

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง  
STRENGTH ANALYSIS OF ALUMINUM HONEYCOMB SANDWICH



ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

# การวิเคราะห์ความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

## STRENGTH ANALYSIS OF ALUMINUM HONEYCOMB SANDWICH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2556

# STRENGTH ANALYSIS OF ALUMINUM HONEYCOMB SANDWICH



CHAITANA JARUKORNSAKUL

PUMIRAK KIRAVITTAYA

SURIYA KERKCHAIWAN

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 2013 ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

STRENGTH ANALYSIS OF ALUMINUM HONEYCOMB SANDWICH

ผู้จัดทำ

1. นาย ชัยธนะ จารุกรสกุล รหัสประจำตัว 53010337
2. นาย ภูมิรักษ์ กิระวิทยา รหัสประจำตัว 53011277
3. นาย สุริย เกริกชัยวัน รหัสประจำตัว 53011792

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์ความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

นายชัยชนะ	จารุกรสกุล	53010337
นายภูมิรักษ์	กิระวิทยา	53011277
นายสุริย	เกริกชัยวัน	53011792
รศ.ดร. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ		อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556		

### บทคัดย่อ

วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการบิน ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้ จึงเกี่ยวข้องกับการนำวัสดุอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งมาศึกษาหาความแข็งแรง โดยจะศึกษาวิเคราะห์ด้วยวิธี ความแข็งแรงแบบการกด 3 จุด (Three-Point Bending Test) และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) จากนั้นจะทำการศึกษาด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) และวิเคราะห์หาค่า โดยชิ้นงานที่ทดสอบ จะมีลักษณะแกนของชิ้นงาน 5 ชั้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความแข็งแรง ผลจากการทดลอง เมื่อมีการเพิ่มจำนวนชั้น จะมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยจำนวนชั้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนช่วงการเสียรูป แต่ในชั้นที่ 5 จะมีแรงสูงสุดลดลง สันนิฐานได้ว่าเมื่อความสูงถึงจุดหนึ่ง จะรับแรงสูงสุดได้น้อยลง แต่ช่วงการเสียรูปจะยังคงมากขึ้น ในส่วนของการดูดซับพลังงานจะมากขึ้นตามจำนวนชั้นของแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## STRENGTH ANALYSIS OF ALUMINUM HONEYCOMB SANDWICH

Chaitana	Jarukornsakul	53010337
Pumirak	Kiravittaya	53011277
Suriya	Kerkchaiwan	53011792
Assoc.Prof. Dr.Somchai Norasethasopon		Advisor
Year 2013		

**ABSTRACT**

Honeycomb sandwich materials are widely used, especially for aviation industry. The aim of the study is related to analysis of aluminums honeycomb sandwich with three-point bending test and compared with using finite element analysis. After that the experiment is uniaxial compression test. The five specimens which are tested have 5 core-layers. Afterward to compared with both of specimens to analyze for further studies. From the experiment, the results show that increasing core layers will be effect on their strength. Furthermore, the level of core layers also effect on the range of deformation. However, at the five core layer tends to have the less of their maximum tension. Therefore, at the saturate point, it will obtain the less force than it can get. On the others hand the range of deformation continues to increase as well as their ability to absorb energy will be more which relates to the level of core layers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะความกรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่ในด้านต่างๆ ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ห้องทดสอบวัสดุ ที่เอื้อเพื่อให้ใช้อุปกรณ์เพื่อทำการ ทดสอบวัสดุ และขอขอบคุณ ผศ.ดร. ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ ในการช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการใช้ เครื่องทดสอบ รวมถึงขอขอบคุณนางสาว ทัทพ์ศมน ดุสิตโสภิตวงค์ และพี่ๆห้องทดสอบวัสดุทุกท่าน

ขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุด นั่นคือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพ ที่ได้เลี้ยงดู และ อบรม รวมถึงให้การสนับสนุนในการศึกษาอย่างดี อีกทั้งยังให้กำลังใจเสมอมา ขอระลึกในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นายชัยธนะ

จารุกรสกุล

นายภูมิรักษ์

กิระวิทยา

นายสุริย

เกริกชัยวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ขั้นตอนการผลิต.....	4
2.1.1 วิธีการขยาย (Expansion).....	4
2.1.2 วิธีการรีด (Corrugated).....	4
2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง.....	5
2.3 พฤติกรรมของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง.....	6
2.3.1 แรงที่กระทำ.....	6
2.3.2 การเบี่ยงเบน (Deflection).....	7
2.3.3 ลักษณะการเสียหาย.....	8
2.4 ขนาดของเซลล์ในแกนรังผึ้ง.....	12
2.5 ทฤษฎีพฤติกรรมการโก่งงอ (Bending Behavior) .....	14
2.6 ความแข็งแรงสูงสุดของแรงอัด (Ultimate Compressive Strength).....	17
2.7 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
2.7.2 ชนิดของเอลิเมนต์.....	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
3.1 ขั้นตอนการทดสอบ.....	23
3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ.....	23
3.1.2 การทดสอบ.....	25
3.2 ขั้นตอนการทดสอบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	29
3.2.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	29
3.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์ (Solidworks).....	29
3.2.3 ขั้นตอนการจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรม Ansys.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลการทดลองจากการทดสอบ.....	45
4.1.1 ผลการทดลองจากการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test).....	45
4.1.2 ผลการทดลองจากการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test).....	51
4.2 ผลการทดลองการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	57
4.2.1 การจำลองขั้นตอน Simulation.....	57
4.2.2 ผลการทดลองการกดแบบ 3 จุด (Three Point Bending Test) ด้วยวิธีการ Simulation.....	59
4.3 ผลการเปรียบเทียบการทดลอง.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.1 การทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุด.....	63
5.2 การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด.....	63
5.3 ปัญหาที่พบข้อเสนอนะ.....	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก ก การคำนวณขนาดเซลล์ของแกนรังผึ้ง.....	68
ภาคผนวก ข การคำนวณการดูดซับพลังงาน.....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความสูงของชิ้นงานแต่ละชั้น.....	30
4.1 แสดงค่าระหว่างจำนวนชั้น และค่าแรงสูงสุดที่จุดแรก.....	54
4.2 แสดงค่าจากการดูดซับพลังที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	55
4.3 แรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานแต่ละแบบที่ระยะ 10 มิลลิเมตร.....	59
ข.1 การดูดซับพลังงานของชิ้นงานทดสอบแกน 1 ชั้น.....	71
ข.2 การดูดซับพลังงานของชิ้นงานทดสอบแกน 2 ชั้น.....	72
ข.3 การดูดซับพลังงานของชิ้นงานทดสอบแกน 3 ชั้น.....	74
ข.4 การดูดซับพลังงานของชิ้นงานทดสอบแกน 4 ชั้น.....	76
ข.5 การดูดซับพลังงานของชิ้นงานทดสอบแกน 5 ชั้น.....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การผลิตแกนรังผึ้งแบบวิธีการขยาย (Expansion).....	4
2.2 การผลิตแกนรังผึ้งแบบวิธีการรีด.....	5
2.3 แสดงแรงกระทำในวัสดุที่มีแกนแบบรังผึ้งทั้งหมด.....	7
2.4 แสดงการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงดัด.....	7
2.5 แสดงการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงเฉือน.....	8
2.6 แสดงความเสียหายที่ผิว.....	9
2.7 แสดงความยืดหยุ่นของวัสดุ.....	9
2.8 แสดงความเสียหายที่เกิดจากการโก่งตัว.....	10
2.9 แสดงการเกยกันของวัสดุที่มีโครงสร้างแกนวิช.....	10
2.10 แสดงการยุบที่เกิดที่ผิว.....	11
2.11 แสดงผิวของวัสดุที่เกิดการย่น.....	11
2.12 แสดงความเสียหายที่เกิดจากการยุบตัวเฉพาะที่.....	12
2.13 แสดงส่วนต่างๆของเซลล์รังผึ้ง 1 เซลล์.....	13
2.14 แสดงแบบจำลองการทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุด.....	14
2.15 แสดงภาพของความเค้นที่เกิดที่แกนและแผ่นผิว.....	14
2.16 แสดงกราฟผลการทดลองเปรียบเทียบการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี.....	15
2.17 แสดงการเสมือนความหนาเทียบเท่า.....	17
2.18 แสดงกราฟของผลการดูดซับพลังงานจากการทดสอบด้วยแรงกด.....	19
2.19 ตัวอย่างแสดงการแบ่ง Mesh, Element และ Node.....	20
2.20 แสดงรูปทรงของโนด(Node) ชนิดต่างๆ.....	22
2.21 แสดงการจำลองทางไฟไนต์กับรูปทรงวัตถุชนิดต่างๆ.....	22
3.1 การพัลลูมิเนียมให้มีลักษณะเป็นครึ่งหกเหลี่ยม.....	24
3.2 แกนครึ่งหกเหลี่ยมเมื่อพับเสร็จ.....	24
3.3 ทาอีพ็อกซีเรซินที่แผ่นที่พับแล้ว จากนั้นนำมาประกบกัน.....	25
3.4 แกนที่ประกอบสำเร็จและตัวอย่างวัสดุที่พร้อมทดสอบ.....	25
3.5 ขนาดหัวกดของการทดสอบแบบ Three Point Bending Test.....	26
3.6 ขนาดของหัวกดของการทดสอบแบบ Uniaxial Compression Test.....	27
3.7 แสดงการตั้งค่าเบื้องต้น ชื่อชิ้นงาน ความกว้าง ความยาว ความหนา.....	28

เอกสารนี้ 3.8 แสดงการตั้งค่าประเภทชิ้นงาน (Sample Type).....

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 แสดงการตั้งค่า Load Cell หน่วย (Unit) ความเร็วในการกดและ Return Speed.....	29
3.10 การวาดรูปครึ่งทงกลมเหลี่ยมสองมิติ.....	30
3.11 ภาพตัวอย่างของการยึดชิ้นงาน 1 ชั้น.....	31
3.12 การวาดแผ่นผิวของโครงสร้างรังผึ้ง.....	31
3.13 ภาพแผ่นผิวของโครงสร้างรังผึ้ง.....	32
3.14 การใช้คำสั่ง Split Line เพื่อสร้างเส้นจุดอ้างอิง.....	32
3.15 การใช้คำสั่ง Circle.....	33
3.16 ภาพการคำสั่ง Trim ตัดส่วนโค้งด้านบนออก.....	33
3.17 ภาพการ Extrude ของหัวกด.....	34
3.18 การย้ายระนาบ.....	34
3.19 การสร้างเส้นจุดอ้างอิงของหัวกด.....	35
3.20 หน้าต่างการประกอบชิ้นส่วนของโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์.....	35
3.21 การแทรกชิ้นงานทั้งสามส่วน.....	36
3.22 (ก-ค) การ Mate ที่ผิวหน้า ผิวระนาบข้าง ผิวระนาบบน.....	36
3.23 การ Mate ชิ้นงานรวมกัน.....	37
3.24 (ก-จ) การ Mate ส่วนหัวกดกับแผ่นผิว.....	37
3.25 หน้าต่างโปรแกรม Ansys.....	40
3.26 การใส่ค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	40
3.27 การนำชิ้นงานลงใน Ansys.....	41
3.28 การเปลี่ยนวัสดุในของชิ้นงาน.....	41
3.29 การเลือกการยึดติดระหว่างหัวกดกับชิ้นงาน.....	42
3.30 การสร้าง Mesh.....	42
3.31 การใส่ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก.....	43
3.32 การ Fixed Support หัวกดด้านล่าง.....	43
3.33 การกำหนดให้หัวกดกดลง 10 มิลลิเมตร.....	44
3.34 การเลือกตัวแปรที่ต้องการทราบจากการทดลอง.....	44
4.1 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 1 ชั้น (Three Point Bending Test).....	45
4.2 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 2 ชั้น (Three Point Bending Test).....	46
4.3 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 3 ชั้น (Three Point Bending Test).....	46
4.4 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 4 ชั้น (Three Point Bending Test).....	47

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 5 ชั้น (Three Point Bending Test).....	47
4.6 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบ (Three Point Bending Test).....	48
4.7 แสดงการเสียหายของชิ้นทดสอบแบบแกนหนึ่งชั้น.....	48
4.8 แสดงการเสียหายของชิ้นทดสอบแบบแกนสองชั้น.....	49
4.9 แสดงการเสียหายของชิ้นทดสอบแบบแกนสามชั้น.....	49
4.10 แสดงการเสียหายของชิ้นทดสอบแบบแกนสี่ชั้น.....	50
4.11 แสดงการเสียหายของชิ้นทดสอบแบบแกนห้าชั้น.....	50
4.12 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 1 ชั้น (Uniaxial Compression Test)....	51
4.13 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 2 ชั้น (Uniaxial Compression Test)....	51
4.14 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 3 ชั้น (Uniaxial Compression Test)....	52
4.15 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 4 ชั้น (Uniaxial Compression Test)....	52
4.16 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 5 ชั้น (Uniaxial Compression Test)....	53
4.17 กราฟผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบ (Uniaxial Compression Test).....	53
4.18 แสดงผลการทดลองที่แรงสูงสุดในแต่ละชั้น.....	54
4.19 ค่าการดูดซับพลังงาน ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	55
4.20 การเสียหายของชิ้นทดสอบที่เกิดจากการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test).....	56
4.21 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงาน 1 ชั้น.....	57
4.22 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงาน 2 ชั้น.....	57
4.23 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงาน 3 ชั้น.....	58
4.24 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงาน 4 ชั้น.....	58
4.25 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงาน 5 ชั้น.....	58
4.26 ความสัมพันธ์ของแรง และระยะที่เสียรูป.....	59
4.27 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบกด 3 จุด (แกน 1 ชั้น).....	60
4.28 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบกด 3 จุด (แกน 2 ชั้น).....	60
4.29 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบกด 3 จุด (แกน 3 ชั้น).....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปสู่อะไรทั้งนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบกด 3 จุด (แกน 4 ชั้น).....	61
4.31 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบกด 3 จุด (แกน 5 ชั้น).....	62
ก-1 แสดงส่วนต่างๆของเซลล์รั้งฝั่ง 1 เซลล์.....	68
ข-1 แสดงการแบ่งพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ ชิ้นงานทดสอบแกน 1 ชั้น.....	70
ข-2 แสดงการแบ่งพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ ชิ้นงานทดสอบแกน 2 ชั้น.....	72
ข-3 แสดงการแบ่งพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ ชิ้นงานทดสอบแกน 3 ชั้น.....	74
ข-4 แสดงการแบ่งพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ ชิ้นงานทดสอบแกน 4 ชั้น.....	76
ข-5 แสดงการแบ่งพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ ชิ้นงานทดสอบแกน 5 ชั้น.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโลกปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีต่างๆถูกพัฒนาไปอย่างมากมาย ทรัพยากรต่างๆในโลกถูกใช้งานมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ โลหะ เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในโลกรมนุษย์มากที่สุดเป็นอันดับต้นๆ เพื่อผลิต และตอบสนองความต้องการของมนุษย์ โดยโลหะ จะถูกนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างมาก เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง นำมาใช้เป็นโครงสร้าง เพื่อให้เกิดความแข็งแรง เพราะความแข็งแรงของวัสดุประเภทโลหะ จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ซึ่งโลหะ นอกจากจะมีข้อดีแล้ว ย่อมมีข้อเสียอยู่ด้วยเช่นกัน น้ำหนักของโลหะ จัดเป็นข้อเสียประการแรกๆ ที่ผู้นำมาใช้งาน ควรจะระลึกถึง ซึ่งอาจจะทำให้จุดประสงค์ของงาน ขาดตกบกพร่องไป เพราะเหตุนี้เอง มนุษย์จึงได้มีการคิดค้น หาทางออกเพื่อทำการกำจัดข้อด้อยของโลหะ นั่นคือ การคิดค้น และพัฒนาวัสดุ การปรับแต่งโครงสร้างของวัสดุ จัดเป็นนวัตกรรมทางความคิดของมนุษย์ ในการลดข้อเสียที่จะใช้วัสดุประเภทโลหะนี้ นอกจากการลดน้ำหนักของวัสดุได้แล้ว บางครั้ง อาจจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ของวัสดุได้อีกด้วย

วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb Sandwich) จัดเป็นวัสดุประกอบประเภทหนึ่งที่เป็นผลมาจากการดัดแปลง และคิดค้นของมนุษย์ วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แผ่นผิว กาวยึดติด และแกนกลาง อาจจะเป็นทั้งวัสดุชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกันก็ได้ นอกจากแกนกลางที่มีรูปทรงหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งแล้ว อาจจะมีรูปทรงแบบอื่นได้ เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยม เป็นต้น คุณสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งนี้ คือ มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง และยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

โครงงานนี้จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์วัสดุอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง โดยการศึกษาเชิงทดลองกับวัสดุที่ทำขึ้นเป็นแบบทดลอง ด้วยการทดลอง 2 วิธีคือ การทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) นอกจากการทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุดแล้ว จะมีการทดสอบด้วยวิธี

แรงกด (Uniaxial Compression Test) ด้วยการทดสอบกับเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM) แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยที่ชิ้นงาน จะมีลักษณะของแกนแตกต่างกัน 5 แบบ คือ 1. แบบรังผึ้ง 2. แบบรังผึ้งสองชั้น 3. แบบรังผึ้งสามชั้น 4. แบบรังผึ้งสี่ชั้น และ 5. แบบรังผึ้งห้าชั้น ซึ่งจะทำให้ได้ความหลากหลายของแกนรังผึ้ง อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆอีกด้วย

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อทำการแบ่งแกนของวัสดุทดลองที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะทำให้วัสดุแกนที่ถูกแบ่งจะมีความแข็งแรงมากกว่า ทนต่อการเสียรูปได้ดีกว่าวัสดุทดลองที่แบ่งจำนวนชั้นแกนน้อยกว่า แต่ยังสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าอีกด้วย

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

โครงการนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง วัสดุทั้งหมดที่ใช้ทำแกนและแผ่นผิวเป็นอลูมิเนียมชนิด 1100-H14 ทั้งหมด โดยกำหนดให้ขนาดของ 6 เหลี่ยมมีความกว้าง 1 เซนติเมตร แล้วนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีแกน 2-5 ชั้น

### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ประกอบวัสดุที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 2 แบบ
3. ศึกษาการใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM)
4. ทดสอบวัสดุด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM)
5. จำลองการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA)
6. ประมวลผล วิเคราะห์ผล และเปรียบเทียบผลการทดสอบ
7. สรุปผลการศึกษา

### 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารการศึกษาทดลองนี้ จะใช้วัสดุคืออลูมิเนียม 1100 H-14 ทั้งที่แผ่นผิว และแกน ทดลองที่ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

การศึกษาการทดลองนี้ จะมีการใช้กาว Epoxy นำมาเชื่อมติดกันทั้งแผ่นผิวและแกน จึงไม่สามารถมีคุณภาพที่ดีเทียบเท่าวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งที่ใช้งานในอุตสาหกรรมได้ จึงทำให้ค่าจากการทดลองมีความผิดพลาดเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

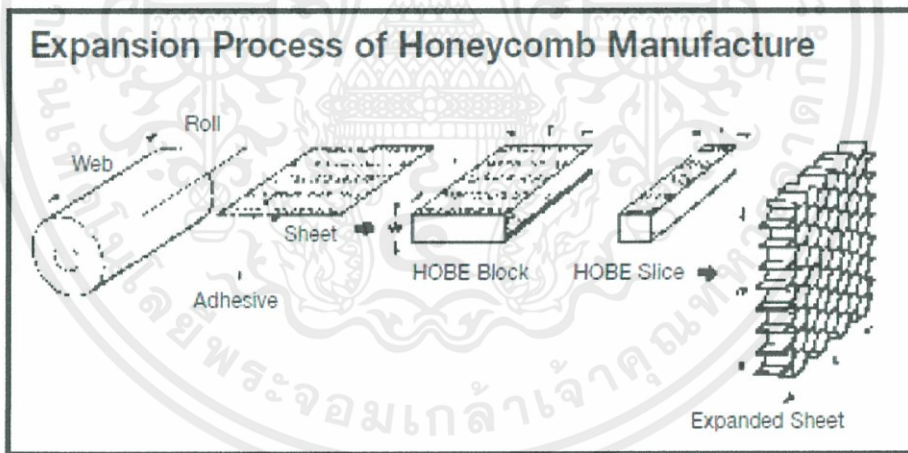
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ขั้นตอนการผลิต

ในการผลิตวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง [6] จะต้องมีกระบวนการในการขึ้นรูปของแกน ในกระบวนการผลิตแกนของวัสดุนั้น จะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ วิธีการขยาย (Expansion) และวิธีการรีด (Corrugated)

#### 2.1.1 วิธีการขยาย (Expansion)

ในกระบวนการผลิตวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งด้วยวิธีการขยายนั้น จะเริ่มต้นจากการติดแผ่นวัสดุตามตำแหน่งแนวเส้นด้วยสารยึดติด จากนั้นจะกลายมาเป็นวัสดุแกนก่อนการยืด HOBE<sup>®</sup> (Honeycomb Before Expansion) จากนั้นจะนำวัสดุต้นแบบที่มีรูปทรงเดียวกับรูปทรงที่เป็นแกนแทรกไประหว่างส่วนของวัสดุแกนก่อนการยืด ดังภาพ

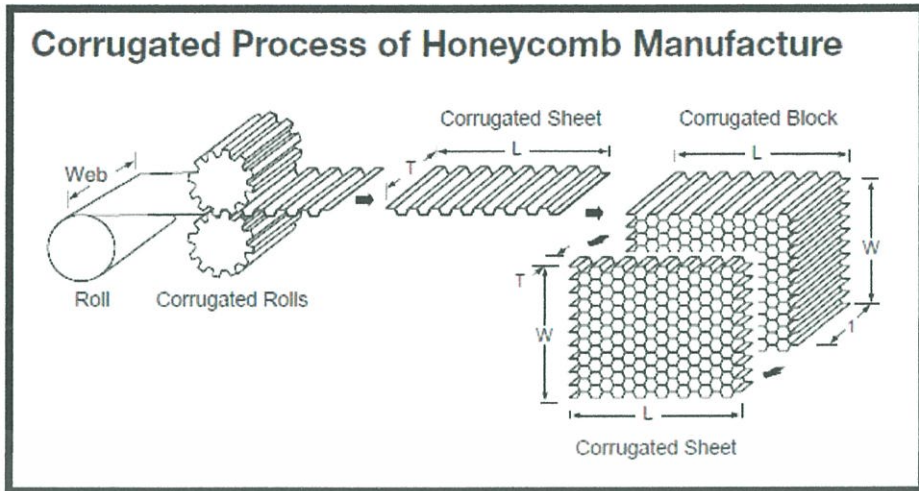


รูปที่ 2.1 การผลิตแกนรังผึ้งแบบวิธีการขยาย (Expansion) [6]

#### 2.1.2 วิธีการรีด (Corrugated)

ในการผลิตแกนของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง ผู้ผลิตมักจะใช้วิธีการนี้กับแกนที่มีความหนาแน่นมาก กระบวนการนี้ เมื่อผ่านการรีดแล้ว จะมีการนำสารยึดติด ยึดให้เข้ากัน จากนั้นจึงตัด

เพื่อให้ได้ขนาด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การผลิตแกนรังผึ้งแบบวิธีการรีด (Corrugated) [6]

## 2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง [7] จะเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยความหลากหลายของวัสดุที่นำมาประกอบทั้งแกนและแผ่นผิว คุณสมบัติต่างๆต่อไปนี้ จะเป็นทางเลือกหลักในการพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุ

### การพิจารณาด้านโครงสร้าง

#### ความแข็งแรง

ทั้งแกนและผิวของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งนั้น ต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล และต้องแน่ใจว่าวัสดุที่นำมาใช้นั้น จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดในการเลือกมาใช้งาน

#### ความยืดหยุ่น

โครงสร้างแซนวิช จำเป็นต้องคำนึงความยืดหยุ่นที่น้ำหนักต่ำมากๆ เพราะความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความเค้นต่ำ อย่างไรก็ตาม จะต้องคำนึงถึงการเลือนตัวที่เกิดจากแรงเค้น

#### คุณสมบัติของสารยึดติด

สารยึดติดต้องมีคุณสมบัติในการดึงดูดผิวและแกนเข้าหากัน คุณสมบัติของสารยึดติดที่ดีจะต้องมีความโมดูลัสสูง สารยึดติดที่มีความเปราะ จะเป็นข้อเสียในการนำมาใช้

#### การพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกมาจากเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะเป็นวัสดุทางเลือกในการลดต้นทุนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพิจารณาด้านแวดล้อม

### อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรหลักในการคัดเลือก หรือพิจารณาการเลือกใช้วัสดุ ส่วนมาก การใช้งานของวัสดุ จะถูกใช้ใน ช่วงอุณหภูมิห้อง และจะเลือกใช้พิจารณาคุณสมบัติของช่วงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่าง -55 องศาเซลเซียส ถึง 170 องศาเซลเซียส

### ความทนทานต่อการติดไฟ

วัสดุที่จะคัดเลือกจะพิจารณาจากคุณสมบัติ 3 อย่าง คือ

1. ไม่ติดไฟ
2. วัสดุจะติดไฟเมื่อมีเปลวไฟ และจะต้องไม่ติดไฟเมื่อไม่มีเปลวไฟ
3. ความสามารถในการติดไฟ : จะพิจารณาว่า เมื่อเปลวไฟแพร่ไปภายใต้คุณสมบัติที่เหมาะสม

#### การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่ทะลุผ่านวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะขึ้นอยู่กับการพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

#### ความชื้น

ในบางวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะมีความสามารถในการป้องกันความชื้นได้อย่างยอดเยี่ยม

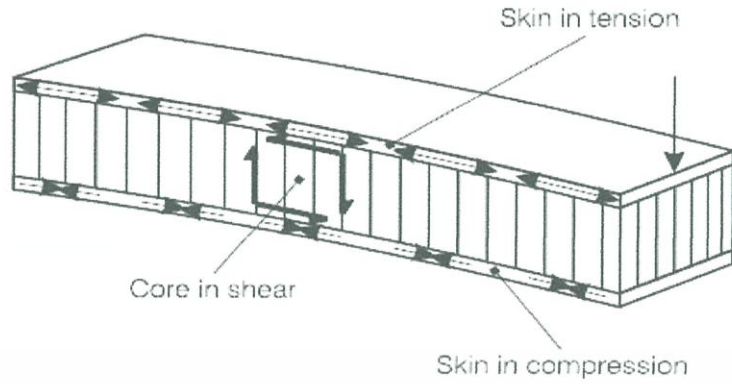
## 2.3 พฤติกรรมของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

### 2.3.1 แรงที่กระทำ

พิจารณาคานแขนวิชที่ตรึงติดกำแพงด้านหนึ่ง ในอีกด้าน จะเป็นไม่มีจุดยึดติดใดๆ เมื่อลองออกแรงกดที่จุดปลาย จะเกิดแรงโมเมนต์ดัด ซึ่งจะทำให้มีแรงที่มากที่สุดอยู่ที่จุดปลาย และจะเกิดแรงเฉือนตลอดคาน

ในแผ่นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะเกิดแรงดึงที่แผ่นผิวบน และจะเกิดแรงกดที่แผ่นผิวล่าง ขณะที่แกนกลาง จะเกิดแรงเฉือนระหว่างช่องว่าง ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนไปเสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

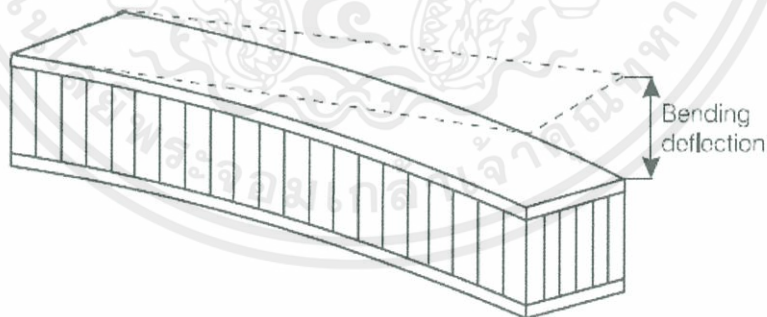


รูปที่ 2.3 แสดงแรงกระทำในวัสดุที่มีแกนแบบรังผึ้งทั้งหมด [7]

### 2.3.2 การเบี่ยงเบน (Deflection)

ลักษณะการเบี่ยงเบนของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะเกิดจากทั้งแรงดัด (Bending) และแรงเฉือน (Shear)

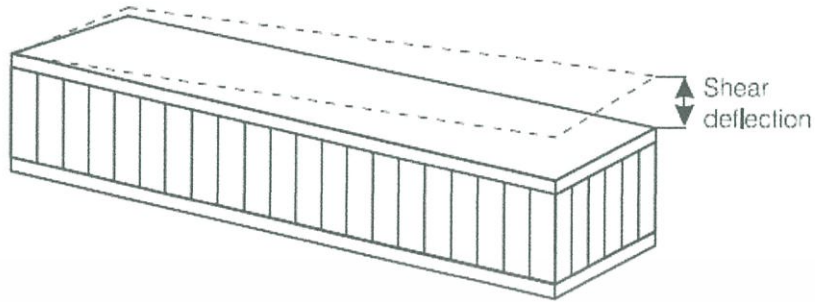
การเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงดัด จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของแรงดึง (Tensile) และแรงกด (Compression) ที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ



รูปที่ 2.4 แสดงการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงดัด [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงเฉือน จะขึ้นอยู่กับแรงเฉือนที่แกน



รูปที่ 2.5 แสดงการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงเฉือน [7]

ดังนั้นแล้ว จะสรุปได้ว่า ระยะเวลาการเบี่ยงเบน เกิดจากผลรวมของแรงดัด และแรงเฉือนที่เกิดขึ้น

$$\text{Total Deflection} = \text{Bending Deflection} + \text{Shear Deflection}$$

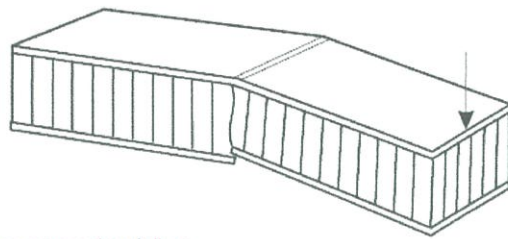
### 2.3.3 ลักษณะการเสียหาย

ลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรับน้ำหนักนั้น ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงผลของลักษณะการเสียหาย เพื่อป้องกัน และการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยลักษณะการเสียหาย จะสรุปได้ดังนี้

#### 2.3.3.1 ความไม่แข็งแรง

แผ่นผิวและแกนกลางของวัสดุจะเกิดความเสียหายที่ผิวของวัสดุด้วยแรงดึง แรงกด และแรงเฉือน โดยกาวที่ยึดติด จะมีความสามารถที่จะถ่ายโอนความเค้นเฉือนระหว่างแกนและผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Skin compression failure

รูปที่ 2.6 แสดงความเสียหายที่ผิว [7]

2.3.3.2 ความยืดหยุ่น

วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะต้องมีความยืดหยุ่นเพื่อรับแรงดัด และแรงเฉือน เพื่อป้องกันการเสียรูปที่มากเกินไป



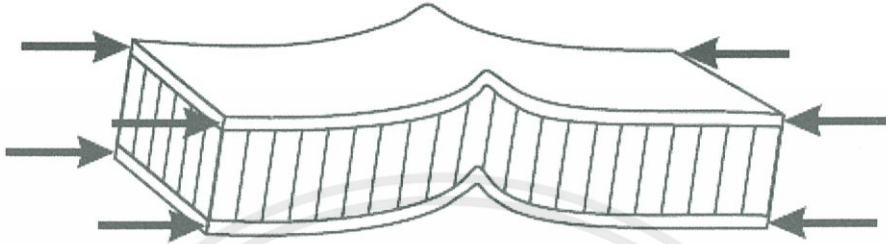
Excessive deflection

รูปที่ 2.7 แสดงความยืดหยุ่นของวัสดุ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.3 การโค้งตัว

ความหนาของแกนกลางและค่าโมดูลัสของแรงเฉือน จำเป็นต้องมีค่าที่พอเหมาะ เพื่อป้องกันการโค้งอันเนื่องมาจากแรงกด



รูปที่ 2.8 แสดงความเสียหายที่เกิดจากการโค้งตัว [7]

### 2.3.3.4 การเกยกันเนื่องจากแรงเฉือน

ความหนาของแกนกลางและค่าโมดูลัสของแรงเฉือน จำเป็นต้องมีค่าที่พอเหมาะ เพื่อป้องกันการเกยกันเสียหายก่อนที่ควรจะเป็น อันเนื่องมาจากแรงเฉือนภายใต้แรงกด

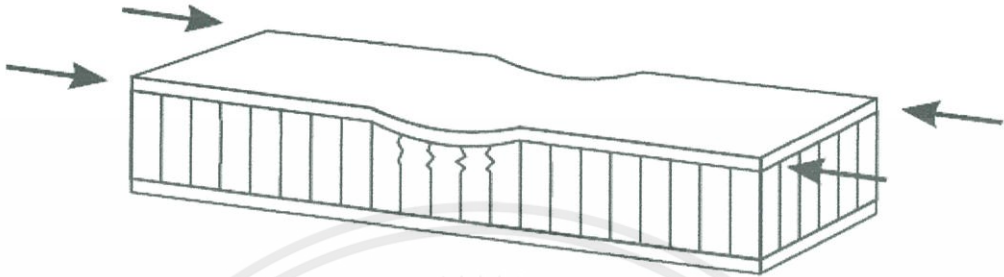


รูปที่ 2.9 แสดงการเกยกันของวัสดุที่มีโครงสร้างแซนวิช [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.5 การยุบตัวของผิว

โมดูลัสของแรงกดที่ผิวและความหนาของแกนกลาง ต้องมีค่าที่มากพอที่จะป้องกันการยุบตัว

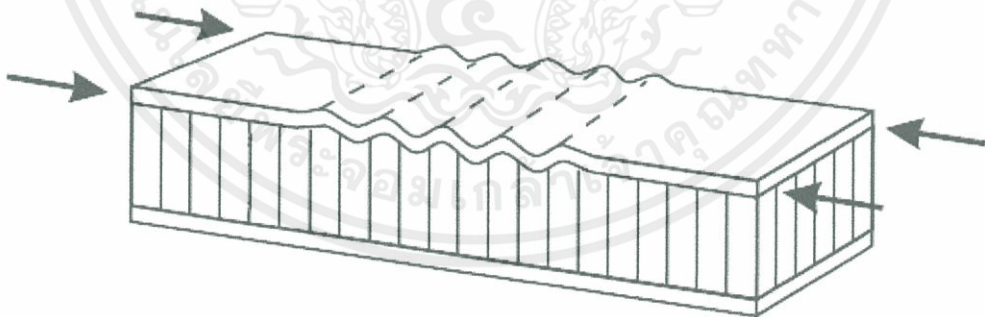


รูปที่ 2.10 แสดงการยุบที่เกิดที่ผิว [7]

### 2.3.3.6 การโก่งตัวเข้าด้านใน

ขนาดของเซลล์แกนกลางจะต้องมีขนาดที่เล็กเพียงพอเพื่อป้องกันการโก่งตัวเข้าด้าน

ใน

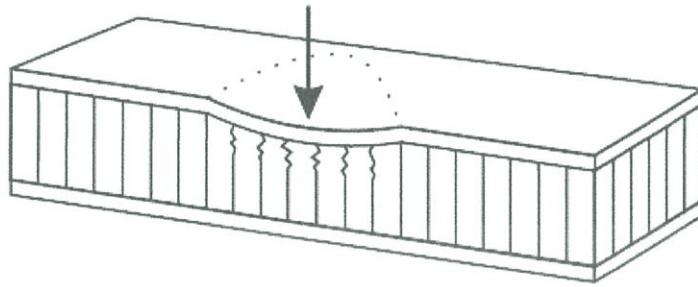


รูปที่ 2.11 แสดงผิวของวัสดุที่เกิดการยุบ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.7 การยุบตัวเฉพาะที่

แกนกลาง จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมากพอ เพื่อป้องกันการยุบตัวเฉพาะที่

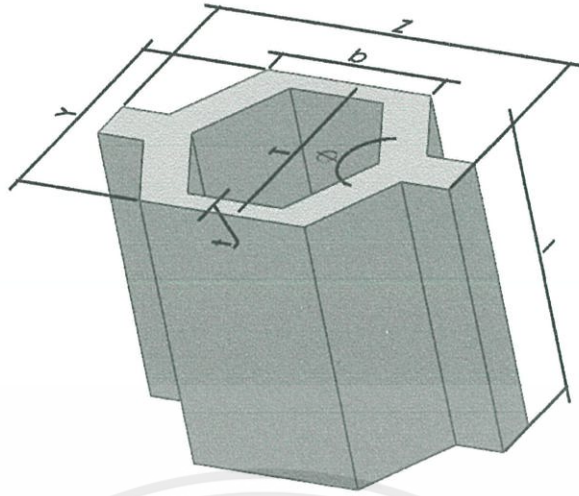


รูปที่ 2.12 แสดงความเสียหายที่เกิดจากการยุบตัวเฉพาะที่ [7]

## 2.4 ขนาดของเซลล์ในแกนรังผึ้ง

แกนรังผึ้งจะมีลักษณะเป็น 6 เหลี่ยมต่อกัน ซึ่งจะเกิดเป็นแกนรังผึ้งเรียงต่อกัน แต่ใน 1 เซลล์ หรือ 1 หกเหลี่ยมของแกนรังผึ้งนั้น สามารถนำมาคำนวณ เพื่อหาความกว้าง ความยาว และมุมของ หกเหลี่ยมในแต่ละเซลล์แล้วนำไปออกแบบและเลือกใช้ประกอบเป็นวัสดุแกนรังผึ้งได้ ความสัมพันธ์ของขนาดใน 1 เซลล์นั้น สามารถศึกษาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงส่วนต่างๆของเซลล์รังผึ้ง 1 เซลล์ [1]

เมื่อ กำหนดให้

$S$  = ความกว้างของแผ่นอลูมิเนียม (mm)

$t$  = ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (mm)

$\rho_a$  = ความหนาแน่นของอลูมิเนียม ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_r$  = ความหนาแน่นของเซลล์ (mm)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของเซลล์ ( $\text{mm}^2$ )

$l$  = ความสูงของเซลล์ (mm)

$b$  = ความกว้างของด้าน (mm)

$\theta$  = มุมภายในระหว่างด้าน =  $120^\circ$

จะได้ว่า

$$Y = 2b \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) + 2t \quad (2.1)$$

$$Z = 2b \times \left( 1 + \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$A = Z \times Y = 4b^2 \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \left( 1 + \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

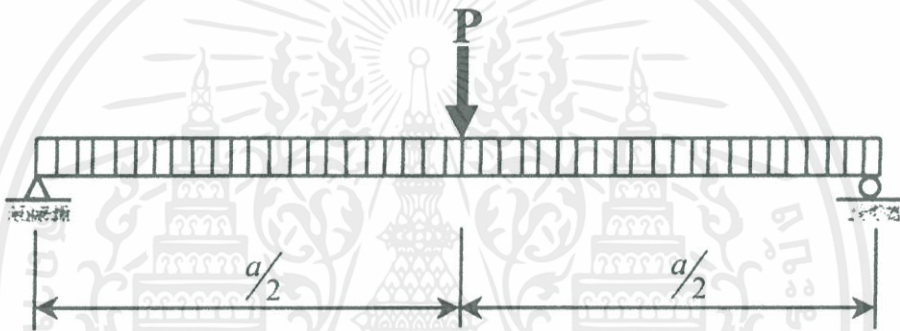
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะได้

$$\rho_c = \frac{(2tp_a)}{\left[ \left( \sin \frac{f}{2} \right) \left( 1 + \cos \frac{f}{2} \right) \right]} \quad (2.4)$$

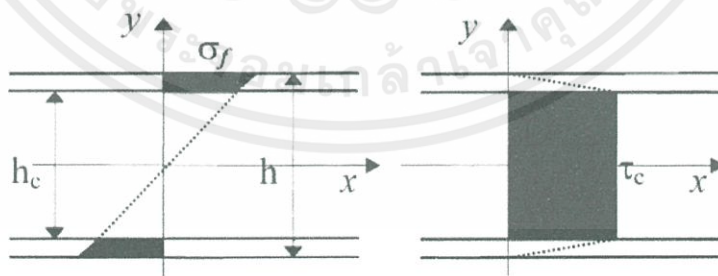
## 2.5 ทฤษฎีพฤติกรรมการโก่งงอ (Bending Behavior)

ในการทดสอบพฤติกรรมการโก่งงอของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะใช้วิธีการออกแรงกดไปที่จุดกลางของชิ้นวัสดุทดสอบ



รูปที่ 2.14 แสดงแบบจำลองการทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุด [8]

รูปที่ 2.15 แสดงความเค้นที่กระจาย เมื่อออกแรงกดที่จุดตรงกลางของวัสดุชิ้นทดสอบ จากภาพ ผิวนของวัสดุจะเกิดความเค้นดัด  $\sigma_f$



(a) Bending stress

(b) Shear stress

รูปที่ 2.15 แสดงภาพของความเค้นที่เกิดขึ้นที่แกนและแผ่นผิว [8]

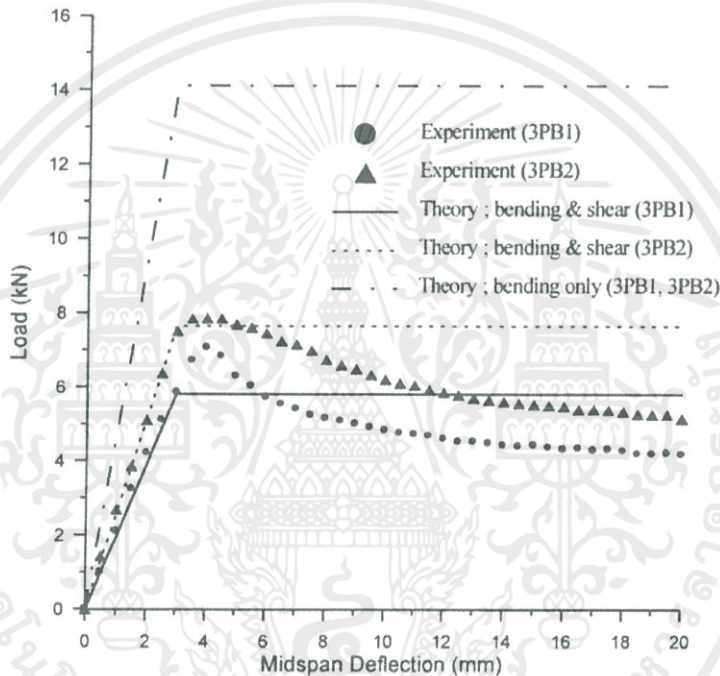
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เมื่อความหนา  $t_f$  ของแผ่นผิวมีขนาดเล็ก ความแตกต่างของแรงดัดตลอดแผ่นผิวจะไม่นำมา

พิจารณา และจะพิจารณาว่า วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งจะมีความเค้นเฉือนตามแนวขวาง  $\tau_c$  และ

จะพิจารณาว่า การเคลื่อนที่ของทั้งผิวและแกนของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน Kelsey et al. [11] ได้แสดงสมการการโก่งตัวที่บริเวณกึ่งกลางของวัสดุโครงสร้างแซนวิชในช่วง Liner Elastic ไว้ได้ว่า

$$w = \frac{Pa^3}{48E_f I_f} + \frac{Pa}{4A_c G_{ca}} \quad (2.5)$$

ในเทอมแรกของสมการนั้น เป็นผลที่มาจากแรงดัดเพียงอย่างเดียว และในเทอมที่สองของสมการนั้น จะเป็นผลของแรงเฉือน



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟผลการทดลองเปรียบเทียบการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี [8]

จากรูปที่ 2.16 Jeom Kee Paik et al. [8] จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าการทำนายการโก่งตัวด้วยวิธีการคำนวณตามทฤษฎีโดยใช้สมการที่ 2.5 กับผลของการทดลองที่ทดสอบกับชิ้นงาน (จากกราฟ ชิ้นงานที่ทดสอบคือ 1. 3PB1 มีขนาดความหนา 0.0381 mm และมีความหนาแน่นของแกน 54.4 kg/m<sup>3</sup> 2. 3PB2 มีขนาดความหนา 0.0635 mm และมีความหนาแน่นของแกน 83.2 kg/m<sup>3</sup>) ในการคำนวณทำนายผลของแรงดัดด้วยสมการแล้ว จะไม่มีการคำนึงถึงผลของแรงเฉือน ตามสมการที่ 2.5 ซึ่งจากกราฟที่แสดงแล้ว จะทำนายแต่เพียงความเป็น Elastic ของวัสดุที่

เอกสารนี้มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง แต่จากความเป็นจริง ไม่สามารถละทิ้งผลของแรงเฉือนได้ ในการทำนายค่าที่เรียกว่าค่ามากที่สุดที่จะรับแรงได้ จะพิจารณาได้จากความเค้นที่กระจายดังรูปที่ 15 ค่าของโมเมนต์ดัดที่รองรับ

คานวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งจะคำนวณได้จากการหาปริพันธ์ของโมเมนต์ดัด โดยไม่คำนึงถึงแกนธรรมชาติ (Neutral Axis) ดังจะได้ตามสมการ

$$M = C \frac{bh^2 \sigma_f}{4} \times \left\{ 1 - \left( \frac{h_c}{h} \right)^2 \right\} = \frac{Pa}{4} \quad (2.6)$$

โดยที่ค่า  $C$  เป็นค่าคงที่ของแรงเฉือนอันเป็นผลมาจากความทนทานต่อโมเมนต์ดัดของแกนของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

สำหรับค่าคงที่  $C$  จะมาจากสมการที่ 2.5 ด้วยการสมมติผลของแรงเฉือนของแกน และสมมติความแข็งแรงของแผ่นด้วยความยืดหยุ่น จะได้สมการ

$$C = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (2.7)$$

$$\text{โดยที่ } C_1 = \frac{a^3}{48E_f I_f}, C_2 = \frac{a^3}{4A_c G_{ca}}$$

ภาระแรงสูงสุดที่รับได้จะได้จากเมื่อความเค้นดัดของแผ่นผิวเข้าสู่ความเค้นที่จุดยิว (Yield Stress) หรือ  $\sigma_f = \sigma_{f0}$  ดังนั้น แทนค่า  $P$  ด้วย  $P_0$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_0 = C \frac{bh^2 \sigma_{f0}}{a} \times \left\{ 1 - \left( \frac{h_c}{h} \right)^2 \right\} \quad (2.8)$$

จากรูปที่ 2.16 ภาระแรงสูงสุดจะหาได้จากสมการที่ 2.5 และ 2.8 และจะพบได้ว่า สมการที่ 2.8 จะสามารถนำมาใช้ทำนายค่าภาระโหดสูงสุดของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งได้อย่างรวดเร็ว

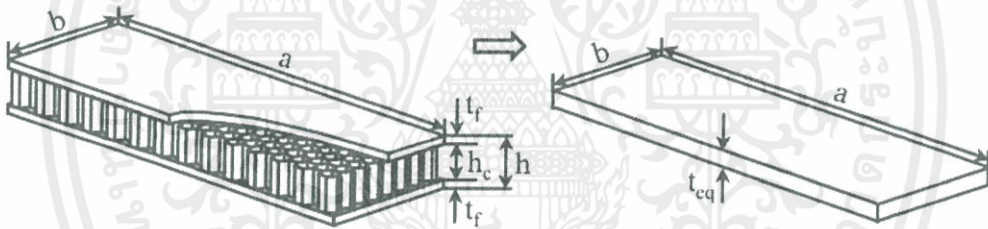
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ความแข็งแรงสูงสุดของแรงอัด (Ultimate compressive strength)

การคำนวณความแข็งแรงสูงสุดของแรงอัดภายใต้แรงอัดตามแนวแกน ดังภาพ จะเป็นการสมมติให้ความหนาทั้งหมดของชั้นทดสอบมีค่าเท่ากับความหนาของแผ่นเดียว

ในการแทนที่วัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งด้วยความหนาเทียบเท่าแผ่นผิว จะมีด้วยกันสองวิธี คือ วิธีเทียบเท่าความแข็งแรง และวิธีการเทียบเท่าน้ำหนัก ในการเทียบเท่าความแข็งแรง ความหนาของแผ่นและโมดูลัสความยืดหยุ่นจะถูกกำหนดให้มีความแข็งแรงของแผ่นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง มีความแข็งแรงเท่ากับแผ่นผิว และในวิธีการเทียบเท่าน้ำหนัก จะกำหนดให้น้ำหนักของชั้นทดสอบและแผ่นผิวมีค่าเท่ากัน

คุณสมบัติของวัสดุของแผ่นผิวที่เทียบเท่าความแข็งแรงจะหาได้จากสมการ จากตัวอย่างของ Keneko และ Takeuchi [10] ความแข็งแรงของแผ่นที่มีความหนาเท่ากับแผ่นผิวจะนำมาพิจารณา แยกเป็นกรณีของ แรงดึงตามแนวแกน แรงดัด และแรงเฉือน



รูปที่ 2.17 แสดงการเสมือนความหนาเทียบเท่า [8]

ในกรณีของแรงดึง

$$2t_f E_f = t_{eq} E_{eq} \quad (2.9)$$

ในกรณีแรงดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ โดยนอกระบบ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{2} \left[ (h_c + 2t_f)^3 - h_c^2 \right] E_f = \frac{1}{12} t_{eq}^3 E_{eq} \quad (2.10)$$

ในกรณีแรงเฉือน

$$G_{eq} = \frac{2t_f}{t_{eq}} \cdot G_f \quad (2.11)$$

$$2t_f G_f = t_{eq} G_{eq} \quad (2.12)$$

โดยที่ค่า  $t_{eq}, E_{eq}, G_{eq}$  จะสามารถหาได้จากสมการข้างต้น ซึ่งจะได้ดังนี้

$$t_{eq} = \sqrt{3h_c^2 + 6h_c t_c + 4t_c^2} \quad (2.13)$$

$$E_{eq} = \frac{2t_f}{t_{eq}} \times E_f \quad (2.14)$$

$$G_{eq} = \frac{2t_f}{t_{eq}} \times G_f \quad (2.15)$$

หรือจะกล่าวได้ว่า ความหนาเทียบเท่าของแผ่นผิว  $t_{eq}$  จะหาได้จากน้ำหนัก ดังสมการ

$$L \times W \times t_{eq} \times \rho_f = L \times W \times 2t_f \times \rho_f + L \times W \times h_c \times \rho_{ca} \quad (2.16)$$

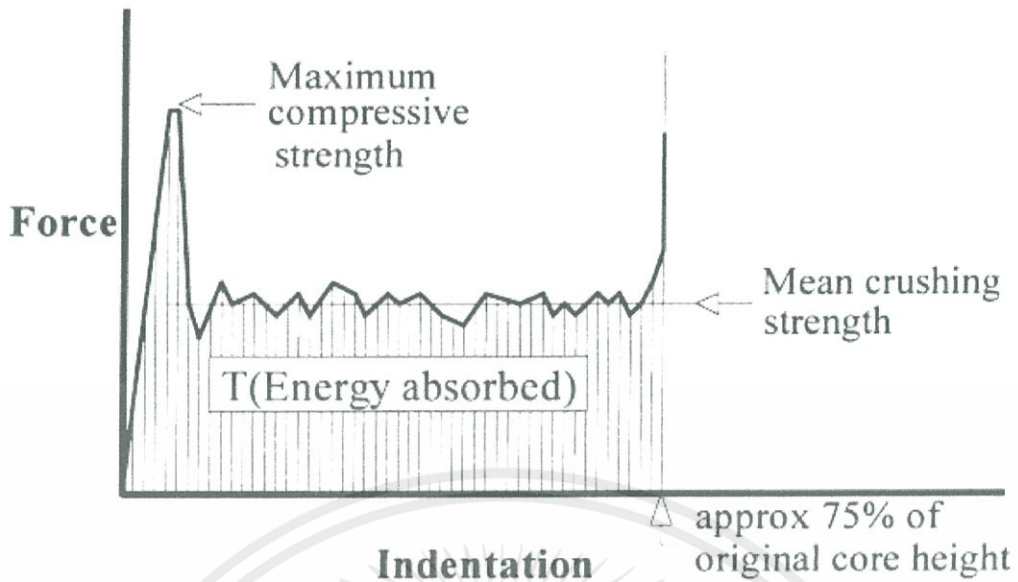
ได้ผลคือ

$$t_{eq} = \frac{2t_f \times \rho_f + h_c \times \rho_{ca}}{\rho_f} \quad (2.17)$$

ความยืดหยุ่นและแรงเฉือนของแผ่นผิวเทียบเท่ากับจะถูกสมมติว่าได้เท่ากับแผ่นผิววัสดุ จะได้

$$E_{eq} = E_f, G_{eq} = G_f \quad (2.18)$$

จากรูปแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระจายและระยะที่เคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างแผ่นบางที่มีแรงอัดสูงสุด ในการออกแรงที่ซึ่งมีการเสียรูปเล็กน้อยนั้น แรงภายในจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านจุดที่มีภาระแรงสูงสุด เมื่อการเสียรูปดำเนินต่อไป รอยพับของแกนจะเริ่มเกิดขึ้น ถ้าแกนของวัสดุติดต่อกันและกัน แรงภายในจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแกนด้านถัดไปเกิดรอยพับ ซึ่งกระบวนการนี้ จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่งแกนของเซลล์พับจนสุด หลังจากการพับของแกนอย่างสมบูรณ์แล้วจะกลายเป็นวัตถุแข็งเกร็ง พื้นที่ใต้กราฟจะแสดงพลังงานที่ดูดซับของโครงสร้างวัสดุที่มีเอกสารนี้ โครงสร้างแบบรังผึ้งไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟของผลการดูดซับพลังงานจากการทดสอบด้วยแรงกด [8]

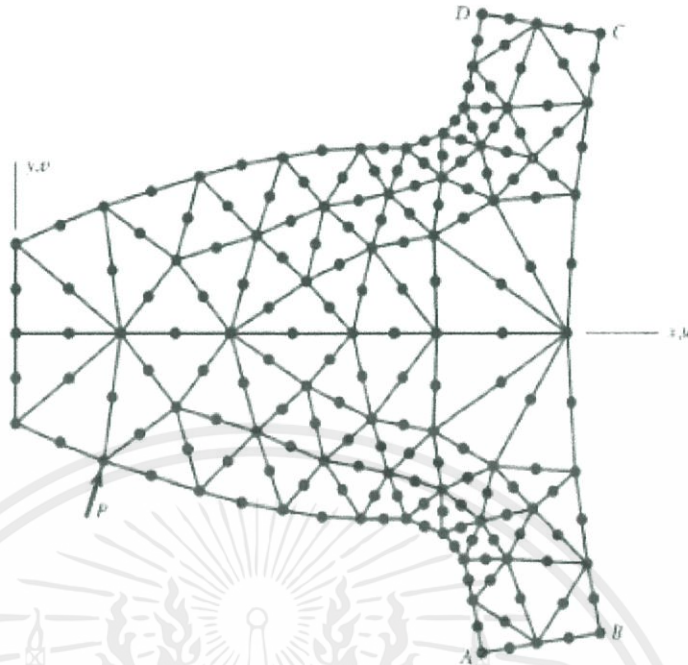
เมื่อพลังงานภายในกระจายไปทั่วโครงสร้าง ความแข็งแรงต่อภาระแรงที่กระทำจะได้จากสมการ

$$P_m = \frac{T}{\delta_{\max}} \quad (2.19)$$

## 2.7 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการวิเคราะห์ด้วยการจำลอง (Simulation) เชิงตัวเลขเพื่อทำการแก้ไขปัญหาทางฟิสิกส์ หรือทางวิศวกรรม ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเกิดจากการแบ่งเอลิเมนต์ (Element) ย่อยๆของโดเมนโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างแสดงการแบ่ง mesh, element และ node [3]

ข้อดีของการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากประโยชน์ในการใช้วิเคราะห์รูปร่าง หรือ โครงสร้างที่ซับซ้อนได้แล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนได้ เช่น Vibration, nonlinear, Heat transfer เป็นต้น และยังวิเคราะห์ปัญหาที่มีคุณสมบัติแบบ non-isotropic อีกทั้งยังเป็นการประหยัดต้นทุน ในการประกอบวัสดุที่ขึ้นรูปมา เพื่อจำลองสถานการณ์ในการเสียหาย หรือ สถานการณ์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของวัสดุ ข้อเสียของการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การใช้งานไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเกิด error ขึ้นเสมอ ความชำนาญในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็ จัดเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องคำนึง นอกจากนี้การผิดพลาดจากการสร้างโมเดล ก็จะเป็นข้อเสียด้วย

การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการจำลอง และคำนวณ ขึ้นมา โปรแกรมในการใช้คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีอยู่หลายโปรแกรม เช่น Solidwork Simulation, Ansys, Marc, Abaqus เป็นต้น

### 2.7.1 ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะแบ่งขั้นตอนใหญ่ๆออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. ขั้นตอนเตรียมการจำลอง (Pre-processing, Modeling)

เป็นขั้นตอนในการเตรียมรูปร่าง (Model) เพื่อใช้ในการจำลอง นอกจากนี้ จะแบ่งโดเมน

ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยจะประกอบด้วยโนด (Node) และทำการสร้างสมการ กำหนดเงื่อนไข (Boundary Condition) อีกทั้งยังกำหนดคุณสมบัติของวัสดุอีกด้วย

2. ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution)

เป็นการแก้คำตอบสมการในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น เป็นการประมวลผลหลังจากการกำหนดค่าในขั้นตอนแรก

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-processing)

จะเป็นขั้นตอนการแสดงผล หรือผลลัพธ์จากการตั้งค่าในขั้นตอนที่ 1

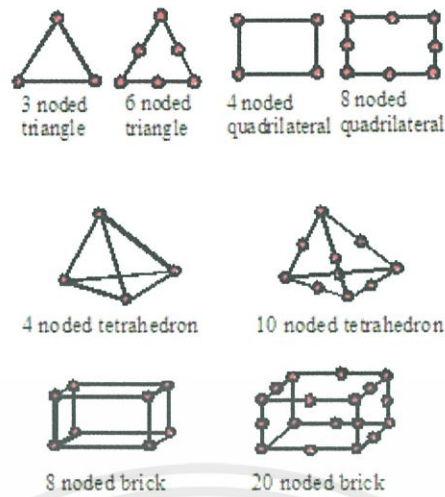


### 2.7.2 ชนิดของเอลิเมนต์

ในการแบ่งเอลิเมนต์ของวัสดุเพื่อทำการคำนวณนั้น จะสามารถแบ่งรูปทรงของโนด (Node) ออกได้หลายแบบ เช่น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม หรือพีระมิด เป็นต้น ชนิดของเอลิเมนต์จะแบ่งคุณสมบัติออกได้สองประเภท

1. แบ่งตามจำนวนโนด (Node) ทุกๆเอลิเมนต์จะกำหนดตัวเลขเป็นจำนวนเต็ม
2. แบ่งตามรูปทรง มีรูปทรงหลายแบบที่จะมาเป็นเอลิเมนต์ ในการจำลองด้วยแบบ 2 มิติ จะมีรูปทรง สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม และในการจำลองด้วยแบบ 3 มิติ จะมีรูปทรงห้าเหลี่ยม หกเหลี่ยม รวมถึงรูปอัฐบลิ๊อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงรูปทรงของโนด (Node) ชนิดต่างๆ [5]



รูปที่ 2.21 แสดงการจำลองทางไฟไนต์กับรูปทรงวัตถุชนิดต่างๆ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดลองเป็นขั้นตอนที่นำชิ้นงานทดสอบมาทดสอบกับเครื่องทดสอบเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM) โดยจะทดลองทั้งหมด 2 แบบ คือ การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) กับ การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

##### 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

เป็นขั้นตอนการสร้าง Honeycomb Sandwich สำหรับการทดสอบกับเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM) โดยจะทดสอบ 2 แบบคือ การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด(Uniaxial Compression Test) กับ การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

###### 3.1.1.1 อุปกรณ์การทำงาน

1. อลูมิเนียม 1100 H-14
2. คัตเตอร์
3. ไม้บรรทัดเหล็กขนาดยาว 1 ฟุต
4. คลิปหนีบกระดาษ
5. กาวอีพ็อกซีติดเหล็ก (อีพ็อกซีสตีล)

###### 3.1.1.2 ชิ้นงานทดสอบสองขนาด

การทำชิ้นงานทดสอบจะต้องทำชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 2 ขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องทดสอบโดยขนาดของชิ้นงานสำหรับการทดสอบทั้งสองประเภทมีดังนี้

- สำหรับ การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) ใช้ขนาด 93×185 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับ การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) ใช้ขนาด 92.5×93 mm

### 3.1.1.3 วิธีการทำขึ้นทดสอบ

1. ตัดแผ่นอลูมิเนียมสำหรับ การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) โดยหนึ่งชั้นมีขนาด 21.4×240 mm สองชั้นมีขนาด 10.5×240 mm สามชั้นมีขนาด 7×240 mm สี่ชั้นมีขนาด 5×240 mm ห้าชั้นมีขนาด 4×240 mm และการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) โดยหนึ่งชั้นมีขนาด 21.4×120 mm สองชั้นมีขนาด 10.5×120 mm สามชั้นมีขนาด 7×120 mm สี่ชั้นมีขนาด 5×120 mm ห้าชั้นมีขนาด 4×120 mm โดยในแต่ละชั้นใช้จำนวน 20 ชิ้น

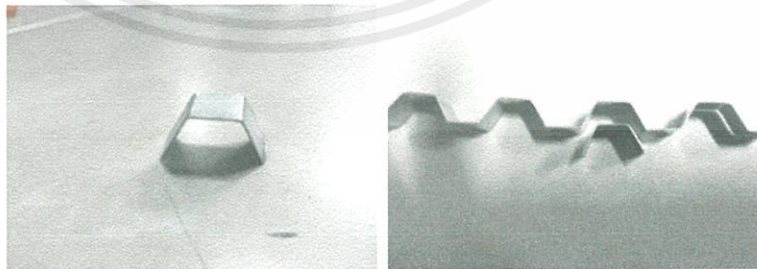
2. ตัดแผ่นอลูมิเนียมให้มีขนาด 93×185 mm สำหรับ การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending test) และ 92.5×93 mm สำหรับการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test)

3. พับอลูมิเนียมให้มีลักษณะเป็นครึ่งทงเหลี่ยม



รูปที่ 3.1 การพับอลูมิเนียมให้มีลักษณะเป็นครึ่งทงเหลี่ยม

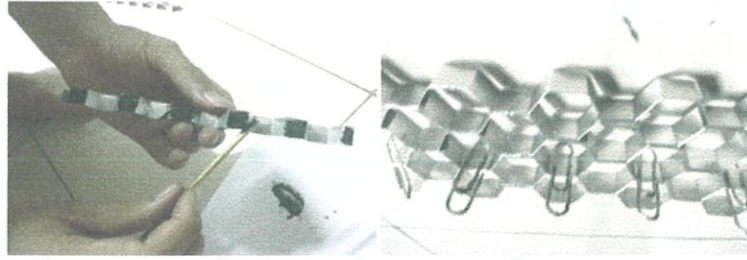
4. แล้วนำมาเข้ารูปด้วยแบบที่เตรียมไว้โดยแบบจะมีลักษณะเป็นครึ่งทงเหลี่ยมมีมุมภายใน 120°



รูปที่ 3.2 แขนครึ่งทงเหลี่ยมเมื่อพับเสร็จ

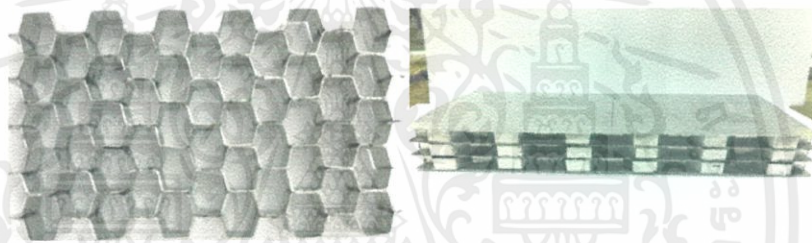
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ประกอบลูมึเนียมที่เข้ารูปเสร็จแล้วเข้าด้วยกันโดยแต่ละชั้นใช้ 20 ชั้นด้วยกาวอีพ็อกซีติดเหล็ก (อีพ็อกซีสตีล) แล้วติดตัวล็อกไว้ให้กาวอยู่ตัว 15 นาที



รูปที่ 3.3 ทาอีพ็อกซีสตีลที่แผ่นที่พับแล้ว จากนั้นนำมาประกอบกัน

6. จากนั้นนำแผ่นอลูมิเนียมมาประกอบกับโครงรังผึ้งที่เตรียมไว้โดยหนึ่งชั้นใช้ 2 แผ่น สองชั้น 3 แผ่น สามชั้น 4 แผ่น สี่ชั้น 5 แผ่น ห้าชั้น 6 แผ่น



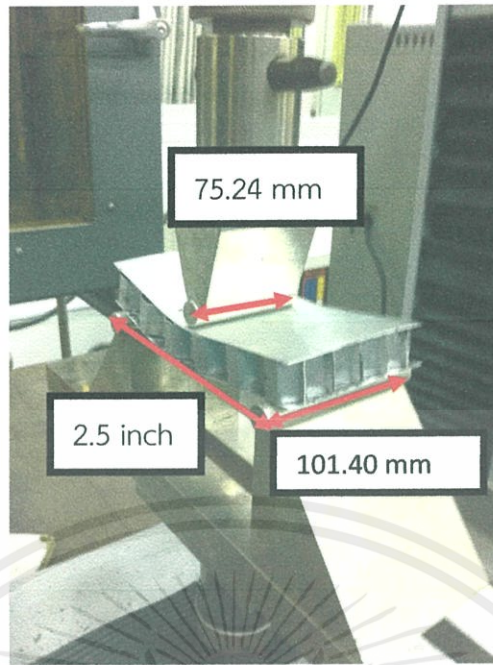
รูปที่ 3.4 แกนที่ประกอบสำเร็จและตัวอย่างวัสดุที่พร้อมทดสอบ

### 3.1.2 การทดสอบ

3.1.2.1 การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) ด้วยการทดสอบเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM) วิธีการทดลองจะมีเงื่อนไขการทดลองคือ Load Cell มีความเร็วหัวกดอยู่ที่ 3 mm/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ขนาดหัวกดของการทดสอบแบบกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

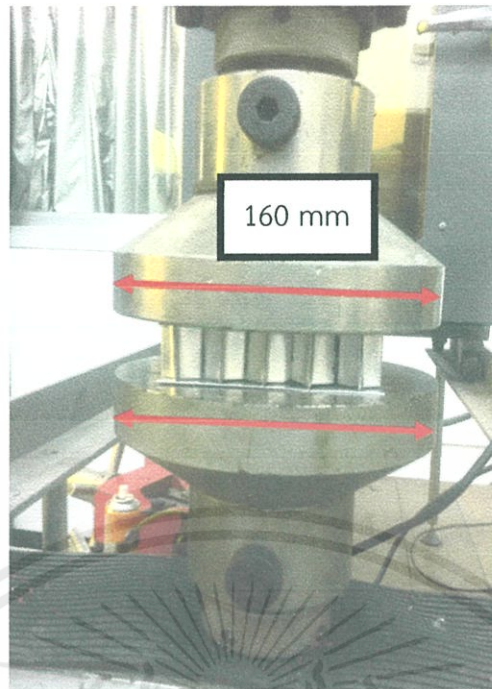
ขนาดหัวกดของการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) จะมีขนาดดังนี้

ขนาดของหัวกดด้านบน	เส้นผ่านศูนย์กลาง = 8mm
	ยาว = 75.24 mm
ขนาดของหัวกดด้านล่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง = 8mm
	ยาว = 101.40 mm

3.1.2.2 การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test)

การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด ถูกตั้งค่าการทดลองด้วยความเร็วของหัวกดอยู่ที่ 3 mm/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ขนาดของหัวกดของการทดสอบแบบแรงกด (Uniaxial Compression Test)

ขนาดของหัวกด ของการทดสอบความแข็งแรง ด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) จะมีขนาดดังนี้

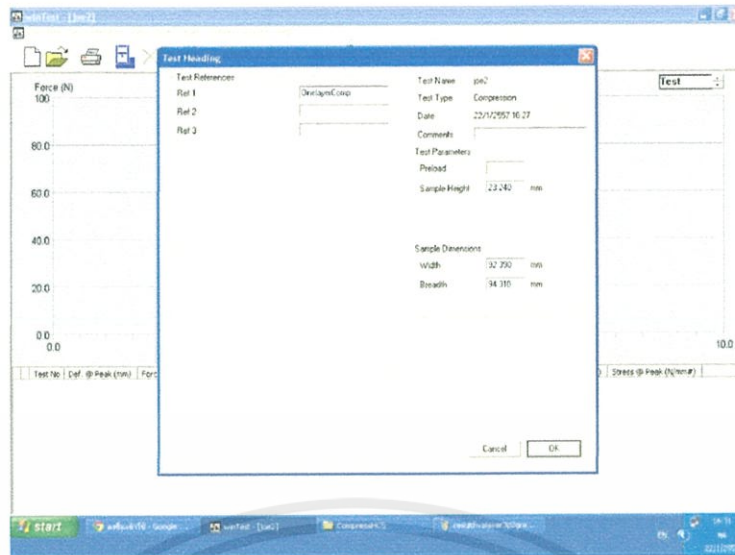
ขนาดของหัวกดด้านบน เส้นผ่านศูนย์กลาง = 160 mm

ขนาดของหัวกดด้านล่าง เส้นผ่านศูนย์กลาง = 160 mm

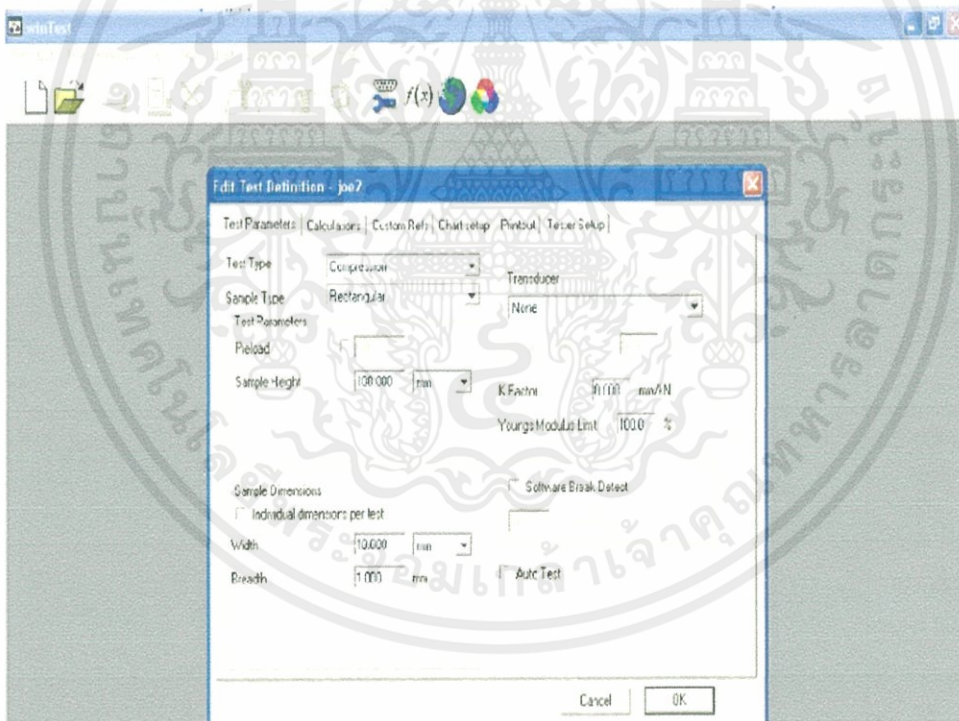
### 3.1.2.3 การตั้งค่าเครื่องเพื่อทดสอบ

ก่อนที่เราจะทำการทดสอบการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) และ การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) จะต้องทำการตั้งค่าเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM) โดยจะตั้งค่าเครื่องของการทดสอบทั้งสองแบบเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

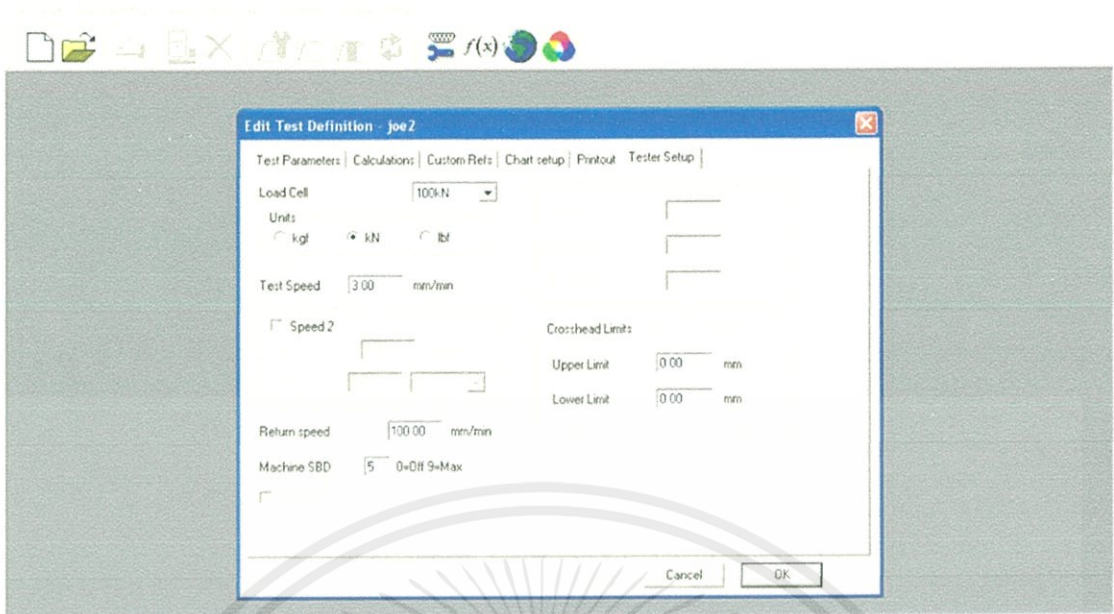


รูปที่ 3.7 แสดงการตั้งค่าเบื้องต้น ชื่อชิ้นงาน ความกว้าง ความยาว ความหนา



รูปที่ 3.8 แสดงการตั้งค่าประเภทชิ้นงาน (Sample Type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการตั้งค่า Load Cell หน่วย (Unit) ความเร็วในการกดและ Return speed

### 3.2 ขั้นตอนการทดสอบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.2.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

สามารถวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ของขอบเขตปัญหาไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเอลิเมนต์
3. สภาวะเงื่อนไขขอบเขต
4. กำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการ เช่น แรง

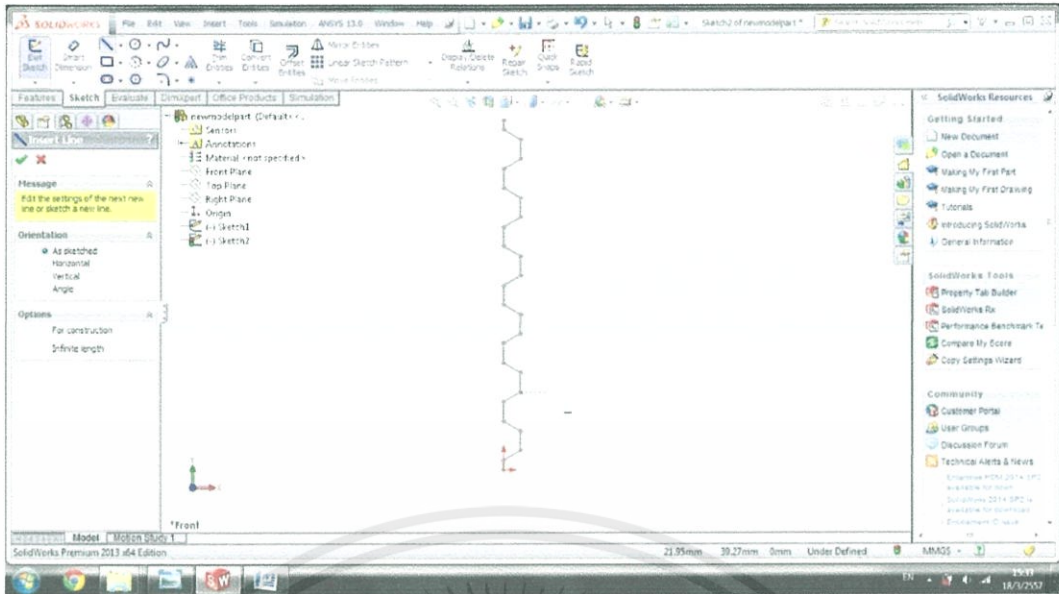
#### 3.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์ (Solidworks)

ซึ่งมีตัวอย่างการใช้งานดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Solidwork ใช้คำสั่ง Line วาดรูปครึ่งหกเหลี่ยมที่มีความกว้าง

0.35 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



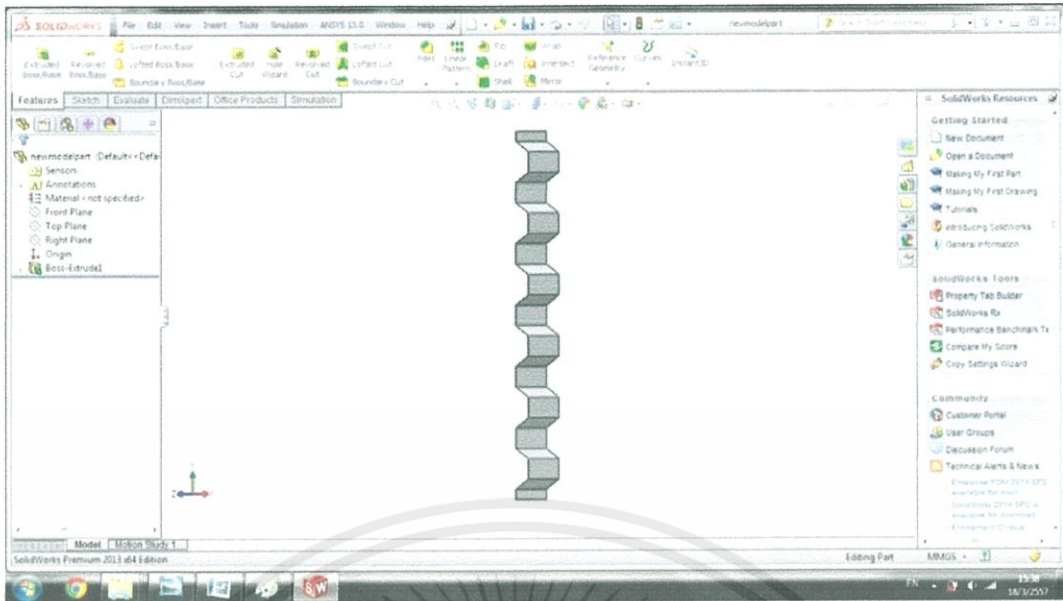
รูปที่ 3.10 การวาดรูปครึ่งหกเหลี่ยมสองมิติ

2. ใช้คำสั่ง Extrude เพื่อยืดชิ้นงานแต่ละโมเดล จากนั้นทำการบันทึกไฟล์แต่ละชิ้นส่วนไว้

ตารางที่ 3.1 ความสูงของชิ้นงานแต่ละชั้น

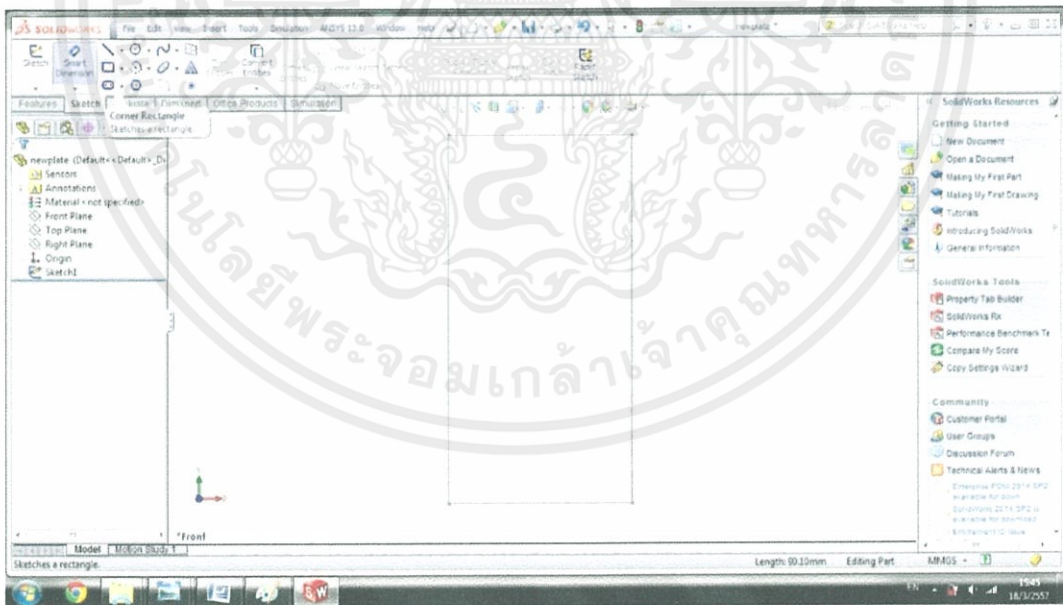
ชิ้นงาน รูปร่าง	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
ความสูง ในการยืด	21.4 มิลลิเมตร	10.575 มิลลิเมตร	6.9 มิลลิเมตร	5.0875 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ภาพตัวอย่างของการยืดชิ้นงาน 1 ชั้น

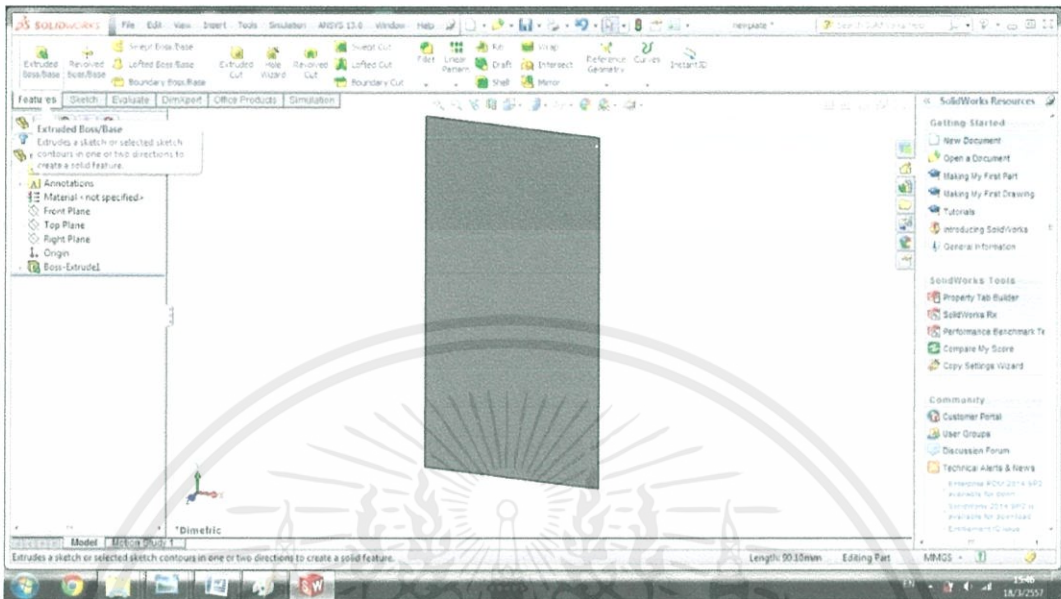
3. ใช้คำสั่ง Line เพื่อวาดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วใช้คำสั่ง Smart Dimension เพื่อกำหนดความกว้าง 88.4 มิลลิเมตร และความยาว 183.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.12 การวาดแผ่นผิวของโครงสร้างรังผึ้ง

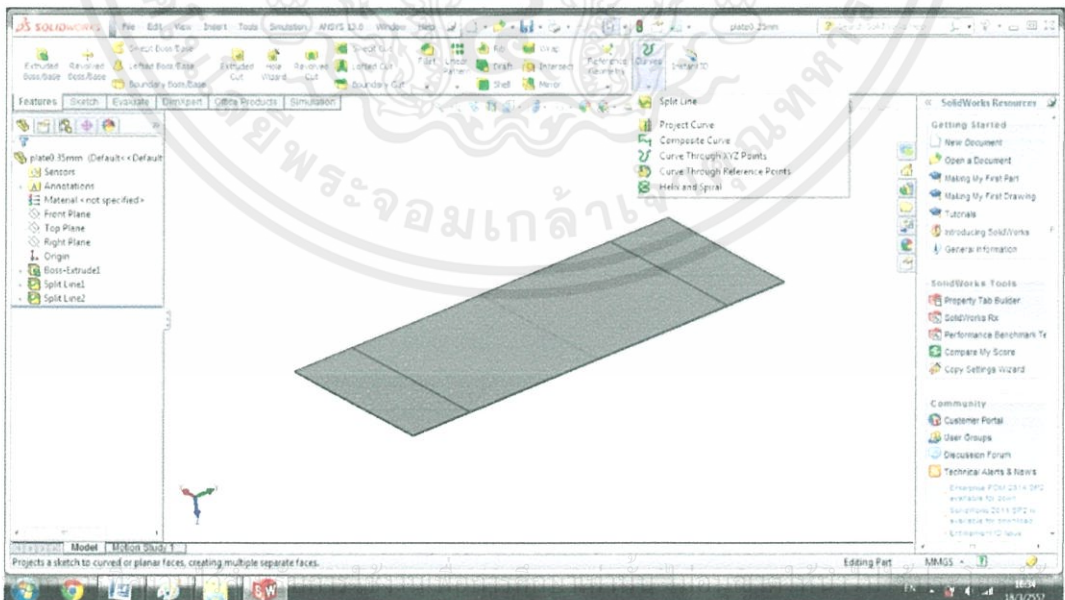
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ใช้คำสั่ง Extrude เพื่อยึดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 0.35 มิลลิเมตร



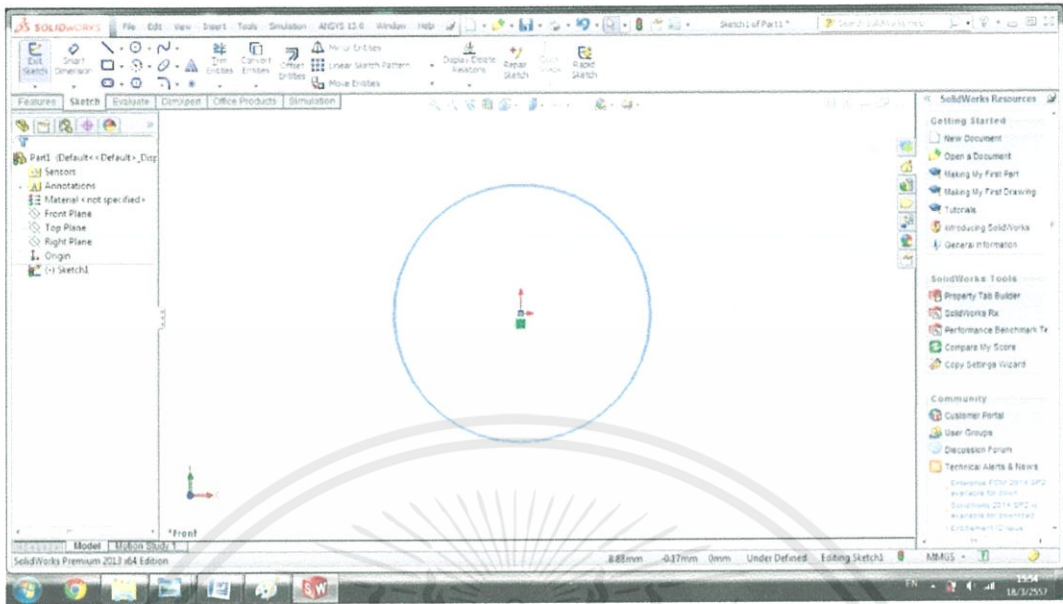
รูปที่ 3.13 ภาพแผ่นผิวของโครงสร้างรังผึ้ง

5. สร้างเส้นจุดอ้างอิงตรงกลางของแผ่นผิว และสร้างเส้นจุดอ้างอิงห่างจากกึ่งกลางด้านละ 63.5 มิลลิเมตร ที่อีกด้านของแผ่นผิวแล้วใช้คำสั่ง Split Line เพื่อทำเส้นจุดอ้างอิง และทำการบันทึกชิ้นส่วนไว้



รูปที่ 3.14 การใช้คำสั่ง Split Line เพื่อสร้างเส้นจุดอ้างอิง

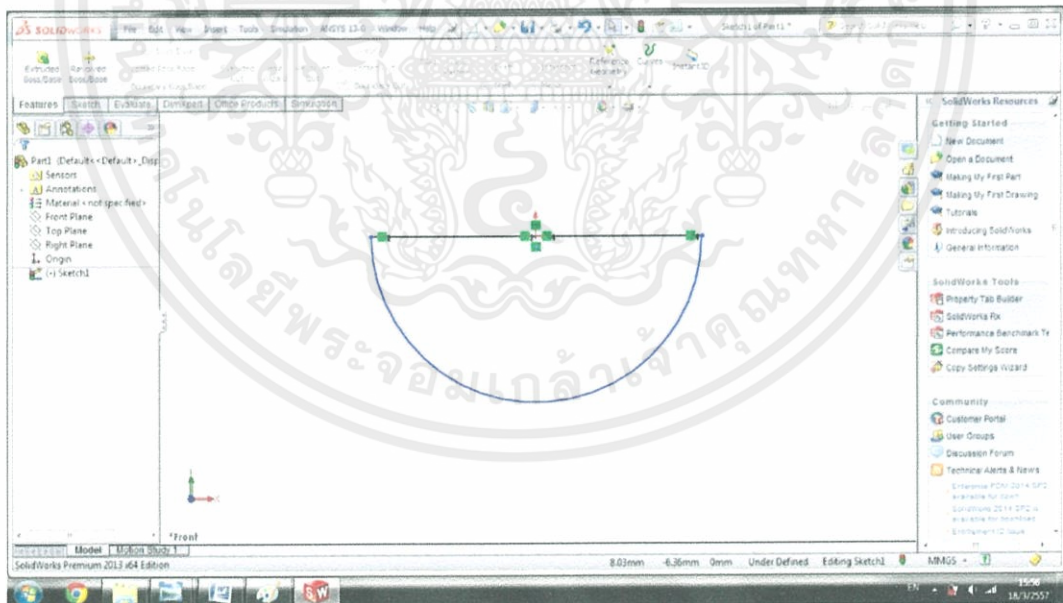
## 6. ใช้คำสั่ง Circle เพื่อวาดวงกลมรัศมี 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 การใช้คำสั่ง Circle

## 7. ใช้คำสั่ง Line ลากเส้นตัดศูนย์กลางวงกลม แล้วใช้คำสั่ง Trim ตัดส่วนโค้งด้านบนออก

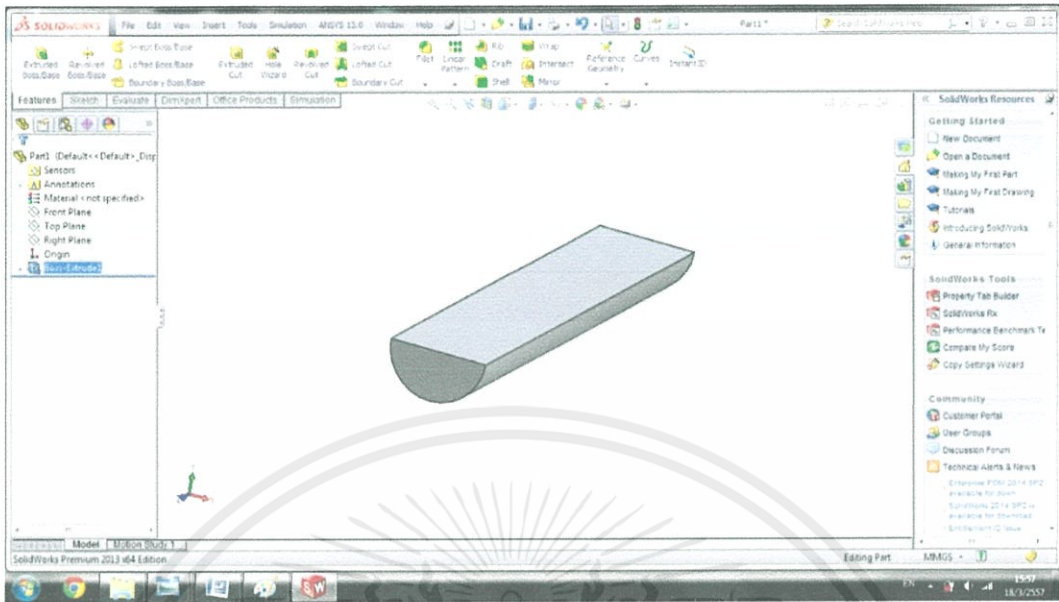
ออก



รูปที่ 3.16 ภาพการคำสั่ง Trim ตัดส่วนโค้งด้านบนออก

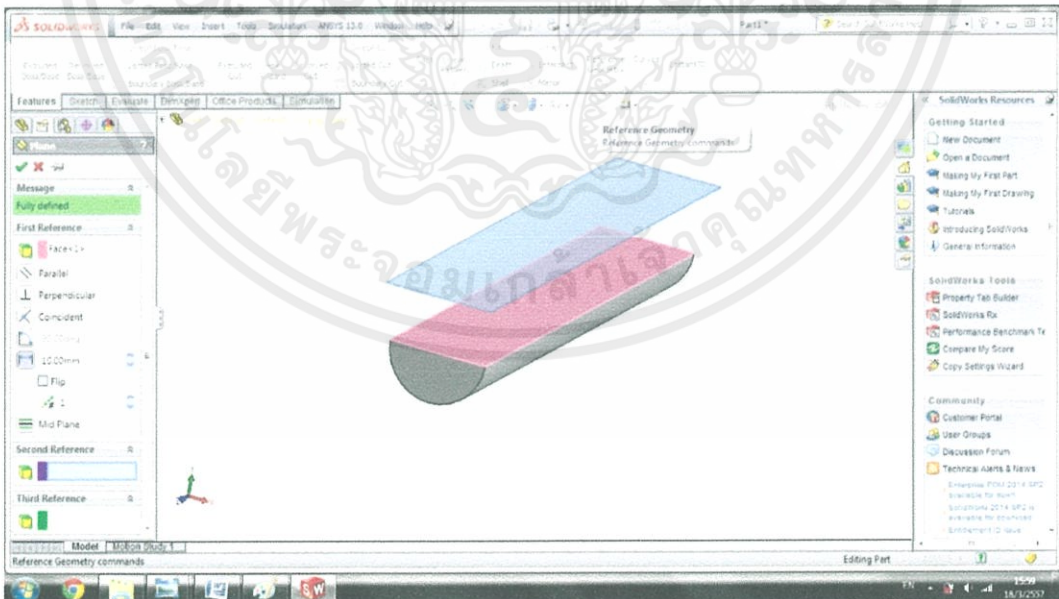
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ใช้คำสั่ง Extrude เพื่อยึดครึ่งวงกลมโดยมีความยาว 88.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.17 ภาพการ Extrude ของหัวกด

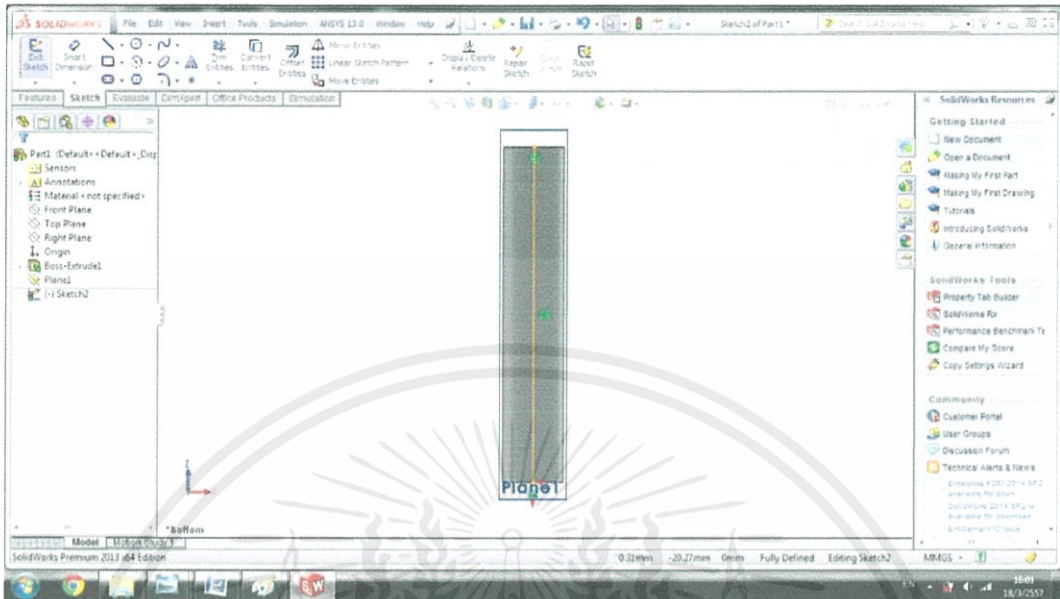
9. ใช้คำสั่งย้ายระนาบแล้วเลือกระนาบผิวด้านบนของรูปทรง แล้วทำการย้ายระนาบลงมาด้านล่าง 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.18 การย้ายระนาบ

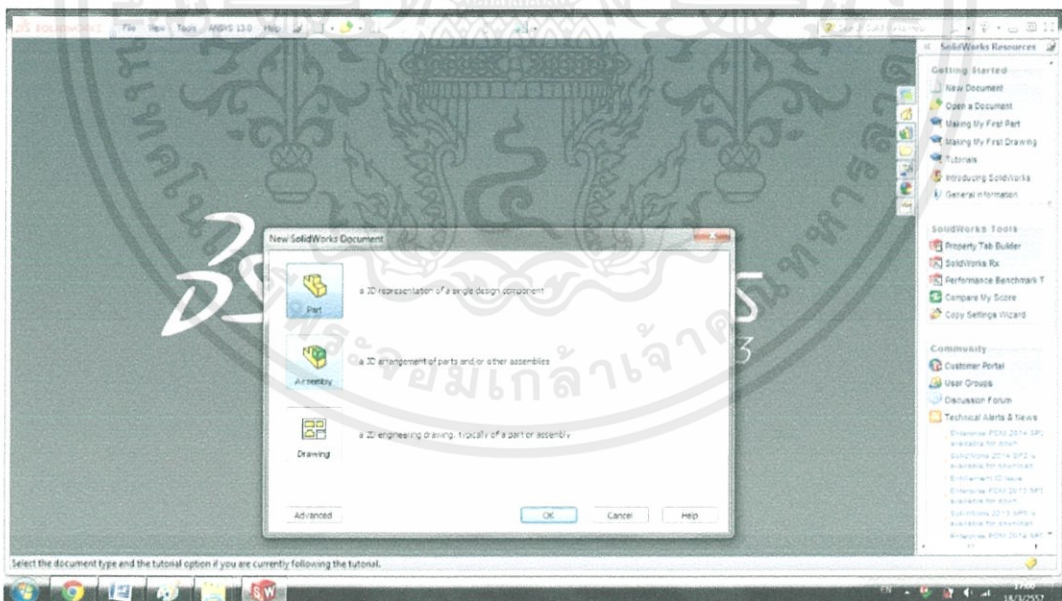
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ใช้คำสั่ง Line ลากเส้นจากจุดศูนย์กลางผ่านท่อไปอีกด้าน แล้วใช้คำสั่ง Split Line เพื่อสร้างเส้นจุดอ้างอิง จากนั้นทำการบันทึกชิ้นส่วน



รูปที่ 3.19 การสร้างเส้นจุดอ้างอิงของหัวกด

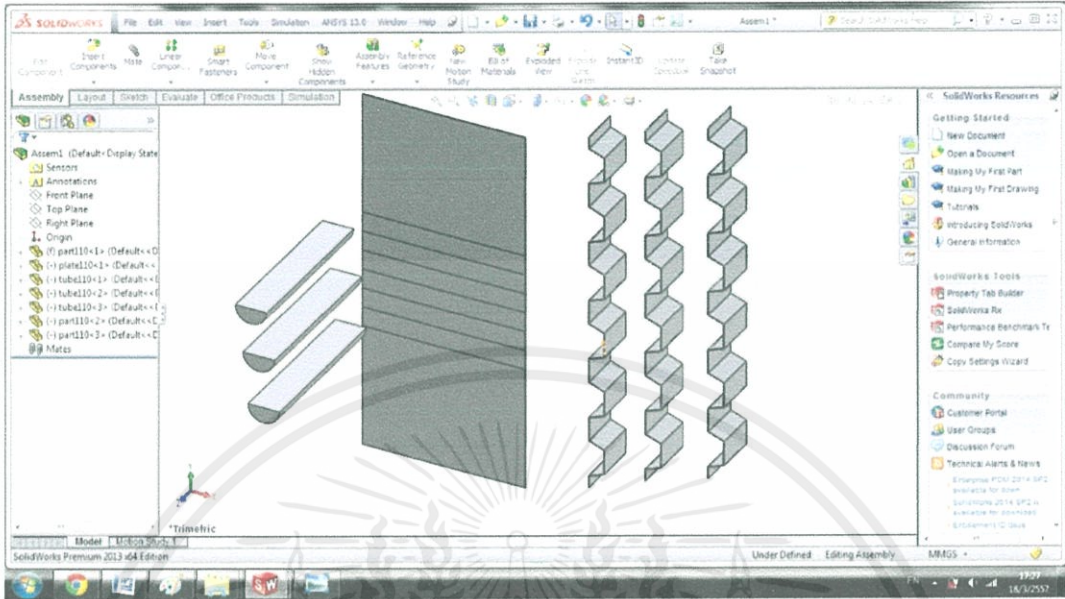
11. การประกอบชิ้นส่วนเลือกการประกอบชิ้นส่วนจากโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์



รูปที่ 3.20 หน้าต่างการประกอบชิ้นส่วนของโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์

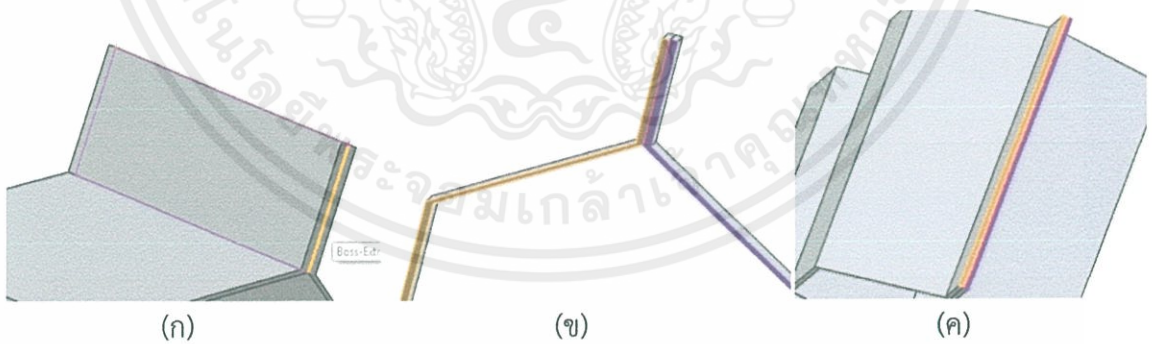
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ใช้คำสั่งแทรกชิ้นงานทั้งสามชิ้นส่วนเข้ามา จากนั้นกดปุ่มคอนโทรลค้างแล้วคลิกลากเพื่อคัดลอกชิ้นงาน



รูปที่ 3.21 การแทรกชิ้นงานทั้งสามส่วน

13. ประกอบส่วนแกนโดยใช้คำสั่ง Mate ที่ผิวหน้า ผิวระนาบข้าง และระนาบบน

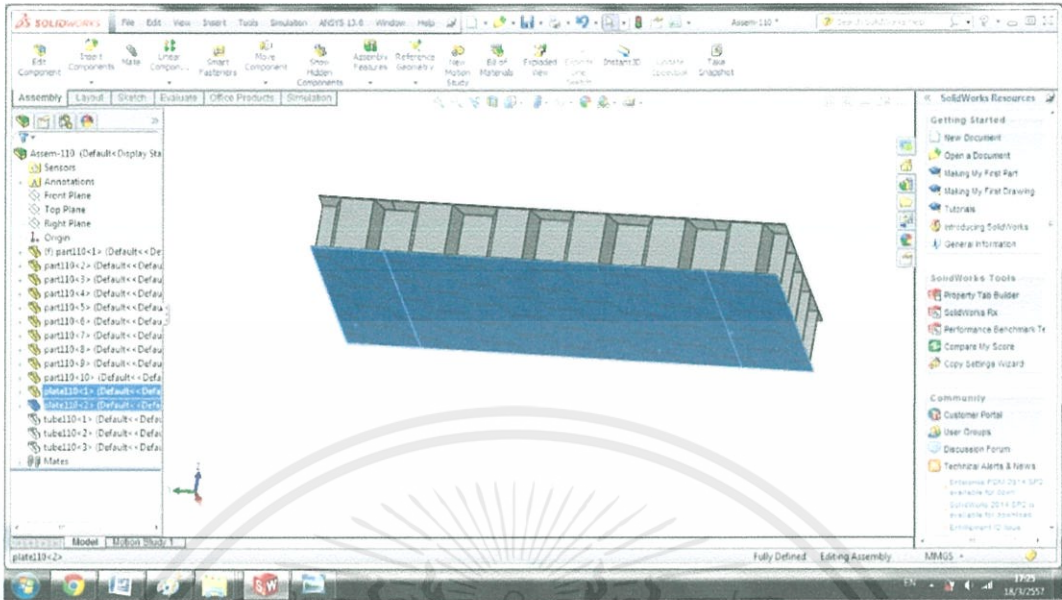


รูปที่ 3.22 (ก) การ Mate ที่ผิวหน้า

รูปที่ 3.22 (ข) การ Mate ที่ผิวระนาบข้าง

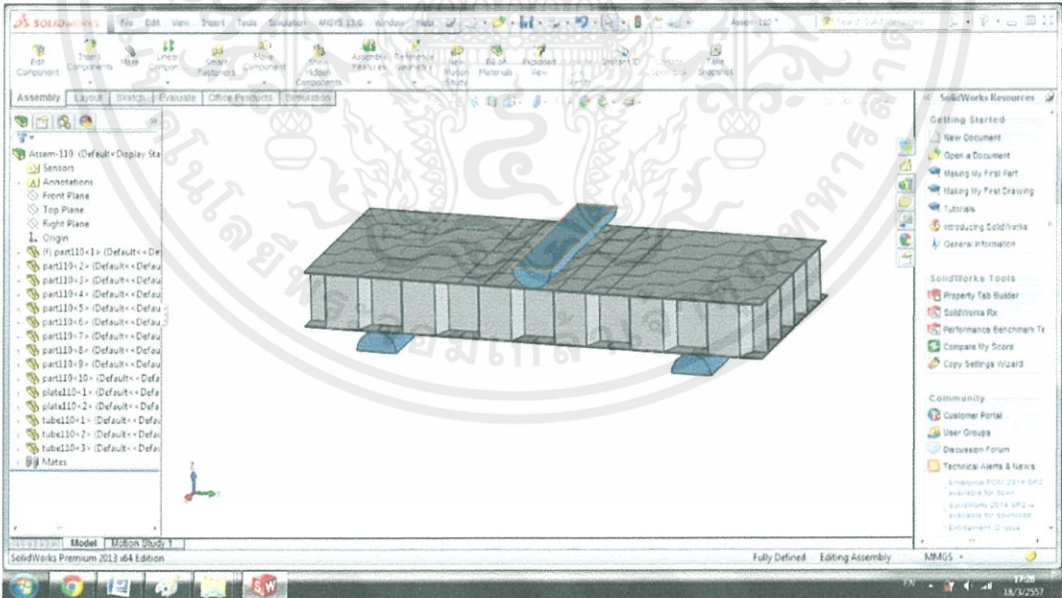
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.22 (ค) การ Mate ที่ผิวระนาบบนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 14. ใช้คำสั่ง Mate ส่วนแผ่นผิวติดกับส่วนแกนที่ผิวหน้า ผิวข้าง และผิวบน



รูปที่ 3.23 การ Mate ชิ้นงานรวมกัน

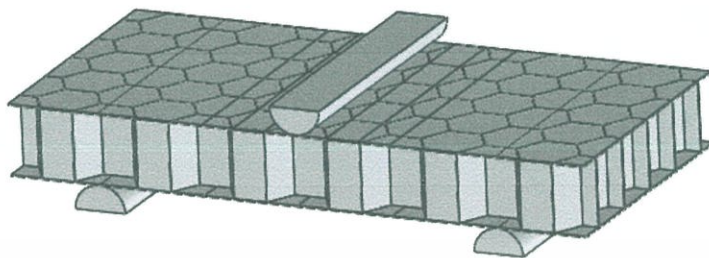
#### 15. ใช้คำสั่ง Mate ส่วนของหัวกดติดกับแผ่นผิว โดยที่เส้นจุดอ้างอิง และผิวข้าง



รูปที่ 3.24 การ Mate ส่วนหัวกดกับแผ่นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

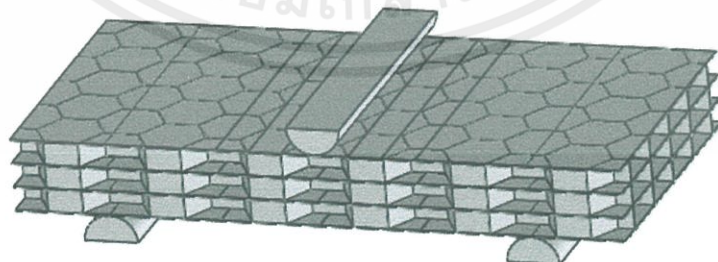
16. เมื่อประกอบชิ้นงานทั้ง 5 โมเดล จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.16ก ถึง 3.16จ



รูปที่ 3.24ก ภาพชิ้นงานรังผึ้ง 1 ชั้น

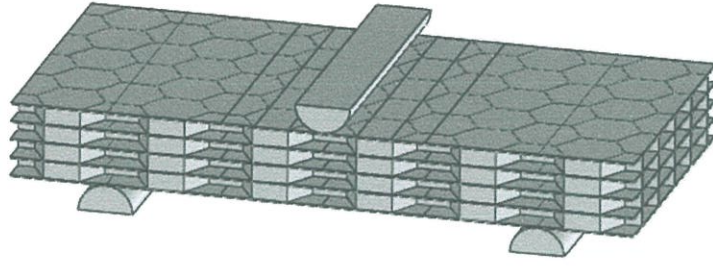


รูปที่ 3.24ข ภาพชิ้นงานรังผึ้ง 2 ชั้น

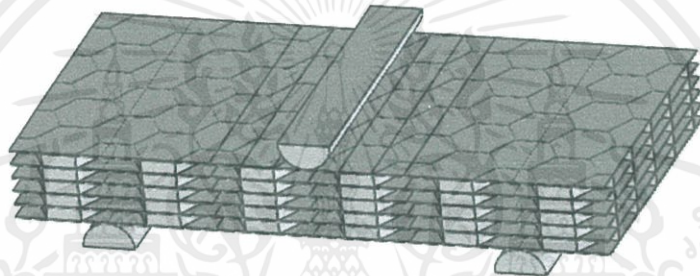


รูปที่ 3.24ค ภาพชิ้นงานรังผึ้ง 3 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานอกระบบ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24ง ภาพชิ้นงานรังผึ้ง 4 ชั้น

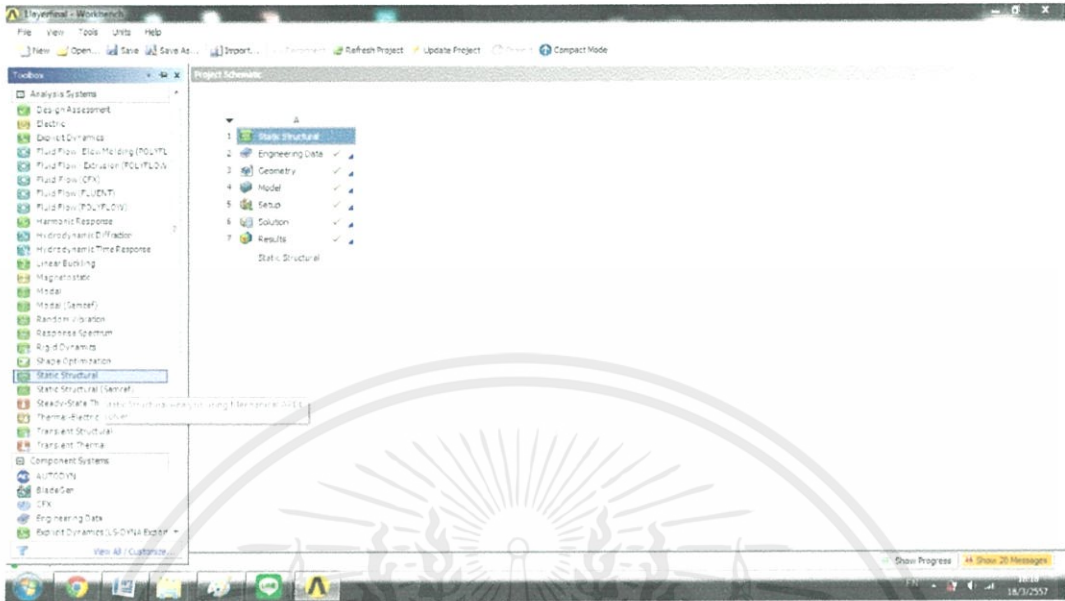


รูปที่ 3.24จ ภาพชิ้นงานรังผึ้ง 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

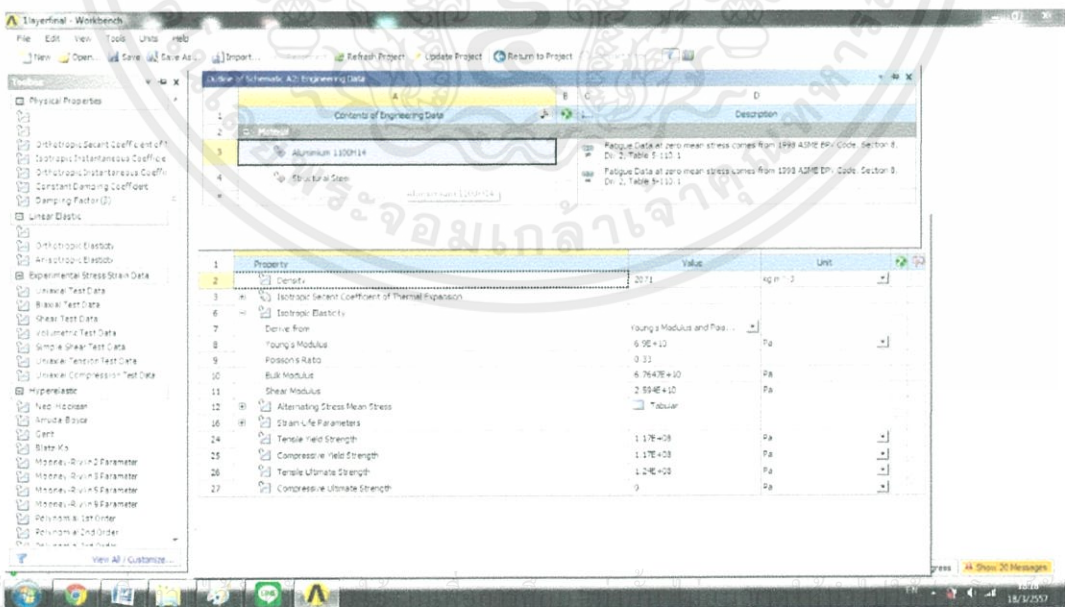
### 3.2.3 ขั้นตอนการจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรม Ansys

#### 1. เปิดโปรแกรม Ansys เลือกประเภทการวิเคราะห์เป็น Static Structural



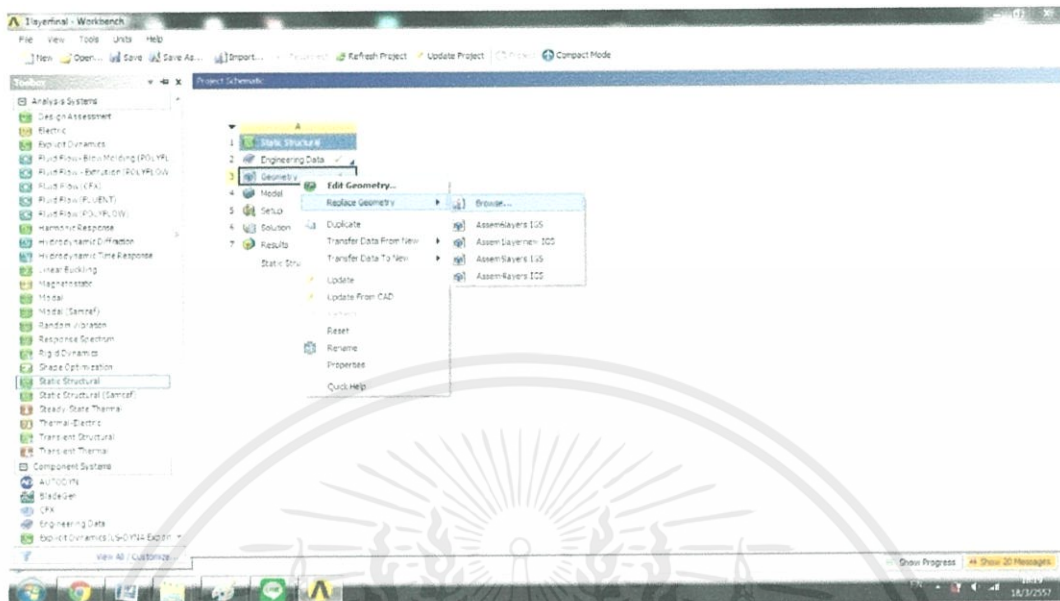
รูปที่ 3.25 หน้าต่างโปรแกรม Ansys

#### 2. เลือกคำสั่ง Engineering Data ใส่สมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม 1100-H14 สำหรับชิ้นงาน และ สมบัติเชิงกลของเหล็กสำหรับหัวกด



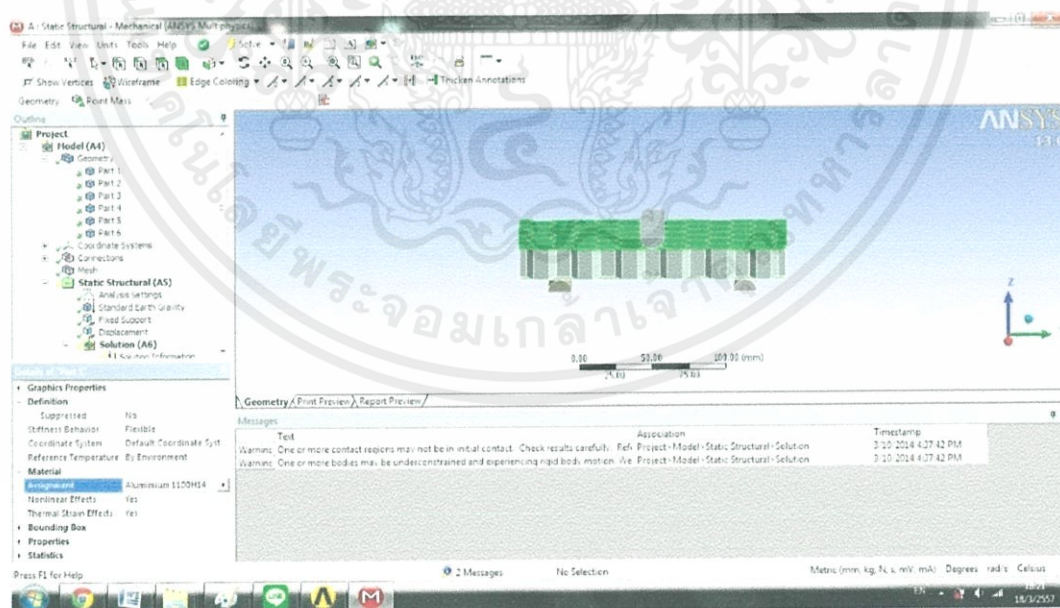
รูปที่ 3.26 การใส่ค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุ

3. คลิกขวาที่ Geometry เลือก Replace Geometry และ Browse ตามลำดับ จากนั้นเลือกชิ้นงานที่เตรียมในหัวข้อ 3.2.2



รูปที่ 3.27 การนำชิ้นงานลงใน Ansys

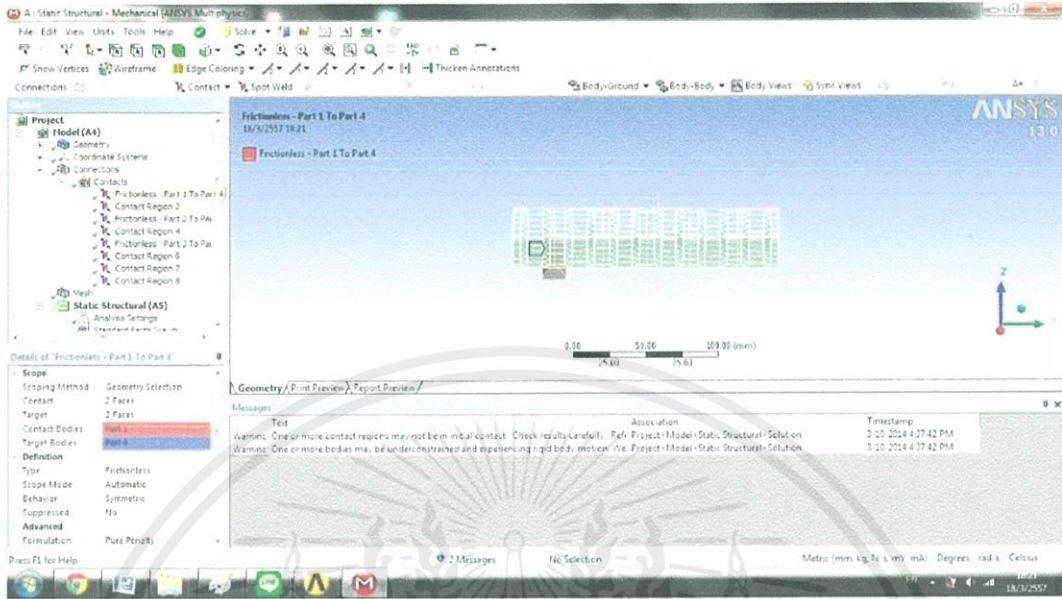
4. เลือกคำสั่ง Model จะได้นหน้าต่าง Mechanical Ansys เลือก Geometry จากหน้าจอ Outline จากนั้นเปลี่ยนวัสดุของชิ้นงานเป็นอลูมิเนียม 1100-H14 กับหัดกดเป็นเหล็ก



รูปที่ 3.28 การเปลี่ยนวัสดุในของชิ้นงาน

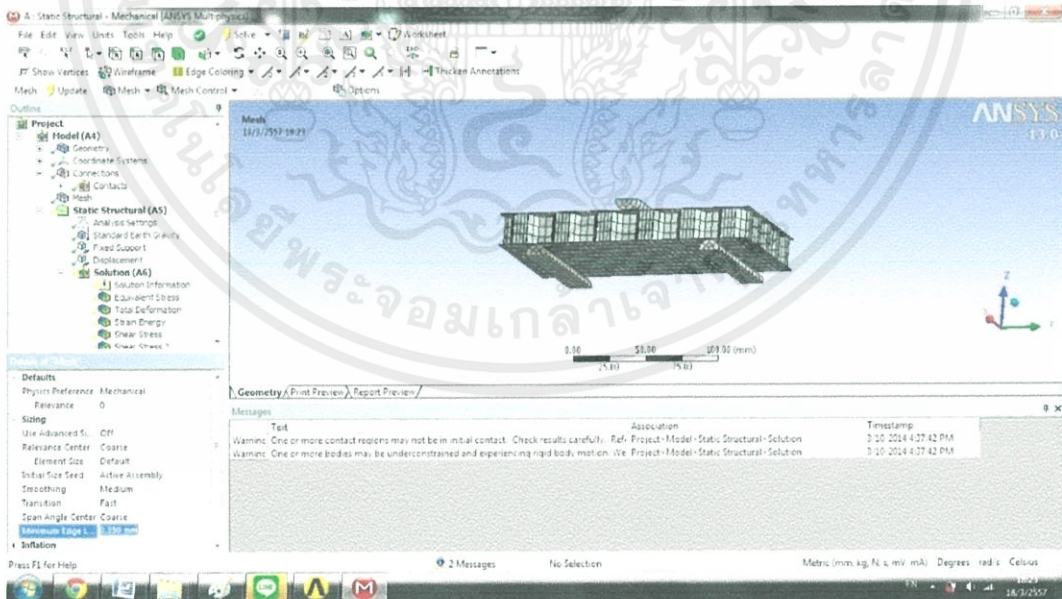
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เชิงนามธรรมเพื่อการศึกษาค้นคว้า มิใช่ผูกขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เลือกคำสั่ง Connection เพื่อกำหนดการยึดติดระหว่างหัวกดกับชิ้นงานให้เป็นแบบ Friction Less



รูปที่ 3.29 การเลือกการยึดติดระหว่างหัวกดกับชิ้นงาน

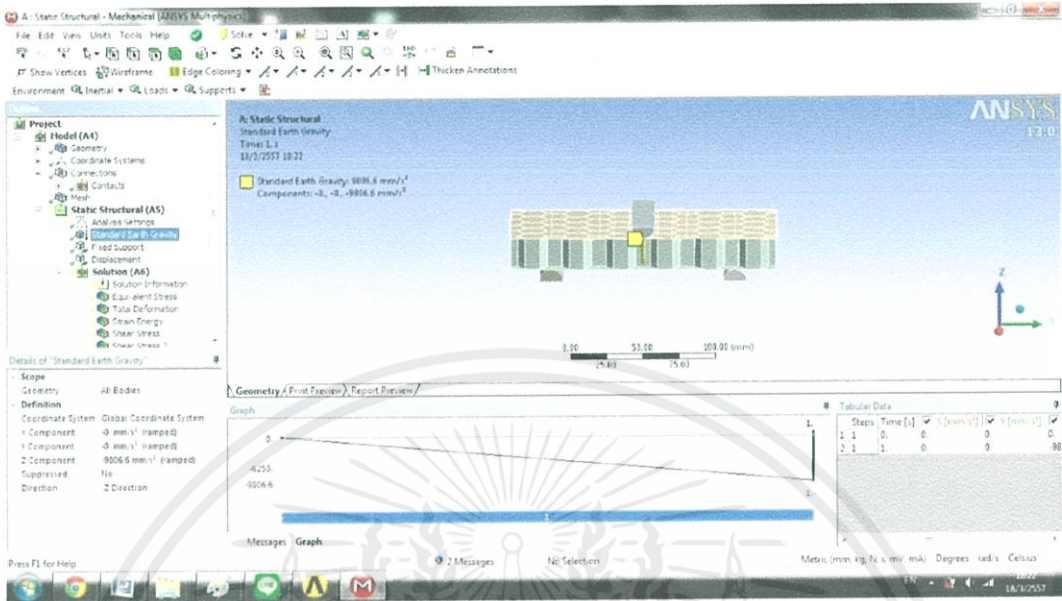
6. สร้าง Mesh ขนาด 0.35 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.30 การสร้าง Mesh

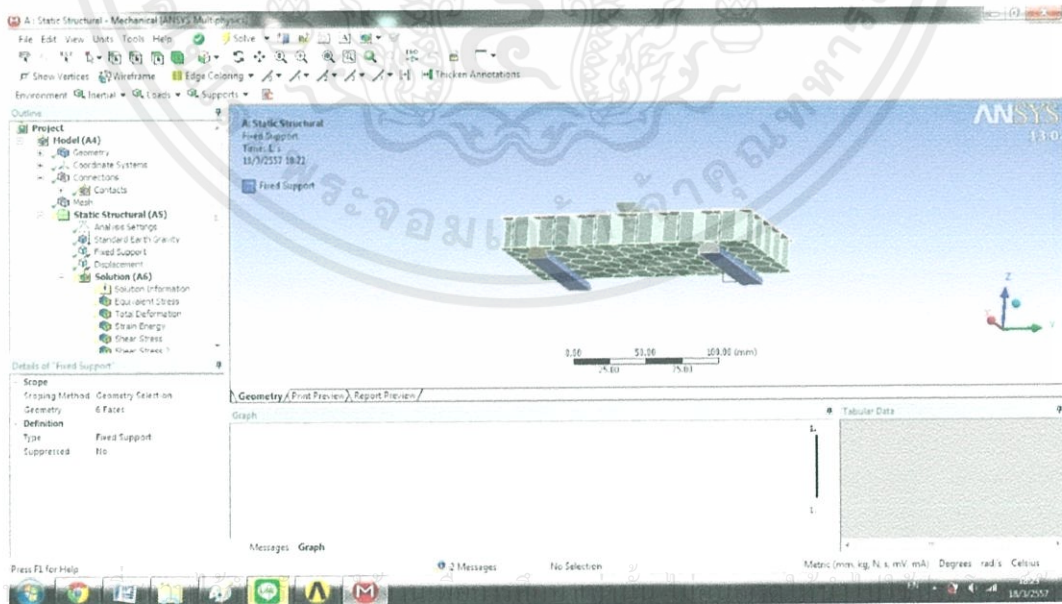
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. เลือกคำสั่ง Static Structural เพื่อใส่ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (Standard Earth Gravity)



รูปที่ 3.31 การใส่ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก

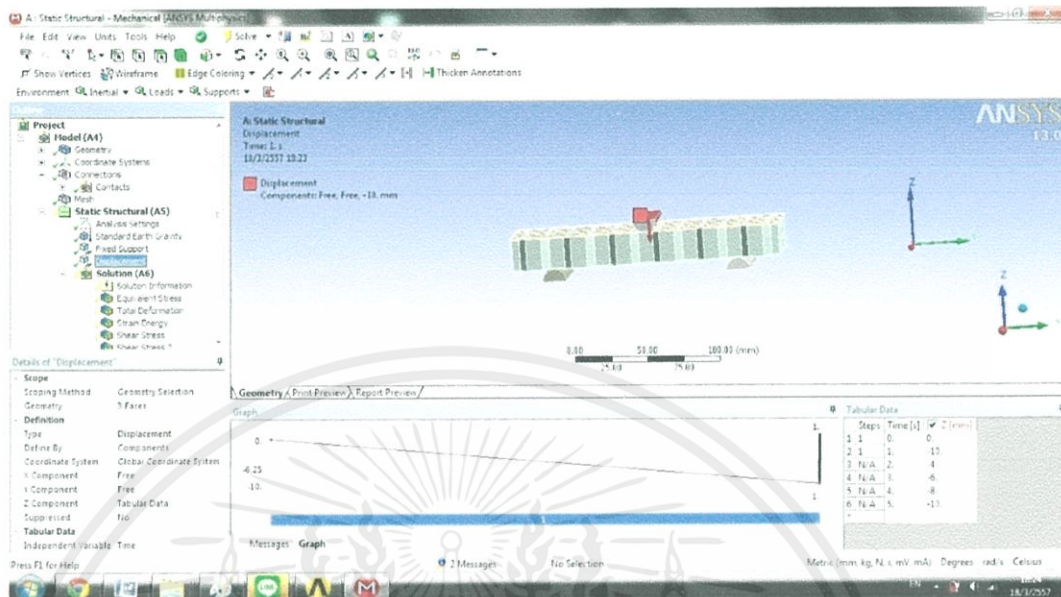
## 8. เลือกคำสั่ง Static Structural เพื่อกำหนด Fixed Support ที่หัวกดด้านล่าง 2 อัน ไม่ให้เคลื่อนที่



รูปที่ 3.32 การ Fixed Support หัวกดด้านล่าง

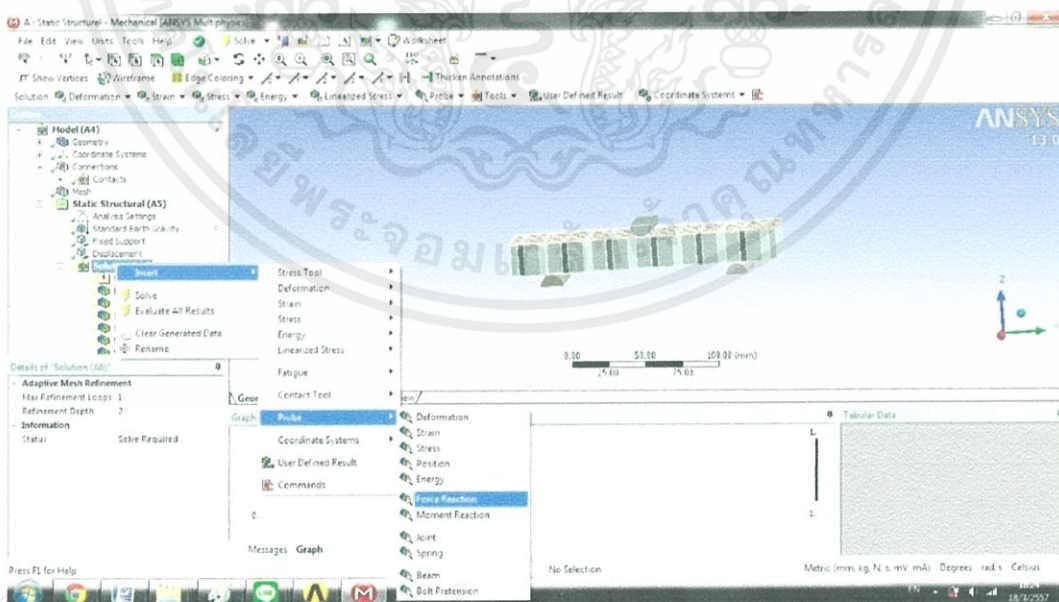
## 9. เลือกคำสั่ง Static Structural เพื่อกำหนด Displacement ที่หัวกดด้านบนกดลง

10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.33 การกำหนดให้หัวกดตกลง 10 มิลลิเมตร

10. คลิกขวาที่ Solution จากนั้นเลือก Insert, Probe, Reaction Force ตามลำดับ เพื่อเลือกค่าตัวแปรที่ต้องการทราบจากการทดลอง แล้วคลิกขวา Solution เลือก Solve เพื่อเริ่มการจำลองการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.34 การเลือกตัวแปรที่ต้องการทราบจากการทดลองครั้งที่มีกรนำไปใช้

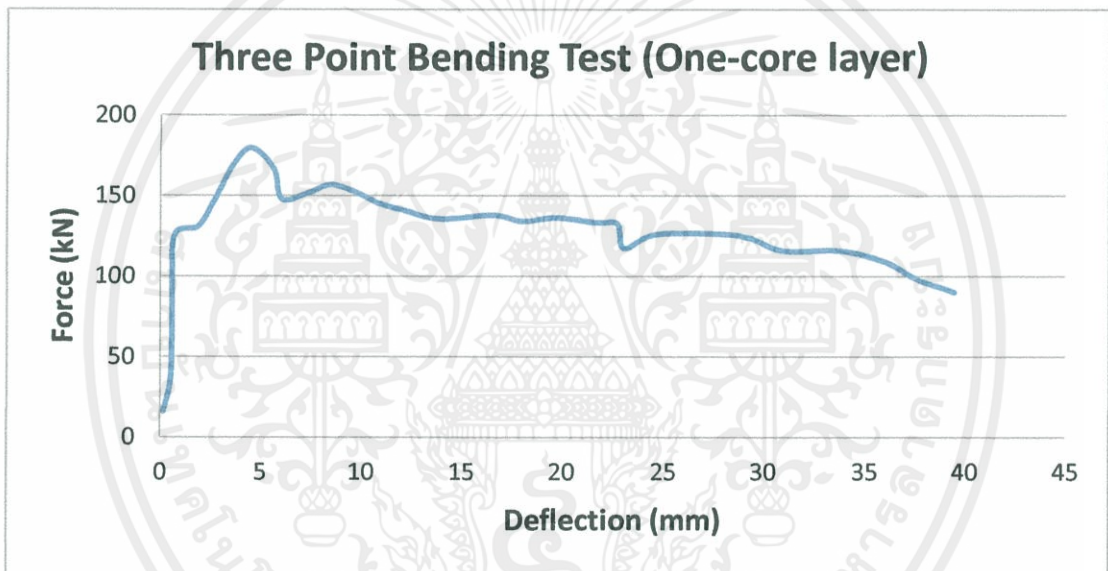
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองจากการทดสอบ

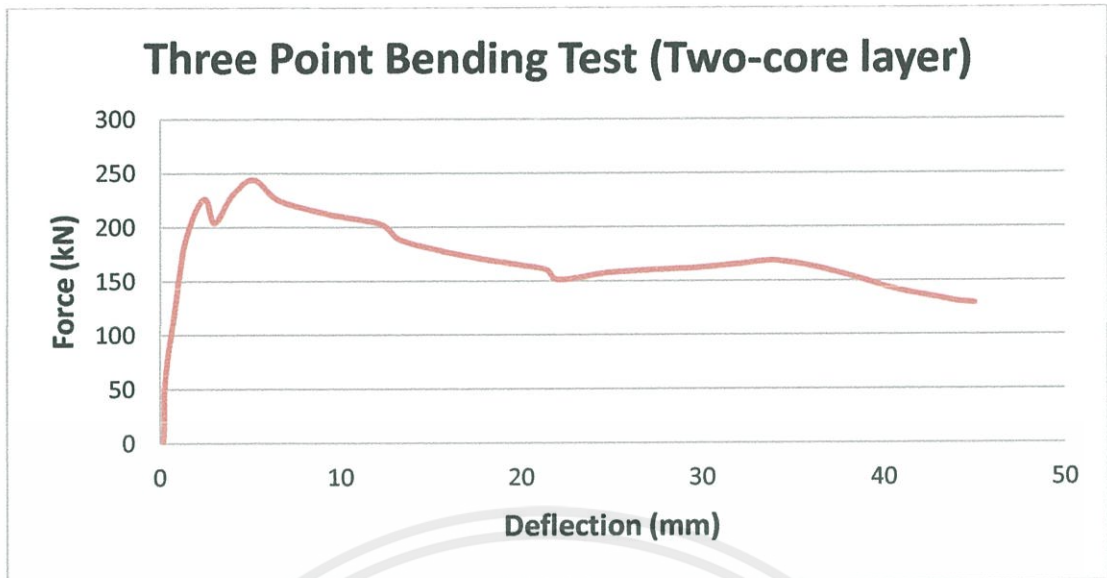
##### 4.1.1 ผลการทดลองจากการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

การทดสอบด้วยการทดลองนี้จะมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ Load Cell มีความเร็วของหัวกด อยู่ที่ 3 mm/min ได้ผลการทดลองดังนี้

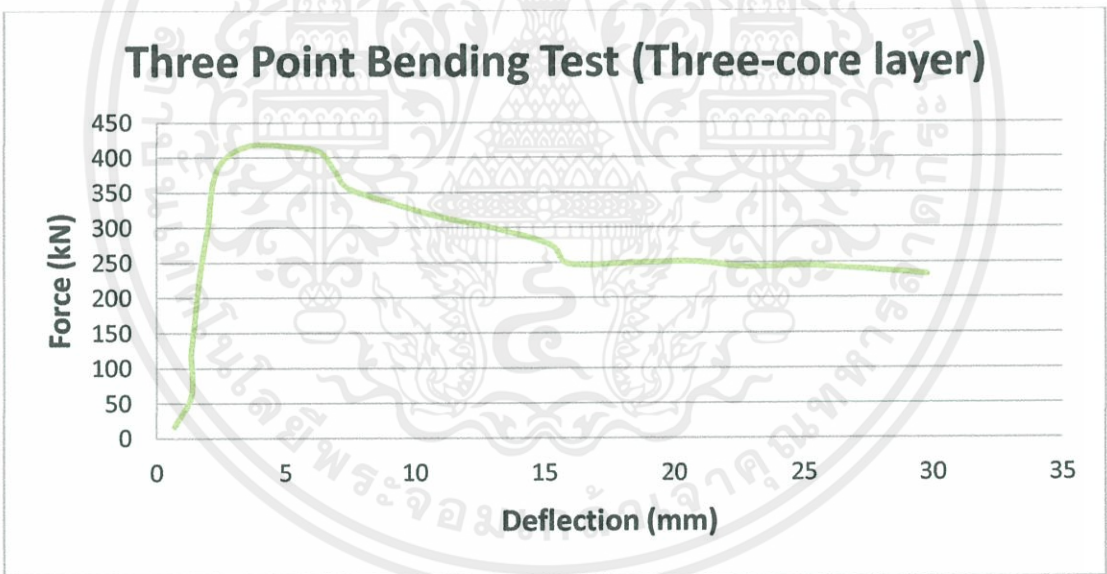


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบ แกน 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

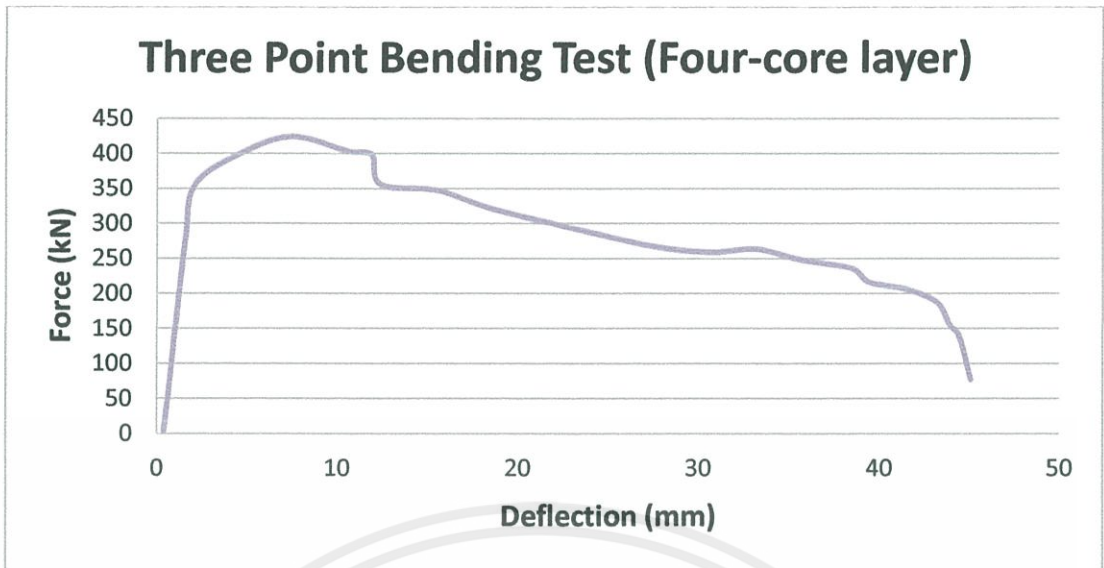


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบ แกน 2 ชั้น

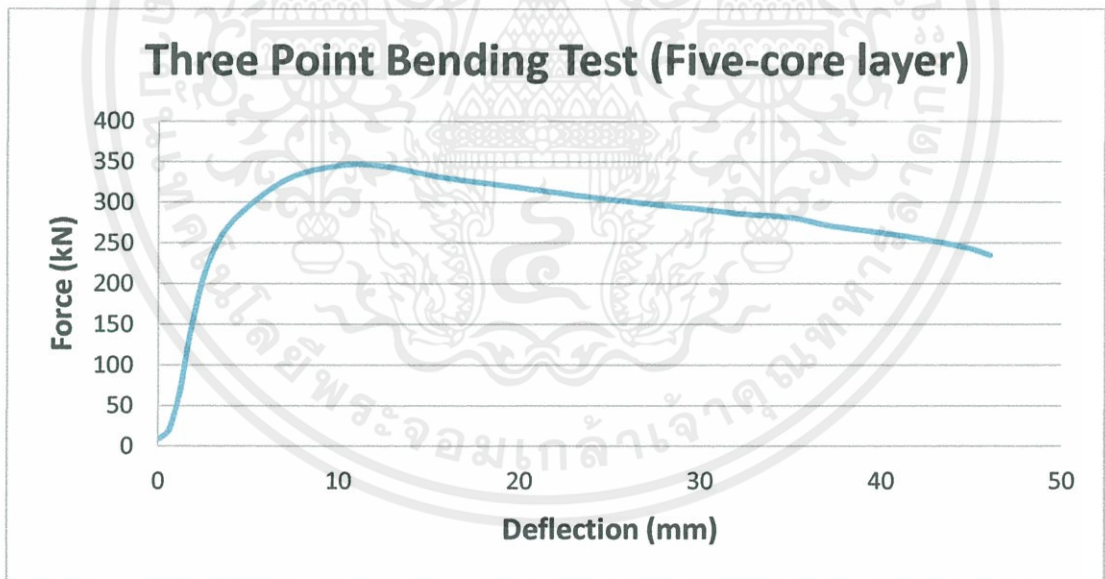


รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบ แบบ แกน 3 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

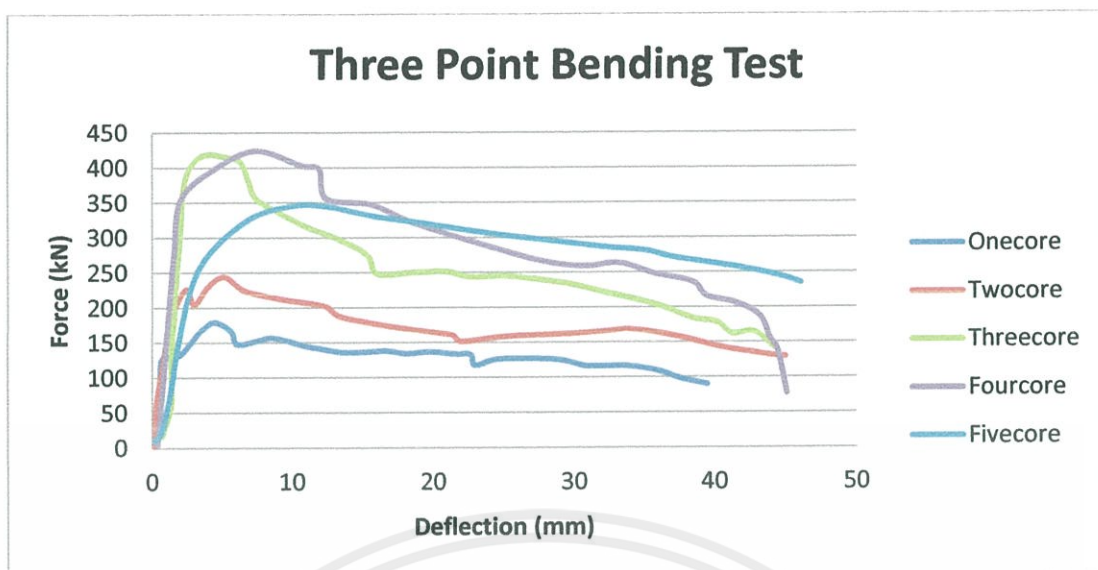


รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบ แกน 4 ชั้น



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบ แกน 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของ การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

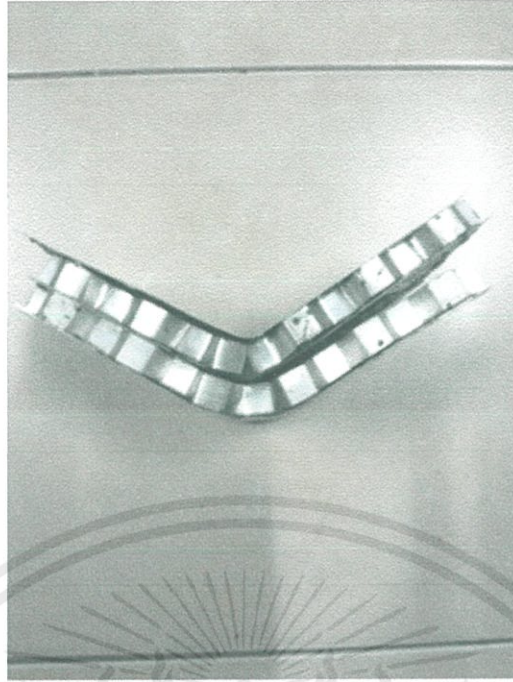
4.1.1.1 ลักษณะของขั้นตอนทดสอบด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test)

การทดสอบด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการกด 3 จุด (Three Point Bending Test) ชิ้นงานจะมีลักษณะถูกกดโดยจะมีลักษณะดังภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงวงเล็บเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงการเสียหายของขั้นตอนทดสอบแบบแกนหนึ่งชั้น

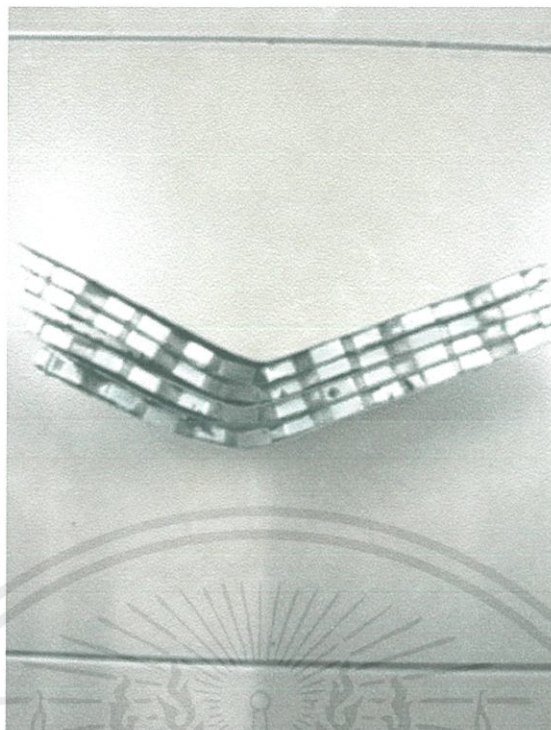


รูปที่ 4.8 แสดงการเสียหายของชั้นทดสอบแบบแกนสองชั้น

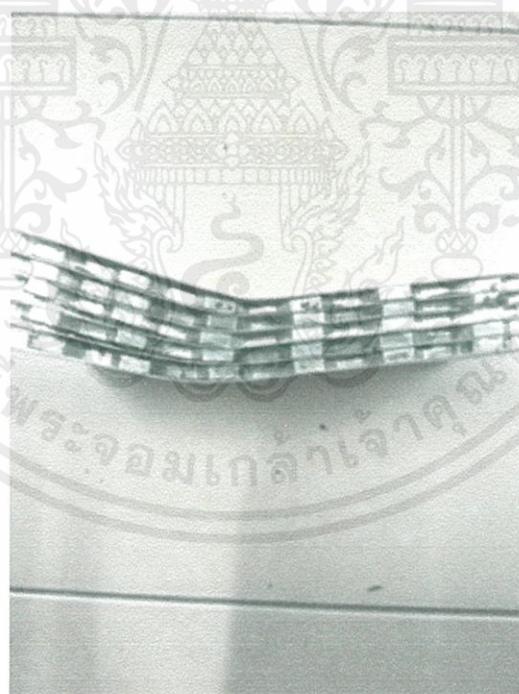


รูปที่ 4.9 แสดงการเสียหายของชั้นทดสอบแบบแกนสามชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการเสียหายของชั้นทดสอบแบบแกนสี่ชั้น

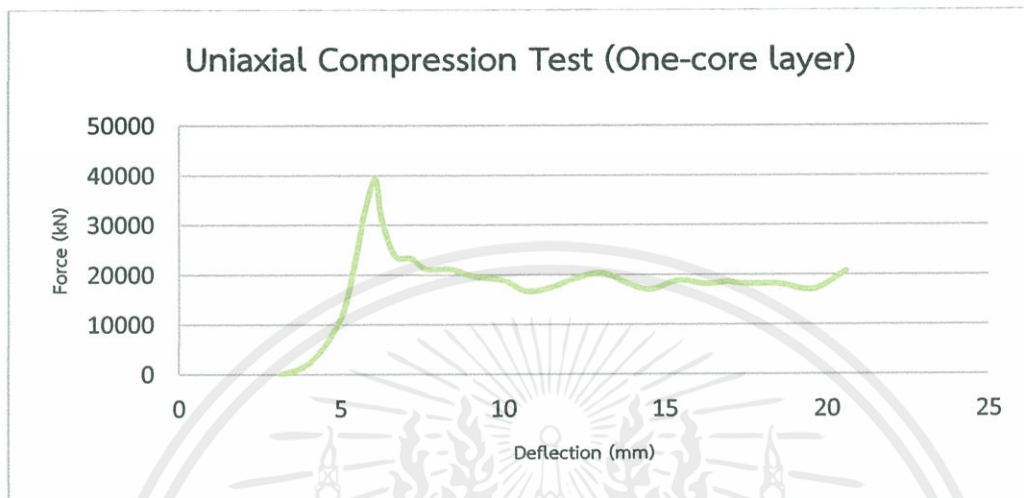


รูปที่ 4.11 แสดงการเสียหายของชั้นทดสอบแบบแกนห้าชั้น

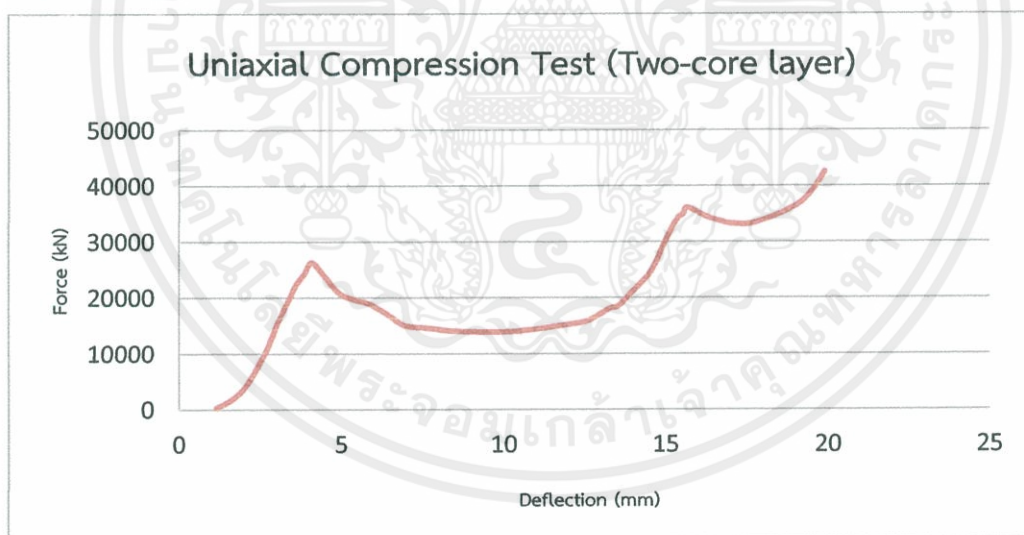
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการทดลองจากการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test)

การทดสอบด้วยการทดลองนี้จะมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ Load Cell มีความเร็วของหัวกด อยู่ที่ 3 mm/min ได้ผลการทดลองดังนี้ (แสดงผลที่ระยะหัวกดเคลื่อนตัวลงมา 20 mm)

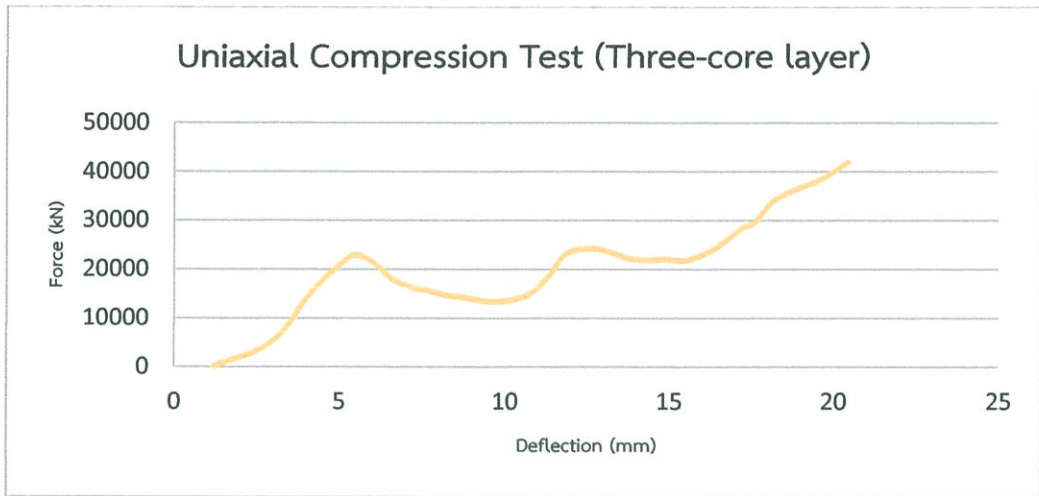


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 1 ชั้น

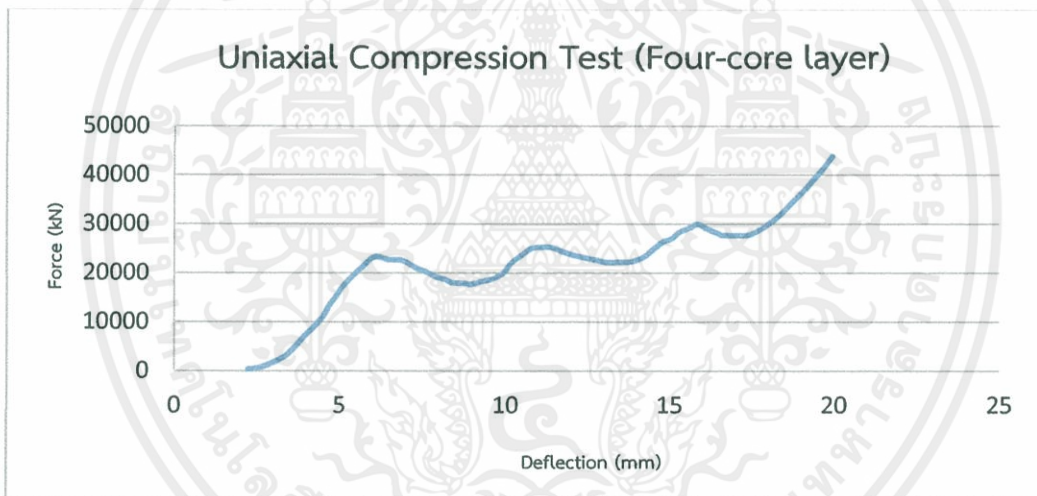


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

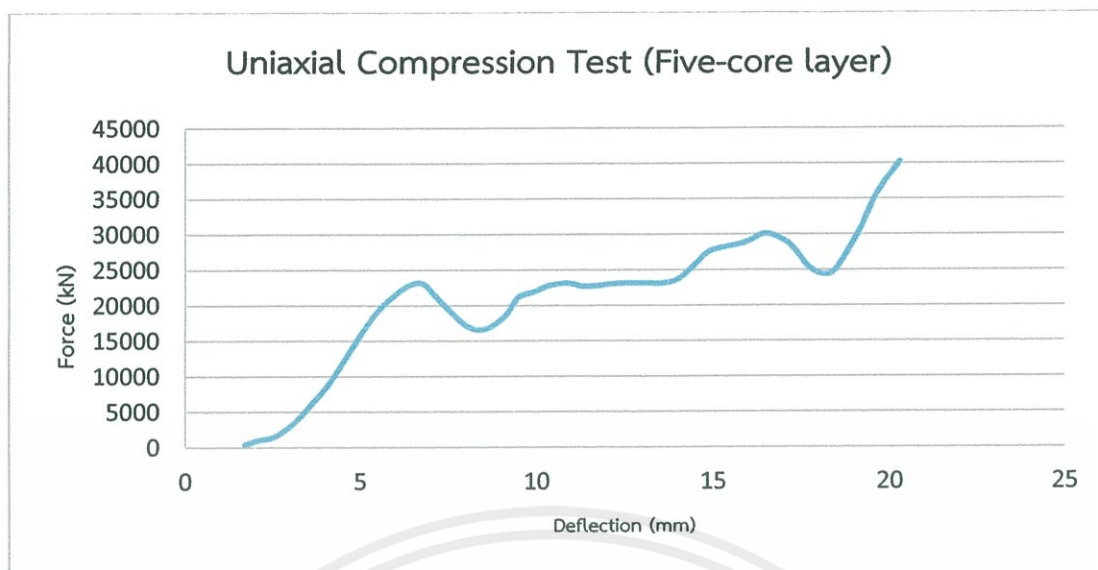


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 3 ชั้น

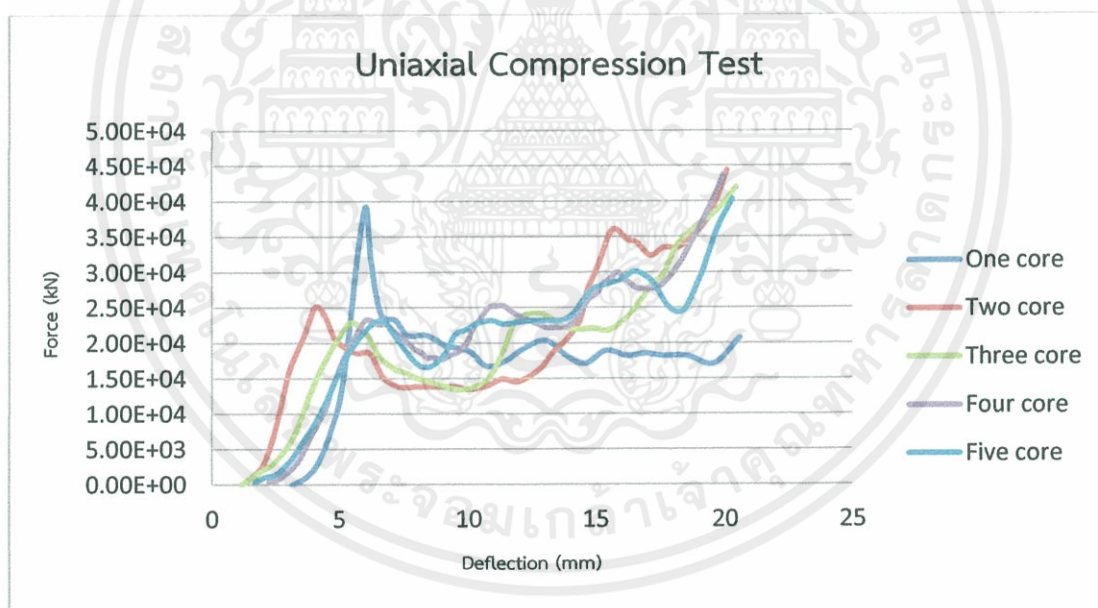


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชิ้นงานทดสอบแบบแกน 4 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของชั้นงานทดสอบแบบแกน 5 ชั้น



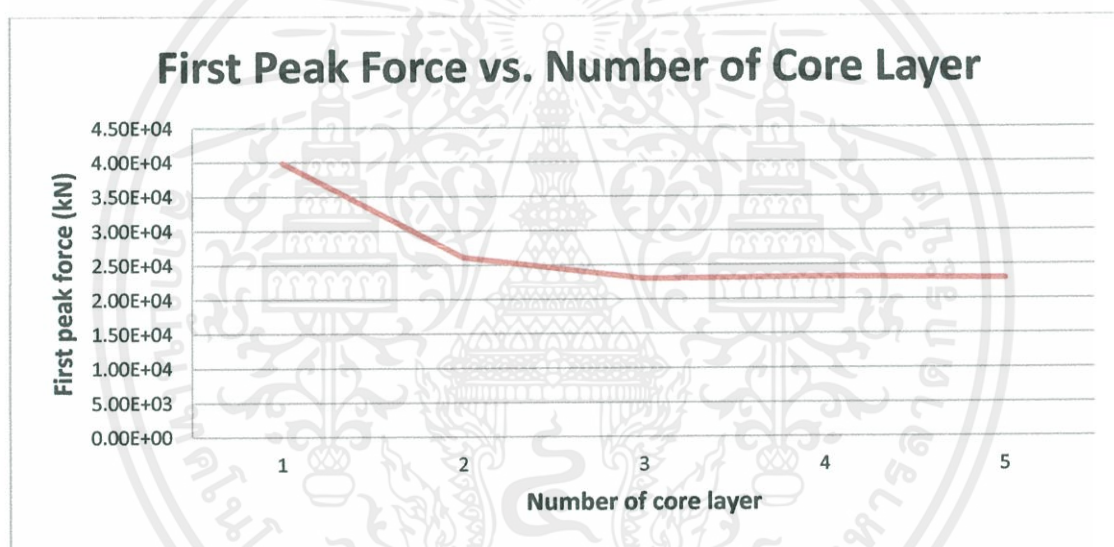
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Force (kN) และ Deflection (mm) ของการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง ได้ค่าจากการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระหว่างจำนวนชั้น และค่าแรงสูงสุดที่จุดแรก

	Force (kN)
แกน 1 ชั้น	3.99E+04
แกน 2 ชั้น	2.62E+04
แกน 3 ชั้น	2.30E+04
แกน 4 ชั้น	2.32E+04
แกน 5 ชั้น	2.30E+04



รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองที่แรงสูงสุดในแต่ละชั้น

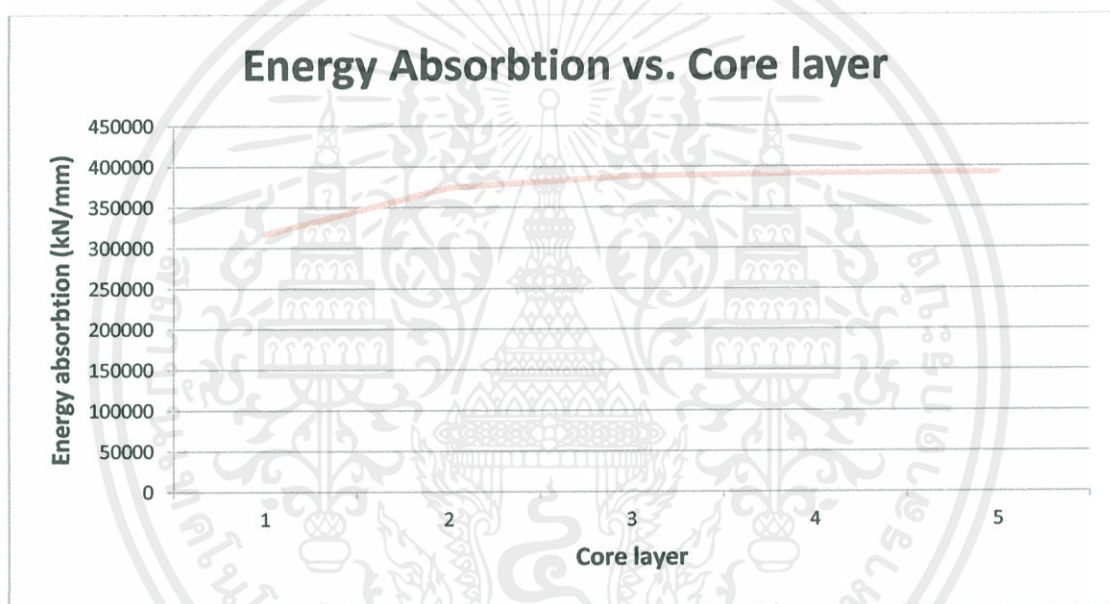
เพื่อหาการดูดซับพลังงานหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู จากการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) พิจารณาเมื่อหัวกดเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine : UTM) เคลื่อนตัวลงได้ 20 mm จะได้ค่าจากการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าจากการดูดซับพลังที่จำนวนชั้นต่างๆ

	Energy Absorbtion (kN/mm)
แกน 1 ชั้น	316720.117
แกน 2 ชั้น	374176
แกน 3 ชั้น	388619.13
แกน 4 ชั้น	391855.9068
แกน 5 ชั้น	392823.2262

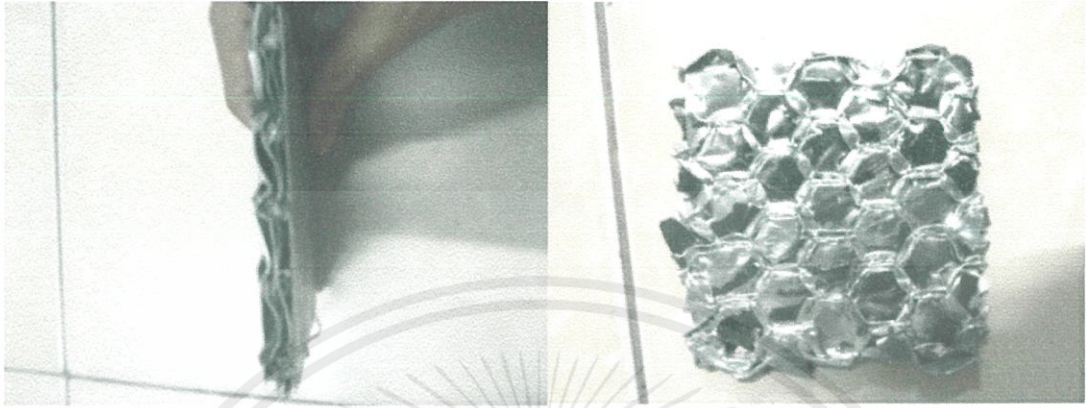
เมื่อทำการบันทึกกราฟ จะได้ดังนี้



รูปที่ 4.19 ค่าการดูดซับพลังงาน ที่จำนวนชั้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 ลักษณะของชิ้นทดสอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) ชิ้นงานจะมีลักษณะถูกกดโดยจะมีลักษณะดังภาพ



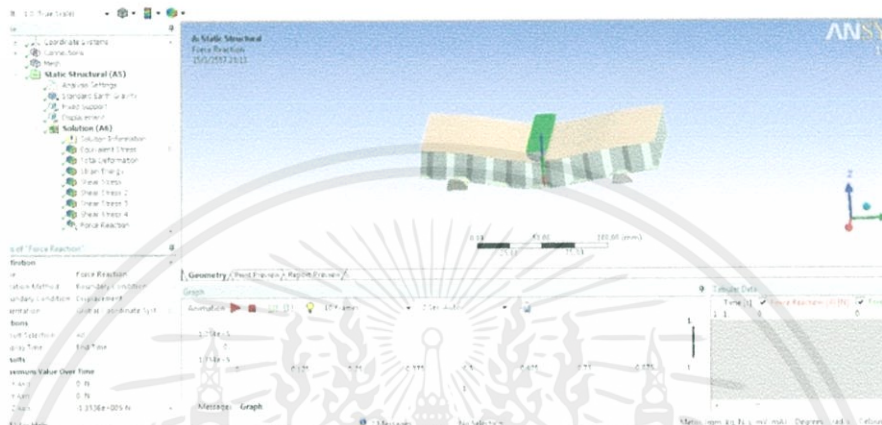
รูปที่ 4.20 การเสียหายของชิ้นทดสอบที่เกิดจากการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแรงกด ( Uniaxial Compression Test )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

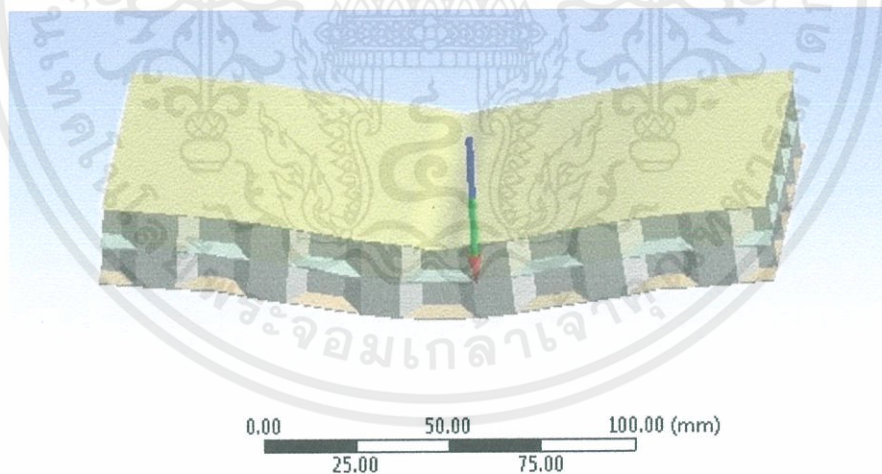
## 4.2 ผลการทดลองการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 4.2.1 การจำลองขั้นตอน Simulation

จะได้ค่าแรงที่ใช้กดชิ้นงาน และรูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงานแกน 1 ชั้น, แกน 2 ชั้น, แกน 3 ชั้น, แกน 4 ชั้น และ แกน 5 ชั้น

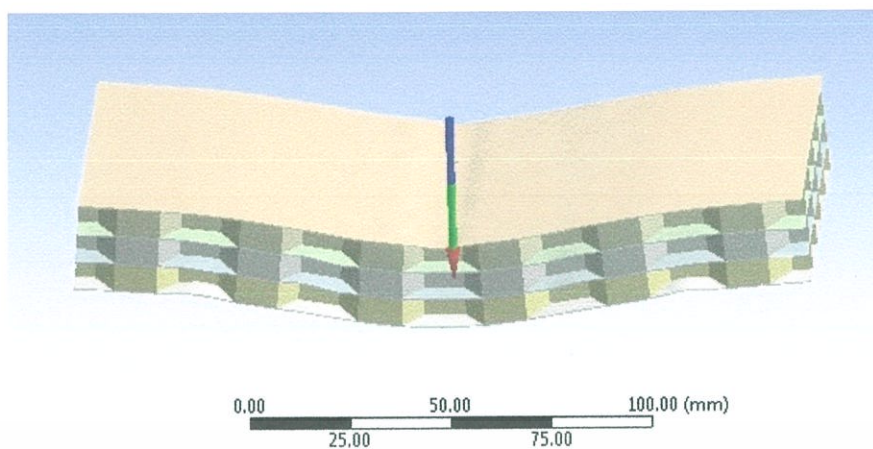


รูปที่ 4.21 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกดของชิ้นงาน 1 ชั้น

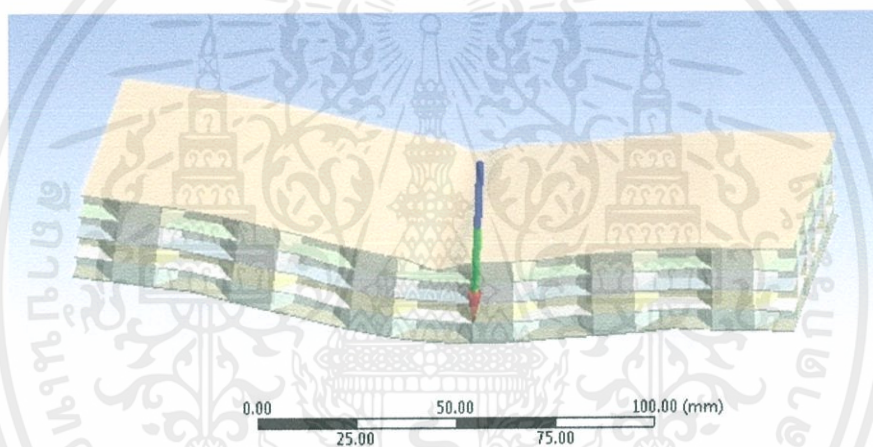


รูปที่ 4.22 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกด ของชิ้นงาน 2 ชั้น

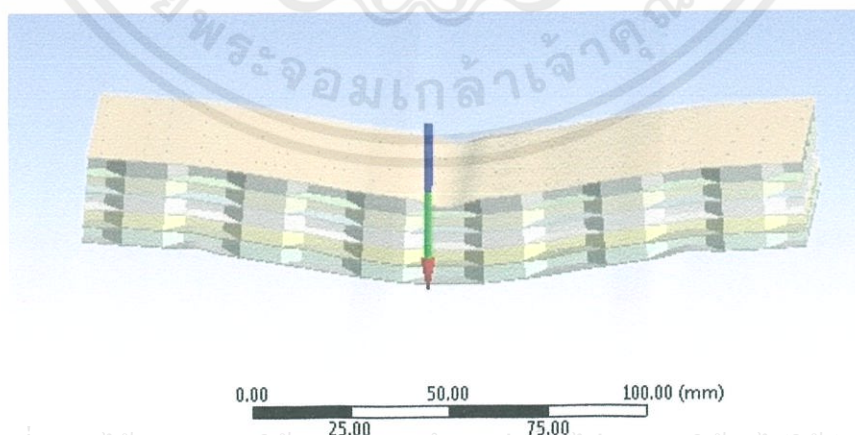
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกด ของชิ้นงาน 3 ชั้น

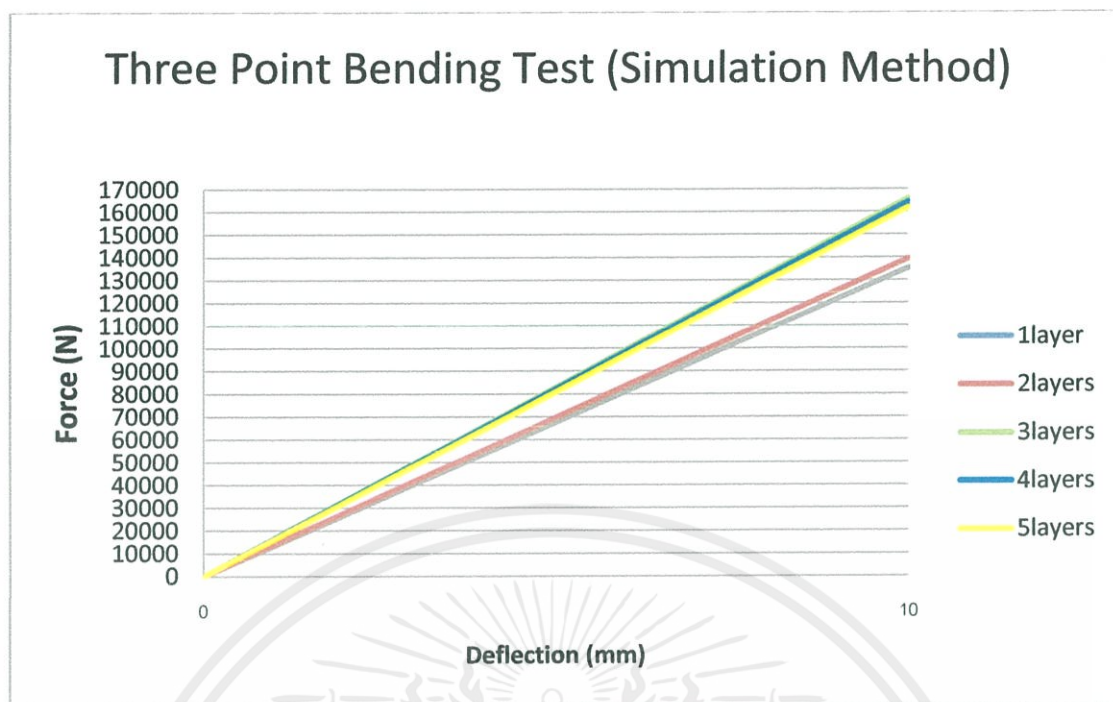


รูปที่ 4.24 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกด ของชิ้นงาน 4 ชั้น



รูปที่ 4.25 รูปชิ้นงานที่เสียรูปจากการกด ของชิ้นงาน 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของแรง และระยะที่เสียรูป

ตารางที่ 4.3 แรงที่ใช้ในการกดขึ้นงานแต่ละแบบที่ระยะ 10 มิลลิเมตร

ชั้นของชิ้นงาน	1	2	3	4	5
แรงที่ 10 มิลลิเมตร (N)	1.35E+05	1.39E+05	1.66E+05	1.64E+05	1.62E+05

#### 4.2.2 ผลการทดลองการกดแบบ 3 จุด (Three Point Bending Test) ด้วยวิธีการ

##### Simulation

จะเห็นได้ว่า

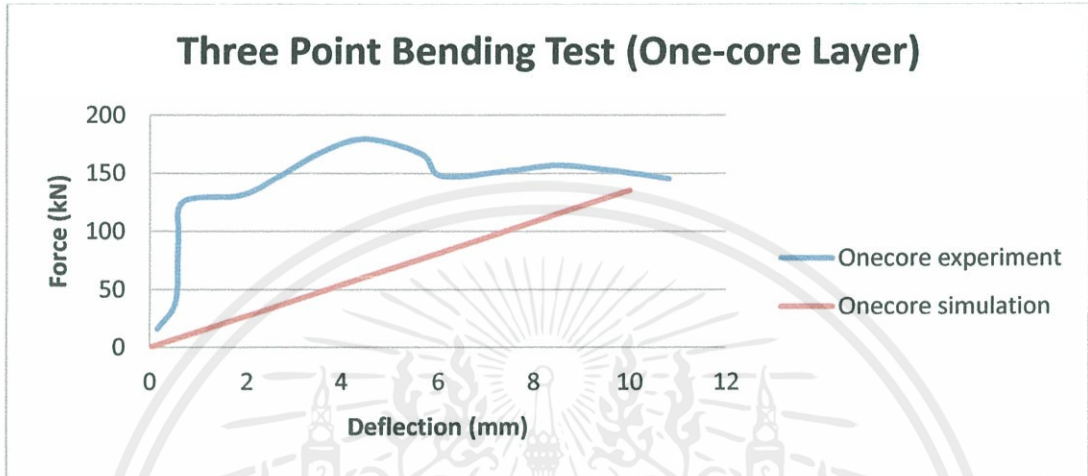
- วิเคราะห์ผลในช่วง Elasticity จะได้ผลการทดลองเป็นลักษณะแปรผันตรงแบบคงที่ ซึ่งแรงที่เกิดจากการกดขึ้นงานจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามระยะที่เสียรูป
- ชิ้นงาน 1, 2 และ 3 ชั้น แรงจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้น
- แรงที่ใช้ในการกดขึ้นงาน 3, 4 และ 5 ชั้น มีค่าใกล้เคียงกัน
- ชิ้นงาน 4 ชั้น แรงในช่วง Elastic มีลักษณะลดน้อยลงกว่าชิ้นงาน 3 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 5. ชิ้นงาน 5 ชั้น แรงในช่วง Elastic มีลักษณะลดน้อยลงกว่าชิ้นงาน 3 และ 4 ระเบียบข้อบังคับการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบการทดลอง

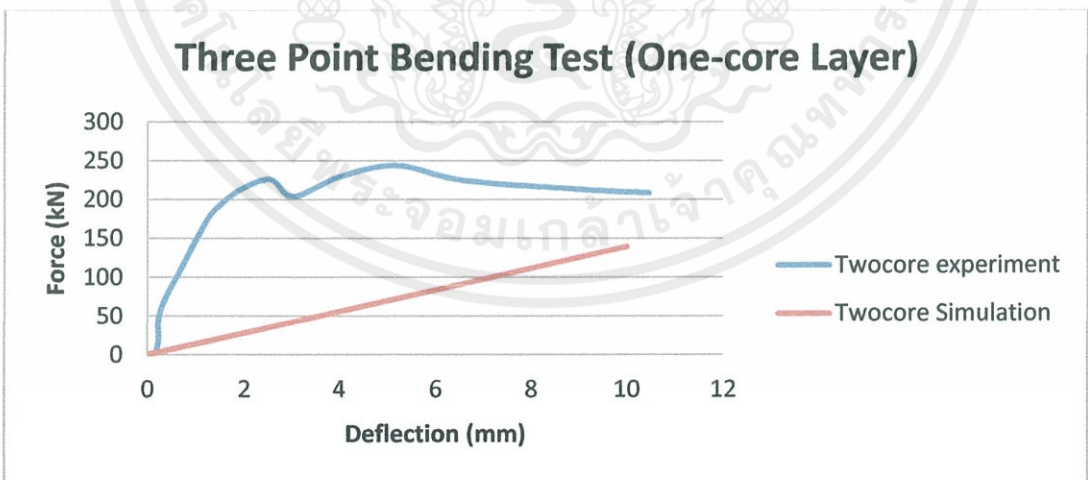
ผลจากการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการทดลองด้วยวิธีการกดแบบ 3 จุด จะสามารถแสดงได้ดังนี้ (จำลองเมื่อมีการเคลื่อนที่ของหัวกดระยะ 10 มิลลิเมตร)

1. การเปรียบเทียบของวัสดุทดสอบที่แกน 1 ชั้น



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบกด 3 จุด (แกน 1 ชั้น)

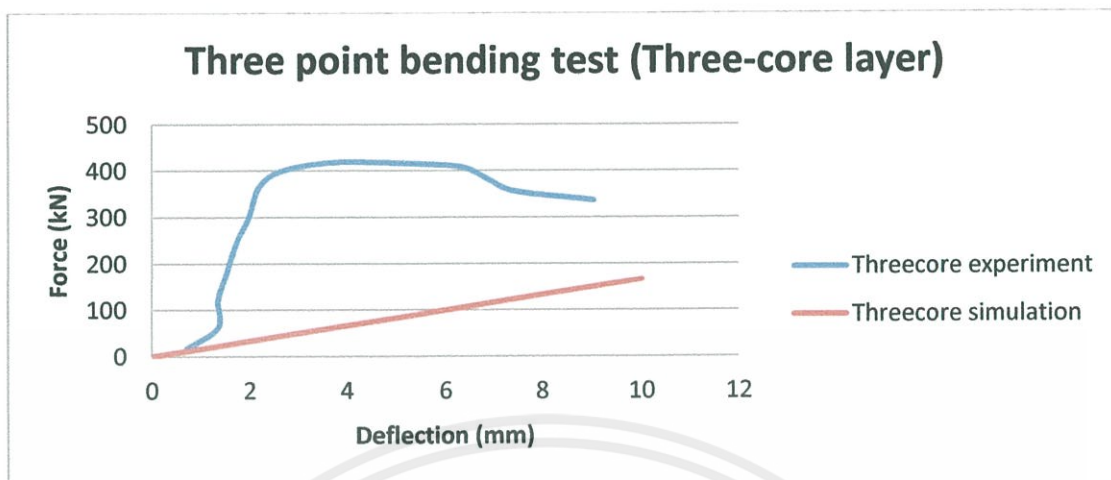
2. การเปรียบเทียบของวัสดุทดสอบที่แกน 2 ชั้น



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบกด 3 จุด (แกน 2 ชั้น)

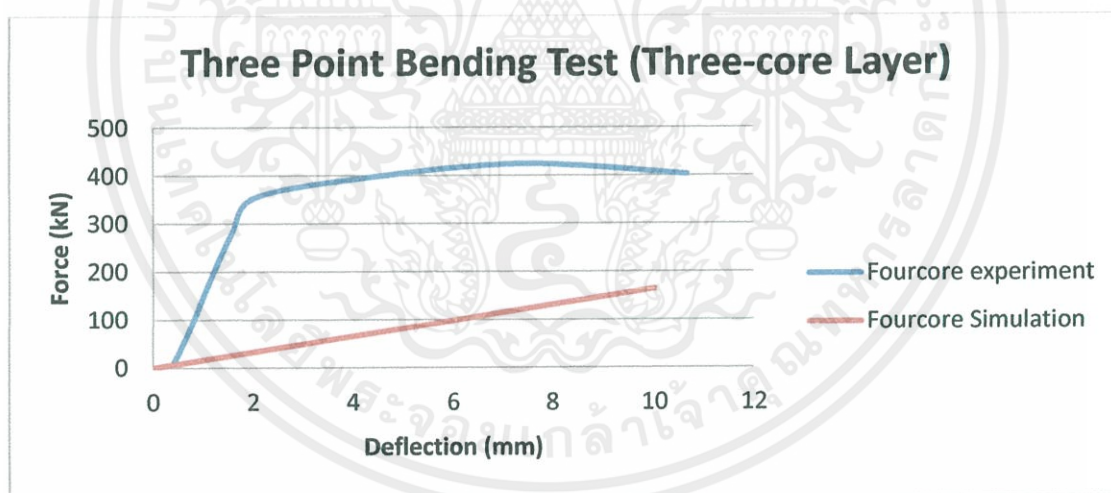
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การเปรียบเทียบของวัสดุทดสอบที่แกน 3 ชั้น



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบกอด 3 จุด (แกน 3 ชั้น)

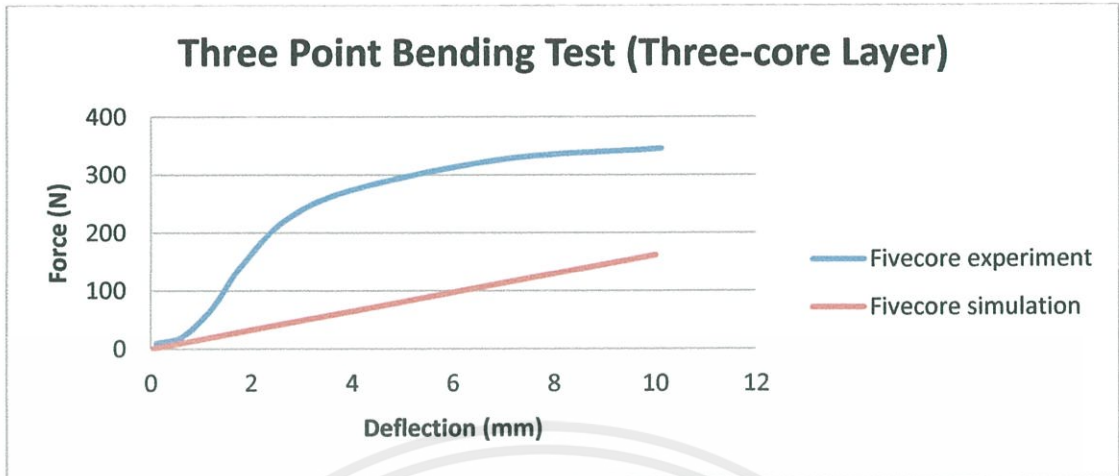
### 4. การเปรียบเทียบของวัสดุทดสอบที่แกน 4 ชั้น



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบกอด 3 จุด (แกน 4 ชั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การเปรียบเทียบของวัสดุทดสอบที่แกน 5 ชั้น



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบกด 3 จุด (แกน 5 ชั้น)

จากการเปรียบเทียบผลของการทดลองด้วยเครื่องทดสอบและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ค่าที่ได้จะมีค่าแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ ค่าการเสียรูปของการทดลอง จะอยู่ในช่วง 5-10 มิลลิเมตร(mm) แต่การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าการเสียรูป จะยังคงดำเนินต่อไปเป็นเส้นตรง เนื่องมาจากการจำลองแบบ Static Structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงการเรื่องการวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งนี้ มีการทดสอบกับวัสดุทดลอง 5 ชนิด กับการทดลอง 2 แบบ คือ การทดสอบด้วยวิธีกด 3 จุด หรือ Three Point Bending Test และการทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) จะสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 การทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุด

การทดสอบด้วยวิธีการกด 3 จุดนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลง และศึกษาพฤติกรรมการโค้งงอของวัสดุ จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น พบว่า ภาระแรงสูงสุดที่วัสดุแต่ละชิ้นได้รับ จะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนชั้น แต่ในวัสดุชั้นทดสอบที่มีแกน 5 ชั้น จะพบว่า มีแรงสูงสุดต่ำกว่าวัสดุทดสอบ 3 ชั้น ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า เป็นเพราะชั้นทดสอบของวัสดุมีขนาดความสูงน้อยเกินไปที่จะรับแรงเมื่อถึงจุดๆหนึ่ง ทำให้ได้รับแรงสูงสุดได้ต่ำลง แต่ช่วงการเสียรูปหรือช่วง Deformation ของวัสดุ จะมีค่ามากกว่าชั้นทดสอบทั้ง 4 ชั้น ซึ่งเป็นไปตามที่ทำนายไว้

#### 5.2 การทดสอบความแข็งแรงด้วยการทดสอบแรงกด

การทดสอบด้วยวิธีการออกแรงกดนั้น เมื่อทำการตั้งค่า Load cell ที่มีความเร็ว 3mm/sec จะพบว่า แรงสูงสุดที่รับภาระของแรงในช่วงแรก หรือจุดสูงสุดของแรงที่รับได้ในช่วงแรกนั้น จะมีค่าต่ำลงอันเนื่องมาจากความสูงของแกนในแต่ละชั้น และเมื่อแบ่งจำนวนชั้นออกมามากขึ้น ก็จะทำให้ค่าสูงสุดของแรงที่รับได้ที่จุดแรกลดลงเพียงเล็กน้อย และผลการทดสอบการดูดซับพลังงาน ที่สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของแรงและระยะกด พบว่า หากมีการแบ่งชั้นของชั้นทดสอบ ก็จะดูดซับพลังงานได้มากขึ้น และหากแบ่งจำนวนชั้นมากขึ้นก็จะดูดซับเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลง

#### 5.3 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง ได้พบปัญหาดังนี้ การออกแบบชิ้นงานการทดลองจะมีคุณภาพที่ต่างกับชิ้นงานที่ใช้ในอุตสาหกรรมมาก เนื่องจากเนื้อกาที่ใช้ยึดติดไม่เป็นเสมือนกับการเชื่อมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งการจัดหาวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง จะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างมาก จึงจำเป็นต้องใช้กา

ตามการทดลอง เพื่อจำลองวัสดุที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง ดังนั้นการศึกษาเรื่องกาวยืดติด และการศึกษาเพื่อลดต้นทุนของวัสดุกาวย เป็นหัวข้อที่น่าสนใจ นอกจากนี้ขนาดของชั้นทดสอบ เนื่องจากชั้นทดสอบ จะใช้การตัดด้วยใบมีดและการกระชาก ทำให้ผลรวมความหนาของชั้นทดสอบมีขนาดแตกต่างกันไม่เท่ากัน นอกจากนี้ จากเริ่มค่าการทดลอง (Calibrate) เครื่องทดสอบก่อนเริ่มทำการทดลอง มีค่าที่ไม่เท่ากันในแต่ละชั้นทดสอบ อาจทำให้ค่าที่ออกมาไม่ตรงกับความเป็นจริง ในส่วนการทดสอบด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบ มีคุณภาพที่ไม่เพียงพอต่อการศึกษาในการคำนวณอย่างเห็นได้ชัด

ข้อเสนอแนะที่ให้เป็นการเสนอต่องานวิจัยต่อไป คือ การศึกษาข้อเท็จจริงของการทดสอบด้วยวิธีการกดแบบ 3 จุด ในจำนวนชั้นที่หลายๆ ในการทดสอบครั้งนี้ ผลของการทดสอบวัสดุที่มีแกน 5 ชั้น มีขนาดของแรงสูงสุดที่น้อยกว่าวัสดุทดสอบที่มีแกน 3 ชั้น ซึ่งเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ฐานิภูมฺ์ ทินนาม, ฅนุฎุมิ มัจพันฐ์ , “การวิเคราะห์การค้ังงอและการคูดกลืนพลังงานของวัตถุประกอบรูปรั้งผ้ัง,” (ปริญญานิพนธ์ปริญญาวិศวกรรมศาสตรบัณทิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2536).
- [2] พงศัสถิต อิศรางกูร ณ อยุธยา และคนอื่น ๆ., “การพัฒนาโครงสร้างแซนวิชค้ังงอโมโนค้อกสำหรับรถฟอร์มูล่า ระดับน้ักศึกษา,” (ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณทิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2552).
- [3] มนต์ค้กดี พิมพ์สาร. 2557. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.(ออนไลน์)  
URL : <http://www.kmitl.ac.th/~kpmonsak/FEM/IntroductionFEM.pdf>. 5 มีนาคม 2557.
- [4] A.Gpoichand, R.Mohanrao, N.V.S Sankar, G.Rama Balaji, P.Sandeep Kumar, 2013, **Design and Analysis of Copper Honeycomb Sandwich Structure**, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2(4), 2249 – 8958
- [5] Allan F. Bower. 2014. **Introduction to Finite Element Analysis in Solid Mechanics**. (homepage on the Internet).  
URL : [http://solidmechanics.org/Text/Chapter7\\_1/Chapter7\\_1.php](http://solidmechanics.org/Text/Chapter7_1/Chapter7_1.php). 2014 Mar 6.
- [6] HexWeb™ **Honeycomb Attributes and properties** (On-line), Hexcel Composites, from [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)
- [7] HexWeb™ **Honeycomb Sandwich Design Technologies** (On-line), Hexel Composites, from [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขค้ดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกค้ั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] Jeom Kee Paik, Anil K. Thayamballi, Gyu Sung Kim, 1999, **The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels**, Thin-Walled Structures, 35(3), 205-231
- [9] K.Kantha Rao et.al. **Strength Analysis on Honeycomb Sandwich Panels of different Materials**, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2(3), 365-374.
- [10] Kaneko Y, Takeuchi K. **Design and construction of a seawater survey ship built using aluminum honeycomb panels**. In: Proceedings of the Second International Conference on Fast Sea Transportation, vol. 1, Yokohama (Japan), December 1993:449-460.
- [11] Kelsey S, Gellatly RA, Clark BW. **The shear modulus of foil honeycomb cores**. Aircraft Engng 1958;30:294-308.
- [12] P.Beer, Ferdinand et al. **Mechanics of Materials**. 5<sup>th</sup> ed. New York, NY : McGraw-Hill, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



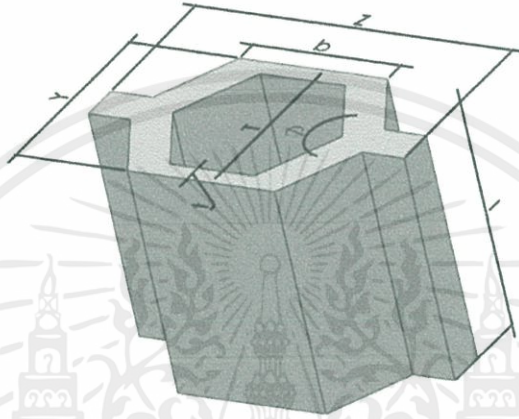
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณขนาดเซลล์ของแกนรังผึ้ง

ขนาดของเซลล์รังผึ้งรูปหกเหลี่ยมจำนวน 1 เซลล์นั้น จะสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ ก-1 แสดงส่วนต่างๆของเซลล์รังผึ้ง 1 เซลล์ [1]

เมื่อกำหนดให้ ขนาดด้าน b มีความยาว 1 เซนติเมตร (10 มิลลิเมตร)

1. หาคความกว้างด้าน Y ได้ดังนี้

$$Y = 2b \left( \sin \frac{\phi}{2} \right) + 2t$$

$$Y = 2(10) \left( \sin \frac{120}{2} \right) + 2(0.35)$$

$$Y = 18.02\text{mm}$$

2. หาคความยาวด้าน Z ได้ดังนี้

$$Z = 2b \left( 1 + \cos \frac{\phi}{2} \right)$$

$$Z = 2(10) \left( 1 + \cos \frac{120}{2} \right)$$

$$Z = 30\text{mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หาขนาดของพื้นที่หน้าตัดครึ่งผึ่งต่อ 1 เซลล์ได้ดังนี้

$$A = Y \times Z$$

$$A = (18.02\text{mm}) \times (30\text{mm}) = 540.6\text{mm}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## การคำนวณการดูดซับพลังงาน

การคำนวณการดูดซับพลังงานนั้น จะสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระแรงที่กระทำ และระยะยุบตัวที่หวัคดเคลื่อนที่ลงไป

ในการคำนวณเพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟนั้น จะสามารถใช้วิธีการคำนวณได้หลากหลายวิธี ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้วิธีของกฎสี่เหลี่ยมคางหมู ข้อดี คือ สามารถประมาณข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ข้อเสีย คือ จะมีค่าความแตกต่างจากค่าอยู่บ้าง การคำนวณพื้นที่นั้น ในการแบ่งส่วนแรกสุดของกราฟ จะมีลักษณะเป็นรูป สามเหลี่ยม โดยมีพื้นที่ของสามเหลี่ยมดังนี้

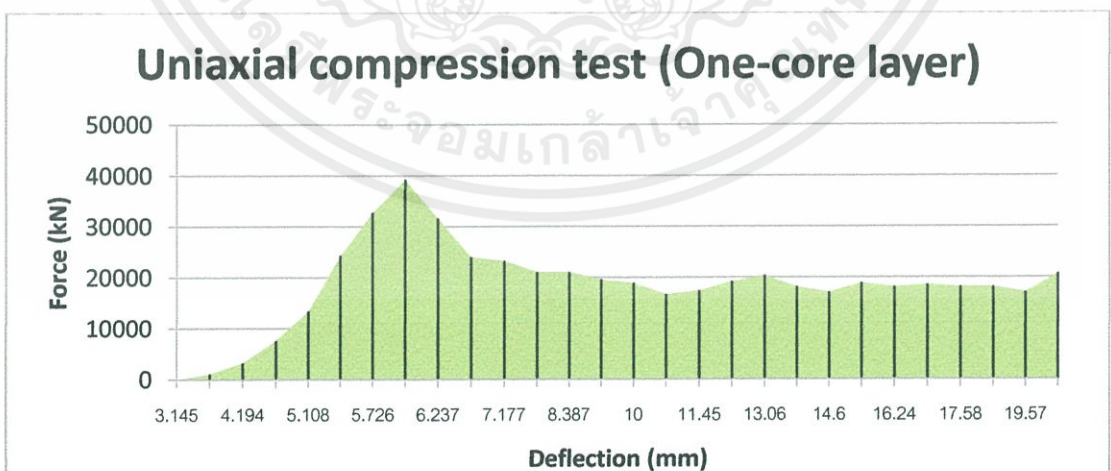
$$\text{พื้นที่สามเหลี่ยม} = \frac{1}{2} \times \text{ฐาน} \times \text{สูง}$$

และพื้นที่ใต้กราฟของสี่เหลี่ยมคางหมูจะสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู} = \frac{1}{2} \times (\text{ผลบวกด้านคู่ขนาน}) \times \text{สูง}$$

การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ จะคำนวณด้วยระยะเคลื่อนตัวของหวัคดที่ระยะ 20 มิลลิเมตร

ในชั้นทดสอบแกน 1 ชั้น จะแบ่งพื้นที่ใต้กราฟได้ดังนี้



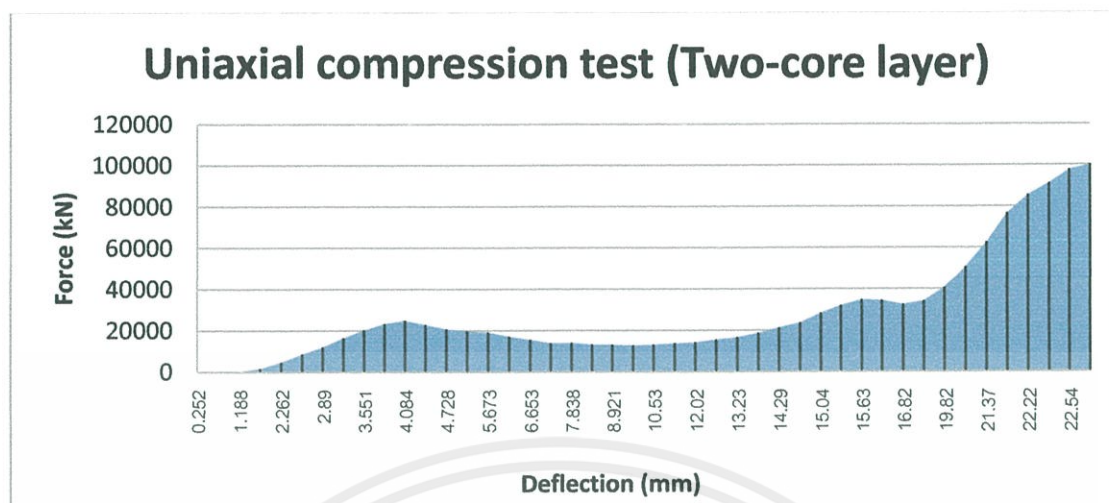
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ข-1 แสดงการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสนธิสัญญาฉบับนี้ให้คิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ชั้นงานทดสอบแกน 1 ชั้น

ตารางที่ ข-1 การดัดรับพลังงานของชิ้นงานทดสอบแกน 1 ชั้น

Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของ ด้านความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
3.145	0			
3.71	1091	0.565	1091	308.2075
4.194	3273	0.484	4364	1056.088
4.677	7636	0.483	10909	2634.5235
5.108	13450	0.431	21086	4544.033
5.484	24360	0.376	37810	7108.28
5.726	32730	0.242	57090	6907.89
6.048	39270	0.322	72000	11592
6.237	31640	0.189	70910	6700.995
6.64	24000	0.403	55640	11211.46
7.177	23270	0.537	47270	12691.995
7.634	21090	0.457	44360	10136.26
8.387	21090	0.753	42180	15880.77
9.113	19640	0.726	40730	14784.99
10	18910	0.887	38550	17096.925
10.7	16730	0.7	35640	12474
11.45	17450	0.75	34180	12817.5
12.2	19270	0.75	36720	13770
13.06	20360	0.86	39630	17040.9
13.87	18180	0.81	38540	15608.7
14.6	17090	0.73	35270	12873.55
15.4	18910	0.8	36000	14400
16.24	18180	0.84	37090	15577.8
16.94	18550	0.7	36730	12855.5
17.58	18180	0.64	36730	11753.6
18.52	18180	0.94	36360	17089.2
19.57	17090	1.05	35270	18516.75
20.59	20730	1.02	37820	19288.2
				316720.117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาก่อนหน้านี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นทดสอบแกน 2 ชั้น จะแบ่งพื้นที่ใต้กราฟได้ดังนี้



รูปที่ ข-2 แสดงการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ  
ชั้นงานทดสอบแกน 2 ชั้น

ตารางที่ ข-2 การดูค่าพลังงานของชั้นงานทดสอบแกน 2 ชั้น

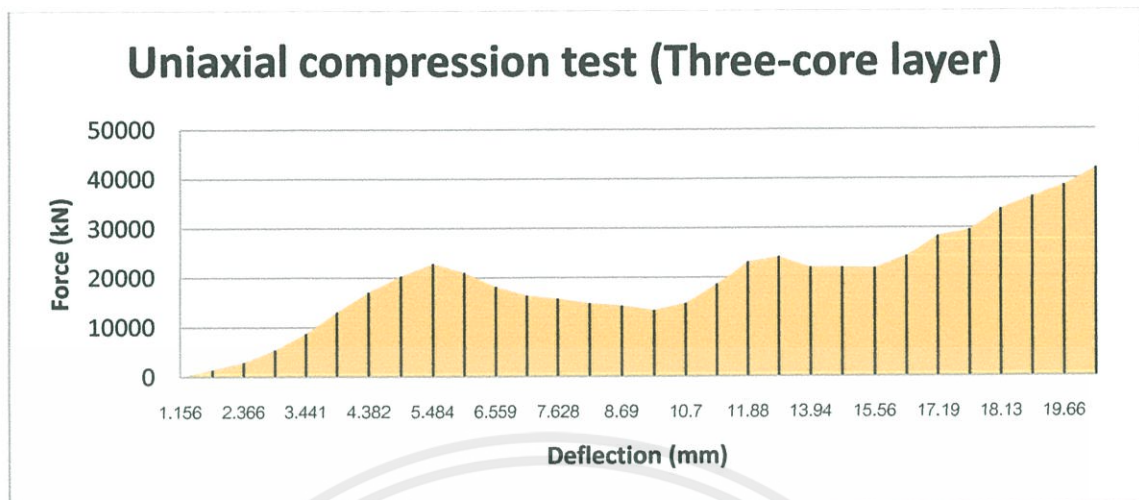
Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของ ด้านความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
0.252	1.589			
0.673	230.8	0.421	232.389	48.91788
1.188	230.8	0.515	461.6	118.862
1.747	1625	0.559	1855.8	518.6961
2.262	4763	0.515	6388	1644.91
2.597	8599	0.335	13362	2238.135
2.89	1.21E+04	0.293	20689	3030.939
3.225	1.65E+04	0.335	28590	4788.825
3.551	2.02E+04	0.326	36720	5985.36
3.903	2.34E+04	0.352	43580	7670.08
4.084	2.49E+04	0.181	48230	4364.815
4.341	2.29E+04	0.257	47760	6137.16
4.728	2.08E+04	0.387	43690	8454.015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของ ด้านความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
5.098	1.98E+04	0.37	40560	7503.6
5.673	1.92E+04	0.575	38930	11192.38
6.154	1.72E+04	0.481	36370	8746.985
7.838	1.41E+04	0.627	28000	8778
8.388	1.33E+04	0.55	27310	7510.25
8.921	1.31E+04	0.533	26380	7030.27
9.72	1.28E+04	0.799	25910	10351.05
10.53	1.31E+04	0.81	25910	10493.55
11.15	1.37E+04	0.62	26840	8320.4
12.02	1.43E+04	0.87	28000	12180
12.75	1.56E+04	0.73	29860	10898.9
13.23	1.67E+04	0.48	32300	7752
13.88	1.87E+04	0.65	35440	11518
14.29	2.13E+04	0.41	39980	8195.9
14.69	2.37E+04	0.4	44980	8996
15.04	2.82E+04	0.35	51950	9091.25
15.36	3.21E+04	0.32	60310	9649.6
15.63	3.49E+04	0.27	66930	9035.55
15.95	3.45E+04	0.32	69380	11100.8
16.82	3.25E+04	0.87	67060	29171.1
18.56	3.42E+04	1.74	66710	58037.7
19.82	4.07E+04	1.26	74840	47149.2
				374176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นทดสอบแกน 3 ชั้น จะแบ่งพื้นที่ใต้กราฟได้ดังนี้



รูปที่ ข-3 แสดงการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ  
ชั้นงานทดสอบแกน 3 ชั้น

ตารางที่ ข-3 การหาคัดซ้ำพลังงานของชั้นงานทดสอบแกน 3 ชั้น

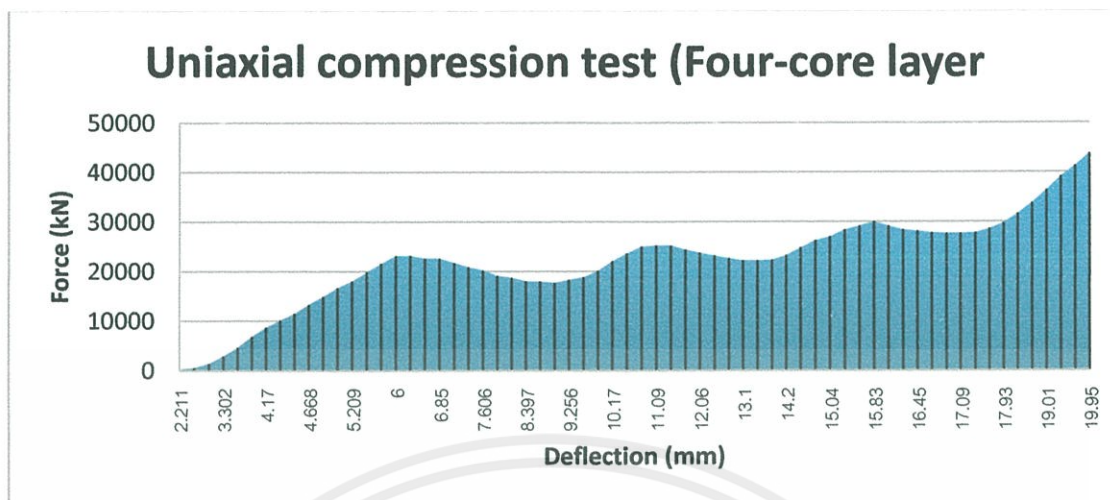
Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของ ด้านความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
1.156	0			
1.72	1455	0.564	1455	410.31
2.366	2909	0.646	4364	1409.572
2.984	5455	0.618	8364	2584.476
3.441	8727	0.457	14182	3240.587
3.871	1.31E+04	0.43	21817	4690.655
4.382	1.71E+04	0.511	30180	7710.99
4.919	2.04E+04	0.537	37450	10055.33
5.484	2.29E+04	0.565	43270	12223.78
6.102	2.11E+04	0.618	44000	13596
6.559	1.82E+04	0.457	39270	8973.195
7.151	1.64E+04	0.592	34540	10223.84
7.628	1.57E+04	0.477	32080	7651.08
8.165	1.48E+04	0.537	30510	8191.935
8.69	1.43E+04	0.525	29120	7644

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของ ด้านความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
9.707	1.34E+04	1.017	27730	14100.71
10.7	1.48E+04	0.993	28190	13996.34
12.8	2.42E+04	0.92	47360	21785.6
13.94	2.21E+04	1.14	46280	26379.6
14.91	2.21E+04	0.97	44120	21398.2
15.56	2.19E+04	0.65	43960	14287
16.4	2.44E+04	0.84	46280	19437.6
17.19	2.84E+04	0.79	52780	20848.1
17.59	2.96E+04	0.4	58040	11608
18.13	3.38E+04	0.54	63450	17131.5
18.81	3.63E+04	0.68	70090	23830.6
19.66	3.86E+04	0.85	74880	31824
20.44	4.20E+04	0.78	80610	31437.9
				388619.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นทดสอบแกน 4 ชั้น จะแบ่งพื้นที่ได้กราฟได้ดังนี้



รูปที่ ข-4 แสดงการแบ่งพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ  
ชั้นงานทดสอบแกน 4 ชั้น

ตารางที่ ข-4 การดูค่าพลังงานของชั้นงานทดสอบแกน 4 ชั้น

Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของด้าน ความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
2.211	347.1	2.211	0	191.86
2.512	579.5	0.301	926.6	139.4533
2.847	1393	0.335	1972.5	330.3938
3.302	2904	0.455	4297	977.5675
3.594	4647	0.292	7551	1102.446
3.886	6855	0.292	11502	1679.292
4.17	8715	0.284	15570	2210.94
4.367	1.01E+04	0.197	18825	1854.263
4.531	1.15E+04	0.164	21610	1772.02
4.668	1.33E+04	0.137	24750	1695.375
4.857	1.49E+04	0.189	28120	2657.34
5.037	1.66E+04	0.18	31490	2834.1
5.209	1.80E+04	0.172	34630	2978.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

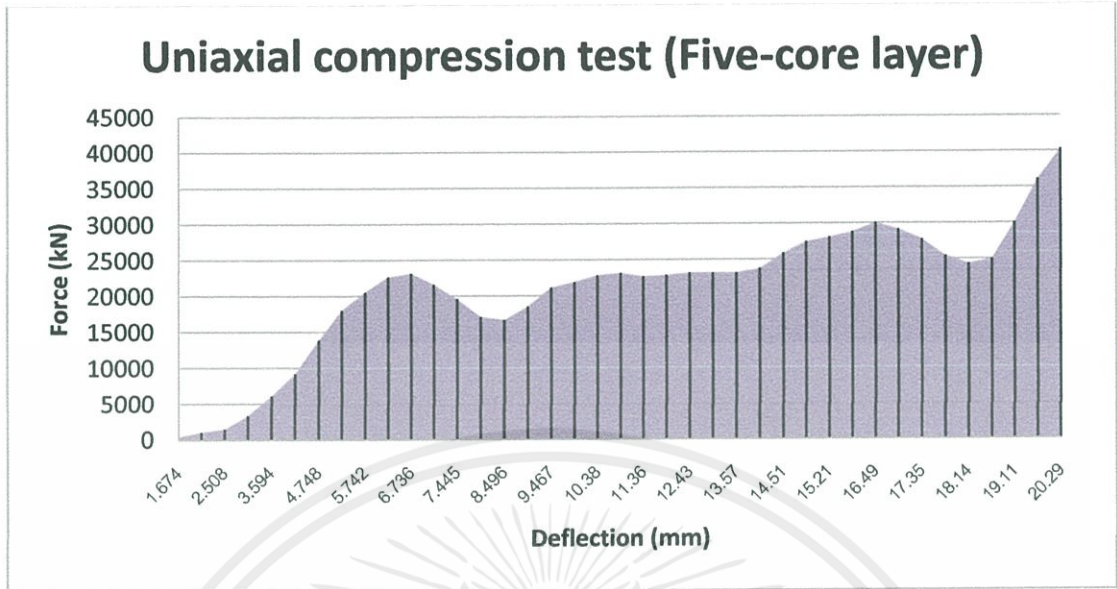
Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของด้าน ความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
5.476	1.99E+04	0.267	37880	5056.98
5.742	2.16E+04	0.266	41490	5518.17
6	2.31E+04	0.258	44750	5772.75
7.125	2.17E+04	0.275	44390	6103.625
7.34	2.09E+04	0.215	42650	4584.875
7.606	2.02E+04	0.266	41140	5471.62
7.916	1.92E+04	0.31	39390	6105.45
8.165	1.87E+04	0.249	37880	4716.06
8.397	1.80E+04	0.232	36720	4259.52
8.757	1.79E+04	0.36	35910	6463.8
8.938	1.77E+04	0.181	35560	3218.18
9.256	1.82E+04	0.318	35900	5708.1
9.625	1.88E+04	0.369	37070	6839.415
9.943	2.01E+04	0.318	38930	6189.87
10.17	2.21E+04	0.227	42180	4787.43
10.48	2.36E+04	0.31	45670	7078.85
10.79	2.50E+04	0.31	48580	7529.9
11.09	2.52E+04	0.3	50210	7531.5
11.41	2.52E+04	0.32	50440	8070.4
11.73	2.44E+04	0.32	49620	7939.2
12.06	2.37E+04	0.33	48110	7938.15
12.43	2.31E+04	0.37	46840	8665.4
12.76	2.27E+04	0.33	45790	7555.35
13.1	2.22E+04	0.34	44860	7626.2
13.44	2.22E+04	0.34	44400	7548
13.83	2.23E+04	0.39	44510	8679.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรทำงานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิใช่ผูกมัดให้นำไปใช้บวริ โชนค้า การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 13.83 ห้ามมิให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ แกน x	ผลรวมของ ด้านความสูง	พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
14.2	2.32E+04	0.37	45550	8426.75
14.76	2.63E+04	0.28	51010	7141.4
15.04	2.70E+04	0.28	53220	7450.8
15.29	2.84E+04	0.25	55320	6915
15.57	2.92E+04	0.28	57530	8054.2
15.83	3.00E+04	0.26	59150	7689.5
16.08	2.92E+04	0.25	59150	7393.75
16.35	2.84E+04	0.27	57530	7766.55
16.45	2.81E+04	0.1	56480	2824
16.54	2.78E+04	0.09	55890	2515.05
16.82	2.77E+04	0.28	55430	7760.2
17.09	2.77E+04	0.27	55320	7468.2
17.37	2.78E+04	0.28	55430	7760.2
17.66	2.86E+04	0.29	56360	8172.2
17.93	2.98E+04	0.27	58340	7875.9
18.3	3.16E+04	0.37	61360	11351.6
18.62	3.38E+04	0.32	65430	10468.8
19.01	3.64E+04	0.39	70190	13687.05
19.38	3.92E+04	0.37	75530	13973.05
19.66	4.13E+04	0.28	80420	11258.8
19.95	4.38E+04	0.29	85070	12335.15
				391855.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นทดสอบแกน 5 ชั้น จะแบ่งพื้นที่ใต้กราฟได้ดังนี้



รูปที่ ข-5 แสดงการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจากผลการทดลองด้วยวิธีแรงกดกับ  
ชั้นงานทดสอบแกน 5 ชั้น

ตารางที่ ข-5 การดูดซับพลังงานของชั้นงานทดสอบแกน 5 ชั้น

Deflection (mm)	Force (kN)	ผลต่างของ		พื้นที่ใต้กราฟ (kN/mm)
		แกน x	ด้านความสูง	
1.674	408.9	1.674	408.9	342.249
2.051	1027	0.377	1435.9	270.6672
2.508	1491	0.457	2518	575.363
3.068	3347	0.56	4838	1354.64
3.594	6130	0.526	9477	2492.451
4.131	9223	0.537	15353	4122.281
4.748	1.39E+04	0.617	23083	7121.106
5.297	1.80E+04	0.549	31900	8756.55
5.742	2.05E+04	0.445	38550	8577.375
6.302	2.27E+04	0.56	43190	12093.2
6.736	2.31E+04	0.434	45820	9942.94
7.056	2.16E+04	0.32	44730	7156.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำสิ่งนี้อีก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้