วิเคราะห์ความแข็งแรงของชุดโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ภายใต้การทดสอบตามข้อกำหนด ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

Analysis Strength Of Medical Container Structure By Requirements Of ECE Regulation No.66 And FMVSS 220 Using Finite Element Method

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

วิเคราะห์ความแข็งแรงของชุดโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ภายใต้การทดสอบตามข้อกำหนด ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

Analysis Strength Of Medical Container Structure By Requirements Of ECE Regulation No.66 And FMVSS 220 Using Finite Element Method

ณัฐชนน สมจิตต์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis Strength Of Medical Container Structure By Requirements Of ECE Regulation No.66 And FMVSS 220 Using Finite Element Method

Natchanon Somjit

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วิเคราะห์ความแข็งแรงของชุดโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ภายใต้การทดสอบตามข้อกำหนด ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

Analysis Strength Of Medical Container Structure By Requirements Of ECE Regulation No.66 And FMVSS 220 Using Finite Element Method

ผู้จัดทำ

1.นายณัฐชนน สมจิตต์ รหัสประจำตัว 56010377

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ความแข็งแรงของชุดโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ภายใต้การทดสอบตาม
ข้อกำหนด ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

นายณัฐชนน สมจิตต์ 56010377
ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์มีความสาคัญ ที่ช่วยป้องกันผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บ จากการอุบัติเหตุถูกชนกระแทก รวมถึงกรณีที่ร้ายแรงพลิกคว่ำช่วยป้องกันผู้โดยสารไม่ให้กระเด็นหลุดออกจากตัวห้องโดยสารทางการแพทย์ เป็นเหตุทำให้ได้รับบาดเจ็บรายแรงหรือเสียชีวิต ในปัจจุบันนี้ภาครัฐได้ออกระเบียบที่จะควบคุมสถานประกอบการให้รถพยาบาลฉุกเฉินที่มีการจัดซื้อของโรงพยายาลรัฐต้องผ่านการทดสอบความแข็งแรงทางโครงสร้าง โดยการทดสอบดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ โดย ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 แต่อย่างไรก็ตามในประเทศไทยนั้นยังไม่มีหน่วยงานใดที่ลงทุนสร้างแท่นทดสอบที่จะทดสอบความแข็งแรงห้องโดยสารทางการแพทย์ และรับรองผลการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว จึงเป็นที่มาให้ผู้วิจัยได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างให้เป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดของ ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงเพื่อลดเวลาในการทดสอบจริงอีกทั้งยังประหยัดและง่ายต่อการปรับปรุงจุให้มีความแข็งแรงตามมาตรฐานก่อนทดสอบจริง ผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์แบบเดิมนั้นเกิดความเสียหายเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจึงได้ออกแบบโครงสร้างเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยการเพิ่มเหล็กกล่องไว้ในผนังสำเร็จรูป ด้ปรับปรุงโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ด้วยวิธีออกแบบการทดลองทำให้ได้ปัจจัย ในการปรับปรุงโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสาคัญต่อค่าความเค้นวอนมิสเซสของโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ การปรับปรุงโดยใช้ปัจจัยเหล่านั้นทำให้มีความแข็งแรงผ่านตามมาตรฐานการทดสอบในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ และ ได้ออกแบบและสร้างแท่นทดสอบเพื่อทดสอบจริง และโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ที่สร้างจากแบบจำลองผ่านการทดสอบจริงตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ซึ่งผลการทดสอบห้องโดยสารทางการแพทย์ผ่านการทดสอบทั้ง2 มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis Strength Of Medical Container Structure By Requirements Of ECE Regulation No.66 And FMVSS 220 Using Finite Element Method

Natchanon Somjit 56010377

Asst.Prof.Dr.Chinda Charoenphonphanich Advisor

Year 2016

ABSTRACT

Medical Container Structure is an important for safety in order to safe passenger from injury and deaths in accident. Department of Land Transport (DLT) has prescribed the law to control the Ambulance manufacturing company for anchoring Medical Container Structure according to the standard ECE Regulation No.66 And FMVSS 220. There are standard test for Medical Container Structure of ambulance. However, in Thailand ,there is no laboratory to test the Medical Container Structure and certify the testing according to those standards. This research was to analyze strength of the Medical Container Structure following to the requirements of the Medical Container Structure by using Finite Element Method. The analysis results showed that the Structure were slightly damaged. The results showed that improved Medical Container Structure are strong enough and conform to requirements on the basis of standard ECE Regulation No.66 And FMVSS 220.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากการร่วมมือและความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความใส่ใจ ความเมตตา และความรักแก่พวกเราคณะผู้จัดทำเป็นอย่างมาก รวมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำที่เปี่ยมไปด้วยความรู้และประสบการณ์ซึ่งทำให้ผู้จัดทำซาบซึ้งมากจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณปรีดา วงศ์ตั้งใจ กรรมการผู้จัดการ คุณพณิช ธีรติ ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการ คุณมารุต แย้มจารึก ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายออกแบบรถพิเศษ บริษัท ที เค ดี ไฟเบอร์ จำกัด (Carryboy) และอาจารย์ชาติชาย ชุมจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัย-เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้โอกาสและความรู้เพิ่มเติมและแนะนำหนังสือที่เกี่ยวข้องอันเป็นประโยชน์หลายเล่มให้แก่ผู้จัดทำ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความรู้และแรงบันดาลใจสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงเพื่อนๆจากสาขาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมขนส่งทางรางสำหรับกำลังใจและคำปรึกษาต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ พลอากาศตรี โชคดี - นาวาอากาศโทหญิง อัชราวัลย์ สมจิตต์ ผู้เป็นบิดาและมารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสูงสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายณัฐชนน สมจิตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VII
สารบัญรูป(ต่อ) VII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 1
1.4 สมมติฐานของการศึกษา 1
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย 2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน 2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 หัวข้อที่ศึกษา 3
2.2 มาตรฐาน FMVSS220 และ AMD001 3
2.2.1 ข้อมูลมาตรฐาน FMVSS 220 3
2.2.1 ข้อมูล มาตรฐาน AMD 001 4
2.3 มาตรฐาน ECE R66 5
2.3.1 ขอบังคับ 5
2.3.2 พื้นที่ปลอดภัย 5
2.3.3 รายละเอียดการทดสอบการพลิกคว่ำขั้นพื้นฐาน 6
2.3.4 การทดสอบเทียบเท่าของโครงสร้างรถพยาบาล 7
2.3.5 ชุดทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66 7
2.3.6 เกณฑ์ชี้วัดการทดสอบ 8
2.4 ทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ 8
2.4.1 พื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร 10
2.4.3 สร้างรูปแบบคณิตศาสตร์ 11
2.4.4 สร้างชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์ 12
2.4.5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต 12
2.4.6 ค่าความผิดพลาดจากการคานวณ 13
2.4.7 อิลลิเมนต์ 13
2.4.8 ความเค้นหลัก (Principal Stress) 17
2.4.9 ทฤษฎีความเสียหาย 23
2.4.10 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 26
2.4.11 แรงกระทาสถิต (Static Loads) 28
2.5 วัสดุคอมโพสิต (Composites) 29
2.5.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต 30
2.5.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต 30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและการออกแบบชุดทดลอง 29
3.1 บทนำ 32
3.2 แบบจำลองโครงสร้าง 33
3.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสารด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ 34
3.3.1 การสร้างแบบจำลอง 35
3.3.2 การกำหนดขนาดอิลลิเมนต์ 36
3.3.3 การกำหนดสมบัติวัสดุ 37
3.3.4 การกาหนดเงื่อนไขการสัมผัส 38
3.3.5 การกาหนดเงื่อนไขขอบเขต 38
3.3.6 การทดสอบการลู่เข้าของผลการวิเคราะห์โดยวิธีการ Grid Independent 38
3.4 การทดสอบตามมาตรฐาน 40
3.4.1 การทดสอบตามมาตรฐาน FMVSS 220 40
3.4.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66 41
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลลัพธ์ 42
4.1 บทนำ 42
4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงตู้โดยสารทางการแพทย์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ค่าระยะการเสียรูปของเพดานในแนวตั้งฉากกับพื้น มาตรฐาน FMVSS 220 42
4.2.2 ค่าการเสียรูปของโครงสร้างไม่ไม่ทับซ้อนพื้นที่ปลอดภัย มาตรฐาน ECE R.66 43
4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรง 44
4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของตู้โดยสารทางการแพทย์มาตรฐาน FMVSS 220 44
4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของตู้โดยสารทางการแพทย์มาตรฐาน ECE R.66 45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 47
5.1 บทนำ 47
5.2 สรุปผลการทดลอง 47
5.3 ข้อเสนอแนะ 47
เอกสารอ้างอิง 48
ภาคผนวก 49
ภาคผนวก ก แบบจำลองตู้โดยสารทางการแพยท์ 50
ภาคผนวก ข การทดสอบการพลิกคำ่ตามมาตรฐาน FMVSS220 และ AMD001 55
ภาคผนวก ค การทดสอบการพลิกคำ่ตามมาตรฐาน ECE R.66 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า
3.1 รายการส่วนประกอบห้องโดยสารทางการแพทย์ 34
3.2 ข้อมูลการแบ่งอิลลิเมนต์ของห้องโดยสารทางการแพทย์ 36
3.3 ค่าสมบัติวัสดุของโครงสร้าง 37
4.1 ตำแหน่งจุดวัดและระยะการเสียรูป 44
4.2 ผลการทดสอบแรงกระทำบนของหลังคาห้องการเปรียบเทียบผลระยะการเสียรูปของการทดสอบและการวิเคราะห์ 46

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า
2.1 การติดตั้งการทดสอบ Static load test 4
2.2 พื้นที่ที่เหลือหรือพื้นที่ปลอดภัยภายในห้องโดยสาร 6
2.3 ลักษณะของเครื่องทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน 6
2.4 ลักษณะรูปร่างของชุดทดสอบการพลิกคว่ำ 7
2.5 พื้นที่ปลอดภัยและการหาพื้นที่ปลอดภัย 8
2.6 การเตรียมชิ้นงานด้วยการระงับการลบมุม 9
2.7 ขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของ COSMOSWorks 9
2.8 ขั้นตอนการคำนวณ 11
2.9 โมเดลเอลิเมนต์ 12
2.10 ชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์ 12
2.11 เอลิเมนต์ลาดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า 14
2.12 โมเดลเอลิเมนต์ลาดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า 14
2.13 เอลิเมนต์ลาดับที่สองทรงสี่หน้า 14
2.14 โมเดลเอลิเมนต์ลาดับที่สองทรงสี่หน้า 15
2.15 เอลิเมนต์ลาดับที่หนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม 15
2.16 ชิ้นงานแบบแบ่งเอลิเมนต์ลาดับที่หนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม 15
2.17 อิลลิเมนต์ลาดับที่สองแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม 16
2.18 ชิ้นงานแบบแบ่งอิลลิเมนต์ลาดับที่สองพื้นผิวสามเหลี่ยม 16
2.19 เอลิเมนต์ทรงตันและเอลิเมนต์ผนังบาง 17
2.20 ความเค้นกระทาบนเอลิเมนต์ในระบบ 3 มิติ 17
2.21 วงกลมโมห์รวิเคราะห์ความเค้น 3 มิติ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.22 วงกลมโมห์รวิเคราะห์ความเค้น 3 มิต 19
2.23 ระนาบ Octahedral 20
2.24 ค่าความเค้นบนแผ่นเหล็ก 22
2.25 การเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ในระนาบหลัก 24
2.26 ส่วนประกอบความเค้นในแต่ละระนาบ 26
2.27 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด 27
2.28 เปรียบเทียบปริมาณการโก่งงอ 28
3.1 แผนผังขั้นตอนการดาเนินงาน 32
3.2 โครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ 33
3.3 ส่วนประกอบของห้องโดยสารทางการแพทย์ 33
3.4 แผนผังแสดงการคานวณทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ 34
3.5 ต้นแบบตู้โดยสารทางการแพทย์ 35
3.6 แบบจำลองห้องโดยสารทางการแพทย์ 35
3.7 ค่าความเค้นวอนมิสเซสอิลลิเมนต์ขนาด 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร 36
3.8 การแบ่งอิลลิเมนต์ของแบบจาลองห้องโดยสารทางการแพทย์ 37
3.9 การกาหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง 38
3.10 ผลการลู่เข้าของค่าความเค้นฟอนมิสเซสสูงสุดที่ได้ทาการทดสอบ 39
3.11 ผลการลู่เข้าของค่าการเสียรูปสูงสุดที่ได้ทาการทดสอบ 39
3.12 การทดสอบการรับภาระแบบสถิต 40
3.13 วัดระยะการเสียรูปที่จุดอ้างอิง 40
3.14 ชุดมวลถ่วงน้าหนักรวมโครงสร้าง 41
3.15 ภาพรวมการติดตั้งแท่นทดสอบ 41
4.1 แผนภาพเปรียบเทียบขนาดอิลลิเมนต์และเวลาในการประมวลผล 42
4.2 ชั้นแถบสีค่าการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y ของตู้โดยสารทางการแพทย์ 43
4.3 ชั้นแถบสีและพื้นที่ปลอดภัยภายในกรอบภายในตู้โดยสาร 43
4.4 การตรวจสอบความเสียหายโดยใช้พื้นที่ปลอดภัย 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

รถพยาบาลฉุกเฉินที่มีใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะนำรถตู้โดยสารมาดัดแปลง โดยเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้ารถพยาบาลมาตรฐานจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ซึ่งรถตู้โดยสารดัดแปลงไม่มีมาตรฐานเกี่ยวกับการใช้งานทางการแพทย์ฉุกเฉินมารองรับ ด้วยเหตุนี้ทำให้ความเสี่ยงของบุคลากรทางการแพทย์ฉุกเฉินและผู้ป่วยเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ทางบริษัท ที เค ดีไฟเบอร์ จำกัด ได้เล็งเห็นความสำคัญชีวิตและสวัสดิภาพของบุคลากรทางการแพทย์ฉุกเฉินและผู้ป่วย ดังนั้นจึงวางแผนออกแบบและผลิตห้องโดยสารทางการแพทย์ที่สามารถติดตั้งบนรถกระบะตอนเดียว ด้วยวิธีนี้เราจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับห้องโดยสารทางการแพทย์ได้และยังเพิ่มพื้นที่ในการทำงานบนรถได้อีกทางหนึ่งด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ห้องโดยสารทางการแพทย์ ตามมาตรฐานยุโรป ข้อ ECE Regulation No. 66 และมาตรฐานอเมริกา FMVSS 220 ด้วย ระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ โดยผลการศึกษานี้คาดว่าจะสามารถปรับปรุงห้องโดยสารทางการแพทย์ให้มีความแข็งแรงและเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ที่ผ่านมาตรฐาน

1.2.2 เพื่อศึกษาความเค้นของโครงสร้างที่ห้องโดยสารทางการแพทย์ ตามข้อกำหนด ECE R66

1.2.3 เพื่อออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ให้สามารถรับภาระกระทาตามเกณฑ์การทดสอบได้กำหนด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ชุดห้องโดยสารทางการแพทย์ชนิดที่ติดตั้งกับรถกระบะตอนเดียว รุ่นABL-LT-SL ของบริษัท Carryboy

1.3.2 วิเคราะห์ความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์ตามข้อกำหนดการทดสอบความแข็งแรงห้องโดยสารทางการแพทย์โดยอ้างอิงจากข้อกำหนดของ ECE Regulation No.66 FMVSS 220 AMD001 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์

1.3.3 ใช้โปรแกรม Solidwork ในการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์

1.3.3 ทดลองจริงตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 FMVSS 220 และ AMD001

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

1.4.1 ห้องโดยสารทางการแพทย์ไม่เกิดการไถล

1.4.2 ห้องโดยสารทางการแพทย์การส่ายตัว

1.4.3 สมมติให้ห้องโดยสารทางการแพทย์เป็นวัตถุแข็งเกร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.4.1 ศึกษาโครงสร้างชุดคัชชีเทียมและห้องโดยสารทางการแพทย์

2.4.2 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต

2.4.3 สร้างโมเดลสามมิติจากห้องโดยสารทางการแพทย์จริง

2.4.4 จำลองโครงสร้างทั้งหมดในโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างของชุดตู้รถพยาบาล โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

2.4.5 นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองเพื่อปรับปรุงให้ผ่านมาตรฐาน

2.4.6 นำเสนอแบบจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อประกอบตัวรถจริง

2.4.7 ทำการทดลองห้องโดยสารทางการแพทย์จริง ตามมาตาฐาน FMVSS220 และ ECE R.66

2.4.8 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

2.5.1 สามารถปรับปรุงและพัฒนา ห้องโดยสารทางการแพทย์ ตามข้อกาหนด ECE R66

2.5.2 สามารถใช้หลักการทางวิศวกรรมเพื่อยกระดับความปลอดภัยของรถพยาบาลดัดแปลงเพื่อนำไปต่อยอดให้ทัดเทียมระดับสากล

2.5.3 เป็นแนวทางเริ่มต้นที่นำผู้ผลิตตระหนักถึงความปลอดภัยมากกว่าด้านต้นทุน

2.5.4 สามารถลดการนำเข้ารถพยาบาลจากต่างประเทศหรือรถที่นำมาดัดแปลงไปถูกต้องตามหลักวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หัวข้อที่ศึกษา

ในการศึกษาเรื่องความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์ จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ ทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ทฤษฎีความเสียหาย ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ทฤษฎีพลังงานแปรรูป และ ทฤษฎีวัสดุคอมโพสิต ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2 มาตรฐาน FMVSS220 และ AMD001

2.2.1 มาตรฐาน FMVSS 220

มาตรฐานความปลอดภัยยานยนต์แห่งชาติของสหรัฐอเมริกา Federal Motor Vehicle Safety Standards 220 (FMVSS 220) ได้มีข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพสำหรับการป้องกันความเสียหายจากการพลิกคว่ำของรถโรงเรียน แต่ยังใช้เป็นมาตรฐานด้านความปลอดภัยที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารประเภทอื่นในสหรัฐอเมริกาเป็นประจำ

แนวคิดของมาตรฐาน FMVSS 220 คือการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงเท่ากับ 1.5 เท่าของน้ำหนักรถบรรทุกที่ยังไม่ได้บรรทุก (UVW) (US DOT, 1998) โดยแรงจะถูกนำไปกระจายแบบสมมาตรไปบนหลังคา ผ่านแผ่นทรงแบบนรูปแข็งที่มีอัตราเร็วการใส่โหลดไม่เกิน 12.7 มม. / วินาที (0.5 นิ้วต่อวินาที) สำหรับรถยนต์ที่มี GVWR มากกว่า 10,000 ปอนด์แผ่นกดน้ำหนักต้องมีขนาด 12 นิ้วสั้นกว่าหลังคาของรถที่ทดสอบและกว้าง 36 นิ้ว สำหรับรถยนต์ที่มี GVWR ไม่เกิน 10,000 ปอนด์ แผ่นกดน้ำหนักจะต้องยาวกว่าขนาดหลังคารถ 5 นิ้ว ถ้าการเสียรูปเคลื่อนที่ในแนวตั้งสูงสุดไม่เกิน 130.2 มม. (5.125 นิ้ว) และทางออกฉุกเฉินทั้งหมดสามารถใช้งานได้ระหว่างการใส่โหลดและหลังจากปล่อยแรงแล้วรถจะถือว่าผ่านการทดสอบ

ข้อกำหนดที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.1 โครงสร้างรถพยาบาลต้องทนต่อแรงแบบสถิตที่กระทาบนหลังเท่ากับ 1.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกของรถขั้นต่ำหรือ 2,850 กก. X 1.5 = 4,275 กก.

1.2 การเสียรูปลงในแนวตั้งที่จุดใดๆ ของแผ่นหลังคาเข้ามาในห้องโดยสารต้องไม่เกิน 5.12 นิ้ว (130 มม.)

1.3 ประตู เข้า-ออก ห้องโดยสารรถพยาบาลต้องสามารถ เปิด-ปิด ได้ทั้งขณะใส่โหลดเต็มที่และปลดโหลดออกแล้ว

1.4 ต้องไม่มีส่วนใดของโครงสร้างเสียหายเลย เช่น รอยแตกของวัสดุ รอยเชื่อม
รีเวทนัท นัท สกรู ทั้งขณะใส่โหลดเต็มที่และปลดโหลดออกแล้ว

กรณีไม่ได้ติดตั้งประตูและหน้าต่าง

1.5 ขณะทำการทดสอบ ทั้งขณะใส่โหลดเต็มที่ โครงสร้างของกรอบประตูต้องเสียรูปไม่เกิน 4 มม. และเมื่อปลดภาระออก แล้วไม่ปรากฏการเสียรูปของกรอบประตูและหน้าต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 มาตรฐาน AMD 001 (Ambulance Manufacturers Division Standard)

1.โครงสร้างรถพยาบาลประเภทที่ 1 ต้องทนทานต่อแรงกระทำ 2.5 เท่าของน้ำหนักรถที่ติดกับหลังคาโครงสร้างตัวถัง โดยการทดสอบรถพยาบาลที่คล้ายคลึงกันตามข้อกำหนดของ AMD 001 การทดสอบการบรรทุกความแข็งแรงแบบสถิตของโครงสร้างรถพยาบาล

2. โครงสร้างรถพยาบาลประเภทที่ 2 ต้องทนต่อแรงเท่ากับ 1.5 เท่าของน้ำหนักรถที่ห้อยลงบนหลังคาโครงสร้างตัวถังการทดสอบรถพยาบาลที่คล้ายคลึงกันตามข้อกำหนดของ AMD 001 การทดสอบการบรรทุกความแข็งแรงแบบสถิตของโครงสร้างรถพยาบาล

3. การเคลื่อนที่แนวดิ่งหรือการเสียรูปของโครงสร้างหลังคาจะต้องไม่เกิน 5.12 นิ้ว (130 มม.)

4. ประตูทางออกด้านนอกของรถบรรทุกต้องสามารถในการเปิดและปิดได้ในระหว่างการรับภาระสูงสุดและหลังจากการปลดปล่อยภาระออกทั้งหมด

5. ต้องไม่มีความเสียหายกับโครงสร้างใดๆ จากน้ำหนักกดทับหรือตัวรองรับ (วัสดุขาดหรือหักวัสดุ ได้แก่ รอยเชื่อมที่แตกหักหรือตัวยึดหรือสลักเกลียวน็อตหรือสลักเกลียวหรือวัสดุอื่นๆ) จะต้องไม่ปรากฏชัดในระหว่างการใส่โหลดและหลังการปลดโหลดออก

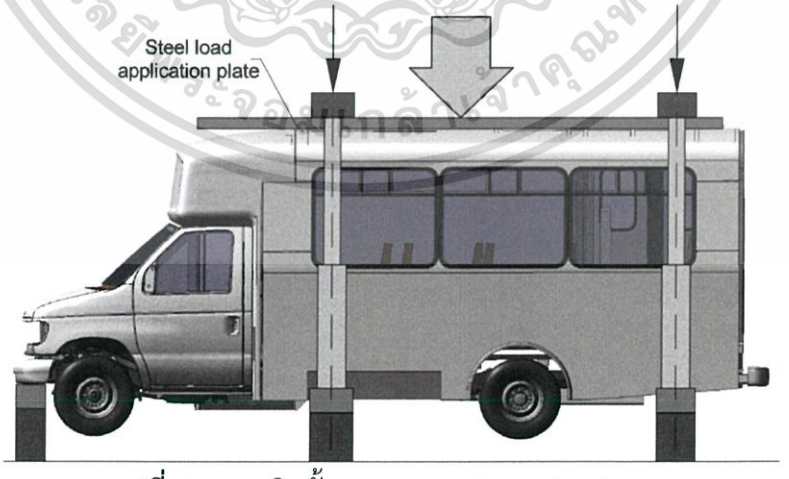
เกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานสากลสำหรับรถพยาบาลประเภทที่ 2

1 โครงสร้างรถพยาบาลต้องทนต่อแรงแบบสถิตที่กระทำบนหลังเท่ากับ 1.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกของรถขั้นต่ำหรือ 2,850 กก. X 1.5 = 4,275 กก.

2 การเสียรูปลงในแนวตั้งที่จุดใดๆ ของแผ่นหลังคาเข้าในห้องโดยสารต้องไม่เกิน 5.12 นิ้ว (130 มม.)

3 ประตู เข้า-ออก ห้องโดยสารรถพยาบาลต้องสามารถ เปิด-ปิด ได้ทั้งขณะใส่โหลดเต็มที่และปลดโหลดออกแล้ว

4 ต้องไม่มีส่วนใดของโครงสร้างเสียหายเลย เช่น รอยแตกของวัสดุ รอยเชื่อม รีเวทนัท นัท สกรู ทั้งขณะใส่โหลดเต็มที่และปลดโหลดออกแล้ว



รูปที่ 2.1 การติดตั้งการทดสอบ Static load test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มาตรฐาน ECE R66

มาตรฐาน E/ECE/324 Addendum 65: Regulation No. 66 “Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of their Superstructure” หรือมาตรฐาน ECE Regulation No. 66 เป็นการตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่

2.3.1 ขอบังคับ

โครงสร้างรถโดยสารจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อให้พื้นที่ปลอดภัยไม่ได้รับอันตรายในขณะดำเนินการทดสอบและภายหลังจากการทดสอบ หมายความว่าไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของโครงสร้างที่อยู่ภายนอกพื้นที่ปลอดภัย (ก่อนเริ่มการทดสอบ) ล้ำเข้ามาภายในพื้นที่ปลอดภัยในขณะดำเนินการทดสอบ

2.3.2 พื้นที่ปลอดภัย

ขนาดของพื้นที่ปลอดภัยถูกกำหนดโดยพื้นระนาบที่มีขนาดเส้นรอบวงดังรูปที่ 2.2 ที่ขยายพื้นที่ไปตลอดตามความยาวของรถโดยสารตามวิธีการดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ตำแหน่ง SR ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่บนพนักพิงหลังของที่นั่งด่าน นอกมีระยะความสูงจากพื้นใต้ที่นั่งเป็นระยะ 500 มิลลิเมตร และมีระยะห่างจากผนังด้านข้าง (ด้านในตัวรถ) เป็นระยะ 150 มิลลิเมตร

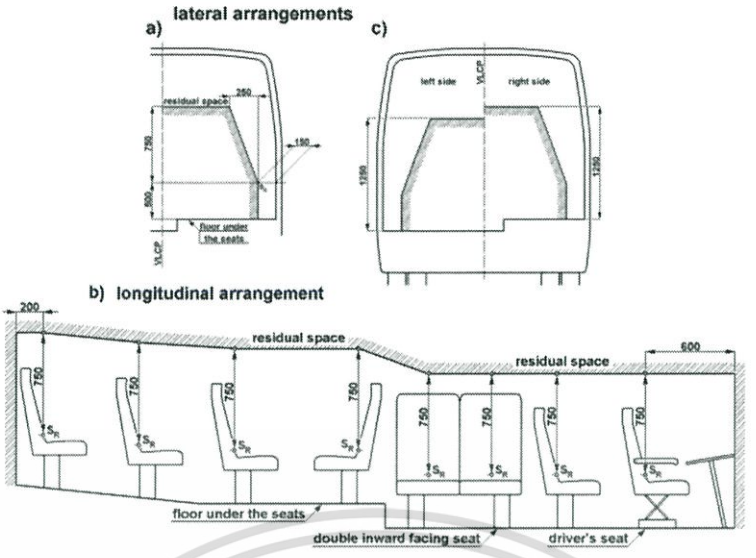
2. กรณี การจัดวางตำแหนงพื้นรถโดยสารสองด้านไมเท่ากันดังรูปที่ ข-1 ความสูงของตำแหน่ง SR ของพื้นที่ปลอดภัยจะแตกต่างกัน สำหรับระดับความสูงที่แตกต่างของพื้นที่ปลอดภัยนี้จะกำหนดที่ระนาบศูนย์กลางตามยาวในแนวดิ่ง (Vertical longitude center plane-VLCP)

3. ด้านท้ายของพื้นที่ปลอดภัยเป็นพื้นระนาบในแนวดิ่งจะมี ระยะห่างจากตำแหน่ง SR ของที่นั่งด้าน ท้ายไปทางด้านหลังเป็นระยะ 200 มิลลิเมตร หรือมีระยะห่างจากผนังด้านท้ายรถเป็นระยะ 200 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างผนังด้านท้ายรถและตำแหน่ง SR ของที่นั่งด้านท้ายน้อยกว่า 200 มิลลิเมตร ถ้าที่ทั้งสองข้างของที่นั่งด้านหน้าและด้านหลังไม่ได้วางอยู่ในตำแหน่งของระนาบแนวขวางเดียวกันความยาวของพื้นที่ปลอดภัยของแตละด้านจะแตกต่างกัน

4. พื้นที่ปลอดภัยเป็นพื้นที่ที่ต่อเนื่องตลอดตัวรถตั้งแต่ส่วนของที่นั่งพนักงานขับรถรถจนถึงที่นั่งผู้โดยสารซึ่งถูกกำหนดจากการเลื่อนระนาบขวางแนวดิ่งที่มี ขนาดเป็นไปตามเงื่อนไขไปตามแนวเสนตรงที่ลากผ่านจุด SR ทั้งสองข้างของรถโดยสาร

5. ผู้ผลิตสามารถกาหนดพื้นที่ปลอดภัยให้มีขนาดใหญ่กว่าตามขอกำหนดเพื่อเป็นการจำลองกรณีร้ายแรงที่สุดของรถโดยสารแต่ละประเภท และสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบในอนาคตต่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 พื้นที่ที่เหลือหรือพื้นที่ปลอดภัยภายในห้องโดยสาร
ตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66

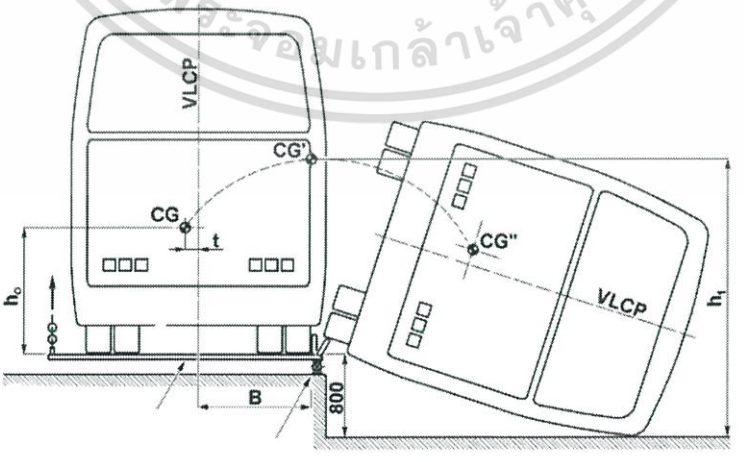
2.2.3 รายละเอียดการทดสอบการพลิกคว่ำขั้นพื้นฐานของรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์

ชุดทดสอบพลิกคว่ำ คือ ชุดพื้นเอียงยกรถในแนวขวางตามรูปที่ 2.3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. รถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์ วางอยู่บนพื้นเอียงยกรถที่มีตัวรองรับลองกันการลื่นไถล จากนั้นชุดพื้น เอียงยกตัวขึ้นอย่างช้าๆ โดยความเร็วเชิงมุมไม่เกิน 5 องศาต่อวินาที จนกระทั่งรถอยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีเสถียรภาพ

2. กำรทดสอบพลิกคว่ำอย่างอิสระจะเริ่มต้นขึ้นเมื่อรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีเสถียรภาพ หรือ อยู่ตำแหน่งเริ่มตกอย่างอิสระจากพื้นเอียง

3. การกระแทกจะเกิดขึ้นจากรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์ ตกลงสู่พื้นรองรับการพลิกคว่ำที่อยู่ต่ำกว่าเป็นระยะ 800 มิลลิเมตร เทียบกับระยะของพื้นก่อนเริ่มยกพื้นเอียง โดยพื้นผิวกระแทกจะมีลักษณะเป็นคอนกรีตเรียบและแห้งในแนวนอน



รูปที่ 2.3 ลักษณะของเครื่องทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน
ECE Regulation No. 66 (หน่วย มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การทดสอบเทียบเท่าของโครงสร้างรถพยาบาล

มาตรฐานนี้ได้กำหนดให้ สามารถใช้วิธีการทดสอบในลักษณะอื่นที่มี ความเทียบเท่ากับการทดสอบพลิกคว่ำของรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์โดยวิธีการทดสอบเทียบเท่าที่นำมาใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ

1. การทดสอบพลิกคว่ำของโครงสร้างบางส่วน ที่ใช้เป็นตัวแทนของโครงสร้างห้องโดยสารรถพยาบาลทั้งคันสมบูรณ์ โดยให้มีน้ำหนักของห้องโดยสารเท่ากัน

2. การจำลองเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) ที่มีการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic) ของการทดสอบการพลิกคว่ำ

หลักการพื้นฐานของมาตรฐาน คือ วิธีการทดสอบเทียบเท่าจะต้องถูกดำเนินการในลักษณะที่ครอบคลุมการทดสอบการพลิกคว่ำขั้นพื้นฐานตามที่ระบุไว้ รายละเอียดอื่นๆ ของมาตรฐาน ECE Regulation No. 66 ที่นำมาใช้อ้างอิงในการศึกษาวิจัยจะถูกกล่าวไว้ในเนื้อหาของแต่ละบทตามที่เกี่ยวของ สำหรับรายละเอียดปลีกยอยอื่นๆ ที่ไม่ได้ถูกอ้างอิงในรายงานนี้ สามารถดูได้จากเอกสารมาตรฐาน ECE Regulation No. 66

2.2.5 ชุดทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66

เงื่อนไขการออกแบบชุดทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66 มีรายละเอียดขอบังคับดังนี้

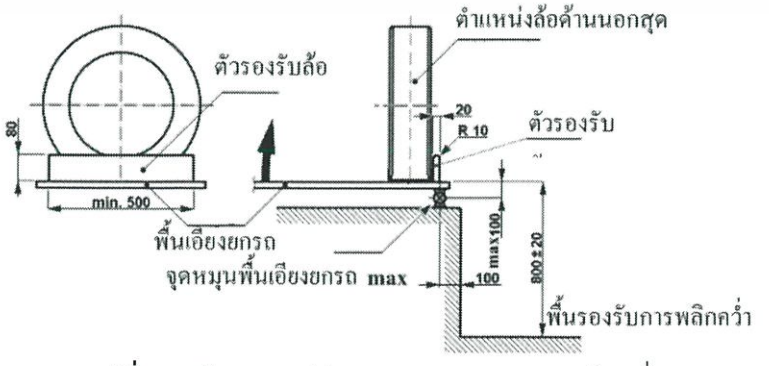
1. พื้นเอียงยกรถจะต้องมีความแข็งเกร็งเพียงพอ สามารถหมุนยกเพลาลอของรถโดยสารแต่ละเพลาขึ้นได้พร้อมๆ กันโดยมีความแตกต่างของมุมพื้นเอียงยกรถแต่ละตำแหน่งนอยกว่า 1 องศา

2. พื้นเอียงยกรถจะอยู่สูงจากพื้นรองรับการพลิกคว่ำเปนระยะ 800 ± 20 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.4

3. พื้นเอียงยกรถจะตองถูกจัดวางให้มีระยะ ดังรูปที่ ข-3 คือ แกนหมุนของพื้นเอียงยกรถจะต้องมีระยะห่างจากผนังแนวดิ่งของพื้นรองรับการพลิกคว่ำไม่เกิน 100 มิลลิเมตร และจะต้องอยู่ ต่ำกว่าระนาบของพื้นเอียงยกรถไม่เกิน 100 มิลลิเมตร

4. ตัวรองรับล้อ (Wheel support) จะต้องอยู่ติดกับจุดหมุน เพื่อป้องกันการลื่นไถลตามแนวด้านข้างของรถขณะทำการยกเอียง คุณลักษณะที่สำคัญของตัวรองรับล้อ (ดังในรูปที่) คือ ต้องมีความสูงไม่เกินสองในสามของระยะจากพื้นเอียงยกรถที่รถจอดอยูถึงขอบล้อ (Rim of wheel) ด้านใกล้ที่สุด และมีความกว้าง 20 มิลลิเมตร รัศมีขอบ 10 มิลลิเมตร และความยาวอย่างน้อย 500 มิลลิเมตร ต้องวางอยูบนพื้นเอียงยกรถห่างจากจุดหมุนในแนวดิ่งไม่เกิน 100 มิลลิเมตร

5. พื้นรองรับการพลิกคว่ำจะต้องเป็นพื้นผิวคอนกรีตในแนวราบ มีความสม่ำเสมอ แห้งและเรียบ

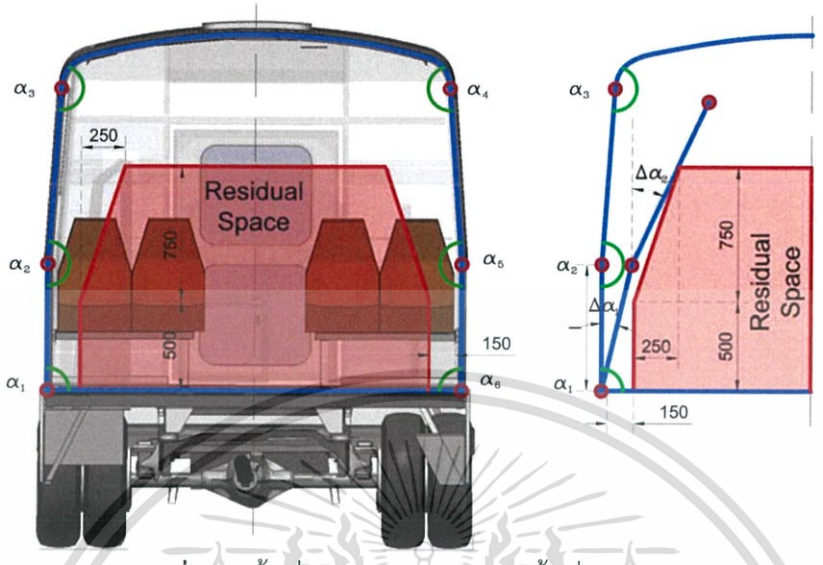


รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างของชุดทดสอบการพลิกคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 เกณฑ์ชี้วัดการทดสอบ

การเสียรูปของโครงสร้างต้องไม่เสียรูปยุบเข้ามาภายในพื้นที่ปลอดภัย



รูปที่ 2.5 พื้นที่ปลอดภัยและการหาพื้นที่ปลอดภัย

2.4 ทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์

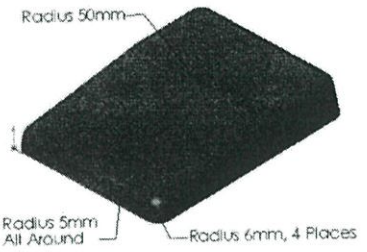
2.4.1 พื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้ COSMOSWorkks เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรง, ความแข็งเกร็งของชิ้นงาน (ระยะเคลื่อนตัวเมื่อเทียบกับขนาดแรงกระทำ)ม การวิเคราะห์ความถี่, การวิเคราะห์ทางความร้อน, การวิเคราะห์การโก่งจากแรงกระทำในแนวแกน (bucking) และการทดสอบปล่อยตก (drop test) ผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ จะทำความเข้าใจเนื้อหาในหนังสือได้ง่าย โดยผู้อ่านควรจะมีพื้นฐานความรู้ในสิ่งต่อไปนี้เพื่อความรวดเร็วในการทำความเข้าใจ

- มีประสบการณ์ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
- สามารถใช้งานโปรแกรม Windows TM ได้ดี
- เคยใช้งาน SolidWorks ในส่วนการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ (ขั้นพื้นฐาน)

โปรแกรม SolidWorks และ COSMOSWorks จะเชื่อมโยงข้อมูลด้วยกัน โดยผู้ออกแบบจะต้องสร้างชิ้นงานจาก SolidWorks แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย COSMOSWorks แต่อาจจะต้องเตรียมชิ้นงานโดยเฉพาะส่วนโค้งหรือส่วนการลบมุม ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลกระทบต่อผลเฉลยน้อยมาก แต่ทำให้เสียเวลาและทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำงานหนัก โดยเฉพาะช่วงการแบ่งเอลิเมนต์ดังในรูป 1.1 ชิ้นงานมีช่วงลบมุมที่ขอบ ควรจะต้องระงับ (suppress) ก่อนการส่งไปคำนวณในโปรแกรม COSMOSWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

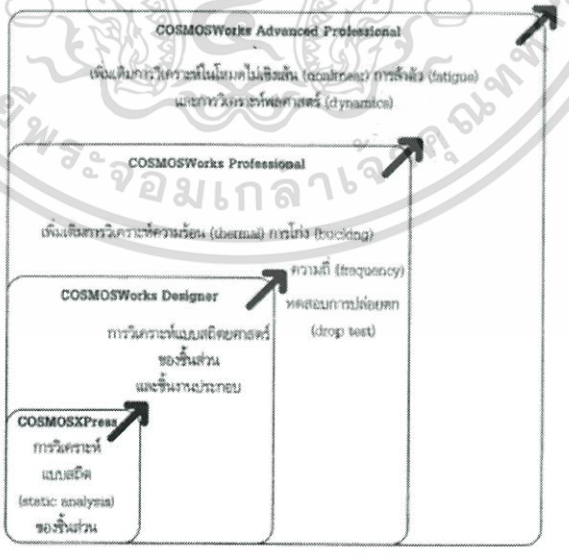


รูปที่ 2.6 การเตรียมชิ้นงานด้วยการระงับการลบมุม

ส่วน COSMOSWorks เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลข เทคนิคการคำนวณนี้เรียกว่า “Finite Element Analysis” หรือเรียกย่อ ๆ ว่า “FEA” โดยโปรแกรม COSMOSWorks เป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับมานานจากกลุ่มวิศวกรผู้ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องงจักรกล ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย SRAC มีจุดประสงค์เพื่อสร้างโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)

การสร้างชิ้นงานจาก SolidWorks ในระบบ 3 มิติ เพื่อนำไปใช้ในส่วนการคำนวณจะอาศัยระบบจัดการของ Windows ทำให้ผู้ออกแบบสามารถเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาต่อยอดในอนาคตต่อไปได้เอง อีกทั้งการใช้งานผ่านหน้าจอของโปรแกรม Windows จึงทำให้ผู้ออกแบบมีความคุ้นเคย สามารถควบคุมและป้อนค่าตัวแปรได้ตามต้องการ

COSMOSWorks ถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ตามขีดความสามารถในการใช้งานและลักษณะของงานว่าเป็นประเภทใด ได้แก่ งานวิเคราะห์แบบสถิต งานวิเคราะห์ไดนามิกส์ และงานวิเคราะห์ความร้อน เป็นต้น ดังในรูปที่ 1.2 แสดงขีดความสามารถของโปรแกรมและลักษณะงานที่ครอบคลุม



รูปที่ 2.7 ขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของ COSMOSWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร

ผู้ออกแบบจะรู้จักวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในนามของเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical technique) การแก้สมการจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (partial differential technique) ที่เขียนจากสมการในสาขาต่าง ๆ ได้แก่ การออกแบบเครื่องจักร, วิศวกรรมระบบเสียง, สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, กลศาสตร์ของแข็ง, กลศาสตร์ของไหล เป็นต้น วิศวกรรมออกแบบจะใช้ FEA ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ งานโครงสร้าง (structural), งานวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (vibration) และงานวิเคราะห์ความร้อน (thermal) เป็นต้น

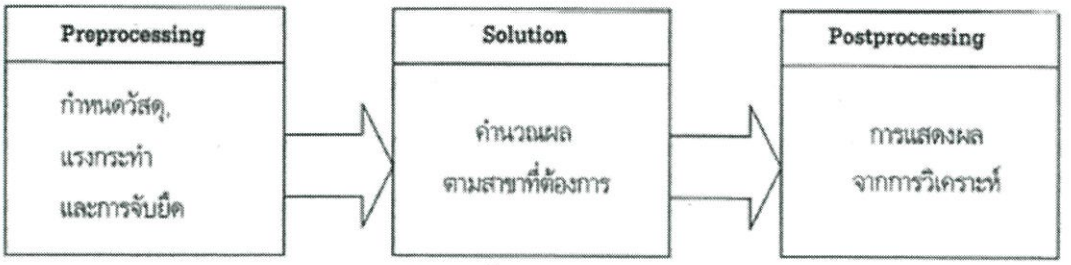
การวิเคราะห์เชิงตัวเลข นอกจาก FEA ยังมีวิธีการคำนวณแบบอื่น ได้แก่ Finite Difference Method, Boundary Element Method หรือ Finite Volumes Method อย่างไรก็ตาม ผู้พัฒนาโปรแกรมมีความพยายามจะพัฒนาให้การคำนวณเชิงตัวเลขมีประสิทธิภาพมากที่สุด การใช้ FEA จะช่วยให้การวิเคราะห์รูปร่างชิ้นงานตรงตามแนวความคิดในการออกแบบ และจะช่วยให้เกิดความเชื่อมั่นด้วยการจำลองสถานการณ์

วิธีการคำนวณด้วย FEA, คำนวณสมการเชิงตัวเลข และวิธีการแก้สมการ กำลังเป็นที่ต้องการของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นแรงจูงใจให้มีการพัฒนาการใช้งานให้เหมาะจะเป็นโปรแกรมคำนวณเชิงพาณิชย์ (commercial) เพื่อให้การใช้งานง่าย และอาศัยการสร้างเครื่องมือช่วยให้สามารถเข้าถึงรายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขได้เร็วขึ้น ซึ่งผู้ใช้อาจจะไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดการคำนวณมากนักจุดเด่นของวิธีการคำนวณด้วย FEA จะถูกใช้เพื่อแก้ปัญหา ตั้งแต่ปัญหาง่าย ๆ จนถึงปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก วิศวกรออกแบบจะใช้ FEA ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการวิเคราะห์เข้าไปในกระบวนการการออกแบบ เพิ่มเครื่องมือช่วยในการกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่มีความยุ่งยากอาจจะต้องใช้การคำนวณขั้นสูง ตัวอย่างเช่น รอยแตกร้าวจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์ งานขึ้นรูปโลหะ งานการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดที่ส่งผลต่อความแข็งแรง เป็นต้น

กระบวนการในการวิเคราะห์เริ่มจากการสร้างชิ้นงาน แล้วแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ (meshing) โดยมีรูปทรงง่าย ๆ (สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม) เราเรียกว่า “elements (เอลิเมนต์)” และชิ้นส่วนเล็ก ๆ จะต่อเชื่อมโยงกันทั้งชิ้น การทำงานด้วยการแบ่งเอลิเมนต์ FEA จะแก้สมการด้วยการประมาณค่าในแต่ละเอลิเมนต์ จนกว่าจะครบทุกชิ้นส่วน แต่ถ้าเป็นชิ้นงานประกอบ จะแยกคำนวณในแต่ละชิ้นส่วนแล้วนำมาประมวลผลรวมกัน ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งจะมี ขั้นตอนดังนี้

- Preprocessing ถือว่าเป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ โดยข้อมูลมาตรฐานจะมีทั้งคุณสมบัติวัสดุ (material properties), แรงกระทำ (loads) และการจับยึด (restraints) เป็นต้น
- Solution การคำนวณหาผลเฉลย (solution) หรือหาคำตอบ
- Postprocessing การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ได้ดังนี้

- Building the Mathematical Model (สร้างรูปแบบคณิตศาสตร์)
- Building the Finite Element Model (สร้างรูปแบบชิ้นส่วนย่อย)
- Solving the Finite Element Model (สร้างรูปแบบการแก้ปัญหา)
- Analyzing the Results (การวิเคราะห์ผลเฉลย)

2.4.3 สร้างรูปแบบคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ด้วย COSMOSWorks จะสามารถเชื่อมโยงไฟล์ชิ้นส่วนจากโปรแกรม SolidWorks ทั้งชิ้นส่วน (part) และชิ้นงานประกอบ (assembly) ชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ โดยมีจำนวนหลาย ๆ เอลิเมนต์ แต่มีจำนวนจำกัดนับได้ (finite element mesh) ขนาดของเอลิเมนต์ถูกกำหนดโดยอัตโนมัติ หรือผู้ออกแบบจะกำหนดเองก็ได้ ผู้ออกแบบควรจะมั่นใจในการสร้างรูปร่างชิ้นส่วน เพราะอาจจะมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณ โดยจะสนใจผลลัพธ์จากการคำนวณ เช่น การหาระยะเคลื่อนตัวของชิ้นงาน, ความเค้น, การกระจายอุณหภูมิ เป็นต้น

สิ่งสำคัญในการแบ่งเอลิเมนต์ สามารถทำด้วย CAD ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงชิ้นส่วนตามระดับความจำเป็น 3 ระดับ ได้แก่ Defeaturing, Idealization และ Clean-up ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

Defeaturing เป็นการพิจารณาขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วน โดยอาจจะต้องปรับรูปทรงของชิ้นส่วนเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ เช่น การยกเลิกการลบมุมรอบชิ้นส่วน, ตราสัญลักษณ์บนชิ้นส่วน เป็นต้น

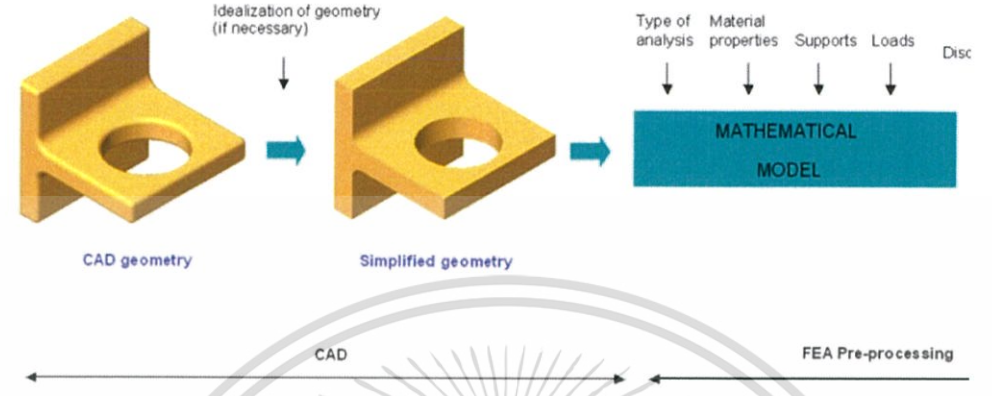
Idealization เป็นการพิจารณารูปร่างของชิ้นส่วน โดยลดความยุ่งยากของชิ้นงานจาก CAD โดยอาจจะลดความหนาให้มีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น การคำนวณชิ้นงานผนังหนาด้วยโหมดพื้นผิว (surface)

Clean-up เป็นการกำหนดบริเวณในการสร้างเอลิเมนต์ โดยบริเวณที่ไม่มีผลกระทบจากการกระทำของแรง เอลิเมนต์จะมีขนาดใหญ่ ไม่หนาแน่น แต่ในส่วนบริเวณที่มีผลกระทบ จะสร้างเอลิเมนต์ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น

การปรับปรุงชิ้นงานให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ ในเบื้องต้นอาจจะปรับด้วย CAD ให้เป็นชิ้นงานที่เรียบง่ายและปรับเปลี่ยนขนาดเอลิเมนต์ จะช่วยลดเวลาในการคำนวณ การกำหนดสร้างเอลิเมนต์ที่สมบูรณ์จะขึ้นอยู่กับการกำหนดรูปร่างเอลิเมนต์ และชนิดเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

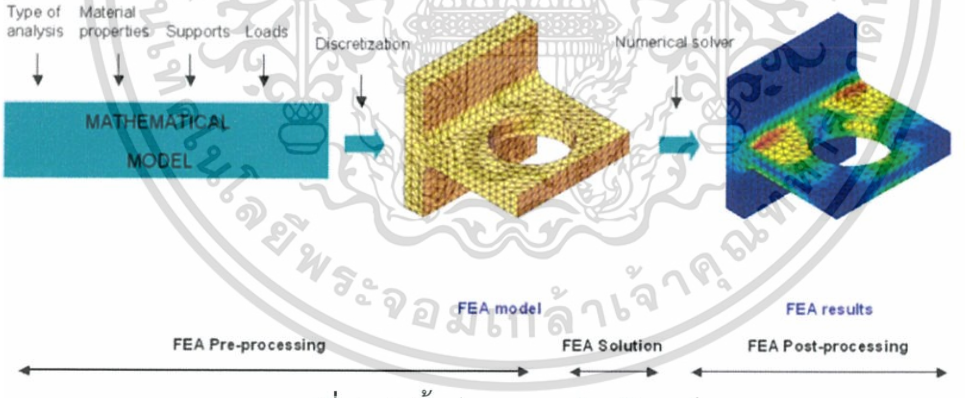
การเตรียมชิ้นงาน จะเริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ, รูปร่างชิ้นส่วน, การกำหนดความหนาแน่นของเอลิเมนต์, ขนาดเอลิเมนต์ และทิศทางของแรงกระทำ ตลอดจนเงื่อนไขการยึดจับ กระบวนการนี้จะสมบูรณ์ในขั้นตอนการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โมเดลเอลิเมนต์

2.4.4 สร้างชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์

การสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์ (mathematical model) เป็นการเตรียมชิ้นงานเพื่อการแบ่งเอลิเมนต์ (meshing) โดยเวกเตอร์ของแรงกระทำ (load) และเงื่อนไขการยึดจับ (supports) จะกระทำลงบนโหนด (nodes) ของชิ้นงานแบบแบ่งเอลิเมนต์ (finite element mesh)



รูปที่ 2.10 ชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์

2.4.5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์ที่แสดงบนชิ้นส่วนเอลิเมนต์ (FEA model) จะมีกระบวนการวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน แต่คอมพิวเตอร์ปัจจุบันมีขีดความสามารถเพียงพอ จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ผลและรายงานผลในรูปแบบไฟล์ที่สามารถแก้ไขได้ (interpretation) ซึ่งทำให้เราสามารถพิมพ์ข้อความ, หมายเหตุ และข้อผิดพลาดเบื้องต้นได้โดยจะมีขั้นตอนในช่วงต้น 3 ช่วง คือ การสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ (mathematical model), ชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์ (finite element model) และชิ้นส่วนแบบผลเฉลย (solving model)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 ค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ

ในการสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ จะเป็นช่วงต้นของข้อผิดพลาด เรียกว่า idealization errors ซึ่งเป็นการลดความซับซ้อนของชิ้นส่วนเพื่อให้การคำนวณใช้เวลาน้อยลง ชนิดของข้อผิดพลาดสามารถแยกย่อยได้ 3 ชนิด คือ

- ผิดพลาดจากการใช้งาน หรือวิธีการที่ผิด
- ผิดพลาดจากการป้อนค่าไม่ถูกต้องในช่วงการทำโมเดลคณิตศาสตร์
- ผิดพลาดจากช่วงการหาค่าผลเฉลย (solution errors) ซึ่งจะแก้ไขได้ยากหรือง่ายนั้นสามารถควบคุมได้

2.4.7 เอลิเมนต์ (Element)

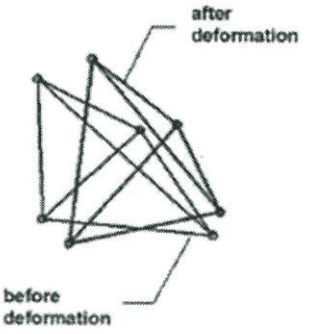
เมื่อผู้ออกแบบพอรู้ความหมายของการสร้างเอลิเมนต์แล้ว ก็จะต้องรู้ถึงวิธีการเลือกชนิดของเอลิเมนต์ เพราะชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกมาจะส่งผลต่อความถูกต้องในการคำนวณ และส่งผลต่อความแม่นยำในการจำลองสถานการณ์ต่างๆCOSMOSWorks จะใช้เอลิเมนต์ในลำดับที่หนึ่งเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral solid) สำหรับชิ้นงานทรงตัน และใช้เป็นเอลิเมนต์แบบพื้นผิวสามเหลี่ยม (triangular shell) สำหรับชิ้นงานผิวบาง โปรแกรมจะใช้เอลิเมนต์ทั้งสองแบบนี้ในการสร้างชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์โดยโปรแกรมจะเลือกเองโดยอัตโนมัติ

ส่วนเอลิเมนต์แบบอื่นในลำดับที่สอง ได้แก่ เอลิเมนต์ทรงหกหน้า (hexahedral element (brick)) ซึ่งจะไม่สามารถกำหนดสร้างแบบอัตโนมัติได้ ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดเองชนิดของเอลิเมนต์ใน COSMOSWorks ในเบื้องต้นมีอยู่ 4 แบบ คือ สำหรับเอลิเมนต์ทรงตัน ลำดับที่หนึ่งจะเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral solid) และเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (hexahedral elements) ส่วนเอลิเมนต์พื้นผิวลำดับที่หนึ่งจะเป็นเอลิเมนต์แบบพื้นผิวสามเหลี่ยม (triangular shell) และเอลิเมนต์แบบพื้นผิวลำดับที่สอง (second order triangular shell)

โดย COSMOSWorks จะอ้างอิงการใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าและเอลิเมนต์พื้นผิวสามเหลี่ยมในลำดับที่หนึ่ง พร้อมเลือกเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดต่ำ (draft quality) และจะอ้างอิงเอลิเมนต์ลำดับที่สองของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า และเอลิเมนต์ลำดับที่สองของพื้นผิวสามเหลี่ยมพร้อมเลือกเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดสูง (high quality)

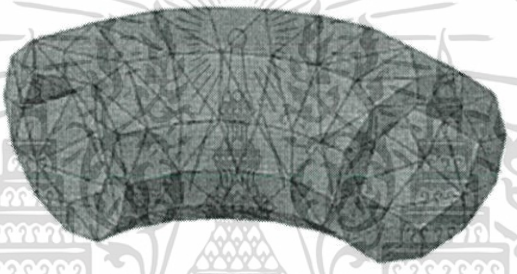
เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า (First Order Solid Tetrahedral Element) เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า สร้างจากเส้นตรง (linear) โดยความสัมพันธ์ของระยะระหว่างโหนดบนพื้นผิวและขอบชิ้นงาน การเขียนความสัมพันธ์ของระยะการยืดหดตัวจะใช้หลักวิชา Mechanics of Materials โดยพิจารณาจากสมการความเครียด (strain) และส่งแรงไปยังเอลิเมนต์รอบข้างไปเรื่อย ๆ จนครบทุกชิ้นส่วนในแต่ละเอลิเมนต์จะมีทั้งหมด 4 โหนด กระจายอยู่ตามมุมของเอลิเมนต์ ในแต่ละโหนดจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3 (degree of freedom เท่ากับ 3) หมายถึงแต่ละโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง ดังในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



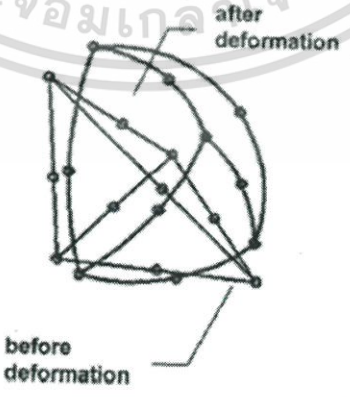
รูปที่ 2.11 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า

ขอบของเอลิเมนต์จะตรงและแบนราบ จึงเห็นได้ว่าเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขอบตรงและพื้นผิวแบนราบ แต่ถ้าชิ้นงานมีหน้าตัดกลมหรือมีพื้นผิวโค้ง จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากการสร้างโมเดลเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดไม่เท่าของจริงดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โมเดลเอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า

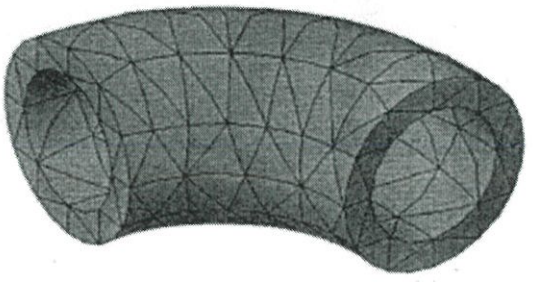
เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า (Second Order Solid Tetrahedral Element) เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า สร้างจากเส้นโค้งพาราโบลิก (parabolic) การกำหนดความสัมพันธ์ของระยะระหว่างโหนดในแต่ละเอลิเมนต์จะมี 10 โหนด (มี 4 มุม และมีโหนดกึ่งกลาง 6 โหนด) และแต่ละโหนดจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3 (เคลื่อนที่ 3 ทิศทาง)



รูปที่ 2.13 เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

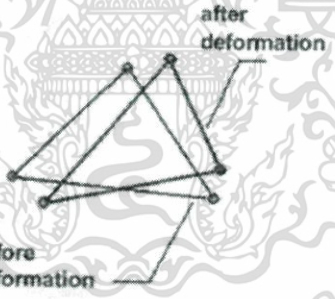
อย่างไรก็ตามการแบ่งชิ้นส่วนย่อยนี้ก็เพื่อให้รูปร่างชิ้นส่วนย่อยใกล้เคียงชิ้นงานจริงให้มากที่สุด แต่ก็อาจจะทำให้การประมวลผลใช้เวลานานขึ้น เพราะจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดจะมากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โมเดลเอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า

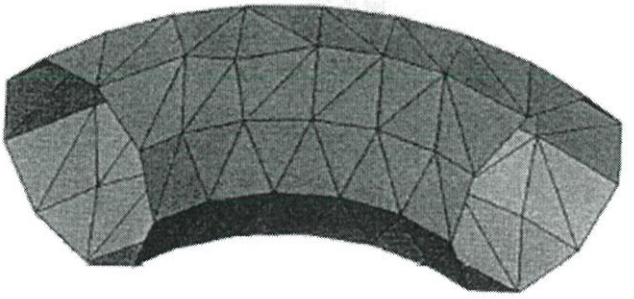
ความแม่นยำของผลลัพธ์ในส่วนการวิเคราะห์ความเค้นจะแสดงเป็น 2 ชั้น (two layers) สำหรับชิ้นงานผนังหนา

เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม (First Order Triangular Shell Element)เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม สร้างจากเส้นตรงลากระหว่างโหนด ซึ่งแต่ละโหนดจะอยู่บนขอบหรือบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยในแต่ละเอลิเมนต์จะมี 3 โหนด (ตามมุมของเอลิเมนต์) และแต่ละโหนดจะมีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) เท่ากับ 6 (เคลื่อนที่ 3 ทิศทางและหมุนรอบ 3 แกน)



รูปที่ 2.15 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม

ยกตัวอย่างท่อโค้งจะใช้พื้นผิวกึ่งกลางท่อเพื่อนำมาสร้างชิ้นงานแบบแบ่งเอลิเมนต์ โดยกรณีเส้นโค้งจะใช้รูปเหลี่ยมหลายรูปแทน ดังแสดงในรูปที่ 2.16

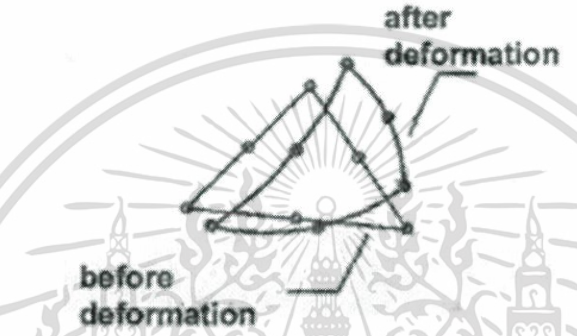


รูปที่ 2.16 ชิ้นงานแบบแบ่งเอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม

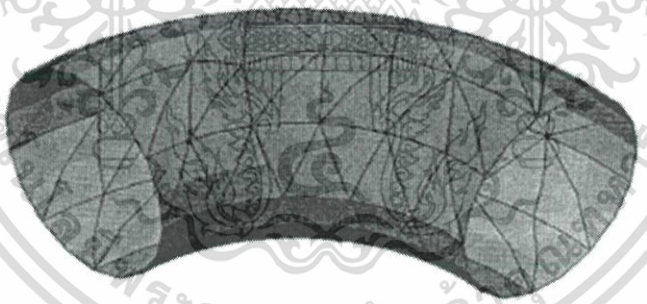
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเอลิเมนต์มีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้โมเดลเอลิเมนต์ไม่ตรงกับความเป็นจริง ในการแสดงสีของเอลิเมนต์ด้านบนจะใช้สีน้ำตาล และด้านล่างใช้สีเขียว ผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนค่าจาก “Flipping” ซึ่งเป็นตัวแปรอ้างอิงในการสร้างชิ้นงาน

เอลิเมนต์ลำดับที่สองแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม (Second Order Triangular Shell Element) อิลลิเมนต์ลำดับที่สองแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม สร้างเส้นโค้งพาราโบลิก (parabolic) โดยแต่ละเอลิเมนต์จะมี 6 โหนด (3 โหนดอยู่ที่มุมและ 3 โหนดอยู่ระหว่างกึ่งกลาง) ในแต่ละโหนดจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 6 (เคลื่อนที่ 3 ทิศทาง และหมุนรอบ 3 แกน) ที่ขอบและพื้นผิวของเอลิเมนต์จะสามารถลงบนขอบโค้งของชิเนส่วนเมื่อสร้างโมเดลเอลิเมนต์ดังในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 อิลลิเมนต์ลำดับที่สองแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม

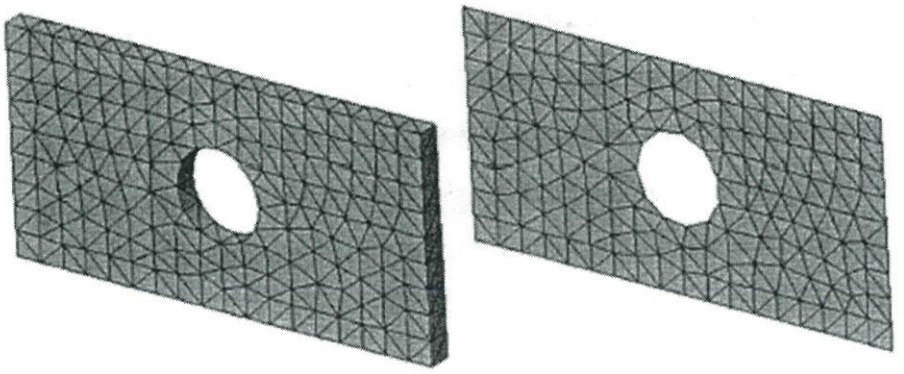


รูปที่ 2.18 ชิ้นงานแบบแบ่งอิลลิเมนต์ลำดับที่สองพื้นผิวสามเหลี่ยม

การเลือกระหว่างเอลิเมนต์ทรงตันและเอลิเมนต์ผนังบาง

ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ สามารถเลือกใช้ได้ทั้งสองแบบ คือเอลิเมนต์แบบทรงตัน (solid) และเอลิเมนต์แบบผนังบาง (Shell) ตัวอย่างเช่นท่อโค้งที่พยายามทำให้การวิเคราะห์คำนวณง่ายจึงลดรูปของเอลิเมนต์จากชิ้นงานทรงตัน มาเป็นเอลิเมนต์แบบผนังบาง เป็นต้น การเลือกเอลิเมนต์จะต้องพิจารณาความเหมาะสม เช่น ชิ้นงานที่เกิดจากการหล่อขึ้นรูปควรใช้เอลิเมนต์แบบทรงตันหรือชิ้นงานที่มีความหนาแน่นเท่ากันเป็นช่วง สามารถใช้เอลิเมนต์แบบทรงตันและแบบผนังบาง โดยนำตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานมาวิเคราะห์

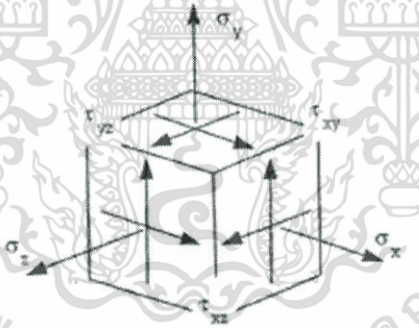
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 เอลิเมนต์ทรงตันและเอลิเมนต์ผนังบาง

2.4.8 ความเค้นหลัก (Principal Stress)

ความเค้นเกิดจากแรงกระทำในทิศทางมาตรฐาน 3 แนวแกน การเขียนตัวแปรแทนความเค้นในระบบ 3 มิติจะคล้ายกับระบบ 2 มิติ ในการหาค่าความเค้นสูงสุดในแต่ละระนาบเราเรียกว่า ความเค้นหลัก (principal stress) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าความเค้นเฉือนเท่ากับศูนย์ สามารถเขียนแทนด้วยตัวแปร σ_1, σ_2 และ σ_3 ชิ้นงานที่รับแรงภายนอก เมื่อวิเคราะห์แรงกระทำภายในต่อเอลิเมนต์แล้วจะมีความเค้นทั้งหมด 6 ตัวแปรที่เขียนแทนทิศทางครบทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 2.20 แล้วเขียนความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร ดังในสมการ (1.1)



รูปที่ 2.20 ความเค้นกระทำบนเอลิเมนต์ในระบบ 3 มิติ

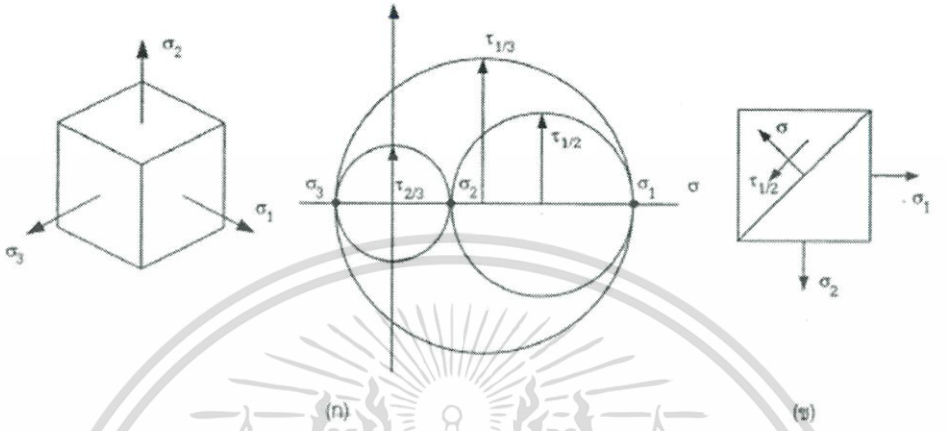
$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\,\sigma^2 + (\sigma_x\,\sigma_y + \sigma_x\,\sigma_z + \sigma_y\,\sigma_z - \tau^2_{xy} - \tau^2_{yz} - \tau^2_{zx})$$
$$\sigma - (\sigma_x\,\sigma_y\,\sigma_z + 2\,\tau_{xy}\,\tau_{yz}\,\tau_{zx} - \sigma_x\,\tau^2_{yz} - \sigma_y\,\tau^2_{zx} - \sigma_z\,\tau^2_{zy}) = 0 \qquad (1.1)$$

เมื่อนำไปเขียนกราฟวงกลมโมห์ร จะสามารถหาค่าของความเค้นหลักได้ $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ดังแสดงในรูปที่ 1.16 (ก) และความเค้นเฉือนสูงสุด $\tau_{1/2}$, $\tau_{2/3}$, $\tau_{1/3}$ โดยจะเกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ของระนาบสองระนาบ เช่นระนาบในรูปที่ 1.16 (ข) แสดงความเค้นบนระนาบสองมิติ เราสามารถหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจากความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนจากสมการ (1.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{1/2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2};\ \tau_{2/3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2};\ \tau_{1/3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \qquad (1.2)$$

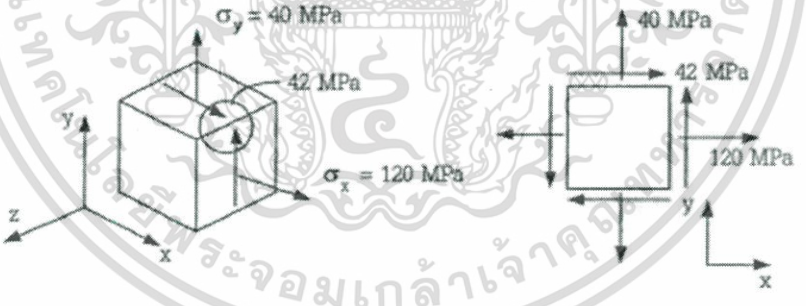
ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดสมบูรณ์ $(\mathbf{T}_{max})_{abs} = \mathbf{T}_{1/3}$ เมื่อความเค้นหลักที่เกิดตามเงื่อนไข $\boldsymbol{\sigma}_1 > \boldsymbol{\sigma}_2 > \boldsymbol{\sigma}_3$



รูปที่ 2.21 วงกลมโมห์รวิเคราะห์ความเค้น 3 มิติ

ตัวอย่างการวิเคราะห์เพื่อหาความเค้นหลัก

การหาค่าความเค้นหลัก และความเค้นเฉือนสูงสุด จากสภาวะของระนาบความเค้นดังรูป มีส่วนประกอบของความเค้น $\boldsymbol{\sigma}_x$ = 120 MPa, $\boldsymbol{\sigma}_y$ = 40 MPa, $\mathbf{T}_{xy}$ = 42 MPa

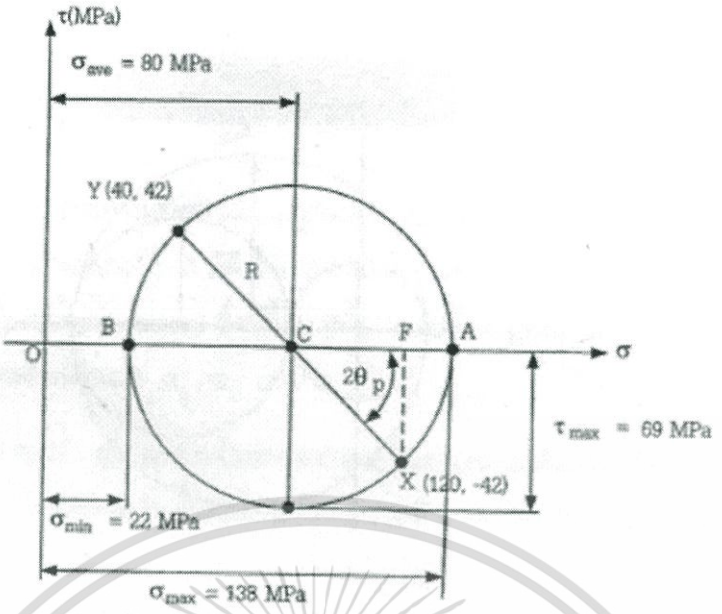


(1) เริ่มหาค่าความเค้นหลักในแต่ละระนาบ ระนาบ xy, yz, xz โดยระวังเรื่องเครื่องหมายส่วนประกอบความเค้น $\boldsymbol{\sigma}_x$ = 120 MPa, $\boldsymbol{\sigma}_y$ = 40 MPa และ $\mathbf{T}_{xy}$ = 42 MPa เป็นการพิจารณาบนระนาบ xy

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{120 + 40}{2} = 80\ MPa$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sqrt{40^2 + 42^2} = 58\ \text{MPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 วงกลมโมห์รวิเคราะห์ความเค้น 3 มิติ

(2) จัดเรียงลำดับความเค้นจากมากไปน้อย $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ หาค่าความเค้นหลักสูงสุดและต่ำสุด

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = \sigma_{ave} + R = 80 + 58 = 138\ MPa$$
$$\sigma_2 = \sigma_{min} = \sigma_{ave} - R = 80 - 58 = 22\ MPa\ ;\quad \sigma_3 = 0$$

(3) แทนค่าในสมการความเค้นเฉือนสูงสุดสมบูรณ์

$$\tau_{1/2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{138 - 22}{2} = 58\ \ MPa\ \ \ (A)$$

$$\tau_{2/3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} = \frac{22 - 0}{2} = 11\ \ MPa\ \ \ (B)$$

$$\tau_{1/3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{138 - 0}{2} = 69\ \ MPa\ \ \ (C)$$

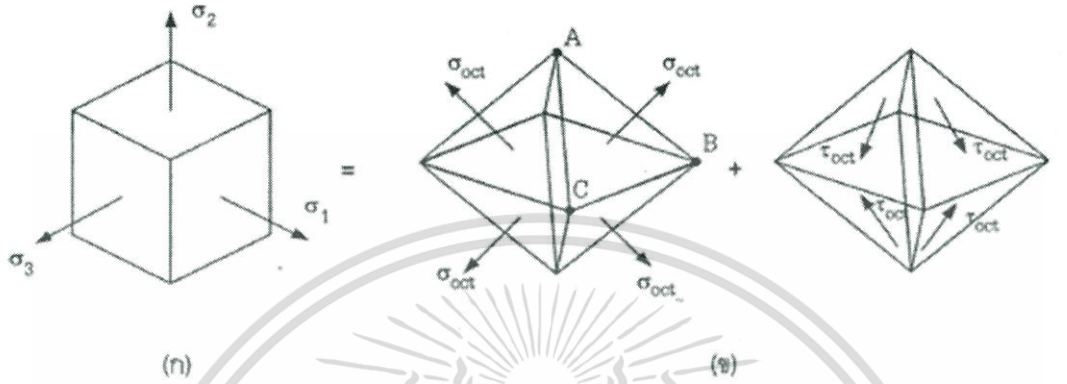
(4) เรียงลำดับเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดสมบูรณ์ พร้อมเขียนวงกลมโมห์รแสดงความสัมพันธ์ จากคำตอบที่ได้ทั้ง 3 คำตอบนั้นเราจะสังเกตเห็นว่า ค่าความเค้นเฉือนของระนาบที่ 1 กับ 3($\tau_{1/3}$) จะมีค่าสูงสุด และเมื่อเรานำคำตอบทั้ง 3 มาสร้างเป็นวงกลมโมห์ร ดังรูป จะทำให้ทราบว่าค่าความเค้นเฉือนของระนาบที่ 1 กับ 3 นั้นจะเป็นค่าความเค้นเฉือนสูงสุดสมบูรณ์ที่แท้จริงซึ่งมีผลต่อการออกแบบของวัสดุ

ดังนั้น ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดสมบูรณ์ คือ $\sigma_{max} = \tau_{1/3}$=69 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น Octahedral

หลังจากการพิจารณาค่าความเค้นหลัก σ_1, σ_2และ σ_3 เราสามารถหาระนาบได้อีกระนาบหนึ่งโดยระนาบนี้จะเป็นไปตามตำแหน่ง ABC ซึ่งเราเรียกระนาบนี้ว่า “ระนาบ Octahedral” เราสามารถตัดมุมของแท่งสี่เหลี่ยมตันออกไปได้แปดมุม หรือจะได้ทั้งหมด 8 ระนาบ และแต่ละระนาบจะมีขนาดของความเค้นเท่ากัน



รูปที่ 2.23 ระนาบ Octahedral

ในรูปที่ 1.17จากการเขียนรูปอิสระ (free body) จะทำให้เห็นส่วนประกอบของความเค้น และเมื่อรวมแรงของแต่ละแนวแกนจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะอยู่ในสภาวะสมดุล จะทำให้สามารถหาแรงที่กระทำกับระนาบนั้นได้แล้วเรียกว่า “แรง Octahedral” ซึ่งเกิดขึ้นบนระนาบ ABC เมื่อนำค่าของแรงหารด้วยพื้นที่จะทำให้ทราบค่าความเค้น เช่นแรงตั้งฉากกับระนาบหารด้วยพื้นที่ระนาบเรียกว่า “ความเค้นตั้งฉาก octahedral” และเมื่อนำแรงที่ขนานกับระนาบหารด้วยพื้นที่ระนาบเรียกว่า “ความเค้นเฉือน octahedral” เราสามารถหาขนาดของความเค้นได้จาก

$$\begin{aligned}\tau_{oct} &= \frac{1}{3}\left((\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2\right)^{1/2}\\ &= \frac{2}{3}\left(\tau_{1/2}^2+\tau_{2/3}^2+\tau_{1/3}^2\right)^{1/2}\\ &= \frac{1}{3}\Big(\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2+6\left(\tau_{xy}^2+\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2\right)\Big)^{1/2}\end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) = \frac{1}{3}\left(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z\right) \quad (1.4)$$

ในสมการ (1.3) และสมการ (1.4) จะสามารถใช้งานได้ครอบคลุมทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของความเค้น (Stress Concentration)

ชิ้นงานที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ เมื่อรับแรงที่มีขนาดคงที่ การกระจายของความเค้นจะมีค่าสม่ำเสมอคงที่ตลอดหน้าตัด แต่ในกรณีที่หน้าตัดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันที เช่น ทำเป็นร่อง รูเจาะ และลบมุม การกระจายของความเค้นบนหน้าตัดตรงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ผลของความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ของพื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุทำให้เกิดความเค้นหน้าแน่นซึ่งแสดงให้เห็นเป็นเส้นการไหลของความเค้น (stress trajectory) บนหน้าตัดที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น เราสามารถคำนวณความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงจากความเค้นเฉลี่ย $\left(\sigma_{ave} = \frac{P}{A}\right)$ ได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (1.5)

$$K_C = \frac{\text{ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง}}{\text{ความเค้นเฉลี่ย}} \qquad (1.5)$$

หรือ

$$K_C = \frac{\sigma_{act}}{\sigma_{ave}} \qquad (1.6)$$

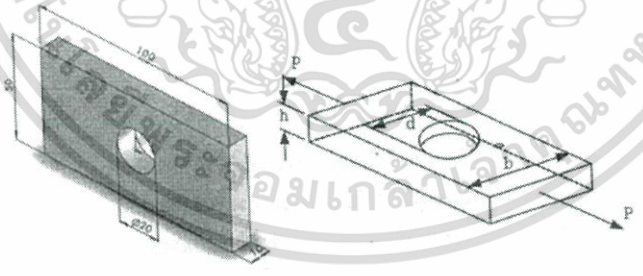
โดยที่ K_C = ค่าคงที่ความหนาแน่นของความเค้น (พิจารณาจากกราฟ)

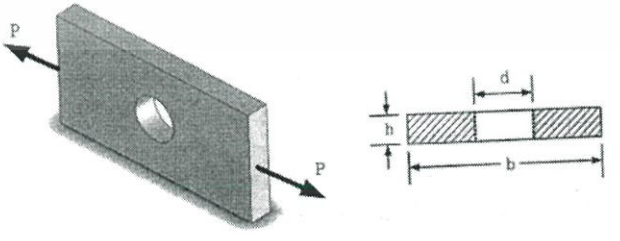
σ_{act} = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง

σ_{ave} = ความเค้นเฉลี่ย

ตัวอย่างการหาค่าความหนาแน่นของความเค้นและความเค้นสูงสุด

แผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง (b) 50 mm หนา (h) 10 mm รูเจาะมีขนาดเส้นผ่านนศูนย์กลาง (d) 20 mm รับแรงดึงในแนวนอน P = 11500 N แผ่นเหล็ก AISI 1020

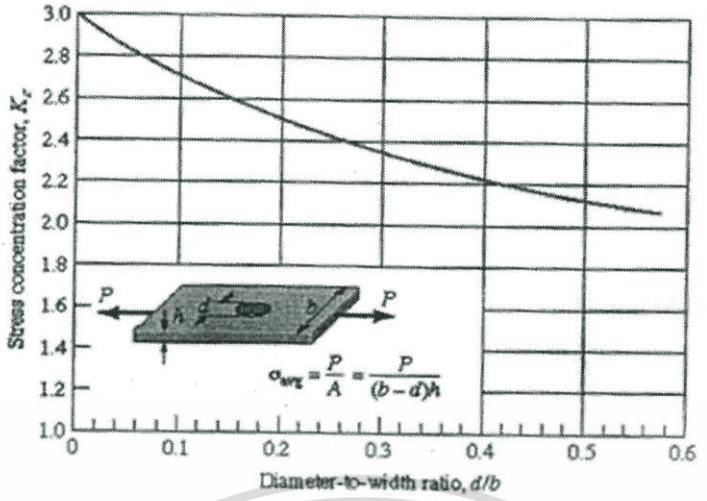




(1) เส้นผ่านศูนย์กลางต่อความกว้าง $\frac{d}{b} = \frac{20\ mm}{50\ mm} = 0.4$ และขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณรูเจาะคือ A = (b-d)h

(2) จากกราฟแสดงความหนาแน่นของความเค้น จะได้ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น K_C = 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(3) ความเค้นเฉลี่ยและค่าความเค้นสูงสุด

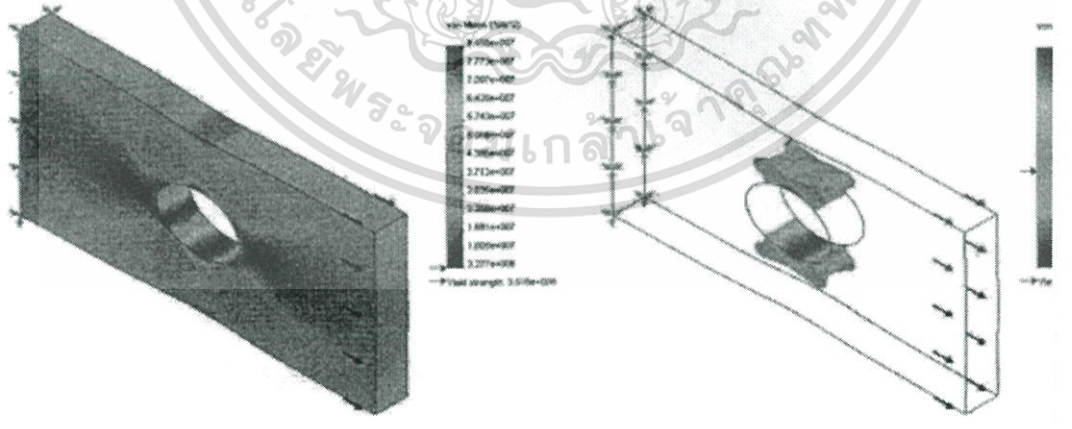
$$A_{net} = (b-d)h = (50\ mm - 20\ mm)\ 10\ mm = 300\ mm^2 = 0.3 \times 10^{-3} m^2$$

$$\sigma_{ave} = \frac{P}{A_{net}} = \frac{11500\ N}{300\ mm^2} = 38.33\ MPa$$

$$\sigma_{act} = K_C \sigma_{ave} = 2.22\ (38.33\ MPa) = 85.1\ MPa$$

ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยมือนั้นสามารถทำได้ เพียงแต่ต้องใช้เวลาและมีข้อจำกัดด้านรูปร่างของชิ้นงาน ในเบื้องต้นสามารถที่จะหาค่าความเค้นสูงสุดได้ 85.1 MPa

การคำนวณด้วยโปรแกรมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่จะทำให้งานมีความแม่นยำมากขึ้น สามารถคำนวณในกรณีหน้าตัดชิ้นงานมีรูปร่างที่ปกติ เช่นมีการเจาะหลายตำแหน่ง มีความหนาไม่สม่ำเสมอ หรือมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างรวดเร็ว เป็นต้น ซึ่งได้ทดลองคำนวณด้วยโปรแกรมแล้ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.24 ค่าความเค้นบนแผ่นเหล็ก

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะได้ค่าความเค้นสูงสุด 84.5 MPa ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยมือดังแสดงในรูปที่ 1.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.9 ทฤษฎีความเสียหาย

กรณีของวัสดุเหนียวอ่อนการออกแบบชิ้นส่วนให้สามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัย ผู้ออกแบบต้องแน่ใจว่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนนั้น ถ้าเป็นวัสดุประเภทเหนียวอ่อน *(ductile material)* จะให้ความสำคัญกับค่าความเค้นที่จุดคราก *(yield strength; S_y)* เพราะเป็นความเค้นที่ทำให้วัสดุเริ่มต้นเปลี่ยนรูปอย่างถาวร อันจะทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย

วัสดุที่มีคุณสมบัติเปราะหลายชนิดเช่นเหล็กหล่อ จะไม่มีความเค้นที่จุดคราก จึงต้องใช้ค่าความเค้นประลัย *(ultimate strength)* เป็นเกณฑ์กำหนดความเสียหายในการออกแบบ ในงานออกแบบที่ใช้วัสดุประเภทเปราะจะต้องไม่ลืมว่าค่าความเค้นอัดประลัย *(ultimate compressive strength)* มีค่ามากกว่าความเค้นดึงประลัย *(ultimate tensile strength)* ส่วนกรณีวัสดุเหนียวอ่อนค่าความเค้นดึงประลัย *(ultimate tensile strength)* กับค่าความเค้นอัดประลัยจะมีค่าเท่ากัน

วัสดุเหนียวอ่อนนั้นส่วนใหญ่จะรวมไปถึงโลหะและเส้นใยสังเคราะห์ด้วย โดยปกติวัสดุเหนียวอ่อนจะมีค่าความต้านทานการดึง และความต้านทานการอัดที่เหมือนกัน ซึ่งวัสดุเหนียวอ่อนนั้นมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนิยมใช้อยู่ด้วยกัน ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด และทฤษฎี *Distortion Energy Theory* ดังในรายละเอียดต่อไป

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (The Maximum-Shear-Stress-Theory (MSST))

จากข้อสมมุติฐานว่าวัสดุเกิดความเสียหายขณะที่รับความเค้นสูงสุด ซึ่งความเค้นเฉือนที่ทำให้เกิดความเสียหายในขณะที่ทดสอบแรงดึงจึงถือได้ว่าวัสดุเสียหายเมื่อเกิดการครากตัว ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความเค้นที่จุดคราก ดังนั้น

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2(S.F.)} \tag{1.7}$$

เมื่อ τ_{max} = ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด

S_y = ค่าความเค้นที่จุดครากของวัสดุ

(S.F.) = ค่าความปลอดภัย

กรณีของชิ้นงานที่ใช้วัสดุเหนียวอ่อนมักจะเกิดการเสียหายจากการทดสอบแรงดึงถ้าความแข็งแรงของวัสดุในการรับกับความเค้นเฉือนเท่ากับ $S_y/2$ และเพื่อเป็นการเผื่อความปลอดภัย ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $S_y/(2\ S.F.)$ เราเรียกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด แต่เมื่อนำไปใช้กับความเค้น 3 มิติ จะได้ว่า

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2(S.F.)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_y}{(S.F.)} \tag{1.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

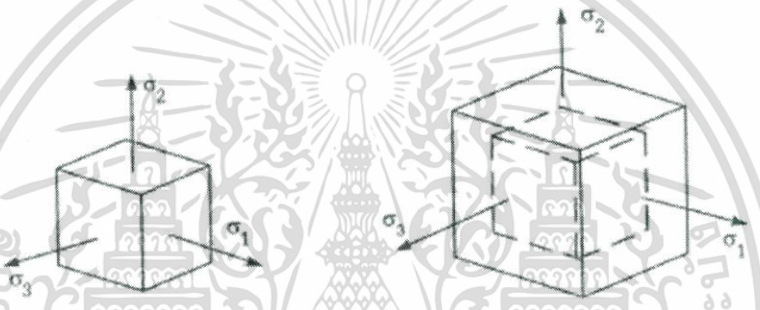
ทั้งนี้การหาค่าความเค้นหลักจะต้องพิจารณาตามเงื่อนไข $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ จึงเป็นการพิจารณาค่าความปลอดภัยต่อการรับแรงภายนอก

2. Distortion Energy Theory

พลังงานความเครียด (strain energy) ได้ถูกค้นพบว่ามีผลต่อการทำให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกิดความเสียหาย โดยการวิเคราะห์ค่า strain energy ต่อหน่วยปริมาตร (U) ได้จาก

$$U_{(\text{แนวแกนเดียว})} = \frac{1}{2}\sigma_x \varepsilon_x \tag{1.9}$$

เราสามารถเขียนในสภาวะของระนาบหลัก 1, 2 และ 3 ได้เป็นพลังงานรวมทั้งสามแนวแกนได้ โดยการยืดหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.19



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ในระนาบหลัก

เราสามารถเขียนสมการ strain energy ต่อหน่วยปริมาตรในรูปของสมการความเค้นหลักดังในสมการ (1.10)

$$U = \left(\frac{1}{2E}\right)\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2v(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)\right) \tag{1.10}$$

ด้วยสาเหตุของการที่พลังงานจากการยืดหดตัวในแต่ละแนวแกนไม่เท่ากันจะนำไปสู่การเกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนเครื่องจักร ถ้าค่า $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ความเสียหายก็จะเกิดขึ้นน้อยซึ่งในความเป็นจริงเกิดขึ้นได้ยากมาก จึงอาศัยค่าเฉลี่ยความเค้น (σ_{ave}) ในการคาดการณ์ความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3} \tag{1.11}$$

ค่า strain energy ของความเค้นเฉลี่ยหาได้โดยการแทนค่าความเค้นหลักแต่ละแนวแกนด้วยค่าความเค้นเฉลี่ยในสมการ (1.10) จะได้ว่า

$$U_{ave} = \frac{3(1-2v)}{2E}\sigma_{ave}^2 \tag{1.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนสมการในรูปของความเค้นหลักได้

$$U_{ave} = \frac{3(-2)}{2E}\sigma_{ave}^2;\ (\sigma_{ave})^2 = \left(\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3}\right)^2$$

$$= \left(\frac{1-2v}{6E}\right)\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)\right) \quad (1.13)$$

Distortion energy คือ ความแตกต่างระหว่าง strain energy ของเอลิเมนต์ใด ๆ กับ strain energy ของความเค้นเฉลี่ย (U_{ave})

$$U_d = U - U_{ave}$$

$$U_d = \frac{1+v}{3E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3) \quad (1.14)$$

การเกิดความเสียหายจะขึ้นอยู่กับ distortion energy โดยการสังเกตจากผลการทดลองนำแท่งโลหะไปทดสอบแรงดึง แล้วสังเกตค่าของ distortion energy ต่อหน่วยปริมาตร โดยจะถือว่าความเค้นจุดครากวัสดุเป็นจุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย

$$\sigma_1 = \sigma_x = S_y\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (1.15)$$

แทนค่าความเค้นจุดครากที่ใช้งานได้อย่างปลอดภัยด้วยการให้ค่า $\sigma_1 = \frac{S_y}{S.F.}$ และสามารถหา distortion energy ที่ทำให้วัสดุทดสอบเกิดความเสียหายได้ด้วยการแทนค่าในสมการ (1.14)

$$U_d = \frac{1+v}{3E}\left(\frac{S_y}{S.F.}\right)^2 \quad (1.16)$$

ผลลัพธ์ของสมการ distortion energy ที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงเกิดความเสียหายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระนาบความเค้น 3 มิติได้ด้วยการพิจารณาสมการ (1.14)

$$U_d = \frac{1+v}{3E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3)\ ;$$

และ $$U_d = \frac{1+v}{3E}\left(\frac{S_y}{S.F.}\right)^2$$

จะได้ว่า $$\left(\frac{S_y}{S.F.}\right)^2 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3) \quad (1.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

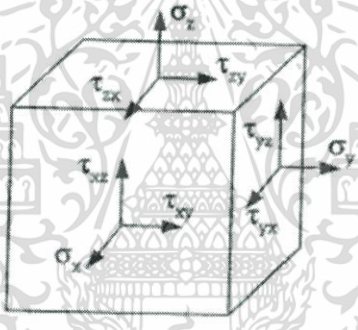
2.4.10 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะเตรียมไว้เพื่อการหาค่าระยะการเคลื่อนตัว (displacements), ความเครียด (strains) และความเค้น (stresses) ซึ่งวิเคราะห์จากโครงสร้างของชิ้นงานหรือวิเคราะห์จากอุณหภูมิ (temperatures), การแผ่ความร้อน (temperatures gradients) และปริมาณความร้อน (heat flux) นำไปวิเคราะห์ความเค้น, ความเครียดจากความร้อน ผู้ออกแบบจะนำผลลัพธ์ไปตัดสินใจว่าผ่าน (passed) หรือชิ้นงานเกิดความเสียหาย (failed)

คำตอบจะใช้วิเคราะห์หาระยะการโก่งงอสูงสุด, ความเค้นสูงสุด และค่าความถี่ธรรมชาติต่ำสุด โดยการนำมาพิจารณาประกอบว่าผ่านหรือเกิดความเสียหายนั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ โดยค่าความปลอดภัยจะใช้ทั้ง von Mises stresses (ความเค้นฟอนมิสเซส) และ principal stresses (ความเค้นหลัก) มาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่วัสดุจะยอมให้เกิด (S_{all}) ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

ความเค้นฟอนมิสเซส (Von Mises Stress)

ความเค้นฟอนมิสเซส เป็นที่รู้จักกันดี เพราะมักใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจากเอลิเมนต์ในระบบ 3 มิติ จะมีส่วนประกอบของความเค้น 6 ตัวแปร ได้แก่ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ และ τ_{yz}



รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบความเค้นในแต่ละระนาบ

ความเค้นจะแบ่งตามทิศทางของความเค้น คือ ความเค้นตั้งฉาก (normal stress) และความเค้นเฉือน (shear stress) โดยการกำหนดตัวแปรตามระนาบและตามทิศทางของแกน ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรความเค้นเฉือนจะใช้สมการสมดุล และมีความสัมพันธ์ดังในสมการ (1.18)

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{xz} = \tau_{zx} \tag{1.18}$$

สมการความเค้น von Mises สามารถเขียนในรูปตัวแปรความเค้นย่อย ดังในสมการ (1.19)

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{0.5\left|\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\right| + 3\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)} \tag{1.19}$$

ความเค้น von Mises สามารถเขียนในรูปของตัวแปรความเค้นหลัก (principle stress) ได้โดยใช้ตัวแปร $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ซึ่งมีเงื่อนไขว่า $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ดังในสมการ (1.20)

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{0.5\left|(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right|} \tag{1.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเค้น von Mises จะไม่ติดลบ และเป็นเวกเตอร์เชิงปริมาณ (scalar value) ซึ่งจะต้องใช้ค่าความเค้น เพื่อเป็นตัวชี้ถึงค่าความปลอดภัยของชิ้นงาน โดยจะเทียบกับขีดความสามารถในการรับความเค้นของแต่ละวัสดุ (S_{all})

สำหรับค่าความเค้นที่จุดคราก (S_y) หรือค่าความเค้นประลัย (S_u) จะใช้ในการคำนวณหาค่าความปลอดภัย ดังในสมการ (1.21) และสมการ (1.22)

$$\text{ค่าความปลอดภัย } (S.F.) = \frac{yield\ strength}{von\ Mises\ stress} = \frac{S_y}{\sigma_{von\ Mises}} \tag{1.21}$$

$$\text{ค่าความปลอดภัย } (S.F.) = \frac{ultimate\ strength}{von\ Mises\ stress} = \frac{S_u}{\sigma_{von\ Mises}} \tag{1.22}$$

โปรแกรม COSMOSWorks จะสามารถหาค่าความเค้นหลักในตัวแปร σ_1, σ_2 และ σ_3 โดยชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเปราะ (brittle material) สมการความปลอดภัยจะหาค่าได้จากสมการ (1.23) การใช้ค่า σ_1 จะดีกว่าการใช้ความเค้นดึง แล้วใช้ σ_3 พิจารณาเปรียบเทียบกับขีดความสามารถรับความเค้นอัด (S_c) ดังสมการ

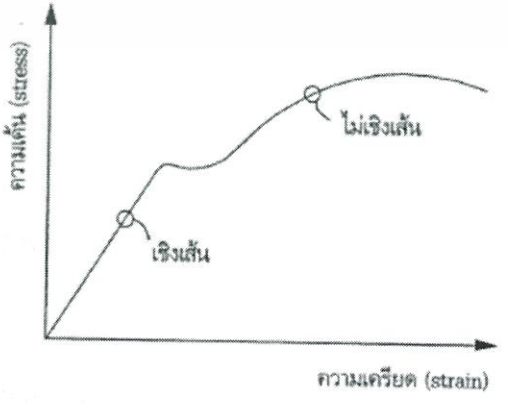
$$S.F. = \frac{S_y}{\sigma_1} \quad \text{หรือ} \quad S.F. = \frac{S_c}{\sigma_3} \tag{1.23}$$

โดยจะต้องพิจารณาค่าความปลอดภัยที่น้อยที่สุดจากคำตอบในสมการ (1.23)

คุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุ

คุณสมบัติทั้งหมดในโปรแกรม COSMOSWorks ในส่วนนี้มักจะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรืออาจจะกล่าวได้ว่า อัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดมีค่าคงที่ดังสมการ (1.24)

$$E\ (\text{ยังส์โมดูลัส}) = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\varepsilon)} \tag{1.24}$$



รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด

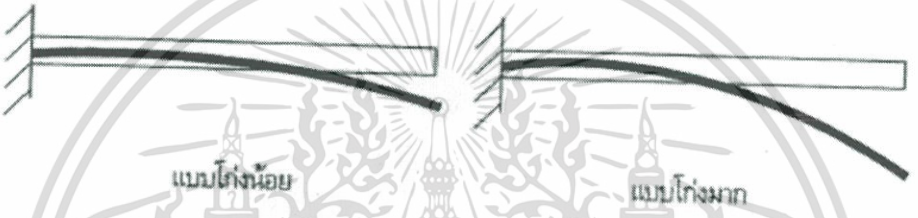
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นจะต้องพิจารณาภายใต้จุดคราก (yield point) และค่าความปลอดภัย (factor of safety) จะพิจารณาเทียบกับความเค้นที่จุดคราก (yield stress)

ตัวอย่าง กรณีที่ชิ้นงานทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงเส้น จะพบว่าเมื่อแรงกระทำ 1,000 lb แล้วส่งผลให้เกิดความเค้น 100,000 psi แต่ถ้าแรงกระทำเพิ่มขึ้น 2 เท่า เป็น 2,000 lb ความเค้นจะเพิ่มขึ้น 2 เท่า เป็นค่าความเค้น 200,000 psi ด้วยเช่นกัน จึงถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุ ซึ่งอาจจะมีข้อจำกัดว่าความเค้นที่เกิดขึ้นนั้น จะต้องมีค่าไม่เกินค่าความเค้นที่จุดคราก (S_y)

ระยะการโก่งงอ

ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์จะมีความแตกต่างกันมากในเรื่องของการเสียรูป เพราะในการปรับตั้งค่าสามารถกระทำได้ โดยปรับค่าเป็นการแสดงภาพการโก่งงอสองแบบคือ แบบโก่งน้อย (small) และแบบโก่งมาก (large)



รูปที่ 2.28 เปรียบเทียบปริมาณการโก่งงอ

การจับยึดชิ้นงานจะมีผลโดยตรงต่อการเสียรูปของชิ้นงาน และความแข็งเกร็ง (stiffness) ของชิ้นงาน ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุ

2.4.11 แรงกระทำสถิต (Static Loads)

แรงกระทำสถิต หมายถึงแรงกระทำต่อชิ้นงานที่มีค่าคงที่ทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งจะไม่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถจะวิเคราะห์กรณีของแรงกระทำแบบอื่น ๆ ได้แก่ แรงกระแทก, แรงจากการพุ่งชน เป็นต้น

แรงบางประเภทที่มีตัวแปรของเวลา แต่สามารถนำมาวิเคราะห์ในแบบของแรงสถิต ได้แก่ แรงโน้มถ่วง, แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal forces), แรงขันตึงสลักเกลียว (bolt preloads) เป็นต้น

แรงแบบไดนามิกมักจะวิเคราะห์เฉพาะกรณีที่แรงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้น ๆ (transient) หรือกรณีทดสอบการตกของชิ้นงาน (drop test) หรือการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนซึ่งกรณีเหล่านี้ผู้ออกแบบจะใช้โหมดไดนามิกเข้ามาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วัสดุคอมโพสิต (Composites)

วัสดุคอมโพสิต หรือ "วัสดุประกอบ" เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมากในปัจจุบันมีปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุคอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นทุกปีประมาณ 5-10% วัสดุคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering materials) ที่สาคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสาหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้นทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สา คัญที่สุดคือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้า หนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ดังนั้นคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength, σ/ρ) สูง ดังนั้นเมื่อใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง เช่นยานพาหนะ จะทา ให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง แต่น้าหนักเบา เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น มีประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้น และประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่อยู่ในช่วงกว้างเนื่องจากมีคอมโพสิตหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ทาให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตอย่างกว้างขวางมากมายหลากหลายการใช้งานในการใช้งาน

ในปัจจุบันมีการเรียกวัสดุคอมโพสิตหลากหลายชื่อ เช่น พลาสติกเสริมแรง (Reinforced plastics, RP) พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Fiberglass reinforced plastics, FRP) แผ่นลามิเนตเสริมแรง (Reinforced plastic laminates) หรือ ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เป็นต้นวัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกันและเสริมแรงกัน

องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต คือ

1. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สาคัญได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers)เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar® fibers) เป็นต้น เส้นใยอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น (Discontinuous หรือ Choppedshort fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ โดยส่วน

2. เมตริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทา หน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กาหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase)จะทา หน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงเมตริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Polymer Composites" สามารถใช้ได้ทั้งพอลิ-เมอร์ ประเภท เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต(Thermosets)
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Metal Composites"
- เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Ceramic Composites"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites)

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตในหลายแบบ อาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuousfibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทา ให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแซนวิช(Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1ไมครอน)นอกจากนี้สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต คือ

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือวัสดุคอมโพสิต ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ (Wood) ฟัน (Teeth) และกระดูก (Bone) ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจาพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมตริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์คอลลาเจน (Collagen) ที่เหนียว เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

2.5.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

ข้อดีของคอมโพสิต

- มีสมบัติต่อน้า หนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio)สูง เช่น ความแข็งแรงจาเพาะ (Specific strength) มอดุลัสจาเพาะ (Specificmodulus) ความแข็งเปราะจา เพาะ (Specific stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่า น้า หนักเบา
- ช่วยลดน้า หนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานเช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติการรับแรงและมีการหน่วง (Damping) ที่ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion, CTE) ต่า เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

ข้อเสียของคอมโพสิต

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy)เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse direction)
- การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น ทา ได้ยาก
- การตรวจวิเคราะห์สมบัติคอมโพสิต ทา ได้ยาก
- การทา ลายและนา กลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ทำ ได้ยาก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

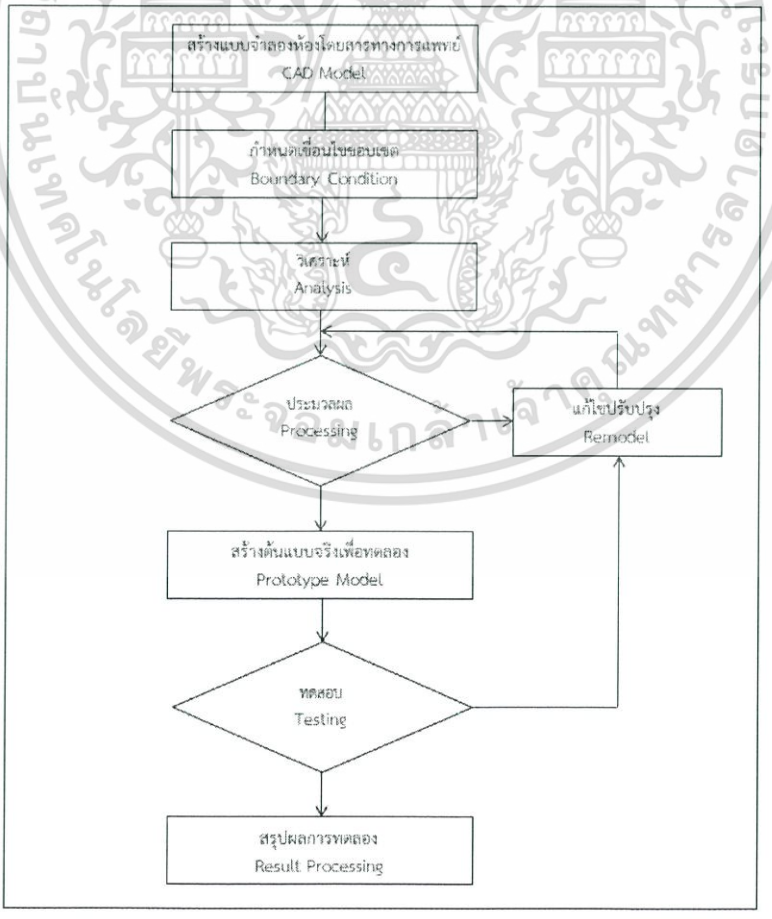
บริษัท สุพรีร่า อินโนเวชั่น จากัด (2014) ได้วิเคราะห์และปรับปรุงสาหรับการเสียหายของโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์โดยใช้แบบจำลองและการทดลอง ซึ่งพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในแบบจาลองเชิงตัวเลขนั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบตามข้อกาหนดของ UN ECE-Regulation No. 66 และ FMVSS Standard No. 220 ซึ่งเกิดการเสียรูปแบบถาวรเป็นบริเวณกว้างของหลังคารถ และความเสียหายจากผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นได้ทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มความแข็งแรงของประตูหลังของห้องโดยสารทางการแพทย์ จากผลการปรับปรุงดังกล่าวนั้นพบว่าห้องโดยสารทางการแพทย์ และหลังคาห้องโดยสารทางการแพทย์ ที่เกิดการเสียหายนั้นมีความแข็งแรงและทาให้ผ่านเกณฑ์ UN ECE-Regulation No. 66 และ FMVSS Standard No. 220 ได้กาหนดไว้ ซึ่งในการใช้แบบจาลองเชิงตัวเลขช่วยในการวิเคราะห์นั้นให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงและยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์ และบริเวณที่เสียหายได้อย่างมีนัยสาคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานและการออกแบบชุดทดลอง

3.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ เป็นการศึกษาเพื่อทดสอบความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ในเบื่องต้นเพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงห้องโดยสารทางการแพทย์แบบเดิม เพื่อเป็นการลดต้นทุนและระยะเวลาการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน การทดสอบความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์ ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปแบบและขนาดของห้องโดยสารทางการแพทย์ได้ข้อมูลจาก บริษัท ที เค ดี ไฟเบอร์ จำกัด การสร้างแบบจำลองและกำหนดสมบัติวัสดุของห้องโดยสารทางการแพทย์ในกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ กำหนดลักษณะใกล้เคียงกับห้องโดยสารทางการแพทย์ที่ต้องการวิเคราะห์มากที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลลิเมนต์ในกรณีที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐาน จะมีการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งแรง ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experimental) เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความเค้นที่โครงสร้างที่นั่งเพื่อนำไปปรับปรุง โครงสร้างที่นั่งต่อไป ดังแสดงในแผนผังในรูปที่ 3.1

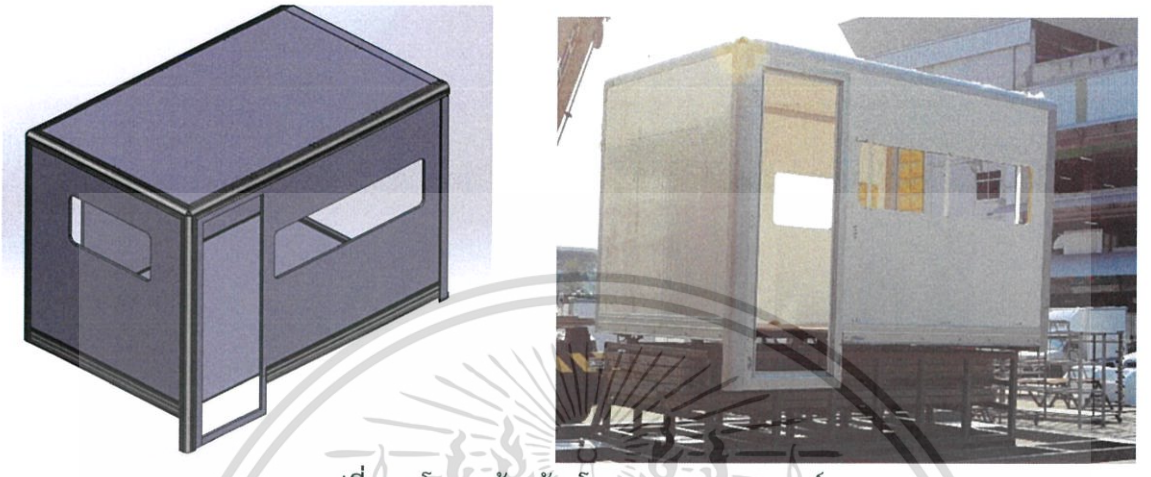


รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

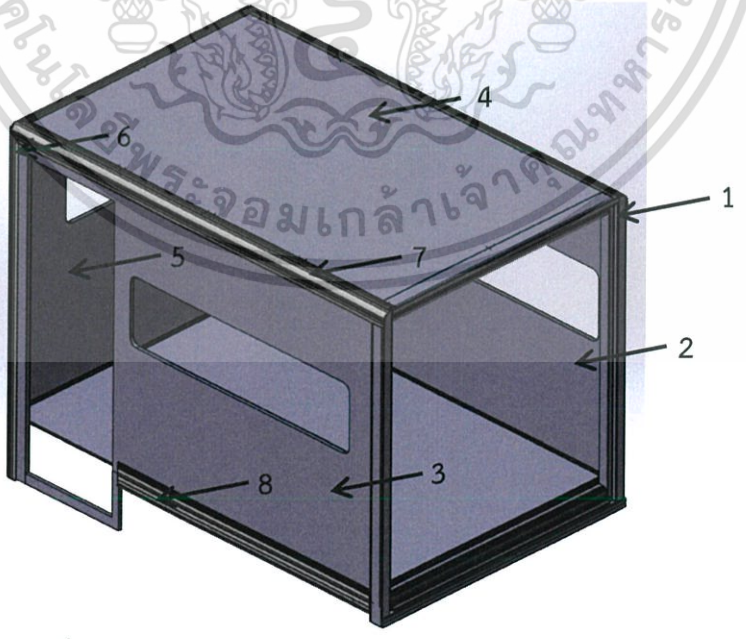
3.2 แบบจำลองโครงสร้าง (CAD Model)

โครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ ดังรูปที่ 3.2 เป็นโครงสร้างโดยสารทางการแพทย์ที่สถานประกอบการได้ออกแบบและผลิตเพื่อใช้งาน และผู้วิจัยได้นำมาถอดแบบและสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลลิเมนต์



รูปที่ 3.2 โครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์

จากรูปที่ 3.2 เป็นโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ที่สถานประกอบการได้ออกแบบเพื่อที่จะสามารถติดตั้งบนรถกระบะตอนเดียวและมีขนาดตามมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบก และวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220 ของโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ ผู้วิจัยไม่นำอุปกรณ์ภายในมาเกี่ยวข้อง เนื่องจากจำนวนของอิลลิ-เมนต์มีจำนวนมากและมีจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของห้องโดยสารทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

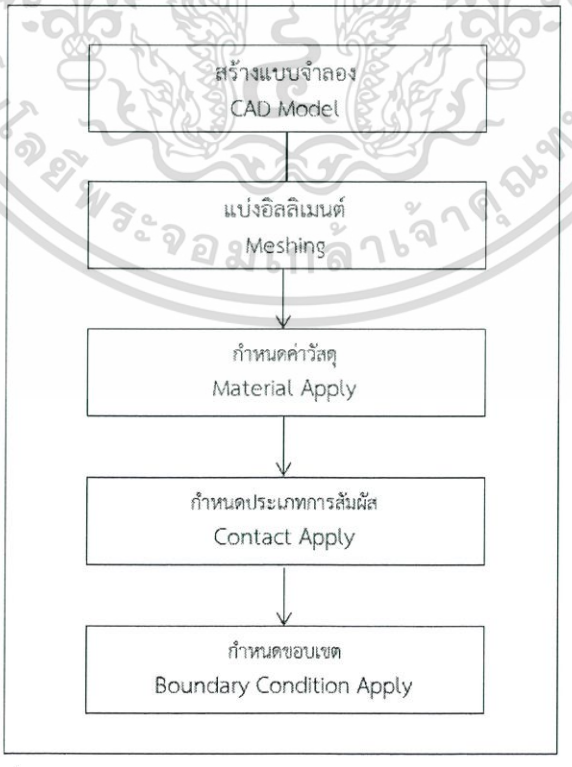
ตารางที่ 3.1 รายการส่วนประกอบห้องโดยสารทางการแพทย์

ลำดับ	ชื่อชิ้นส่วน	วัสดุ	ความหนา
1	เฟลมประตูเหล็กพับ	เหล็กแผ่น AISI 1035	1.5 มม.
2	ผนังแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิช-ขวา	Fiber Sheet และ XPS โฟม	27.4 มม
3	ผนังแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิช-ซ้าย	Fiber Sheet และ XPS โฟม	27.4 มม
4	ผนังแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิช-เพดาน	Fiber Sheet และ XPS โฟม	27.4 มม
5	ผนังแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิช-หลัง	Fiber Sheet และ XPS โฟม	27.4 มม
6	อลูมิเนียมโปรไฟล์ – เสาคู่หลัง	Aluminum 6063	2 มม.
7	อลูมิเนียมโปรไฟล์ – คู่บนหลังคา	Aluminum 6063	2 มม.
8	อลูมิเนียมโปรไฟล์ – รองโครงสร้างตู้	Aluminum 6063	2 มม.

รูปที่ 3.3 แสดงถึงลักษณะของโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ และได้แสดงถึงส่วนประกอบหลักของโครงสร้างที่ห้องโดยสารทางการแพทย์ตาม ตารางที่ 3.1 คือ เฟลมประตูหลัง อลูมิเนียมโปรไฟล์

3.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสารด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์นั้นเริ่มจากการสร้างโมเดลจำลองของห้องโดยสารทางการแพทย์ โดยอ้างอิงขนาดจากแบบจริง เริ่มแบ่งแบบจำลองออกเป็นอิลลิเมนต์ เล็ก ๆ แล้วกำหนดสมบัติวัสดุ เงื่อนไขการขอบเขตต่างๆ ให้สอดคล้องกับสภาพการทดสอบจริงตามมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์ Solidwork Simulation 2017 โดยจะวิเคราะห์ปัญหาแบบ-สถิต (Static Analysis) โดยขั้นตอนพอสังเขปได้แสดงในแผนผังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการคำนวณทางไฟไนท์อิลลิเมนต์

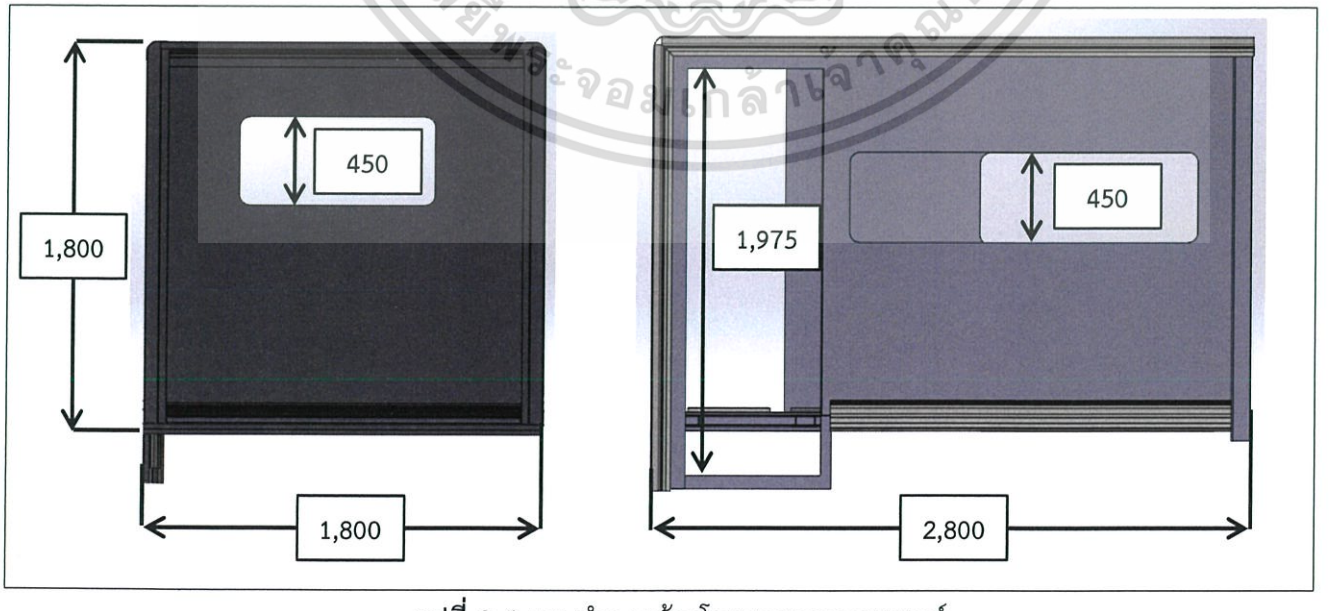
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การสร้างแบบจำลอง

ห้องโดยสารทางการแพทย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นห้องโดยสารที่ติดตั้งอยู่บนรถกระบะตอนเดียวซึ่งต้นแบบเป็นของบริษัท ที เค ดี ไฟเบอร์ จำกัด ซึ่งผู้วิจัยได้ลดทอนความซับซ้อนของแบบจำลองด้วยการตัดชิ้นส่วนภายในที่เล็กและไม่เกี่ยวข้องกันความแข็งแรงของโครงสร้างออก ดังรูปที่ 3.5 โดยในแบบจำลองจะมีส่วนที่จำเป็นตามเงื่อนไขของการทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐานเท่านั้น

รูปที่ 3.5 ต้นแบบตู้โดยสารทางการแพทย์

แบบจำลองห้องโดยสารทางการแพทย์สร้างโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2017 โดยมีรูปร่างและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.6 แบบจำลองจะถูกสร้างให้มีรูปร่างแบบ 3 มิติ

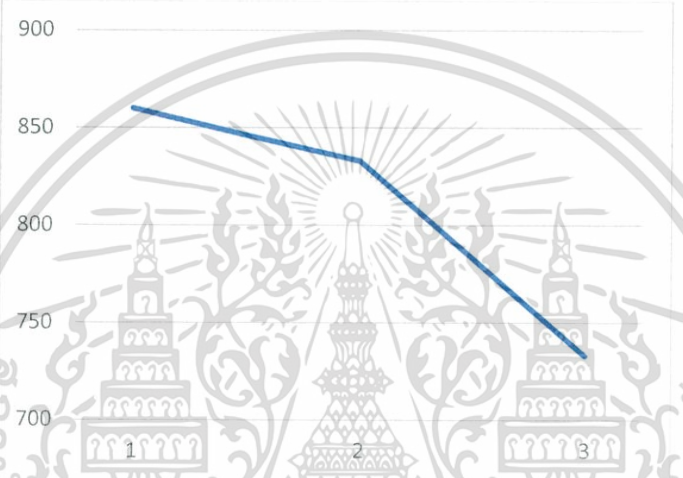


รูปที่ 3.6 แบบจำลองห้องโดยสารทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การกำหนดขนาดอิลลิเมนต์

เมื่อสร้างแบบจาลองที่นั่งรถโดยสารแล้ว จึงนำแบบจำลองเข้าไปแบ่งอิลลิเมนต์ ในฟังค์ชั่นของ SOLIDWORKS Simulation โดยแบ่งเป็นอิลลิเมนต์แบบสามมิติ ซึ่งเลือกใช้อิลลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) ทั้งนี้เพื่อสร้างความมั่นใจให้กับผลคำตอบที่ได้ จึงปรับขนาดของอิลลิเมนต์จากค่าเริ่มต้นของโปรแกรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 17 มิลลิเมตร โดยลดขนาดของอิลลิเมนต์ลง ครั้งละ 1 มิลลิเมตร แล้วเปรียบเทียบของค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุด ซึ่งระหว่าง อิลลิเมนต์ความยาว 1 กับ 2 มิลลิเมตร มีค่าความแตกต่างของค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดที่ เปลี่ยนไปอยู่ที่ 3.81% ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จึงเลือกใช้อิลลิเมนต์ที่มีขนาด 2 มิลลิเมตร ที่ให้ผลคำตอบค่าความเค้นใกล้เคียงกับผลคำตอบของการใช้อิลลิเมนต์ขนาด 1 มิลลิเมตร และยังใช้ CPU time ที่น้อยกว่า



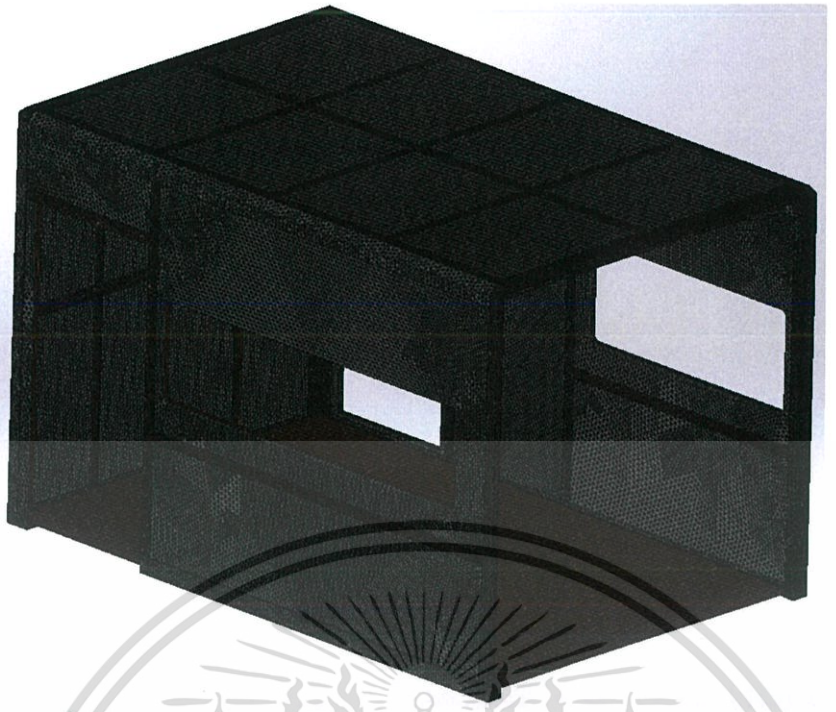
รูปที่ 3.7 ค่าความเค้นวอนมิสเซสอิลลิเมนต์ขนาด 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร

ซึ่งในแบบจำลองโครงสร้างที่นั่งมีจำนวน 400,337 อิลลิเมนต์ 809,208 จุดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนของที่นั่งรถโดยสารจะมีจำนวนอิลลิเมนต์ ดังแสดง ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการแบ่งอิลลิเมนต์ของห้องโดยสารทางการแพทย์

Mesh type	Mixed-Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	20 mm
Min Element Size	2 mm
Mesh quality	High
Total nodes	809208
Total elements	400337

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การแบ่งอิลลิเมนต์ของแบบจำลองห้องโดยสารทางการแพทย์

3.3.3 การกำหนดสมบัติวัสดุ

แบบจำลองห้องโดยสารทางการแพทย์ ได้กำหนดสมบัติวัสดุโดยอ้างอิงจากวัสดุจริง ที่ใช้ในการประกอบห้องโดยสารทางการแพทย์ ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงในหัวข้อ 3.2 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์สมบัติวัสดุโดยให้มีค่าสมบัติวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง (Elastic-Plastic Isotropic) เพื่อนำไปวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Simulation 2017 ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสมบัติวัสดุของโครงสร้าง

	ชื่อวัสดุ			
คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	AISI 1035	Fiber sheet	XPS	Aluminum 6063
Young modulus (GPa)	205.00	660	1.1	69.00
Tangent modulus (MPa)	171.00	130	2.7	25.80
Yield strength (MPa)	282.00	36	0.31	90.00
Tensile strength (MPa)	585.00	45	0.45	150.00
Poisson Ratio	0.29	0.30	0.10	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน แบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข การสัมผัส คือ

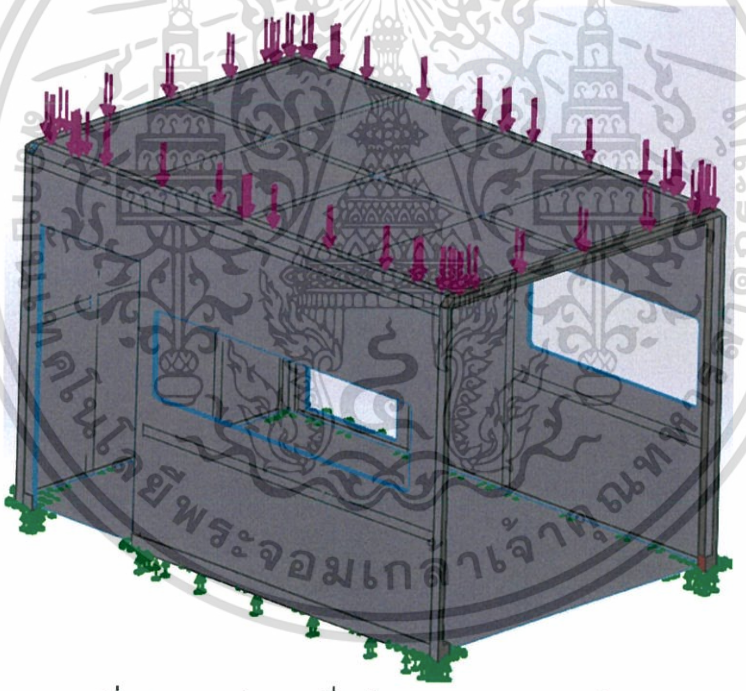
1. การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ (Bond Contact)

2. การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นสามารถเลื่อนไถลได้แต่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ (No penetration Contact)

ซึ่งระหว่างชิ้นส่วนที่ติดกันด้วยการเชื่อมจะพิจารณาให้เป็นการเชื่อมต่ออย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะถูกกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแบบ Bond Contact และ ระหว่างหน้าสัมผัสของ ชิ้นส่วนที่ติดกันจะถูกกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแบบ No penetration Contact

3.3.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตนั้น จะกำหนดให้ชิ้นส่วนพื้นห้องโดยสารทางการแพทย์ ไม่ให้เคลื่อนที่และหมุนในทุกทิศทาง (Fixed displacement) และให้แรงกระทำแบบจุด (Point load) กระทำที่ขอบหลังคาทั้ง 4 ด้าน ให้แรงกระทำเป็นทิศทางตั้งฉากกับหลังคา โดยภาระที่กระทำเท่ากับ 47,250 นิวตัน ดังแสดง ในรูปที่ 3.



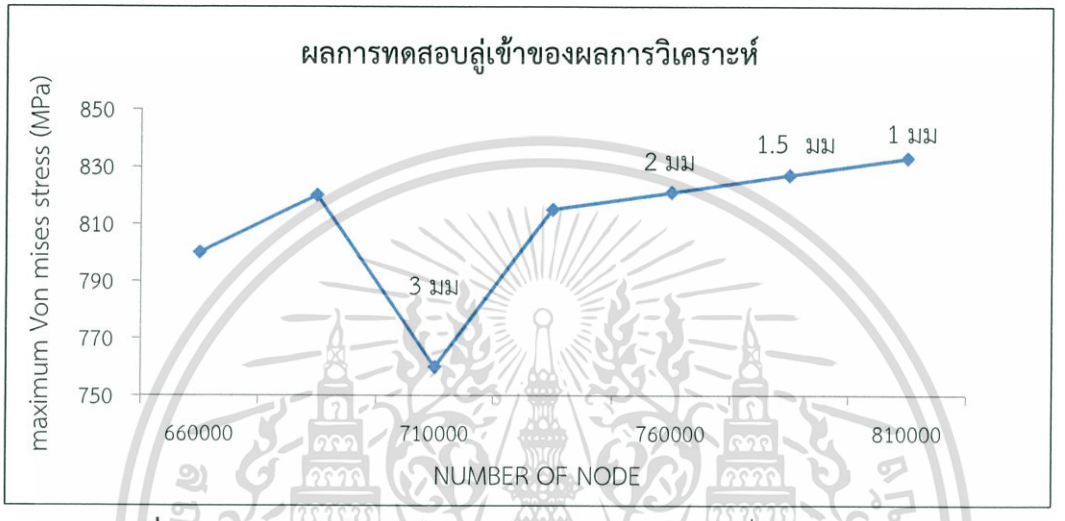
รูปที่ 3.9 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

3.3.6 การทดสอบการลู่เข้าของผลการวิเคราะห์โดยวิธีการ Grid Independent

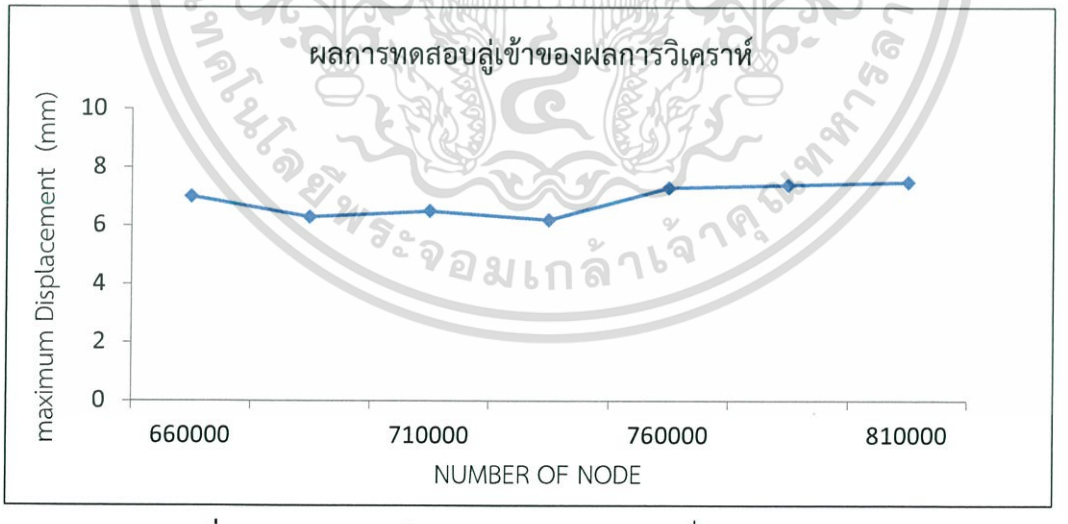
ทฤษฎีทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์นั้นหากขนาดของอิลลิเมนต์มีขนาดที่เล็กลงก็จะทาให้ผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์นั้นลู่เข้าสู่ผลเฉลยแม่นตรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งหากปรับลดขนาดของอิลลิเมนต์ให้เล็กลงเรื่อยๆจนผลเฉลยนั้นไม่มีความแตกต่างหรือมีความแตกต่างในแต่ละช่วงอิลลิเมนต์ที่น้อยมาก ซึ่งหมายความว่าผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์นั้นลู่เข้าสู่ผลเฉลยแม่นตรง ในการทดลองนั้นได้กาหนดเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ตามหัวข้อ 3.3.2-3.3.5และทำการลดขนาดของอิลลิเมนต์ลงเรื่อยๆจนกว่าผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์นั้นจะมีแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงที่และเริ่มเป็นเส้นตรง ในการทดสอบดังกล่าวจะพิจารณาค่าความเค้นฟอนมิสเซสสูงสุด (maximum Von mises stress) และค่าการเสียรูปสูงสุด (maximum Displacement) จากผลการวิเคราะห์ นั้น พบว่าค่าความเค้นฟอนมิสเซสสูงสุด และค่าการเสียรูปสูงสุดนั้นเริ่มลู่เข้าที่ขนาดอิลลิเมนต์ 2, 1.5 และ 1 มิลลเมตร ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบ แล้วพบว่าขนาดอิลลิเมนต์ 2, 1.5 และ 1 มิลลเมตร นั้นก็มีค่าความเครียดที่ตำแหน่งคานประตูใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังนั้นการทดลองทั้งสองการทดลองนี้พบว่าขนาดอิลลิเมนต์ 2, 1.5 และ 1 มิลลิเมตรมีความเหมาะสมที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ห้องโดยสารทางการแพทย์ ตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 และ FMVSS 220



รูปที่ 3.10 ผลการลู่เข้าของค่าความเค้นฟอนมิสเซสสูงสุดที่ได้ทาการทดสอบ



รูปที่ 3.11 ผลการลู่เข้าของค่าการเสียรูปสูงสุดที่ได้ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบตามมาตรฐาน

3.4.1 มาตรฐาน FMVSS 220

การตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยและใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์ ได้ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ โดยวิธีการที่เรียกว่า การทดสอบการรับภาระแบบสถิต (Static load test) ด้วยการใส่น้ำหนักที่เท่ากับ 1.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกของรถขั้นต่ำหรือ 2,850 กก. X 1.5 = 4,275 กก. โดยยกแท่นกดหลังคาแบบเติมน้ำไปวางบนหลังคาที่มีน้ำหนัก 500 กก. และวัดระยะการเสียรูปที่จุดอ้างอิงและเติมน้ำครั้งละ 1,000 ลิตร และวัดระยะการเสียรูปที่จุดอ้างอิงต่างๆ รวม 4 ครั้ง ได้น้ำหนักรวมครั้งสุดท้ายของแท่นกดหลงคาเป็น 4,500 กก.

รูปที่ 3.12 การทดสอบการรับภาระแบบสถิต

รูปที่ 3.13 วัดระยะการเสียรูปที่จุดอ้างอิง

การทดสอบการรับภาระสถิต ได้ติดตั้งแท่นกดหลังคาแบบเพิ่มภาระโดยเติมน้ำ ทุกๆช่วงของการเพิ่มภาระจะวัดค่าการเสียระยะจากจุดอ้างอิงที่สำคัญ เพื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบจริงกับค่าการเสียระยะจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการพลิกคว่ำาประกอบดวย โครงสรางทดสอบ มวล ผูโดยสาร เครื่องชั่งน้าหนักโครงสราง ชุดทดสอบการพลิกคว่ำา และเครื่องบันทึกภาพถายวีดีทัศน ความเร็วสูงสาหรับการทดสอบการกระแทกดานหนา เครื่องมือและอุปกรณที่ใชจะประกอบดวย โครงสรางทดสอบ เครื่องชั่งน้าหนักโครงสราง ชุดทดสอบการกระแทกดานหนา และเครื่องบันทึกภาพถายวีดีทัศนความเร็วสูง รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณมีดังตอไปนี้

3.4.1 มวลของโครงสร้างและผูโดยสาร

มวลผูโดยสารถูกกาหนดใหติดตั้งเพื่อจาลองการพลิกคว่ำาขณะมีผูโดยสารเสมือนจริง ซึ่งมวลผูโดยสารทามาจากคอนกรีตผสมเสร็จ (CPAC) มีความหนาแนนเทากับ 2.4 ตัน/ลูกบาศกเมตร และมีกาลังอัด ขนาด 0.35x0.07x3 ม. น้าหนักจากการชั่งได้ 120 กิโลกรัม/แผ่น ใช้ทั้งหมด 18 แผ่น ได้น้าหนักรวม 2,160 กิโลกรัม

การชั่งแผ่นคอนกรีตผสมเสร็จ

การติดตั้งแผ่นคอนกรีตผสมเสร็จกับชุดทดสอบการพลิกคว่ำ

รูปที่ 3.14 ชุดมวลถ่วงน้าหนักรวมโครงสร้าง

การติดตั้งโครงสร้างบนแท่นทดสอบการพลิกคว่ำ UN-ECE R66

ชุดทดสอบการพลิกคว่ำสาหรับการทดสอบการพลิกคว่ำของห้องโดยสารรถพยาบาลและสองชั้น ชุดทดสอบถูกสรางขึ้นตามมาตรฐาน UN-ECE R66 ณ พื้นที่ภายในบริษัท ที เค ดี ไฟเบอร์ จำกัด มีขนาด 2.5 x 5 เมตร รับการยกด้วยรถเครนขนาดใหญ่ เมื่อคานวณโมเมนตจะมี ค่าเทากับ 1,440 กิโลนิวตัน× เมตร ซึ่งมีค่ามากกวาโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของตัวรถโดยสารตามและน้ำหนักของโครงสรางชุดทดสอบ 3.2 เท่า โดยประมาณ ความเร็วในการยกเท่ากับ 30 มิลลิเมตร/วินาที หรือเทียบเท่าไมเกิน 5 องศาต่อวินาที และมุมยกสูงสุดมีคาเทากับ 70 องศา โดยมุมยกใช้งานจะถูกตั้งไว้ที่ 60 องศา

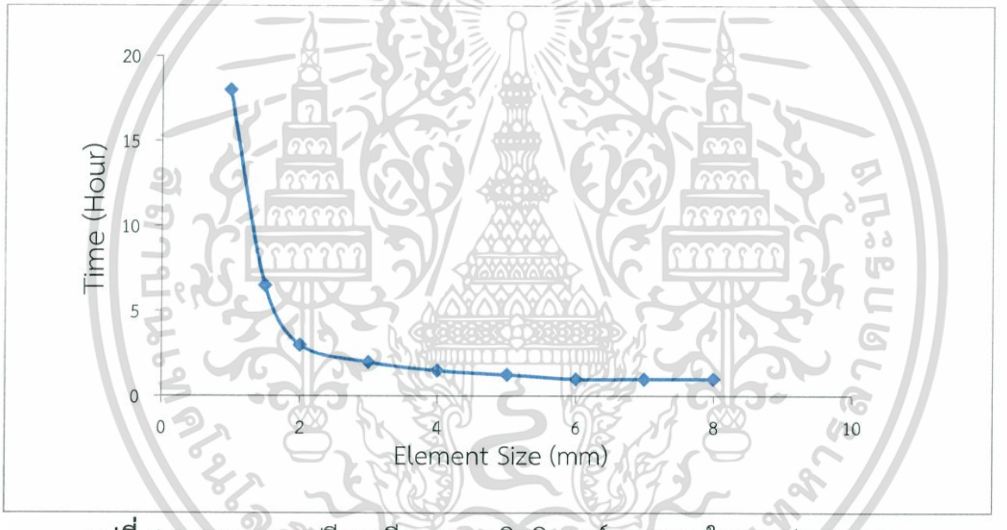
รูปที่ 3.15 ภาพรวมการติดตั้งแท่นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ทาการวิเคราะห์จุดยึดเข็มขัดนิรภัยตามข้อกาหนดของ ECE R 14 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ และทาการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์โดยการทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่นั่งผู้โดยสารและเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ และเพื่อความน่าเชื่อถือของการทดลองทาการทดลองการลู่เข้าของผลเฉลยทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ผลจากการทดลองทั้งสองการทดลองนั้นทาให้พบว่าที่ขนาดอิลลิเมนต์ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร นั้นมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์โครงสร้างที่ห้องโดยสารทางการแพทย์ เนื่องจากขนาดอิลลิเมนต์ดังกล่าวนั้นทำให้ผลเฉลยเริ่มลู่เข้าสู่ผลเฉลยแม่นตรงของปัญหาดังกล่าว แต่เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลของขนาดอิลลิเมนต์ทั้ง 3 ขนาดแล้วพบว่าอิลลิเมนต์ขนาด 2 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4.1 และให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับขนาดอิลลิเมนต์ 1 และ1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 แผนภาพเปรียบเทียบขนาดอิลลิเมนต์และเวลาในการประมวลผล

4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงตู้โดยสารทางการแพทย์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์นั้นจะมีเกณฑ์ตัดสินให้จุดยึดที่นั่งผ่านการทดสอบซึ่งมีเกณฑ์การตัดสิน 2 เกณฑ์ คือ

1) ค่าระยะการเคลื่อนที่ของผนังเพดานในแนวตั้งฉากกับพื้น โดยอิงมาตรฐาน FMVSS 220

2) ค่าระยะการเสียรูปของโครงสร้างโดยไม่ต่ำกว่าค่าของพื้นที่ปลอดภัยตามมาตรฐาน ECE R.66

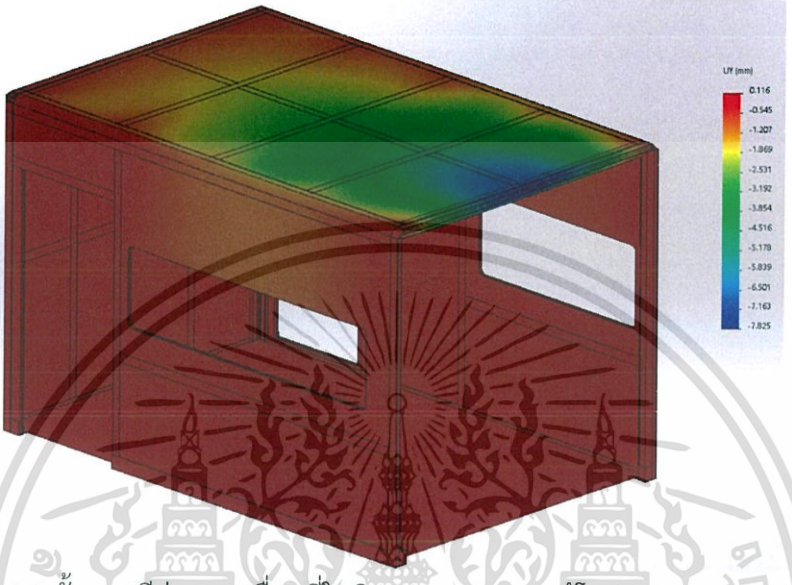
ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ จะต้องผ่านเกณฑ์การตัดสินทั้ง 2 ข้อ พร้อมกันจึงจะถือว่าห้องโดยสารทางการแพยท์มีความแข็งแรงผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน

4.2.1 ค่าระยะการสียรูปของเพดานในแนวตั้งฉากกับพื้นโดยอิงมาตรฐาน FMVSS 220

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถแสดงให้เห็นถึงระยะ การเคลื่อนที่ของสิ้นส่วนเพนดานตู้ในแนวตั้งฉากกับพื้นทิศทางแกน Y หลังจากใส่แรงกระทำซึ่งจะเห็นได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

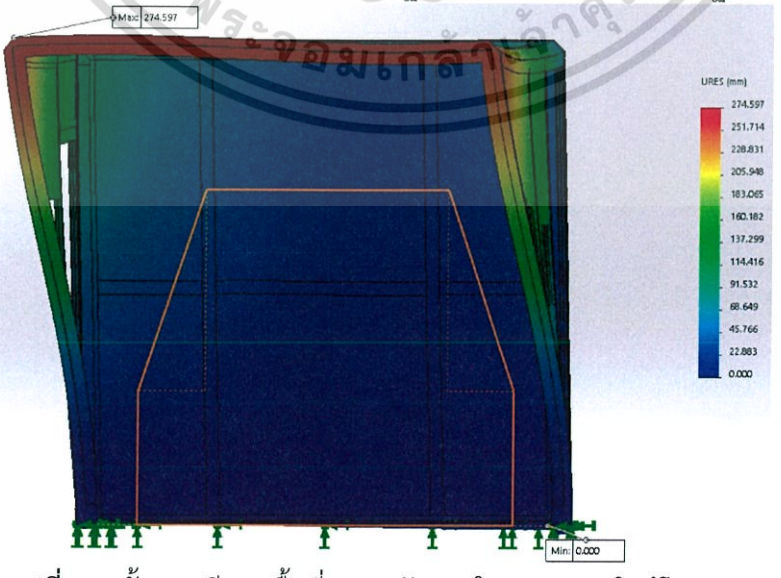
ขอบประตูมีความสูงก่อนใส่ภาระที่จุด A เท่ากับ 1,865 มม. มีระยะเคลื่อนที่ลงในแนวแกน Y สูงสุด -7.8 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การตัดสินการทดสอบที่กำหนดให้ระยะเคลื่อนลงที่ไม่เกิน -130 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดสอบห้องโดยสารทางการแพยท์เกณฑ์การตัดสินในส่วนของระยะการเสียรูปในแนวแกน Y ทดสอบได้ผ่านมาตรฐานการทดสอบโดยอิงมาตรฐาน FMVSS 220



รูปที่ 4.2 ชั้นแถบสีค่าการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y ของตู้โดยสารทางการแพทย์

4.2.2 ค่าการเสียรูปของโครงสร้างไม่ไม่ทับซ้อนพื้นที่ปลอดภัยตามมาตรฐาน ECE R.66

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ระยะการเสียรูปของโครงสร้างห้องพยาบาลทางการแพทย์หลังจากใส่แรงกระทำแล้วนำระยะการเสียรูปของพื้นที่หน้าตัดภายในห้องโดยสารมาเทียบกับพื้นปลอดภัยซึ่งจะพบว่า ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การตัดสินการทดสอบที่กำหนดให้โครงสร้างหรือชิ้นส่วนของโครงสร้างเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดสอบห้องโดยสารทางการแพยท์ทดสอบได้ผ่านมาตรฐานการทดสอบโดยอิงมาตรฐาน ECE R.66



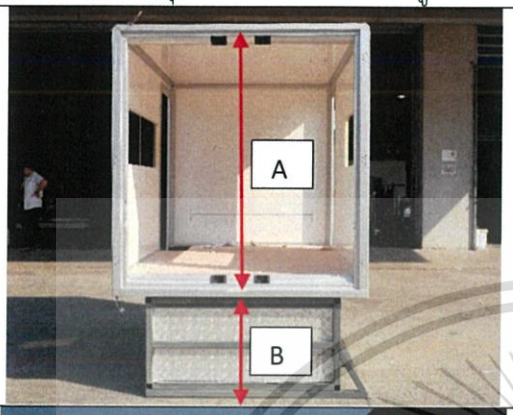
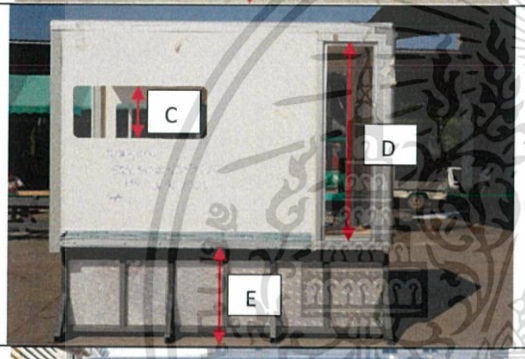
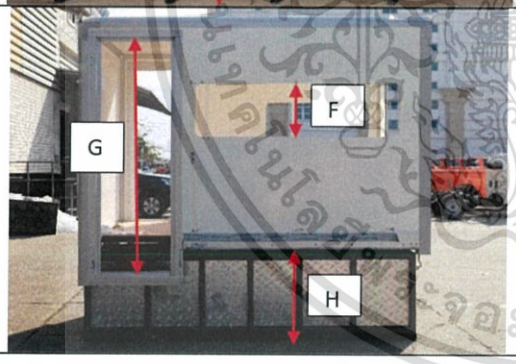
รูปที่ 4.3 ชั้นแถบสีและพื้นที่ปลอดภัยภายในกรอบภายในตู้โดยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงของตู้โดยสารทางการแพทย์

4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของตู้โดยสารทางการแพทย์มาตรฐาน FMVSS 220

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งจุดวัดและระยะการเสียรูป

ตำแหน่งจุดวัดและระยะการเสียรูป	รายละเอียด
	จุด A มีระยะเดิมเท่ากับ 1,865 มม. จุด B มีระยะเดิมเท่ากับ 800 มม.
	จุด C มีระยะเดิมเท่ากับ 450 มม. จุด D มีระยะเดิมเท่ากับ 1,675 มม. จุด E มีระยะเดิมเท่ากับ 807 มม.
	จุด F มีระยะเดิมเท่ากับ 450 มม. จุด G มีระยะเดิมเท่ากับ 1,965 มม. จุด H มีระยะเดิมเท่ากับ 809 มม.

สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างห้องโดยสารของรถพยาบาลที่สร้างจากแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิชและมีการเสริมความแข็งแรงภายในแผ่นด้วยเหล็กกล่องและขอบอลูมิเนียม ขนาดภายในห้องโดยสารรถพยาบาลมีขนาดความกว้าง 1,800 มม. ความยาว 2,850 มม. และความสูง 1,800 มม. สามารถต้านทานแรงภายนอกขนาด 4,500 กก. ที่มากระทำบนของหลังคาห้องโดยสารได้และไม่มีส่วนใดของโครงสร้างได้รับความเสียหาย

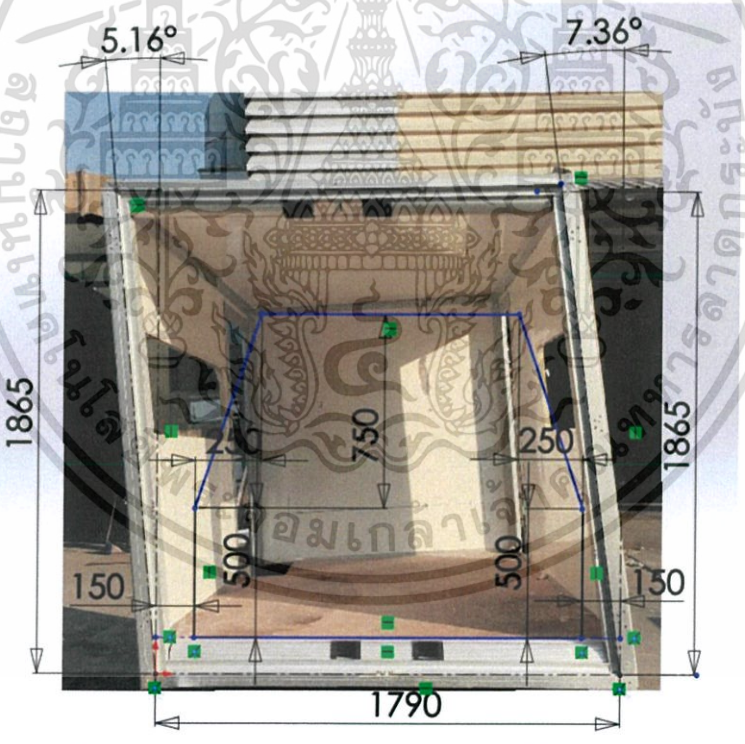
ผลการทดสอบจากตารางที่ 4.1 แสดงว่าโครงสร้างห้องโดยสารของรถพยาบาลมีความแข็งแรงผ่านการประเมินความต้านทานแรงจากการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน FMVSS 220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงกระทำบนของหลังคาห้องโดยสาร

จุดวัด	ระยะเดิม (มม.)	ระยะการเสียรูปขณะเพิ่มน้ำหนัก (มม.)					ระยะเสียรูปหลังจากปลดภาระ	ผลการทดสอบ
		500 กิโลกรัม	1,500 กิโลกรัม	2,500 กิโลกรัม	3,500 กิโลกรัม	4,500 กิโลกรัม		
A	1,865	0	0	0	0	5	0	ผ่าน
B	800	0	0	0	0	0	0	ผ่าน
C	450	0	0	2	0	5	0	ผ่าน
D	1,675	0	0	0	0	0	0	ผ่าน
E	807	0	0	3	6	7	0	ผ่าน
F	450	0	0	2	2	2	0	ผ่าน
G	1,965	0	0	0	0	0	0	ผ่าน
H	809	0	0	3	4	9	0	ผ่าน

4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของตู้โดยสารทางการแพทย์มาตรฐาน ECE R.66



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบความเสียหายโดยใช้พื้นที่ปลอดภัย

สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างห้องโดยสารของรถพยาบาลที่สร้างจากแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิชและมีการเสริมความแข็งแรงภายในแผ่นด้วยเหล็กกล่องและขอบอลูมิเนียม ขนาดภายในห้องโดยสารรถพยาบาลมีขนาดความกว้าง 1,800 มม. ความยาว 2,850 มม. และความสูง 1,800 มม. สามารถต้านทานความเสียหายจากกการพลิกคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบแสดงว่าโครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์มีความแข็งแรงผ่านการประเมินความต้านทานแรงจากการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66

ผลการเปรียบเทียบความค่าระหว่างการเสียรูปกับแรงกระทำ ของการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

เมื่อนำผลที่ได้มาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสียรูปกับแรงกระทำ เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดสอบจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยวัดระยะการเสียรูปที่ตำแหน่งสำคัญที่มีมาตรฐานกำหนด ซึ่งจากตารางความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับแรงกระทำพบว่าแนวโน้วของการสียรูปต่อแรงกระทำของการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์มีผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งได้ เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงสุด อยู่ที่ 0.010% ซึ่งถือว่าเป็นค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ เนื่องจากแบบจำลองของการทดสอบได้ให้ ขนาดที่สวมเข้ากันพอดี แต่การทดสอบจริงนั้นมีค่าความเผื่อของการสวมรูสลักและระบบ การทดสอบมีจุดต่อ 3 จุด ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทา ให้เกิดค่าความผิดพลาด

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลระยะการเสียรูปของการทดสอบและการวิเคราะห์

จุดวัด	ระยะเดิม (มม.)	ระยะการเสียรูปขณะเพิ่มน้ำหนัก (มม.) ภาระแบบสถิต 4,500 กิโลกรัม		เปอร์เซนต์ความแตกต่าง
		วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์	การทดลอง	
A	1,865	7	5	0.010%
B	800	-	-	
C	450	5	5	0%
D	1,675	1	0	0.029%
E	807	-	7	
F	450	2	2	0%
G	1,965	1	0	0.029%
H	809	-	9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อได้ผลการทดลองจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ แล้ว ผู้ทำการทดลองจะได้ทราบถึงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ รวมถึงความผิดพลาดและข้อเสนอแนะในการนำมาซึ่งการพัฒนาชุดการทดลองนี้เป็นลำดับต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงห้องโดยสารทางการแพทย์สามารถรับแรงกระทำตามมาตรฐานการทดสอบห้องโดยสารทางการแพทย์และเพื่อออกแบบโครงสร้างรับแรงที่สามารถรับแรงกระทำดังกล่าวได้ตามมาตรฐานการทดสอบ จากการวิจัย พบว่า

5.2.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของห้องโดยสารทางการแพทย์แบบจำลองต้นแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ การเสียรูปในแนวตั้งฉากกับพื้นของผนังเพดานและหลังคาไม่ผ่านมาตรฐาน

5.2.2 ผลจากการปรับปรุงห้องโดยสารทางการแพทย์

- ปัจจัยที่มีผลต่อค่าระยะการเสียรูปของผนังเพดาน ได้แก่ (1) ความแข็งแรงของแผ่นวัสดุคอมโพสิตแซนด์วิช (2) ความหนา (3) ความแข็งแรงของแผ่นวัสดุคอมโพสิตแซนด์วิชของผนังด้านข้างทั้ง3ด้าน และ (4) การเพิ่มเหล็กเสริมแรงภายในผนัง

5.2.3 การปรับปรุงห้องโดยสารทางการแพทย์จากปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสาคัญส่งผลให้ได้แบบจำลองของห้องโดยสารทางการแพทย์ที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ โดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 80 กิโลกรัม

5.2.4 โครงสร้างห้องโดยสารทางการแพทย์ ที่สร้างจากแผ่นประกอบคอมโพสิตแซนด์วิชและมีการเสริมความแข็งแรงภายในแผ่นด้วยเหล็กกล่องและขอบอลูมิเนียม ขนาดภายในห้องโดยสาร มีขนาดความกว้าง 1,800 มม. ความยาว 2,850 มม. และความสูง 1,800 มม. สามารถต้านทานแรงภายนอกขนาด 4,500 กก. ที่กระทำบนของหลังคาห้องโดยสารได้และไม่มีส่วนใดของโครงสร้างได้รับความเสียหายตามมาตฐาน FMVSS 220 และ AMD001 และ สามารถต้านทานความเสียหายจากกันพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 66

5.2.5 ผลการทดสอบแสดงว่าโครงสร้างห้องโดยสารของรถพยาบาลของ บริษัท ที.เค.ดี. ไฟเบอร์ จำกัด มีความแข็งแรงผ่านการประเมินความต้านทานแรงจากการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน FMVSS 220 AMD001 และ ECE Regulation No. 66

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ควรมีการวิเคราะห์อุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในเพิ่มด้วยเพื่อให้มีเงื่อนไขเหมือนกับตู้โดยสารทางการแพทย์จริงเพื่อให้ได้ผลที่มีความแม่นมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรเลือกใช้ประเภทอิลลิเมนต์ที่มีคุณภาพที่สูงขึ้นเพื่อความถูกต้องแม่นยำของผล

5.2.3 ควรมีการศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพื่อให้เงื่อนไขการสัมผัสระหว่าง ชิ้นส่วนเหมือนกับการสัมผัสจริงและเพื่อสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดกับรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ปราโมทย์ เดชะอำไพ ,สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช. ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่ายพร้อมซอฟต์แวร์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2548.

[2] พงษ์ศักดิ์ บุญธรรมกุล. เทคนิคการติดตั้งตัวถังรถบรรทุก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น ,2543.

[3] บัญฑิต ใจชื่น. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การอบชุบเหล็กกล้าด้วยความร้อน. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งสริมอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม, 2541.

[4] อำพล ซื่อตรง. แชสซีสและตัวรถ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2531.

[5]ไพโรจน์ สิงหฌนัดกิจ. กลศาสตร์ของวัสดุวิศวกรรม. สานักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. (2555).

[6] Nadine Levick. DEVELOPMENT OF PROPOSED CRASH TEST PROCEDURES FOR AMBULANCE VEHICLES. Monash University Australia,2009

[7] B. GEPNER1)*, C. BOJANOWSKI2), L. KWASNIEWSKI3) and J. WEKEZER1). EFFECTIVENESS OF ECE R66 AND FMVSS 220 STANDARDS IN ROLLOVER CRASHWORTHINESS ASSESSMENT OF PARATRANSIT BUSES. Department of Civil and Environmental Engineering, FAMU-FSU College of Engineering,2013

[8] Ferdinand Beer, Russell Johnston, John Dewolf, David Mazurek and Sanjeev Sanghi (2012), Mechanic of Materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

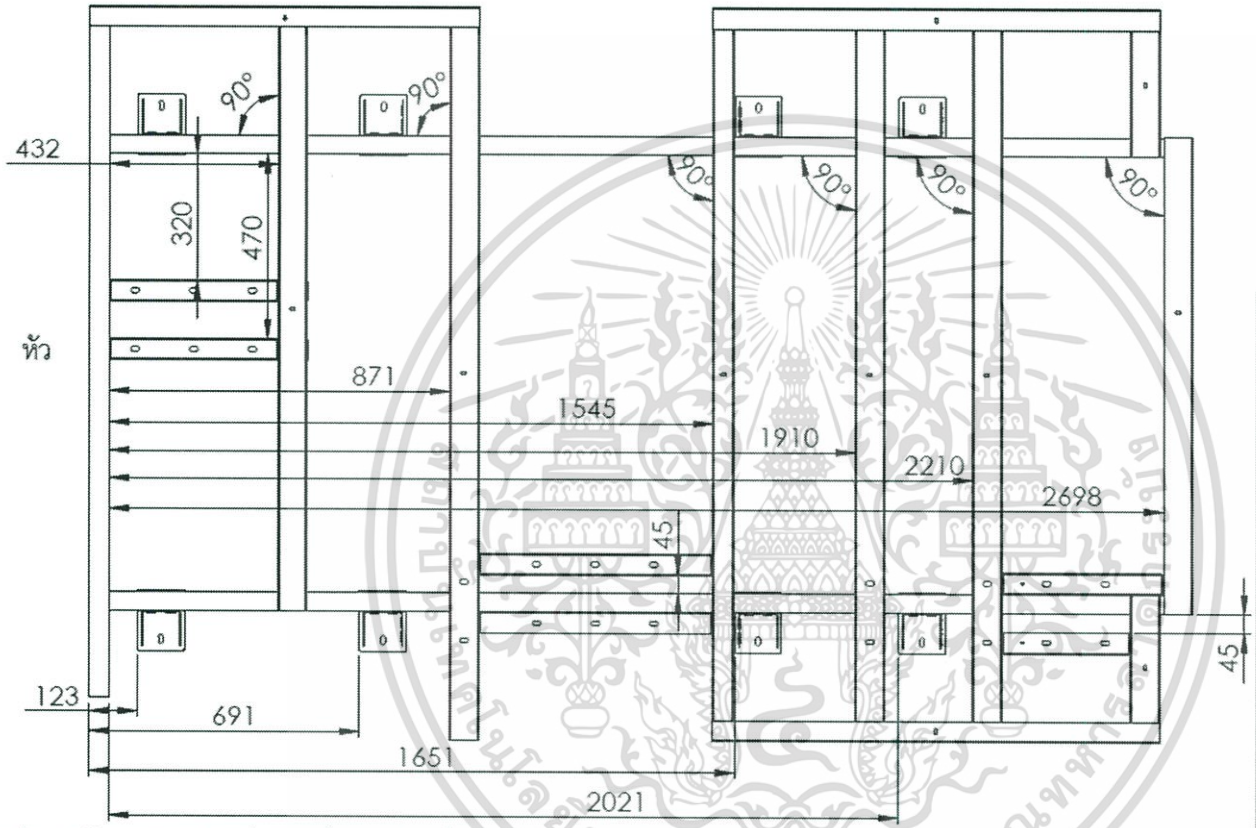
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แบบจำลองตู้โดยสารทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะการวางคาน + ระยะลูกตั้ง + ระยะคานรับเก้าอี้



* กรุณาแจ้งค่า + กรณีมีค่ามาตรฐานของการผลิต/ระยะใน Drawing นี้ต้องประกอบกับ Part อื่นๆ ทางบริการฯ ไม่รับผิดชอบทั้งสิ้น *

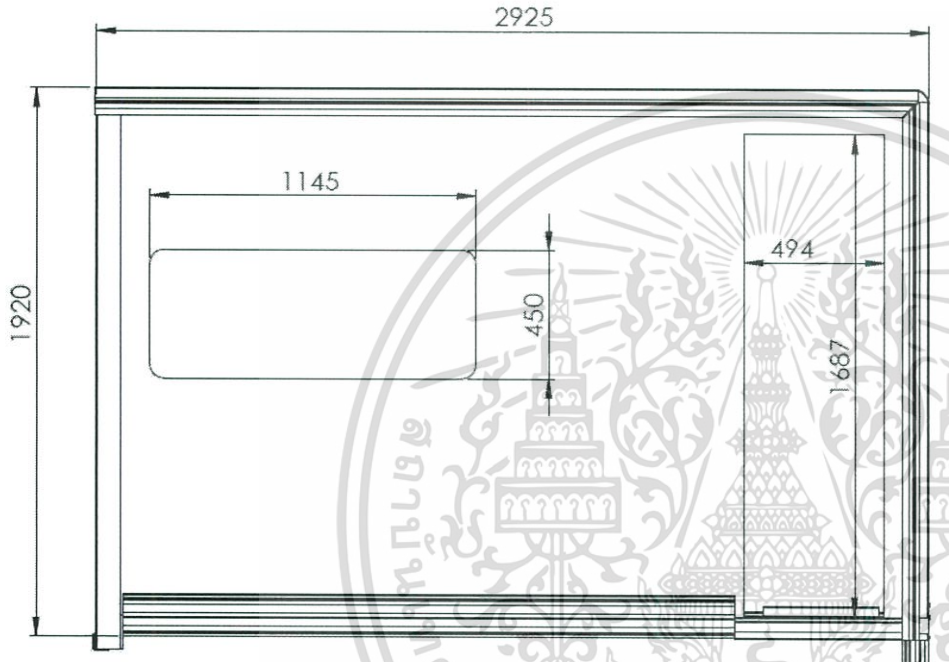
PROJECT โครงการ	
PART NAME ชื่อชิ้นงาน	ตัวทดลอง ประกอบ 11-05-61
MATERIAL วัสดุ	
SURFACE พื้นผิว	
COLOR สี	
OVERALL SIZE ขนาด	
THICKNESS ความหนา	
WEIGHT น้ำหนัก	
QUANTITY จำนวนการใช้งาน	TOLERANCE ± 1
VIEW	
UNIT หน่วย MM.	SCALE มาตราส่วน

CARRYBOY
T.K.D. FIBER CO.,LTD
888 LUANGPHAENG RD, LADKRABANG, BANGKOK 10520
TEL 360-7588(AUTOMATIC) FAX (662) 360-7551
THE DESIGN & DETAILS ARE THE PROPERTY OF T.K.D. FIBER CO.,LTD
DO NOT REPRODUCE WITHOUT PERMISSION
ISO 9001 : 2008
www.carryboy.com e-mail:design@carryboy.com

C:\Users\USER\Desktop\Chassis 07-05-61\ตัวทดลอง ประกอบ 11-05-61

MARK	REVISION	DATE
1		
2		
3		

PART NUMBER รหัสและชื่อชิ้นงาน		MANAGING DIRECTOR กรรมการผู้จัดการ	
DRAWING NUMBER	NO		
DRAWN BY ณัฐชนน สมจิตต์	DATE 31 May 18	DESIGN MANAGER	DATE
DESIGNER ณัฐชนน สมจิตต์	DATE	APPROVED	DATE



PROJECT โครงการ	
PART NAME ชื่อชิ้นงาน	ABL LT SL 10G
MATERIAL วัสดุ	
SURFACE พื้นผิว	
COLOR สี	
OVERALL SIZE ขนาด	
THICKNESS ความหนา	
WEIGHT น้ำหนัก	
QUANTITY จำนวนการใช้งาน	TOLERANCE ± 1
VIEW	
UNIT หน่วย MM	SCALE มาตราส่วน

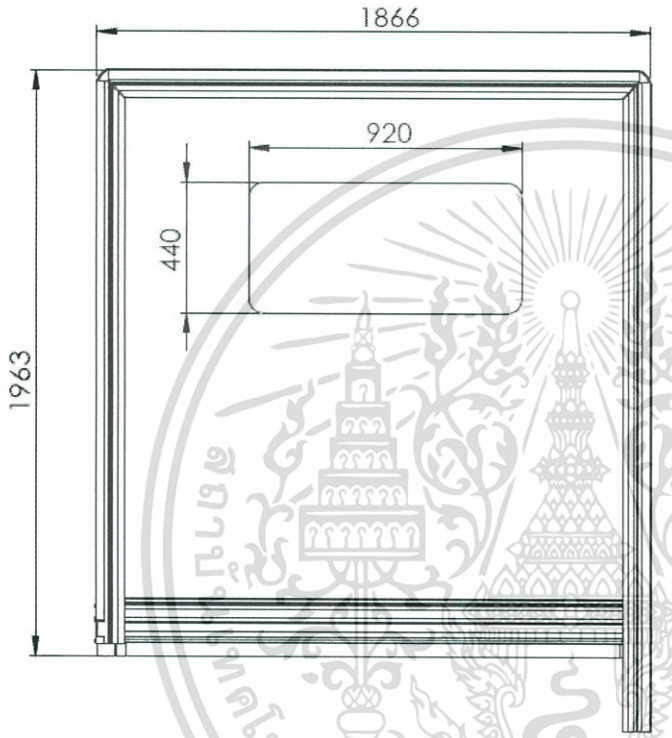
* กรุณาเน้นจัดคำ + การมีมิติค่ามาตรฐานของการผลิต/ระยะใน Drawing นี้ต้องประกอบกับ Part อื่นๆ หากมีการแก้ไขให้แก้และส่งให้ CARRYBOY APPROVE *

CARRYBOY
T K D FIBER CO.,LTD
888 LUANGPHAENG RD. LADKRABANG, BANGKOK 10520
TEL 360-7666(AUTOMATIC) FAX (662) 360-7651
บมจ.ทรอปิคัลดีลักษณ์อินดัสเตรียล ลิมิเต็ด บริษัท ที.เค.ดี ไฟเบอร์ จำกัด
THE DESIGN & DETAILS ARE THE PROPERTY OF T.K.D. FIBER CO.,LTD
DO NOT REPRODUCE WITHOUT PERMISSION
ISO 9001 : 2008
www.carryboy.com e-mail:design@carryboy.com

C:\Users\USER\Desktop\ผู้จำหลองการที่110G 17-05-61\ABL LT SL 10G

MARK	REVISION	DATE
1		
2		
3		

PART NUMBER หมายเลขชิ้นงาน		MANAGING DIRECTOR กรรมการผู้จัดการ	
DRAWING NUMBER	NO		
DRAWN BY	DATE 31-May-18	DESIGN MANAGER	DATE
DESIGNER	DATE	APPROVED	DATE



PROJECT โครงการ	
PART NAME ชื่อชิ้นงาน	ABL LT SL 10G
MATERIAL วัสดุ	
SURFACE พื้นผิว	
COLOR สี	
OVERALL SIZE ขนาด	
THICKNESS ความหนา	
WEIGHT น้ำหนัก	
QUANTITY จำนวนการใช้งาน	TOLERANCE + 1
VIEW	
UNIT หน่วย MM.	SCALE มาตราส่วน

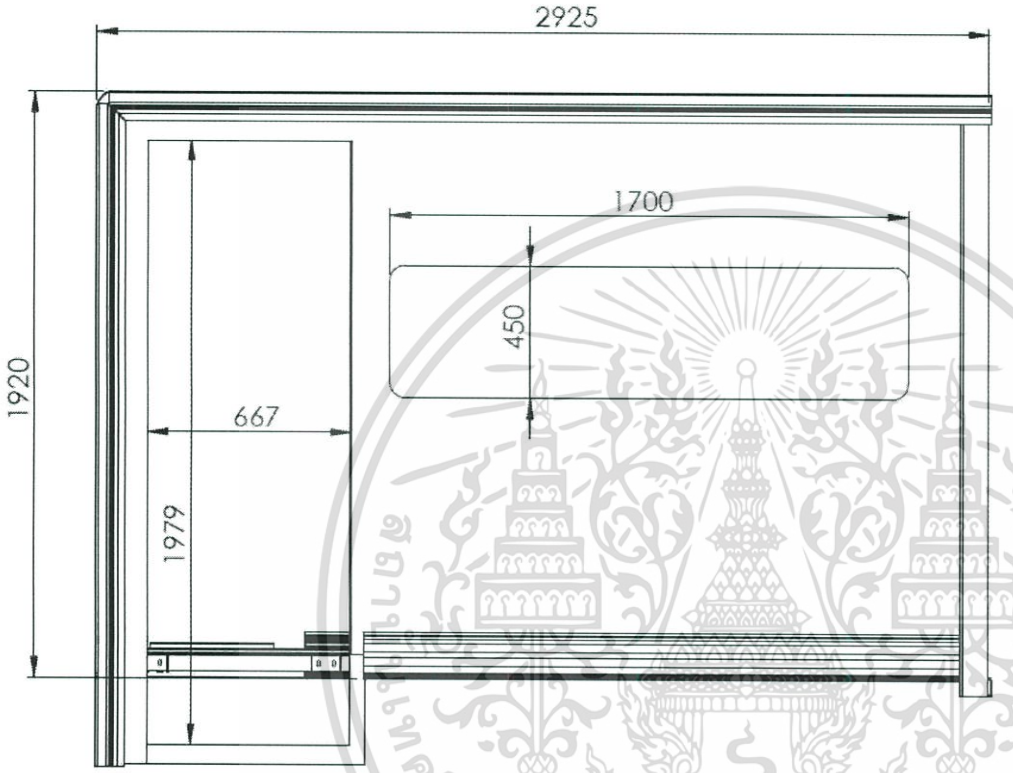
* กรุณาแจ้งค่า + กรณีมีค่ามาตรฐานของการผลิต/ระบุใน Drawing ที่ต้องปรากฏบนชิ้น Part อื่นๆ/หากมีการแก้ไขให้แจ้งและส่งให้ CARRYBOY APPROVE *

CARRYBOY
T.K.D. FIBER CO.,LTD.
888 LUANGPHAENG RD. LADKRABANG, BANGKOK 10520
TEL 360-7555(AUTOMATIC) FAX (662) 360-7551
บมจ.แบรนด์ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ บริษัท ที.เค.ดี.ไฟเบอร์ จำกัด
THE DESIGN & DETAILS ARE THE PROPERTY OF T.K.D. FIBER CO.,LTD
DO NOT REPRODUCE WITHOUT PERMISSION
ISO 9001 : 2008
www.carryboy.com e-mail:design@carryboy.com

MARK	REVISION	DATE
1		
2		
3		

C:\Users\USER\Desktop\ตู้จ่ายงานดิ่ง10G 17-05-61\ABL LT SL 10G

PART NUMBER หมายเลขชิ้นงาน		MANAGING DIRECTOR กรรมการผู้จัดการ	
DRAWING NUMBER	NO		
DRAWN BY	DATE 31-May-18	DESIGN MANAGER	DATE
DESIGNER	DATE	APPROVED	DATE



PROJECT โครงการ	
PART NAME ชื่อชิ้นงาน	ABL LT SL 10G
MATERIAL วัสดุ	
SURFACE พื้นผิว	
COLOR สี	
OVERALL SIZE ขนาด	
THICKNESS ความหนา	
WEIGHT น้ำหนัก	
QUANTITY จำนวนการใช้งาน	TOLERANCE + 1
VIEW	
UNIT หน่วย MM.	SCALE มาตราส่วน

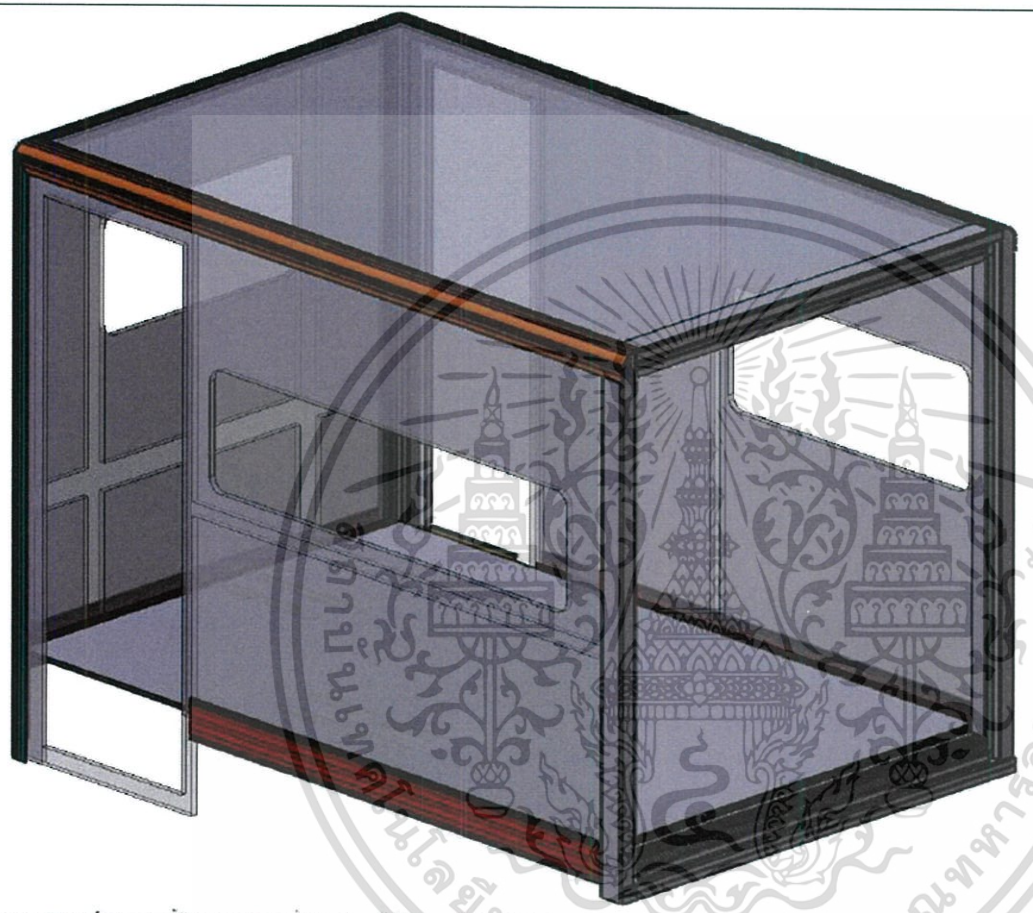
* กรุณาแจ้งค่า + กรณีมีค่ามาตรฐานของการผลิตระบุใน Drawing ที่ต้องประกอบกับ Part อื่นๆ ทางโรงงานมีการแก้ไขให้เป็นไปตามที่ CARRYBOY APPROVE *

CARRYBOY
T.K.D. FIBER CO.,LTD.
898 LUANGPHAENG RD., LADKRABANG, BANGKOK 10520
TEL 360-7566(AUTOMATIC) FAX (662) 360-7651
บริษัท ที.เค.ดี.ไฟเบอร์ จำกัด
THE DESIGN & DETAILS ARE THE PROPERTY OF T.K.D. FIBER CO.,LTD
DO NOT REPRODUCE WITHOUT PERMISSION
ISO 9001 : 2008
www.carryboy.com e-mail:design@carryboy.com

C:\Users\USER\Desktop\ผู้จำลองการที่ร10G 17-05-61\ABL LT SL 10G

MARK	REVISION	DATE
1		
2		
3		

PART NUMBER หมายเลขชิ้นงาน		MANAGING DIRECTOR กรรมการผู้จัดการ	
DRAWING NUMBER	NO		
DRAWN BY	DATE 31 May 18	DESIGN MANAGER	DATE
DESIGNER	DATE	APPROVED	DATE



PROJECT โครงการ	
PART NAME ชื่อชิ้นงาน	ABL LT SL 10G
MATERIAL วัสดุ	
SURFACE ที่นผิว	
COLOR สี	
OVERALL SIZE ขนาด	
THICKNESS ความหนา	
WEIGHT น้ำหนัก	
QUANTITY จำนวนการใช้งาน	TOLERANCE ± 1
VIEW	
UNIT หน่วย MM.	SCALE มาตราส่วน

* กรุณาแจ้งค่า + กรณีมีค่ามาตรฐานของการผลิต/ระยะใน Drawing นี้ต้องประกอบกับ Part อื่นๆ/หากมีการแก้ไขให้แจ้งและส่งให้ CARRYBOY APPROVE *

CARRYBOY
T.K.D. FIBER CO.,LTD.
888 LUANGPHAENG RD, LADKRABANG, BANGKOK 10520
TEL 360-7566(AUTOMATIC) FAX (662) 360-7561
ลูกแบบของผลิตภัณฑ์เป็นทรัพย์สินของ บริษัท ที.เค.ดี.ไฟเบอร์ จำกัด

THE DESIGN & DETAILS ARE THE PROPERTY OF T.K.D. FIBER CO.,LTD
DO NOT REPRODUCE WITHOUT PERMISSION

ISO 9001 : 2008
www.carryboy.com e-mail:design@carryboy.com

C:\Users\USER\Desktop\ตู้จำลองการดีไ10G 17 05 61\ABL LT SL 10G

MARK	REVISION	DATE
1		
2		
3		

PART NUMBER หมายเลขชิ้นงาน		MANAGING DIRECTOR กรรมการผู้จัดการ
DRAWING NUMBER	NO	
DRAWN BY	DATE 31-May-18	DESIGN MANAGER / DATE
DESIGNER	DATE	APPROVED / DATE

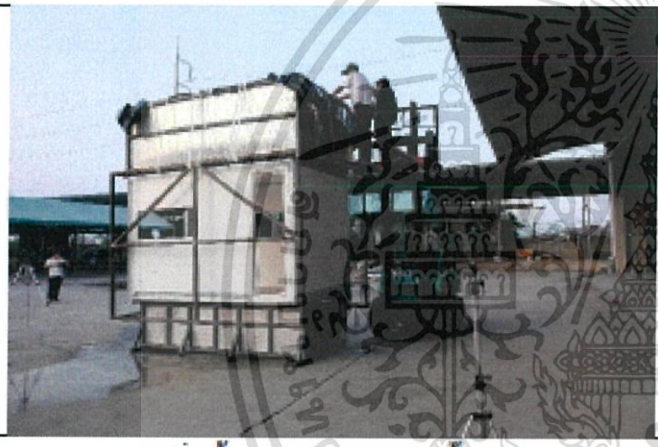
ภาคผนวก ข

การพลิกคว่ำของโครงสร้างห้องโดยสารรถพยาบาล ตามมาตรฐาน FMVSS 220 และ AMD 001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. การชั่งน้ำโครงสร้างแท่นกดหลังคาแบบเติมน้ำได้น้ำหนัก 500 กิโลกรัม

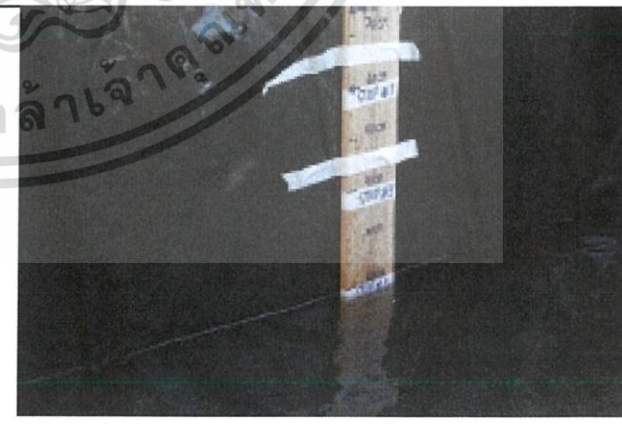
ข. การยกโครงสร้างแท่นกดหลังคาแบบเติมน้ำไปวางบนทับบนหลังคา



ค. การเพิ่มน้ำหนักโดยการเติมน้ำประปาเข้าไปในแท่นยกแท่นกดหลังคาแบบเติมน้ำ

ง. การเพิ่มน้ำหนักโดยการเติมน้ำประปาจากสายยางดับเพลิง

จ. การเติมน้ำเข้าไป 1 ลูกบาศก์เมตร



ฉ. เช็คระดับน้ำด้วยไม้วัดระดับน้ำโดยมีระดับน้ำเท่ากับ 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

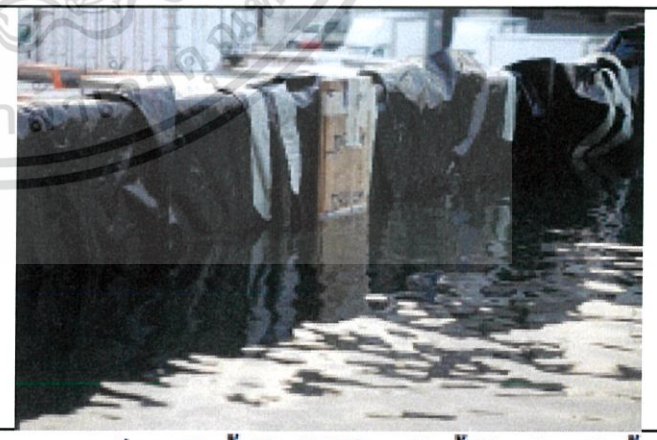
ช. การเติมน้ำเข้าไป 2 ลูกบาศก์เมตร

ช. เซ็ครระดับน้ำด้วยไม้วัดระดับน้ำโดยมีระดับน้ำเท่ากับ 40 เซนติเมตร

ฌ. การเติมน้ำเข้าไป 3 ลูกบาศก์เมตร

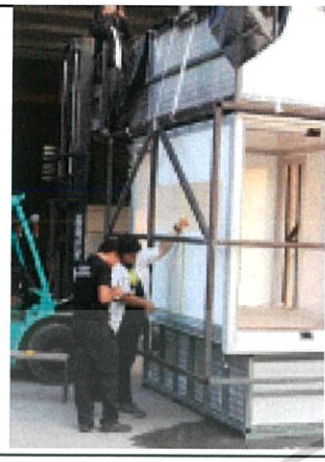
ญ. เซ็ครระดับน้ำด้วยไม้วัดระดับน้ำโดยมีระดับน้ำเท่ากับ 60 เซนติเมตร

ฎ. การเติมน้ำเข้าไป 4 ลูกบาศก์เมตร



ฏ. เซ็ครระดับน้ำด้วยไม้วัดระดับน้ำโดยมีระดับน้ำเท่ากับ 80 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

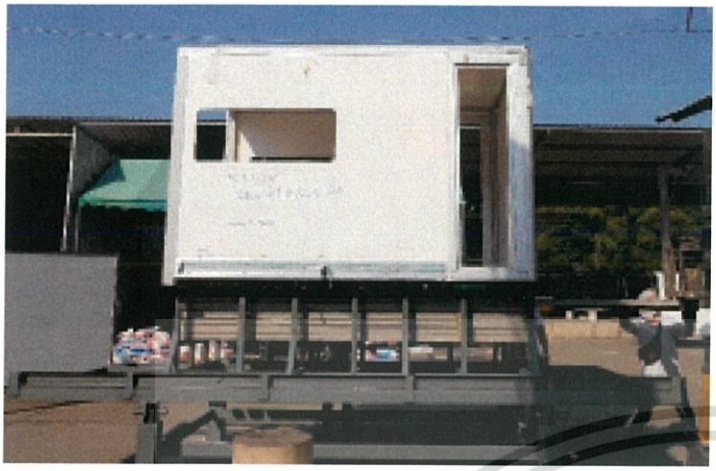
	
ฐ. การวัดระยะการเสียรูปของโครงในจุดที่กำหนด	ฌ. ปล่อยให้โครงสร้างรับน้ำหนัก 4,500 กิโลกรับไว้ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การพลิกคว่ำของโครงสร้างห้องโดยสารรถพยาบาลตามมาตรฐาน UN ECE R66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. โครงสร้างบนแท่นทดสอบ (ด้านซ้าย)

ข. โครงสร้างบนแท่นทดสอบ (ด้านหน้า)

ค. โครงสร้างบนแท่นทดสอบ (ด้านขวา)

ง. โครงสร้างบนแท่นทดสอบ (ด้านท้าย)

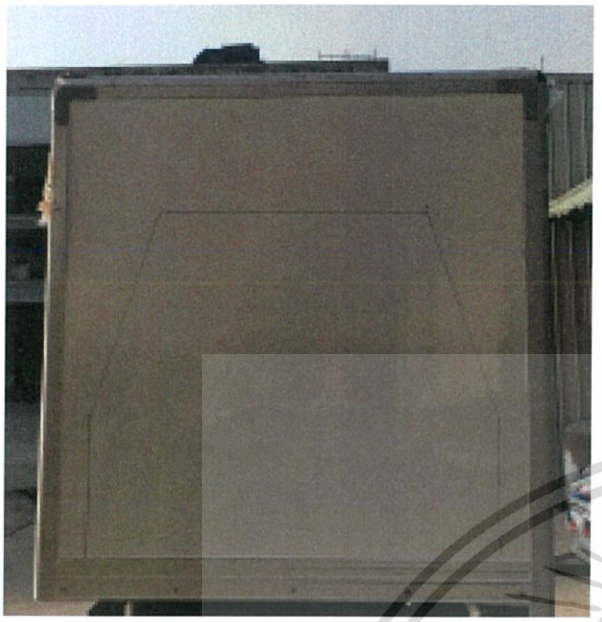
จ. โครงสร้างบนแท่นทดสอบ

ฉ. รถเครนสำหรับยกแท่นทดสอบ

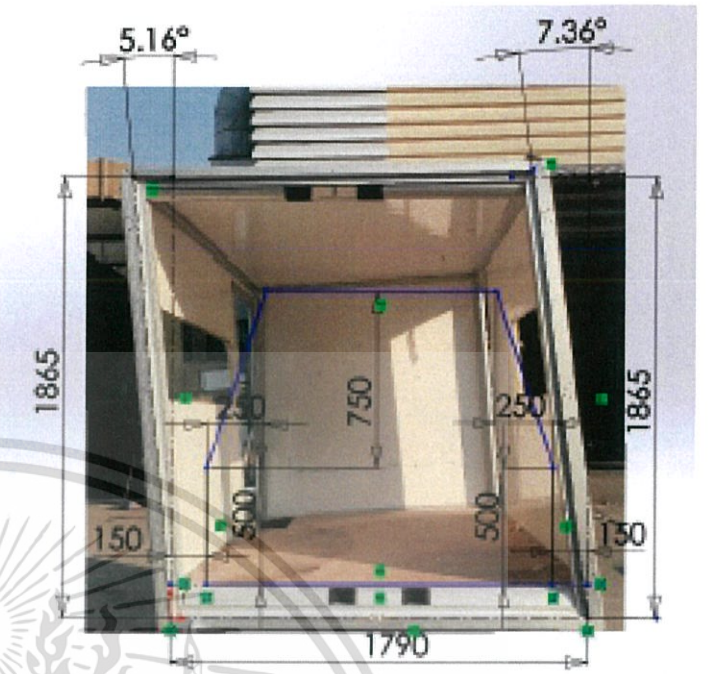
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน		ขั้นตอน	
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ความเสียหายของโครงสร้างเปรียบเทียบกับพื้นที่ปลอดภัยด้านหน้า



ข. ความเสียหายของโครงสร้างเปรียบเทียบกับพื้นที่ปลอดภัยด้านหลัง

ค. ความเสียหายหลังจากพลิกคว่ำ (ด้านท้าย)

ง. ความเสียหายหลังจากพลิกคว่ำ (มุมด้าน)

จ. ความเสียหายหลังจากพลิกคว่ำ (หลังคา)

ฉ. ความเสียหายหลังจากพลิกคว่ำ (ข้างซ้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้