

การออกแบบและการผลิตโครงสร้างรถแข่งแบบโมโนคอคจากคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับรถแข่ง  
สูตรนักศึกษา

Design and Manufacturing of Carbon Fiber Composite Monocoque Chassis  
for Formula Student Car



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Manufacturing of Carbon Fiber Composite Monocoque Chassis  
for Formula Student Car



MR.Jakkarin Piwdang  
MR.Narawit Khlairit  
MR.Wiriyapong Boonrawd

THIS THESIS IS 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  
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและการผลิตโครงสร้างรถแข่งแบบโมโนคอคจากคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับรถแข่งสูตร  
นักศึกษา  
Design and Manufacturing of Carbon Fiber Composite Monocoque Chassis for  
Formula Student Car

ผู้จัดทำ

- |    |               |           |              |          |
|----|---------------|-----------|--------------|----------|
| 1. | นายจักริน     | ผิวแดง    | รหัสประจำตัว | 61010131 |
| 2. | นายนราวิชญ์   | คล้ายฤทธิ | รหัสประจำตัว | 61010555 |
| 3. | นายวิริยะพงษ์ | บุญรอด    | รหัสประจำตัว | 61010981 |



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์  
(ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและการผลิตโครงรถแข่งแบบโมโนคอคจากคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

นายจักริน	ผิวแดง	61010131
นายนราวิชญ์	คล้ายฤทธิ	61010555
นายวิริยะพงษ์	บุญรอด	61010981
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2564

## บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโครงสร้างรถ Formula Student โดยการออกแบบนั้นสร้างขึ้นในรูปแบบ Monocoque ที่ทำจากเส้นใยคาร์บอน ซึ่งก่อนหน้านี้ทีม Initial Formula Racing ได้เคยมีการสร้าง Monocoque มาก่อนหน้านี้ โดยโครงการนี้จะทำการปรับปรุงรูปแบบการวางผ้าและกรรมวิธีการผลิต โดยความแข็งแรงและน้ำหนักให้ดีกว่าเดิม โดยก่อนหน้านี้ทางทีมได้ใช้การวางผ้าแบบ 8/8 ทั้งคัน ทำให้ไม่ได้ใช้ข้อได้เปรียบจากการที่บางพื้นที่ของโครงรถไม่ได้มีกฎรองรับ ในการปรับปรุงการวางผ้าจึงได้ใช้การวางผ้าแบบ 6/6 และ 10/10 ในส่วนที่มีกฎรองรับ และบริเวณอื่น ๆ จะใช้การวางผ้าแบบ 3/3 โดยการออกแบบทั้งหมดจะอิงตามกฎและกติกาของ FSAE 2022 และการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดย ANSYS จากนั้นทำการทดสอบแผ่น Laminate โดยวิธีการตัดงอ 3 จุด เพื่อเทียบค่า Flexural Rigidity กับเหล็ก Baseline และนำค่าจากการทดสอบไปใส่ SES เพื่อเทียบความการวางผ้าแต่ละแบบของแต่ละส่วนให้เป็นไปตามกฎ จากนั้นทำการวิเคราะห์ Torsional Stiffness ของโมโนคอคด้วย ANSYS โดยได้ค่าที่ 3367 Nm/deg และจัดสร้างโมโนคอคตามรูปแบบการวางผ้าที่ผ่าน SES และจัดสร้างโดยใช้ Aluminum Mold เพื่อเป็นการปรับปรุงรูปแบบการผลิตให้ลดจำนวนแรงงานและราคาลง โดยน้ำหนักโมโนคอคเมื่อเสร็จแล้วอยู่ที่ 14.3 kg และเมื่อรวมกับโครงเหล็กด้านหลังจะอยู่ที่ 27.3 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและผลิตโครงรถแข่งสูตรนักศึกษาจากคาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต

นายจักริน	ผิวแดง	61010131
นายนราวิชญ์	คล้ายฤทธิ	61010555
นายวิริยะพงษ์	บุญรอด	61010981
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2564

## ABSTRACT

The goal of this project is to design and develop a chassis for a Formula Student car. The design chassis was built by carbon fiber composite. The Initial Formula Racing Team had previously built a monocoque chassis. This project is designed to improve the schedule of the fabric plies and the manufacturing process to archive the desired strength and weight better than before. Previously, the team had used an 8/8 ply schedule throughout the monocoque chassis, which had the disadvantage that some areas of the chassis had no rules to support them. To improve ply schedule, 6/6 and 10/10 ply fabrics were used in sections supported by the rules, while 3/3 ply fabrics were used in other areas. All designs were based on the FSAE 2022 rules and strength analysis using the ANSYS finite element method. The laminate panel was tested using the 3-point bending method to compare the bending stiffness with that of baseline steel, and the data from the test was collected in SES to compare the ply orientation of each type of each part according to the rules. The torsional stiffness of the monocoque was then analyzed using ANSYS at 3367 Nm/deg, and the monocoque was fabricated according to the SES ply schedule and using aluminum mold to improve the ply schedule. This reduces the number of plies and lowers the price. The finished weight of the monocoque is 14.3 kg and 27.3 kg when combined with the rear space frame.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการช่วยเหลือให้คำแนะนำและปรึกษาจาก ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ทางคณะผู้ศึกษารู้สึกขอบซึ่งในความอนุเคราะห์

ขอขอบคุณบุคลากรจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา พี่เจี๊ยบ ผู้ดูแลสถานที่ใช้อุปกรณ์ที่ให้คำแนะนำและปรึกษาในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับทดสอบวัสดุ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบวัสดุ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบคุณบริษัท P1 Composites ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการขึ้นรูปชิ้นงานของจริง

ขอบคุณไปยังสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มอบบสนับสนุนในการซื้อวัสดุและอุปกรณ์สำหรับทำวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักเคารพยิ่ง ตลอดจนเป็นอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ต้องขอขอบคุณนายบุญเอื้อม บุนรอด,นางนิภา บุนรอด,นายนิติธร ผิวแดง,นางกรองแก้ว ผิวแดง,นางพัชรินทร์ คล้ายฤทธิ์,นายวรวิช คล้ายฤทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญภาพ(ต่อ)	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษา	2
บทที่ 2 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ประเภทของโครงสร้าง	3
2.2.1 โครงสร้างแบบโครงเหล็ก	3
2.2.2 โครงสร้างแบบโมโนคอค	4
2.2.3 โครงสร้างแบบผสม	4
2.3 กติกาของ <i>Formula Student</i>	5
2.3.1 กติกาต้านโครงสร้าง	5
2.3.2 กติกาต้านอื่นๆ	7
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.4.1 วัสดุเชิงประกอบ	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.4.2 โครงสร้างแกนด्वิช	10
2.4.3 ผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ Prepreg	11
2.4.4 แกนรังผึ้งอลูมิเนียม	11
2.4.5 ระเบียบวิธี SES	12
2.4.6 ทฤษฎีคานสำหรับแผ่นแกนด्वิช	14
2.4.7 รูปแบบความเสียหาย	16
บทที่ 3 การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบเหล็ก Baseline	18
3.1 บทนำ	18
3.2 รูปแบบการทดสอบตามกติกา FSAE	18
3.3 การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด	19
3.3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด	19
3.3.2 ACP(Pre)	19
3.3.3 Mechanical Model	22
3.3.4 Static Structural	23
3.3.5 ACP(Post)	24
3.3 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุดของเหล็ก Baseline	27
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการทดสอบ	30
4.1 เตรียมชิ้นงาน	30
4.2 การทดสอบชิ้นงาน	34
4.2.1 3-Point Bending	34
4.2.2 3-Perimeter Shear	36
4.2.3 3-Pull Out	37
4.3 SES Submit	38
4.3.1 SES ของรูปแบบการวางผ้า 3/c/3	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

4.3.2 SES ของรูปแบบการวางผ้า 6/c/6	40
4.3.3 SES ของรูปแบบการวางผ้า 10/c/10	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	42
5.1 บทนำ	42
5.2 <i>Final Layup Schedule</i>	42
5.3 <i>Torsional Stiffness</i>	42
5.4 การสร้าง <i>Mold</i>	43
5.5 การคำนวณปริมาณของผ้า	44
บทที่ 6 กรรมวิธีการผลิตและสรุปผล	45
6.1 กรรมวิธีการผลิต	45
6.2 อุปกรณ์ที่ต้องใช้	45
6.3 การผลิตชิ้นงาน	46
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	53
7.1 สรุปผลการทดลอง	54
7.2 ปัญหาที่พบเจอ	54
7.3 ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม	56

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆของโครงรถและจำนวนเหล็กที่แทนที่	6
ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนต่างๆของตัวรถและค่า Flexural Rigidity	7ตาราง
ที่ 4.1 แสดงจำนวนชิ้นงานที่ต้องการสร้างเพื่อทดสอบ	30
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงจากการทดสอบและจาก Ansys ของ 3/c/3	44
ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบแรงจากการทดสอบและจาก Ansys ของ 6/c/6	44
ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบแรงจากการทดสอบและจาก Ansys ของ 10/c/10	45 ตารางที่ 7.1
แสดงรูปแบบการวางผ้าในแต่ละโครงสร้าง	53



## สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	โครงสร้างแบบโครงเหล็กของ Technical University of Berlin		3ภาพที่
2.2	โครงสร้างแบบโมโนคอคของ Cornell Racing	4	
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างแบบผสมของ NUS Formula SAE		4
ภาพที่ 2.4	โครงสร้างหลักของ KF19		5
ภาพที่ 2.5	แสดงประเภทของเหล็กที่อนุญาตให้ใช้ในโครงสร้างหลัก		6
ภาพที่ 2.6	แสดงคุณสมบัติของเหล็กพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ		7
ภาพที่ 2.7	แสดง Cockpit opening template และ Cockpit internal cross section		8
ภาพที่ 2.8	แสดงรูปแบบขนาดของ Percy		8
ภาพที่ 2.9	แสดงรูปแบบของการเสริมวัสดุ		9
ภาพที่ 2.10	แสดงการจัดเรียงผ้าแบบ 0/-45/+90/45/0		10
ภาพที่ 2.11	โครงสร้างแซนด์วิช		11
ภาพที่ 2.12	แสดงผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ Prepreg		11
ภาพที่ 2.13	แสดงแผ่นรังผึ้งอลูมิเนียมตอนคลี้ออกแล้ว		12
ภาพที่ 2.14	แสดงรูปการรบกวนขนาดของแผ่นแซนด์วิช		14
ภาพที่ 2.15	แสดงความเสียหายแบบ Skin Compression Failure		16ภาพที่
2.16	แสดงความเสียหายแบบ Intra Cell Buckling	16ภาพที่	3.1
วิธีการทดสอบ		18ภาพที่	3.2 แสดง
ผังระบบงานของการทดสอบการติดตั้งแบบ 3 จุดใน ANSYS		18	
ภาพที่ 3.3	แสดงหน้าของ ACP(Pre)		18
ภาพที่ 3.4	แสดงหน้าต่างของช่อง Engineering Data		19
ภาพที่ 3.5	แสดงหน้าต่างของช่อง Geometry		19
ภาพที่ 3.6	แสดงหน้าต่างของช่อง Model		20
ภาพที่ 3.7	แสดงหน้าต่างของช่อง Setup		20
ภาพที่ 3.8	แสดงหน้าการจัดวางผ้าแบบ +45/-45		21ภาพที่
3.9	แสดงหน้าหน้าต่างของ Mechanical Model		22
ภาพที่ 3.10	แสดงหน้าหน้าต่างช่อง Model ใน Mechanical Model		23
ภาพที่ 3.11	แสดงหน้าหน้าต่างของ Static Structural		23
ภาพที่ 3.12	แสดงหน้าการตั้งค่าใน Static Structural		24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ 3.13	แสดงผลของความเครียด	24
ภาพที่ 3.14	แสดงหน้าหน้าต่างของ ACP(Post)	24
ภาพที่ 3.15	แสดงหลักเกณฑ์ความเสียหายที่ถูกใช้วิเคราะห์	25
ภาพที่ 3.16	แสดงความเสียหายของผ้าชั้นแรกด้านบน	25
ภาพที่ 3.17	แสดงความเสียหายของชั้น Honeycomb	26
ภาพที่ 3.18	แสดงความเสียหายของผ้าชั้นแรกด้านล่าง	26
ภาพที่ 3.19	แสดงการเปรียบเทียบแรงสูงสุดกับจำนวนชั้นผ้า	27
ภาพที่ 3.20	แสดงการทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	28
ภาพที่ 3.21	แสดงเหล็ก Baseline 2 ท่อนหลังจากถูกกด	28
ภาพที่ 3.22	แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัด	29
ภาพที่ 3.23	แสดงหน้าต่าง SES ของการทดสอบเหล็ก Baseline	30
ภาพที่ 4.1	แสดงการเตรียม Carbon Fiber Prepreg	31
ภาพที่ 4.2	แสดงการเตรียม Aluminum Honeycomb	31
ภาพที่ 4.3	แสดงการเรียงชิ้นงานบนแผ่นอลูมิเนียม	32
ภาพที่ 4.4	แสดงชิ้นงานในโครงเหล็ก	32
ภาพที่ 4.5	อุปกรณ์ในการทำ Bagging	33
ภาพที่ 4.6	แสดงการหุ้ม Release Film	33
ภาพที่ 4.7	แสดงการห่อชิ้นงานด้วย Bleeder Fabric	33
ภาพที่ 4.8	แสดงการนำชิ้นงานเข้าไปใน Bagging Film	34
ภาพที่ 4.9	แสดงการนำชิ้นงานเข้าตู้อบ	34
ภาพที่ 4.10	แสดงการแกะชิ้นงานทดสอบออกจากแม่พิมพ์	35
ภาพที่ 4.11	แสดงการทดสอบ 3-Point Bending	35
ภาพที่ 4.12	แสดงชิ้นงานเสียหาย	36
ภาพที่ 4.13	แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัดของการทดสอบ 3-Point Bending	36
ภาพที่ 4.14	แสดงการทดสอบ Perimeter Shear	37
ภาพที่ 4.15	แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัดของการทดสอบ Perimeter Shear	37
ภาพที่ 4.16	แสดงการจัดชิ้นงานในการทดสอบ Pull Out	38
ภาพที่ 4.17	แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัดของการทดสอบ Pull Out	38
ภาพที่ 4.18	แสดง SES ของ 3-Point Bending ของ 3/c/3	39
ภาพที่ 4.19	แสดง SES ของ Perimeter Shear ของ 3/c/3	39
ภาพที่ 4.20	แสดง SES ของ 3-Point Bending ของ 6/c/6	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ 4.21	แสดง SES ของ Perimeter Shear ของ 6/c/6	40
ภาพที่ 4.22	แสดง SES ของ 3-Point Bending ของ 10/c/10	41
ภาพที่ 4.23	แสดง SES ของ Perimeter Shear ของ 10/c/10	41
ภาพที่ 5.1	แสดง Layup Schedule	42
ภาพที่ 5.2	แสดง Condition ในแบบจำลองของ Ansys	42
ภาพที่ 5.3	แสดงผลลัพธ์การจำลองแบบ Deformation	43
ภาพที่ 5.4	แสดง Compliance ตามยาวของ Monocoque	43
ภาพที่ 5.5	แสดงการเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้าง Mold ของ Traditional Mold	45
ภาพที่ 5.6	แสดง Nesting ของผ้าใน Deepnest	45ภาพที่
5.7	แสดง CAD ของ Aluminum Mold	45
ภาพที่ 6.1	แสดงขั้นตอนในการผลิตชิ้นงาน	46
ภาพที่ 6.2	แสดงการทำให้ Carbon Fiber Prepreg เรียบ	47
ภาพที่ 6.3	แสดงการติด Release Film	48
ภาพที่ 6.4	แสดงการติด Breather Cloth	48
ภาพที่ 6.5	แสดงการบรรจุชิ้นงานลงใน Vacuum Bag	48
ภาพที่ 6.6	แสดงวิธีการเช็ครั่ว Vacuum Bag	49
ภาพที่ 6.7	แสดงการนำชิ้นงานเข้าอบใน Autoclave	49
ภาพที่ 6.8	แสดงการ Aluminum Honeycomb ลงบนชิ้นงาน	50
ภาพที่ 6.9	แสดงการวาง Carbon Fiber Prepreg ชั้นใน	50
ภาพที่ 6.10	แสดงการวาง Release Film	52
ภาพที่ 6.11	แสดงการวาง Breather Cloth	52
ภาพที่ 6.12	แสดงการบรรจุชิ้นงานลงใน Vacuum Bag	52
ภาพที่ 6.13	แสดงการดูอากาศออกจาก Vacuum Bag	53
ภาพที่ 6.14	แสดงการนำชิ้นงานเข้าอบใน Autoclave	53
ภาพที่ 6.15	แสดงการนำชิ้นงานออกจาก Vacuum Bag	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การแข่งขัน Formula Student ในประเทศไทยเป็นรถแข่งที่ถูกสร้างโดยทีมนักศึกษาที่ถูกพัฒนาและออกแบบ ตามกติกาการแข่งขันสากล โดยแต่ละทีมของแต่ละสถาบันทั่วประเทศไทย จะสร้างรถเพื่อเข้าร่วมแข่งขัน (FSAE) ในทุกๆปี ทีมที่ชนะเลิศจะได้เป็นตัวแทนประเทศไทยเพื่อไปในต่างประเทศ ซึ่งแต่ละทีมนั้นแข่งขันเพื่อที่ต้องการเอารางวัลชนะเลิศ เพื่อที่จะแข่งขันและศึกษาเทคโนโลยีและการออกแบบในรถทีมต่างประเทศ ซึ่งเป้าหมายหลักในการสร้างรถแข่งสำหรับนักศึกษานั้นต้องมีคุณสมบัติตามที่ต้องการในด้านวิศวกรรม เพื่อให้รถมีประสิทธิภาพและขับได้เร็วมากที่สุดเช่น การลดน้ำหนักรถ การ Aerodynamics ที่ดี รถมีความคงทนตลอดการแข่งขัน มีความปลอดภัยตามกติกา เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้เราจึงศึกษาค้นคว้าและพัฒนารถแข่งด้วย Monocoque ซึ่งเป็นการต่อยอดจากรุ่นก่อนหน้า ผู้ศึกษาจึงมุ่งเน้นที่ปัญหาจากระยะเวลาในการขึ้นชิ้นงาน ความแข็งแรงในจุดยึดต่างๆ และจำนวนผ้าคาร์บอนที่ใช้ขึ้นชิ้นงาน เพื่อประหยัดงบประมาณและเวลาในการสร้าง Monocoque โดยจะมีการศึกษากรรมวิธีการขึ้นรูปแบบใหม่ รวมถึงศึกษาการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดระยะเวลาในการขึ้นรูป รวมถึงการจำลองรูปแบบการทดสอบความแข็งแรงด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามที่ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้าง Monocoque ซึ่งเป็นเป็นการสร้างโดยการใช้เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เป็นโครงสร้างแบบแซนด์วิช และทดสอบความแข็งแรงจริงโดยการทดสอบแบบ Three Point Bending เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้ศึกษาจึงมีความคิดที่จะศึกษาและพัฒนารถแข่งด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ เพื่อลดระยะเวลาในการสร้างและลดค่าใช้จ่ายในการสร้าง รวมถึงปรับปรุงรูปแบบการวางผ้า เพื่อลดน้ำหนักแต่ยังคงความแข็งแรงที่มากกว่าเดิม

### 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. ออกแบบและสร้าง Monocoque จาก Carbon Fiber เพื่อเข้าแข่งขัน TSAE
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างแซนด์วิช เพื่อให้มีความแข็งแรงและเบาเพื่อให้ได้ Torsion Stiffness ที่เหมาะสม
3. เพื่อเทียบความแข็งแรงระหว่างผล Simulation กับชิ้นงานจริง
4. ลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการผลิตเมื่อเทียบกับรถรุ่นก่อนหน้า
5. ปรับปรุงการวางผ้าให้เหมาะสมมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในปฏิญานิพนธ์นี้มีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาหาข้อมูลของรถแข่งและทำการออกแบบโครงสร้างของรถแข่งให้ถูกต้องตามหลักกลศาสตร์ทางวิศวกรรมและตรวจสอบความถูกต้องตามกติกา FSAE
- 1.3.2 ศึกษาความแข็งแรงของการวางผังรูปแบบต่างๆ และวิเคราะห์โดยใช้ Finite Element Method
- 1.3.3 ทดสอบวัสดุด้วยการทดสอบแบบ Three Point Bending เพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์แบบ Finite Element Method ตามรูปแบบของ FSAE
- 1.3.4 ลงมือสร้างตามที่ได้ออกแบบตามกฎกติกาการแข่งขัน FSAE 2022

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในปฏิญานิพนธ์นี้มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากทีมต่างประเทศที่มีการออกแบบคล้ายกันที่สร้างจากคาร์บอนไฟเบอร์และรังผึ้ง อลูมิเนียม รวมถึงปรับปรุงรูปแบบการสร้างและวิธีการผลิต
- 1.4.2 สร้างแบบจำลองใน Fusion 360 และ Catia V5
- 1.4.3 ทดสอบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นผ่านการทดสอบด้วยวิธี Finite Element Method โดยโปรแกรม Ansys
- 1.4.4 ทดสอบการตัดงอแบบ 3 จุดของเหล็ก Baseline และแผ่น Laminate

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษา

ในปฏิญานิพนธ์เป็นการออกแบบและทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างแบบ Monocoque คาดว่าจะได้ประโยชน์ดังนี้

- 1.5.1 โครงสร้างแบบ Monocoque มีน้ำหนักเบามากกว่า Steel Frame
- 1.5.2 มีความแข็งแรงเทียบเท่าหรือมากกว่าเหล็ก
- 1.5.3 ปรับปรุงการวางผังในการสร้างให้ใช้ปริมาณวัสดุน้อยลงจากแบบเดิม

## บทที่ 2

# เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

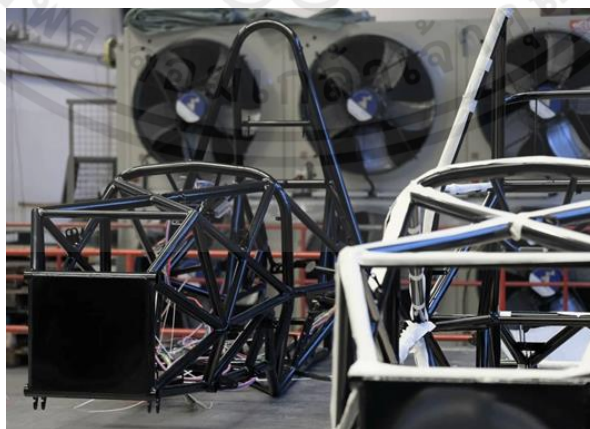
คาร์บอนไฟเบอร์เสริมแรงด้วยโพลีเมอร์ หากถูกใช้งานและผลิตอย่างถูกต้อง จะมีคุณสมบัติทางกลสูงกว่า เหล็กกล้าหรือโลหะอื่นๆ ตามกฎและกติกาของ Formula SAE ในการจัดสร้างโครงสร้างรถจากวัสดุผสม ผู้สร้าง จะต้องทำการจัดสร้างและทดสอบวัสดุในการสร้างโครงรถในแต่ละส่วน เอกสารและผลการทดลองนี้จะต้องถูก กรอกลงใน Excel ที่ถูกสร้างขึ้นจากผู้จัดการแข่งขัน ที่ชื่อ Structural Equivalence Sheet (SES) ในเอกสารนี้ จะ มีการคำนวณของวัสดุที่ใช้สร้างรถมาเทียบกับเหล็กที่ถูกแทนที่ในด้านของตัวแปร 6 ตัวที่จะกล่าวในบทที่ 2.4.5 เพื่อให้ SES ถูกต้องและผ่านแต่ละส่วนของโครงสร้างรถจะต้องแข็งแรงกว่าเหล็กพื้นฐาน

### 2.2 ประเภทของโครงสร้าง

โครงสร้างของรถนั้นจุดประสงค์หลักคือเพื่อรักษาความปลอดภัยกับผู้ขับ รวมทั้งเป็นจุดรวมของทุกส่วน ภายในรถเข้าด้วยกัน จุดประสงค์รองลงมาคือเพื่อเป็นตัวถ่ายแรงจากส่วนต่างๆของรถ โดยใน Formula Student มีโครงสร้างหลักๆที่ให้ได้อยู่ 3 แบบ คือ

#### 2.2.1 โครงสร้างแบบโครงเหล็ก

โครงสร้างแบบโครงเหล็กคือโครงสร้างที่นิยมใช้มากที่สุดใน Formula Student โดยเป็นโครงสร้างที่ทำ มาจากโครงเหล็กถักและเชื่อมด้วยกัน โดยโครงสร้างรูปแบบนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ถูกลง โดยเหล็กที่ใช้สร้างเป็นได้ทั้งเหล็กท่อและเหล็กกล่อง



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแบบโครงเหล็กของ Technical University of Berlin [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 โครงสร้างแบบโมโนคอค

คำว่า monocoque คือคำที่มาจากภาษาฝรั่งเศส ซึ่งแปลเป็นภาษาอังกฤษได้ว่า single shell ซึ่งในภาษาไทยแปลว่า เป็นเปลือกเดียว โดยโมโนคอคเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผิวนอกของโครงสร้างเป็นตัวรับแรง



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างแบบโมโนคอคของ Cornell Racing [2]

### 2.2.3 โครงสร้างแบบผสม

เป็นโครงสร้างที่ผสมระหว่างโครงเหล็กและโครงโมโนคอคเข้าด้วยกัน โดยเป็นโครงสร้างแบบโมโนคอคด้านหน้า ส่วนด้านหลังจะเป็นแบบโครงเหล็ก



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างแบบผสมของ NUS Formula SAE [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

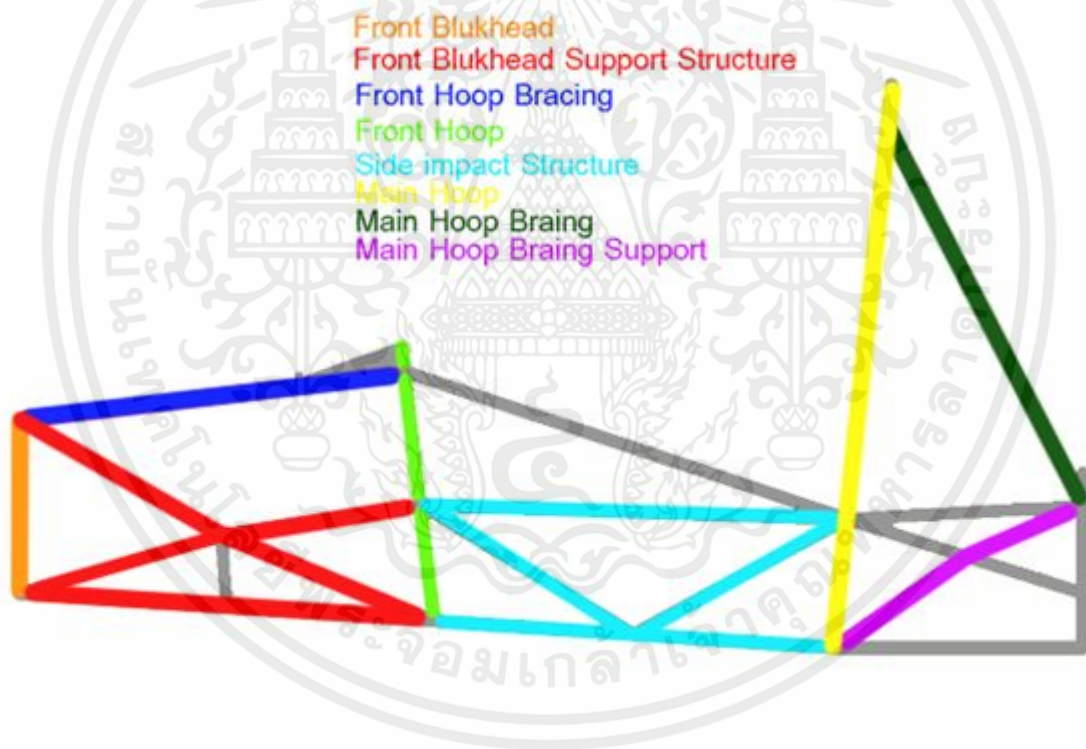
## 2.3 กติกาของ Formula Student

ในการแข่งขัน Formula Student ทั่วโลกจะใช้กฎและกติกาซึ่งออกโดย Formula SAE นอกจากการแข่งขันที่เยอรมัน ซึ่งจะมีกฎของตัวเอง โดยในการแข่งขันแต่ละประเทศก็อาจจะมีกฎ Local Rule ตามประเทศนั้นๆแยกย่อยไปอีก โดยในไทยเราสามารถใช้กฎและกติกาตาม Formula SAE ยึดเป็นกฎหลัก

โดยในกฎกล่าวว่า โครงสร้างที่ทำมาจากวัสดุผสม จะต้องแข็งแรงมากกว่าหรือเทียบเท่าโครงสร้างที่ทำมาจากเหล็กพื้นฐาน ซึ่งเป็นเหตุผลมาจากทางด้านความปลอดภัย

### 2.3.1 กติกาโครงสร้าง

โครงเหล็กที่ถูกสร้างมาจากเหล็กพื้นฐานนั้นไม่ต้องถูกคำนวณเพื่อพิสูจน์ความแข็งแรง トラบใดที่โครงสร้างนั้นถูกต้องแบบตามกฎของการแข่งขัน เช่น ขนาดท่อ ตำแหน่ง โดยโครงเหล็กตามกฎจะมีต้องมีโครงสร้างหลัก (Primary Structure) ดังนี้



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างหลักของ KF19

โดยถ้าหากโครงสร้างทำมาจากวัสดุผสม ตัวโครงสร้างบริเวณนั้นจะต้องมีความแข็งแรงเทียบเท่าหรือมากกว่าเหล็กพื้นฐานของบริเวณที่ถูกแทนที่ ตามตารางด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rule/requirement/car location		Type	Performance requirement	
			Property	Value
Vertical Side Impact Structure	Side impact zone	Bending	Flexural Rigidity	3 baseline steel tubes
		Bending	Energy absorption	2 baseline steel tubes
		Puncture	Minimum shear force	7.5 kN
Horizontal Side Impact Structure	Floor	Bending	Flexural Rigidity	1 baseline steel tubes
Front Bulkhead	Support	Bending	Flexural Rigidity	1 baseline steel tubes
		Puncture	Perimeter shear strenght	>4 kN
	Bulkhead	Bending	Buckling modulus	6 baseline steel tubes
Monocoque attachments	Primary structure	Attachments	Maximum force	>30 kN
	Impact attenuator	Attachments	Maximum force	8mm bolts (X4)
Driver harness attachments	Shoulder belt	Attachments	Maximum force	13 kN
	Lap belts	Attachments	Maximum force	13 kN
	Anti-submarine belts	Attachments	Maximum force	6.5 kN
	Lap + anti-submarine	Attachments	Maximum force	19.5 kN

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆของโครงรถและจำนวนเหล็กที่แทนที่

โดยเหล็กที่อนุญาตให้ใช้ได้โครงสรางหลักจะมีดังนี้

#### F.3.4.1 Minimum Requirements for Steel Tubing

A tube must meet all four minimum requirements for each Size specified:

Tube	Minimum Area Moment of Inertia	Minimum Cross Sectional Area	Minimum Outside Diameter or Square Width	Minimum Wall Thickness	Example Sizes of Round Tube
a. Size A	11320 mm <sup>4</sup>	173 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	2.0 mm	1.0" x 0.095" 25 x 2.5 mm
b. Size B	8509 mm <sup>4</sup>	114 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.065" 25.4 x 1.6 mm
c. Size C	6695 mm <sup>4</sup>	91 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.049" 25.4 x 1.2 mm
d. Size D	18015 mm <sup>4</sup>	126 mm <sup>2</sup>	35.0 mm	1.2 mm	1.375" x 0.049" 35 x 1.2 mm

A tube which is both the Minimum Diameter and the Minimum Wall Thickness may NOT meet the Moment of Inertia and Cross Sectional Area Requirements

ภาพที่ 2.5 แสดงประเภทของเหล็กที่อนุญาตให้ใช้ในโครงสรางหลัก [4]

ซึ่งจะกฎจะระบุคุณสมบัติทางกลของเหล็กพื้นฐานในการคำนวณตามข้อมูลด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### F.3.4.2 Properties for ANY steel material for calculations submitted in an SES must be:

#### a. Non Welded Properties for continuous material calculations:

Young's Modulus (E) = 200 GPa (29,000 ksi)

Yield Strength (Sy) = 305 MPa (44.2 ksi)

Ultimate Strength (Su) = 365 MPa (52.9 ksi)

#### b. Welded Properties for discontinuous material such as joint calculations:

Yield Strength (Sy) = 180 MPa (26 ksi)

Ultimate Strength (Su) = 300 MPa (43.5 ksi)

### ภาพที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของเหล็กพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ [4]

ซึ่งเมื่อนำคุณสมบัติและขนาดของเหล็กพื้นฐานมาคำนวณหา Flexural Rigidity ของส่วนต่างๆที่ถูกที่แทนด้วยวัสดุผสมจะได้ค่าตามตารางนี้

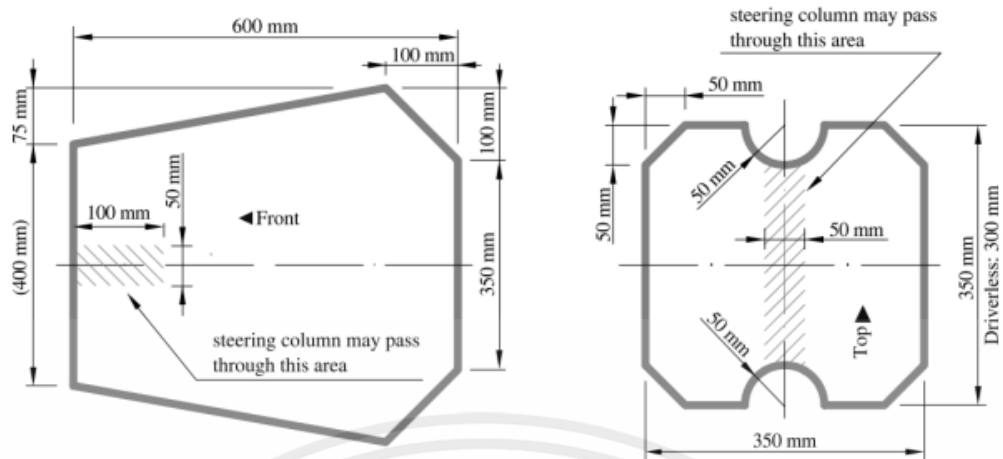
Chassis section	Requirement	Flexural Rigidity
Horizontal Side Impact	Flexural Rigidity = 1	Size B baseline steel tubes = 1.7018 kPa*m <sup>4</sup>
Vertical Side Impact	Flexural Rigidity = 2	Size B baseline steel tubes = 3.4036 kPa*m <sup>4</sup>
Front Bulkhead	Flexural Rigidity = 2	Size B baseline steel tubes = 3.4036 kPa*m <sup>4</sup>
Vertical Front Bulkhead Support	Flexural Rigidity = 1	Size C baseline steel tubes = 1.3390 kPa*m <sup>4</sup>
Front Bulkhead one side	Flexural Rigidity = 3	Size B baseline steel tubes = 5.1054 kPa*m <sup>4</sup>

### ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนต่างๆของตัวรถและค่า Flexural Rigidity

#### 2.3.2 กติกาอื่นๆ

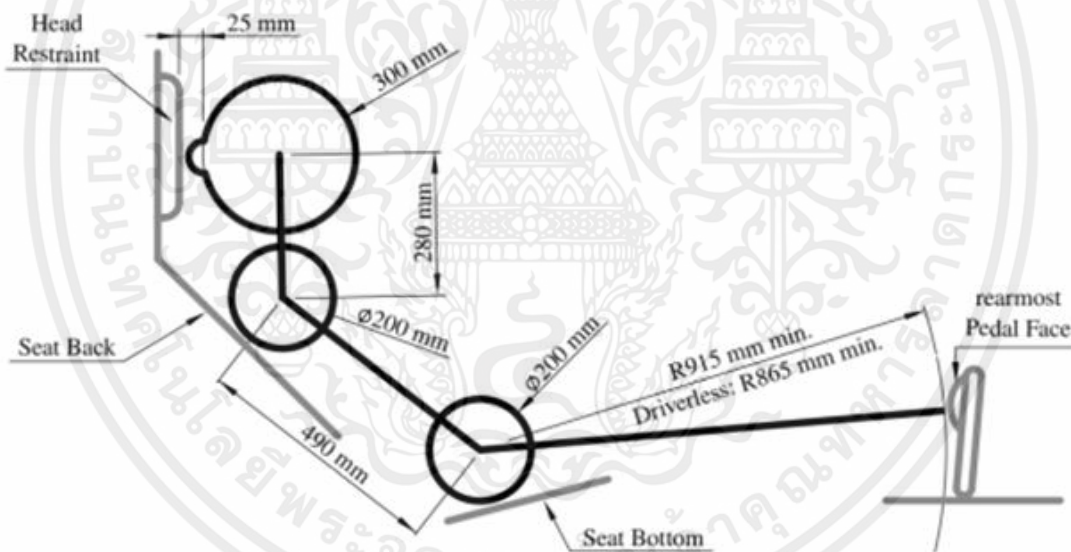
นอกเหนือจากกติกาด้านโครงสร้างแล้ว ยังมีกติกาด้านพื้นที่ภายในห้องคนขับด้วย อีกทั้งยังมีกติกาว่ารถจะต้องมีขนาดพอที่จะให้คนขับผู้หญิง 5th percentile และคนขับผู้ชาย 95th percentile สามารถใช้งานรถได้อย่างไม่มีปัญหา อีกทั้งยังมีกติกานักขับทุกคนจะต้องออกจากรถได้ภายใน 5 วินาที โดยในห้องนักขับจะต้องกว้างพอที่จะให้ template ของ Cockpit opening ผ่านได้ และด้านหน้าของตัวรถจะต้องมีพื้นที่ภายในให้ Cockpit internal cross section template ผ่านได้ไปถึง 100mm จากแป้นคันเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดง Cockpit opening template (ซ้าย) และ Cockpit internal cross section (ขวา) [4]

โดย template นักขับที่จะถูกใช้วัดและออกแบบจะอิงตาม 95th percentile ของผู้ชาย ถูกเรียกว่า Percy



ภาพที่ 2.8 แสดงรูปแบบขนาดของ Percy [4]

## 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไป เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันไป จึงทำให้ทำให้วัสดุประกอบมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น หรือมีลักษณะเฉพาะ ตัวอย่างเช่น เหล็กที่มีการเสริมด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ทำให้มีแข็งแรงมากกว่า 1020 grade steel ถึง 5 เท่าโดยมีน้ำหนักเหลือเพียง 1 ใน 5 ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไฟเบอร์ถูกใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อวกาศ เรือ อากาศยาน และทางการทหาร เป็นต้น สำหรับในพอลิเมอร์ และเซรามิกที่มีพันธะภายในเนื้อวัสดุ และเส้นใยที่แข็งแรง โดยเส้นใยจะทำหน้าที่ในการรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิววัสดุ ส่วนพันธะภายในเนื้อวัสดุจะทำหน้าที่รักษาทิศทางของเส้นใย นอกจากนี้ไฟเบอร์ยังสามารถป้องกันรอยขีดข่วนได้ [5]

#### 2.4.1.1 การแบ่งประเภทของวัสดุประกอบ

##### การเสริมวัสดุผสมแบบเส้นใย

คือ การขึ้นรูปวัสดุต่างๆให้เป็นเส้นใย เช่น แก้ว คาร์บอน เซรามิก จากนั้นนำมาขึ้น เช่น การทอให้เป็นแผ่น ดังนั้นในการแบ่งประเภทจึงใช้ขนาดเป็นเกณฑ์

Short fiber reinforced คือน้อยกว่า 2 มม.

Long fiber reinforced คือมากกว่า 2 มม. แต่น้อยกว่า 30 มม.

Endless fiber reinforced คือมากกว่า 30 มม.

##### การเสริมวัสดุผสมแบบอนุภาค

คือ การที่มีอนุภาคของวัสดุผสมกระจายตัวอยู่ในวัสดุหลัก โดยอนุภาคจะมีรูปร่างที่หลากหลาย เช่น ทรงกลม ทรงรี ทรงหลายเหลี่ยม เป็นต้น

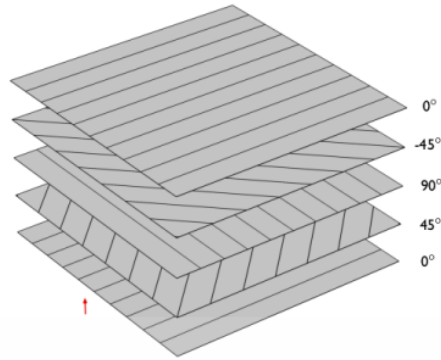


ภาพที่ 2.9 แสดงรูปแบบของการเสริมวัสดุ [10]

#### 2.4.1.2 การเรียงตัวของเส้นใย

เนื่องจากเส้นใยสามารถรับแรงแนวแกนได้ดี แต่ก็สามารถเกิดความเสียหายได้ง่ายในทิศ 90 องศาจากแนวแกน ดังนั้นจึงมีการเรียงในทิศ  $0, +45/-45, +90/-90$  เพื่อให้สามารถแรงได้ในทุกทิศทาง

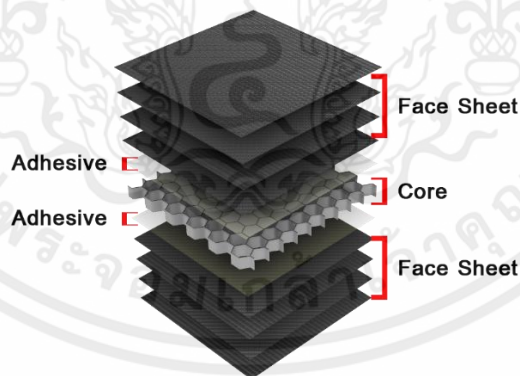
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงผ้าแบบ 0/-45/+90/45/0 [11]

#### 2.4.2 โครงสร้างแซนด์วิช

โครงสร้างแซนด์วิชคือโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุแกนกลางและถูกประกบด้วยผิวหน้า 2 ด้าน โดยผิวหน้าทำหน้าที่รับแรงดึงและแรงอัด ส่วนวัสดุแกนกลางทำหน้าที่รับแรงเฉือนและแรงอัด นอกจากนี้วัสดุแกนกลางยังทำหน้าที่เพื่อเพิ่ม Second Moment of Inertia ของโครงสร้างด้วย จึงค่า Bending Stiffness เพิ่มขึ้น

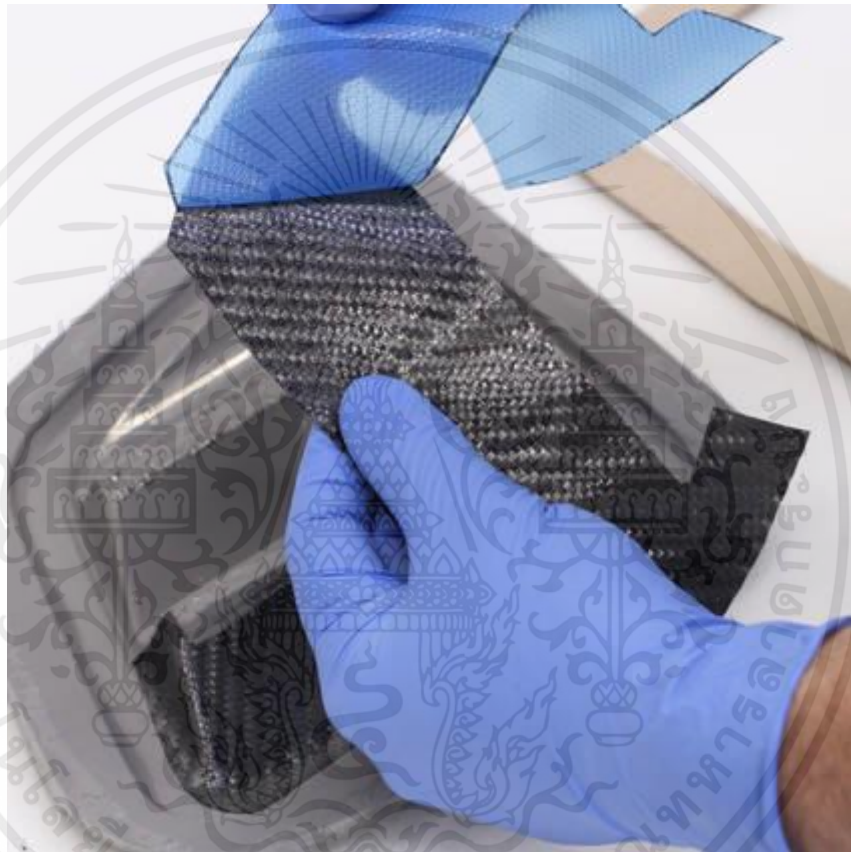


ภาพที่ 2.11 โครงสร้างแซนด์วิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 ผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ Prepreg

โดยปกติแล้ว การขึ้นชิ้นงานวัสดุผสมด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ จะทำโดยการใช้ผ้าคาร์บอนไฟเบอร์แบบแห้ง จากนั้นทำให้แข็งตัวโดยการทาเรซินลงไป แต่ผ้าคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Prepreg จะเป็นผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีการเคลือบเรซินมาอยู่ในเนื้อผ้าแล้ว จะทำให้แข็งได้ด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิการอบ แต่ผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ Prepreg สามารถแข็งตัวเองได้ภายในอุณหภูมิห้องหากทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือน ดังนั้นการจัดเก็บผ้า Prepreg จึงต้องจัดเก็บไว้ในอุณหภูมิเย็นจัด ส่วนมากจะอยู่ประมาณ  $-18^{\circ}\text{C}$  ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต โดยจะอยู่ได้ประมาณ 1 ปี



ภาพที่ 2.12 แสดงผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ Prepreg [6]

### 2.4.4 แกนรังผึ้งอลูมิเนียม

เป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุแกนกลางของโครงสร้างแซนด์วิช โดยตอนอยู่ในรูปที่ยังไม่ได้ถูกคลี่ ตัวรังผึ้งอลูมิเนียมมีขนาดกะทัดรัดและง่ายต่อการขนส่งโดยไม่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย และสามารถคลี่ออกมาได้อย่างง่ายดายโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติม เหมือนกับวัสดุแกนกลางอื่นๆ รังผึ้งอลูมิเนียมถูกออกแบบมาเพื่อเป็นแกนกลางของโครงสร้างแซนด์วิชโดยมีแผ่นผิวประกอบทั้ง 2 ด้าน โดยข้อดีของรังผึ้งอลูมิเนียมคือเพิ่ม Stiffness ของแผ่นแซนด์วิชโดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 แสดงแผ่นรังผึ้งอลูมิเนียมตอนคลี่ออกแล้ว [7]

#### 2.4.5 ระเบียบวิธี SES

อย่างที่กล่าวไว้ในบทนำตัวแปรต่างๆของแผ่นแซนด์วิช ที่ได้รับการพิสูจน์โดยใช้ 6 ตัวแปรที่ใช้คำนวณใน SES ได้แก่

##### Flexural Rigidity ของเหล็ก Baseline

ความแข็งแกร่งดัด EI ของชิ้นส่วนคำนวณจากผิว elastic modulus ที่โดนกระทำจาก 3 จุดตัดทางกายภาพในการทดสอบ laminate และ second moment of area ที่เกิดขึ้นเองจากความหนาของชิ้นงาน และผลกระทบด้านความสูงของ monocoque จริง

$$EI = \frac{200000 \cdot n\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (2.1)$$

- โดย E คือ ค่าความยืดหยุ่นของผิว  
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่  
 n คือ จำนวนท่อเหล็ก  
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางในของท่อ

#### Yield Tensile Strength

$$F_y = \frac{\sigma_{y,skin} \times A_{skins\ cross-section}}{10^6} \quad (2.2)$$

#### Ultimate Tensile Strength

$$F_u = \frac{\sigma_{u,skin} \times A_{skins\ cross-section}}{10^6} \quad (2.3)$$

#### Maximum Bending Load

$$F_{max} = \frac{4 \times \sigma_{u,skin} \times I_{panel}}{0.001 \times 0.5 \times t_{panel} \times L} \quad (2.4)$$

#### Maximum Deflection at Baseline Steel Load

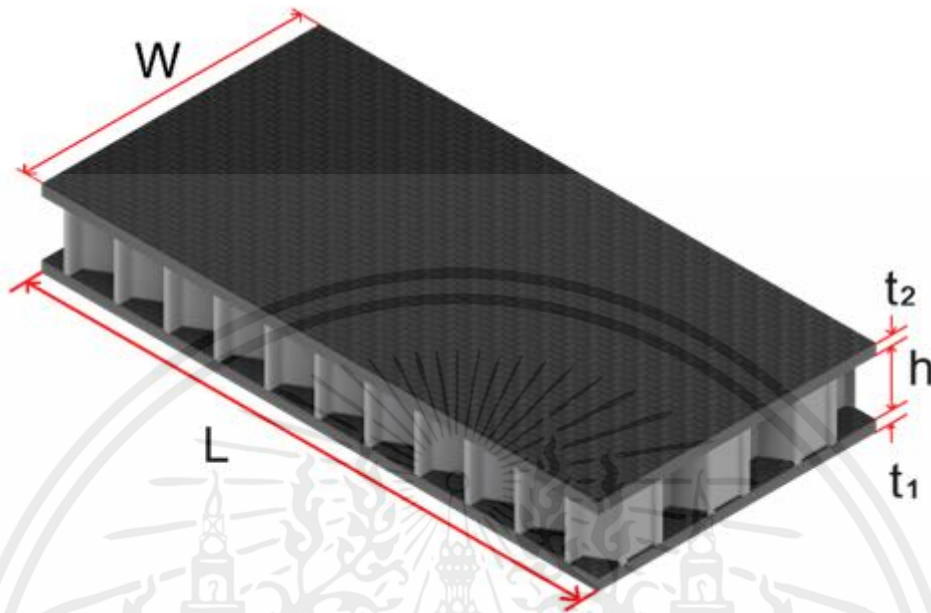
$$\Delta = \frac{F_{steel,max} \times L^3}{48 \times EI} \quad (2.5)$$

#### Energy Absorbed

การดูดซับพลังงานของชิ้นงานทดสอบคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะกระจัด

## 2.4.6 ทฤษฎีคานสำหรับแผ่นแซนด์วิช

พิจารณาคานแผ่นแซนด์วิชแบบง่าย ยาว  $L$  กว้าง  $W$



ภาพที่ 2.14 แสดงรูปการณืบอกขนาดของแผ่นแซนด์วิช

เราจะสามารถหาค่า Flexural Rigidity ของแผ่นแซนด์วิชนี้ได้โดยใช้สมการ [8]

$$EI = E_f \frac{Wtd^2}{2} \quad (5)$$

โดย	$EI$	คือ Flexural Rigidity
	$E_f$	คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของผิวหน้า
	$W$	คือ ความกว้างของชิ้นงาน
	$t$	คือ ความหนาของผิวหน้า
	$d$	คือ $\frac{t_1+t_2}{2} + h$

จากสมการข้างต้น โมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับแผ่นแซนด์วิชถูกคำนวณจาก

$$E = \frac{G_c \cdot L_c^3}{48I_c(y_{c2} - y_{c1})} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	$E$	คือ ค่าความยืดหยุ่นของผิว
	$G_c$	คือ เกรเดียนต์
	$L_c$	คือ ความยาวของชิ้นงาน
	$I_c$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่
	$y_{c2}$	คือ ระยะเสียรูปของชิ้นงานก่อนรับภาระ
	$y_{c1}$	คือ ระยะเสียรูปของชิ้นงานหลังรับภาระสูงสุดก่อนเกิดความเสียหาย

โดยเกรเดียนต์ของความสัมพันธ์ของแรงกับระยะกระจัด ( $G_c$ ) หาได้จาก

$$G_c = \frac{F_{c2} - F_{c1}}{y_{c2} - y_{c1}} + S_c \quad (7)$$

โดย	$G_c$	คือ เกรเดียนต์
	$F_{c1}$	คือ ภาระที่กระทำก่อนเกิดระยะเสียรูปของชิ้นงาน
	$F_{c2}$	คือ ภาระที่กระทำสูงสุดก่อนเกิดความเสียหาย
	$y_{c1}$	คือ ระยะเสียรูปของชิ้นงานก่อนรับภาระ
	$y_{c2}$	คือ ระยะเสียรูปของชิ้นงานหลังรับภาระสูงสุดก่อนเกิดความเสียหาย
	$S_c$	คือ ตัวแปรชดเชยของการทดสอบ เพื่อที่จะชดเชยความผิดพลาดในการทดสอบ

และโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หาได้จาก

$$I_c = \frac{W \cdot (h + t_1 + t_2)^3 - h^3}{12} \quad (8)$$

โดย	$I_c$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่
	$t_1$	คือ ความหนาของผิวชั้นแรก
	$t_2$	คือ ความหนาของผิวชั้นหลัง
	$W$	คือ ความกว้างของชิ้นงาน
	$h$	คือ ความหนาของแกน

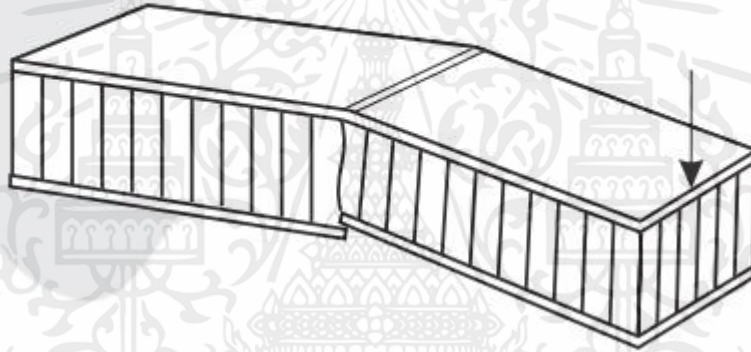
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.7 รูปแบบความเสียหาย

โครงสร้างแซนด์วิชมีรูปแบบความเสียหายมากมาย และรูปแบบความเสียหายเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบสำหรับตัวถัง monocoque [8] มีดังนี้

#### Skin Compression Failure

การเสียหายประเภทนี้เกิดขึ้นที่แผ่นผิว เมื่อความเค้นในแนวแกนของแผ่นผิวมีค่ามากกว่า In-plane strength ของแผ่นผิว เมื่อรับภาระตามแนวแกนของคาน



ภาพที่ 2.15 แสดงความเสียหายแบบ Skin Compression Failure [9]

#### Intra Cell Buckling

เป็นการโก่งของผิวหน้าบริเวณที่ไม่ได้ถูกรองรับด้วยตัวแกน ความเสียหายชนิดนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยการเลือกขนาดของแกนรังผึ้งให้เล็กลง



ภาพที่ 2.16 แสดงความเสียหายแบบ Intra Cell Buckling [9]

#### Core Shear

เกิดขึ้นเมื่อวัสดุแกนกลางรับแรงเฉือนในด้านหัวและท้ายของผนัง โดยความหนาและโมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุแกนกลาง ควรจะต้องเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายประเภทนี้



ภาพที่ 2.17 แสดงความเสียหายแบบ Core Shear [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบเหล็ก Baseline

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบแผ่น Laminate และเหล็ก Baseline เพื่อนำมาเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS รวมทั้งข้อมูลต่างๆจากการทดสอบการดัดงอ 3 จุดของเหล็ก Baseline

### 3.2 รูปแบบการทดสอบตามกติกา FSAE

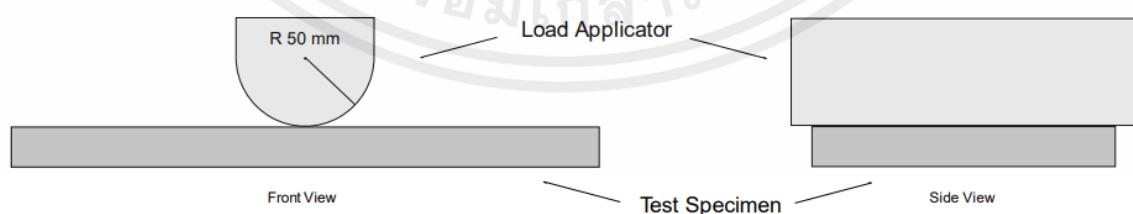
#### F.4.3.3 Comparison Test

Teams must make an equivalent test that will determine any compliance in the test rig and establish an absorbed energy value of the baseline tubes.

- The comparison test must use two Side Impact steel tubes (F.3.2.1.e)
- The steel tubes must be tested to a minimum displacement of 19.0 mm
- The calculation of absorbed energy must use the integral of force times displacement from the initiation of load to a displacement of 19.0 mm.

#### F.4.3.4 Test Conduct

- The Laminate test F.4.3.2 and the Comparison test F.4.3.3 must use the same fixture
- The load applicator used to test any panel/tubes as required in this section F.4.3 must be:
  - Metallic
  - Radius 50 mm
- The load applicator must overhang the test piece to prevent edge loading.
- Any other material must not be placed between the load applicator and the items on test.



ภาพที่ 3.1 วิธีการทดสอบ [4]

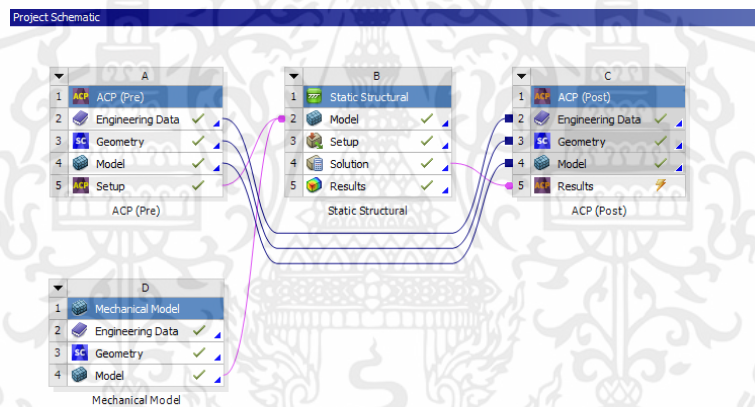
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการทดสอบจะมีระบุไว้ในกฎของการแข่งขัน โดยมีใจความคร่าวๆว่า การทดสอบเหล็ก Base line เหล็กที่จะนำมาทดสอบต้องมีขนาดตามที่กำหนด จำนวน 2 ท่อน ส่วนชิ้นงาน Laminate ก็จะมีขนาดให้เลือกกว่าจะใช้ 138x500 หรือ 275x500 นอกจากนั้นก็ยังระบุขนาดของหัวกดว่าต้องมีขนาดรัศมี 50 mm และระยะห่างระหว่างจุดรองรับ คือ 400 mm

### 3.3 การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

ในการการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด จะทำโดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยใช้ ACP (Ansys Composite PrepPost) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สำหรับวัสดุผสม โดยเฉพาะ โดยการวิเคราะห์นี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น

#### 3.3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

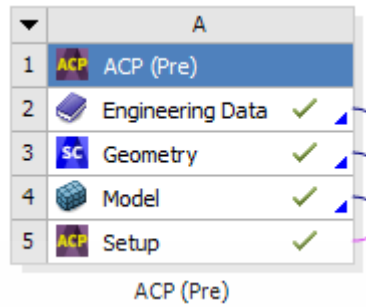


ภาพที่ 3.2 แสดงผังระบบงานของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุดใน ANSYS

โดยภายในผังระบบงานจะประกอบไปด้วย ACP(Pre) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการตั้งค่าของวัสดุผสม, Mechanical Model เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลอง โดยเราใช้เครื่องมือนี้ในการสร้างแบบจำลองของจุดรองรับ, Static Structural เป็นเครื่องมือในการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของการทดสอบ, ACP(Post) เป็นเครื่องมือในการแสดงข้อมูลของผลลัพธ์ของการทดสอบแต่ละชั้นผ้า

#### 3.3.2 ACP(Pre)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 แสดงหน้าของ ACP(Pre)

ในเครื่องมือ ACP(Pre) จะต้องกำหนดค่าต่างๆในแต่ละช่อง โดยในช่อง Engineering Data จะเป็นช่องในการกำหนดวัสดุที่จะถูกใช้ในการทดสอบ

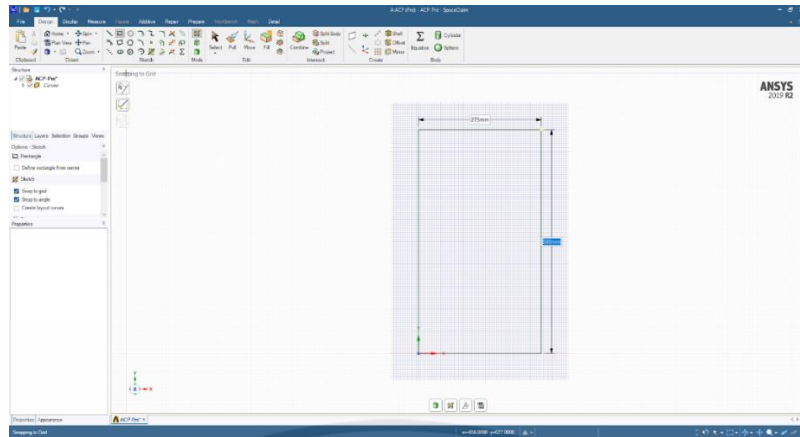
Outline of Schematic A2, C2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg				
4	Honeycomb				
5	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material				

ภาพที่ 3.4 แสดงหน้าต่างของช่อง Engineering Data

โดยวัสดุที่จะถูกใช้ในการทดสอบจะมี 3 ชนิด คือ 1. Epoxy Carbon Woven (230Gpa) Prepreg  
2. Honeycomb 3. Structural Steel

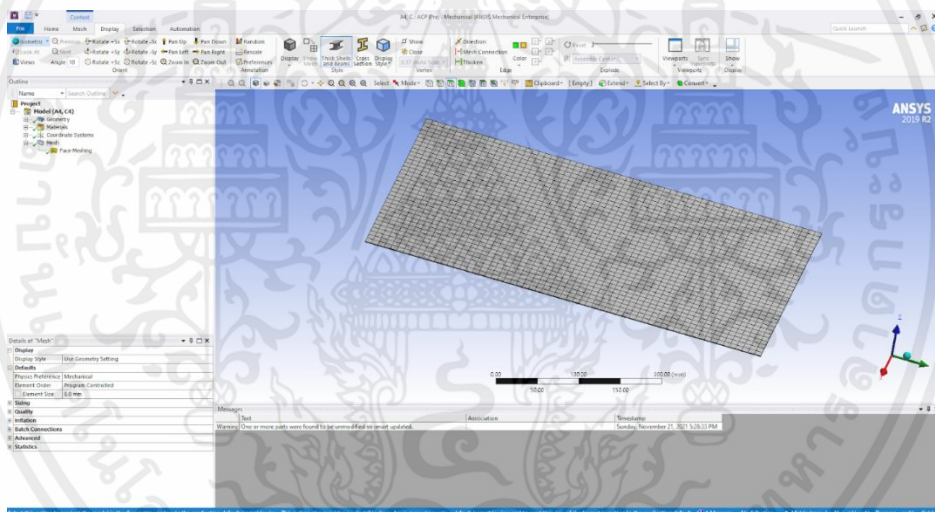
ต่อมาจะเป็นช่อง Geometry ซึ่งจะเป็นช่องสำหรับการทำแบบจำลอง โดยในช่องนี้จะเป็นการทำแบบจำลองของชิ้นงานตามขนาดที่กฎของการแข่งขันกำหนดไว้ที่ 275x500 มิลลิเมตร [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แสดงหน้าต่างของช่อง Geometry

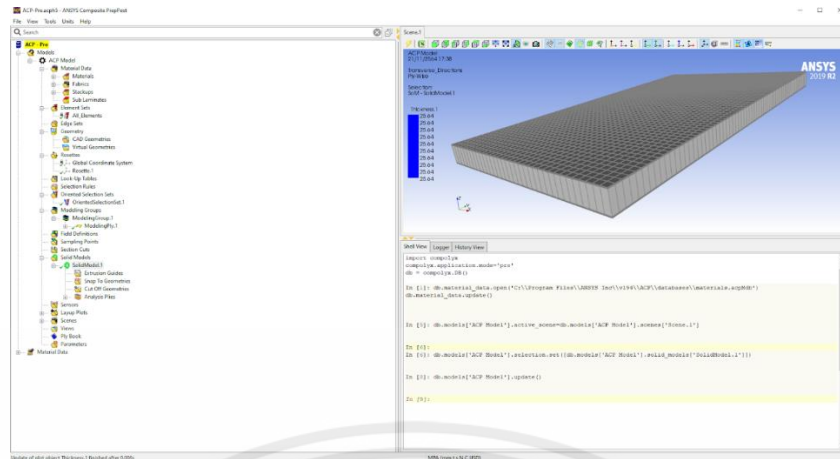
ช่องถัดไปจะเป็นช่องของ Model ซึ่งเป็นช่องสำหรับการสร้าง Mesh จาก Geometry เพื่อมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 3.6 แสดงหน้าต่างของช่อง Model

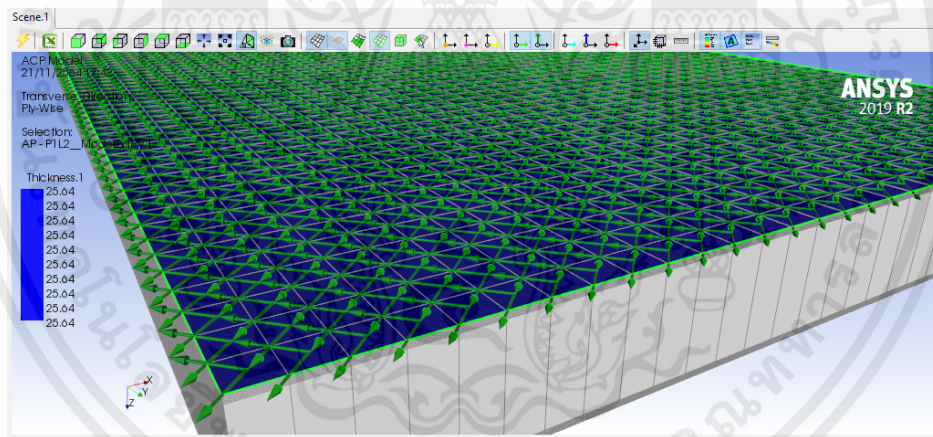
หลังจากนั้นข้อมูล Mesh จากช่อง Model จะถูกส่งมายังช่อง Setup ในการสร้างชิ้นงานวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



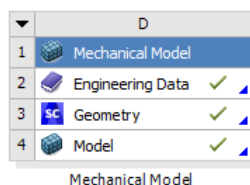
ภาพที่ 3.7 แสดงหน้าต่างของช่อง Setup

โดยในช่องนี้จะสามารถเลือกวัสดุ ความหนา และจำนวนชั้นได้ โดยในช่องนี้จะนำ Mesh ที่เป็น Surface มา จากนั้นจะนำข้อมูลความหนาและจำนวนชั้นที่ถูกกำหนดมาสร้างเป็นแบบจำลองที่มีความหนาขึ้นมา รวมทั้งยังสามารถกำหนดทิศทางของผ้าและกำหนดรูปแบบการวางผ้าได้



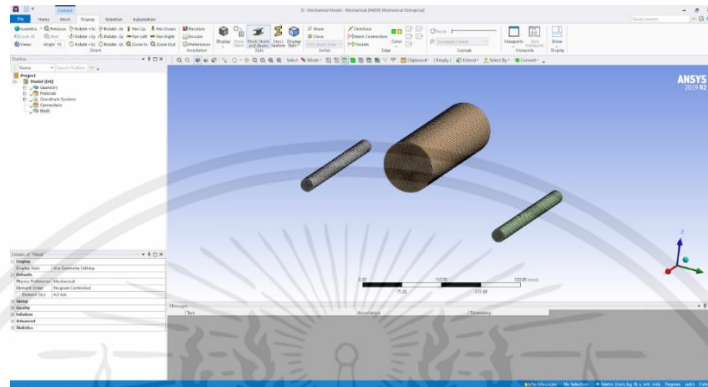
ภาพที่ 3.8 แสดงหน้าการจัดวางผ้าแบบ +45/-45

### 3.3.3 Mechanical Model



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภาพที่ 3.9 แสดงหน้าหน้าต่างของ Mechanical Model ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

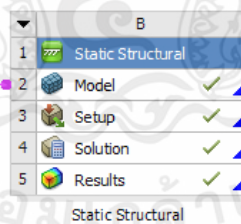
โดยในเครื่องมือ Mechanical Model จะมีช่องเครื่องมือหลายๆช่อง เหมือนกับของ ACP(Pre) ที่ได้ อธิบายไปข้างบนแล้ว เพียงแต่เครื่องมือ Mechanical Model นี้จะเป็นเครื่องมือสำหรับการสร้างแบบจำลองของ จูตรองรับในการทดสอบ



ภาพที่ 3.10 แสดงหน้าต่างต่างช่อง Model ใน Mechanical Model

ซึ่งขนาดของตัวกดจะมีรัศมี 50 mm [4] แต่ว่าขนาดของจูตรองรับไม่ได้มีกำหนดขนาดไว้ ผู้ทดลองจึงได้ ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 25 mm ซึ่งเป็นขนาดที่มีใช้ในห้องทดลองของทางภาควิชาวิศวกรรมโยธา

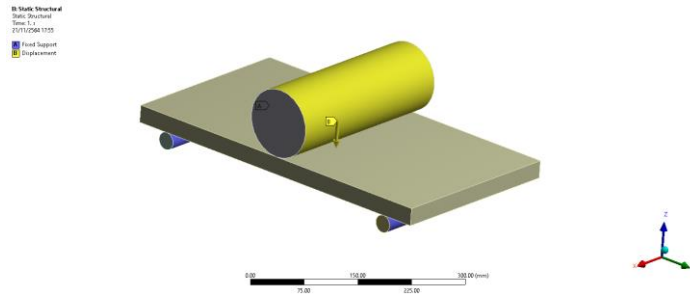
### 3.3.4 Static Structural



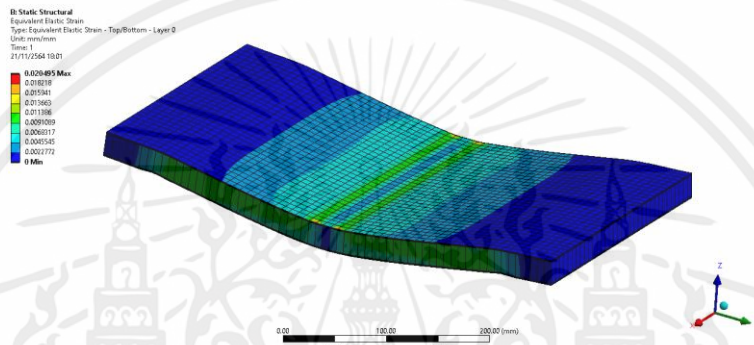
ภาพที่ 3.11 แสดงหน้าต่างต่างของ Static Structural

ในเครื่องมือนี้จะเป็นเครื่องมือสำหรับการตั้งค่าการทดลอง โดยการกำหนดเงื่อนไขจะกำหนดระยะกระจัด ของตัวกดลงมาในแนวแกน Z ที่ -8 mm และยึดจูตรองรับทั้งสองเป็น Fix Support

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

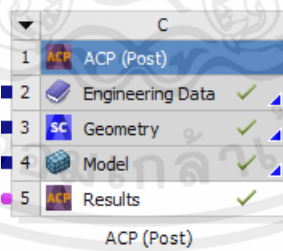


ภาพที่ 3.12 แสดงหน้าการตั้งค่าใน Static Structural



ภาพที่ 3.13 แสดงผลของความเครียด

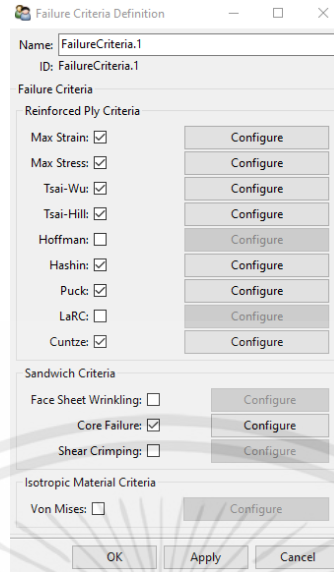
### 3.3.5 ACP(Post)



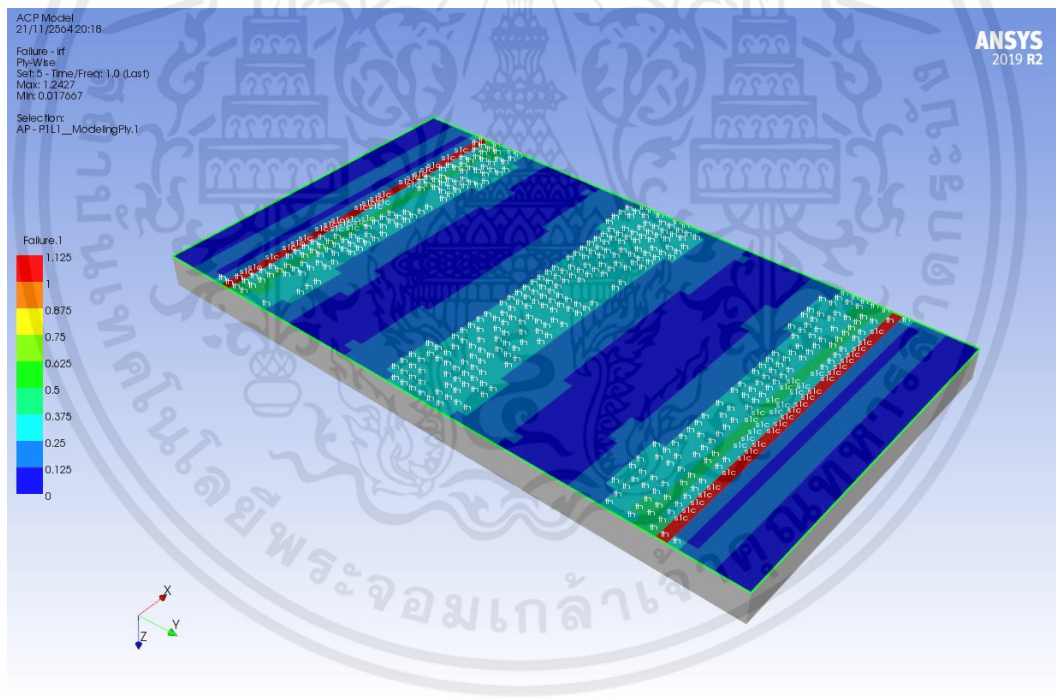
ภาพที่ 3.14 แสดงหน้าหน้าต่างของ ACP(Post)

ACP(Post) เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน โดยสามารถแสดงผลเป็นแต่ละชั้นได้ ซึ่งผลความเสียหายจะถูกวิเคราะห์หลักเกณฑ์ความเสียหายในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

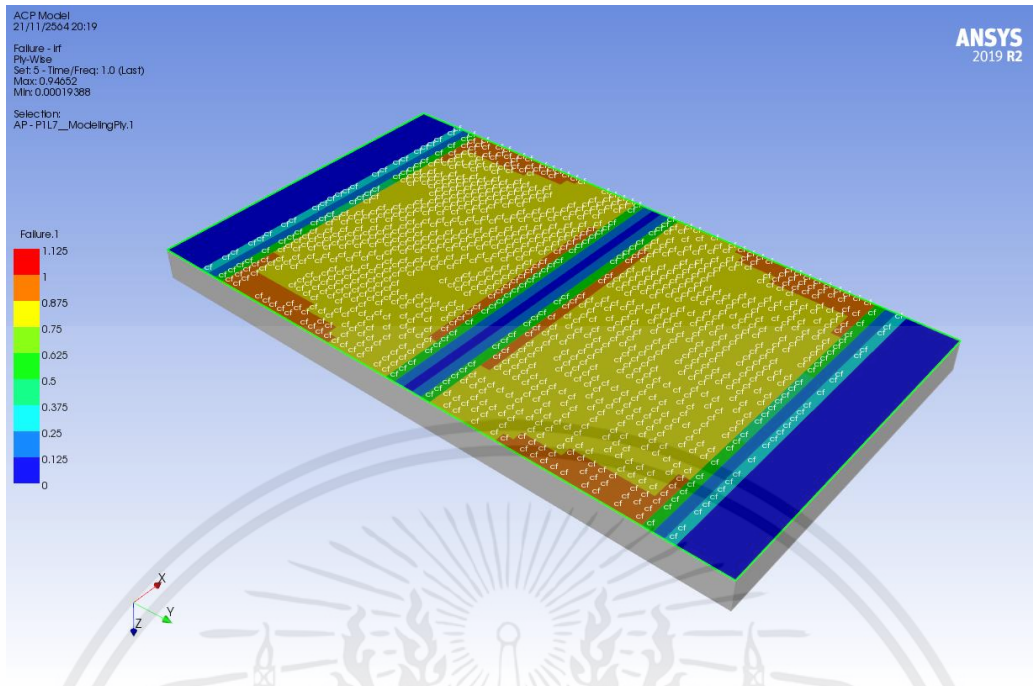


ภาพที่ 3.15 แสดงหลักเกณฑ์ความเสียหายที่ถูกใช้วิเคราะห์

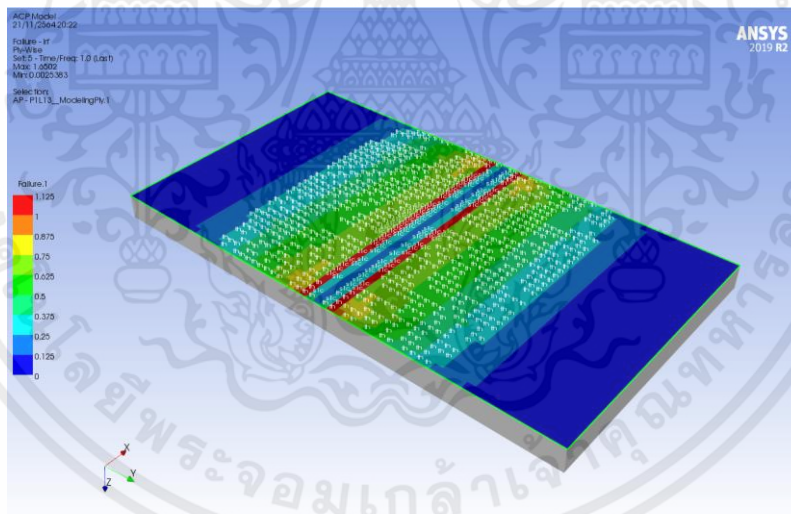


ภาพที่ 3.16 แสดงความเสียหายของผ้าชั้นแรกด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 แสดงความเสียหายของชั้น Honeycomb



ภาพที่ 3.18 แสดงความเสียหายของผ้าชั้นแรกด้านล่าง

โดยตัวอักษรที่ปรากฏบนชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย จะแทนหลักเกณฑ์ความเสียหายที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

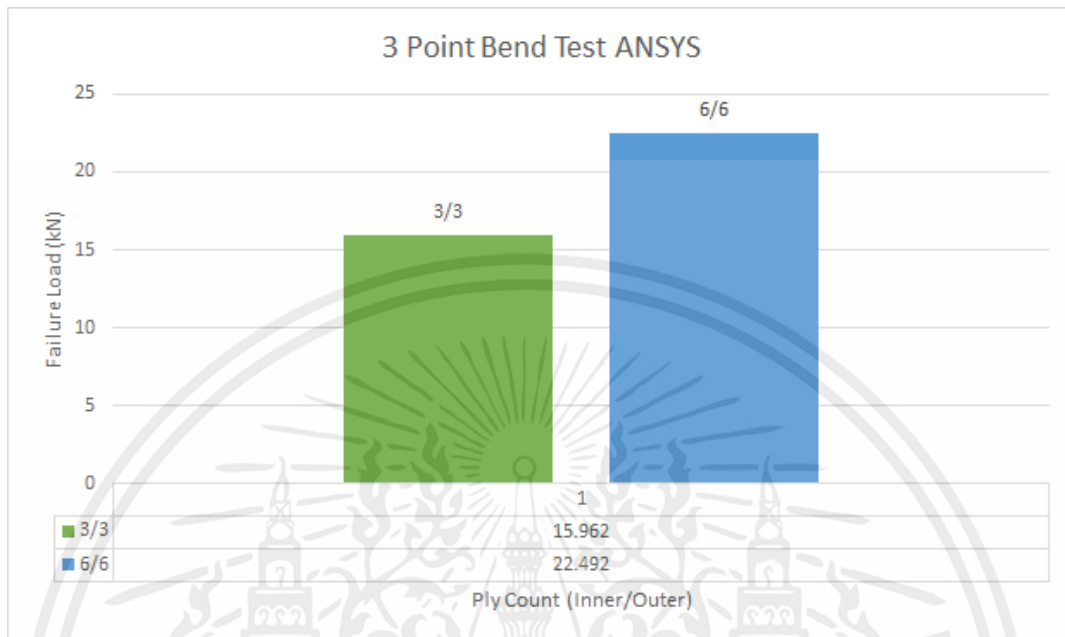
tw หลักเกณฑ์ความเสียหายของ Tsai-Wu

th หลักเกณฑ์ความเสียหายของ Tsai-Hill

cf หลักเกณฑ์ความเสียหายแบบ Core Failure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยชิ้นงานจะถือว่าเสียหายอย่างสมบูรณ์ เมื่อเกิดความเสียหายบนผิวของผ้าคาร์บอนไฟเบอร์หรือแกน Honeycomb ตลอดแนวความกว้างของชิ้นงาน



ภาพที่ 3.19 แสดงการเปรียบเทียบแรงสูงสุดกับจำนวนชั้นผ้า

### 3.3 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุดของเหล็ก Baseline

ตามกฎของ Formula Student การทดสอบการดัดงอ 3 จุด ระบุสำหรับเหล็ก Baseline ระบุไว้ว่า เหล็กที่ใช้นำมาทดสอบจะต้องมีค่า Cross sectional Area มากกว่า  $114 \text{ mm}^2$  และ Second moment of inertia มากกว่า  $8509 \text{ mm}^4$  จำนวน 2 ท่อน โดยมีระยะจุดรองรับห่างกัน 400 mm และหัวกดทรงกลมมีรัศมี 50 mm การทดสอบสำหรับส่วน Side Impact จะต้องมีการพิสูจน์ว่าผนังของส่วนนี้สามารถดูดซับพลังงานได้ เท่ากับหรือมากกว่าเหล็ก Baseline จำนวน 2 ท่อน ที่ถูกกดจนระยะกระจัดที่ 19 mm โดยในการทดสอบนี้ ได้ทำการทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา



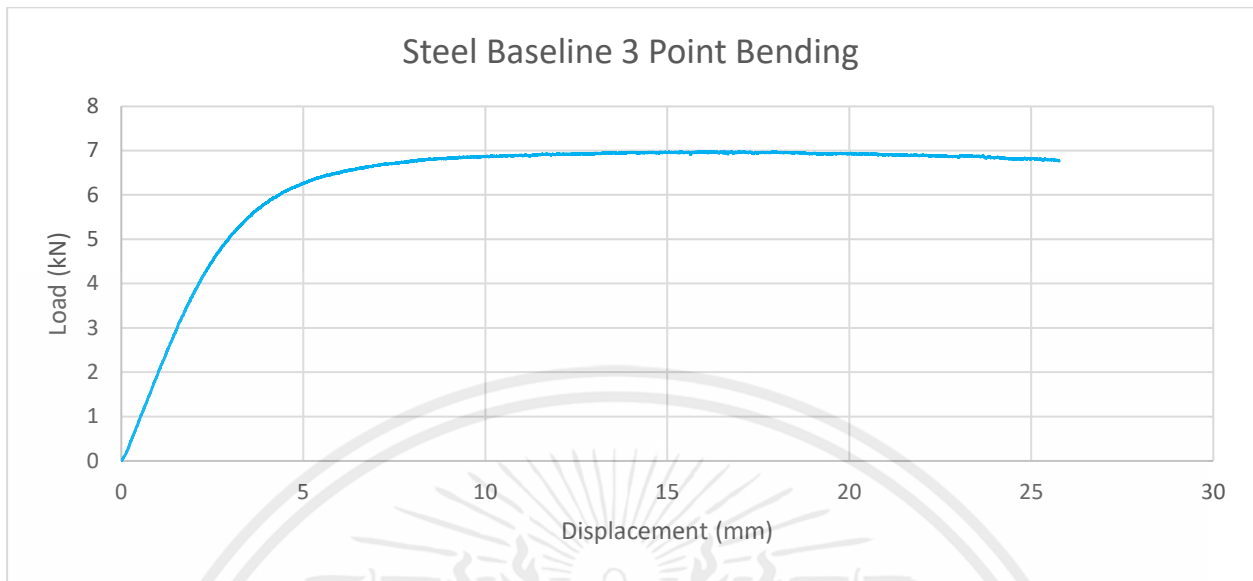
ภาพที่ 3.20 แสดงการทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา



ภาพที่ 3.21 แสดงเหล็ก Baseline 2 ท่อนหลังจากถูกกด

โดยในการทดสอบความเร็วในการกดได้ถูกตั้งค่าไว้ที่ 5 mm/min และกดมาจนถึงระยะกระจัดที่ 25 mm โดยกราฟของการทดสอบถูกแสดงในภาพภาพที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.22 แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัด

จากนั้นจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบ นำไปใส่ใน SES เพื่อคำนวณคุณสมบัติต่างๆของเหล็กที่เรานำมาทดสอบ ซึ่งจากกราฟด้านบน เมื่อนำมาคำนวณหาพลังงานที่ดูดซับของเหล็กที่ 19 mm จะมีค่าประมาณ 115.689 J และแรงที่กระทำมากที่สุดมีค่า 6984 N และข้อมูลจากการทดสอบจะถูกนำมากรอกลงใน SES เพื่อที่จะคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของเหล็กที่นำมาทดสอบ

EQ

## Steel Tube 3-Point Test

F.4.3.2 Minimize deflection in applicator and span fixture.

All entries on this tab are in SI. Inch units are calculated only for output values.

F.4.3.4 Repeat tube values on all composite tabs. Use same fixture for all 3-point tests.

Logged tube data only is only necessary on one of the composite tabs. Prioritize SIS layout tab.

I Make sure to use stepwise integration:  $\text{current\_force} * (\text{current\_disp} - \text{prev\_disp}) + \text{previous\_total}$   
Do not assume steps are identical.INCORRECT:  $\text{Final\_force} * \text{final\_displacement}$ 

EQ			
F.4.3.1	Dates of tests:	15/11/2021	EQ
F.4.3.4.a	Metallic load applicator 50mm (2in radius):	50 mm	EQ
	Tube Support Span =400mm L:	400 mm	EQ
F.4.3.3.a	Number of tubes =2 n:	2 Round	EQ
	Wall thickness (t):	1.6 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25.0 mm	EQ
	Tube cross sectional area (A):	114 120 mm <sup>2</sup>	EQ
	Tube second moment of inertia (I):	8509 8509 mm <sup>4</sup>	EQ

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region

EQ			
	x <sub>1</sub> :	0.174626714 mm	EQ
	x <sub>2</sub> :	1.60257729 mm	EQ
	y <sub>1</sub> :	258.089 N	EQ
	y <sub>2</sub> :	3133.437 N	EQ
F.4.3.3.b	Maximum displacement >=19mm:	25.77189 mm	EQ
	Absorbed energy at 19mm deflection (Area under curve):	115.689 J	EQ
y1 to y2	Displacement from bending ( $P \cdot L^3 / 48 \cdot E \cdot I$ ):	1.126 mm	EQ
	Local crush ( $P^2 \cdot R^2 \cdot t / (16 \cdot \pi \cdot S_y \cdot I^2)$ ):	0.023 mm	EQ
	Displacement from shear ( $0.5 \cdot P \cdot 0.5 \cdot L \cdot \text{shape} / A \cdot 0.3 \cdot E$ ):	0.040 mm	EQ
	Displacement from test rig:	0.238 mm	EQ
	Rig compliance:	0.083 mm/kN	EQ
	Theoretical EI:	3.40E+09 N*mm <sup>2</sup>	EQ
	Tested EI, uncorrected:	2.83E+09 83.0%	EQ
	Propagate the yield formula provided in column AC to complete this section.		
	Beam curvature radius for 0.2% strain offset:	6350 mm	EQ
	Deflection at curvature:	3.15E+00 mm	EQ
	Yield Force:	3.27E+03 N	EQ
	Maximum Moment:	3.27E+02 N*m	EQ
	Theoretical Yield:	305 MPa	EQ
	Tested Yield:	244 80.0%	EQ

ภาพที่ 3.23 แสดงหน้าต่าง SES ของการทดสอบเหล็ก Baseline

ซึ่งเหล็ก Baseline ตามทฤษฎีจะมีค่า Flexural Rigidity ที่  $3.4E+09 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$  ส่วนเหล็กที่นำมาทดสอบคำนวณค่าจากการทดสอบได้  $2.83E+09 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$  มีความเหมือนกันที่ 83% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินการทดสอบ

#### 4.1 เตรียมชิ้นงาน

ทำการวัด และตัด Carbon Fiber Prepreg และ Aluminum Honeycomb ให้ได้ขนาดและจำนวนตามตาราง

กว้าง x ยาว	Lay Up			การทดสอบ
	3/c/3	6/c/6	10/c/10	
100 x 100	1	1	1	Perimeter Shear
300 x 300	-	1	-	Pull Out
500 x 275	1	1	1	3-Point Bending

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนชิ้นงานที่ต้องการสร้างเพื่อทดสอบ



ภาพที่ 4.1 แสดงการเตรียม Carbon Fiber Prepreg



ภาพที่ 4.2 แสดงการเตรียม Aluminum Honeycomb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแผ่น Aluminum Sheet ไปทา Release Agent เพื่อกันชิ้นงานติดกับแผ่น วาง Carbon Fiber Prepreg ทิศ 0 องศาสลับกับ 45 องศาตามการจัดเรียงของแต่ละ Lay Up ในโครงเหล็กโดย เพื่อกันการเกิด Core Crush จากด้านข้าง โดยมี Aluminum Honeycomb อยู่ระหว่างกลางของ Carbon Fiber Prepreg ทั้งสองฝั่ง และมี Adhesive Film อยู่ระหว่างกลาง



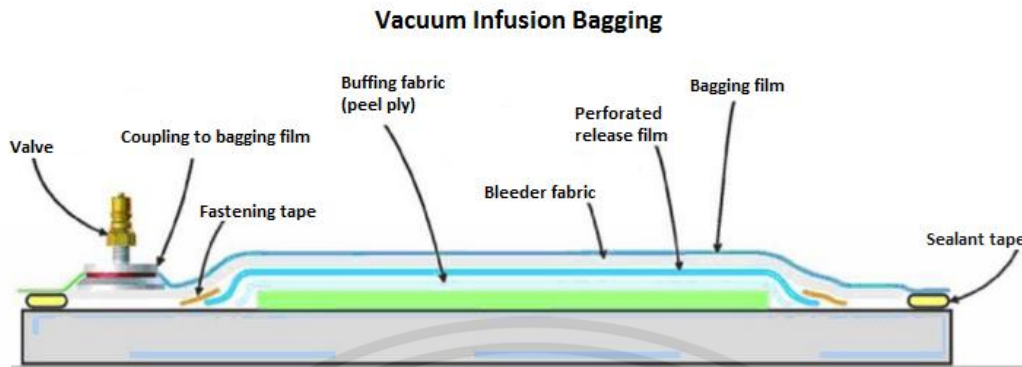
ภาพที่ 4.3 แสดงการเรียงชิ้นงานบนแผ่นอลูมิเนียม



ภาพที่ 4.4 แสดงชิ้นงานในโครงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำชิ้นงานทั้งหมดมาทำการ Bagging โดยรูปการณ์ทำ Bagging เป็นดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 อุปกรณ์ในการทำ Bagging



ภาพที่ 4.6 แสดงการหุ้ม Release Film

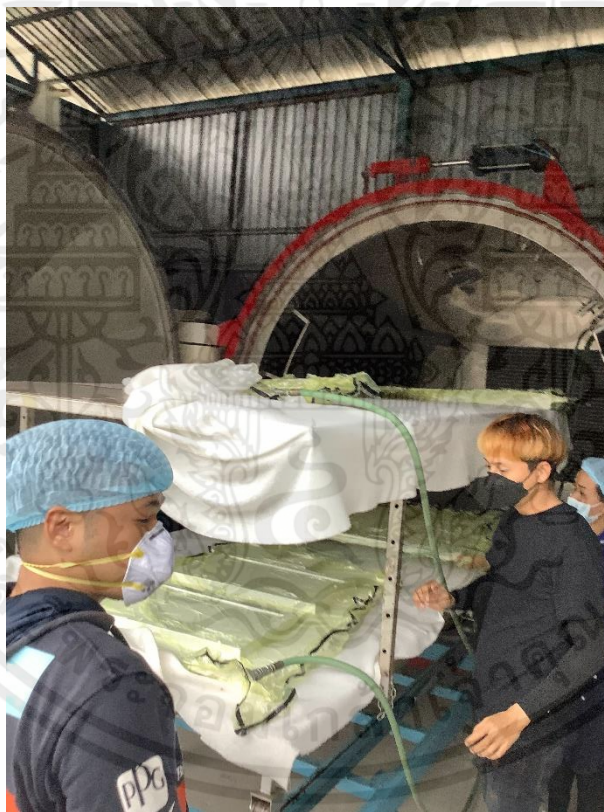


ภาพที่ 4.7 แสดงการห่อชิ้นงานด้วย Bleeder Fabric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 แสดงการนำชิ้นงานเข้าไปใน Bagging Film



ภาพที่ 4.9 แสดงการนำชิ้นงานเข้าตู้อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 แสดงการแกะชิ้นงานทดสอบออกจากแม่พิมพ์

## 4.2 การทดสอบชิ้นงาน

ในการทดสอบชิ้นงาน จะมีการทดสอบทั้งหมด 3 แบบ คือ 3-Point Bending, Perimeter Shear และ Pull Out โดยการทดสอบทั้งหมดทำการทดสอบขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล.

### 4.2.1 3-Point Bending

การทดสอบจัดทำโดยใช้รูปแบบการทดสอบตามกติกา Formula Student โดยระยะ Span 400 mm และหัวกด  $R=50$  mm ขนาดชิ้นงาน 275x500 mm



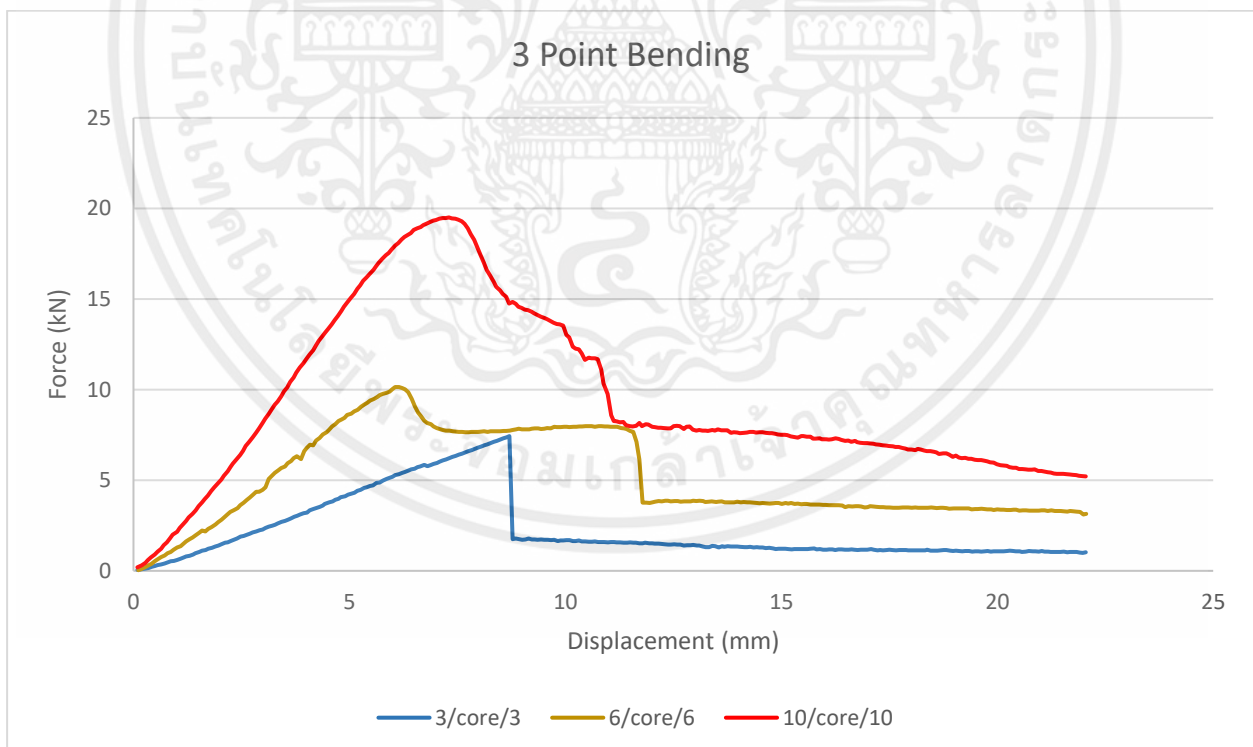
ภาพที่ 4.11 แสดงการทดสอบ 3-Point Bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 แสดงชิ้นงานเสียหาย

ผลลัพธ์ของการทดสอบ 3-Point Bending เป็นไปตามภาพที่ 4.12

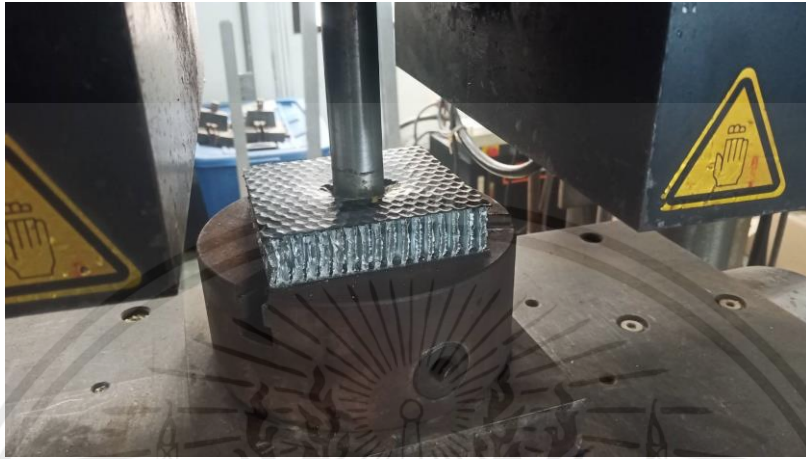


ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัดของการทดสอบ 3-Point Bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

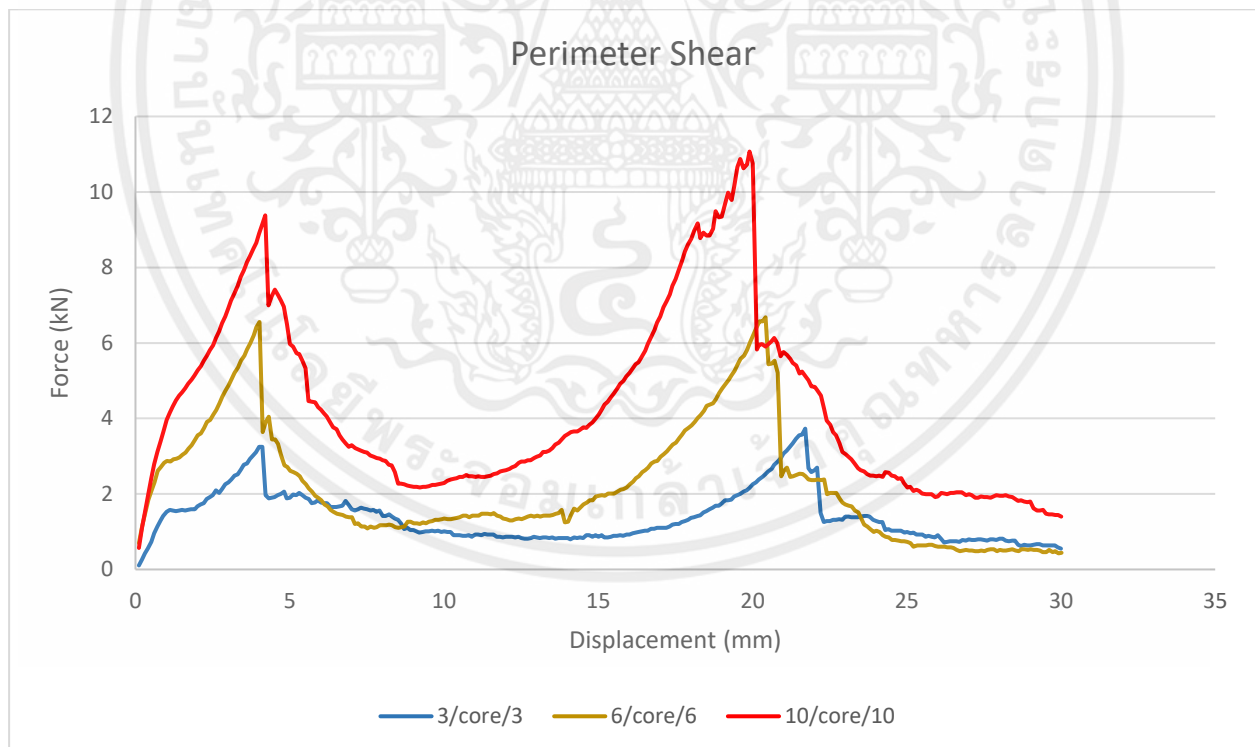
#### 4.2.2 Perimeter Shear

การทดสอบจัดทำโดยใช้รูปแบบการทดสอบตามกติกา Formula Student โดยขนาดชิ้นงาน 100x100 mm หัวกด D=25 mm อนุญาตให้ทำการ Fillet ได้โดย r=1 mm



ภาพที่ 4.14 แสดงการทดสอบ Perimeter Shear

ผลลัพธ์ของการทดสอบ Perimeter Shear เป็นไปตามภาพที่ 4.15

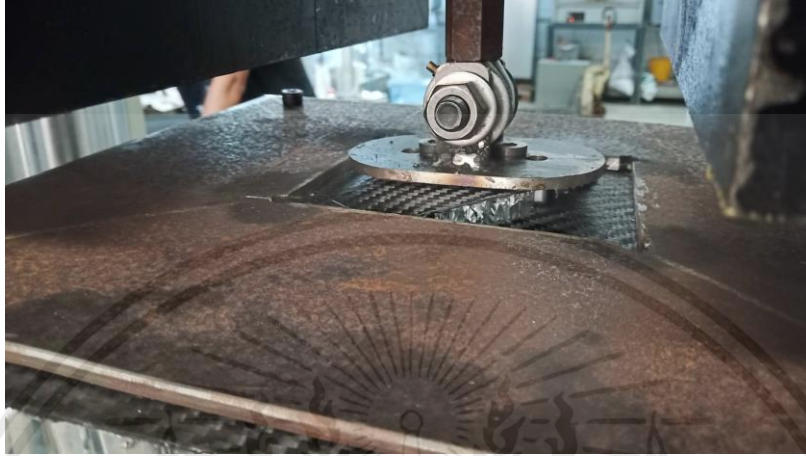


ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัดของการทดสอบ Perimeter Shear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

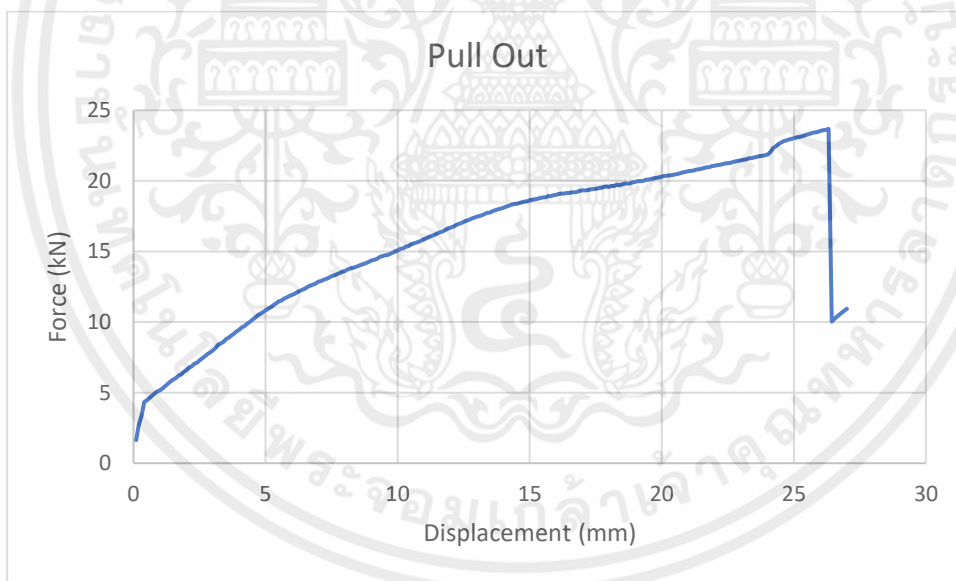
### 4.2.3 Pull Out

ในการทดสอบ Pull Out กติกาไม่ได้กำหนดขนาดของชิ้นงานไว้ อย่างไรก็ตามผู้จัดทำได้ใช้ขนาดชิ้นงานที่เหมาะสม คือ 300x300 mm



ภาพที่ 4.16 แสดงการจัดชิ้นงานในการทดสอบ Pull Out

ผลลัพธ์ของการทดสอบ Pull Out เป็นไปตามภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะกระจัดของการทดสอบ Pull Out

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 SES Submit

หลังจากมีข้อมูลจากการทดสอบแล้ว ก็นำข้อมูลทั้งหมดไปกรอกใน SES เพื่อคำนวณหาค่าต่างๆ เพื่อประเมินว่าแผ่นทดสอบมีความแข็งแรงเพียงพอหรือไม่

#### 4.3.1 SES ของรูปแบบการวางผ้า 3/c/3

**EQ Composite 3-Point Tests**

F.4.3.1.b Minimize deflection in applicator and span fixture.  
All entries on this tab are in SI. Preferred units are calculated only for output values.

F.4.3.2.a The flat 3-point test panels measure 275mm x 500mm or 138mm x 500mm. The top and bottom skin must have equal surface area. Panels must have bare edges, with the core exposed.

Make sure to use stepwise integration: current\_force\*(current\_disp-prev\_disp)-previous\_total  
Do not assume steps are identical.  
**INCORRECT:** Final\_force\*final\_displacement

EQ		22/2/2022		EQ
F.4.3.1	Dates of tests:	EQ		EQ
F.4.3.4.a	Metallic load applicator 50mm (2in radius):	50	mm	EQ
F.4.3.2.a	Panel maximum width =500mm W:	500	mm	EQ
	Panel Support Span =400mm L:	400	mm	EQ
	Panel Height = 138mm or 275mm h:	275	mm	EQ
	Centroid from bottom:	12.550	mm	EQ
	Panel Thickness:	25.1	mm	EQ
	Core thickness:	23	mm	EQ
	Outer TOP Skin Thickness:	1.05	mm	EQ
	Inner BOTTOM Skin Thickness:	1.05	mm	EQ
	Second moment of inertia I:	91011	mm <sup>4</sup>	EQ

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region

EQ		EQ		EQ	
x <sub>1</sub>	0.09	mm	EQ	y <sub>1</sub>	54
x <sub>2</sub>	8.707	mm	EQ	y <sub>2</sub>	7434.774
Force at panel failure or maximum tested force ymax:		7434.774		N	
Absorbed energy at test panel height:		45.91		J	
Two Size B tubes uncorrected gradient:		1769		N/mm	
275mm panel uncorrected gradient:		857		48.42%	
Uncorrected skin modulus of elasticity E:		12.55		GPa	
Uncorrected skin modulus of elasticity E:		1.25E+10		Pa	
Uncorrected skin modulus of elasticity E:		1.82E+06		psi	
Correction = MIN(Rig Compliance*(y2-y1), 0.5*(x2-x1)) (mm):		1.084		12.58%	
Corrected skin modulus of elasticity E:		14.35		GPa	
Corrected skin modulus of elasticity E:		1.44E+10		Pa	
Corrected skin modulus of elasticity E:		2.08E+06		psi	
UTS of skins σ <sub>ult</sub> :		1.03E+02		MPa	
UTS of skins σ <sub>ult</sub> :		1.03E+08		Pa	
UTS of skins σ <sub>ult</sub> :		1.49E+04		psi	

ภาพที่ 4.18 แสดง SES ของ 3-Point Bending ของ 3/c/3

**EQ Perimeter Shear Test**

F.4.3.5.b The first peak must be used for skin shear strength for composite chassis properties.

EQ		8/4/2022		N/A
F.4.3.1	Dates of tests:	EQ		N/A
F.4.3.5.a	Punch diameter 25mm (1in):	25	mm	N/A
F.4.3.5.e	Maximim fillet 1mm (.040in):	1	mm	N/A
F.4.3.5.b	Sample Length 100mm (4in) min:	100	mm	N/A
F.4.3.5.c	Sample Width 100mm (4in) min:	100	mm	N/A
F.4.3.5.c	Maximum fixture hole diameter 32mm (1.25in):	32	mm	N/A
	Panel Thickness:	25.1	mm	N/A
	Core thickness:	23	mm	N/A
	First Peak Skin Thickness:	1.05	mm	N/A
	Second Peak Skin Thickness:	1.05	mm	N/A
F.4.3.5.g	First peak:	3250	N	N/A
F.4.3.5.h	Highest peak:	3730	N	N/A
	FBHS requirement 4000N:	93.3%		N/A
	SIS & Accumulator protection requirement 7500N:	49.7%		N/A
F.4.3.5.g		σ <sub>max</sub> :	39.4098	MPa
		σ <sub>max</sub> :	3.94E+07	Pa
		σ <sub>max</sub> :	5.72E+03	psi

ภาพที่ 4.19 แสดง SES ของ Perimeter Shear ของ 3/c/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 SES ของรูปแบบการวางผ้า 6/c/6

EQ		Composite 3-Point Tests	
F.4.3.1.b Minimize deflection in applicator and span fixture. All entries on this tab are in SI. Preferred units are calculated only for output values.			
F.4.3.2.a The flat 3-point test panels measure 275mm x 500mm or 138mm x 500mm. The top and bottom skin must have equal surface area. Panels must have bare edges, with the core exposed.			
Make sure to use stepwise integration: current_force*(current_disp-prev_disp)+previous_total Do not assume steps are identical. INCORRECT: Final_force*final_displacement			
EQ			
F.4.3.1	Dates of tests:	22/2/2022	EQ
F.4.3.4.a	Metallic load applicator 50mm (2in radius):	50 mm	EQ
F.4.3.2.a	Panel maximum width =500mm W:	500 mm	EQ
	Panel Support Span =400mm L:	400 mm	EQ
	Panel Height = 138mm or 275mm h:	275 mm	EQ
	Centroid from bottom:	13.600 mm	EQ
	Panel Thickness:	27.2 mm	EQ
	Core thickness:	23 mm	EQ
	Outer TOP Skin Thickness:	2.1 mm	EQ
	Inner BOTTOM Skin Thickness:	2.1 mm	EQ
	Second moment of inertia I:	214053 mm <sup>4</sup>	EQ
Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region			
EQ			
	x <sub>1</sub>	0.72 mm	EQ
	x <sub>2</sub>	4.6 mm	EQ
	y <sub>1</sub>	854 N	EQ
	y <sub>2</sub>	7976 N	EQ
	Force at panel failure or maximum tested force y <sub>max</sub> :	10144 N	EQ
	Absorbed energy at test panel height:	102.14 J	N/A
EQ			
	Two Size B tubes uncorrected gradient:	1766 N/mm	EQ
	275mm panel uncorrected gradient:	1836 103.95%	EQ
EQ			
	Uncorrected skin modulus of elasticity E:	11.43 GPa	EQ
	Uncorrected skin modulus of elasticity E:	1.14E+10 Pa	EQ
	Uncorrected skin modulus of elasticity E:	1.66E+06 psi	EQ
EQ			
	Correction = MIN(Rig Compliance*(y <sub>2</sub> -y <sub>1</sub> ), 0.5*(x <sub>2</sub> -x <sub>1</sub> )) (mm):	1.085 27.96%	EQ
	Corrected skin modulus of elasticity E:	15.87 GPa	EQ
	Corrected skin modulus of elasticity E:	1.59E+10 Pa	EQ
	Corrected skin modulus of elasticity E:	2.30E+06 psi	EQ
	UTS of skins σ <sub>UTS</sub> :	6.45E+01 MPa	EQ
	UTS of skins σ <sub>UTS</sub> :	6.45E+07 Pa	EQ
	UTS of skins σ <sub>UTS</sub> :	9.35E+03 psi	EQ

ภาพที่ 4.20 แสดง SES ของ 3-Point Bending ของ 6/c/6

EQ		Perimeter Shear Test	
F.4.3.5.b The first peak must be used for skin shear strength for composite chassis properties.			
Shear Test Required			
EQ			
F.4.3.1	Dates of tests:	8/4/2022	EQ
F.4.3.5.a	Punch diameter 25mm (1in):	25 mm	EQ
F.4.3.5.e	Maximim fillet 1mm (.040in):	1 mm	EQ
F.4.3.5.b	Sample Length 100mm (4in) min:	100 mm	EQ
	Sample Width 100mm (4in) min:	100 mm	EQ
F.4.3.5.c	Maximum fixture hole diameter 32mm (1.25in):	32 mm	EQ
	Panel Thickness:	27.2 mm	EQ
	Core thickness:	23 mm	EQ
	First Peak Skin Thickness:	2.1 mm	EQ
	Second Peak Skin Thickness:	2.1 mm	EQ
F.4.3.5.g	First peak:	6556 N	EQ
F.4.3.5.h	Highest peak:	6680 N	EQ
	FBHS requirement 4000N:	167.0%	EQ
	SIS & Accumulator protection requirement 7500N:	89.1%	N/A
F.4.3.5.g	σ <sub>shear</sub> :	39.74933 MPa	EQ
	σ <sub>shear</sub> :	3.97E+07 Pa	EQ
	σ <sub>shear</sub> :	5.77E+03 psi	EQ

ภาพที่ 4.21 แสดง SES ของ Perimeter Shear ของ 6/c/6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 SES ของรูปแบบการวางผ้า 10/c/10

EQ		Composite 3-Point Tests	
F.4.3.1.b Minimize deflection in applicator and span fixture.			
All entries on this tab are in SI. Preferred units are calculated only for output values.			
F.4.3.2.a The flat 3-point test panels measure 275mm x 500mm or 138mm x 500mm.			
The top and bottom skin must have equal surface area.			
Panels must have bare edges, with the core exposed.			
Make sure to use stepwise integration: current_force*(current_disp-prev_disp)+previous_total			
Do not assume steps are identical.			
INCORRECT: Final_force*final_displacement			
EQ			
F.4.3.1	Dates of tests:	22/2/2022	EQ
F.4.3.4.a	Metallic load applicator 50mm (2in radius):	50 mm	EQ
F.4.3.2.a	Panel maximum width =500mm W:	500 mm	EQ
	Panel Support Span =400mm L:	400 mm	EQ
	Panel Height = 138mm or 275mm h:	275 mm	EQ
Centroid from bottom:	14.000 mm	Panel Thickness:	28 mm
		Core thickness:	23 mm
		Outer TOP Skin Thickness:	2.5 mm
		Inner BOTTOM Skin Thickness:	2.5 mm
		Second moment of inertia I:	270216 mm <sup>4</sup>
Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region			
EQ			
x <sub>1</sub>	0.91 mm	y <sub>1</sub>	1990 N
x <sub>2</sub>	6.06 mm	y <sub>2</sub>	17942 N
Force at panel failure or maximum tested force y <sub>max</sub> : 19504 N			
Absorbed energy at test panel height: 189.91 J			
Two Size B tubes uncorrected gradient: 1766 N/mm			
275mm panel uncorrected gradient: 3097 175.41%			
Uncorrected skin modulus of elasticity E: 15.28 GPa			
Uncorrected skin modulus of elasticity E: 1.53E+10 Pa			
Uncorrected skin modulus of elasticity E: 2.22E+06 psi			
Correction = MIN(Rig Compliance*(y2-y1), 0.5*(x2-x1)) (mm): 2.430 47.19%			
Corrected skin modulus of elasticity E: 28.94 GPa			
Corrected skin modulus of elasticity E: 2.89E+10 Pa			
Corrected skin modulus of elasticity E: 4.20E+06 psi			
UTS of skins σ <sub>UTS</sub> : 1.01E+02 MPa			
UTS of skins σ <sub>UTS</sub> : 1.01E+08 Pa			
UTS of skins σ <sub>UTS</sub> : 1.47E+04 psi			

ภาพที่ 4.22 แสดง SES ของ 3-Point Bending ของ 10/c/10

EQ		Perimeter Shear Test	
F.4.3.5.b The first peak must be used for skin shear strength for composite chassis properties.			
Shear Test Required			
EQ			
F.4.3.1	Dates of tests:	8/4/2022	EQ
F.4.3.5.a	Punch diameter: 25mm (1in):	25 mm	EQ
F.4.3.5.e	Maximim fillet 1mm (.040in):	1 mm	EQ
F.4.3.5.b	Sample Length 100mm (4in) min:	100 mm	EQ
	Sample Width 100mm (4in) min:	100 mm	EQ
F.4.3.5.c	Maximum fixture hole diameter 32mm (1.25in):	30 mm	EQ
	Panel Thickness:	28 mm	EQ
	Core thickness:	23 mm	EQ
	First Peak Skin Thickness:	2.5 mm	EQ
	Second Peak Skin Thickness:	2.5 mm	EQ
F.4.3.5.g	First peak:	6486 N	EQ
F.4.3.5.h	Highest peak:	11070 N	EQ
	FBHS requirement 4000N:	276.8%	N/A
	SIS & Accumulator protection requirement 7500N:	147.6%	EQ
F.4.3.5.g		σ <sub>shear</sub> : 33.03293 MPa	
		σ <sub>shear</sub> : 3.30E+07 Pa	
		σ <sub>shear</sub> : 4.79E+03 psi	

ภาพที่ 4.23 แสดง SES ของ Perimeter Shear ของ 10/c/10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

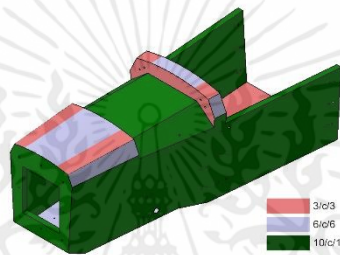
## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

หลังจากการทดสอบคุณสมบัติของแต่ละแผ่นทดสอบแล้ว ในบทนี้ก็จะกล่าวถึงผลลัพธ์จากการนำค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุมาใช้ในการสร้าง Monocoque

#### 5.2 Final Layup Schedule

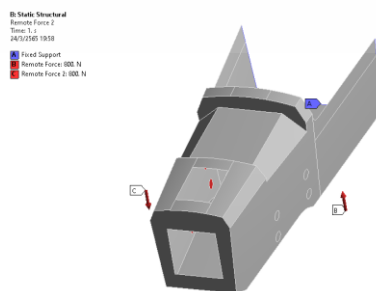


ภาพที่ 5.1 แสดง Layup Schedule

จำนวนชั้นผ้าของแต่ละส่วนของรถจะถูกกำหนดโดย SES จากนั้นแสดงให้เห็นในแบบจำลองของ Monocoque ดังภาพที่ 5.1 เนื่องจาก โดยส่วนที่เป็นสีขาวจะเป็นการวางผ้า 3/c/3 ซึ่งเป็นจำนวนชั้นที่น้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ในส่วนของ Unregulated section ก็ใช้การวางผ้าแบบนี้เหมือนกันเนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่มีกติการองรับ

#### 5.3 Torsional Stiffness

ใช้ Ansys ในการคำนวณหาค่า Torsional Stiffness โดยการกำหนดการยึดที่ Main hoop และใส่แรงเข้าที่ปลายของ Wishbone ทั้งสองข้างให้เป็นแบบ Couple Moment

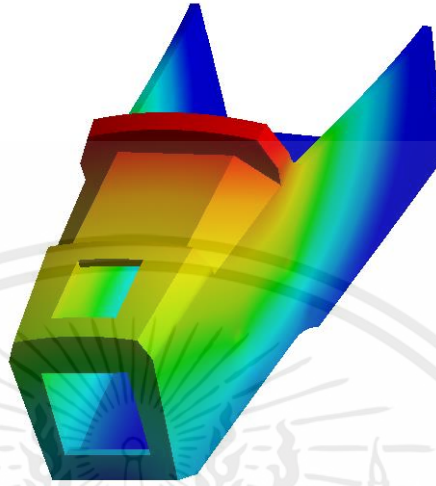
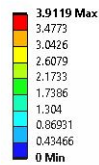


ภาพที่ 5.2 แสดง Condition ในแบบจำลองของ Ansys

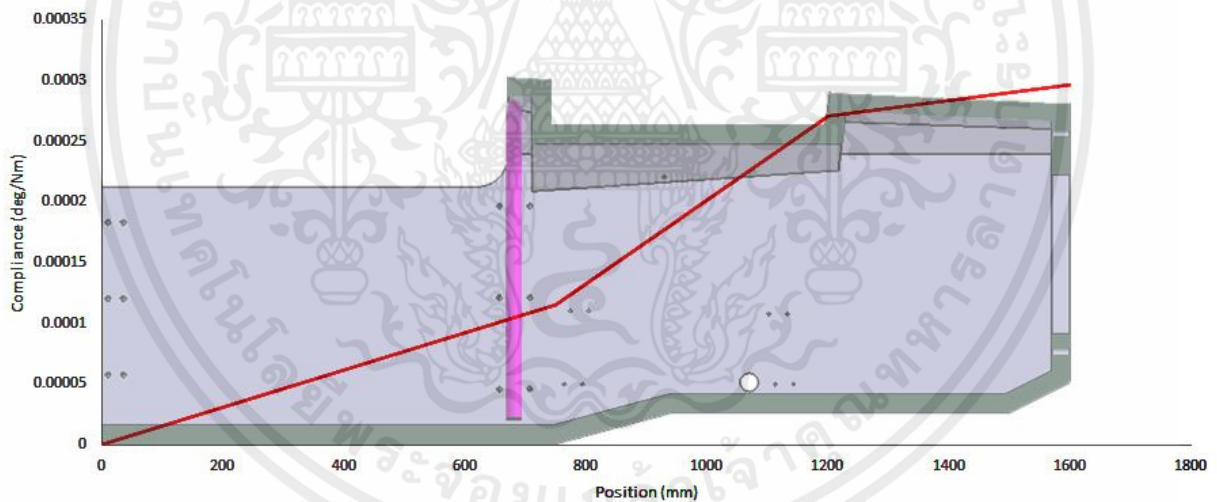
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์จากการจำลองเมื่อใส่ Couple Moment ไปที่ 800 Nm จะได้ค่า Torsional Stiffness อยู่ที่ 3367 Nm/deg

B: Static Structural  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1  
 24/3/2565 19:59



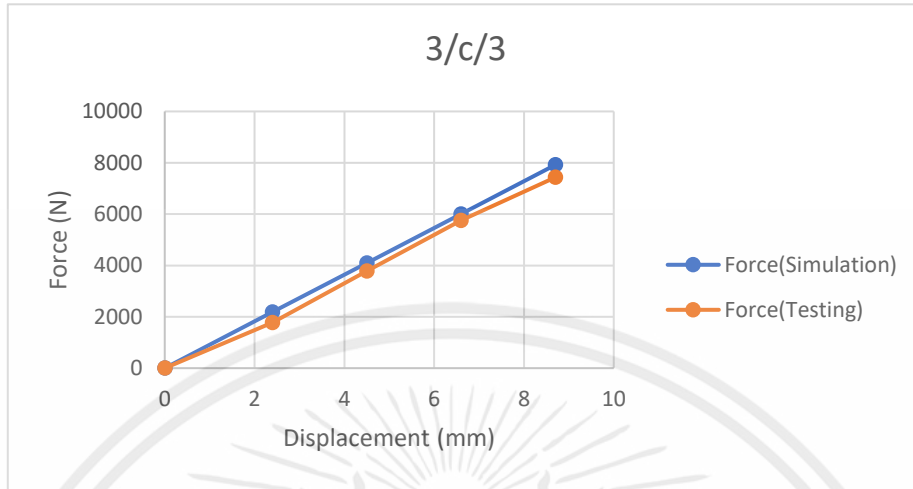
ภาพที่ 5.3 แสดงผลลัพธ์การจำลองแบบ Deformation



ภาพที่ 5.4 แสดง Compliance ตามยาวของ Monocoque

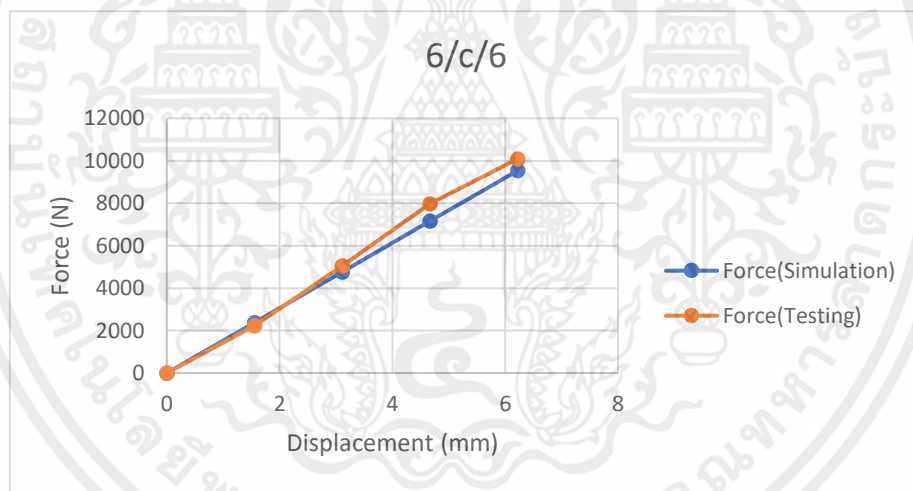
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลของการทดสอบเทียบกับผลจาก Ansys



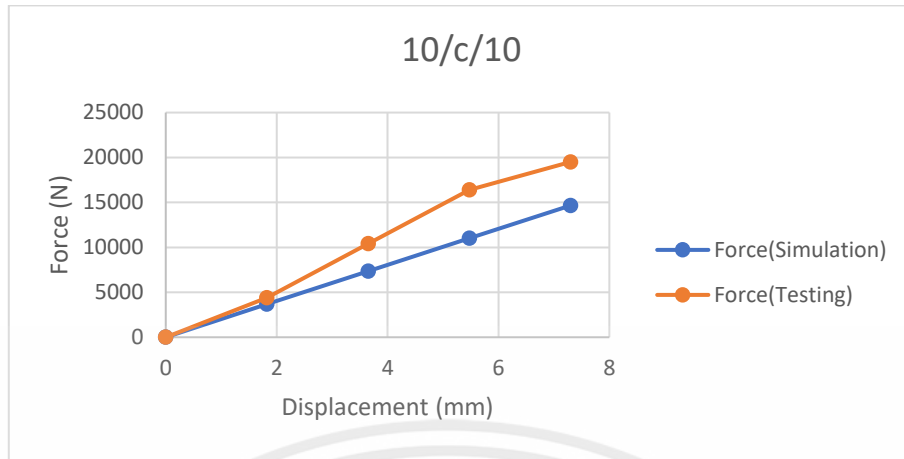
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงจากการทดสอบและจาก Ansys ของ 3/c/3

โดยที่ความแตกต่างระหว่างการ Simulation และการ Testing อยู่ที่ 6.13% เมื่อเทียบกับผล Simulation



ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบแรงจากการทดสอบและจาก Ansys ของ 6/c/6

โดยที่ความแตกต่างระหว่างการ Simulation และการ Testing อยู่ที่ 5.80% เมื่อเทียบกับผล Simulation



ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบแรงจากการทดสอบและจาก Ansys ของ 10/c/10

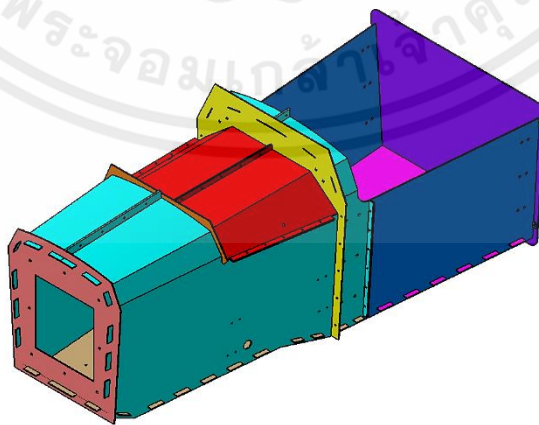
โดยที่ความแตกต่างระหว่างการ Simulation และการ Testing อยู่ที่ 33.1% เมื่อเทียบกับผล Simulation

#### 5.4 การสร้าง Mold

Mold ถูกสร้างขึ้นโดยเลือกใช้เป็น Aluminum Mold แทนที่แบบเป็นไฟเบอร์กลาส เนื่องจากการใช้ Mold แบบนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายและลดระยะเวลาในการจัดสร้าง Mold ไปได้ค่อนข้างมาก



ภาพที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้าง Mold ของ Traditional Mold และ Aluminum Mold



ภาพที่ 5.7 แสดง CAD ของ Aluminum Mold

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 การคำนวณปริมาณของผ้า

คำนวณปริมาณของผ้าที่ใช้โดยการนำแต่ละส่วนและจำนวนของตัว Monocoque มาและนำมาวางแบบตัด Nesting โดยใช้โปรแกรม Deepnest เพื่อให้ได้ประมาณการตัดผ้าที่น้อยที่สุด โดยใช้ผ้าประมาณ 40 ตารางเมตร



ภาพที่ 5.6 แสดง Nesting ของผ้าใน Deepnest

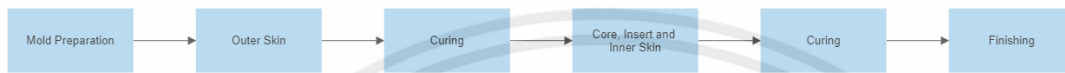


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### กรรมวิธีการผลิตและสรุปผล

#### 6.1 กรรมวิธีการผลิต



ภาพที่ 6.1 แสดงขั้นตอนในการผลิตชิ้นงาน

การผลิตชิ้นงานแบ่งการอบเป็น 2 รอบ เนื่องจากว่าถ้าใช้การอบ 1 รอบ จะทำให้ผ้า Carbon Fiber Prepreg ชั้นแรกๆที่วางจะไม่แนบสนิทกับผิว Mold โดยการอบรอบแรกจะเป็นการอบผิวนอกของ Monocoque จากนั้นเมื่ออบเสร็จก็ทำการใส่ Aluminum Honeycomb และผิวชั้นในจากนั้นนำไปอบรอบสุดท้าย และทำการตกแต่งหลังจากชิ้นงานอบเสร็จสิ้น

#### 6.2 อุปกรณ์ที่ต้องใช้

ในการผลิตชิ้นงาน Carbon Fiber Prepreg มีด้วยกันอยู่ 2 วิธี คือ OOA (Out Of Autoclave) และ Autoclave Curing โดยต่างกันที่ OOA จะไม่ใช่ Autoclave ในการขึ้นรูปชิ้นงาน ใช้เพียงแค่ Oven ในการอบชิ้นงาน โดยอุปกรณ์ที่ต้องใช้ มีดังนี้

##### Aluminum Profile

Aluminum Profile ถูกใช้เพื่อเป็น Insert บริเวณที่ต้องใส่ Bolt เนื่องจาก Aluminum Honeycomb ไม่สามารถรับแรงในรูปแบบ Point Load ได้ดี จึงต้องมี Insert บริเวณที่รับภาระประเภทนี้

##### Release Film

Release Film คือฟิล์มที่ใช้เพื่อป้องกัน Resin จาก Carbon Fiber Prepreg มาติดกับ Breather Cloth

##### Breather Cloth

Breather Cloth คือผ้าที่ใช้เพื่อให้อากาศเดินทางออกจาก Vacuum Bag สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Vacuum Bag

ใช้เพื่อครอบชิ้นงานทั้งชิ้นงานและดูดอากาศออก เพื่อให้ชิ้นงานถูกกดด้วยความดันบรรยากาศ

### Sealant Tape

ใช้เพื่อต่อ Vacuum Bag เข้าด้วยกัน หรือสามารถใช้ปิดรอยรั่วใน Vacuum Bag

### Spray Glue

ใช้เพื่อติดอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยดิน เพื่อไม่ให้หลุดในกรณีที่อยู่ด้านบนหรือด้านข้าง

### Mold Sealer

ใช้เพื่อปกปิดรูเล็กๆ บนพื้นผิวของ Mold

### Mold Release

ใช้เพื่อไม่ให้ Resin จาก Carbon Fiber ติดกับผิวของ Mold

### Autoclave

ใช้เพื่ออบชิ้นงานโดยมีสามารถตั้งอุณหภูมิและความดันได้

## 6.3 การผลิตชิ้นงาน

นำ Release Agent มาทาลงบน Mold เพื่อให้ผิวชิ้นงานติดกับ Mold วาง Carbon Fiber Prepreg ที่ได้เตรียมไว้มาวางบน Mold ในทิศ 0 องศาสลับกับ 45 องศาจากนั้นรีดให้เรียบ และตัดส่วนเกินออกในแต่ละชั้น โดยที่มีจำนวนชั้นของ Carbon Fiber Prepreg ตามที่ได้กล่าวไปในบทที่ 5



ภาพที่ 6.2 แสดงการทำให้ Carbon Fiber Prepreg เรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติด Release Film บน Carbon Fiber Prepreg โดยใช้สเปรย์กาว เพื่อกัน Breather Cloth ติดกับ  
ชิ้นงานจากนั้นติด Breather Cloth บน Release Film โดยใช้ Spray Glue เพื่อกันชิ้นงานทำ Vacuum Bag รั่ว



ภาพที่ 6.3 แสดงการติด Release Film



ภาพที่ 6.4 แสดงการติด Breather Cloth

บรรจุชิ้นงานลงใน Vacuum Bag แล้วดูดอากาศออก โดยรีด Vacuum Bag ให้เข้ามุมของชิ้นงานมากที่สุดเพื่อกันรั่วขณะอยู่ใน Autoclave จากนั้นตรวจสอบรอยรั่วของ Vacuum Bag โดยใช้ Pressure Gauge



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ **ภาพที่ 6.5** แสดงการบรรจุชิ้นงานลงใน Vacuum Bag ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.6 แสดงวิธีการใช้ครีว Vacuum Bag

นำชิ้นงานเข้าอบใน Autoclave ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และ 120 องศาเซลเซียสอีกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ความดัน 2 bar



ภาพที่ 6.7 แสดงการนำชิ้นงานเข้าอบใน Autoclave

นำชิ้นงานออกจาก Vacuum Bag จากนั้นนำ Breather Cloth และ Release Film ออกจากชิ้นงานแล้ว เจาะรู Bolt สำหรับยึด Mold กับ Aluminum Profile

ตัด Aluminum Honeycomb ให้ได้ขนาดที่ต้องการเพื่อแทรกในชั้นกลางของชิ้นงานโดยเว้นช่องว่างไว้สำหรับเพื่อวาง Aluminum Profile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วาง Honeycomb ที่ได้เตรียมไว้วางลงบนชิ้นงานจากนั้นใช้ Bolt และ Nut เพื่อยึด Aluminum Profile กับ Mold จากนั้นทำการวาง Carbon Fiber Prepreg บน Aluminum Honeycomb



ภาพที่ 6.8 แสดงการ Aluminum Honeycomb ลงบนชิ้นงาน



ภาพที่ 6.9 แสดงการวาง Carbon Fiber Prepreg ชิ้นใน

ติด Release Film บน Carbon Fiber Prepreg โดยใช้สเปรย์กาว เพื่อกัน Breather Cloth ติดกับ ชิ้นงานจากนั้นติด Breather Cloth บน Release Film โดยใช้สเปรย์กาว เพื่อกันชิ้นงานทำ Vacuum Bag รั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.10 แสดงการวาง Release Film



ภาพที่ 6.11 แสดงการวาง Breather Cloth

บรรจุชิ้นงานลงใน Vacuum Bag แล้วดูดอากาศออก โดยดัน Vacuum Bag ให้เข้ามุมของชิ้นงานมากที่สุดเพื่อกันรั่วขณะอยู่ใน Autoclave จากนั้นตรวจสอบรอยรั่วของ Vacuum Bag โดยใช้ Pressure Gauge



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ **ภาพที่ 6.12** แสดงการบรรจุชิ้นงานลงใน Vacuum Bag ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.13 แสดงการดูดอากาศออกจาก Vacuum Bag



ภาพที่ 6.14 แสดงการนำชิ้นงานเข้าอบใน Autoclave

นำชิ้นงานออกจาก Vacuum Bag จากนั้นนำ Breather Cloth และ Release Film ออกจากชิ้นงาน



ภาพที่ 6.15 แสดงการนำชิ้นงานออกจาก Vacuum Bag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปผลการทดลอง

#### 7.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากข้อมูลจากการทดสอบแผ่นทดสอบสามารถระบุรูปแบบการวางผ้าของส่วนต่างๆของ Monocoque ได้ดังนี้

Section	Layup
Front Bulkhead	10/c/10
Front Bulkhead Support	10/c/10
Front Hoop Brace	6/c/6
Side Impact Structure	10/c/10
Unregulated Area	3/c/3

ตารางที่ 7.1 แสดงรูปแบบการวางผ้าในแต่ละโครงสร้าง

2. จากการทำการวิเคราะห์ Torsional Stiffness ของ Monocoque ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ค่า Torsional Stiffness อยู่ที่ 3367 Nm/deg

3. เมื่อทำการสร้าง Monocoque เสร็จแล้ว นำไปชั่งน้ำหนักได้ 14.3 kg ซึ่งเบากว่า Monocoque รุ่นก่อนหน้าที่ 25 แต่ยังไม่รวมโครงเหล็กด้านหลังอีก 13 kg เมื่อรวมโครงเหล็กด้านหลังแล้ว จะทำให้น้ำหนักโดยรวมของ Monocoque อยู่ที่ 27.3 kg

#### 7.2 ปัญหาที่พบเจอ

1. Mold ที่ทำจากอลูมิเนียม เมื่อนำมาประกอบกันแล้วเกิดมีเศษเหล็กจากการตัดติดอยู่ที่รู ทำให้ไม่สามารถเสียบเข้าไปได้เลย จึงต้องความรู้เพิ่มเติมทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน และเนื่องจากเราไม่สามารถทำให้ Aluminum โค้งตามแบบได้ ทำให้พื้นผิวบางที่ต้องขัดแต่งเพิ่ม

2. Mold อลูมิเนียมเกิดการขยายตัวเมื่อเข้าตู้อบ ทำให้ Mold อ่อนลง ทำให้ผ้าชั้นแรกหลุดออกจาก Mold เมื่ออบเสร็จ

3. Aluminum Honeycomb ไม่สามารถงอได้ตามมุม ผู้จัดทำจึงแก้ปัญหาโดยการตัดเป็นชิ้นเล็กๆเพื่อใส่และพบปัญหาที่ตามมาคือ บริเวณที่เป็นส่วนต่อของ Aluminum Honeycomb และ Carbon Fiber Prepreg เกิดหลุมยุบเนื่องจากแรงดันภายใน Autoclave

4. เนื่องจากอูรรอยต่อระหว่าง Mold ไม่สนิทจึงทำให้เรซินจาก Carbon Fiber Prepreg ไหลออกมาติดกับ Breather Cloth ทำให้ถอด Mold ยากขึ้น

### 7.3 ข้อเสนอแนะ

1. เมื่อทำ Mold จากอลูมิเนียมควรใช้ส่วนโค้งให้น้อยที่สุด หรือถ้าจะทำส่วนโค้งควรทำ Jig ขึ้นมาเพื่อใช้ตอนประกอบและตอนตัดส่วนโค้งด้วย
2. เมื่อทำการเจาะรูขึ้นงานควรมี Jig ในการเจาะรูด้วย เนื่องจากรูบางรูเมื่อเจาะด้วยสว่านมือ ทำให้รูนั้นไม่ตรงศูนย์
3. ควรทำการ Debulk ชั้นผ้ามากกว่านี้ เพื่อให้ผ้าแนบสนิทกับ Mold มากขึ้น
4. นำผ้าแบบ Unidirectional มาใช้ เพื่อลดน้ำหนักและเสริมความแข็งแรงตามทิศทางที่ต้องการ

## บรรณานุกรม

- [1] FaSTTUBe, Technical University of Berlin (2020)  
URL:[www.facebook.com/FaSTTUBe/photos/3193182217359995](https://www.facebook.com/FaSTTUBe/photos/3193182217359995)
- [2] Cornell Racing, Cornell University (2019) URL:  
[www.facebook.com/CornellFSAE/photos/10157377381121614](https://www.facebook.com/CornellFSAE/photos/10157377381121614)
- [3] NUS Formula SAE, National University of Singapore (2020) URL:  
[www.facebook.com/510071592428194/photos/pb.100063649956956.-2207520000../3466542823447708/](https://www.facebook.com/510071592428194/photos/pb.100063649956956.-2207520000../3466542823447708/)
- [4] SAE International, 2022 Formula SAE Rules URL:  
[www.fsaenline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx](https://www.fsaenline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx).
- [5] Meghana P. Kamble (2019), **DESIGN AND ANALYSIS OF A COMPOSITE MONOCOQUE FOR STRUCTURAL PERFORMANCE**. Purdue University.
- [6] Easy Composites (2021) URL: <https://www.easycomposites.co.uk/xc110-210g-22-twill-3k-prepreg-carbon-fibre>
- [7] Easy Composites (2021) URL: <https://www.easycomposites.co.uk/6mm-aluminium-honeycomb>
- [8] Leon Shi and Kieran Rice (2019), **Carbon Fiber Composite Monocoque Chassis for a Formula Student Race Car**. Monash university.
- [9] Hexcel Composites (2000), HexWeb Honeycomb Sandwich Design Technology, URL:  
[www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf).  
, access on 15/11/2021
- [10] anisoprint.support (2019), Composite material. Structural Composite, URL:  
<https://support.anisoprint.com/2019/10/02/composite-materials-structural-composites/>
- [11] Stack Sequence, URL:  
[https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.compmat/compmat\\_ug\\_modeling.3.09.html#1624563](https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.compmat/compmat_ug_modeling.3.09.html#1624563)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้