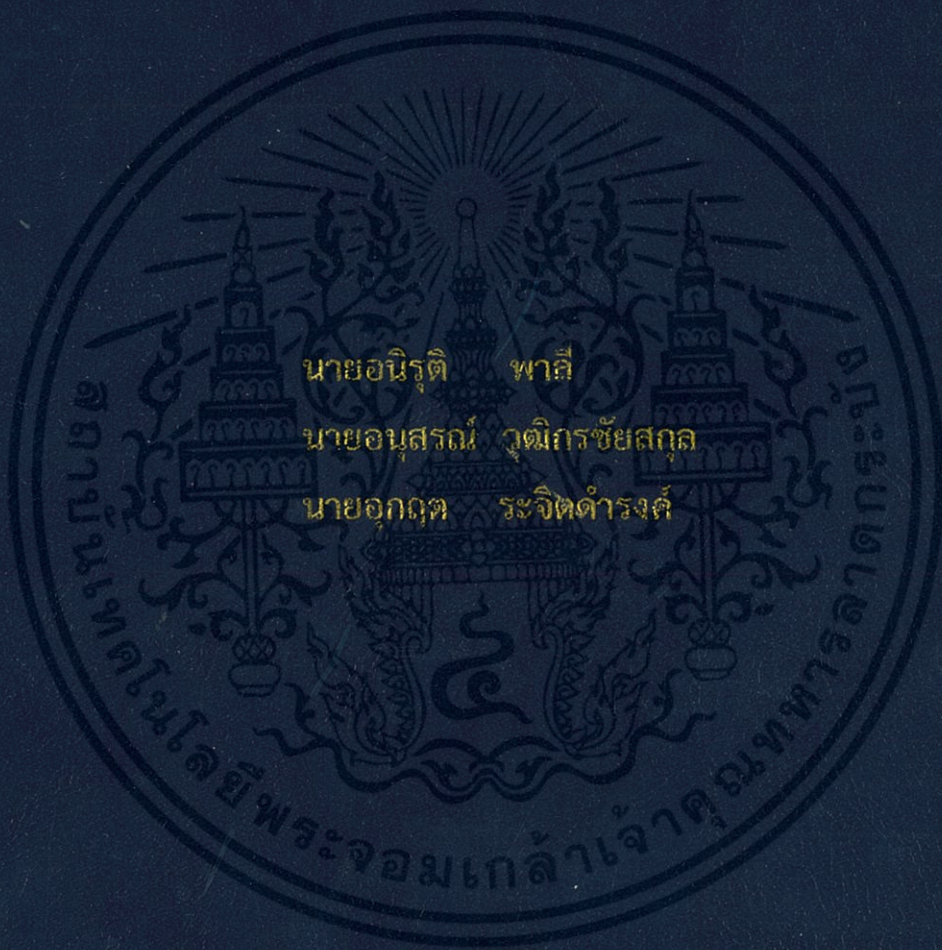


การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูกด้วยระเบียบ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STRENGTH ANALYSIS OF CORRUGATED BOARD STRUCTURE USING  
FINITE ELEMENT METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูกด้วยระเบียบ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STRENGTH ANALYSIS OF CORRUGATED BOARD STRUCTURE USING

FINITE ELEMENT METHOD



นายอนิรุติ พาลี

นายอนุสรณ์ วุฒิกรชัยสกุล

นายอุกฤษฏ์ ระจิตดำรงค์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRENGTH ANALYSIS OF CORRUGATED BOARD STRUCTURE USING  
FINITE ELEMENT METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2555  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STRENGTH ANALYSIS OF CORRUGATED BOARD STRUCTURE USING FINITE ELEMENT  
METHOD

ผู้จัดทำ

1. นาย อนิรุติ พาลี รหัสประจำตัว 52011381
2. นาย อนุสรณ์ วุฒิกฤษัยสกุล รหัสประจำตัว 52011390
3. นาย อุกฤษ ระจิตดำรงค์ รหัสประจำตัว 52011466



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นายอนิรุติ พาลี 52011381  
นายอนุสรณ์ วุฒิมกรชัยสกุล 52011390  
นายอุกฤษ ระจิตดำรงค์ 52011466  
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันกระดาดลูกฟูกนิยมใช้ในการบรรจุภัณฑ์เพื่อขนส่งสินค้าในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งกระดาดลูกฟูกจะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับสินค้าอีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและทำจากวัสดุรีไซเคิล ดังนั้นความแข็งแรงจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของโครงสร้างกระดาดลูกฟูก รูปแบบกระดาดลูกฟูกในอุตสาหกรรมมีการแบ่งตามชนิดลอน เช่น A B C และ E เป็นต้น ซึ่งในอุตสาหกรรมกระดาดลูกฟูกของประเทศไทย พบว่าชนิดลอน C มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และรูปแบบกระดาดลอน C ยังสามารถจัดแบ่งได้ตามขนาดระยะพิทช์และความสูงลอน

ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการศึกษากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูกประกอบไปด้วยการทดสอบแฟลชครีซ[6]และเอตครีซ[7] ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ นอกจากนั้นศึกษาผลกระทบของรูปร่างลอนซึ่งประกอบไปด้วย ความสูงของลอนและระยะพิทช์ของลอนต่อความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูก ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงจำกัดขอบเขตให้ การเสียรูปของโครงสร้างอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น

ผลจากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาดลูกฟูก เมื่อทดสอบแบบแฟลชครีซ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพิทช์มีค่าลดลง ส่วนการทดสอบแบบเอตครีซ ผลของความสูงของลอนและระยะพิทช์ จะมีผลต่อความแข็งแรงน้อยมาก อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ถือว่าการศึกษาเบื้องต้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

# STRENGTH ANALYSIS OF CORRUGATED BOARD STRUCTURE USING FINITE ELEMENT METHOD

Anirut Phalee 52011381  
Anusorn Wuthikornchaisakul 52011390  
Ukrit Rajitdumrong 52011466  
Assist.Prof. Dr.Monsak Pimsarn Advisor  
Year 2555

## ABSTRACT

Nowadays, corrugated board panels are very popular in the packaging industry, because these panels help to protect damage's goods. Moreover, they are light weight and produced from recycle material. Therefore, their strength is very crucial. The corrugated board profile in industry can be classified as type A, B, C, and E, ect. In Thailand, type C has been used widely and its shape can be varied with different pitch and height.

This project is aimed to study the corrugated board strength using finite element method. The strength analyses consist of flat crush[6] and edge crush tests[7], according to the packing industrial standard. In this study, the effect of flute height and pitch on the board strength were studied and the structure deformation was assumed to be linear elastic.

The finite element results reveal that flat crush strength increases when the flute pitch decreases. On the other hand, the effect of the flute height and flute pitch have no effect on the edge crush strength. However, this study is a preliminary study using finite element method.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณสยามบรรจภัณฑ์ ที่ให้การสนับสนุนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบและข้อมูลด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายอนิรุติ พาลี  
นายอนุสรณ์ วุฒิกรชัยสกุล  
นายอุกฤษ ระจิตดำรงค์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4.1 กระบวนการผลิต.....	2
1.4.2 คุณสมบัติของกระดาษลูกฟูก.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของกระดาษลูกฟูก.....	9
3.1.1 การแบ่งประเภทตามชนิดลอน.....	9
3.1.2 การแบ่งประเภทตามจำนวนชั้นกระดาษ.....	11
3.2 การทดสอบแรงดึง.....	12
3.3 การทดสอบความแข็งแรง.....	13
3.3.1 การทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ.....	13
3.3.2 การทดสอบความแข็งแรงชนิดเอ็ดครีซ.....	13
บทที่ 4 วิธีดำเนินงานและอุปกรณ์.....	14
4.1 อุปกรณ์.....	14
4.1.1 เครื่องทดสอบกระดาษ.....	14
4.1.2 ตัวประกอบกระดาษ.....	15
4.1.3 ชิ้นงานทดสอบชนิดแฟลชครีซ.....	15

	หน้า
4.1.4 ชิ้นงานทดสอบชนิดเอตครีช.....	16
4.2 การหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาศลูกฟูก.....	16
4.3 การทดสอบความแข็งแรงของกระดาศลูกฟูก.....	16
4.3.1 การทดสอบความแข็งแรงในแนวนอนหรือแฟลชครีช (Flat crush test, FCT).....	16
4.3.2 การทดสอบความแข็งแรงในแนวตั้งหรือเอตครีช (Edge crush test, ECT).....	17
4.4 วิธีการทดสอบความแข็งแรงของกระดาศลูกฟูก.....	18
4.4.1 การทดสอบชนิดแฟลชครีช.....	18
4.4.2 การทดสอบชนิดเอตครีช.....	18
4.5 ภาพรวมของการสร้างแบบจำลองชนิดแฟลชครีชและชนิดเอตครีช.....	18
4.5.1 แบบจำลองชนิดแฟลชครีช.....	18
4.5.1.1 แบบจำลอง.....	18
4.5.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ.....	20
4.5.1.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระ.....	20
4.5.1.4 การสร้างตาข่าย (Mesh).....	21
4.5.2 แบบจำลองชนิดเอตครีช.....	21
4.5.2.1 แบบจำลอง.....	21
4.5.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ.....	23
4.5.2.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระ.....	23
4.5.2.4 การสร้างตาข่าย (Mesh).....	24
4.6 การสร้างแบบจำลองกระดาศลูกฟูกโดยใช้โปรแกรม ABAQUS เวอร์ชัน 6.10.....	24
4.6.1 การกำหนดโครงสร้างลอน.....	24
4.6.2 การสร้างแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีช.....	26
4.6.3 การสร้างแบบจำลองการทดสอบชนิดเอตครีช.....	48
บทที่ 5 ผลการดำเนินงาน.....	53
5.1 ผลการทดสอบแรงดึง.....	53
5.1.1 การหาค่ายังมอดูลัสของกระดาศแผ่นเรียบในทิศทาง MD และ CD.....	54
5.1.1.1 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นเรียบในทิศทาง MD ( $E_{MD}$ ).....	55
5.1.1.2 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นเรียบในทิศทาง CD ( $E_{CD}$ ).....	56
5.1.2 การหาค่ายังมอดูลัสของกระดาศแผ่นทำลอนในทิศทาง MD และ CD.....	57
5.1.2.1 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นทำลอนในทิศทาง MD ( $E_{MD}$ ).....	58

	หน้า
5.1.2.2 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นทำลอนในทิศทาง CD ( $E_{CD}$ ) .....	58
5.1.3 การหาข้มอดูลัสในทิศทาง ZD มอดูลัสของแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนปัวซอง.....	59
5.2 การทดสอบความแข็งแรง.....	60
5.2.1 การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีแฟลชครีซ.....	60
5.2.2 การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีเอดครีซ.....	61
5.3 เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง 1 ลูกลอนเทียบกับผลของแบบจำลองเต็มแผ่น.....	62
5.4 การเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม.....	64
5.5 การเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างการทดสอบจริงกับแบบจำลอง.....	66
5.6 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของแบบจำลองลอน C ทั้ง 4 แบบ.....	68
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	73
6.1 สรุปผล.....	73
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	73

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ลักษณะเฉพาะของชนิดกระดาษลูกฟูก.....	3
ตารางที่ 1.2 รายละเอียดโครงสร้างลอน C แบบต่าง ๆ.....	4
ตารางที่ 3.1 ขนาดรูปร่างของโครงสร้างลอนชนิดต่างๆตามมาตรฐาน.....	10
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดโครงสร้างลอน C แบบต่าง ๆ.....	10
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	54
ตารางที่ 5.2 ค่า Elastic limit แรงดึงและระยะยืดที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของกระดาษแผ่นเรียบ.....	55
ตารางที่ 5.3 ค่า Elastic limit แรงดึงและระยะยืดที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของกระดาษแผ่นทำลอน.....	57
ตารางที่ 5.4 สรุปค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษแผ่นเรียบกับแผ่นลอนในทิศทาง MD และ CD.....	59
ตารางที่ 5.5 ค่านิจและแรงสูงสุดของการทดสอบชนิดแฟลชครีชและชนิดเอตครีช.....	62
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบแบบจำลองชนิดแฟลชครีช 1 ลูกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่น.....	62
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบแบบจำลองชนิดเอตครีช 1 ลูกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่น.....	63
ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่านิจของแบบจำลอง 1 ลูกลอนกับแบบจำลองเต็มแผ่น.....	63
ตารางที่ 5.9 แรงกดสูงสุดที่ขนาดเอลิเมนต์ต่างๆของแบบจำลองชนิดแฟลชครีช 1 ลูกลอน.....	64
ตารางที่ 5.10 แรงกดสูงสุดที่ขนาดเอลิเมนต์ต่างๆของแบบจำลองชนิดเอตครีช 1 ลูกลอน.....	65
ตารางที่ 5.11 ค่านิจที่ได้จากแบบจำลองชนิดแฟลชครีชของลอน C ทั้ง 4 แบบ.....	68
ตารางที่ 5.12 ค่านิจที่ได้จากแบบจำลองชนิดเอตครีชของลอน C ทั้ง 4 แบบ.....	69
ตารางที่ 5.13 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของแรงสูงสุดและ Take up ratio ของลอน C ทั้ง 4 แบบ ที่ได้จากแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีช.....	70
ตารางที่ 5.14 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของแรงสูงสุดและ Take up ratio ของลอน C ทั้ง 4 แบบ ที่ได้จากแบบจำลองการทดสอบชนิดเอตครีช.....	71

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 การกำหนดแกนในการอ้างอิงของแผ่นกระดาษ.....	2
รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของแผ่นกระดาษลูกฟูก.....	3
รูปที่ 1.3 โครงสร้างลอนกระดาษลูกฟูก.....	3
รูปที่ 1.4 มาตรฐานโครงสร้างลอนกระดาษลูกฟูก.....	4
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแผ่นกระดาษในการทดสอบแรงดึง กับแรงกด.....	5
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบจริงกับแบบจำลองชนิดแฟลชครีช.....	5
รูปที่ 2.3 การเผื่อระยะเยื้อง offset และไม่เผื่อระยะเยื้อง offset .....	7
รูปที่ 2.4 ทิศทางความอิสระ (Degree of freedom).....	7
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของกระดาษลูกฟูก.....	9
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของลอนชนิดต่างๆ.....	9
รูปที่ 3.3 มาตรฐานโครงสร้างลอนกระดาษลูกฟูก.....	10
รูปที่ 3.4 กระดาษลูกฟูกสองชั้น.....	11
รูปที่ 3.5 กระดาษลูกฟูกสามชั้น.....	11
รูปที่ 3.6 กระดาษลูกฟูกห้าชั้น.....	11
รูปที่ 3.7 กระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูกสองชั้น (Single face).....	12
รูปที่ 3.8 กระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูกสามชั้น (Single wall).....	12
รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบ Universal Tensile Test .....	14
รูปที่ 4.2 ตัวประกอบกระดาษ.....	15
รูปที่ 4.3 ชิ้นงานทดสอบชนิดแฟลชครีช.....	15
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานทดสอบชนิดเอดครีช.....	16
รูปที่ 4.5 การทดสอบชนิดแฟลชครีช.....	17
รูปที่ 4.6 การทดสอบชนิดเอดครีช.....	17
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีช.....	19
รูปที่ 4.8 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับทิศทางการเคลื่อนที่และทิศทางการหมุนของแบบจำลองการทดสอบ ชนิดแฟลชครีช.....	20

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.9 แบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซหลังจากการสร้างตาราง (Mesh).....	21
รูปที่ 4.10 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองการทดสอบชนิดเอดครีซ.....	22
รูปที่ 4.11 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับทิศทางการเคลื่อนที่และทิศทางการหมุนแบบจำลองการทดสอบชนิดเอดครีซ.....	23
รูปที่ 4.12 แบบจำลองการทดสอบชนิดเอดครีซหลังจากการสร้างตาราง (Mesh).....	24
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างโครงสร้างลอน.....	24
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างโครงสร้างลอน $C_2$ .....	25
รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของกระดาษแผ่นเรียบในทิศทาง MD และ CD .....	54
รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของกระดาษแผ่นทำลอนในทิศทาง MD และ CD .....	57
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวที่ได้จากการทดสอบจริงชนิดแฟลชครีซ.....	60
รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวที่ได้จากการทดสอบจริงชนิดเอดครีซ.....	61
รูปที่ 5.5 แบบจำลอง 1 ลูกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่นของการทดสอบชนิดแฟลชครีซ.....	62
รูปที่ 5.6 แบบจำลอง 1 ลูกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่นของการทดสอบชนิดเอดครีซ.....	63
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับจำนวนเอลิเมนต์ของการทดสอบชนิดแฟลชครีซ 1 ลูกลอน.....	64
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับจำนวนเอลิเมนต์ของการทดสอบชนิดเอดครีซ 1 ลูกลอน.....	65
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของ การทดสอบจริงและแบบจำลอง ชนิดแฟลชครีซ.....	66
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของ การทดสอบจริงและแบบจำลอง ชนิดเอดครีซ.....	67
รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของแบบจำลองชนิดแฟลชครีซ 1 ลูกลอนของลอน C ทั้ง 4 แบบ.....	68
รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของแบบจำลองชนิดเอดครีซ 1 ลูกลอนของลอน C ทั้ง 4 แบบ.....	69
รูปที่ 5.13 แผนภูมิระหว่างแรงกดกับลอน C ทั้ง 4 ชนิดของแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซ.....	70

รูปที่

หน้า

รูปที่ 5.14 แผนภูมิระหว่างแรงกดกับลอน C ทั้ง 4 ชนิดของแบบจำลองการทดสอบชนิดเอเดครีซ.....71



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในชีวิตประจำวันเราพบเห็นกล่องที่ใช้บรรจุสินค้าเพื่อการขนส่งที่มีลักษณะเป็นกล่องกระดาษ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วเป็นกล่องกระดาษลูกฟูกที่มีความจำเป็นในการบรรจุภัณฑ์เพราะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับสินค้า อีกทั้งกระดาษลูกฟูกเป็นวัสดุที่ทนทาน ราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถเพิ่มความสวยงามต่อบรรจุภัณฑ์ได้และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในด้านการผลิตตลอดจนสามารถรีไซเคิลได้ จึงเป็นที่นิยมใช้ในการขนส่งและบรรจุภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูกมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและพฤติกรรมทางกลซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต ถ้ากระดาษลูกฟูกมีความแข็งแรงมากก็จะช่วยให้สินค้าไม่เกิดความเสียหายแต่อาจต้องใช้ต้นทุนที่สูงในการผลิต ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ล้วนแล้วมีผลต่อกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรม จึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพด้วยการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานกำหนด

ปัจจุบันมีการพัฒนาและออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองโครงสร้างเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงของกระดาษลูกฟูก วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆได้สะดวก ซึ่งประหยัดเวลา ดังนั้นจึงทำการศึกษาการผลิตกระดาษลูกฟูกรวมถึงพฤติกรรมทางกลของกระดาษที่ใช้ในการผลิตและหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษเพื่อนำไปใช้ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ววิเคราะห์หาความแข็งแรงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความแข็งแรงที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาวิธีการผลิตกระดาษลูกฟูก

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมทางกลของกระดาษที่ใช้ในการผลิตและหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษที่จะใช้ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.3 ศึกษาการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความแข็งแรงซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบ

1.2.4 ศึกษากรรมวิธีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาษลูกฟูกตามมาตรฐานหรือที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 รูปร่างของกระดาษลูกฟูกที่ใช้งานจริงจะมีรูปร่างดังที่ได้ออกแบบไว้

1.3.2 คุณสมบัติของกระดาษมีคุณสมบัติแบบสม่ำเสมอ (โฮโมจีเนียส) และพฤติกรรมทางกลเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น

1.3.3 ไม่คิดอิทธิพลของกาวที่ใช้ในการยึดติดกระดาษลูกฟูก

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

โครงการนี้จัดทำเพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างกระดาษลูกฟูกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งต้องใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของวัสดุเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของกระดาษที่ใช้ในการผลิตและศึกษาหาค่าคุณสมบัติทางกลต่างๆจากการทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐาน หลังจากนั้นสร้างแบบจำลองขึ้นโดยใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงทั้งการทดสอบ ชนิดแฟลชครีซและชนิดเอดครีซ

#### 1.4.1 กระบวนการผลิต

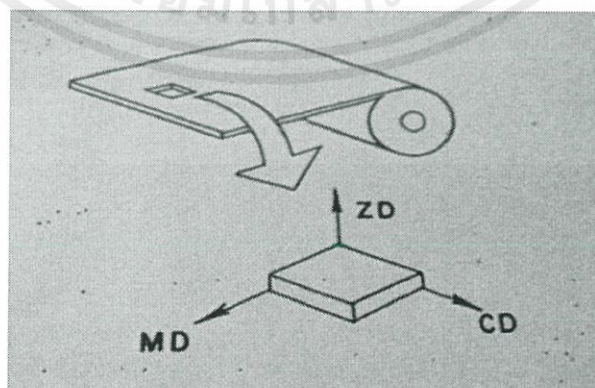
กระบวนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เป็นลอนแล้วจะผ่านไปลูกกาวเพื่อทา กาวที่ยอดลอน และประกบกับกระดาษผิวกลองด้านใน ได้เป็นแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว หลังจากนั้นจะผ่านลูกร้อนก่อนจะเข้าเครื่องทากาวที่ยอดลอนเพื่อนำไปประกบกับกระดาษผิวกลองด้านนอกเป็นแผ่นกระดาษลูกฟูกและจะผ่านการอบเพื่ออบให้กาวแห้งและไล่ความชื้นออกจากกระดาษ

จากนั้นมิตัดจะตัดแผ่นลูกฟูกตามความยาวให้เป็นขนาดตามต้องการแล้วนำไปเรียงซ้อนที่ชุดจัดเรียงกระดาษเพื่อส่งขายเป็นแผ่นกระดาษลูกฟูกหรือนำเข้าไปกระบวนการผลิตเป็นกล่องต่อไป

#### 1.4.2 คุณสมบัติของกระดาษลูกฟูก

วัสดุออร์โธทรอปิก คือวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลอิสระต่อกันทั้งสามแกน และมีคุณสมบัติทางกลต่างกันในแต่ละแกน

การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของกระดาษลูกฟูกจะพิจารณาตามแนวแกน ดังนี้



รูปที่ 1.1 การกำหนดแกนในการอ้างอิงของแผ่นกระดาษ [5]

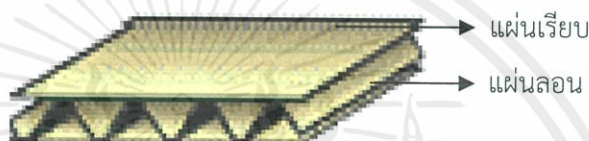
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MD - machine direction.      มีทิศทางแกน X  
 CD - cross machine direction. มีทิศทางแกน Y  
 ZD - thickness direction.    มีทิศทางแกน Z

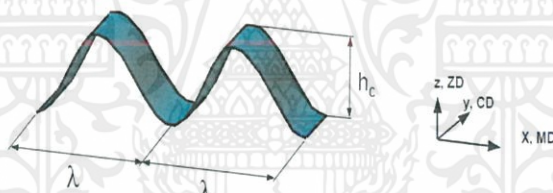
## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ศึกษาเฉพาะกระดาษจากกลุ่มสยามบรรจุกัญท์

1.5.2 ศึกษาโครงสร้างของกระดาษชนิดกระดาษลูกฟูกสามชั้น (single wall) ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นเรียบสองแผ่นและแผ่นลอนหนึ่งแผ่นโดยพิจารณาโครงสร้างลอน C แบบต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของแผ่นกระดาษลูกฟูก [9]



รูปที่ 1.3 โครงสร้างลอนกระดาษลูกฟูก [9]

ตารางที่ 1.1 ลักษณะเฉพาะของชนิดลอนกระดาษลูกฟูก [2]

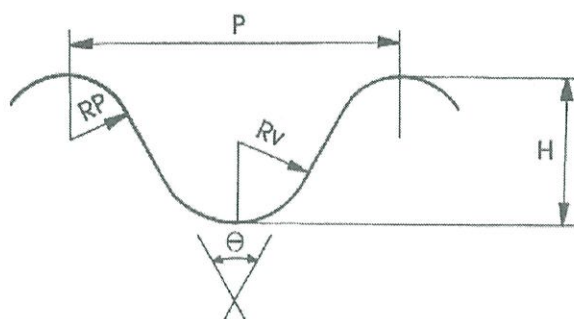
ชนิดลอน	จำนวนลอนต่อเมตร		ความสูงของลอน (mm)	
	มอก.	ยุโรปและสหรัฐอเมริกา	มอก.	ยุโรปและสหรัฐอเมริกา
A	115-125	100-120	4.5	4.67
B	165-175	145-165	2.4	2.46
C	135-145	120-140	3.6	3.61
E	305-315	280-310	1.2	1.57

1.5.3 วิเคราะห์ความแข็งแรงของการทดสอบชนิดแฟลชครีซและชนิดเอตครีซ

1.5.4 การศึกษาเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น

1.5.5 การศึกษาแบบจำลองจะไม่คำนึงถึงผลกระทบจากกาว อุณหภูมิและความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 มาตรฐานโครงสร้างลอนกระดาศลูกฟูก [1]

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดโครงสร้างลอน C แบบต่างๆ [1]

โครงสร้าง ลอน	ระยะพิทช์,P (mm)	ความสูงลอน,H (mm)	รัศมีลอนบน,RP (mm)	รัศมีลอนล่าง,RV (mm)
C <sub>1</sub>	7.13	3.68	1.14	1.44
C <sub>2</sub>	7.50	3.60	1.32	1.62
C <sub>3</sub>	7.80	3.65	1.42	1.72
C <sub>4</sub>	7.90	3.70	1.44	1.74

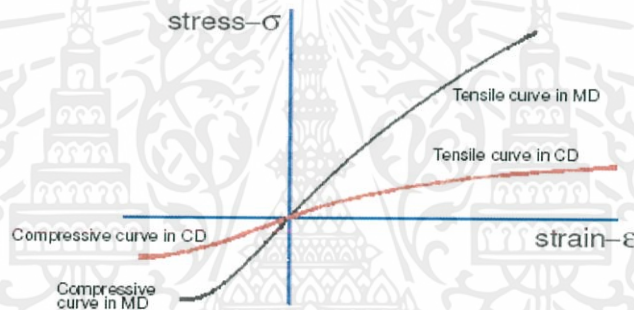
## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษากระบวนการผลิตกระดาศลูกฟูกที่กลุ่มสยามบรรจุกภัณฑ์
- 1.6.2 เตรียมชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบชนิดแฟลชครีซและชนิดเอตครีซ
- 1.6.3 ทำการทดสอบชนิดแฟลชครีซและชนิดเอตครีซ
- 1.6.4 ทำการศึกษาหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาศลูกฟูก
- 1.6.5 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.6.6 ทำการเปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบ
- 1.6.7 ศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างลอน C ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.6.8 สรุปผลการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

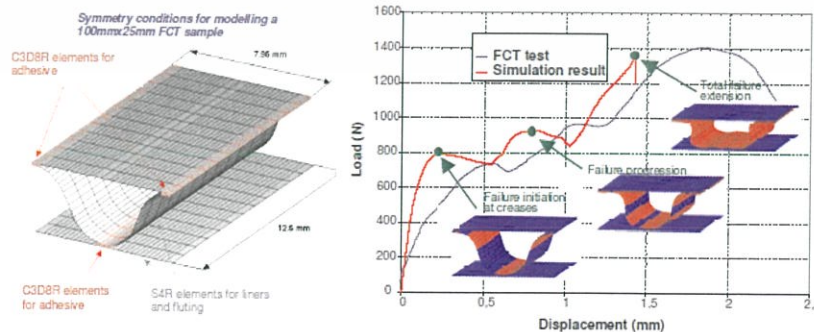
## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jimenez-Cabellero, M.A. et al. [8] อธิบายถึงพฤติกรรมทางกลของกระดาษแผ่น ขึ้นอยู่กับทิศทางของการเสียรูป เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุที่สร้างมาจากเส้นใยและตัวยึดจับเส้นใยที่มีการกระจายตัวที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนของกระดาษ พฤติกรรมที่ขึ้นกับทิศทางของกระดาษสามารถแบ่งออกได้สามทิศทางหลักตามลักษณะของกระบวนการผลิต คือ ทิศทางตามเครื่อง (MD) ทิศทางขวางเครื่อง (CD) และทิศทางตามความหนา (ZD) จะทำการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษจากการทดสอบแรงดึงและแรงกด สรุปได้ว่า ไม่ว่าจะทำการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติโดยแรงดึงหรือแรงกดในทิศทาง MD และ CD ค่าความชันของทิศทาง MD จะมีค่ามากกว่าค่าความชันของทิศทาง CD เสมอ



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแผ่นกระดาษในการทดสอบแรงดึงกับแรงกด

Jimenez-Cabellero, M.A. et al. [8] อธิบายการเปรียบเทียบผลการทดสอบชนิดเพลชครีซทั้งแผ่นกับแบบจำลองโครงสร้างกระดาษลูกฟูกโดยพิจารณาแค่หนึ่งลูกลอนแล้วนำมาคูณกับอัตราส่วนให้เท่ากับขนาดของแผ่นเต็มพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบจริงกับแบบจำลองชนิดเพลชครีซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าที่จุดยอดของกราฟทั้งสามยอดนั้นแสดงถึงรูปร่างความเสียหายของแผ่นลอนเมื่อได้รับแรงกดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

Allansson and Svard [4] อธิบายคุณสมบัติทางกลของแต่ละทิศทาง จะมีค่าที่แตกต่างกัน จึงกล่าวตามหลักทฤษฎีทางกลศาสตร์วัสดุได้ว่ากระดาษเป็นวัสดุแบบสมมาตรสามแกน(Orthotropic Material) ตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะจำเพาะของพฤติกรรมของวัสดุกำหนดไว้ว่า ความสัมพันธ์ของวัสดุแบบสมมาตรสามแกนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตามสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  คือ ค่าความเครียดในแนวแกนทิศทาง x, y, z

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  คือ ค่าความเครียดเฉือนในแนว xy, xz, yz

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  คือ ค่าความเค้นในแนวแกนทิศทาง x, y, z

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนว xy, xz, yz

$\nu_{ij}$  คือ ค่าอัตราส่วนปัวซองค์ เสียรูปด้านข้างของแนว j เมื่อมีแรงมาทำในแนว i

$E_i$  คือ ยังมอดูลัสในแนวแกนเมื่อมีแรงในทิศแกน i มากระทำ

$G_{ij}$  คือ มอดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบ ij

เราจะเห็นได้ว่ามี 9 ตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือ  $\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, E_x, E_y, E_z, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$

ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษ

จากความสัมพันธ์ของวัสดุกระดาษนั้นสามารถหาความสัมพันธ์อัตราส่วนปัวซองค์

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (2.2)$$

โดยทั่วไปแล้วสำหรับกระดาษ ทิศทาง X คือทิศทางของ MD ทิศทาง Y คือทิศทางของ CD และทิศทาง Z คือทิศทางของ ZD

ค่ายังมอดูลัสที่สามารถหาได้จากการทดสอบแรงดึงตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนว MD และ CD ค่าความชันนั้นคือค่ายังมอดูลัส (E) ในงานวิจัยของ Allansson and Svard [4] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสแรงเฉือน (G) กับค่ายังมอดูลัส (E) ไว้ดังนี้

$$E_{ZD} = \frac{E_{MD}}{200} \quad (2.3)$$

$$G_{MDCD} = 0.387\sqrt{E_{MD}E_{CD}} \quad (2.4)$$

$$G_{MDZD} = \frac{E_{MD}}{55} \quad (2.5)$$

$$G_{CDZD} = \frac{E_{CD}}{35} \quad (2.6)$$

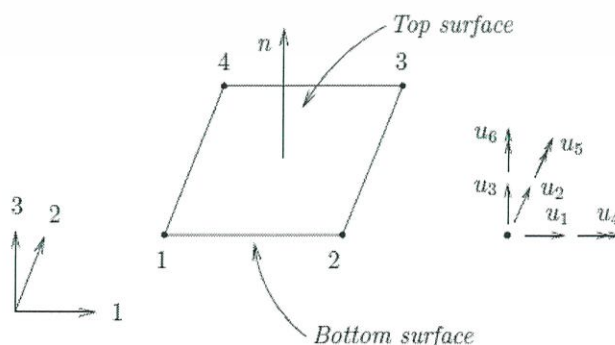
การสร้างแบบจำลองโครงสร้างกระดาศลูกฟูก

Allansson and Svard [4] แนะนำการแปะติดกันของแบบจำลองกระดาศแผ่นเรียบและแผ่นลอนที่มีโครงสร้างเป็นลูกคลื่นโดยไม่คำนึงถึงผลของความแข็งแรงของกาว ได้มีการทำแบบจำลองเพื่อระยะเยื้อง (offset) และไม่ได้เยื้อง ผลลัพธ์ที่ได้จะให้ค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.3 การเยื้องระยะเยื้อง offset และไม่เยื้องระยะเยื้อง offset

ชนิดของเอลิเมนต์ใช้ชนิด Shell element (S4R) เนื่องจากแผ่นกระดาศมีความบางมากและความอิสระ (Degree of freedom) ของแต่ละโหนดทั้ง 4 โหนดมีการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้น 3 ทิศทาง ( $u_1, u_2, u_3$ ) และมีการหมุนรอบแกนตัวเอง ( $u_4, u_5, u_6$ )



รูปที่ 2.4 ทิศทางความอิสระ (Degree of freedom)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกรินทร์ พงพิณิจรนา [3] แนะนำการเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยหลักการเลือกนั้นจะมีอยู่ 2 ข้อคือ

1. ขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้ต้องมีความละเอียดเพียงพอที่จะก่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในค่าที่ได้จากการประมวลผล
2. ขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้นั้นต้องมีความเหมาะสมในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลสรุปได้ว่าควรเลือกขนาดเอลิเมนต์ที่ให้ค่าจากการประมวลผลลู่เข้าใกล้ค่าจริง และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลไม่ควรมากเกินไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

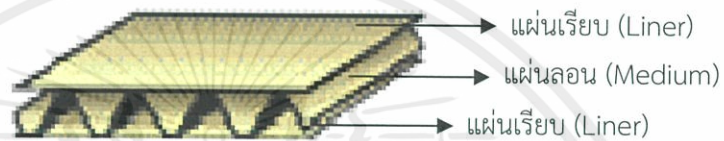
# บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของกระดาษลูกฟูก 3 ส่วนหลักๆ คือ 1.ทฤษฎีพื้นฐานของกระดาษลูกฟูก 2.การทดสอบแรงดึง 3.การทดสอบความแข็งแรงแรงชนิดแฟลชครีซและเอดครีซ

### 3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของกระดาษลูกฟูก

กระดาษลูกฟูกประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ กระดาษแผ่นเรียบ 2 แผ่น (Liner) และแผ่นลอน 1 แผ่น (Medium) มาประกบกันโดยมีแผ่นลอนอยู่ตรงกลาง

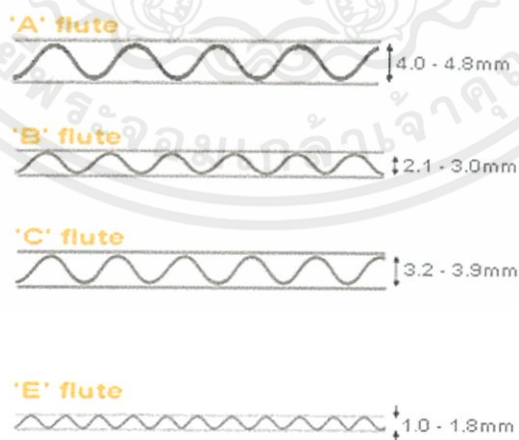


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของกระดาษลูกฟูก [9]

ประเภทของกระดาษลูกฟูกสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

#### 3.1.1 การแบ่งประเภทตามชนิดลอน

ลอนแต่ละประเภทจะมีขนาดความสูงและระยะพิทซ์แตกต่างกัน รวมไปถึงการนำไปใช้งาน บรรจุภัณฑ์ต่างกันด้วย สามารถแบ่งประเภทเป็นชนิดลอน A, B, C, E ชนิดลอน A เหมาะกับสินค้าที่ต้องการรับน้ำหนักการเรียงซ้อนมาก และไม่เน้นการพิมพ์ ชนิดลอน B เหมาะกับสินค้าที่รับน้ำหนักได้ด้วยตัวมันเอง เช่น กระจงเหล็ก ชนิดลอน C เป็นที่นิยมใช้กันมาก เหมาะกับสินค้าทั่วไปที่รับน้ำหนักได้ปานกลาง ชนิดลอน E รองรับการผลิตได้ดีที่สุด เหมาะกับกล่องไดคัทขนาดเล็ก หรือ กล่องออฟเซ็ท

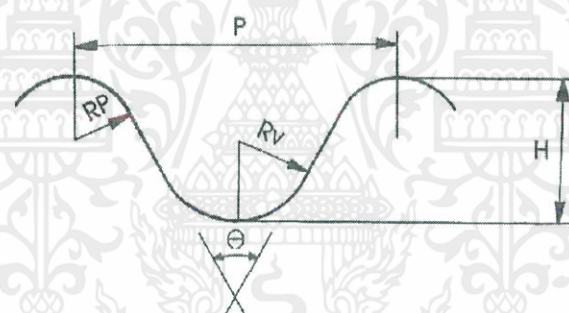


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของลอนชนิดต่างๆ [2]

ตารางที่ 3.1 ขนาดรูปร่างของโครงสร้างลอนชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน [2]

ชนิดลอน	จำนวนลอนต่อเมตร		ความสูงของลอน (mm)	
	มอก.	ยุโรปและสหรัฐอเมริกา	มอก.	ยุโรปและสหรัฐอเมริกา
A	115-125	100-120	4.5	4.67
B	165-175	145-165	2.4	2.46
C	135-145	120-140	3.6	3.61
E	305-315	280-310	1.2	1.57

งานวิจัยนี้เราจะพิจารณาเฉพาะลอน C แบบต่างๆกันดังนี้



รูปที่ 3.3 มาตรฐานโครงสร้างลอนกระตาศลูกฟูก [1]

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดโครงสร้างลอน C แบบต่างๆ [1]

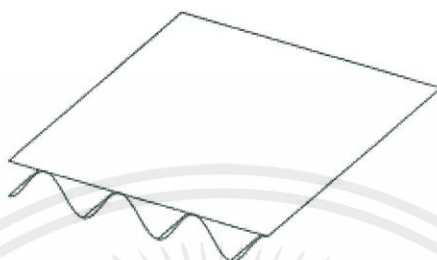
ลอน	ระยะพิทช์, P (mm)	ความสูง, H (mm)	รัศมีบน, RP (mm)	รัศมีล่าง, Rv (mm)	$\theta$
C <sub>1</sub>	7.13	3.68	1.14	1.44	≈ 60
C <sub>2</sub>	7.50	3.60	1.32	1.62	≈ 60
C <sub>3</sub>	7.80	3.65	1.42	1.72	≈ 60
C <sub>4</sub>	7.90	3.70	1.44	1.74	≈ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2. การแบ่งประเภทตามจำนวนชั้นกระดาษ

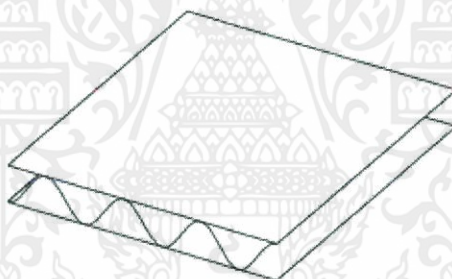
การแบ่งประเภทกระดาษลูกฟูกตามจำนวนชั้นกระดาษมีทั้งแบบสองชั้น สามชั้น และห้าชั้น สามารถแบ่งได้ดังนี้

แผ่นกระดาษลูกฟูกสองชั้น (Single face) คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษ 2 ชั้น ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อ่ง 1 ด้าน และลอนลูกฟูก 1 แถว นิยมใช้กันการกระแทก



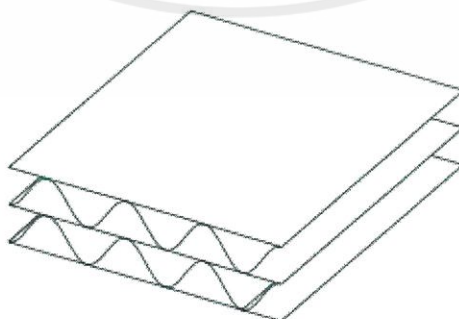
รูปที่ 3.4 กระดาษลูกฟูกสองชั้น [4]

แผ่นกระดาษลูกฟูกสามชั้น (Single wall) คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษรวม 3 ชั้น ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อ่ง 2 แผ่น และมีลอนลูกฟูก 1 แถว อยู่ระหว่างกระดาษทำผิวกล่อ่ง นิยมใช้รับน้ำหนักปานกลาง



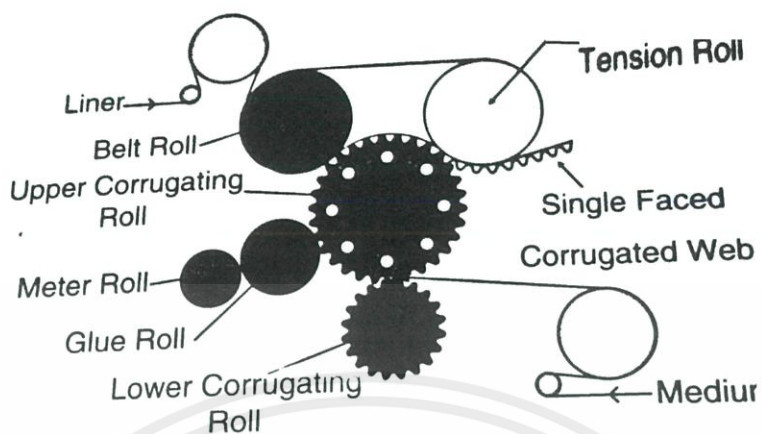
รูปที่ 3.5 กระดาษลูกฟูกสามชั้น [4]

แผ่นกระดาษลูกฟูกห้าชั้น (Double wall) คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษรวม 5 ชั้น ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อ่ง 3 แผ่น และมีลอนลูกฟูก 2 แถว อยู่ระหว่างกระดาษทำผิวกล่อ่งของแต่ละชั้น นิยมใช้รับน้ำหนักมาก

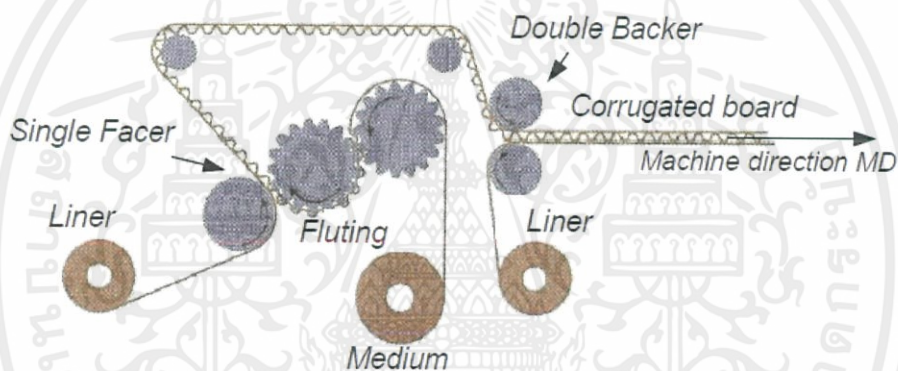


รูปที่ 3.6 กระดาษลูกฟูกห้าชั้น [4]

## กระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูก



รูปที่ 3.7 กระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูกสองชั้น (Single face) [1]



รูปที่ 3.8 กระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูกสามชั้น (Single wall) [4]

เริ่มต้นจากแผ่นกระดาษที่ใช้ทำลอนจะเข้าไปอยู่ระหว่างตัวเฟืองที่ขบกันอยู่ จะได้เป็นรูปร่างลอนแล้วนำไปที่ลูกกวาดเพื่อทากาวที่ยอดลอนและประกบกับกระดาษผิวกล่องด้านในได้เป็นแผ่นกระดาษลูกฟูกสองชั้น (Single face) ดังรูปที่ 3.7

หลังจากนั้นจะผ่านลูกร้อนก่อนจะเข้าเครื่องทากาวที่ยอดลอนเพื่อนำไปประกบกับกระดาษผิวกล่องด้านนอกเป็นแผ่นกระดาษลูกฟูกสามชั้น (Single wall) ดังรูปที่ 3.8 และจะผ่านการอบเพื่อทำให้กาวแห้งและไล่ความชื้นออกจากกระดาษ

จากนั้นมีดตัดจะตัดแผ่นลูกฟูกตามความยาวให้เป็นขนาดตามต้องการแล้วนำไปเรียงซ้อนที่ชุดจัดเรียงกระดาษเพื่อส่งขายเป็นแผ่นกระดาษลูกฟูกหรือนำเข้าไปกระบวนการผลิตเป็นกล่องต่อไป

### 3.2 การทดสอบแรงดึง

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษ โดยพิจารณาทิศทางแรงดึง MD และ CD จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ค่าความชันนำไปหาค่า Young's Modulus ของ

แต่ละทิศทางได้ตามมาตรฐาน TAPPI-494 [10] ค่าคุณสมบัติตัวอื่น ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3) - (2.6) สำหรับค่าอัตราส่วนปิวของค้ำอิงจาก [4]

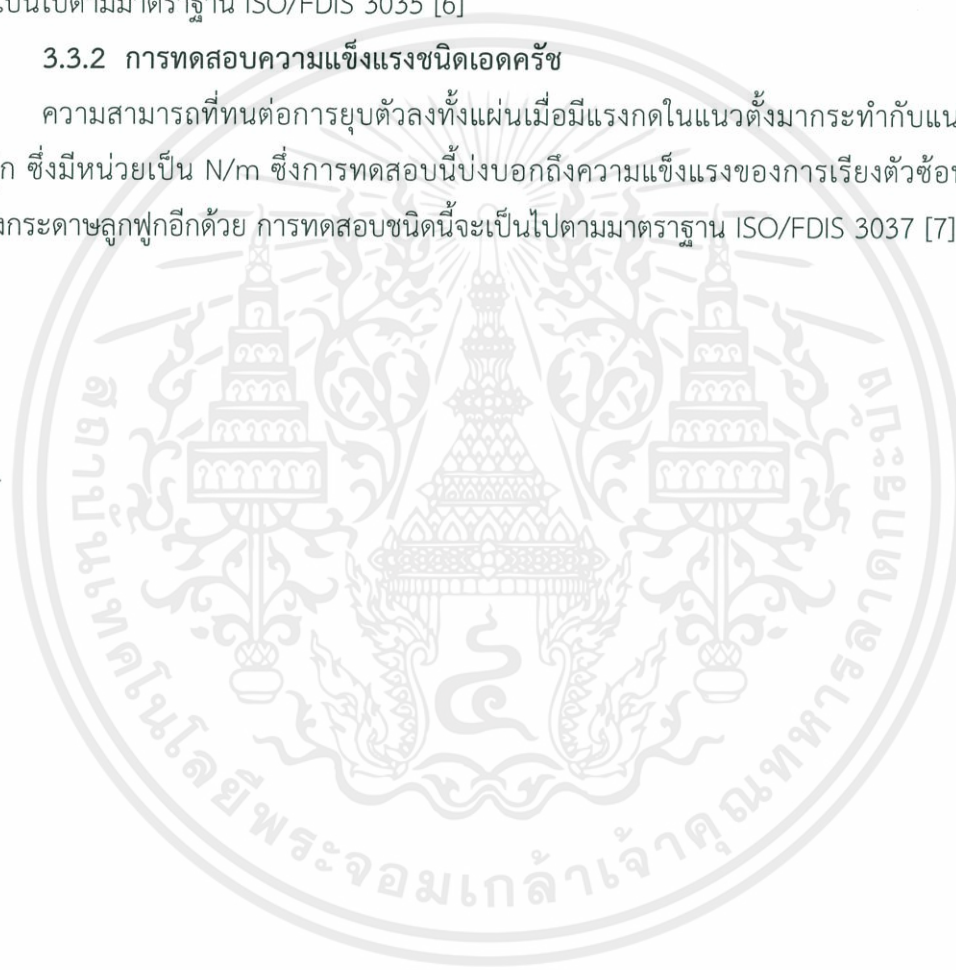
### 3.3 การทดสอบความแข็งแรง

#### 3.3.1 การทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ

การทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ คือ ความสามารถที่ทนต่อการยุบตัวของลูกฟูกเมื่อมีแรงกดในแนวตั้งมากกระทำกับแนวนอนของลูกฟูก ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m ซึ่งการทดสอบนี้บ่งบอกถึงความแข็งแรงของการบรรจุภัณฑ์ภายในกล่องกระดาษลูกฟูกอีกด้วย การทดสอบความแข็งแรงชนิดนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐาน ISO/FDIS 3035 [6]

#### 3.3.2 การทดสอบความแข็งแรงชนิดเอตครีซ

ความสามารถที่ทนต่อการยุบตัวลงทั้งแผ่นเมื่อมีแรงกดในแนวตั้งมากกระทำกับแนวตั้งของลูกฟูก ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m ซึ่งการทดสอบนี้บ่งบอกถึงความแข็งแรงของการเรียงตัวซ้อนกันของกล่องกระดาษลูกฟูกอีกด้วย การทดสอบชนิดนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐาน ISO/FDIS 3037 [7]



## บทที่ 4

# วิธีดำเนินงานและอุปกรณ์

แบ่งออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือการหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษลูกฟูกซึ่งได้รับข้อมูลการทดสอบมาจากกลุ่มสยามบรรจุกัมภ์ ส่วนที่สองคือการทดสอบความแข็งแรง และส่วนสุดท้ายคือการสร้างแบบจำลอง การทดสอบความแข็งแรงจะแบ่งออกเป็นชนิดแฟลชครีซและชนิดเอดครีซโดยเราจะนำกราฟ ระหว่างแรงและระยะยวบตัวที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกัน

### 4.1 อุปกรณ์

#### 4.1.1 เครื่องทดสอบกระดาษ

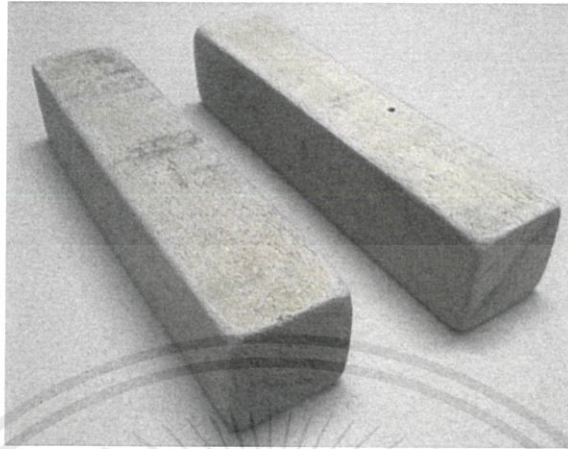
เครื่องทดสอบ Universal Tensile Test โทลด์เซลล์ขนาด 5 kN ดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบ Universal Tensile Test

#### 4.1.2 ตัวประกอบกระดาศ

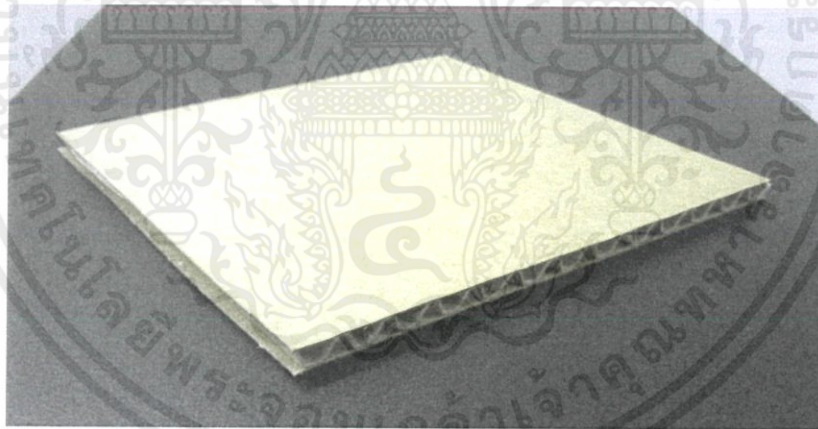
ตัวประกอบกระดาศ ทำจากไม้ ขนาด 20 mm x 20 mm x 100 mm ดังแสดงในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวประกอบกระดาศ

#### 4.1.3 ชิ้นงานทดสอบชนิดเพลชกรีซ

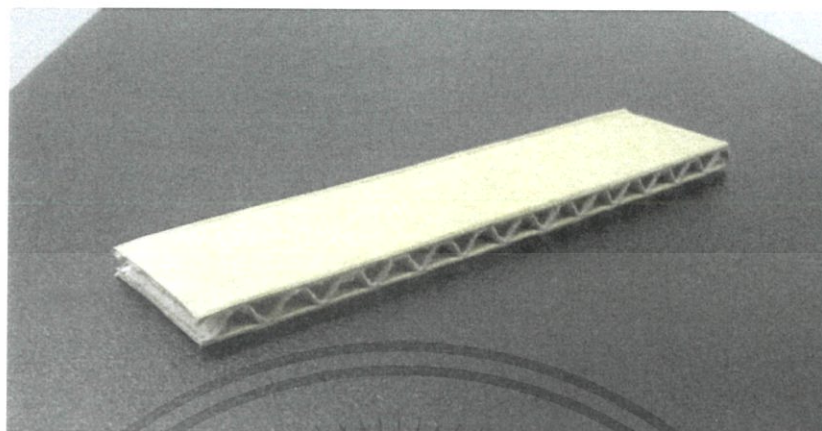
ชิ้นงานทดสอบชนิดเพลชกรีซ ขนาด 100 mm x 100 mm ดังแสดงในรูป 4.3



รูปที่ 4.3 ชิ้นงานทดสอบชนิดเพลชกรีซ

#### 4.1.4 ชิ้นงานทดสอบชนิดเอตครีซ

ชิ้นงานทดสอบชนิดเอตครีซ ขนาด 100 mm x 25 mm ดังแสดงในรูป 4.4



รูปที่ 4.4 ชิ้นงานทดสอบชนิดเอตครีซ

#### 4.2 การหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษลูกฟูก

การหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษลูกฟูกได้รับการเอื้อเฟื้อข้อมูลจากกลุ่มสยามบรรจุกัมมันท์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าความเค้นและความเครียด โดยจะแบ่งข้อมูลเป็น ทิศทางตามเครื่อง (machine direction (MD)) และ ทิศทางตามขวางเครื่อง (cross machine direction (CD)) โดยจะนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษ

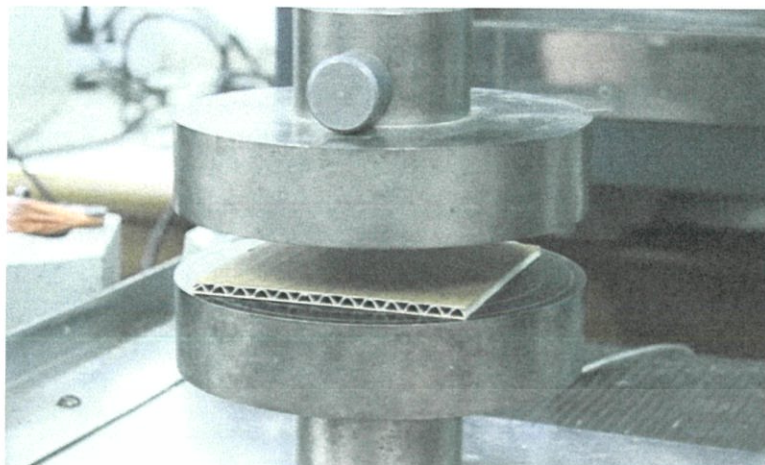
#### 4.3 การทดสอบความแข็งแรงของกระดาษลูกฟูก

การทดสอบความแข็งแรงของกระดาษลูกฟูกรูปแบบลอน C<sub>2</sub> นั้นใช้เครื่องทดสอบ Universal Tensile Test ซึ่งเราสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 วิธี คือ

##### 4.3.1 การทดสอบความแข็งแรงในแนวนอนหรือแฟลชครีซ (Flat crush test, FCT)

ความต้านทานแรงกดในแนวนอน หมายถึงความสามารถที่ทนต่อการยุบตัวของลูกฟูกเมื่อมีแรงกดในแนวตั้งมากกระทำกับแนวนอนของลูกฟูก ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m ซึ่งการทดสอบนี้บ่งบอกถึงความแข็งแรงของการบรรจุภัณฑ์ภายในกล่องกระดาษลูกฟูก

การทดสอบชนิดนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/FDIS 3035 [6] โดยทดสอบด้วยชิ้นงานขนาด 100 mm x 100 mm ใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 kN ความเร็วในการกดขึ้นงาน 12.5 mm/min จำนวนชิ้นงานที่นำมาทดสอบจำนวน 10 ชิ้น

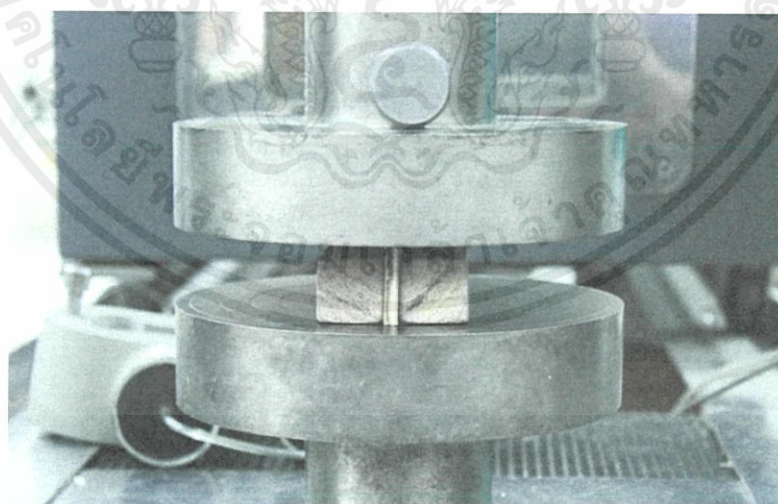


รูปที่ 4.5 การทดสอบชนิดแฟลชครีช

#### 4.3.2 การทดสอบความแข็งแรงในแนวตั้งหรือเอ็ดครีช (Edge crush test, ECT)

ความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง หมายถึงความสามารถที่ทนต่อการยุบตัวลงทั้งแผ่นเมื่อมีแรงกดในแนวตั้งมากกระทำกับแนวตั้งของลูกฟูก ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m ซึ่งการทดสอบนี้บ่งบอกถึงความแข็งแรงของการเรียงตัวซ้อนกันของกล่องกระดาษลูกฟูก

การทดสอบชนิดนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/FDIS 3037 [7] โดยทดสอบด้วยชิ้นงานขนาด 100 mm x 25 mm ใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 kN ความเร็วในการกดชิ้นงาน 12.5 mm/min จำนวนชิ้นงานที่นำมาทดสอบจำนวน 10 ชิ้น การทดสอบจะต้องมีตัวประคองให้กับชิ้นงานซึ่งมีขนาดเท่ากับ 20 mm x 20 mm x 100 mm



รูปที่ 4.6 การทดสอบชนิดเอ็ดครีช

## 4.4 วิธีการทดสอบความแข็งแรงของกระดาศลูกฟูก

### 4.4.1 การทดสอบชนิดแฟลชครีซ

4.4.1.1 นำกระดาศลูกฟูกมาตัดให้ได้ขนาด 100 mm x 100 mm จำนวน 10 ชิ้น

4.4.1.2 ทำการตั้งค่าให้กับเครื่องทดสอบให้มีความเร็วในการกดขึ้นงานเท่ากับ

12.5 mm/min และกำหนดให้ระยะในการกดขึ้นงานเท่ากับ 2.5 mm

4.4.1.3 นำชิ้นทดสอบมาวางบนเครื่องทดสอบ

4.4.1.4 ทำการกดขึ้นงานและบันทึกผลการทดสอบ

### 4.4.2 การทดสอบชนิดเอดครีซ

4.4.2.1 นำกระดาศลูกฟูกมาตัดให้ได้ขนาด 100 mm x 25 mm จำนวน 10 ชิ้น

4.4.2.2 ทำการตั้งค่าให้กับเครื่องทดสอบให้มีความเร็วในการกดขึ้นงานเท่ากับ

12.5 mm/min และกำหนดให้ระยะในการกดขึ้นงานเท่ากับ 2.5 mm

4.4.2.3 นำชิ้นทดสอบมาวางบนเครื่องทดสอบและใช้ตัวประคองมาประคองขึ้นทดสอบ

4.4.2.4 ทำการกดขึ้นงานและบันทึกผลการทดสอบ

## 4.5 ภาพรวมของการสร้างแบบจำลองชนิดแฟลชครีซและชนิดเอดครีซ

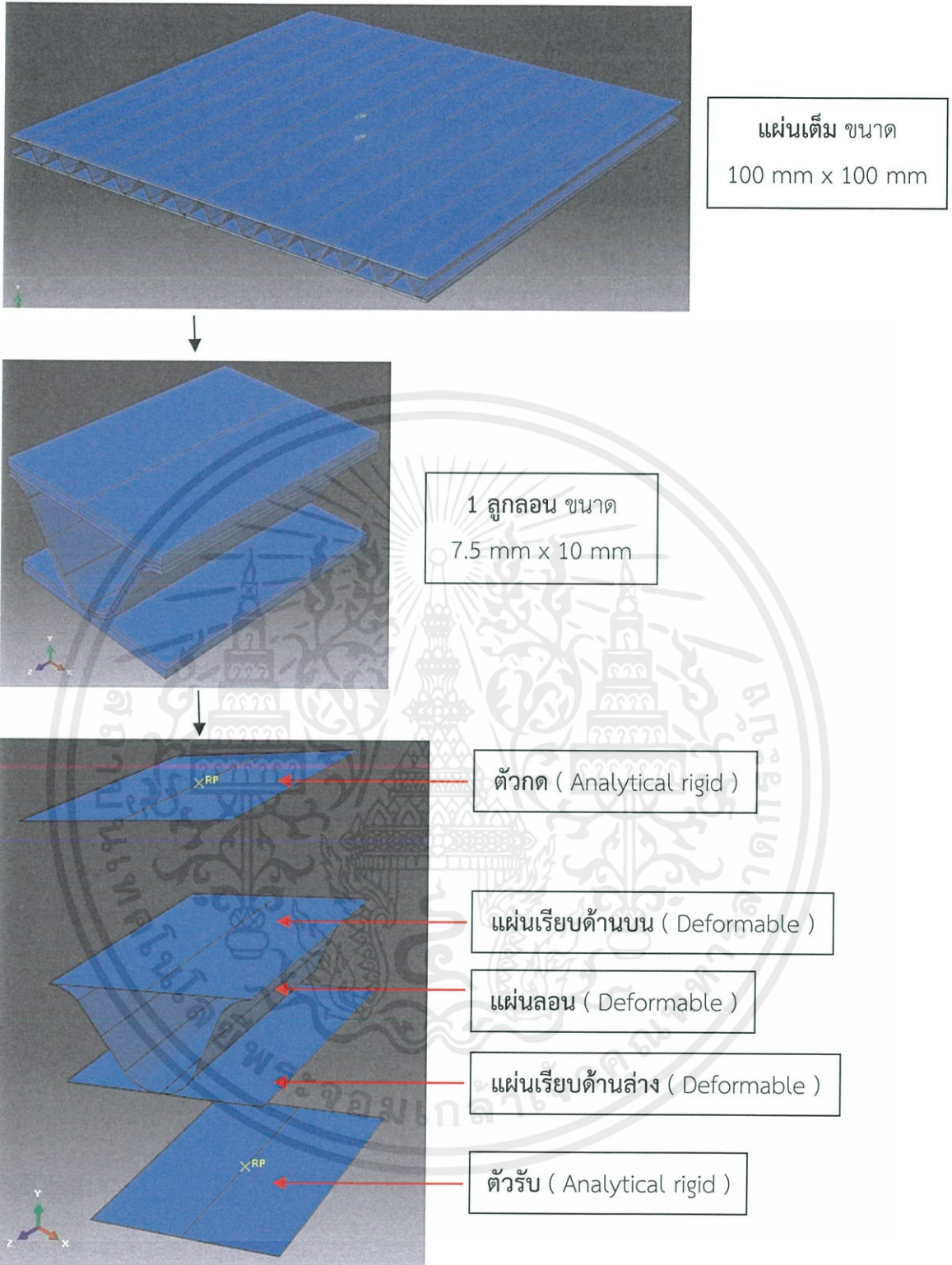
เบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระดาศลูกฟูก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อันเกิดจากปัจจัยของรูปแบบโครงสร้างลอน ที่มีลักษณะแตกต่างกันโดยการทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซและชนิดเอดครีซ การวิเคราะห์ดังกล่าวถูกดำเนินการด้วยโปรแกรม ABAQUS เวอร์ชัน 6.10 เพื่อให้บรรลุผลโดยดำเนินการดังนี้

1. สร้างแบบจำลองขนาดจริง แบบ 3 มิติ
2. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง
3. กำหนดคุณสมบัติการสัมผัสกันระหว่างผิว
4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระ
5. สร้างตาข่าย (Mesh)

### 4.5.1 แบบจำลองชนิดแฟลชครีซ

#### 4.5.1.1 แบบจำลอง

โครงสร้างแบบจำลองการทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ ตามมาตรฐานขนาด 100 mm x 100 mm ซึ่งโครงสร้างกระดาศลูกฟูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ 1) ชั้นผิวบน 2) ชั้นลอน และ 3) ชั้นผิวล่าง แต่ตามหลักการสมมาตร จะวิเคราะห์กระดาศเพียง 1 ลูกลอน นำมาวิเคราะห์โดยการจำลองแบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วย แผ่นเรียบด้านบน แผ่นเรียบด้านล่าง แผ่นลอน ตัวกด และตัวรับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซ

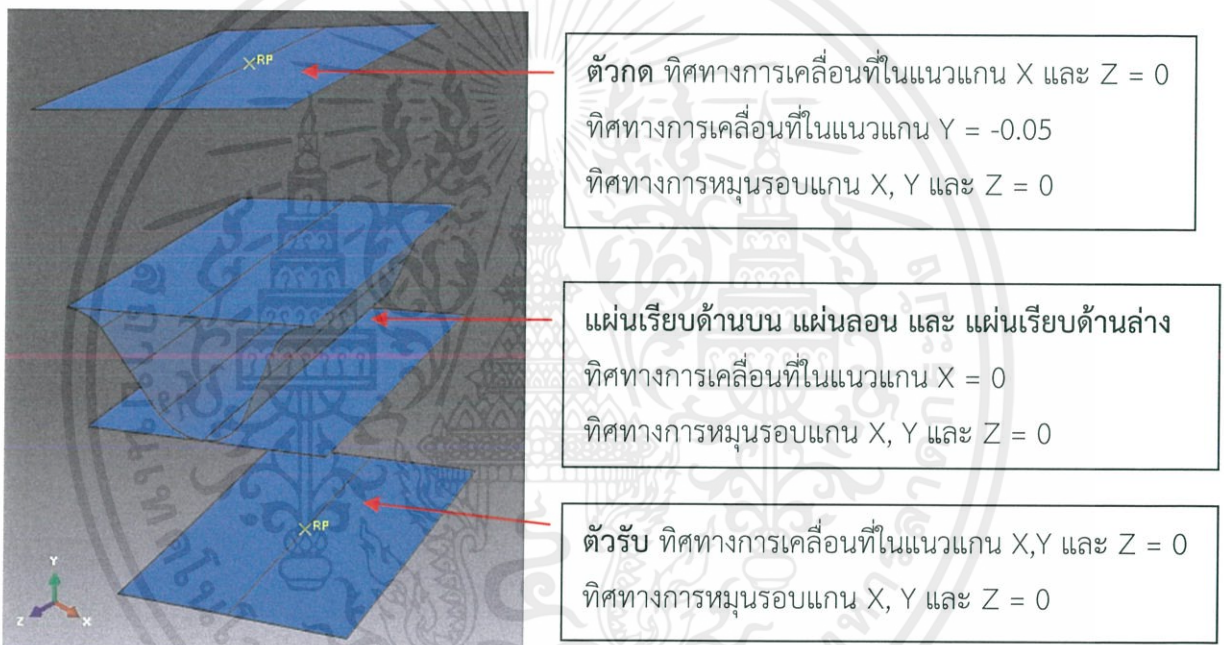
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติทางกลของกระดาษลูกฟูกเนื่องด้วยกระดาษเป็นวัสดุแบบสมมาตรสามแนวแกน (Orthotropic Material) ซึ่งหมายความว่าในแต่ละชั้นกระดาษจำเป็นต้องมีตัวแปรถึง 9 ตัว ชั้นผิวบนและชั้นผิวล่างจะใช้คุณสมบัติเดียวกัน ซึ่งคุณสมบัติทั้งหมดแสดงไว้ตารางที่ 5.4 ส่วนตัวกดและตัวรับกำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Analytical rigid)

#### 4.5.1.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระ

เนื่องจากการวิเคราะห์เพียง 1 ลูกลอนเงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณา คือ 1) เงื่อนไขนี้สร้างขึ้นเพื่อยึดฐานตัวรับกระดาษให้อยู่กับที่โดยการยึดทั้ง 3 ทิศทางการเคลื่อนที่และยึดใน 3 ทิศทางการหมุน 2) เงื่อนไขนี้สร้างขึ้นเพื่อยึดขอบของแบบจำลองในด้านข้างโดยกำหนดให้ระนาบ X ให้อยู่กับที่ 3) เงื่อนไขการกำหนดระยะที่ต้องการให้ตัวกดเลื่อนลง เงื่อนไขขอบเขตแสดงดังรูปที่ 4.8

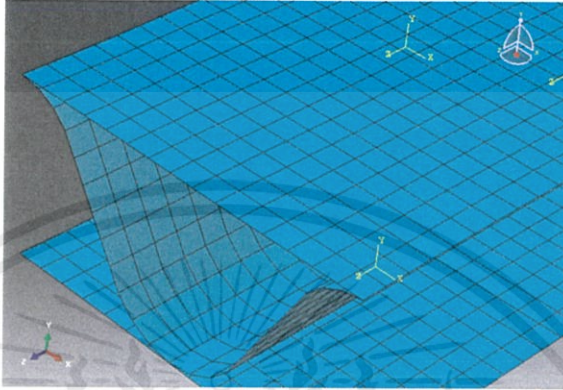


รูปที่ 4.8 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับทิศทางการเคลื่อนที่และทิศทางการหมุนของแบบจำลองการทอด

สอบชนิดแฟลชครีซ

#### 4.5.1.4 การสร้างตาข่าย (Mesh)

เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ คือ Shell element (S4R) โดยถูกใช้กับแผ่นเรียบด้านบน แผ่นเรียบด้านล่าง และแผ่นลอน ส่วนตัวกดและตัวรับไม่ต้องสร้างตาข่าย (Mesh) แบบจำลองหลังจากใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาราง (Mesh) ดังแสดงในรูปที่ 4.9

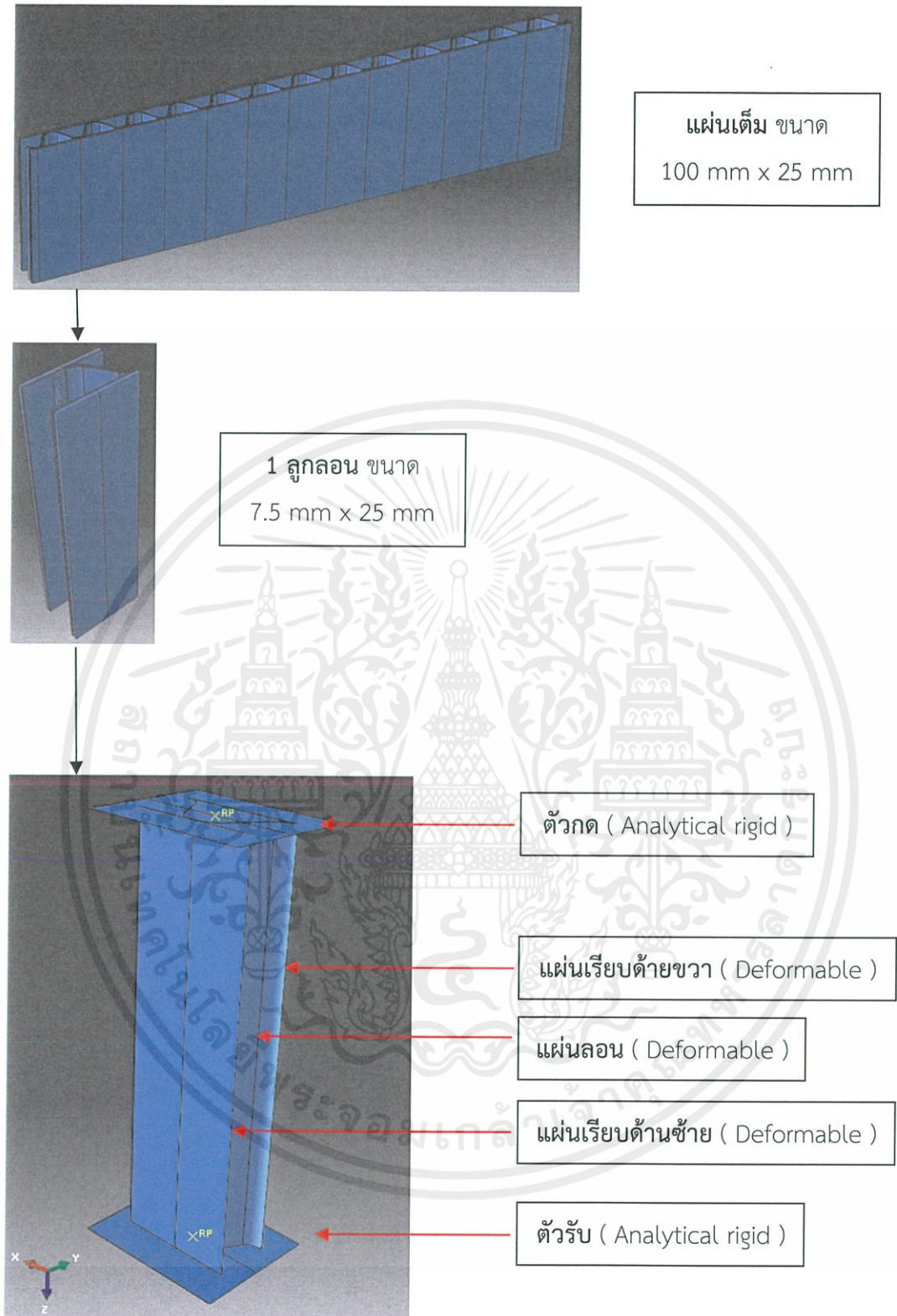


รูปที่ 4.9 แบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซหลังจากการสร้างตาราง (Mesh)

#### 4.5.2 แบบจำลองชนิดเอตครีซ

##### 4.5.1.1 แบบจำลอง

โครงสร้างแบบจำลองการทดสอบความแข็งแรงชนิดเอตครีซ ตามมาตรฐานขนาด 100 mm x 25 mm ซึ่งโครงสร้างกระดาดลูกฟูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ 1) ชั้นผิวด้านขวา 2) ชั้นลอน และ 3) ชั้นผิวซ้าย แต่ตามหลักการสมมาตร จะวิเคราะห์กระดาดเพียง 1 ลูกลอน นำมาวิเคราะห์โดยการจำลองแบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วย แผ่นเรียบด้านขวา แผ่นเรียบด้านซ้าย แผ่นลอน ตัวกด และตัวรับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองการทดสอบชนิดเอคคริช

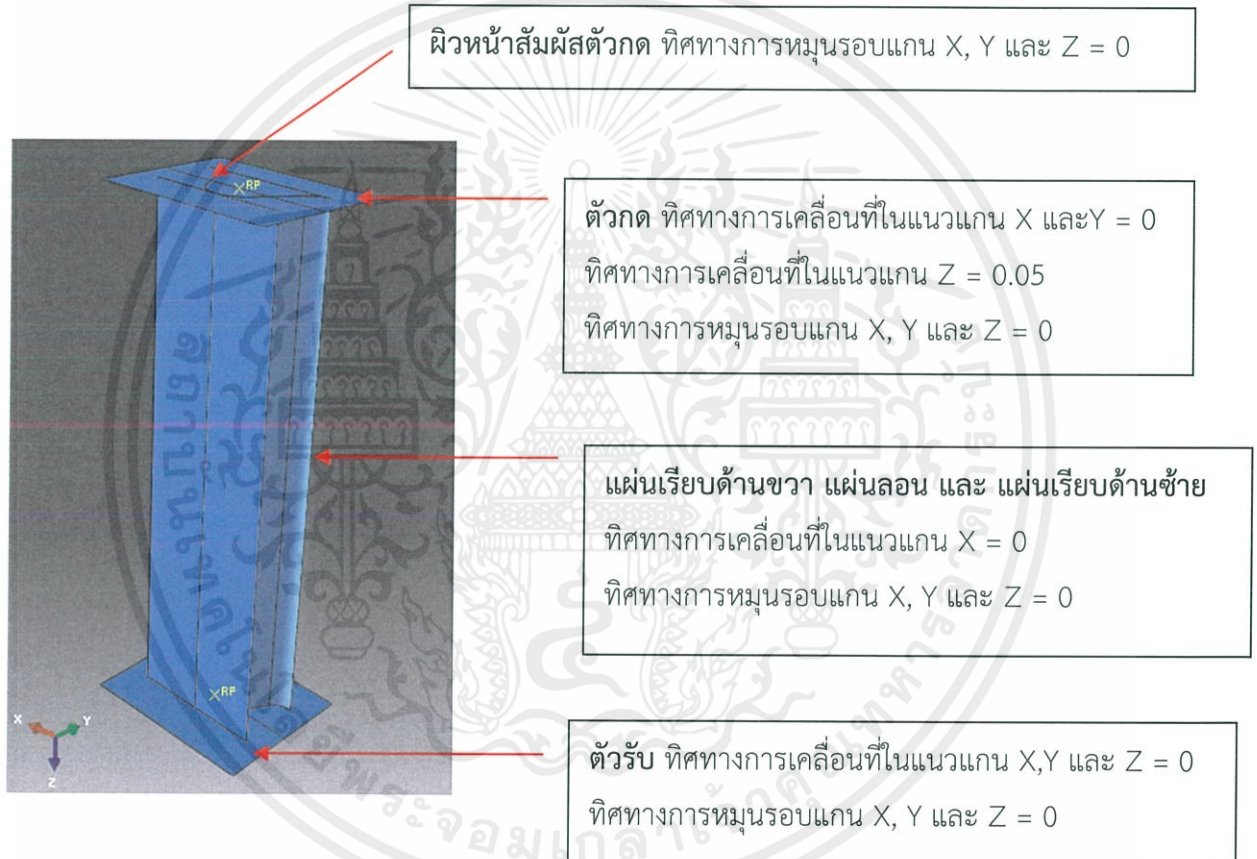
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ

การวิเคราะห์ความแข็งแรงชนิดเอเดครีซ คุณสมบัติทางกลของกระดาษลูกฟูกจะใช้คุณสมบัติเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความแข็งแรงชนิดเพลชคัช

#### 4.5.1.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระ

เป็นการวิเคราะห์เพียง 1 ลูกลอนเช่นกัน เงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาคือ 1) เงื่อนไขนี้สร้างขึ้นเพื่อยึดฐานของตัวรับให้อยู่กับที่โดยการยึดทั้ง 3 ทิศทางการเคลื่อนที่และยึดใน 3 ทิศทางการหมุน 2) เงื่อนไขนี้สร้างขึ้นเพื่อยึดขอบของแบบจำลองในด้านข้างโดยกำหนดให้ระนาบ X ให้อยู่กับที่ 3) เงื่อนไขการกำหนดระยะที่ต้องการให้ตัวกดเคลื่อนลง 4) เงื่อนไขนี้สร้างขึ้นเพื่อกำหนดผิวหน้า ที่สัมผัสกับตัวกดโดยยึดให้ทิศทางการหมุนทั้งสามให้อยู่กับที่ เงื่อนไขขอบเขตแสดงดังรูปที่ 4.11

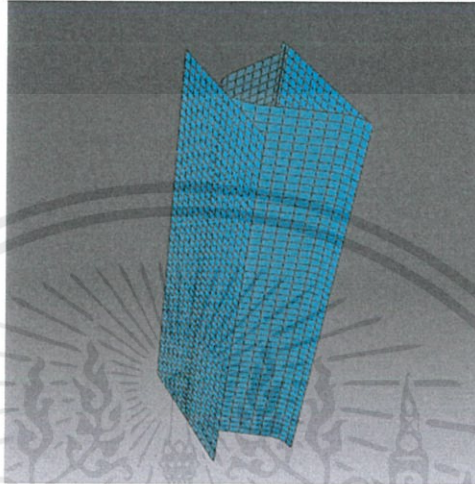


รูปที่ 4.11 เงื่อนไขขอบเขตเกี่ยวกับทิศทางการเคลื่อนที่และทิศทางการหมุนของแบบจำลองการ

ทดสอบชนิดเอเดครีซ

#### 4.5.1.4 การสร้างตาข่าย (Mesh)

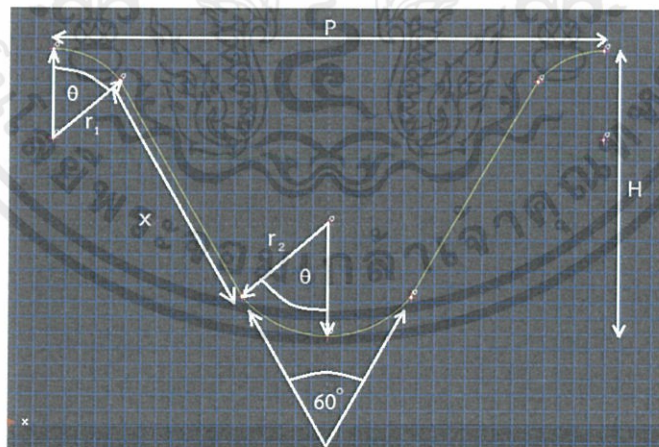
เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ คือ Shell element (S4R) โดยถูกใช้กับแผ่นเรียบด้านขวา แผ่นเรียบด้านซ้าย และแผ่นลอน ส่วนตัวกดและตัวรับไม่สร้างตาข่าย (Mesh) แบบจำลองหลังจากใช้เอลิเมนต์สามารถสร้างตาราง (Mesh) ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แบบจำลองการทดสอบชนิดแอตครีซหลังจากการสร้างตาราง (Mesh)

### 4.6 การสร้างแบบจำลองกระดาดลูกฟูกโดยใช้โปรแกรม ABAQUS เวอร์ชัน 6.10

#### 4.6.1 การกำหนดโครงสร้างลอน



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างโครงสร้างลอน

สมการความสัมพันธ์ของโครงสร้างลอน

$$r_1 \sin \theta + x \cos 60 + r_2 \sin \theta = \frac{P}{2} \quad (4.1)$$

$$r_1 - r_1 \cos \theta + x \sin 60 + r_2 - r_2 \cos \theta = H \quad (4.2)$$

$$\text{take up ratio} = (r_1 \theta + x + r_2 \theta) \div \frac{P}{2} \quad (4.3)$$

$r_1$ , RP คือ รัศมีลอนบน แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

$r_2$ , RV คือ รัศมีลอนล่าง แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

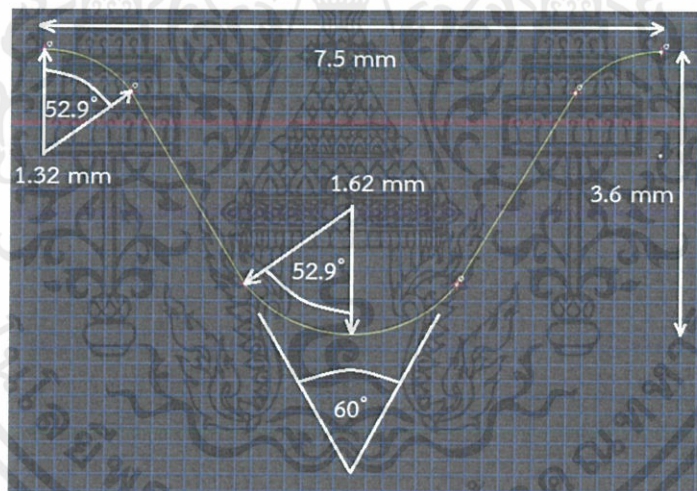
H คือ ความสูงลอน แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

P คือ ระยะพิทช์ แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

มุม  $60^\circ$  คือ มุมที่กำหนดมา แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

มุม  $\theta$  คือ มุมขนาด  $52.9$  ที่ได้จากการคำนวณ

Take up ratio คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นลอนกับความยาวของแผ่นเรียบ

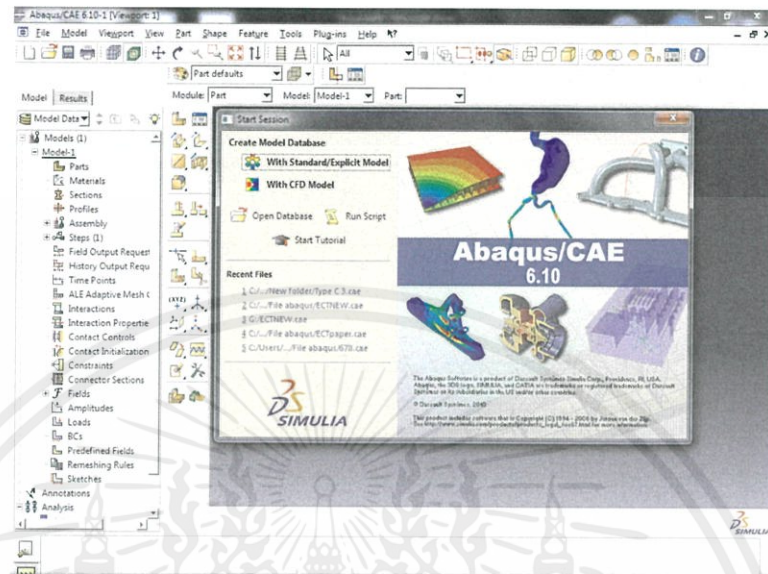


รูปที่ 4.14 ตัวอย่างโครงสร้างลอน  $C_2$

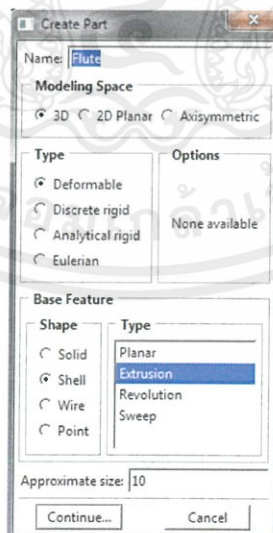
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 การสร้างแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีช

ขั้นตอนทั้งหมดประกอบไปด้วย 9 ส่วนหลักๆ ดังนี้ คือ

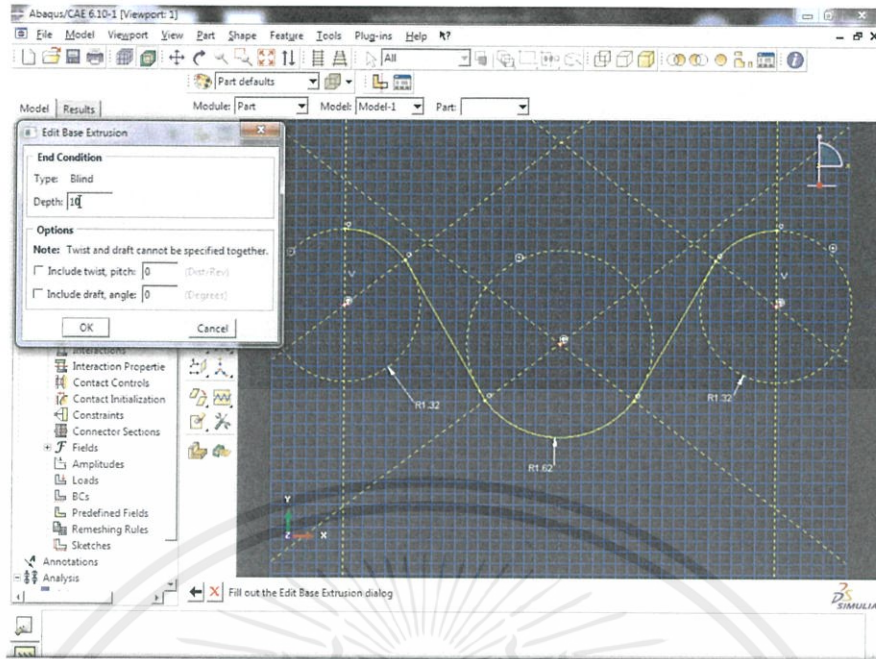


- 1) Part ในส่วนของ Part จะเป็นขั้นตอนการสร้างชิ้นงานซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นเรียบ 2 แผ่น, แผ่นลอน 1 แผ่น, ตัวกด 1 แผ่น และตัวรับ 1 แผ่น ( ซึ่งในที่นี้เราจะสร้างชิ้นงานเพียงหนึ่งลูกลอนเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณของโปรแกรม )
  - คลิก Create Part ตั้งชื่อชิ้นงานที่จะสร้าง ช่องของ Shape ให้เลือก Shell ช่องของ Type ให้เลือก Extrusion ช่องของ Approximate size ให้ใส่ 10 ( ในที่นี้เราจะวัดในหน่วยของmm ) แล้วคลิกที่ Continue... จะปรากฏหน้าต่างให้วาดชิ้นงานในแบบสองมิติ



- หลังจากวาดชิ้นงานเสร็จแล้วให้คลิก Done ตรงบริเวณด้านล่าง แล้วจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้เราใส่ค่าความลึกของชิ้นงาน แล้วคลิก OK

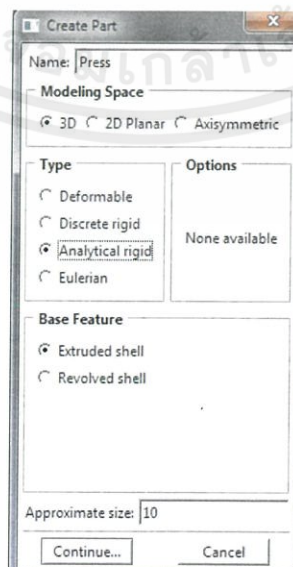
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ตัวอย่างแผ่นลอนเมื่อสร้างเสร็จ

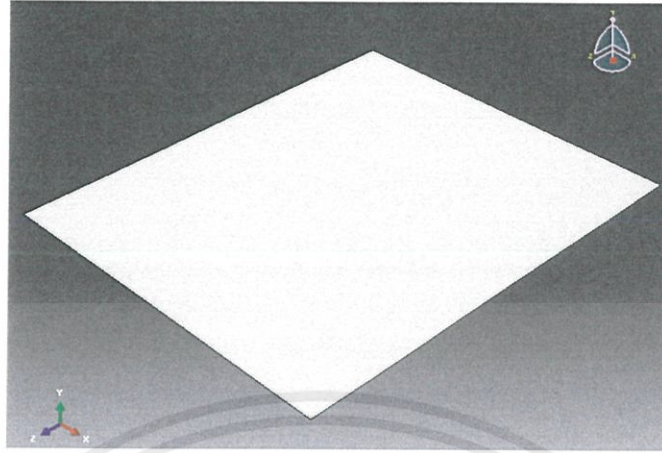


- แต่ในการสร้างหัวกดและฐานรับชิ้นงาน ในช่องของ Type ให้เลือก Analytical rigid



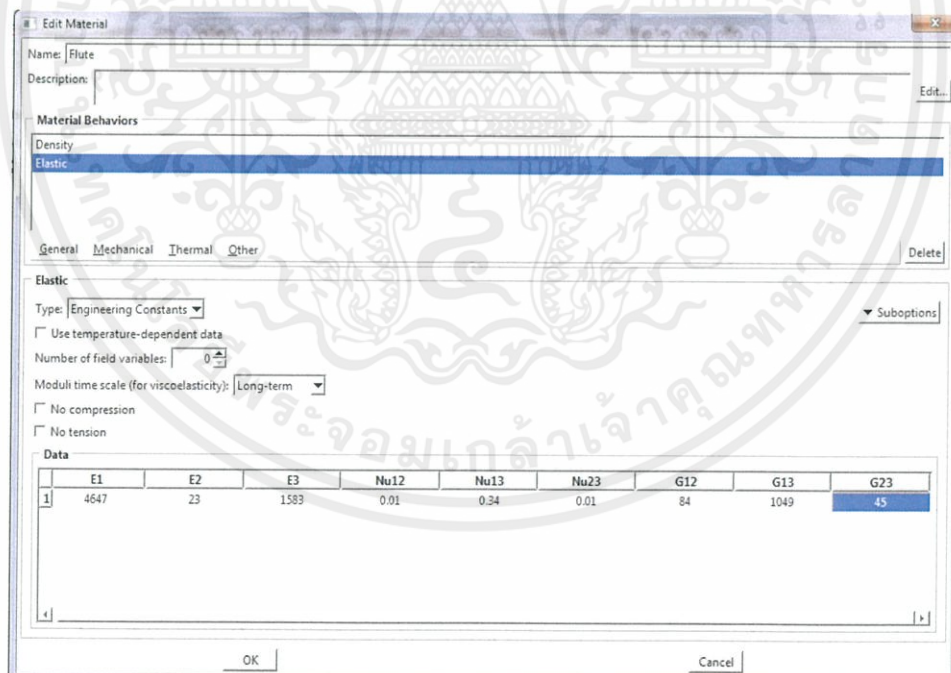
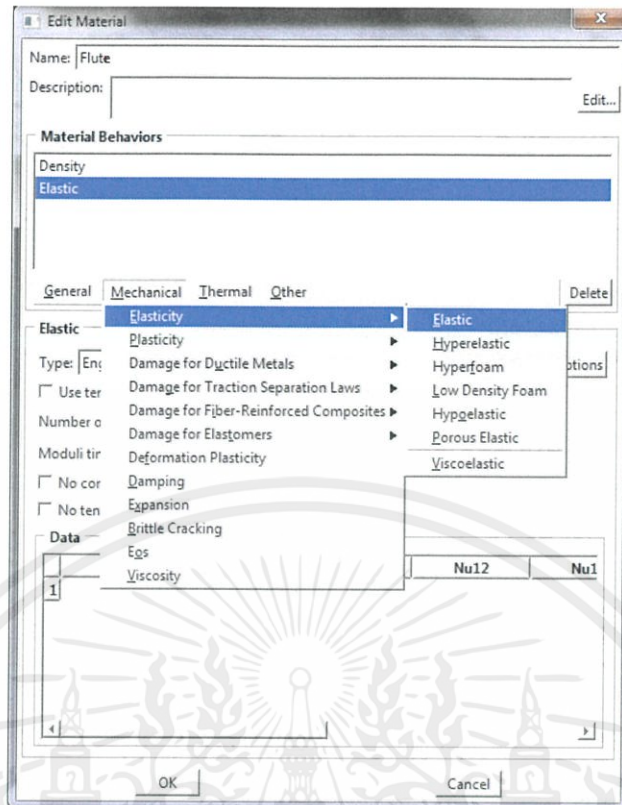
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวอย่างห้วกดเมื่อสร้างเสร็จ



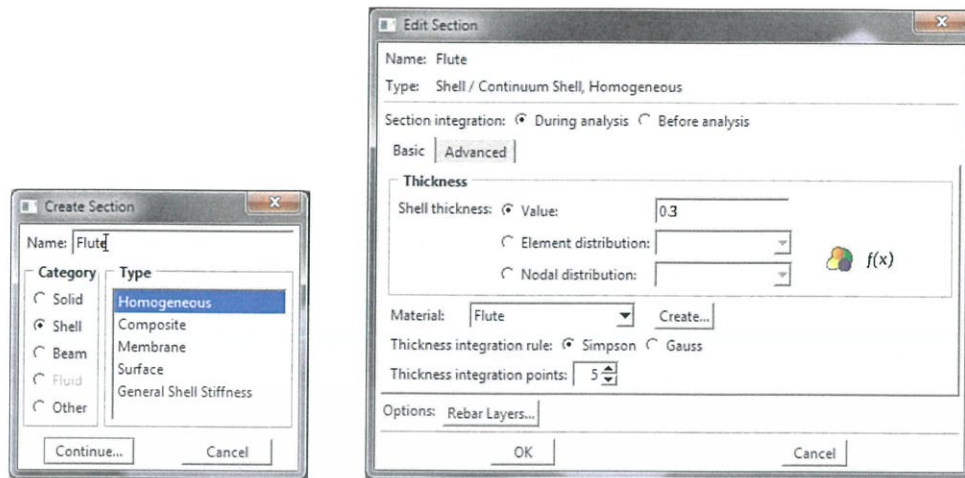
2) Property ในส่วนนี้เราจะกำหนดค่าคุณสมบัติให้แก่ชิ้นงาน

- คลิก Create Material จะปรากฏหน้าต่างให้ใส่ค่าคุณสมบัติ ให้เราตั้งชื่อของคุณสมบัติที่จะใส่ และให้ใส่ค่าคุณสมบัติ
- คลิก General >> Density >> ใส่ค่าลงไปในช่วงว่าง ( ระวังเรื่องหน่วยซึ่งตัวอย่างนี้วัดในหน่วย mm เพราะฉะนั้นค่าคุณสมบัติต้องเป็นหน่วยเดียวกัน )
- คลิก Mechanical >> Elasticity >> Elastic >> ใส่ค่าคุณสมบัติให้ครบทั้งเก้าช่อง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5-4 ( ระวังการใส่ค่าคุณสมบัติ เพราะว่าทิศทางของชิ้นงานจริงกับทิศทางของชิ้นงานในโปรแกรมอาจไม่เหมือนกัน ) ในช่องของ Type ให้เลือก Engineering Constance

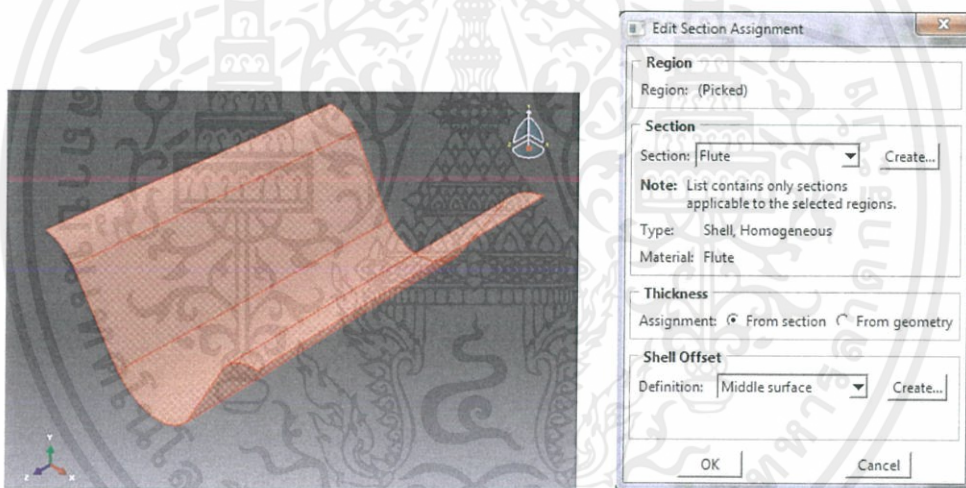


- คลิก Create Section จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้เราตั้งชื่อ ช่องของ Category ให้เลือก Shell ช่องของ Type ให้เลือก Homogeneous แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้เราใส่ค่าความหนา ช่องของ Material ให้เลือกชิ้นงานให้ตรงกับค่าคุณสมบัติที่เรากำหนดไว้ก่อนหน้านี้ แล้วคลิก OK ทำเช่นนี้กับแผ่นลอนและแผ่นเรียบ

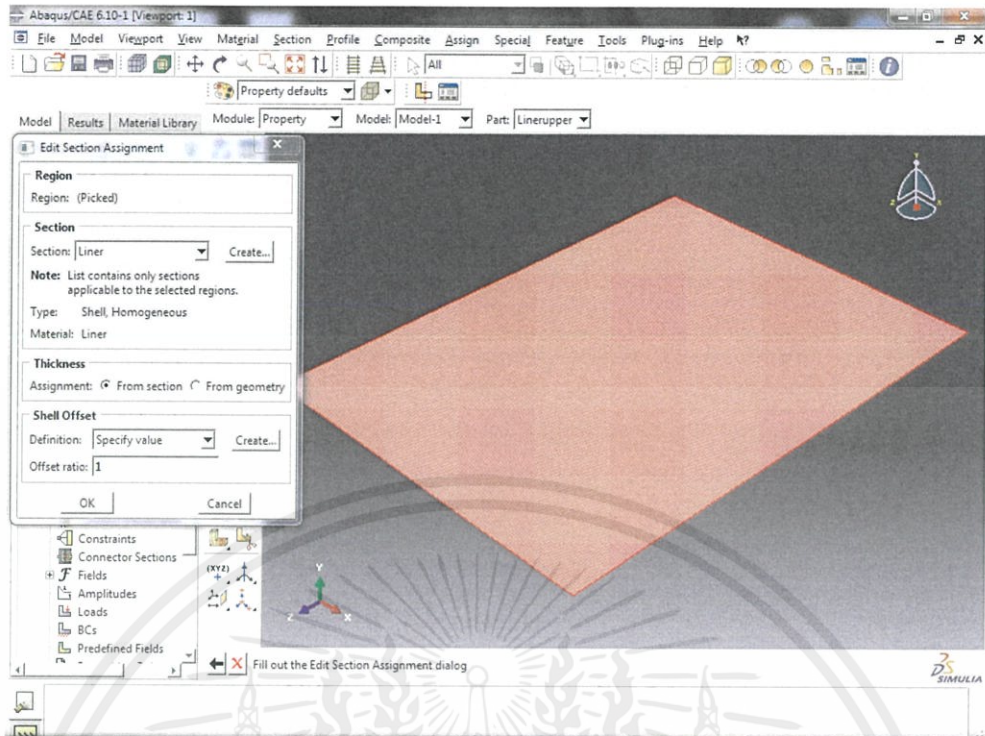
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



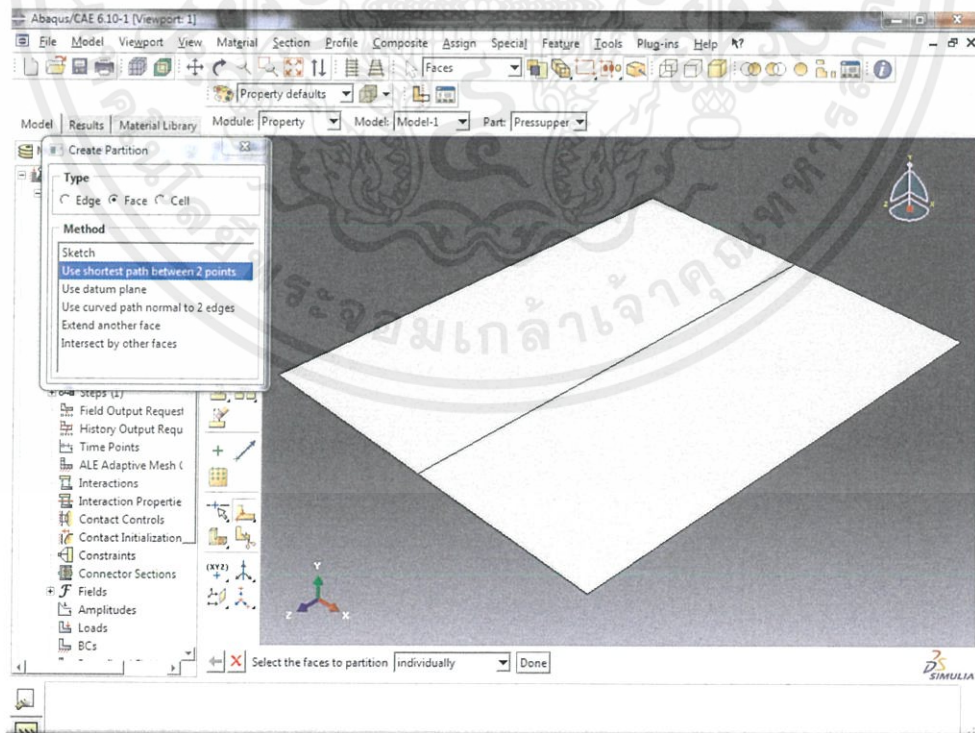
- คลิก Assign Section >> เลือกชิ้นงาน >> Done จะปรากฏหน้าต่างต่างขึ้นมา ช่องของ Section ให้เลือก Section ให้ตรงกับวัสดุที่เราจะใส่ค่าคุณสมบัตินั้นเข้าไป ช่องของ Shell offset สำหรับแผ่นลอนให้เลือก Middle surface และสำหรับแผ่นเรียบให้เลือก Specify value ถ้าเป็นแผ่นเรียบด้านบนให้เราใส่ค่า Offset ratio เป็น 1 ส่วนแผ่นเรียบด้านล่างให้ใส่ -1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

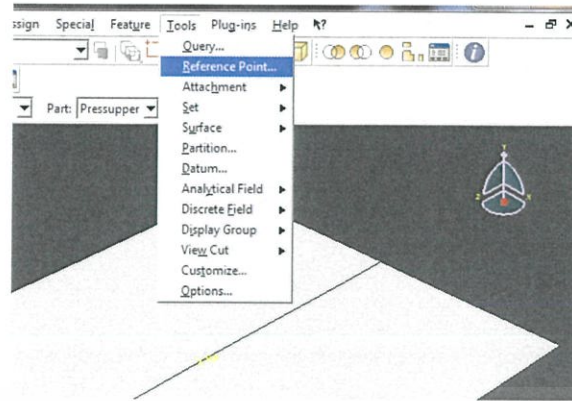


- ในส่วนของหัวกดเราจะแบ่งพื้นที่หน้าตัดให้กับหัวกดเพื่อกำหนดจุดอ้างอิง คลิก Tools >> Partition จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ Type ให้เลือก Face ช่องของ Method ให้เลือก Use shortest path between 2 point หลังจากนั้นให้คลิกเลือกจุดสองจุดที่จะตีเส้น เสร็จแล้วคลิก Create Partition จะปรากฏเส้นขึ้นมา

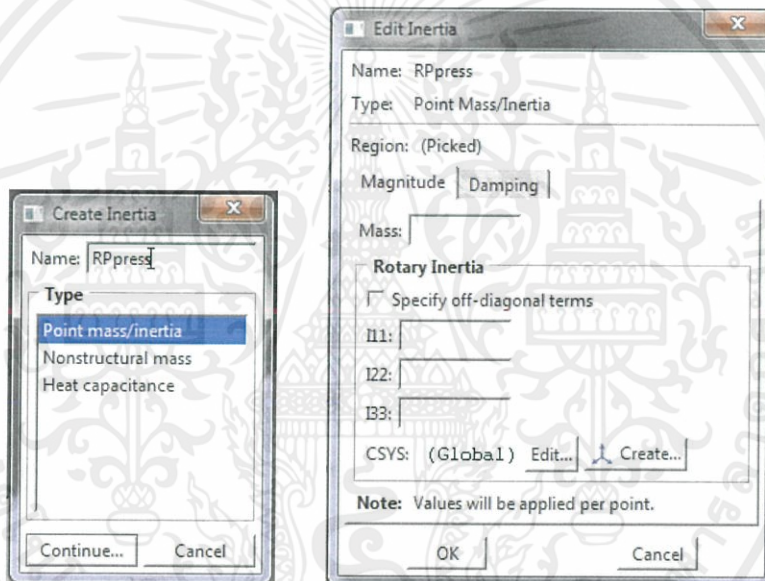


- คลิก Tools >> Reference Point... แล้วคลิกที่จุดกึ่งกลางของแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

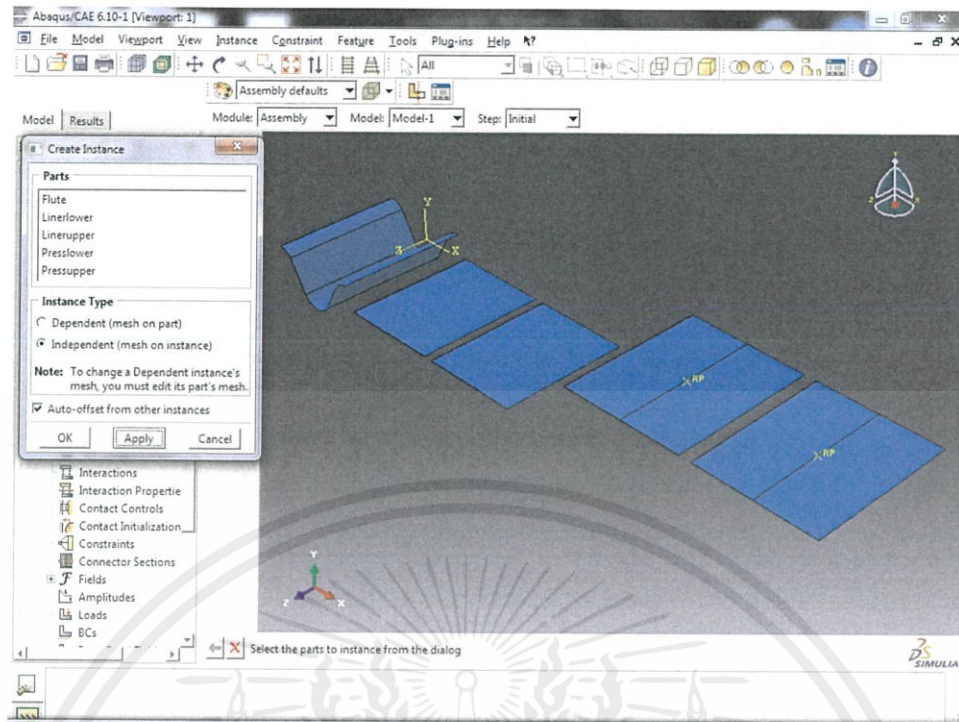


- คลิก Special >> Inertia >> Create... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้ตั้งชื่อ ช่องของ Type ให้เลือก Point mass/Inertia แล้วคลิก Continue... แล้วคลิกที่จุดอ้างอิง เสร็จแล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้ใส่ค่ามวลและค่า Inertia ของห้วงแล้วคลิก OK ( ตัวรับก็ทำเช่นเดียวกัน )

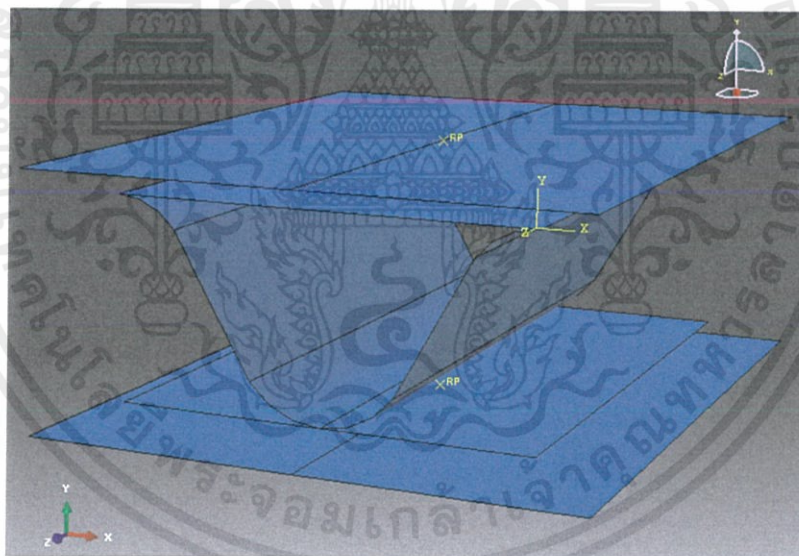


### 3) Assembly ในส่วนนี้เราจะทำการประกอบแต่ละชิ้นงานเข้าด้วยกัน

- คลิก Instance Part ช่องของ Part ให้คลิกเลือกชื่อชิ้นงาน ช่องของ Instance Type ให้เลือก Independent (mesh on instance) แล้วคลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้า Auto-offset from other instances เสร็จแล้วคลิก Apply ชิ้นงานที่เราเลือกก็จะออกมา ให้ทำแบบนี้จนได้ชิ้นงานออกมาจนครบแล้วประกอบเข้าด้วยกัน

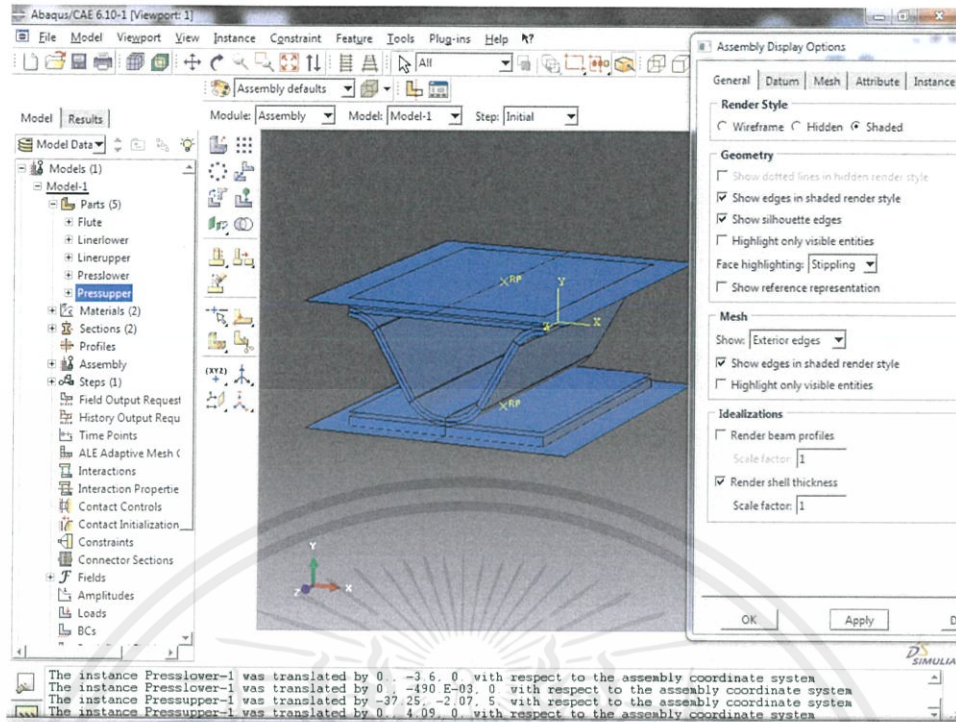


- ตัวอย่างแบบจำลองเมื่อประกอบเสร็จ

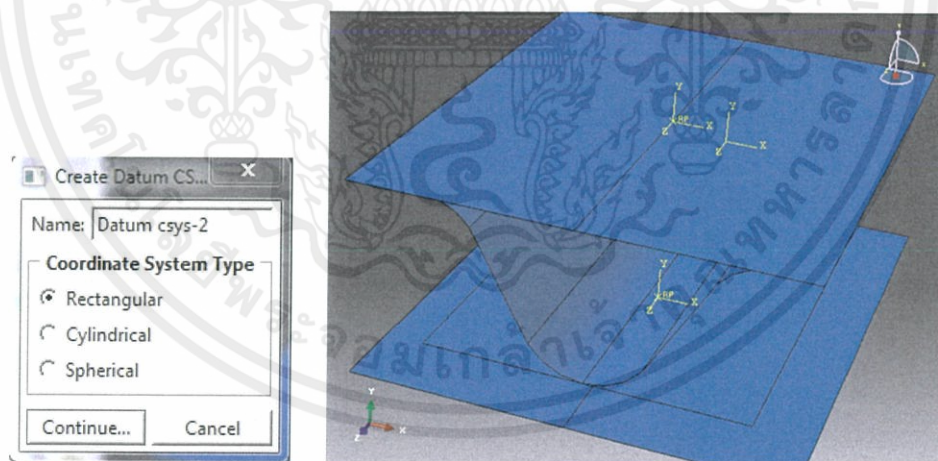


- การทำให้เห็นความหนาของชิ้นงาน เลือก View >> Assembly Display Option... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ General คลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้า Render shell thickness แล้วคลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



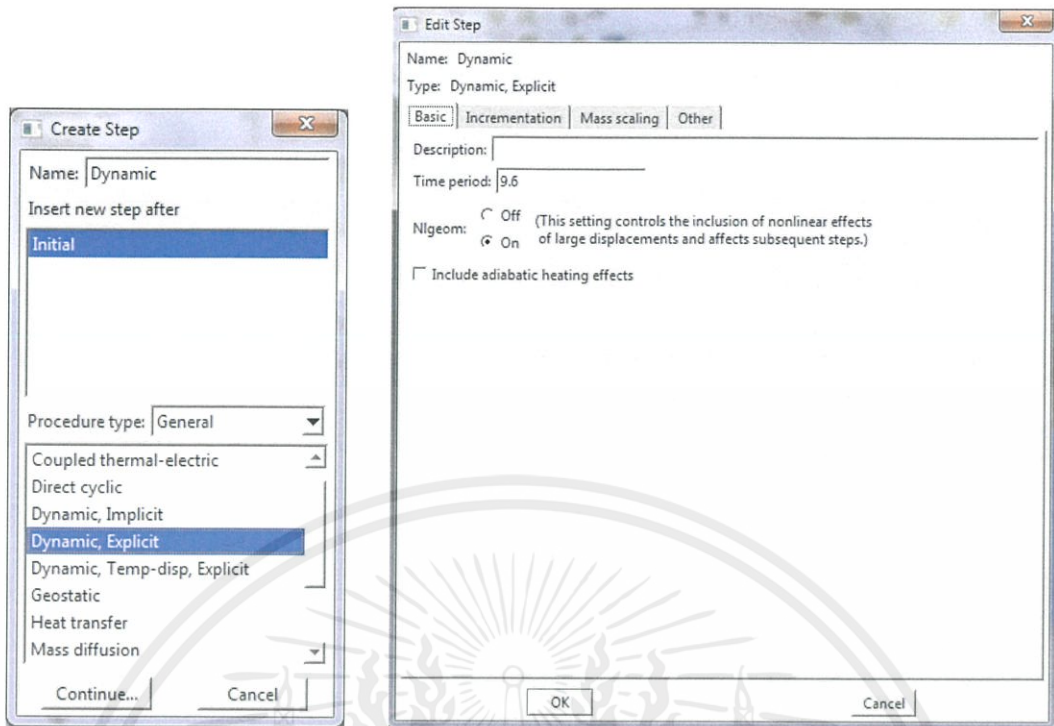
- เลือก Create Datum CSYS : 3 point ให้ตั้งชื่อแล้วเลือก Rectangular แล้วคลิก Continue... เสร็จแล้วคลิกที่จุด RP ด้านบนหัวกด ทำซ้ำอีกครั้งแต่เปลี่ยนไปคลิกที่จุด RP ของตัวรับ



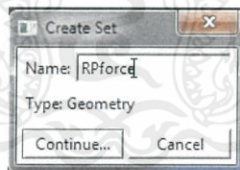
#### 4) Step จะเป็นขั้นตอนการเลือกวิธีการประมวลผลของแบบจำลอง

- คลิก Create Step จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้ตั้งชื่อ แล้วเลือกที่ Dynamic Explicit แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ Basic ตรง Time period ให้ใส่ค่าเวลาที่ต้องการให้หัวกดเคลื่อนที่ ช่อง Nlgeom ให้คลิกเลือก On เสร็จแล้วคลิก OK

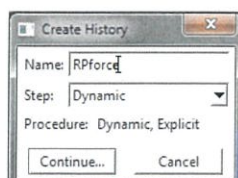
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



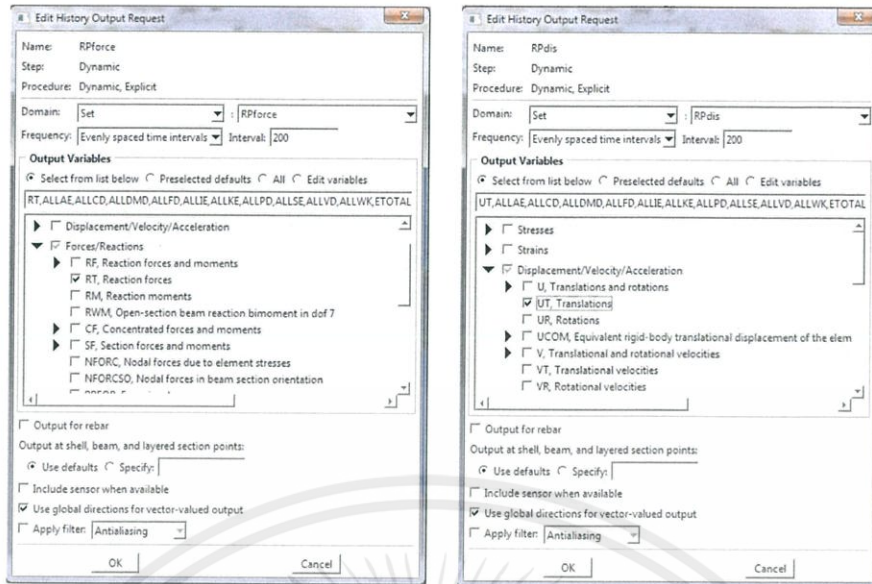
- ต่อไปเราจะกำหนดจุดอ้างอิงเพื่อใช้บันทึกผลลัพธ์ที่จะออกมาคือแรงที่ใช้ในการกดและระยะยุบตัวของแบบจำลอง
- คลิก Tools >> Set >> Create... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้เราตั้งชื่อจุดที่เราจะบันทึกผลลัพธ์ที่ออกมา ได้แก่ จุดที่จะบันทึกแรงกดและจุดที่จะบันทึกระยะยุบตัวของแบบจำลอง เสร็จแล้วคลิก Continue... แล้วคลิกที่จุด RP บริเวณกลางหัวกด แล้วคลิก Done ( ก็คือทำสองครั้งสองชื่อแต่ทำที่จุดเดียวกัน )



- คลิก Create History Output จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้เราตั้งชื่อผลลัพธ์ที่ต้องการ แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ Domain ให้เลือก Set แล้วทางด้านขวาของ Set ให้เลือกจุดที่เราตั้งชื่อไว้ ที่รอบด้านล่างให้คลิกรูปสามเหลี่ยมหน้า Forces/Reactions เสร็จแล้วคลิกให้เครื่อง หมายถึงคลิกปรากฏหน้า RT, Reaction forces (สำหรับจุดที่จะวัดแรง) แล้วคลิก OK
- ทำอีกครั้งสำหรับจุดที่จะวัดระยะยุบตัวแต่ในกรอบด้านล่างให้ไปคลิกที่รูปสามเหลี่ยมหน้า Displacement/Velocity/Acceleration คลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้า UT, Translations

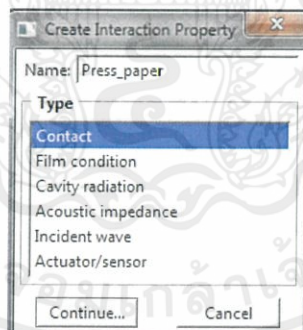


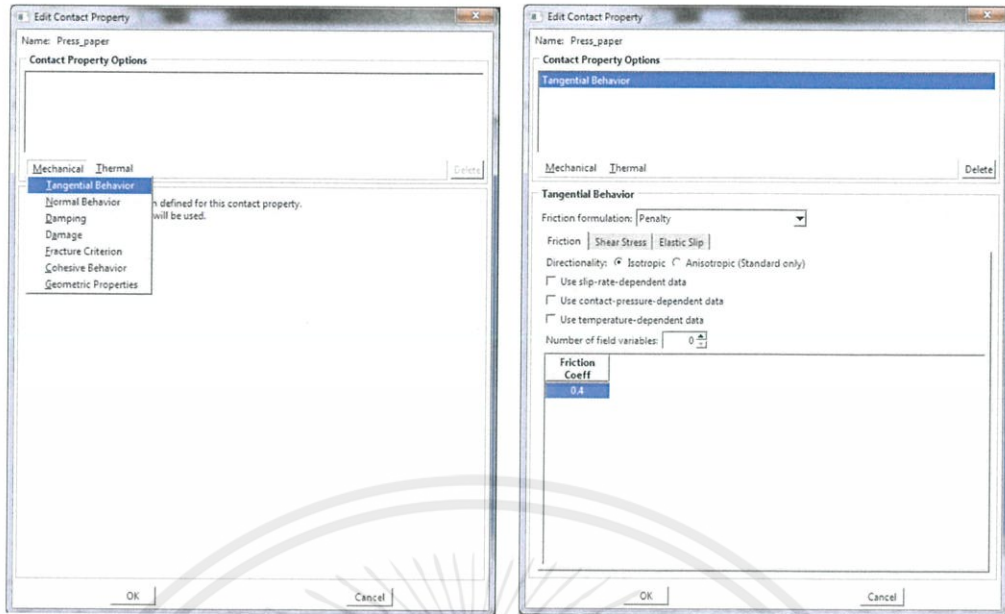
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



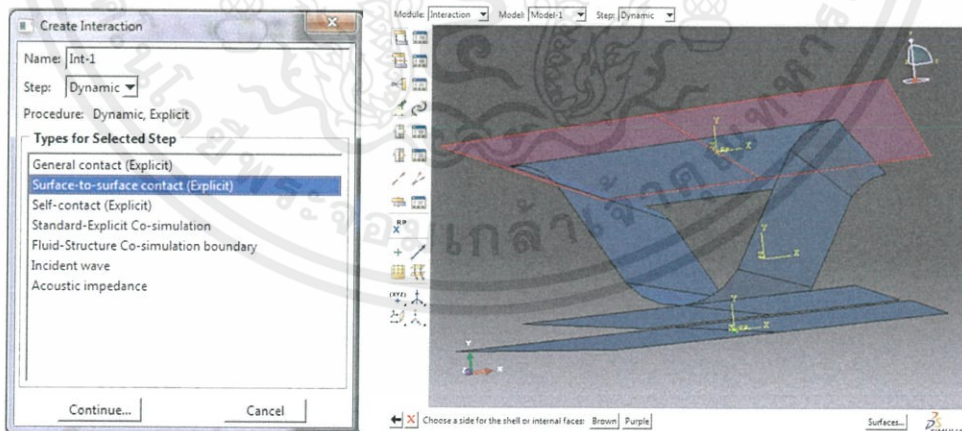
5) Interaction เป็นการสร้างความสัมพันธ์ของแต่ละชิ้นงาน ในที่นี้จะเห็นได้ว่าเป็นความสัมพันธ์อยู่สองแบบ คือ 1. ระหว่างหัวดักกับกระดาดหรือตัวรับกับกระดาด 2. ระหว่างกระดาดกับกระดาด ซึ่งนั่นก็คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเหล็กกับกระดาดและกระดาดกับกระดาด

- คลิก Create Interaction Property ให้ตั้งชื่อ ช่องของ Type เลือก Contact แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา คลิก Mechanical >> Tangential Behavior ช่องของ Friction formulation ให้เลือก Penalty แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ทำซ้ำอีกครั้งสำหรับค่าสัมประสิทธิ์อีกค่า

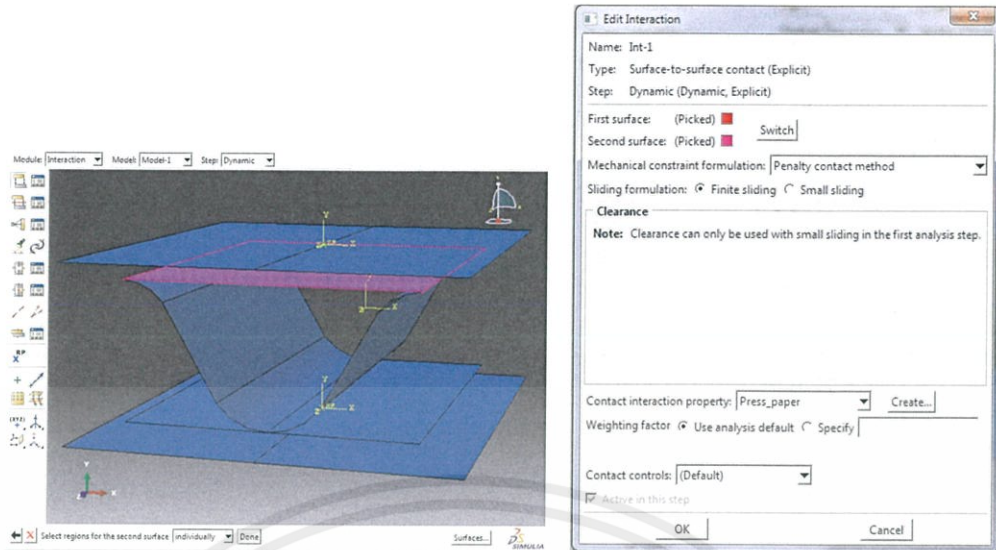




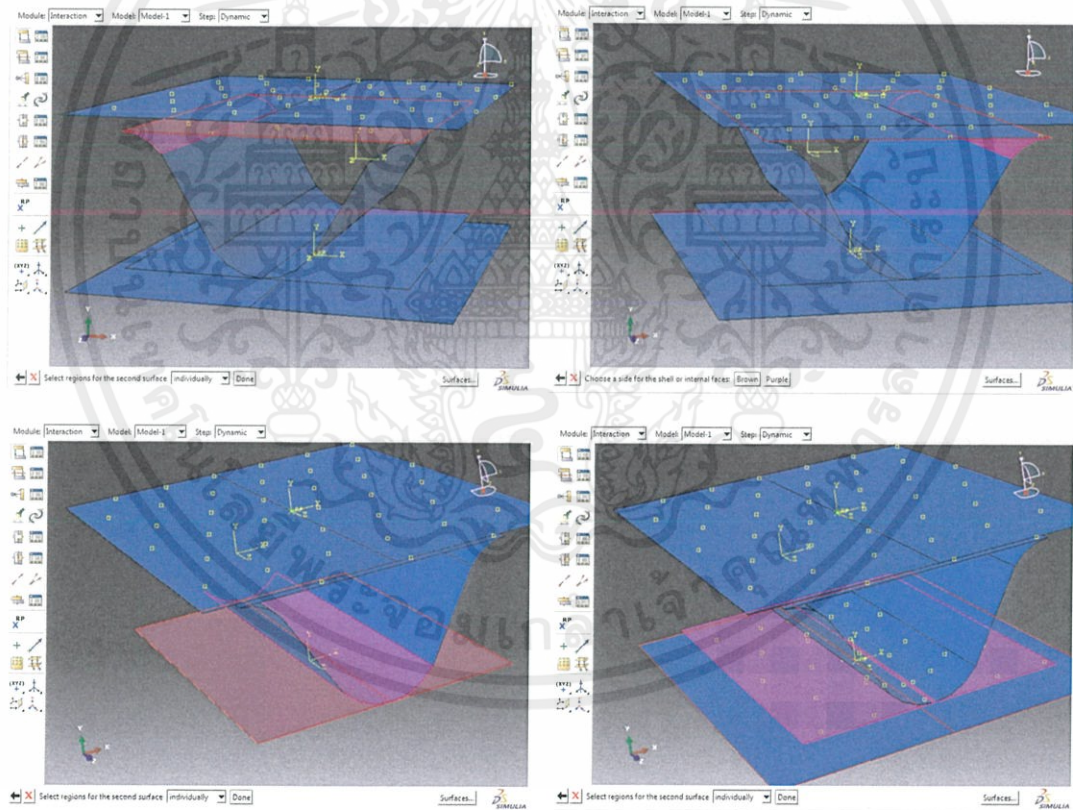
- คลิก Create Interaction ตั้งชื่อความสัมพันธ์ ช่องของ Type for Selected Step ให้เลือก Surface-to-surface contact (Explicit) คลิก Continue... แล้วคลิกที่พื้นผิวของหัวกดจากนั้นเลือกสีที่จะสัมผัสกันโดยคลิกที่ Purple ต่อไปคลิก Surface แล้วคลิกเลือกผิวของกระดาษแผ่นเรียบ ด้านบน คลิก Purple จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่อง Mechanical constraint formulation ให้เลือก Penalty contact method ตรง Contact Interaction property ให้เลือกชื่อคุณสมบัติของหัวกดกับกระดาษ คลิก OK ( หลักการพิจารณาเลือกพื้นผิวที่สัมผัสกัน คือ หลังจากการกด พื้นผิวใดที่จะสัมผัสกันหรือมีโอกาสที่จะสัมผัสกัน เราจะเลือกพื้นผิวคู่นั้น โดยเราจะเลือกพื้นผิวที่แข็งแรงกว่าเป็นพื้นผิวแรก )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

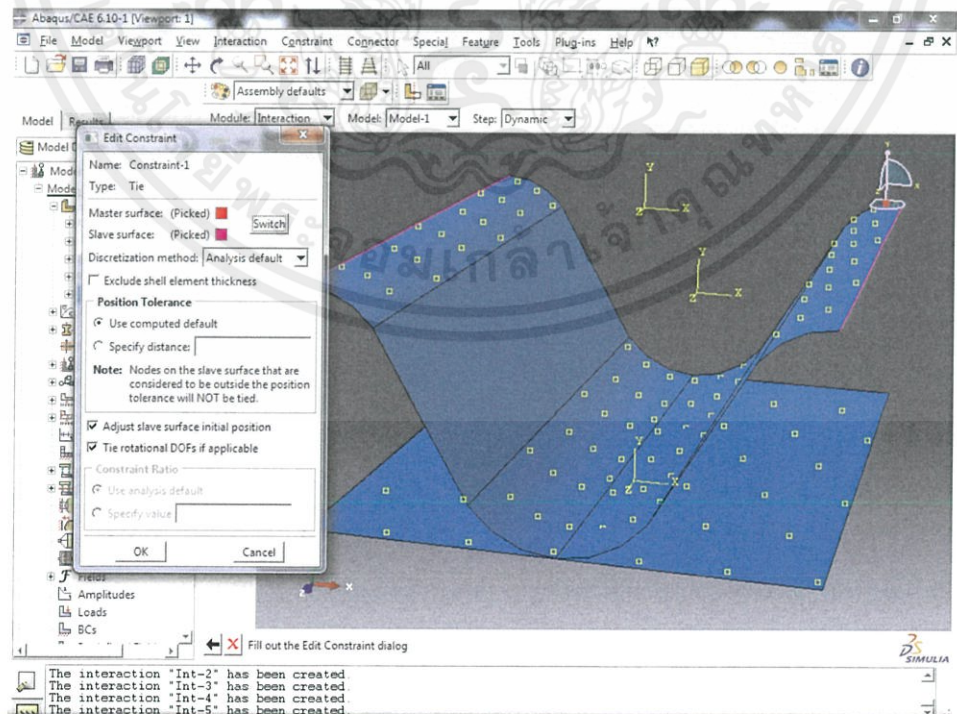
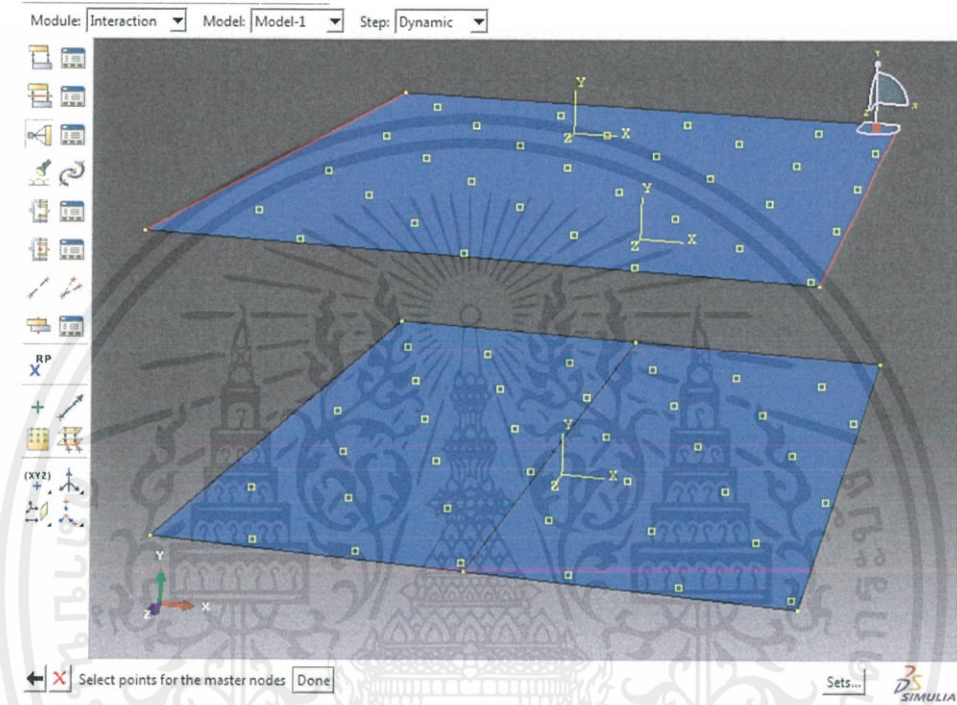
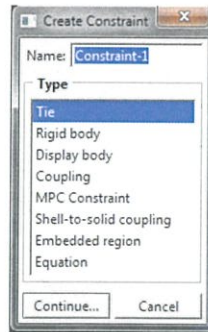


- ทำคล้ายๆอย่างเดิมโดยดูว่าความสัมพันธ์ของผิวชิ้นงานเป็นแบบไหนแล้วก็เลือกชื่อคุณสมบัติให้ตรงกับความสัมพันธ์นั้น



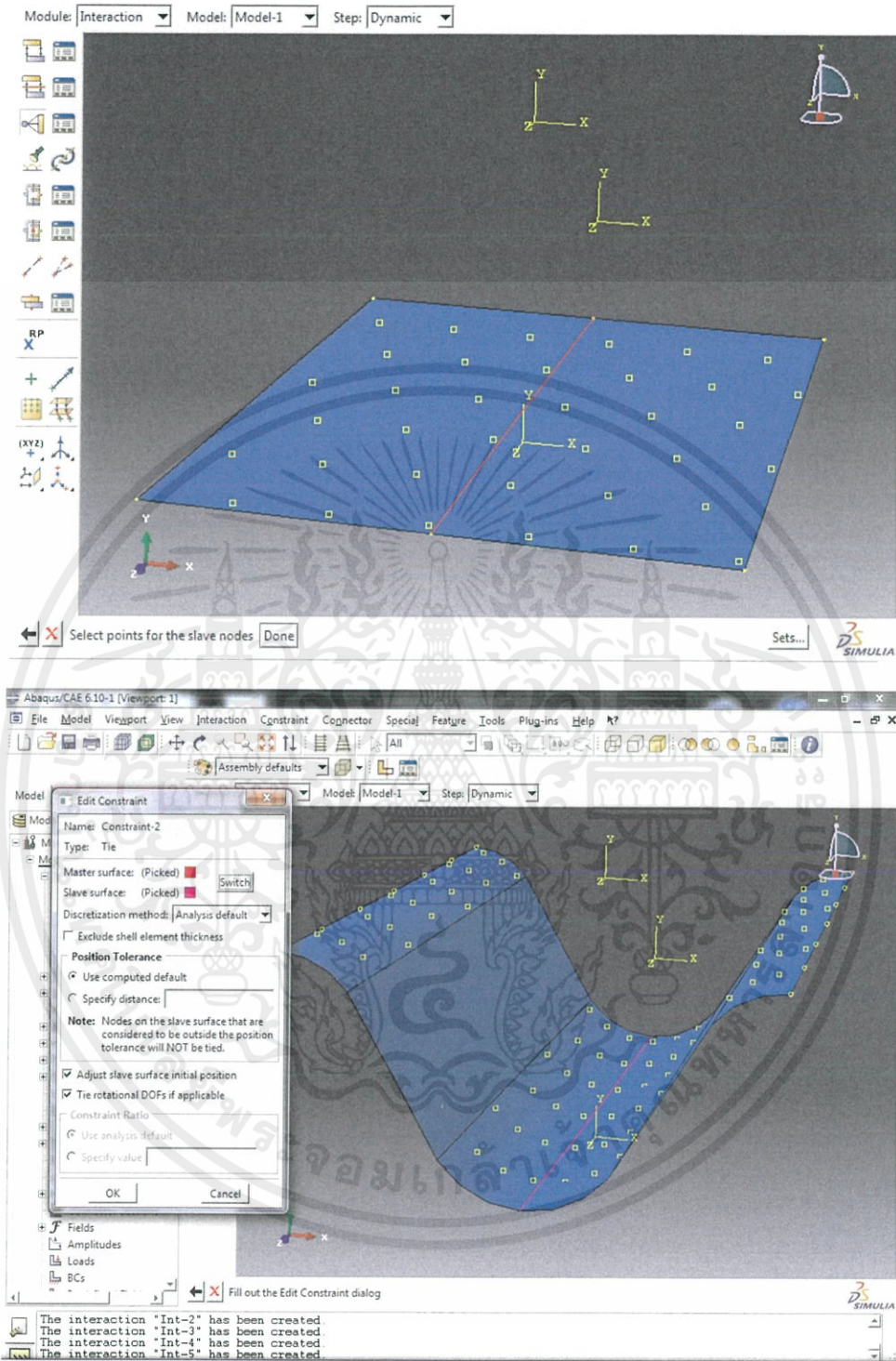
- คลิก Create Constraint ( ขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนการเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกันตรงบริเวณที่ผิวของชิ้นงานสัมผัสกัน ) จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้ตั้งชื่อ ช่องของ Type ให้เลือก Tie คลิก Continue... แล้วคลิก Node Region แล้วคลิกที่ขอบทั้งสองของแผ่นเรียบด้านบน คลิก Done ต่อไปคลิกเลือก Node Region แล้วคลิกที่ขอบทั้งสองของแผ่นลอนแล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา คลิก OK ได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



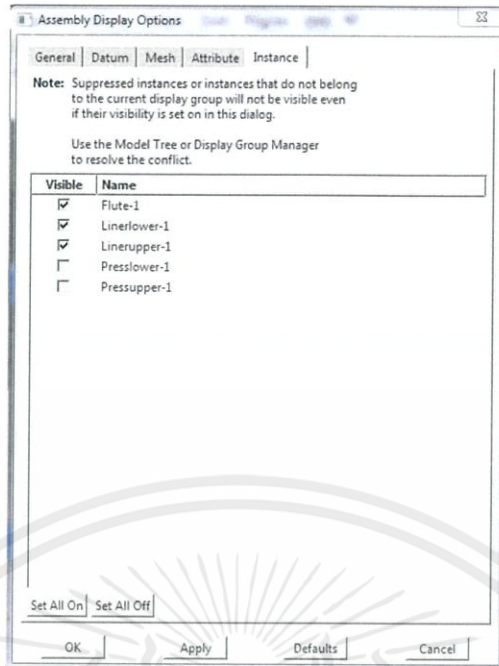
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำคล้ายๆกันแต่เปลี่ยนไปทำที่แผ่นลอนกับแผ่นเรียบด้านล่าง



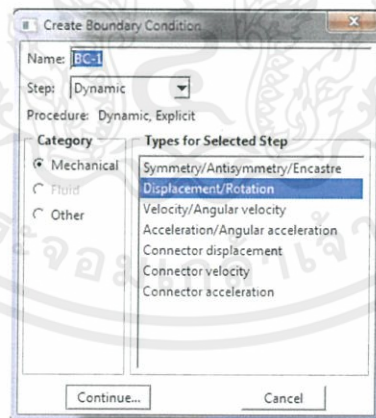
- เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการเลือกขอบของชิ้นงาน ให้ไปคลิกที่ View >> Assembly Display Option... ในส่วนของหัวข้อ Instance คลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้าชื่อชิ้นงานที่ต้องการให้เห็น และคลิกเอาออกถ้าไม่ต้องการให้เห็น แล้วคลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

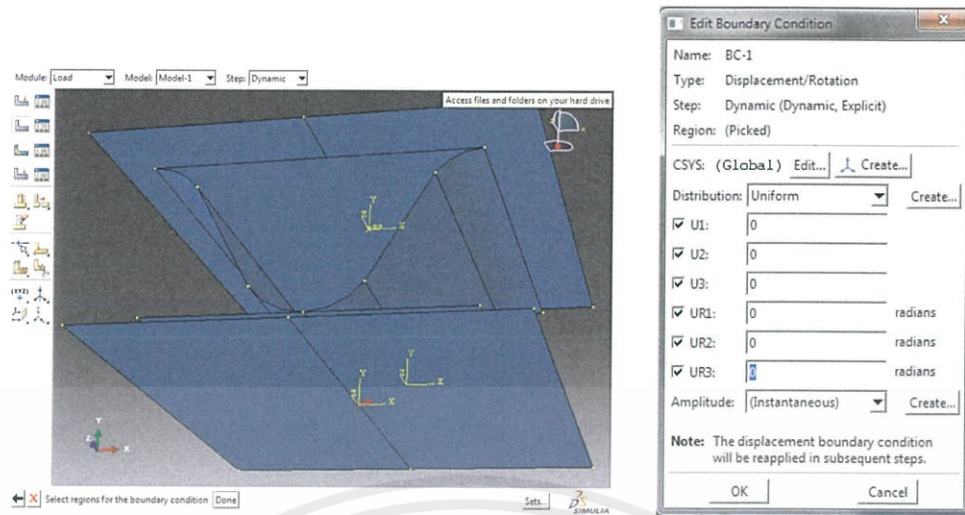


6) Load ขั้นตอนนี้เป็นกำหนัดเงื่อนไขให้กับแบบจำลอง เราจะกำหนด Boundary Condition 3 อย่างด้วยกัน 1.ยึดตัวรับด้านล่าง 2.กำหนดระยะที่ต้องการให้หัวกดเลื่อนลง 3.ยึดด้านข้างของชิ้นงาน

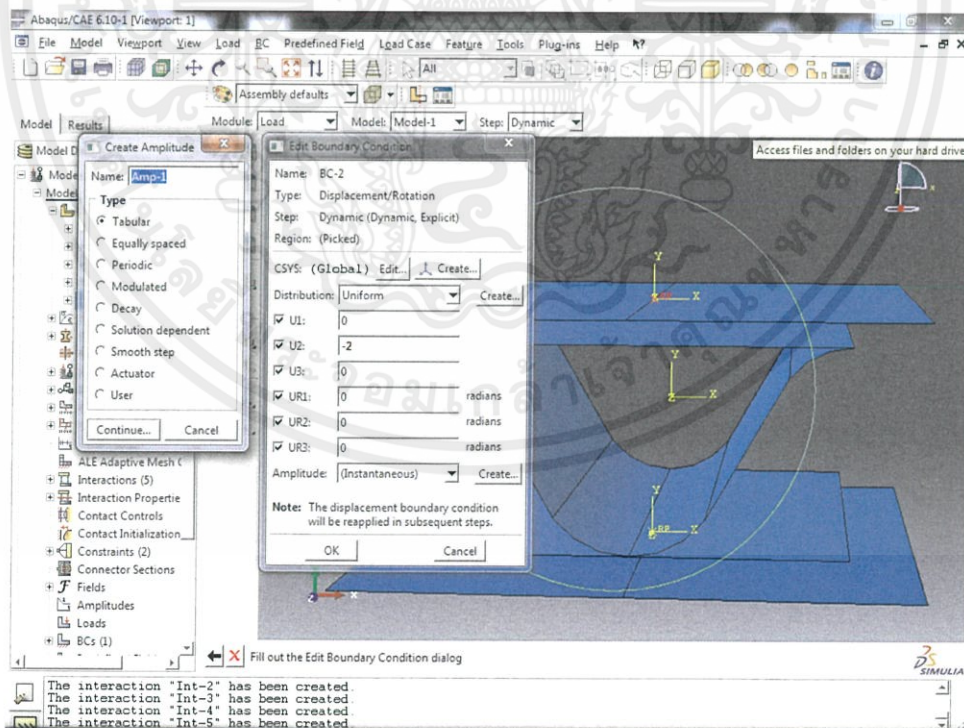
- คลิก Create Boundary Condition ให้ตั้งชื่อ ช่องของ Types for Selected Step ให้เลือก Displacement/Rotation คลิก Continue... ทั้งสามแบบจะทำคล้ายๆกันแต่จะกำหนด Condition ต่างกัน



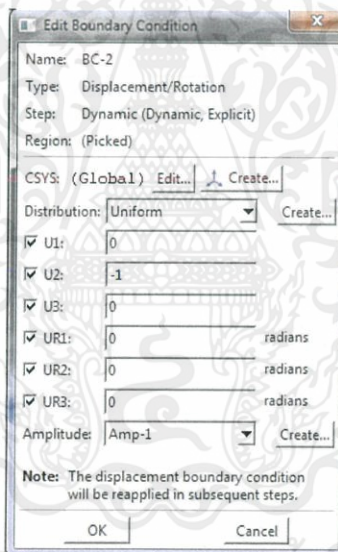
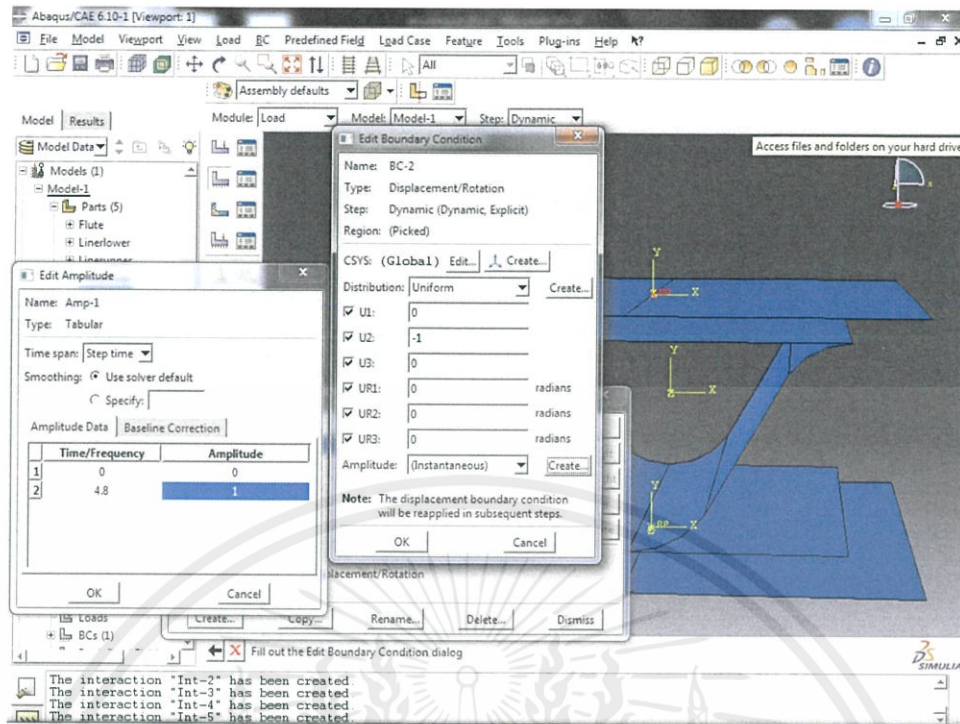
- ที่ตัวรับ คลิกที่จุด RP บนตัวรับ แล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา คลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้า U1, U2, U3, UR1, UR2 และ UR3 แล้วคลิก OK



- ที่ห้หวัด คลิกที่จุด RP บนห้หวัด แล้วคลิก Done แล้วคลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้า U1,U2, U3, UR1, UR2 และ UR3 แต่ที่ด้านหลังของ UR2 ให้ใส่ค่าระยะที่เราต้องการให้ห้หวัดเคลื่อนลง ( ให้ใส่ค่าลบ ) ในส่วนของ Amplitude ให้คลิก Create จะปรากฏหน้าต่างต่างขึ้นมา ให้ตั้งชื่อ แล้วคลิกเลือก Tabular แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างต่างขึ้นมา ช่องของ Time/Frequency ช่อง 1 ให้ใส่ 0 ช่อง 2 ให้ใส่ค่าระยะเวลาที่ใช้ในการกด ช่องของ Amplitude ช่อง 1 ให้ใส่ 0 ช่อง 2 ให้ใส่ 1 เสร็จแล้วคลิก OK แล้วกลับไปเลือกในส่วนของ Amplitude ในหน้าต่างของ Boundary Condition ให้เลือกชื่อที่เราตั้งไว้ในหน้าต่างของ Amplitude แล้วคลิก OK

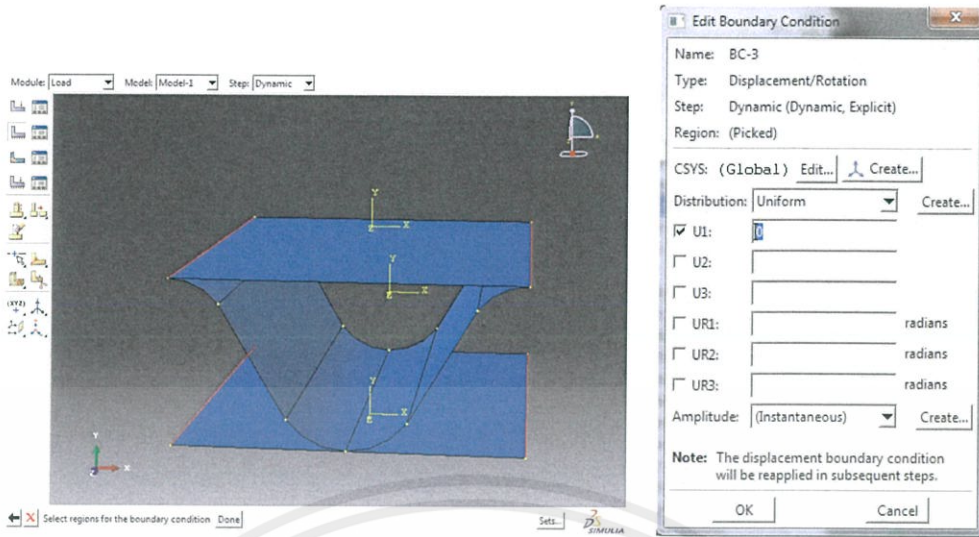


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



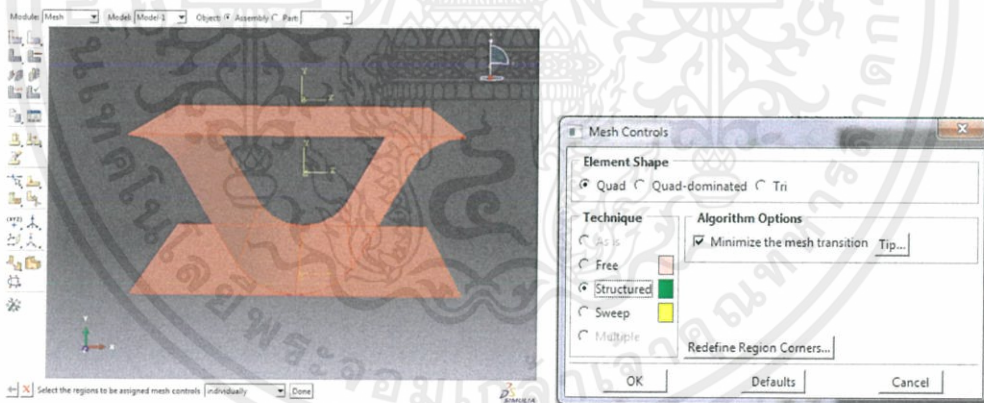
- ที่ด้านข้างชิ้นงาน คลิกเลือกด้านข้างของแต่ละชิ้นงานโดยการกดปุ่ม Shift ค้างไว้แล้วคลิกเลือกด้านข้างของชิ้นงานทั้งหมด 3 ชิ้นจะได้ 6 เส้น แล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างต่างขึ้นมา คลิกให้ปรากฏเครื่องหมายถูกหน้า U1 แล้วคลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

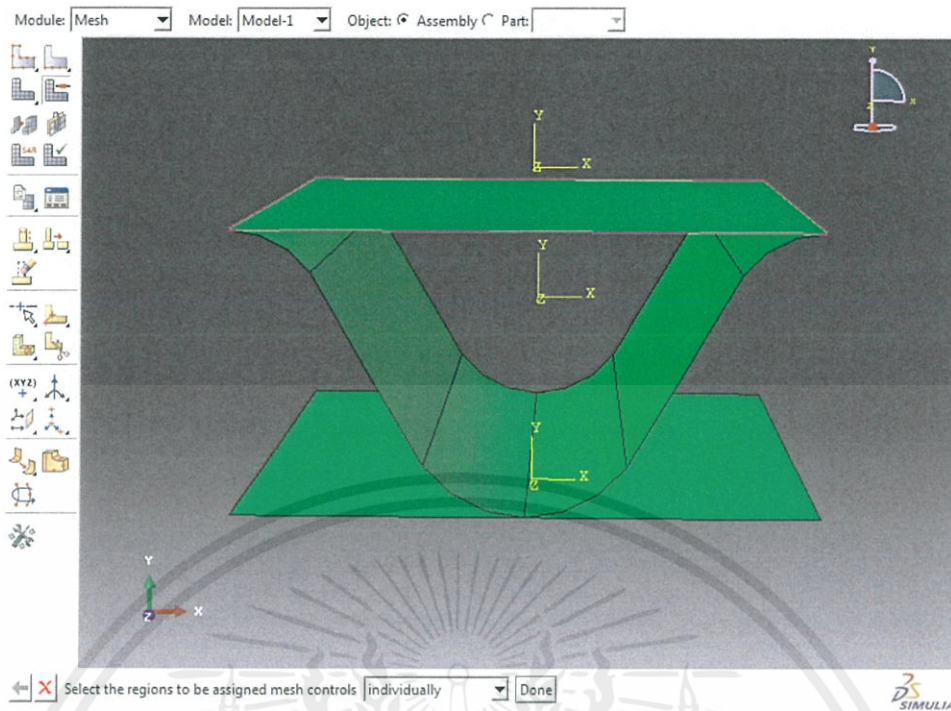


7) Mesh ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดชนิดและขนาด element ให้กับชิ้นงาน (เฉพาะแผ่นเรียบและแผ่นลอน)

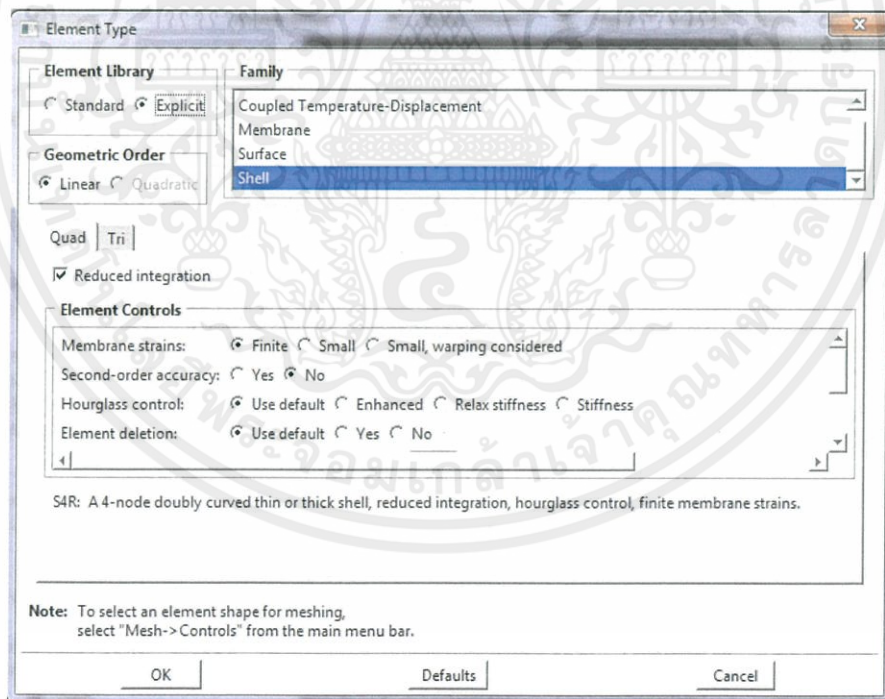
- คลิก Assign Mesh Controls หลังจากนั้นลากคลุมชิ้นงาน แล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาช่องของ Element Shape ให้เลือก Quad ช่องของ Technique ให้เลือก Structured แล้วคลิก OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

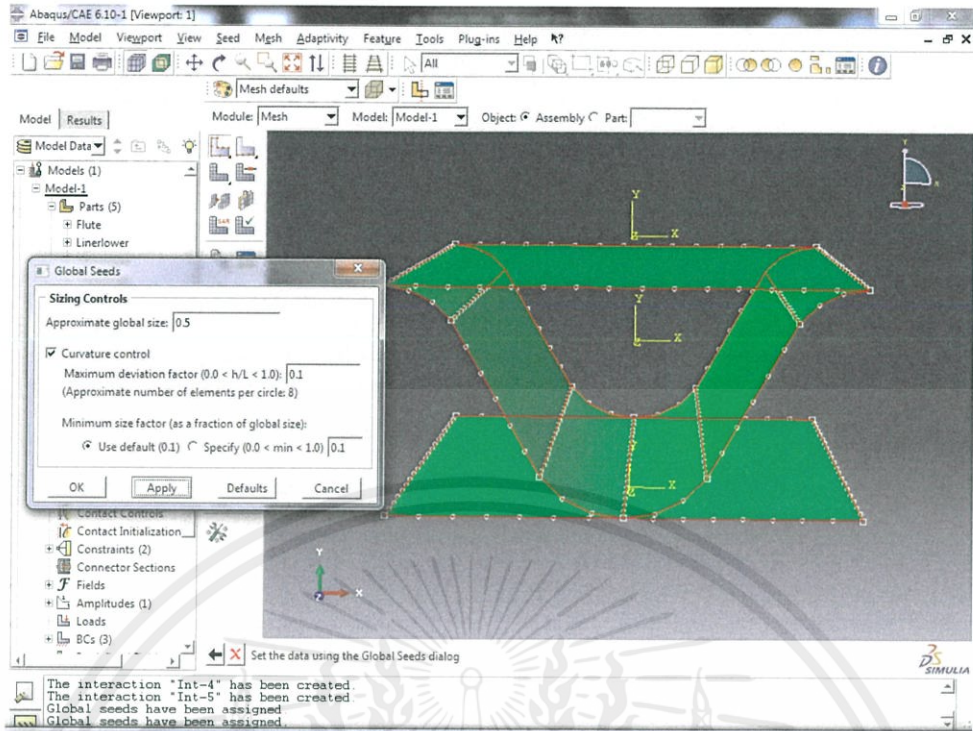


- คลิก Assign Element Type ลากคลุมชิ้นงานแล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ Element Library ให้เลือก Explicit ช่องของ Family ให้เลือก Shell แล้วคลิก OK

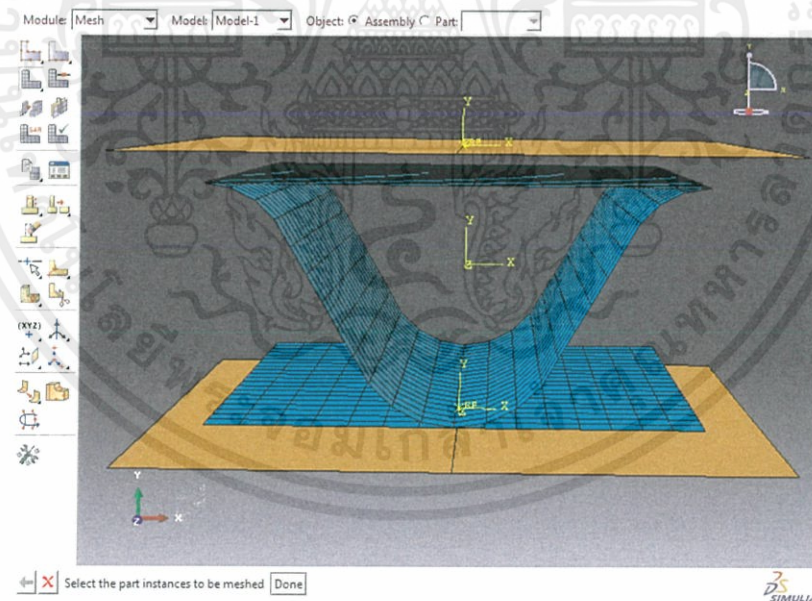


- คลิก Seed Part Instance ลากคลุมชิ้นงาน แล้วคลิก Done จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ Approximate global size ให้ใส่ค่าขนาดของ element แล้วคลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- คลิก Mesh Part Instance ลากคลุมชิ้นงาน แล้วคลิก Done

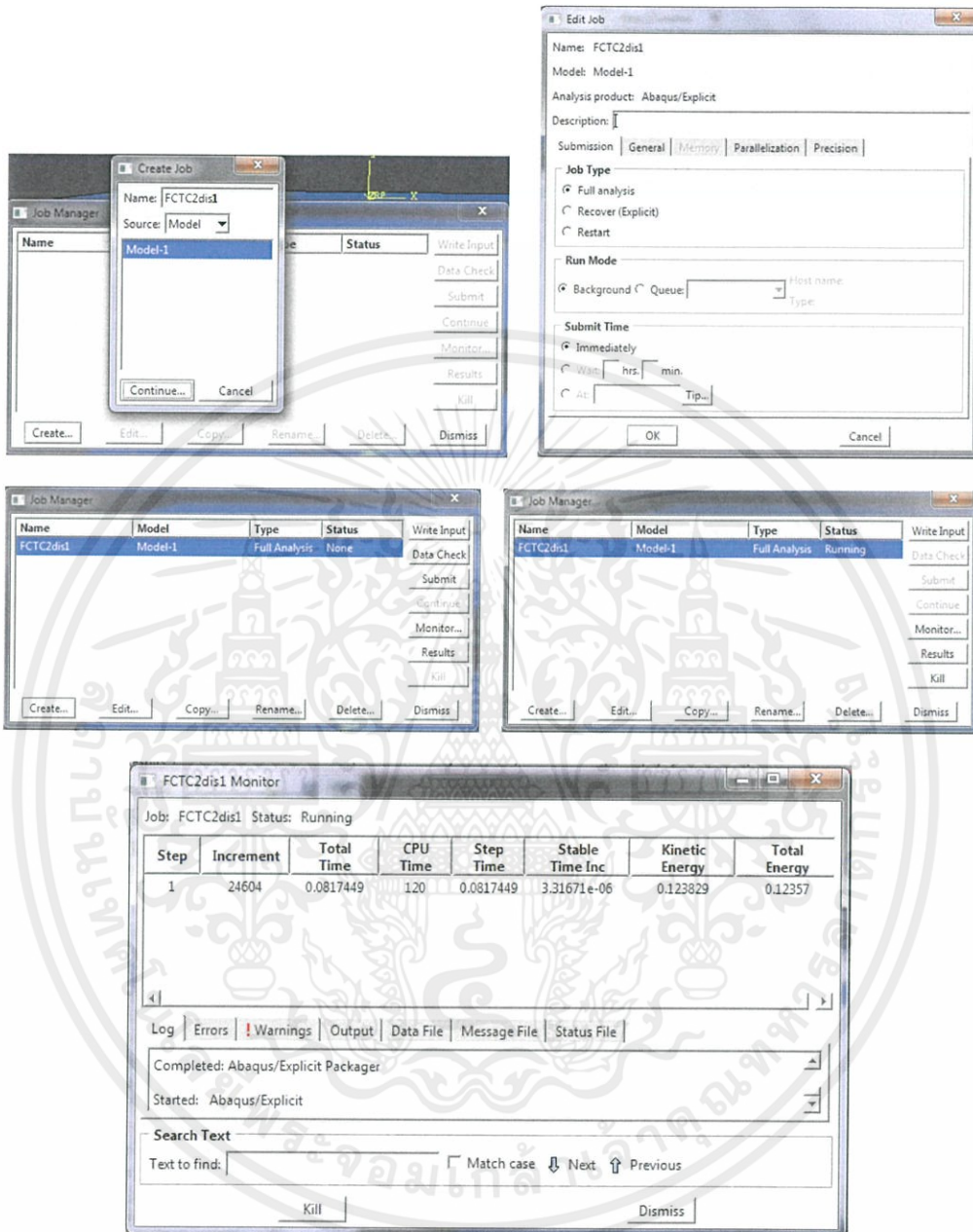


## 8) Job ขั้นตอนนี้คือการนำแบบจำลองไปประมวลผล

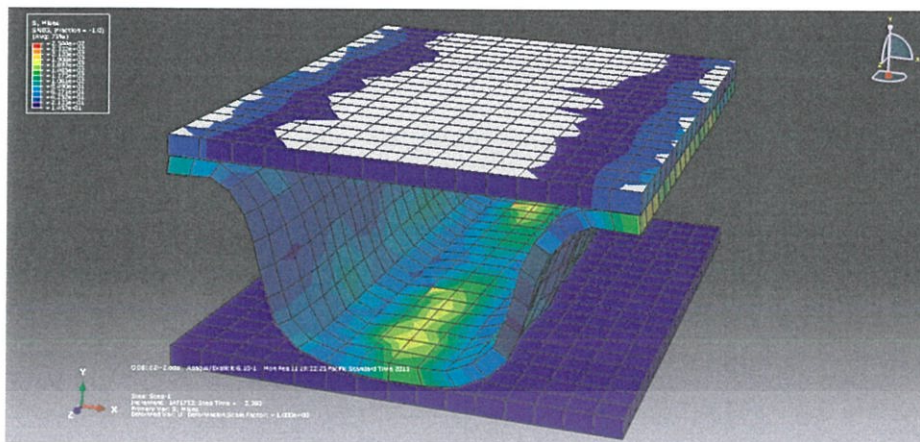
- คลิก Job Manager จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้ตั้งชื่อ แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้คลิก OK ได้เลย หลังจากนั้นคลิกที่ Submit ในหน้าต่างของ Job Manager รอจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น Running แล้วคลิกที่ Monitor จะปรากฏหน้าต่างการประมวลผล ให้รอจน Completed หลังจากนั้นกด Result เพื่อดูผลลัพธ์และการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลอง



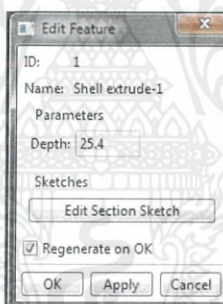
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



#### 4.6.3 การสร้างแบบจำลองการทดสอบชนิดเอคตรีช

ขั้นตอนทั้งหมดประกอบไปด้วย 9 ส่วนหลักๆ คล้ายกับการสร้างแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีชแต่มีส่วนต่างจากชนิดแฟลชครีชอยู่บ้าง คือ

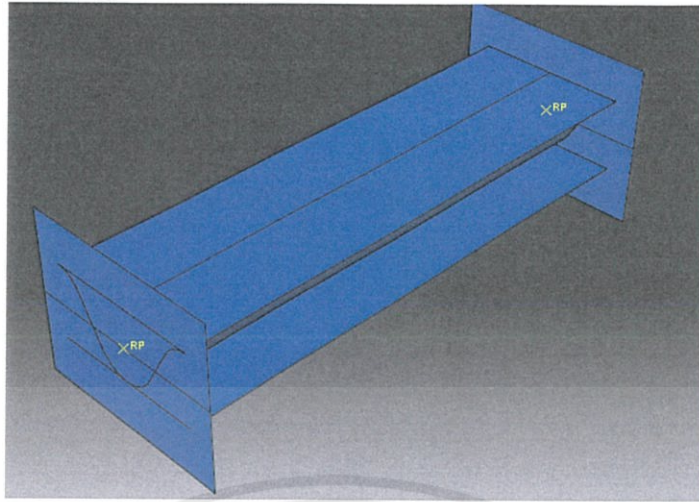
1) Part ในส่วนนี้ต่างกันที่ความลึกของชิ้นงาน แบบจำลองการทดสอบชนิดเอคตรีชจะให้ความลึกของชิ้นงานเท่ากับ 25.4 mm



2) Property ในส่วนนี้เราจะกำหนดค่าคุณสมบัติให้แก่ชิ้นงาน ซึ่งขั้นตอนการกำหนดค่าคุณสมบัติของแบบจำลองชนิดเอคตรีชจะมีลักษณะเช่นเดียวกับชนิดแฟลชครีช

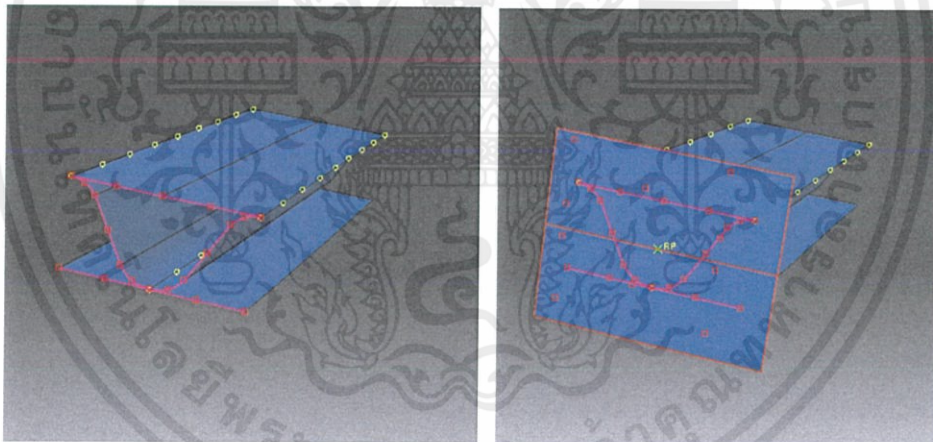
3) Assembly ในส่วนนี้เราจะทำคล้ายกับแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีช แต่จะแตกต่างกันที่ตำแหน่งของตัวกดและตัวรับ

- ตัวอย่างแบบจำลองเมื่อประกอบเสร็จ



4) Step ในส่วนนี้เราจะทำคล้ายกับชนิดแพลชครัช

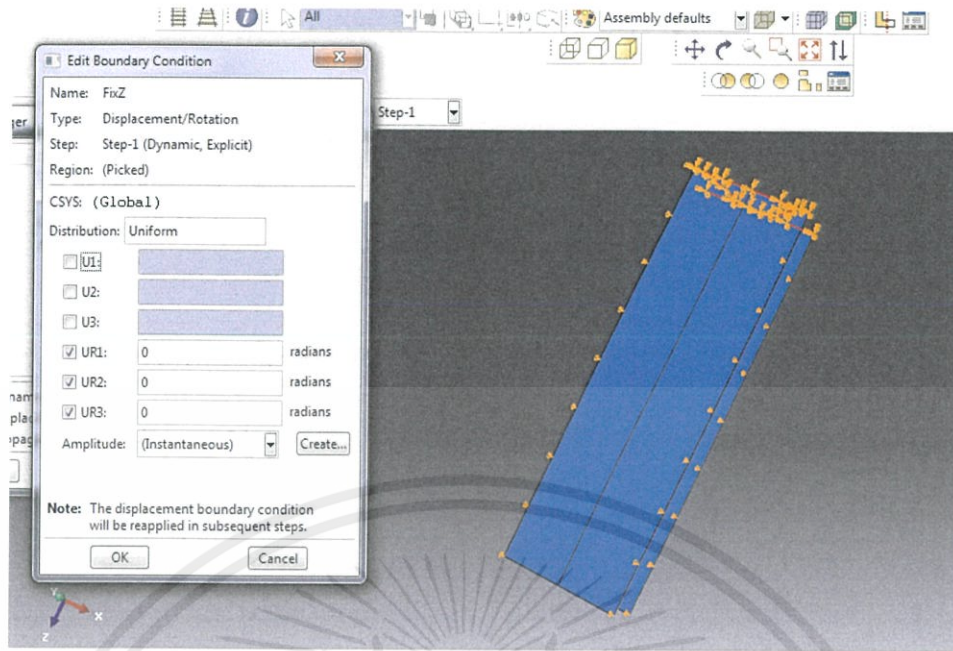
5) Interaction วิธีการสร้างพื้นผิวสัมผัสจะมีวิธีการคล้ายกับแบบจำลองการทดสอบชนิดแพลชครัช แต่จะแตกต่างกันที่ผิวสัมผัสของตัวกดกับผิวสัมผัสของชิ้นงานทดสอบที่ต้องมีลักษณะเป็นเส้น ดังภาพ ซึ่งจะทำการทั้งตัวกดและตัวรับ



6) Load ในส่วนนี้จะต่างกันที่ทิศทางในการกดและเพิ่มการ Fix ด้านบนของแบบจำลอง

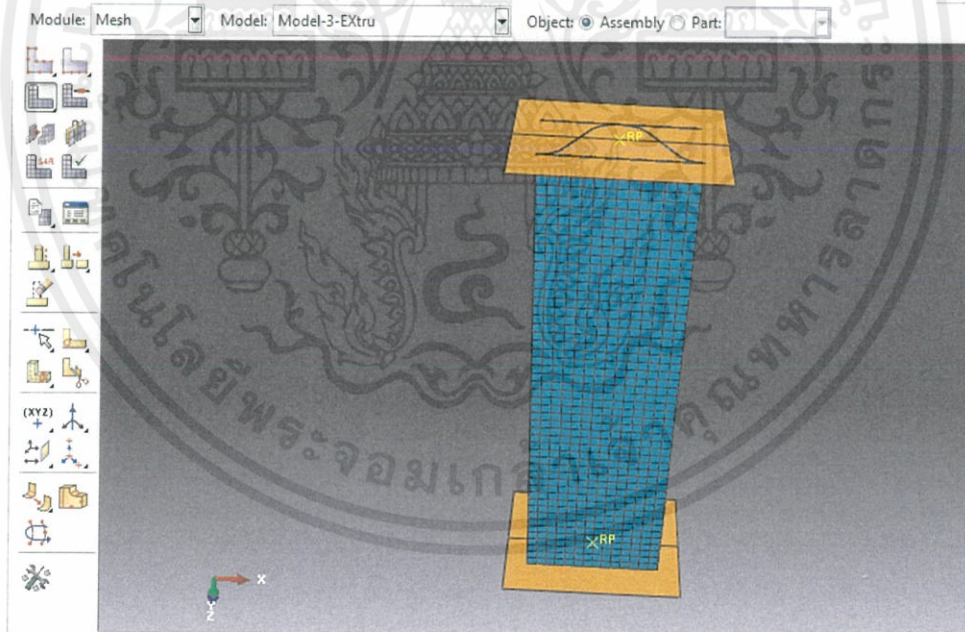
- ด้านบนของแบบจำลองก็ต้องมีการตรึงเช่นกัน ซึ่งจะกำหนดดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



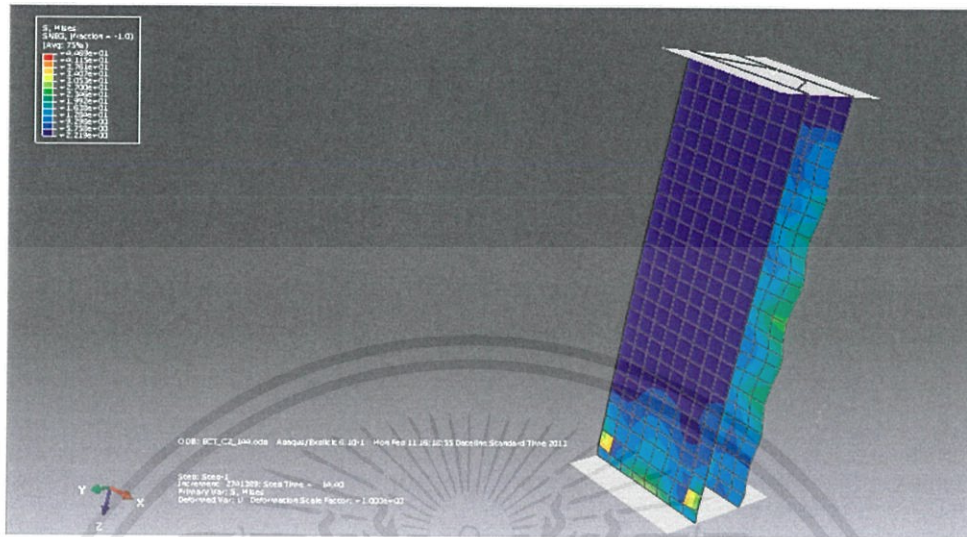
e Edit Boundary Condition dialog

## 7) Mesh ในส่วนนี้เราจะทำคล้ายกับชนิดแฟลชครีซ

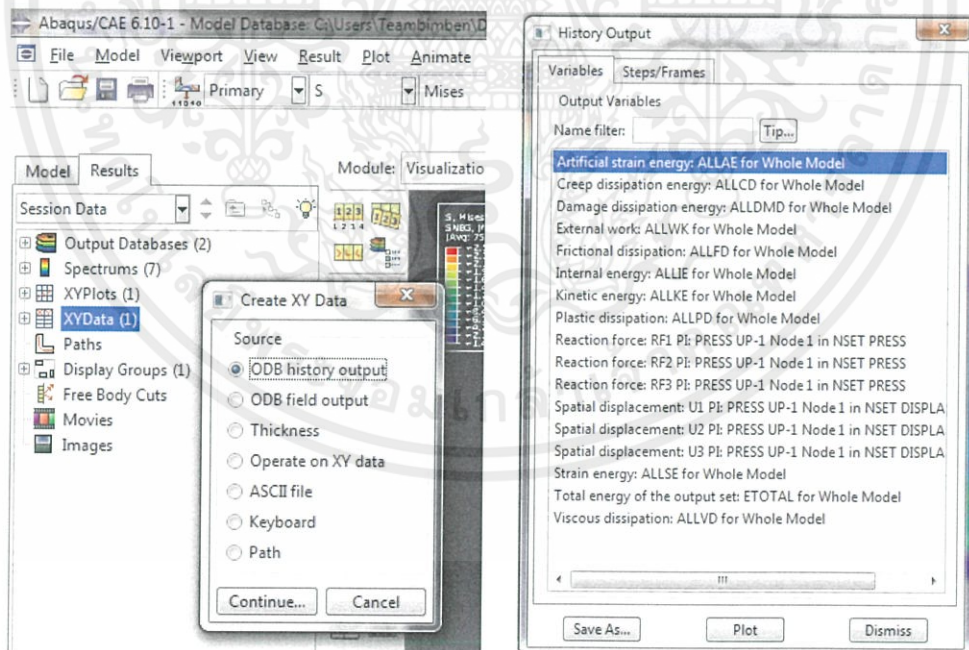


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

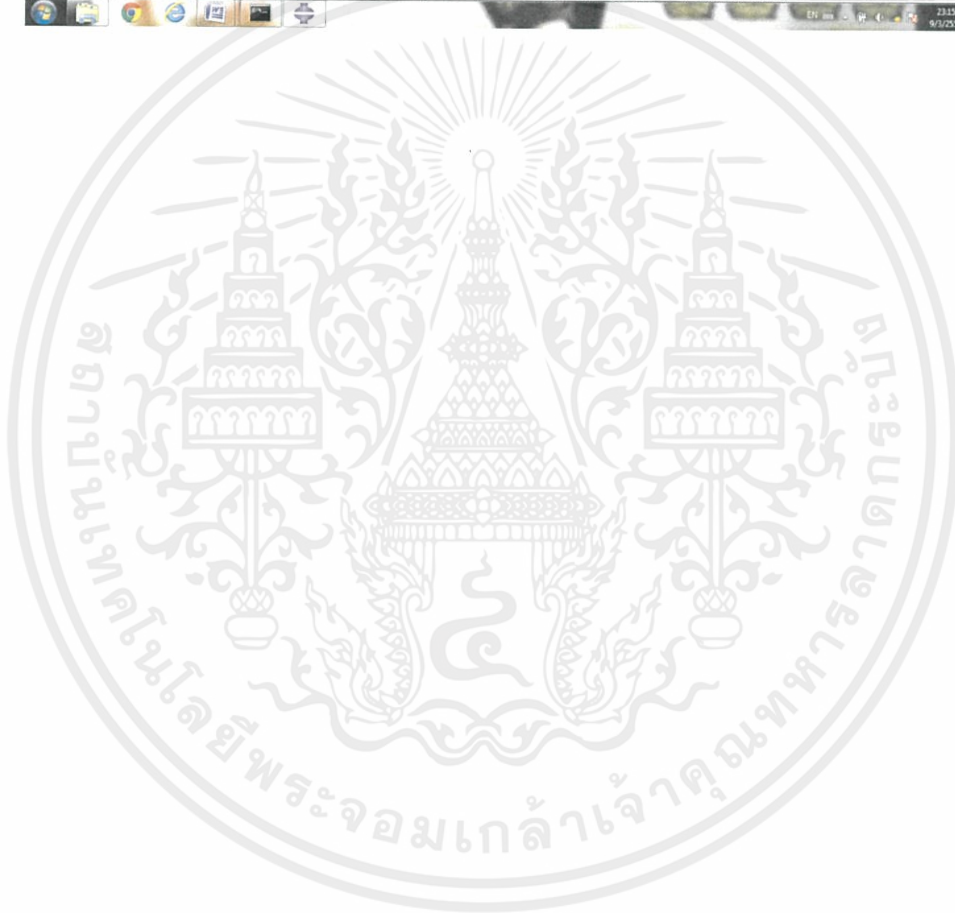
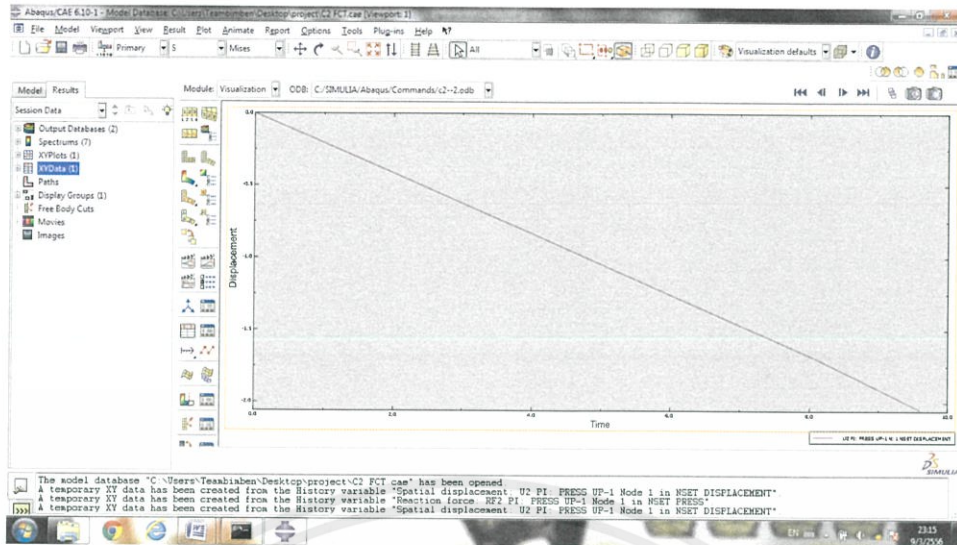
## 8) Job ในส่วนนี้จะทำคล้ายกับชนิดแฟลชครีช



- การเรียกกราฟของแรงและระยะยวบตัวออกมาดู ให้คลิกขวาที่ XYData (1) แล้วคลิก Create... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ช่องของ Source ให้เลือก ODB history output แล้วคลิก Continue... จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ให้เราเลือกกราฟที่เราต้องการแล้วคลิก Plot เสร็จแล้วคลิก Save as... ให้ตั้งชื่อแล้วคลิก OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะแบ่งผลการดำเนินงานออกเป็น 4 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบจริงโดยแยกออกเป็น การทดสอบชนิดแฟลชครีซ และการทดสอบชนิดเอดครีซ ส่วนที่สามเป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองหนึ่งลูกอนที่มีคุณสมบัติสมมาตรโดยนำมาคูณอัตราส่วนแล้วเทียบกับผลของแบบจำลองเต็มแผ่นของรูปร่างลอน C<sub>2</sub> และส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรงแบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เปรียบเทียบกับการทดสอบจริงและเปรียบเทียบลอน C ทั้ง 4 แบบ

### 5.1 ผลการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษซึ่งคุณสมบัติในแต่ละทิศทาง (MD, CD, ZD) จะมีค่าคุณสมบัติที่ไม่เท่ากัน ฉะนั้นเราจึงพิจารณาเพียง 2 ทิศทาง คือทิศทาง MD และทิศทาง CD ส่วนทิศทาง ZD จะพิจารณาได้ยากแต่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

คุณสมบัติทางกลของกระดาษสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ค่าความชันนั้นคือค่า Young's Modulus โดยจะพิจารณากระดาษแผ่นเรียบ (Liner) กับกระดาษที่ใช้ทำลอน (Flute) ในทิศทาง MD และ CD ซึ่งสามารถคำนวณตามมาตรฐาน TAPPI-494 [10]

ส่วนค่า Young's Modulus ของแรงเฉือนสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.4) - (2.6) และค่าอัตราส่วนปัวซองของกระดาษจะใช้ค่าตาม [4]

คุณสมบัติของกระดาษมีทั้งหมด 9 ค่าคือ

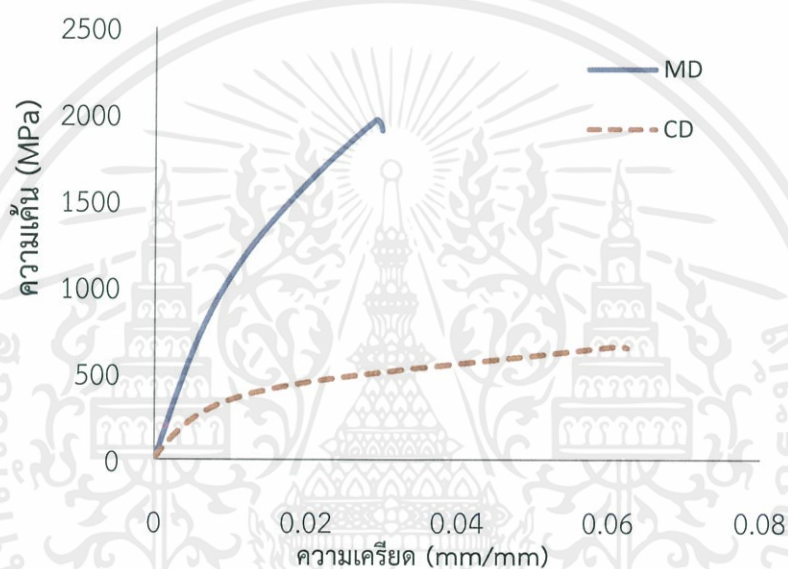
$E_{MD}, E_{CD}, E_{ZD}, G_{MDCD}, G_{MDZD}, G_{CDZD}, \nu_{MDCD}, \nu_{MDZD}, \nu_{CDZD}$

การคำนวณหาค่า Young's Modulus ตามมาตรฐาน TAPPI-494 [10] เริ่มจากการหาจุดสุดท้ายของช่วงเชิงเส้น (elastic limit) ด้วย 0.2% offset ซึ่งทำการลากขนานกับเส้นการทดสอบ แล้วแบ่งออกเป็น 3 จุดคือ 75%, 20%, 5% ของจุด elastic limit เมื่อหาค่าได้แล้วนำไปหาแรงที่ใช้ในการดึงกระดาษและระยะยืดของทั้งสามจุด หลังจากนั้นพิจารณาค่า Young's Modulus ออกเป็น 2 ช่วงคือ 75% ถึง 20% และ 20% ถึง 5% ตามสมการ (5.1) สุดท้ายให้เลือกราค่าสูงที่สุดเป็นค่า Young's Modulus ของกระดาษ

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ขนาด	แผ่นเรียบ	แผ่นที่ใช้ทำลอน
ความยาว (mm)	254	254
ความกว้าง (mm)	15	15
ความหนา (mm)	0.34	0.3
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	735	617

### 5.1.1 การหาค่ายังมอดูลัสของกระดาษแผ่นเรียบในทิศทาง MD และ CD



รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของกระดาษแผ่นเรียบในทิศทาง MD และ CD

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟในทิศทาง MD มีค่ามากกว่าความชันของกราฟในทิศทาง CD แสดงว่าค่ายังมอดูลัสของกระดาษแผ่นเรียบในทิศทาง MD มีค่ามากกว่าค่ายังมอดูลัสของกระดาษแผ่นเรียบในทิศทาง CD ซึ่งในทิศทาง MD จะมีค่ามากกว่าประมาณ 3 เท่าของทิศทาง CD

ตารางที่ 5.2 ค่า Elastic limit แรงดึงและระยะยืดที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของกระดาษแผ่นเรียบ

	แผ่นเรียบทิศทาง MD	แผ่นเรียบทิศทาง CD
Elastic limit (MPa)	1,135.818	366.392
75% ของ Elastic limit (MPa)	851.864	274.794
20% ของ Elastic limit (MPa)	227.164	73.278
5% ของ Elastic limit (MPa)	56.791	18.320
75% ของแรงดึง (N)	151.759	50.111
20% ของแรงดึง (N)	39.796	14.438
5% ของแรงดึง (N)	9.198	4.543
75% ของระยะยืด (mm)	1.309	1.207
20% ของระยะยืด (mm)	0.339	0.223
5% ของระยะยืด (mm)	0.084	0.040

สมการหาค่ายังมอดูลัส (E) [10]

$$E = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) \quad (5.1)$$

E คือ ค่ายังมอดูลัส (MPa),  $\Delta f$  คือ ความต่างของแรงดึง (N),  $\Delta L$  คือ ความต่างของความยาว (m)  
L คือ ความยาวเริ่มต้น (m), w คือ ความต่างของแรงดึง (m), t คือ ความหนา (m)

#### 5.1.1.1 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นเรียบในทิศทาง MD ( $E_{MD}$ )

พิจารณาในช่วงที่ 75% ถึง 20%

$$E_{MD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{75\%} - f_{20\%}}{L_{75\%} - L_{20\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{MD} = \left( \frac{151.759 - 39.796}{(1.309 - 0.338) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.34 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{MD} = 5,742.736 \text{ MPa}$$

พิจารณาในช่วงที่ 20% ถึง 5%

$$E_{MD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{20\%} - f_{5\%}}{L_{20\%} - L_{5\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{MD} = \left( \frac{39.796 - 9.198}{(0.338 - 0.084) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.34 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{MD} = 6,230.079 \text{ MPa}$$

จะเห็นว่าช่วงที่ 20% ถึง 5% มีค่ามากกว่าช่วงที่ 75% ถึง 20% เราจึงเลือกค่ายังมอดูลัสที่ช่วงที่ 20% ถึง 5% ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $E_{MD} = 6,230.079 \text{ MPa}$

### 5.1.1.2 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นเรียบในทิศทาง CD ( $E_{CD}$ )

พิจารณาในช่วงที่ 75% ถึง 20%

$$E_{CD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{75\%} - f_{20\%}}{L_{75\%} - L_{20\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{CD} = \left( \frac{50.111 - 14.4378}{(1.207 - 0.223) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.34 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{CD} = 1,804.820 \text{ MPa}$$

พิจารณาในช่วงที่ 20% ถึง 5%

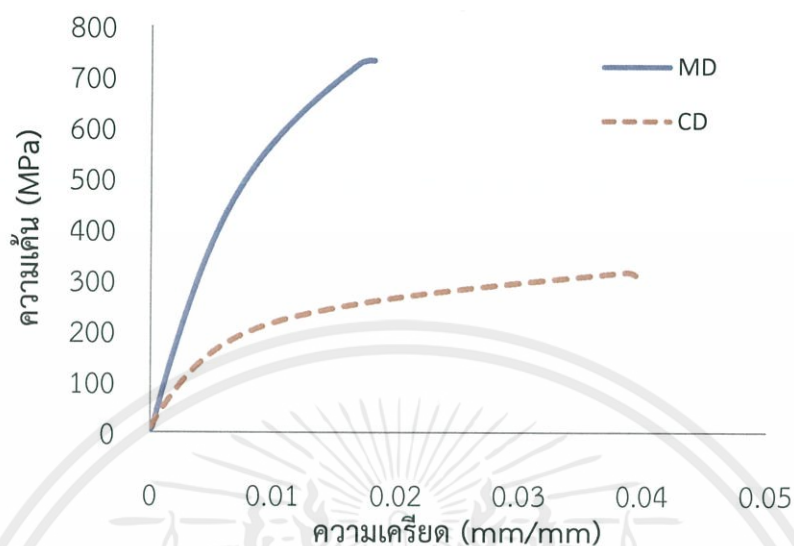
$$E_{CD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{20\%} - f_{5\%}}{L_{20\%} - L_{5\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{CD} = \left( \frac{14.438 - 9.198}{(0.223 - 0.040) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.34 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{CD} = 2,697.399 \text{ MPa}$$

จะเห็นว่าช่วงที่ 20% ถึง 5% มีค่ามากกว่าช่วงที่ 75% ถึง 20% เราจึงเลือกค่ายังมอดูลัสที่ช่วงที่ 20% ถึง 5% ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $E_{CD} = 2,697.399 \text{ MPa}$

### 5.1.2 การหาค่ายังมอดูลัสของกระดาษแผ่นทำลอนในทิศทาง MD และ CD



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของกระดาษแผ่นทำลอนในทิศทาง MD และ CD

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟในทิศทาง MD มีค่ามากกว่าความชันของกราฟในทิศทาง CD แสดงว่าค่ายังมอดูลัสของกระดาษแผ่นทำลอนในทิศทาง MD มีค่ามากกว่าค่ายังมอดูลัสของกระดาษแผ่นทำลอนในทิศทาง CD ซึ่งในทิศทาง MD จะมีค่ามากกว่าประมาณ 3 เท่าของทิศทาง CD

ตารางที่ 5.3 ค่า Elastic limit แรงดึงและระยะยืดที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของกระดาษแผ่นทำลอน

	แผ่นทำลอนทิศทาง MD	แผ่นทำลอนทิศทาง CD
Elastic limit (MPa)	568.791	212.399
75% ของ Elastic limit (MPa)	426.241	159.299
20% ของ Elastic limit (MPa)	113.664	42.480
5% ของ Elastic limit (MPa)	28.416	10.620
75% ของแรงดึง (N)	76.266	29.260
20% ของแรงดึง (N)	18.810	7.668
5% ของแรงดึง (N)	4.722	-
75% ของระยะยืด (mm)	1.088	0.920
20% ของระยะยืด (mm)	0.247	0.151
5% ของระยะยืด (mm)	0.076	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2.1 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นทำลอนในทิศทาง MD ( $E_{MD}$ )

พิจารณาในช่วงที่ 75% ถึง 20%

$$E_{MD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{75\%} - f_{20\%}}{L_{75\%} - L_{20\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{MD} = \left( \frac{76.266 - 18.810}{(1.088 - 0.2472) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.30 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{MD} = 3,857.244 \text{ MPa}$$

พิจารณาในช่วงที่ 20% ถึง 5%

$$E_{MD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{20\%} - f_{5\%}}{L_{20\%} - L_{5\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{MD} = \left( \frac{18.810 - 4.722}{(0.247 - 0.076) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.30 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{MD} = 4,647.380 \text{ MPa}$$

จะเห็นได้ว่าช่วงที่ 20% ถึง 5% มีค่ามากกว่าช่วงที่ 75% ถึง 20% เราจึงเลือกค่ายังมอดูลัสที่ช่วงที่ 20% ถึง 5% ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $E_{MD} = 4,647.38 \text{ MPa}$

### 5.1.2.2 การหาค่ายังมอดูลัสของแผ่นทำลอนในทิศทาง CD ( $E_{CD}$ )

พิจารณาในช่วงที่ 75% ถึง 20%

$$E_{CD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{75\%} - f_{20\%}}{L_{75\%} - L_{20\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right)$$

$$E_{CD} = \left( \frac{29.260 - 7.668}{(0.920 - 0.151) \times 10^{-3}} \right) \times \left( \frac{254}{15 \times 0.30 \times 10^{-3}} \right)$$

$$E_{CD} = 1,583.458 \text{ MPa}$$

พิจารณาในช่วงที่ 20% ถึง 5%

$$E_{CD} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta L} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \left( \frac{f_{20\%} - f_{5\%}}{L_{20\%} - L_{5\%}} \right) \times \left( \frac{L}{w \times t} \right) = \text{ไม่มีค่า}$$

ช่วงที่ 20% ถึง 5% ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากข้อมูลแรงดึงและระยะยืดที่ 5% ไม่ได้ปรากฏในตารางการทดลอง ดังนั้นจึงใช้ค่าในช่วงที่ 75% ถึง 20% แทนซึ่งมีค่าเท่ากับ  $E_{CD} = 1583.458 \text{ MPa}$

### 5.1.3 การหayingมอดูลัสในทิศทาง ZD มอดูลัสของแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนปัวซองค์

$$E_{ZD} = \frac{E_{MD}}{200} \quad (5.3)$$

$$G_{MDCD} = 0.387\sqrt{E_{MD}E_{CD}} \quad (5.4)$$

$$G_{MDZD} = \frac{E_{MD}}{55} \quad (5.5)$$

$$G_{CDZD} = \frac{E_{CD}}{35} \quad (5.6)$$

ตารางที่ 5.4 สรุปค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษแผ่นเรียบกับแผ่นลอนในทิศทาง MD และ CD

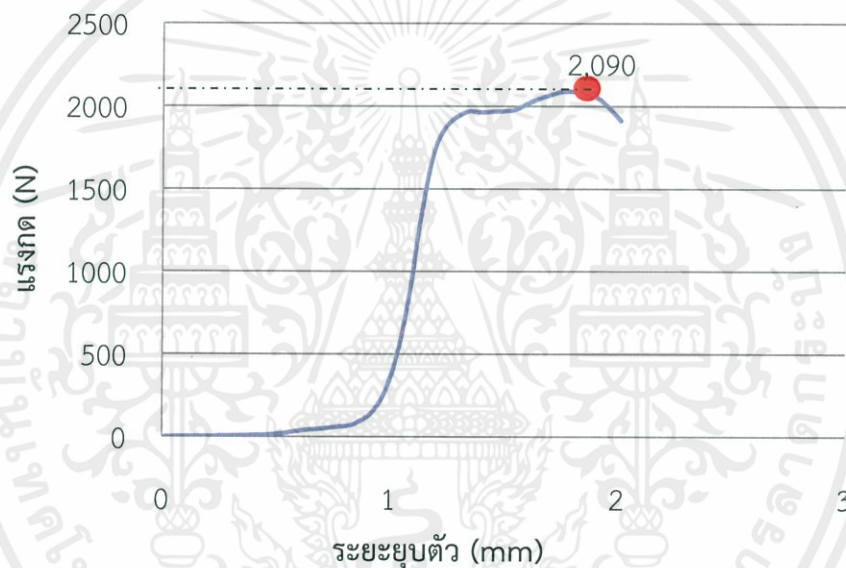
ค่าคุณสมบัติ	แผ่นเรียบ	แผ่นลอน
$E_{MD}$ (MPa)	6,230	4,647
$E_{CD}$ (MPa)	2,697	1,583
$E_{ZD}$ (MPa)	31	23
$G_{MDCD}$ (MPa)	1,586	1,049
$G_{MDZD}$ (MPa)	113	84
$G_{CDZD}$ (MPa)	77	45
$\nu_{MDCD}$	0.34	0.34
$\nu_{MDZD}$	0.01	0.01
$\nu_{CDZD}$	0.01	0.01
ความหนา (mm)	0.34	0.3
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	735	617

## 5.2 การทดสอบความแข็งแรง

### 5.2.1 การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีแฟลชครีซ

ขั้นตอนทดสอบในหัวข้อนี้คือกระดาศลูกฟูกลอน C<sub>2</sub> (มีความสูงของลอนเท่ากับ 3.60 mm และมีระยะพิทซ์เท่ากับ 7.50 mm) กระบวนการทดสอบจริงเป็นการทดสอบโดยใช้ขั้นตอนทดสอบจำนวนชนิดละ 10 ชิ้นด้วยเครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing ขนาดโหลดเซลล์ 5 kN ด้วยความเร็ว 12.5 mm/min ในการทดสอบจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งส่วนประกอบในแต่ละชิ้นเป็นกระดาศชนิดเดียวกัน ตามมาตรฐานขนาดขั้นตอนทดสอบ 100×100 mm ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นดังนี้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัว  
ที่ได้จากการทดสอบจริงชนิดแฟลชครีซ



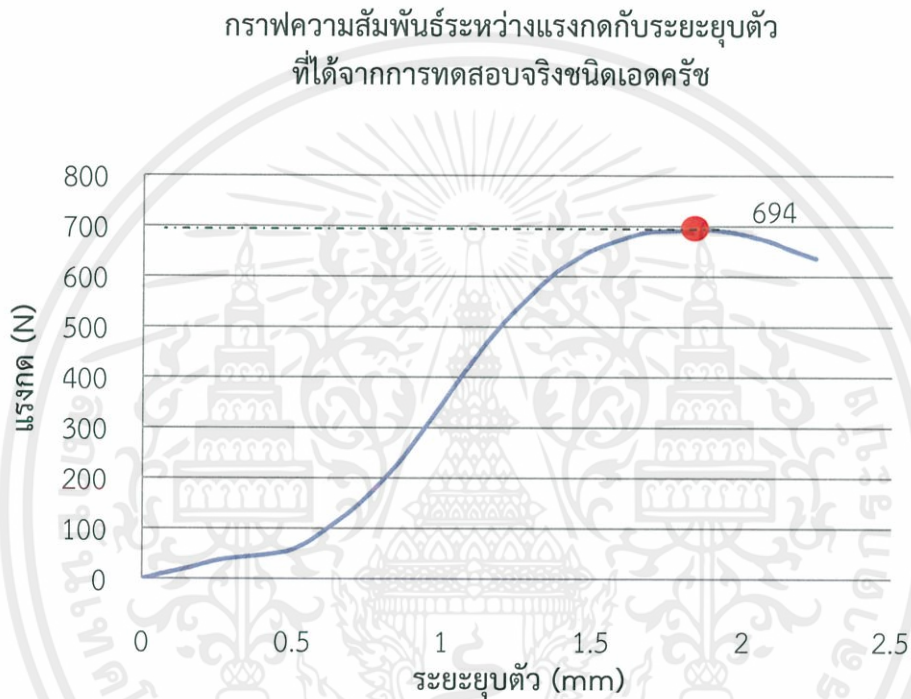
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวที่ได้จากการทดสอบจริงชนิด

แฟลชครีซ

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นของการกด คือช่วงที่ตัวกดเริ่มสัมผัสกับขั้นตอนทดสอบ แรงกดจะเพิ่มขึ้นไม่มาก หลังจากนั้นเมื่อตัวกดสัมผัสกับขั้นตอนอย่างสมบูรณ์แล้ว แรงกดจะเพิ่มขึ้นมากในลักษณะเป็นเชิงเส้น หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่แรงกดเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะพบว่ายอดกราฟลูกแรกแสดงถึงโครงสร้างของลูกลอนเริ่มเกิดการเสียรูป ส่วนยอดกราฟที่สองแสดงถึงแรงกดสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2090 N ที่มีผลทำให้โครงสร้างของลูกลอนได้รับความเสียหาย เป็นไปตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้องบทที่ 2 ของ Jimenez-Cabellero, M.A. et al. [8]

### 5.2.2 การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีเอ็ดคริช

ขั้นทดสอบในหัวข้อนี้คือกระดาษลูกฟูกลอน C<sub>2</sub> (มีความสูงของลอนเท่ากับ 3.60 mm และมีระยะพิทช์เท่ากับ 7.50 mm) กระบวนการทดสอบจริงเป็นการทดสอบโดยการใช้น้ำหนักทดสอบจำนวนชนิดละ 10 ชิ้นด้วยเครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing ขนาดโหลดเซลล์ 5 kN ด้วยความเร็ว 12.5 mm/min ในการทดสอบจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งส่วนประกอบในแต่ละชิ้นเป็นกระดาษชนิดเดียวกัน ตามมาตรฐานขนาดขั้นทดสอบ 25x100 mm ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นดังนี้



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวที่ได้จากการทดสอบจริงชนิดเอ็ดคริช

จากรูปที่ 5.4 จะมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 5.3 คือช่วงเริ่มต้นของการกดหรือช่วงที่ตัวกดเริ่มสัมผัสกับขั้นทดสอบ แรงกดจะเพิ่มขึ้นไม่มาก หลังจากนั้นเมื่อตัวกดสัมผัสกับขั้นทดสอบอย่างสมบูรณ์แล้ว แรงกดจะเพิ่มขึ้นมากในลักษณะเป็นเชิงเส้น หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่แรงกดเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแรงกดสูงสุดนี้จะมีค่าเท่ากับ 694 N โดยจะอยู่ในช่วงลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้

ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบระหว่างค่านิจและแรงสูงสุดของวิธีการทดสอบชนิดแฟลชครีซและวิธีการทดสอบชนิดเอตครีซ

ค่านิจ คือ ค่าของแรงกดหารด้วยระยะยวบตัวในช่วงลักษณะที่เป็นเชิงเส้น หรือ ความชันของกราฟระหว่างแรงกดและระยะยวบตัวในช่วงที่เป็นเชิงเส้น สามารถใช้บอกความแข็งแรงของกระดาษได้

ตารางที่ 5.5 ค่านิจและแรงสูงสุดของการทดสอบชนิดแฟลชครีซและชนิดเอตครีซ

ชนิดการทดสอบ	ค่านิจ (N/mm)	แรงสูงสุด (N)
แฟลชครีซ	7,567	2,090
เอตครีซ	690	694

### 5.3 เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง 1 ลูกลอนเทียบกับผลของแบบจำลองเต็มแผ่น

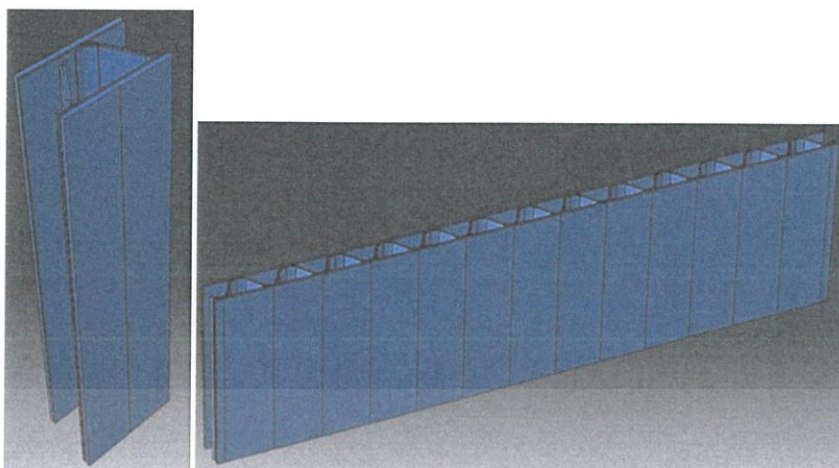
เป็นการเปรียบเทียบทั้งกรณีการทดสอบชนิดแฟลชครีซและการทดสอบชนิดเอตครีซ



รูปที่ 5.5 แบบจำลอง 1 ลูกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่นของการทดสอบชนิดแฟลชครีซ

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบแบบจำลองชนิดแฟลชครีซ 1 ลูกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่น

ชนิดการทดสอบ	1 ลูกลอน (N/mm)	เต็มแผ่น (N/mm)	ความคลาดเคลื่อน
แฟลชครีซ	92,773	92,049	0.79%
เวลาที่ใช้คำนวณ (s)	233	14,965	



รูปที่ 5.6 แบบจำลอง 1 ลูกกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่นของการทดสอบชนิดเอตครีซ

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบแบบจำลองชนิดเอตครีซ 1 ลูกกลอนและแบบจำลองเต็มแผ่น

ชนิดการทดสอบ	1 ลูกกลอน (N/mm)	เต็มแผ่น (N/mm)	ความคลาดเคลื่อน
เอตครีซ	117.5	115.8	1.47 %
เวลาที่ใช้คำนวณ (s)	515	6,274	

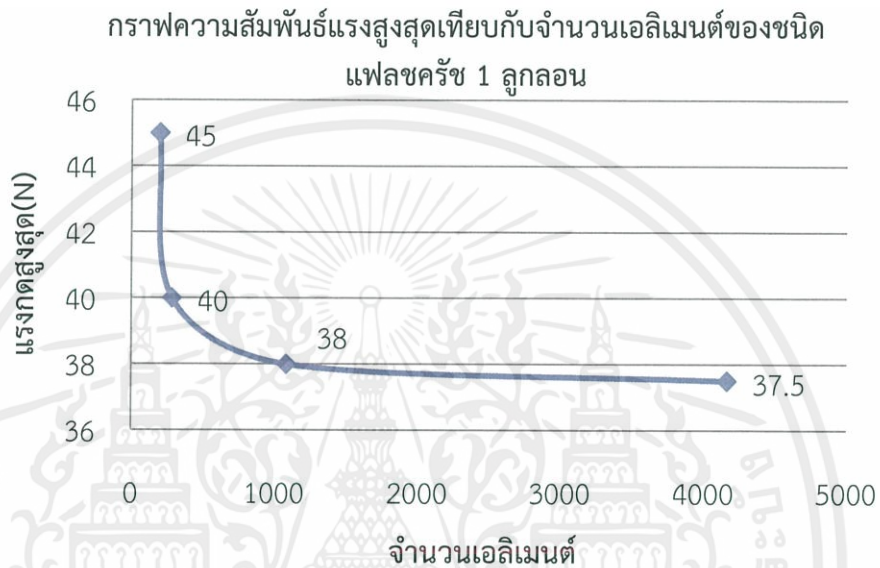
ซึ่งจะเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง 1 ลูกกลอนที่มีคุณสมบัติสมมาตรโดยนำมาคูณอัตราส่วนแล้วเทียบกับผลของแบบจำลองเต็มแผ่นของรูปร่างลอน C<sub>2</sub> แสดงไว้ดังตาราง

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าแรงของแบบจำลอง 1 ลูกกลอนกับแบบจำลองเต็มแผ่น

ชนิดทดสอบ	1 ลูกกลอน (N/mm)	เต็มแผ่น (N/mm)	ความคลาดเคลื่อน
แฟลชครีซ	92,773	92,049	0.79%
เอตครีซ	117.5	115.8	1.47%

## 5.4 การเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

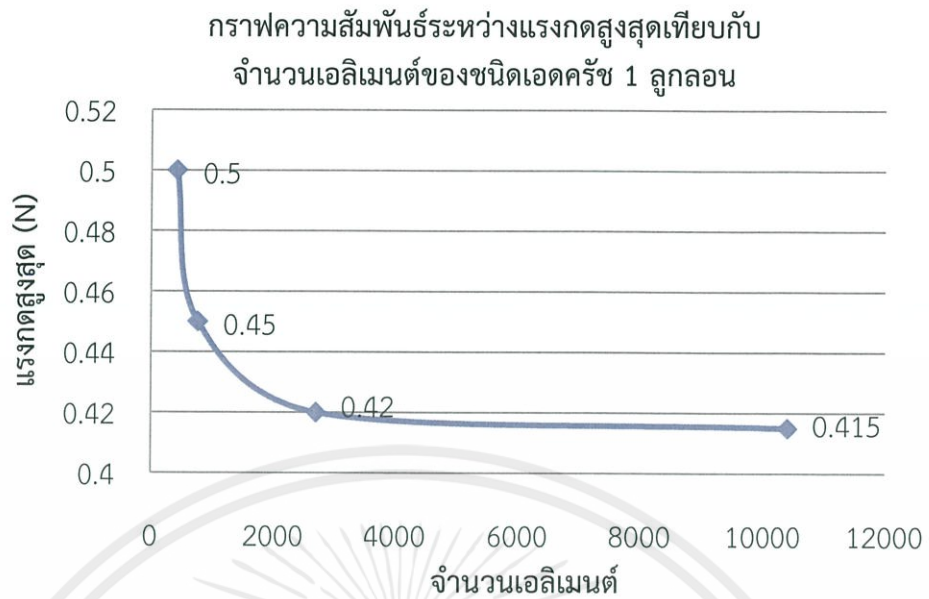
การเลือกใช้ขนาดของเอลิเมนต์ จะพิจารณาให้มีความเหมาะสมและมีความถูกต้องแม่นยำกับแบบจำลองเสมือนจริง โดยคำนึงอยู่ 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกคือมีความละเอียดเพียงพอต่อการประมวลผล และส่วนที่สอง เวลาที่เหมาะสมกับการประมวลผล การเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เหมาะสมจะใช้นขนาด 0.5 mm ทั้งวิธีทดสอบชนิดแฟลชครีชและเอดครีช เนื่องจากมีแรงกดสูงสุดใกล้เคียงกับเอลิเมนต์ขนาด 0.25 mm แต่จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับจำนวนเอลิเมนต์ของการทดสอบชนิดแฟลชครีช 1 ลูกกลอน

ตารางที่ 5.9 แรงกดสูงสุดที่ขนาดเอลิเมนต์ต่างๆของแบบจำลองชนิดแฟลชครีช 1 ลูกกลอน

ขนาดเอลิเมนต์ (mm)	จำนวนเอลิเมนต์	แรงกดสูงสุด (N)	เวลาที่ใช้ประมวลผล (s)
1.375	418	0.5	74.1
1	754	0.45	113.7
0.5	2,704	0.42	515
0.25	10,404	0.415	3,942.9

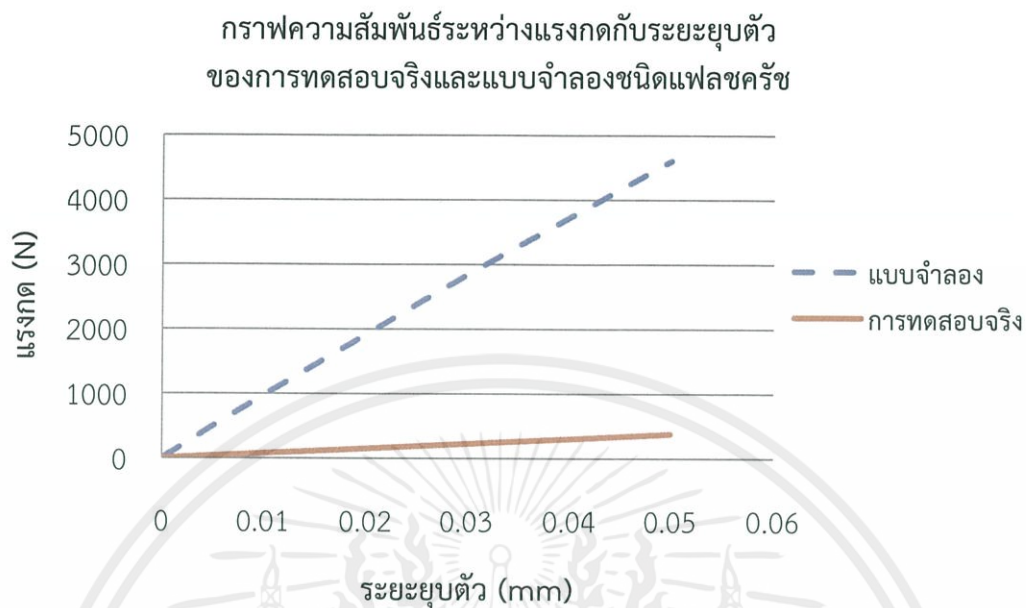


รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับจำนวนเอลิเมนต์ของการทดสอบชนิดเอตครีช 1 ลูกกลอน

ตารางที่ 5.10 แรงกดสูงสุดที่ขนาดเอลิเมนต์ต่างๆของแบบจำลองชนิดเอตครีช 1 ลูกกลอน

ขนาดเอลิเมนต์ (mm)	จำนวนเอลิเมนต์	แรงกดสูงสุด (N)	เวลาที่ใช้ประมวลผล (s)
1.375	196	45	29
1	284	40	45
0.5	1,084	38	233
0.25	4,164	37.5	2,051

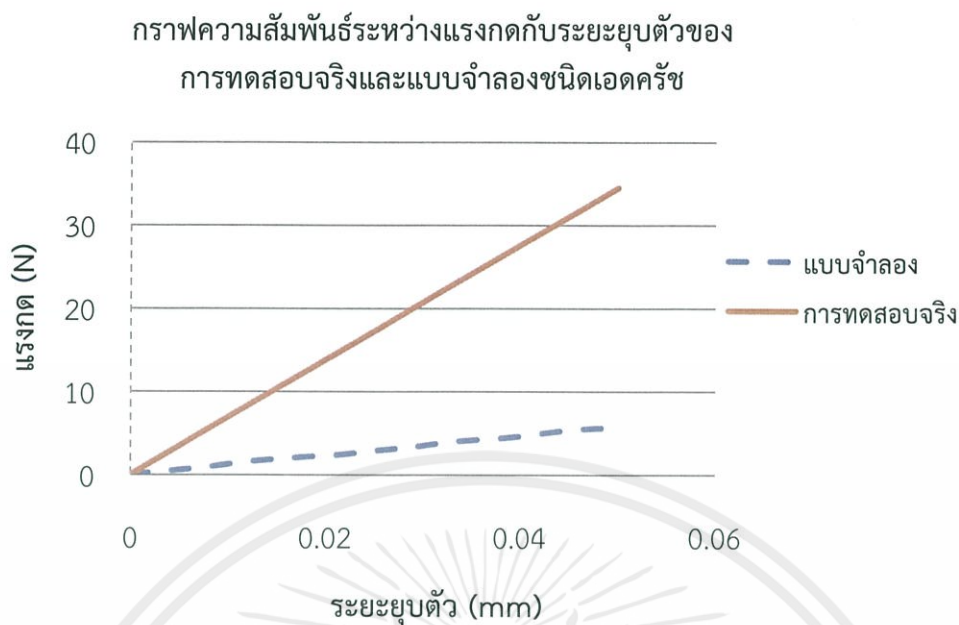
## 5.5 การเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างการทดสอบจริงกับแบบจำลอง



รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของการทดสอบจริงและแบบจำลองชนิดเพลชกรีซ

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่ากราฟของแบบจำลองมีค่ามากกว่ากราฟของการทดสอบจริงอยู่มาก ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจาก

- 1) การทดสอบคุณสมบัติของกระดาษและการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ ไม่ได้ใช้เครื่องทดสอบเครื่องเดียวกัน
- 2) เครื่องทดสอบไม่ได้มีการสอบเทียบก่อนใช้งาน
- 3) ไม่ได้ใช้เครื่องตัดที่ได้มาตรฐานในการตัดชิ้นทดสอบ
- 4) กระดาษที่ใช้ทดสอบแรงดึง และกระดาษที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงชนิดเพลชกรีซ และเอดกรีซ เป็นกระดาษคนละชุดในการผลิต

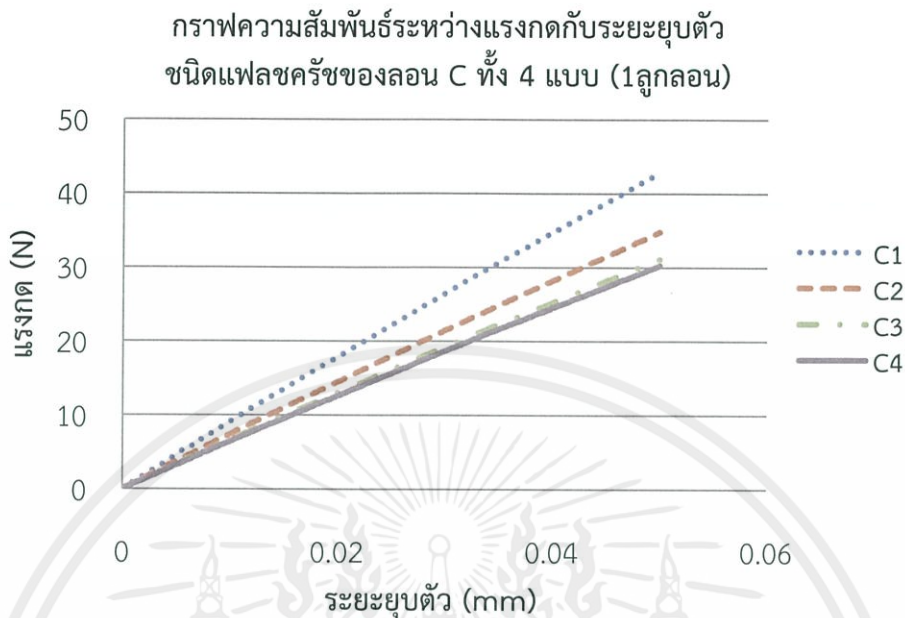


รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของ การทดสอบจริงและแบบจำลอง ชนิดเอดครีซ

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่ากราฟของแบบจำลองมีค่าน้อยกว่ากราฟของการทดสอบจริงอยู่มาก ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจาก

- 1) การทดสอบคุณสมบัติของกระดาษและการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ ไม่ได้ใช้ เครื่องทดสอบเครื่องเดียวกัน
- 2) เครื่องทดสอบไม่ได้มีการสอบเทียบก่อนใช้งาน
- 3) ไม่ได้ใช้เครื่องตัดที่ได้มาตรฐานในการตัดชิ้นทดสอบ
- 4) กระดาษที่ใช้ทดสอบแรงดึง และกระดาษที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซ และเอดครีซ เป็นกระดาษคนละชุดในการผลิต

## 5.6 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของแบบจำลองลอน C ทั้ง 4 แบบ

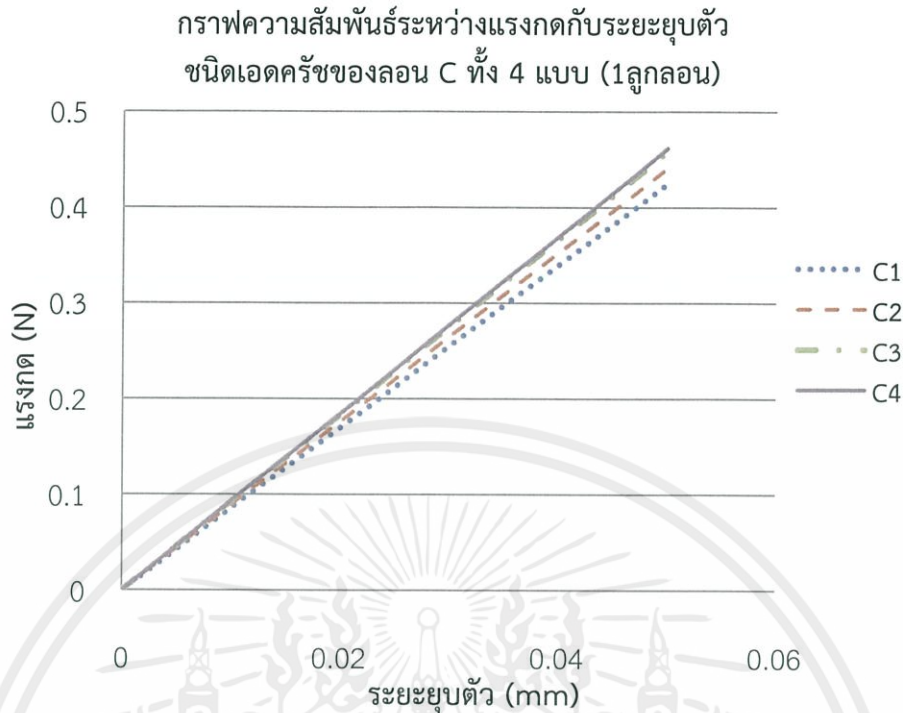


รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซ 1 ลูกลอนของลอน C ทั้ง 4 แบบ

ตารางที่ 5.11 คำนิจที่ได้จากแบบจำลองชนิดแฟลชครีซของลอน C ทั้ง 4 แบบ

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
ค่านิจ (N/mm)	856.9	695.8	623.0	605.2
% การเพิ่มขึ้นของค่านิจ	41.5	14.9	2.9	0

จากตารางที่ 5.11 จะเห็นว่ารูปแบบลอน C<sub>1</sub> ให้ค่านิจมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 856.9 N/mm รองลงมาคือ C<sub>2</sub> C<sub>3</sub> และ C<sub>4</sub> ตามลำดับ ผลที่ได้เป็นผลมาจากระยะพิทช์ ซึ่ง C<sub>1</sub> จะมีค่าน้อยที่สุดและเพิ่มขึ้นตามลำดับไปจะถึง C<sub>4</sub> สรุปคือค่านิจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะพิทช์ เพราะ การลดลงของระยะพิทช์ทำให้เกิดจุดรองรับแรงมีจำนวนมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้รูปแบบลอน C<sub>1</sub> ซึ่งมีระยะพิทช์น้อยที่สุด มีความแข็งแรงมากที่สุด



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของแบบจำลองการทดสอบชนิดเอตครีซ 1 ลูกลอนของลอน C ทั้ง 4 แบบ

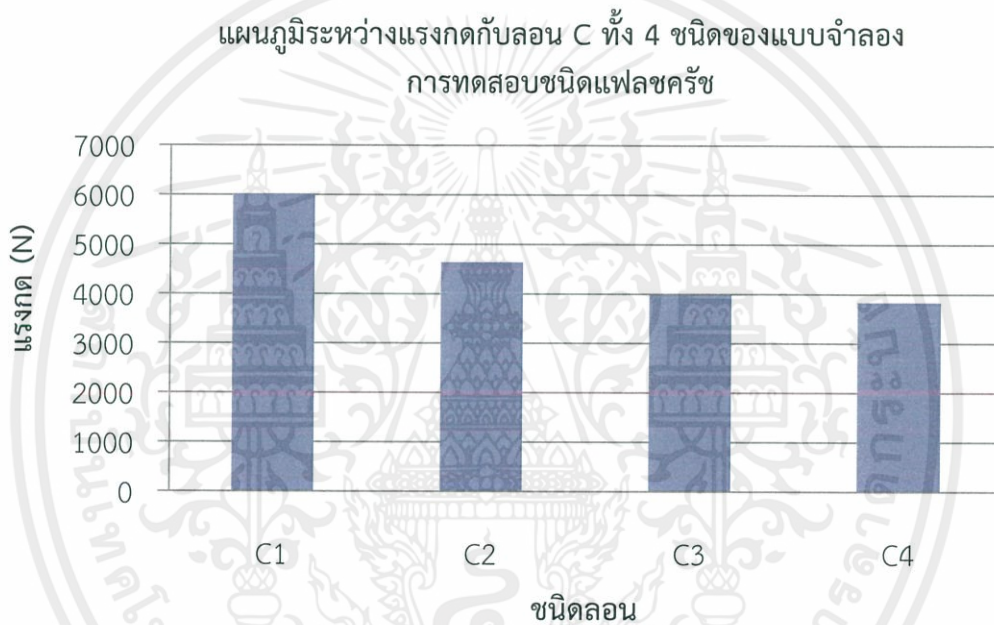
ตารางที่ 5.12 คำนิจที่ได้จากแบบจำลองชนิดเอตครีซของลอน C ทั้ง 4 แบบ

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
ค่านิจ (N/mm)	8.487	8.813	9.165	9.231
% การเพิ่มขึ้นของค่านิจ	0	3.8	7.9	8.7

จากตารางที่ 5.12 จะเห็นว่ารูปแบบลอน C<sub>1</sub> ให้ค่านิจมากที่สุด รองลงมาคือ C<sub>2</sub> C<sub>3</sub> และ C<sub>4</sub> ตามลำดับ จากผลที่ได้คิดว่ามาจากพื้นที่รับแรง ซึ่ง C<sub>1</sub> จะมีค่าน้อยที่สุดและเพิ่มขึ้นตามลำดับไปจะถึง C<sub>4</sub> สรุปคือค่านิจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแรง เพราะ ความสูงของลอนมากขึ้นทำให้เกิดพื้นที่รับแรงมีมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้รูปแบบลอน C<sub>4</sub> ซึ่งพื้นที่รับแรงมากที่สุด มีความแข็งแรงมากที่สุด

ตารางที่ 5.13 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงสูงสุดและ Take up ratio ของลอน C ทั้ง 4 แบบที่ได้จากแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซ

ลอน	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
แรงกดสูงสุด (N)	6,014	4,639	3,989	3,834
Take up ratio	1.524	1.473	1.456	1.456
ระยะพิทช์ (mm)	7.13	7.50	7.80	7.90
% การเพิ่มของแรงกดสูงสุด	56.9	21.0	4.0	0.0
% การเพิ่มของ Take up ratio	4.7	1.2	0.0	0.0
% การลดลงของระยะพิทช์	10.7	9.3	5.2	0.0



รูปที่ 5.13 แผนภูมิระหว่างแรงกดกับลอน C ทั้ง 4 ชนิดของแบบจำลองการทดสอบชนิดแฟลชครีซ

จากตารางที่ 5.13 ค่าแรงสูงสุดที่ได้เกิดจากการนำค่าแรงสูงสุดของ 1 ลูกลอนคูณด้วยอัตราส่วนที่จะทำให้เท่ากับขนาดแผ่นเต็ม (อัตราส่วนของแต่ละลอนเท่ากับพื้นที่แผ่นเต็มของแต่ละลอนหารด้วยพื้นที่ 1 ลูกลอนของแต่ละลอน)

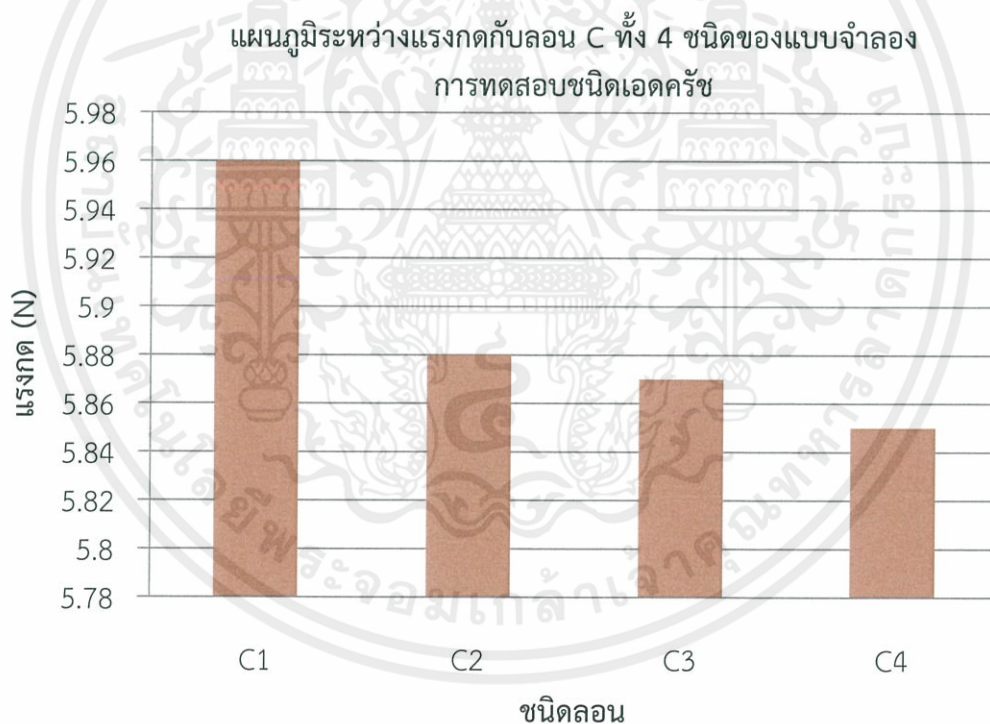
สำหรับแบบจำลองชนิดแฟลชครีซเราพบว่า เมื่อ % Take up ratio มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ลอนสามารถรับแรงกดได้เพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า Take up ratio เพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบอย่างมากต่อความแข็งแรงของแบบจำลองชนิดแฟลชครีซเพราะสามารถรับแรงกดสูงสุดเพิ่มขึ้นได้ถึง 56.9% แต่ต้องคำนึงในเรื่องของค่า Take up ratio ที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้สิ้นเปลืองกระดาษในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสังเกตจะเห็นว่า % การลดลงของระยะพิทช์จะทำให้แรงกดสูงสุดเพิ่มขึ้น เพราะมีจุดรองรับแรงมากขึ้น

ตารางที่ 5.14 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของแรงสูงสุดและ Take up ratio ของลอน C ทั้ง 4 แบบ ที่ได้จากแบบจำลองการทดสอบชนิดเอคร์ช

ลอน	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
แรงกดสูงสุด (N)	5.96	5.88	5.87	5.85
Take up ratio	1.524	1.473	1.456	1.456
ความสูงลอน (mm)	3.68	3.60	3.65	3.70
% การเพิ่มของแรงกดสูงสุด	1.9	0.5	0.3	0.0
% การเพิ่มของ Take up ratio	4.7	1.2	0.0	0.0
% การเพิ่มของความสูงลอน	2.2	0.0	1.4	2.7



รูปที่ 5.14 แผนภูมิระหว่างแรงกดกับลอน C ทั้ง 4 ชนิดของแบบจำลองการทดสอบชนิดเอคร์ช

จากตารางที่ 5.14 ค่าแรงสูงสุดที่ได้เกิดจากการนำค่าแรงสูงสุดของ 1 ลูกลอนคูณด้วยอัตราส่วนที่จะทำให้เท่ากับขนาดแผ่นเต็ม (อัตราส่วนของแต่ละลอนเท่ากับพื้นที่แผ่นเต็มของแต่ละลอนหารด้วยพื้นที่ 1 ลูกลอนของแต่ละลอน)

สำหรับแบบจำลองชนิดเอตครีซเราพบว่า เมื่อ % การเพิ่มของ Take up ratio มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ลอนสามารถรับแรงกดได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า Take up ratio เพิ่มขึ้น จะมีผลกระทบน้อยมากต่อความแข็งแรงของแบบจำลองชนิดเอตครีซเพราะสามารถรับแรงกดสูงสุด เพิ่มขึ้นได้เพียง 1.9 % ซึ่งถือว่าน้อยมาก

ทั้งนี้ตารางที่ 5.13 กับ 5.14 ผลที่ได้จากตารางเป็นการเพิ่มตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์กระดาดลูกฟูกในแต่ละรูปแบบให้เหมาะสมและตรงกับลักษณะการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผล

จากการศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างของกระดาศลูกฟูกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะแบ่งการทดสอบความแข็งแรงออกเป็น การทดสอบชนิดแฟลชครีซ และการทดสอบชนิดเอตครีซ โดยการศึกษาจะเลือกพิจารณา ลอน C ซึ่ง ลอน C แบ่งได้เป็น 4 แบบตามตารางที่ 3.2 โดยการศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างของกระดาศลูกฟูกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิต ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังมีผลต่อการตัดสินใจเลือกพื้นที่ใช้ในการผลิตโครงสร้างของแผ่นลอน

การทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. เลือกใช้ประเภท ลอน  $C_2$  ในการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับแบบจำลองเสมือนจริง 2. เปรียบเทียบประเภท ลอน C ในแบบต่างๆ ลอน C แบบใดมีความแข็งแรงที่สุดจากการสร้างแบบจำลองเทียบกับการทดสอบจริง ผลปรากฏว่า

6.1.1 จากการวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองหนึ่งลูก ลอนเปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองเต็มแผ่นจะให้ผลลัพธ์ของแรงสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน

6.1.2 ความแข็งแรงที่วัดโดยวิธีการทดสอบชนิดแฟลชครีซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะพิทซ์ (พิจารณาแบบจำลอง 1 ลูก ลอน)

6.1.3 เมื่อวิเคราะห์ผลจากการใช้โปรแกรม ABAQUS ความแข็งแรงที่วัดโดยวิธีการทดสอบชนิดเอตครีซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแรง (พิจารณาที่ 1 ลูก ลอน)

6.1.4 การทดสอบความแข็งแรงทั้งชนิดแฟลชครีซและเอตครีซ ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ take up ratio (พิจารณาแบบจำลองเต็มแผ่น)

ผลจากการศึกษาเป็นการเพิ่มตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกผลิตกระดาศลูกฟูกในแต่ละรูปแบบให้เหมาะสมและตรงกับลักษณะการใช้งาน

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การทดสอบคุณสมบัติและการทดสอบความแข็งแรงของกระดาศลูกฟูกควรใช้เครื่องทดสอบเครื่องเดียวกัน และขนาดโหลดเซลล์ขนาดเดียวกัน

6.2.2 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบควรมีการสอบเทียบก่อนใช้งาน

6.2.3 การตัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบควรใช้เครื่องตัดที่ได้มาตรฐาน

6.2.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงจะมีความสมบูรณ์ควรต้องมีการวิเคราะห์ในช่วงที่เป็นลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นด้วย

6.2.5 ภาระดาซที่ใช้ทดสอบแรงดึง และภาระดาซที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงชนิดแฟลชครีซและเอตครีซ ควรเป็นภาระดาซชุดเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มสยามบรรจุกัมภ์
- [2] อัญชลี กมลรัตนกุล (2545). คู่มือการใช้กระดาษเพื่อการหีบห่อ, ISBN 9748054942
- [3] เอกรินทร์ พงพิณจิรนา. การพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวของกระดาษลูกฟูกจากโครงสร้างกระดาษ พ.ศ.2537. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [4] Allansson Andreas and Svard Bjorn, (2001). **Stability and Collapse of Corrugated Board**, ISSN: 0281-6679, KFS I Lund AB, Lund.
- [5] Baum Gary A, (1984). **The elastic properties of paper**, Ipc Technical Paper Series, number. 145, pp. 2.
- [6] ISO/FDIS 3035. **Determination of flat crush resistance** (2012).
- [7] ISO/FDIS 3037. **Determination of edge crush resistance** (2011).
- [8] Jimenez-Cabellero, M.A. et al.,(2009). **Design of Different Types of Corrugated Board Packages Using Finite Element Tools**, Spain, Instituto Tecnológico de Aragón.
- [9] Nordstrand Tomas, (2003). **Basic Testing and Strength of Corrugated Board and Containers**, ISBN: 91-628-5563-8, KFS I Lund AB, Lund.
- [10] TAPPI-494, **Tensile Properties of Paper and Paperboard**. (2006).