

ออกแบบและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อก
สำหรับรถประหยัดพลังงานไฟฟ้า

DESIGN AND SIMULATE THE STRENGTH OF A MONOCOQUE SANDWICH
STRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLE



ทรงยศ มีชัย
ธนกร โชคเจริญ
ธนพล ศรีเปารยะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ออกแบบและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อก
สำหรับรถประหยัดพลังงานไฟฟ้า

DESIGN AND SIMULATE THE STRENGTH OF A MONOCOQUE SANDWICH
STRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND SIMULATE THE STRENGTH OF A MONOCOQUE SANDWICH
STRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLE



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

ออกแบบและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อกสำหรับรถประหยัดพลังงานไฟ

ฟ้า

DESIGN AND SIMULATE THE STRENGTH OF A MONOCOQUE SANDWICH
STRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLE

ผู้จัดทำ

1. นาย ทรงยศ มีชัย รหัสประจำตัว 57010506
2. นาย ธนกร โชคเจริญ รหัสประจำตัว 57010531
3. นาย ธนพล ศรีเปารยะ รหัสประจำตัว 57010551



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อก
สำหรับรถประหยัดพลังงานไฟฟ้า

นายทรงยศ มีชัย 57010506

นายธนกร โชคเจริญ 57010531

นายธนพล ศรีเปารยะ 57010551

ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบตัวถังรถและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อก(Monocoque)ของรถประหยัดพลังงานไฟฟ้า เพื่อเข้าแข่งขันในรายการ Shell Eco Marathon Asia 2018 โดยการออกแบบตัวรถจะต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่สุดเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนตัวรถและจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้กลุ่มผู้ทำการวิจัยต้องการทดสอบแรงที่กระทำกับโครงสร้างแซนวิชที่วัสดุแกนกลางจาก Foam pvc ความหนาแน่น 60 kg/m^3 ขนาด $300 \times 100 \text{ mm}$. โดยใช้วิธีการจำลองความแข็งแรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงกดแบบแรงกระทำเป็น point load ที่มีจุดรองรับอย่างง่าย 2 ด้าน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบกับการทดลอง มีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือมากจากนั้นได้ทำการออกแบบโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อกเพื่อเลือกรูปแบบในการสร้างโครงสร้างจริง ซึ่งความหนาที่เลือกใช้ในการสร้างโครงสร้างจริงคือ 20 มิลลิเมตร และการวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลับลาย 45 องศาทำให้โครงสร้างมีความสามารถต้านทานแรงดัดได้ดีกว่าถึง 20 % เมื่อเทียบกับการวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลายเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถสร้างโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา สามารถคงความแข็งแรงต่อการใช้งาน และจะไม่เกิดความเสียหายหากใช้งานในรูปแบบที่กำหนดไว้ตามกฎการแข่งขัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND SIMULATE THE STRENGTH OF A MONOCOQUE SANDWICH
STRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLE

Mr. SONGYOD MEECHAI 57010506

Mr. THANAKORN CHOKCHAROEN 57010531

Mr. TANAPOL SRIPAORAYA 57010551

Asst.Prof.Dr. PONGSAK KUMMUL Adviser

Year 2560

Abstract

The purpose of this research is to design and simulate the strength of the monocoque sandwich structure of electric car to compete in the Shell Eco Marathon Asia 2018. The car is designed to be as lightweight as possible to reduce electrical energy consumption and strong enough to operate. In this experiment, the authors attempted to test the force applied to the 300 × 100 mm sandwich structure using numerical simulation by finite element analysis and comparing the test results from the test machine with simple 2-point support the error between the test results and the experiment was not more than 5 % , making the analysis with computer software reliable. Then design the sandwich monocoque structure to choose the model to create real monocoque structure. And the 45-degree rotation angle of prepregs which gives it the ability to withstand up to 20% better bending strength compared to the 0-degree rotation angle of prepregs. It can also be used to create a lightweight structure that will maintain its strength and will not be damaged if used in the manner consistent by the competition rules.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือในด้าน คำแนะนำ การตรวจแก้ไข การติดตามความก้าวหน้าในการทำปริญญานิพนธ์ การดูแลเอาใจใส่เป็น อย่างดีและสม่ำเสมอตลอดการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง ในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องทดสอบแรง ขอขอบคุณชมรม Innogen KMITL สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้ออำนวยสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ รวมไปถึงการยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้

ผู้จัดทำขอระลึกในพระคุณนี้ ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ผู้จัดทำขอกราบ ขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทีมงานวิจัยขอบแต่ ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ช่วยเหลือมาโดยตลอดระยะเวลาในการทางานวิจัย

นายทรงยศ มีชัย

นายธนกร โชคเจริญ

นายธนพล ศรีเปารยะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.5 เงื่อนไขในการออกแบบเบื้องต้น.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบโครงสร้างหลักของยานยนต์ (Construction of Automotive).....	4
2.2.1 แบบโครงอิสระ (Independent frame type).....	4
2.2.1 แบบโครงในตัว (Unibody).....	5
2.2 ทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์.....	6
2.2.1 แรงกระทำเมื่อรถจอดหยุดนิ่ง.....	6
2.2.2 แรงกระทำเมื่อรถมีความเร่งสูงสุด.....	7
2.2.3 แรงกระทำเมื่อรถมีความหน่วงสูงสุด.....	7

2.2.4	แรงกระทำขณะเลี้ยวโค้ง.....	8
2.3	ทฤษฎีโครงสร้างแซนด์วิช.....	9
2.3.1	ประวัติความเป็นมาของโครงสร้างแซนด์วิช.....	9
2.3.2	องค์ประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช.....	10
2.3.3	ความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแซนด์วิช.....	16
2.3.4	ทฤษฎีของคานแบบแซนด์วิช.....	21
บทที่ 3	การออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรง.....	26
3.1	แนวทางในการออกแบบเบื้องต้น.....	26
3.2	กระบวนการการออกแบบ (Flow chart diagram).....	27
3.3	ขั้นตอนการใช้โปรแกรม ABAQUS สำหรับการออกแบบชิ้นงาน.....	28
บทที่ 4	กรรมวิธีผลิตและอุปกรณ์.....	44
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด.....	45
4.2	ขั้นตอนการทำชิ้นงานทดสอบ.....	47
บทที่ 5	วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ.....	51
5.1	รายละเอียดการทดสอบ.....	51
5.2	ขั้นตอนการทดสอบโครงสร้างแซนด์วิช.....	53
5.3	ผลการทดสอบ.....	54
5.4	กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลทางทดสอบและ	
	และการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	57
5.5	การออกแบบโครงสร้างแซนด์วิช.....	58
5.5.1	กำหนดขนาด.....	58
5.5.2	ออกแบบโมเดลโดยใช้ Solid work.....	58
5.5.3	วิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้ ABAQUS.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3.1	สภาวะการตัด.....	58
5.5.3.2	สภาวะการบิด (Torsion).....	59
5.5.3.3	สภาวะการชน (Impact).....	60
5.5.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	61
5.5.5	สร้างโครงสร้างจริง.....	65
บทที่ 6	สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	68
6.1	สรุปผลการทดสอบ.....	68
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก	72
ภาคผนวก ข	76

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงข้อดีข้อเสียของผิวหน้าแต่ละประเภท.....	12
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของผิวหน้าแต่ละประเภท.....	13
ตารางที่ 2.3 แสดงประเภทของกาวและวัสดุที่เหมาะสมกับกาวชนิดนั้น.....	14
ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของกาวอีพ็อกซี่.....	14
ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของแกนกลางแต่ละชนิด.....	15
ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ k_b และ k_s ของจุดรองรับและรูปแบบแรงที่กระทำต่อแกนวิช.....	25
ตารางที่ 4. 1 แสดงแบบชิ้นงานทดสอบ 6 แบบ	44
ตารางที่ 5.1 ตารางชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบการกด.....	55
ตารางที่ 5.3 ตารางเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์	57
ตาราง 5.4 ผลวิเคราะห์โครงสร้างรถ.....	61
ตาราง 5.5 ผลวิเคราะห์โครงสร้างรถ ที่ความหนาแกนขนาดต่างๆ	62

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบโครงอิสระ (Independent frame type).....	4
รูปที่ 2.2 แบบโครงในตัว (Unibody).....	5
รูปที่ 2.3 ขนาดรถที่ใช้ในการออกแบบ	6
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich Structure).....	10
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น (Stress-strain Diagram) ของ วัสดุเหนียวและเปราะ.....	10
รูปที่ 2.6 รูปแบบความเสียหายในแท่งแซนวิช (a) ความเสียหายครากที่ผิวหน้า (b) ความ เสียหายเฉือนที่แกนกลาง (c และ d) การย่นที่ผิวหน้า (e) การโก่งทั่วไป (f) การย่นแบบเฉือน (g) การ เป็นลวดลายที่ผิวหน้า (h) รอยหยักเฉพาะที่.....	16
รูปที่ 2.7 ความเสียหายครากของผิวหน้า.....	17
รูปที่ 2.8 ความเสียหายจากแรงเฉือนที่แกนกลาง.....	17
รูปที่ 2.9 การย่นที่ผิวหน้า.....	18
รูปที่ 2.10 การโก่งตัวของวัสดุแซนวิช.....	18
รูปที่ 2.11 ความเสียหายของการย่นแบบเฉือน.....	19
รูปที่ 2.12 การยุบตัวหรือโก่งงอระหว่างเซลล์.....	19
รูปที่ 2.13 รอยหยักที่เกิดขึ้นที่แกน.....	20
รูปที่ 2.14 ขนาดของคานแบบแซนด์วิชและภาพตัดขวาง (ที่มา Howard G. Allen, 1969).....	21
รูปที่ 2.15 การกำหนดเครื่องหมาย รูป a; ระยะยวบตัวที่เป็นบวก ความชันและส่วนโค้งโมเมนต์ดัดที่ เป็นลบ รูป b; แรงเฉือนที่เป็นบวก ความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน	22
รูปที่ 2.16 ระยะโก่งตัวของคาน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการออกแบบ	27
รูปที่ 3.2 แสดงการกำหนดลักษณะชิ้นงานทดสอบ.....	28
รูปที่ 3.3 แสดงการใส่ Reference Point	29
รูปที่ 3.4 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์.....	30
รูปที่ 3.5 แสดงจำนวนชั้นของชิ้นงานทดสอบ.....	31
รูปที่ 3.6 แสดงการเลือกชิ้นงานทดสอบเพื่อใส่ค่าคุณสมบัติ	31
รูปที่ 3.7 แสดงค่าคุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบในแต่ละชั้น	32
รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องทดสอบการกดแบบสามจุด	33
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการวางตำแหน่งการกดแบบสามจุดในโปรแกรม.....	33
รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของจุดสัมผัส.....	34
รูปที่ 3.11 แสดงการสร้างจุดสัมผัส (Interaction)	35
รูปที่ 3.12 แสดงการกำหนดจุดสัมผัส.....	35
รูปที่ 3.13 แสดงการสร้างจุดสัมผัส (Interaction)	36
รูปที่ 3.14 แสดงการกำหนดลักษณะของหัวกด	36
รูปที่ 3.15 แสดงการกำหนดค่า BC ของหัวกด	37
รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของหัวกดและจุดรองรับที่ทำการใส่ค่า BC เรียบร้อย.....	38
รูปที่ 3.17 แสดงการสร้างเมส (Mesh).....	39
รูปที่ 3.18 แสดงการสร้างเมส (Mesh).....	40
รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างเมส.....	40
รูปที่ 3.20 แสดงการสร้าง Job.....	41
รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการคำนวณ.....	41
รูปที่ 3.22 แสดงการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบของชิ้นงานทดสอบ..	42

รูปที่ 3.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบของชิ้นงานทดสอบ.....	43
รูปที่ 4.1 Vacuum Bag.....	45
รูปที่ 4.2 Sealan.....	45
รูปที่ 4.3 Vacuum Valve.....	46
รูปที่ 4.4 Catch Pot.....	46
รูปที่ 4.5 Vacuum Pump.....	47
รูปที่ 4.6 แสดงการวางผ้าคาร์บอนและทา Epoxy Resin.....	47
รูปที่ 4.7 แสดงการวางแผ่นโฟมบนผ้าคาร์บอนหลังจากทาExpoxy Resin.....	48
รูปที่ 4.8 แสดงการติดSealant Tape หลังจากวางผ้าคาร์บอนสลับแผ่นโฟม.....	48
รูปที่ 4.9 แสดงการติดตั้งVacuum Valve และประกบVacuum Bag	49
รูปที่ 4.10 แสดงภาพเมื่อเครื่องทำงาน.....	50
รูปที่ 4.11 ชิ้นงานทดสอบที่เสร็จสมบูรณ์ จำนวน 6 ชิ้น.....	50
รูปที่ 5.1 เครื่องกด (Triaxial Compression Test).....	51
รูปที่ 5.2 proving ring.....	52
รูปที่ 5.3 ฐานรองสำหรับทดสอบ 3 point bending	52
รูปที่ 5.4 เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาด	53
รูปที่ 5.4 เครื่องทดสอบ	54
รูปที่ 5.5 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 1A.....	55
รูปที่ 5.6 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 2A.....	56
รูปที่ 5.7 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 3A.....	56
รูปที่ 5.8 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 1B.....	57
รูปที่ 5.9 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 2B.....	57

รูปที่ 5.10 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 3B.....	58
รูปที่ 5.11 กราฟผลการทดสอบเฉลี่ย.....	59
รูปที่ 5.12 ออกแบบโครงสร้างด้วย Solid work.....	60
รูปที่ 5.13 แสดงการกำหนดจุดยึดและใส่ภาระของแรง.....	61
รูปที่ 5.14 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการตัด.....	61
รูปที่ 5.15 แสดงการกำหนดจุดยึดและใส่ภาระของแรง.....	62
รูปที่ 5.16 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการบิด.....	62
รูปที่ 5.17 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการชน.....	63
รูปที่ 5.18 กราฟรวมผลการวิเคราะห์โครงสร้างรถภายใต้สภาวะต่างๆในหน่วย มิลลิเมตร.....	65
รูปที่ 5.19 ตู้อากาศออกจากแผ่นโครงสร้างคาร์บอนไฟเบอร์.....	65
รูปที่ 5.20 เขียนแบบชิ้นงานตามที้ออกแบบ.....	66
รูปที่ 5.21 การตัดชิ้นงานด้วยเลื่อยไฟฟ้า.....	66
รูปที่ 5.22 ประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง.....	67
รูปที่ 5.23 เสริมผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ตามแนวที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรง.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ทุกวันนี้น้ำมันในโลกมีการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณการใช้ น้ำมันสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งในงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการคมนาคมขนส่ง ด้วยเหตุนี้หลายภาคส่วนจึงตระหนัก ถึงการใช้พลังงานทดแทนแทนการใช้ น้ำมัน ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจาก ไฟฟ้าเป็นพลังงานสะอาดและไม่ปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม

ผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความสำคัญนี้จึงมีความสนใจเกี่ยวกับยานพาหนะไฟฟ้าประหยัดพลังงานจึงได้ เข้าร่วมชมรม Innogen KMITL ซึ่งเป็นทีมในนามสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบังลงแข่งขันรายการ shell eco-marathon Asia ซึ่งดำเนินการโดยเชลล์ เป็นการแข่งขันที่ทำ ทายนักเรียนนักศึกษาจากทั่วเอเชียเพื่อออกแบบ สร้างและขับรถที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากที่สุด ทั้งนี้ไม่เพียงแค่ออกแบบประหยัดพลังงานเท่านั้นแต่เชลล์ให้ความสำคัญของความปลอดภัยมาเป็นอันดับแรก โดยแต่เดิมนั้นจะลงแข่งเฉพาะในประเภทรถต้นแบบ 3 ล้อ ผู้จัดทำจึงมีความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบ ยานพาหนะไฟฟ้าประหยัดพลังงานประเภท 4 ล้อ โดยมุ่งเน้นการออกแบบโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา แต่แข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของรถรวมถึงแรงที่กระทำ ง่ายต่อการซ่อมบำรุง และปลอดภัยต่อผู้ใช้ รถใช้ถนน ผู้จัดทำจะใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้าง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาโครงสร้างรถประเภทโมโนค็อก(Monocoque)และคำนวณแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง
- 1.2.2 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแขนขาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยวิธีไฟไนติ เมนส์(Finite element)
- 1.2.3 สร้างชิ้นงานจริงเพื่อทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบการกด แบบ 3-point bending และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.4 ออกแบบโครงสร้างโมโนค็อกและวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.5 สร้างและพัฒนารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าให้มีน้ำหนักลดลงและยังคงความแข็งแรง เพื่อเข้า แข่งขันรถไฟฟ้าประหยัดพลังงาน ในรายการ Shell Eco Marathon Asia 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 การออกแบบโครงสร้างโมโนค็อก(Monocoque) สำหรับรถไฟฟ้าประหยัดพลังงาน
- 1.3.2 การวิเคราะห์แรงกระทำที่ส่งผลต่อโครงสร้างของรถเมื่อได้รับการใช้งานในสภาวะจริง
- 1.3.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแขนวิชโดยเลือกใช้โฟมความหนาแน่นสูงเป็น

แกนกลาง

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์(Carbon fiber)และวัสดุสำหรับทำแกนกลางเพื่อเสริมความแข็งแรงและกรรมวิธีการผลิต
- 1.4.2 ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างยานยนต์แบบโมโนค็อก(Monocoque) รวมถึงหาข้อดีและข้อเสีย
- 1.4.3 สร้างจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบแรงกด แบบ 3 point bending เพื่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
- 1.4.4 ออกแบบโครงสร้างในโปรแกรม Solid work ซึ่งต้องอ้างอิงตามกฎการแข่งขัน และจำลองความแข็งแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง โดยใช้โปรแกรม ABACUS ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
- 1.4.5 สร้างโครงสร้างจริงตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยหาวัสดุที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงที่ออกแบบไว้

1.5 เงื่อนไขในการออกแบบเบื้องต้น

การออกแบบโครงสร้างของรถต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของกฎของการแข่งขัน Shell Eco marathon Asia 2018 ซึ่งมีรายละเอียดเบื้องต้นดังนี้

- 1.5.1 ความสูงของตัวรถ ต้องอยู่ระหว่าง 1000 mm ถึง 1300 mm
- 1.5.2 ความกว้างของตัวรถโดยไม่รวมกระจกมองข้าง ต้องอยู่ระหว่าง 1200mm ถึง 1300mm
- 1.5.3 ความยาวของตัวรถ ต้องอยู่ระหว่าง 2200 mm ถึง 3500 mm
- 1.5.4 ความกว้างของระยะฐานล้อหน้า ไม่น้อยกว่า 1000 mm และระยะฐานล้อหลัง ไม่น้อยกว่า 800 mm
- 1.5.5 ความยาวระหว่างฐานล้อหน้าและล้อหลัง ต้องมีค่า ไม่น้อยกว่า 1200 mm
- 1.5.6 ในส่วนของพื้นที่คนขับ ต้องมีความสูงไม่น้อยกว่า 880 mm และมีความกว้างไม่น้อยกว่า 700 mm โดยวัดที่ระยะไหล่ของคนขับ
- 1.5.7 ความสูงของใต้ท้องรถ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 100 mm
- 1.5.8 น้ำหนักของตัวรถไม่รวมคนขับ ต้องมีน้ำหนักไม่เกิน 225 kg

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถ เพื่อเลือกโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน สามารถนำไปสร้างโครงสร้างจริงเพื่อใช้ในการแข่งขัน สามารถนำความรู้ที่มีอยู่นำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างมีระบบและถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

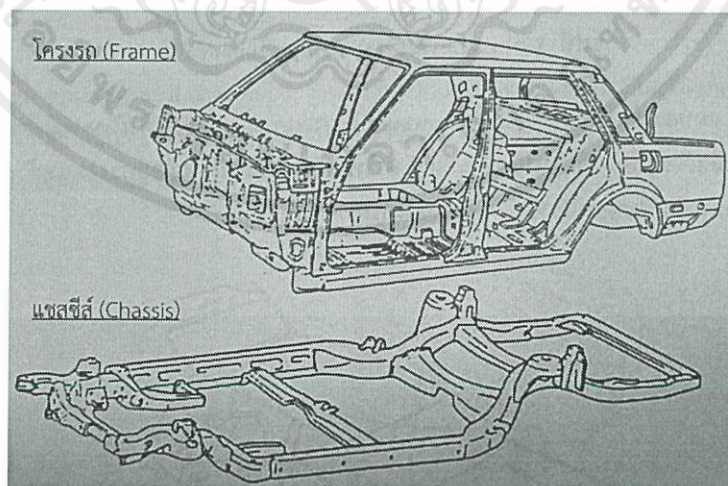
2.1 ระบบโครงสร้างหลักของยานยนต์ (Construction of Automotive)

แนวความคิดในการออกแบบโครงสร้างตัวถังรถยนต์ มีจุดมุ่งหมายที่ด้านพลศาสตร์และความแข็งแรง ซึ่งความแข็งแรงต้องเพียงพอที่จะรองรับกลไกและระบบต่าง ๆ ที่มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์ นอกจากนี้โครงสร้างของตัวถังรถยนต์ต้องทำหน้าที่ช่วยรับและดูดกลืนแรงที่เกิดจากการชน การสั่นสะเทือน และเสียงดังจากพื้นถนนที่แทรกเข้าไปในห้องโดยสาร รวมทั้งช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดกับผู้ขับขี่และผู้โดยสารอีกทางหนึ่งด้วยโครงสร้างพื้นฐานของตัวถังรถยนต์ประกอบด้วย โครง(Frame) และตัวถัง (Body)

โดยโครงสร้างยานยนต์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 แบบโครงอิสระ (Independent frame type)

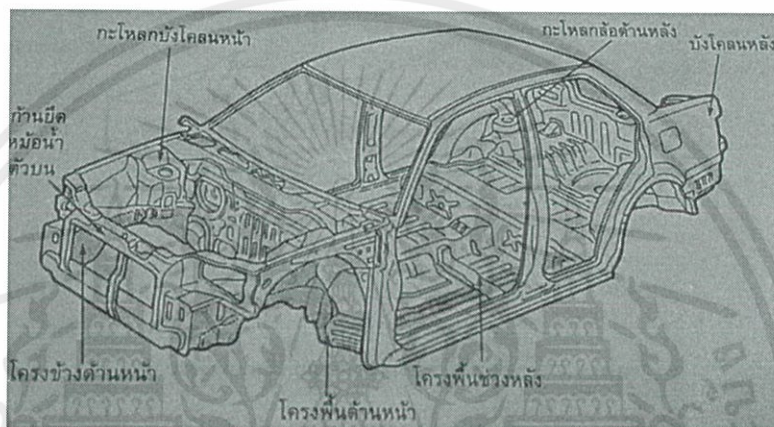
โครงรถ (Frame) กับแชสซีส์ (Chassis) จะถูกแยกออกจากกัน โดยแชสซีส์เป็นส่วนที่ใช้ยึดกลไกการเคลื่อนที่ เช่น เครื่องยนต์ ระบบรองรับน้ำหนัก ระบบบังคับเลี้ยว รวมทั้งทำหน้าที่ดูดกลืนแรงที่เกิดจากการชนภายนอก และการสั่นสะเทือนจากพื้นถนน โครงรถแบบนี้จะมีน้ำหนักมากแต่ก็สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ปริมาณมาก ทำให้นิยมใช้โครงรถประเภทนี้กับรถบรรทุก



รูปที่ 2.1 แบบโครงอิสระ (Independent frame type)

2.1.2 แบบโครงในตัว (Unibody)

แนวคิดการออกแบบโครงสร้างตัวถังรถยนต์ประเภทนี้ได้มาจาก การออกแบบสร้างเครื่องบินที่เรียกว่า โมโนค็อก (Monocoque) โดยการเชื่อมสปอตขึ้นส่วนที่ทำจากแผ่นโลหะขึ้นรูป ทำให้ไม่ต้องมีส่วนของแชสซีส์ โครงสร้างประเภทนี้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง ต้านทานแรงบิดได้ดี และมีความเรียบร้อยสวยงาม แต่อย่างไรก็ตาม หากเกิดอุบัติเหตุ จะทำให้เสียรูป ซ่อมให้เข้ารูปดั้งเดิมได้ยาก ดังนั้นโครงสร้างของพื้นตัวถังด้านล่างจึงต้องมีวิธีป้องกันความแข็งแรงที่สูญเสียไป



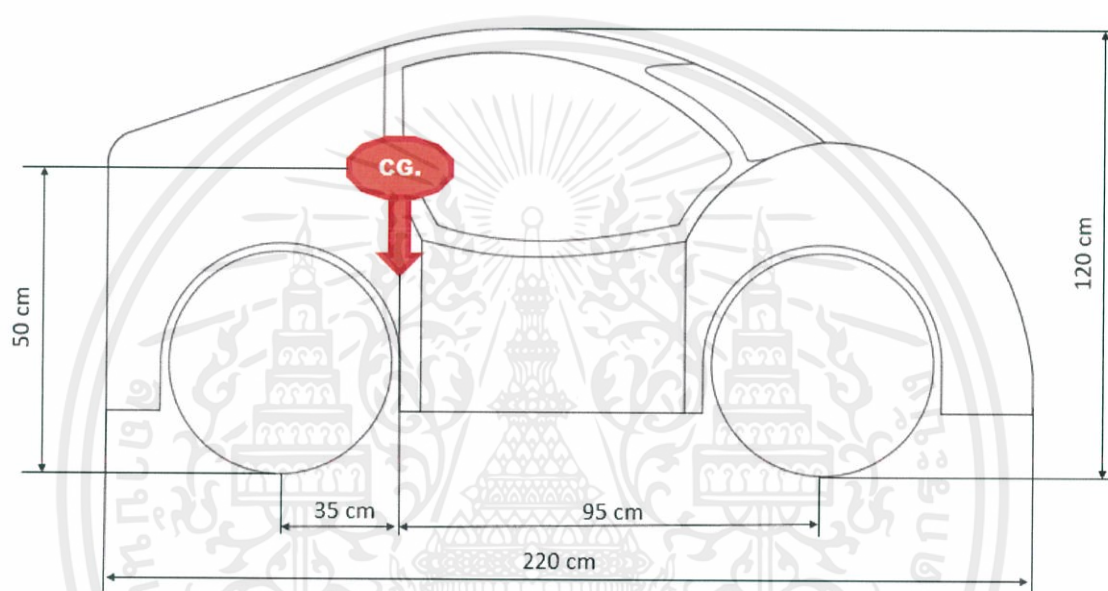
รูปที่ 2.2 แบบโครงในตัว (Unibody)

เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของโครงสร้างในแต่ละแบบแล้ว ในการทำโปรเจกครั้งนี้ ผู้จัดทำจึงเลือกใช้โครงสร้างชนิดโมโนค็อก (Monocoque) มาใช้ในการออกแบบ โดยมีการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอนแทนการใช้เหล็กหรืออลูมิเนียมเพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้าง อีกทั้งยังคงความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน

2.2 ทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์

การคำนวณแรงกระทำที่ส่งผลต่อโครงสร้างของรถมีความสำคัญมาก เพราะทำให้สามารถนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างรถ อีกทั้งยังต้องจำลองแรงกระทำที่สภาวะต่าง ๆ ที่รถได้รับเมื่อมีการขับขี่ เพื่อรับรองว่าโครงสร้างไม่ได้รับความเสียหายจากการใช้งานจริง

โดยมีข้อมูลอ้างอิง เพื่อใช้ในการคำนวณ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 ขนาดรถที่ใช้ในการออกแบบ

2.2.1 แรงกระทำเมื่อรถจอดหยุดนิ่ง

เมื่อรถจอดหยุดนิ่งหรือวิ่งด้วยความเร็วคงที่ จะมีแรงกระทำที่ถนนกระทำกับล้อ ทั้ง 4 ซึ่งเป็นแรงจากน้ำหนักกรวมของตัวรถเอง

$$\text{แรงปฏิกิริยากระทำที่ล้อหน้า} \quad R_F = \frac{mgl}{b} \quad (2.1)$$

$$\text{แรงปฏิกิริยาที่กระทำที่ล้อหลัง} \quad R_R = \frac{mg(b-l)}{b} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 แรงกระทำเมื่อรถมีความเร่งสูงสุด

เมื่อรถมีความเร่งสูงที่สุดจะเกิดแรงกระทำที่ล้อซึ่งเกิดจากแรงต้านการหมุนของล้อที่กระทำกับพื้นถนน เนื่องจากรถเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งและมีพื้นเรียบจึงไม่นำแรงต้านอากาศและแรงต้านความชัน

$$\text{แรงปฏิกิริยากระทำที่ล้อหน้า} \quad R_F = \frac{mgl}{b} - \frac{mah}{b} \quad (2.3)$$

$$\text{แรงปฏิกิริยาที่กระทำที่ล้อหลัง} \quad R_R = \frac{mg(b-l)}{b} + \frac{mah}{b} \quad (2.4)$$

หาความเร่ง a ที่กระทำเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร่งสูงสุด

จากสมการ $\sum F = ma$ โดย แรงที่กระทำให้รถมีความเร่งจะถูกต้านด้วยแรงต้านการหมุนของล้อแค่เพียงแรงเดียวเพราะรถเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง และบนพื้นที่ราบจึงไม่คิดแรงต้านอากาศหรือแรงต้านทางชันของมวล จะได้ $F - R_r = ma$

โดย $F =$ ค่าแรงขับเคลื่อน, $m =$ มวล, $a =$ ความเร่ง, $R_r =$ แรงต้านการหมุนของล้อ

เมื่อ $R_r = K_r W$, $K_r =$ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ มีค่าเท่ากับ 0.014

$$\text{จะได้} \quad a = \frac{F - R_r}{m} \quad (2.5)$$

2.2.3 แรงกระทำเมื่อรถมีความหน่วงสูงสุด

แรงชนิดนี้จะเกิดในกรณีที่มีรถมีการเบรกด้วยแรงเบรกเต็มทีจนกระทั่งล้อลื้อคตาย แต่สามารถเคลื่อนที่ไปด้วยโมเมนตัมแรงเฉื่อยของรถ

$$\sum F = ma \quad (2.6)$$

ซึ่งแรงเบรกที่ล้อหน้าคือ $F_F = \mu R_F$ และแรงเบรกที่ล้อหลังคือ $F_R = \mu R_R$

$$F = F_F + F_R$$

$$ma = \mu R_F + \mu R_R$$

$$ma = \mu(mg)$$

$$a = \mu g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด $\mu = 0.5$ (ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางสลิก) ดังนั้นความหน่วงสูงสุดมีค่า $0.5g$

แรงที่กระทำต่อล้อเมื่อรถมีความหน่วงคือ

$$R_F = \frac{mgl}{b} + \frac{0.5mgh}{b} \quad (2.7)$$

$$R_R = \frac{mg(b-l)}{l} + \frac{0.5mgh}{b} \quad (2.8)$$

2.2.4 แรงกระทำขณะเลี้ยวโค้ง

เมื่อมีแรงและความเร่งเกิดขึ้นในขณะที่รถเลี้ยวโค้ง สังเกตได้ว่าเมื่อรถเลี้ยวโค้งจะมีการถ่ายเทแรงให้มีความสมดุลไปทางด้านใดด้านหนึ่งและแรงปฏิกิริยาที่ล้อซึ่งส่งผลมายังโครงรถ ซึ่งจะแบ่งเป็นแรงปฏิกิริยาที่ล้อ และแรงกระทำด้านข้างของรถ

หาความเร่งหนีศูนย์กลาง

จากผลรวมโมเมนตัมรอบจุด A $\frac{mv^2h}{r} = \frac{mgt}{2} \quad (2.9)$

ความเร่งสู่ศูนย์กลางโค้ง $\frac{v^2}{r} = \frac{gt}{2h} = 1g \quad (2.10)$

โดยที่ $r =$ รัศมีการเลี้ยวโค้ง (กำหนดให้มีขนาด 6 m)

แรงปฏิกิริยาที่ล้อขณะรถเลี้ยวโค้งทางขวา

$$R_L = \frac{mg}{2} + \frac{mgh}{t} \quad (2.11)$$

$$R_R = \frac{mg}{2} - \frac{mgh}{t} \quad (2.12)$$

ขณะรถเลี้ยวซ้าย แรงกระทำที่ล้อขวาก็จะมีขนาดเท่ากับแรงกระทำที่ล้อซ้ายเช่นเดียวกัน

แรงกระทำด้านข้างที่ล้อยหน้าและล้อยหลัง

กำหนดจุดหมุนที่ล้อยหน้าและล้อยหลัง
จะได้สูตร

$$\text{แรงด้านข้างที่ล้อยหน้า} \quad Y_F = \frac{mgtl}{2h(J+l)} \quad (2.13)$$

$$\text{แรงกระทำที่ล้อยหลัง} \quad Y_R = \frac{mgtJ}{2h(J+l)} \quad (2.14)$$

2.3 ทฤษฎีโครงสร้างแซนด์วิช

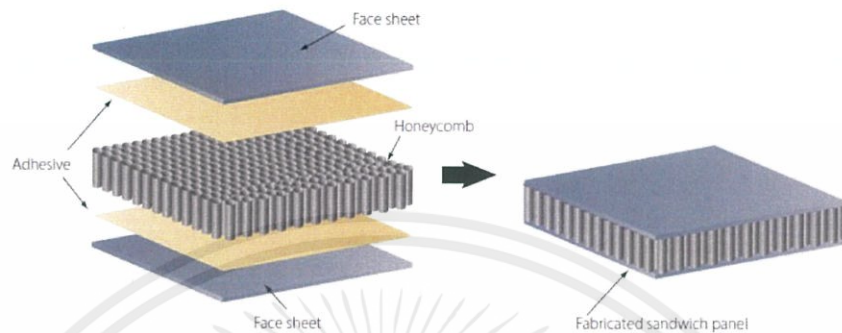
2.3.1 ประวัติความเป็นมาของโครงสร้างแซนด์วิช

โครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich Structure) ในความหมายของ The American Society For Testing And Materials (ASTM) ได้ให้นิยาม คือโครงสร้างที่ประกอบด้วยการรวมกันของวัสดุที่ไม่เหมือนกันหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) ต่าง ๆ ที่นำมารวมกันและสลับกันโดยยึดวัสดุหนึ่งไว้กับอีกวัสดุหนึ่ง โครงสร้างแบบแซนด์วิชเป็นรูปแบบพิเศษที่เป็นชั้น ๆ (Laminated composite) นำมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้โครงสร้างที่สามารถใช้ประโยชน์หรือคุณสมบัติเด่นแต่ละส่วนประกอบนั้น ๆ ผู้คิดค้นโครงสร้างแซนด์วิชคือ Fairbairn ในปี 1849 และโครงสร้างแซนด์วิชถูกนำมาใช้ในสงครามโลกครั้งที่ 2 เช่น ได้มีการนำโครงสร้างแบบแซนด์วิชไปใช้ในการทำเครื่องบินเล็ก ซึ่งเกิดขึ้นจากการร่วมมือระหว่างสหรัฐอเมริกาและอังกฤษในปี 1930 ชื่อเครื่องบิน

“Mosquito” หลักการพื้นฐานของโครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich Structure) เหมือนกับคานารูปตัวไอ (I Beam) ซึ่งมีประสิทธิภาพทางโครงสร้างสูง ซึ่งในโครงสร้างแบบแซนด์วิชผิวหน้า (Face) เปรียบเสมือนปีก(Flange) ซึ่งทำหน้าที่ต้านทานโมเมนต์ที่เกิดจากแรงภายนอกและต้านทานการ Bucking ของผิวหน้าอีกด้วย และแกนกลาง (Core) คือแผ่นตั้ง (Web) โดยแกนกลางจะทำหน้าที่ต้านทานความเค้นเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกและต้องมีการต้านทานต่อการย่น ในด้านการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้า(Face) และแกนกลาง (Core) จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานความเค้นเฉือนและความเค้นดัดที่เกิดขึ้นโดยใช้การเชื่อม การชุบ หรือการติดกาวขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและสภาพแวดล้อมของการใช้งาน

2.3.2 องค์ประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช

องค์ประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich Structure) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ผิวหน้า (Face) วัสดุเชื่อมประสาน (Adhesive) และแกนกลาง (Core)



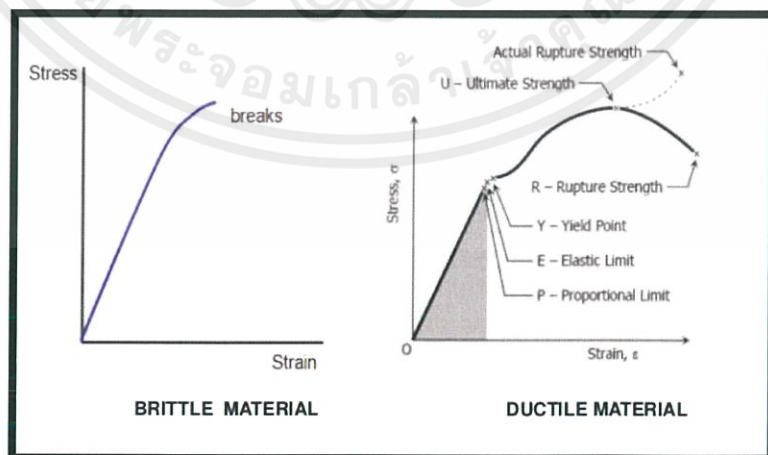
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich Structure)

2.3.2.1 ผิวหน้า (Face)

วัสดุที่ใช้ในการทำผิวหน้า (Face) โดยทั่วไปเป็นวัสดุแผ่นบาง ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้

- 1 มีความต้านทานแรงดึงและแรงอัด
- 2 มีความแข็งแรงและมีความเหนียวสูง ทำให้มีความต้านทานการโก่งงอ (Buckling) สูงตามไปด้วย
- 3 มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ทนทานต่อการสึกกร่อน และความร้อน
- 4 มีความทนทานต่อแรงกระแทก

สมบัติทางกลของผิวหน้า



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น (Stress-strain Diagram) ของวัสดุเหนียวและเปราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เราจะเห็นได้ว่า Stress-Strain Diagram ของวัสดุแต่ละประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้ว วัสดุจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของ Stress-Strain Diagram ของวัสดุ คือ วัสดุเหนียว (Ductile Materials) และวัสดุเปราะ (Brittle Materials)

วัสดุเหนียว (Ductile Materials) เป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนที่จะเกิดการวิบัติ (Failure) เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและ Aluminum Alloys วัสดุประเภทนี้จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากกว่าวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เป็นวัสดุที่ไม่มีการ Yielding เกิดขึ้นหรือมีแต่น้อยมากก่อนที่วัสดุจะเกิดการวิบัติ เช่น เหล็กหล่อ (Cast Iron) และคอนกรีต

วัสดุเปราะมักจะเป็นวัสดุที่มีค่าหน่วยแรงดึงประลัย (Ultimate Tensile Stress) ต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรงกดอัดประลัย (Compressive Ultimate Stress) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อวัสดุเปราะถูกกระทำ โดยแรงดึงแล้ว รอยแตกขนาดเล็กมากบนผิวของตัวอย่างทดสอบ (เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ) จะถูกทำให้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนถึงจุด ๆ หนึ่งเมื่อค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุแล้วตัวอย่างทดสอบกับจะเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด

โดยทั่วไปแล้วในการจำแนกวัสดุผิวหน้า (Face) จะจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ผิวหน้าที่เป็นโลหะ (Metallic) ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส เป็นต้น
2. ผิวหน้าที่ไม่ใช่กลุ่มโลหะ (Non Metallic) ได้แก่ ซีเมนต์ ไม้ และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ เป็นต้น สำหรับวัสดุในกลุ่มนี้ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยไฟเบอร์จะเป็นที่นิยมใช้เป็นผิวหน้าของโครงสร้างแซนด์วิช

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงข้อดีข้อเสียของผิวหนังแต่ละประเภท

ประเภทของผิวหนัง	ข้อดี	ข้อเสีย
ผิวหนัง (Face skin) ในกลุ่มโลหะ	<ul style="list-style-type: none"> - มีราคาค่อนข้างถูก - มีความแข็งแรงและเกร็งสูง - มีความต้านทานแรงสูง - ผิวหนังเป็นแบบผิวสำเร็จ - ทนแรงกระทำต่อสิ่งแวดล้อมรอบข้างได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ยากต่อการขึ้นโครงสร้างแบบแซนวิช
E-Glass Fibers	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานที่ต้องรับภาระแรงเป็นส่วนใหญ่ - มีคุณสมบัติทางกลที่ดี - ทนต่อสภาพแวดล้อม - ราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ทนต่อสารเคมีความเข้มข้นสูง
S, R-Glass Fibers	<ul style="list-style-type: none"> - มีสมบัติที่ดึกฎ E-Glass นิดหน่อยแต่ราคาแพงกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (' E) ต่ำ - มีความหนาแน่นสูง
Carbon Fibers (HS)	<ul style="list-style-type: none"> - มีความแข็งแรงสูง - มีความต้านทานแรงดึงสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเครียดสูง
Carbon Fibers (HM)	<ul style="list-style-type: none"> - น้ำหนักเบา - มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนที่ต่ำ - ทนต่อแรงเสียดทาน - ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาสูง - เปราะ
ไม้ (Wood)	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูก - น้ำหนักเบา 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความแข็งแรงต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกและโลหะ
Aramid Fibers เป็น วัสดุพวก Kevlar	<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นต่ำ - ค่าโมดูลัสสูง - มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกบสัดส่วนน้ำหนัก - ทนต่อการสึกหรอ 	<ul style="list-style-type: none"> - จัดแต่งผิวยาก - มีคุณสมบัติที่แยเมื่อได้รับภาระแบบอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของผิวหน้าแต่ละประเภท

	Tensile	Tensile	Strain to	Density
	Strength (Ksi)	Modulus (Msi)	Failure (%)	Kg/l
	ความต้านทานแรงดึง	ค่ามอดูลัสแรงดึง	แรงดึงจนเสียหาย	ความหนาแน่น
E -Glass	420	10.5	4.4	2.6
S2 -Glass	655	12.4	5.2	2.5
Aramid "high modulus"	525	18	2.4	1.44
Aramid "high resistance"	424	10.2	3.6	1.44
Carbon "high resistance"				
T 300	512	33.4	1.5	1.8
TR 305	640	34	1.9	1.8
TC 35	580	35	1.6	1.8
T 700	711	33.4	2.1	1.8
T 800	796	42.7	1.9	1.8

จากการพิจารณาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุสำหรับทำผิวหน้า ซึ่งต้องมีน้ำหนักเบาและคงความแข็งแรงที่สุด มีราคาอยู่ในงบประมาณที่ตั้งไว้และสามารถจัดหาซื้อได้ตามท้องตลาด ทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้คาร์บอนไฟเบอร์ในการทำโครงสร้าง

2.3.2.2 วัสดุเชื่อมประสาน (Adhesive)

การเลือกใช้กาวหรือวัสดุเชื่อมประสานค่อนข้างมีส่วนสำคัญมากในโครงสร้างประเภทแซนด์วิช (Sandwich Structure) เพราะวัสดุที่เลือกใช้ในงานโครงสร้างนี้ค่อนข้างมีหลากหลายประเภท ดังนั้นการพิจารณาเลือกกาวที่จะนำมาใช้ควรเหมาะสมกับวัสดุนั้นๆด้วย ซึ่งในโครงสร้างประเภทแซนด์วิชจะนิยมใช้กาวอีพ็อกซีเป็นส่วนใหญ่ ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากาวอีพ็อกซีนั้นจะเหมาะสมกับวัสดุที่หลากหลาย

ตารางที่ 2.3 แสดงประเภทของกาวและวัสดุที่เหมาะสมกับกาวชนิดนั้น

ประเภทของกาว	วัสดุที่เหมาะสม
กาวลาเท็กซ์ (Latex Glues)	กระดาษ ไม้ ผ้า
กาวยาง (Rubber cement)	กระดาษ ไม้ แผ่นยาง ผ้า
กาวพลังช้าง (Superglue)	แก้ว เซรามิก พลาสติก โลหะ
กาวอีพ็อกซี (Epoxy)	ไม้ โลหะ แก้ว พลาสติก
กาวป็นซิลิโคน (Silicone Glues)	ไม้ พลาสติก แก้ว

กาวอีพ็อกซี

กาวประเภทนี้มีอยู่ 2 ประเภท คือประเภทที่ 1 วัสดุกาวเหนียวที่อยู่ในสภาพเหลว ที่สามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง โดยจะมีส่วนผสมแบ่งเป็น 2 หลอด คือ หลอดแรกคือส่วนที่ทำให้แข็งตัวและตัวยายึดประสาน เรียกว่า อีพ็อกซีเรซิน และ อีกหลอดหนึ่งเป็นวัสดุบ่มประเภท POLYAMIDE และมีส่วนผสมอื่นๆที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น มีผงโลหะผสมอยู่สำหรับใช้ซ่อมแซมรอยแตกร้าวของสิ่งที่เป็นเหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง มีคุณสมบัติติดแน่น ไม่หดตัว ซึ่งที่ฉลากจะระบุคำว่า STEEL FILLER หรือชนิดที่ติดได้ทุกประเภท เช่น ไม้ หนัง กระเบื้อง เป็นต้น นอกจากนี้ยังแบ่งเป็นแบบชนิดแห้งช้าและชนิดแห้งเร็ว ประเภทที่ 2 มีลักษณะกอนคล้ายดินน้ำมัน แบ่งเป็นสองส่วน เวลาใช้ก็นำมาผสมกันกาวอีพ็อกซีแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับงานที่เร่งด่วน เป็นต้นว่าใช้อุดท่อน้ำรั่ว ใช้อุดยาเครื่องจักรกล ที่ฉลากจะระบุคำว่า BOND หรือ GROUT และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกาวอีพ็อกซี ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของกาวอีพ็อกซี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ มีค่า	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ	1.95
แรงดึง	4,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว
แรงอัด	12,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว
แรงยึดเหนี่ยว	375 ปอนด์/ตารางนิ้ว
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	4×10^{-5} นิ้ว/นิ้ว °F
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด	350 °F
เวลาในการแข็งตัวที่ 75°F	2-3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 แกนกลาง (Core)

คุณลักษณะโดยทั่วไปของแกนกลาง (Core) ที่สำคัญ

1. มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำเพื่อทำให้น้ำหนักของโครงสร้างแบบแซนด์วิชเบาที่สุด
2. เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี เนื่องจากแกนกลางต้องมีลักษณะที่มีความหนาแน่นที่ต่ำ หากไม่เป็นฉนวนกันความร้อน เมื่อมีอัคคีภัยไฟจะลุกลามได้อย่างรวดเร็ว
3. เป็นฉนวนกันเสียงได้ดี
4. มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ได้ดี เพราะหน้าที่ของแกนกลางนั้นจะต้องรับแรงเฉือนโดยตรง
5. มีความหนาเพียงพอ เพราะความหนาส่งผลต่อความแข็งแรงในทิศทางตั้งฉาก ซึ่งหากความหนาไม่เพียงพออาจส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength)

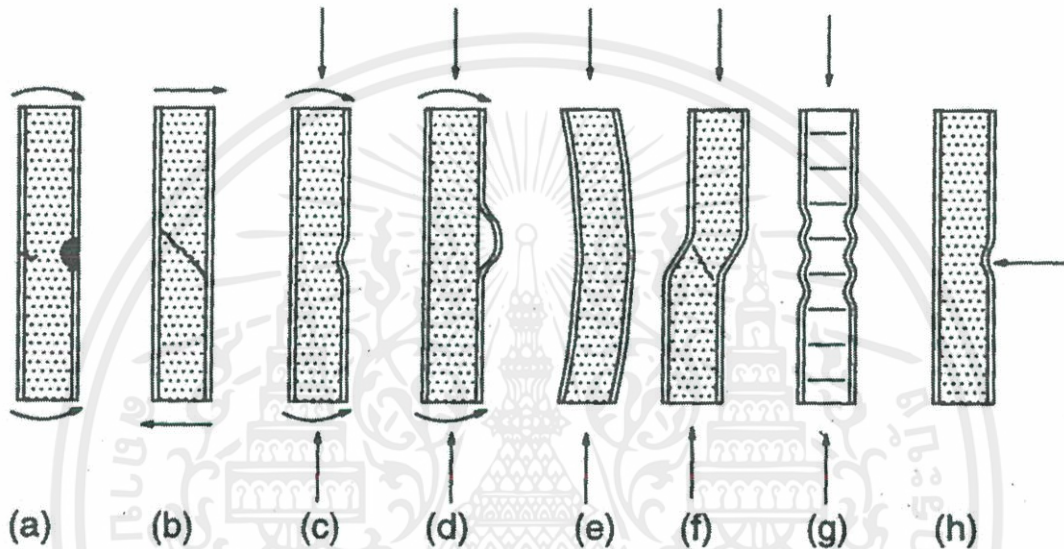
ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของแกนกลางแต่ละชนิด

	Unit	Lantor Coremat	Divinycell P	ProBalsa	NIDAPLAST
Tensile strength	Mpa	-	2.45	7	0.5
Tensile strength across layers	Mpa	4	-	-	0.4
Compressive Modulus	Mpa	-	152	1,850	30
Compression strength (10%strain)	Mpa	10	2.3	5.4	1.2
Shear strength	Mpa	5	1.25	1.6	0.4
Shear modulus	Mpa	35	40	14	5
Resin uptake	kg/m ²	3	-	-	-
Dry weight	kg/m ²	125	-	-	-
Density impregnated	kg/m ³	630	-	-	-
Nominal Density	kg/m ³	-	150	90	65

หากพิจารณาจากผลในตารางที่ 2.5 Divinycell P จะเป็นแกนกลางที่สามารถรับน้ำหนักแรงเฉือนต่อน้ำหนักได้ดีที่สุด หากเทียบต่อน้ำหนัก โดยรองลงมาคือ lantor Coremat ซึ่งวัสดุทั้ง 2 มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกันมาก แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ Divinycell P จะไม่สามารถตัดโค้งงอตามโครงสร้างของรถได้ ในการผลิตชิ้นส่วนที่ใช้ Divinycell P เป็นองค์ประกอบนั้นจำเป็นต้องผลิตเป็นชิ้นๆ และนำมาประกอบกันเป็นรูปร่างต่าง ๆ ที่ต้องการโดยการนำกาวอีพ็อกซีมาใช้ในการประสานชิ้นงานเข้าด้วยกัน

2.3.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแกนวิช

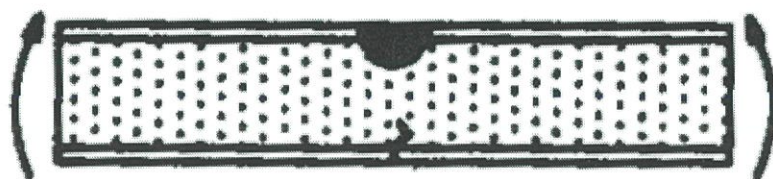
โครงสร้างแกนวิชสามารถเกิดความเสียหายได้หลายวิธี ผิวหน้าและแกนกลางสามารถเสียหายแบบยืดหยุ่นหรือแตกหักขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุที่ใช้ รูปแบบความเสียหายที่ต่างกันไปกลายเป็นสิ่งสำคัญและด้วยเหตุนี้จึงข้อจำกัดสำหรับการใช้งานโครงสร้างแกนวิช รูปแบบความเสียหายที่พบบ่อยที่สุดในโครงสร้างแบบแกนวิชมีการแสดงแผนภาพไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแบบความเสียหายในแท่งแกนวิช (a) ความเสียหายครากที่ผิวหน้า (b) ความเสียหายเฉือนที่แกนกลาง (c และ d) การย่นที่ผิวหน้า (e) การโก่งทั่วไป (f) การย่นแบบเฉือน (g) การเป็นลวดลายที่ผิวหน้า (h) รอยหยักเฉพาะที่

รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแซนวิช มีทั้งหมด 6 ประเภทดังนี้

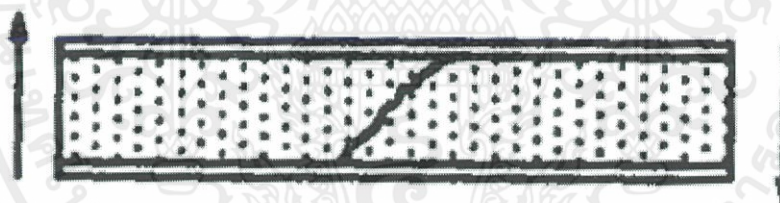
2.3.3.1 ความเสียหายครากของผิวหน้า



รูปที่ 2.7 ความเสียหายครากของผิวหน้า

ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และเกณฑ์ที่ระบุว่าเสียจะพิจารณาความเสียหายทั้งผิวหน้าและแกนถ้าเกิดการครากหรือถ้าส่วนประกอบได้แตกหักจริง ดังนั้นสำหรับส่วนประกอบวัสดุทุกชนิดจะมีความเค้นอนุญาตสูงสุดไม่ว่าความเค้นนี้จะเป็ความเค้นครากหรือความเค้นที่ทำให้วัสดุเสียหาย เกณฑ์สำหรับความเสียหายคือเมื่อความเค้นสูงสุดในส่วนประกอบถึงความเค้นอนุญาต

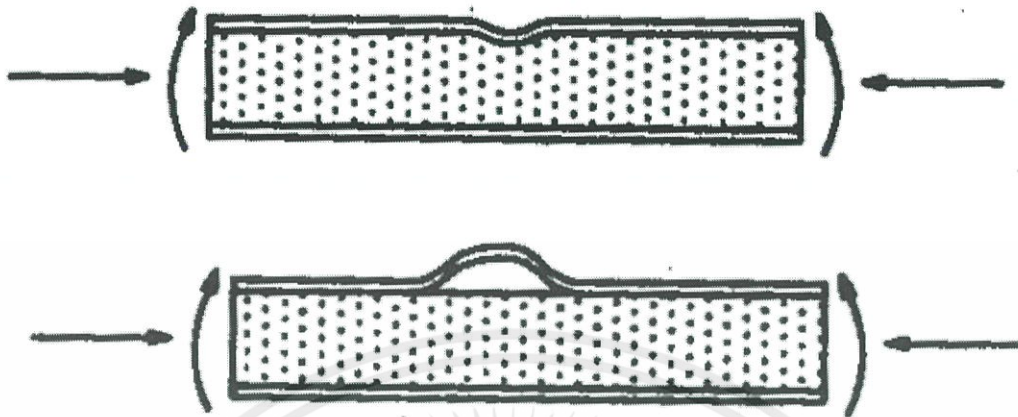
2.3.3.1 ความเสียหายเฉือนที่แกนกลาง



รูปที่ 2.8 ความเสียหายจากแรงเฉือนที่แกนกลาง

วัสดุแกนส่วนใหญ่จะต้องรับแรงเฉือนและแรงขางเกือบทั้งหมด อย่างไรก็ตามความเครียดโดยตรงในแกนอาจมีขนาดเดียวกับแรงเฉือน

2.3.3.2 การย่นที่ผิวหน้า

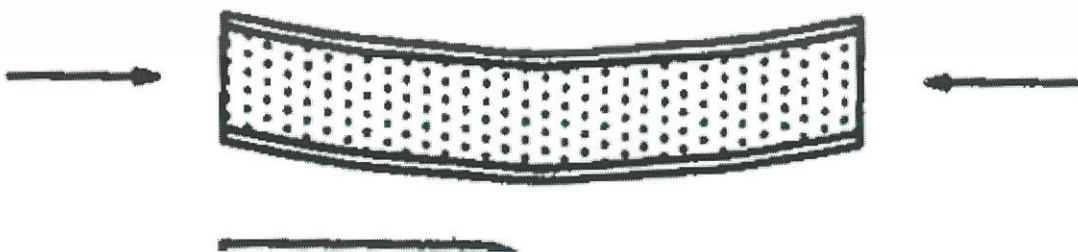


รูปที่ 2.9 การย่นที่ผิวหน้า

รอยยับในแกนวิชสามารถเกิดจากการปฏิบัติเกิดขึ้นได้ทั้งเมื่อถูกบีบอัดในระนาบหรือในการบีบอัดผิวหน้าในระหว่างการตัดหรือทั้งสองอย่างรวมกัน เกณฑ์ที่ระบุว่าย่นจะเกิดขึ้นในผิวหน้าคือเมื่อความเค้นอัดในผิวหน้านั้นถึงความเค้นย่น ความเสียหายจริงอาจเกิดขึ้นได้สองวิธี

- 1 รอยย่นที่เกิดจากรอยหยักภายในแกน ถ้าความต้านทานแรงกดของแกนต่ำกว่าความต้านแรงดึงของแกนและรอยต่อ
- 2 รอยย่นที่เกิดจากความเสียหายจากการดึง ถ้าความต้านทานแรงดึงของแกนหรือรอยต่อต่ำกว่าความต้านทานแรงอัดของแกน

2.3.3.3 การโก่งตัวไป

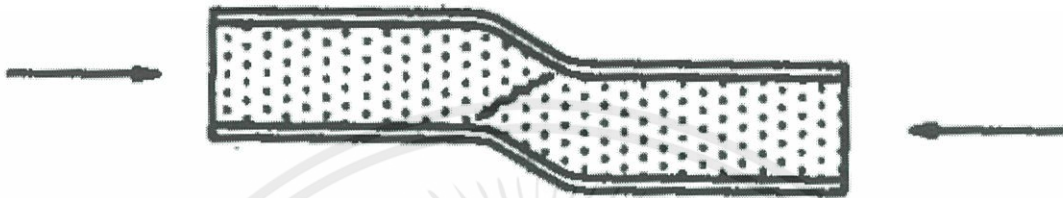


รูปที่ 2.10 การโก่งตัวของวัสดุแกนวิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าการโก่งตัวบางครั้งจะไม่เกิดความเสียหายกับโครงสร้าง แต่ก็ยังต้องหลีกเลี่ยงเนื่องจากโครงสร้างที่มีปัญหาอาจสูญเสียความสามารถในการตอบสนองของวัสดุประสงค์ ภาวะการโก่งที่เกิดขึ้นจริงอาจเป็นความสามารถในการแบกรับน้ำหนักที่ดีที่สุดของแกนวิชเนื่องจากรูปทรงที่โค้งงอมันไม่อาจสามารถรับภาระเพิ่มเติมได้

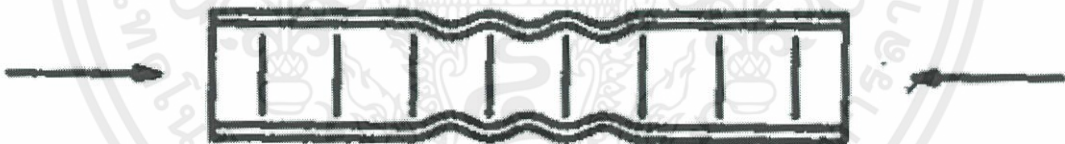
2.3.3.4 การย่นแบบเฉือน



รูปที่ 2.11 ความเสียหายของการย่นแบบเฉือน

ความเสียหายของการย่นแบบเฉือนโดยทั่วไปเป็นเช่นเดียวกับขีดจำกัดของการโก่งแบบทั่วไป

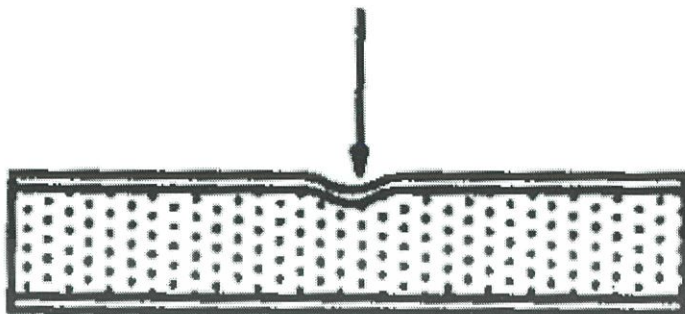
2.3.3.5 การเป็นลวดลายที่ผิวหน้า



รูปที่ 2.12 การยุบตัวหรือโก่งอระหว่งเซลล์

ปรากฏการณ์การไม่มีเสถียรภาพอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างของแกนวิชที่มีแกนที่เป็นรูปรังผึ้งหรือลูกฟูกคือการยุบตัวหรือโก่งอระหว่งเซลล์

2.3.3.6 รอยหยักที่แกน

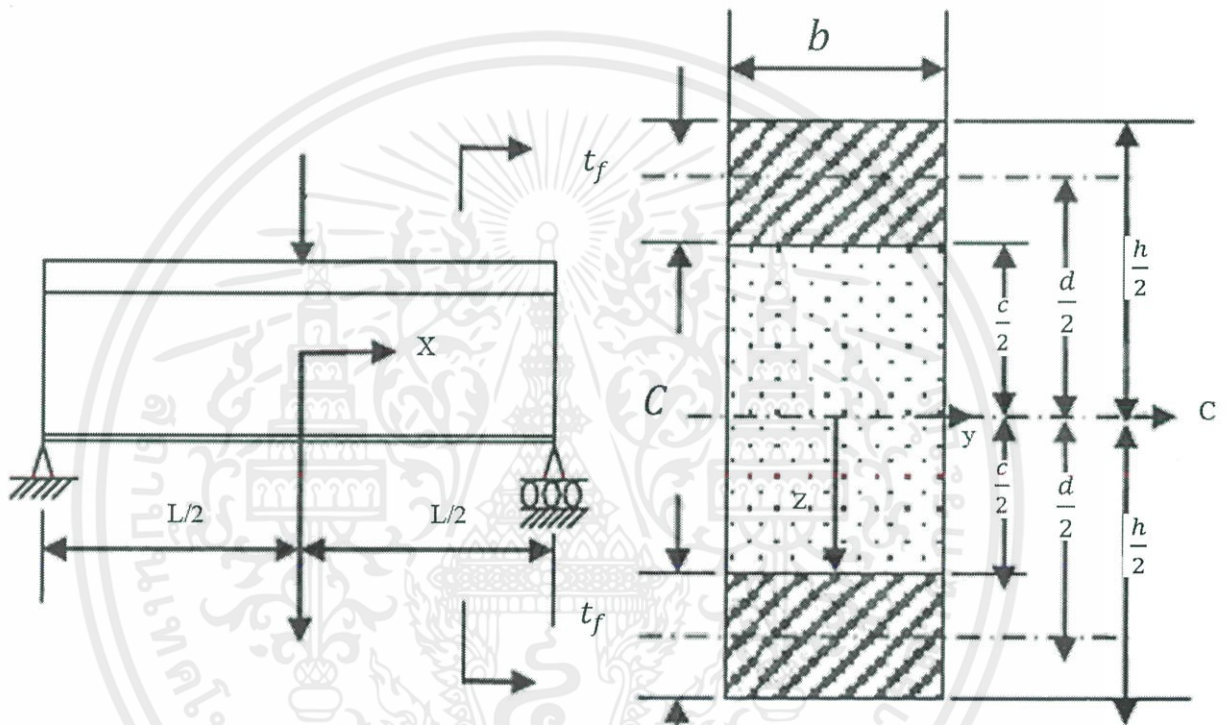


รูปที่ 2.13 รอยหยักที่เกิดขึ้นที่แกน

รอยหยักที่แกนเกิดขึ้นที่โหนดที่มีความเข้มข้นเช่น ส่วนควบ มุม หรือข้อต่อ ในทางปฏิบัติสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใส่โหนดที่พื้นที่ขนาดใหญ่พอ

2.3.4 ทฤษฎีของคานแบบแซนวิช

คานแบบแซนวิชซึ่งประกอบด้วยผิวหน้าที่มีความหนาแต่ละอันเท่ากับ t_f ถูกแยกออกด้วยชั้นที่มีความหนาหรือเรียกว่าแกนกลาง (Core) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและความหนาเท่ากับ c ความลึกทั้งหมดของคานเท่ากับ h และมีความกว้างเท่ากับ b ทั้ง 3 ชั้นถูกยึดติดด้วยกันและวัสดุผิวหน้าต้องมีความแข็งมากกว่าวัสดุแกนกลาง สมมติให้วัสดุผิวหน้าและแกนกลางเป็นวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic) ดังแสดงในรูป 2.13



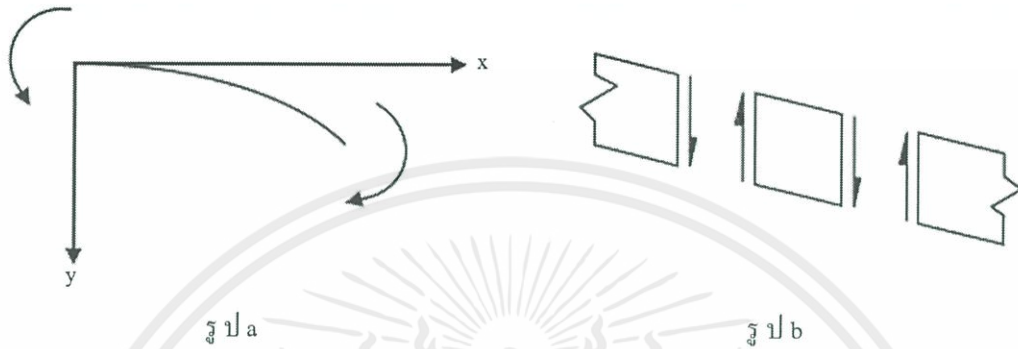
รูปที่ 2.14 ขนาดของคานแบบแซนวิชและภาพตัดขวาง (ที่มา Howard G. Allen, 1969)

ความเค้นและการโก่งตัวของคานชนิดนี้ อาจจะสามารถหาได้โดยการใช้ทฤษฎีการโก่งงอของคานเบื้องต้น (Theory of Bending) ทฤษฎีนี้มีพื้นฐานบนสมมติฐานที่ว่า พื้นที่ตัดขวางต้องเป็นระนาบและตั้งฉากกับแกนตามความยาวของคานทั้งตอนที่ไม่มีน้ำหนักและตอนที่รับโมเมนต์ดัด ข้อสมมติฐานนี้ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด (M) และส่วนโค้ง ($1/R$)

$$\frac{M}{EI} = -\frac{1}{R}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายลบเบื้องต้นใช้กับการกำหนดเครื่องหมายในรูปที่ 2.13 โดย EI คือความแข็งแกร่งเชิงดัด (Flexural Stiffness) ซึ่งเหมือนกับคานธรรมดาเป็นผลคูณของสัมประสิทธิ์การยืดตัว (Modulus of Elasticity, E) และโมเมนต์ที่สองของพื้นที่ (Second Moment of Area, I) เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงกำหนดความแข็งแกร่งเชิงดัดให้มีสัญลักษณ์ D



รูปที่ 2.15 การกำหนดเครื่องหมาย รูป a; ระยะยวบตัวที่เป็นบวก ความชันและส่วนโค้งโมเมนต์ดัดที่เป็นลบ รูป b; แรงเฉือนที่เป็นบวก ความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน (ที่มา Howard G. Allen, 1969)

คานแซนดิวซ์ในรูปที่ 2.14 เป็นคานแบบผสม (Composite Beam) ค่าความแข็งแกร่งเชิงดัดก็คือผลรวมของค่าสติฟเนส (Stiffness) ของผิวหน้าและแกนกลางโดยวัดรอบแกนเซนทรอย์ของหน้าตัดขวางทั้งหมดคือ

$$D = E_f \frac{bt_f^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (2.15)$$

- โดยที่ D คือ ความแข็งแกร่งเชิงดัด
- E_f คือ สัมประสิทธิ์การยืดตัวของผิวหน้า
- E_c คือ สัมประสิทธิ์การยืดตัวของแกนกลาง
- b คือ ความกว้างของคาน
- t_f คือ ความหนาของผิวหน้า
- d คือ ระยะระหว่างกึ่งกลางของผิวหน้าด้านบนถึงผิวหน้าด้านล่าง
- c คือ ความหนาของแกนกลาง

$$d = \frac{h+c}{2} \quad (2.16)$$

โดยที่ h คือ ความลึกทั้งหมดของคานหรือผนัง

ทางด้านขวามือของสมการที่ 2.2 สองเทอมแรกนี้แทนความแข็งแรง (Stiffness) ของผิวหน้ามีความสัมพันธ์กับการตัดรอบแกนเซนทรอยด์ของคานแซนดิวซ์นี้ทั้งหมด เทอมแรกแทนความแข็งแรงแต่ละส่วนรอบแกนเซนทรอยด์การตัดของมันเอง ส่วนเทอมที่สามแทนความแข็งแรงการตัดของแกนกลาง ในทางปฏิบัติความหนาของผิวหน้าจะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแกนกลาง ดังนั้นเทอมที่สองมีความสำคัญต้องคงไว้ และผลรวมของเทอมแรกจะมีค่าน้อยกว่า 1% ของเทอมที่สองเมื่อ

$$3 \left(\frac{d}{t} \right)^3 > 100 \quad (2.17)$$

ดังนั้นจะสามารถตัดเทอมที่หนึ่งออกไปได้ก็ต่อเมื่อค่า $d/t > 5.77$ ซึ่งผิวหน้าที่เป็นโลหะบางจะเข้าเงื่อนไข แต่ผิวหน้าที่มีความหนาซึ่งมีความแข็งแรงต่ำเช่น ซีเมนต์จะไม่เข้าเงื่อนไขดังกล่าวค่าของเทอมที่สามจะมีค่าน้อยกว่า 1% ของเทอมที่สอง (ดังนั้นอาจตัดทิ้งได้) เมื่อ

$$6 \frac{E_f t}{E_c c} \left(\frac{d}{c} \right)^2 > 100 \quad (2.18)$$

ดังนั้น ค่าความแข็งแรงการดัด (Flexural Stiffness) หรือค่า D ที่เหลือจากการตัดเทอมที่หนึ่งและเทอมที่สามคือ

$$D = E_f \frac{b t_f d^2}{2} \quad (2.19)$$

ค่าความแข็งแรงการเฉือน (Shear Stiffness, S) มีสูตรดังนี้

$$S = \frac{G_c b d^2}{c} \quad (2.20)$$

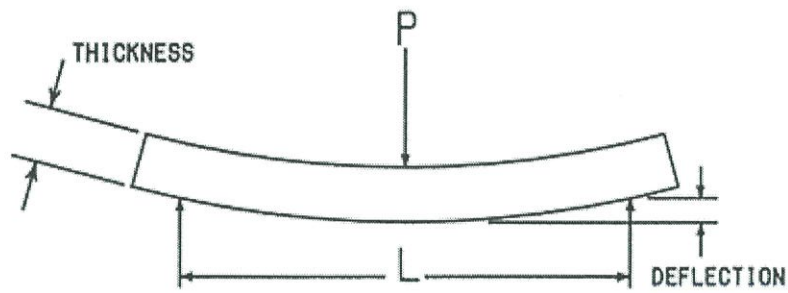
โดยที่ S คือ ความแข็งแรงการเฉือน

G_c คือ โมดูลัสการเฉือนของแกนกลาง

เมื่อคานแบบแซนดิวซ์มีผิวหน้าที่เป็นโลหะ บางค่า c จะประมาณให้เท่ากับค่า d แล้วจะเหลือสูตรอย่างง่ายคือ

$$S = b d G_c \quad (2.21)$$

ระยะโก่งตัว (Deflection) ของคานเกิดจากการโก่งตัวที่เกิดจากการดัดและการโก่งตัวที่เกิดจากแรงเฉือนรวมกัน



รูปที่ 2.16 ระยะโก่งตัวของคาน

ระยะโก่งตัวของคานแซนดรีชภายใต้การรับน้ำหนักชนิดต่างๆ สามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\delta = \frac{k_b PL^3}{D} + \frac{k_s PL}{S} \quad (2.22)$$

โดยที่ δ คือ ระยะโก่งตัวของคานแซนดรีช

k_b คือ ค่าคงที่ในการหาระยะโก่งตัวที่เกิดจากการดัด

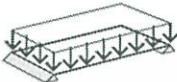


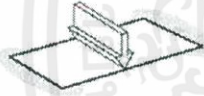

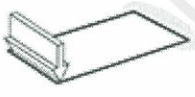

k_s คือ ค่าคงที่ในการหาระยะโก่งตัวที่เกิดจากการเฉือน

P คือ แรงที่กระทำ

L คือ ระยะระหว่างจุดรองรับ

เมื่อ k_b และ k_s เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของจุดรองรับและรูปแบบแรงที่กระทำดังตาราง

ตารางที่ 2.6 ค่าที่ k_b และ k_s ของจตุรกรรับและรูปแบบแรงที่กระทำต่อเซนวิช

BEAM TYPE	MAXIMUM SHEAR FORCE	MAXIMUM BENDING MOMENT	BENDING DEFLECTION COEFFICIENT (k_b)	SHEAR DEFLECTION COEFFICIENT (k_s)
Simple Support  Uniform Load Distribution	$\frac{P}{2}$	$\frac{Pl}{8}$	$\frac{5}{384}$	$\frac{1}{8}$
Both Ends Fixed  Uniform Load Distribution	$\frac{P}{2}$	$\frac{Pl}{12}$	$\frac{1}{384}$	$\frac{1}{8}$
Simple Support  Central Load	$\frac{P}{2}$	$\frac{Pl}{4}$	$\frac{1}{48}$	$\frac{1}{4}$
Both Ends Fixed  Central Load	$\frac{P}{2}$	$\frac{Pl}{8}$	$\frac{1}{192}$	$\frac{1}{4}$
One End Fixed  Uniform Load Distribution	P	$\frac{Pl}{2}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$
One End Fixed  Load one End	P	Pl	$\frac{1}{3}$	1
One End Fixed  Triangular Load Distribution	P	$\frac{Pl}{3}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรง

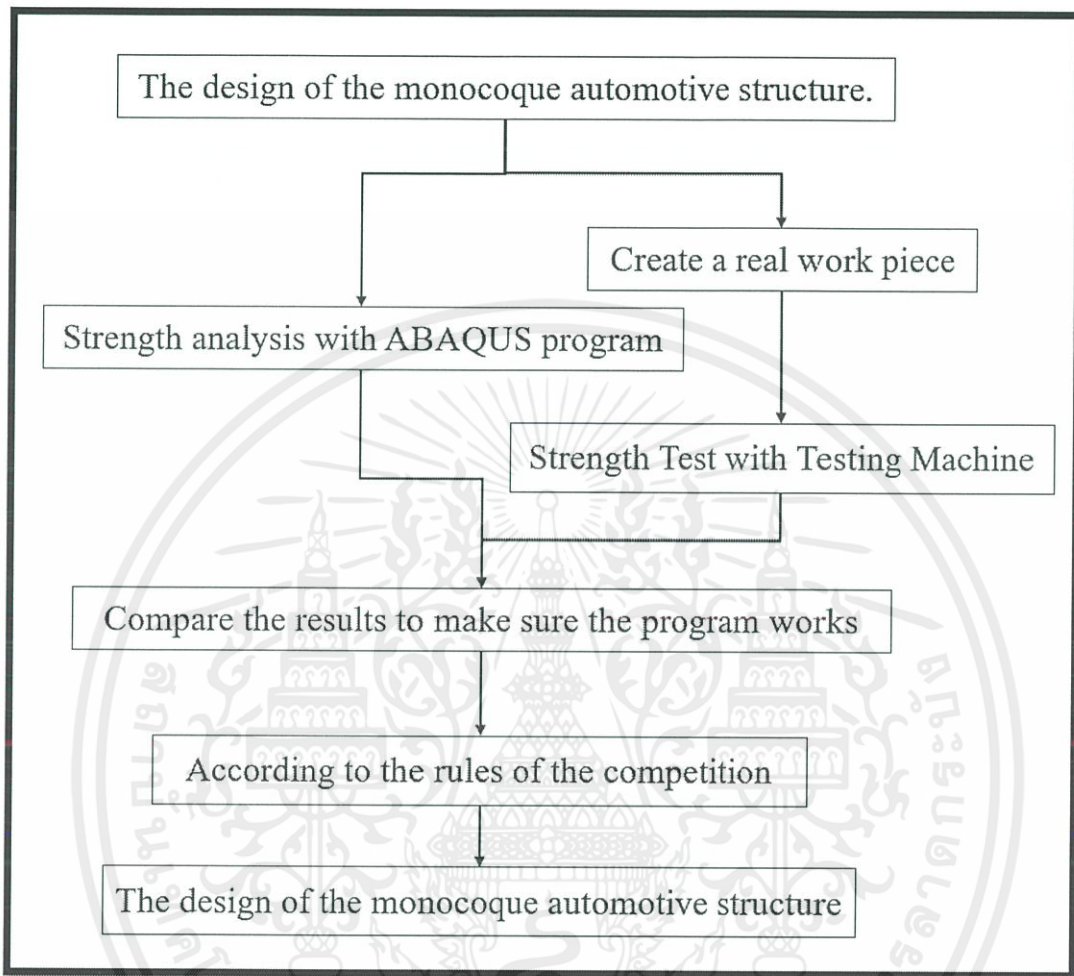
3.1 แนวทางในการออกแบบเบื้องต้น

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแขนวิช เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและน่าเชื่อถือได้นั้น วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจึงเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแบบ 3 points bending เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างหลักมีความแข็งแรงเพียงพอ

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงคือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis – FEA) ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์เป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรม สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งที่มีโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อว่า ABAQUS โปรแกรมนี้ถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของชิ้นส่วนโครงสร้าง เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ออกแบบมาหลายรูปแบบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันได้การออกแบบโครงสร้างยานยนต์แบบโมโนค็อก ในรายการแข่งขันShell Eco marathon Asia 2018สิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบมีดังนี้

- 3.1.1 ควรออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงกระทำจากภายนอก
- 3.1.2 ควรออกแบบให้มีโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาที่สุด
- 3.1.3 ควรออกแบบให้มีความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่
- 3.1.4 ควรออกแบบให้มีระบบการซ่อมบำรุงที่อำนวยความสะดวกต่อระบบต่างๆภายในรถแข่ง
- 3.1.5 ควรออกแบบให้มีความสำคัญกับจุดยึด ข้อต่อต่างๆ ที่ขึ้นกับระบบอื่นๆ
- 3.1.6 ควรออกแบบภายใต้งบประมาณที่จำกัด
- 3.1.7 คำนึงถึงระยะเวลาในการสร้างชิ้นงานจริง

3.2 กระบวนการการออกแบบ



รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

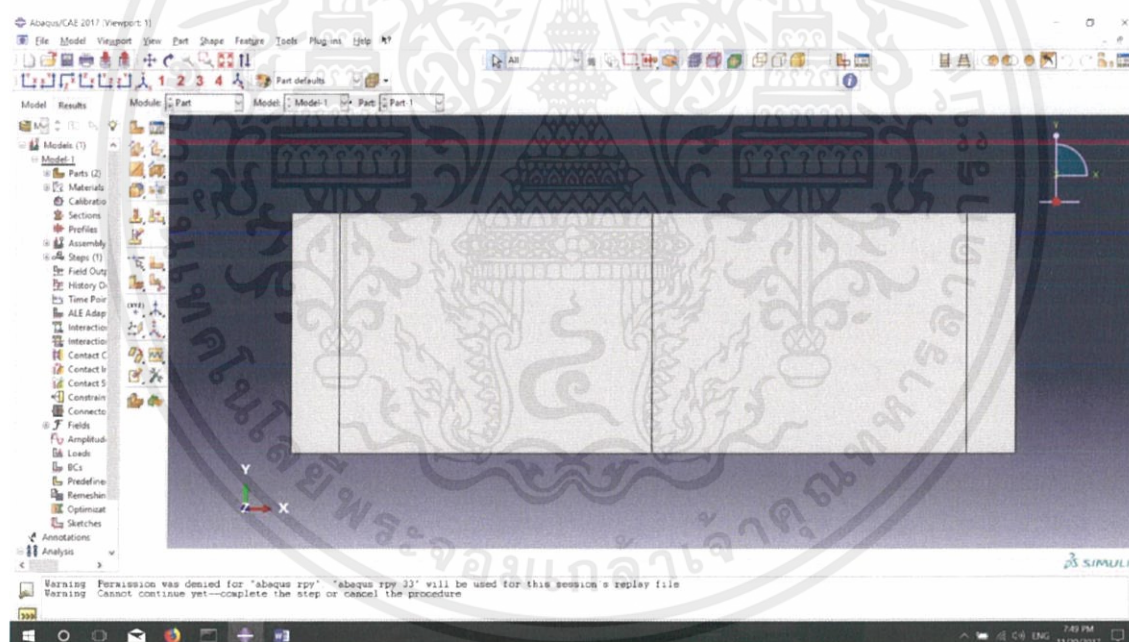
3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม ABAQUS สำหรับการออกแบบตัวอย่างโครงสร้าง

3.3.1 สร้างแบบจำลองโครงสร้าง โดยเลือก Part > Create

3.3.2 กำหนดลักษณะของชิ้นงาน

Modeling space	Type	Shape	Type	Approximate (m)
3D	Deformable	Shell	Planar	1

3.3.3 กำหนดชิ้นงานขนาด 100 × 300 มิลลิเมตร และแบ่ง Partition ของชิ้นงานเพื่อเป็นฐานในการรองรับแรงกด โดยเลือกที่ Partition Face : Sketch แล้วเลือกที่ชิ้นงาน แบ่งชิ้นงานออกเป็นสามส่วนโดยการสร้างเส้นตรงให้มีระยะจากขอบชิ้นงานเข้ามาข้างละ 20 มิลลิเมตร และสร้างเส้นตรงตรงกลางชิ้นงานดังรูป



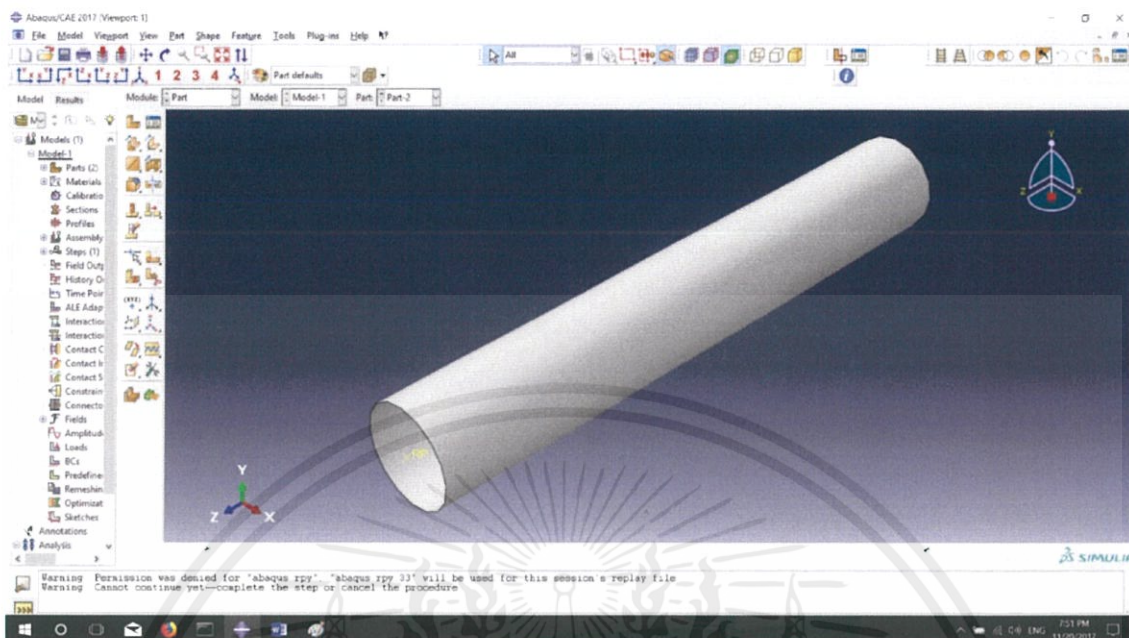
รูปที่ 3.2 แสดงการกำหนดลักษณะชิ้นงานทดสอบ

3.3.4 สร้างตัวรองรับของแบบจำลองขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

Modeling space	Type	Shape	Type	Approximate (m)
3D	Discreate rigid	Shell	Extrusion	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ใส่ Reference point ตรงกลางท่อ โดยเลือก Tool > Reference Point



รูปที่ 3.3 แสดงการใส่ Reference Point

3.3.6 กำหนดค่าคุณสมบัติของชิ้นงาน โดยเลือก Module > Properties > Material > Create จะเจอหน้าต่างใหม่ ให้เลือกที่ Mechanical > Elasticity > Elastic ให้เปลี่ยน Type เป็น Engineering Constant แล้วใส่ค่าคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ ดังนี้

E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23

ที่มา :

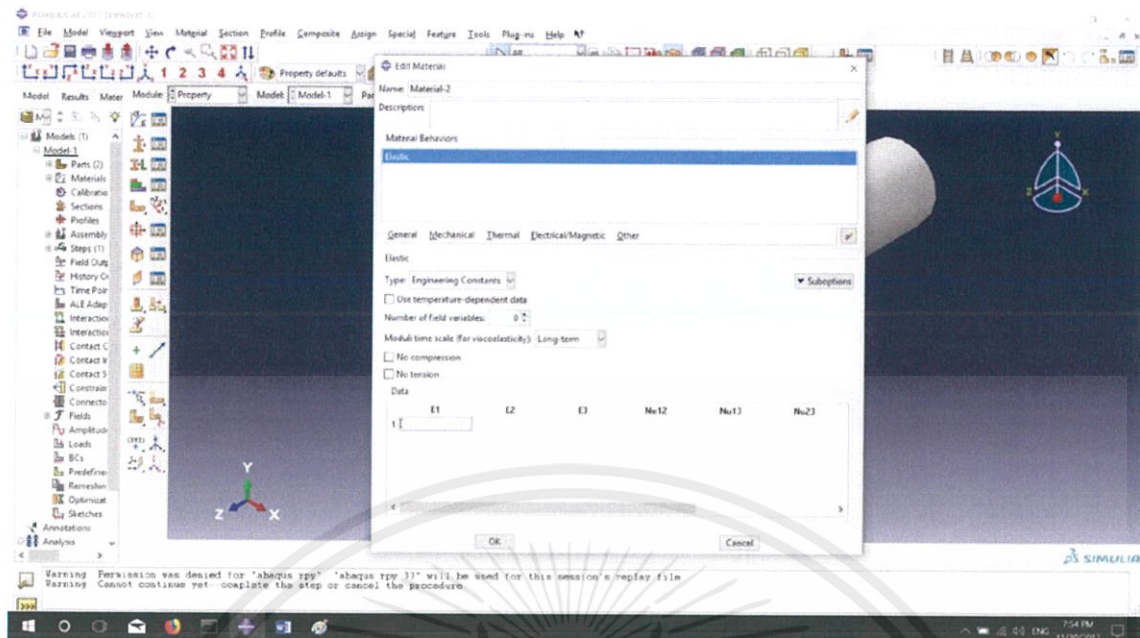
โดยที่ E1 คือ ค่ามอดูลัสของยังในทิศทาง x Nu12 คือ อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง xy

E2 คือ ค่ามอดูลัสของยังในทิศทาง y Nu13 คือ อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง xz

E3 คือ ค่ามอดูลัสของยังในทิศทาง z Nu23 คือ อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง yz

G12 คือ ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง xy G13 คือ ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง xz

G23 คือ ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง yz



รูปที่ 3.4 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์

ทำขั้นตอนการกำหนดค่าคุณสมบัติอีกครั้งโดยใส่คุณสมบัติของแกน Coremat Lantor ดังนี้

E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23

ที่มา :

โดยที่ E1 คือ ค่ามอดูลัสของยังในทิศทาง x Nu12 คือ อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง xy

E2 คือ ค่ามอดูลัสของยังในทิศทาง y Nu13 คือ อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง xz

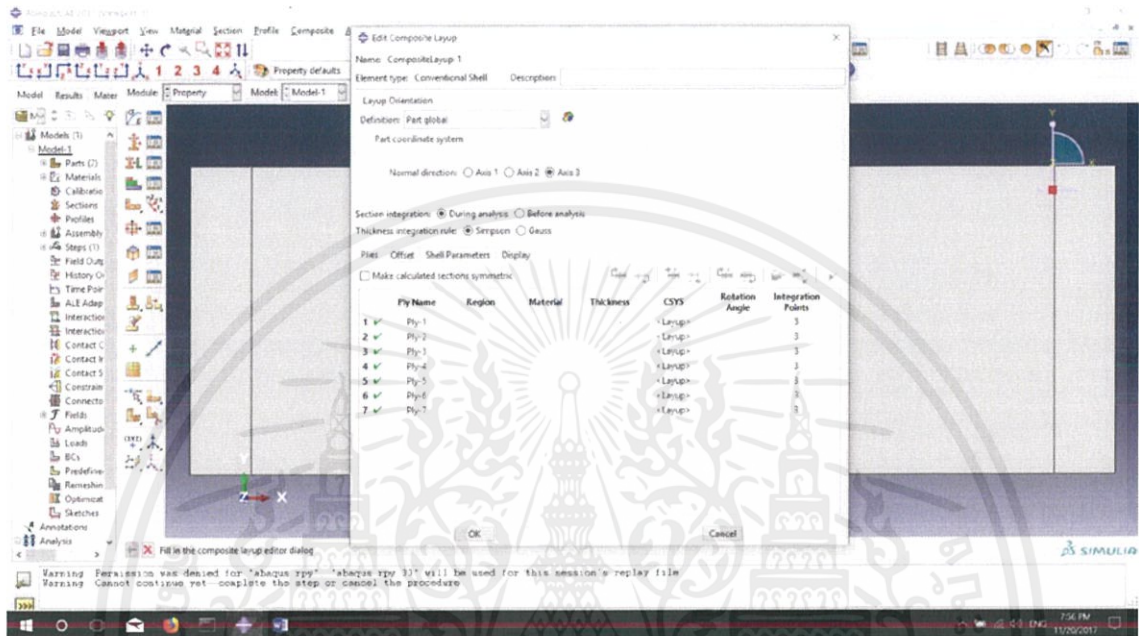
E3 คือ ค่ามอดูลัสของยังในทิศทาง z Nu23 คือ อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง yz

G12 คือ ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง xy G13 คือ ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง xz

G23 คือ ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง yz

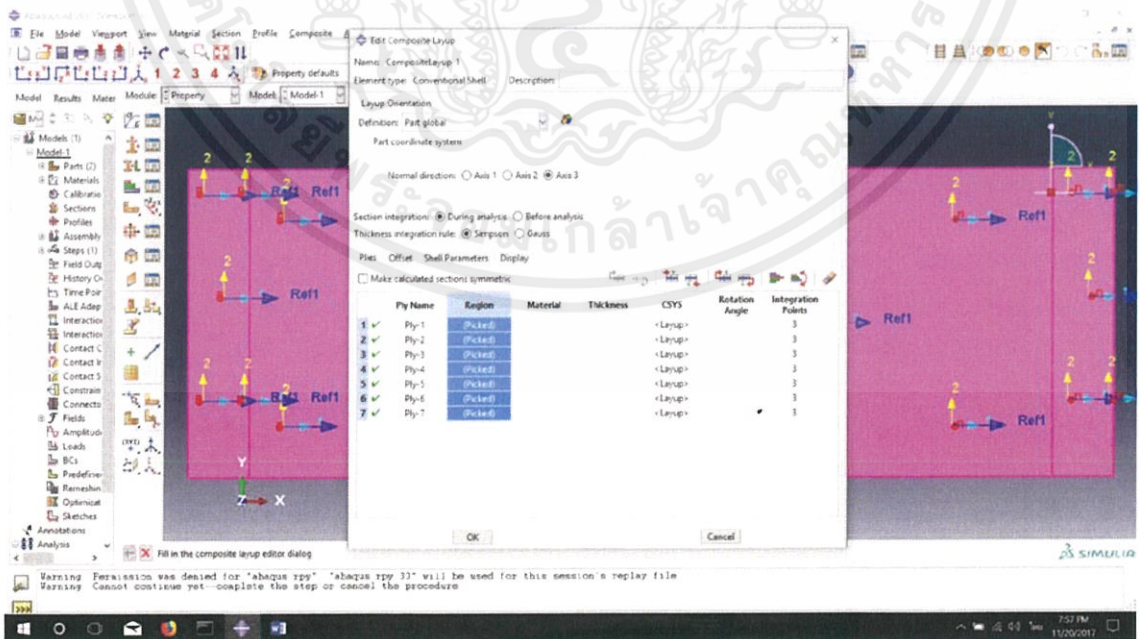
3.3.7 กำหนดลักษณะของชิ้นงาน โดยเลือก Composite > Create

Initial ply count	Element Type
7	Conventional Shell



รูปที่ 3.5 แสดงจำนวนชั้นของชิ้นงานทดสอบ

3.3.8 กำหนดส่วนที่จะใส่ค่าคุณสมบัติของชิ้นงาน คลิกขวาที่ Region > Edit และเลือกที่ชิ้นงาน

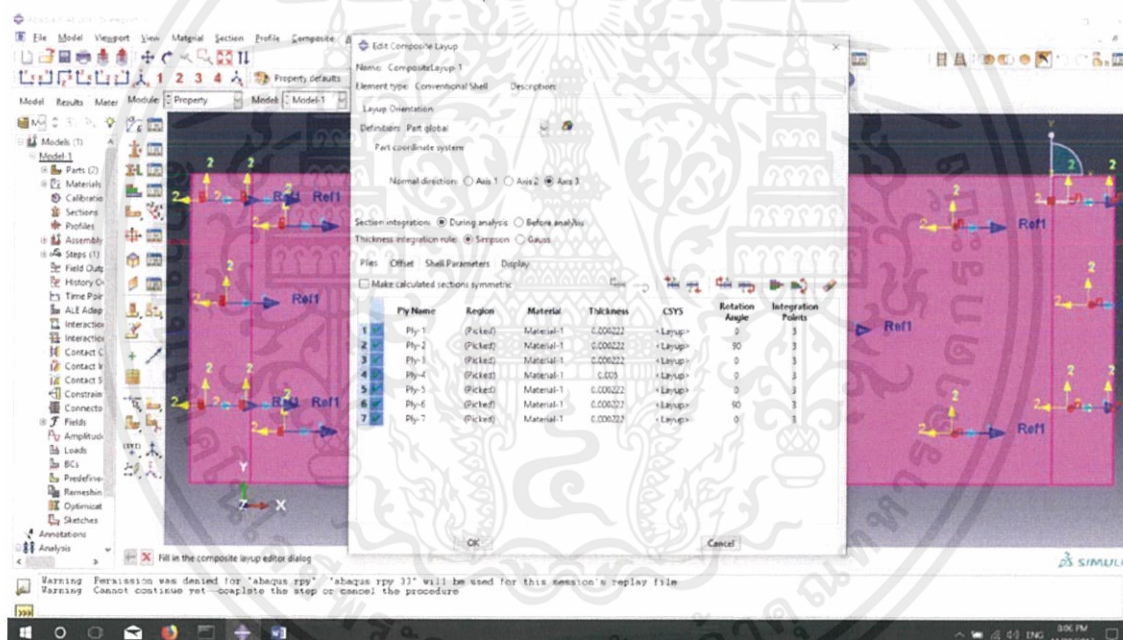


รูปที่ 3.6 แสดงการเลือกชิ้นงานทดสอบเพื่อใส่ค่าคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 กำหนดส่วนที่เป็นค่าคุณสมบัติของชิ้นงานในแต่ละชั้น คลิกขวาที่ Material > Edit Material > เลือกค่าคุณสมบัติของชิ้นงาน ใส่ค่าความหนา และองศาการวางแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

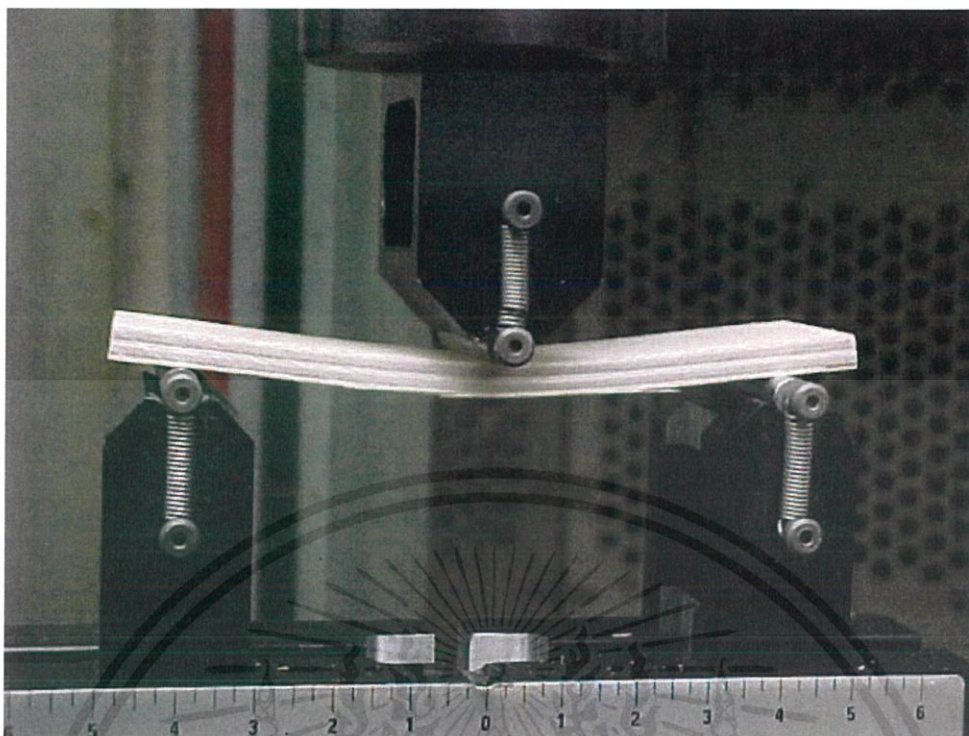
Ply Name	Material	Thickness (m)	Rotation Angle
Ply - 1	CFRP	0.000222	0
Ply - 2	CFRP	0.000222	90
Ply - 3	CFRP	0.000222	0
Ply - 4	Coremat lantor	0.005	0
Ply - 5	CFRP	0.000222	0
Ply - 6	CFRP	0.000222	90
Ply - 7	CFRP	0.000222	0



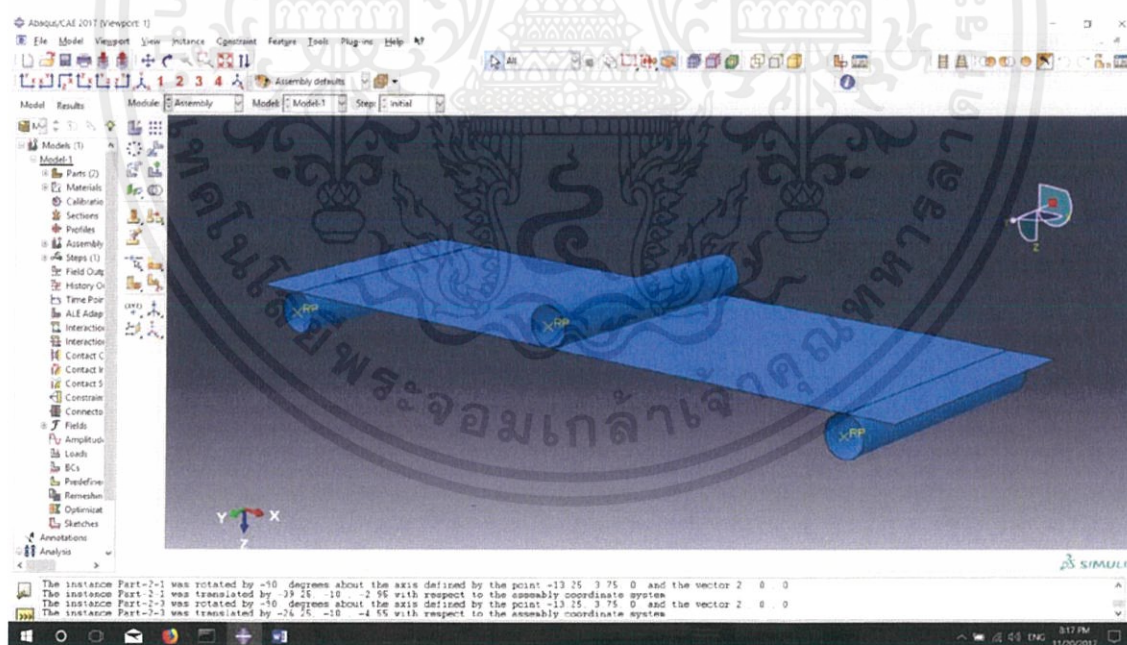
รูปที่ 3.7 แสดงค่าคุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบในแต่ละชั้น

3.3.10 ทำการประกอบ (Assembly) โดยเลือก Module > Assembly > Instance Create > Instance Type (Independence – mesh on instance) ทำการ Import Part ชิ้นงานมาหนึ่งชิ้น และชิ้นส่วนรองรับอีกจำนวน 3 ชิ้นส่วนทำการเลื่อนชิ้นส่วนรองรับไปยังตำแหน่งตามเส้นที่แบ่งไว้เมื่อขั้นตอนการแบ่ง Partition เพื่อให้เหมือนกับการทดสอบจริง ซึ่งเป็นการทดสอบแบบแรงกดแบบสามจุด (3 Points bending)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องทดสอบการกดแบบสามจุด



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการวางตำแหน่งการกดแบบสามจุดในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.11 กำหนดลำดับ (Step) โดยเลือก Module > Step > Step Create ให้ Procedure type เป็น General แล้วเลือก Static, General คลิก ok

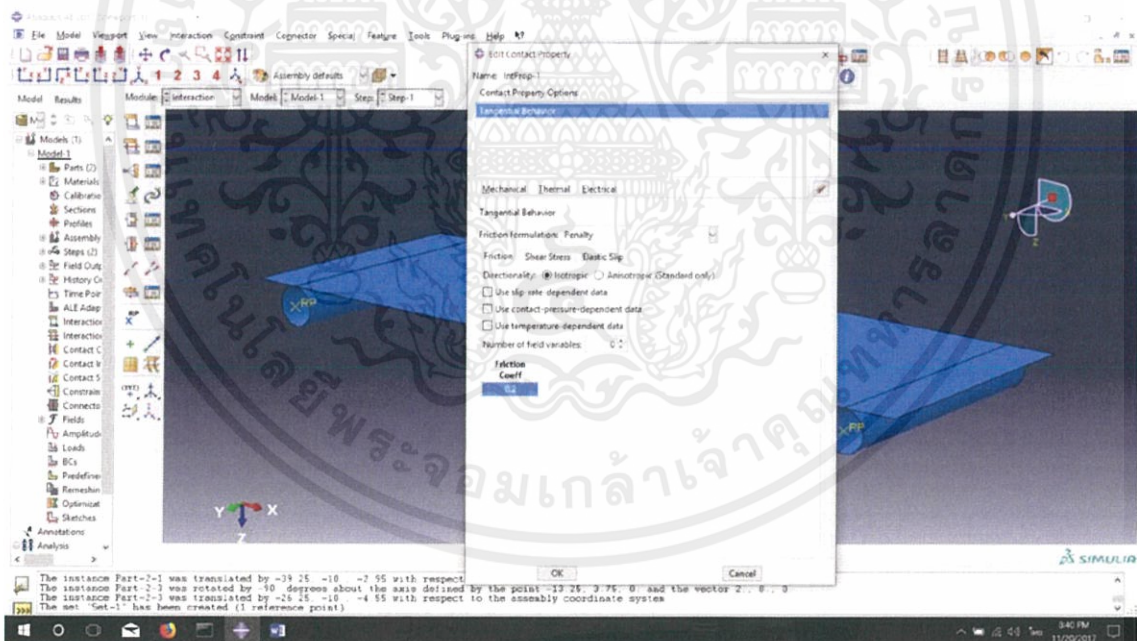
กำหนดการวัดค่าที่หัวกด โดยทำการ set ค่าที่ตรงหัวกด โดยเลือก Tool > Set > Create เสร็จแล้วคลิกเลือกที่จุด RP ของหัวกดตรงกลาง คลิก Done

ให้โปรแกรมอ่านค่าที่หัวกด โดยเลือก Output > History Output Requests > Manager > Edit เปลี่ยน Domain จาก Whole model เป็น Set ในส่วน Output Variables ให้เลือก U3 และ RF3

ต่อไปทำการกำหนด Interaction ให้กับชิ้นงาน

3.3.12 กำหนดคุณสมบัติของจุดสัมผัส โดยเลือก Module > Interaction > Properties > Create เลือก Type : Contact คลิก Continue

จะเจอหน้าต่างใหม่ ให้เลือกที่ Mechanical > Tangential behavior เปลี่ยน Friction formulation จาก Frictionless เป็น Penalty ใส่ค่า Friction Coefficient เท่ากับ 0.2 [Ives De Baere. Design of a three-point bending setup for fatigue testing of fiber-reinforced]



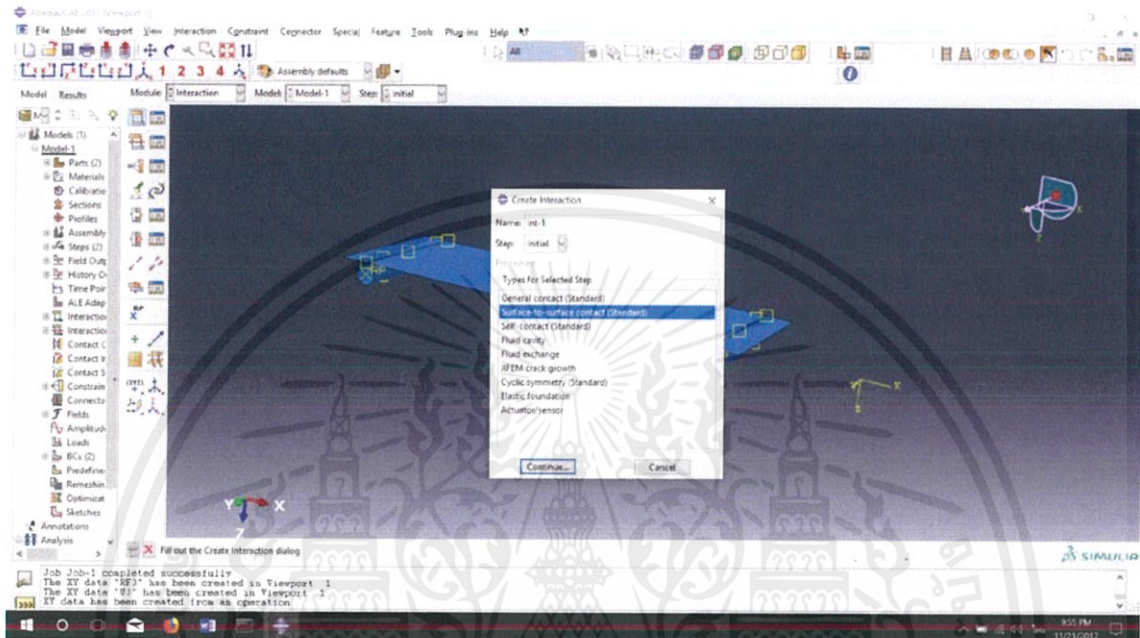
รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของจุดสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ ชิ้นส่วนรองรับติดกับชิ้นงาน โดยเลือก Interaction > Create

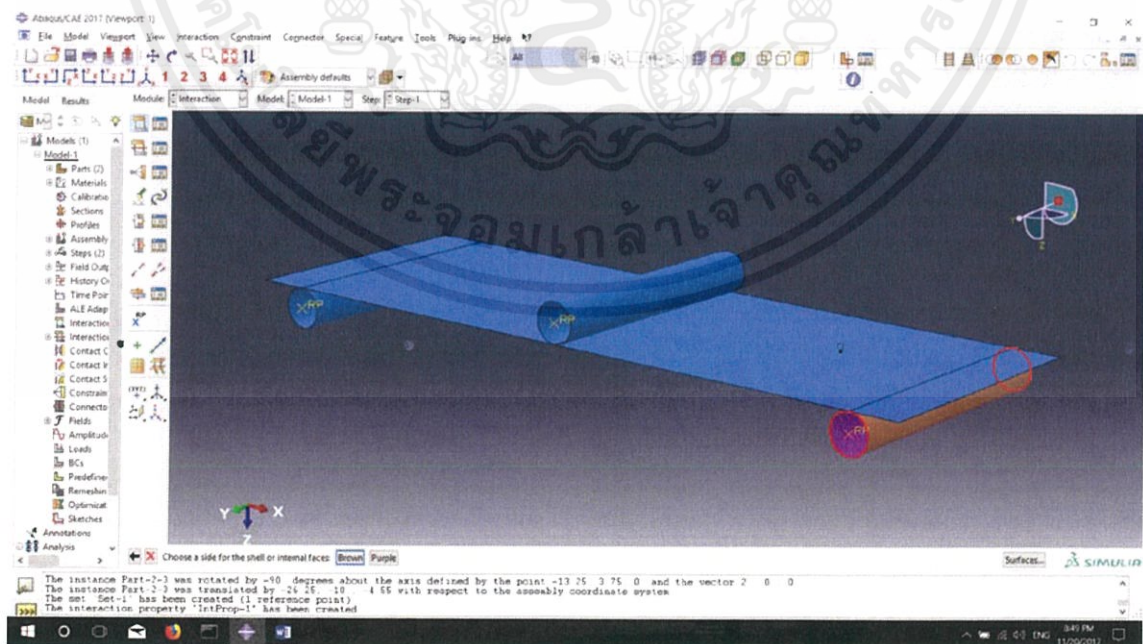
Step	Type for Selected Step
Initial	Surface-to-surface contact (Standard)

คลิก Continue



รูปที่ 3.11 แสดงการสร้างจุดสัมผัส (Interaction)

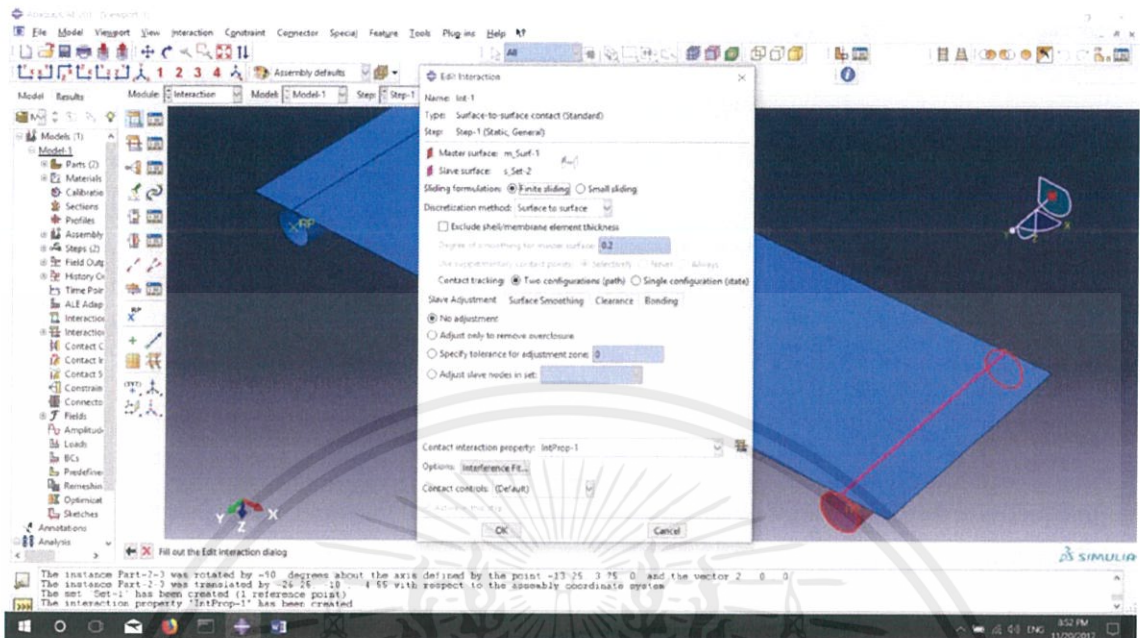
คลิกเลือก Surface ของชิ้นส่วนรองรับเป็น Master แล้วเลือก Brown



รูปที่ 3.12 แสดงการกำหนดจุดสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

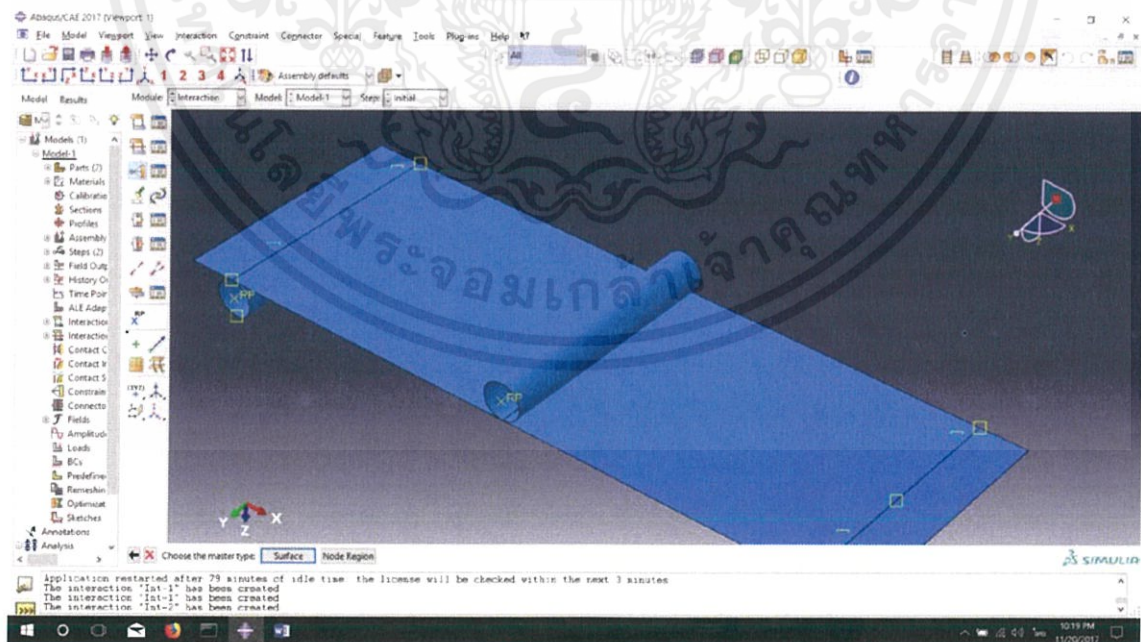
เลือก slave type เป็น Node Region แล้วเลือกเส้นที่แบ่ง Partition ไว้ในตอนแรก



รูปที่ 3.13 แสดงการสร้างจุดสัมผัส (Interaction)

คลิก OK และทำการกำหนด Interaction ของอีกด้านให้เหมือนกัน

3.1.13 ทำการกำหนด Interaction ส่วนของหัวกด โดยเลือก Constraint > Create > Type > Tie คลิก Continue



รูปที่ 3.14 แสดงการกำหนดลักษณะของหัวกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือก Surface เป็น Master แล้วเลือก Brown เลือก salve type เป็น Node Region แล้วเลือก เส้นตรงกลางที่ทำการแบ่ง Partition ไว้ในตอนแรก

3.1.14 ทำการกำหนดเงื่อนไขให้กับโปรแกรมโดยกำหนดให้ห้วกคดตกลงด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามที่ทดสอบจริง โดยเลือกที่ Module > BC > Create

Step	Category	Types for Selected Step
Step-1	Mechanical	Velocity/Acceleration

คลิกเลือกที่จุด RP ของชิ้นส่วนห้วกคด คลิก Done

โดยกำหนดให้

V1	V2	-V3	VR1	VR2	VR3
0	0	0.005	0	0	0

โดยที่

V1 คือ ความเร็วในแนวแกน x

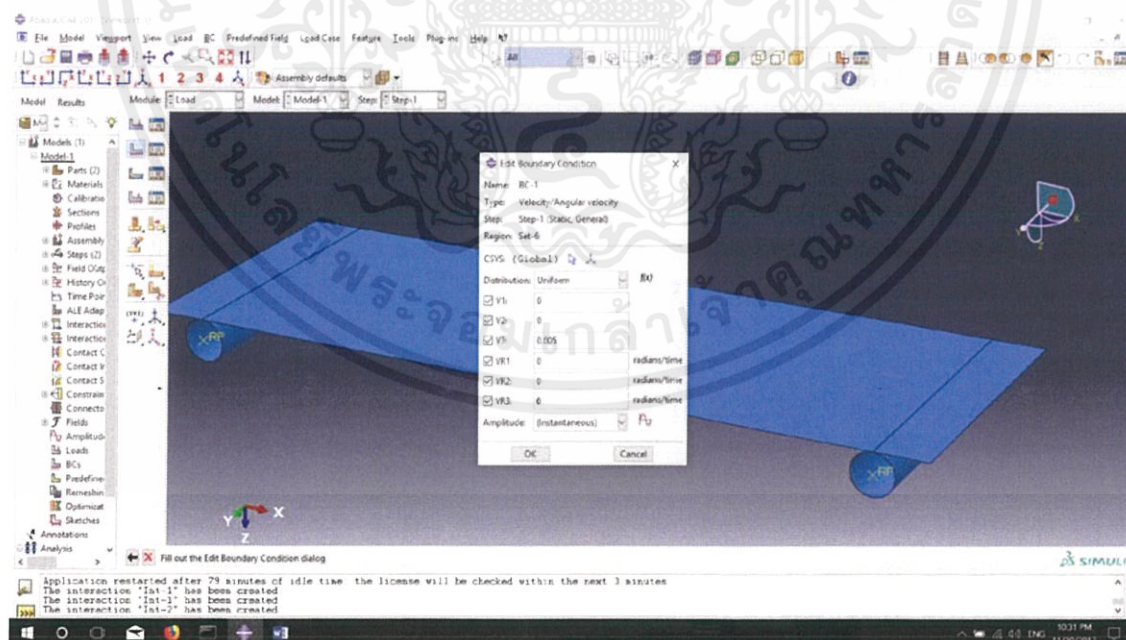
VR1 คือ ความเร็วเชิงมุมในแนวแกน x

V2 คือ ความเร็วในแนวแกน y

VR2 คือ ความเร็วเชิงมุมในแนวแกน y

V3 คือ ความเร็วในแนวแกน z

VR3 คือ ความเร็วเชิงมุมในแนวแกน z



รูปที่ 3.15 แสดงการกำหนดค่า BC ของห้วกคด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.15 ทำการกำหนดจุดรองรับของชิ้นงาน โดยเลือก BC > Create

Step	Category	Types for Selected Step
Step-1	Mechanical	Displacement/Rotation

เลือกที่จุด RP ของชิ้นส่วนรองรับทั้งสองชิ้น คลิก Done

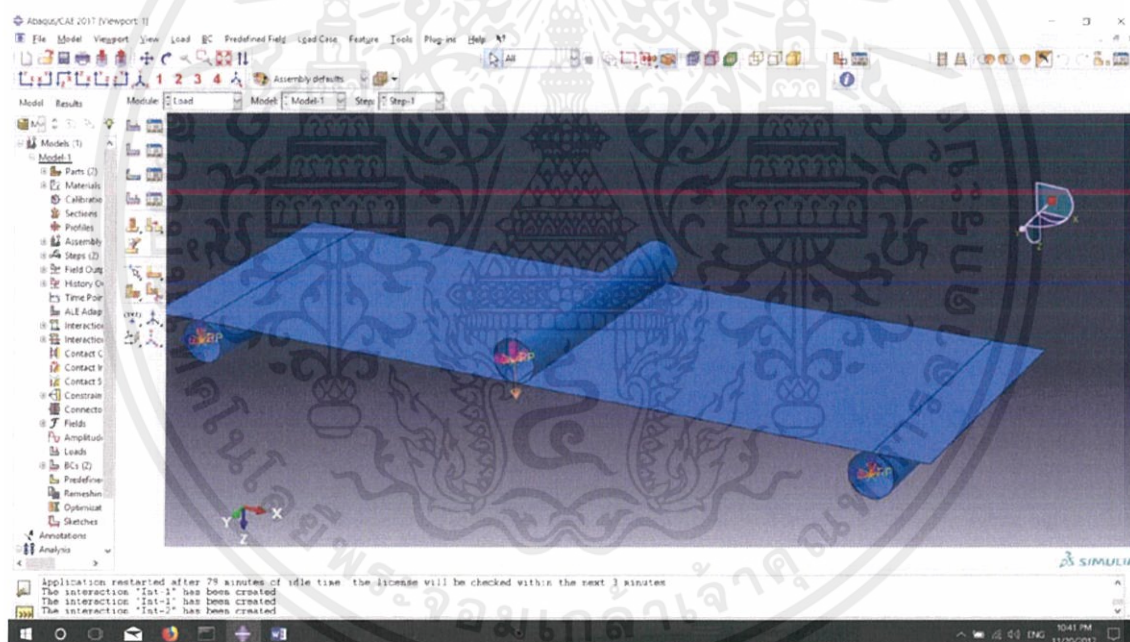
โดยกำหนดให้

U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
0	0	0	0	0	0

โดยที่ U1 คือการยึดในแนวแกน x UR1 คือ การยึดเชิงมุมในแนวแกน x

U2 คือการยึดในแนวแกน y UR2 คือ การยึดเชิงมุมในแนวแกน y

U3 คือการยึดในแนวแกน z UR3 คือ การยึดเชิงมุมในแนวแกน z

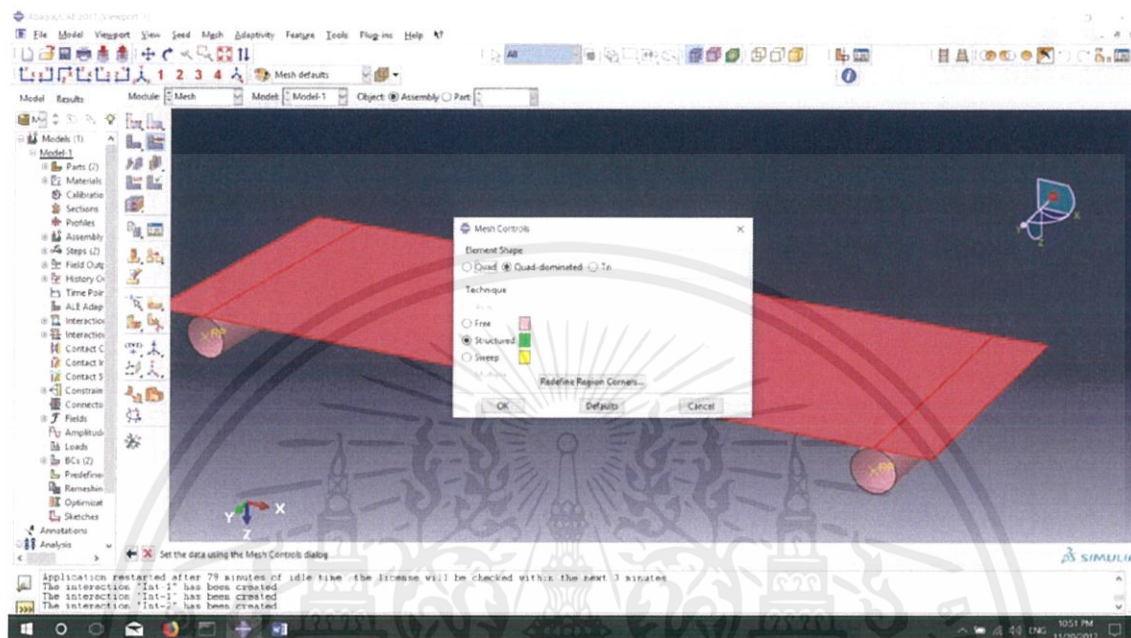


รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของหัวกดและจุดรองรับที่ทำการใส่ค่า BC เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.16 การสร้างเมส (Mesh)

โดยเลือก Module > Mesh > Assign Mesh Controls เพื่อเปลี่ยนลักษณะ Mesh ให้เป็นสี่เหลี่ยม
คลิกเลือกที่ชิ้นงาน คลิก Done



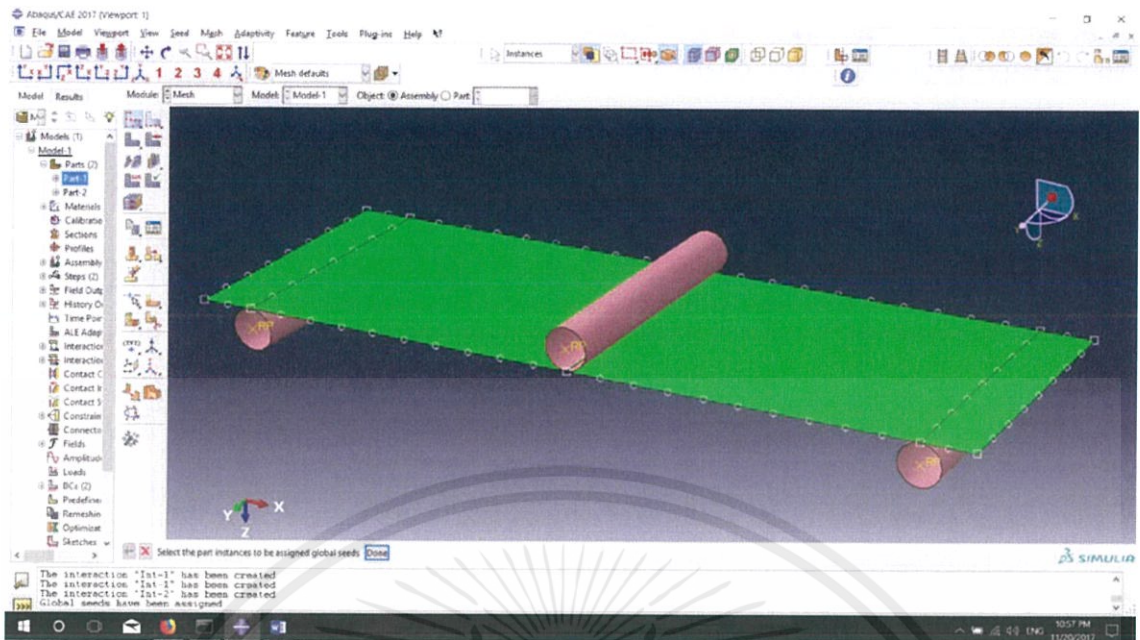
รูปที่ 3.17 แสดงการสร้างเมส (Mesh)

โดยกำหนดให้

Element Shape	Technique
Quad-dominated	Structured

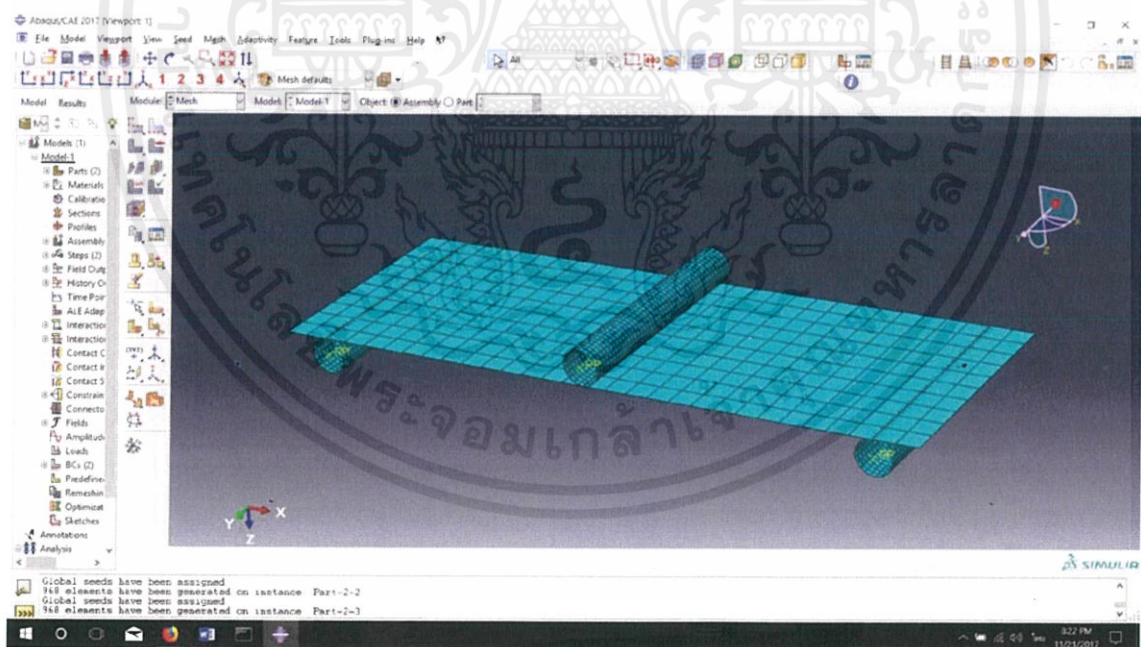
เลือกที่ Seed Part Instance คลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงการสร้างเมส (Mesh)

เลือกที่ Mesh Part Instance คลิกที่ชิ้นงาน

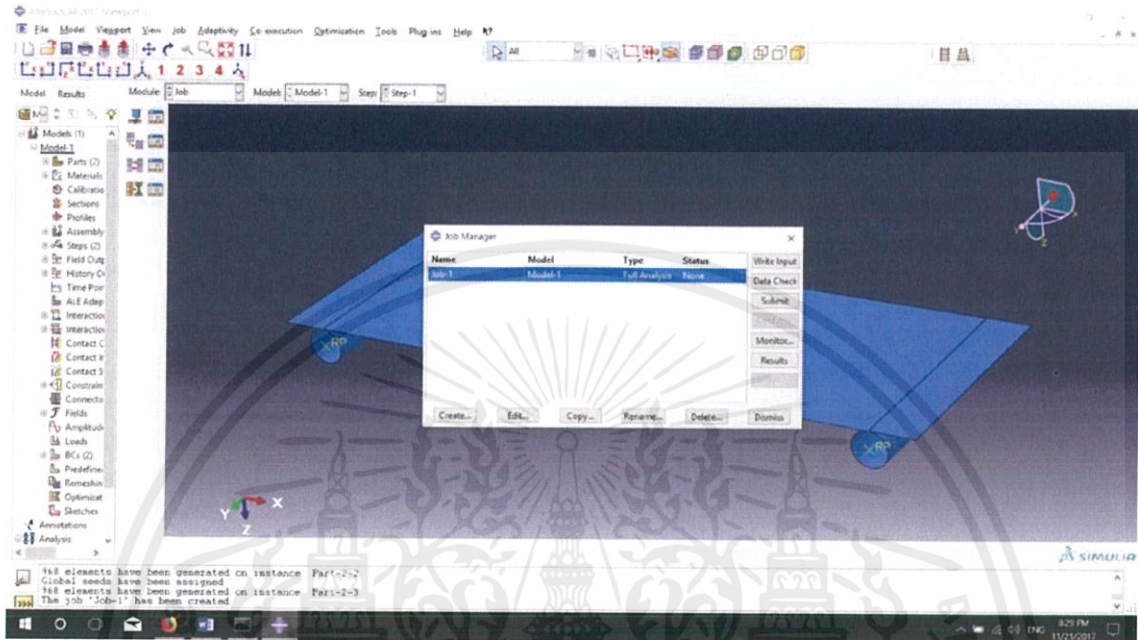


รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างเมส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

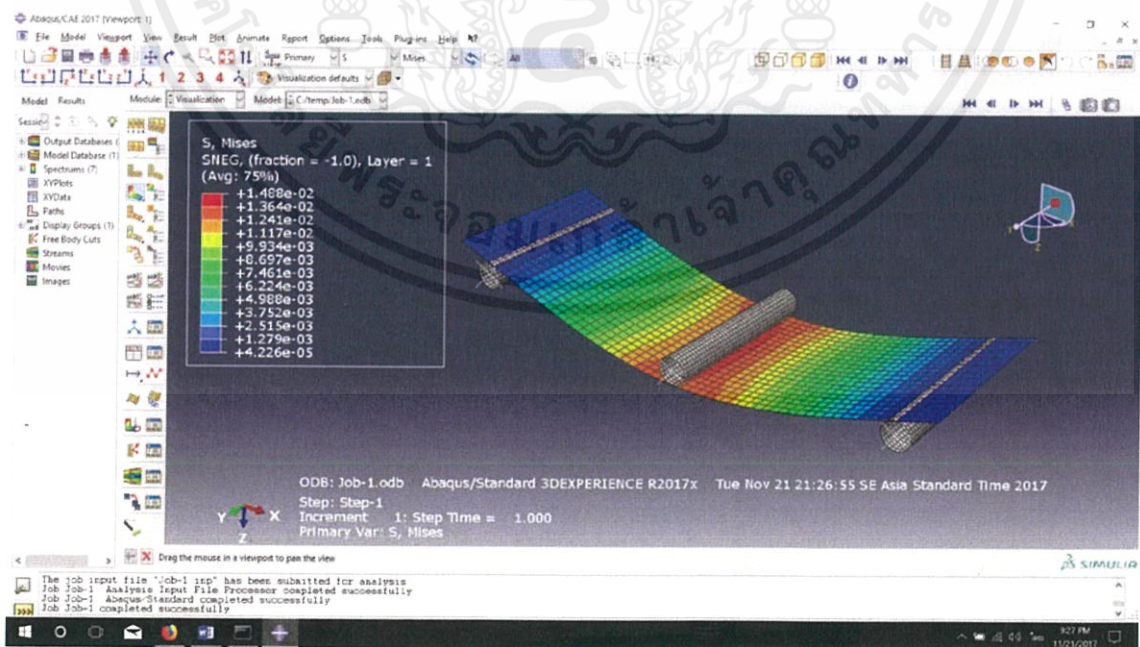
3.3.17 การใช้งาน Module Job

เป็นการกำหนดค่าก่อนสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณ โดยเลือก Module > Job > Create คลิก Continue ให้ใช้ค่าเริ่มต้นตามที่โปรแกรมให้มา คลิก OK



รูปที่ 3.20 แสดงการสร้าง Job

คลิก Submit โปรแกรมจะทำการประมวลผล หลังจากประมวลผลเสร็จ ที่ช่อง Status จะแสดงผลว่า Completed คลิกที่ Results เพื่อดูผลการคำนวณ



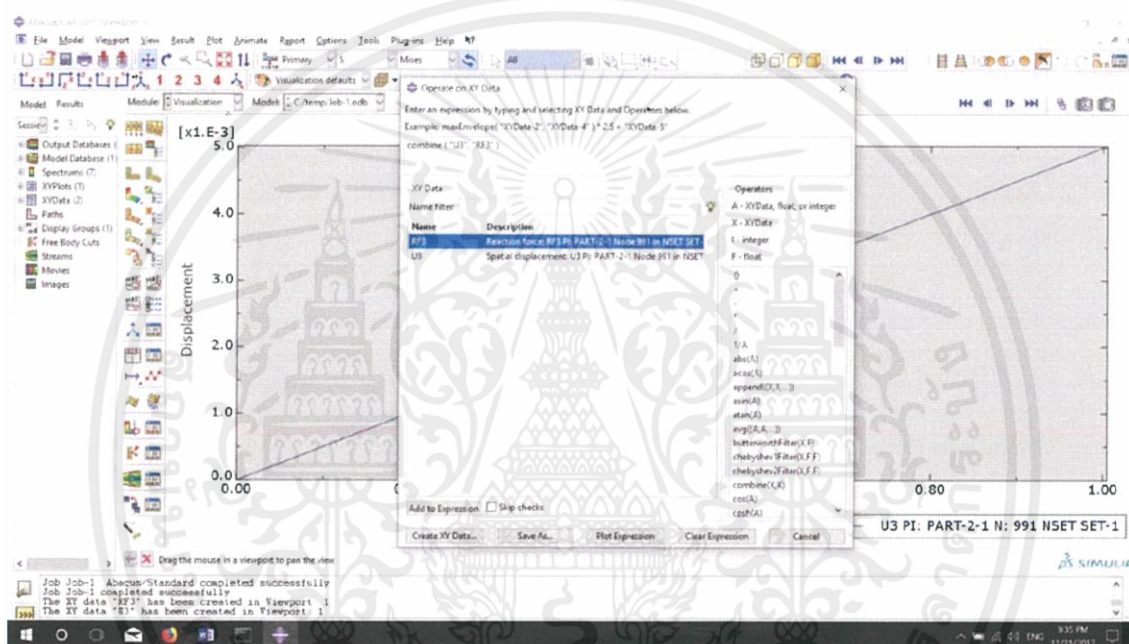
รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเครื่องมือที่ทำการทดสอบการกดแบบสามจุดนั้น แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงกับระยะทาง ดังนั้น การกำหนดให้โปรแกรมแสดงการพล็อตกราฟแรงเปรียบเทียบกับระยะทางสามารถทำได้ดังนี้

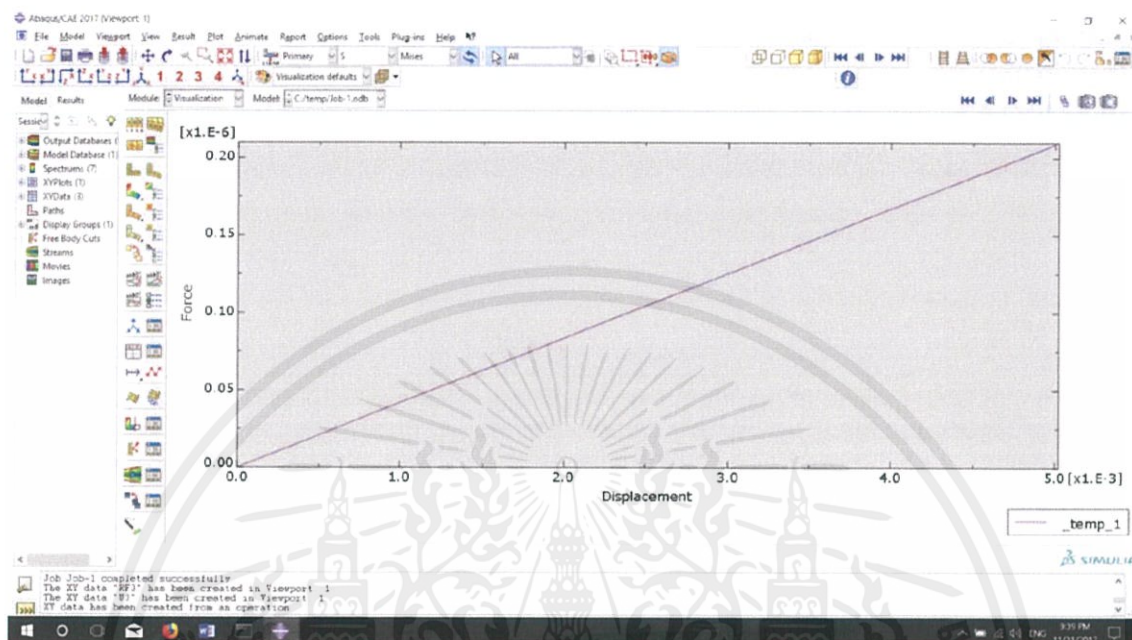
Create XY Data > ODB History output เลือก Reaction Force: RF3 แล้วเซฟในชื่อ RF3 ทำอย่างเดียวกันกับ Spatial displacement: U3 ในชื่อ U3 เสร็จแล้วคลิก Dismiss

คลิกที่ Create XY Data > Operate XY data เลือกตรง Operators เป็น combine(X,X) จากนั้นเลือก U3 และ RF3 ที่ทำการเซฟไว้ คลิก Plot Expression



รูปที่ 3.22 แสดงการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบของชิ้นงานทดสอบ

จากการวิเคราะห์ สีที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเกิดจากภาระหรือแรงที่กระทำบนชิ้นงาน แสดงถึงค่า Von Mises Stress ในบริเวณต่างๆที่แตกต่างกับ สีแดงแสดงถึงบริเวณที่มีค่า Von Mises Stress ที่สูง แสดงการเกิดความเค้นมากที่สุดและไล่ตามลำดับลงมา



รูปที่ 3.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบของชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กรรมวิธีผลิตและอุปกรณ์

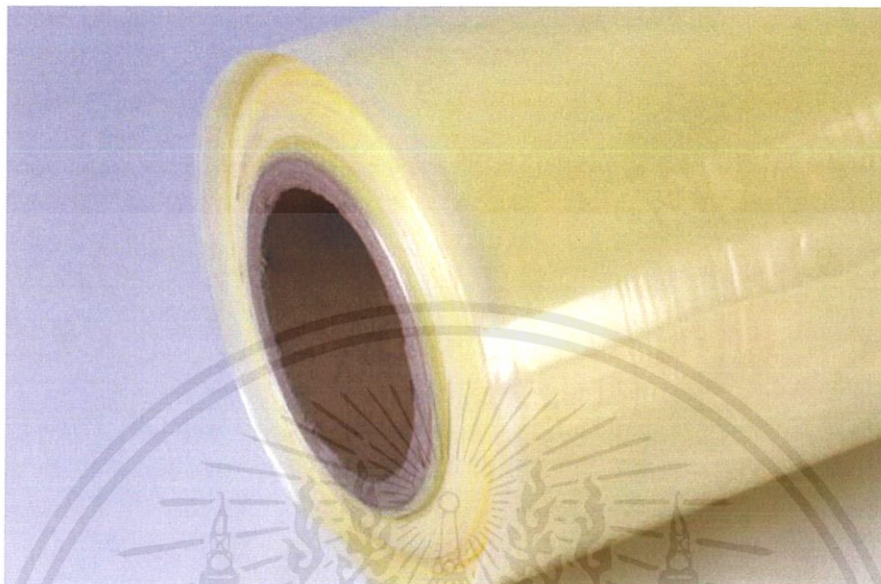
ในบทนี้จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการผลิตชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อนำชิ้นงานมาทดสอบ และเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม เพื่อให้ทราบว่าโปรแกรมสามารถใช้ได้จริง โดยจะแบ่งชิ้นงานทดสอบเป็น 6 แบบ ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งแบบที่ 1-3 จะวางคาร์บอนในแนวเดียวกัน แบบที่ 4-6 จะวางคาร์บอนแนวขวาง และเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำมากที่สุด ในการทำชิ้นงานแต่ละแบบ จะสร้างชิ้นงาน 5 ชิ้น รวมชิ้นงานทั้งหมด 30 ชิ้น

ตารางที่ 4. 1 แสดงแบบชิ้นงานทดสอบ 6 แบบ

ชิ้นงานทดสอบ	จำนวนชั้นคาร์บอน	จำนวนชั้นแกนกลาง	การวางลายผ้าคาร์บอน
ชิ้นงาน 1A	รวมทั้งหมด 6 ชั้น	1 ชั้น (20 มิลลิเมตร)	ลายเดียวกัน
ชิ้นงาน 2A		2 ชั้น (10 มิลลิเมตร)	
ชิ้นงาน 3A		4 ชั้น (5 มิลลิเมตร)	
ชิ้นงาน 1B		1 ชั้น (20 มิลลิเมตร)	สลับลาย 45 องศา
ชิ้นงาน 2B		2 ชั้น (10 มิลลิเมตร)	
ชิ้นงาน 3B		4 ชั้น (5 มิลลิเมตร)	

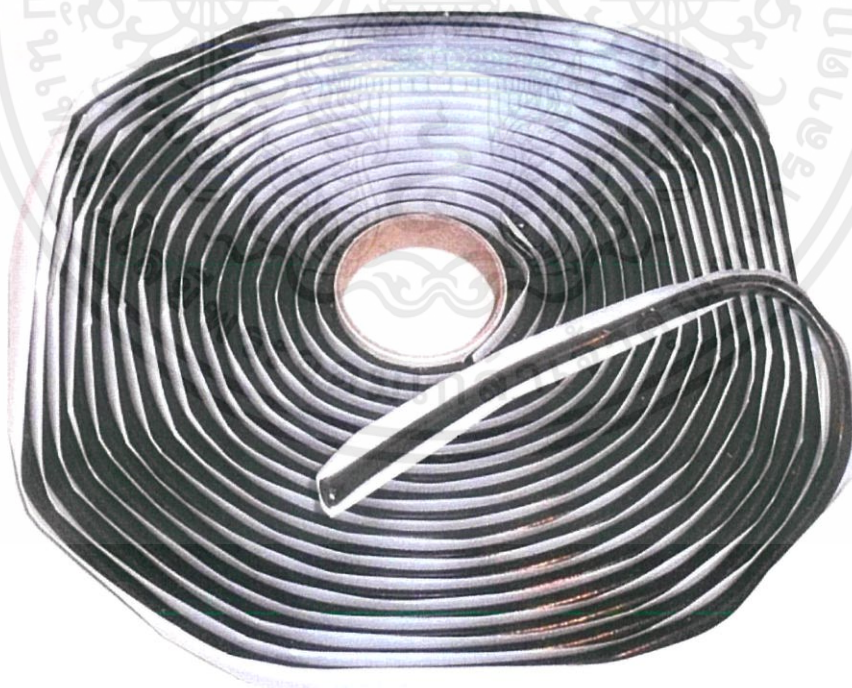
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด

4.1.1 Vacuum Bag แผ่นฟิล์มสำหรับงานในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.1 Vacuum Bag

4.1.2 Sealant Tape แผ่นกาวปิดขอบ คือแถบกาวเหนียวสองด้านใช้ติดขอบรอบชิ้นงาน



รูปที่ 4.2 Sealant tape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 Vacuum Valve ออกแบบสำหรับงานเวิร์คคัมแบ็กกิ้ง(Vacuum backing)



รูปที่ 4.3 Vacuum Valve

4.1.4 Catch Pot ถ้วยดักเรซินพร้อมมาตรวัดแรงดูดอากาศ ใช้ดักเรซินส่วนเกินที่อาจดูดออกมาจากชิ้นงาน ป้องกันไม่ให้เรซินเข้าไปในปั๊มดูดอากาศทำให้เครื่องเสียได้



รูปที่ 4.4 Catch Pot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 Vacuum Pump เครื่องดูดอากาศออกจากชิ้นงานที่ความดัน -1 bar



รูปที่ 4.5 Vacuum Pump

4.2 ขั้นตอนการทำชิ้นงานทดสอบ

4.2.1 วาง Vacuum Bag บนพื้นทิวเรียบ

4.2.2 วางผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ตามจำนวนที่ออกแบบไว้ แล้วทา Epoxy Resin



รูปที่ 4.6 แสดงการวางผ้าคาร์บอนและทา Epoxy Resin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 วางแผ่นโฟมสลักกับผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ตามจำนวนที่ออกแบบไว้ โดยทา Epoxy Resin ที่ชั้นผ้าคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 4.7 แสดงการวางแผ่นโฟมบนผ้าคาร์บอนหลังจากทาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

4.2.4 ติด Sealant Tape ที่ Vacuum Bag โดยล้อมชิ้นงานทั้งหมด



รูปที่ 4.8 แสดงการติด Sealant Tape หลังจากวางผ้าคาร์บอนสลักแผ่นโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ประกอบ Vacuum Bag เข้าหากัน

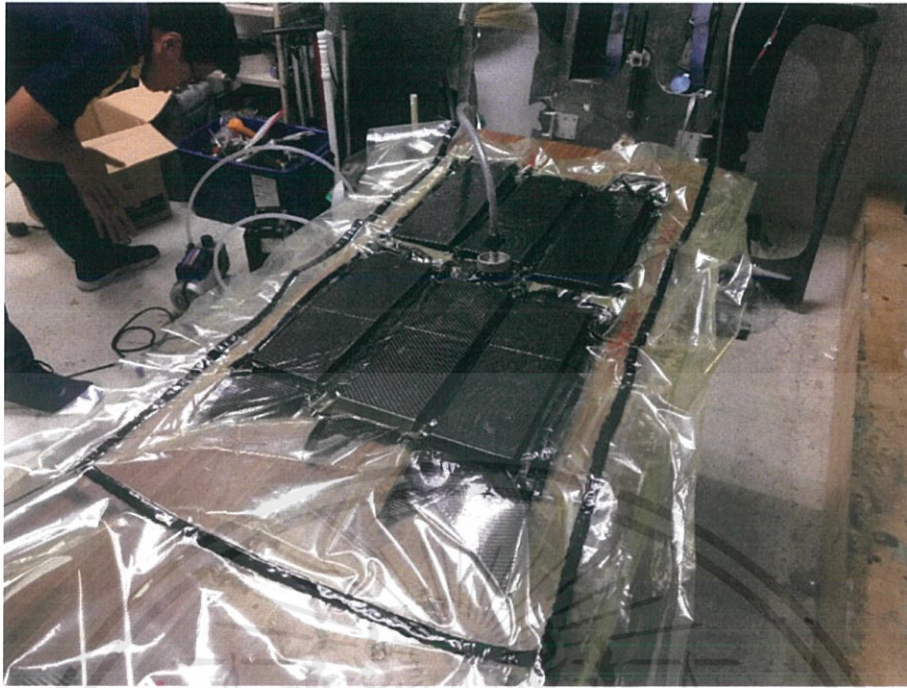
4.2.6 ติดตั้ง Vacuum Valve ที่ Vacuum Bag



รูปที่ 4.9 แสดงการติดตั้ง Vacuum Valve และประกอบ Vacuum Bag

4.2.7 ลอกกระดาษ Sealant Tape ออกเพื่อติด Vacuum Bag เข้าด้วยกัน

4.2.8 เปิด Vacuum Pump เพื่อดูดอากาศออกที่ความดัน 1 บาร์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 แสดงภาพเมื่อเครื่องทำงาน

4.2.9 ได้ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานทดสอบที่เสร็จสมบูรณ์ จำนวน 6 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 รายละเอียดการทดสอบ

ในการทดสอบการโค้งงอของชิ้นงานจะทำโดยใช้เครื่องกด (Triaxial Compression Test) จะทำการทดสอบชิ้นงานแบบ 3 point bending โดยการกดชิ้นงานด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเกิดการเสียหายทำให้ทราบภาระสูงสุดในการกด ซึ่งจะได้ผลออกมาเป็นกราฟแรงสัมพันธ์กับระยะโค้งงอของชิ้นงาน โดยทั่วกตจะใช้ความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตรต่อวินาที



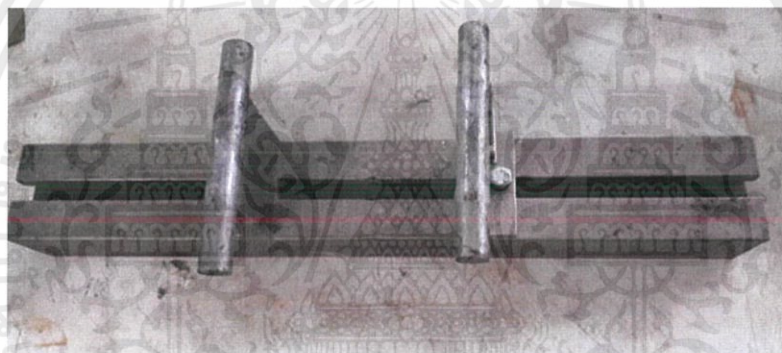
รูปที่ 5.1 เครื่องกด (Triaxial Compression Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 proving ring

อุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงในการกดและระยะการโค้งงอคือ proving ring ซึ่งสามารถรองรับแรงกดได้ถึง 10000 นิวตัน ซึ่งจะดูค่าที่ได้จาก dial gauge เมื่อเข็มของ dial gauge หมุนครบ 1 รอบ ระยะกดจะมีระยะ 1 mm. และค่าที่ได้นำไปคูณกับ 0.6351 จะได้แรงกดที่ใช้ในการทดสอบเป็นหน่วยกิโลกรัม



รูปที่ 5.3 ฐานรองสำหรับทดสอบ 3 point bending

ลักษณะหัวกดและฐานรองที่เลือกใช้ในการทดสอบก็ต้องมีลักษณะเหมือนกันกับวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แท่งเหล็กสำหรับฐานในการกดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ฐานทั้ง 2 มีระยะห่างกัน 240 มิลลิเมตร ในส่วนของหัวกดที่ติดอยู่กับ proving ring มีขนาด 40x60 มิลลิเมตร

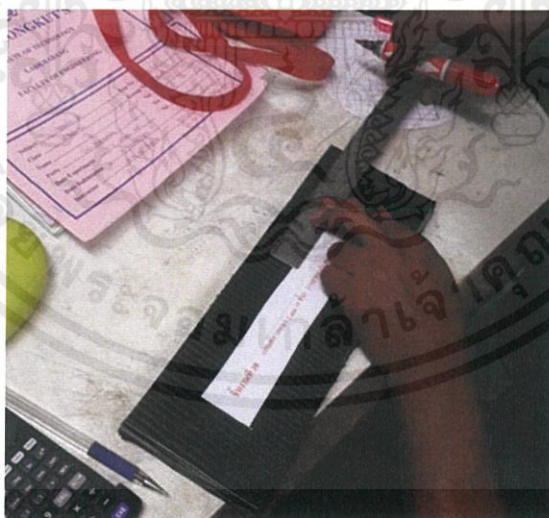
โดยชิ้นงานที่ทดสอบจะแบ่งออกเป็น 6 ชิ้นงาน 3 แบบแรกจะใช้การจัดวางลายผ้าคาร์บอนในแนวเดียวกัน 3 แบบหลังจะมีการจัดวางแนวผ้าคาร์บอนสลับกันในทิศทาง 45 องศา และในแต่ละชิ้นงานจะใช้จำนวนชั้นคาร์บอนเท่ากันแต่จะแตกต่างกันเพียงความหนาของแกนกลางโฟม ที่มีความหนา 20 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นจะมีน้ำหนักเท่ากัน และองค์ประกอบการผลิตเหมือนกันทุกประการ แตกต่างกันเพียงวิธีการวางลายการสลับชั้น โดยชิ้นงานแต่ละแบบจะทำการสร้างแบบละ 5 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ตารางชั้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

ชั้นงานทดสอบ	จำนวนชั้นคาร์บอน	จำนวนชั้นแกนกลาง	การวางสายผ้าคาร์บอน
ชั้นงาน 1A	รวมทั้งหมด 6 ชั้น	1 ชั้น (20 มิลลิเมตร)	ลายเดียวกัน
ชั้นงาน 2A		2 ชั้น (10 มิลลิเมตร)	
ชั้นงาน 3A		4 ชั้น (5 มิลลิเมตร)	
ชั้นงาน 1B		1 ชั้น (20 มิลลิเมตร)	สลับลาย 45 องศา
ชั้นงาน 2B		2 ชั้น (10 มิลลิเมตร)	
ชั้นงาน 3B		4 ชั้น (5 มิลลิเมตร)	

5.2 ขั้นตอนการทดสอบโครงสร้างแซนด์วิช

5.2.1 เตรียมชั้นงานทดสอบขนาด 100×300 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐานของการทดสอบ แล้วทำการวาดเส้นกึ่งกลางของชั้นงาน วาดเส้นตำแหน่งฐานรองที่ระยะถัดจากขอบชั้นงาน ด้านละ 20 มิลลิเมตร และวัดความหนาของชั้นงานด้วยเวอร์เนียคาร์ิเปอร์ เพื่อกำหนดตำแหน่งหัวกดเริ่มต้น



รูปที่ 5.4 เตรียมชั้นงานทดสอบขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 เปิดเครื่องทดสอบ ตั้งค่าความเร็วของหัวกด โดยกำหนดให้ความเร็วเป็น 5 เมตรต่อวินาที ทำการวางชิ้นงานตามตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นค่อยขยับชิ้นงานเพื่อให้หัวกดแนบชิดกับชิ้นงานจนกระทั่งค่าที่อ่านจากเข็ม dial gauge เป็นศูนย์



รูปที่ 5.4 เครื่องทดสอบ

5.2.3 กัดเริ่มการทำงานหัวกดจะทำการกดชิ้นงานจนเกิดการเสียรูปโดยต้องสังเกตผลการทดสอบที่เข็มของ dial gauge ซึ่งค่าที่มากที่สุดคือภาระที่ชิ้นงานสามารถรับแรงได้มากที่สุด หากกดไปเรื่อยชิ้นงานจะเริ่มเสียรูปจนเกิดการแตกหักไม่สามารถรับแรงได้มากกว่านี้อีกแล้ว แล้วทำการบันทึกผลที่ได้

5.3 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางโปรแกรม

จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 6 แบบ แบบละ 5 ชิ้นงานเพื่อดูความต้านทานการโค้งงอของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ทดสอบมีความแตกต่างกันที่ความหนาของแกนกลางชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกัน และการวางสายผ้าคาร์บอนจะมีทั้งการวางสายเดียวกันและการวางสลับสาย 45 องศา จะได้ผลการทดสอบซึ่งอ่านได้จาก dial gauge รวมทั้งหมด 30 ค่าดังนี้

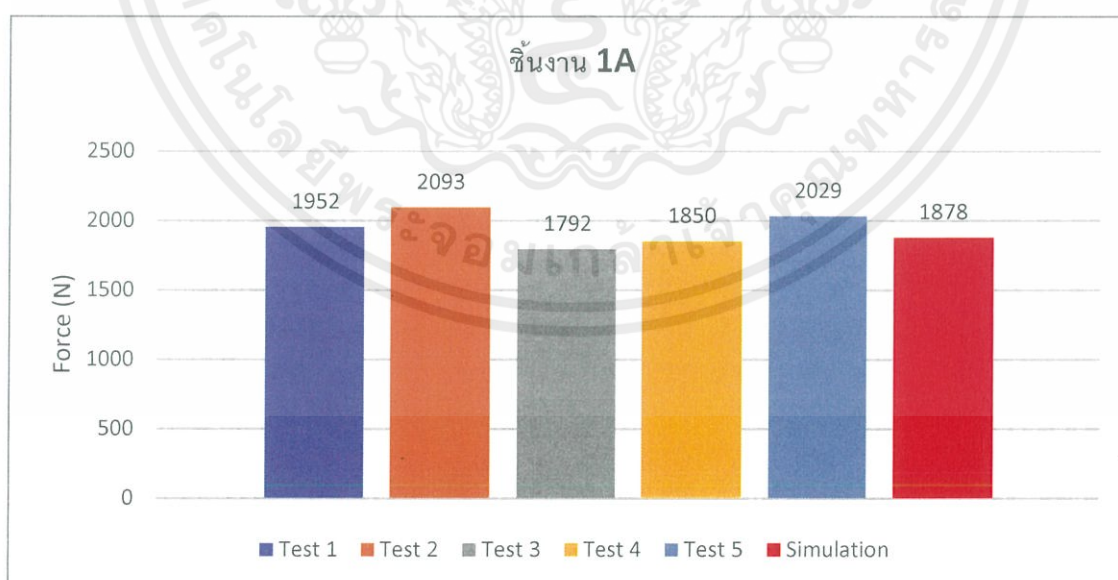
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบการกด

ค่าที่ได้จากการทดสอบ (อ่านค่าจาก dial gauge)					
1A	2A	3A	1B	2B	3B
313	290	279	286	282	254
336	288	265	313	262	217
288	296	294	295	234	204
297	288	265	311	292	221
326	295	248	323	275	238

แปลงค่าที่ได้จาก dial gauge ให้มีหน่วยเป็นนิวตันและนำมาสร้างกราฟเพื่อพิจารณาผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

5.3.1 ผลการทดสอบแบบที่ 1A

จากผลการทดสอบชิ้นงานแบบที่ 1A ได้ค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำ คือ 1943 นิวตัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่า 3.47 เปอร์เซ็นต์

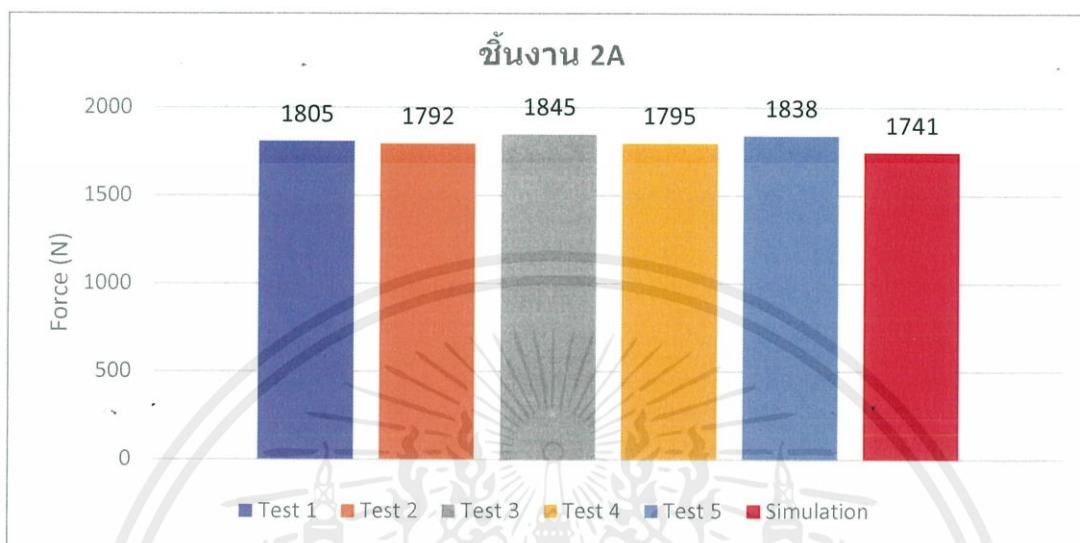


รูปที่ 5.5 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 1A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ผลการทดสอบแบบที่ 2A

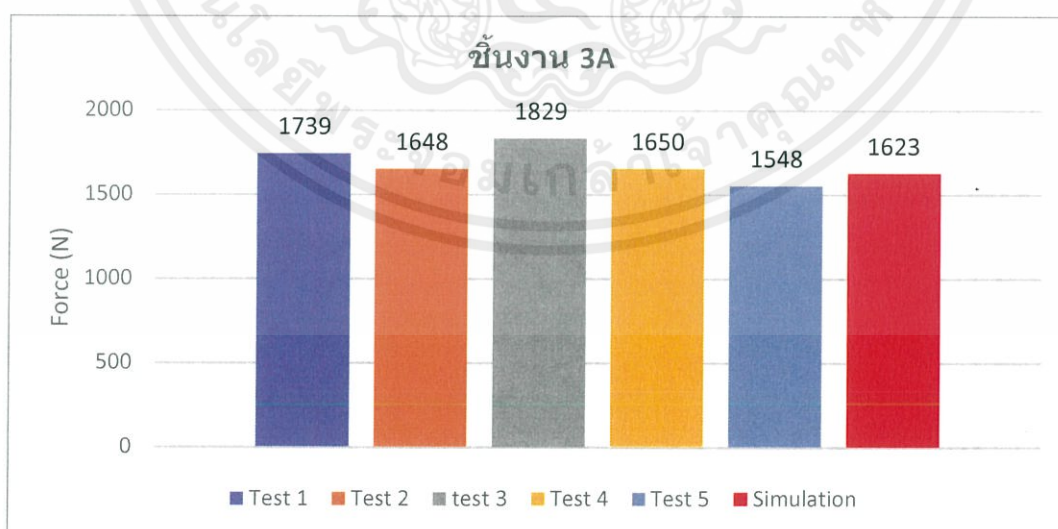
จากผลการทดสอบชิ้นงานแบบที่ 2A ได้ค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำ คือ 1815 นิวตัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่า 4.25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.6 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 2A

5.3.3 ผลการทดสอบแบบที่ 3A

จากผลการทดสอบชิ้นงานแบบที่ 3A ได้ค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำ คือ 1683 นิวตัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่า 3.68 เปอร์เซ็นต์

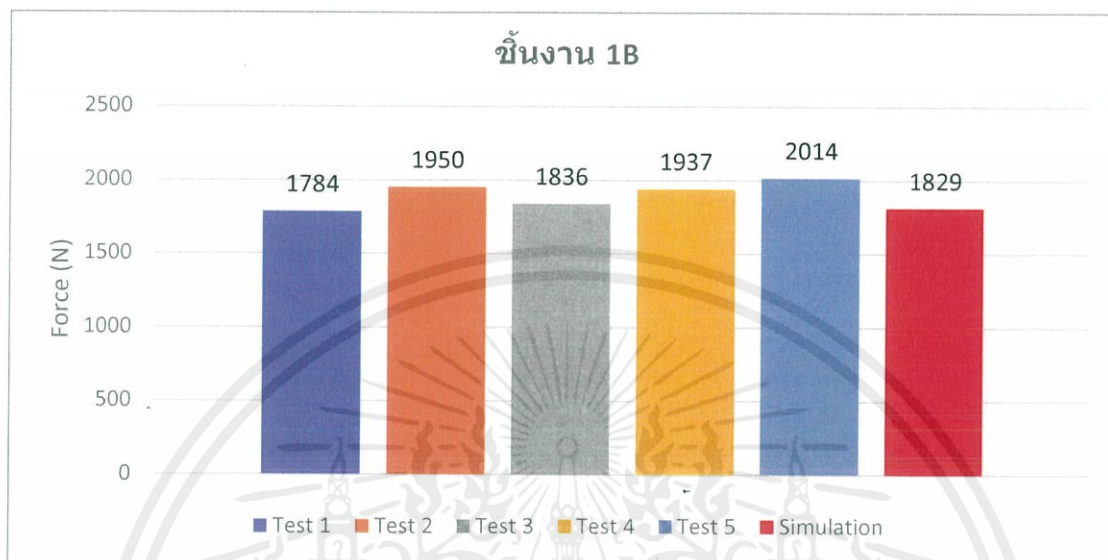


รูปที่ 5.7 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 3A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ผลการทดสอบแบบที่ 1B

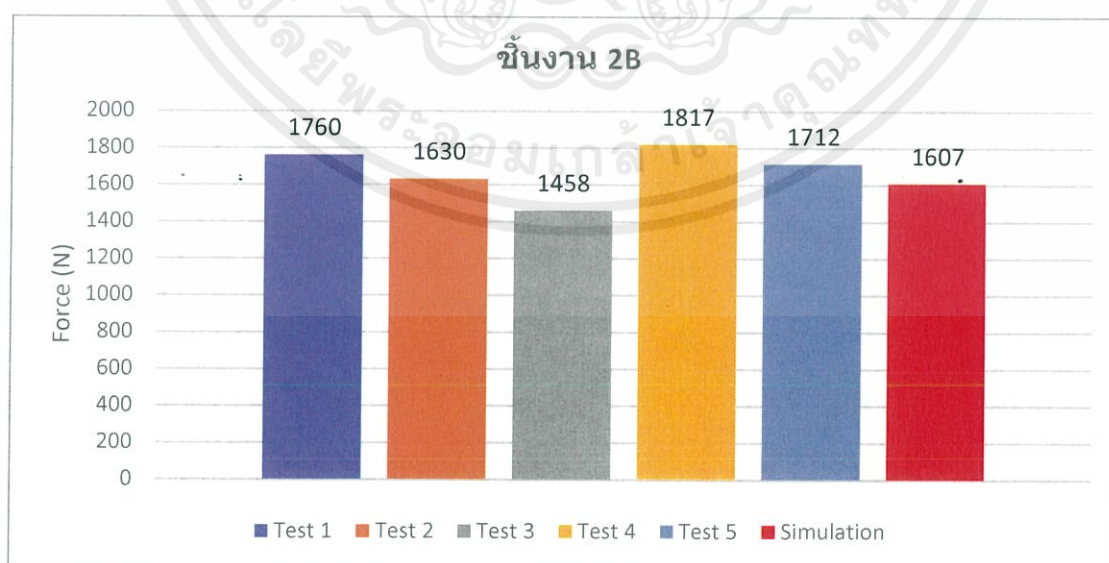
จากผลการทดสอบชิ้นงานแบบที่ 1B ได้ค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำ คือ 1904 นิวตัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่า 3.93 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.8 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 1B

5.3.5 ผลการทดสอบแบบที่ 2B

จากผลการทดสอบชิ้นงานแบบที่ 2B ได้ค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำ คือ 1675 นิวตัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่า 4.26 เปอร์เซ็นต์

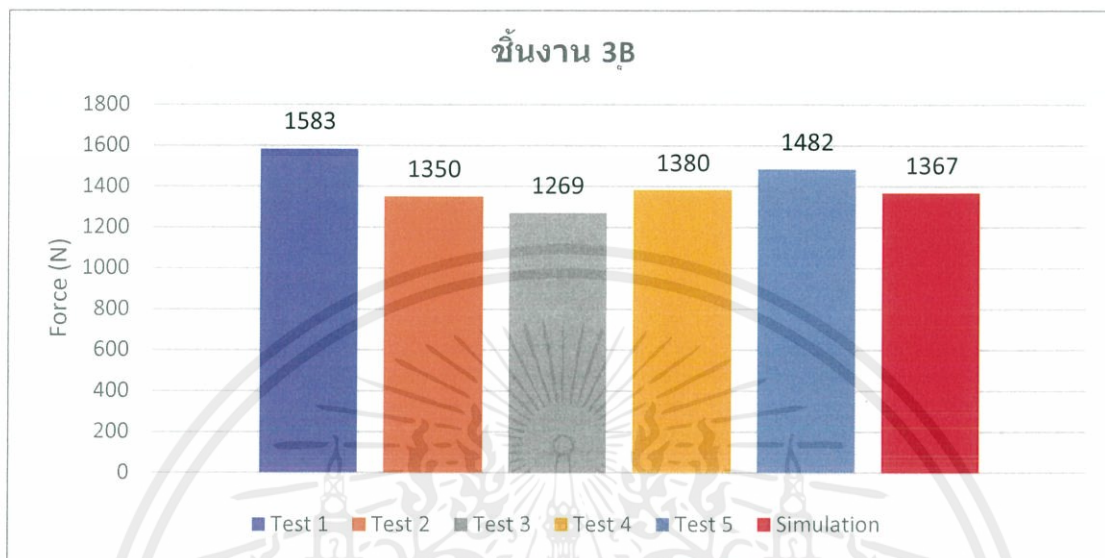


รูปที่ 5.9 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 2B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.6 ผลการทดสอบแบบที่ 3B

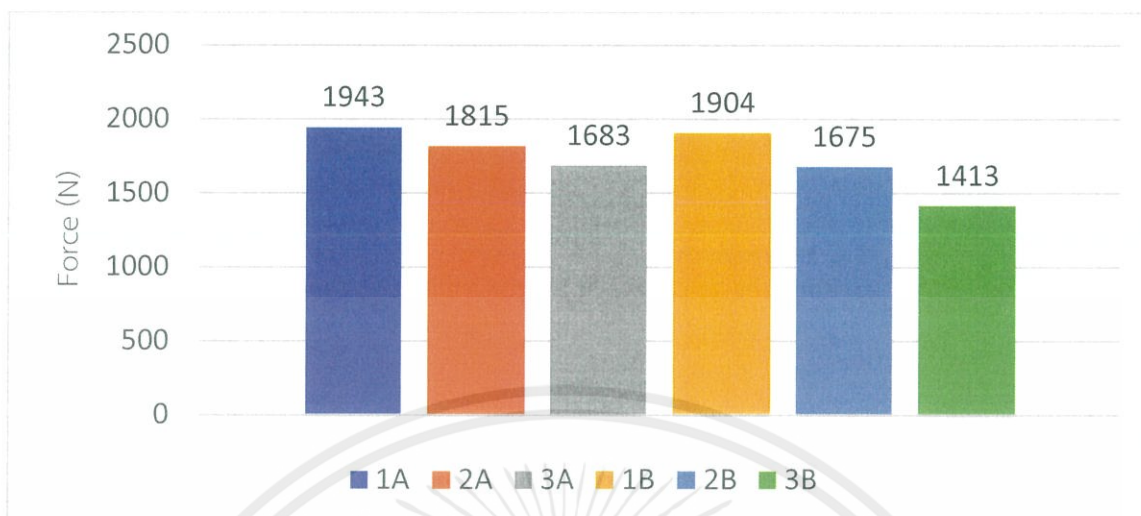
จากผลการทดสอบชิ้นงานแบบที่ 3B ได้ค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำ คือ 1413 นิวตัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่า 3.35 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.10 กราฟผลการทดสอบแบบที่ 3B

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % ดังนั้นสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาคำนวณวิเคราะห์ผลแทนการทดสอบจริงได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายประหยัดเวลาและสามารถใช้งานได้จริงเพราะการทดสอบจริงมีค่าใช้จ่ายมากและยังต้องใช้เวลาในการเตรียมชิ้นงานมากอีกด้วย

5.3.7 พิจารณาผลการทดสอบทั้ง 6 แบบ



รูปที่ 5.11 กราฟผลการทดสอบเฉลี่ย

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ A จะเห็นว่าค่าการทดสอบของแบบทดสอบ 1A จะได้แรงที่กระทำมากที่สุด เพราะชิ้นงาน 1A มีจำนวนชั้นน้อยกว่าการสูญเสียของแรงที่กระจายจากชั้นสู่ชั้นก็จะเกิดน้อยกว่าชิ้นงานที่มีจำนวนชั้นมากกว่า แต่ชิ้นงานที่มีจำนวนชั้นมากกว่าก็จะสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าเช่นกัน

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ A และแบบ B แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ A จะมากกว่า เพราะการทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบในลักษณะแรงดัดตรงกลางชิ้นงาน การวางลายผ้าคาร์บอนแบบ A จะสามารถรับแรงในลักษณะการดัดตรงกลางได้ดีที่สุด

5.5 การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างโมนอค็อกของรถ

5.5.1 กำหนดขนาด

ขั้นตอนแรกในการออกแบบโครงสร้างของรถคือการกำหนดขนาด ซึ่งต้องอ้างอิงตามกฎการแข่งขัน โดยเริ่มจากการกำหนดขนาดสเกลเล็กๆ ก่อนคือพื้นที่ของห้องโดยสาร ตำแหน่งที่นั่ง ขนาดความกว้างฐานของล้อหน้า-หลัง พื้นที่สำหรับวางอุปกรณ์ต่างๆ จุดยึดระหว่างโครงสร้างกับบอดี้ของรถ และสุดท้ายคือความกว้าง ยาวของโครงสร้าง ซึ่งต้องมีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้มีน้ำหนักเบา

5.5.2 ออกแบบโมเดลโดยใช้ Solidwork

ทำการออกแบบโครงสร้างในโปรแกรมเพื่อให้สามารถเห็นถึงรูปแบบรถจริง โดยสิ่งสำคัญในการออกแบบคือส่วนโครงสร้างและบอดี้ต้องสามารถนำมาประกอบกันได้อย่างสมบูรณ์แบบ สิ่งต่อมาคือ คำนึงถึงจุดยึดต่างๆ จุดที่ต้องรับน้ำหนักมาก ก็ต้องให้ความแข็งแรงกว่าส่วนอื่น การทำโรลบาร์ สำหรับผู้ขับขี่เพื่อความปลอดภัยในเวลาเกิดอุบัติเหตุก็ต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอสามารถปกป้องผู้ขับขี่ได้ทั่วทั้งบริเวณร่างกาย

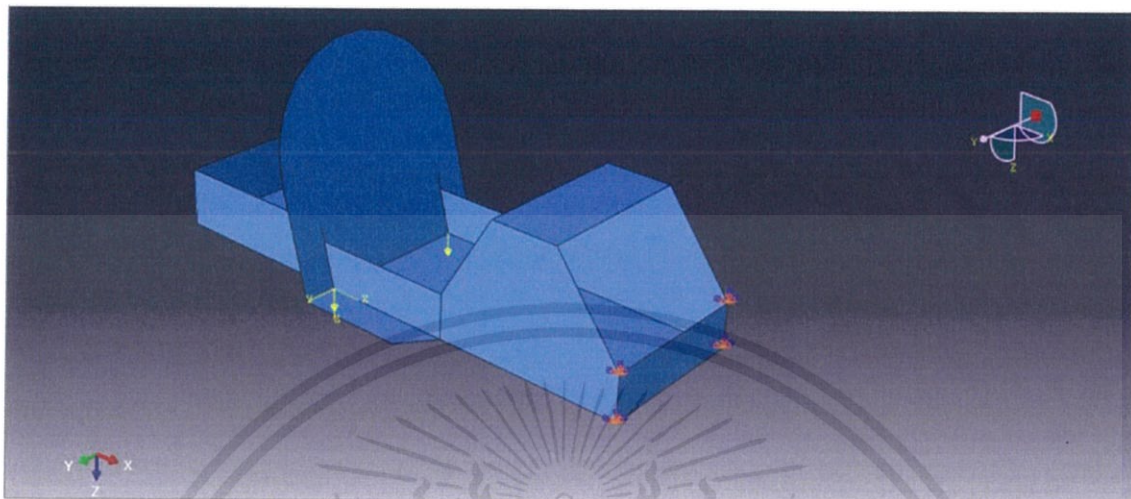


รูปที่ 5.12 ออกแบบโครงสร้างด้วย Solidwork

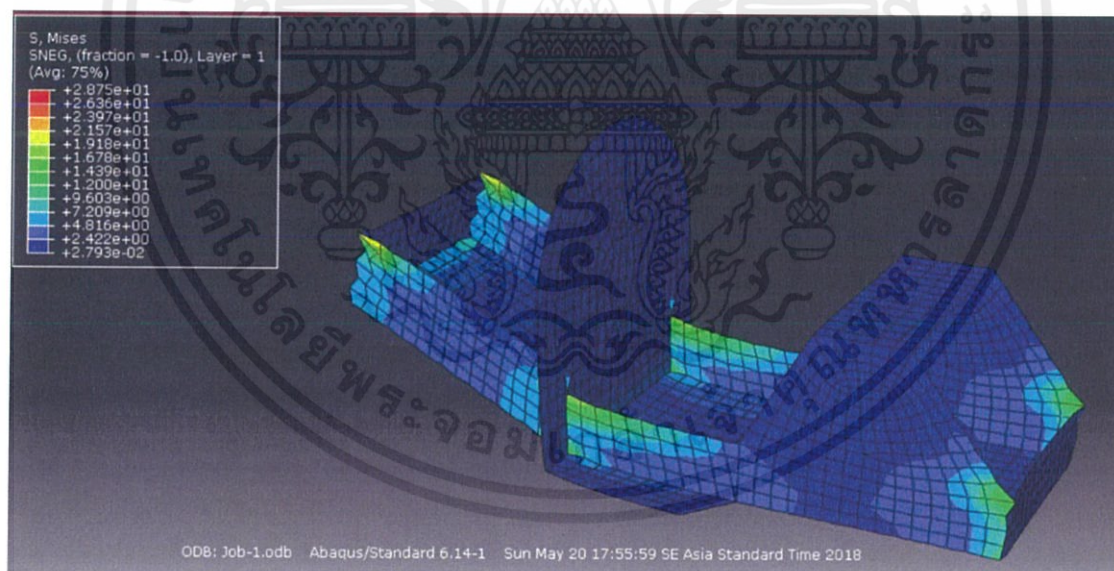
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3 วิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้ ABAQUS

5.5.3.1 สภาวะการตัด กำหนดแรงกระทำในส่วนกลางของโครงสร้างเป็น 1000นิวตัน



รูปที่ 5.13 แสดงการกำหนดจุดยึดและใส่ภาระของแรง

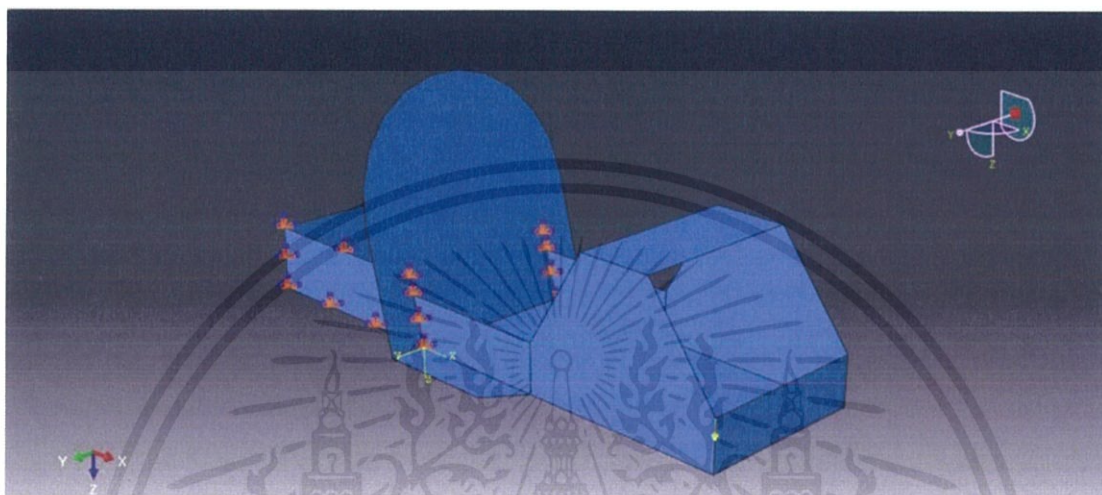


รูปที่ 5.14 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการตัด

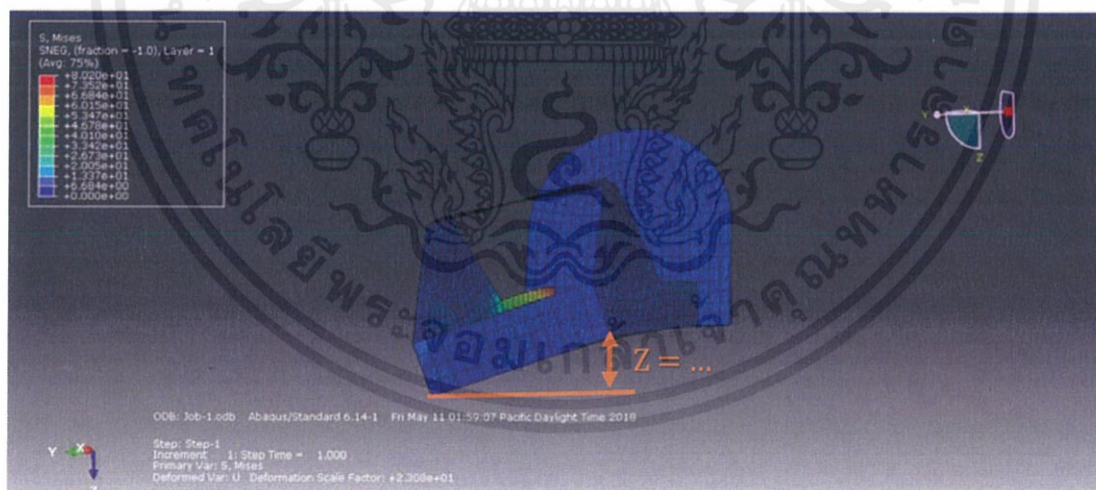
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3.1 สภาวะการบิด (Torsion) กำหนดเงื่อนไขสภาวะ

สภาวะแรงที่กระทำในการบิดตัว 1471 นิวตัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์เป็นแรงกระทำที่มากที่สุดเมื่อมีการใช้งานจริง



รูปที่ 5.15 แสดงการกำหนดจุดยึดและใส่ภาระของแรง

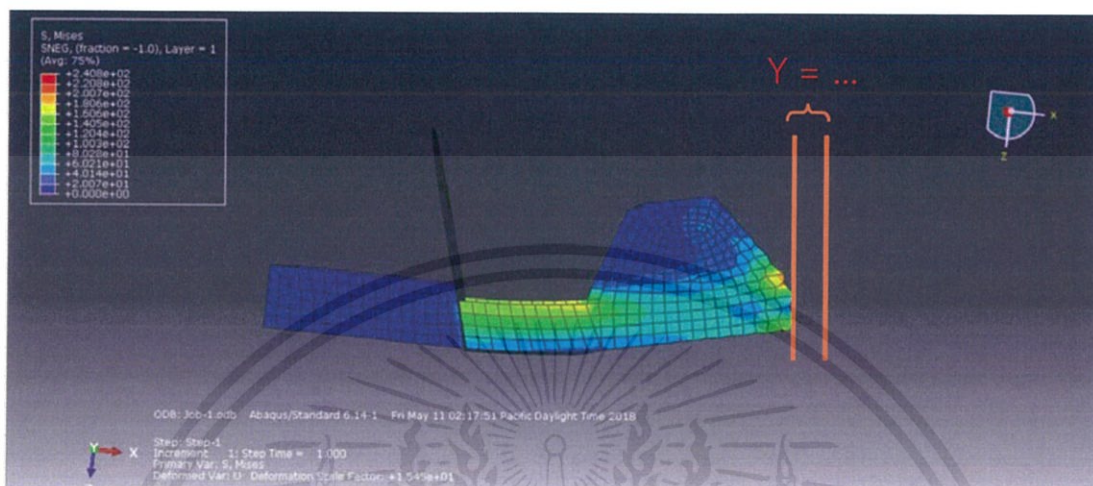


รูปที่ 5.16 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3.1 สภาวะการชน (Impact)

กำหนดอัตราเร่งในการพุ่งชนสูงสุด 10 g และน้ำหนักของตัวรถเฉลี่ยมีน้ำหนักเป็น 150 kg เราจะได้ สภาวะแรงที่เกิดการชนเท่ากับ 14715 นิวตัน



รูปที่ 5.17 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการทดสอบการวิเคราะห์ความแข็งแรงเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการวางสายผ้าคาร์บอนในแนวเดียวกันและการวางสลับสาย 45 องศา ได้ผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 5.4 ผลวิเคราะห์โครงสร้างรถ

สภาวะการทดลอง	การวางสายผ้าคาร์บอน	
	สลับสาย 45 องศา	วางสายเดียวกัน
สภาวะการตัด	0.96	1.20
สภาวะการบิด	14.20	14.66
สภาวะการชน	4.87	4.65

ที่สภาวะการตัด การวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลับสาย 45 องศา มี ระยะการตัดตัวดีกว่า 20.00 %

ที่สภาวะการบิด การวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลับสาย 45 องศา มี ระยะการบิดตัวดีกว่า 3.14 %

ที่สภาวะการชน การวางสายผ้าคาร์บอนแบบวางเดียวกัน มี ระยะการยุบตัวดีกว่า 4.5 %

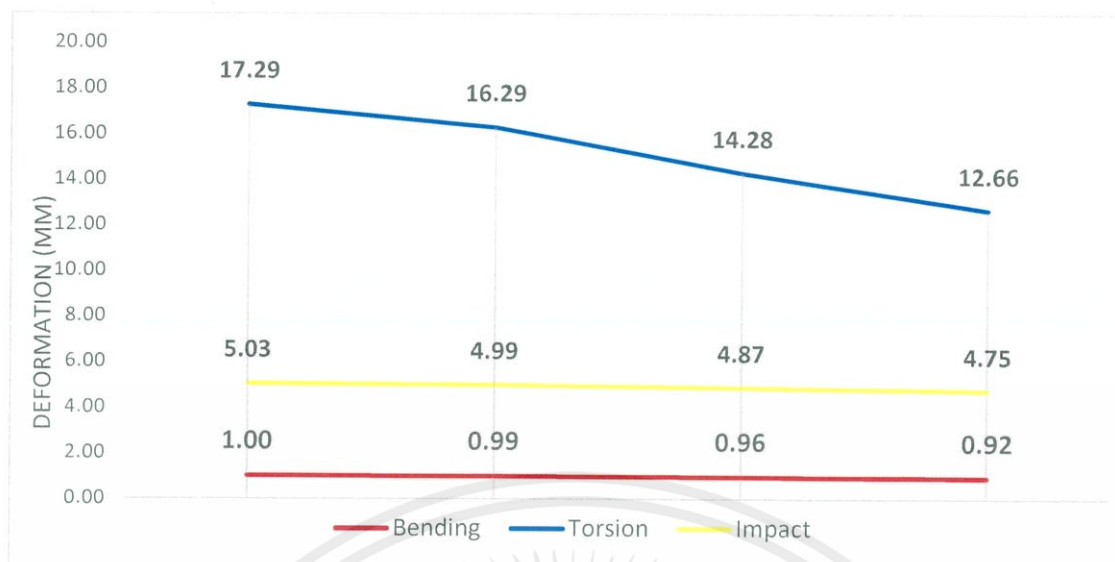
เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ได้ บ่งบอกถึงการวางสายผ้าคาร์บอนสลับ 45 องศาทำให้เกิดความแข็งแรงต่อสภาวะต่างๆของโครงสร้างรถได้มากกว่าการวางสายผ้าคาร์บอนแบบวางเดียวกัน คณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้การวางสายผ้าแบบดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อไป จากนั้นทำการทดสอบวิเคราะห์ความแข็งแรงที่สภาวะต่างๆเพื่อเปรียบเทียบความหนาของแกนกลางและเลือกวัสดุทำแกนกลางที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโครงสร้างจริงต่อไป

ตาราง 5.5 ผลวิเคราะห์โครงสร้างรถ ที่ความหนาแกนขนาดต่างๆ

สภาวะการทดลอง	แกนกลางหนา			
	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm
สภาวะการตัด	1.00	0.99	0.96	0.92
สภาวะการบิด	17.29	16.29	14.28	12.66
สภาวะการชน	5.03	4.99	4.87	4.75

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาทำเป็นกราฟจะได้กราฟดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 กราฟรวมผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้สภาวะต่างๆในหน่วย มิลลิเมตร

หากดูจากกราฟการวิเคราะห์ระยะการบิดตัวของโครงสร้าง พบว่ายิ่งลดความหนาของแกนกลาง การบิดตัวจะยิ่งเกิดได้มากขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดที่จากความหนา 20 มิลลิเมตร ไป ความหนา 10 มิลลิเมตร

5.5.5 สร้างโครงสร้างจริง

5.5.5.1 วางผ้าคาร์บอนและแกนกลาง Pvc foam Density 60 kg/m³ ตามจำนวนชั้นที่ ออกแบบไว้แล้ว พร้อมกับทาสีพ็อกซีเรซิน จากนั้นทำการดูดอากาศที่ความดันบรรยากาศ 1 bar ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 8 ชม.



รูปที่ 5.19 ดูดอากาศออกจากแผ่นโครงสร้างคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.5.2 ทำการวัดขนาดตามแบบที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.20 เขียนแบบชิ้นงานตามที่ออกแบบ

5.5.5.3 ทำการตัดแบ่งเป็นส่วนๆตามที่เขียนแบบไว้



รูปที่ 5.21 การตัดชิ้นงานด้วยเลื่อยไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.5.4 ยึดส่วนประกอบที่ตัดแบ่งไว้ด้วยอีพ็อกซี เรซินชนิดชั้น



รูปที่ 5.22 ประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง

5.5.5.5 ทาเรซินและผ้าคาร์บอนในบริเวณรอยต่อทั่วทั้งบริเวณโครงสร้าง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง



รูปที่ 5.23 เสริมผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ตามแนวที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดสอบชิ้นงานทั้ง 6 แบบ

เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานทั้ง 6 แบบ แบบละ 5 ชิ้นงาน เพื่อดูความต้านทานการโค้งงอของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ทดสอบมีความแตกต่างกันที่ความหนาของแกนกลางชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกัน และการวางสายผ้าคาร์บอนจะมีทั้งการวางสายเดียวกันและการวางสลับสาย 45 องศา จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % ดังนั้นสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาคำนวณวิเคราะห์ผลแทนการทดสอบจริงได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายประหยัดเวลาและสามารถใช้งานได้จริงเพราะการทดสอบจริงมีค่าใช้จ่ายมากและยังต้องใช้เวลาในการเตรียมชิ้นงานมากอีกด้วย และการวิเคราะห์ผลการทดสอบทั้ง 6 แบบเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ A จะเห็นว่าค่าการทดสอบของแบบทดสอบ 1A จะได้แรงที่กระทำมากที่สุด เพราะชิ้นงาน 1A มีจำนวนชั้นน้อยกว่าการสูญเสียของแรงที่กระจายจากชั้นสู่ชั้นก็จะเกิดน้อยกว่าชิ้นงานที่มีจำนวนชั้นมากกว่า แต่ชิ้นงานที่มีจำนวนชั้นมากกว่าก็จะสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ A และแบบ B แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ A จะมากกว่า เพราะการทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบในลักษณะแรงดัดตรงกลางชิ้นงาน การวางสายผ้าคาร์บอนแบบ A จะสามารถรับแรงในลักษณะการดัดตรงกลางได้ดีที่สุด

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

เมื่อทำการทดสอบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการวางสายผ้าคาร์บอนในแนวเดียวกันและการวางสลับสาย 45 องศา จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ได้ บ่งบอกถึงการวางสายผ้าคาร์บอนสลับ 45 องศา ทำให้เกิดความแข็งแรงต่อสภาวะต่างๆของโครงสร้างรถได้มากกว่าการวางสายผ้าคาร์บอนแบบสายเดียวกัน คณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้การวางสายผ้าแบบดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อไป จากนั้นทำการทดสอบวิเคราะห์ความแข็งแรงที่สภาวะต่างๆเพื่อเปรียบเทียบความหนาของแกนกลางและเลือกวัสดุทำแกนกลางที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโครงสร้างจริงต่อไปและเมื่อดูจากค่าวิเคราะห์ความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำต่างๆ การสร้างโครงสร้างโมโนคือกสำหรับรถประหยัดพลังงาน โดยใช้โฟมความหนาแน่นสูงเป็นแกนกลางนั้นสามารถทำ

ได้โดยใช้โฟม Divincycell ที่มีความหนาแน่น 60 kg/m³ ซึ่งความหนาที่เลือกใช้ในการสร้างโครงสร้างจริงคือ 20 มิลลิเมตร และการวางลายผ้าคาร์บอนแบบสลับลาย 45 องศาทำให้โครงสร้างมีความสามารถต้านทานแรงดัดได้ดีกว่าถึง 20 % เมื่อเทียบกับการวางลายผ้าคาร์บอนแบบลายเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถสร้างโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา สามารถคงความแข็งแรงต่อการใช้งาน และจะไม่เกิดความเสียหายหากใช้งานในรูปแบบที่กำหนดไว้ตามกฎการแข่งขัน

ดังนั้นการตัดสินใจเลือกวัสดุทำผิวตัวถังรถจะต้องเลือกด้วยความรอบครอบโดยคำนึงปัจจัยต่างๆ หลายด้านดังที่ได้กระทำในโปรเจกต์นี้

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบปัญหาในการทำงานดังต่อไปนี้ การสร้างชิ้นงานสำหรับการทดสอบซึ่งจะทำให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับอุตสาหกรรมนั้นเป็นเรื่องที่ยาก เพราะวัสดุอุปกรณ์ในการผลิตมีราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งยังต้องใช้ประสบการณ์เพื่อให้สร้างชิ้นงานหรือโครงสร้างรถให้มีความสมบูรณ์แบบ การสร้างชิ้นงานได้เลือกใช้อุปกรณ์ซีเรจีน ชนิดแห้งช้า และการดูอากาศด้วยความดันเพียง 1 บาร์ และมีการปล่อยให้แห้งเองโดยไม่ใช้การอบความร้อน ซึ่งอาจเป็นผลทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

ข้อเสนอแนะที่ให้เสนอเป็นข้อวิจัยต่อไป วัสดุสำหรับทำแกนกลางมีหลากหลายชนิดมาก ซึ่งข้อมูลจากผู้ผลิตก็ทำให้พอทราบถึงน้ำหนัก ความหนาแน่น ความแข็งแรง แต่ในการผลิตนำมาใช้งานจริง วัสดุแกนกลางต้องมีการดูชิมน้ำยาเรซินทำให้น้ำหนักหรือความแข็งแรงก็เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งไม่สามารถอ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตได้เพียงอย่างเดียวถือเป็นหัวข้อที่น่าสนใจหากนำไปศึกษาต่อในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/asia.html
- [2] www.neo.co.th/contact.php
- [3] Abacus 2017
- [4] www.compositesaustralia.com.au
- [5] ร.ศ. ตรียุทธ สุวรรณประทีป. วิศวกรรมการยานยนต์. ทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์. 2547
- [6] พงศ์สถิต อิศรางกูร ณ อยุธยา, รัตน์กร เขียวปัญญาพันธ์, สุวิทย์ ภาวูธ และอดิเรก โคตรมุงคุณ. การพัฒนาโครงสร้างกึ่งโมโนค็อกสำหรับรถฟอร์มูล่าระดับนักศึกษา. 2552
- [7] ภัคพล สิทธิกร, พรหมเรศ รักษาเชื้อ. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบผนังแซนด์วิช. 2556
- [8] สถาบันยานยนต์. การศึกษาโครงสร้างการผลิตชิ้นส่วนของอุตสาหกรรมยานยนต์ไทย 2557.
2557



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

หาแรงขับเคลื่อนที่กระทำต่อรถ

กำหนด มอเตอร์ 2 ตัว กำลัง (P) = 800 watt

จำนวนรอบการหมุนสูงสุด (N) = 900/60 RPS

สูตร หาทอร์กจากมอเตอร์ $P = 2\pi NT$

$$T = \frac{P}{2\pi N} = \frac{800}{2\pi \times 15} = 8.48 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

สูตร หาแรงขับเคลื่อนที่กระทำต่อรถ $F = \frac{\eta iT}{r}$

โดย η = ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์สู่ล้อ (มอเตอร์ต่อเข้าล้อโดยตรง=1)

i = อัตราทดของเกียร์ (เครื่องยนต์ไม่มีเกียร์ $i=1$)

r = รัศมีของวงล้อ [m]

จะได้
$$F = \frac{\eta iT}{r} = \frac{1 \times 1 \times 8.48}{0.25} = 33.92 \text{ นิวตัน}$$

แรงกระทำเมื่อรถจอดหยุดนิ่ง

แรงปฏิกิริยากระทำที่ล้อหน้า
$$R_F = \frac{mgl}{b} = \frac{150 \times 9.81 \times 0.35}{1.3} = 396.17 \text{ นิวตัน}$$

แรงปฏิกิริยาที่กระทำที่ล้อหลัง
$$R_R = \frac{mg(b-l)}{b} = \frac{150 \times 9.81(1.3-0.35)}{1.3} = 1075.33 \text{ นิวตัน}$$

แรงกระทำเมื่อรถมีความเร่งสูงสุด

$$\text{จากสูตร } F - R_r = maW$$

โดย $F =$ ค่าแรงขับเคลื่อน

$m =$ มวล

$a =$ ความเร่ง

$$R_r = \text{แรงต้านการหมุนของล้อ} \text{ เมื่อ } R_r = K_r W = 0.014 \times 150 \times 9.81 = 20.601$$

$K_r =$ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ มีค่าเท่ากับ 0.014

$$\text{จะได้ } a = \frac{F - R_r}{m} = \frac{33.92 - 20.601}{150} = 0.089 \text{ m/s}^2 \approx 0.089g$$

ดังนั้น แรงกระทำที่ล้อเนื่องจากการเร่ง คือ

$$\begin{aligned} R_F &= \frac{mgl}{b} - \frac{0.089gmh}{b} = \frac{150 \times 9.81 \times 0.35}{1.3} - \frac{150 \times 0.089 \times 9.81 \times 0.5}{1.3} \\ &= 345.80 \text{ นิวตัน} \\ R_R &= \frac{mg(b-l)}{b} + \frac{mah}{b} = \frac{150 \times 9.81 \times (1.3 - 0.35)}{0.35} + \frac{0.089 \times 150 \times 9.81 \times 0.5}{1.3} \\ &= 1125.62 \text{ นิวตัน} \end{aligned}$$

แรงกระทำเมื่อรถมีความหน่วงสูงสุด

$$\text{จาก } F = F_F + F_R$$

$$ma = \mu R_F + \mu R_R$$

$$ma = \mu(mg)$$

$$a = \mu g$$

กำหนด $\mu = 0.5$ (ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางสลิด) ดังนั้นความหน่วงสูงสุดมีค่า

0.5 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้แรงที่กระทำต่อล้อเมื่อรถมีความหน่วงคือ

$$\begin{aligned}
 R_F &= \frac{mgl}{b} + \frac{0.5mgh}{b} \\
 &= \frac{150 \times 9.81 \times 0.35}{1.3} + \frac{0.5 \times 150 \times 9.81 \times 0.5}{1.3} \\
 &= 679.15 \text{ นิวตัน} \\
 R_R &= \frac{mg(b-l)}{l} + \frac{1.2mgh}{b} \\
 &= \frac{150 \times 9.81 (1.3 - 0.35)}{1.3} - \frac{0.5 \times 150 \times 9.81 \times 0.5}{1.3} \\
 &= 793.35 \text{ นิวตัน}
 \end{aligned}$$

แรงปฏิกิริยาที่ล้อขณะรถเลี้ยวโค้งทางขวา

$$\begin{aligned}
 R_L &= \frac{mg}{2} + \frac{mgh}{t} \\
 &= \frac{150 \times 9.81}{2} + \frac{9.81 \times 150 \times 0.5}{1} \\
 &= 1471.5 \text{ N} \\
 R_R &= \frac{mg}{2} - \frac{mgh}{t} \\
 &= \frac{150 \times 9.81}{2} - \frac{150 \times 9.81 \times 0.5}{1} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

ขณะรถเลี้ยวซ้าย แรงกระทำที่ล้อขวาก็จะมีขนาดเท่ากับแรงกระทำที่ล้อซ้ายเช่นเดียวกัน

แรงกระทำด้านข้างที่ล้อหน้าและล้อหลัง

กำหนดจุดหมุนที่ล้อหน้าและล้อหลัง

จะได้สูตร แรงด้านข้างที่ล้อหน้า $Y_F = \frac{mgtl}{2h(J+l)}$

แรงกระทำที่ล้อหลัง $Y_F = \frac{mgtJ}{2h(J+l)}$

จากสมการการเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$Y_F = \frac{1gml}{b}$$

$$= \frac{1 \times 9.81 \times 150 \times 0.35}{1.3}$$

$$= 396.18 \text{ นิวตัน}$$

$$Y_F = \frac{1mgJ}{b}$$

$$= \frac{1 \times 150 \times 9.81 \times 0.95}{1.3}$$

$$= 1075.34 \text{ นิวตัน}$$



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อก
สำหรับรถประหยัดพลังงานไฟฟ้า

DESIGN AND SIMULATE THE STRENGTH OF A MONOCOQUE SANDWICH
STRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLE

ทรงยศ มีชัย 57010506, ธนกร โชคเจริญ 57010551 และ ธนพล ศรีเปารยะ 57010551

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท
(ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบตัวถังรถและจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อก(Monocoque)ของรถประหยัดพลังงานไฟฟ้า เพื่อเข้าแข่งขันในรายการ Shell Eco Marathon Asia 2018 โดยการออกแบบตัวรถจะต้องคำนึงถึงการเลือกวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่สุดเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนตัวรถและจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้กลุ่มผู้ทำการวิจัยต้องการทดสอบแรงที่กระทำกับโครงสร้างแซนวิชที่ใช้วัสดุแกนกลางจาก Foam pvc ความหนาแน่น 60 kg/m^3 ขนาด $300 \times 100 \text{ mm}$. โดยใช้วิธีการจำลองความแข็งแรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เปรียบเทียบผลทดสอบด้วยวิธีการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงกดแบบแรงกระทำเป็น point load ที่มีจุดรองรับอย่างง่าย 2 ด้าน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบกับการทดลอง มีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือมาก จากนั้นได้ทำการออกแบบโครงสร้างแซนวิชโมโนค็อกเพื่อเลือกรูปแบบในการสร้างโครงสร้างจริง ซึ่งความหนาที่เลือกใช้ในการสร้างโครงสร้างจริงคือ 20 มิลลิเมตร และการวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลับลาย 45 องศาทำให้โครงสร้างมีความสามารถต้านทานแรงดัดได้ดีกว่าถึง 20 % เมื่อเทียบกับการวางสายผ้าคาร์บอนแบบลายเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถสร้างโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา สามารถคงความแข็งแรงต่อการใช้งาน และจะไม่เกิดความเสียหายหากใช้งานในรูปแบบที่กำหนดไว้ตามกฎการแข่งขัน

Abstract

The purpose of this research is to design and simulate the strength of the monocoque sandwich structure of electric car to compete in the Shell Eco Marathon Asia 2018. The car is designed to be as lightweight as possible to reduce electrical energy consumption and strong enough to operate. In this experiment, the authors attempted to test the force applied to the $300 \times 100 \text{ mm}$ sandwich structure using numerical simulation by finite element analysis and comparing the test results from the test machine with

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

simple 2-point support the error between the test results and the experiment was not more than 5 % , making the analysis with computer software reliable. Then design the sandwich monocoque structure to choose the model to create real monocoque structure. And the 45-degree rotation angle of prepregs which gives it the ability to withstand up to 20% better bending strength compared to the 0-degree rotation angle of prepregs. It can also be used to create a lightweight structure that will maintain its strength and will not be damaged if used in the manner consistent by the competition rules.

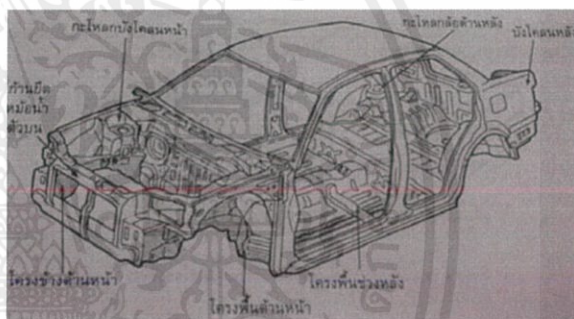
1. บทนำ

ทุกวันนี้ น้ำมันในโลกมีการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณ การใช้ น้ำมัน สูงอย่างต่อเนื่องทั้งในงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการคมนาคมขนส่ง ด้วยเหตุนี้หลายภาคส่วนจึงตระหนักถึงการใช้พลังงานทดแทนแทนการใช้ น้ำมัน ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากไฟฟ้าเป็นพลังงานสะอาดและไม่ปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ผู้จัดทำได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญนี้จึงมีความสนใจเกี่ยวกับยานพาหนะไฟฟ้า ประหยัดพลังงานจึงได้เข้าร่วมชมรม Innogen KMITL ซึ่งเป็นทีมในนามสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังลงแข่งขันรายการ shell eco-marathon Asia ซึ่งดำเนินการโดยเซลล์ เป็นการแข่งขันที่ทำให้นักเรียนนักศึกษาจากทั่วเอเชียเพื่อออกแบบสร้างและขับรถที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากที่สุด ทั้งนี้ไม่เพียงแต่การประหยัดพลังงานเท่านั้นแต่เซลล์ให้ความสำคัญของความปลอดภัยมาเป็นอันดับแรก โดยแต่เดิมนั้นจะลงแข่งเฉพาะในประเภทรถต้นแบบ 3 ล้อ ผู้จัดทำจึงมีความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบยานพาหนะไฟฟ้าประหยัดพลังงานประเภท 4 ล้อ โดยมุ่งเน้นการออกแบบโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของรถรวมถึงแรงที่กระทำง่ายต่อการซ่อมบำรุง และปลอดภัยต่อผู้ใช้รถใช้ถนน ผู้จัดทำจะใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้าง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบโครงสร้างหลักของยานยนต์

แนวความคิดในการออกแบบโครงสร้างตัวถังรถยนต์ มีจุดมุ่งหมายที่ด้านพลศาสตร์และความแข็งแรง ซึ่งความแข็งแรงต้องเพียงพอที่จะรองรับกลไกและระบบต่าง ๆ ที่



มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์ นอกจากนี้ โครงสร้างของตัวถังรถยนต์ต้องทำหน้าที่ช่วยรับและดูดกลืนแรงที่เกิดจากการชนการสั่นสะเทือนและเสียงดังจากพื้นถนนที่แทรกเข้าไปในห้องโดยสาร รวมทั้งช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดกับผู้ขับขี่และผู้โดยสารอีกทางหนึ่ง ด้วยโครงสร้างพื้นฐานของตัวถังรถยนต์ประกอบด้วยโครง (Frame) และตัวถัง (Body) โดยโครงรถแบ่งเป็น 2 ประเภท

2.1.1 แบบโครงอิสระ (Independent frame type)

โครงรถ(Frame) กับแชสซีส์ (Chassis) จะถูกแยกออกจากกัน โดยแชสซีส์เป็นส่วนที่ยึดกลไกการเคลื่อนที่ ทั้งทำหน้าที่ดูดกลืนแรงที่เกิดจากการชนภายนอก และการสั่นสะเทือนจากพื้นถนน โครงรถแบบนี้จะมีน้ำหนักมาก แต่ก็สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ปริมาณมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 แบบโครงสร้างในตัว (Unibody)

แนวคิดการออกแบบโครงสร้างตัวถังรถยนต์ประเภทนี้ได้มาจาก การออกแบบสร้างเครื่องบินที่เรียกว่า โมโนค็อก (Monocoque) โดยการเชื่อมสปอตขึ้นส่วนที่ทำจากแผ่นโลหะขึ้นรูป ทำให้ไม่ต้องมีส่วนของแชสซีส์ โครงสร้างประเภทนี้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง ด้านทานแรงบิดได้ดี และมีความเรียบร้อยสวยงาม แต่อย่างไรก็ตาม หากเกิดอุบัติเหตุ จะทำให้เสียรูป ซ่อมให้เข้ารูปดั้งเดิมได้ยาก ดังนั้นโครงสร้างของพื้นตัวถังด้านล่างจึงต้องมีวิธีป้องกันความแข็งแรงที่สูญเสียไป

รูปที่ 2.1 แบบโครงสร้างในตัว (Unibody)

เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของโครงสร้างในแต่ละแบบแล้ว ในการทำโปรเจกครั้งนี้ผู้จัดทำจึงเลือกใช้โครงสร้างชนิดโมโนค็อก (Monocoque) มาใช้ในการออกแบบ โดยมีการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอนแทนการใช้เหล็กหรืออลูมิเนียมเพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้างทั้งคงความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน

2.2 ทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์

การคำนวณแรงกระทำที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของรถมีความสำคัญมาก เพราะทำให้สามารถนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างรถ อีกทั้งยังต้องจำลองแรงกระทำที่สภาวะต่าง ๆ ที่รถได้รับเมื่อมีการขับขึ้น เพื่อรับรองว่าโครงรถไม่ได้รับความเสียหายจากการใช้งานจริง โดยมีข้อมูลอ้างอิง เพื่อใช้ในการคำนวณ ดังต่อไปนี้

2.2.1 แรงกระทำเมื่อรถจอดหยุดนิ่ง

เมื่อรถจอดหยุดนิ่งหรือวิ่งด้วยความเร็วคงที่ จะมีแรงกระทำที่ถนนกระทำกับล้อ ทั้ง 4 ซึ่งเป็นแรงจากน้ำหนักกรรมของตัวรถเอง

2.2.2 แรงกระทำเมื่อรถมีความเร่งสูงสุด

เมื่อรถมีความเร่งสูงสุดที่สุดจะเกิดแรงกระทำที่ล้อซึ่งเกิดจากแรงต้านการหมุนของล้อที่กระทำกับพื้นถนน เนื่องจากรถเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งและมีพื้นเรียบจึงไม่นำแรงต้านอากาศและแรงต้านความชื้น

2.2.3 แรงกระทำเมื่อรถมีความหน่วงสูงสุด

แรงชนิดนี้จะเกิดในกรณีที่รถมีการเบรกด้วยแรงเบรกเต็มที่จนกระทั่งล้อล๊อคตาย แต่สามารถเคลื่อนที่ไปด้วยโมเมนตัมแรงเฉื่อยของรถ

2.2.4 แรงกระทำขณะเลี้ยวโค้ง

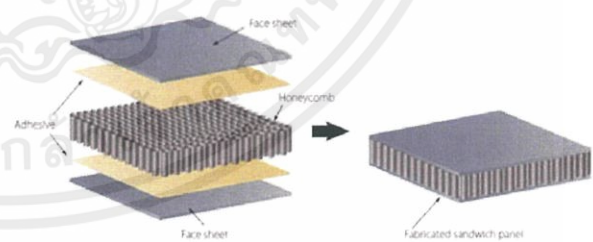
เมื่อมีแรงและความเร่งเกิดขึ้นในขณะที่รถเลี้ยวโค้ง สังเกตได้ว่าเมื่อรถเลี้ยวโค้งจะมีการถ่ายเทแรงให้มีความสมดุลไปทางด้านใดด้านหนึ่งและแรงปฏิกิริยาที่ล้อซึ่งส่งผลมายังโครงรถ ซึ่งจะแบ่งเป็นแรงปฏิกิริยาที่ล้อ และแรงกระทำด้านข้างของรถ

2.3 ทฤษฎีโครงสร้างแซนด์วิช

คือโครงสร้างที่ประกอบด้วยการรวมกันของวัสดุคอมโพสิตต่าง ๆ ที่นำมารวมกันและสลักกันโดยยึดวัสดุหนึ่งไว้กับอีกวัสดุหนึ่งโครงสร้างแบบแซนด์วิชเป็นรูปแบบพิเศษที่เป็นชั้น ๆ (Laminated composite) นำมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้โครงสร้างที่สามารถใช้ประโยชน์หรือคุณสมบัติเด่นแต่ละส่วนประกอบนั้น ๆ

2.3.1 องค์ประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช

องค์ประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich Structure) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือผิวหน้า (Face) วัสดุเชื่อมประสาน (Adhesive) และแกนกลาง (Core)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช

2.3.1.1 ผิวหน้า (Face)

วัสดุที่ใช้ในการทำผิวหน้า (Face) โดยทั่วไปเป็นวัสดุแผ่นบาง ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้ 1 มีความต้านทานแรงดึงและแรงอัด 2 มีความแข็งแรงและมีความเหนียวสูง ทำให้มีความต้านทานการโก่งงอ (Buckling) สูงตามไปด้วย 3 มีความทนทานต่อสภาวะ

แวดล้อม เช่น ทนทานต่อการสึกกร่อน และความร้อน 4 มีความทนทานต่อแรงกระแทก

2.3.1.2 วัสดุเชื่อมประสาน (Adhesive)

การเลือกใช้กาวหรือวัสดุเชื่อมประสานค่อนข้างมีส่วนสำคัญมากในโครงสร้างประเภทแซนด์วิช เพราะวัสดุที่เลือกใช้กันในงานโครงสร้างนี้ค่อนข้างมีหลากหลายประเภท ดังนั้นการพิจารณาเลือกกาวที่จะนำมาใช้ควรเหมาะสมกับวัสดุนั้น ๆ ด้วย ซึ่งในโครงสร้างประเภทแซนด์วิชจะนิยมใช้กาวอีพ็อกซีเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากกาวอีพ็อกซีนั้นจะเหมาะสมกับวัสดุที่หลากหลาย

2.3.2.3 แกนกลาง (Core)

คุณลักษณะโดยทั่วไปของแกนกลางที่สำคัญ 1. มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำเพื่อทำให้น้ำหนักของโครงสร้างแบบแซนด์วิชเบาที่สุด 2. เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี เนื่องจากแกนกลางต้องมีลักษณะที่มีความหนาแน่นที่ต่ำหากไม่เป็นฉนวนกันความร้อน เมื่อไฟไหม้ไฟจะลุกลามได้อย่างรวดเร็ว 3. มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ดี เพราะหน้าที่ของแกนกลางนั้นจะต้องรับแรงเฉือนโดนตรง 5. มีความหนาเพียงพอ เพราะความหนาส่งผลต่อความแข็งแรงในทิศทางตั้งฉาก ซึ่งหากความหนาไม่เพียงพออาจส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength)

3. การออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรง

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแซนด์วิชเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและน่าเชื่อถือได้นั้นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจึงเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแบบ 3 points bending เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างหลักมีความแข็งแรงเพียงพอ วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงคือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis – FEA) ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์เป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรม

สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งที่มีโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อว่า ABAQUS โปรแกรมนี้ถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ออกแบบมาหลายรูปแบบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันได้ มีการสร้างชิ้นงานจริงและนำไปทดสอบเพื่อยืนยันว่าโปรแกรมมีความถูกต้องแม่นยำ การออกแบบโครงสร้างยานยนต์แบบโมโนค็อก ในรายการแข่งขัน Shell Eco marathon Asia 2018 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบมีดังนี้ 1. ควรออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงกระทำจากภายนอก 2. ควรออกแบบให้มีโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาที่สุด 3. ควรออกแบบให้มีความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่ 4. ควรออกแบบให้มียุทธศาสตร์การซ่อมบำรุงที่อำนวยความสะดวกต่อระบบต่างๆภายในรถแข่ง 5. ควรออกแบบให้มีความสำคัญกับจุดยึดข้อต่อต่างๆ ที่ขึ้นกับระบบอื่น ๆ 6. ควรออกแบบภายใต้งบประมาณที่จำกัด 7. คำนึงถึงระยะเวลาในการสร้างชิ้นงานจริง

4.กรรมวิธีผลิตและอุปกรณ์

รายละเอียดเกี่ยวกับการผลิตชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อนำชิ้นงานมาทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม โดยจะแบ่งชิ้นงานทดสอบเป็น 6 แบบ แบบละ 5 ชิ้น ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงแบบชิ้นงานทดสอบ 6 แบบ

ชิ้นงานทดสอบ	จำนวนชั้นแกนกลาง	การวางสายผ้าคาร์บอน
ชิ้นงาน 1A	1 ชั้น (20 มิลลิเมตร)	ลายเดียวกัน
ชิ้นงาน 2A	2 ชั้น (10 มิลลิเมตร)	
ชิ้นงาน 3A	4 ชั้น (5 มิลลิเมตร)	
ชิ้นงาน 1B	1 ชั้น (20 มิลลิเมตร)	สลับลาย 45 องศา
ชิ้นงาน 2B	2 ชั้น (10 มิลลิเมตร)	
ชิ้นงาน 3B	4 ชั้น (5 มิลลิเมตร)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด

1. Vacuum Bag แผ่นฟิล์มสำหรับงานในระบบสุญญากาศ 2. Sealant Tape แผ่นกาวปิดขอบ คือแถบกาวเหนียวสองด้านใช้ติดขอบรอบชิ้นงาน 3. Vacuum Valve ออกแบบสำหรับงานเวิร์คคัมแบ็กกิ้ง 4. Catch Pot ถ้วยดักเรซินพร้อมมาตรวัดแรงดูดอากาศ ใช้ดักเรซินส่วนเกินที่อาจดูดออกมาจากชิ้นงาน 5. Vacuum Pump เครื่องดูดอากาศออกจากชิ้นงานที่ความดัน -1 bar

5. วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

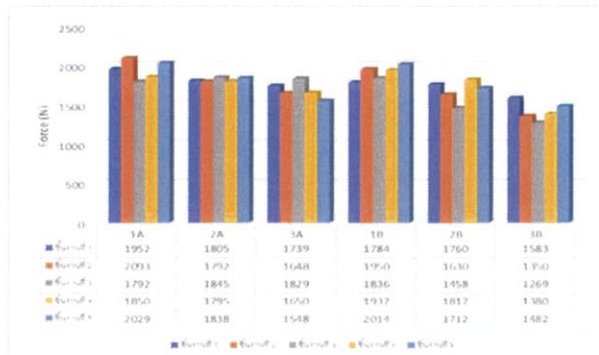
ในการทดสอบการโค้งงอของชิ้นงานจะทำการใช้เครื่องกด (Triaxial Compression Test) จะทำการทดสอบชิ้นงานแบบ 3 point bending โดยการกดชิ้นงานด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเกิดการเสียหายทำให้ทราบภาระสูงสุดในการกด โดยหัวกดจะใช้ความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตรต่อวินาที อุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงในการกดและระยะการโค้งงอคือ proving ring ซึ่งจะดูค่าที่ได้จาก dial gauge

5.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 6 แบบ แบบละ 5 ชิ้นงานเพื่อดูความต้านทานการโค้งงอของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ทดสอบมีความแตกต่างกันที่ความหนาของแกนกลาง ชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกัน และการวางสายผ้าคาร์บอนจะมีทั้งการวางสายเดียวกันและการวางสลับสาย 45 องศา จะได้ผลการทดสอบซึ่งอ่านได้จาก dial gauge รวมทั้งหมด 30 ค่าดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบซึ่งอ่านได้จาก dial gauge

ค่าที่ได้จากการทดสอบ (อ่านจาก dial gauge)					
1A	2A	3A	1B	2B	3B
313	290	279	286	282	254
336	288	265	313	262	217
288	296	294	295	234	204
297	288	265	311	292	221
326	295	248	323	275	238



รูปที่ 5.1 กราฟผลการทดลอง

จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละแบบ แล้วจะได้ผลการทดสอบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.2 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและการวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการทดลอง

ชิ้นงาน	ภาระการรับแรงสูงสุด (N)		ความคลาดเคลื่อน (%)
	วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม	ทดสอบจริง	
1A	1878	1943	-3.47
2A	1741	1815	-4.25
3A	1623	1683	-3.68
1B	1809	1904	-5.26
2B	1607	1675	-4.26
3B	1367	1413	-3.35

5.3 การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างโมโนค็อกของรถ

5.3.1 กำหนดขนาด

อ้างอิงตามกฎการแข่งขัน โดยเริ่มจากการกำหนดขนาดสเกลเล็กๆก่อนคือพื้นที่ของห้องโดยสาร ตำแหน่งที่นั่ง ขนาดความกว้างฐานของล้อหน้า-หลัง พื้นที่สำหรับวางอุปกรณ์ต่างๆ จุดยึดระหว่างโครงสร้างกับบอดี้ของรถ และสุดท้ายคือความกว้าง ยาวของโครงสร้าง ซึ่งต้องมีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้มีน้ำหนักเบา

5.3.2 ออกแบบโมเดลโดยใช้ Solidwork

ทำการออกแบบโครงสร้างในโปรแกรมเพื่อให้สามารถเห็นถึงรูปแบบจริง โดยสิ่งสำคัญในการออกแบบคือส่วนโครงสร้างและบอดี้ต้องสามารถนำมาประกอบกันได้อย่างสมบูรณ์แบบ สิ่งต่อมาคือคำนึงถึงจุดยึดต่างๆ จุดที่ต้องรับน้ำหนักมาก ก็ต้องให้ความแข็งแรงกว่าส่วนอื่น การทำโรลบาร์สำหรับผู้ขี่เพื่อความปลอดภัยในเวลาเกิดอุบัติเหตุก็ต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอสามารถปกป้องผู้ขี่ได้ทั่วทั้งบริเวณร่างกาย

5.4 วิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้ ABAQUS

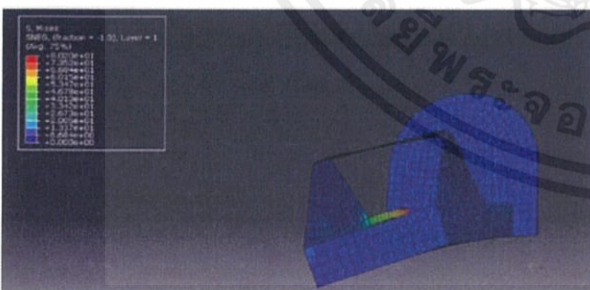
5.4.1 สภาวะการตัด กำหนดแรงกระทำในส่วนกลางของโครงสร้างเป็น 1000 นิวตัน



รูปที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการตัด

5.4.2 สภาวะการบิด (Torsion)

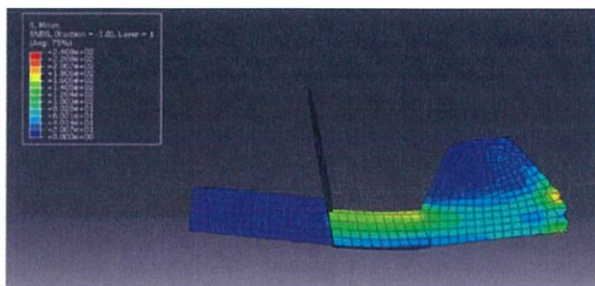
สภาวะแรงที่กระทำในการบิดตัว 1471 นิวตัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์เป็นแรงกระทำที่มากที่สุดเมื่อมีการใช้งานจริง



รูปที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการบิด

5.4.3 สภาวะการชน (Impact)

กำหนดอัตราเร่งในการพุ่งชนสูงสุด 10 g และน้ำหนักของตัวรถเฉลี่ยมีน้ำหนักเป็น 150 kg เราจะได้สภาวะแรงที่เกิดการชนเท่ากับ 14715 นิวตัน



รูปที่ 5.4 แสดงผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสภาวะการชน

5.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการทดสอบการวิเคราะห์ความแข็งแรงเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการวางสายผ้าคาร์บอนในแนวเดียวกันและการวางสลับสาย 45 องศา ได้ผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

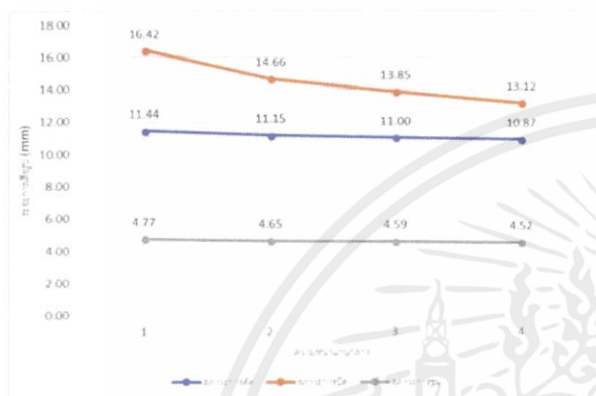
สภาวะการทดลอง	การวางสายผ้าคาร์บอน	
	สลับสาย 45 องศา	วางสายเดียวกัน
การตัด	0.96	1.20
การบิด	14.2	14.66
การชน	4.87	4.65

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการวางสายผ้าคาร์บอน

ที่สภาวะการตัด การวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลับสาย 45 องศา มี ระยะการตัดตัวดีกว่า 15.24 % ที่สภาวะการบิด การวางสายผ้าคาร์บอนแบบสลับสาย 45 องศา มี ระยะการบิดตัวดีกว่า 3.14 % ที่สภาวะการชน การวางสายผ้าคาร์บอนแบบสายเดียวกัน มี ระยะการยุบตัวดีกว่า 4.5 % เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ได้ บ่งบอกถึงการวางสายผ้าคาร์บอนสลับ 45 องศาทำให้เกิดความแข็งแรงต่อสภาวะต่าง ๆ ของโครงสร้างรถได้มากกว่าการวางสายผ้าคาร์บอนแบบสายเดียวกัน คณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้การวางสายผ้าแบบดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อไป

สภาวะการทดลอง	10	20	25	30
ทดลอง	mm	mm	mm	mm
การตัด	11.44	11.15	11.00	10.87
การบิด	16.42	14.66	13.85	13.12
การชน	4.77	4.65	4.59	4.52

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบการรับแรงแต่ละค่าความหนาของแกนกลาง



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบการรับแรงแต่ละค่าความหนาของแกนกลาง

หากดูจากกราฟการวิเคราะห์ระยะการบิดตัวของโครงสร้าง พบว่ายิ่งลดความหนาของแกนกลางการบิดตัวจะยิ่งเกิดได้มากขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดที่ จากความหนา 20 มิลลิเมตรไปความหนา 10 มิลลิเมตร

6.สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

เมื่อทำการทดสอบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการวางลายผ้าคาร์บอนในแนวเดียวกันและการวางสลับลาย 45 องศา จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ได้ บ่งบอกถึงการวางลายผ้าคาร์บอนสลับ 45 องศา ทำให้เกิดความแข็งแรงต่อสภาวะต่างๆของโครงสร้างรถได้มากกว่า การวางลายผ้าคาร์บอนแบบลายเดียวกัน คณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้การวางลายผ้าแบบดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อไป จากนั้นทำการทดสอบวิเคราะห์ความแข็งแรงที่สภาวะต่างๆเพื่อเปรียบเทียบความหนาของแกนกลางและเลือกวัสดุทำแกนกลางที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโครงสร้างจริงต่อไปและเมื่อดูจากค่าวิเคราะห์ความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำต่างๆ การสร้างโครงสร้าง

หนาแน่นสูงเป็นแกนกลางนั้นสามารถทำได้โดยใช้โฟม Divinycell ที่มีความหนาแน่น 60 kg/m³ ซึ่งความหนาที่เลือกใช้ในการสร้างโครงสร้างจริงคือ 20 มิลลิเมตร และการวางลายผ้าคาร์บอนแบบสลับลาย 45 องศาทำให้โครงสร้างมีความสามารถต้านทานแรงดัดได้ดีกว่าถึง 20 % เมื่อเทียบกับการวางลายผ้าคาร์บอนแบบลายเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถสร้างโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาสามารถคงความแข็งแรงต่อการใช้งาน และจะไม่เกิดความเสียหายหากใช้งานในรูปแบบที่กำหนดไว้ตามกฎการแข่งขัน

ดังนั้นการตัดสินใจเลือกวัสดุทำตัวถังรถจะต้องเลือกด้วยความรอบครอบโดยคำนึงปัจจัยต่างๆหลายด้านดังที่ได้กระทำในโปรเจกต์นี้

7.กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือในด้านคำแนะนำ การตรวจแก้ไข การติดตามความก้าวหน้าในการทำปริญญานิพนธ์ การดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีและสม่ำเสมอตลอดการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องทดสอบแรง ขอขอบคุณชมรม Innogen KMITL สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการทำปริญญานิพนธ์ รวมไปถึงการยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้

ผู้จัดทำขอระลึกในพระคุณนี้ ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทีมงานวิจัยขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ช่วยเหลือมาโดยตลอดระยะเวลาในการทางานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้