

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเฮดเดอร์ในหม้อน้ำ

Strength Analysis of A Radiator Header



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61882  
วัน,เดือน,ปี..... 24 ก.ค. 2549

b..... 110-2053  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเฮดเดอร์ในหม้อน้ำ  
Strength Analysis of A Radiator Header

โดย

ปนิดา ฤทธิ์แก้ว  
ณัฐพงษ์ ทรัพย์นันท์



อาจารย์ที่ปรึกษา  
ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ ความแข็งแรงของเฮดเตอร์ในหม้อน้ำ

Strength Analysis of A Radiator Header

ผู้จัดทำ

1. นางสาวปนิดา ฤทธิแก้ว

รหัสประจำตัว 44010751

2. นายณัฐพงษ์ หารรณันท์

รหัสประจำตัว 44010696



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทกัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 ที่มาของปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตและภาพรวมของโครงการ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำ Header</b>	3
2.1 ทฤษฎีและพฤติกรรมเชิงกลของยาง	3
2.1.1 Neo-Hooke Model	3
2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบยาง EPDM	7
2.2 ทฤษฎีความเสียหายและพฤติกรรมเชิงกลของโลหะ	11
2.2.1 พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ	11
2.2.2 ทฤษฎีความเสียหาย	11
2.2.3 วิธีการหาค่าพลาสติก Strain	12
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์	15
2.3.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบ 3D สำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่น	15
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS/CAE</b>	23
3.1 ขั้นตอนการเตรียมโมเดลของเฮดเดอร์	23
3.1.1 Header Plate	23
3.1.2 Plastic Tank	28
3.1.3 Tube	39
3.1.4 Packing Tank	30
3.2 ขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ในโมเดล	32
3.3 ขั้นตอนการกำหนด Step ให้กับโมเดล	32
3.3.1 Step 1	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 Step 2	37
3.3.3 Step 3	38
3.4 ขั้นตอนการตี Mesh	39
3.5 ขั้นตอนการรัน Model	40
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการสรุปผลการทดลอง</b>	<b>41</b>
4.1 ผลการทดลอง	41
4.2 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	50
4.3 งานวิจัยขั้นต่อไป	50
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>51</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

### บทที่ 1

รูป 1.1 แสดงส่วนประกอบของหม้อน้ำรถยนต์	1
รูป 1.2 แสดงส่วนประกอบของเฮดเดอร์	2

### บทที่ 2

รูป 2.1 แสดงการพิจารณาวัตถุตามแนวแกน	4
รูป 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ที่เกิดจากค่าทางทฤษฎีของ Neo-Hooke และค่าที่ได้จากการทดลอง	7
รูป 2.3 (a) Universal Tensile Testing Machine (b) การทดสอบการดึงยาง EPDM	8
รูป 2.4 (a) Stress-Strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (b) Stress-Strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (c) Stress-Strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ 3	10
รูป 2.5 Stress-Strain curve ของค่าเฉลี่ย	10
รูป 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve แบบมีจุดคราก	11
รูป 2.7 แสดงการหาค่าความเครียดพลาสติก	12
รูปที่ 2.8 แสดงกราฟ ความเค้น-ความเครียด ของวัสดุ SM2464	13
รูปที่ 2.9 แสดงกราฟ ความเค้น-ความเครียด ของวัสดุ SM2385	14

### บทที่ 3

รูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของ Header Plate	23
รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นส่วนที่ได้จากการ Extrude	24
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดที่เราต้องการเจาะ	24
รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นส่วนที่ถูกเจาะแล้ว	25
รูปที่ 3.5 แสดงขนาดที่เราต้องการ Extrude	25
รูปที่ 3.6 แสดงชิ้นส่วนที่ Extrude แล้ว	26
รูปที่ 3.7 แสดงชิ้นส่วนที่ Round แล้ว	26
รูปที่ 3.8 แสดงบริเวณที่จะทำการตัดออก	27
รูปที่ 3.9 แสดงชิ้นส่วนที่ถูกตัดบริเวณหูของ Header Plate ออก	27
รูปที่ 3.10 แสดงโมเดลของ Header Plate	28
รูปที่ 3.11 แสดง Sketch ของ Plastic Tank	28
รูปที่ 3.12 แสดงโมเดลของ Plastic Tank	29
รูปที่ 3.13 แสดง Sketch ของ Tube	29
รูปที่ 3.14 แสดงโมเดลของ Tube	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 แสดง Sketch ของ Packing Tank	30
รูปที่ 3.16 แสดงโมเดลของ Packing Tank	31
รูปที่ 3.17 แสดงโมเดลของชิ้นส่วนที่ประกอบกันเสร็จแล้ว	31
รูปที่ 3.18 แสดง Boundary Condition ของPlastic Tank ใน Step 1	33
รูปที่ 3.19 แสดง Boundary Condition ของHeader Plate ใน Step 1	33
รูปที่ 3.20 แสดง Boundary Condition ของTube ใน Step 1	34
รูปที่ 3.21 แสดงการกำหนดให้ผิวของ Packing Tank ไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน 3	34
รูปที่ 3.22 แสดงการกำหนดผิวสัมผัสของ Plastic Tank กับ Packing Tank	35
รูปที่ 3.23 แสดงการผูกติดผิวในของ Header Plate กับ Tube	36
รูปที่ 3.24 แสดงการผูกติดผิวด้านล่างของ Packing Tank กับ Header Plate	37
รูปที่ 3.25 แสดงการกำหนดผิวสัมผัส ของ Header Plate กับ Plastic Tank ใน Step 2	37
รูปที่ 3.26 แสดงการใส่แรงกดที่หูของ Header Plate	38
รูปที่ 3.27 แสดงการใส่ความดันในเฮดเดอร์	38
รูปที่ 3.28 แสดง FEM Model	39

#### บทที่ 4

รูปที่ 4.1 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเมื่อรับความดันจากไอน้ำ	41
รูปที่ 4.2 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate	41
รูปที่ 4.3 แสดง Deformed Shape เปรียบเทียบกับ Undeformed Shape โดย ที่ Undeformed Shape คือรูปสี่เหลี่ยม	42
รูปที่ 4.4 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก	42
รูปที่ 4.5 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก	43
รูปที่ 4.6 แสดงความเครียดพลาสติกที่เกิดกับ Header Plate	43
รูปที่ 4.7 แสดงความเค้นที่เกิดในเฮดเดอร์เมื่อรับความดัน 2 bar	44
รูปที่ 4.8 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate	44
รูปที่ 4.9 แสดง Deformed Shape เปรียบเทียบกับ Undeformed Shape โดย ที่ Undeformed Shape คือรูปสี่เหลี่ยม	45
รูปที่ 4.10 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก	45
รูปที่ 4.11 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก	46
รูปที่ 4.12 แสดงความเครียดพลาสติกที่เกิดกับ Header Plate	46
รูปที่ 4.13 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate แบบเรียบ	47
รูปที่ 4.14 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate แบบลอน	47
รูปที่ 4.15 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของแบบจำลองของเฮดเดอร์ที่มี Header Plate แบบเรียบ โดยกำหนด Factor Deformation =5	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของแบบจำลองของเฮดเดอร์ที่มี Header Plate แบบลอน โดยกำหนด Factor Deformation =5	48
รูปที่ 4.17 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของ Header Plate แบบเรียบ	49
รูปที่ 4.18 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของ Header Plate แบบลอน	49
รูปที่ 4.19 แสดงบริเวณโหนดที่ใช้ในการวัดการกระจัด	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเฮดเดอร์ในหม้อน้ำ

นางสาวปณิดา ฤทธิ์แก้ว รหัสประจำตัว 44010751

นายณัฐพงษ์ ธรรมนันท์ รหัสประจำตัว 44010696

ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

### บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ Header หม้อน้ำรถยนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการศึกษาความเค้นและรูปร่างของการเสียรูปที่เกิดขึ้นจากความดันภายใน Header ซึ่ง Header Plate ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่สองแบบ คือ แบบเรียบและแบบลอน จากการวิเคราะห์พบว่า Header Plate แบบเรียบมีความแข็งแรงน้อยกว่า Header Plate แบบลอน และใน Header Plate แบบเรียบจะมีการเสียรูปแบบพลาสติกเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ ๆ กับส่วนโค้งที่ยึดติดกับ Tube



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

This project presents the analysis of a radiator header strength by using finite element method. The analysis is performed to determine stress distribution and deformation of the header, subjected to static pressure. In this project, two different models of a header plate, flate and ribbed types, are considered. From the analysis, it is found that the ribbed-type header plate is stronger than the flat-typed header plate one. Moreover, in the flat-typed header plate, plastic deformation is likely to occure in the hole region of a header plate.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนโครงการนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี รวมถึงขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้การสั่งสอนและคำแนะนำแก่คณะผู้จัดทำ อีกทั้งบริษัท C.H. วัฒนายนต์ จำกัด ที่ให้ความร่วมมือในด้านข้อมูลและวัสดุอุปกรณ์ รวมไปถึงคณะวิทยาศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบวัสดุ

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้ให้กำเนิดและดูแลเอาใจใส่ อีกทั้งยังสนับสนุนให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านด้วยดีตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

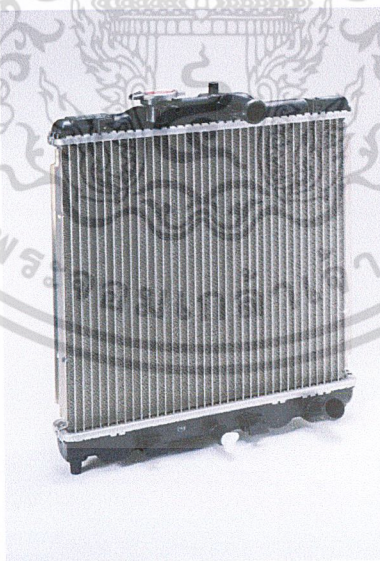
#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

หม้อน้ำ คือ อุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการช่วยระบายความร้อนของเครื่องยนต์ ใช้น้ำที่มีความดันสูงจะไหลผ่านท่อเข้าไปยัง Header หลังจากนั้นจึงผ่านเข้าสู่ตัวหม้อน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ใช้น้ำจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นน้ำ และคลายความร้อนออกมาเป็นจำนวนมากและให้พลังงานจลน์ออกมา หลังจากนั้นน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำลงจะไหลออกจากหม้อน้ำที่ส่วนล่าง จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้น ทำให้เราทราบว่าควรจะต้องออกแบบ Header หม้อน้ำรถยนต์ให้มีความแข็งแรงและไม่เกิดการรั่วซึม เนื่องจาก Header ต้องรับความดันสูงจากไอน้ำ

วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยในการทำนายการเสียรูปที่อาจเกิดขึ้นจากการรับความดันของไอน้ำ รวมถึงสามารถใช้ทำนายความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ และวิธีการนี้ยังช่วยเป็นแนวทางการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนที่จะนำมาผลิตจริง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมในปัจจุบัน

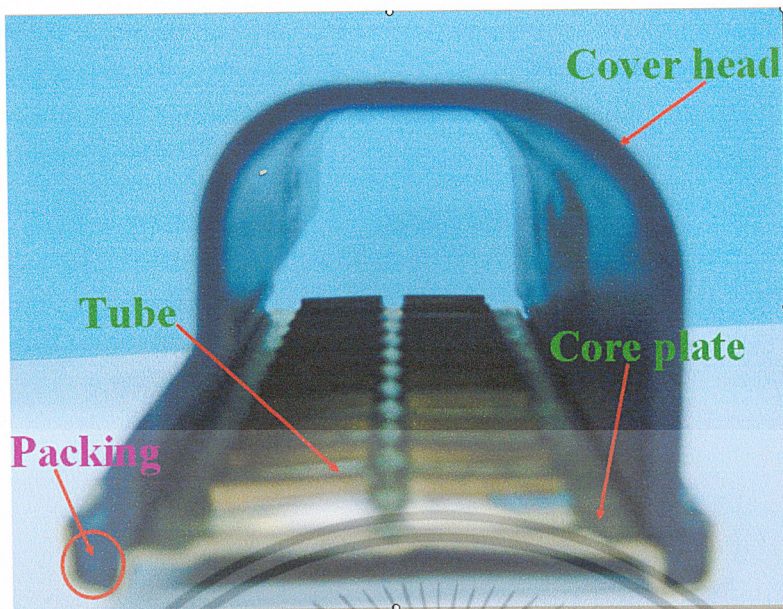
#### 1.2 ที่มาของปัญหา

ปัญหาเกิดจากการรั่วซึมที่เกิดขึ้นภายใน Header ภายหลังจากที่ได้รับแรงดันสูงจากไอน้ำ ซึ่งเมื่อ Header ที่ได้รับการออกแบบมาไม่ดีพอจึงทำให้การรั่วซึมเกิดขึ้น



รูป 1.1 แสดงส่วนประกอบของหม้อน้ำรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1.2 แสดงส่วนประกอบของ Header

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.3.1 ทำนายการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นของ Header เนื่องจากการรับแรงดันจากไอน้ำ
- 1.3.2 เปรียบเทียบความแข็งแรงของ Header ซึ่งมี Header Plate ที่แตกต่างกันสองแบบ
- 1.3.3 หาค่าคุณสมบัติของยาง EPDM

### 1.4 ขอบเขตและภาพรวมของโครงการ

โครงการเรื่องการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ Header หม้อน้ำรถยนต์นี้จะเป็นการพิจารณาถึงความเค้น, ความเครียด และการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นใน Header โดยการใช้โปรแกรม ABAQUS/CAE ช่วยในการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์นี้จะเป็นพิจารณาที่อุณหภูมิห้อง โดยพิจารณาเปรียบเทียบ ความแข็งแรงของ Header ที่มี Header Plate ต่างกันสองแบบ คือ แบบลอนกับแบบเรียบ ว่าแบบใดจะมีความแข็งแรงมากกว่ากัน และที่ Header Plate แบบเรียบจะเกิดการเสีรูปร่างแบบพลาสติกที่ความดันเท่าใด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำ Header

#### 2.1 ทฤษฎีและพฤติกรรมเชิงกลของยาง

ยางเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Hyperelastic) สูง ดังนั้นเราจึงไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ Young's modulus,  $E$  มาใช้อธิบายคุณสมบัติของยางได้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์อย่างอื่นในการอธิบายคุณสมบัติของยาง

ในการอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสำหรับวัสดุ Hyperelastic เราจะใช้ค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียด  $W$  (strain energy density function) ซึ่ง  $W$  จะเป็นฟังก์ชันของค่า Invariants ( $I_1, I_2, I_3$ ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

สำหรับวัสดุยาง Ethylene Propylene Diene Methylene (EPDM) ที่ใช้ในการทำ Header สมการความหนาแน่นของพลังงานความเครียด  $W$  จะประพฤติตามสมการของ Neo-Hooke [1]

##### 2.1.1 Neo-Hooke Model

โดยมีสมการดังนี้

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (2.1)$$

โดย

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.2)$$

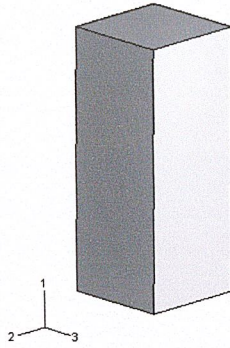
เมื่อ  $I_1$  : ค่า Strain invariant ตัวที่ 1

และ  $\lambda_1$  : ค่าความเครียดหลักตามแนวแกน 1

$\lambda_2$  : ค่าความเครียดหลักตามแนวแกน 2

$\lambda_3$  : ค่าความเครียดหลักตามแนวแกน 3

$C_{10}$  : ค่าคงที่ของวัสดุ ซึ่งจะหาได้จากการทดลอง



รูป 2.1 แสดงการพิจารณาวัตถุตามแนวแกน

จากรูปเราจะได้ว่าคุณสมบัติของยางที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible condition) คือ

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (2.3)$$

จากการทดสอบการดึง เมื่อยางถูกดึงตามแนวแกน 1 ผลก็คือ ยางในแนวแกน 2 และ 3 จะหดเข้าตามแนวแกน

$$\lambda_2 = \lambda_3 \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.4) แทนลงในสมการ (2.2) เราได้

$$I_1 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_1} \quad (2.5)$$

แทน (2.5) ใน (2.1)

$$\begin{aligned} W &= C_{10} \left( \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_1} - 3 \right) \\ &= C_{10} \left( \lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ เราสามารถหาค่าความเค้นตามแนวแกน 1 ได้ดังนี้

$$\sigma_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = 2C_{10} \left[ \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right] \quad (2.6)$$

หลังจากนั้นเราจะทำการจัดสมการเพื่อทำการหา  $C_{10}$  ให้อยู่ในรูป  $y = mx$  เราได้

$$\sigma_1 = 2C_{10} \lambda_1 \left[ 1 - \frac{1}{\lambda_1^3} \right]$$

$$\frac{\sigma_1}{2 \left[ 1 - \frac{1}{\lambda_1^3} \right]} = C_{10} \lambda_1$$

จาก Least square method เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} s &= (y'_1 - y_1)^2 + (y'_2 - y_2)^2 + \dots + (y'_n - y_n)^2 \\ &= (y'_1 - mx_1)^2 + (y'_2 - mx_2)^2 + \dots + (y'_n - mx_n)^2 \end{aligned}$$

เมื่อ  $S$  คือค่าความผิดพลาด และ

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dm} &= -2x_1(y'_1 - mx_1) - 2x_2(y'_2 - mx_2)^2 + \dots + 2x_n(y'_n - mx_n)^2 = 0 \\ &= (x_1y'_1 + x_2y'_2 + \dots + x_ny'_n) - m(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) \end{aligned}$$

ซึ่ง  $m = C_{10}$  เราได้

$$C_{10} = m = \frac{(x_1y'_1 + x_2y'_2 + \dots + x_ny'_n)}{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (2.7)$$

จากการทดสอบแรงดึงของยาง EPDM ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นหนึ่งในส่วนประกอบของ Header ได้ผล ดังนี้ (ซึ่งวิธีการทดสอบได้อธิบายอยู่ในหัวข้อ 2.1.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Stress เฉลี่ย และ Strain เฉลี่ย ที่ได้จากการดึงยาง EPDM

$\sigma_{avg}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{avg}$
0.000000	0.0
0.971767	0.5
1.098667	1.0
1.826667	1.5
3.200000	2.0
4.569667	2.5
5.994000	3.0
7.429667	3.5
9.034667	4.0
11.024833	4.5
13.422000	5.0

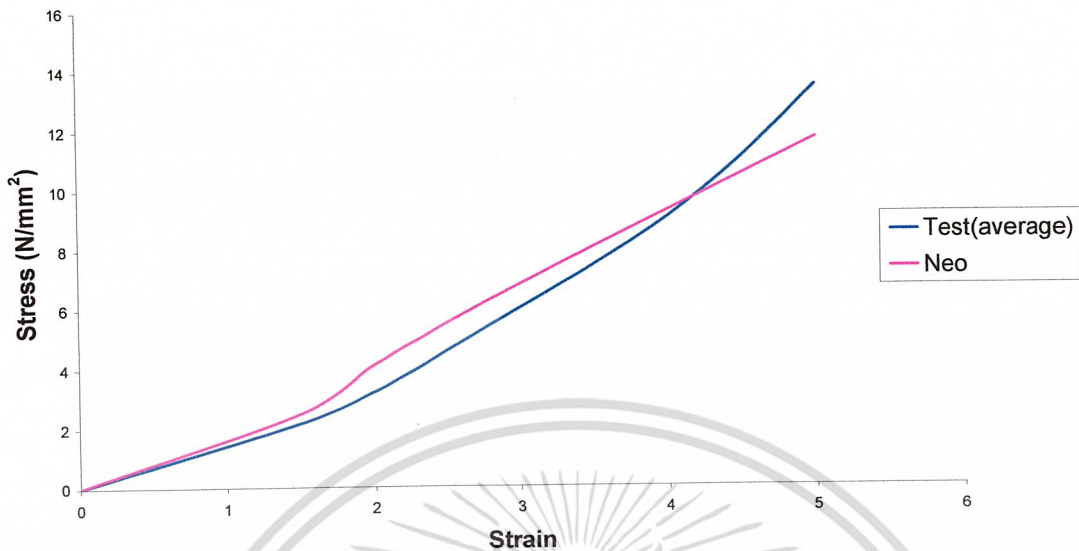
โดยค่า  $\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>) และ  $\epsilon$  เป็นค่าเฉลี่ย

จากค่าตามตารางเราจึงสามารถหาค่า  $C_{10}$  ได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.175201 แทนค่า  $C_{10}$  ลงในสมการ (2.7) ได้

$$\sigma_1 = 2.35041 \left[ \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right]$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของยางที่ได้จากสมการของ Neo Hooke กับกราฟที่ได้จากการทดลองได้ดังแสดงในรูป 2.2

### Neo Hooke vs Test(average)



รูป 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain curve ที่เกิดจากค่าทางทฤษฎีของ Neo-Hooke และค่าที่ได้จากการทดลอง

จะเห็นได้ว่ากราฟมีความใกล้เคียงกันและสามารถยอมรับได้ ดังนั้นการกำหนดคุณสมบัติของยางในโปรแกรมจึงเหมาะสม

#### 2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบยาง EPDM

ยาง EPDM หรือ Ethylene Propylene Diene Methylene เป็นวัสดุที่ใช้ในการทำ Packing Tank ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบยางเพื่อหาค่า Stress และ Strain ของยางเพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม ซึ่งทำการทดลองโดยการดึง โดยใช้เครื่อง Universal Tensile Testing Machine ซึ่งมีโหลดเซลล์ขนาด 100 นิวตัน โดยใส่ค่าเริ่มต้นให้กับเครื่อง Universal Tensile Testing Machine ดังนี้

2.1.2.1 Gauge length ของยางมีค่าเท่ากับ 4 cm

2.1.2.2 Thickness มีค่าเท่ากับ 2.2 mm

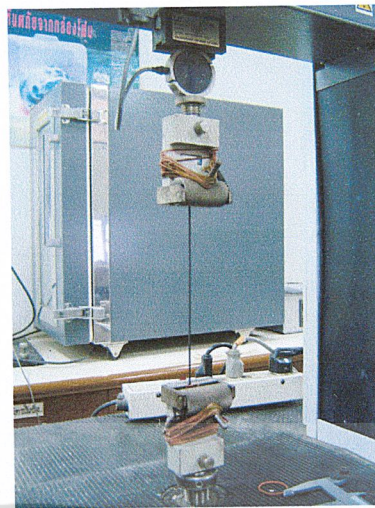
2.1.2.3 Width มีค่าเท่ากับ 2.45 mm

2.1.2.4 Speed มีค่าเท่ากับ 60 mm/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูป 2.3 (a) Universal Tensile Testing Machine  
(b) การทดสอบการดึงยาง EPDM

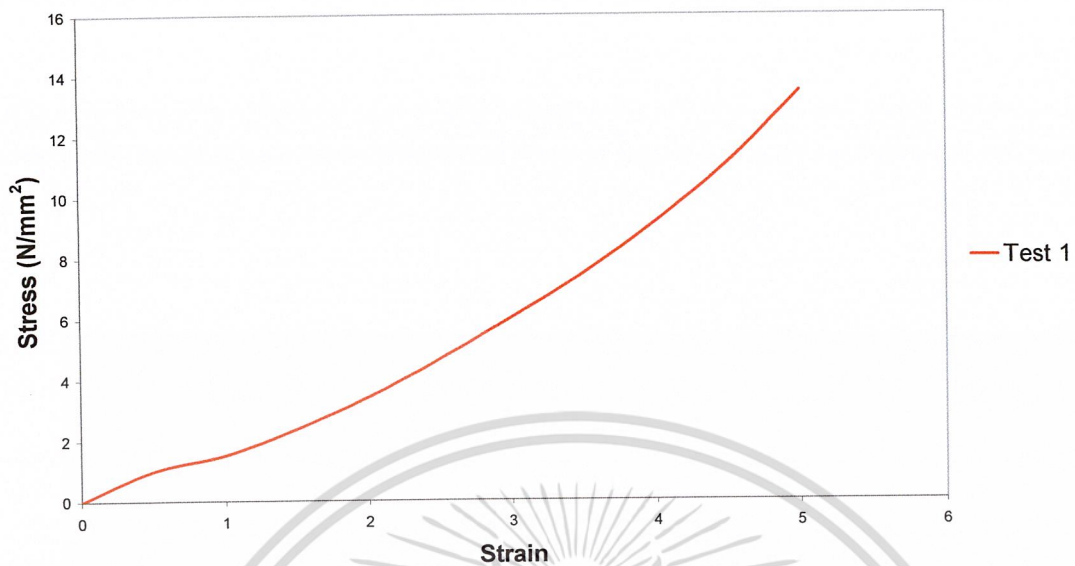
ซึ่ง ในการทดลองได้ทดสอบตัวอย่างยางทั้งหมดสามครั้ง แล้วหลังจากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยมีผลการทดลองดังนี้

ตาราง 2.2 แสดงผลการทดสอบยาง EPDM

	Test 1		Test 2		Test 3		Test (avg)	
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$
1	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000
2	0.9995	0.500	0.9632	0.500	0.9526	0.500	0.9718	0.500
3	1.5160	1.000	1.3640	1.000	1.4160	1.000	1.4320	1.000
4	2.3760	1.500	1.8600	1.500	2.2440	1.500	2.1587	1.500
5	3.4200	2.000	2.9390	2.000	3.2410	2.000	3.2000	2.000
6	4.6570	2.500	4.6390	2.500	4.4130	2.500	4.5697	2.500
7	6.0250	3.000	6.2410	3.000	5.7160	3.000	5.9940	3.000
8	7.4720	3.500	7.7100	3.500	7.1070	3.500	7.4297	3.500
9	9.1600	4.000	9.2710	4.000	8.6730	4.000	9.0347	4.000
10	11.0890	4.500	11.2980	4.500	10.6875	4.500	11.0248	4.500
11	13.4600	5.000	13.7400	5.000	13.0660	5.000	13.4220	5.000

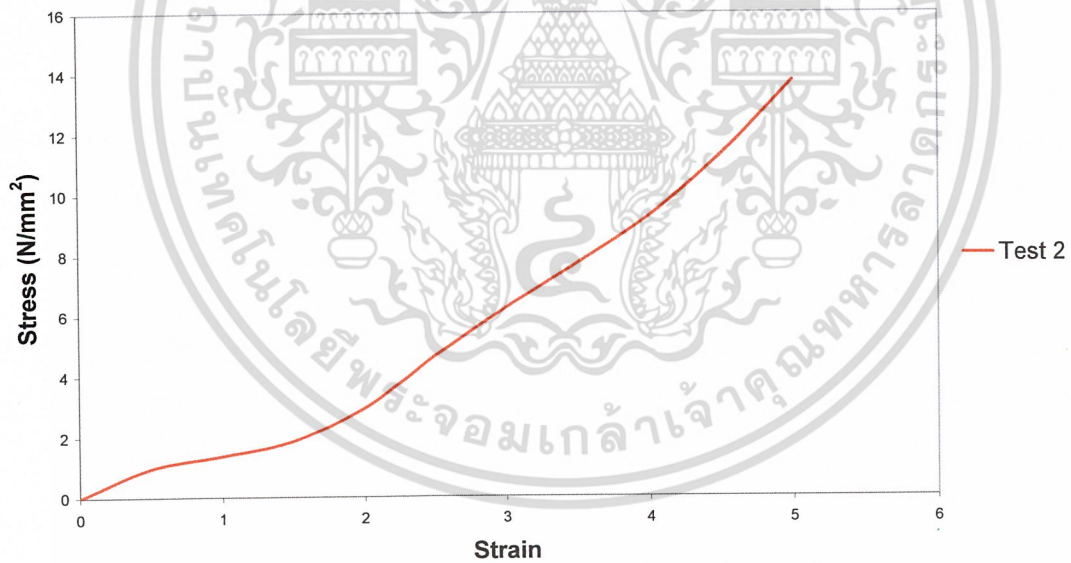
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stress-Strain curve for EPDM(1)



(a)

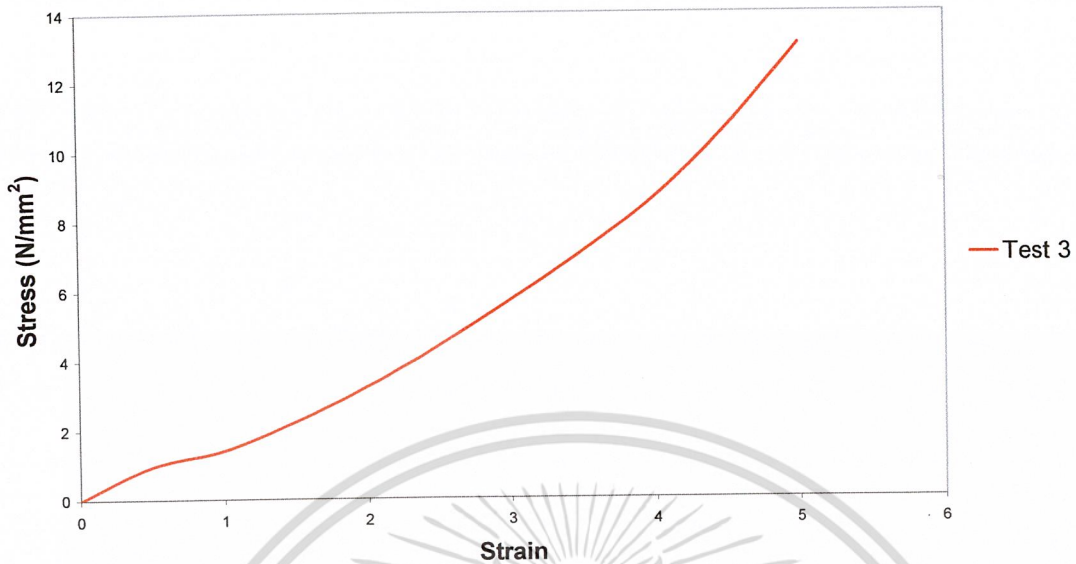
Stress-Strain curve for EPDM(2)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

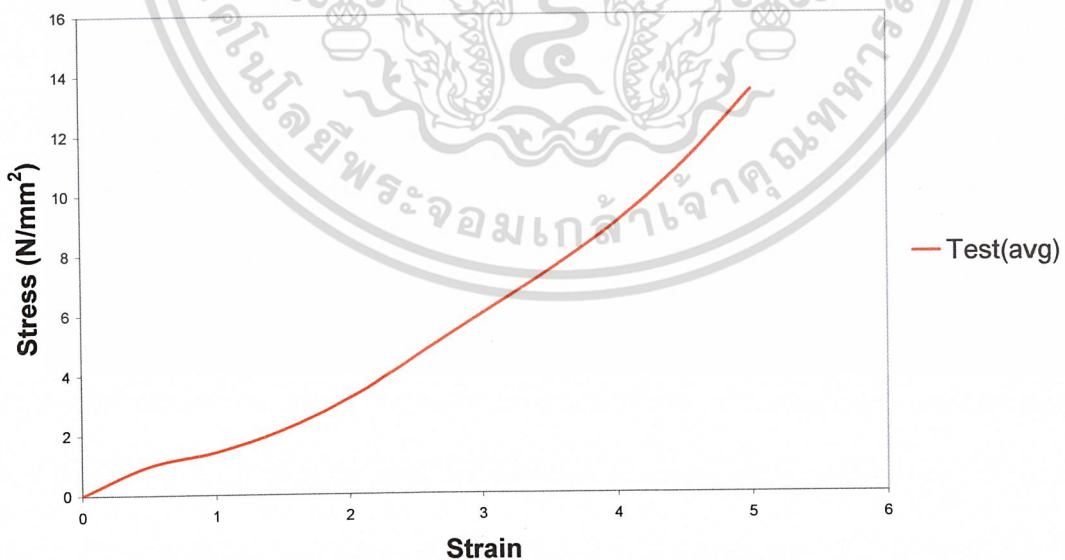
Stress-Strain curve for EPDM(3)



(c)

รูป 2.4 (a) Stress-Strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ 1  
 (b) Stress-Strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ 2  
 (c) Stress-Strain curve ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

Stress-Strain curve for EPDM(average)



รูป 2.5 Stress-Strain curve ของค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

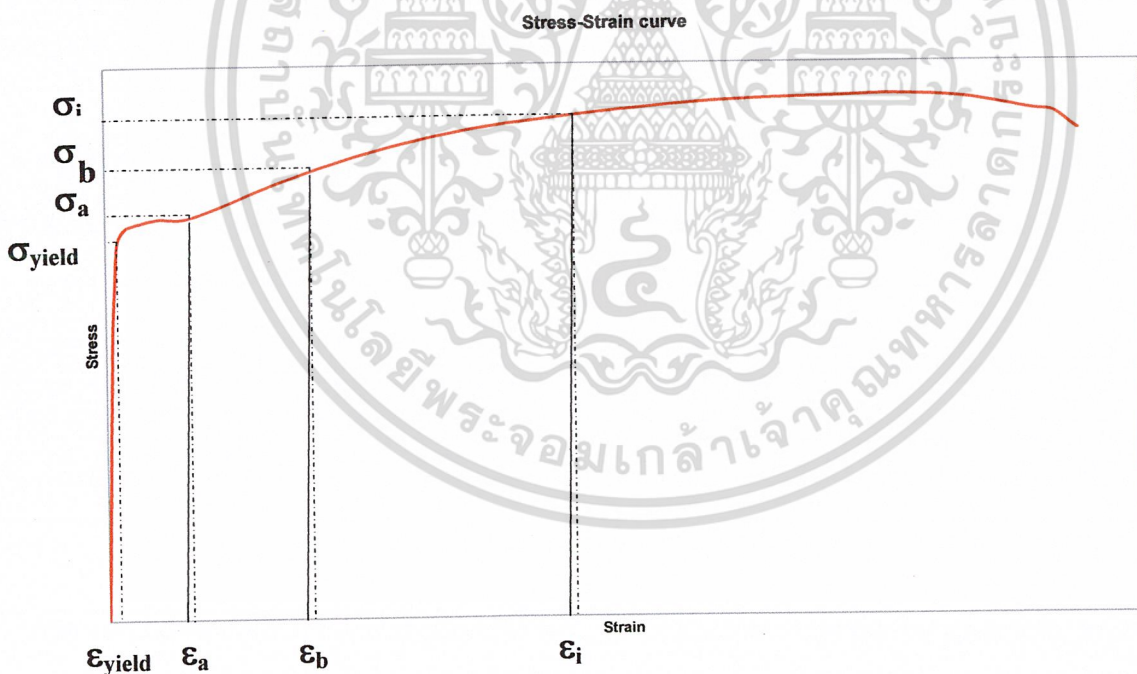
โดยทั่วไปสถานะของความเค้นภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งใดๆ มีค่าประกอบด้วยความเค้น  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$  และ  $\tau_{yz}$  แต่เราสามารถที่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นค่าความเค้นหลักสามตัว คือ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  จากนั้นเราสามารถที่จะคำนวณหาค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ได้จากสมการ

$$\sigma_{von} \equiv \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\sigma_{von}$  คือ ความเค้นวอนมิส

ซึ่งชิ้นงานจะเกิดการครากขึ้นเมื่อ  $\sigma_{von} = \sigma_{yield}$ , เมื่อ  $\sigma_{yield}$  คือ ค่าความต้านทานแรงคราก (Yield stress) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

## 2.2.2 วิธีการหาค่าพลาสติก Strain



รูป 2.7 แสดงการหาค่าความเครียดพลาสติก

จากกราฟดังรูปที่ 2.7 เราสามารถหาค่าความเครียดพลาสติกได้โดยการลากเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับเส้นจากจุดกำเนิดลากไปที่จุดความเค้นคราก จากนั้นเราจะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\varepsilon_e)_a = \frac{\sigma_a}{E} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_a = (\varepsilon_e)_a + (\varepsilon_p)_a \quad (2.11)$$

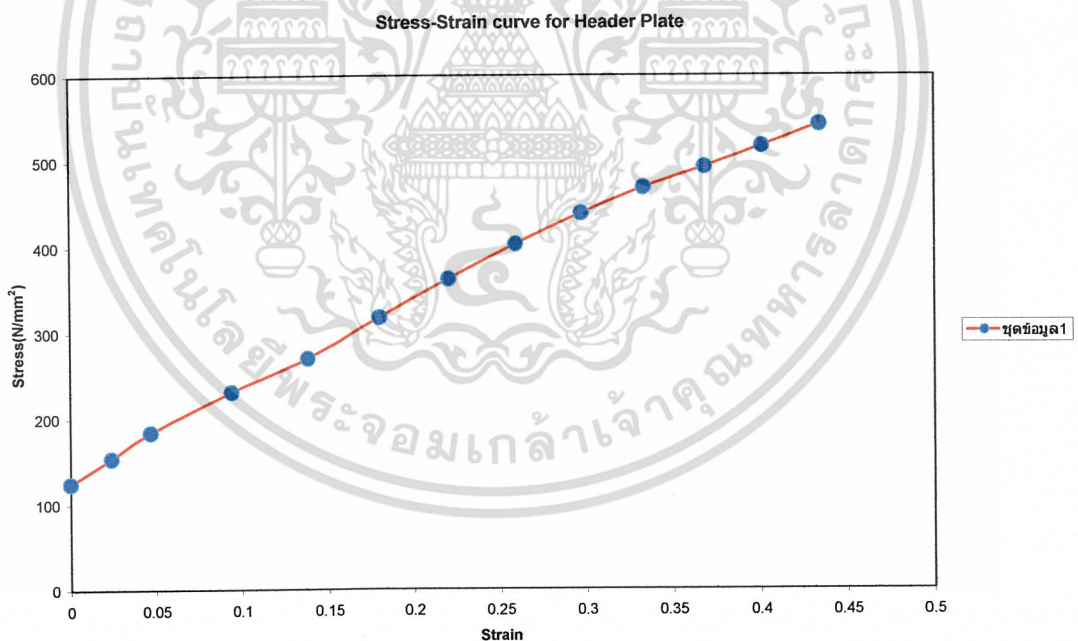
$$\begin{aligned} (\varepsilon_p)_a &= \varepsilon_a - (\varepsilon_e)_a \\ &= \varepsilon_a - \frac{\sigma_a}{E} \end{aligned}$$

$$(\varepsilon_p)_b = \varepsilon_b - \frac{\sigma_b}{E}$$

$$(\varepsilon_p)_i = \varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} \quad (2.12)$$

โดยที่

$\varepsilon_p$  = Plastic Strain  
 $\varepsilon_e$  = Elastic Strain  
 $E$  = Young's Modulus  
 $\sigma_a$  = Yield Stress



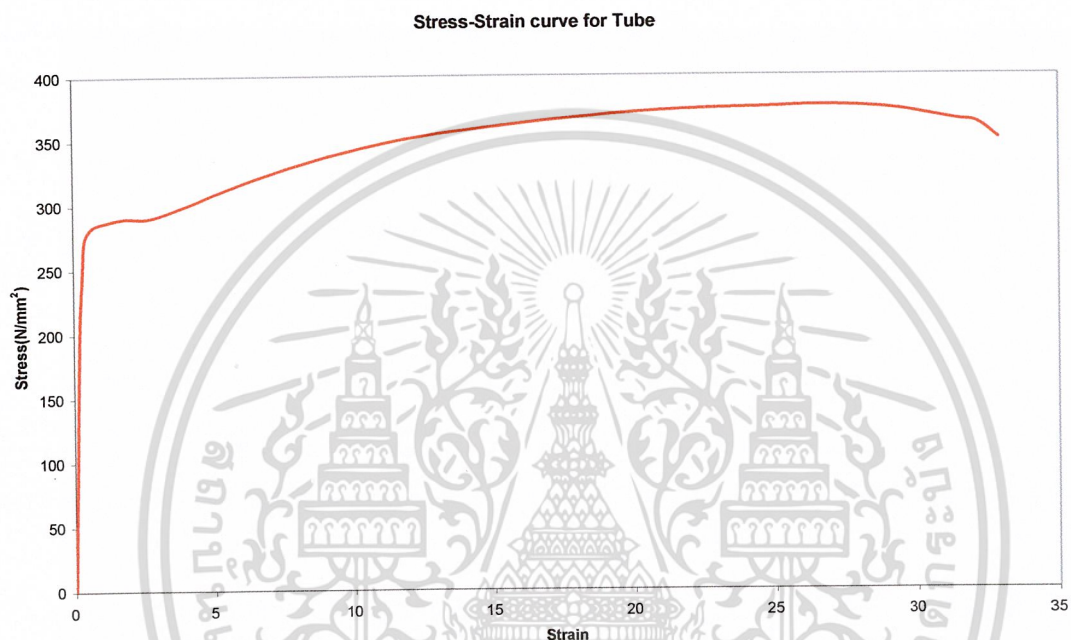
รูปที่ 2.8 แสดงกราฟ ความเค้น-ความเครียด ของวัสดุ SM2464

จากกราฟที่ 2.8 ซึ่งเป็นกราฟของวัสดุที่ใช้ทำ Header Plate เราสามารถหาค่า ความเค้นพลาสติก ได้โดยการใช้สมการ(2.10)-(2.12) ซึ่งจะได้ค่าดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตาราง 2.3 แสดงค่าความเค้นครากและค่าความเค้นพลาสติก ของ Header Plate

Yield Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Plastic Strain
117.442	0
153.48	0.02203
181.395	0.04872
238.372	0.09322
281.395	0.13644



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟ ความเค้น-ความเครียด ของวัสดุ SM2385

จากกราฟที่ 2.9 ซึ่งเป็นกราฟของวัสดุที่ใช้ทำ Tube เราสามารถหาค่า ความเค้นพลาสติกได้โดยการใช้สมการ(2.10)-(2.12) ซึ่งจะได้ค่าดังตารางต่อไปนี้

## ตาราง 2.4 ค่า ความเค้นครากและความเครียดพลาสติกของ Tube

Yield Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Plastic Strain
267.2	0
289.6	1.66117
299.2	3.28168
311.2	4.94628
323.5	6.61082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์

ไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่งที่ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ มีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวางและ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้มากมายเช่น การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ วิเคราะห์โครงสร้าง วิเคราะห์ความเค้นในชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ในปัญหาที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

ในโครงงานนี้ก็เช่นกัน วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยใช้หลักการของกาเลอคิน ซึ่งเป็นพื้นฐานทางทฤษฎีที่ใช้ในโปรแกรม ABAQUS/CAE

### 2.3.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติสำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

#### 2.3.1.1 Weak form ของสมการสมดุลในระบบสามมิติ

สำหรับปัญหาสามมิติ อนุพันธ์ของสมการสมดุล คือ

$$\tilde{\nabla}^T \sigma + b = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$\tilde{\nabla}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad (2.14)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}$$

โดย  $\tilde{\nabla}$  : Matrix differential vector

$\sigma$  : ค่าความเค้นรวม ซึ่ง  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  คือ ค่าความเค้นตามแนวแกน X, y และ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ และ  $\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$  คือ ค่าความเค้นตามระนาบ XY, XZ, และ YZ

$b$  : ค่า Body force ซึ่ง  $b_x, b_y, b_z$  คือ ค่า Body force ตามแนวแกน

X, y และ Z ตามลำดับ

ทำการจัดรูปสมการ (2.13) เราได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + b_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + b_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + b_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

ซึ่งขอบเขตของวัสดุจะมีเวกเตอร์ความเค้น  $t$  (traction vector) ที่มีองค์ประกอบของเวกเตอร์ดังนี้

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

นอกจากนี้ เวกเตอร์ความเค้น  $t$  ต้องเป็นไปตามสภาวะขอบดังนี้

$$\begin{aligned} t_x &= \sigma_{xx} n_x + \sigma_{xy} n_y + \sigma_{xz} n_z \\ t_y &= \sigma_{yx} n_x + \sigma_{yy} n_y + \sigma_{yz} n_z \\ t_z &= \sigma_{zx} n_x + \sigma_{zy} n_y + \sigma_{zz} n_z \end{aligned} \quad (2.17)$$

โดย  $n$  : Normal vector และ  $n_x, n_y, n_z$  คือ ค่า Normal vector

ตามแนวแกน X, y และ Z ตามลำดับ

พิจารณาเวกเตอร์  $\mathbf{v}$  ใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทำการอินทิเกรต by-pass โดยใช้ทฤษฎี Green-Gauss เราจะได้องค์ประกอบ  $t_x$

$$\begin{aligned} & \int_s v_x \sigma_{xx} n_x ds - \int_V \frac{\partial v_x}{\partial x} \sigma_{xx} dV + \int_s v_x \sigma_{xy} n_y ds - \int_V \frac{\partial v_x}{\partial y} \sigma_{xy} dV \\ & + \int_s v_x \sigma_{xz} n_z ds - \int_V \frac{\partial v_x}{\partial z} \sigma_{xz} dV + \int_V v_x b_x dV = 0 \end{aligned}$$

จาก  $t_x$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์ความเค้น  $t$  เราสามารถทำการจัดรูปสมการข้างบนใหม่ได้ดังนี้

$$\int_s v_x t_x ds - \int_V \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \sigma_{xx} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \sigma_{xy} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \sigma_{xz} \right) dV + \int_V v_x b_x dV = 0 \quad (2.21)$$

ทำอย่างเดียวกันกับสมการที่สองและสามของสมการ(2.14) ซึ่งเราจะได้

$$\int_s v_y t_y ds - \int_V \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \sigma_{yx} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \sigma_{yy} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \sigma_{yz} \right) dV + \int_V v_y b_y dV = 0 \quad (2.22)$$

$$\int_s v_z t_z ds - \int_V \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} \sigma_{zx} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \sigma_{zy} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \sigma_{zz} \right) dV + \int_V v_z b_z dV = 0 \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.21) ถึง (2.23) เราได้ว่า

$$\begin{aligned} & \int_s (v_x t_x + v_y t_y + v_z t_z) ds + \int_V (v_x b_x + v_y b_y + v_z b_z) dV \\ & - \int_V \left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} \sigma_{xx} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \sigma_{yy} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \sigma_{zz} + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \sigma_{xy} \right. \\ & \left. + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \sigma_{xz} + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \sigma_{yz} \right] dV = 0 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเราสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\int_V (\tilde{\nabla} \mathbf{v})^T \sigma dV = \int_s \mathbf{v}^T t ds + \int_V \mathbf{v}^T \mathbf{b} dV \quad (2.24)$$

สมการที่ (2.24) คือ Weak form ของอนุพันธ์ของสมการสมดุล โดยมีสถานะขอบเป็นตัวกำหนด

### 2.3.1.2 วิธีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุยืดหยุ่นในระบบสามมิติ

จากสมการ (2.24) Weak form ของอนุพันธ์ของสมการสมดุล จึงนำไปสู่การ พิสูจน์หาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุยืดหยุ่นในระบบสามมิติ โดยในขั้นแรกเราจะทำการกำหนดเวกเตอร์การกระจัด  $\mathbf{u}$  (Displacement vector) มาก่อน

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{a} \quad (2.25)$$

โดย  $\mathbf{N}$  : Global shape function

หลังจากนั้นเราจะใช้วิธีของกาลูคินโดยใช้ Weight vector ( $\mathbf{v}$ ) เป็นตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดย

$$\mathbf{v} = \mathbf{N} \mathbf{c} \quad (2.26)$$

โดยที่  $\mathbf{v}$  และ  $\mathbf{c}$  เป็น เวกเตอร์ใดๆ จากสมการ (2.25) เราจะได้

$$\tilde{\nabla} \mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{c} \quad \text{เมื่อ} \quad \mathbf{B} = \tilde{\nabla} \mathbf{N} \quad (2.27)$$

แทนสมการ (2.26) และ (2.27) ในสมการ (2.24)

$$\mathbf{c}^T \left( \int_V \mathbf{B}^T \sigma dV - \int_s \mathbf{N}^T t ds - \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \right) = 0$$

เนื่องจาก  $\mathbf{c}^T$  ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\int_V \mathbf{B}^T \sigma dV = \int_s \mathbf{N}^T t ds + \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนนี้เราจะแนะนำ สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Constitutive model) คือ

$$\sigma = D\varepsilon - D\varepsilon_0 \quad (2.29)$$

โดย  $D$  : เมตริกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด  
(Constitutive model) และ  $D = D^T$   
 $\varepsilon_0$  : ความเครียดเริ่มต้น

จากความสัมพันธ์ Kinematic เราได้ว่า

$$\varepsilon = \tilde{\nabla}u \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.25) และสมการ (2.26) เราจะได้

$$\varepsilon = Ba \quad (2.31)$$

ดังนั้น สมการ (2.29) จะได้เป็น

$$\sigma = DBa - D\varepsilon_0 \quad (2.32)$$

แทนสมการ (2.32) ลงในสมการ (2.28)

$$\left( \int_V B^T DB dV \right) a = \int_s N^T t ds + \int_V N^T b dV + \int_V B^T D \varepsilon_0 dV \quad (2.33)$$

โดย  $t$  : Traction Vector คือค่า Natural Boundary Condition

จาก  $t = Sn$  [2]

เราจะได้

$$\begin{aligned} T = Sn &= h & \text{ที่} & S_h \\ u &= g & \text{ที่} & S_g \end{aligned} \quad (2.34)$$

$h$  ,  $g$  คือเวกเตอร์ที่ทราบค่า ซึ่งหมายความว่าเราสามารถทราบค่า เวกเตอร์ความเค้นได้ ตามค่าขอบ  $S_h$  และ เวกเตอร์การกระจัด  $u$  ทราบค่าได้ตามค่าขอบ  $S_g$  โดย  $S$  คือค่าขอบรวม จากข้อมูลข้างต้นเราสามารถจัดรูปสมการ (2.33) ใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \right) \mathbf{a} = \int_{S_h} \mathbf{N}^T \mathbf{h} ds + \int_{S_g} \mathbf{N}^T \mathbf{t} ds + \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV + \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \quad (2.35)$$

เราจะจัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \\ \mathbf{f}_b &= \int_{S_h} \mathbf{N}^T \mathbf{h} ds + \int_{S_g} \mathbf{N}^T \mathbf{t} ds \\ \mathbf{f}_l &= \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \\ \mathbf{f}_0 &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \end{aligned} \quad (2.36)$$

ซึ่งเราจะได้ว่า

$$\mathbf{K} = \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_l + \mathbf{f}_0 \quad (2.37)$$

และ

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_l + \mathbf{f}_0 \quad (2.38)$$

เมื่อ  $\mathbf{f}$  คือ เวกเตอร์ของแรง

และเราจะได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{f} \quad (2.39)$$

ถ้าเราต้องการพิจารณาเฉพาะแต่ละ Element ย่อยใดๆ เราได้

$$\mathbf{K}^e \mathbf{a}^e = \mathbf{f}^e \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$\mathbf{f}^e = \mathbf{f}_b^e + \mathbf{f}_l^e + \mathbf{f}_0^e \quad (2.41)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}^e &= \int_{V_\alpha} \mathbf{B}^{eT} \mathbf{D} \mathbf{B}^e dV \\
\mathbf{f}_b^e &= \int_{S_{\alpha_h}} \mathbf{N}^{eT} \mathbf{h} ds + \int_{S_{\alpha_g}} \mathbf{N}^{eT} \mathbf{t} ds \\
\mathbf{f}_1^e &= \int_{V_\alpha} \mathbf{N}^{eT} \mathbf{b} dV \\
\mathbf{f}_0^e &= \int_{V_\alpha} \mathbf{B}^{eT} \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV
\end{aligned} \tag{2.42}$$

โดย  $V_\alpha$  และ  $S_\alpha$  คือชิ้นส่วนปริมาตรและชิ้นส่วนพื้นผิวตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS/CAE

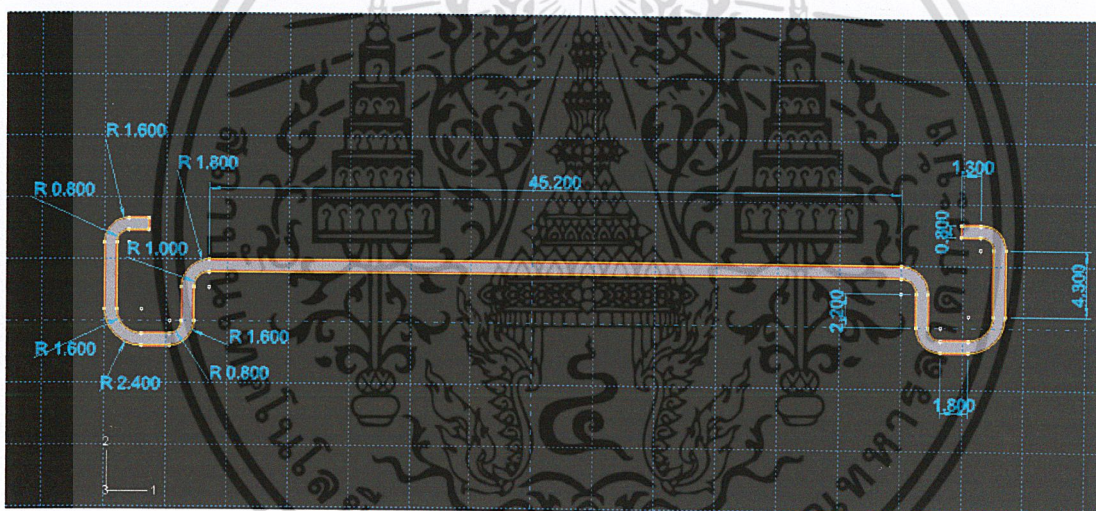
### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมโมเดลของ Header

การเตรียมโมเดลของ Header นั้นเราจะต้องตัดให้โมเดลมีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะทำให้สามารถวิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS/CAE ได้ง่ายขึ้นโดยเรียกวิธีนี้ว่า Cyclic Symetry

ในการวาดโมเดลของ Header เราต้องวาดส่วนประกอบต่างๆด้วยกัน 4 ส่วน คือ Header Plate, Plastic Tank, Packing Tank และ Tube

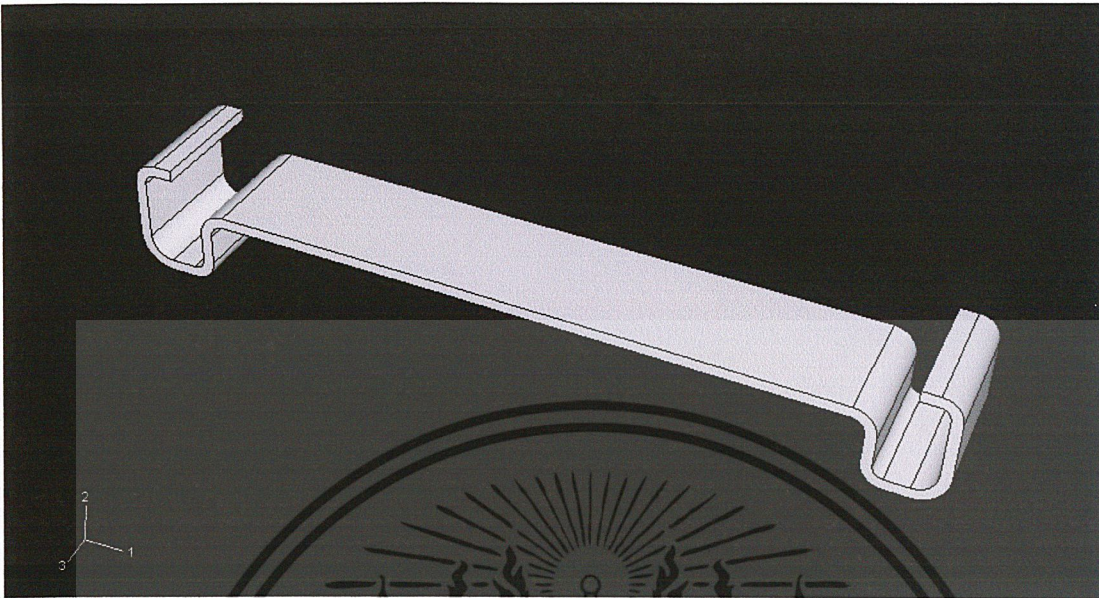
#### 3.1.1 Header Plate

เริ่มโปรแกรม ABAQUS/CAE เลือก Part Module ตั้งชื่อ Part ว่า “Header Plate” กำหนด Modeling Space เป็น 3D, Deformable, กำหนด Shape ให้เป็น Solid เลือก Extrusion หลังจากนั้นวาด Sketch ดังรูปที่ 3.1



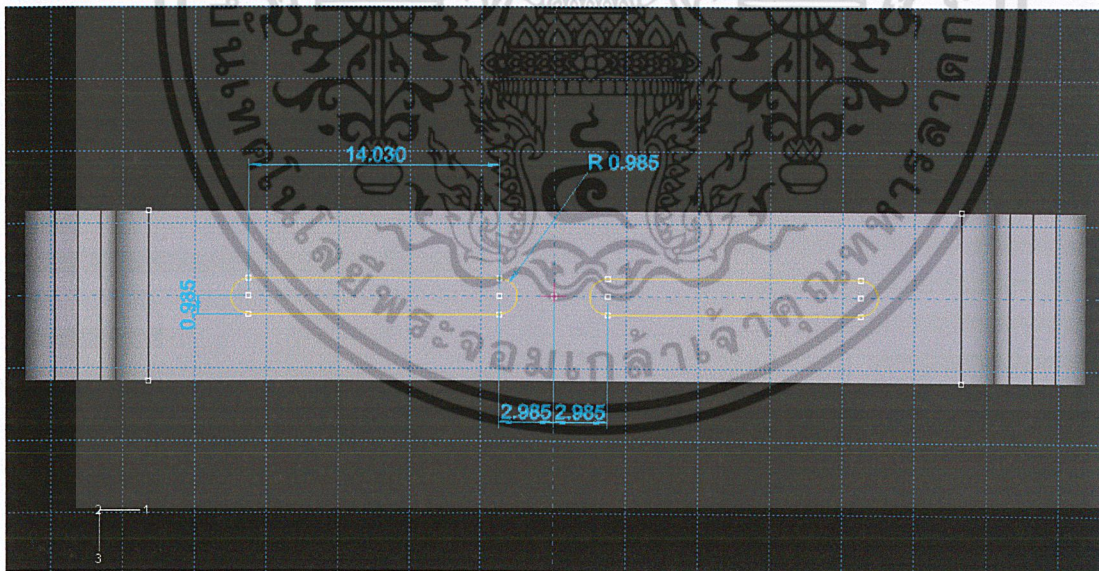
รูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของ Header Plate

กำหนดให้ Depth=9.4 จะได้ชิ้นส่วนสามมิติดังรูปที่ 3.2



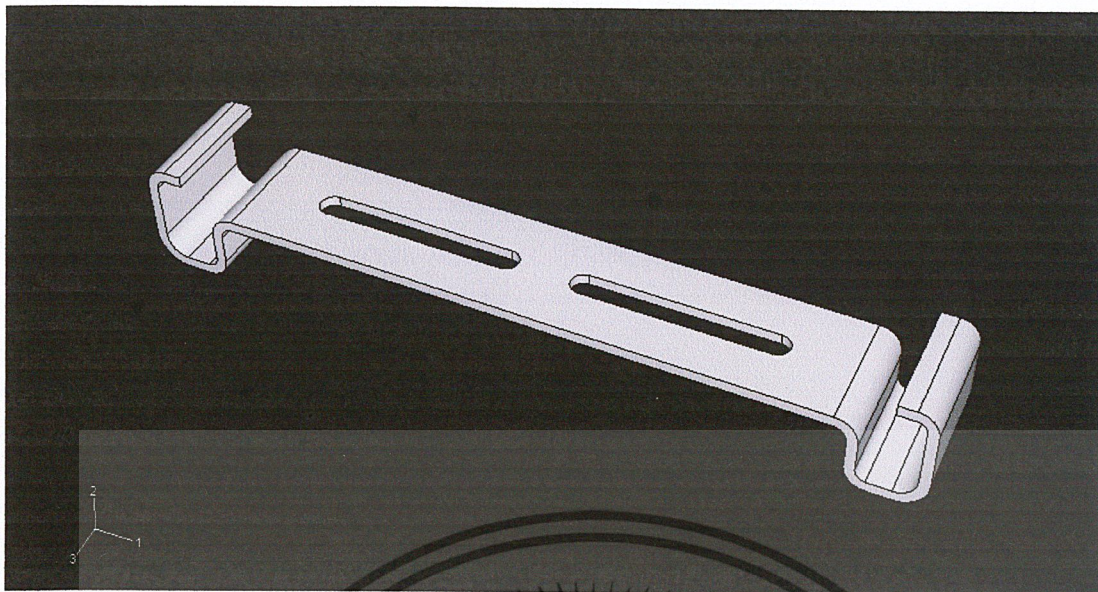
รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นส่วนที่ได้จากการ Extrude

ใช้คำสั่ง Create Cut : Extrude เพื่อเจาะรูชิ้นส่วนที่ได้ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



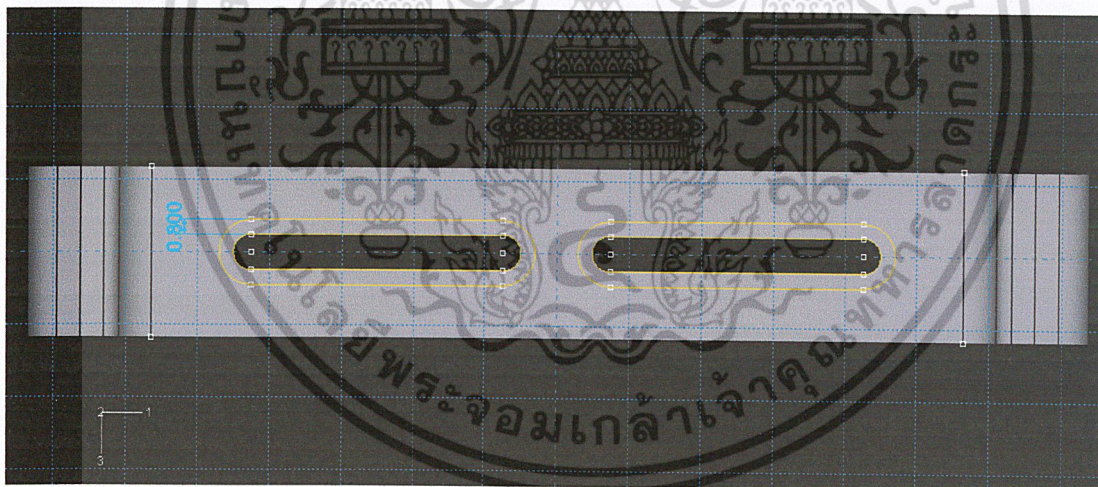
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดที่เราต้องการเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



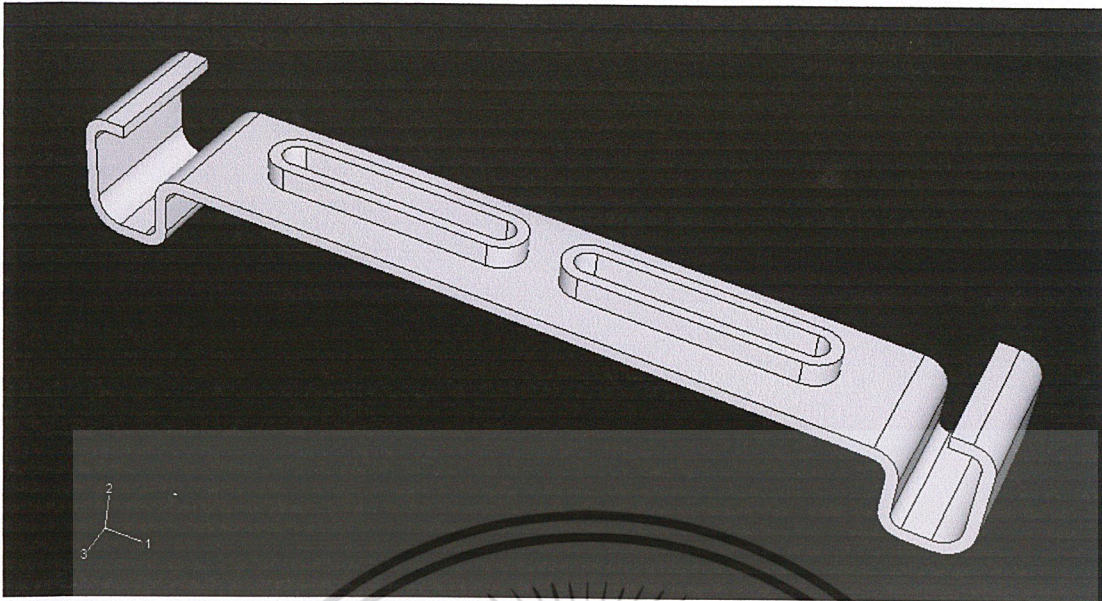
รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นส่วนที่ถูกเจาะแล้ว

ใช้คำสั่ง Create Solid : Extrude โดยมี Sketch ดังรูปที่ 3.5 หลังจากนั้นกำหนดให้ Depth = 1.5 จะได้ชิ้นส่วนดังรูปที่ 3.6



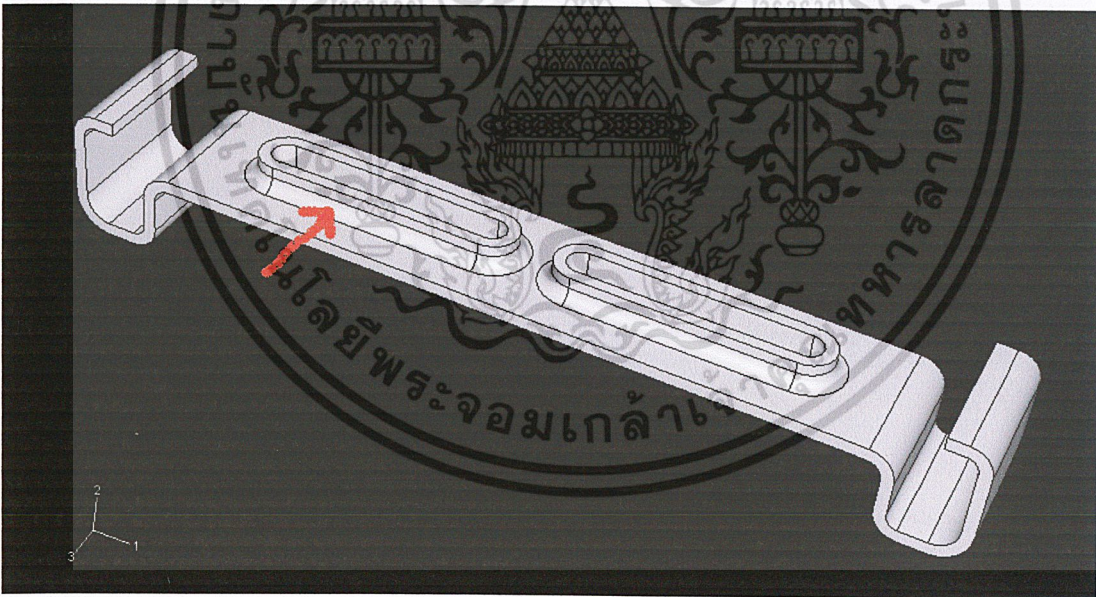
รูปที่ 3.5 แสดงขนาดที่เราต้องการ Extrude

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงชิ้นส่วนที่ **Extrude** แล้ว

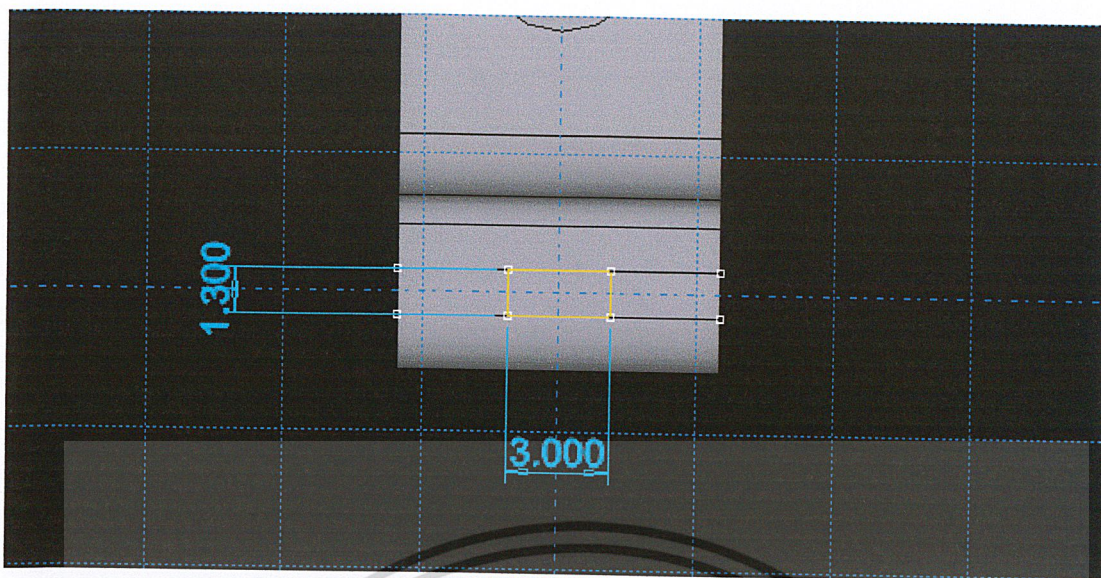
ใช้คำสั่ง **Create Round or Fillet** โดยกำหนดให้ **Radius = 0.8** จะได้ชิ้นส่วนดังรูปที่ 3.7



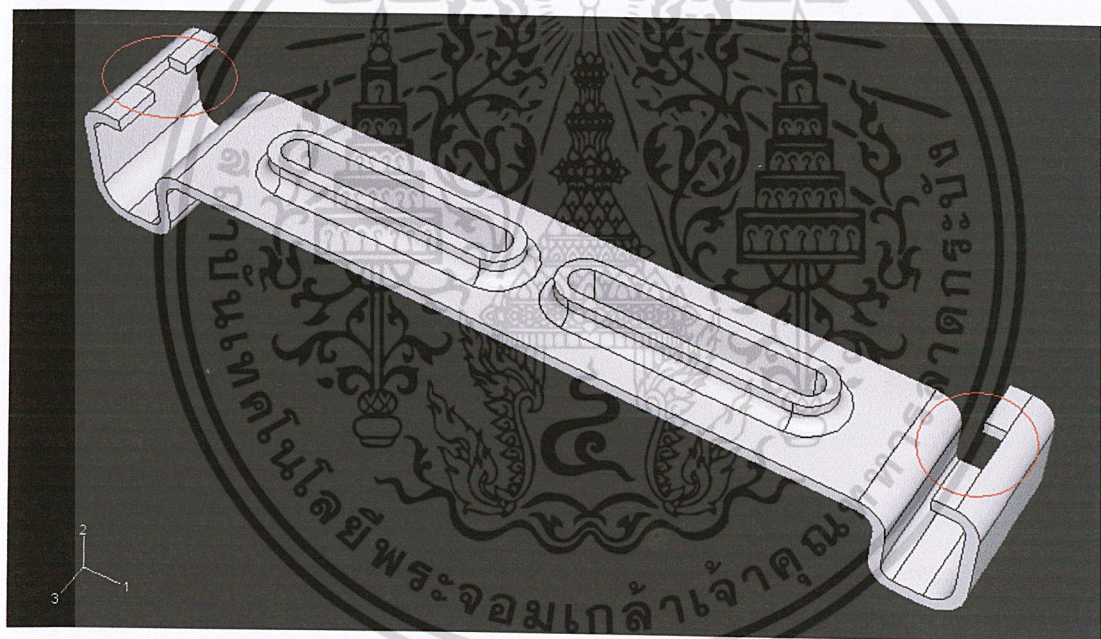
รูปที่ 3.7 แสดงชิ้นส่วนที่ **Round** แล้ว

ใช้คำสั่ง **Create Cut : Extrude** เพื่อตัดบริเวณหูของ **Header Plate** ทั้ง 2 ข้าง โดยมี **Sketch** ดังรูปที่ 8 หลังจากนั้นกำหนดให้ **Depth = 0.9** จะได้ชิ้นส่วนดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



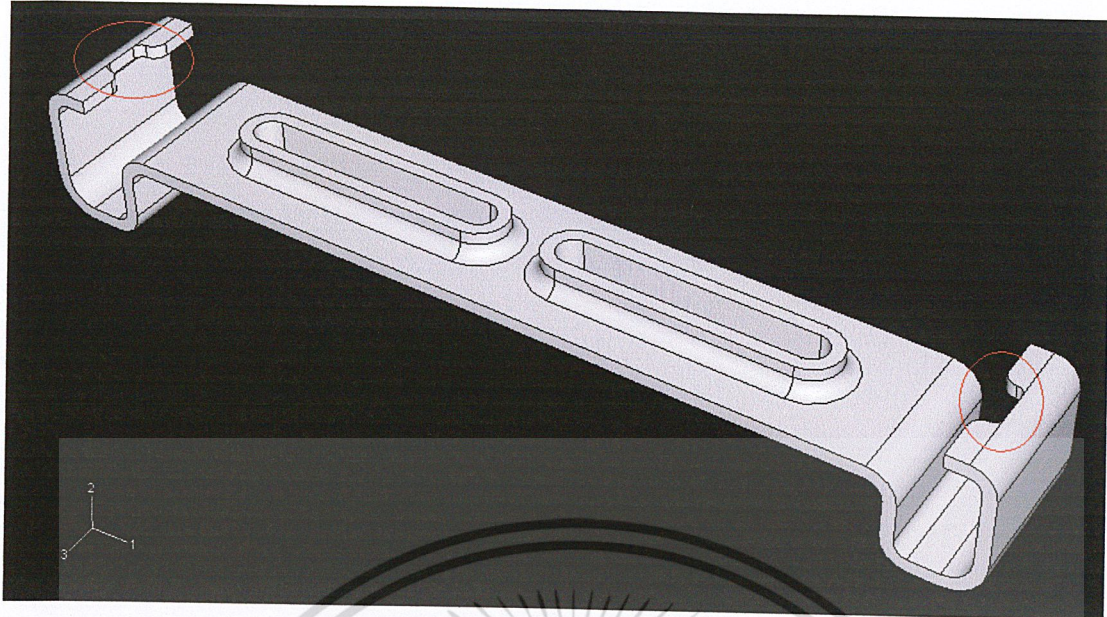
รูปที่ 3.8 แสดงบริเวณที่จะทำการตัดออก



รูปที่ 3.9 แสดงชิ้นส่วนที่ถูกตัดบริเวณมุมของ Header Plate ออก

ใช้คำสั่ง Create Round or Fillet โดยกำหนดให้ Radius = 0.5 สำหรับด้านในและ 0.8 สำหรับด้านนอก จะได้ชิ้นส่วนของ Header Plate ดังรูปที่ 3.10

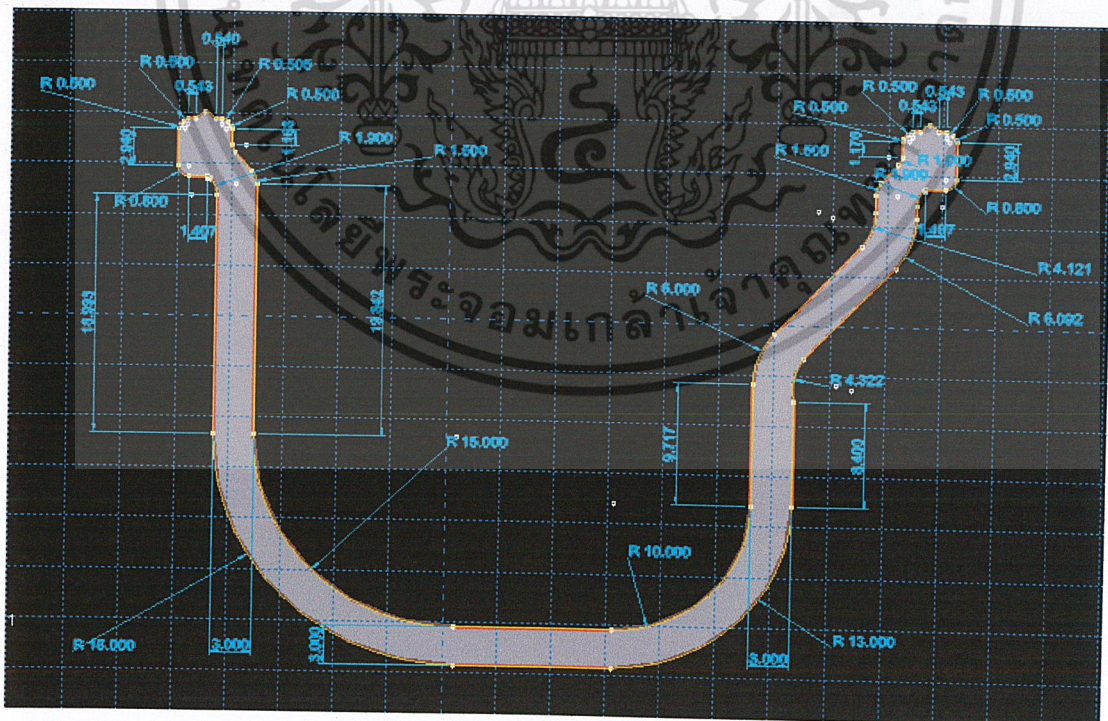
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงโมเดลของ Header Plate

### 3.1.2 Plastic Tank

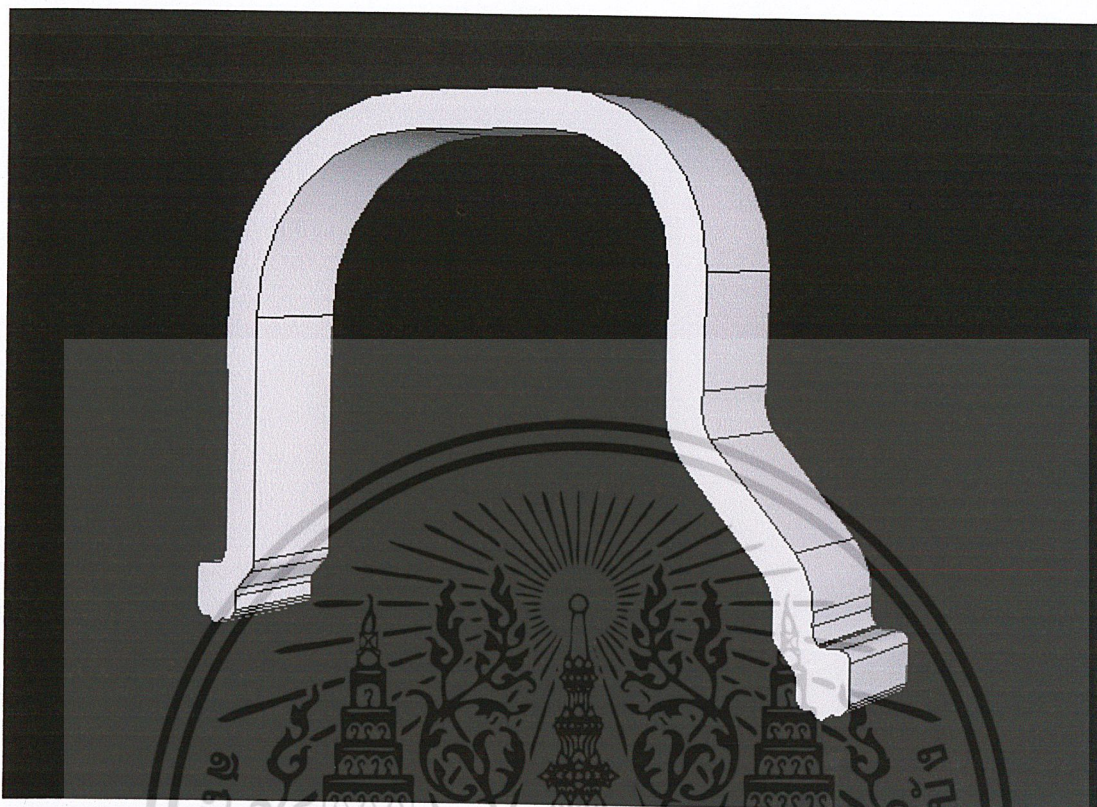
เลือกไอคอน Create Part ตั้งชื่อ Part ว่า “Plastic Tank” กำหนด Modeling Space เป็น 3D, Deformable กำหนด Shape ให้เป็น Solid, Extrusion โดยที่ Sketch ของชิ้นส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดง Sketch ของ Plastic Tank

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

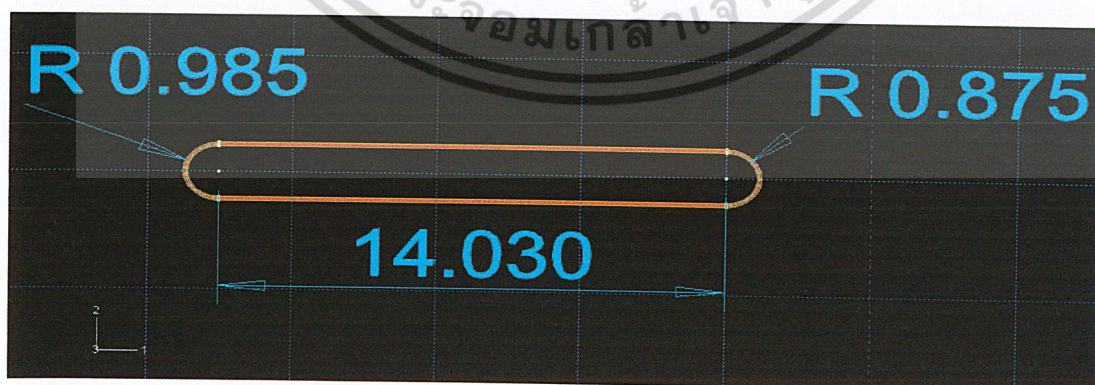
กำหนด Depth=9.4 จะได้ โมเดลของ Plastic Tank ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงโมเดลของ Plastic Tank

### 3.1.3 Tube

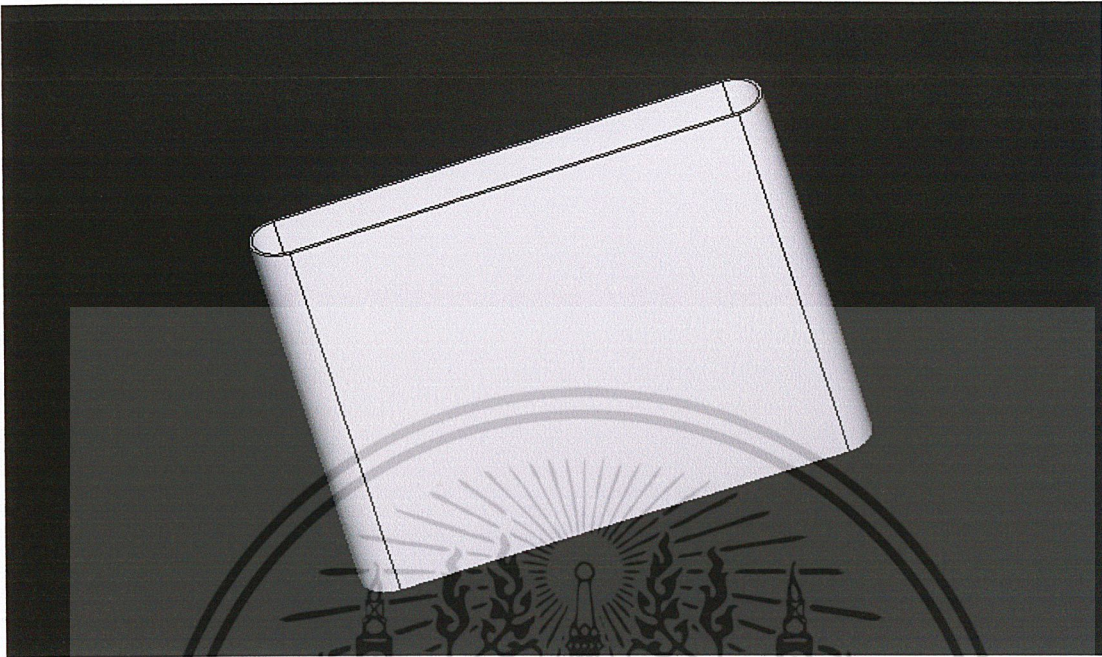
เลือกไอคอน Create Part ตั้งชื่อ Part ว่า “Tube” กำหนด Modeling Space เป็น 3D, Deformable กำหนด Shape ให้เป็น Solid, Extrusion โดยที่ Sketch ของชิ้นส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดง Sketch ของ Tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

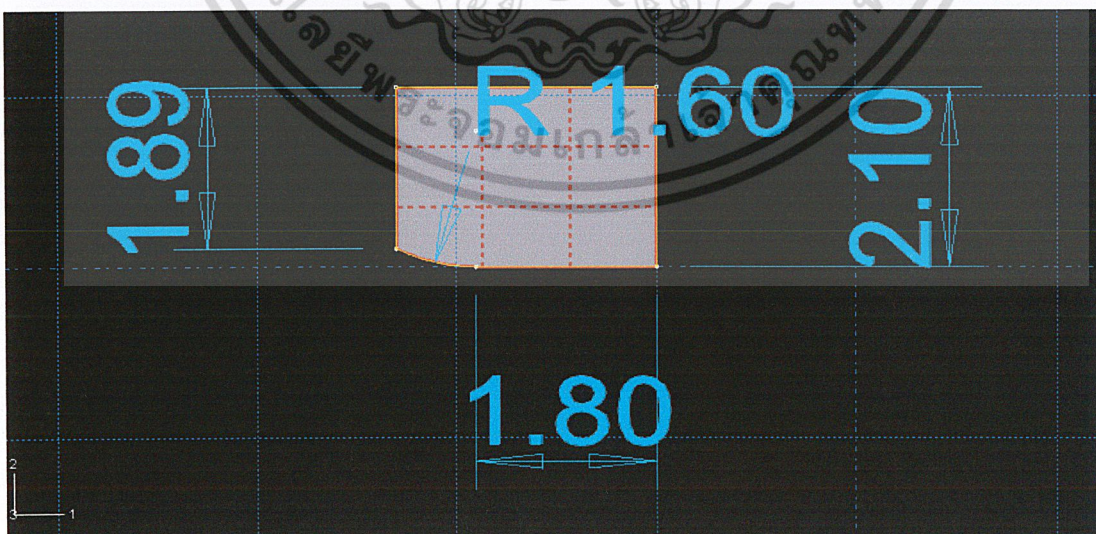
กำหนด Depth=15.1 จะได้โมเดลของ Tube ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงโมเดลของ Tube

### 3.1.4 Packing Tank

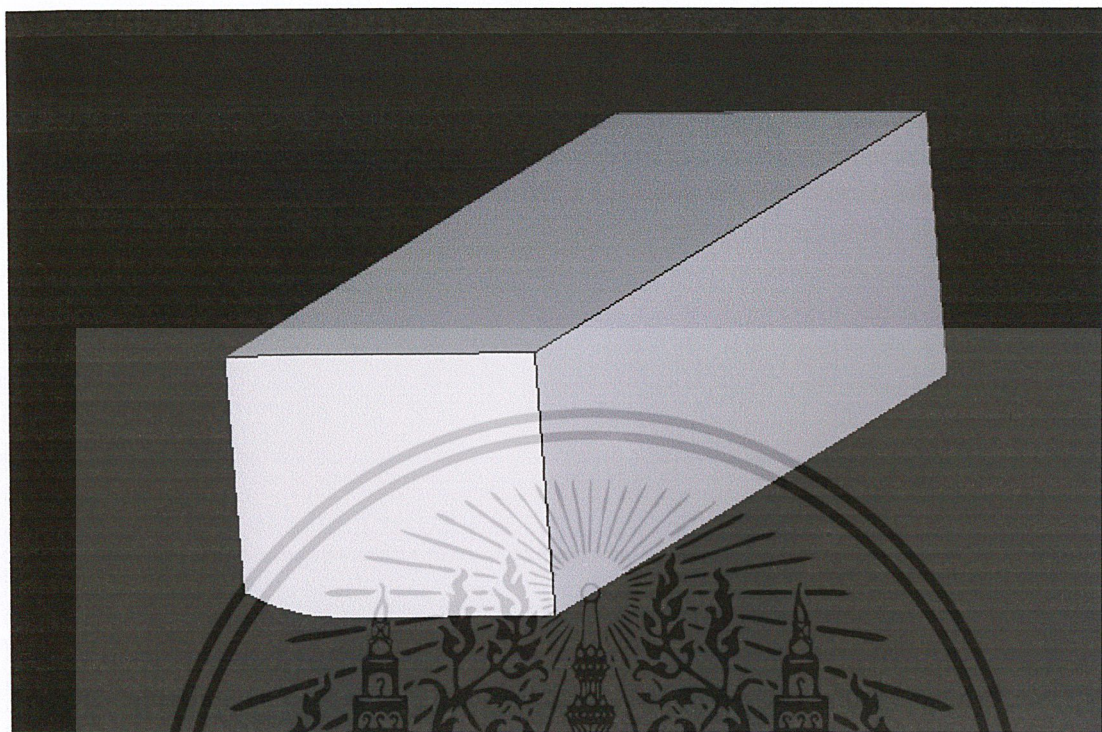
เลือกไอคอน Create Part ตั้งชื่อ Part ว่า “Packing Tank” กำหนด Modeling Space เป็น 3D, Deformable กำหนด Shape ให้เป็น Solid, Extrusion โดยที่ Sketch ของชิ้นส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดง Sketch ของ Packing Tank

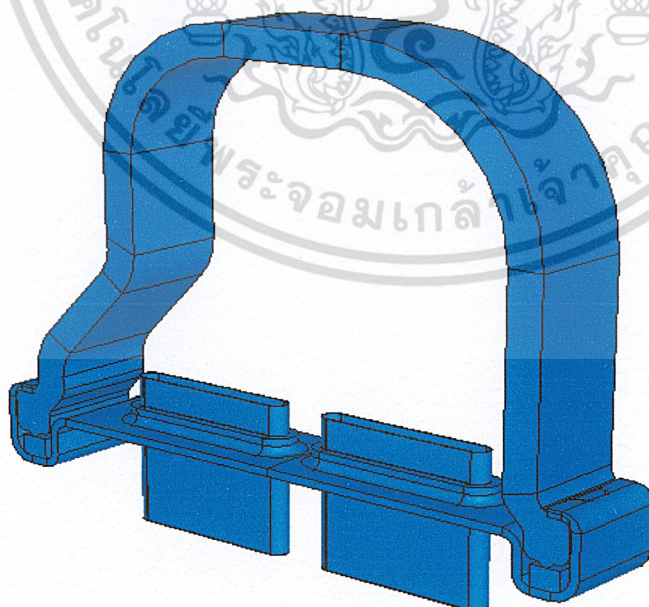
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด Depth = 9.4 จะได้โมเดลของ Packing Tank ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงโมเดลของ Packing Tank

หลังจากที่ได้ขึ้นส่วนต่างๆครบแล้วเราต้องประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงโมเดลของชิ้นส่วนที่ประกอบกันเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ในโมเดล

หลังจากที่เราวาดชิ้นส่วนต่าง ๆ เสร็จแล้ว เราจะต้องกำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นส่วนเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม ABAQUS/CAE

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของ Header

	Header Plate (SM2464)	Plastic Tank (PA66-GF30%)	Tube (SM2385)
E(N/mm <sup>2</sup> )	122000	10000	103400
$\nu$	0.30	0.3	0.3
Yield Stress (N/mm <sup>2</sup> )	117.4	-	267.3

### 3.3 ขั้นตอนการกำหนด Step ให้กับโมเดล

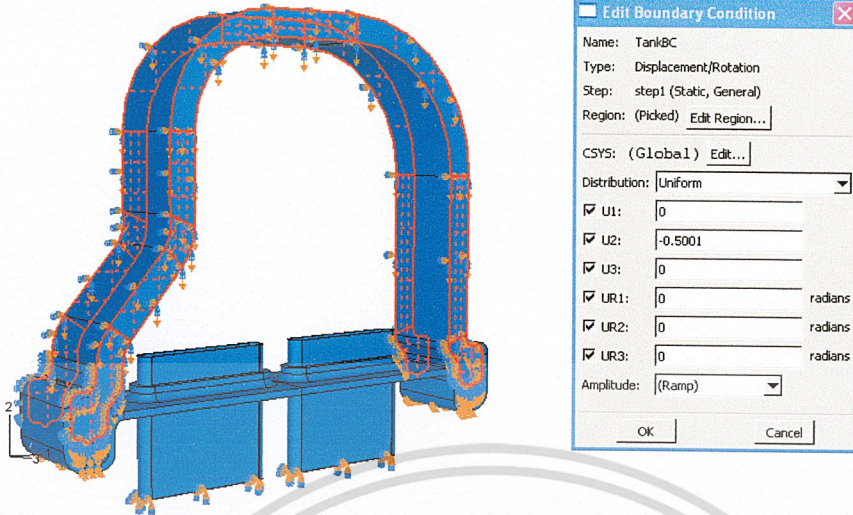
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ Header เมื่อรับแรงดัน เราจะต้องแบ่งขั้นตอนออกเป็น Step ย่อย ๆ เพื่อที่จะทำให้รันโปรแกรมได้ง่ายขึ้น รวมถึงสามารถตรวจสอบแก้ไขได้สะดวก ซึ่งในโมเดลที่เราพิจารณานี้จะแบ่งเป็น Step ย่อย ๆ 3 Step ดังนี้

#### 3.3.1 Step 1

ใน Step 1 นี้ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนการประกอบชิ้นงาน คือ กำหนดให้เป็นขั้นตอนที่เราประกอบ Plastic Tank กับ Header Plate โดยมี

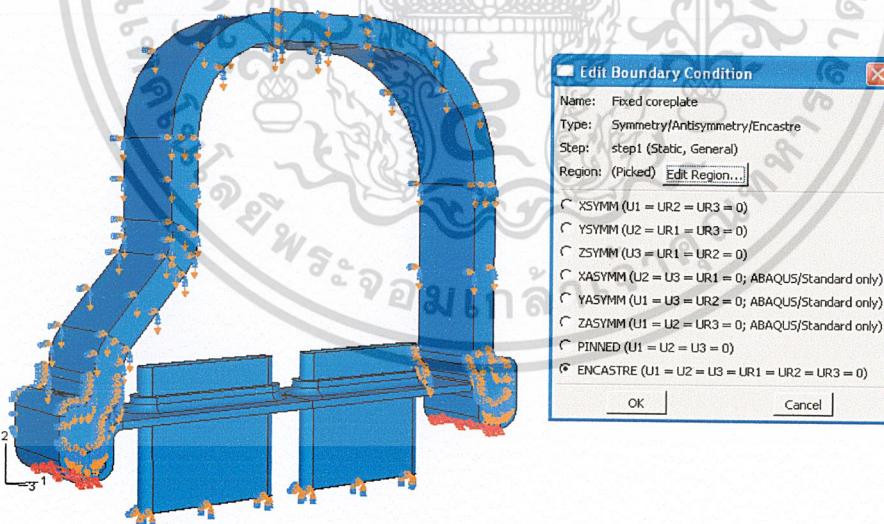
##### 3.3.1.1 Boundary condition ของ Step 1 ดังนี้

เรากำหนดให้ Plastic Tank เคลื่อนลงตามแนวแกน y โดยมีขนาดเท่ากับ -0.5001 mm โดยทำการเลือกที่ไอคอน Create Boundary Condition หลังจากนั้นจึงทำการตั้งชื่อให้กับ Step 1 แล้วเลือก Category ที่ Mechanical, เลือก Types สำหรับ Step ที่ Displacement and Rotation หลังจากนั้นเลือกบริเวณดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดง Boundary Condition ของ Plastic Tank ใน Step 1

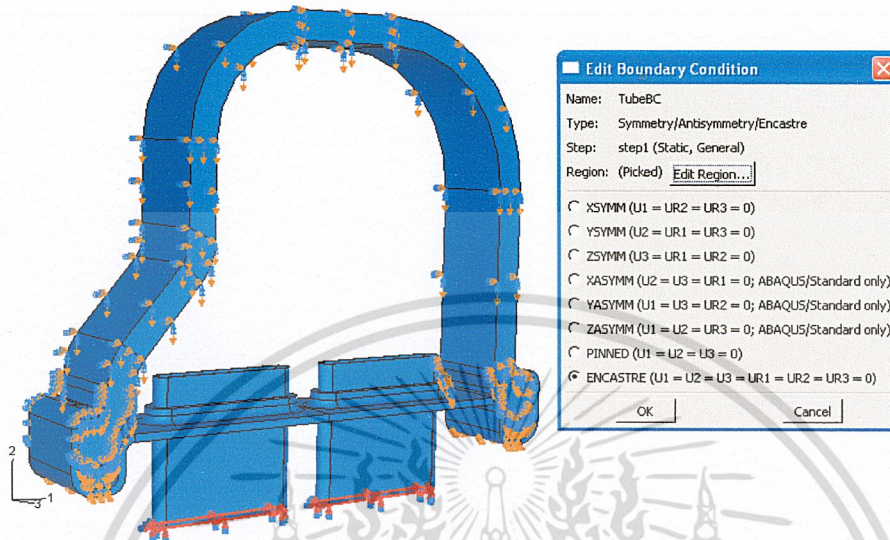
ที่ Header Plate เป็นการกำหนดให้ Header Plate ถูกยึดอยู่กับที่โดยทำการเลือกไอคอน Create Boundary Condition เลือก Category เป็น Mechanic เลือก Type เป็น Encastre ( $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ ) โดยเลือกบริเวณที่จะยึดดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดง Boundary Condition ของ Header Plate ใน Step 1

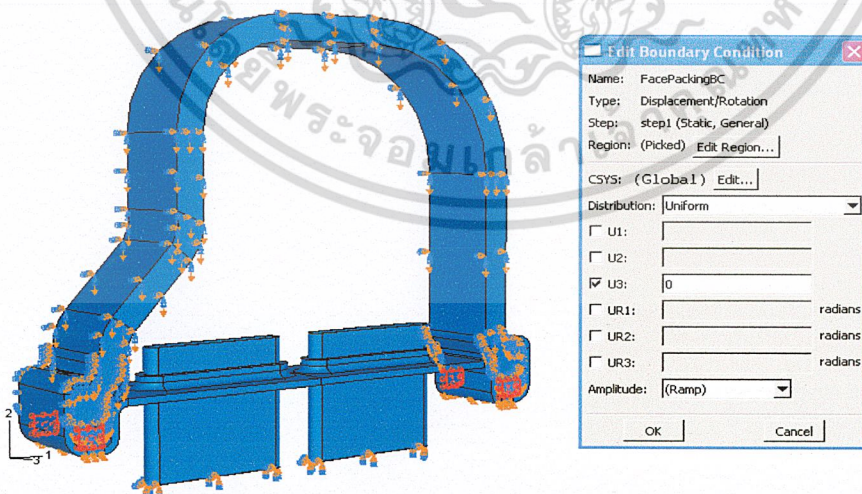
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ Tube เป็นการกำหนดให้ Tube ถูกยึดอยู่กับที่ โดยทำการเลือกไอคอน Create Boundary Condition หลังจากนั้นเลือก Category เป็น Mechanical, เลือกชนิดของ Boundary ให้เป็น Encastrate โดยเลือกบริเวณที่ทำการยึดดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดง Boundary Condition ของ Tube ใน Step 1

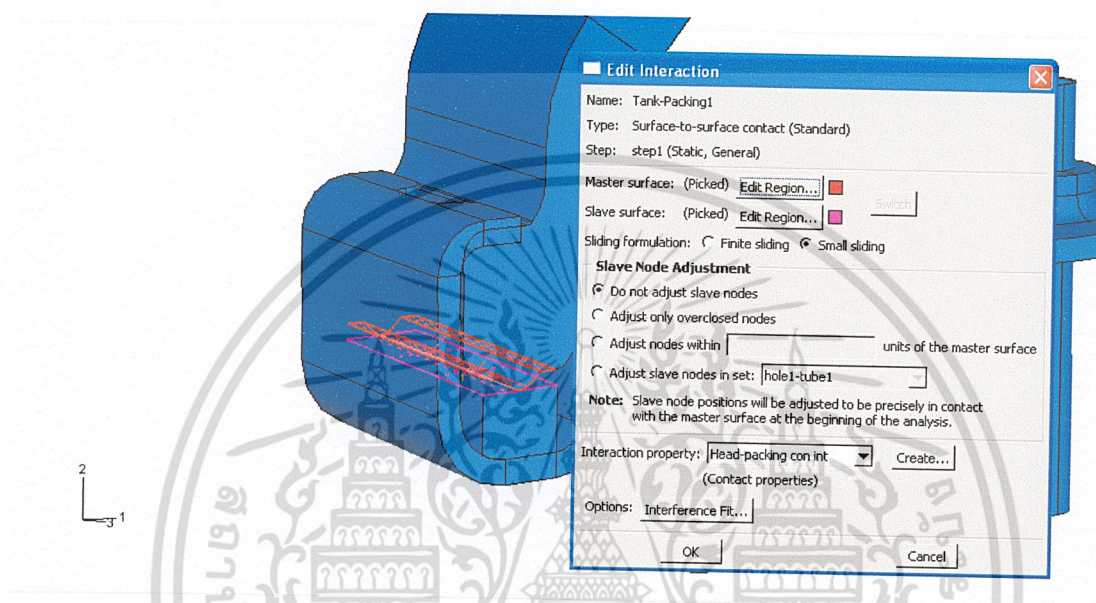
ที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังของ Packing Tank กำหนดเพื่อป้องกันไม่ให้ตัว Packing Tank ที่ถูกกดจาก Plastic Tank นั้นปลิ้นออกมา โดยเลือก Type เป็น Displacement and Rotation เลือกบริเวณที่ต้องการทำการ Fixed ดังรูปที่ 3.21 แล้วกำหนดให้  $U_3 = 0$



รูปที่ 3.21 แสดงการกำหนดให้ผิวของ Packing Tank ไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน 3

**3.3.1.2 Interaction** คือ การกำหนดผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของชิ้นงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

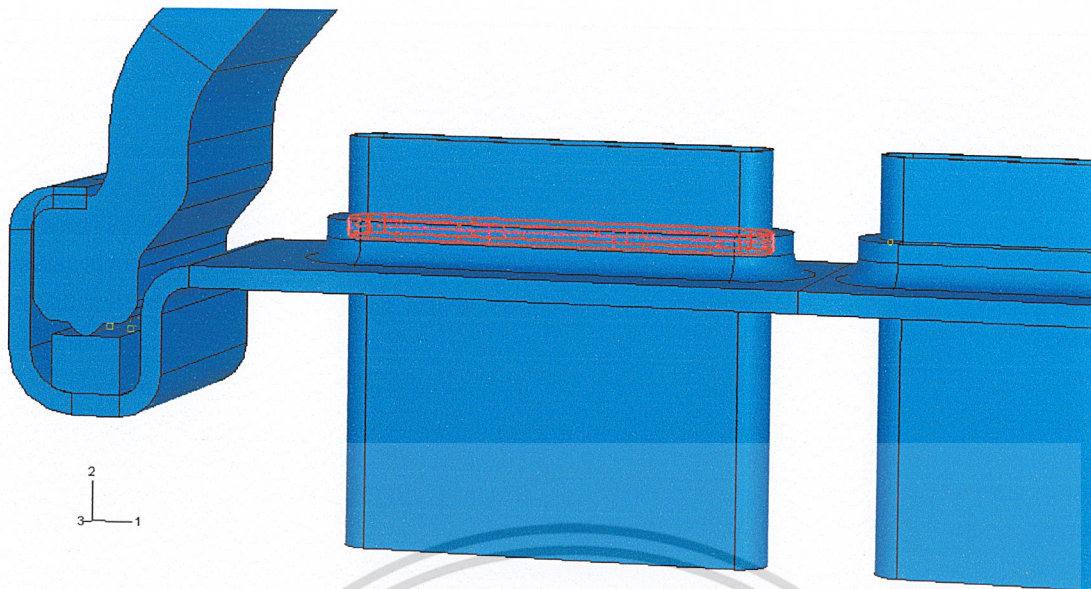
ใน Step1 มีการสัมผัสของชิ้นงานอยู่หลายตำแหน่งด้วยกันโดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่าง Packing Tank กับ Plastic Tank ทั้งสองข้าง โดยเลือกที่ไอคอน Create Interaction เลือกชนิดของ Interaction เป็นแบบ Surface-to-Surface Contact จากนั้นเลือก Master Surface (ชิ้นงานที่แข็งแรงกว่าคือ Plastic Tank) และ Slave Surface เลือกที่ผิวของ Packing Tank ซึ่งหลังจากที่เลือกแล้วจะปรากฏสีเกิดขึ้นที่ผิวที่เรากำหนดหน้าสัมผัส สีแดงคือ Master Surface และสีม่วงคือ Slave Surface ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงการกำหนดผิวสัมผัสของ Plastic Tank กับ Packing Tank

กำหนด Constraint ในการวิเคราะห์โมเดลมีบริเวณที่เราจะต้องใช้วิธี Tie เพื่อผูกชิ้นงานให้ติดกัน โดยที่มีบริเวณที่ต้อง Tie ทั้งหมด 2 ส่วน คือ

Tie บริเวณผิวด้านใน (ส่วนที่เป็นรู) ของ Header Plate กับผิวด้าน นอกของ Tube โดยเลือกที่ไอคอน Create Constraint แล้วเลือกบริเวณดังรูป 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงการผูกติดผิวในของ Header Plate กับ Tube

Tie บริเวณผิวของ Packing Tank กับผิวของ Header Plate ดังรูปโดยให้ผิวของ Header Plate และ Packing Tank เป็น Master Surface และ Slave Surface ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงการผูกติดผิวด้านล่างของ Packing Tank กับ Header Plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 Step 2

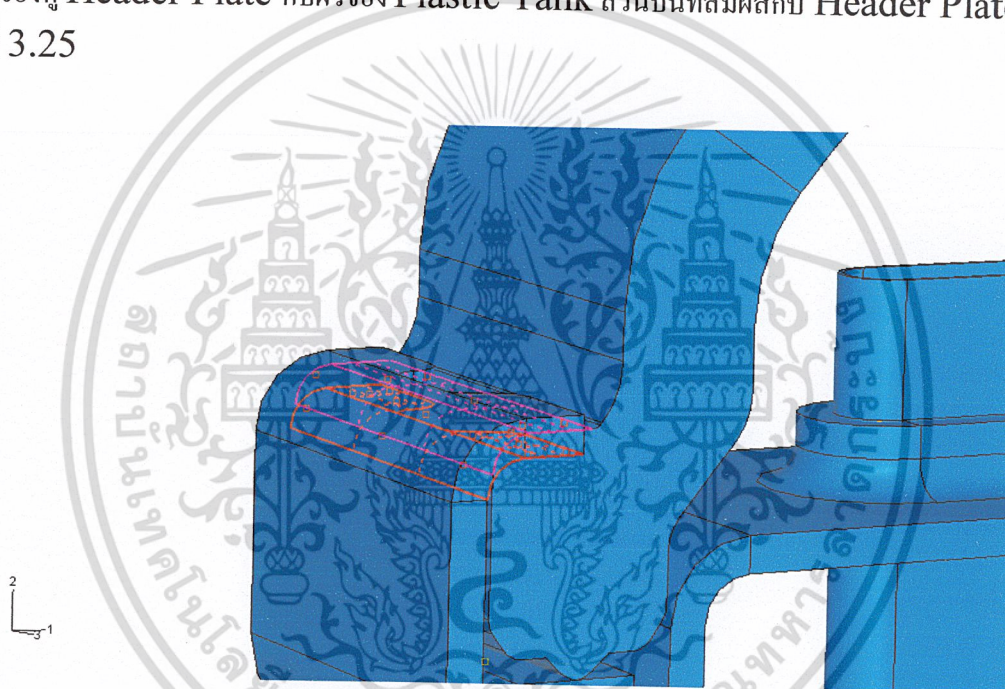
ใน Step 2 ยังคงเป็นขั้นตอนการประกอบชิ้นงานโดยใน Step นี้จะเป็นการใส่แรงกดบริเวณของหูของ Header Plate เพื่อยึด Plastic Tank ให้อยู่กับที่

#### 3.3.2.1 Boundary condition ของ Step 2 ดังนี้

ใน Step 2 นี้การกำหนด Boundary Condition เราจะกำหนดเช่นเดียวกับ Step 1 แต่ Boundary Condition ของ Plastic Tank จะเลือก Deactivate

#### 3.3.2.2 Interaction

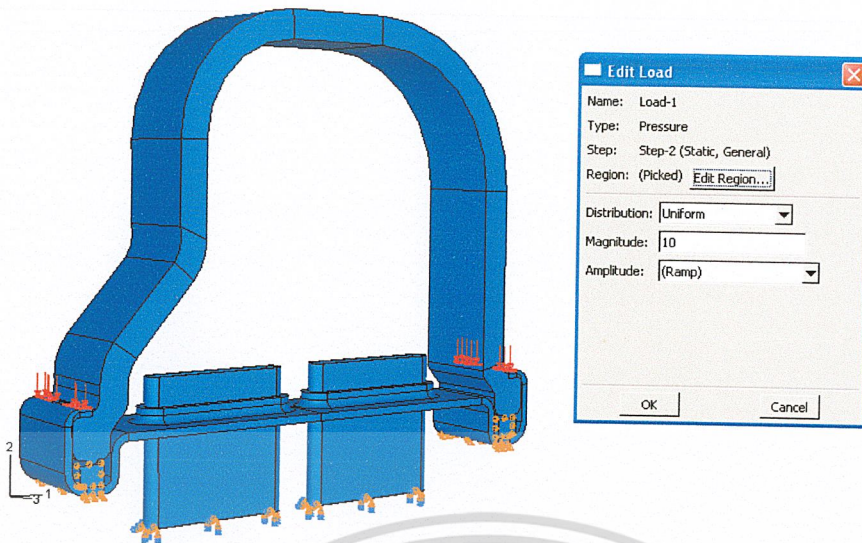
ใน Step 2 การกำหนด Interaction จะเหมือนกับใน Step 1 แต่มีเพิ่มขึ้นมาบริเวณหูของผิวของหู Header Plate กับผิวของ Plastic Tank ส่วนบนที่สัมผัสกับ Header Plate ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงการกำหนดผิวสัมผัส ของ Header Plate กับ Plastic Tank ใน Step 2

#### 3.3.2.3 Load

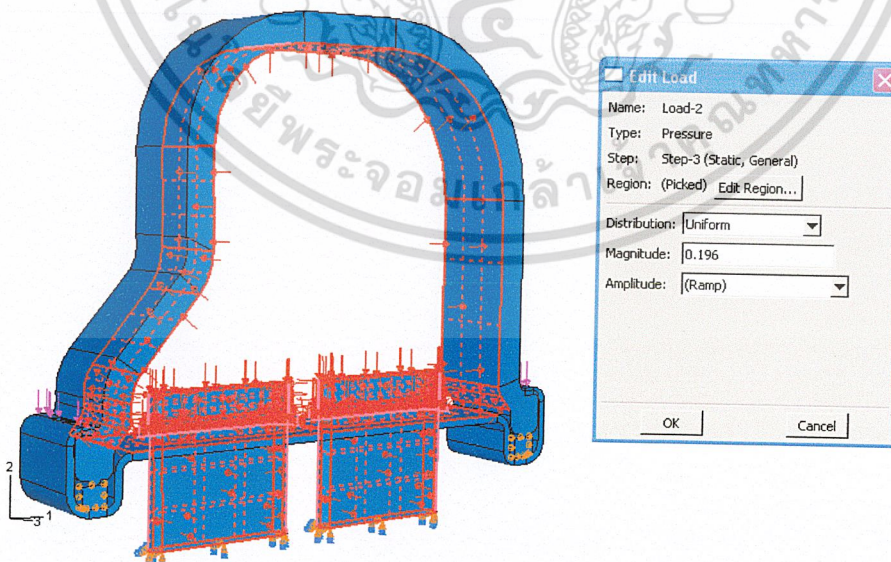
ใน Step 2 จะมีการใส่แรงกดที่หูของ Header Plate โดยการเลือกไอคอน Create Load เลือกชนิดของโหลดเป็น Pressure จากนั้นเลือกบริเวณที่จะใส่โหลดและใส่ขนาดของแรงเท่ากับ  $10 \text{ N/mm}^2$  ดังแสดงในรูป 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงการใส่แรงกดที่หูของ Header Plate

### 3.3.3 Step 3

Step 3 เป็นขั้นตอนการใส่แรงดันเข้าไปใน Header เพื่อดูการกระจายความเค้น ความเครียดและการเสียรูปของ Header Plate ใน Step นี้เราจะกำหนด Boundary Condition ให้เหมือนกับ Step 2 แต่ต่างกันตรงที่ใน Step นี้จะเอา Boundary Condition ที่ fixed Header Plate ออก ส่วนการกำหนด Interaction ใน Step นี้จะกำหนดให้เหมือนกับ Step 2 ทั้งหมด ส่วนการใส่ Load ใน Step นี้จะยังคงแรงกดที่หูของ Header Plate ไว้และใส่ความดันเข้าไปข้างใน Header ดังรูป 3.27

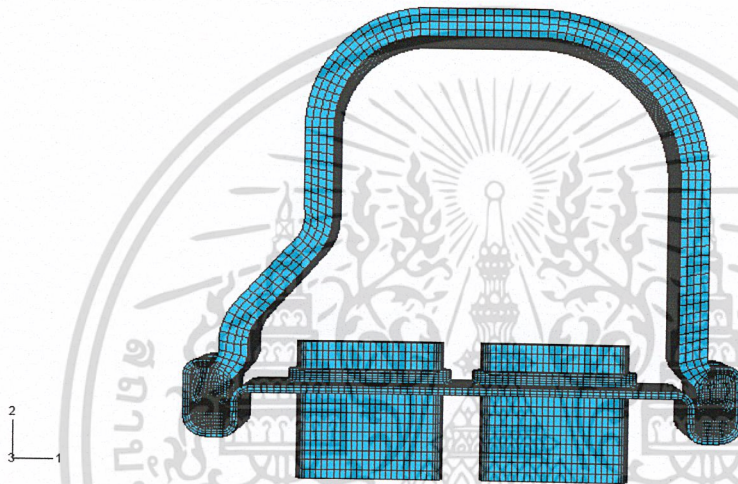


รูปที่ 3.27 แสดงการใส่ความดันใน Header

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการตี Mesh

ขั้นตอนนี้เป็นการแบ่งโมเดลให้เป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ โดยอิลิเมนต์ย่อยๆเหล่านี้จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ ซึ่งในโมเดลนี้เป็นการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ อิลิเมนต์จึงเป็นอิลิเมนต์ 3 มิติด้วยเช่นเดียวกัน ในการแบ่งอิลิเมนต์นั้นเราจะต้องพยายามให้แบบจำลองมีลักษณะใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุดเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด การตี Mesh นั้นจะสามารถทำได้โดยการเลือกเข้าไปที่ Module Mesh , เลือกที่ไอคอน Seed Edge by Number เพื่อกำหนดช่วงในการแบ่งอิลิเมนต์ หลังจากนั้นเลือกไปที่ไอคอน Mesh Part Instant เพื่อทำการตี Mesh จะได้ Finite Element Model ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 แสดง FEM Model

หลังจากที่เรารตี Mesh เสร็จแล้วเราต้อง Assign Element Type ให้กับชิ้นส่วนต่างๆ โดยที่ Header Plate, Plastic Tank, Tube กำหนดให้เป็นดังตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 แสดงชนิดอิลิเมนต์ของแต่ละชิ้นส่วน

ชิ้นส่วน	ชนิดอิลิเมนต์
Header Plate	Hex,3D-8node,reduced integration
	Tet,3D-4node
Tube	Hex,3D-8node,reduced integration
Plastic Tank	Hex,3D-8node,reduced integration
Packing Tank	Hex,3D-8node,reduced integration,hybrid formulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการรัน Model

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการรันโปรแกรมเพื่อดูการกระจายความถี่ ความเครียด และการเสียรูปซึ่งสามารถทำได้โดยเลือก Module Job เลือก Create Job เลือก Job Type แล้วเลือก Submit เพื่อรันโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

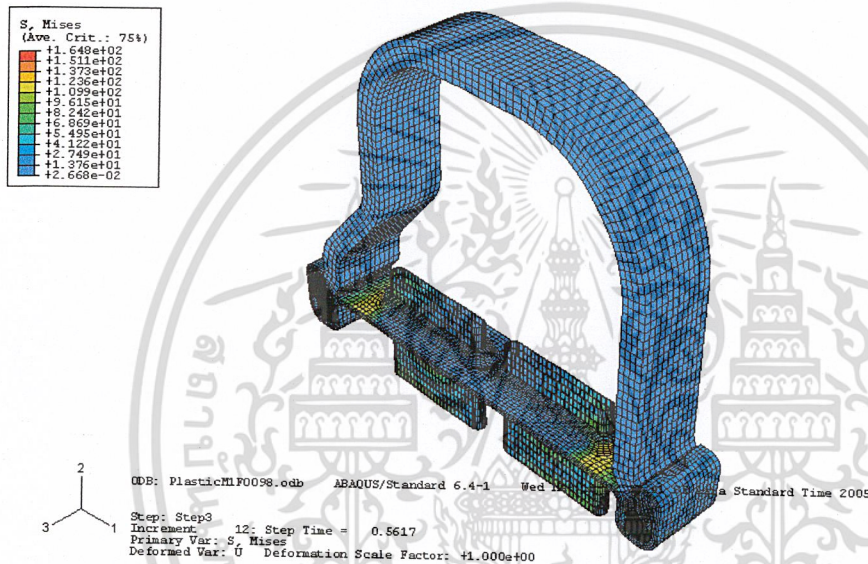
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการสรุปผลการทดลอง

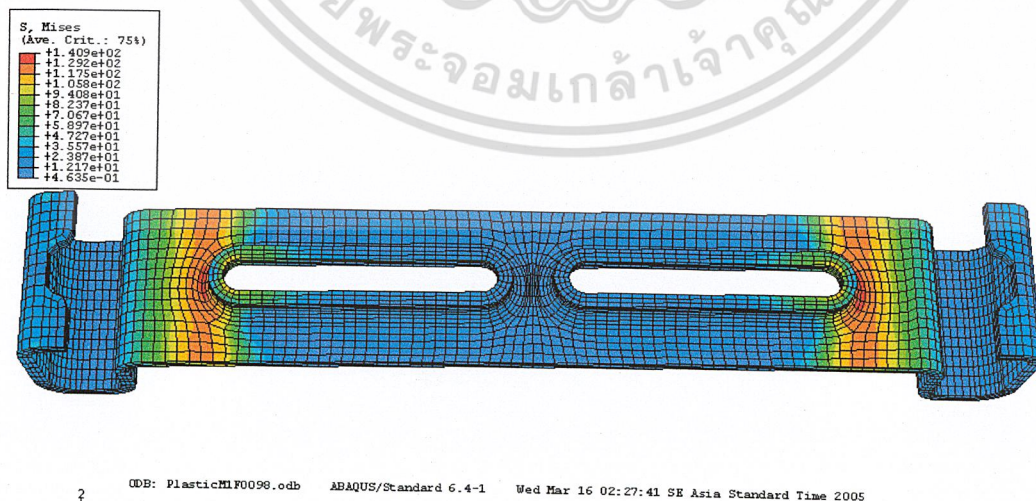
#### 4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 จุดประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อจะทำการหาตำแหน่งที่เกิดความเครียดพลาสติกสูงสุดหรือตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายสูงสุดโดยจะทำการทดสอบที่ความดัน 1 และ 2 bar

ผลการทดลองโดยการรันโปรแกรม ABAQUS/CAE ของแบบจำลองของ Header ที่มี Header Plate แบบเรียบที่ความดัน 1 bar

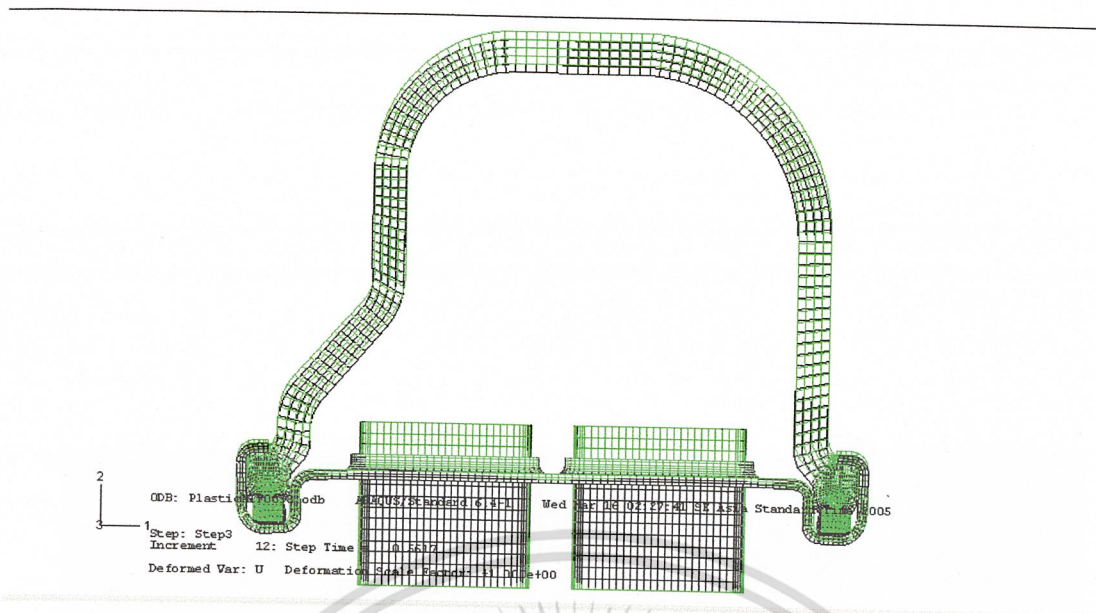


รูปที่ 4.1 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเมื่อรับความดันจากไอน้ำ

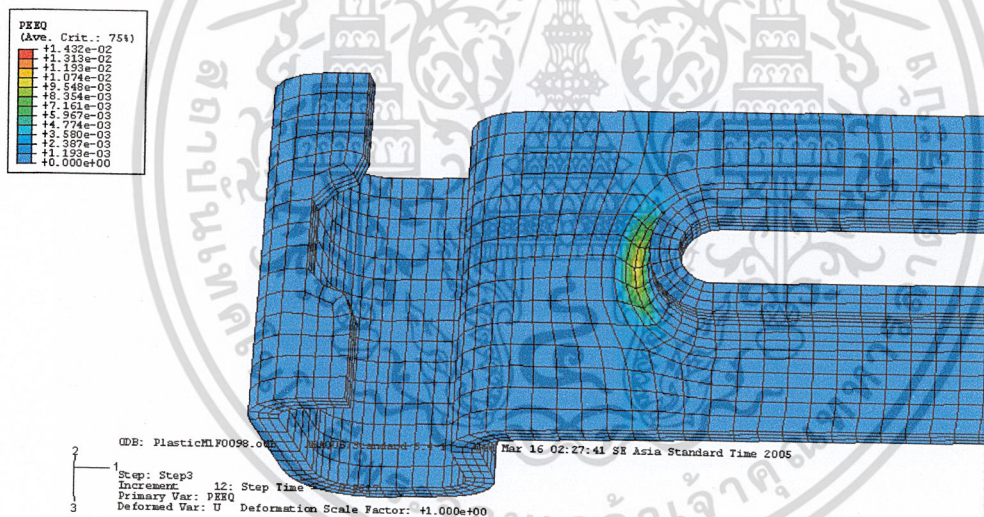


รูปที่ 4.2 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

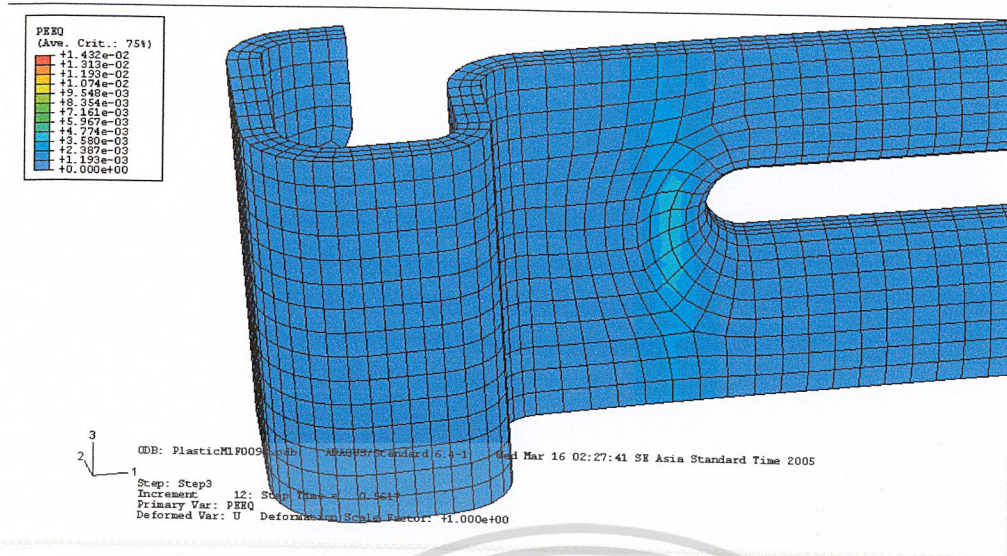


รูปที่ 4.3 แสดง Deformed Shape เปรียบเทียบกับ Undeformed Shape โดยที่ Undeformed Shape คือรูปสี่เหลี่ยม

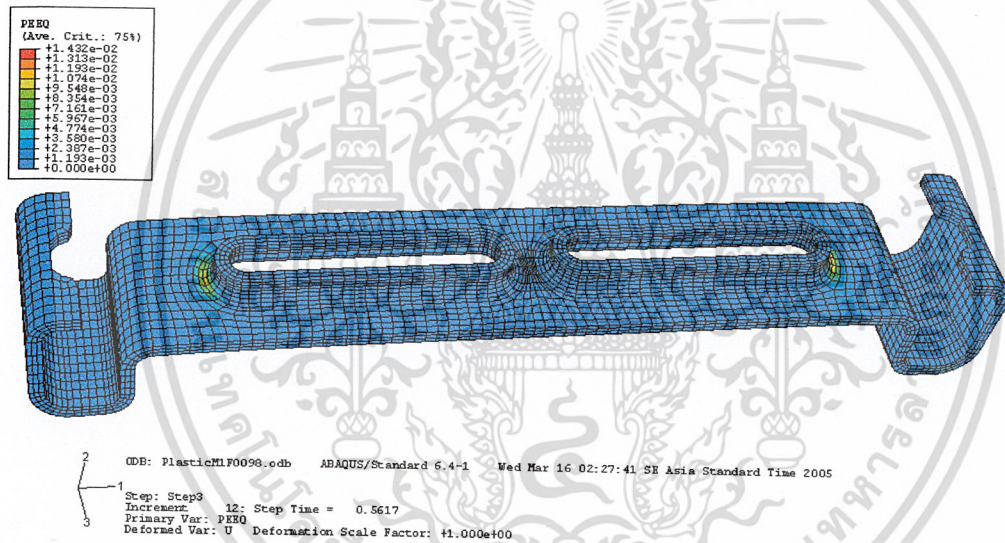


รูปที่ 4.4 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



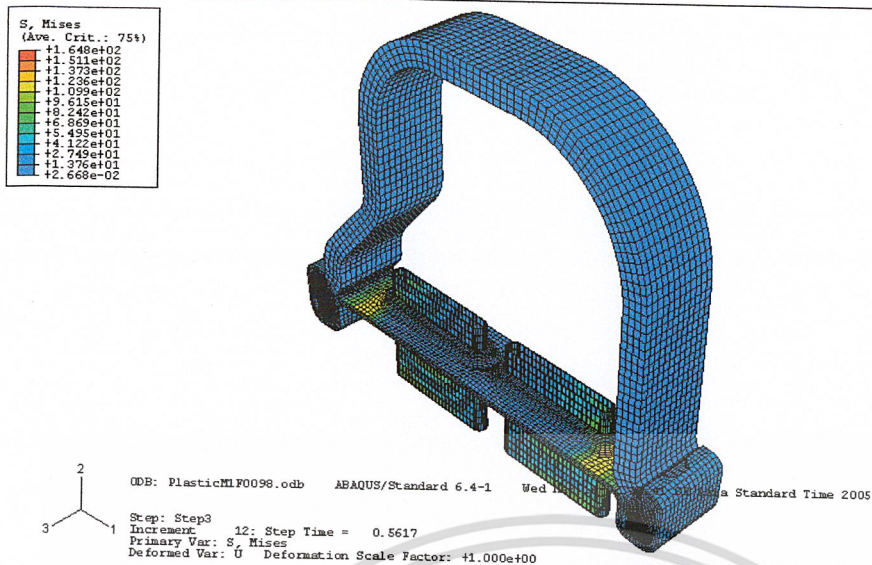
รูปที่ 4.5 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก



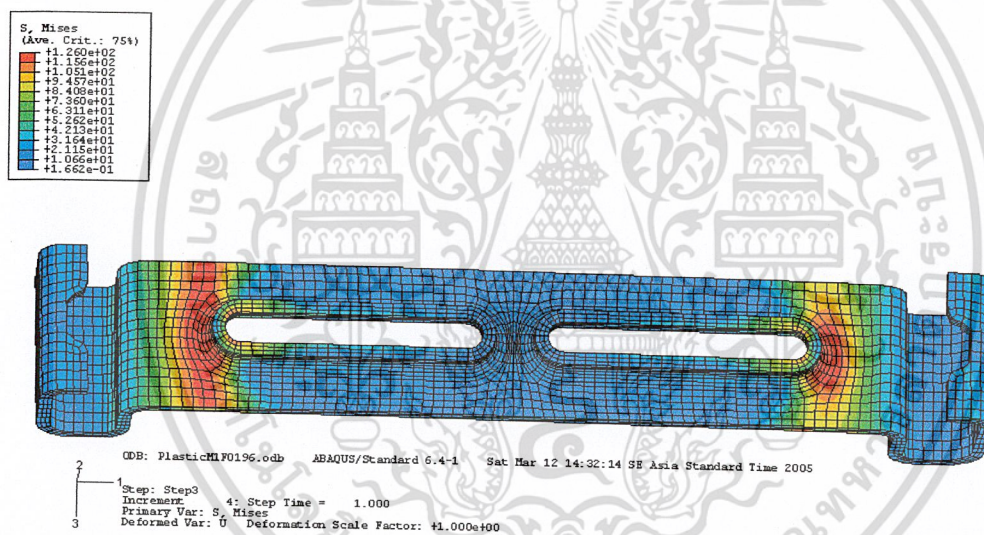
รูปที่ 4.6 แสดงความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้น Header Plate

ผลการทดลองโดยการรันโปรแกรม ABAQUS/CAE ของแบบจำลองของ Header ที่มี Header Plate แบบเรียบที่ความดัน 2 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

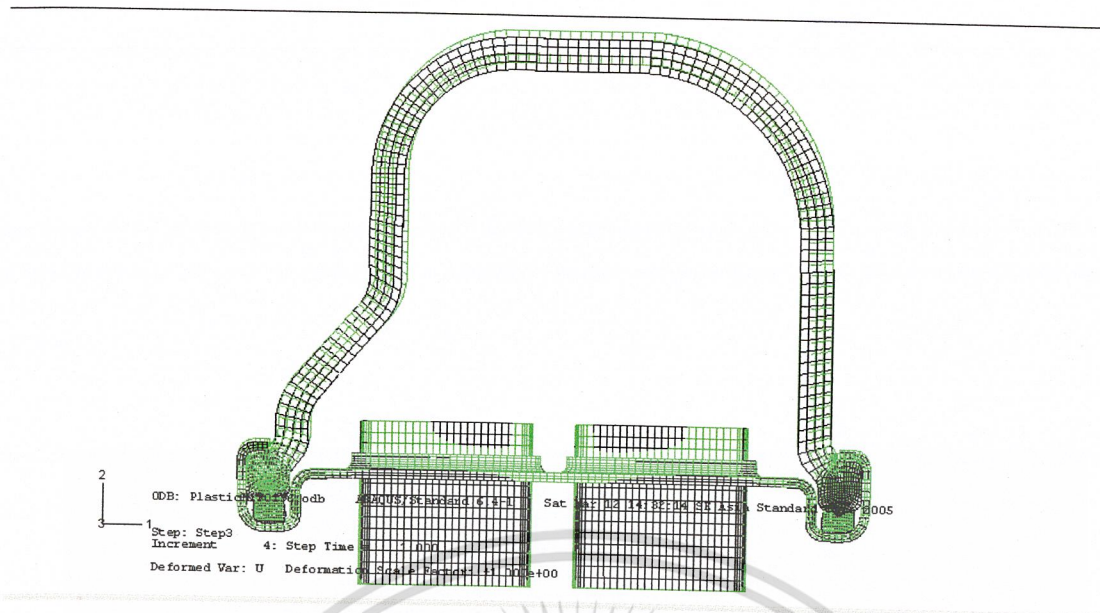


รูปที่ 4.7 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในเฮดเดอร์เมื่อรับความดัน 2 bar

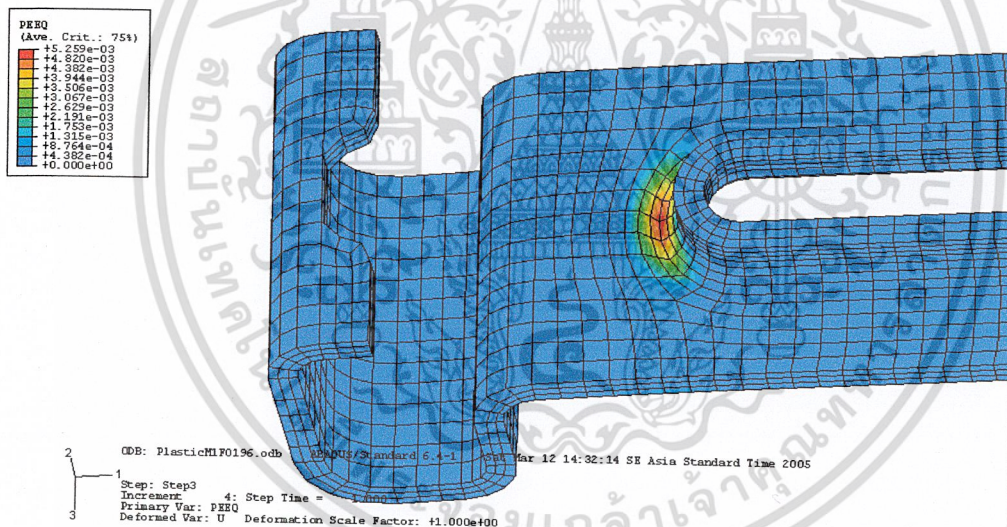


รูปที่ 4.8 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

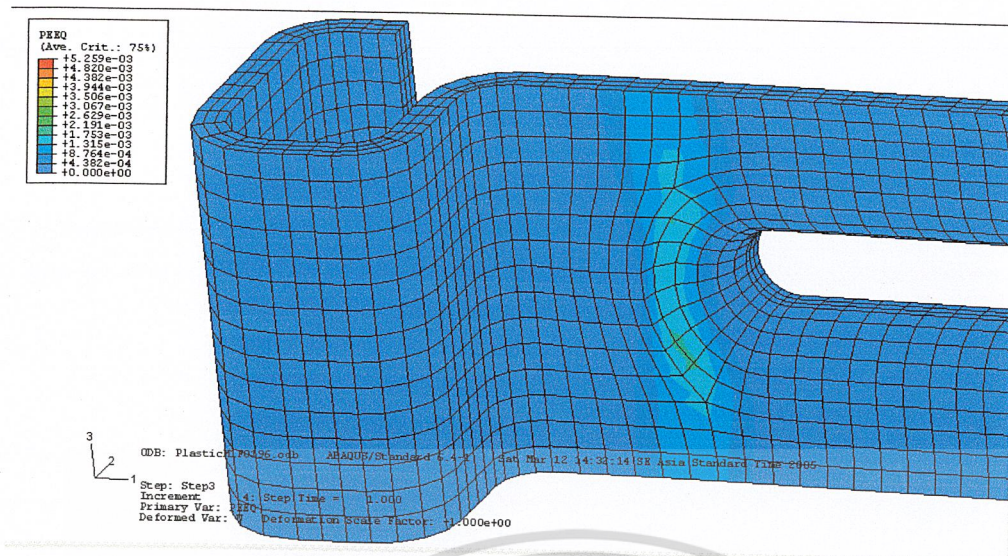


รูปที่ 4.9 แสดง Deformed Shape เปรียบเทียบกับ Undeformed Shape โดยที่ Undeformed Shape คือรูปสี่เหลี่ยม

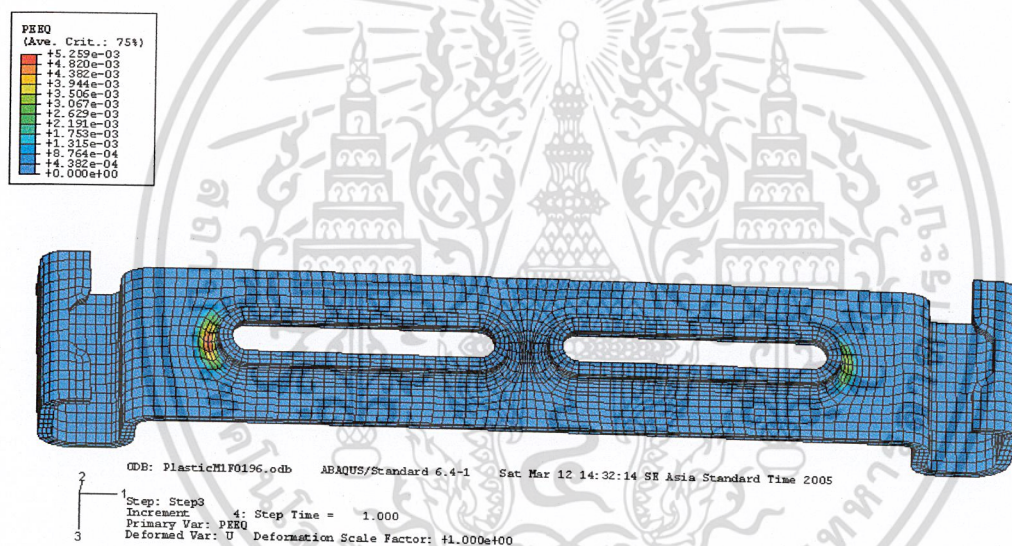


รูปที่ 4.10 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



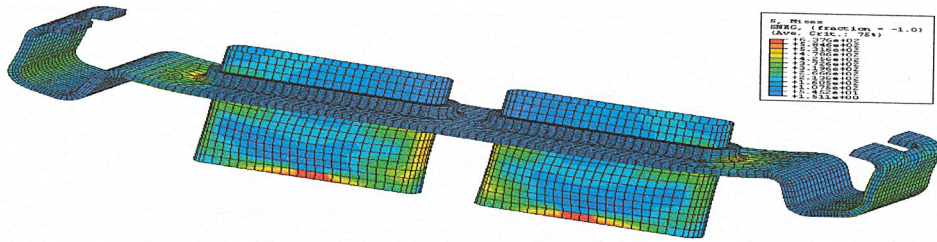
รูปที่ 4.11 แสดงบริเวณที่เกิดความเครียดพลาสติก



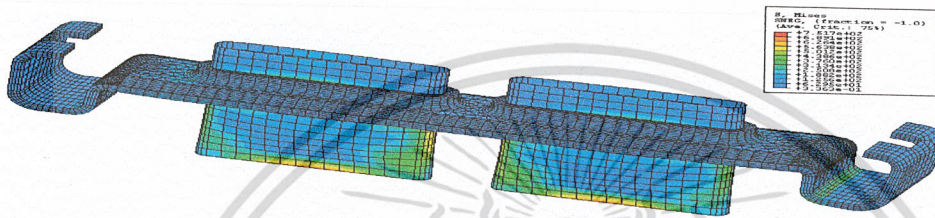
รูปที่ 4.12 แสดงความเครียดพลาสติกที่เกิดกับ Header Plate

4.1.2 จุดประสงค์การทดลองนี้เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของ Header Plate ทั้งสองแบบโดยการทดลองจะทำการวิเคราะห์หาการเสียรูปของ Header Plate ทั้ง 2 แบบภายใต้ความดันเท่ากันคือ 2 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

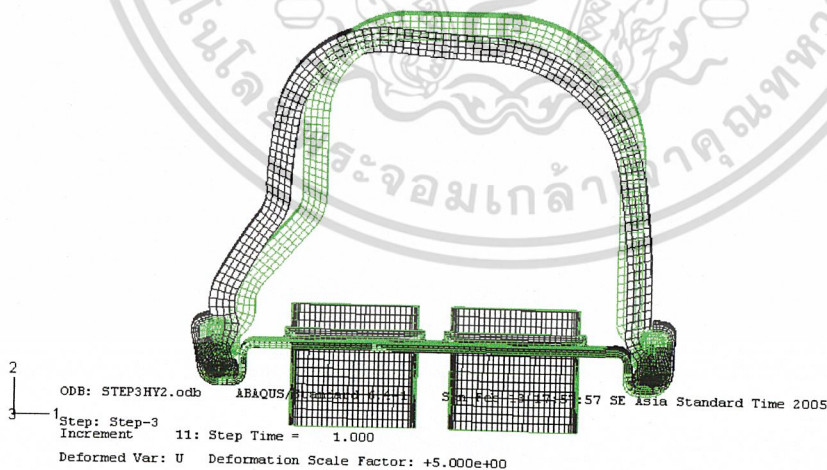


รูปที่ 4.13 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate แบบเรียบ



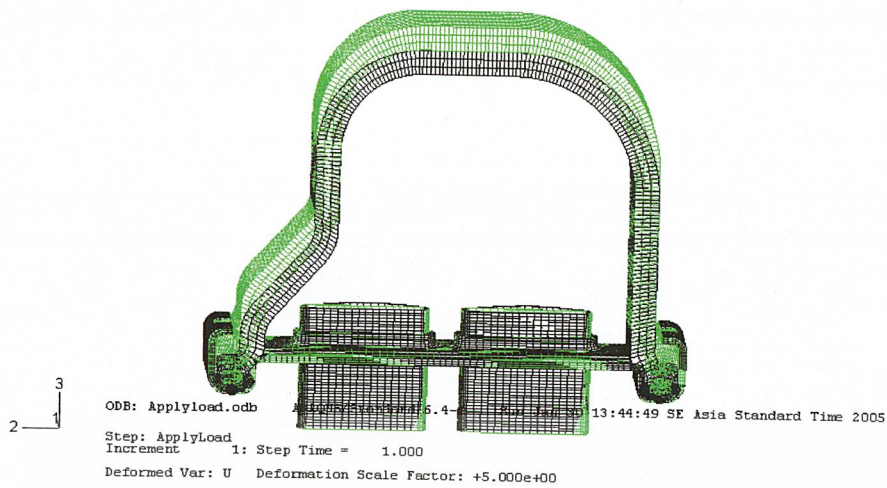
รูปที่ 4.14 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ Header Plate แบบลอน

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เมื่อสังเกตสีที่เกิดขึ้นที่บริเวณ Header Plate จะพบว่าการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นที่ Header Plate แบบเรียบมากกว่า Header Plate แบบลอน เมื่อพิจารณาที่ความดันเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Header Plate แบบลอนมีความแข็งแรงมากกว่าแบบเรียบ

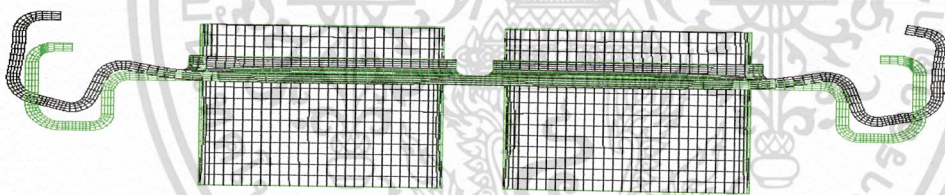


รูปที่ 4.15 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของแบบจำลองของเฮดเดอร์ที่มี Header Plate แบบเรียบ โดยกำหนด Factor Deformation =5

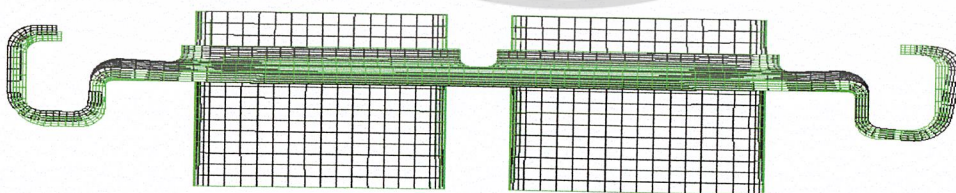
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของแบบจำลองของเฮดเดอร์ที่มี Header Plate แบบลอน โดยกำหนด Factor Deformation =5

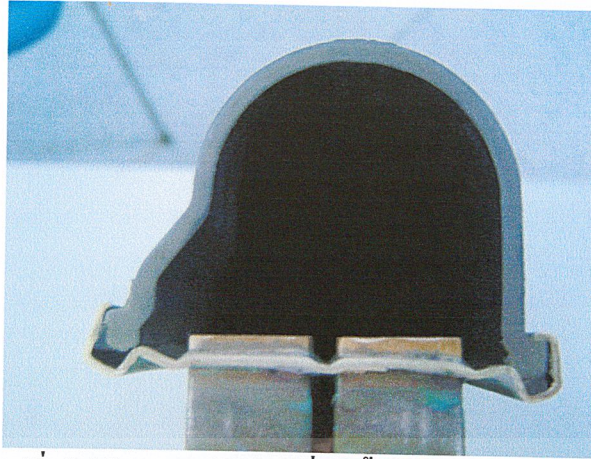


รูปที่ 4.17 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของ Header Plate แบบเรียบ



รูปที่ 4.18 แสดง Deformed Shape เทียบกับ Undeformed Shape ของ Header Plate แบบลอน

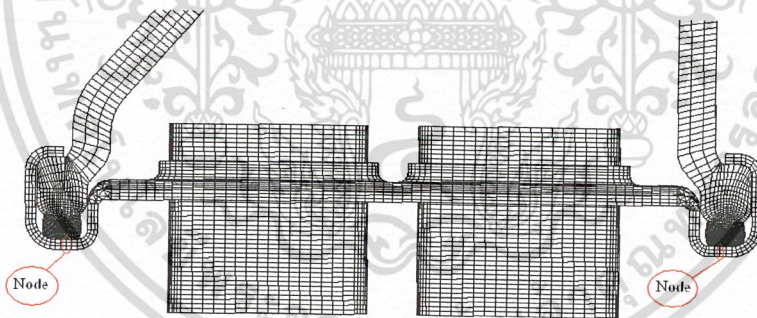
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงการเสียรูปที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจริง

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงโดยบริษัท C.H. วัฒนายนต์และผลจากโปรแกรม ABAQUS/CAE จะได้ว่ารูปร่างการเสียรูปจากความดันที่เกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน

จากการทดลองวัดค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นที่โหนดบริเวณดังรูปที่ เมื่อ Header รับแรงดันไอน้ำ ของ Header Plate ทั้งสองแบบโดยได้ผลดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.20 แสดงบริเวณโหนดที่ใช้วัดค่าการกระจัดในแนวแกน y ของ Header Plate ทั้งสองแบบ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการกระจัดในแนวแกน y ที่เกิดขึ้นที่แต่ละ Node ในแบบจำลอง Header Plate แบบเรียบ

Node	ค่าการกระจัด (mm)	Node	ค่าการกระจัด (mm)
244	9.78E-03	391	1.05E-01
2198	1.10E-02	2468	1.02E-01
2197	1.24E-02	2467	9.89E-02
247	1.37E-02	396	9.59E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการกระจัดในแนวแกน y ที่เกิดขึ้นที่แต่ละ Node ในแบบจำลอง Header Plate แบบลอน

Node	ค่าการกระจัด (mm)	Node	ค่าการกระจัด (mm)
1262	1.35E-36	3073	-8.38E-36
5109	5.05E-05	8869	-5.95E-05
5108	1.11E-04	8868	-1.19E-04
1265	6.14E-05	3076	-8.13E-05

### 4.2 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองที่เกิดขึ้นทำให้เราทราบว่า

4.2.1 จากผลการรันโปรแกรม ABAQUS/CAE บริเวณที่มีความเค้นสูงสุดจะมีความเครียดพลาสติกเกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ความเครียดพลาสติกจะเกิดขึ้นที่ Header Plate บริเวณด้านข้าง(ส่วนนอก) ของส่วนที่เป็นรู ดังเช่นรูปที่ 4.12

4.2.2 จากผลการรันโปรแกรม ABAQUS/CAE เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของแบบจำลองที่มี Header Plate แตกต่างกันทั้งสองแบบ ทำให้สรุปได้ว่า แบบจำลองที่มี Header Plate แบบลอนมีความแข็งแรงมากกว่าแบบเรียบ เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อทดสอบที่ความดันเดียวกันมีค่าน้อยกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่มี Header Plate แบบเรียบ รวมถึงรูปแสดงรูปร่างการเสียรูปที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลองจะพบได้ว่า แบบจำลองที่มี Header Plate แบบลอนนั้นมีการเสียรูป ที่น้อยกว่า เหตุผลที่ช่วยสนับสนุนอีกข้อ คือ ค่าการกระจัดในแนวแกน y ที่เกิดขึ้นที่ Node ใน Header Plate แบบลอนมีค่าน้อยกว่าใน Header Plate แบบเรียบดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

4.2.3 จากผลการทดสอบการเสียรูปของ Header Plate จากการทดลองจริงเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS/CAE พบว่ารูปร่างการเสียรูป ของ Header Plate ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

4.2.4 ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการตี Mesh ซึ่งถ้ามีการตี Mesh ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างจริงของชิ้นงานมากที่สุด ผลการทดลองจะมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น แต่ก็ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีกด้วย และสาเหตุของการคลาดเคลื่อนของผลการทดลองอีกสาเหตุหนึ่งคือ ในการทดลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS/CAE นั้น เป็นการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนการทดสอบจริงอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่านี้มากทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมอาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

### 4.3 งานวิจัยขั้นต่อไป (Future Work)

ในอนาคตเราสามารถที่จะวิเคราะห์ความเค้นความเครียดและการเสียรูปแบบพลาสติกที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาถึงสภาวะความร้อนภายใน Header เพื่อให้ความสมจริงยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1]Lindvall,J.,and Minkkinen,M.,Fracture Mechanics For Plate Heat Exchanger Gasket,School of Mechanical Engineering Lund University
- [2]William,F.H.,and Robert,M.C.,Metalforming Mechanics and Metallurgy,2<sup>nd</sup> Ed.,Prentice Hall International
- [3] Ottosen,N.,and Petersson,H.,Introduction to the Finite Element Method, Prentice Hall International



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้