauge) ซึ่งโดยปกติแล้ว เราจะสามารถทำได้ในบางทิศทางเท่านั้น ดังนั้นถ้าเราสนใจที่จะทราบค่าของความเครียดในทิศทางอื่นๆ แล้ว เราจะต้องทำ การแปลงความเครียด (strain transformation) เพื่อหาค่าของความเครียดในทิศทางนั้นๆ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทนี้ เช่นเดียวกับในกรณีของหน่วยแรงความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลจะถูกลดจำนวนให้อยู่ในรูปของสถานะของความเครียดในระนาบเดียว (plane strain) ได้โดยที่สถานะของความเครียดแบบ (plane strain) ในระบบแกน $x - y$ จะประกอบไปด้วยความเครียดตั้งฉาก ϵ_x และ ϵ_y และความเครียดเฉือน γ_{xy} ซึ่งกระทำอยู่บนด้านทั้งสี่ด้านของ ชิ้นส่วนเล็กๆที่เกิดความเครียด (strain element) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 จากรูป เราจะเห็นได้ว่า ความเครียดตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_x และ ϵ_y จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวในแกน x และแกน y ตามลำดับและ ความเครียดเฉือน γ_{xy} จะทำให้เกิดการหมุนสัมผัสของหน้าตัดที่อยู่ติดกันบนชิ้นส่วนเล็ก ๆ นั้น



รูปที่ 2.6 แสดงความเครียดตั้งฉากในแนวแกน x และ y

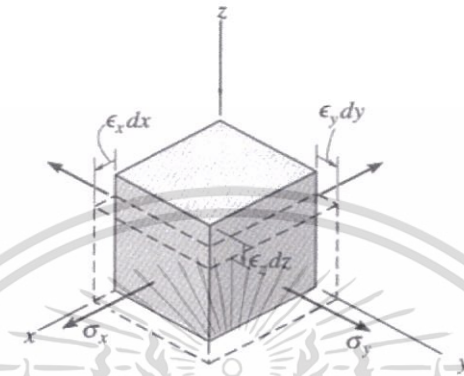
(รูปจาก: กลศาสตร์วัสดุ Mechanics of Materials)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงของวัสดุภายใต้แรงจากภายนอกที่มากกระทำต่อเนื้อของ วัสดุจนทำให้วัสดุรับแรงมากเกินไปกว่าจะรับได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทาง ของแรงที่มากกระทำ เช่น เกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction) โดยชนิด ของความเครียดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ความเครียดดึง (tensile strain, ϵ) เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงดึงตามแนวแกน และเพิ่มแรงดึง ขึ้นอย่างช้าๆ ท่อนวัสดุก็จะเกิดการยืดออกทีละน้อยตามขนาดของแรงดึงที่เพิ่มขึ้น
2. ความเครียดอัด (compressive strain, ϵ) เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงกดตามแนวแกน และ เพิ่มแรงกดอย่างช้าๆจนทำให้ท่อนวัสดุหดตัวลง
3. ความเครียดเฉือน (shear strain, γ) เมื่อมีแรงเฉือนกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิด ความเครียดขึ้นมา ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าความเครียดเฉือน

พิจารณา ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่ง ถูกกระทำ โดยสถานะของหน่วยแรงแบบ ความเค้นระนาบ (plane stress) σ_x และ σ_y ภายใต้ หน่วยแรงทั้งสองนี้ เราจะเห็นได้ว่า ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังที่แสดงโดยเส้นประ ซึ่งนอกจากจะทำให้มีความเครียดตั้งฉาก ϵ_x และ ϵ_y เกิดขึ้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าว ยัง จะทำให้มีความเครียดตั้งฉาก ϵ_z เกิดขึ้นด้วย แต่ในกรณีที่ ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) ถูกกระทำ โดยสถานะของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นบนเว็บไซต์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดระนาบ (plane strain) ϵ_x และ ϵ_y แล้วเราจะเห็นได้ ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) จะมีเฉพาะหน่วยแรงตั้งฉาก σ_x และ σ_y เกิดขึ้นเท่านั้น แต่จะไม่มีหน่วยแรงตั้งฉาก σ_z เกิดขึ้นเลย ดังนั้น โดยทั่วไปแล้ว เราอาจจะกล่าวได้ว่า ความเค้นระนาบ (plane stress) จะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันกับความเครียดระนาบ (plane strain)

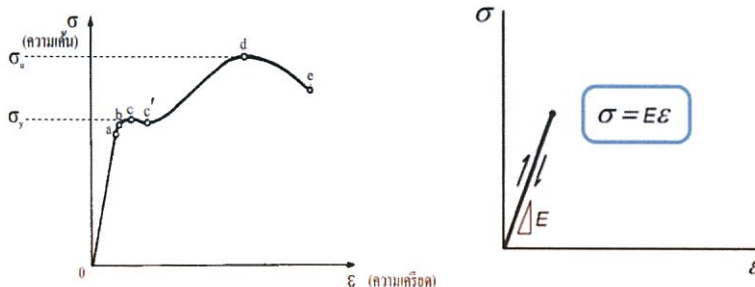


รูปที่ 2.7 แสดงความเครียดในลูกบาศก์ปริมาตรเมื่อรับความเค้นระนาบ
(รูปจาก: กลศาสตร์วัสดุ Mechanics of Materials)

2.3.3 กฎของฮุค (Hooke's Law)

โครงสร้างในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะต้องออกแบบให้มีการเสียรูปน้อยมาก ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุจะอยู่ในช่วงแรกที่เป็นเส้นตรงในแผนภาพของความเค้น-ความเครียด สำหรับช่วงนั้น (รูปที่ 2.8) ความเค้น σ จะแปรผันตรงกับความเครียด ϵ และจะได้ว่า “กฎของฮุค” ใน 1 มิติแสดงดังสมการ (2.3.1) ซึ่งจะนำสมการนี้มาใช้ในการหาค่าความเครียดบนคาน เพื่อที่จะสร้างสมการความเครียดเปรียบเทียบค่าความเครียดที่อ่านได้จากคานที่ติดตั้งตัววัดความเครียดต่อไป

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.3.1)$$



รูปที่ 2.8 แผนภาพของความเค้น - ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น ($\frac{N}{m^2}$)
 σ คือ ความเค้น ($\frac{N}{m^2}$)
 ε คือ ความเครียด

โดยค่าสัมประสิทธิ์ E เรียกว่า “โมดูลัสความยืดหยุ่น” (Modulus of Elasticity) เนื่องจากความเครียด ε ไม่มีหน่วย ค่าโมดูลัส E จึงมีหน่วยเหมือนกับความเค้นคือปาสกาล ค่าความเค้นที่มากที่สุดของวัสดุที่สามารถใช้กฎของฮุกได้เรียกว่า “ขีดจำกัดความเป็นปฏิกิริยา” (Proportion Limit) ของวัสดุ ε

กฎของฮุกในระบบ 3 มิติ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \nu & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.3.2)$$

โดย

σ_x คือ ความเค้นอัดในแนวแกน X

σ_y คือ ความเค้นอัดในแนวแกน Y

σ_z คือ ความเค้นอัดในแนวแกน Z

τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือน ที่กระทำบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน x และกระทำขนานกับแกน y

τ_{yz} คือ ความเค้นเฉือน ที่กระทำบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน y และกระทำขนานกับแกน z

τ_{zx} คือ ความเค้นเฉือน ที่กระทำบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน z และกระทำขนานกับแกน x

E คือ ค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

ε_x คือ ความเครียดอัดบนแกน X

ε_y คือ ความเครียดอัดบนแกน Y

ε_z คือ ความเครียดอัดบนแกน Z

γ_{xy} คือ ความเครียดเฉือนบนระนาบ XY

γ_{yz} คือ ความเครียดเฉือนบนระนาบ YZ

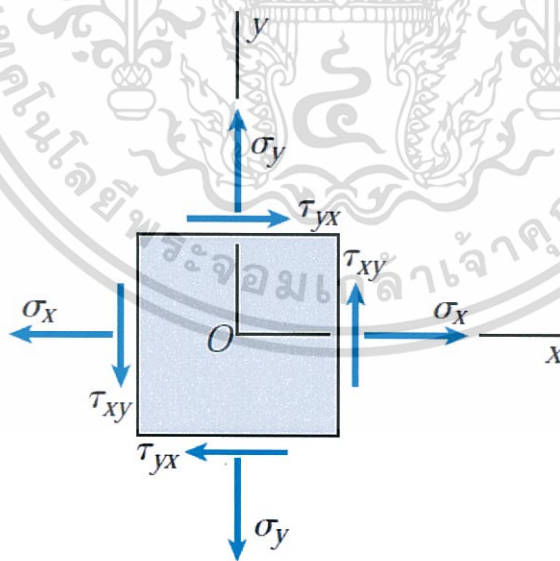
ν_{zx} คือ ความเครียดเฉือนบนระนาบ ZX

ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio)

อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio)

คือ อัตราส่วนความเครียดในแนวด้านข้างต่อความเครียดในแนวด้านยาวของวัตถุ โดยอัตราส่วนของปัวซองเป็นปริมาณที่ไม่มีมิติและสำหรับของแข็งที่ไม่มีรูพรุนส่วนมากจะมีค่าโดยทั่วไประหว่าง $1/4$ และ $1/3$ ค่าทั่วไปของ ν สำหรับวัสดุวิศวกรรมทั่วไปจะแสดงอยู่ด้านในของวัสดุ สำหรับวัสดุในอุดมคติที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปด้านข้างเมื่อยืดหรือบีบอัด อัตราส่วนของปัวซองจะเท่ากับ 0 ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับอัตราส่วน Poisson คือ 0.5 โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq \nu \leq 0.5$

โดยทั่วไปแล้วสถานะของหน่วยแรงที่จุดๆหนึ่งบนวัตถุซึ่งจะแสดงได้โดยการใช้ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) ที่ตัดออกมาจากวัตถุนั้น จะประกอบด้วยหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนที่เป็นอิสระต่อกันทั้งหมดหกหน่วยแรง โดยหน่วยแรงดังกล่าวจะกระทำอยู่บนด้านต่างๆทั้งหมดของ ส่วนย่อยของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic volume element) ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.4 แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว ชิ้นส่วนของโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลจะถูกกระทำโดยหน่วยแรงที่อยู่ในระนาบเดียวกันและเป็นอิสระต่อกันเพียงแคสามหน่วยแรงนี้เท่านั้นสถานะของหน่วยแรงดังกล่าวที่เรียกว่า ความเค้นในแนวระนาบดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความเค้นในแนวระนาบ (plane stress)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาการเปลี่ยนรูปของความเค้นในแนวระนาบ (Plane-Stress Transformation) จะกล่าวถึงความเค้นระนาบ (Plane Stress) เป็นหลักซึ่งผิวหน้าของรูปลูกบาศก์สองผิวหน้าไม่มีความเค้นกระทำ ถ้าเราให้แกน z เป็นแกนตั้งฉากกับผิวหน้านั้น เราจะได้ $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ และจะเหลือความเค้น σ_x, σ_y และ τ_{xy} เท่านั้นโดยสามารถพิจารณาความเค้นด้วยกฎของฮุกในระบบ 2 มิติ

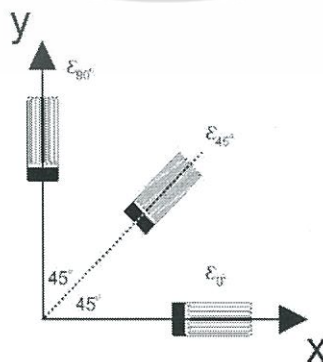
กฎของฮุกในระบบ 2 มิติ

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.3.3)$$

2.3.4 การวัดค่าความเครียดจากตัววัดบนความเครียดที่ติดตั้งบนผิวของวัตถุ

ความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดึงจะถูกวัดได้โดยใช้ตัววัดความเครียด แต่ความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมักจะถูกวัดโดยใช้และการคำนวณโดยใช้สมการการเปลี่ยนแปลงความเครียด ซึ่งสภาวะความเครียดที่คำนวณได้นี้จะเป็นสภาวะความเครียดที่เกิดจากสภาวะหน่วยแรงแบบความเครียดระนาบเนื่องจากการจัดวางตัววัดความเครียดเป็นแนวบนพื้นผิวของวัตถุไม่สามารถวัดความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับผิวของโครงสร้างได้โดยทั่วไปแล้วการติดตั้งตัววัดความเครียดวางตัวเป็นแนวจะมีลักษณะเป็นสามตัวที่ติดตั้งอยู่ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง

พิจารณาการติดตั้งตัววัดความเครียดดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 กำหนดให้แกนของตัววัดความเครียดเป็น x และ y ในการติดตั้งทำมุมกับแกนอ้างอิง x เป็นมุม θ_1, θ_2 และ θ_3 ตามลำดับ ถ้าค่าความเครียดที่อ่านได้จากตัววัดความเครียดทั้งสามได้เป็น ϵ_1, ϵ_2 , และ ϵ_3 ตามลำดับแล้ว เราจะหาค่าความเครียดตั้งฉาก ϵ_x, ϵ_y , และ γ_{xy} ในระนาบ $x-y$ ที่จุด ดังกล่าวได้โดยใช้สมการการเปลี่ยนแปลงความเครียด โดยที่



รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการติดตั้งตัววัดความเครียดแบบแนวฉากที่มุม 45°

(รูปจาก: <https://www.ecomputingx.com/SM-06.jsp>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\
 \varepsilon_2 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\
 \varepsilon_3 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3
 \end{aligned}
 \tag{2.4.1}$$

เมื่อเราทำการแก้สมการที่ 2.4.1 แล้ว เราจะได้ค่าความเครียด ε_x , ε_y , และ γ_{xy} ซึ่งแสดงสภาวะความเครียดที่จุด ดังกล่าวในระนาบ $x - y$

2.3.5 ความเสียหายของวัสดุและการออกแบบ

การออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆ ต้องคำนึงถึงความเสียหายของวัสดุ ซึ่งในปริณิธานิพนธ์นี้ เลือกใช้เหล็กเป็นวัสดุ โดยส่วนมากแล้วนั้นเราจะใช้ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Distortion energy) โดยมีการใช้ทฤษฎีของวอนมิสเสส (Von Mises) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเค้นที่จุดครากของวัสดุที่ทำให้เกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณชิ้นส่วนต่างๆ ของวัสดุเป็นที่น่าเชื่อถือสูง โดยจะพิจารณาความเค้นทุกทิศทางที่กระทำกับวัสดุตามสมการ

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2}
 \tag{2.5.1}$$

โดยที่ σ_{von} คือ ความเค้นตามทฤษฎีความเสียหายของวอนมิสเสส

σ_x คือ ความเค้นอัดในแนวแกน X

σ_y คือ ความเค้นอัดในแนวแกน Y

σ_z คือ ความเค้นอัดในแนวแกน Z

τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน x และกระทำขนานกับแกน y

τ_{yz} คือ ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน y และกระทำขนานกับแกน z

τ_{zx} คือ ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน z และกระทำขนานกับแกน x

2.3.6 ตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor)

การออกแบบชิ้นส่วนเชิงกลสิ่งที่สำคัญคือค่าความเค้นต้องอยู่ในระยะที่ปลอดภัย เพื่อให้แน่ใจว่าปลอดภัยจริงจึงจำเป็นต้องมีการเลือกค่าความเค้นที่ยอมรับได้ (Allowable stress) เพื่อควบคุมให้ค่าของแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนไม่เกินค่าสูงสุดของวัสดุ หนึ่งในวิธีการที่จะได้มาซึ่งแรงที่ปลอดภัยคือการ

เลือกค่าคงที่ความปลอดภัย (factor of safety: F.S) คืออัตราส่วนระหว่างแรงที่ทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย (F_{fail}) ต่อแรงที่ยอมรับได้ (F_{allow}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$F.S. = \frac{F_{fail}}{F_{allow}} \quad (2.6.1)$$

แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ การคำนวณตัวประกอบความปลอดภัยคำนวณจาก

$$F.S. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{von}} \quad (2.6.2)$$

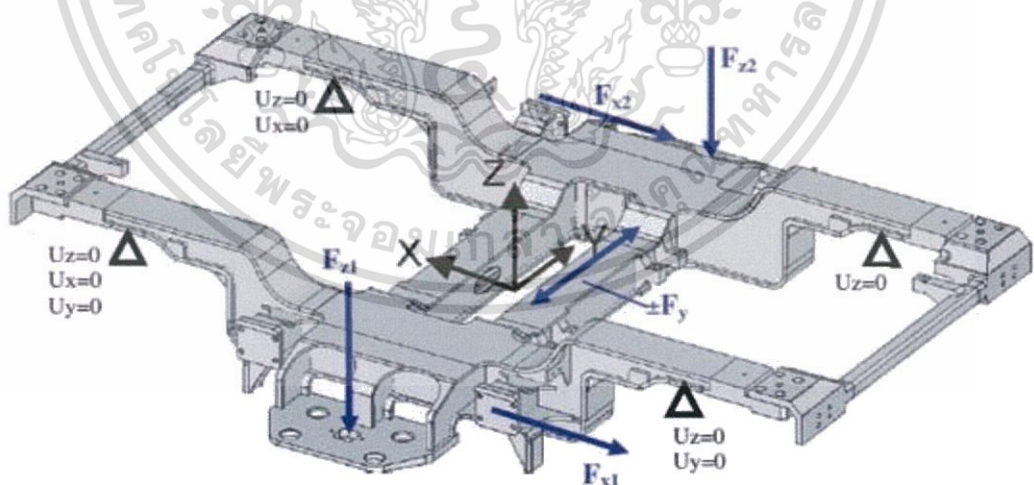
โดยที่

σ_y คือ ความเค้นที่จุดครากของวัสดุ ($\frac{N}{m^2}$)

σ_{von} คือ ความเค้นวอนมิสเซล ($\frac{N}{m^2}$)

2.3.7 มาตรฐาน EN 13749

การทดสอบแรงกดบนแบบจำลองโครงแคร์รถไฟ ทำการทดสอบโดยพิจารณาตามกรณีภาระน้ำหนัก ของ European standard EN 13749 ซึ่งแรงที่กดบนโครงแคร์ที่อยู่กับที่ แรงมีแรงกระทำเฉพาะแรงแนวตั้ง ซึ่งแรงที่ใช้ทดสอบเป็นแรงที่ตัวรถเปล่าตกลงที่โครงแคร์ ที่จุดรับน้ำหนักตามรูป



▲ Boundary condition with constraints:

- U_x displacement in X-direction
- U_y displacement in Y-direction
- U_z displacement in Z-direction

รูปที่ 2.11 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของโครงแคร์รถไฟ

(รูปจาก: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/609.pdf>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ F_x คือ แรงกระทำในทิศทางแกน X

F_y คือ แรงกระทำในทิศทางแกน Y

F_z คือ แรงกระทำในทิศทางแกน Z

U_x คือ การขจัดในทิศทางแกน X

U_y คือ การขจัดในทิศทางแกน Y

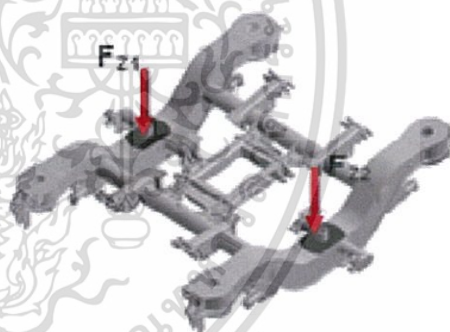
U_z คือ การขจัดในทิศทางแกน Z

การรับโหลดน้ำหนักประเภทที่ 1 โดยการรับโหลดเฉพาะแรงในแนวตั้ง ซึ่งมาจากน้ำหนักของตู้โดยสารขณะที่รถไฟหยุดนิ่ง โดยทำที่จุดดังรูป

Load case 1

$$F_{z2} = \frac{F_z}{2}, F_{z1} = \frac{F_z}{2}$$

โดยที่ F_z คือ น้ำหนักตู้โดยสาร



รูปที่ 2.12 แสดงกรณีรับภาระแบบที่ 1

(รูปจาก: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/609.pdf>)

การรับโหลดน้ำหนักประเภทที่ 2 เป็นการรับภาระจากการโคลงตัวของรถไฟโดยที่ค่าโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการโคลง (α) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเด็ง (β) โดยทำที่จุดดังรูป

$$\alpha = 0.1, \beta = 0.2 \text{ จาก European railways}$$

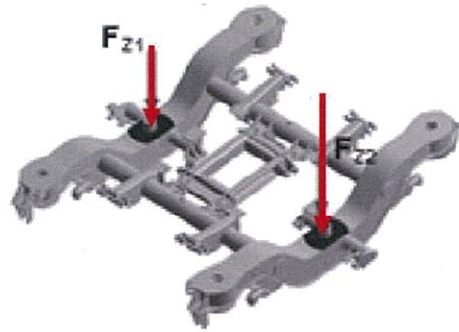
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load case 2

$$F_{z1} = (1 + \alpha + \beta) \frac{F_z}{2}$$

$$F_{z2} = (1 - \alpha + \beta) \frac{F_z}{2}$$

โดยที่ F_z คือ น้ำหนักตู้โดยสาร



รูปที่ 2.13 แสดงกรณีรับภาระแบบที่ 2

(รูปจาก: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/609.pdf>)

การรับโหลดน้ำหนักประเภทที่ 3 เป็นการวิเคราะห์แรงตรงด้านข้างขณะที่รถไฟกำลังเข้าทางโค้ง โดยการบิดของทางวิ่ง (Track twist) คือการออกแบบทางวิ่งในช่วงกำลังเข้าโค้ง เนื่องจากมีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางเพิ่มขึ้นแถมยังมีการแปรผันของแรงที่กระทำที่เพลาล้อขณะที่มีการบิดด้วย โดยที่ความเร่งสู่ศูนย์กลาง คือ $a_c = 0.1 \text{ m/s}^2$

$$F_y = (m_{total}) a_c \quad (2.7.1)$$

Load case 3

$$F_{z1} = (1 + \alpha + \beta) \frac{F_z}{2}$$

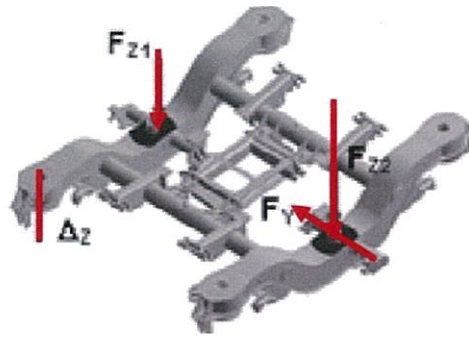
$$F_{z2} = (1 - \alpha + \beta) \frac{F_z}{2}$$

$\Delta z = \text{tracktwist } 0.5\%$ (ค่าสัมประสิทธิ์รางบิด)

$$F_y = m_{total} a_c$$

โดยที่ F_z คือ น้ำหนักตู้โดยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงกรณีรับภาระแบบที่ 3

(รูปจาก: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/609.pdf>)

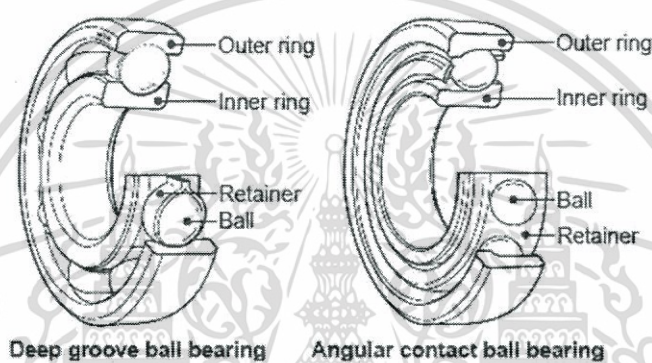


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 แบริ่ง (Bearing)

แบริ่งสัมผัส (Rolling – Contact Bearing) เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ใช้ในการช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงาน โดยโหลดจะถูกส่งไปส่วนต่างๆ ผ่านการสัมผัสของเม็ดลูกกลิ้งที่บรรจุอยู่ภายใน แรงเสียดทานเริ่มต้นในแบริ่งสัมผัสแบบกลิ้งจะมีค่ามากเป็น 2 เท่าของแรงเสียดทานขณะทำงาน ดังนั้น การรับโหลด ความเร็วในการหมุนและความหนืดของสารหล่อลื่นล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแบริ่งสัมผัสแบบกลิ้งทั้งสิ้น

แบริ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนคือ วงแหวนนอก (Outer Ring) วงแหวนใน (Inner Ring) ลูกปืนหรือเม็ดลูกกลิ้ง (Ball or Rolling element) และตัวยึดลูกกลิ้งแสดงดังรูป



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบของแบริ่ง

(รูปจาก: http://thninte.blogspot.com/2013/11/bearing-skf-bearing-iso-1_26.html)

อายุการใช้งานของแบริ่ง

เมื่อลูกกลิ้งของแบริ่งเข้าไปอยู่ในขอบเขตของโหลดจากการหมุน ทำให้เกิดความเค้นที่ผิวสัมผัสของแบริ่งกับราง หากแบริ่งนี้สะอาด มีการหล่อลื่นที่เหมาะสมและได้รับการติดตั้งโดยฉนักป้องกันฝุ่นและสิ่งสกปรกได้เป็นอย่างดีและถูกนำไปใช้งานภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม การล้าจะเป็นเพียงสาเหตุเดียวที่ทำให้แบริ่งเกิดความเสียหายเนื่องจากลูกกลิ้งในแบริ่งจะได้รับความเค้นนับเป็นล้านครั้ง ดังนั้นในการระบุอายุการใช้งานของแบริ่ง เราจึงต้องการปริมาณที่วัดได้ ซึ่งอาจเป็น

- จำนวนรอบที่วงแหวนในหมุน (เมื่อวงแหวนนอกถูกยึดติดอยู่กับที่) จนกระทั่งมีสิ่งบอเหตุว่าเกิดการล้า
- จำนวนชั่วโมงการใช้งานเมื่อแบริ่งมีความเร็วเชิงมุมมาตรฐาน จนกระทั่งมีสิ่งบอเหตุว่าเกิดการล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

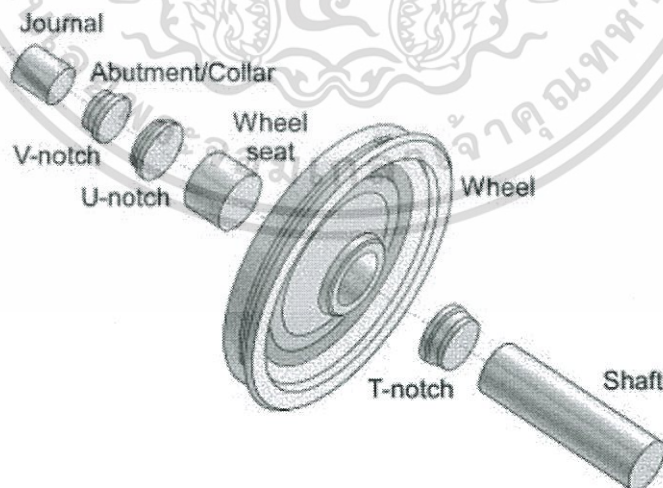
อายุการรับโหลดของแบร็งตามอัตราความนำเชือถือ

$$C_{10} = F_D \left(\frac{L_D n_D 60}{L_R n_R 60} \right)^{1/a} = F_D \left(\frac{X_D}{X_R} \right)^{1/a} \quad (2.8.1)$$

- a คือ ลูกกลิ้งแบบเม็ดกลม มีค่าเท่ากับ 3
- C_{10} คือ ความสามารถในการรับโหลดสถิต lbf หรือ kN
- F_D คือ โหลดที่แบร็งรองรับ lbf หรือ kN
- n_D คือ ความเร็วรอบของแบร็ง รอบ/ชั่วโมง
- L_R คือ อายุประเมินของแบร็งใน 1 ชั่วโมง
- n_R คือ ความเร็วรอบ (ดูได้จากแค็ตตาล็อก) รอบ/ชั่วโมง
- C เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวงแหวนด้านในหมุนและวงแหวนด้านนอกอยู่นิ่ง

2.3.9 การออกแบบเพลลา

เพลลา (Shaft) เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีการหมุน ซึ่งมักจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม ละใช้ในการส่งถ่ายกำลัง หรือถ่ายเทการหมุนระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ส่งกำลังจากเครื่องต้นกำลังขับไปยังเครื่องจักรกลที่ต้องการใช้งาน เพลลาเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ขณะใช้งานเพลลาจะอยู่ภายใต้แรงชนิดต่างๆเช่น แรงกด แรงดึง โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิดเพลลาแกน (axle) เป็นชิ้นส่วนที่ไม่มีการหมุนจึงไม่ต้องรับโมเมนต์บิดถูกใช้ในการรองรับเฟือง ล้อหมุน (wheel) จานโซ่ (sprocket) หรือพูลเลย์ (pulley)



รูปที่ 2.16 แสดงเพลลาของล้อรถไฟ

(รูปจาก: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630712002543>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกออกแบบเพลาจําเป็นจะต้องวิเคราะห์ความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนเพลลาและบริเวณใกล้เคียง โดยพิจารณารูปทรงเรขาคณิตของเพลลาบริเวณจุดนั้นๆโดยไม่จําเป็นต้องคำนึงถึงรูปทรงเรขาคณิตของเพลลาทั้งท่อน ในการออกแบบเพลลาจึงมีความเป็นไปได้ที่จะระบุตำแหน่งของจุดวิกฤต และหาขนาดของเพลลาเพื่อให้เป็นไปตามหลักการของความต้านแรง จากนั้นจึงกำหนดขนาดของเพลลาส่วนที่เหลือตามความต้องการในการรองรับเพลลาด้วยเหตุนี้ในการออกแบบเพลลาจึงมักจะเริ่มจากการพิจารณาความเค้นและความต้านแรงเป็นอันดับแรก จากนั้นเมื่อได้ขนาดของเพลลาจึงค่อยพิจารณาการทรุดตัวและความลาดเอียงของเพลลา

การออกแบบเพลลา (Shaft Design)

การออกแบบเพลลาส่วนมากจะเป็นการดัดแปลง ปรับปรุงเพลลาที่มีอยู่แล้ว ผลของการปรับปรุงมักจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเรขาคณิตเพียงเล็กน้อย การเริ่มต้นออกแบบจึงมักจะเริ่มจากการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาสม่ำเสมอการออกแบบเพลลาที่อยู่ภายใต้โหลดเปลี่ยนแปลง โดยใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดพิจารณาเพลลาที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัด M และโมเมนต์บิด T ซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา แสดงดังรูป



รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างเพลลาที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด
(รูปจาก: หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล)

การออกแบบเพลลาจะมีสูตรที่ใช้คำนวณคือ

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} \quad (2.9.1)$$

$$c = \frac{D}{2} \quad (2.9.2)$$

$$I_x = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2.9.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ σ_x คือ ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนแกน x

M คือ โมเมนต์ที่บริเวณพื้นที่หน้าตัดของเพลลา

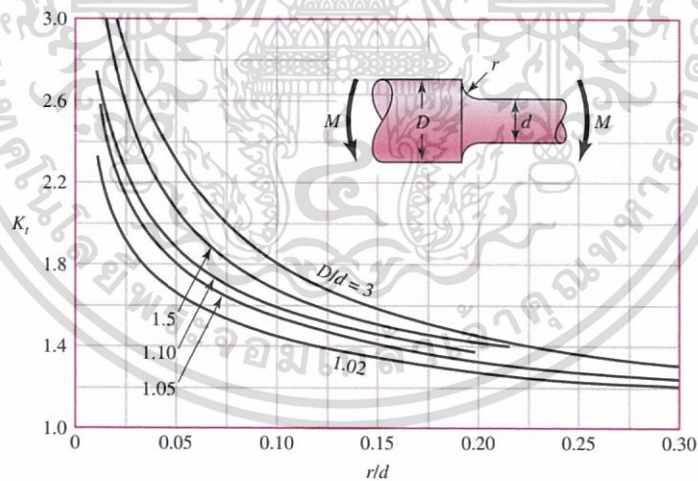
c คือ ระยะห่างจากจุดสะเทิน

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านโต

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านเล็ก

- เพลลาส่วนใหญ่รับแรงบิดเป็นหลักทำให้เกิดความเค้นเฉือนจากการบิด
- เพลลามักจะประกอบด้วยชิ้นส่วนที่รับส่งกำลังก่อให้เกิดแรงกระทำในทิศทางต่างๆแล้วเกิดเป็นภาระเช่นโมเมนต์ดัด
- ความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดไม่ว่าจะเป็นจากการบิดหรือการดัดจะมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านนอกของเพลลา
- เพลลาส่วนใหญ่มักมีองค์ประกอบที่จะเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหาย เช่น ร่องลิ้ม ป่าต่างระดับ และร่องแหวน ซึ่งต้องใช้การวิเคราะห์แบบความเค้นรวมศูนย์

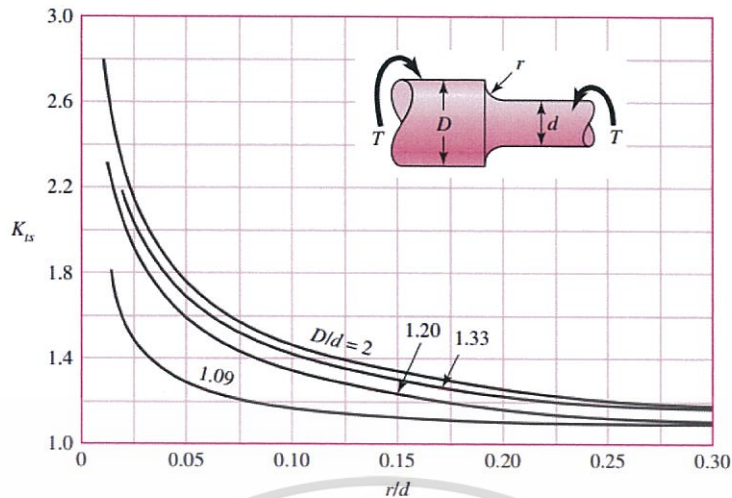


รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างกราฟ ความเข้มของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการดัด

(รูปจาก: Shigley's mechanical engineering design)

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_x \quad (2.9.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างกราฟ ความเข้มของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการบิด
(รูปจาก: Shigley's mechanical engineering design)

$$\tau_{max} = K_{ts} \tau_x \quad (2.9.5)$$

K_t คือ ค่าจตุรวมของความเค้นดัด (stress concentration)

K_{ts} คือ ค่าจตุรวมของความเค้นเฉือน (stress concentration)

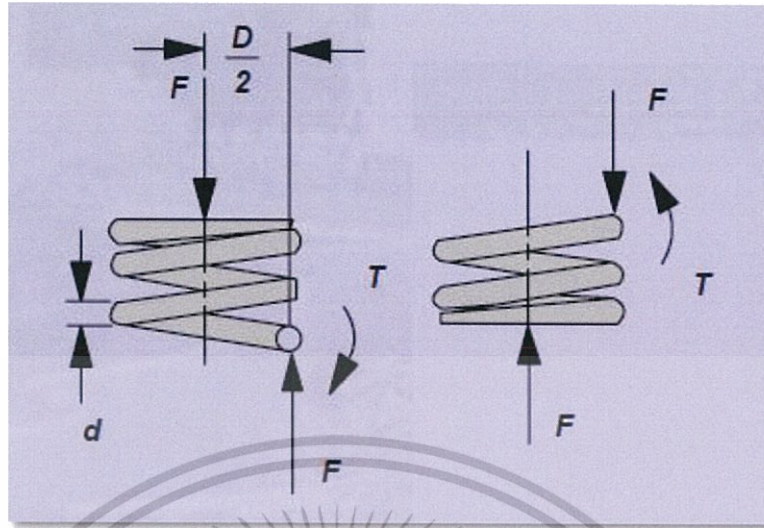
ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเพลลา แต่ในความเป็นจริงแล้ว เราหลีกเลี่ยงเสียไม่ได้เลยที่จะต้องมี การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในเล็กลง หรือจะต้องทำให้เพลลามีร่องลิ้น หรือ ทำฟิลเลต (Fillet) นั้นเอง เช่น เพลลาของมอเตอร์ที่ส่งกำลังให้ปั้มน้ำ , เพลลาที่สวมอยู่กับแบริ่ง เป็นต้น ซึ่งผลที่เกิดจากการทำฟิลเลต (Fillet) หรือ การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดนั้นจะทำให้เกิดจตุรวมของความเค้น (Stress Concentration) หรือเรียกว่าการรวมจุดความเค้น ตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดการเสียหายก่อนตำแหน่งอื่นของเพลลา

2.3.10 การออกแบบสปริงรับแรงกดสำหรับโหลดการล้า

สปริงเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่ต่างๆเป็นจำนวนมาก เช่น ควบคุมแรงกระทำอันเนื่องมาจากโหลด กระจายแรง ควบคุมระดับของการสั่นสะเทือน ควบคุมแรงและการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆสะสมพลังงานและค่อยๆปล่อยออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นในสปริงกด



รูปที่ 2.20 แสดงการรับโหลดในแนวแกนของสปริงกด

(รูปจาก: Mechanical+Springs.pdf)

จากรูป เป็นรูปของสปริงรับแรงกดขดเป็นรูปวงกลม โดยรับโหลดแรงกระทำในแนวแกน F ถ้ากำหนดให้ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดสปริงและ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่นำมาขดเป็นสปริงดังรูปสมมติว่าสปริงขดถูกตัดที่จุดใดจุดหนึ่ง แล้วแยกส่วนที่ถูกตัดออกมา และแสดงผลกระทบที่เกิดจากส่วนที่ถูกแยกออกมาด้วยแรงกระทำภายใน จะเห็นได้ว่าส่วนที่ถูกตัดออกมาจะมีแรงเฉือนโดยตรง F และโมเมนต์บิด $T = FD/2$ กระทำ

ความเค้นสูงสุดในเส้นลวดสามารถหาได้ด้วยวิธี Superposition ซึ่งจะได้

$$\tau_{\max} = \frac{T_r}{J} + \frac{F}{A} \quad (2.10.1)$$

ถ้านิยามค่าดัชนีสปริง(Spring Index) $C = \frac{D}{d} = \frac{D_m}{d}$

$$\tau = K_B \left(\frac{8FD}{\pi d^3} \right) \quad (2.10.2)$$

เมื่อ K_B คือแฟกเตอร์แก้ความเค้นดัด หาได้จาก

$$K_B = \frac{4C+2}{4C-3} \quad (2.10.3)$$

เมื่อ S_{ut} คือความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) โดยที่ $S_{sy} = 0.45S_{ut}$

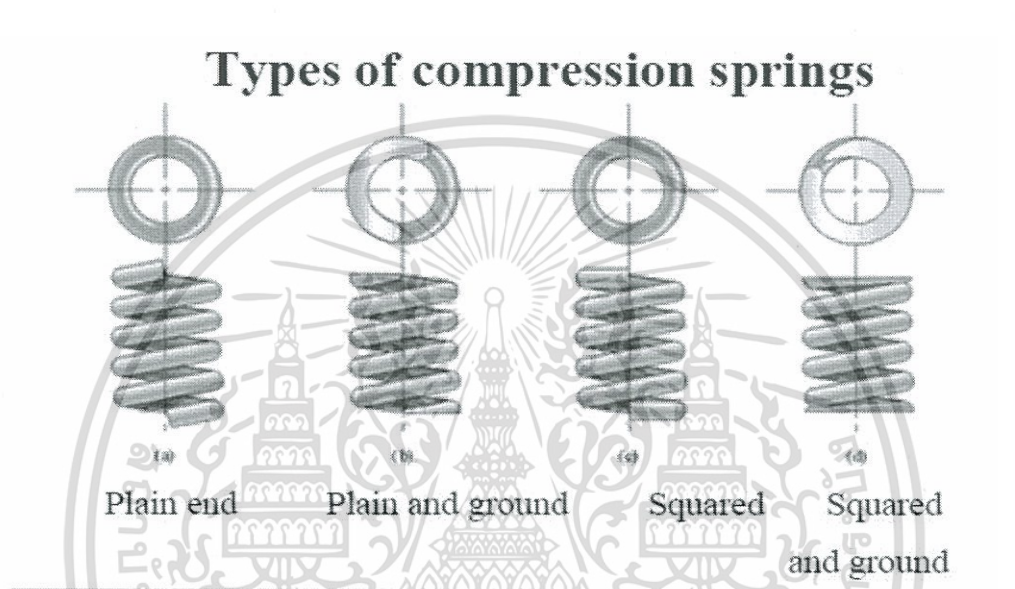
$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (2.10.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{\pi d^3 S_{sy}}{8K_B D} \quad (2.10.5)$$

$$k = \frac{(2.6^4)G}{8D^3 N_a} \quad (2.10.6)$$

สปริงรับแรงกด



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะปลายแบบต่างๆของสปริงขดรับแรง

(รูปจาก: <https://www.quora.com>)

- ก. สปริงปลายธรรมดา จะมีการแต่งปลายขดลวด
- ข. สปริงปลายธรรมดาเจียรระโน
- ค. สปริงปลายตรงหรือปลายขีด จะมีการแต่งให้มุมเฉียงของปลายสปริงเท่ากับศูนย์
- ง. สปริงปลายตรงเจียรระโน จะทำการเจียรระโนสปริงปลายตรงเพื่อให้สามารถถ่ายโหลดจากแผ่นปิดปลายสปริงได้อย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนับจำนวนขดทำงานของสปริงรับแรงกด (N_a =Number of Active coils)

Term	Type of Spring End			
	Plain	Plain and Ground	Squared or Closed	Squared and Ground
End Coil, N_e	0	1	2	2
Total Number of Active Coils, N_a	N_t	$N_t - 1$	$N_t - 2$	$N_t - 2$
Free Length, L_0	$pN_a + d$	$pN_a + p$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Solid Length, L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Pitch, p	$\frac{L_0 - d}{N_a}$	$\frac{L_0}{N_a + 1}$	$\frac{L_0 - 3d}{N_a}$	$\frac{L_0 - 2d}{N_a}$

N_t : Total number of coils

รูปที่ 2.22 แสดงการคำนวณลักษณะปลายแบบต่างๆของสปริงขดรับแรงกด

(รูปจาก: <http://www.kau.edu.sa/GetFile.aspx?id=246450&f=Mechanical%20Springs.pdf>)

การออกแบบสปริงโดยทั่วไป จะไม่คิดผลของแรงกระทำเยื้องศูนย์ที่เกิดจากลักษณะของปลายสปริงขดและไม่คิดผลกระทบของความเค้นตักค้างอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตที่ใช้กรรมวิธีทางความร้อน แต่จะใช้วิธีเพิ่มแฟกเตอร์ความปลอดภัยในการออกแบบให้ครอบคลุมถึงผลกระทบที่เกิดจากทั้ง 2 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ซึ่งในขั้นแรกนั้นจะเริ่มจากการหาข้อมูลเพื่อนำมาใช้ใน การวิเคราะห์ปัญหาในวิธีการออกแบบและการสร้างแบบจำลองแคร่รถไฟ (bogie) และแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร (Car Body) การทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างของแบบจำลองแคร่รถไฟ (bogie) และแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร (Car Body) โดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีระเบียบไฟไนท์เอลิเมนต์ รวมไปถึงการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกจริงตามที่กำหนดไว้เป็นต้น

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาส่วนประกอบของแคร่รถไฟและส่วนรองรับผู้โดยสารเพื่อนำมาวิเคราะห์ความแข็งแรง
2. ศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง
3. เลือกแคร่รถไฟชนิดสินค้า รุ่น Y25 wagon bogie
4. ทำการย่อขนาดแคร่รถไฟด้วยอัตราส่วน 1:8 และเขียนแบบส่วนประกอบของตัวแคร่รถไฟ
5. ทำการออกแบบส่วนรองรับผู้โดยสารจำลอง
6. ใช้การคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์ความแข็งแรงของตัวแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร
7. ใช้โปรแกรมเขียนแบบ ทำการสร้างแบบจำลองของแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสารในรูปแบบสามมิติ
8. ใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ทำการทดสอบหาค่าความเค้นของตัวแคร่รถไฟจำลองและส่วนรองรับผู้โดยสารจำลอง
9. ทำการสร้างชิ้นงานจริงของแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร
10. ทำการทดสอบหาค่าความเค้นของแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสารด้วยการรับภาระน้ำหนักบรรทุกทุกจริง
11. เปรียบผลการทดสอบระหว่างการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และการรับภาระน้ำหนักบรรทุกทุกจริง

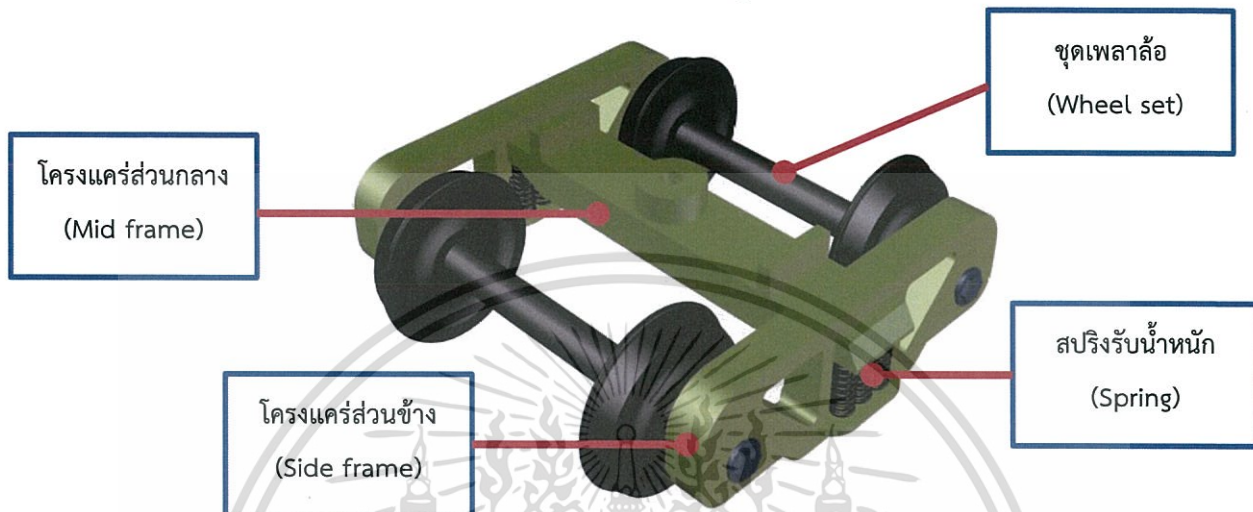
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์การทดลอง

3.3.1 แบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร

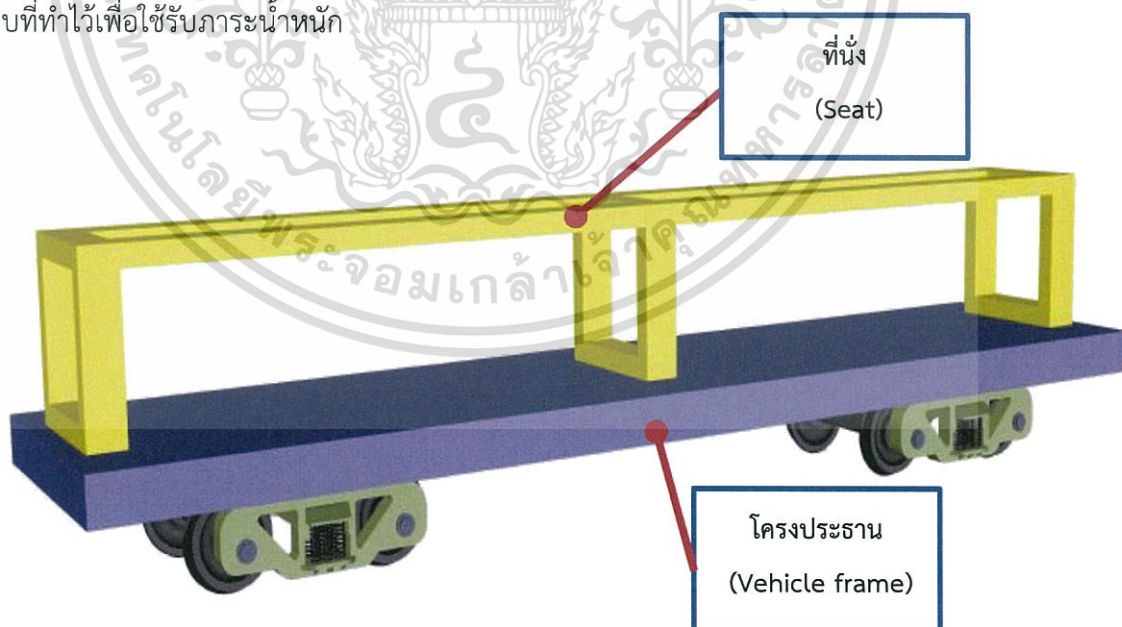
แคร่รถไฟชนิดสินค้า รุ่น Y25 wagon bogie สามารถแบ่งองค์ประกอบได้ดังนี้

1) แคร่รถไฟ (Bogie) ใช้เหล็ก SS400 ในการสร้างชิ้นงานขึ้นรูปด้วยการเครื่อง CNC



รูปที่ 3.1 แบบจำลองแคร่รถไฟที่ทำจากโปรแกรมเขียนแบบ

2) ส่วนรองรับผู้โดยสาร (Car Body) ใช้เหล็กแบนในการสร้างชิ้นงาน ด้วยการเชื่อมให้เป็นโครงสร้างตามแบบที่ทำไว้เพื่อใช้รับภาระน้ำหนัก



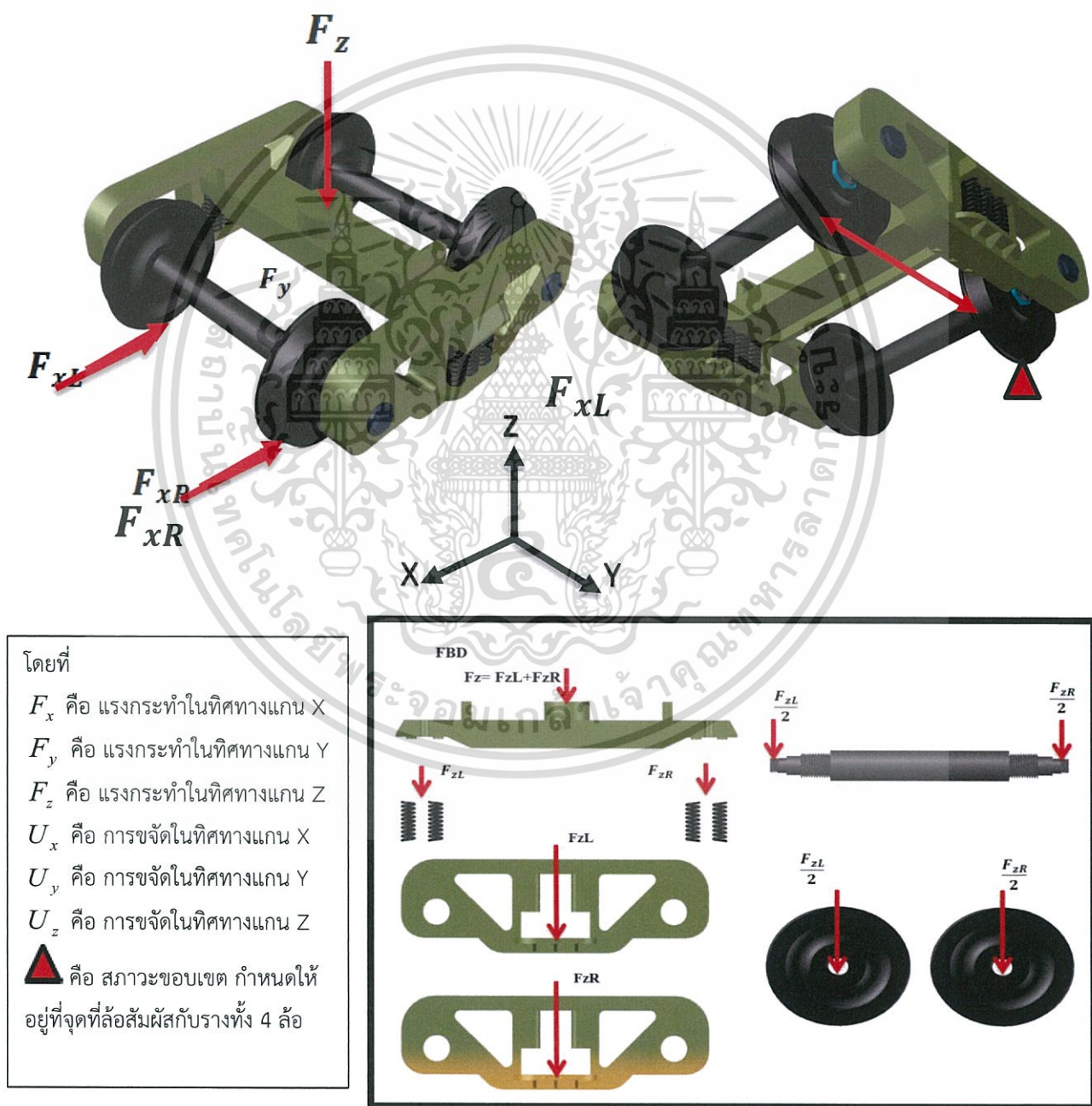
รูปที่ 3.2 แบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารที่ทำจากโปรแกรมเขียนแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

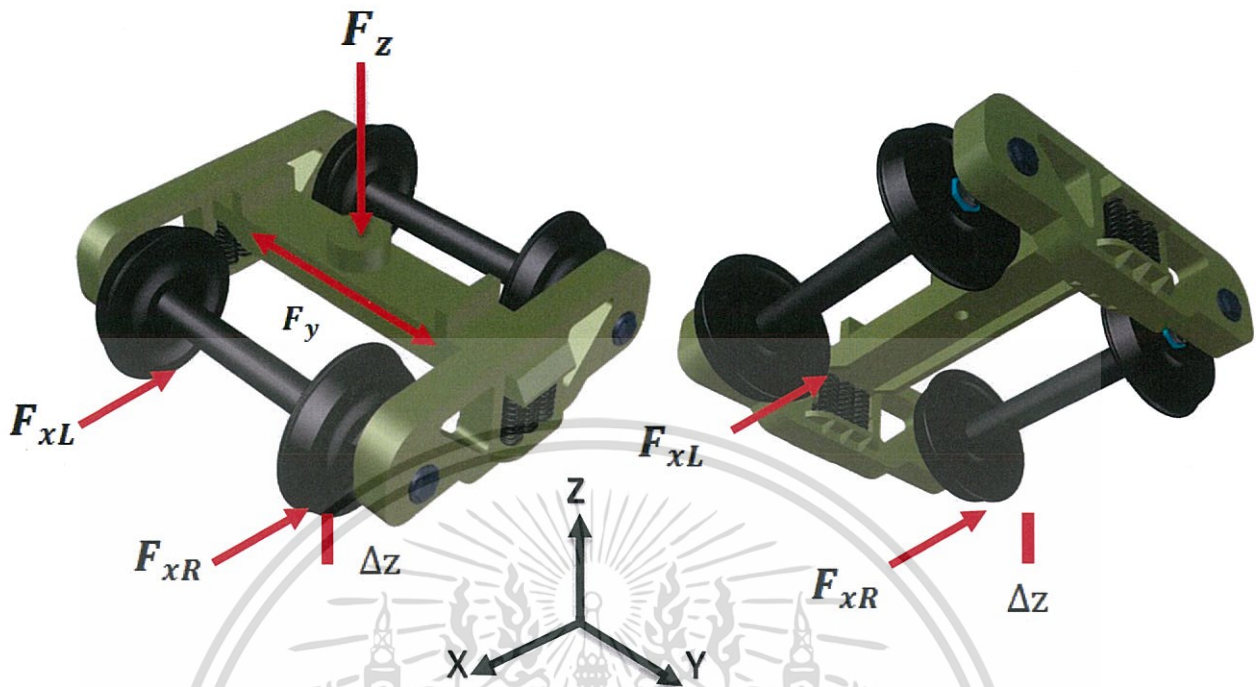
จะใช้โปรแกรมจำลองผลในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของตัวแคร่รถไฟจำลองและส่วนรองรับ ผู้โดยสารจำลองโดยจะใช้รูปแบบการวิเคราะห์แบบสถิตโดยจำเป็นต้องกำหนดแรงที่กระทำต่อแบบจำลองแคร่รถไฟในรูปแบบต่างๆตามมาตรฐาน EN 13749 ทั้ง 3 กรณีที่ได้นำมาอ้างอิงในการวิเคราะห์ โดยกำหนดให้การวิเคราะห์นี้เกิดขึ้นในขณะที่แบบจำลองนั้นหยุดนิ่งตามสภาพกรณีต่างๆไฟไนต์เอลิเมนต์

กรณีรับภาระแบบที่ 1



รูปที่ 3.3 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของแคร่รถไฟ กรณีที่ 1 ซึ่งเกิดจากน้ำหนักตู้ที่ตกลงแคร่รถไฟ โดยพิจารณาด้วยการใส่แรงแบบสถิต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีรับภาระแบบที่ 2



โดยที่

F_x คือ แรงกระทำในทิศทางแกน X

F_y คือ แรงกระทำในทิศทางแกน Y

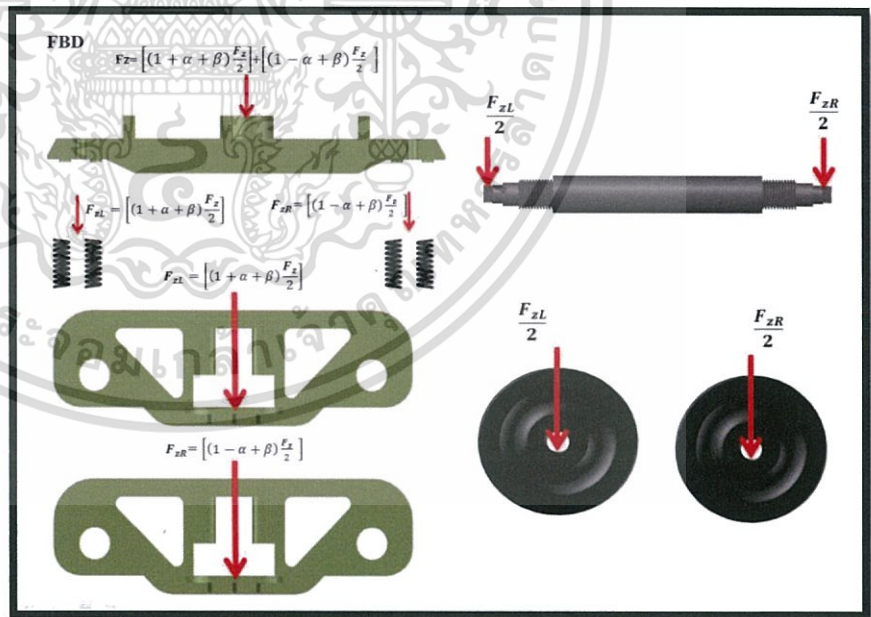
F_z คือ แรงกระทำในทิศทางแกน Z

U_x คือ การขจัดในทิศทางแกน X

U_y คือ การขจัดในทิศทางแกน Y

U_z คือ การขจัดในทิศทางแกน Z

▲ คือ สภาวะขอบเขต กำหนดให้
อยู่ที่จุดที่ล้อสัมผัสกับรางทั้ง 4 ล้อ

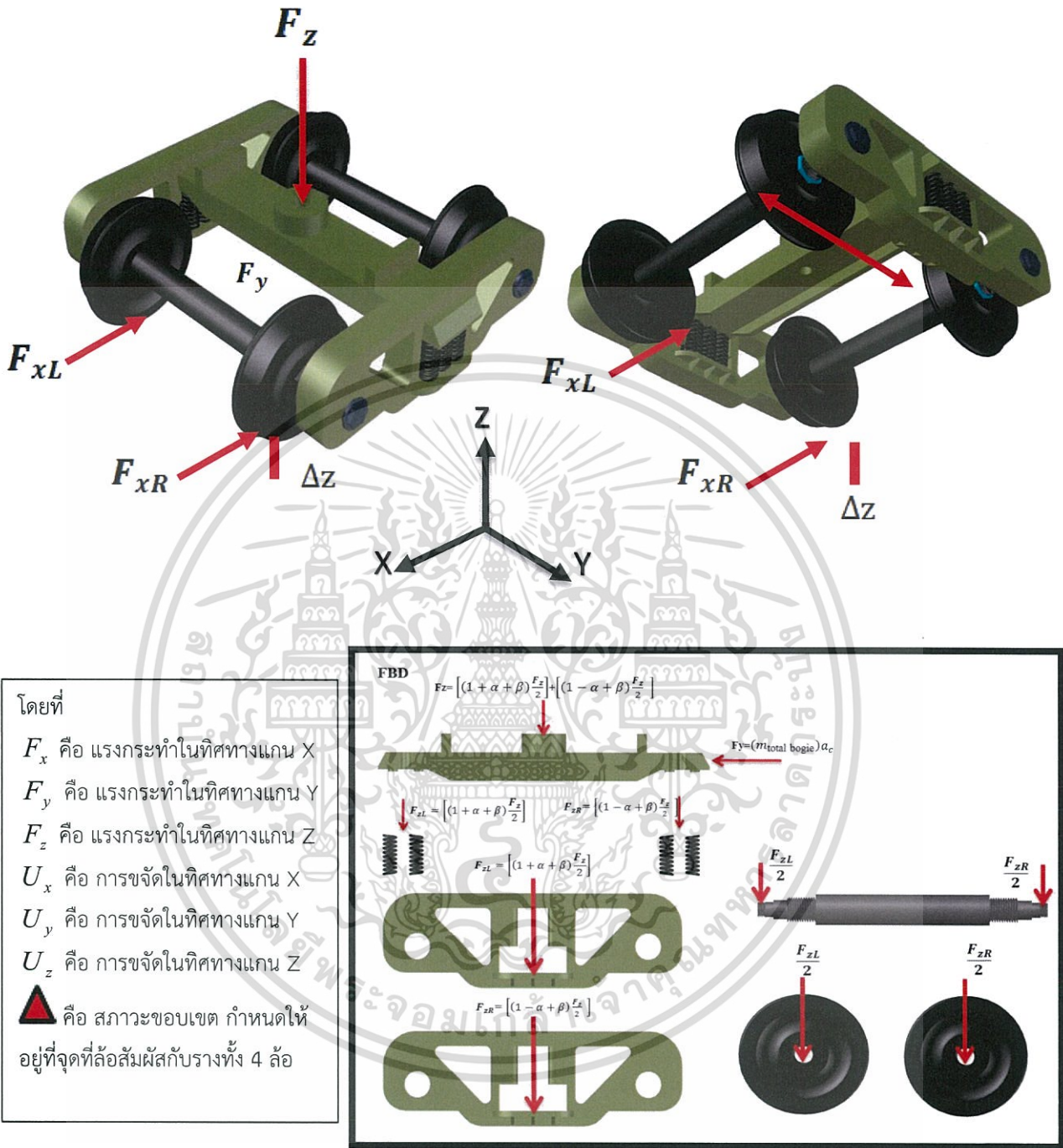


รูปที่ 3.4 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของแคร่รถไฟ กรณีที่ 2 การพิจารณาการโคลงตัวของแคร่รถไฟ

โดยพิจารณาด้วยการใส่แรงแบบสถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีรับภาระแบบที่ 3



รูปที่ 3.5 แสดงการรับแรงและเงื่อนไขการรองรับของแคร่รถไฟ กรณีที่ 3 มีการพิจารณาแรงที่กระทำด้านข้าง (F_y) ของโครงแคร่รถไฟจำลอง ซึ่งเกิดขึ้นในขณะรถไฟกำลังวิ่งในทางโค้งและใส่แรงแบบสถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบจะพิจารณาการรับภาระแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน EN 13749

ซึ่งจะพิจารณาการรับภาระของแรงแบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. แรงกดลงบนแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร ขณะหยุดนิ่งและใส่แรงแบบคงที่
2. แรงที่ทำให้เกิดการโคลงตัวของรถไฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การโคลง (α) และ ค่าสัมประสิทธิ์การกระด้าง (β) โดยที่ $\alpha = 0.1$ และ $\beta = 0.2$ โดยกำหนดตามมาตรฐาน EN 13749
3. แรงที่กระทำจากด้านข้าง (Lateral Force) ซึ่งเกิดในขณะที่รถไฟกำลังวิ่งเข้าทางโค้ง หรือเรียกว่า (Track twist) จะพิจารณาในขณะที่รถไฟเริ่มเข้าโค้ง และใส่แรงแบบใส่แรงแบบสถิต โดยที่ความเร่งสู่ศูนย์กลาง คือ $a_c = 0.1 \text{ m/s}^2$

$$F_y = (m_{total})a_c \quad (3.3.1)$$

การบิดของทางวิ่ง (Twist load) ของแคร่จำลอง

$$\begin{aligned} \text{Twist} &= 0.005 \times \text{wheelbase of bogie} \\ &= 0.005 \times 210 = 1.05 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

ระยะยกโค้งสูงสุด (ΔZ) ของแคร่จำลอง

$$\Delta Z = \frac{\text{Twist}}{2} = 0.525 \text{ mm} \quad (3.3.3)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงการใส่แรงตามกรณีการรับภาระตามมาตรฐาน EN13749 กำหนดให้รับน้ำหนัก 300 กิโลกรัม

กรณีการรับภาระแบบที่	F_{zR} (N)	F_{zL} (N)	F_x (N)	F_y (N)	ΔZ (mm)
1	1471.50	1471.50	0	0	0
2	1618.65	1912.95	0	0	0.525
3	1618.65	1912.95	0	309.21	0.525

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงเมื่อทดสอบกับแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร

ในการทดสอบความแข็งแรงของแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร มีอุปกรณ์ดังนี้

1. แคร่รถไฟจำลอง (Bogie)
2. ส่วนรองรับผู้โดยสารจำลอง (Car Body)
3. ตัววัดความเครียด (Strain Gauge)
4. กล่องต่อวงจรบริจ (Bridge box)
5. อุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียด (Strain gage amplifier)
6. มัลติมิเตอร์ (MultiMeter)
7. น้ำหนักมาตรฐาน (Standard weight)



รูปที่ 3.6 แคร่รถไฟจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ส่วนรองรับผู้โดยสาร



รูปที่ 3.8 ตัววัดความเครียด (Strain Gauge)



รูปที่ 3.9 กล่องต่อวงจรบริจ (Bridge box)

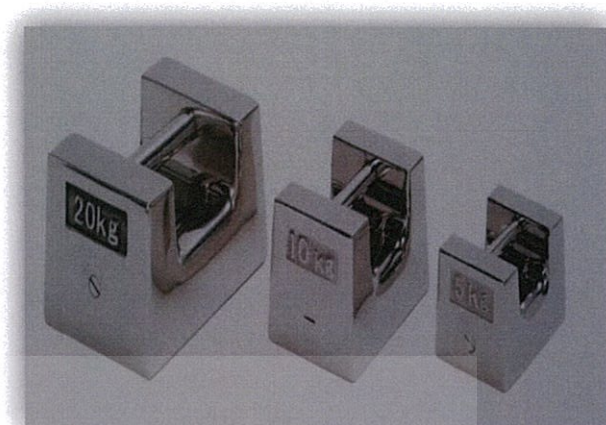


รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียด (Strain gage amplifier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปะยะอื่นใดหากการคำนวณหรือการวัดค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

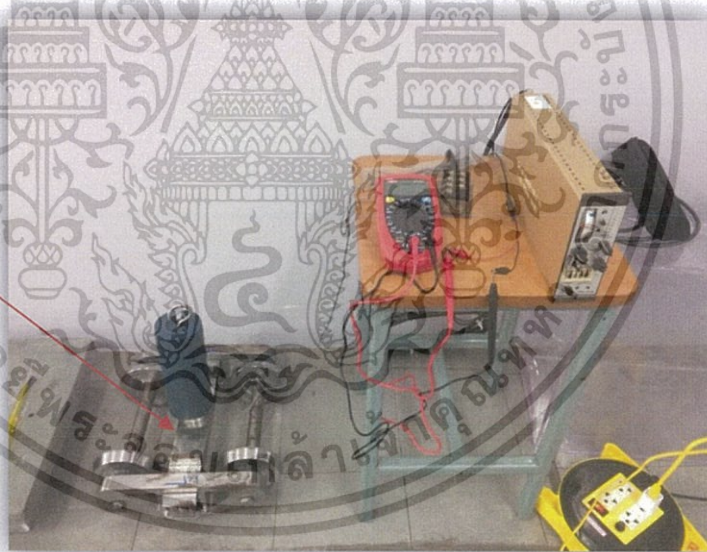


รูปที่ 3.11 มัลติมิเตอร์ (MultiMater)



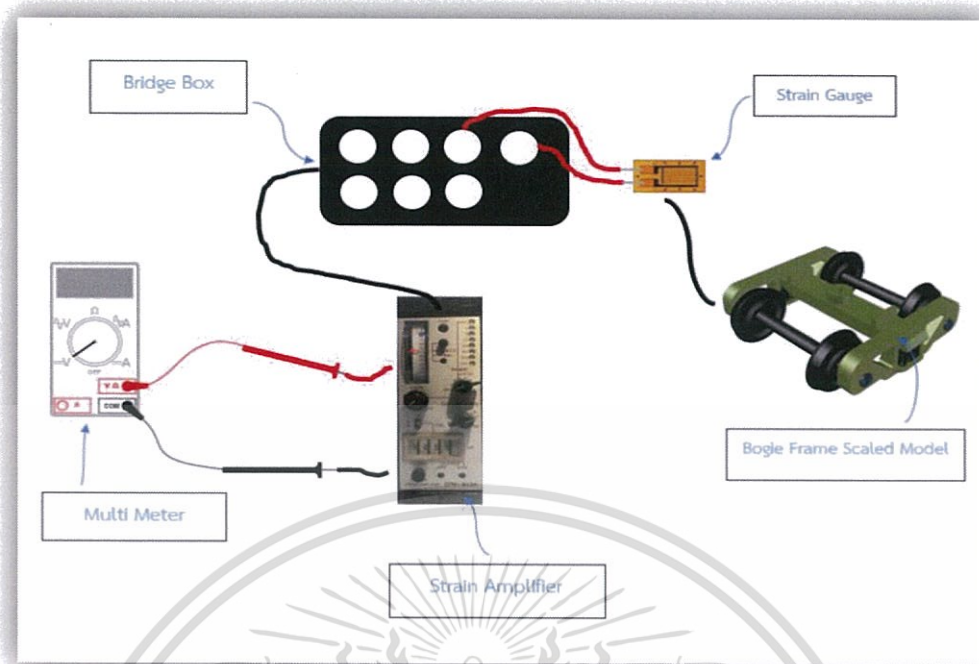
รูปที่ 3.12 น้ำหนักมาตรฐาน (Standard weight)

จุดที่ติดตั้งตัววัด
ความเครียด

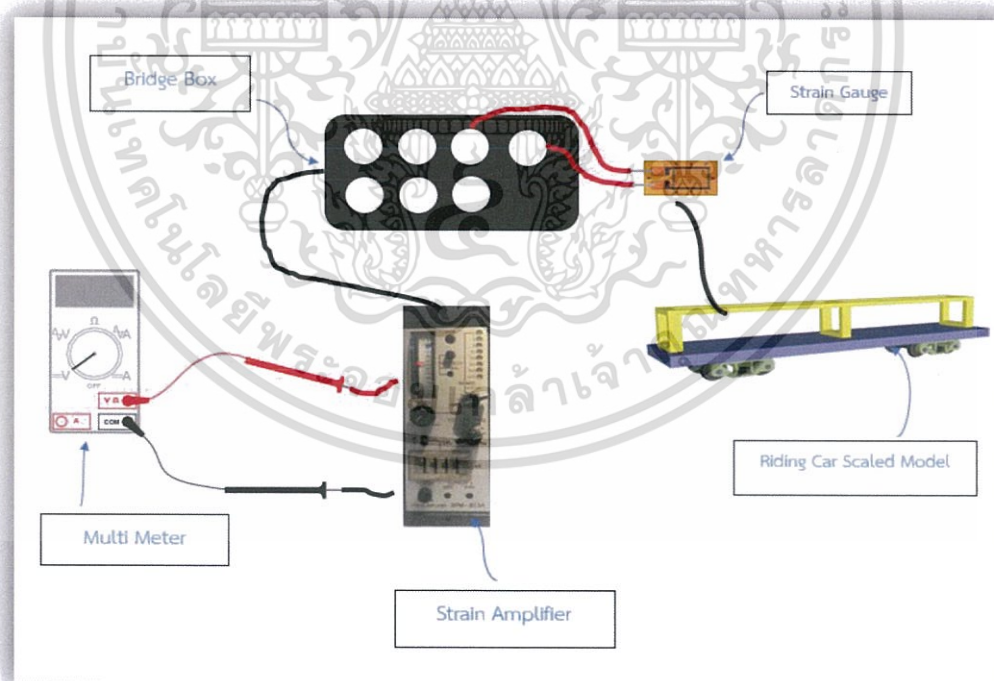


รูปที่ 3.13 แบบจำลองแคร่รถไฟที่ติดตั้งตัววัดความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง (Bogie)



รูปที่ 3.15 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง (Car Body)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error)

ความถูกต้องและความเชื่อถือของการทดลองพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ต้องมีปริมาณที่เป็นจริงและถูกต้องไว้เปรียบเทียบกับซึ่งค่าที่จะนำมาเปรียบเทียบกับคือค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองเป็นค่าที่เชื่อถือได้เพราะสามารถควบคุมตัวแปรได้ดีกว่าการทดลองจากชุดการทดสอบ

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{R_m - R_{th}}{R_{th}} \right| \times 100 \quad (3.5.1)$$

R_m = ค่าที่ได้จากการวัด

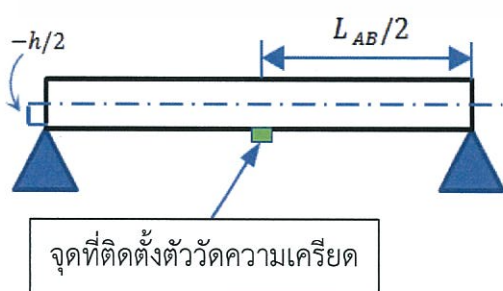
R_{th} = ค่าที่ได้จากทฤษฎี

3.3.6 การสอบเทียบตัววัดความเครียดโดยใช้ทฤษฎีการแอ่นตัวของคาน (Beam theory)

ขั้นตอนการสอบเทียบตัววัดความเครียด (Strain gauge)

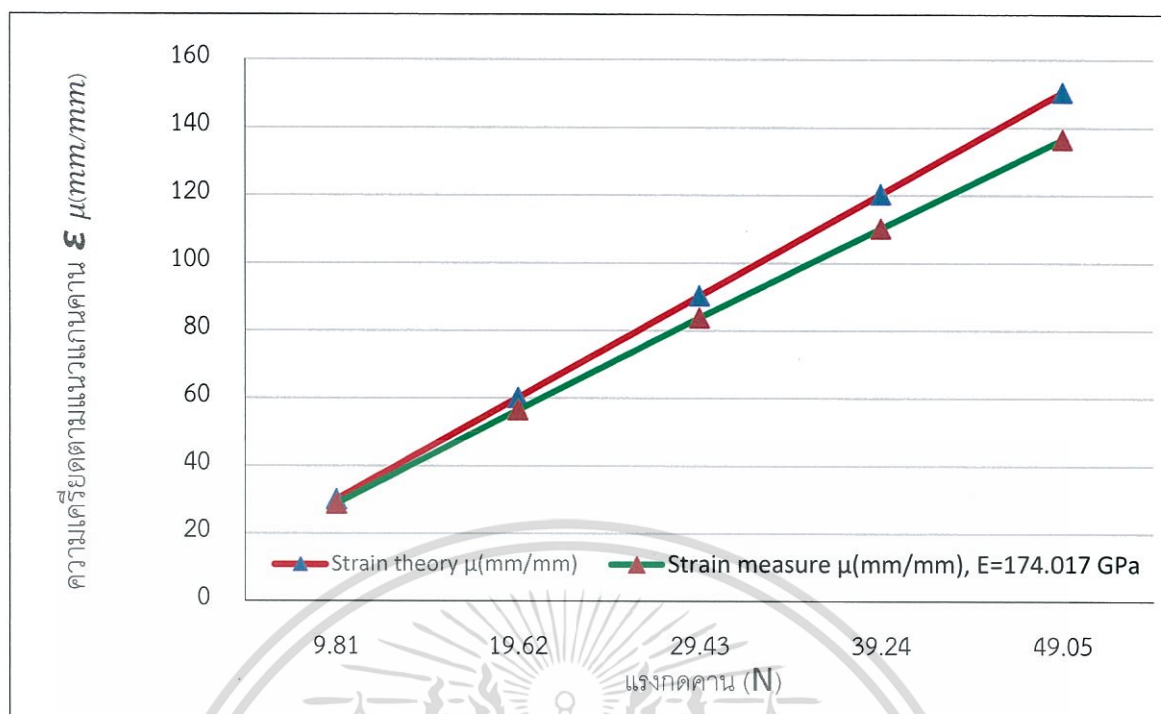
1. ติดตั้งชุดการทดลองวัดความเครียดในห้องทดลอง
2. อ่านค่าความเครียดชุดการทดลองวัดความเครียด
3. คำนวณความเครียดจากทฤษฎีการแอ่นตัวของคานโดยอภิปรายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.1 ในตำแหน่งเดียวกัน
4. ใช้ค่าความเครียดจากทฤษฎีการแอ่นตัวของคานและจากชุดการทดลอง เพื่อคำนวณกราฟความเครียดในการตรวจสอบความถูกต้อง

จากผลการทดลองสอบเทียบแล้ว จะได้ความสัมพันธ์คือ จากความเครียดจริง และความเครียดจากการทดลองดังสมการที่ (3.5.2) และแสดงในกราฟรูปที่ (3.18)



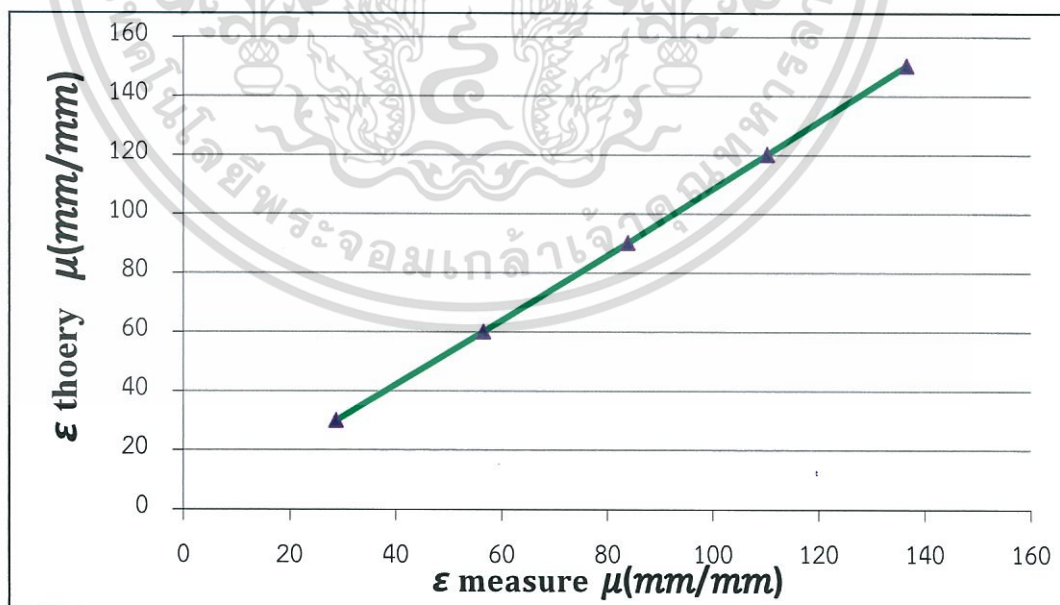
รูปที่ 3.16 แลปการทดลองที่ใช้ปรับค่าตัววัดความเครียด (Strain gauge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงค่าความเครียดจากทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดจากการวัด

จากทดลองพบว่าค่าความเครียดจากทดลองและค่าความเครียดจากทฤษฎีการคำนวณนั้นมีความแตกต่างกันดังนั้นจึงต้องมีกาสอบเทียบค่าเพื่อหาความคาดเคลื่อนระหว่างการทดลองและทฤษฎีการคำนวณโดยที่ $E = 174.017 \text{ GPa}$ ได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของโลหะด้วยวิธีการดึง (Tensile test of Metallic Materials)



รูปที่ 3.18 กราฟการสอบเทียบค่าจากการคำนวณกับค่าจากการทดลองเพื่อหาสมการ การปรับค่า

$$\epsilon_{\text{measure, calibration}} = 1.1177\epsilon_{\text{measure}} - 2.6974 \text{ หน่วย } \mu(\text{mm}/\text{mm}) \quad (3.5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลลัพธ์

4.1 บทนำ

หลังจากทราบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและขั้นตอนในการดำเนินการทดสอบแล้ว ในบทนี้จะทำการหาผลที่ได้จากการทำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองและผลจากการที่ได้ทดสอบด้วยชุดทดสอบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจากทดสอบผ่านโปรแกรมจำลองและผลจากการที่ได้ทดสอบด้วยชุดทดสอบของรูปแบบการรับภาระน้ำหนักตามกรณีการรับภาระน้ำหนักในแบบต่างๆ

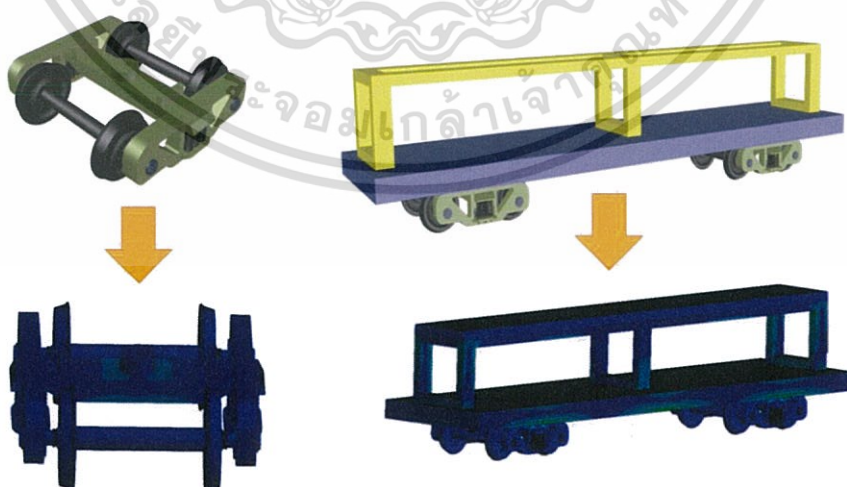
4.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1. การคำนวณผลการทดสอบโดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์
2. การคำนวณผลการทดสอบจากการทดสอบด้วยชุดทดสอบ

4.2.1 การคำนวณผลการทดสอบโดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

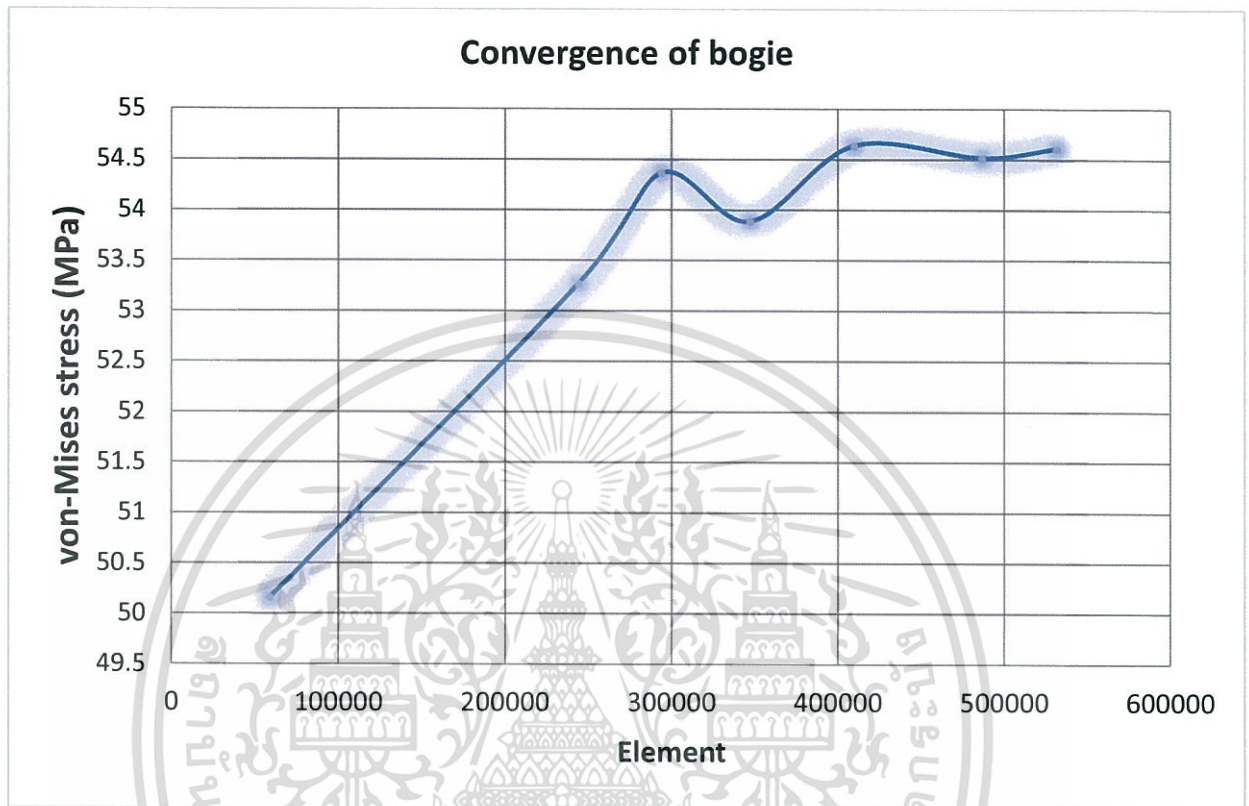
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมรูปแบบปัญหาคือการหาฟังก์ชันการกระจายตัวของตัวแปรในระบบสามมิติ โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน, วิเคราะห์ปัญหารับภาระที่กระทำกับของชิ้นงาน การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติม เช่น อยากทราบค่าความเค้นหลัก เป็นต้น



รูปที่ 4.1 การทดสอบแบบจำลองโดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการหาการลู่เข้าคำตอบ (Mesh Convergent) ของเอลิเมนต์เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมจากกราฟ ดังนั้นจึงใช้ จำนวนเอลิเมนต์ 400000 เอลิเมนต์ ในการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการลู่เข้าคำตอบ (Mesh Convergent)

4.2.2 การคำนวณผลการทดสอบจากการทดสอบด้วยชุดทดสอบ

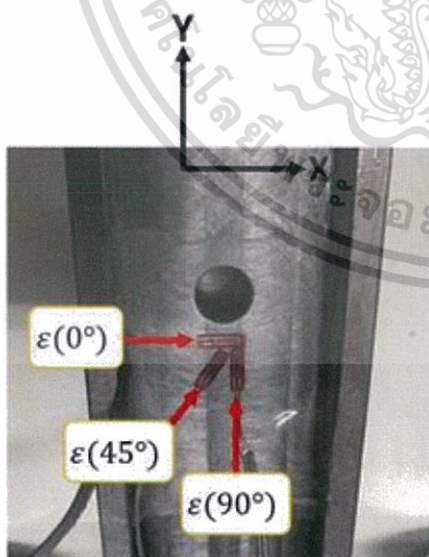
ในการติดตั้งตัววัดความเครียดบนพื้นผิวเพื่อนต้องการหาความเครียดภายในวัตุนั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาในการติดตั้งตัววัดความเครียดบนพื้นผิวเพื่อนต้องการหาความเค้นภายในวัตุนั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาการเปลี่ยนรูปของความเค้นในแนวระนาบดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่แรงที่เกิดขึ้นจริงในวัตุนั้นสามารถหาได้โดยตัดวัตถุรอบๆให้เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เนื่องมาจากการติดตั้งตัววัดความเครียดนั้นถูกติดตั้งในแนวระนาบบนพื้นผิวของวัตถุซึ่งเป็นผิวหน้าของลูกบาศก์จากทฤษฎีความเค้นในระบบ 3 มิติ 2.3.2 เนื่องจากการติดตั้งตัววัดความเครียดนั้นเกิดขึ้นแค่ระนาบเดียวของลูกบาศก์ จึงทำให้พิจารณาหาความเครียดที่เกิดขึ้นได้โดยการวัดด้วยตัววัดความเครียดที่ติดตั้งอยู่บนพื้นผิววัตถุเพียงระนาบเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

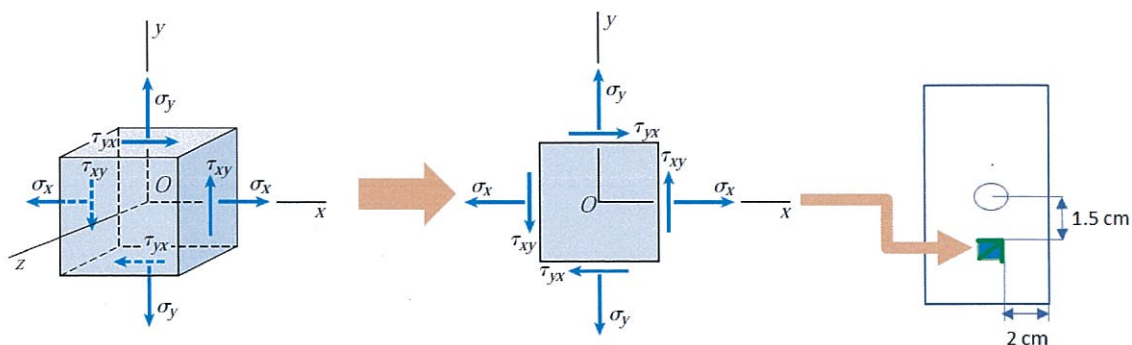
ในการติดตั้งตัววัดความเครียดบนพื้นผิววัตถุนั้นสามารถติดตั้งตามรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการวัดค่าความเครียดจากตัววัดความเครียดที่ติดตั้งบนผิวของวัตถุ 2.3.4 โดยความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดึงจะถูกวัดได้โดยใช้ตัววัดความเครียด แต่ความเครียดตั้งฉากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมักจะถูกรวัดโดยใช้และการคำนวณ โดยใช้สมการการเปลี่ยนแปลงความเครียด สมการที่ 2.4.1 สภาวะหน่วยแรงแบบความเครียดระนาบเนื่องจากการจัดวางตัววัดความเครียดเป็นแถบบนพื้นผิวของวัตถุไม่สามารถวัดความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับผิวของโครงสร้างได้โดยทั่วไปแล้วการติดตั้งตัววัดความเครียดวางตัวเป็นแถบจะมีลักษณะเป็นสามตัวที่ติดตั้งอยู่ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

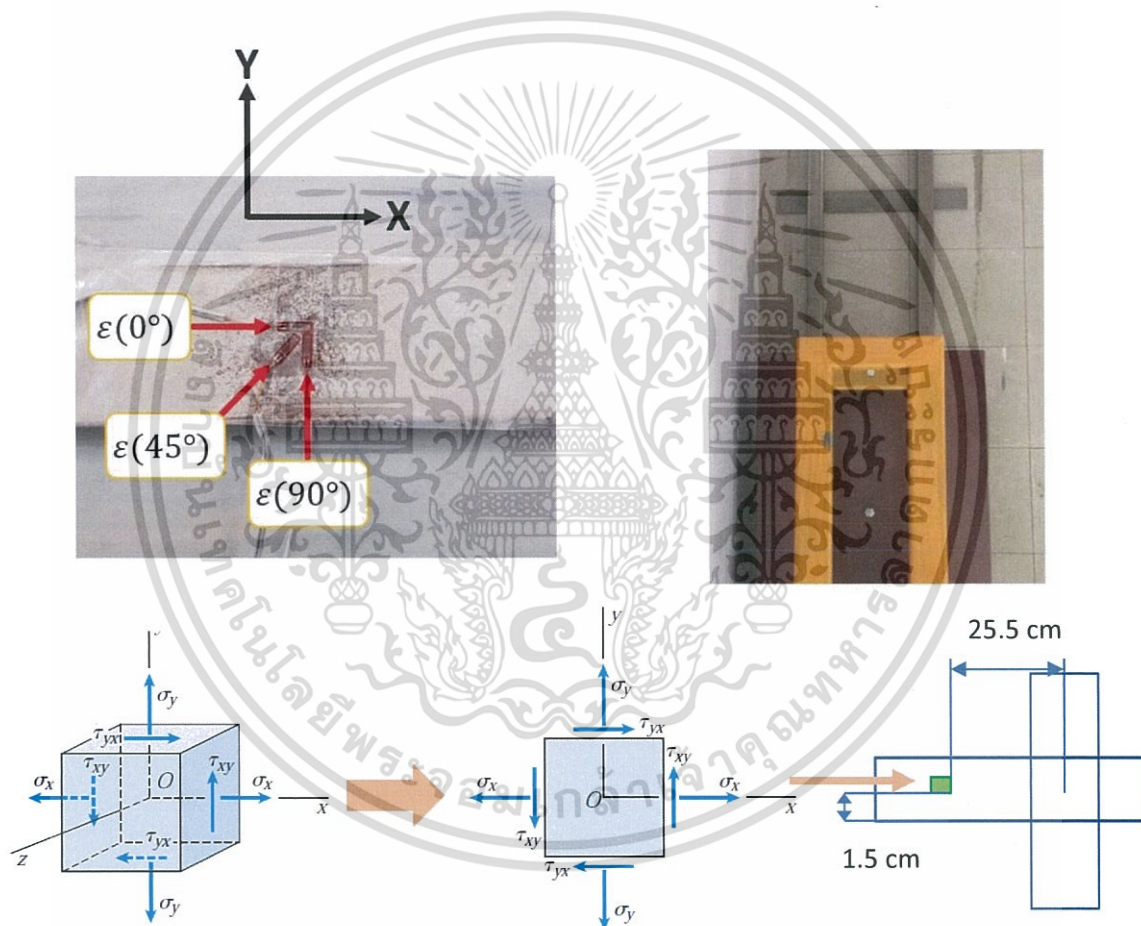
1. ติดตั้งแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนักลงบนพื้นห้อง
2. ติดตั้งตัววัดความเครียด ณ ตำแหน่งดังภาพที่ 4.1 ลงบนจุดรับน้ำหนักของแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนักในรูปแบบเดียวกัน โดยติดตั้งตัววัดความเครียดเป็น 3 ตัวดังนี้
 - 2.1 มุมของตัววัดความเครียด 0 องศา กับแกน X
 - 2.2 มุมของตัววัดความเครียด 45 องศา กับแกน X
 - 2.3 มุมของตัววัดความเครียด 90 องศา กับแกน X



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดความเครียด (strain gauges) ของแบบจำลองแครร์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดความเครียด (strain gauges) ของแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ติดตั้งตัววัดความเครียดเข้ากับวงจรถับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียด
4. ติดตั้งโวลต์มิเตอร์เข้ากับอุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียด โดยจะเปลี่ยนค่าความต้านทานที่รับมาให้เป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงค่าที่แสดงออกมาเป็นค่าความเครียด
5. เปิดอุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียดกับโวลต์มิเตอร์และปรับกำลังขยาย
6. ทำการใส่แรงลงบนแบบจำลองแคร่รถไฟและแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนัก โดยใส่มวลทั้งหมด 5 ค่า ตั้งแต่ 5 ถึง 25 กิโลกรัม ตามดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 ในบทที่ 3
7. นำค่าความเครียดที่อ่านได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณตัววัดความเครียด มาแทนลงในสมการ 3.3.5 เพื่อทำการสอบเทียบตัววัดความเครียด และจะได้ค่าความเครียดทั้ง 3 แกน
8. หลังจากได้ค่าครบแล้วก็จะสามารถนำไปหาค่าความเค้นวอนมิสเชสได้

4.3 ผลการทดลอง

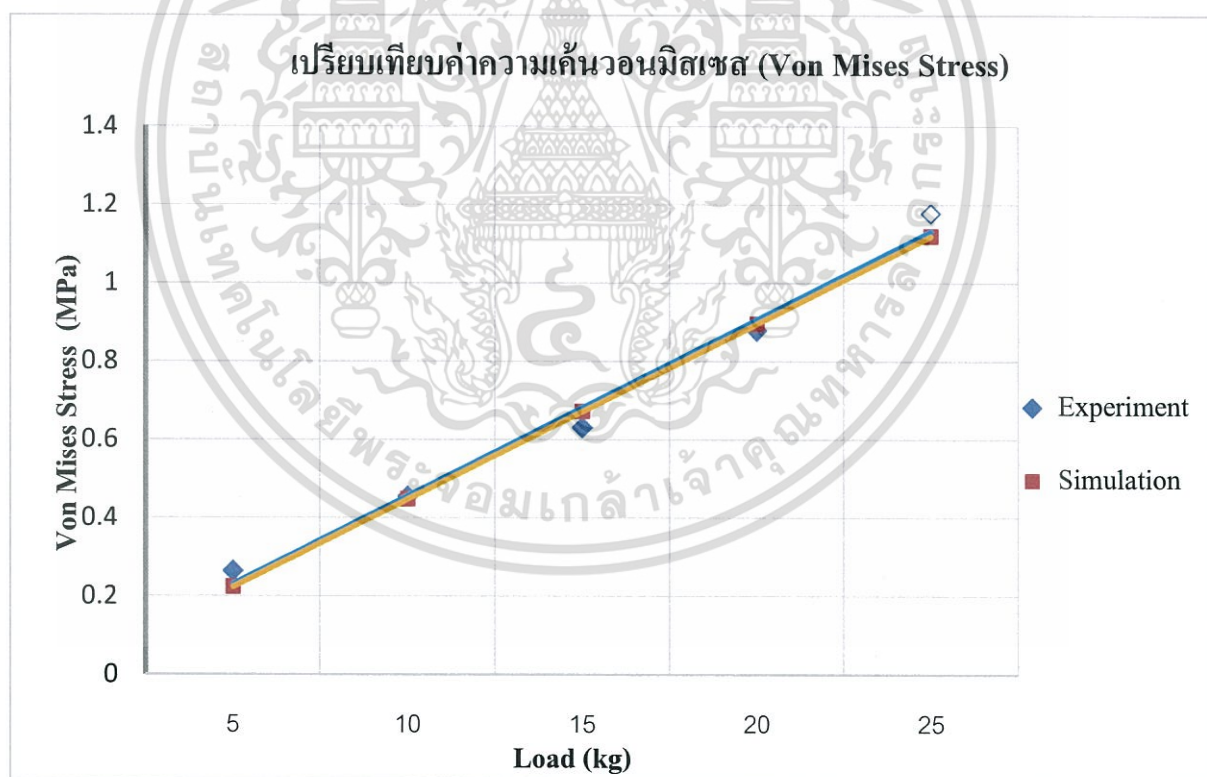
ผลของการศึกษาในครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ผลการทดลอง ได้แก่ การเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของแคร่กับผลของโปรแกรมจำลอง การเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนักกับผลของโปรแกรมจำลอง การทำนายน้ำหนักที่แบบจำลองของแคร่รถไฟที่สามารถรับได้ และผลการจำลองในโปรแกรมของแคร่รถไฟขนาดจริงตามรูปแบบของ กรณีภาชนะน้ำหนักต่างๆ ,การทำนายน้ำหนักที่แบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนักที่สามารถรับได้ และผลการจำลองในโปรแกรมของแคร่รถไฟขนาดจริงตามรูปแบบของ กรณีภาชนะน้ำหนักต่างๆ

4.3.1 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิสเชสระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของแคร่รถไฟกับผลของการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อทำการทดลองวัดค่าความเค้นวอนมิสเชส ที่ตำแหน่งดังรูปที่ 4.1 แล้วกำหนดภาระจากน้ำหนัก 5-25 กิโลกรัม และใส่แรงแบบสถิต โดยใช้ชุดการทดลองในการทดสอบดังรูปที่ 3.14 และใช้โปรแกรมจำลอง ในการวิเคราะห์จำนวน 6 กรณีตามมาตรฐาน EN 13749 และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการใช้โปรแกรมจำลอง แสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเค้นวอนมิสของแคร่รถไฟ (Bogie) จากการทดลองและการจำลองในโปรแกรมจำลองโดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนคำนวณจากสมการที่ (3.3.5)

มวลของภาระ (kg)	การจำลอง (MPa)	การทดลอง (MPa)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
5	0.224	0.2647	15.38
10	0.448	0.455	1.54
15	0.672	0.631	6.50
20	0.896	0.879	1.93
25	1.12	1.179	5.00



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิสจากโปรแกรมจำลองและชุดการทดลองของแบบจำลองแคร่รถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิกซ์ระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของแคร่รถไฟ โดยแสดงวิธีการคำนวณในภาพผนวก (ค) กับผลของโปรแกรมจำลอง ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.5 และหาค่าความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ 3.3.5 ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 1.54% ที่มวลของภาระเท่ากับ 10 กิโลกรัม และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ 15.38% ที่มวลของภาระเท่ากับ 5 กิโลกรัม กราฟการทดลองจริงกับกราฟทดสอบจากโปรแกรมมีค่าความเค้นวอนมิกซ์ต่อน้ำหนักมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

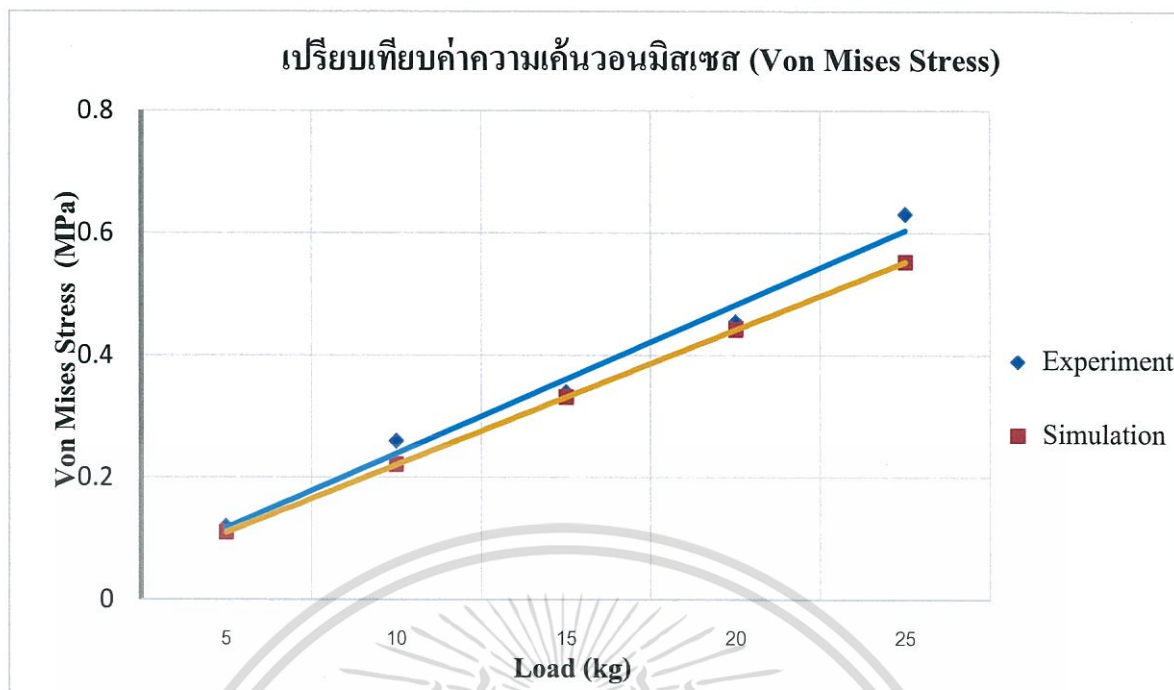
4.3.2 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิกซ์ระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารกับผลของกับผลของการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรมจำลองเมื่อทำการทดลองวัดค่าความเครียด ที่ตำแหน่งดังรูปที่ 4.2 แล้วกำหนดภาระจากน้ำหนัก 5-25 กิโลกรัม และใส่แรงแบบสถิต โดยใช้ชุดการทดลองในการทดสอบดัง รูปที่ 3.15 และใช้โปรแกรมจำลอง ในการวิเคราะห์จำนวนทงกรณี และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการใช้โปรแกรมจำลอง แสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเครียดของส่วนรองรับผู้โดยสาร จากการทดลองและการจำลองในโปรแกรมจำลอง โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนคำนวณจากสมการที่ (3.3.5)

มวลของภาระ (kg)	การจำลอง (MPa)	การทดลอง (MPa)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
5	0.1106	0.1201	7.83
10	0.2213	0.2607	14.88
15	0.3319	0.3400	2.38
20	0.4425	0.4549	2.73
25	0.55317	0.6310	12.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



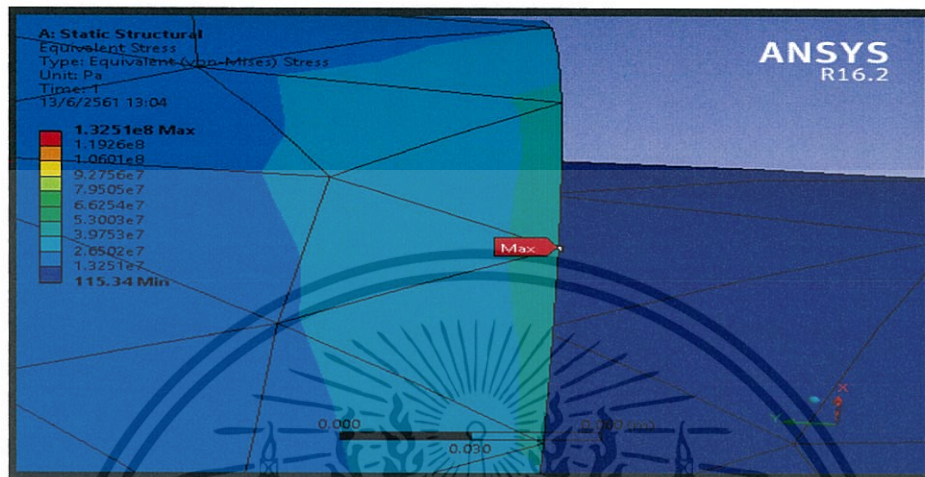
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิสเชสจากโปรแกรมจำลอง และชุดการทดลองของแบบจำลองส่วนรองรับผู้โดยสาร

ผลการเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิสเชสระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสาร กับผลของโปรแกรมจำลอง ได้ผลดังตารางที่ 4.2 และสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.6 และหาค่าความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ (3.3.5) ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 2.38% ที่มวลของภาระเท่ากับ 15 กิโลกรัม และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ 14.88% ที่มวลของภาระเท่ากับ 10 กิโลกรัม กราฟการทดลองจริงกับกราฟทดสอบจากโปรแกรมมีค่าความเค้นวอนมิสเชสต่อน้ำหนักมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

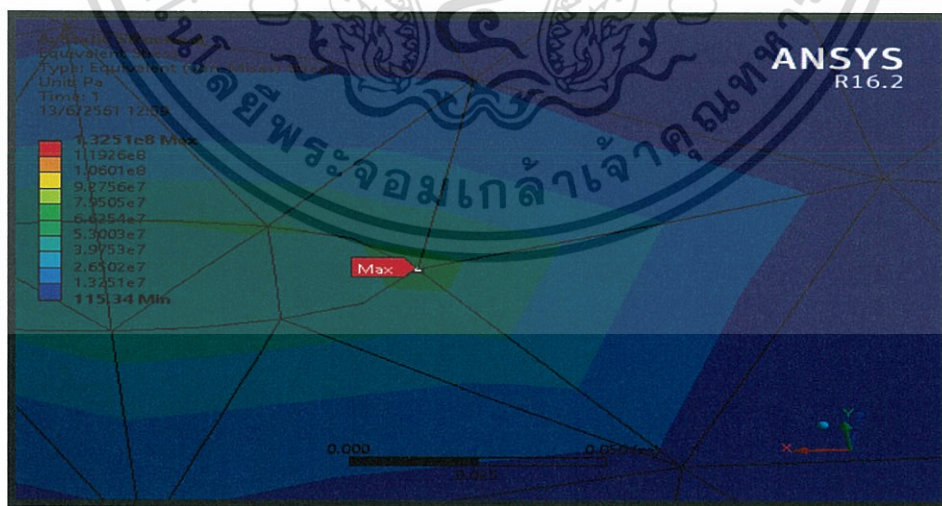
4.3.3 ผลการทำนายน้ำหนักที่แบบจำลองของแคร่รถไฟที่สามารถรับได้โดยวิธีการจำลองโดยโปรแกรมจำลองตามรูปแบบของกรณีรับภาระแบบต่างๆตามมาตรฐาน EN 13749

4.3.3.1 กรณีรับภาระแบบที่ 1 การวิเคราะห์แรงในแนวตั้ง ซึ่งเกิดจากน้ำหนักตู้โดยสารกดลงแคร่ขณะหยุดนิ่งและใส่แรงแบบสถิตย์ โดยกำหนดมวลของภาระเท่ากับ 300 กิโลกรัม

หมายเลข 1 คือ บริเวณเพลลาของแครร์รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 43.58 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 6.65 เพราะตรงจุดปลายของเพลลาคือเป็นจุดรวมของความเค้น(Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

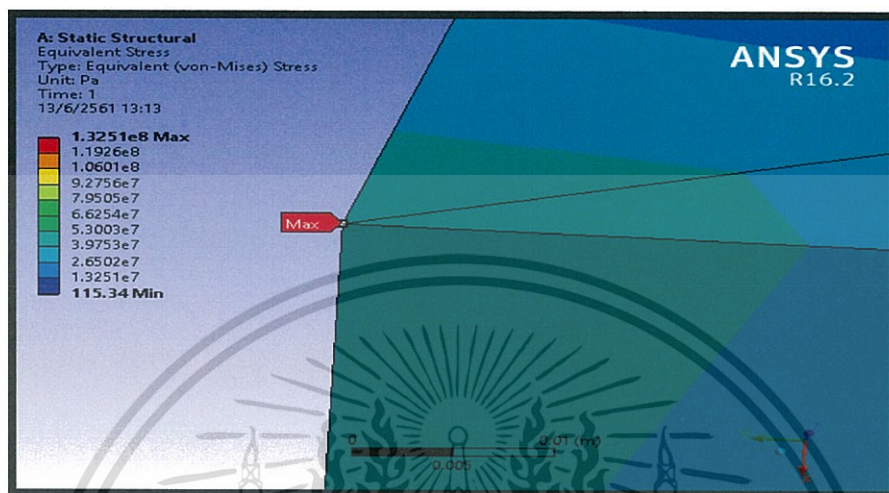


หมายเลข 2 คือ บริเวณผิวล้อของแครร์รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 58.88 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.92 เพราะตรงเป็นจุดที่แรงลงตรงจุดที่ล้อสัมผัสกับรางรถไฟซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 3 คือ บริเวณปลายโครงแครงกลางแต่ละฝั่งของแครงรถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 49.88 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5.81 เพราะตรงจุดปลายขอบของโครงแครงกลางเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

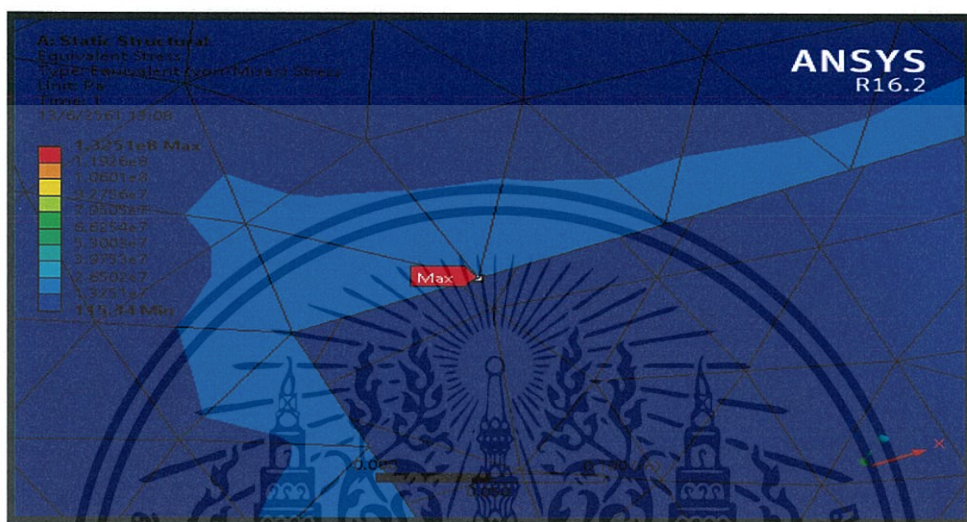


หมายเลข 4 คือ บริเวณขดสปริงแต่ละตัวของแครงรถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 49.21 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5.89 เพราะตรงเป็นจุดที่แรงกดลงบนสปริงแต่ละตัวจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุด



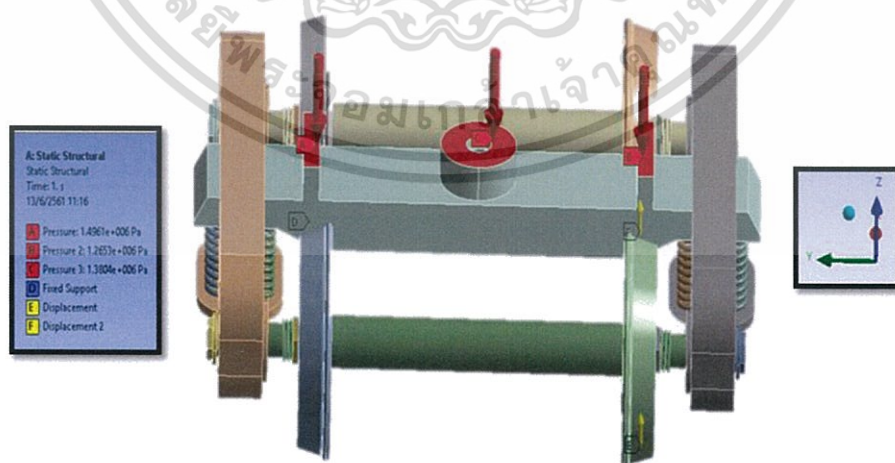
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 5 บริเวณโครงครัดด้านข้างของแคร่รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมีเซสมากที่สุด เท่ากับ 24.88 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 11.65 เพราะตรงจุดขอบด้านในของ โครงครัดด้านข้างเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน



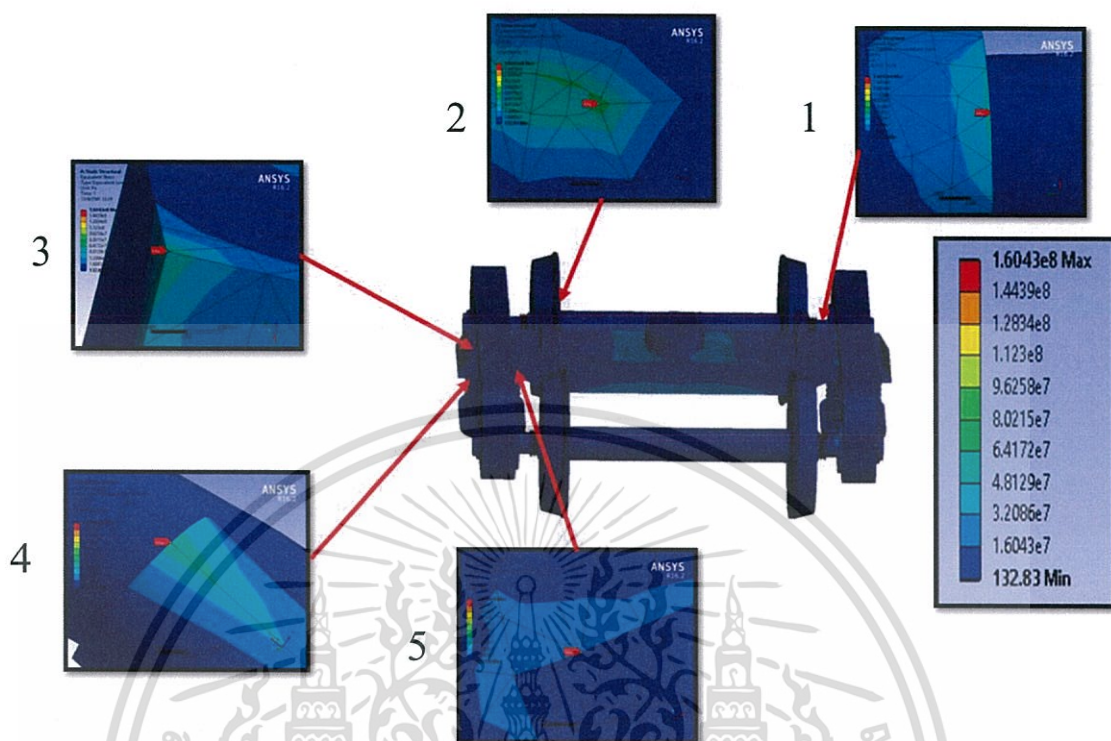
4.3.3.2 กรณีรับภาระแบบที่ 2 การพิจารณาการโคลงตัวของรถไฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน (α) กับค่าสัมประสิทธิ์การกระเด็ง (β) มาพิจารณาด้วยและใส่แรงแบบสถิตย์ โดยกำหนดมวลของภาระเท่ากับ 300 กิโลกรัม

ก)



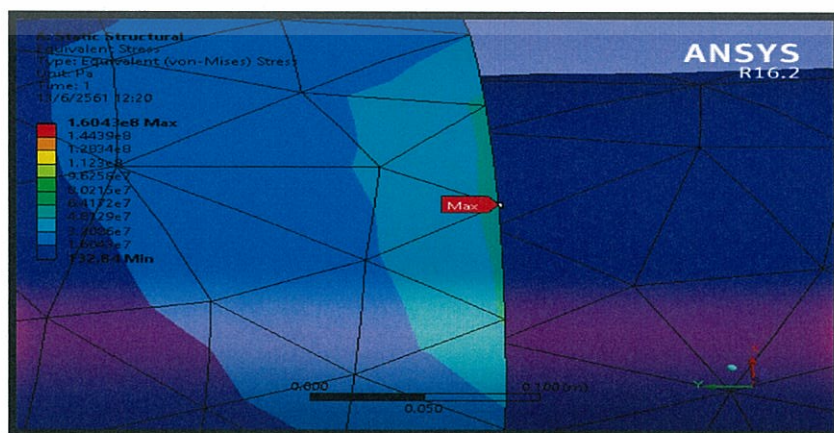
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข)

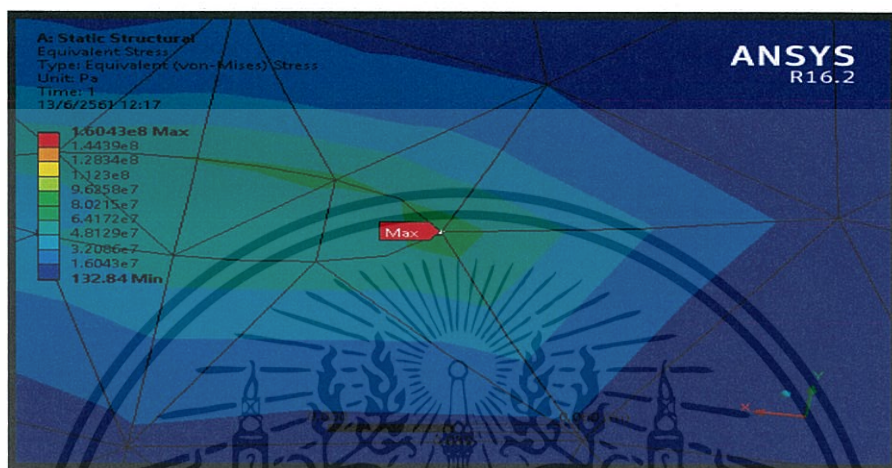


รูปที่ 4.8 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support) ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแคร่รถไฟที่รับน้ำหนัก

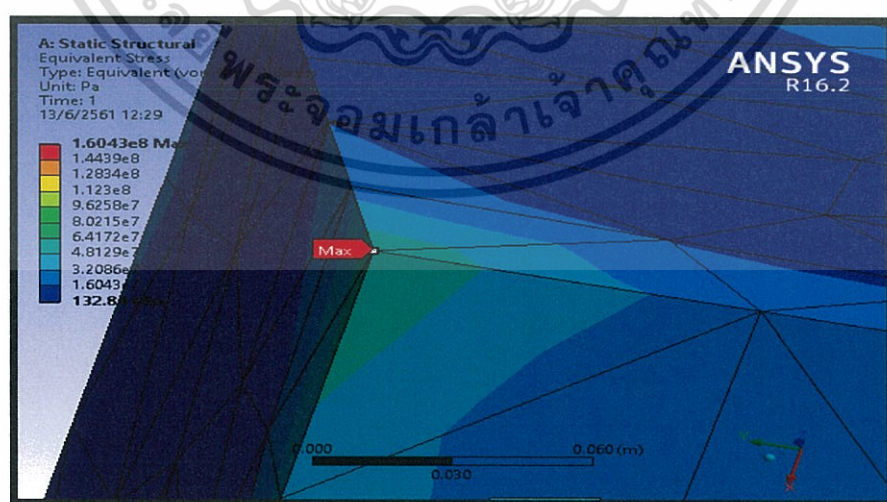
หมายเลข 1 คือ บริเวณปลายขอบเพลาดึงขวาของแคร่รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 51.78 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5.6 เพราะแคร่รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางซ้ายจึงทำให้เกิดแรงจากโมเมนต์ดัดจากฝั่งซ้ายรวมกับแรงที่กดลงบนเพลาดึงขวาและปลายเพลาล้อเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดตรงปลายขอบของเพลาดึงขวาจะเกิดความเสียหายก่อน



หมายเลข 2 คือ บริเวณผิวล้อฝั่งซ้ายของแครร์รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 71.63 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.04 เพราะแครร์รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางซ้ายจะทำให้แรงทั้งหมดตกลงล้อฝั่งซ้ายและที่ผิวจุดสัมผัสของล้อมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุด

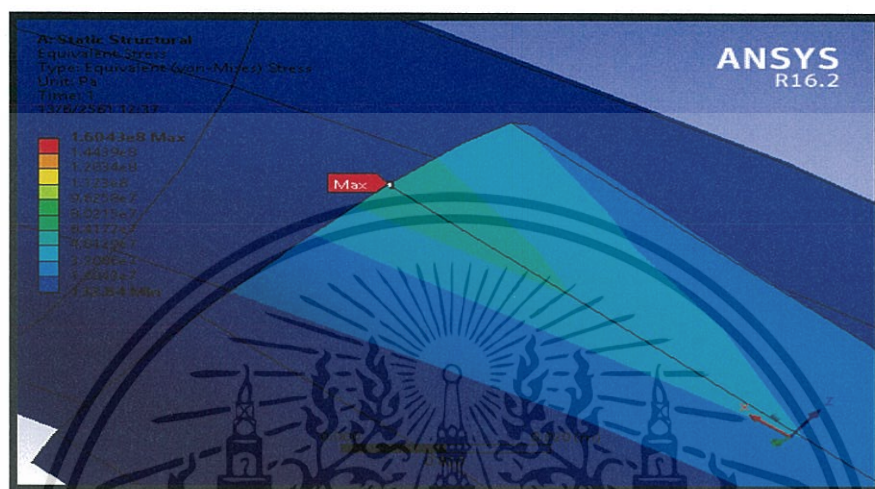


หมายเลข 3 คือ บริเวณปลายโครงแครร์กลางฝั่งซ้ายของแครร์รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 61.09 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.74 เพราะแครร์รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางซ้ายซึ่งตรงจุดปลายขอบฝั่งซ้ายของโครงแครร์กลางเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

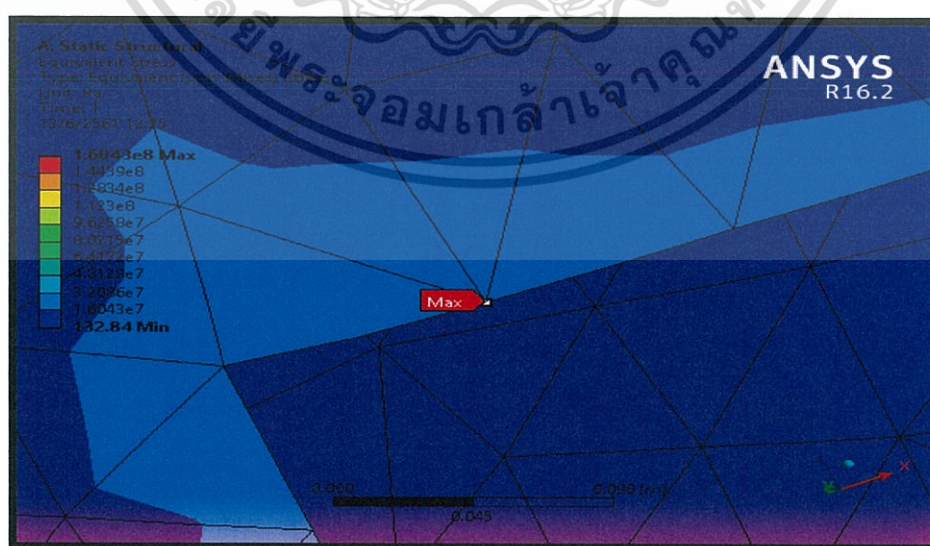


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 4 คือ บริเวณขดสปริงแต่ละตัวฝั่งซ้ายของแคร่รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 60.42 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.79 เพราะแคร่รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางซ้ายจะทำให้แรงกดลงบนสปริงแต่ละตัวของฝั่งซ้ายมากกว่าจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุด



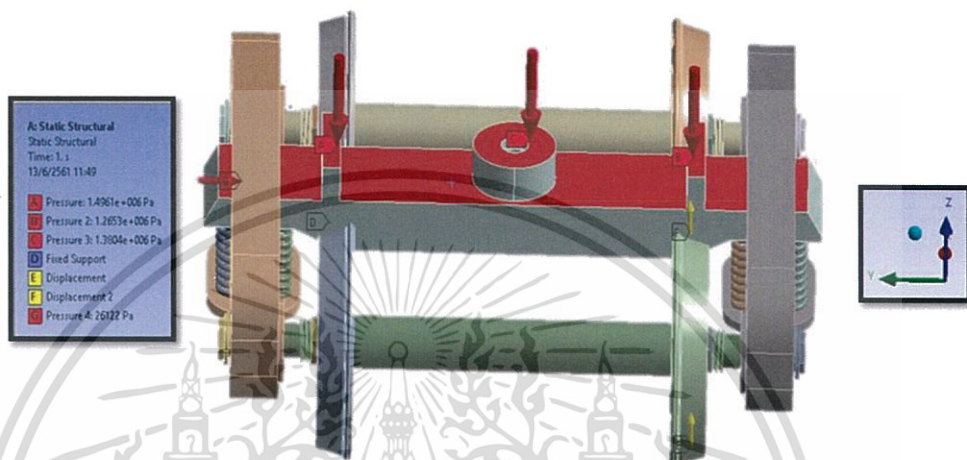
หมายเลข 5 คือ บริเวณโครงแคร่ด้านข้างฝั่งซ้ายของแคร่รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 30.17 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 9.61 เพราะแคร่รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางซ้ายซึ่งแรงกดลงปลายขอบฝั่งซ้ายตรงขอบด้านในของโครงแคร่ด้านข้างมากกว่าและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน



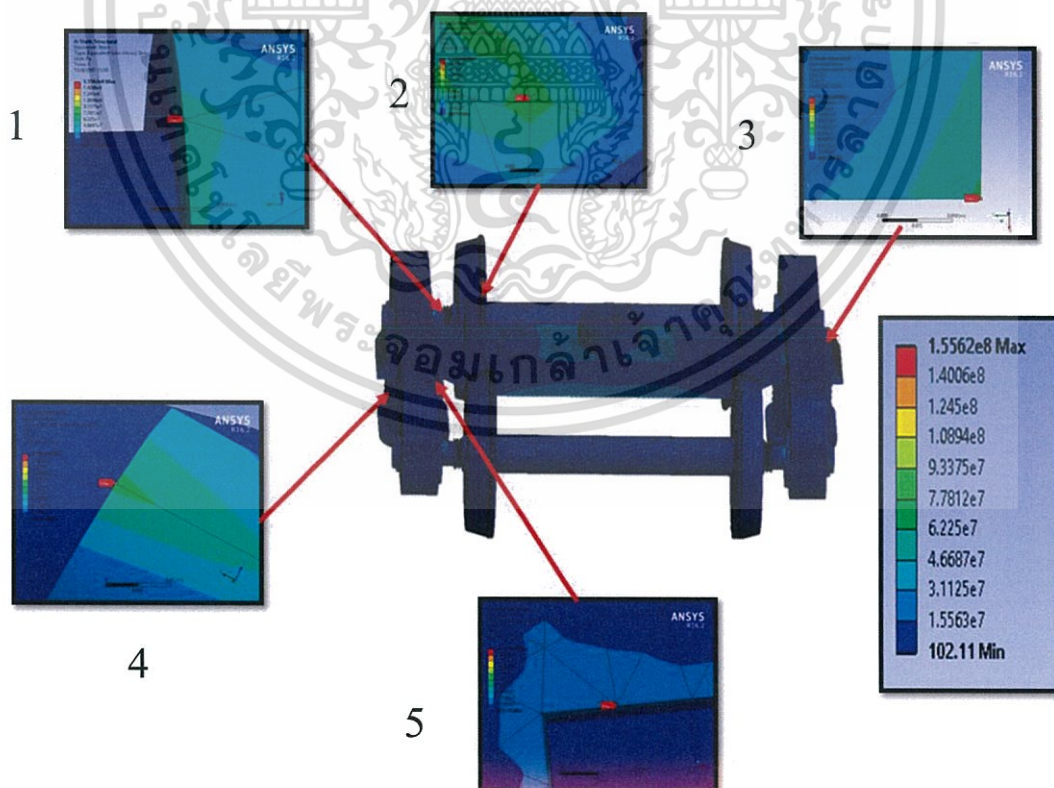
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.3 กรณีรับภาระแบบที่ 3 มีการพิจารณาแรงที่กระทำด้านข้างโดยใช้สมการที่ 3.3.1 และการบิดของทางวิ่งของโครงแคร์จำลองตามสมการที่ 3.3.2 และระยะยกโค้งสูงสุด ของโครงแคร์จำลองตามสมการที่ 3.3.3 ซึ่งเกิดขึ้นในขณะรถไฟกำลังวิ่งในทางโค้งและใส่แรงแบบสถิตย์ โดยกำหนดมวลของภาระเท่ากับ 300 กิโลกรัม

ก)

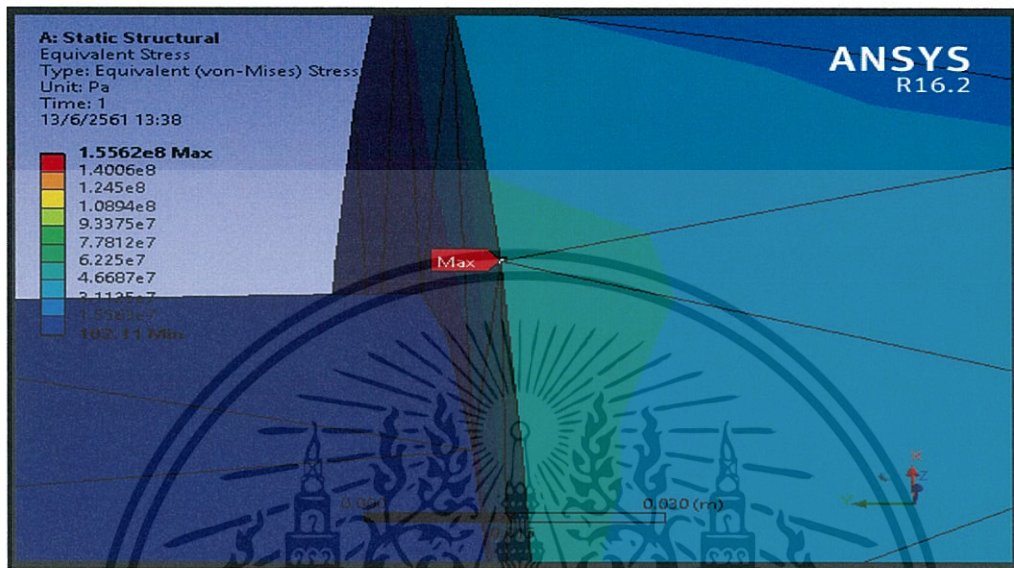


ข)

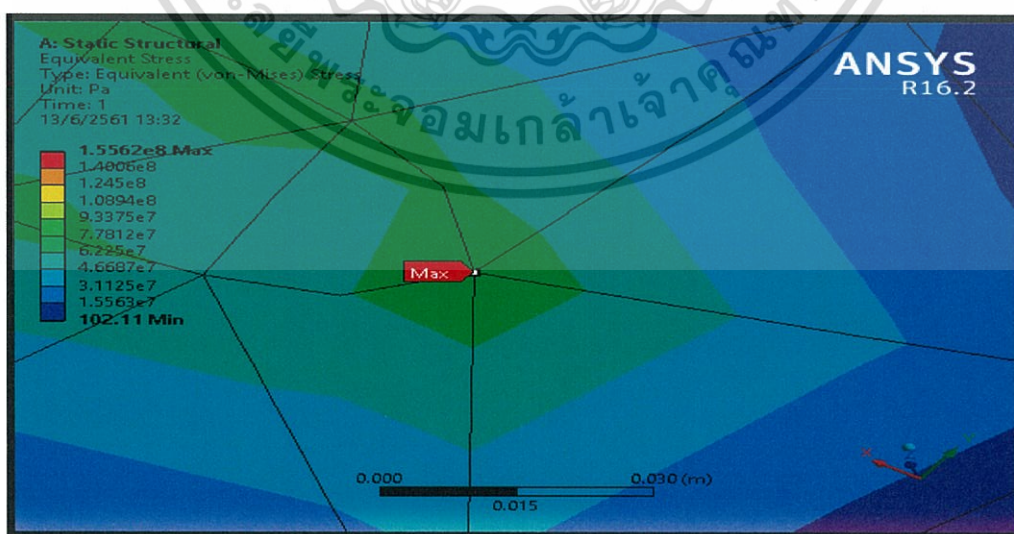


รูปที่ 4.9 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)
 ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแคร์รถไฟรับน้ำหนัก

หมายเลข 1 คือ บริเวณปลายขอบเพลาดึงซ้ายของแคว่รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 52.73 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5.49 เพราะแคว่รถไฟเกิดการเข้าโค้งไปทางซ้ายซึ่งแรงจะกดลงบนฝั่งซ้ายมากกว่าฝั่งขวาและปลายเพลาล้อเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดตรงปลายขอบของเพลาดึงซ้ายจะเกิดความเสียหายก่อน

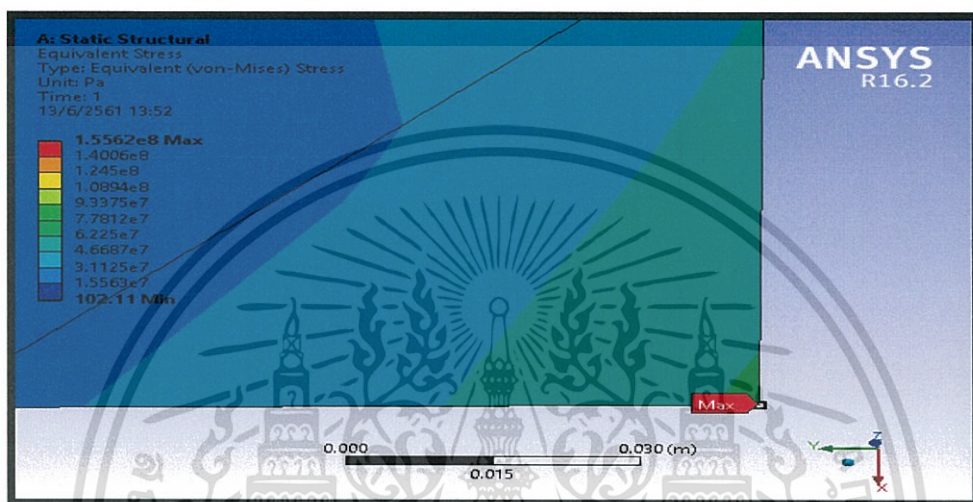


หมายเลข 2 คือ บริเวณผิวล้อฝั่งซ้ายของแคว่รถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 73.38 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 3.95 เพราะแคว่รถไฟเกิดการเข้าโค้งไปทางซ้ายจะทำให้แรงทั้งหมดกดลงล้อฝั่งซ้ายมากกว่าและที่ผิวจุดสัมผัสของล้อมีพื้นที่หน้าตัดน้อยจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุด

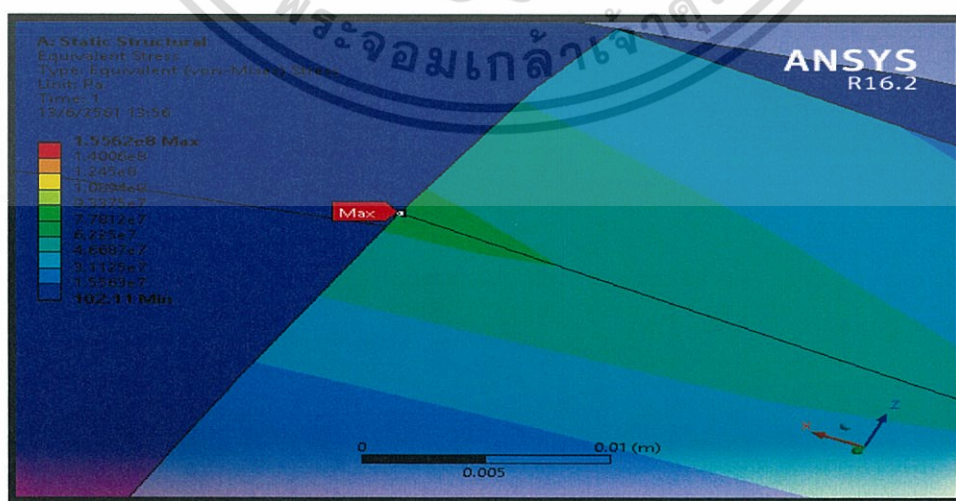


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 3 คือ บริเวณปลายโครงเคร่งกลางฝั่งขวาของแครร์รถไฟ เกิดค่าความเค้นนอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 64.75 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.47 เพราะแครร์รถไฟเกิดการเข้าโค้งไปทางซ้ายซึ่งขณะนั้นจะมีแรงหนีของจุดศูนย์กลางกระทำกับโครงเคร่งกลางไปทางขวาจึงทำให้ขอบของโครงเคร่งฝั่งขวาไปกระทบกับโครงเคร่งด้านข้างและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

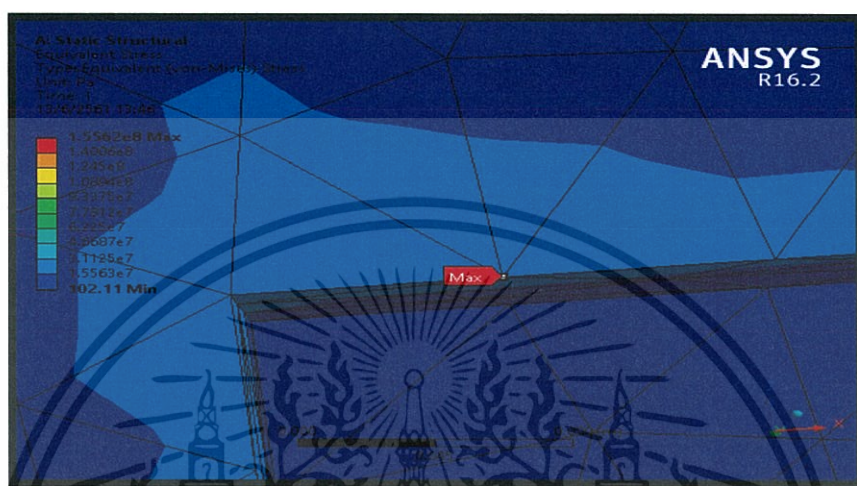


หมายเลข 4 คือ บริเวณขดสปริงแต่ละตัวฝั่งซ้ายของแครร์รถไฟ เกิดค่าความเค้นนอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 66.35 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.37 เพราะแครร์รถไฟเกิดการเข้าโค้งไปทางซ้ายจะทำให้แรงกดลงบนสปริงแต่ละตัวของฝั่งซ้ายมากกว่าจึงทำให้เกิดค่าความเค้นนอนมิสเสสมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 5 คือ บริเวณโครงแครงด้านข้างฝั่งขวาของแครงรถไฟ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 28.26 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 10.26 เพราะแครงรถไฟเกิดการเข้าโค้งไปทางซ้ายซึ่งขณะนั้นจะมีแรงหนีของจุดศูนย์กลางกระทำกับโครงแครงกลางไปทางขวาจึงทำให้ขอบของโครงแครงฝั่งขวาไปกระทบกับโครงแครงด้านข้างและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน



ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสของแครงรถไฟจากการจำลองในโปรแกรมจำลองกำหนดน้ำหนักภาระ 300 กิโลกรัมโดยค่าความปลอดภัยคำนวณจากสมการที่ 2.11.2

กรณีรับภาระแบบที่	ภาระน้ำหนัก (Kg)	ค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุด (MPa)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
1	300	58.88	4.92
2	300	71.63	4.04
3	300	73.38	3.95

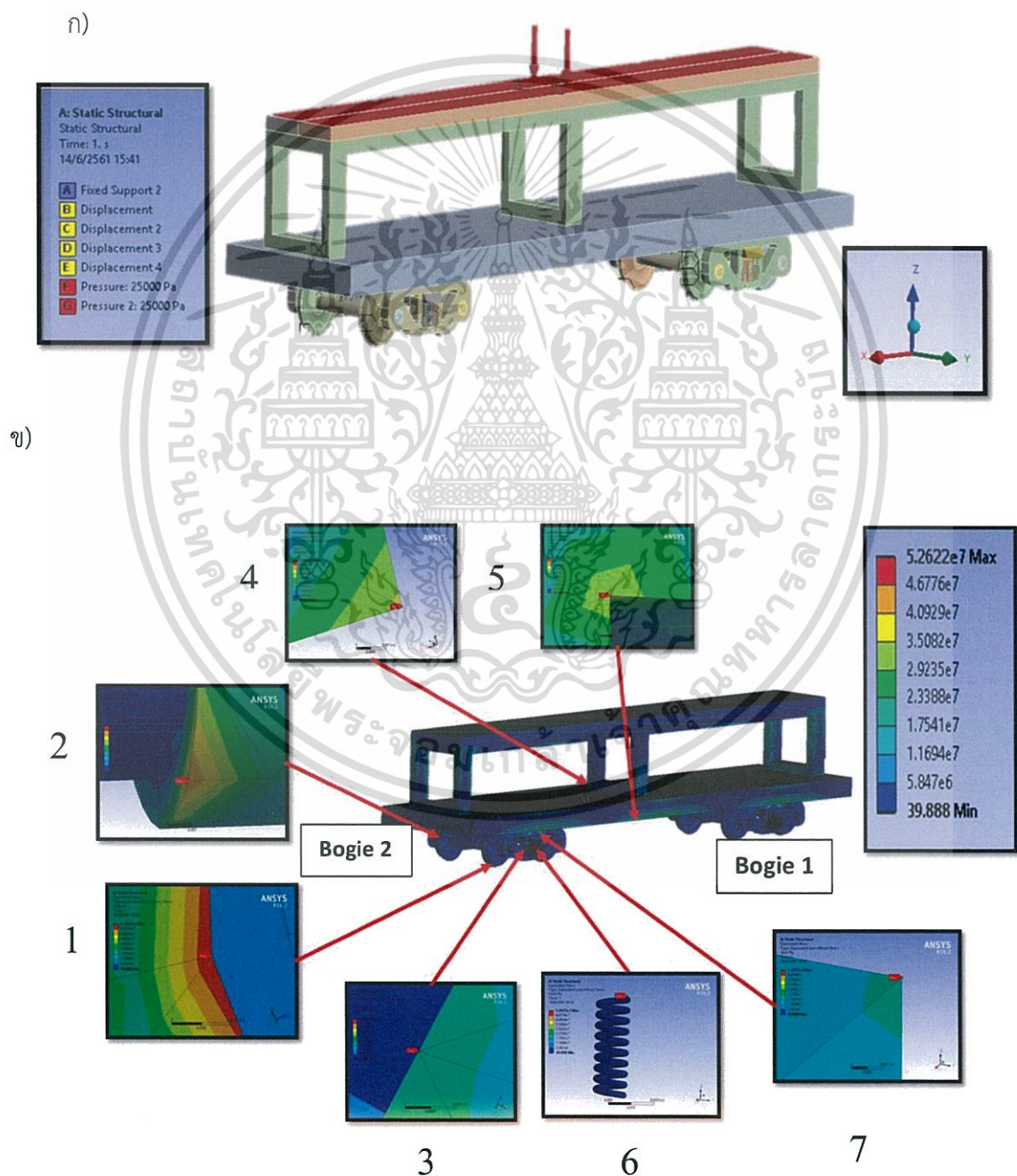
ผลจากการพิจารณาความปลอดภัยของแบบจำลองของแครงรถไฟตามกรณีรับภาระแบบต่างๆโดยกำหนดภาระน้ำหนัก 300 กิโลกรัม พบว่าในกรณีการรับภาระในแบบที่1 ที่รถไฟหยุดนิ่งจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.92, กรณีการรับภาระในแบบที่2 ที่พิจารณาการโคลงตัวของรถไฟจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.04, กรณีการรับภาระในแบบที่3 ที่พิจารณาแรงที่กระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นในขณะรถไฟกำลังวิ่งในทางโค้งจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 3.95 ซึ่งจะพบว่ากรณีการรับภาระในแบบกรณีที่ 3 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยน้อยที่สุด และจะพบว่าตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงที่สุดจากทั้ง 3 กรณีที่นำมาทดสอบนั้นจะเกิดที่บริเวณเพลลาของแครงรถไฟ ซึ่งแต่ละกรณีจะมีค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงที่สุดไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการทำนายน้ำหนักที่แบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารที่สามารถรับได้โดยวิธีการจำลอง โดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ตามรูปแบบของกรณีรับภาระแบบต่างๆตามมาตรฐาน EN13749

จากการจำลองด้วยโปรแกรมของแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารตามเงื่อนไข กรณีรับภาระแบบที่ 1, กรณีรับภาระแบบที่ 2 และกรณีรับภาระแบบที่ 3 ผลที่ได้แสดงตามรูปด้านล่าง

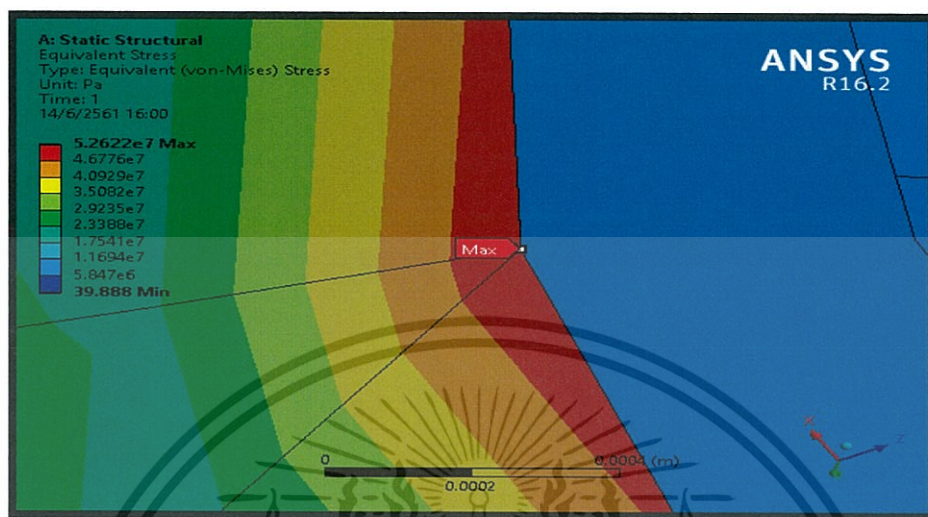
4.3.4.1 กรณีรับภาระแบบที่ 1 การวิเคราะห์แรงในแนวตั้ง ซึ่งเกิดจากน้ำหนักตู้โดยสาร กดลงแคร่ขณะหยุดนิ่งและใส่แรงแบบสถิตย์ โดยกำหนดมวลของภาระเท่ากับ 300 กิโลกรัม



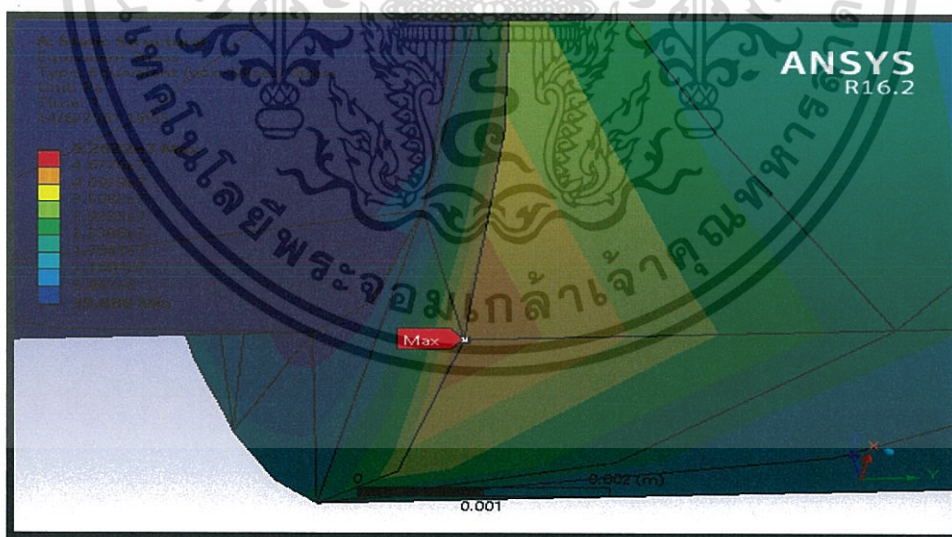
รูปที่ 4.10 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาระดับปริญญาโทเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแบบจำลองของส่วนรองรับ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 1 คือ บริเวณล้อของแคร่รถไฟหัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 52.62 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5.51 เพราะตรงเป็นจุดที่แรงลงตรงจุดที่เพลากลดตรงปลายวงล้อจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุด

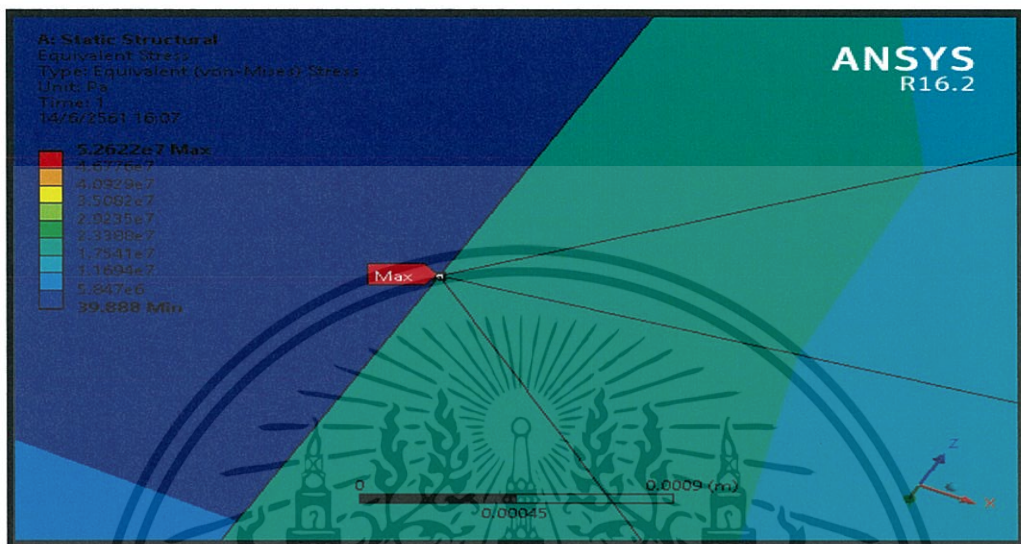


หมายเลข 2 คือ บริเวณเพลาล้อของแคร่รถไฟหัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 46.09 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 6.29 เพราะตรงจุดปลายของเพลาล้อเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

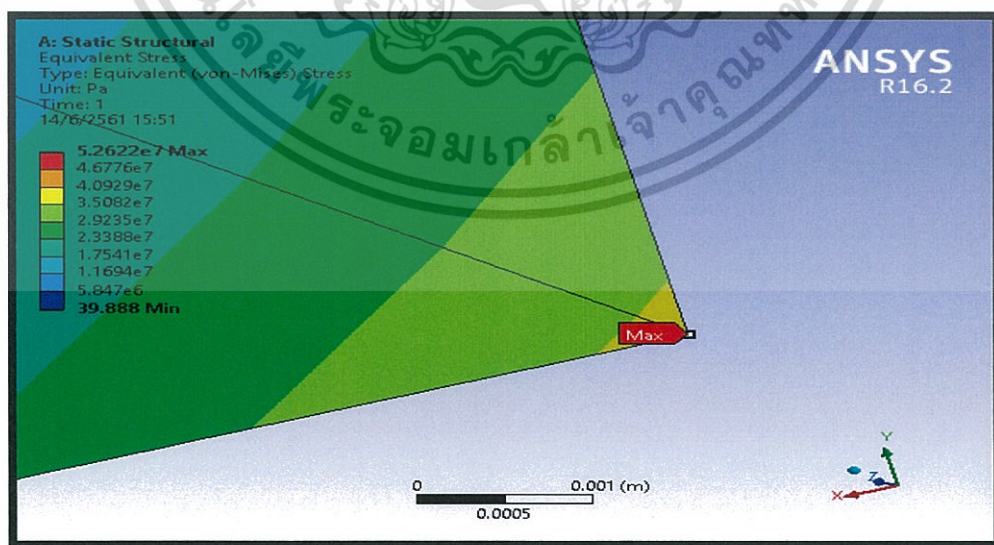


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 3 คือ บริเวณโครงเครื่อด้านข้างของแคว่รถไฟฟ้าที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมีสเซสมากที่สุดเท่ากับ 19.2 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 15.1 เพราะตรงจุดขอบด้านในของโครงเครื่อด้านข้างเป็นจุดรวมของความเค้น(Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

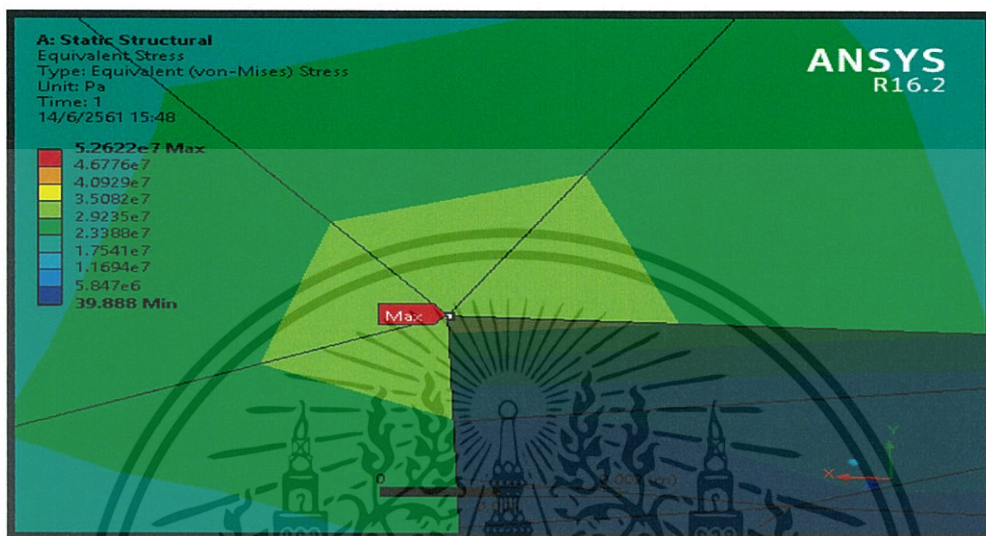


หมายเลข 4 คือ บริเวณปลายเสาข้างของตัวรถ เกิดค่าความเค้นวอนมีสเซสมากที่สุดเท่ากับ 36.61 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 7.92 เพราะตรงจุดปลายของเสาข้างเป็นจุดรวมของความเค้น(Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

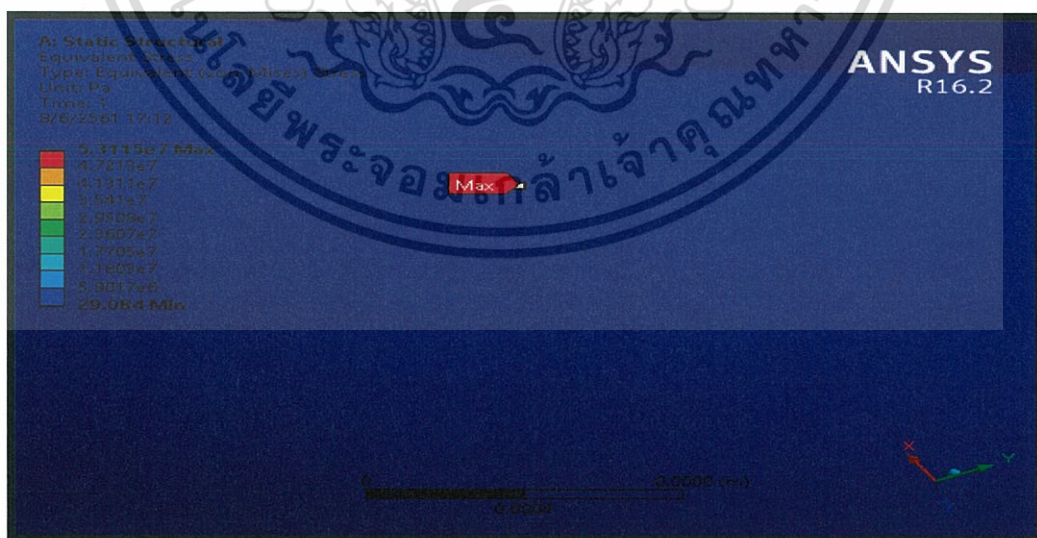


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 5 คือ บริเวณใต้ล่างตรงกลางของตัวรถ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 33.56 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 8.64 เพราะแรงลงตรงขอบตัวรถซึ่งเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน



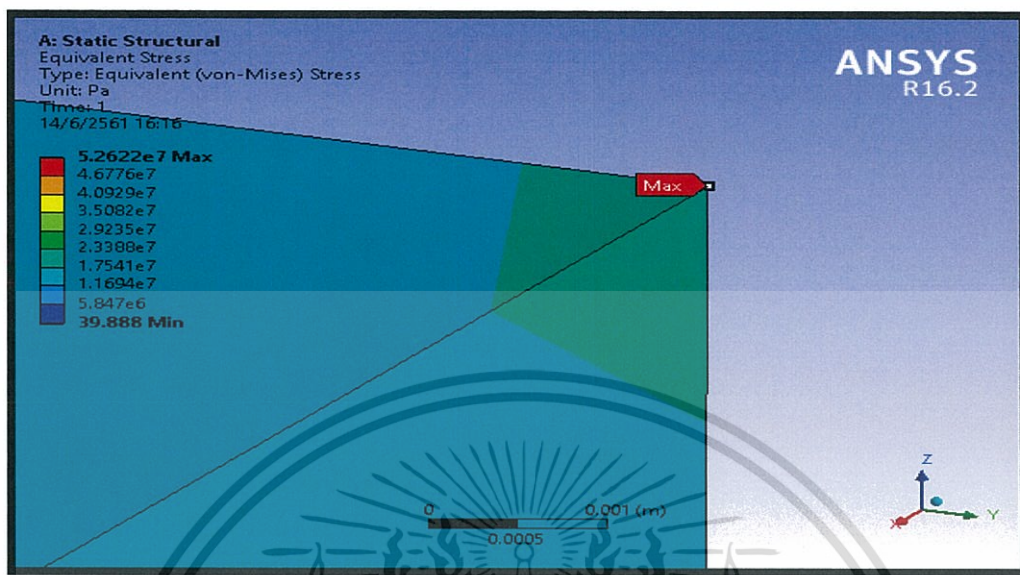
หมายเลข 6 คือ บริเวณขดสปริงตัวหน้าด้านนอกฝั่งขวาของแคร่รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 3.31 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 87.61 เพราะเป็นจุดที่แรงกดลงบนสปริงแต่ละตัวจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุด



หมายเลข 7 คือ บริเวณปลายโครงแคร่กลางแต่ละฝั่งของแคร่รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 16.23 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 17.86 เพราะกดแรงลงบน

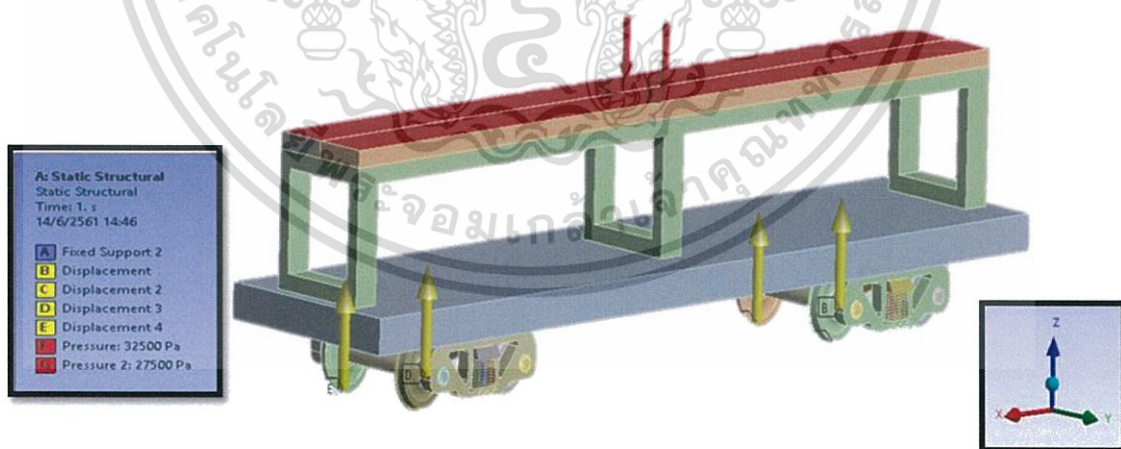
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรถซึ่งตรงจุดปลายขอบของโครงแคร่กลางเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

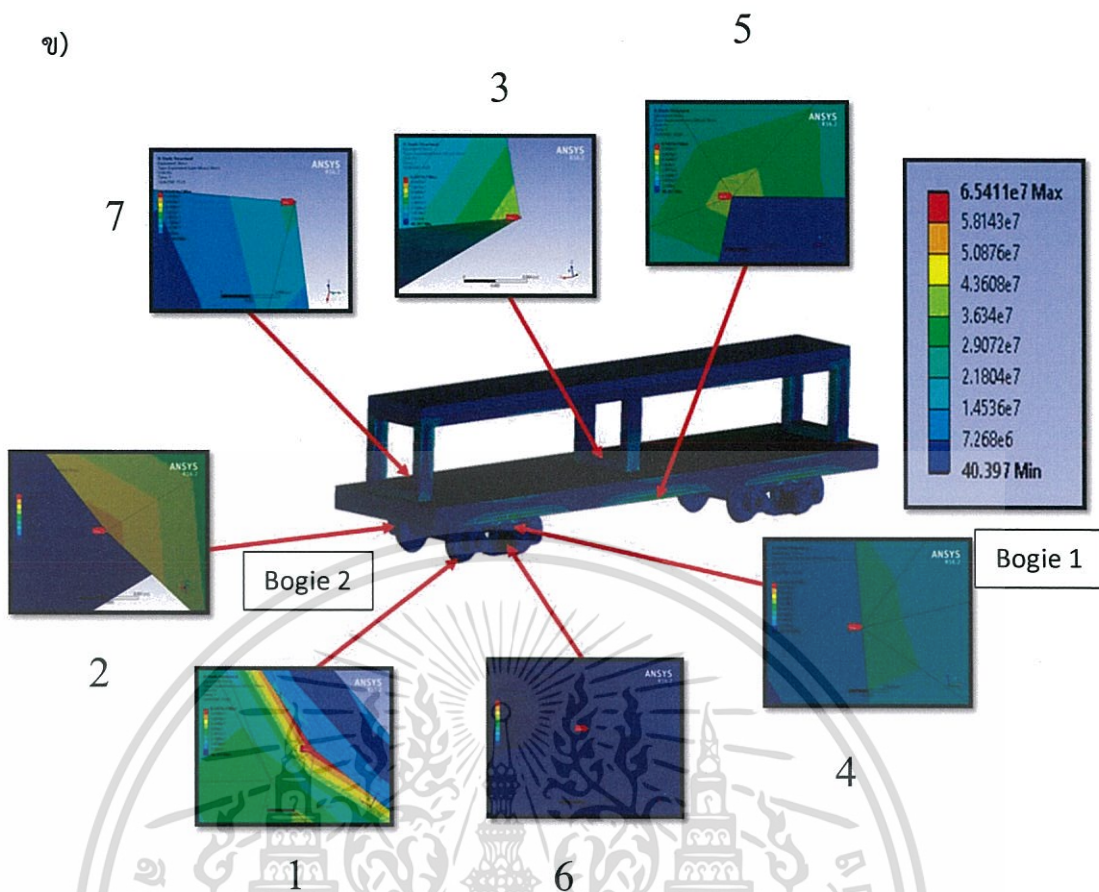


4.3.4.2 กรณีรับภาระแบบที่ 2 การพิจารณาการโคลงตัวของรถไฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการหมุน (α) กับค่าสัมประสิทธิ์การกระเด็ง (β) มาพิจารณาด้วยและใส่แรงแบบสถิตย์ โดยกำหนดมวลของภาระเท่ากับ 300 กิโลกรัม)

ก)



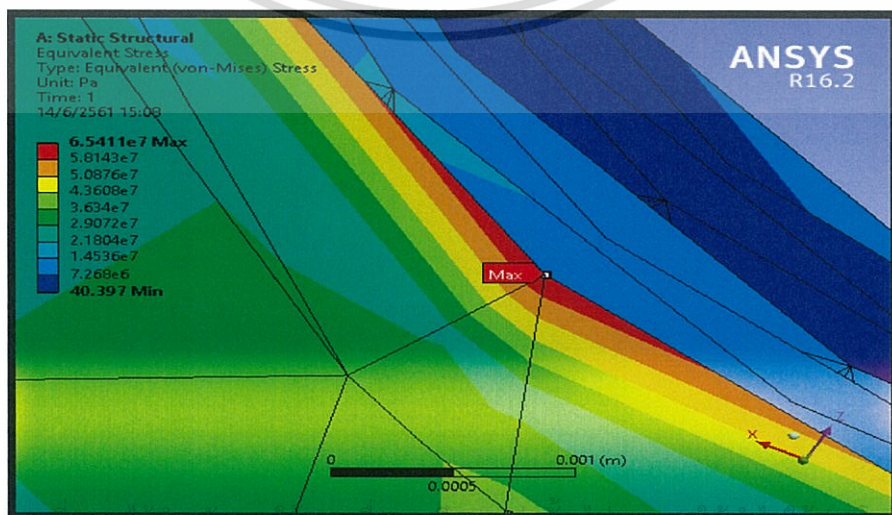
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)

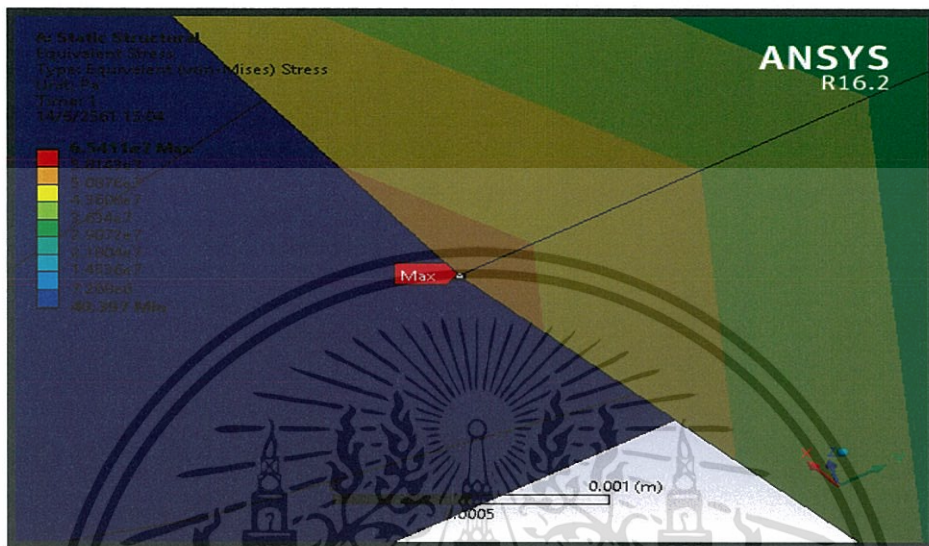
ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสาร

หมายเลข 1 คือ บริเวณล้อของแคร่รถไฟตู้ที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 65.41 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.43 เพราะแคร่รถไฟเกิดการโคลงไปทางขวาจึงทำให้แรงกดลงฝั่งขวามากกว่าฝั่งซ้ายที่ซึ่งแรงกดลงตรงจุดที่เพลาลูกกลิ้งตรงปลายวงล้อจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุด

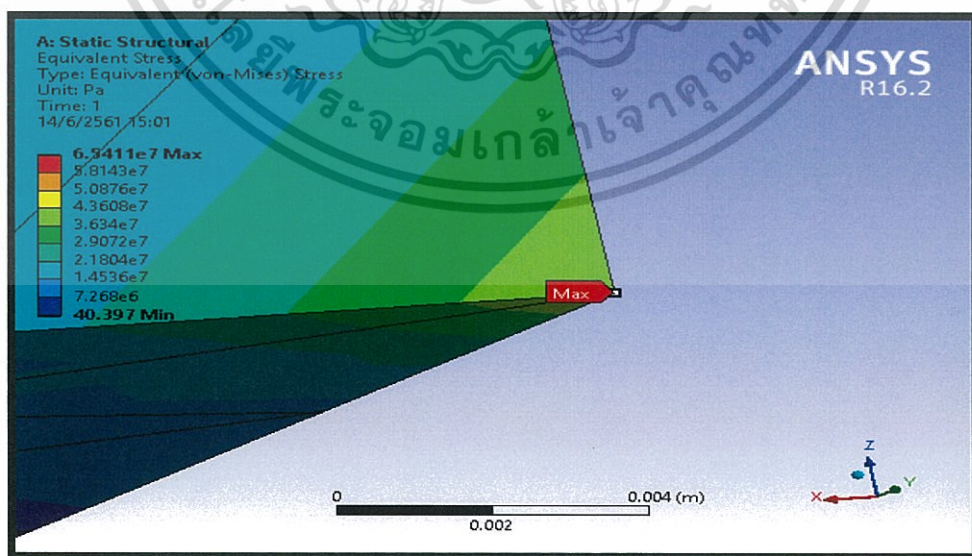


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 2 คือ บริเวณเพลาช้ายของแควร์รถไฟตู้ที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 54 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5.37 เพราะแควร์รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางขวาจึงทำให้เกิดแรงจากโมเมนต์ตัดจากฝั่งขวาพร้อมกับแรงที่กดลงบนเพล่าฝั่งซ้ายและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

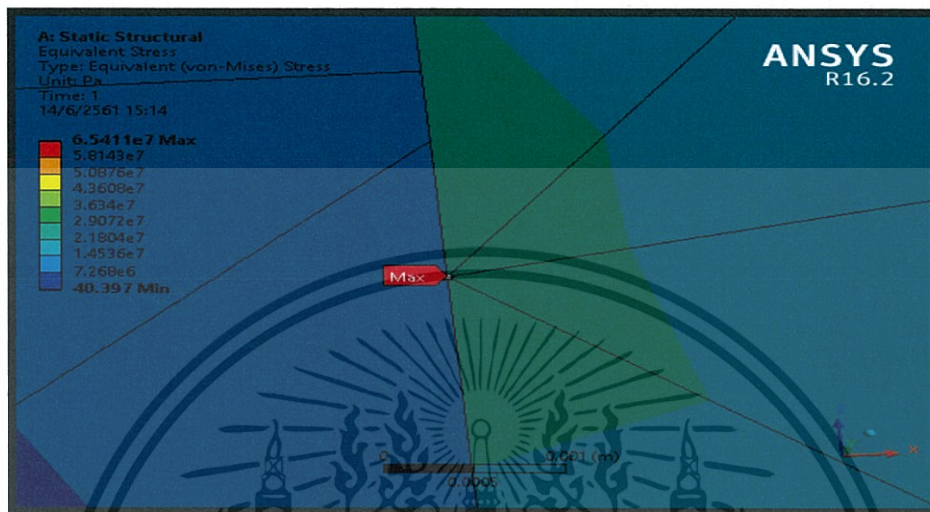


หมายเลข 3 บริเวณปลายเสาล่างฝั่งขวาของตัวรถ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 42.85 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 6.76 เพราะเกิดการโคลงตัวของตัวรถไปทางขวาจึงทำให้แรงกดลงตรงฝั่งขวาตรงจุดปลายขอบของเสาล่างมากกว่าและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

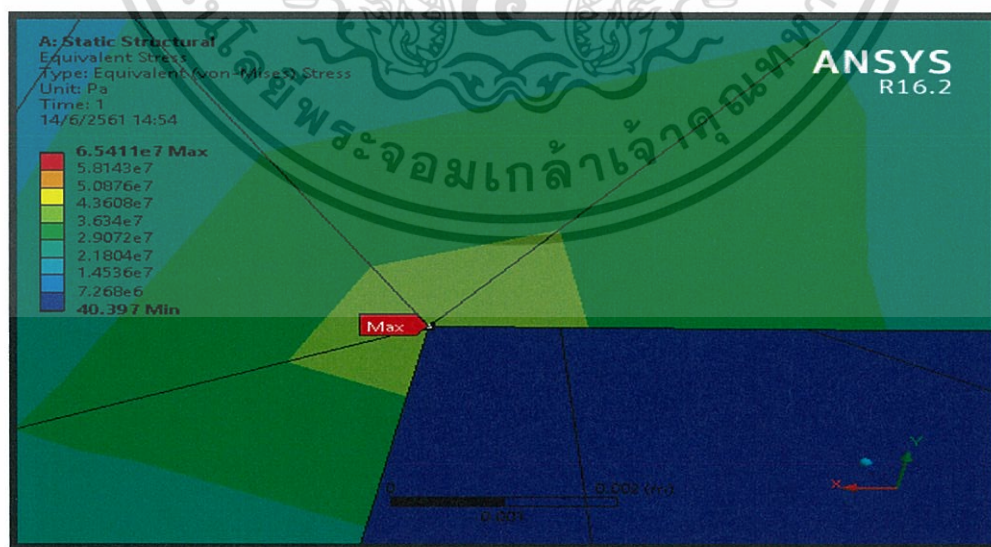


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 4 คือ บริเวณโครงแคร์ด้านข้างฝั่งขวาของแคร์รถไฟตัวที่2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 23.76 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 12.2 เพราะ แคร์รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางขวาซึ่งแรงกดลงปลายขอบฝั่งขวามัดตรงขอบด้านในของโครงแคร์ด้านข้างมากกว่าและเป็นจุดรวมของความเค้น(Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

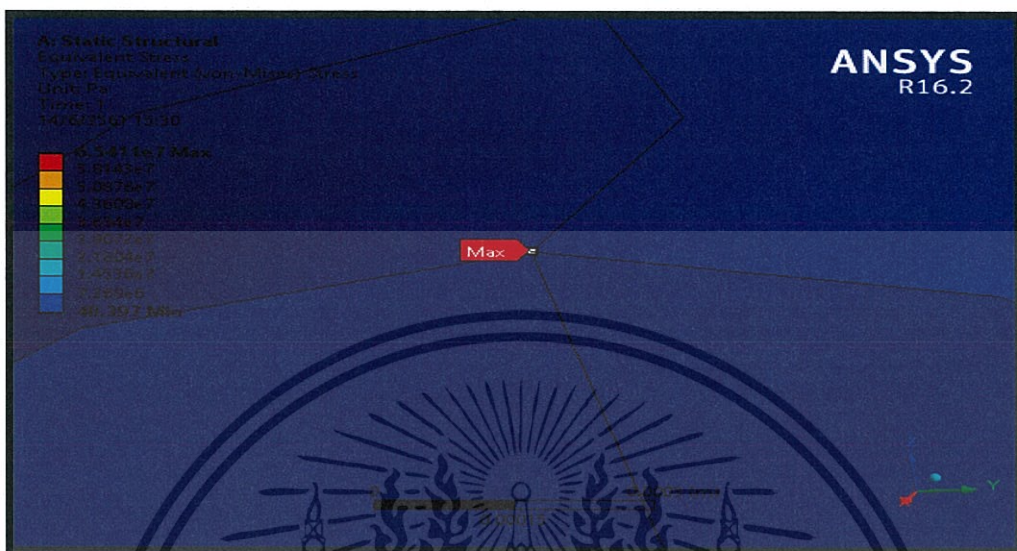


หมายเลข 5 คือ บริเวณใต้ล่างของพื้นตัวรถฝั่งขวา เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 40.16 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 7.22 เพราะเกิดการโคลงตัวไปทางขวาซึ่งแรงกดลงบนตัวรถฝั่งขวาตรงขอบใต้ล่างตรงกลางมากกว่าและ เป็นจุดรวมของความเค้น(Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

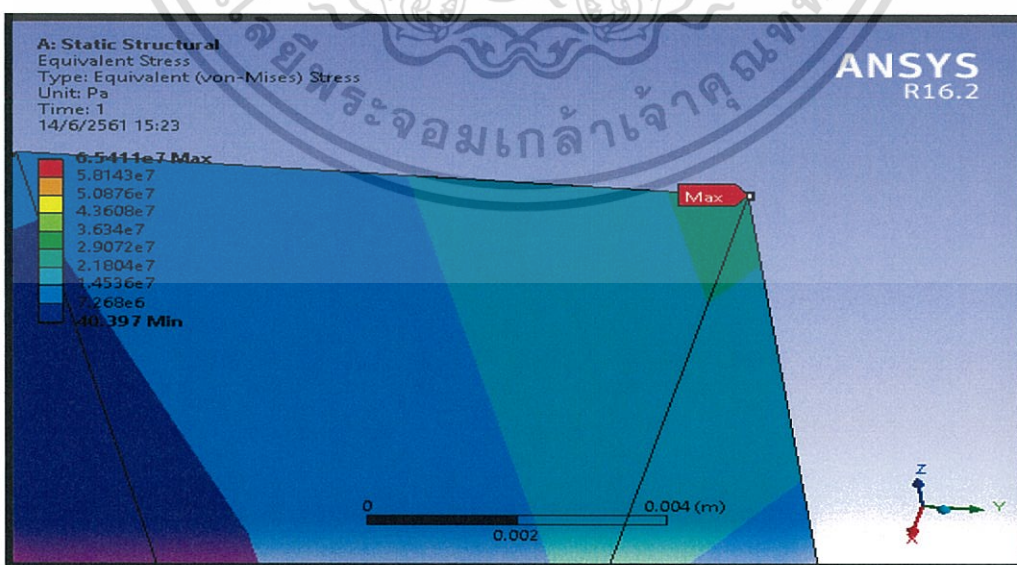


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 6 คือ บริเวณขดสปริงตัวหน้าด้านนอกฝั่งขวาของแคว์รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 5.2 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 55.76 แคว์รถไฟเกิดการโคลงตัวไปทางขวาซึ่งแรงกดลงบนสปริงฝั่งขวามากกว่าและเกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุด



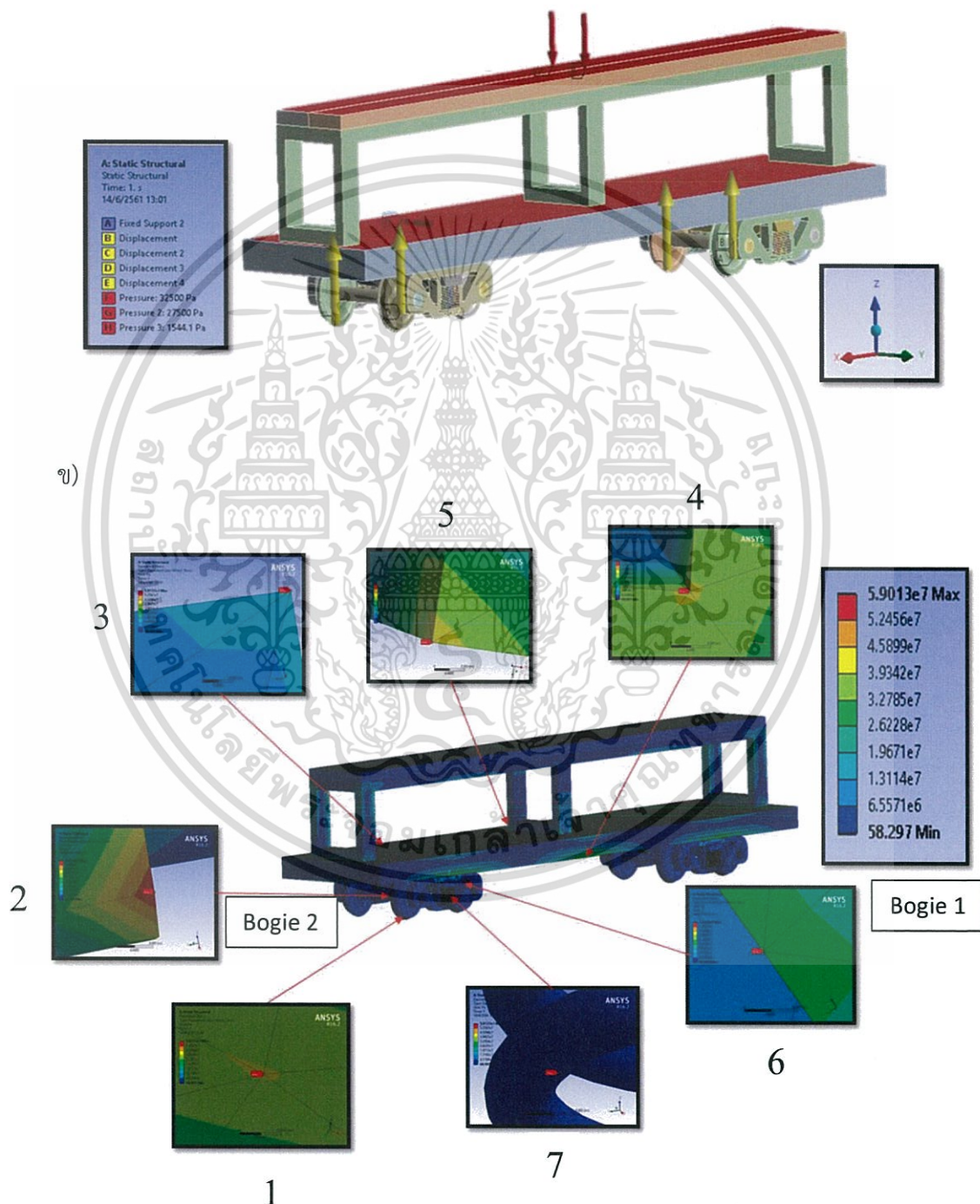
หมายเลข 7 คือ บริเวณโครงแคร่กลางฝั่งขวาของแคว์รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 24.18 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 11.99 เพราะเกิดการโคลงตัวไปทางขวาซึ่งแรงกดลงบนตัวรถฝั่งขวาไปที่จุดขอบของโครงแคร่กลางมากกว่าและ เป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.3 กรณีรับภาระแบบที่ 3 มีการพิจารณาแรงที่กระทำด้านข้างโดยใช้สมการที่ 3.3.1 และ การบิดของทางวิ่งของโครงแคร่จำลองตามสมการที่ 3.3.2 และระยะยกโค้งสูงสุด ของส่วนรองรับผู้โดยสารตามสมการที่ 3.3.3 ซึ่งเกิดขึ้นในขณะรถไฟกำลังวิ่งในทางโค้งและใส่แรงแบบสถิต โดยกำหนดมวลของภาระเท่ากับ 300 กิโลกรัม

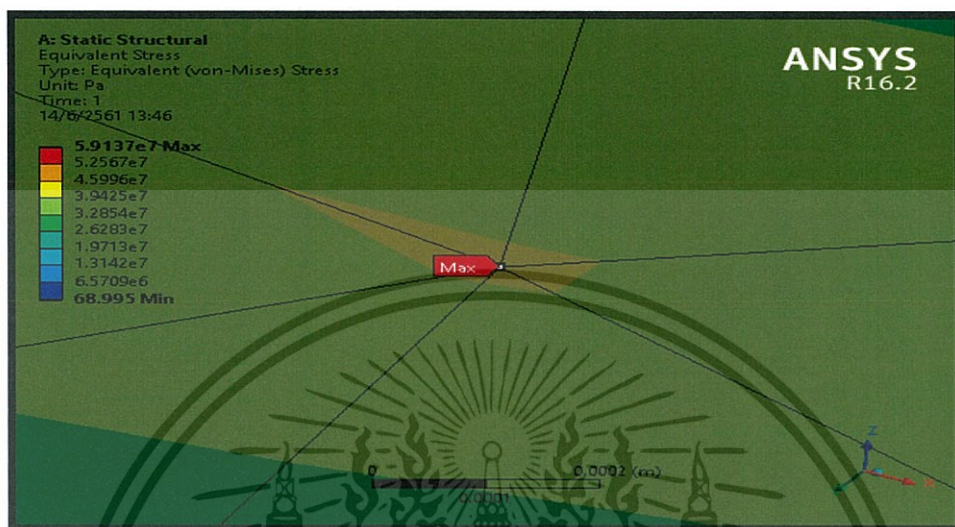
ก)



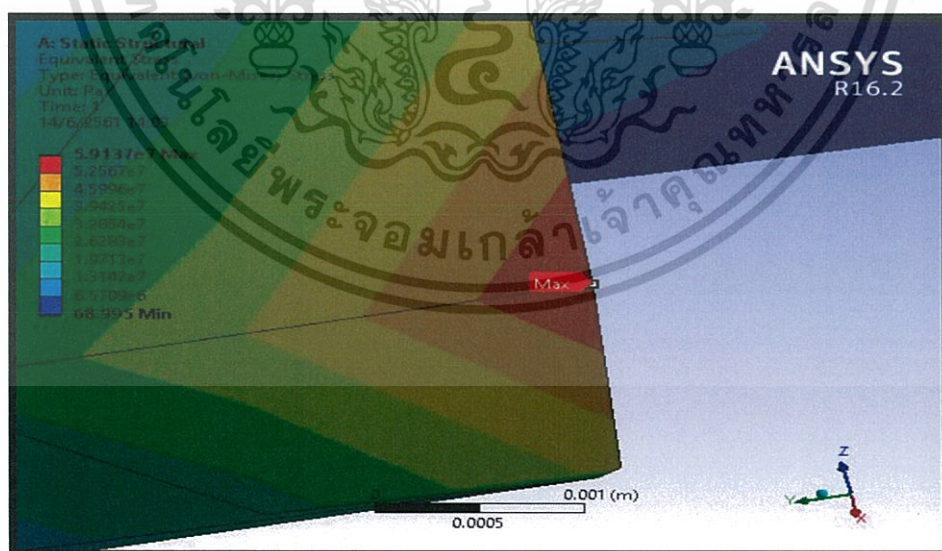
รูปที่ 4.12 ก) แสดงจุดรับแรงและจุดรองรับแบบยึดตรึง (Fixed support)

ข) แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสาร
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพิธีการพิเศษเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 1 คือ บริเวณล้อหลังฝั่งขวาของแคร่รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 40.01 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 7.24 เพราะเกิดจากการเข้าโค้งไปทางขวาของตัวรถไฟทำให้เกิดแรงลงตรงล้อด้านขวามากกว่าและจุดที่ล้อสัมผัสกับรางมีพื้นที่หน้าตัดน้อยมากจึงทำให้มีค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุด

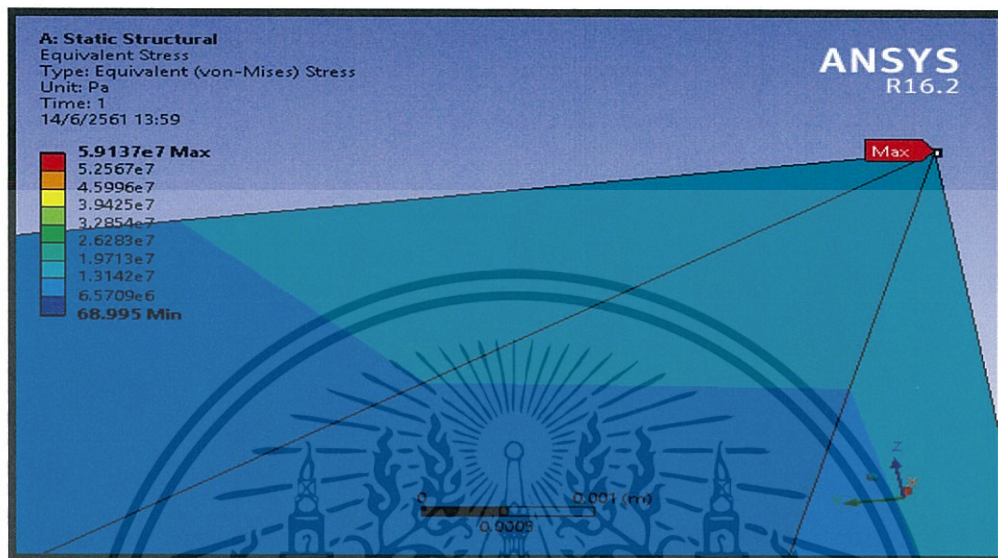


หมายเลข 2 คือ บริเวณเพลาล้อหลังฝั่งขวาของแคร่รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 59.13 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.90 เพราะแคร่รถไฟเกิดการเข้าโค้งไปทางขวาซึ่งแรงจะกดลงบนฝั่งขวามากกว่าฝั่งซ้ายและปลายเพลาล้อเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดตรงปลายขอบของเพลาล้อจะเกิดความเสียหายก่อน

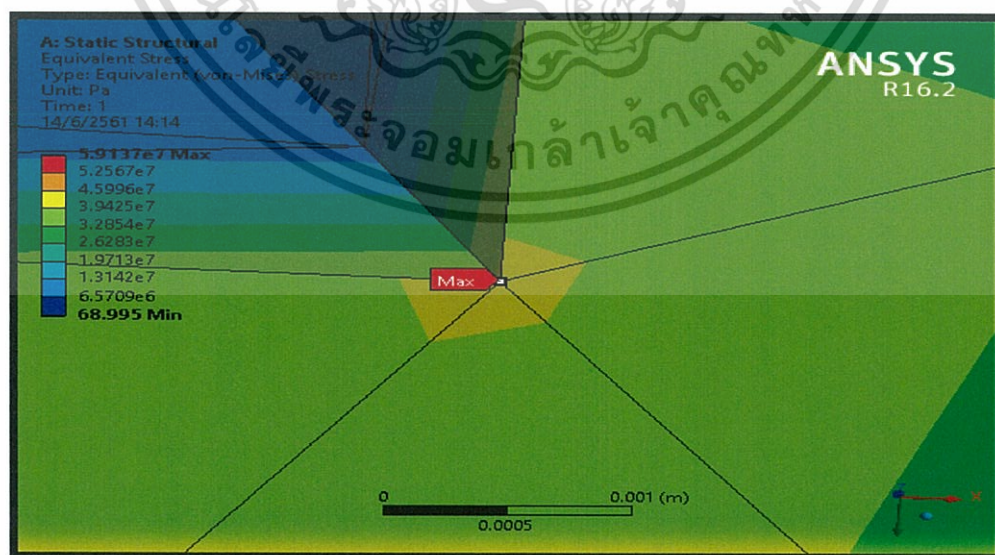


หมายเลข 3 คือ บริเวณโครงแคร่กลางฝั่งซ้ายของแคร่รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 19.36 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 14.97 เพราะแคร่รถไฟเกิดเอกสาร์นี่เป็นเอกสาร์นี่ที่สวงนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้าโค้งไปทางขวาซึ่งขณะนั้นจะมีแรงหนีของจุดศูนย์กลางกระทำกับโครงแคร์กลางไปทางซ้ายจึงทำให้ขอบของโครงแคร์ฝั่งซ้ายไปกระทบกับโครงแคร์ด้านข้างและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

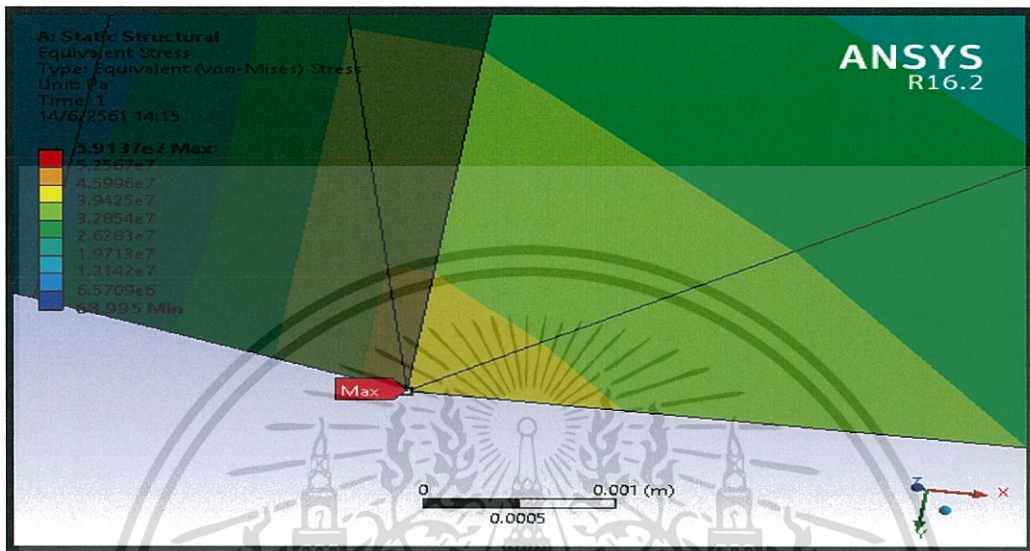


หมายเลข 4 คือ บริเวณใต้ล่างของพื้นตัวรถฝั่งขวา เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสมากที่สุดเท่ากับ 40.44 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 7.17 เพราะเกิดการเข้าโค้งไปทางขวาซึ่งแรงกดลงบนตัวรถฝั่งขวาตรงขอบใต้ล่างตรงกลางมากกว่าและ เป็นจุดรวมของความเค้น Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

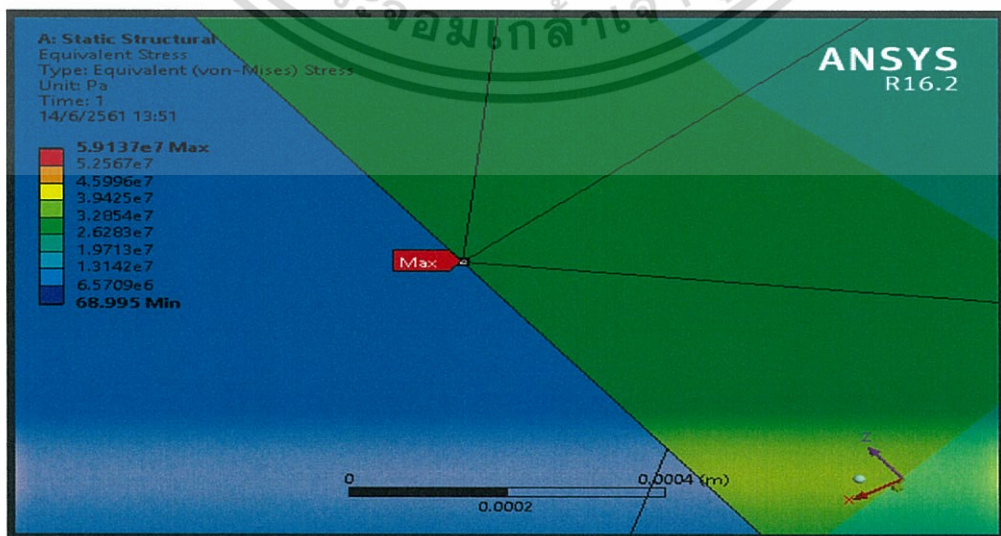


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 5 คือ บริเวณเสาที่นั้งด้านหน้าฝั่งขวาของตัวรถ เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 42.71 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 6.78 เพราะเกิดการเข้าโค้งไปทางขวา จึงทำให้แรงกดลงตรงฝั่งขวาตรงจุดปลายขอบของเสาล่างมากกว่าและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน

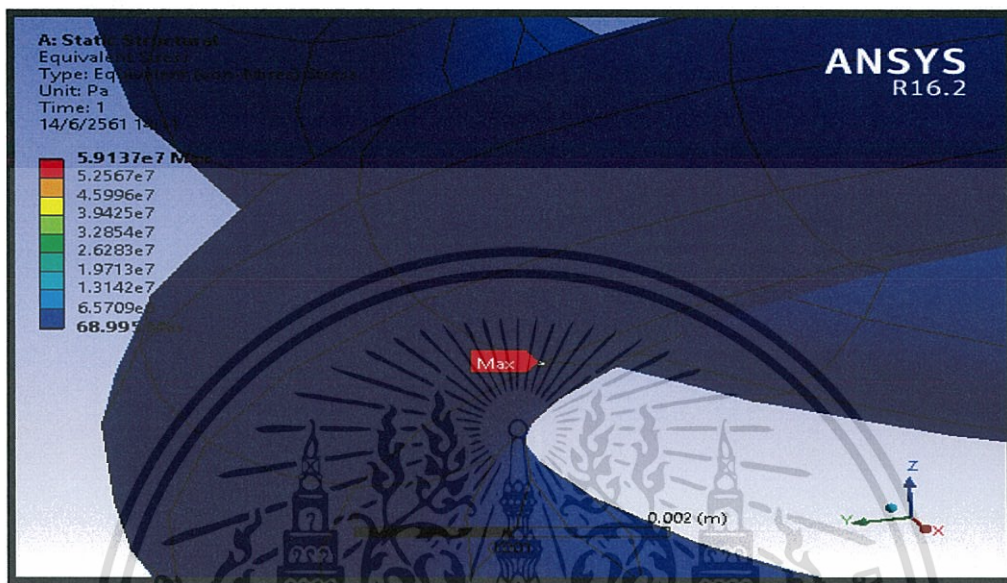


หมายเลข 6 คือ บริเวณ โครงแครงด้านข้างฝั่งซ้ายของโบกี้ตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 27.36 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 10.59 เพราะเกิดการเข้าโค้งไปทางขวาซึ่งขณะนั้นจะมีแรงหนีของจุดศูนย์กลางกระทำกับโครงแครงกลางไปทางซ้ายจึงทำให้ขอบของโครงแครงฝั่งซ้ายไปกระทบกับโครงแครงด้านข้างและเป็นจุดรวมของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งตรงจุดนั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 7 คือ บริเวณขดสปริงตัวหน้าด้านนอกฝั่งขวาของแคร่รถไฟตัวที่ 2 เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุดเท่ากับ 4.88 MPa และค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 59.42 เพราะเกิดการเข้าโค้งไปทางขวาจะทำให้แรงกดลงบนสปริงแต่ละตัวของฝั่งขวามากกว่าจึงทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเซสมากที่สุด



ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสของส่วนรองรับผู้โดยสารจากการจำลองในโปรแกรมจำลองกำหนดน้ำหนักภาระ 300 กิโลกรัมโดยค่าความปลอดภัยคำนวณจากสมการที่ (2.11.2)

กรณีรับภาระแบบที่	ภาระน้ำหนัก (Kg)	ค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุด (MPa)	ค่าตัวประกอบความปลอดภัย
1	300	52.62	5.51
2	300	65.41	4.43
3	300	59.13	4.90

ผลจากการพิจารณาค่าความปลอดภัยของแบบจำลองแคร่รถไฟตามกรณีรับภาระแบบต่างๆ โดยกำหนดภาระน้ำหนัก 300 กิโลกรัม พบว่ากรณีรับภาระแบบที่ 1 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 5.51 ,กรณีรับภาระแบบที่ 2 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 4.43 และกรณีรับภาระแบบที่ 3 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 4.90 ซึ่งจะพบว่าโหนดในกรณีรับภาระแบบที่ 2 จะมีค่าความปลอดภัยน้อยที่สุด และจากการพิจารณาพบว่าบริเวณที่เกิดค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คํานวนมิสเซลสูงสุดของทั้ง 3 กรณี คือบริเวณลํอกของรถไฟ ซึ่งแต่ละกรณีจะมีคําความคํานวนมิสเซลสูงสุดไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อได้รับผลจากการทดลองจากแบบจำลองที่ทำออกมาจริงและผลจากการจำลองแบบจำลองด้วยโปรแกรมจำลองแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกันนั้น ผู้ทำการทดลองจะทราบถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 5 นี้รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาแบบจำลองนี้ในอนาคตต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถใช้ความรู้ต่างๆ ที่ได้ศึกษารวมทั้งใช้หลักคล้ายคลึงในสภาวะหยุดนิ่งมาออกแบบและสร้างแบบจำลองของแคว่รถไฟและแบบจำลองของส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนักของรถไฟหนึ่งตู้ มาย่อขนาดในอัตราส่วน 1 ต่อ 8 จากขนาดจริง

2. สามารถหาค่าความเค้นวอนมิสเสระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของแคว่รถไฟจากระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 1.54 % ที่มวลของภาระเท่ากับ 10 กิโลกรัม และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ 15.38 % ที่มวลของภาระเท่ากับ 5 กิโลกรัม กราฟการทดลองจริงกับกราฟทดสอบจากโปรแกรมมีค่าความเค้นวอนมิสเสต่อน้ำหนักมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

3. สามารถหาค่าความเค้นวอนมิสเสระหว่างการทดลองการกดแบบจำลองของ ส่วนรองรับผู้โดยสารหรือน้ำหนักจากระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 2.38 % ที่มวลของภาระเท่ากับ 15 กิโลกรัม และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ 14.88 % ที่มวลของภาระเท่ากับ 10 กิโลกรัม กราฟการทดลองจริงกับกราฟทดสอบจากโปรแกรมมีค่าความเค้นวอนมิสเสต่อน้ำหนักมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

4. สามารถทำนายค่าความปลอดภัยของแบบจำลองแคว่รถไฟในการรับภาระแบบต่างๆตามกรณี ที่นำมาศึกษา โดยกำหนดให้ค่าสูงสุดของภาระน้ำหนักให้มีมวลเท่ากับ 300 กิโลกรัม ผลจากการพิจารณาความปลอดภัยของแบบจำลองของแคว่รถไฟตามกรณีรับภาระแบบต่างๆโดยกำหนดภาระน้ำหนัก 300 กิโลกรัม พบว่าในกรณีการรับภาระในแบบที่ 1 ที่รถไฟหยุดนิ่งจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.92, กรณีการรับภาระในแบบที่ 2 ที่พิจารณาการโคลงตัวของรถไฟจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 4.04, กรณีการรับภาระในแบบที่ 3 ที่พิจารณาแรงที่กระทำด้านข้างที่เกิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นในขณะรถไฟกำลังวิ่งในทางโค้งจะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 3.95 ซึ่งจะพบว่าการรับภาระในแบบกรณีนี้ 3 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยน้อยที่สุด และจะพบว่าตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดที่สุดจากทั้ง 3 กรณีที่นำมาทดสอบนั้นจะเกิดที่บริเวณเพลลาของแคร่รถไฟ ซึ่งแต่ละกรณีจะมีค่าความเค้นความเค้นความเค้นสูงสุดไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

5.สามารถทำนายค่าความปลอดภัยของแบบจำลองแคร่รถไฟในการรับภาระแบบต่างๆตามกรณีที่นำมาศึกษา โดยกำหนดให้ค่าสูงสุดของภาระน้ำหนักให้มีมวลเท่ากับ 300 กิโลกรัม ผลจากการพิจารณาความปลอดภัยของแบบจำลองของแคร่รถไฟตามกรณีรับภาระแบบต่างๆโดยกำหนดภาระน้ำหนัก 300 กิโลกรัม พบว่ากรณีรับภาระแบบที่ 1 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 5.51, กรณีรับภาระแบบที่ 2 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 4.43 และกรณีรับภาระแบบที่ 3 จะมีค่าตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 4.90 ซึ่งจะพบว่าโหนดในกรณีรับภาระแบบที่ 2 จะมีค่าความปลอดภัยน้อยที่สุด และจากการพิจารณาพบว่าตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นความเค้นความเค้นสูงสุดทั้ง 3 กรณีเกิดที่ตรงบริเวณล้อรถไฟ ซึ่งแต่ละกรณีจะมีค่าความเค้นความเค้นความเค้นสูงสุดไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

5.3 ปัญหาจากการศึกษา

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเครียดไม่ว่าจะเป็นตัวอุปกรณ์ขยายสัญญาณและกล่องวงจรบริดจ์ที่นำมาใช้วัดค่านั้น เป็นรุ่นที่เก่าที่ยกเลิกการผลิตไปเป็นเวลานานแล้วจึงเกิดปัญหาในเรื่องของการหาคู่มือการใช้งานที่ถูกต้อง และตัวอุปกรณ์นั้นก็มีความเก่าผ่านการใช้งานมานานแล้วจึงอาจส่งผลทำให้ค่าที่วัดได้นั้นมีความคลาดเคลื่อน อีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนคือเนื่องจากกลุ่มของพวกเรานั้นไม่มีประสบการณ์ในการติดตั้งตัวเกจวัดความเครียดมาก่อนจึงอาจเกิดความผิดพลาดในขั้นการติดตั้งตัวเกจวัดความเครียดได้และในขณะที่ทดลองเราไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของห้องที่ใช้ในการทดลองได้ดีพอจึงอาจส่งผลต่อการอ่านค่าจากเกจวัดความเครียด

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการออกแบบชุดแคร่รถไฟและส่วนรองรับน้ำหนักของผู้โดยสารตามกรณีการรับภาระน้ำหนักทั้งสามแบบนี้กลุ่มของพวกเราพิจารณาในกรณีที่ทุกอย่างอยู่สภาวะหยุดนิ่งเท่านั้น จึงมีข้อเสนอแนะให้น้ำชุดรถไฟจำลองที่สร้างขึ้นไปทดสอบการรับภาระน้ำหนักในกรณีที่รถไฟมีการเคลื่อนที่บนราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Kassner. 2012. **Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods.** International Journal of Fatigue 34. pp. 103–111.
- [2] Giampaolo Mancini and Alessandro Cera . **Design of railway bogies in compliance with new EN 13749 European standard.**
- [3] G.Moritz and J.Alfred. 2004. **Design of an active wheelset on a scaled roller rig.**Vehicle System Dynamics. pp.365-381.
- [4] **Strength Analysis of Bogie Frame Scaled Model**
- [5] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. 2008. **Shigley’s mechanical engineering design.** 9thed. United States. McGraw-Hill.
- [6] Robert L. Norton. 2006. **Machine design an integrated approach.** 3rd ed. Massachusetts : Pearson Prentice Hall. McGraw-Hill.



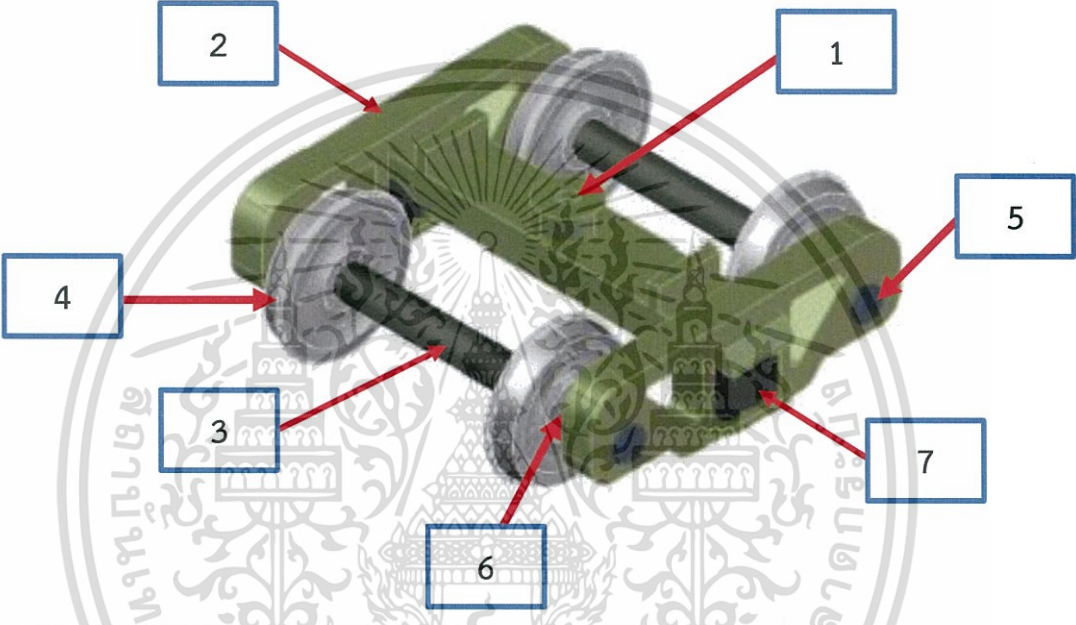
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
แบบชิ้นส่วนของแคร่รถไฟจำลอง

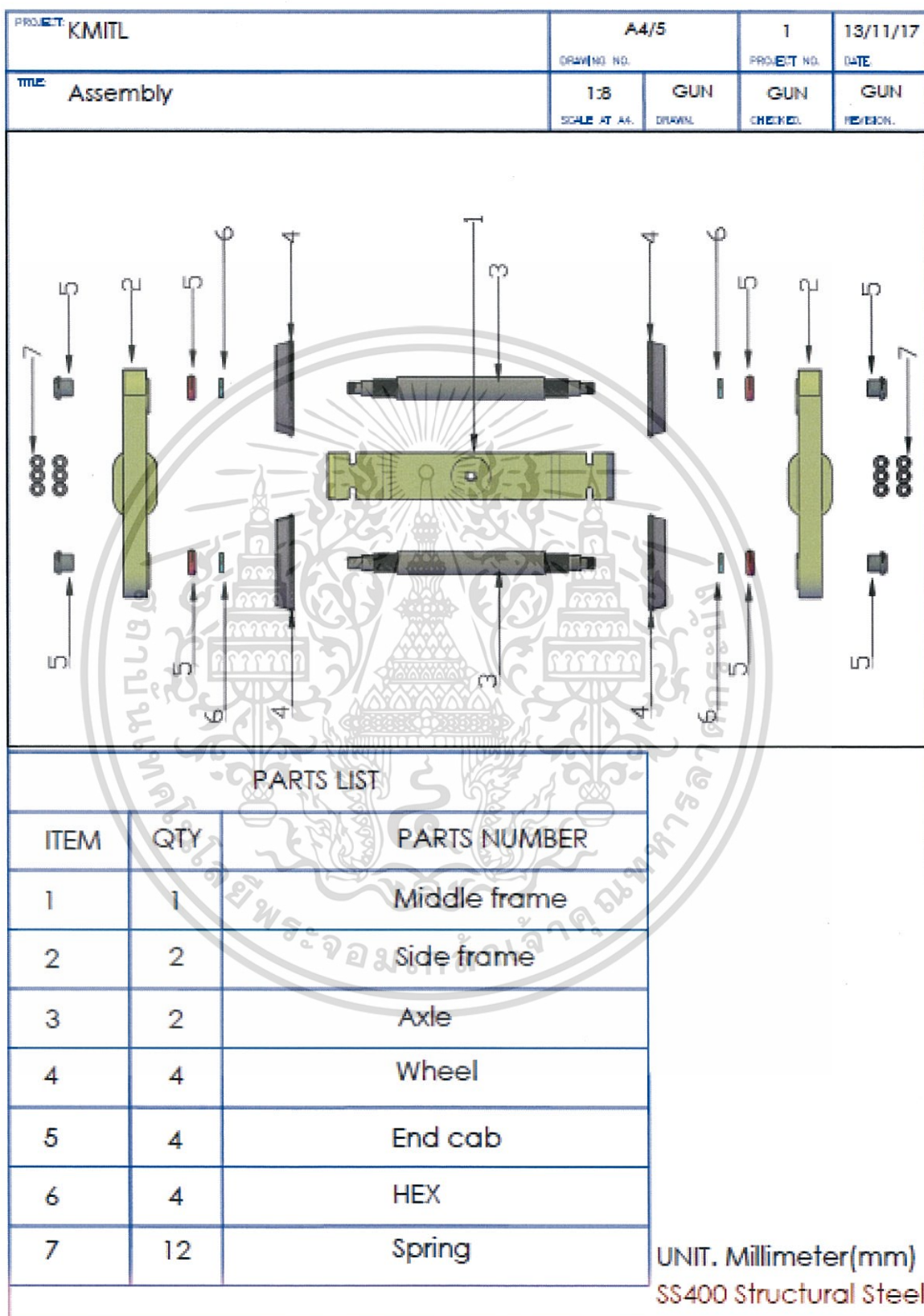
PROJECT: KMITL		A4/5		1	13/11/17
DRAWING NO.		PROJECT NO.		DATE	
Assembly		1:8	GUN	GUN	GUN
SCALE AT AS.		DRAWN.		CHECKED.	REVISION.



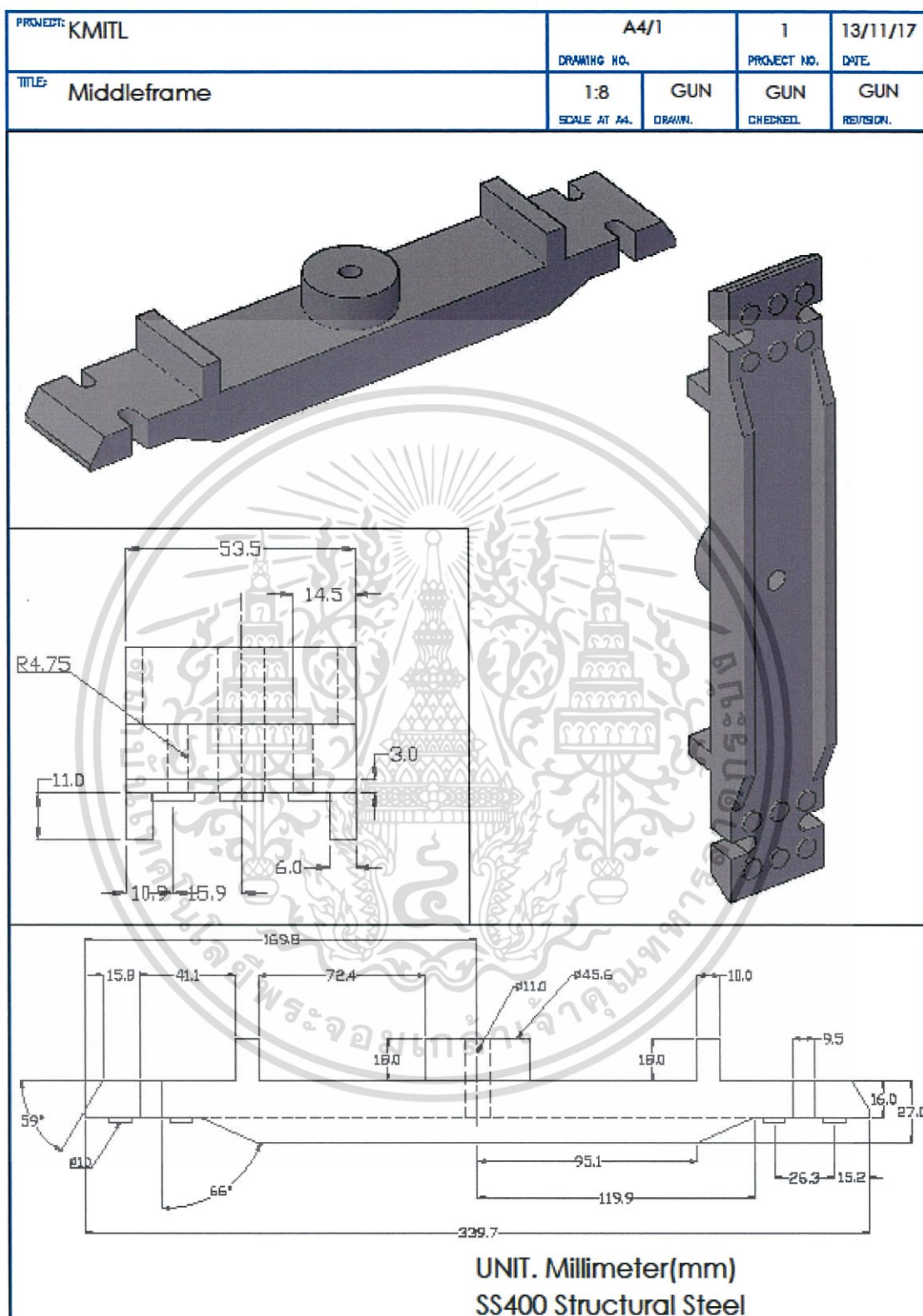
PARTS LIST		
ITEM	QTY	PARTS NUMBER
1	1	Middle frame
2	2	Side frame
3	2	Axle
4	4	Wheel
5	4	End cab
6	4	HEX
7	12	Spring

UNIT. Millimeter(mm)
SS400 Structural Steel

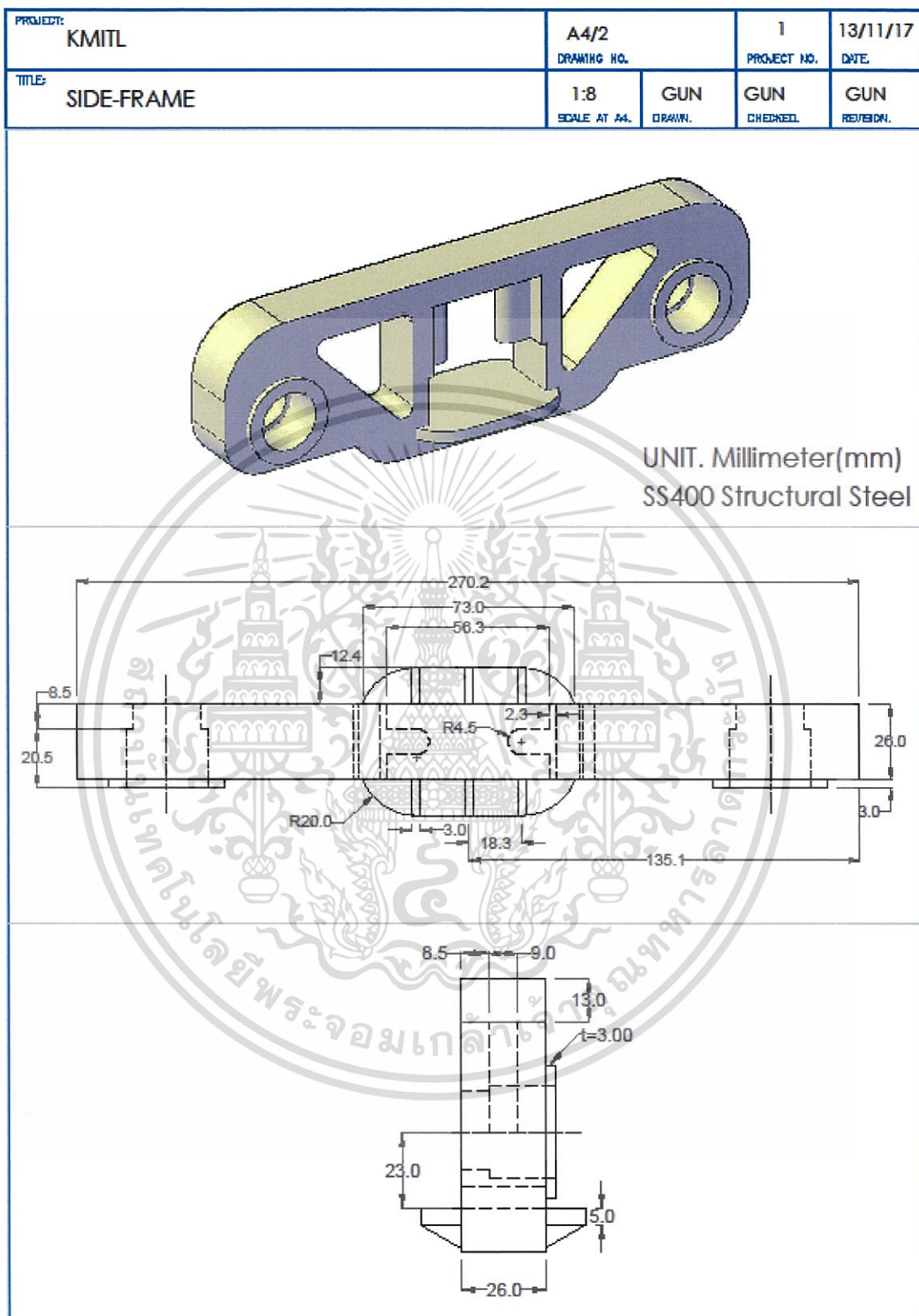
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

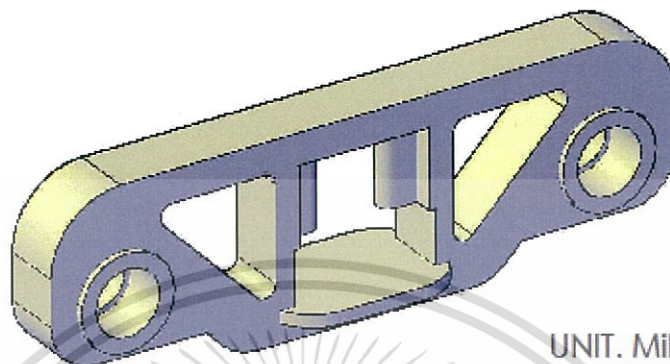


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

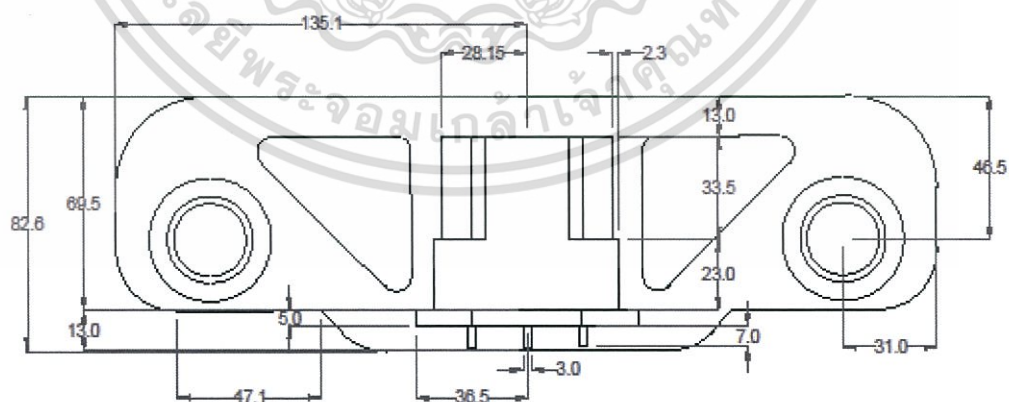
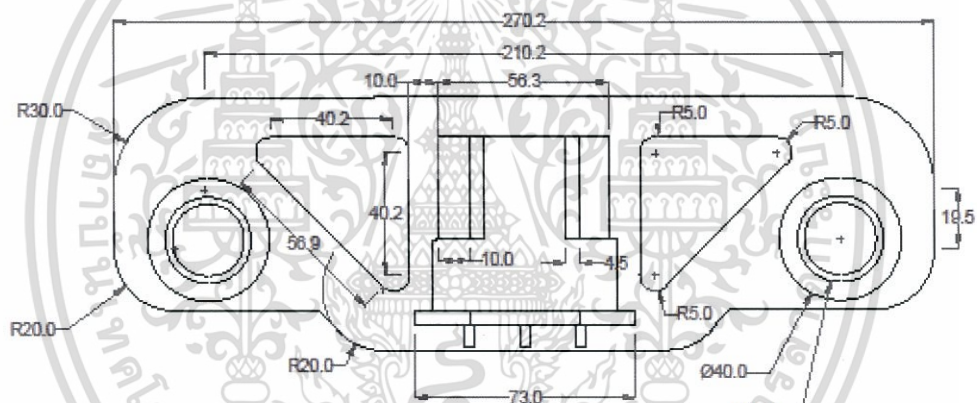


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROJECT: KMITL	A4/2	1	13/11/17
TITLE: SIDE-FRAME	DRAWING NO.	PROJECT NO.	DATE
	1:8 SCALE AT A4.	GUN DRAWN.	GUN CHECKED.
		GUN REVISION.	



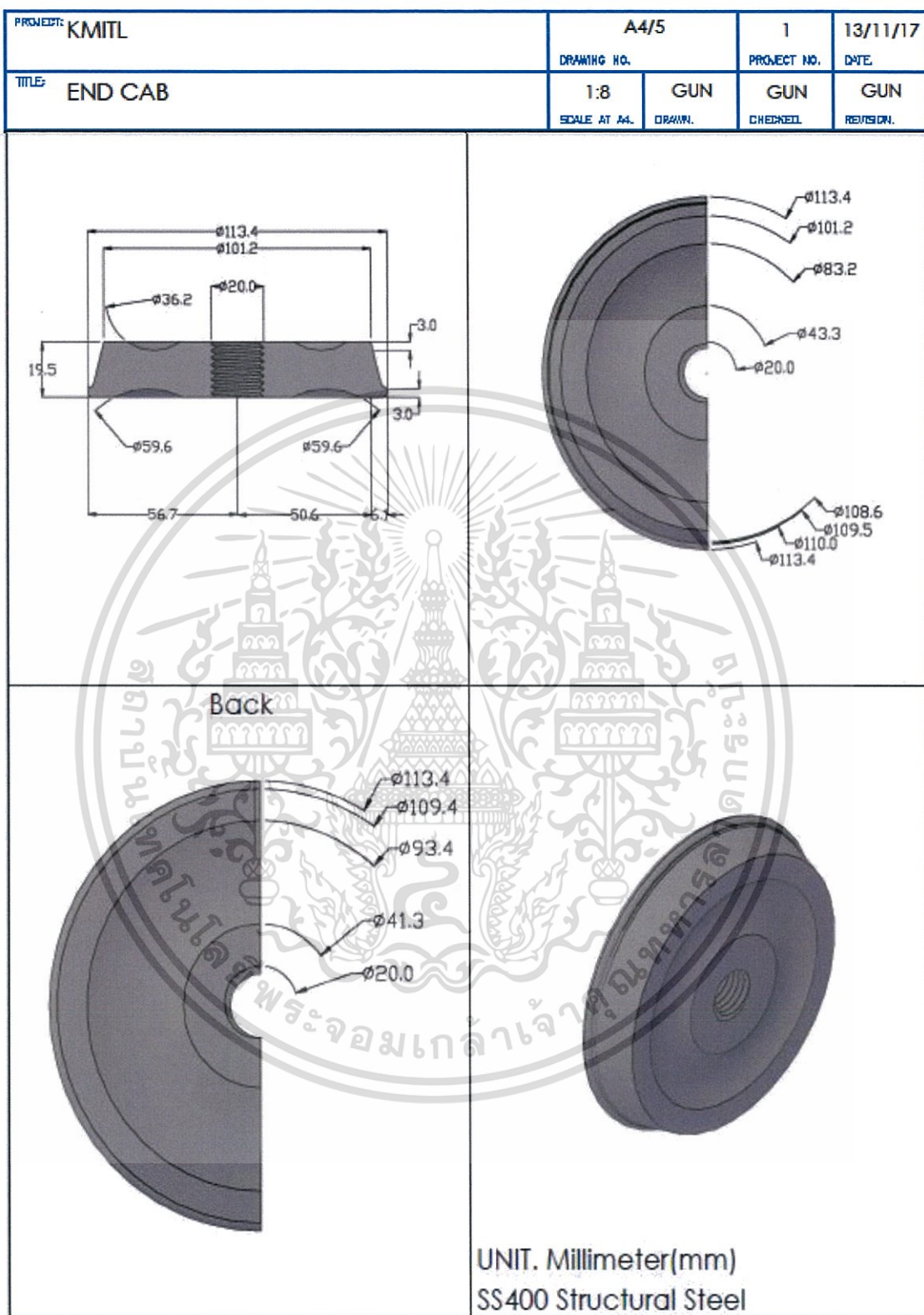
UNIT. Millimeter(mm)
SS400 Structural Steel



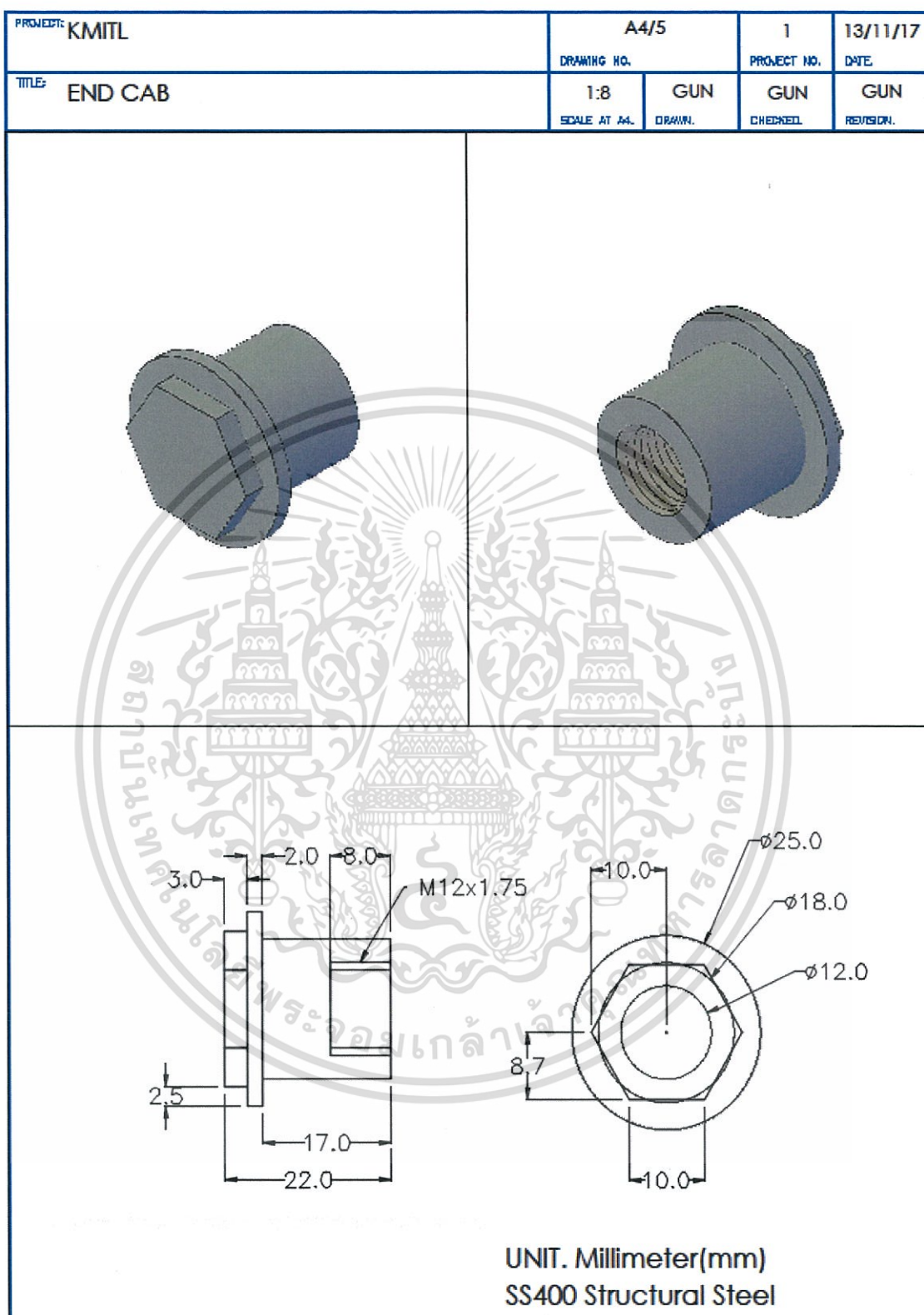
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



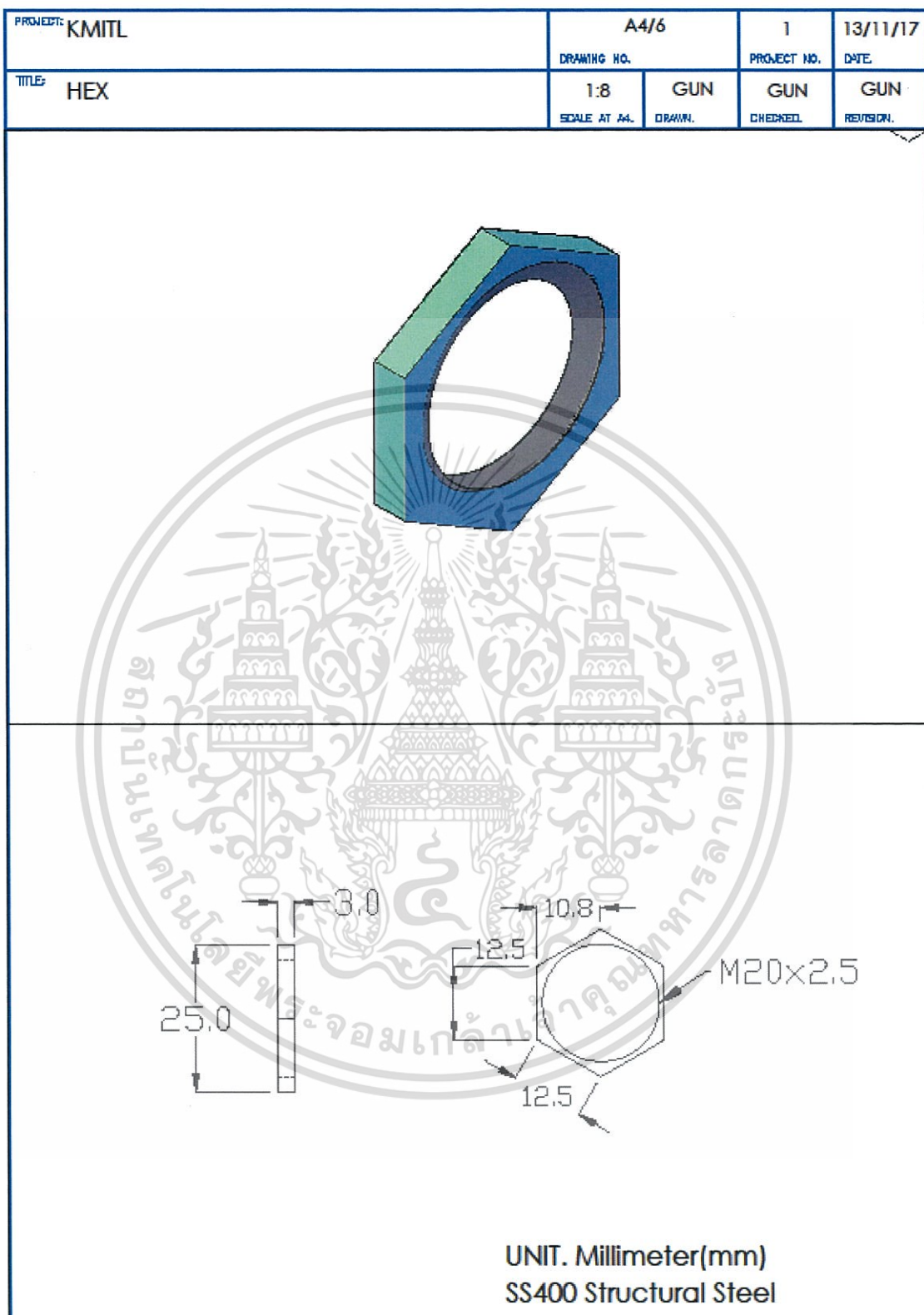
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข.1 การคำนวณหาแรงเพื่อเลือกขนาดแบริ่ง

โดยที่ต้องการความสามารถรับแรงกด 300 กิโลกรัมและน้ำหนักตัวรถ 37.2 กิโลกรัม โดยมี
แบริ่ง 8 ตัว ดังนั้น น้ำหนักที่แบริ่ง 1 ตัวจะรับเท่ากับ $\frac{(337.2 \times 9.81)}{8} = 413.49 \text{ N}$

เราจะได้อ่า $F_D = 413.49 \text{ N}$

การออกแบบนี้เราต้องการให้แบริ่งหมุนได้ถึง 100 ล้านรอบ

∴ จึงหาขนาดแบริ่งให้เหมาะสมกับการใช้งาน

$$C_{10} = F_R = F_D \left(\frac{L_D}{L_R} \right)^{\frac{1}{a}}$$

a คือ ลูกกลิ้งแบบเม็ดกลม มีค่าเท่ากับ 3

C_{10} คือ แรงในแนวนอนที่ทำให้แบริ่งมีค่า L_{10} หรือ $L_R = 10^6$ รอบ

C เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวงแหวนด้านในหมุนและวงแหวนด้านนอกอยู่นิ่ง
เนื่องจากการออกแบบแบริ่งกรณีนี้เป็นกคน้ำหนักลงสู่แบริ่งในแนวตั้งอย่างเดียว
ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นจึงมีแค่แรงในแนวนอน

$L_R = 10^6$ รอบ

$$\begin{aligned} C_{10} = F_R = F_D \left(\frac{L_D}{L_R} \right)^{\frac{1}{3}} \\ = (413.5) \left(\frac{100 \times 10^6}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} \\ = 1.919 \text{ kN} \end{aligned}$$

ซึ่งนำไปเทียบกับตารางในหนังสือจึงเลือกใช้แบริ่ง รุ่น 6001-2Z

ซึ่งมีค่า $C_{10} = 2.37 \text{ kN}$

$$\text{จาก } F.S. = \frac{C_{10} \text{ จากแคตตาล็อก}}{C_{10} \text{ ทฤษฎีการคำนวณ}} = \frac{2.37}{1.919} = 1.235$$

Specifications	
Clearance	C0 (Normal)
Bore Size d	12.000 mm
Features	Contact Seals
Weight	0.020 Kg
Dimensions	
Outside Diameter D	28.000 mm
Outside Ring Width B	8.000 mm
Radius Rs min	0.300 mm
Basic Load Ratings	
Cr - Dynamic Load Rating	5.1 kN
C0r - Static Load Rating	2.4 kN
Factors	
Grease Reference Speed	23000 rpm
Oil Reference Speed	33000 rpm



ข.2 การคำนวณหาค่าKของสปริง



ในการออกแบบสปริงเราใช้สปริงประเภทขดลวดดนตรี (music wire) ซึ่งมี ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

$$S_{ut} = \frac{A}{d^n} = \frac{2211}{0.0026^{0.145}} = 1924.94 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 0.45S_{ut} = 0.45 \times 1924.94 = 866.223 \text{ MPa}$$

$$D = 10 \text{ mm}, d = 2.6 \text{ mm}, C = \frac{10}{2.6} = 3.846$$

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} = \frac{4(3.846) + 2}{4(3.846) - 3} = 1.4037$$

จาก $F = kx$

$$F = \frac{(300 + 37.2)(9.81)}{(2)(12)} = 138.04 \text{ N}$$

k คือ ค่าคงที่ของสปริง

$$k = \frac{(d^4)(G)}{(8)(D^3)(N_a)} = \frac{(2.6^4)(G)}{(8)(D^3)(N_a)}$$

N_a คือ จำนวนขดทำงานของสปริงรับแรงกด (total number of active coil) ซึ่งสปริงที่ใช้คือ

สปริงปลายตรง หรือ ปลายชิด (squared or closed)

$$N_a = N_t - 2$$

N_t คือ จำนวนขดทั้งหมดของสปริง = 9

$$\therefore N_a = 9 - 2 = 7 \text{ ขด}$$

$$k = \frac{(2.6^4)(82,700)}{(8)(10^3)(7)} = 67.48 \text{ N/mm}$$

$$\therefore F = (67.48)(x) = 138.04$$

$$x = 2.045 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในการออกแบบชิ้นงานนี้ต้องยุบไม่เกิน 5 mm สปริงนี้จึงสามารถนำมาใช้งานได้
หาค่า ตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor)

$$F.S. = \frac{S_{ut}}{\tau} = \frac{1924.94}{\tau}$$

$$\tau_{\text{ความเค้นสปริง}} = \frac{K_B 8FD}{\pi d^3}$$

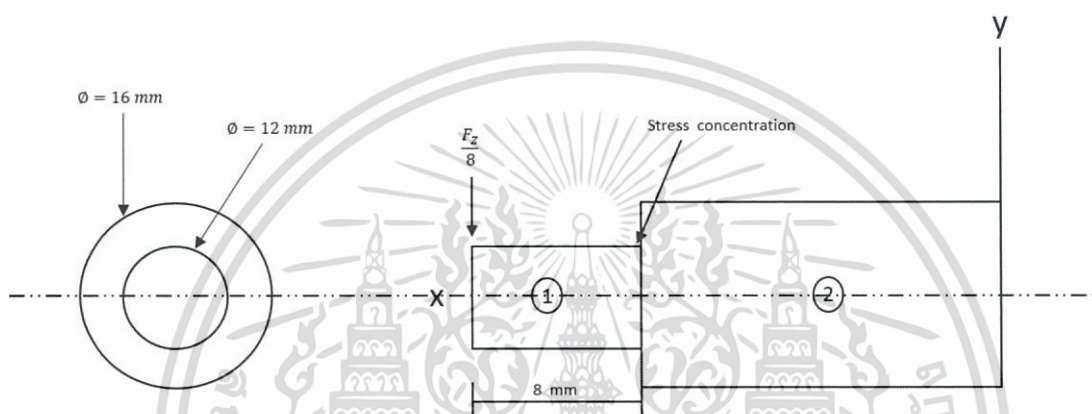
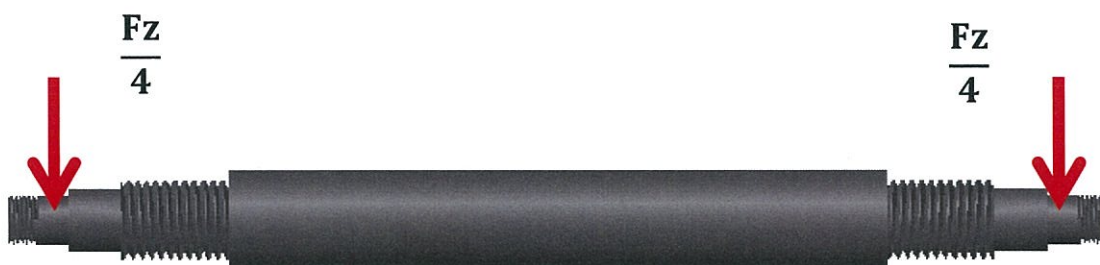
$$= \frac{(1.4037)(8)(138.04)(10)}{(\pi)(2.6^3)} = 280.736 \text{ MPa}$$

$$\therefore F.S. = \frac{1924.34}{280.736} = 6.855$$



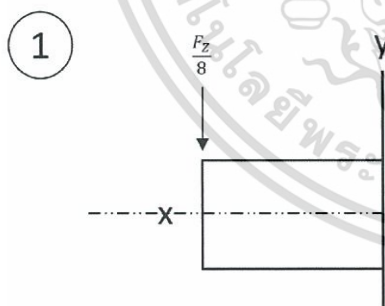
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 การคำนวณหา safety factor ของเพลา



การออกแบบป่าของเพลา

จาก FBD ของส่วนที่ 1



$$\sigma_x = \frac{M_x c}{I_x} = \frac{\frac{F_z}{8} L_c}{\frac{\pi d^4}{64}}, \sigma_y = 0, \sigma_z = 0$$

$$F_z = (\text{น้ำหนักโดยสาร} + \text{น้ำหนักตัวรถ}) \times 9.81 \\ = 3,307.93 \text{ N}$$

$$\therefore M_x = \frac{(3,307.93)(0.008)}{8} = 3.308 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \sigma_x = \frac{(3.308)(0.006)}{\frac{\pi(0.012)^4}{64}} = 19.5 \text{ MPa}$$

ซึ่งจุดที่น้ำหนักที่กดลงเป็นจุดศูนย์รวมความเค้น (stress concentration)

$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x$$

ซึ่ง k_t ใช้กับความเค้นตึงฉากซึ่งหาได้จากตาราง A-15 Figure A-15-9 ของ shingley

ซึ่ง $r = \frac{d}{50}$ โดยที่ r คือ fillet of radius

$$\therefore \frac{r}{d} = 0.02 \text{ และ } \frac{D}{d} = \frac{16 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 1.33$$

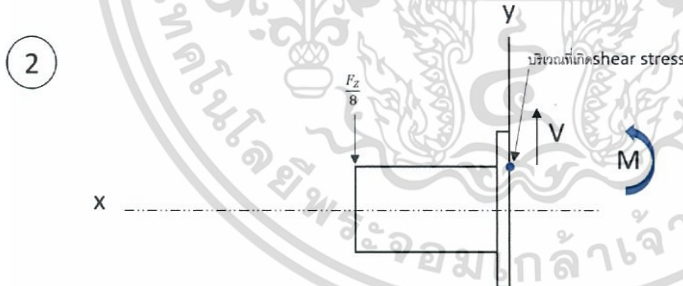
$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x = 2.8(19.5) = 54.6 \text{ MPa}$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_{von} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{max})^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(54.6)^2 + (54.6)^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= 54.6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{หา } S.F. = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{290 \times 10^6}{54.6 \times 10^6} = 5.31$$

จาก FBD ของส่วนที่ 2



$$\sigma_x = \frac{M_x y}{I_x} = \frac{F_z L y}{8I}, \sigma_y = 0, \sigma_z = 0, \tau_{xy} = \frac{VQ}{Ib}$$

$$\begin{aligned} F_z &= (\text{น้ำหนักโดยสาร} + \text{น้ำหนักตัวรถ}) \times 9.81 \\ &= 3,307.93 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\therefore M_x = \frac{(3,307.93)(0.008)}{8} = 3.308 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\therefore \sigma_x = \frac{(3.308)(0.006)}{\frac{\pi(0.016)^4}{64}} = 6.17 \text{ MPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 64 นวส สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าความเค้นเฉือนได้จาก $\tau = \frac{VQ}{Ib}$

หรือได้ $\tau = \frac{V}{2I}(c^2 - y^2)$ โดยที่ $c = 0.008, y = 0.006$

เนื่องจาก $v = \frac{Fz}{8} = 413.5$

$$\therefore \tau = \frac{413.5}{2(3.217 \times 10^{-9})}(0.008^2 - 0.006^2) = 1.8 \text{ MPa}$$

ซึ่ง σ_x และ τ_x เป็นจุดศูนย์รวมความเค้น (stress concentration)

$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x$$

$$\tau_{max} = k_{ts} \tau_x$$

ซึ่ง $r = \frac{d}{50}$ โดยที่ r คือ fillet of radius

$$\therefore \frac{r}{d} = 0.02 \text{ และ } \frac{D}{d} = \frac{16 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 1.33$$

$$\therefore k_t = 2.8 \text{ และ } k_{ts} = 2.4$$

$$\sigma_{max} = k_t \sigma_x = (2.8)(6.17) = 17.27 \text{ MPa}$$

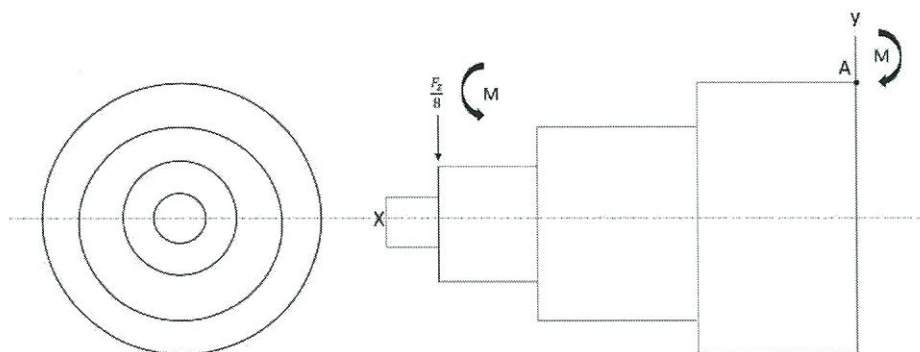
$$\tau_{max} = k_{ts} \tau_x = (2.4)(1.8) = 4.32 \text{ MPa}$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_{von} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{max})^2 + 6(4.32)^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= 18.82 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{หา } S.F. = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{290 \times 10^6}{18.82 \times 10^6} = 15.4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบตรงกลางของเพลลา

ซึ่งตรงจุด A จะได้รับความเสียหายก่อน

$$\sigma_x = \frac{M_x c}{I_x} = \frac{\frac{F_z}{8} L_c}{\frac{\pi d^4}{64}}, \sigma_y = 0, \sigma_z = 0$$

$$F_z = \frac{\text{น้ำหนักโดยสาร} + \text{น้ำหนักตัวรถ}}{2} \times 9.81$$

$$= 3,307.93 \text{ N}$$

$$\therefore M_x = \frac{(3,307.93)(0.138)}{8} = 57.06 \text{ N} \cdot \text{m}$$

คิดทั้งสองฝั่ง

$$\therefore \sigma_x = 2 \frac{(57.06)(0.0125)}{\frac{\pi(0.025)^4}{64}} = 74.41 \text{ MPa}$$

จากสูตร Von Mises

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

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(32.37)^2 + (32.37)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \sigma_{von} = 32.37 \text{ MPa}$$

$$\text{หา } S.F. = \frac{S_y}{\sigma_{von}} = \frac{290 \times 10^6}{74.41 \times 10^6} = 3.89$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าความเค้นวอนมิสเสสของแควร์รถไฟตรงจุดที่ติดตัววัดความเครียดภาระจากน้ำหนัก 20 กิโลกรัม

ตารางที่แสดงค่าความเครียดในแต่ละแกนที่วัดจากตัววัดความเครียด

Axis	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_2 = 45^\circ$	$\theta_3 = 90^\circ$
$\varepsilon \mu(\text{mm/mm})$	1.7739	2.8911	4.0088

Axis 0°

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \cos \theta_1 \sin \theta_1$$

$$1.7739 = \varepsilon_x \cos^2 0 + \varepsilon_y \sin^2 0 + \gamma_{xy} \cos 0 \sin 0$$

$$1.7739 = \varepsilon_x (1) + \varepsilon_y (0) + \gamma_{xy} (1)(0)$$

$$\varepsilon_x = 1.7739 \mu(\text{mm/mm})$$

Axis 90°

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \cos \theta_3 \sin \theta_3$$

$$4.0088 = \varepsilon_x \cos^2 90 + \varepsilon_y \sin^2 90 + \gamma_{xy} \cos 90 \sin 90$$

$$4.0088 = \varepsilon_x (0) + \varepsilon_y (1) + \gamma_{xy} (0)(1)$$

$$\varepsilon_y = 4.0088 \mu(\text{mm/mm})$$

Axis 45°

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \cos \theta_2 \sin \theta_2$$

$$2.8911 = 1.7739 \cos^2 45 + \varepsilon_y \sin^2 45 + \gamma_{xy} \cos 45 \sin 45$$

$$2.8911 = 1.7739(0.5) + 4.0088(0.5) + \gamma_{xy}(0.5)$$

$$\gamma_{xy} = -0.0005 \mu(\text{mm/mm})$$

ใช้กฎของฮุกแบบ 2 มิติ เพื่อหา $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ration) = 0.3

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น = 174.017 GPa

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.7739 \times 10^{-6} \\ 4.0088 \times 10^{-6} \\ -0.0005 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-0.3)(174.017 \times 10^9)}{(1+0.3)(1-2(0.3))} & \frac{(0.3)(174.017 \times 10^9)}{(1+0.3)(1-2(0.3))} & 0 \\ \frac{(0.3)(174.017 \times 10^9)}{(1+0.3)(1-2(0.3))} & \frac{(1-0.3)(174.017 \times 10^9)}{(1+0.3)(1-2(0.3))} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{174.017 \times 10^9}{2(1+0.3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.7739 \times 10^{-6} \\ 4.0088 \times 10^{-6} \\ -0.0005 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3425 \times 10^{11} & 1.0039 \times 10^{11} & 0 \\ 1.0039 \times 10^{11} & 2.3425 \times 10^{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0.6693 \times 10^{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.7739 \times 10^{-6} \\ 2.8911 \times 10^{-6} \\ -0.0005 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2.3425 \times 10^{11})(1.7739 \times 10^{-6}) + (1.0039 \times 10^{11})(2.8911 \times 10^{-6}) + (0)(-0.0005 \times 10^{-6}) \\ (1.0039 \times 10^{11})(1.7739 \times 10^{-6}) + (2.3425 \times 10^{11})(2.8911 \times 10^{-6}) + (0)(-0.0005 \times 10^{-6}) \\ (0)(1.7739 \times 10^{-6}) + (0)(2.8911 \times 10^{-6}) + (0.6693 \times 10^{11})(-0.0005 \times 10^{-6}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7617 \times 10^6 \\ 0.98601 \times 10^6 \\ -0.037 \times 10^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7617 \\ 0.98601 \\ -0.037 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

ตารางที่แสดงค่าความเค้นในแต่ละแกนที่วัดจากตัววัดความเค้น (ต่อ)

Axis	σ_x	σ_y	τ_{xy}
σ (MPa)	0.7617	0.98601	-0.037

จะได้ค่าความเค้นวอนมิสเชส σ_{von} ดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{von} = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}$$

$$\sigma_{von} = (0.7617^2 - (0.7617 \times 0.98601) + 0.98601^2 + 3(-0.037)^2)^{1/2}$$

$$\sigma_{von} = 0.879 \text{ MPa}$$

ค่าความเค้นวอนมิสเสสของแควร์รถไฟจากโปรแกรมจำลองรับภาระน้ำหนัก 20 กิโลกรัม

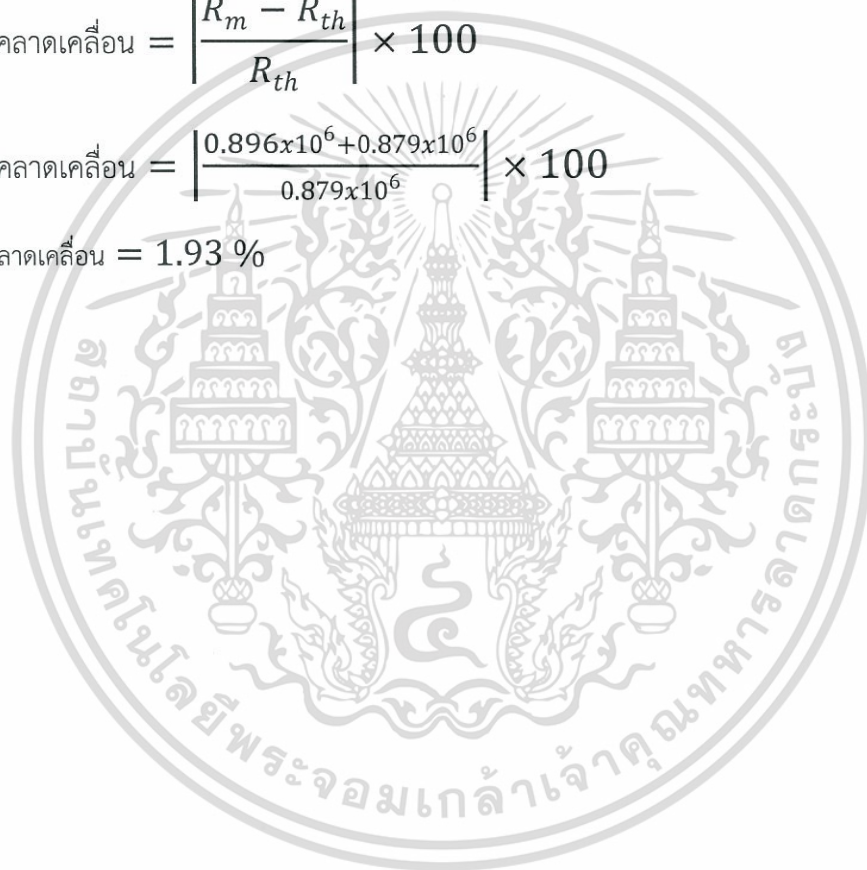
$$\sigma_{von} = 0.896 \text{ MPa}$$

นำมาเปรียบเทียบเพื่อหาความคลาดเคลื่อนจากไฟต์ไนต์เอลิเมนต์

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{R_m - R_{th}}{R_{th}} \right| \times 100$$

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{0.896 \times 10^6 + 0.879 \times 10^6}{0.879 \times 10^6} \right| \times 100$$

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อน} = 1.93 \%$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 ตัวอย่าง การคำนวณ ค่าความเครียด (ϵ) ทางทฤษฎี โดยที่น้ำหนักลงตรงจุดกึ่งกลางคาน 1 กิโลกรัม

$$\sigma(y) = -\frac{My}{I}$$

M คือ โมเมนต์ที่หน้าตัดใดๆของคาน ($N.m$)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน (m^4)

y คือ ระยะห่างจากแกนสะเทินตามแนวแกน

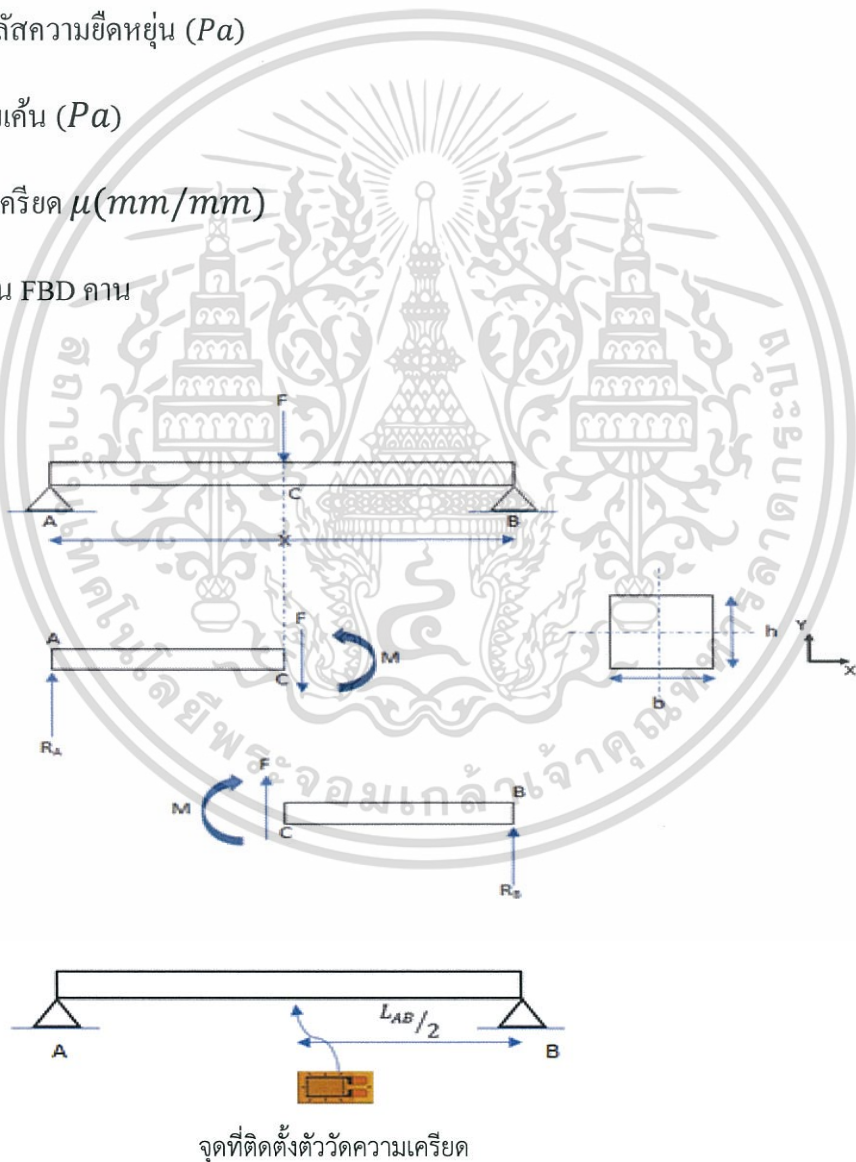
$$\sigma = E\epsilon$$

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Pa)

σ คือ ความเค้น (Pa)

ϵ คือ ความเครียด $\mu(mm/mm)$

วิธีทำ เขียน FBD คาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัด (Bending Moment)

$$\sigma(y) = -\frac{My}{I}$$

น้ำหนักกดลงตรงกึ่งกลางคาน 1 กิโลกรัม โดยที่คาน AB ยาว = 0.8m , หน้าตัดของคานสี่เหลี่ยมความกว้าง $b=1.31\text{cm}$ และ สูง $h=1.31\text{cm}$, เหล็ก เกรด SS400 มีค่า $E = 174.017 \text{ GPa}$ ได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของโลหะด้วยวิธีการดึง, เนื่องจากติดตั้ง ตัววัดความเครียด

ไว้ที่ใต้คานค่า $(y = -\frac{h}{2})$ วัดจากแนวแกนสะเทิน (Neutral surface)

$$\begin{aligned}\sigma(y) &= -\frac{My}{I} = -\frac{\left(\frac{F}{2}\right)\left(\frac{L_{AB}}{2}\right)\left(-\frac{h}{2}\right)}{\frac{1}{12}(b)(h)^3} = -\frac{\left(\frac{1 \times 9.81}{2}\right)(0.4)\left(-\frac{0.0131}{2}\right)}{\frac{1}{12}(0.0131)(0.0131)^3} \\ &= 5.2364 \times 10^6 \text{ Pa}\end{aligned}$$

จากกฎของฮุก (Hooke's Law) สำหรับ 1 มิติ

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{5.2364 \times 10^6}{170.017 \times 10^9} = 30.09 \times 10^{-6} = 30.09 \mu(\text{mm/mm})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้