



รายงานวิจัย

เรื่อง

การวิเคราะห์ความล้าและการออกแบบหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Fatigue Analysis and Design of reform using Finite Element Method

คณะผู้ทำวิจัย

1. นายประกอบ ชาติภักต์
2. นายวรวิทย์ วรรณวิน
3. นายธงชัย ฟองสมุทร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2552

ชื่อ : นายประกอบ ชาติภักดิ์
นายวรวิทย์ วรรณวิน

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อ : นายธงชัย พงษ์สมุทร

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ชื่องานวิจัย : การวิเคราะห์ความล้าและออกแบบหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปี : 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นและบริเวณที่จะเกิดความเข้มของความเค้นเพื่อมุ่งสู่การหาอายุการใช้งานที่ภาระขนาดต่างๆ และอธิบายความเหมาะสมของรูปแบบหัวรีฟอร์ม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รวมกับการทดลอง กระบวนการทดลองจะแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ขั้นตอนแรก หัวรีฟอร์มที่มีขนาดรัศมีที่คอคงที่ 15mm ทำการทดลองจริงและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความดันใช้งาน 380 bar ผลการทดสอบและวิเคราะห์ทั้งสองวิธีให้ค่าความเครียดที่แตกต่างกัน 8.1% และมีอายุการใช้งาน 1,345,467 รอบ ขั้นตอนที่สองหาอายุการใช้งานของหัวรีฟอร์มที่มีขนาดเดิมและอยู่ภายใต้ความดัน 230, 270, 300 และ 350 bar ขั้นตอนสุดท้าย วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เกิดการแตกหักและจำนวนอายุการใช้งานที่ความดันต่างๆ ช่างต้นได้อายุการใช้งานเป็น 12,915,057 8,663,807, 3,968,805 และ 2,118,677 รอบ ตามลำดับ นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยการปรับเพิ่มค่ารัศมีความโค้งที่คอคงหัวรีฟอร์มเป็น 15, 25 และ 30 mm ผลที่ได้คือสามารถลดความเข้มของความเค้นลงได้อย่างมาก นั่นคือมีแนวโน้มที่สามารถใช้งานได้ ในจำนวนรอบรอบที่มากขึ้นกว่าหัวรีฟอร์มที่มีรูปร่างแบบเดิม

(งานวิจัยมีจำนวนทั้งสิ้น 61 หน้า)

คำสำคัญ : ความล้า, การแตกหัก, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Name : Mr.Prakorb Chartpuk
: Mr.Vorawit Voranawin
Major Field : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Name : Mr.Thongchai Fongsamootr
Major Field : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chiang- Mai University
Research Title : Fatigue Analysis and Design of reform using Finite Element Method
Year : 2009

Abstract

The objective of this research to determine a maximum stress and the area might be occur concentration stress on a reformed element. The result will illustrate the appropriateness of the prototype's reformed element and its life time by using the combination of finite element method combine and experiment. The experiment procedure was divided 3 stages. First stage, an original reformed element of 15 mm radius was compared experiment's stress with the analysis's stress that was analyzed by using finite element method under using pressure 380 bar. The result shown that the stress from experiment and simulation is differs of 8.1% and the life time is 1,345,467 cycle. Second stage, the same radius of formed element was tested under using pressure of 230, 270, 300 and 350 bars to determine S-N curve. Third stage is a simulation life time of the preformed element and position of fracture by using CosmosWorks software that was entered S-N curve experiment. Finally, the life times of each pressure are 12,915,057 8,663,807, 3,968,805 and 2,118,677 cycle. Furthermore, the simulation by using the increasing radius of reformed element of 15, 25 and 30 mm are effect extremely decrease concentration stress. Once, trend to increase life time longer than the original preformed element.

(Research 61 pages)

Keywords : Fatigue, Fracture, Finite element method

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณบริษัทไทยซัมมิท พีเคเค บางนา จำกัด ที่สนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆ และให้ข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัยและขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้การการอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือประกอบการทดลองและศึกษา

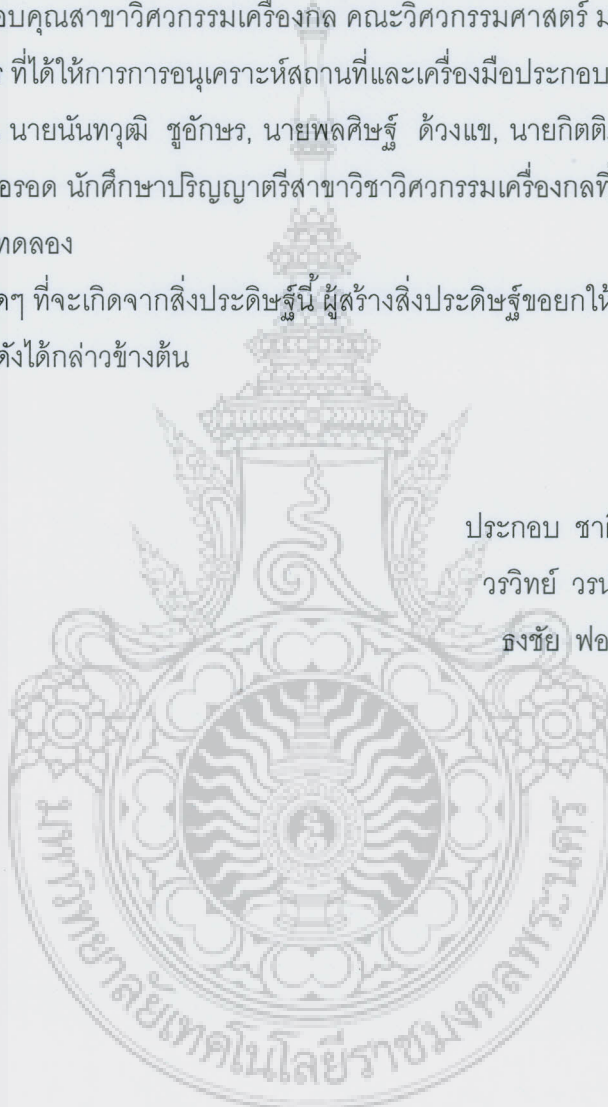
ขอขอบคุณ นายนันท์วุฒิ ชูอักษร, นายพลศิษฐ์ ด่วงแข, นายกิตติภพ จิรภาสพงศา และ นายศรารุณ มีเครือรอด นักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ช่วยเหลือในการเตรียมเครื่องมือและการทดลอง

ประโยชน์ใดๆ ที่จะเกิดจากสิ่งประดิษฐ์นี้ ผู้สร้างสิ่งประดิษฐ์ขอยกให้เป็นคุณงามความดีแด่บุคคลและองค์กรตั้งได้กล่าวข้างต้น

ประกอบชาติภักดิ์

วรวิทย์ วรรณวิน

ธงชัย ฟองสมุทร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	5
2.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป	11
2.3 ความล้า	13
2.4 ทฤษฎีการเสียหายของวัสดุ	16
2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	17
3. วิธีดำเนินการศึกษา	20
3.1 วิธีดำเนินการศึกษา	20
3.2 การสร้างแบบจำลองจริงขนาด 1:1 สำหรับการทดสอบ	22
3.3 การทดสอบแบบจำลองจริงขนาด 1:1 จากแบบมาตรฐาน	22
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองขนาด 1:1 ด้วยคอมพิวเตอร์	27
3.5 การเปรียบเทียบผลของความเค้นและความเครียดจากวิธีต่างๆ	29
3.6 การออกแบบหัวรีฟอร์มเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน	29
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	31
4.1 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองจริงที่มีขนาดและวัสดุเดิม	31
4.2 ผลและการวิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดและวัสดุเดิม	32

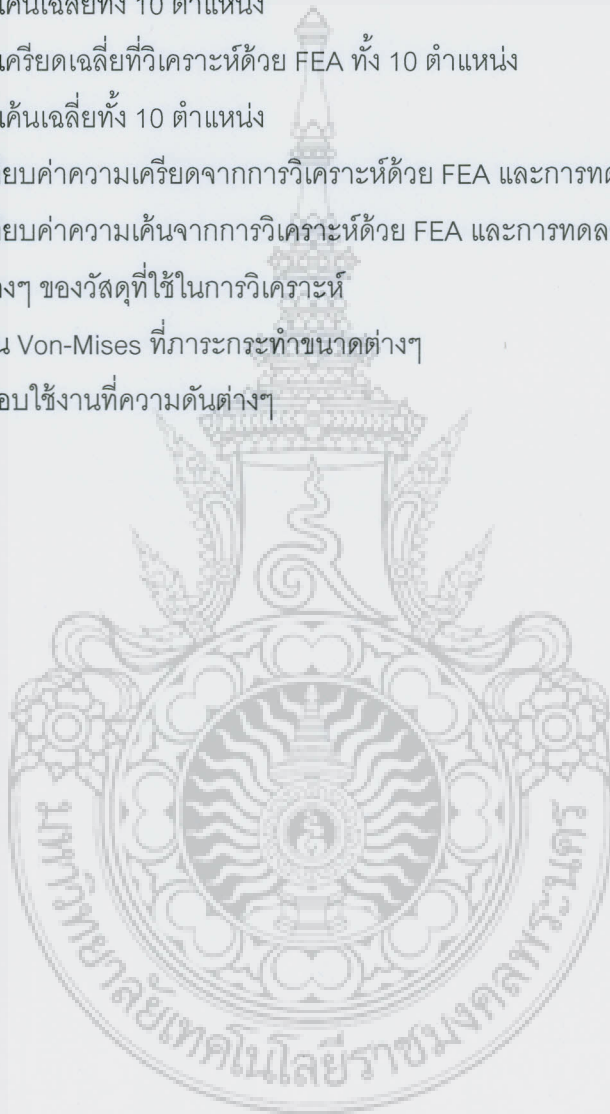
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่หาได้จากวิธีต่างๆ จากแบบจำลองที่มีขนาดและวัสดุเดิม	34
4.4 ผลและการวิเคราะห์ความเค้นที่ภาชนะขนาดต่างๆ	35
4.5 ผลและการวิเคราะห์ความเค้นที่ภาชนะขนาดต่างๆ	39
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการศึกษา	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	47
ภาคผนวก	48
ประวัติผู้วิจัย	53



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4-1	ค่าความเครียดเฉลี่ยที่อ่านได้จาก Strain gage ทั้ง 10 ตำแหน่ง	32
4-2	ค่าความเค้นเฉลี่ยทั้ง 10 ตำแหน่ง	32
4-3	ค่าความเครียดเฉลี่ยที่วิเคราะห์ด้วย FEA ทั้ง 10 ตำแหน่ง	33
4-4	ค่าความเค้นเฉลี่ยทั้ง 10 ตำแหน่ง	33
4-5	เปรียบเทียบค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ด้วย FEA และการทดลอง	35
4-6	เปรียบเทียบค่าความเค้นจากการวิเคราะห์ด้วย FEA และการทดลอง	35
4-7	สมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	36
4-8	ความเค้น Von-Mises ที่ภาระกระทำขนาดต่างๆ	36
4-9	จำนวนรอบใช้งานที่ความดันต่างๆ	39



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1	2
1-2	2
1-3	2
1-4	3
2-1	5
2-2	11
2-3	13
2-4	14
2-5	14
2-6	14
2-7	16
3-1	21
3-2	22
3-3	23
3-4	23
3-5	24
3-6	24
3-7	24
3-8	25
3-9	25
3-10	26
3-11	26
3-12	26
3-13	27
3-14	28
3-15	28

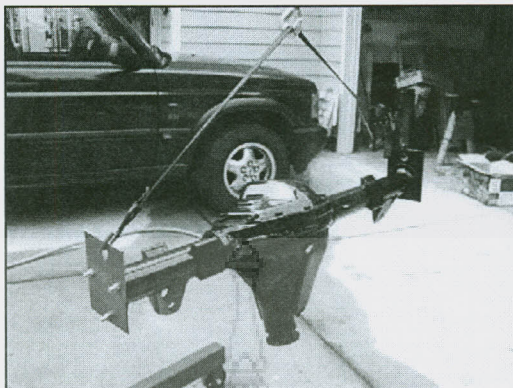
สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-16 การแบ่งแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยเอลิเมนต์ Ten nodes tetrahedral	28
3-17 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหวัรีฟอร์มที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
3-18 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของแผ่นรองกอดัดหวัรีฟอร์มที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
3-19 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของแผ่นกอดัดหวัรีฟอร์มที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
4-1 การเปลี่ยนแปลงความเค้นเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์	32
4-2 การเสียรูปและการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในมุมมอง Isometric	33
4-3 การกระจายความเค้นด้วยทฤษฎีพลังงานการเสียรูปสูงสุดที่เกิดขึ้นในมุมมองต่างๆ	34
4-4 การกระจายความเค้นของหวัรีฟอร์มที่ความดันใช้งาน 380 bar	36
4-5 การกระจายความเค้นของหวัรีฟอร์มที่ความดันใช้งาน 350 bar	37
4-6 การกระจายความเค้นของหวัรีฟอร์มที่ความดันใช้งาน 300 bar	37
4-7 การกระจายความเค้นของหวัรีฟอร์มที่ความดันใช้งาน 270 bar	38
4-8 การกระจายความเค้นของหวัรีฟอร์มที่ความดันใช้งาน 230 bar	38
4-9 S-N curve ของรูปร่าง (S-N curve of part) ที่ได้จากการทดลอง	39
4-10 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 380 bar	40
4-11 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 380 bar	40
4-12 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 350 bar	40
4-13 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 350 bar	41
4-14 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 300 bar	41
4-15 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 300 bar	41
4-16 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 270 bar	42
4-17 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 270 bar	42
4-18 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 230 bar	42
4-19 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 230 bar	43
4-20 ความเข้มของความเค้นลดลงจากการเพิ่มรัศมีความโค้งที่ความดันใช้งาน 380 bar	43
4-21 การปรับค่ารัศมีความโค้งแบบไม่คงที่ที่คอหวัรีฟอร์ม	44

บทที่ 1 บทนำ

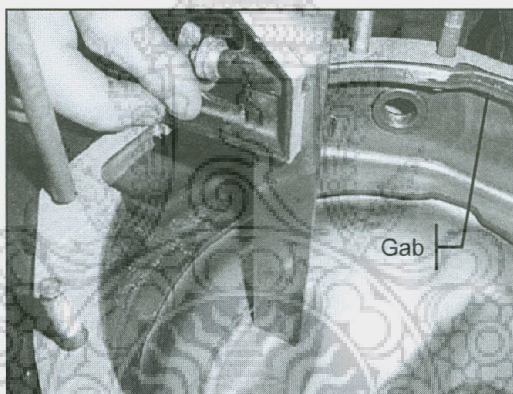
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตที่สำคัญของโลกในด้านอุตสาหกรรมหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ประกอบด้วยการผลิตชิ้นส่วนเพื่อการส่งออกและการประกอบยานยนต์ภายในประเทศ ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตภายในประเทศได้แก่ โครงรถยนต์ เฟลาขับ จานเบรก เสื้อเฟลาขับหลัง ยางรถยนต์ และอื่นๆ ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ย่อมต้องมีกระบวนการและกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันและต้องมีเทคนิคการผลิตที่เป็นลักษณะเฉพาะ จากการเข้าเยี่ยมชมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ของบริษัทไทยซัมมิท พีเคเค บางนา จำกัด พบว่าในกระบวนการผลิตเสื้อเฟลาขับหลังในบางขั้นตอนมีปัญหาเกิดขึ้นเช่น ที่หน้าแปลนของตัวเสื้อเฟลาขับหลังที่ประกอบด้วยหน้าแปลนสองชิ้นถูกเชื่อมเข้าด้วยกันแต่ยังมีช่องว่างระหว่างหน้าแปลนดังกล่าวจึงต้องใช้หัวรีฟอร์มที่มีลักษณะคล้าย C-clamp บีบอัดหน้าแปลนเพื่อลดช่องว่าง (gab) ซึ่งต้องใช้แรงในการบีบอัดที่สูงมากจึงจะลดช่องว่างลงได้ ในการทำงานพบว่าหน้าแปลนของเสื้อเฟลาขับหลังแต่ละตัวจะถูกบีบอัดเป็นจำนวน 14 จุด ด้วยกระบอกสูบไฮดรอลิกที่ติดตั้งกับเข้าหัวรีฟอร์มภายใต้ความดันใช้งานที่ 230-350 bar รูปแบบของภาระที่กระทำเป็นแบบกระทำซ้ำหรือที่เรียกว่า Cyclic loading ซึ่งภาระแบบนี้จะไม่ส่งผลให้ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรเกิดการเสียหายโดยทันทีแต่จะสะสมเป็นความล้า (Fatigue) นั่นคือชิ้นส่วนดังกล่าวจะเสียหายเมื่อผ่านการใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่งหรือจำนวนครั้งในการบีบอัดที่จำนวนหนึ่ง จากข้อมูลการใช้งานพบว่าในระยะเวลาประมาณ 1 ปี หัวรีฟอร์มดังกล่าวจะเกิดการแตก ไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ต้องเปลี่ยนใหม่และต้องสูญเสียเวลาในการตั้งระบบใหม่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตที่ต้องหยุดชะงักไป ดังนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์สาเหตุและวิธีการแก้ไขให้สามารถใช้งานหัวรีฟอร์มได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาจะต้องใช้ทฤษฎีและการออกแบบการทดลองทางด้านวิศวกรรมเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านทฤษฎีต้องใช้ความรู้ในการออกแบบและการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ การจำลองสภาพการใช้งานด้วยคอมพิวเตอร์ที่จะทำให้มองเห็นสภาพความเสียหายได้ชัดเจน อีกทั้งยังมีความรวดเร็วและให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ แต่การวิเคราะห์ทางด้านทฤษฎีเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอที่จะใช้ในการตองปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างมีน้ำหนัก จำเป็นต้องใช้หลักการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมควบคู่ไปด้วย



รูปที่ 1-1 เสื้อเพลลาขับเคลื่อนและเฟืองท้าย

http://www.landroveronly.com/forums/attachments/f7/11885d1170335371-what-do-i-painting-differential-housing-000_0123.jpg (11 January 2009)

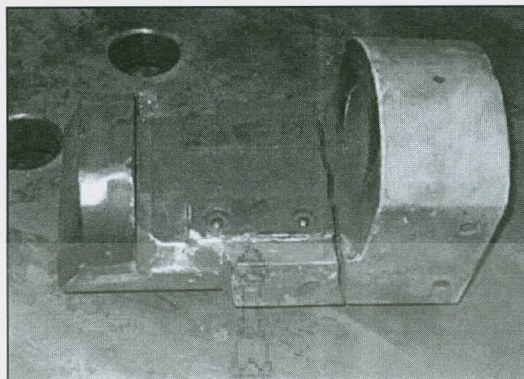


รูปที่ 1-2 ระยะช่องว่างของสองหน้าแปลนที่เสื้อเพลลาขับเคลื่อน

<http://home.off-road.com/~kemanuel/elocker/lots-o-room1.jpg> (11 January 2009)



รูปที่ 1-3 หัวรีฟอร์มกำลังทำการบีบอัดหน้าแปลนเสื้อเพลลาขับเคลื่อน



รูปที่ 1-4 หวีรีฟอร์มที่เกิดการแตกหักหลังการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นในหวีรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่บรรจุในซอฟต์แวร์สำเร็จรูป

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในหวีรีฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและหาตำแหน่งของการเกิดความเค้นสูงสุด

1.2.3 เพื่อศึกษาจำนวนรอบการใช้งานของหวีรีฟอร์มและศึกษาปริมาณความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1.3.1 ได้แบบจำลองของหวีรีฟอร์มที่สามารถใช้วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ในลักษณะที่คุณสมบัติของวัสดุและขนาดต่างไปจากนี้ได้ขนาดของหวีรีฟอร์มที่มีความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานมากขึ้น

1.3.2 ได้รูปแบบของหวีรีฟอร์มที่มีความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานมากขึ้น

1.3.3 สามารถแก้ไขปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรมได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 การศึกษาและวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเปรียบเทียบผลกับการทดลองจริง

1.4.2 เป็นการศึกษาหวีรีฟอร์มที่ใช้ในการลดช่องว่างของหน้าแปลนสี่เหลี่ยมด้านหลังโดยใช้นาตามแบบของบริษัท ไทยซัมมิท พีเคเค บางนา จำกัด

1.4.3 สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks และวิเคราะห์หาความเค้นกับความเครียดแบบ 3 มิติโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ Cosmos

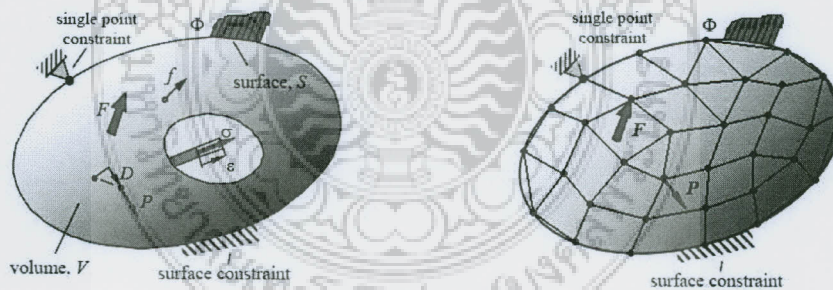
1.4.4 กำหนดภาระที่ใช้เป็นแรงจากก้านสูบของกระบอกสูบไฮดรอลิกเท่านั้น



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีแนวความคิดที่ว่าวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้ โดยแต่ละชิ้นเล็กๆ เหล่านี้สามารถพิจารณาแยกกันอย่างอิสระและสามารถประกอบเข้ากันเป็นวัตถุรูปเดิมได้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะกับปัญหาที่ยุ่งยากซับซ้อนซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยจะแก้ปัญหาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพีชคณิตแล้วใช้คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลลัพธ์ มีหลักการสำคัญคือ แบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของแบบจำลอง แต่ละเอลิเมนต์ต่อเชื่อมกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยการสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการควบคุม ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์นั้นๆ เมื่อนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันจะได้สมการรวม (Global equation) จากนั้นแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ภายใต้สภาวะสมดุลของภาระภายนอกและเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง



รูปที่ 2-1 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ที่มา : ประกอบ ชาติภักดิ์ (2006)

พิจารณารูปที่ 2-1 เป็นวัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่องใน 3 มิติ มีปริมาตรเท่ากับ v และมีพื้นผิวปิด s ล้อมรอบปริมาตร รับภาระกระทำแบบต่างๆคือ ภาระกระทำเป็นจุด (P) ภาระแบบกระจายกระทำที่ผิว (ϕ) และแรงเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุ (F) โดยมีเงื่อนไขขอบซึ่งขึ้นอยู่กับการจับยึดวัตถุคือการจับยึดแบบเป็นจุด การจับยึดแบบกระจายที่พื้นผิว เมื่อแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์

เล็กๆ ภาวะแบบเป็นจุด ภาวะแบบกระจาย แรงเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุ การขจัดและเงื่อนไขขอบ จะถูกแปลงเป็นค่าลงในแต่ละจุดต่อ ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา 3 มิติจะใช้หลักการของงานเสมือนเหมือนกับสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา 2 มิติ ต่างกันที่ใน 3 มิติจะมี 3 แกนคือ x, y, z ดังนั้นสนามการขจัดจะประกอบไปด้วย u, v, w โดยแต่ละจุดต่อจะมีการขจัด 3 ค่า

2.1.1 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ของแข็ง 3 มิติ

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ของแข็ง 3 มิติจะใช้หลักการของงานเสมือน เอลิเมนต์ที่พิจารณาจะเป็นเอลิเมนต์ที่มีสนามภายในเป็นสนามของการขจัด (Displacement based element) โดยมีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด คือ

$$\{\varepsilon\} = [D]\{u\} \quad (2.1)$$

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (2.2)$$

- เมื่อ $\{u\}$ คือ เวกเตอร์ของสนามการขจัดภายในเอลิเมนต์ประกอบด้วย u, v, w
 $[D]$ คือ Derivative operator matrix
 $[E]$ คือ เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในสภาวะยืดหยุ่น
 $\{\varepsilon\}$ คือ เวกเตอร์ของสนามความเครียดภายในเอลิเมนต์
 $\{\sigma\}$ คือ เวกเตอร์ของความเค้นภายในเอลิเมนต์

ดังนั้นจากสมการ (2.1) และ (2.2) เมื่อทราบสนามการขจัดภายในเอลิเมนต์จะทำให้สามารถหาเวกเตอร์ของสนามความเครียดภายในเอลิเมนต์ได้ คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

และเวกเตอร์ของความเค้นภายในเอลิเมนต์ คือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยมีเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในกรณีทั่วไปที่มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง คือ

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

สนามการขจัดภายในโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นค่าสนามภายในเอลิเมนต์และเป็นค่าฟังก์ชันของการขจัดที่จุดต่อ คือ

$$\{u\} = [N]\{d\} \quad (2.6)$$

เมื่อ $[N]$ คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเอลิเมนต์

$\{d\}$ คือ ค่าการขจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์เป็นค่าเวกเตอร์ที่แยกมาจากเวกเตอร์ของการ

ขจัดรวม $\{D\}$ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการแก้สมการ

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (2.7)$$

$$\{D\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (2.8)$$

เมื่อ $[K]$ คือ Global stiffness matrix เป็นเมตริกซ์รวมที่ประกอบจาก Stiffness matrix, $[k]$ ของทุกเอลิเมนต์

$\{F\}$ คือ Global force vector เป็นเวกเตอร์รวมที่ประกอบจาก Element force vector

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือการหาค่า $[k]$ และ $\{f\}$ ของเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างใดๆ โดยที่สมการสมดุลในเอลิเมนต์คือ

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (2.9)$$

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ของแข็ง 3 มิติจะใช้หลักการของงานเสมือน มีหลักการที่สำคัญคือ เมื่อโครงสร้างโดยทั่วไปถูกแรงกระทำจากภายนอกและโครงสร้างอยู่ในสภาพสมดุล แล้วสมมติให้มีการขจัดเสมือน (Virtual displacements) เกิดขึ้น จะมีงานเสมือน (Virtual work) เนื่องจากแรงภายนอกซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานความเครียดเสมือน (Virtual strain energy) เนื่องจากความเค้นในเนื้อวัสดุ จากหลักการนี้จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\begin{aligned} \text{พลังงานความเครียดเสมือน} &= \text{งานเสมือนเนื่องจากแรงภายนอก} \\ \delta U_E &= \delta W_E \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ U_E คือ พลังงานความเครียด

W_E คือ งานเนื่องจากแรงภายนอก

การหา δU_E จะเริ่มจากการแทนค่า $\{u\}$ จากสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.1) จะได้ความเครียดภายในเอลิเมนต์เท่ากับ

$$\{\epsilon\} = [D][N]\{d\} \quad (2.11)$$

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.12)$$

เมื่อ $[B]$ คือ อนุพันธ์ของ $[N]$ สมการ (2.12) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดและความเครียด

ถ้าสมมติให้มีการขจัดเสมือน $\{\delta d\}$ จะได้ความเครียดเสมือนเท่ากับ $\{\delta \epsilon\}$ จากพลังงานความเครียดซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของความเค้นและความเครียด ดังนั้นถ้ามีความเครียดเสมือน $\{\delta \epsilon\}$ ภายใต้สภาวะความเค้น $\{\sigma\}$ จะได้พลังงานความเครียดเสมือนในเอลิเมนต์ที่มีปริมาตร V คือ

$$\delta U_E = \int_V \{\delta \epsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (2.13)$$

แทนค่า $\{\delta\epsilon\}^T$ ด้วย $\{\delta d\}^T [B]^T$ และแทนสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.2) ได้ $\{\sigma\}$ เท่ากับ $[E][B]\{d\}$ ดังนั้นสมการ (2.13) จะได้ว่า

$$\delta U_E = \int_V \{\delta d\}^T [B]^T [E][B]\{d\} dV \quad (2.14)$$

สำหรับ δW_E จะเท่ากับการขจัดเสถียรที่จุดต่อด้วยเวกเตอร์ของแรงจากภายนอกที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์

$$\delta W_E = \{\delta d\}^T \{f\} \quad (2.15)$$

แทนสมการ (2.14) และ (2.15) ลงในสมการสมดุลพลังงาน จะได้

$$\int_V \{\delta d\}^T [B]^T [E][B]\{d\} dV = \{\delta d\}^T \{f\} \quad (2.16)$$

เทอม $\{\delta d\}$ เป็นการขจัดเสถียรที่จุดต่อ และ $\{d\}$ เป็นค่าการขจัดที่จุดต่อ ค่าทั้งสองไม่ขึ้นกับปริมาตรของเอลิเมนต์ ดังนั้น

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$[k] = \int_V [B]^T [E][B] dV \quad (2.18)$$

สมการ (2.18) คือ Stiffness matrix ของเอลิเมนต์ มีขนาด 30×30 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอนุพันธ์ของ $[N]$ โดยที่ $[E]$ คือเมตริกซ์คุณสมบัติของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดมีขนาด 6×6 ดังแสดงในสมการ (2.5) สำหรับเมตริกซ์ $[B]$ จะมีขนาด 6×30 หากจากอนุพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่าง N_i ซึ่งเมื่อเลือกเอลิเมนต์ชนิด Ten nodes tetrahedral จะทำให้มีฟังก์ชันรูปร่าง 10 ฟังก์ชัน ในการหา N_i จะเริ่มจากการสมมติสมการการขจัดด้วยสมการพหุนาม แต่จะมีความยุ่งยากในการใช้สมการพหุนามที่มีตัวแปรบนพิกัดฉาก (x,y,z) ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงใช้พิกัดธรรมชาติ (ξ,η,ζ) มาช่วยในการหาสมการของเอลิเมนต์ สำหรับเอลิเมนต์ Ten nodes tetrahedral จะมีสมการการขจัด คือ

$$u = a_1 + a_2\xi + a_3\eta + a_4\zeta + a_5\xi^2 + a_6\xi\eta + a_7\eta^2 + a_8\eta\zeta + a_9\zeta^2 + a_{10}\xi\zeta \quad (2.19)$$

$$v = a_{11} + a_{12}\xi + a_{13}\eta + a_{14}\zeta + a_{15}\xi^2 + a_{16}\xi\eta + a_{17}\eta^2 + a_{18}\eta\zeta + a_{19}\zeta^2 + a_{20}\xi\zeta \quad (2.20)$$

$$w = a_{21} + a_{22}\xi + a_{23}\eta + a_{24}\zeta + a_{25}\xi^2 + a_{26}\xi\eta + a_{27}\eta^2 + a_{28}\eta\zeta + a_{29}\zeta^2 + a_{30}\xi\zeta \quad (2.21)$$

สมการการขจัดภายในเอลิเมนต์ คือ

$$u = \sum_{i=1}^{10} N_i u_i \quad (2.22)$$

$$v = \sum_{i=1}^{10} N_i v_i \quad (2.23)$$

$$w = \sum_{i=1}^{10} N_i w_i \quad (2.24)$$

สมการความสัมพันธ์ของตำแหน่งภายในเอลิเมนต์ คือ

$$x = \sum_{i=1}^{10} N_i x_i \quad (2.25)$$

$$y = \sum_{i=1}^{10} N_i y_i \quad (2.26)$$

$$z = \sum_{i=1}^{10} N_i z_i \quad (2.27)$$

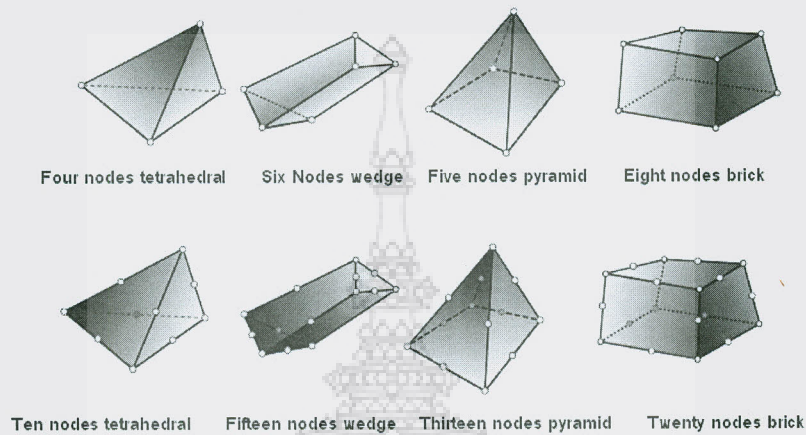
ดังนั้นสมการ (2.18) ในพิกัดฉาก (x,y,z) สามารถเปลี่ยนเป็นสมการในพิกัดธรรมชาติ (ξ,η,ζ) และใช้การอินทิเกรตโดยวิธี Gauss Quadrature จะได้ Element stiffness matrix คือ

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [E] [B] (\det[J]) d\xi d\eta d\zeta \quad (2.28)$$

2.1.2 เอลิเมนต์ 3 มิติ

ในการแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆนั้น ต้องเลือกชนิดของเอลิเมนต์ที่จะนำไปวิเคราะห์ให้เหมาะสม การเลือกชนิดของเอลิเมนต์จะคำนึงถึงคุณสมบัติของวัตถุหรือโครงสร้าง และจำนวนแกน (x,y,z) ที่ใช้บอกตำแหน่งของเอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ 3 มิติที่ใช้ทั่วไปจะมีหลาย

ชนิดดังแสดงในรูปที่ 2-2 เนื่องจากหัตวีฟอร์มมีส่วนโค้งมากดังนั้นเอลิเมนต์ 3 มิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้คือ Ten nodes tetrahedral (3D solid element) ซึ่งจะให้คำตอบที่ถูกต้องมากกว่า เอลิเมนต์ชนิด Four nodes tetrahedral ที่มีขอบข้างตรงแต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า



รูปที่ 2-2 รูปร่างของเอลิเมนต์ 3 มิติแบบต่างๆ

ที่มา : Dary L. Logan. (2001)

2.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Solid Works ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ ที่มีขนาดมาตราส่วนเท่าจากของจริงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ CosmosWorks ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงหัตวีฟอร์มที่มีภาระเป็นแรงเนื่องจากความดันจากกระบอกไฮดรอลิก โดยสามารถยืนยันผลการวิเคราะห์ของหัตวีฟอร์มจากแบบมาตรฐานกับวิธีการทดสอบหัตวีฟอร์มจากแบบมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กระบวนการดังนี้

2.2.1 การ Pre-Processing เป็นการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และกำหนดข้อมูลทางกายภาพให้กับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อการประมวลผล ในกระบวนการนี้จัดว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยข้อมูลหลายส่วนคือ

2.2.1.1 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks ที่มีขีดความสามารถในการออกแบบจำลองที่มีลักษณะเป็น Parasolid

2.2.1.2 การกำหนดประเภทและชนิดของวัสดุที่จะวิเคราะห์ ซึ่งจะกำหนดวัสดุเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในทุกๆ ตำแหน่งของเนื้อวัสดุและเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Linear elastic and isotropic material)

2.2.1.3 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ (Properties of material) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะของวัสดุนั้นๆ ประกอบด้วยโมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง โมดูลัสความแข็งแรง ความหนาแน่นทางมวลความเค้นที่จุดคราก ความแข็งแรงทางแรงดึง ความแข็งแรงทางแรงอัด สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะ ในการกำหนดค่าต่างๆ เหล่านี้เราจะกำหนดค่าตามลักษณะของปัญหาที่จะวิเคราะห์

2.2.1.4 การแบ่งแบบจำลอง (Mesh) โดยโปรแกรมจะสร้างเอลิเมนต์และกำหนดจุดต่อ (Node) พร้อมกับการกำหนดหมายเลขเอลิเมนต์และหมายเลขจุดต่อในการเลือกชนิดเอลิเมนต์ นับว่ามีความสำคัญมากต้องเลือกชนิดเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างของแบบจำลองทวิริฟอร์มมีรูปร่างที่ประกอบด้วยส่วนโค้งเว้าถึงต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด Ten nodes tetrahedral

2.2.1.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการจับยึดทางกายภาพ

2.2.1.6 การกำหนดภาระที่กระทำกับแบบจำลองโดยมีหลายลักษณะเช่น แรงกระทำเป็นจุด แรงกระจายสม่ำเสมอ แรงกระจายไม่สม่ำเสมอและอื่นๆ

2.2.2 การ Solve-Processing

เป็นส่วนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งปกติแล้วเราไม่สามารถแก้ไขกระบวนการส่วนนี้ได้แต่สามารถกำหนดรูปแบบและการวิเคราะห์ให้มีความเหมาะสมกับปัญหานั้นๆ โดยสามารถแสดงลำดับการวิเคราะห์ออกเป็นขั้นตอนดังนี้

2.2.2.1 โปรแกรมทำการสร้าง Local stiffness matrix และสร้าง Element force vector ของแต่ละเอลิเมนต์

2.2.2.2 ประกอบ Local stiffness matrix และ Element force vector ของทุกเอลิเมนต์เข้าเป็น Global stiffness matrix และ Global force vector ตามลำดับ อาศัยหมายเลขตัวแปรที่จุดต่อเป็นตำแหน่งของการประกอบ

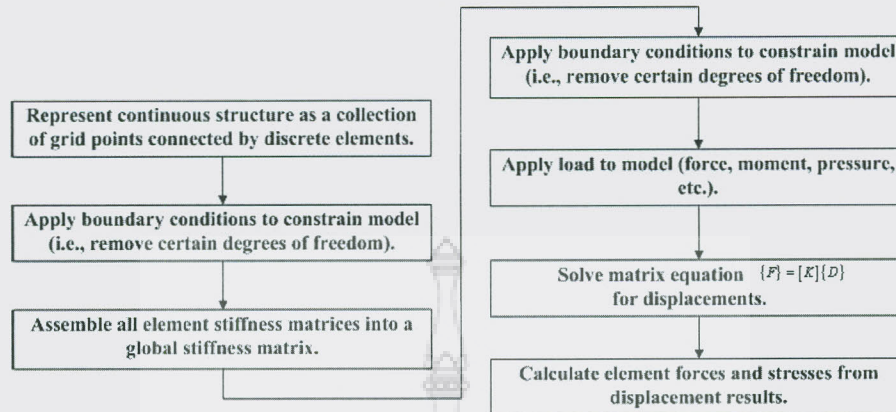
2.2.2.3 โปรแกรมจะตัดสมการที่ตรงกับเงื่อนไขขอบที่ค่าเท่ากับศูนย์ออก

2.2.2.4 แก้สมการ $[K]\{D\} = \{F\}$ จะได้ระยะการขจัด ความเค้นและความเครียด

2.2.3 การ Post-Processing

เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาในลักษณะของภาพกราฟิก โดยสามารถแสดงผลเสียรูป (Deformation) ด้วยค่า (D) โดยตรงรวมถึงสามารถแสดงค่าความเค้นและความเครียดในเอลิเมนต์ต่างๆ โดยใช้สมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

โดยรายละเอียดของการดำเนินการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 กระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.3 ความล้า (Fatigue)

เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) มากกระทำกลับไปกลับมาซ้ำๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้า ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่างๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตช์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้านๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ขั้นตอนที่ทำให้เกิดการเสียหายแบบการล้าของวัสดุจะประกอบด้วย

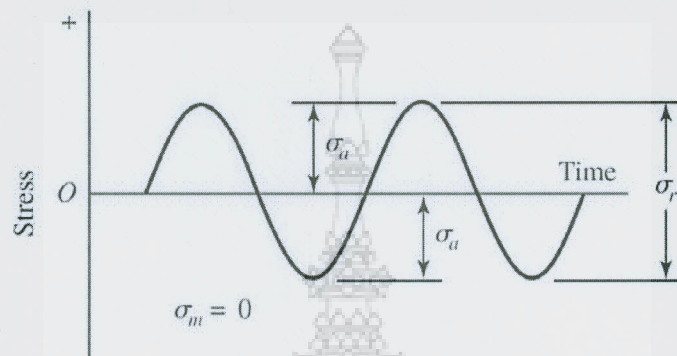
2.3.1 กระบวนการก่อตัวของรอยร้าว (Crack formation) โดยทั่วไปรอยร้าวจะก่อตัวที่ผิวของชิ้นงานที่มีค่าความเข้มข้นของความเค้นสูง (Stress concentration) อันเนื่องมาจากมีตำหนิหรือจุดบกพร่องบนชิ้นงาน (รอยร้าว รอยขีดข่วน เป็นต้น)

2.3.2 กระบวนการขยายตัวของรอยร้าว (Crack growth) ช่วงนี้จะเกิดการขยายของรอยร้าวอย่างช้าๆ ร่องรอยการขยายตัวจะมีลักษณะเป็น Beach mark

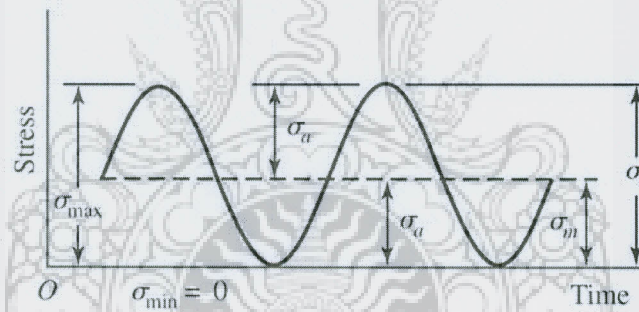
2.3.3 การแตกหักอย่างฉับพลันของชิ้นงาน (Final fracture) เมื่อรอยร้าวเข้าปกคลุมพื้นที่เพียงพอ โดยพื้นที่ที่เหลือของชิ้นงานไม่สามารถต้านทานแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้ ชิ้นงานก็จะขาดจากกันอย่างฉับพลัน

จะเห็นว่าอายุของการล้าจะประกอบไปด้วยเวลาหรือจำนวนรอบของความเค้นวัฏจักรที่ก่อให้เกิดกระบวนการข้างต้น ดังนั้นเราจึงต้องมีการหาค่าอายุของการล้าของชิ้นงาน เมื่อกล่าวถึงการล้าของวัสดุสิ่งที่จะต้องทราบคือรูปแบบของความเค้นวัฏจักรมีการผันแปรเป็นอย่างไร และมีค่าเป็นเท่าไร รูปที่ 2-4 นี้เป็นตัวอย่างหนึ่งของความเค้นวัฏจักรที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่อยู่ภายใต้การหมุนดัด ซึ่งจะเห็นว่าที่ผิวของชิ้นงานจะมีค่าความเค้นดัดเป็นบวกเมื่อจุดบนผิวของชิ้นงานอยู่ด้านบน และจะมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ด้านล่าง ดังนั้นเราจะเขียนกราฟการผันแปรของความเค้นดัดได้

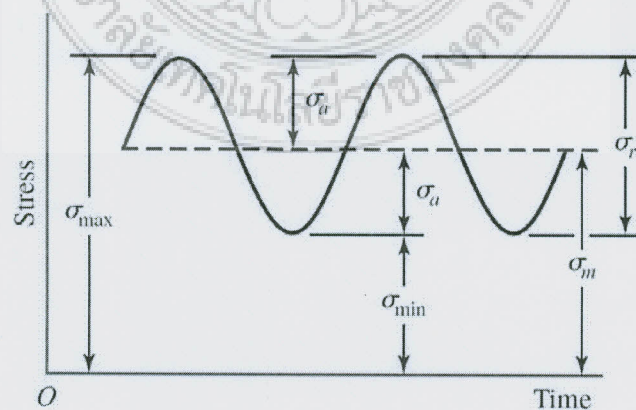
ดังรูปที่ 2-4 ในตัวอย่างนี้เราจะเห็นว่าขนาดของความเค้นดัดสูงสุด กับต่ำสุดจะมีค่าเท่ากันแต่มีเครื่องหมายต่างกัน โดยทั่วไปแล้วมันไม่อาจจะเป็นไปตามนี้ ดังนั้นโดยทั่วไปกราฟการผันแปรของความเค้น จะมีลักษณะดังรูปที่ 2-5 และ 2-6 จากกราฟจะมีตัวแปรสำคัญคือ



รูปที่ 2-4 ความเค้นวัฏจักรของการหมุนดัด



รูปที่ 2-5 ความเค้นวัฏจักรที่ความเค้นต่ำสุดเป็นศูนย์



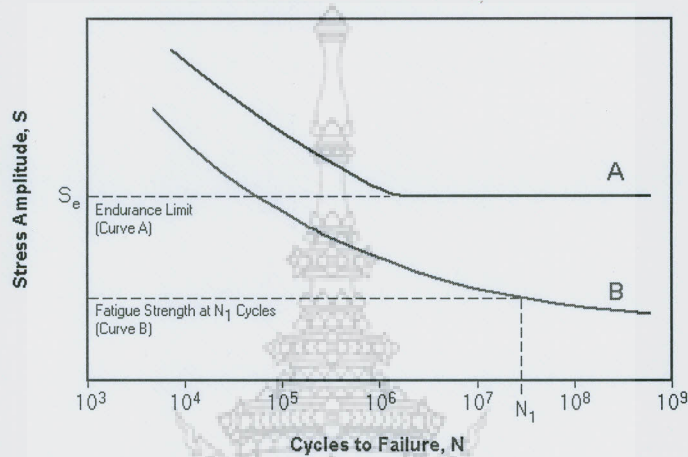
รูปที่ 2-6 ความเค้นวัฏจักรที่วัสดุอยู่ภายใต้ความเค้นก่อนใช้งาน

$$\begin{aligned}
 \text{ก. ความเค้นเฉลี่ย} & \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \\
 \text{ข. ช่วงของความเค้น} & \quad \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \\
 \text{ค. แอมพลิจูดความเค้น} & \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \\
 \text{ง. อัตราส่วนความเค้น} & \quad R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}
 \end{aligned}$$

ถ้ากำหนดจำนวนรอบของแรงที่กระทำซ้ำไปมาแล้วโดยปกติจะใช้ที่ค่า 10^6 รอบ ค่าความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้นๆ เรียกว่า Fatigue strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจะจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า Endurance limit การทดสอบความล้ามีอยู่หลายวิธี แต่โดยหลักการจะเหมือนกันคือ จะให้แรงกระทำเป็นรอบๆ กับชิ้นทดสอบ โดยให้เกิดความเค้นค่าต่างๆ แล้วบันทึกจำนวนรอบ (Cycles) ที่วัสดุจะทนได้ไว้ จากนั้นนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2-7 เรียกว่า S-N Curve สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเกือบทั้งหมดและโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด จะมี Endurance limit ส่วนพวกโพลีเมอร์และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กหลายชนิดจะไม่มี Endurance limit สำหรับโลหะที่มี Endurance limit นั้น ค่า Endurance limit จะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงสูงสุด เหล็กกล้าที่ขึ้นรูปแล้ว จะมีค่า Endurance limit ที่ครึ่งหนึ่งของค่าความแข็งแรงสูงสุด ส่วนโลหะผสมทองแดงจะอยู่ประมาณ 25-50% ของความแข็งแรงสูงสุด สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ที่ต้องรับแรงสลับ ก็คงต้องคำนึงถึงเรื่องของความล้าด้วย และพยายามออกแบบให้รับความเค้นต่ำกว่า Endurance limit หรือ Fatigue strength ตามแต่กรณี

โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของการล้าของวัสดุจะหาได้จากการทดลองโดยจะหาได้จากกราฟให้ภาระแก่ชิ้นงานและวัดดูจำนวนรอบของวัฏจักรความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการเสียหายที่ภาระค่าหนึ่งก็จะได้จำนวนรอบค่าหนึ่ง ดังนั้นถ้าเราแปรเปลี่ยนค่าภาระ จะทำให้เราได้กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับจำนวนรอบซึ่งโดยทั่วไปค่าความเค้นที่จะนำมาพล็อตนั้นจะเป็น σ_a แต่โดยทั่วไปจะเขียนแทนด้วย S และ จำนวนรอบแทนด้วย N กราฟที่นิยมพล็อตกันจะให้ S เป็นแกน Y และ $\log(N)$ เป็นแกน X กราฟนี้นิยมเรียกเป็น S-N curve ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 จากกราฟเราจะเห็นว่าถ้า Stress amplitude (S) ลดลงถึงค่าหนึ่งอายุของการล้าจะมีค่าเป็น Infinity life ($N \rightarrow \infty$) ค่าของ S ที่ค่านี้จะเรียกว่า Fatigue limit or endurance limit อย่างไรก็ตามมีโลหะบางชนิดเท่านั้นที่

จะมีคุณลักษณะอย่างนี้ ตัวอย่างเช่นโลหะพวกเหล็กและ Titanium alloy โลหะบางพวกเช่น Aluminum alloy, Copper, Magnesium จะไม่มีค่า Fatigue limit กราฟจะเป็นดังรูปที่ 2-7 (B) ดังนั้นการล้าจะเกิดขึ้นเสมอสำหรับโลหะพวกนี้



รูปที่ 2-7 S-N Curve เส้นกราฟ (A) คือวัสดุที่มี Endurance limit และเส้นกราฟ (B) คือวัสดุที่ไม่มี Endurance limit

2.4 ทฤษฎีการเสียหายของวัสดุ

ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือโครงสร้างทางวิศวกรรมต่างๆ จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสำคัญ ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างโดยมากจะรับภาระหลายอย่างพร้อมกันทำให้เกิดความเค้นดึง ความเค้นอัด และความเค้นเฉือน ซึ่งเรียกว่าความเค้นผสม บางครั้งรูปร่างของชิ้นส่วนมีขนาดไม่สม่ำเสมอ อาจมีรอยบากหรือตำหนิ จึงมีผู้พยายามตั้งทฤษฎีขึ้นมาใช้อธิบายถึงความเสียหายของชิ้นงาน โดยการเทียบกับสิ่งที่สามารถตรวจสอบด้วยการทดลองได้เช่น Yield tensile strength, Ultimate tensile strength หรือ Strain ซึ่งค่าทั้งหมดได้จากการทดลองดึงขึ้นทดสอบในแนวแกนหรือแบบมิติเดียว ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้อธิบายถึงความเสียหายจึงเรียกว่า ทฤษฎีความเสียหาย (Failure criterion theorem) ซึ่งมีอยู่หลายทฤษฎีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และเนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ วัสดุที่นำมาใช้ทำหัวรีฟอร์มทั้งในส่วนที่ใช้ในการทดลองและในส่วนที่ใช้สร้างหัวรีฟอร์มขนาดจริงจัดว่าเป็นวัสดุเหนียว ซึ่งจะเกิดความเสียหายเมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุถึงจุดคราก (Yield point) ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ เพราะเมื่อความเค้นเกินค่านี้ไปแล้ววัสดุจะไม่สามารถคืนรูปกลับสู่สภาพเริ่มต้นได้ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความเสียหายของวัสดุเหนียวก็ต้องพูดถึงความเค้นคราก (Yield stress) ซึ่งคือ ค่าความเค้น ณ จุดคราก ส่วนวัสดุเปราะจะไม่มีจุดคราก

ความเสียหายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุรับความเค้นจนเกิดการแตกหรือแยกของเนื้อวัสดุ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความเสียหายของวัสดุเพราะก็จะต้องพูดถึงความเค้นที่จุดประลัย (Ultimate stress) ซึ่งคือค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ดังนั้นทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวจึงเลือกใช้ทฤษฎีพลังงานการเสียรูปสูงสุด (Maximum distortion energy theory) ทฤษฎีพลังงานการเสียรูปสูงสุด ได้ถูกพัฒนาโดย R.Von Mises (1913) และ H.Hencky (1925) ซึ่งมีหลักการว่า “วัสดุจะเริ่มแตกหักเมื่อพลังงานการเสียรูปภายในวัสดุภายใต้ภาระทั่วไปเท่ากับพลังงานการเสียรูปจากการทดสอบแรงดึงปกติของวัสดุชนิดเดียวกัน” เมื่อเรามองลึกลงไป Total elastic energy การเสียรูปจะสามารถแยกพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือ (1) ส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และ (2) ส่วนที่ทำให้เกิดการเสียรูป บิดเบี้ยวเนื่องจากความเค้นเฉือน ซึ่งวัสดุจะเกิดการครากหรือเสียหายตามเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{1}{12G} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} \geq \frac{2(\sigma_{yp})^2}{12G}$$

$$\text{หรือ} \quad \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} \geq 2(\sigma_{yp})^2 \quad (2.29)$$

2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

กิตติยา มาตินและคณะ ได้ทำการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของใบพัดและฝาครอบใบพัดของปั้มน้ำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเครื่องทดสอบ โดยทำการทดสอบโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ VERTON RF-700-10-EM HS และ VERTON MFX-700-10 HS เปรียบเทียบกับวัสดุเดิม คือ โลหะบรอนซ์ เพื่อประโยชน์ในการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางการค้า ในการทดลองนั้นแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ นำชิ้นงานทดสอบมาตรฐานของวัสดุ 3 ชนิด มาทำการทดสอบความล้าตัวกับเครื่องทดสอบ fatigue ซึ่งเป็นการทดสอบแบบรับค่าแรงกระทำ (vary load) จะได้ค่าแรงกระทำและอายุการใช้งานออกมา ได้กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเค้นกับจำนวนรอบการใช้งาน (S-N curve) แล้วนำผลจาก S-N curve ไปทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ค่าอายุการใช้งานของทั้งชิ้นส่วนออกมา และผลที่ได้จากการทดลองของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบในด้านคุณภาพและด้านราคาพบว่าวัสดุ VERTON RF-700-10-EM HS มีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเพื่อทดแทนโลหะ Bronze ในการผลิตเป็นใบพัดและฝาครอบใบพัดมากที่สุด

บพิศ นุปผไซติ (2009) ได้ทำการออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ Fast Breeder อธิบายถึงวิธีการทำนายปรากฏการณ์เกิดรอยแตกสำหรับแผ่นงานที่มี

รูเจาะ ในการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ Fast Breeder (FBR) โดยชิ้นงานที่ใช้ทำการศึกษาเป็นเหล็กไร้สนิม (JIS :SUS304) ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยทำการเจาะในทิศทางความกว้างที่มีขนาด 2, 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร ค่าจากการหาจำนวนรอบเริ่มต้นของการปรากฏรอยแตก (N_0) และจำนวนรอบความเสียหาย (N_f) ที่หาได้จากการทดสอบความล้าถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการทำนายทั้งคู่ คือวิธีการของ Neuber's law (เก่า) และวิธีการของ Stress Redistribution Locus : SRL (ใหม่) ซึ่งต้องสร้างเส้นกราฟการทำนายอายุความล้า การหาค่าคงที่ของความเค้นร่วมศูนย์ การหาค่าความเค้นและความเครียดและการหาค่าความเครียดช่วงไม่ยืดหยุ่นโดยใช้วิธี Neuber's law (เก่า) และวิธี SRL (ใหม่) เทียบกับเส้นการทำนาย Best Fit Fatigue Curve (BFF) สามารถสรุปผลได้คือวิธีการทำนายของ The SRL มีแนวโน้มการทำนายรอบจุดเริ่มต้นของปรากฏการณ์เกิดรอยแตกของชิ้นงานทดสอบมีรูเจาะได้ดีแม่นยำกว่าวิธีการของ The Neuber's law ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของ Neuber's law จะมีค่าสูงกว่าวิธีการของ The SRL และการเลือกวิธีการทำนายที่ถูกต้องและเหมาะสม จะส่งผลให้ลดต้นทุนในส่วนของค่าวัสดุที่ใช้ในการออกแบบและสร้างได้

อาณัติ หาททรัพย์¹ และมงคล มงคลวงศ์โรจน์ (2004) ทำการศึกษามลของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุเอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ 3 กลุ่มคือ เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และโพลีเอไมด์ 6 โดยทำการทดลองเตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุดังกล่าวให้มีค่าเฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่างกันคือ 1.2, 1.6, 2.0, 4.0 และ 6.0 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบรูปร่างของชิ้นทดสอบ แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณอายุการรับแรงตามแนวแกนโดยสมการ "อายุความเครียด" และสมการ "บาสควิน" กับอายุที่ได้จากการทดสอบการรับแรงจริง จากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่า (1)การคำนวณอายุของชิ้นส่วนที่รับแรงแบบซ้ำๆ โดยใช้สมการบาสควินจะให้ค่าอายุที่ปลอดภัยมาก แต่ในกรณีของวัสดุ AISI 4140 ที่ค่าความเค้นสะสมต่ำๆ อาจให้ค่าอายุที่ไม่ปลอดภัย (2)การคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเครียดจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับอายุจริงมากและค่อนข้างปลอดภัย แต่ในกรณีที่มีค่าเฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำๆ การคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเครียดจะให้ผลที่ปลอดภัยมากที่สุด (3)ที่ค่าเฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำๆ การใช้ค่าความเค้นสะสมทางทฤษฎี หรือค่าเฟคเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า จะให้ผลไม่ต่างกันมากนัก (4)ที่ค่าเฟคเตอร์ความเค้น

สะสมต่ำๆ การใช้ค่า ความเค้นที่ค่าเฟคเตอร์ความเค้นสะสมสูงๆ การใช้ค่าเฟคเตอร์ลดความ
แข็งแรงต่อความล้า จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับอายุจริงมากที่สุด (5)วัสดุโพลีเอไมด์ 6 จะมี Stiffness
ลดลงค่อนข้างมากในช่วงแรกๆของการรับแรงแล้วจะเกือบคงที่หลังจาก 1000 - 3000 รอบของการ
รับแรงตามแนวแกนแบบซ้ำๆ โดยมีค่าเฉลี่ยของการลด Stiffness เท่ากับ 0.04854 (N/mm) ต่อ
รอบ และ ขึ้นทดสอบที่มีค่าเฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่ำจะมีอัตราการลด Stiffness สูงกว่าขึ้น
ทดสอบที่มีเฟคเตอร์ความเค้นสะสมสูง



บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ โดยได้กำหนดวิธีการดำเนินการศึกษาให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 วิธีดำเนินการศึกษา

3.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การเสียหายของวัสดุเนื่องจากความล้าอันเป็นผลมาจากการรับภาระแบบกระทำซ้ำ

3.1.2 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและรายละเอียดต่างๆ ของหัวรีฟอร์มจากบริษัทไทยซัมมิต พีเค เค บางนา จำกัด

3.1.3 สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวรีฟอร์มด้วยโปรแกรม SolidWorks โดยที่การวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุจะเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม CosmosWorks ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่มีความสามารถในการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นและความล้า ซึ่งสามารถแสดงผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1.4 สร้างแบบทดสอบจริงของหัวรีฟอร์ม ที่มีขนาดตามแบบมาตรฐานของบริษัทไทยซัมมิต พีเค เค บางนา จำกัด ด้วยมาตราส่วน 1:1 และนำมาใช้ในการทดสอบเป็นการยืนยันคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.5 วิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Cosmosworks ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นความเค้น ความเครียด จำนวนรอบการใช้งานและระยะเยื้องตัว

3.1.6 ทำการทดสอบแบบทดสอบจริงหัวรีฟอร์ม โดยที่จะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปซึ่งสามารถวัดค่าได้ด้วย Strain Gages เพื่อเป็นการยืนยันคำตอบจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยที่ผลการทดสอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

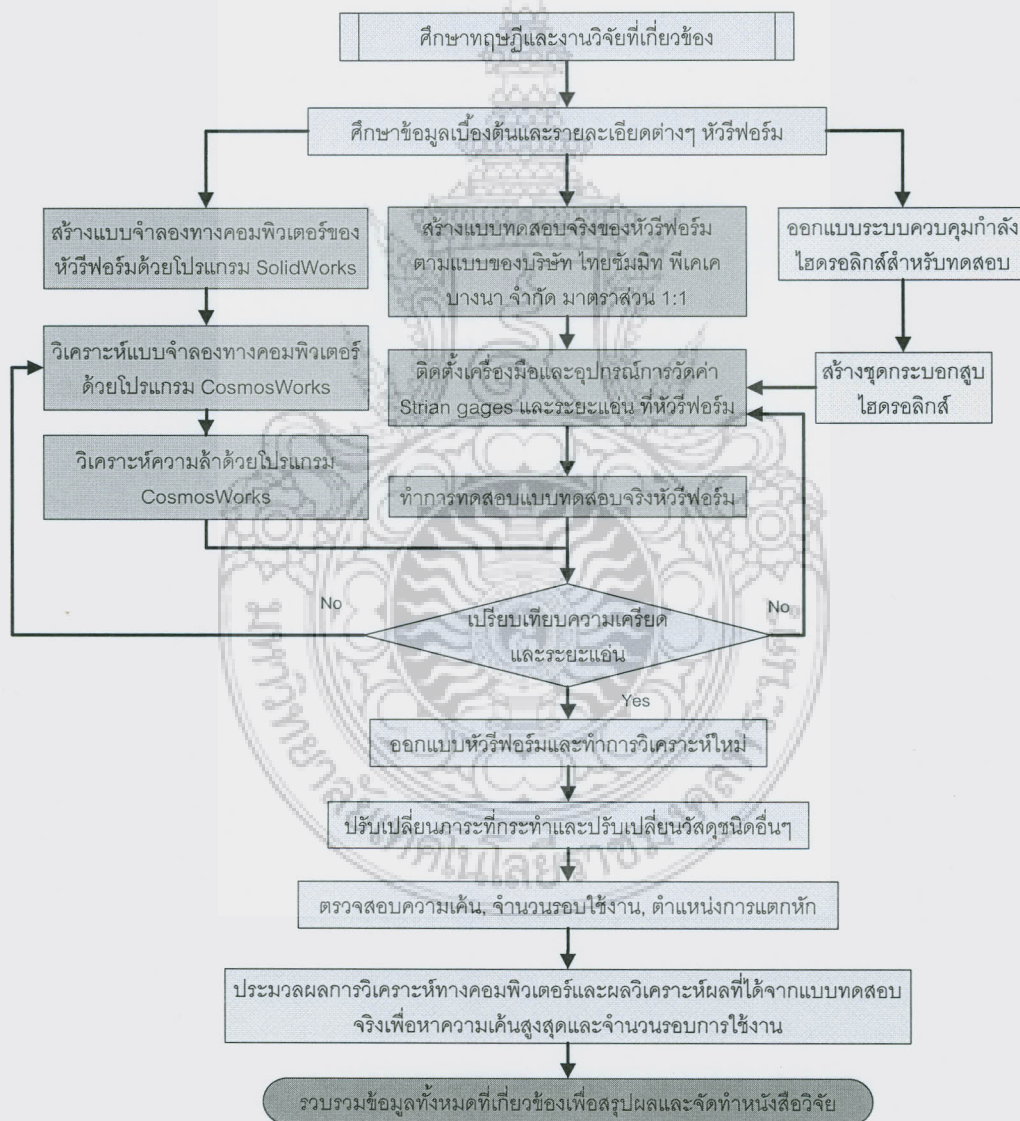
3.1.7 ทำการเปรียบเทียบและประมวลผลการวิเคราะห์ที่ได้จากสองวิธีคือ ผลการทดสอบแบบจำลองจริง และผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบจริง

3.1.8 ออกแบบหัวรีฟอร์มและทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดและวัสดุที่ใช้ทำหัวรีฟอร์ม

3.1.9 คำนวณหาค่าความปลอดภัยเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของขนาดของหัวรีฟอร์ม

3.1.10 ประมวลผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์และผลวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบทดสอบจริงเพื่อหาการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในหัวรีฟอร์ม พร้อมหาค่าความปลอดภัย จำนวนรอบการใช้งานและค่าการแอ่นตัว

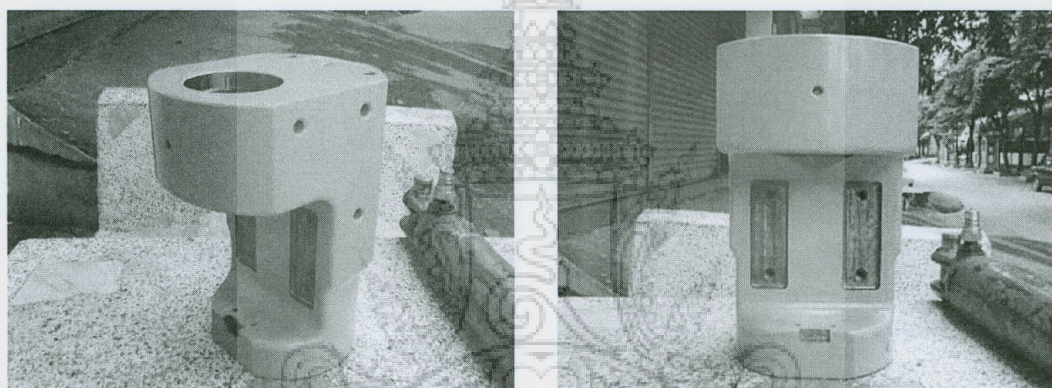
3.1.11 รวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่เกี่ยวข้องเพื่อสรุปผล



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษา

3.2 การสร้างแบบจำลองจริงขนาด 1:1 สำหรับการทดสอบ

ในการสร้างแบบจำลองจริงของหัวรีฟอร์ม มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นที่หัวรีฟอร์มเพื่อนำผลจากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม CosmosWorks มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในลักษณะนี้ได้ และให้ผลลัพธ์ออกมาถูกต้องและเชื่อถือได้ ดังนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองจริงขึ้นมาด้วยมาตราส่วน 1:1 โดยยึดแบบมาตรฐานของบริษัท ไทยซัมมิท พีเคเค บางนา จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3-2 ในการเลือกใช้วัสดุเพื่อนำมาสร้างได้เลือกใช้ AISI1045



Isometric view

Front view

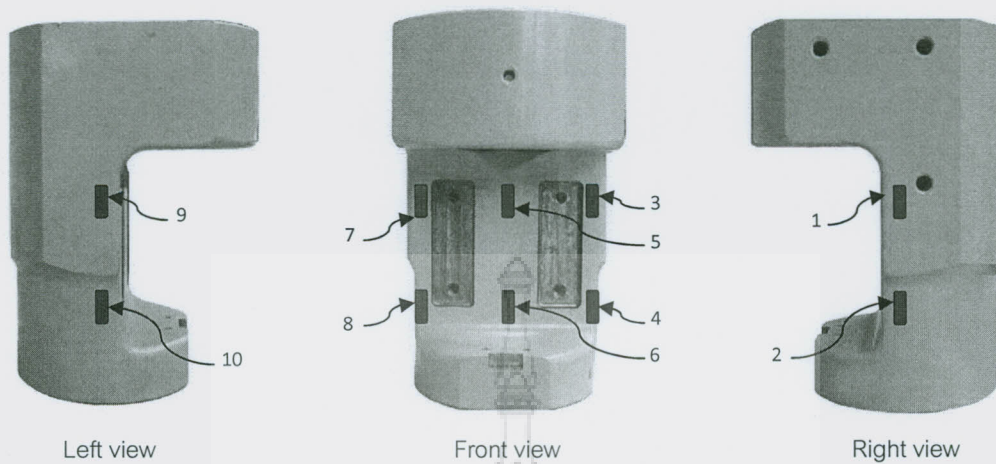
รูปที่ 3-2 หัวรีฟอร์มที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ

3.3 การทดสอบแบบจำลองจริงขนาด 1:1 จากแบบมาตรฐาน

ในการทดสอบแบบจำลองจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มและนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งค่าความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดลองนี้จะเป็นข้อมูลที่ยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์หากการกระจายของความเค้นและความเครียดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์กับหัวรีฟอร์ม และในการทดลองนี้จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและจำนวนรอบการใช้งาน (S-N curve) โดยมีขั้นตอนการทดสอบต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ทำการกำหนดจุดที่จะติดตั้ง Strain gages รวมทั้งสิ้น 10 จุด ดังรูปที่ 3-3

3.3.2 ใช้กระดาษทรายสำหรับขัดโลหะเบอร์ 400 ขัดพื้นที่ที่จะติดตั้ง Strain gages ทั้ง 10 จุดและเช็ดทำความสะอาดอีกครั้ง



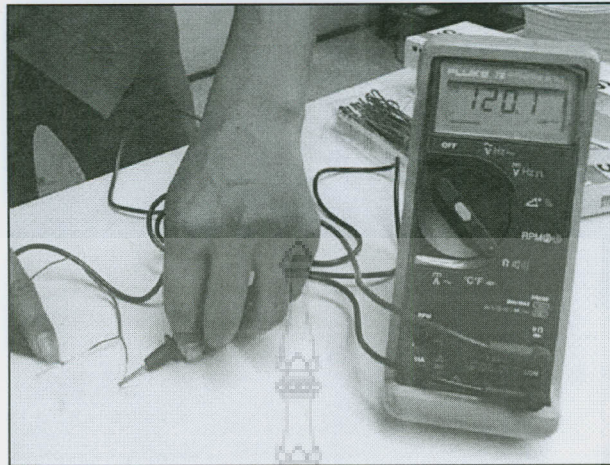
รูปที่ 3-3 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gages ในตัวหัวรีฟอร์ม

3.3.3 ติดตั้ง Strain gages ลงไปที่ตัวหัวรีฟอร์มด้วยกาวสำหรับติด Strain gages โดยต้องติดตั้งในสถานะที่หัวรีฟอร์ม ไม่เกิดความเค้นและความเครียด ซึ่งจะติดตั้งในตำแหน่งที่หัวรีฟอร์ม รับประทานโมเมนต์ตัดเนื่องจากความดันของกระบอกสูบสูงสุดเมื่อหัวรีฟอร์มอยู่ในสถานะตั้งตรง รวมทั้งหมด 10 จุดด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3-3 โดย Strain gages ที่เลือกใช้นี้เป็นชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R ดังรูปที่ 3-4 มี Gages length เท่ากับ 5 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งแล้วให้ทำการวัดค่าความต้านทานของ Strain gages ทุกตัวซึ่ง Gages resistance ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็น 24°C , $50\% \text{ RH}$ จะต้องอ่านค่าได้ในช่วง $120.0 - 120.8 \Omega$

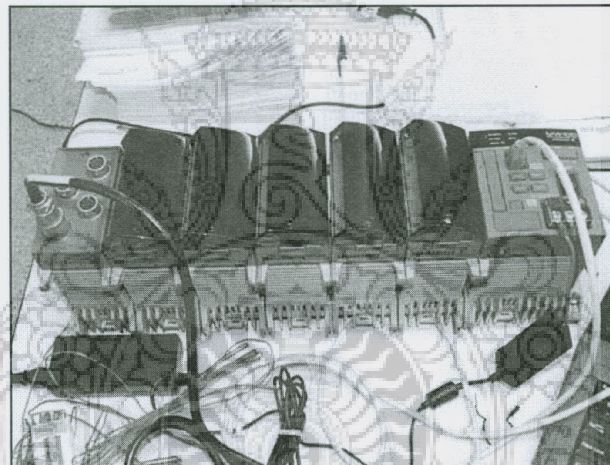
3.3.4 นำเครื่อง Data Logger MX100 ดังรูปที่ 3-6 ติดตั้งเข้ากับ Strain gages และนำหัวรีฟอร์มติดตั้งกับเครื่องทดสอบซึ่งตัวหัวรีฟอร์มอยู่ในสถานะไม่รับภาระใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-6 และควบคุมอุณหภูมิบรรยากาศให้อยู่ที่ 24°C , $50\% \text{ RH}$ ปรับตั้งค่าความเครียดให้เป็นศูนย์



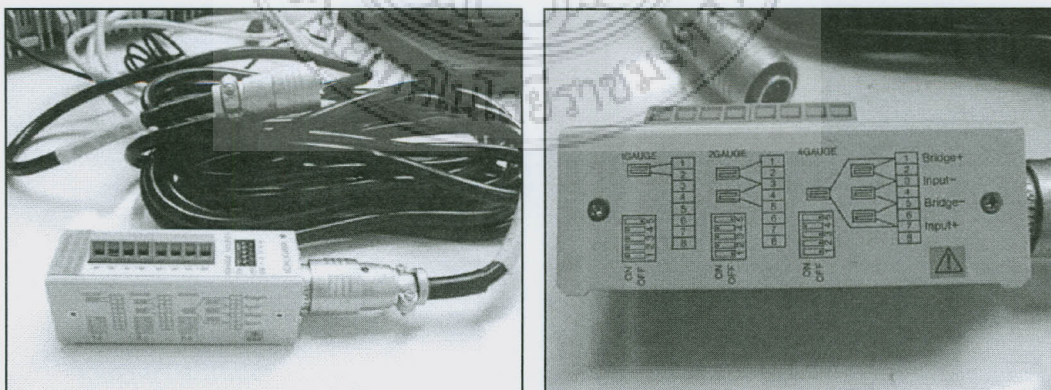
รูปที่ 3-4 Strain gages ชนิด KFG-5-120-C1-11L3M2R



รูปที่ 3-5 เครื่องมือวัดค่าความต้านทาน Strain gages



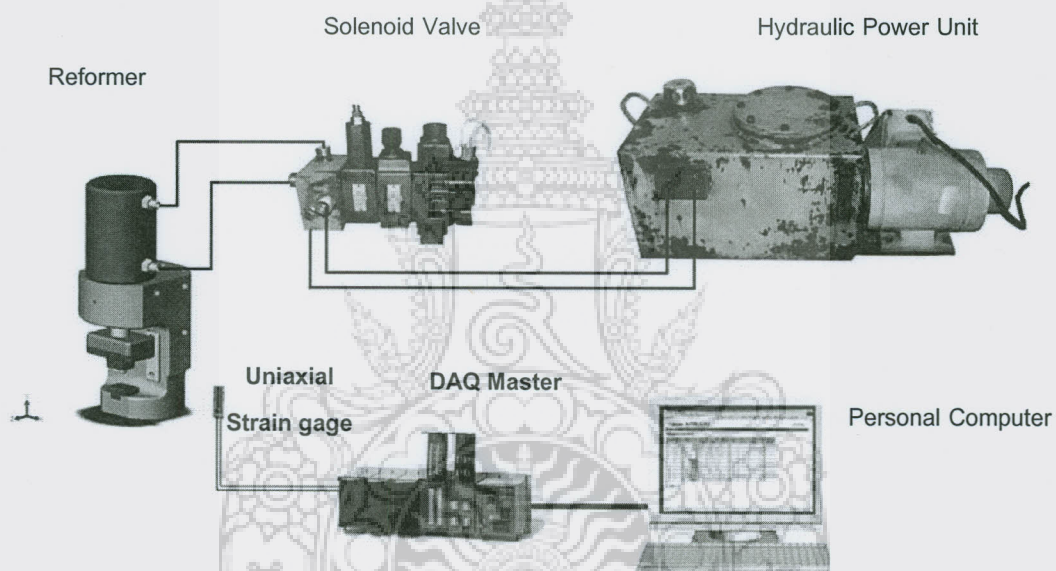
รูปที่ 3-6 Data Logger MX100



รูปที่ 3-7 Gage select แบบ 4 Gauge ของ Data Logger MX100

3.3.5 นำหัวรีฟอร์มติดตั้งสอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงดังรูปที่ 3-7 และ 3-8 ซึ่งหัวรีฟอร์มจะอยู่ภายใต้ภาระเนื่องจากแรงดันจากกระบอกสูบ หัวรีฟอร์มจะเกิดการแอ่น Data logger จะทำการบันทึกผลของความเครียดที่เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ซึ่งต้องทำการทดสอบและบันทึกผล 50 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเครียดที่เกิดขึ้น

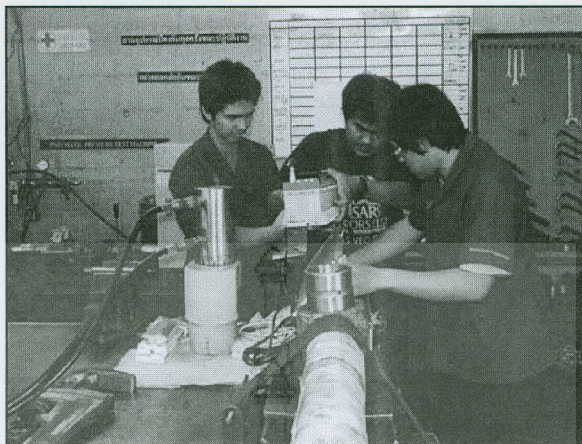
3.3.6 ทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อหา S-N curve ในการทดลองจะกระทำ 4 รอบ แต่ละรอบจะใช้ความดันในการทดลองเท่ากับ 230, 300, 350 และ 380 bar ซึ่งต้องบันทึกจำนวนรอบสูงสุดที่หัวรีฟอร์มสามารถทำงานได้ในแต่ละรอบความดันด้วย และนำความเค้นและจำนวนรอบในแต่ละรอบมาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและจำนวนรอบการใช้งาน



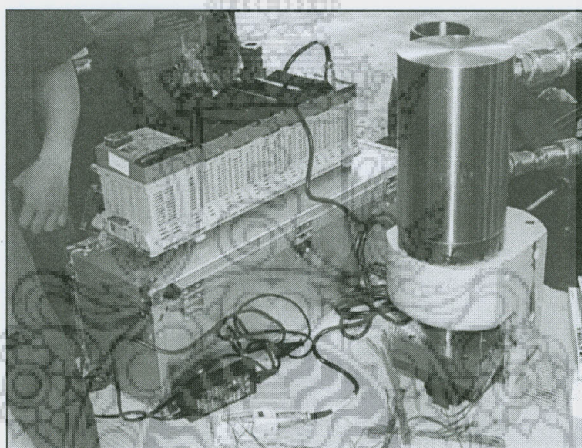
รูปที่ 3-8 การติดตั้งเครื่องมือวัด อุปกรณ์และหัวรีฟอร์มเข้ากับเครื่องทดสอบ



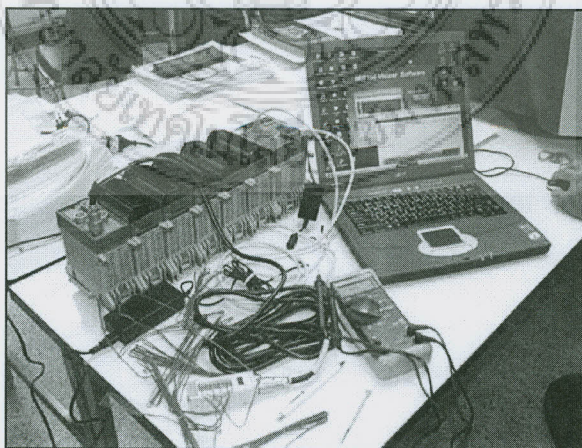
รูปที่ 3-9 ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้ากับหัวรีฟอร์ม



รูปที่ 3-10 ติดตั้ง Strain gauges เข้ากับ Data logger



รูปที่ 3-11 การติดตั้ง Gage selects เข้ากับ Strain gauges ที่ได้ติดตั้งบนหัวรีฟอร์ม



รูปที่ 3-12 การนำออกของข้อมูลความเครียดที่ได้จาก Data logger ด้วยคอมพิวเตอร์

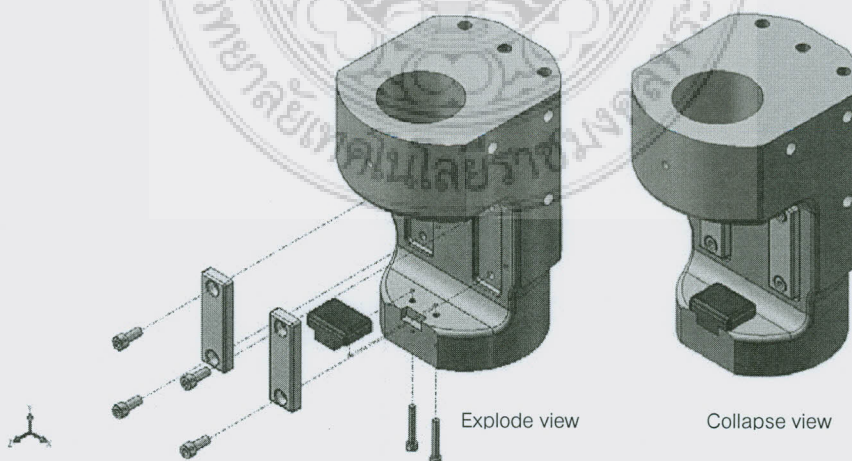
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองขนาด 1:1 ด้วยคอมพิวเตอร์

การสร้างแบบจำลองของหัวรีฟอร์ม เพื่อใช้วิเคราะห์ทางด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องสร้างแบบจำลองสามมิติขึ้นมาก่อนด้วยมาตราส่วน 1:1 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks ซึ่งขนาดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการสร้างนี้จะต้องวัดจากขนาดชิ้นส่วนจริงของแบบจำลองจริงที่สร้างไว้สำหรับการทดลอง วิธีการสร้างแบบจำลองสามมิติได้แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก และในส่วนของวิเคราะห์ทางด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เลือกใช้ CosmosWorks ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งการดำเนินงานในส่วนนี้มีรายละเอียดประกอบด้วย

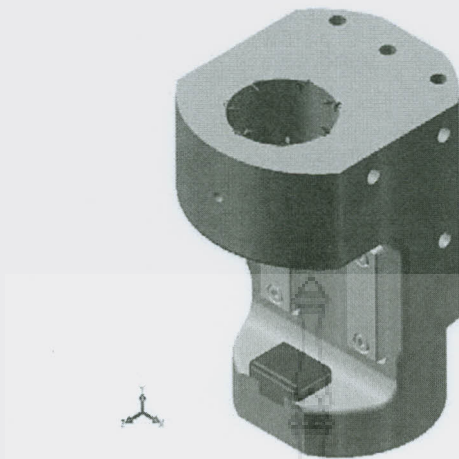
3.4.1 นำแบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks ดังรูปที่ 3-13 มากำหนดคุณสมบัติของวัสดุ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็น Steel AISI 1045 ดังนั้นจะกำหนดวัสดุเป็นชนิดยืดหยุ่นเชิงเส้นและมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันในทุกทิศทาง โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 205 GPa อัตราส่วน بواسง์องเท่ากับ 0.29 ความแข็งแรงทางแรงดึงเท่ากับ 625 MPa ความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 530 MPa และความหนาแน่นทางมวลเท่ากับ 7,850 kg/m³

3.4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการวิเคราะห์ให้เป็นไปตามลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองการทดสอบและเพื่อให้แบบจำลองเป็นไปตามสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดคือ ให้หัวรีฟอร์มยึดแน่นได้ผลดังรูปที่ 3-14

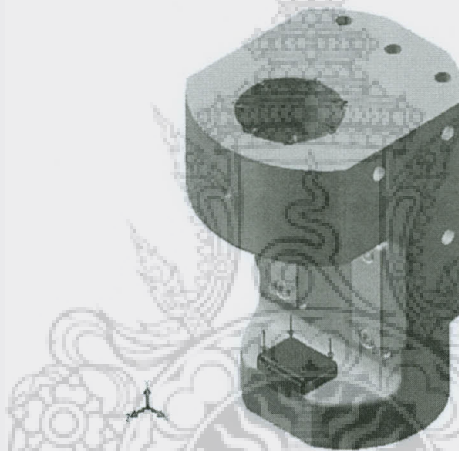
3.4.3 การกำหนดภาระของแบบจำลองจะต้องกำหนดภาระให้สอดคล้องกับการทดลองและสภาพความเป็นจริง ซึ่งการกำหนดภาระในที่นี้คือแรงจากก้านสูบไฮดรอลิก ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหัวลูกสูบมีค่าเท่ากับ 85 mm และความดันที่ใช้ในการทำงานเท่ากับ 230, 300, 350 และ 380 bar ดังนั้นแรงที่ใช้ในการทำงานจึงเท่ากับความดันคูณกับพื้นที่หน้าตัดของหัวลูกสูบ ดังรูปที่ 3-15



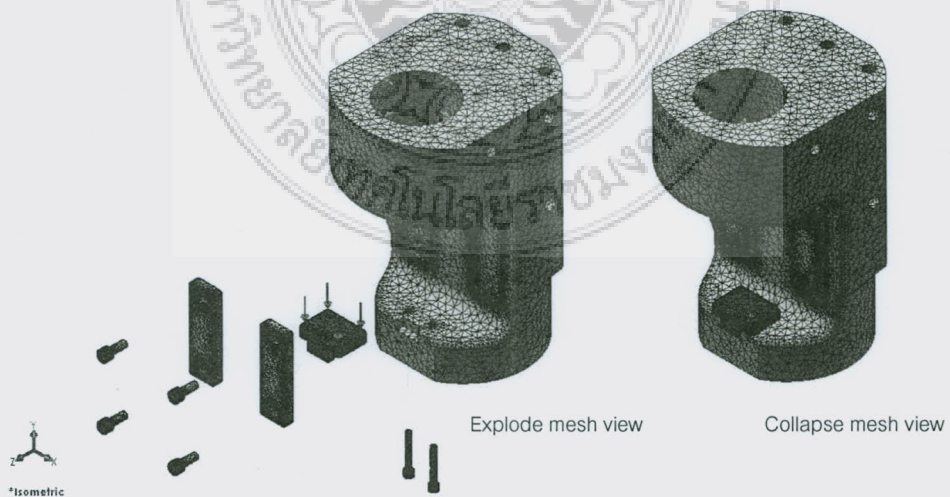
รูปที่ 3-13 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาตราส่วน 1:1 จากแบบมาตรฐาน



รูปที่ 3-14 กำหนดการจับยึดที่หัวรีฟอร์มเป็นแบบยึดแน่น (Fixed on cylindrical face)



รูปที่ 3-15 กำหนดการกระทำบนพื้นที่ตามขั้นตอนที่ 3.4.3 แบบ Normal to surface



รูปที่ 3-16 การแบ่งแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยเอลิเมนต์ Ten nodes tetrahedral

3.4.4 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง เป็นการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ ดังรูปที่ 3-16 และแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ดังนั้นชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ Ten nodes tetrahedral (3D Solid element) ซึ่งมีความเหมาะสมกับแบบจำลองที่มีขอบโค้งและรูปร่างซับซ้อน ทำการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ส่งผลให้จำนวนเอลิเมนต์ที่วิเคราะห์ในกรณีนี้เท่ากับ 227,821 เอลิเมนต์ และมีจำนวนจุดต่อเท่ากับ 344,711 จุดต่อ

3.4.5 ทำซ้ำขั้นตอนใหม่ทั้งหมดอีกครั้งโดยปรับเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์เป็น 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 มิลลิเมตร เพื่อหาขนาดและจำนวนความเหมาะสมของเอลิเมนต์และเพื่อพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการปรับเปลี่ยนขนาดหรือจำนวนเอลิเมนต์สามารถแสดงผลได้ในบทที่ 4 ดังรูปที่ 4-1

3.4.6 คอมพิวเตอร์จะทำการวิเคราะห์และประมวลผล จะได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นค่าความเค้น ความเครียดและระยะแอ่นตัว ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลอง

3.4.7 หากผลลัพธ์ทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกันแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ความล้า ซึ่งต้องทำการทดสอบจริงเพื่อหา S-N curve และนำ S-N curve มาแทนลงในโปรแกรม เพื่อวิเคราะห์หาจำนวนรอบที่ชิ้นงานสามารถใช้งานได้

3.4.8 ทำการปรับเปลี่ยนรูปร่างของหัวรีฟอร์มในบางส่วนและวิเคราะห์ใหม่

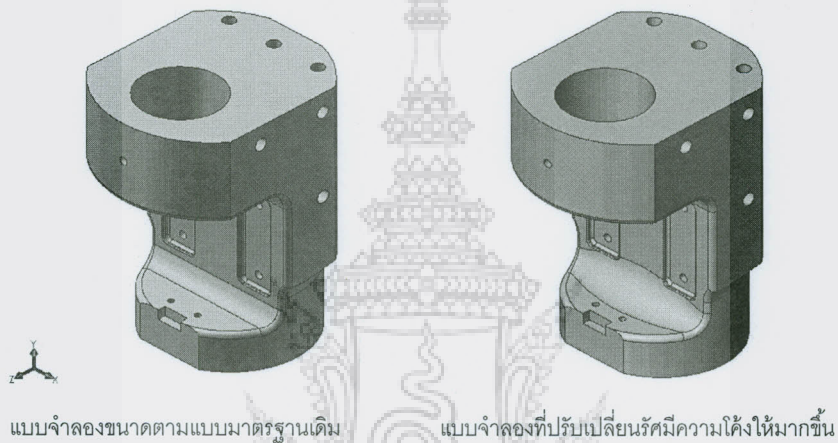
3.5 การเปรียบเทียบผลของความเค้นและความเครียดจากวิธีต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มมาตราส่วน 1:1 ซึ่งรับภาระเป็นแรงดันเนื่องจากกระบอกสูบ ในการเปรียบเทียบนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CosmosWorks โดยนำผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ไปเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดลอง เมื่อการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนชนิดวัสดุและปรับขนาดหัวรีฟอร์มให้สามารถรับภาระได้สูงขึ้นหรือความเค้นที่เกิดขึ้นลดลง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความล้าต่อไปได้

3.6 การออกแบบหัวรีฟอร์มเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน

จากผลการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มด้วยขนาดตามแบบของบริษัท ไทยซัมมิท พีเคเค บางนา จำกัด นั้น พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นโดยใช้ทฤษฎีพลังงานการเสียรูปสูงสุดเทียบกับค่าความเค้นที่จุดครากมีอัตราส่วนที่สูงเกินไปภายใต้ความดันใช้งานที่ 350 bar และมีค่าความปลอดภัยที่น้อยเกินไป มีความเข้มของความเค้นเกิดที่บริเวณคอของหัวรีฟอร์มที่สูง ดังนั้น

จำเป็นต้องลดความดันใช้งานลงในระดับที่ยังสามารถบีบลดระยะช่องว่างของหน้าแปลนเลื่อนเพลา
 ซ์หลังให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด หรือทำการปรับเปลี่ยนขนาดโมเดลหัววีฟอรัมในบางส่วนเพื่อลด
 ความเข้มของความเค้นลง หากพิจารณาแบบโครงสร้างหัววีฟอรัมพบว่าชิ้นส่วนโครงสร้างที่จะต้อง
 ทำการปรับเปลี่ยนนั้นจะอยู่ที่การปรับรัศมีโค้งของหัววีฟอรัมให้มีรัศมีส่วนโค้งมากขึ้นดังรูปที่ 3-17
 เมื่อมีการปรับค่ารัศมีส่วนโค้งแล้วจะส่งผลให้ต้องปรับเปลี่ยนพื้นผิวของแผ่นรองกดอัดให้รับกับรัศมีส่วน
 โค้งด้วย ในการวิเคราะห์นี้จะพิจารณาความเค้นและความล้าของหัววีฟอรัมเท่านั้น



รูปที่ 3-17 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัววีฟอรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3-18 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของแผ่นรองกดอัดหัววีฟอรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3-19 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของแผ่นกดอัดหัววีฟอรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากบทที่ 3 ได้อธิบายการดำเนินงานต่างๆ ทั้งในส่วนของ การทดสอบและในส่วนของ การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาที่ผ่านมาและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดตามหัวข้อต่างๆ ดังนี้

- 4.1 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองจริงที่มีขนาดและวัสดุเดิม
- 4.2 ผลและการวิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดและวัสดุเดิม
- 4.3 ผลการเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่หาได้จากวิธีต่างๆ จากแบบจำลองที่มีขนาดและวัสดุเดิม
- 4.4 ผลและการวิเคราะห์ความเค้นที่ภาชนะขนาดต่างๆ
- 4.5 ผลและการวิเคราะห์ความล้าที่ภาชนะขนาดต่างๆ

4.1 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองจริงที่มีขนาดและวัสดุเดิม

ในการทดลองเพื่อหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มตามที่ได้เสนอไว้ ในหัวข้อที่ 3.3 จะทำการติดตั้ง Strain gages ลงที่ตัวหัวรีฟอร์มจำนวน 10 ตำแหน่งด้วยกัน ซึ่งจะแบ่งเป็น 5 แนวตรงในทิศทางแกน y มี Strain gages ติดตั้งแนวละ 2 ตัว ดังรูปที่ 3-3 โดยในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเครียดด้วยผลจากแรงตั้งฉากกระทำลงบนแผ่นรองกดที่รับแรงมาจากก้านสูบไฮดรอลิกเท่านั้น ด้วยภาระขนาด 170,235 N (P=300 bar) และหลังจากการทดสอบทั้งหมด 50 ครั้ง สามารถสรุปเป็นค่าความเครียดเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 4-1 และสามารถคำนวณเป็นความเค้นได้ดังตารางที่ 4-2 จากการทดสอบพบว่าความเครียดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับตรงกลางของบริเวณรัศมีความโค้ง อีกทั้งรูปร่างของหัวรีฟอร์มในบริเวณนี้ยังมีส่วนเว้า ส่งผลให้เกิด Stress concentration ที่สูงด้วย ตัว Strain gage ที่ใช้ทดสอบจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น ดังนั้นในการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศให้คงที่เพื่อให้ได้ค่าต่างๆ ดังกล่าวออกมาอย่างถูกต้อง การรักษาอุณหภูมิและความชื้นกระทำได้อย่างยาก ดังนั้นจึงต้องทดลองเป็นจำนวน 50 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยดังกล่าว

ตารางที่ 4-1 ค่าความเครียดเฉลี่ยที่อ่านได้จาก Strain gage ทั้ง 10 ตำแหน่ง

Strain gage No.	1	2	3	4	5
Average strain value	0.000262	0.000231	0.000435	0.000387	0.000479

Strain gage No.	6	7	8	9	10
Average strain value	0.000558	0.000461	0.000394	0.000224	0.000226

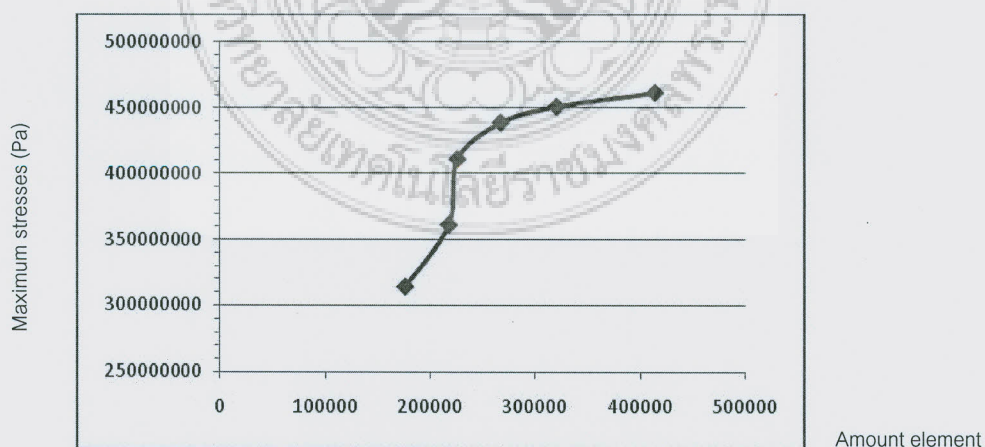
ตารางที่ 4-2 ค่าความเค้นเฉลี่ยทั้ง 10 ตำแหน่ง

Strain gage No.	1	2	3	4	5
Average stress value (Pa)	53,657,454	47,306,289	89,149,956	79,311,015	98,155,791

Strain gage No.	6	7	8	9	10
Average stress value (Pa)	114,455,621	94,524,283	80,842,953	45,861,058	46,340,591

4.2 ผลและการวิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดและวัสดุเดิม

จากการสร้างแบบจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวรีฟอร์มด้วยมาตราส่วน 1:1 โดยโปรแกรม SolidWorks และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CosmosWorks ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มดังเสนอในหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งกำหนดภาวะเป็นแรงเนื่องจากก้านสูบไฮดรอลิกและการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ด้วยขนาดต่าง ๆ จะทำให้ทราบค่าความเค้นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงความเค้นเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์

ยกตัวอย่างตำแหน่งจุดที่ 6 ในรูปที่ 3-3 จะได้ค่าความเค้นอัดในทิศทางตามแกน y และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นดึงเทียบกับการเปลี่ยนแปลงจำนวนเอลิเมนต์ได้ดังรูปที่ 4-1 โดยขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองคือ 8 มิลลิเมตร มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 227,821 เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงใช้ขนาดเอลิเมนต์ 8 มิลลิเมตรนี้แสดงผลของความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของหัววีฟอรัมในทิศทางตามแกน y สามารถสรุปผลค่าความเค้นและความเครียดได้ดังตารางที่ 4-3 และ 4-4

ตารางที่ 4-3 ค่าความเครียดเฉลี่ยที่วิเคราะห์ด้วย FEA ทั้ง 10 ตำแหน่ง

Strain gage No.	1	2	3	4	5
Average strain value	0.000253	0.0002161	0.0004199	0.000356	0.0004494

Strain gage No.	6	7	8	9	10
Average strain value	0.0005181	0.0004367	0.0003621	0.0002095	0.0002135

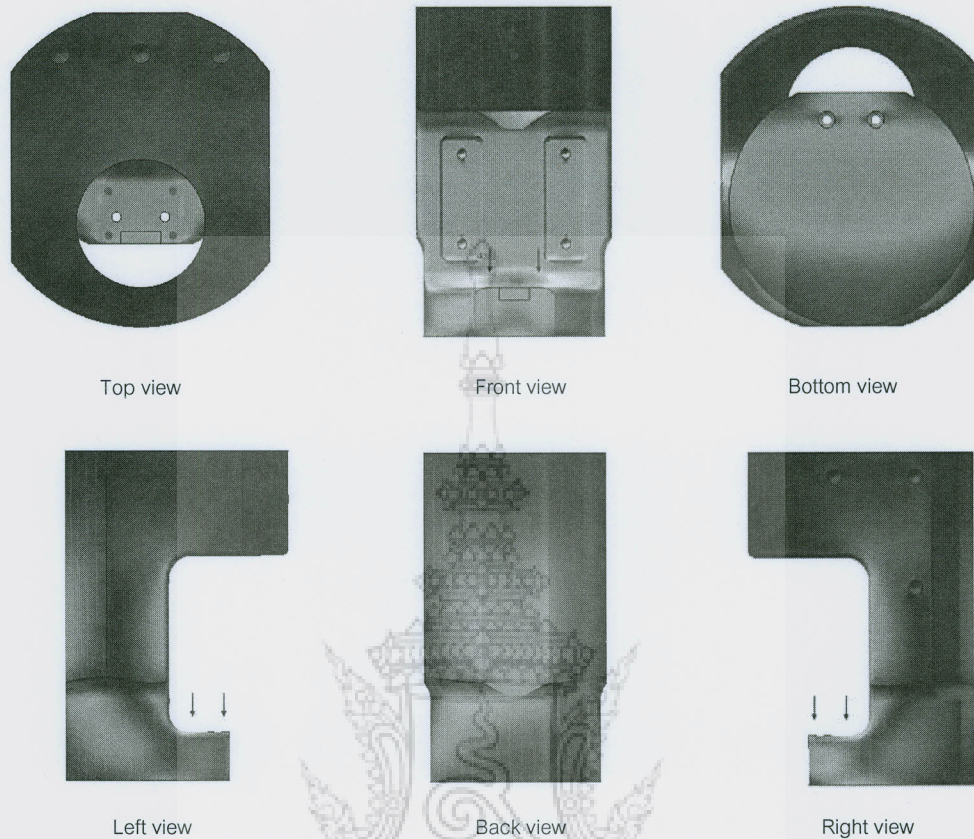
ตารางที่ 4-4 ค่าความเค้นเฉลี่ยทั้ง 10 ตำแหน่ง

Strain gage No.	1	2	3	4	5
Average stress value (Pa)	52,164,840	44,565,508	86,249,000	72,373,528	93,032,696

Strain gage No.	6	7	8	9	10
Average stress value (Pa)	106,010,064	89,944,968	73,602,024	44,917,352	44,010,700



รูปที่ 4-2 การเสียรูปและการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในมุมมอง Isometric



รูปที่ 4-3 การกระจายความเค้นด้วยทฤษฎีพลังงานการเสียรูปสูงสุดที่เกิดขึ้นในมุมมองต่างๆ

จากตารางที่ 4.3 และ 4-4 พบว่าความเค้นและความเครียดมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่มีแรงกระทำและมีลักษณะของผิวที่โค้งทำให้เกิดความเข้มของความเค้น (Stress concentration) ดังแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4-2 ซึ่งมีสีแดง ส่วนบริเวณอื่นๆ โดยเฉพาะที่มีสีน้ำเงินนั้นค่าความเค้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเค้นในบริเวณสีแดง จากการวิเคราะห์ผลกล่าวได้เบื้องต้นว่าชิ้นงานจะเริ่มเกิดการเสียหายในบริเวณที่มีสีแดงนี้ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับพื้นที่ดังกล่าวเช่น ต้องทำการปรับเปลี่ยนคาร์ซีมีความโค้งให้กับพื้นที่นั้นเพิ่มขึ้นเพื่อลดปริมาณความเข้มของความเค้น

4.3 ผลการเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่หาได้จากวิธีต่างๆ จากแบบจำลองที่มีขนาดและวัสดุเดิม

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2 สามารถนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4-3 และ 4-4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการเปรียบเทียบจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างดังตารางที่ 4-5 และ 4-6 จากผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าความเค้น

และความเครียดที่หาได้จากสองวิธีการดังกล่าวให้ผลที่สอดคล้องกันอย่างมากมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 % ค่าความปลอดภัยที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมสำเร็จรูป CosmosWorks มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะนี้ได้ ดังนั้นการออกแบบด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดรัศมีความโค้งให้มากขึ้นหรือการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุในการวิเคราะห์ต่อไปก็ย่อมให้ผลการวิเคราะห์ที่ออกมาที่น่าเชื่อถือได้

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ด้วย FEA และการทดลอง

Strain gage No.		1	2	3	4	5
Strain value	Experiment	0.000262	0.000231	0.000435	0.000387	0.000479
	FEA	0.000253	0.0002161	0.0004199	0.000356	0.0004494
Percent error	%	3.44	6.45	3.47	8.01	6.18

Strain gage No.		6	7	8	9	10
Strain value	Experiment	0.000558	0.000461	0.000394	0.000224	0.000226
	FEA	0.0005181	0.0004367	0.0003621	0.0002095	0.0002135
Percent error	%	7.15	5.27	8.10	6.47	5.53

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบค่าความเค้นจากการวิเคราะห์ด้วย FEA และการทดลอง

Strain gage No.		1	2	3	4	5
Stress value (Pa)	Experiment	53,657,454	47,306,289	89,149,956	79,311,015	98,155,791
	FEA	52,164,840	44,565,508	86,249,000	72,373,528	93,032,696
Percent error	%	2.78	5.79	3.25	8.75	5.22

Strain gage No.		6	7	8	9	10
Stress value (Pa)	Experiment	114,455,621	94,524,283	80,842,953	45,861,058	46,340,591
	FEA	106,010,064	89,944,968	73,602,024	44,917,352	44,010,700
Percent error	%	7.38	4.84	8.96	2.06	5.03

4.4 ผลและการวิเคราะห์ความเค้นที่ภาระขนาดต่างๆ

จากการวิเคราะห์ห้วงรีฟอร์มด้วยซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ทำให้เราทราบว่าความเค้นเกิดการกระจายตัวอย่างไรและยังทราบจำนวนรอบการใช้งานหรืออายุงานของห้วงรีฟอร์มในการบีบอัดหน้าแปลนเพื่อเพลทขับหลัง เราสามารถตัดสินใจเลือกใช้ภาระกระทำที่เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ความดันใช้งานได้ถูกกำหนดให้ใช้ในการวิเคราะห์ห้วงรีฟอร์มมีค่าเท่ากับ 230, 250, 270, 300, 350,

380 bar ซึ่งมีค่าแรงกระทำเท่ากับ 130514, 141863, 153212, 170235, 198608 และ 215631 N ตามลำดับ วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-7 จากการวิเคราะห์ทำให้ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-4 และ 4-5

ตารางที่ 4-7 สมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

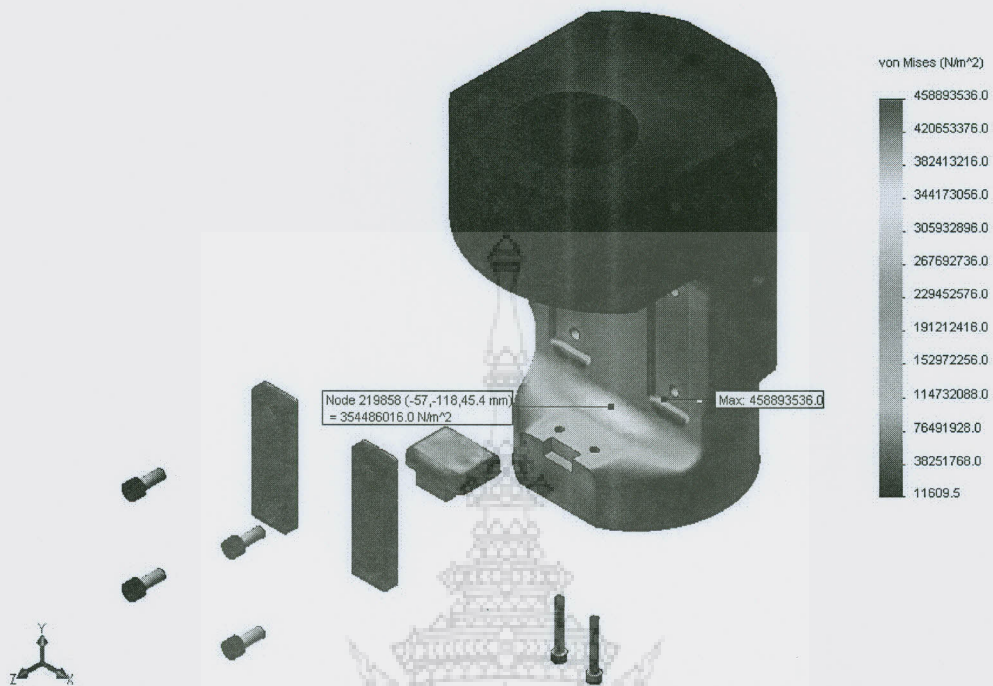
Materials	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Mass density (kg/m ³)	Tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)
AISI 1045 steel	205	0.29	7,850	625.000	530.000
Brass	100	0.33	8,500	478.413	239.689

ตารางที่ 4-8 ความเค้น Von-Mises ที่ภาระกระทำขนาดต่างๆ

Load (N)	215,631	198,608	170,235	153,212	130,514
Pressure (bar)	380	350	300	270	230
Max.Stress at Curve surface (Pa)	382,120,160	354,486,016	289,019,264	265,514,048	227,087,392
Max.stress (Pa)	476,341,600	458,893,536	380,171,136	347,918,720	272,161,664



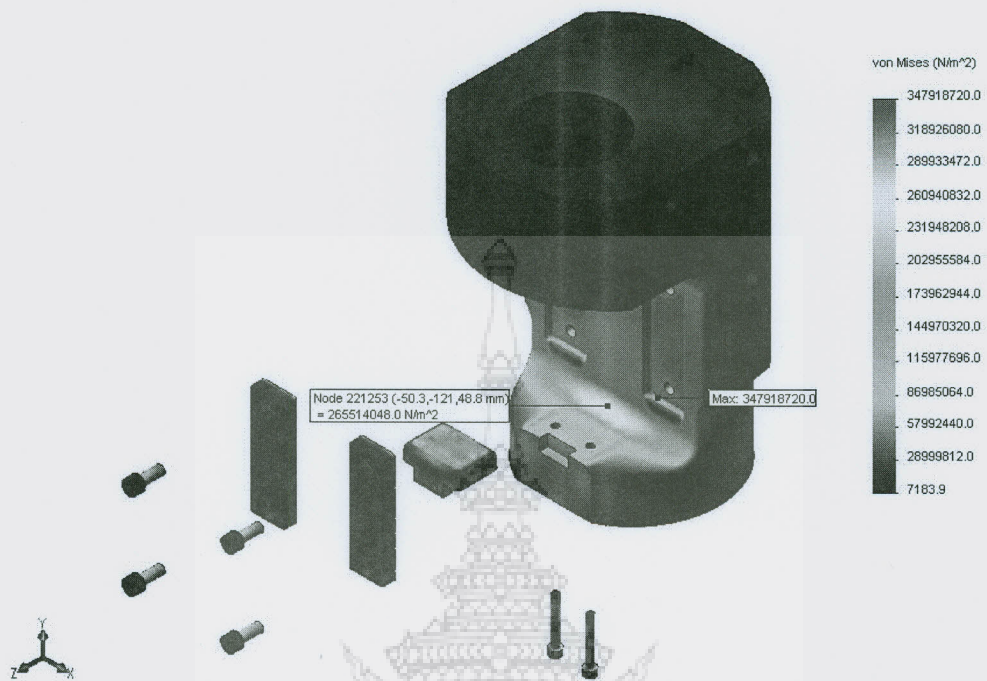
รูปที่ 4-4 การกระจายความเค้นของหัวรีฟอร์มที่ความดันใช้งาน 380 bar



รูปที่ 4-5 การกระจายความเค้นของหัววีฟอรัมที่ความดันใช้งาน 350 bar



รูปที่ 4-6 การกระจายความเค้นของหัววีฟอรัมที่ความดันใช้งาน 300 bar



รูปที่ 4-7 การกระจายความเค้นของหัววีฟอรัมที่ความดันใช้งาน 270 bar

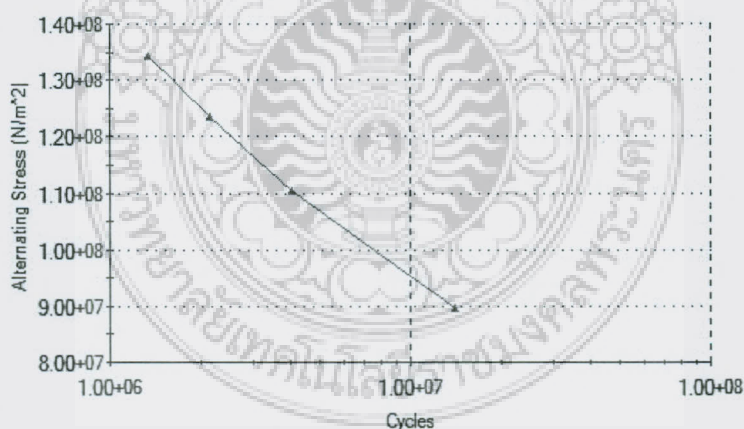


รูปที่ 4-8 การกระจายความเค้นของหัววีฟอรัมที่ความดันใช้งาน 230 bar

จากการวิเคราะห์ที่ความดันใช้งานต่างๆ พบว่า เมื่อค่าความดันมีค่าลดลง ความเข้มของความเค้นในบริเวณส่วนโค้งจะมีค่าลดลงแปรผันตรงตามค่าความดันใช้งาน ถึงแม้ว่าความเค้นสูงสุดจะเกิดดังภาพที่ 4-4 ถึง 4-8 แต่ก็มีความเค้นเฉพาะจุดที่ไม่มีการกระจายเป็นวงกว้าง หากแต่ความเข้มของความเค้นจะเกิดการกระจายเป็นวงกว้างในบริเวณที่เป็นคอโค้งของหัวรีพอร์ม ซึ่งต้องให้ความสำคัญกับพื้นที่บริเวณนี้เช่นกัน และการลดความดันใช้งานลงถึงแม้จะส่งผลให้เราสามารถใช้งานหัวรีพอร์มได้นานขึ้นแต่ต้องพิจารณาถึงผลจากการบีบอัดหน้าแปลนเสื้อเพลลาขับหลังว่าระยะช่องว่างหลังการบีบอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ด้วย

4.5 ผลและการวิเคราะห์ความล้าที่ภาระขนาดต่างๆ

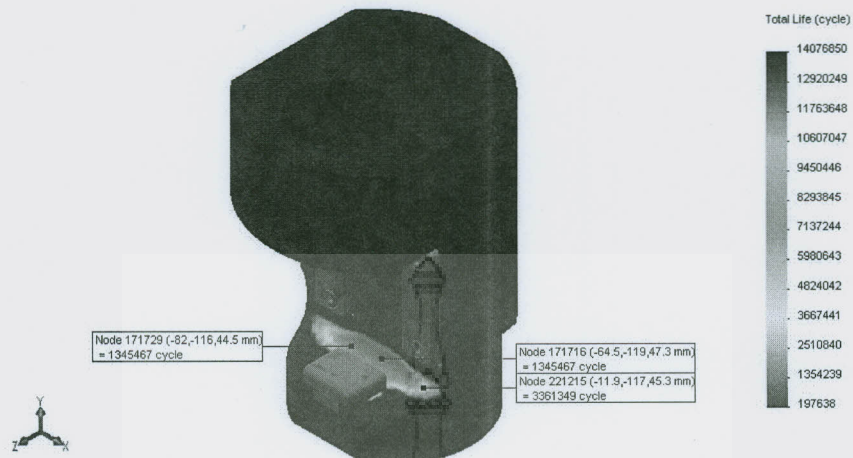
ในการวิเคราะห์ความล้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องใช้ S-N curve ที่หาได้จากการทดลองด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความดันใช้งานและบันทึกจำนวนรอบที่เกิดการแตกหักในแต่ละค่าความดัน ซึ่งมีรูปแบบดังรูปที่ 4-9 จากรูปพบว่าเมื่อความดันใช้งานลดลง ความเค้นก็จะมีค่าลดลงและส่งผลให้จำนวนรอบการใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าความชันของเส้นกราฟมีแนวโน้มลดลง ในการวิเคราะห์ความล้าจะต้องทำการวิเคราะห์การกระจายความเค้นและความเครียดก่อน อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ครั้งนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากความร้อน ซึ่งผลการวิเคราะห์ความล้าที่ได้จะแสดงเป็นหัวข้อต่างๆ ตามการเปลี่ยนแปลงค่าความดันใช้งาน



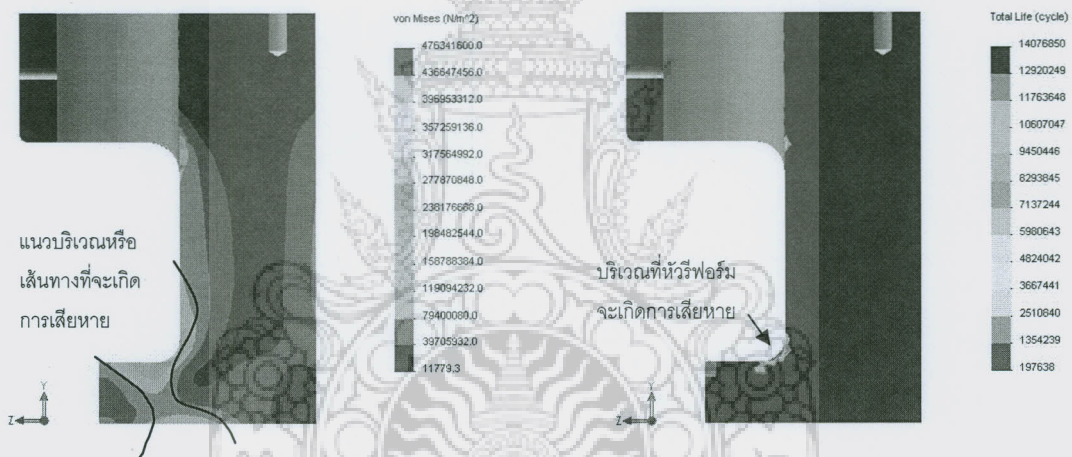
รูปที่ 4-9 S-N curve ของรูปร่าง (S-N curve of part) ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4-9 จำนวนรอบใช้งานที่ความดันต่างๆ

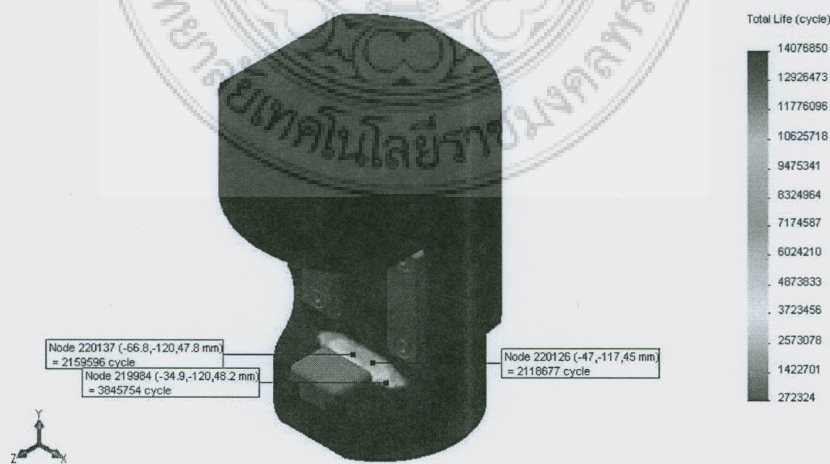
Load (N)	215,631	198,608	170,235	153,212	130,514
Pressure (bar)	380	350	300	270	230
Cycle (time)	1,345,467	2,118,677	3,968,805	8,663,807	12,915,057



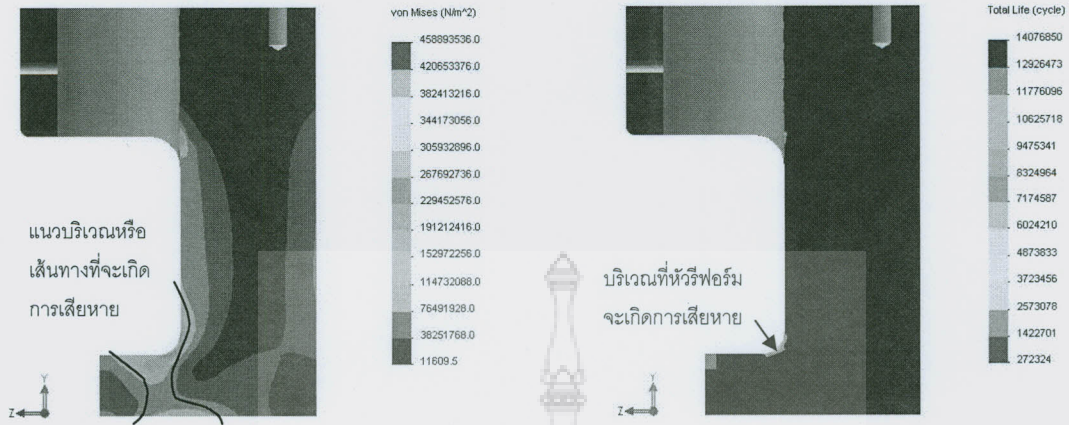
รูปที่ 4-10 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 380 bar



รูปที่ 4-11 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 380 bar



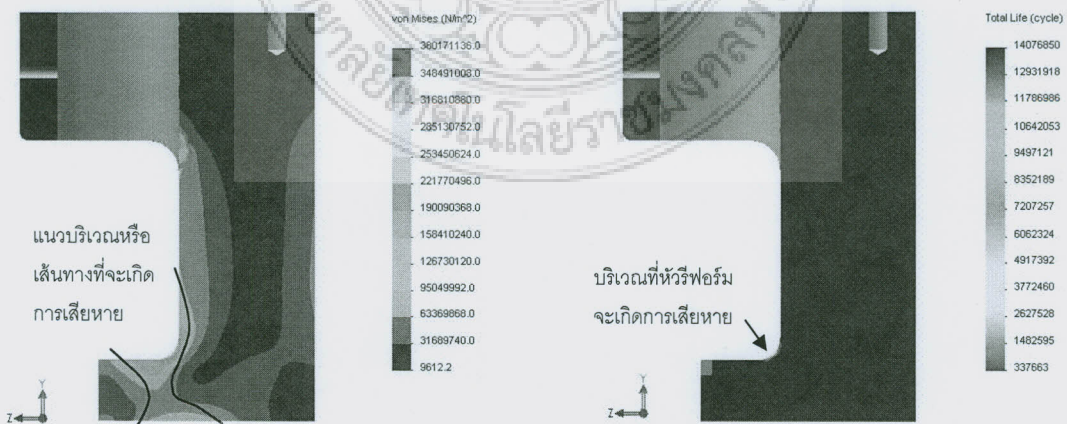
รูปที่ 4-12 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 350 bar



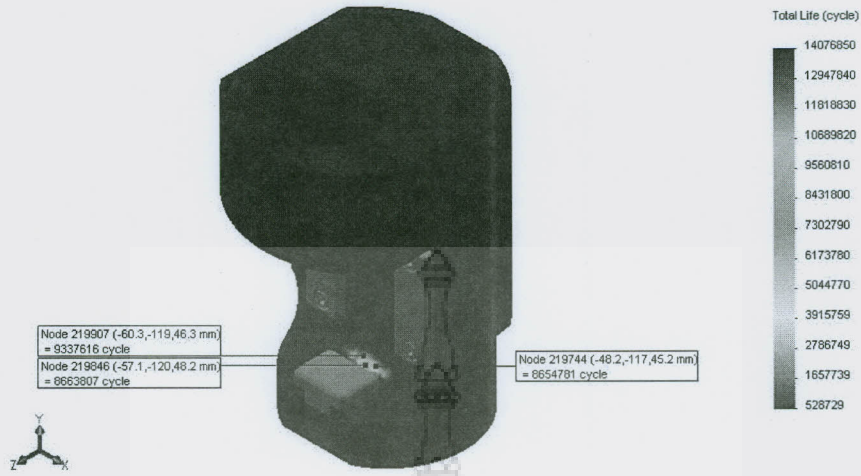
รูปที่ 4-13 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 350 bar



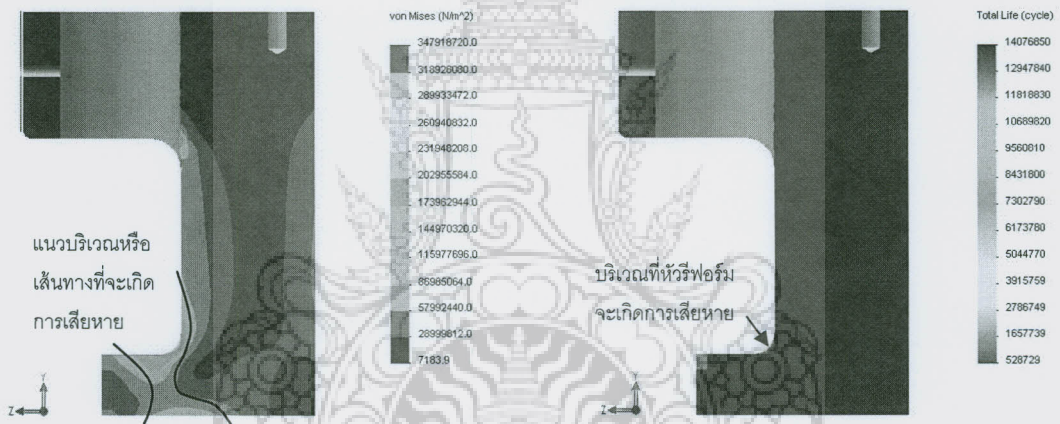
รูปที่ 4-14 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 300 bar



รูปที่ 4-15 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 300 bar



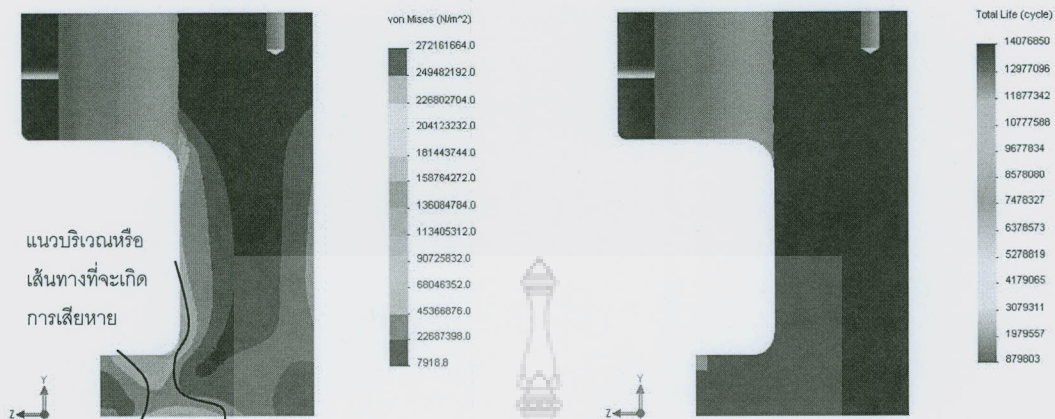
รูปที่ 4-16 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 270 bar



รูปที่ 4-17 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 270 bar



รูปที่ 4-18 จำนวนรอบการใช้งานที่ตำแหน่งเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 230 bar



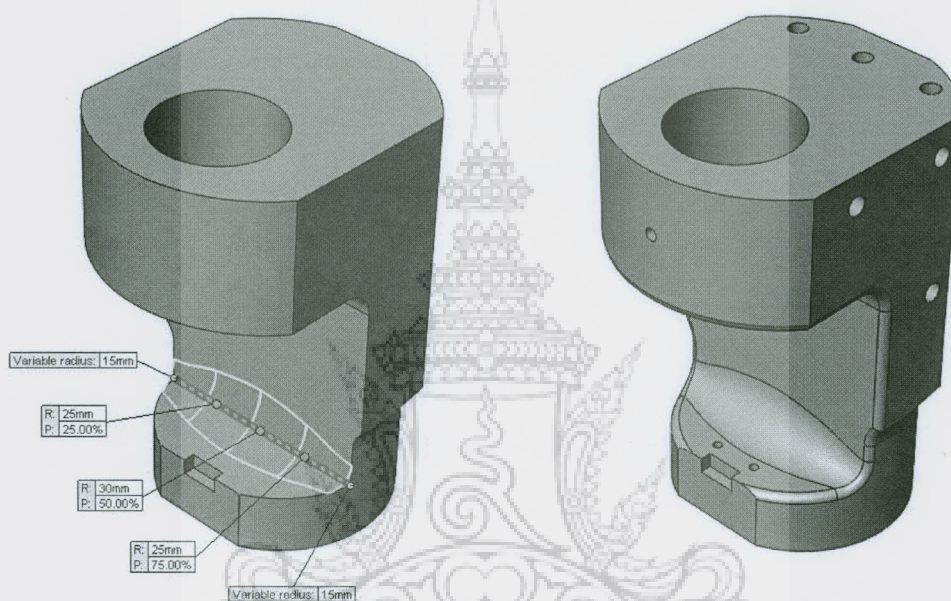
รูปที่ 4-19 การกระจายความเค้นและตำแหน่งการเกิดการแตกหักที่ความดันใช้งาน 230 bar



รูปที่ 4-20 ความเข้มของความเค้นลดลงจากการเพิ่มรัศมีโค้งที่ความดันใช้งาน 380 bar

จากรูปที่ 4-10 ถึง 4-20 แสดงถึงจำนวนรอบการใช้งานที่ความดันต่างๆ ในรูปที่ 4-10 ที่ความดันการใช้งานสูงสุด 380 bar หัวรีฟอร์มจะเกิดการแตกหักดังรูปที่ 4-11 ระยะเวลาการใช้งานสั้นจำนวนรอบใช้งานบีบอัดเท่ากับ 1,345,467 รอบ อีกทั้งอุปกรณ์แหล่งต้นกำลังงานต้องทำงานหนัก ดังนั้นที่ความดันใช้งานนี้ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำงาน จากรูปที่ 4-12 ความดันใช้งานเท่ากับ 350 bar พบว่าระยะเวลาการใช้งานนานขึ้น มีจำนวนรอบใช้งานบีบอัดเท่ากับ 2,118,677 รอบ อายุการใช้งานของหัวรีฟอร์มจะอยู่ที่ประมาณหนึ่งปีจึงเกิดการแตกหัก หากลด

ความดันใช้งานลงมาเป็น 300 bar จำนวนรอบใช้งานบีบอัดจะเพิ่มเป็น 3,968,805 รอบ อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การลดความดันใช้งานลงจะส่งผลให้สามารถใช้งานหัวรีฟอร์มได้ในระยะยาวและที่ความดันใช้งาน 230 bar พบว่าอายุการใช้งานจะยาวนานมาก แต่สิ่งที่ต้องได้รับการพิจารณาควบคู่กับการปรับลดความดันก็คือระยะช่องว่างระหว่างสองหน้าแปลนเสื้อเพลลาซึบหลังมีระยะห่างอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่เมื่อปรับลดความดันใช้งานลงมาแล้ว



รูปที่ 4-21 การปรับค่ารัศมีความโค้งแบบไม่คงที่ที่คอคอหัวรีฟอร์ม

ในการศึกษาข้างต้นทราบว่าโดยทั่วไปแล้วหัวรีฟอร์มจะเกิดการแตกหักที่บริเวณคอคอเนื่องจากมีความเข้มของความเค้นสูง ในบริเวณนี้มีรัศมีของคอคอคงที่ตลอดความยาวคอคอเท่ากับ 15 mm ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนขนาดรัศมีความโค้งเป็นแบบไม่คงที่ในบริเวณคอคอของหัวรีฟอร์มให้มีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4-21 โดยยังคงใช้รูปแบบการวิเคราะห์เช่นเดิม ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4-20 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่คอคอหัวรีฟอร์มซึ่งเป็นบริเวณที่ความเค้นเกิดการสะสมมากมีค่าเท่ากับ 288.8 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบเดียวกันกับโมเดลที่มีรัศมีคอคอคงที่ดังรูปที่ 4-4 พบว่ามีค่าความเค้นเท่ากับ 382.1 MPa ผลต่างระหว่างค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ 93.3 MPa การลดลงของความเค้นนี้มีผลมาจากการเพิ่มรัศมีความโค้งที่คอคอหัวรีฟอร์มเป็นการกระจายความเข้มของความเค้นออกไป เมื่อพิจารณาค่าความปลอดภัยที่เกิดขึ้นที่บริเวณคอคอโค้งพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลดี

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้ทำการศึกษาค้นหาความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นและบริเวณที่จะเกิด Stress concentration เพื่อมุ่งสู่การหาอายุการใช้งานที่ภาระขนาดต่างๆ และอธิบายความเหมาะสมของรูปแบบหัวรีฟอร์ม สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่อธิบายการกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่บรรจุในซอฟต์แวร์สำเร็จรูป สามารถเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในหัวรีฟอร์มที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและหาตำแหน่งของการเกิดความเค้นสูงสุด อีกทั้งได้ศึกษาจำนวนรอบการใช้งานของหัวรีฟอร์มและศึกษาปริมาณความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานศึกษาที่ผ่านมาสามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่าออกเป็นสองส่วนดังนี้

5.1.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) หากทั้งสองวิธีมีค่าความเค้นและความเครียดที่สอดคล้องกันนั้นแสดงว่าการวิเคราะห์ด้วย FEA มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหานี้ได้ ซึ่งในการเปรียบเทียบพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 8.1 % สรุปได้ว่าโปรแกรม CosmosWorks มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาความเค้นและความล้าของหัวรีฟอร์มได้อย่างเหมาะสม

5.1.2 การปรับลดภาระกระทำจะส่งผลให้หัวรีฟอร์มสามารถใช้งานได้ระยะเวลาที่นานขึ้น แต่การปรับลดภาระกระทำก็ต้องพิจารณาควบคู่กับระยะช่องว่างระหว่างสองหน้าแปลนเสื้อเพลลาซ์บหลังว่ามีระยะห่างอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ การปรับเพิ่มรัศมีความโค้งแบบไม่คงที่ที่คอของหัวรีฟอร์มสามารถลดความเข้มของความเค้นลงได้อย่างมาก นั่นคือมีแนวโน้มที่สามารถใช้งานได้ ในจำนวนรอบรอบที่มากขึ้นกว่าหัวรีฟอร์มที่มีรูปร่างแบบเดิมและแผ่นรองการบีบอัดก็ต้องได้รับการปรับขนาดให้สอดคล้องกับรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนไปนี้ด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิเคราะห์และสรุปผลข้างต้นเป็นการวิเคราะห์ที่มุ่งไปยังหัวรีฟอร์มเท่านั้นด้วยการปรับเพิ่มรัศมีความโค้งที่คอ ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็น AISI 1045 ที่มีความเค้นที่จุดคราก 530 MPa และมีค่า

ความต้านทานแรงดึง 625 MPa แต่ยังมีวัสดุอีกชนิดหนึ่งคือ AISI 4043 ที่มีค่าความเค้นที่จุดครากที่สูงถึง 710 MPa และมีค่าความต้านทานแรงดึงถึง 1,110 MPa ซึ่งเป็นวัสดุที่ควรได้รับการพิจารณานำมาทดสอบและหาจำนวนรอบการใช้งานเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมด้วย

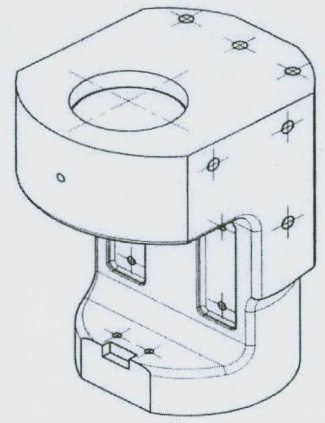
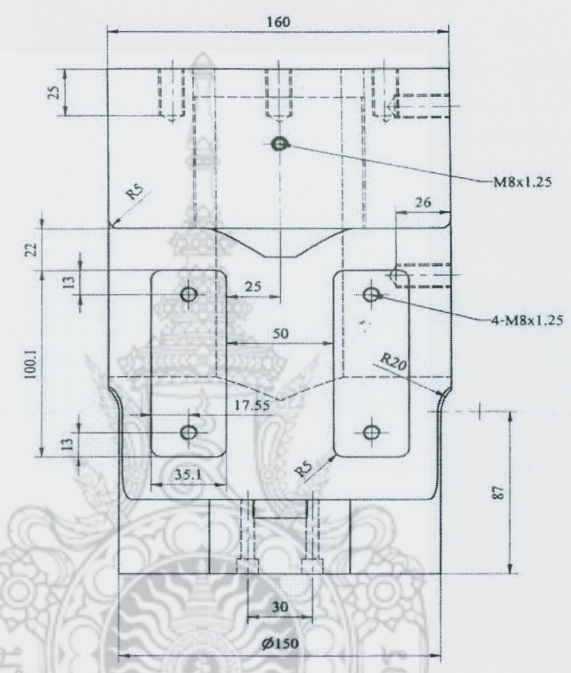
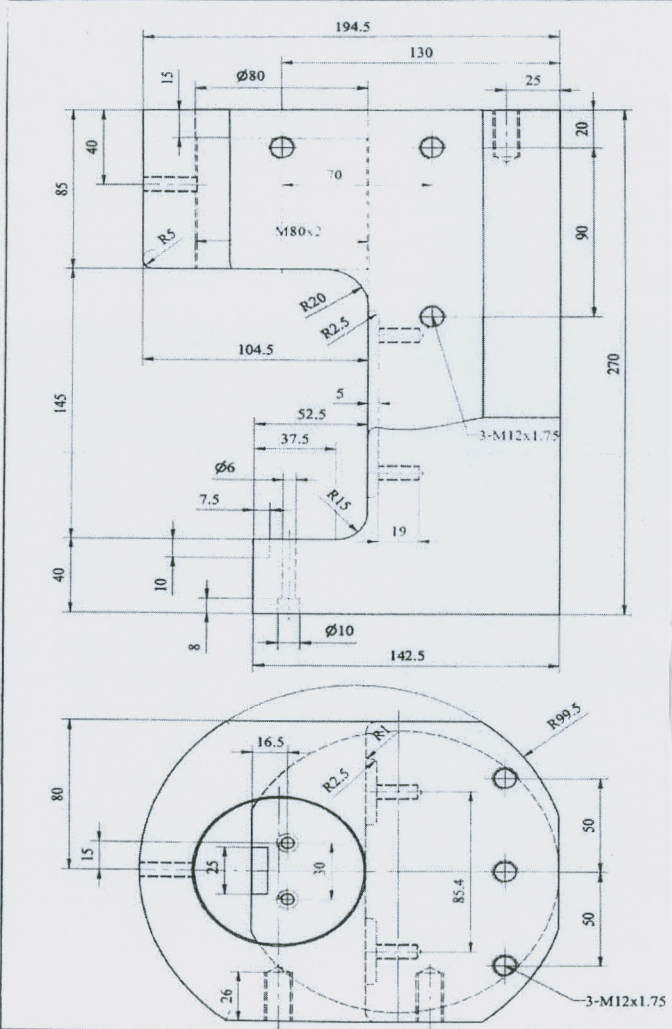


บรรณานุกรม

1. กิตติยา มาติน, พรทิพย์ ก่อเกษมพร และสิริลักษณ์ นิวัฒน์ยานนท์. การทดสอบหาจำนวนรอบอายุการใช้งานของใบพัด และฝาครอบใบพัดด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และเครื่องทดสอบความล้าตัว. ภาควิชาเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
2. บพิศ บุญพิชิต. การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ Fast Breeder. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2009.
3. ประกอบ ชาติภักดิ์. การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่เกิดจากพายุหิมะต่อการกระจายความเค้นและความถี่ธรรมชาติของเสาบอกทางจราจรโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สิงหาคม 2549.
4. อนุชา พรหมวังขวา. เอกสารประกอบการสอนวิชาไฟไนต์เอลิเมนต์. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.
5. อาณัติ หาทรัพย์ และมงคล มงคลวงศ์โรจน์. การศึกษาผลของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุเอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547.
6. Charles E. Knight. The Finite Element Method in Mechanical Design, Boston : PWS-KENT Publishing Company. 1993.
7. Daryl L. Logan. A First Course in the Finite Element Method Using Algor, 2nd.ed. United State : Books/Cole. 2001.
8. Robert C.Juvinal and Kurt M.Marshek. Fundamentals of Machine Component Design. 3rd.ed. United States : John Wiley & Son. 2000.
9. Y.K. Cheung, S.H.Lo and A.Y.T. Leung. Finite Element Implementation, 1st.ed. Blackwell Science. 1996.
10. Nirbhay Singh, Ram Khelawan and G Nathur, 1972. Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Journal, Proceedings, 69(11):673-677.
11. <http://home.off-road.com/~kemanuel/elocker/lots-o-room1.jpg> (11 January 2009).
12. <http://www.landroveronly.com/forums/attachments/f7> (11 January 2009).

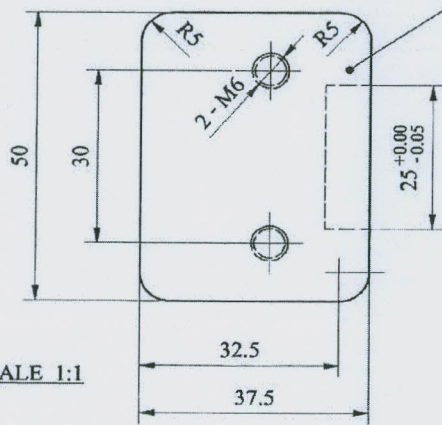
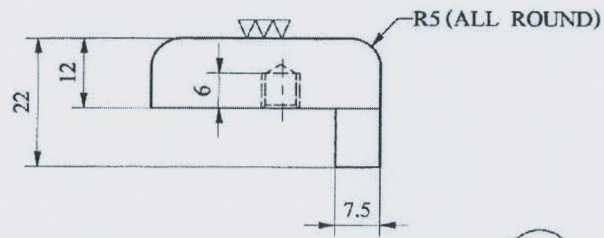


ภาคผนวก
แบบของชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง



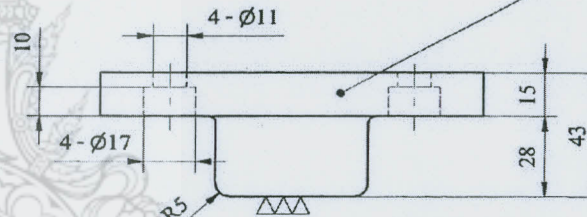
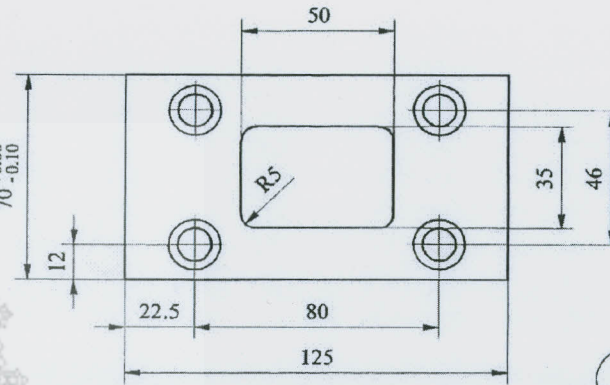
Note:
 MATERIAL = S45C
 QTY. = 1 PCS

Designed by Phanu Sripet	Checked by	Approved by	Date	Date 16/8/2548
THAI SUMMIT PKK - BANGNA			190 AXLE ASM LINE RING FROM	
C' Type Correction Press			Scale 1:2	Sheet 1/2



SCALE 1:1

1



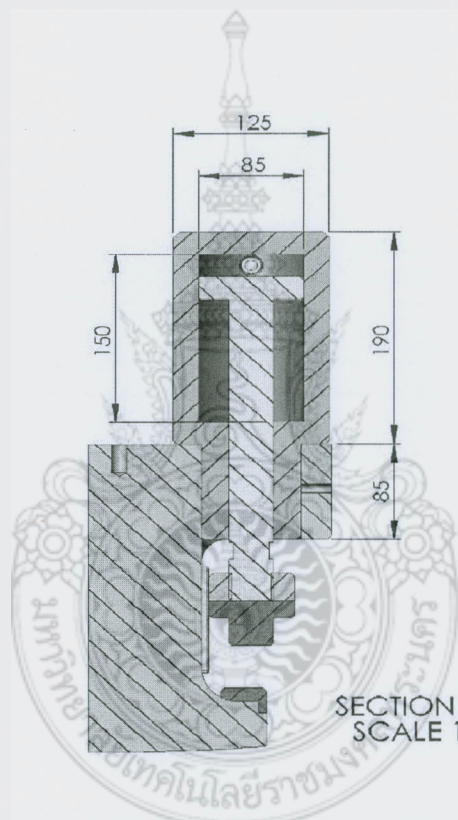
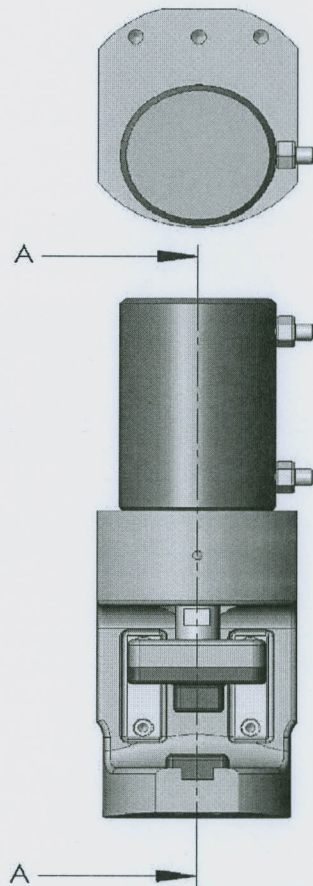
SCALE 1:2

2

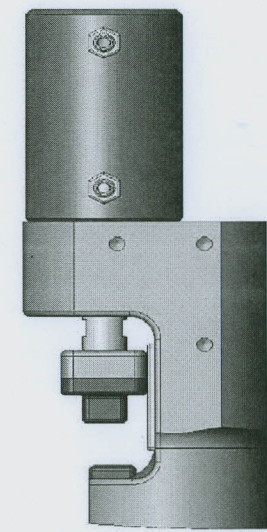
2.	UPPER BLOCK	125x70x43	SCM440	REFINING HRC30	1	In Reforming Yoke
1.	UNDER BLOCK	50x37.5x22	SCM440	REFINING HRC30	1	In Reforming Yoke
No.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT TREAT	QTY	DESCRIPTION

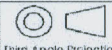
Designed by Phanu Sripet	Checked by	Approved by	Date	Date 16/8/2548
-----------------------------	------------	-------------	------	-------------------

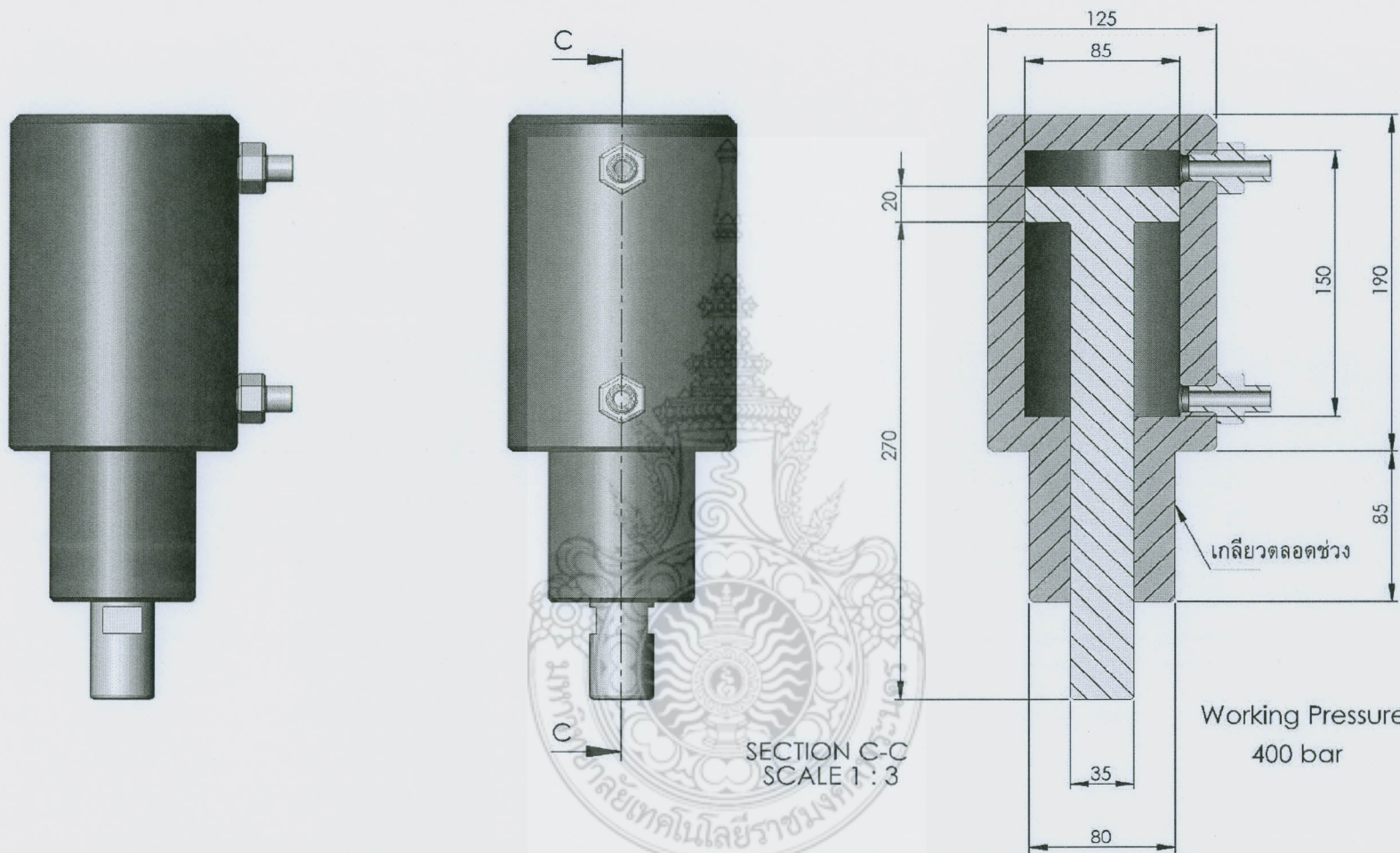
THAI SUMMIT PKK - BANGNA	190 AXLE ASM LINE RING FROM		
	C' Type Correction Press	Scale	Sheet 2 / 2



SECTION A-A
SCALE 1 : 5

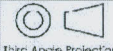


DRAW	FRAKORB CHARTPUK	7 July 2008	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING		
DESIGNER	FRAKORB CHARTPUK	15 February 2008	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
APPROVED	FRAKORB CHARTPUK	30 March 2008	TITLE :	ASSEMBLY :	 SCALE : 1:1 SHEET : 1 OF 2
DIMENSION : mm	NAME	DATE	Reformer Assembly	Reformer Assembly	



SECTION C-C
SCALE 1 : 3

Working Pressure
400 bar

DRAW	PRAKORB CHARIPUK	7 July 2008	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING			
DESIGNER	PRAKORB CHARIPUK	15 February 2008	RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
APPROVED	PRAKORB CHARTPUK	30 March 2008	TITLE :	ASSEMBLY :	 Third Angle Projection	SCALE : 1:1
DIMENSION : mm	NAME	DATE	Cylindrical and piston	Cylindrical and piston		SI I C E T : 2 OF 2

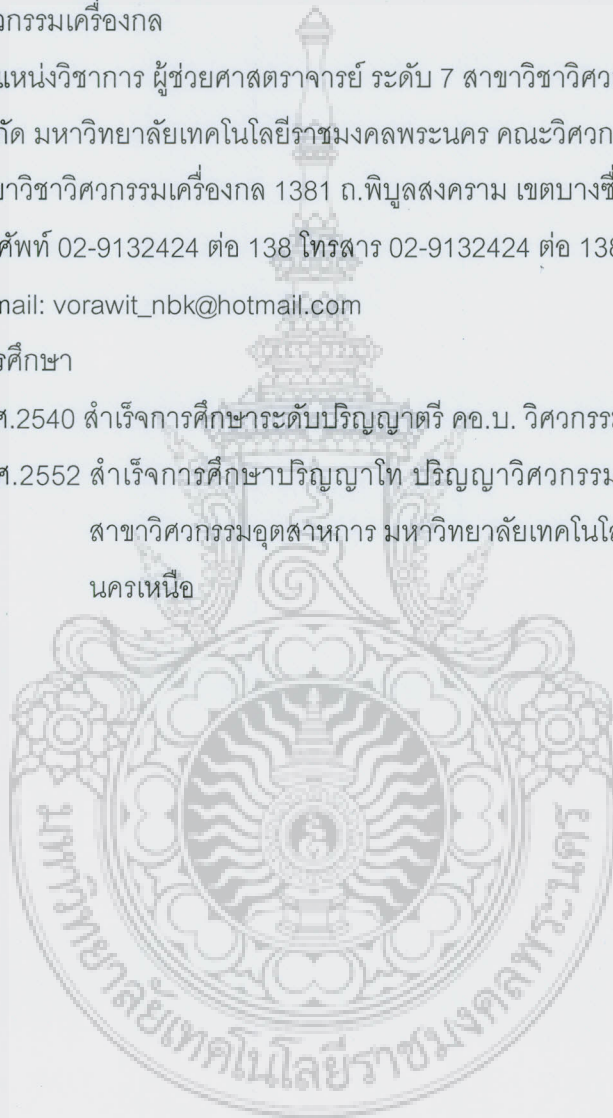


ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ : นายประกอบ ชาติภักดิ์
- ชื่องานวิจัย : การวิเคราะห์ความถี่และออกแบบหัวรีฟอর্মโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
- ประวัติ
1. ตำแหน่งวิชาการ อาจารย์ ระดับ 5 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 2. สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล 1381 ถ.พินุดสงคราม เขตบางซื่อ กทม.10800
โทรศัพท์ 02-9132424 ต่อ 138 โทรสาร 02-9132424 ต่อ 138
E-mail: prakorb@hotmail.com
 3. การศึกษา
 - พ.ศ.2543 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 - พ.ศ.2549 สำเร็จการศึกษาปริญญาโท ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 4. การอบรม
 - 4.1 การฝึกอบรม THE ADVANCED MECHATRONICS TRAINING COURSE
ที่ Festo (Thailand) CO., LTD (พ.ศ. 2546)
 - 4.2 การฝึกอบรม FLUID POWERS TECHNOLOGY AND MAINTENANCE IN
INDUSTRIAL AUTOMATION ที่ Technical Training Center
Rajamangala University of Technology Thanyaburi and Festo
CO.,LTD. (พ.ศ. 2549)
 - 4.3 การฝึกอบรม Training in Control and Drive Engineering ที่ Festo
Didactic GmbH & CO.KG Germany (พ.ศ. 2550)
 - 4.4 การฝึกอบรม LabVIEW Basic I, II and Intermediate I,II ที่ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดย Trinergy Instrument Co.,Ltd. And
National Instruments (Thailand) Co.,Ltd. (พ.ศ. 2551)
 - 4.5 ผู้ช่วยที่ปรึกษาโครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานให้คำปรึกษาด้านการ
อนุรักษ์พลังงาน ตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงาน บำรุงรักษาปรับปรุง
ระบบปรับอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ : ผศ.วรวิทย์ วรรณานิน
- ชื่องานวิจัย : การวิเคราะห์ความล้มและออกแบบหัวรีฟอรัมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
- ประวัติ
1. ตำแหน่งวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 7 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 2. สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล 1381 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กทม.10800
โทรศัพท์ 02-9132424 ต่อ 138 โทรสาร 02-9132424 ต่อ 138
E-mail: vorawit_nbk@hotmail.com
 3. การศึกษา
พ.ศ.2540 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ : รศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร
- ชื่องานวิจัย : การวิเคราะห์ความล้มและออกแบบหัวรีฟอร์มโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
- ประวัติ
1. ตำแหน่งวิชาการ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ตำแหน่งทางบริหาร รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 2. สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์ 0-5394-4146 ต่อ 323 โทรสาร 0-5394-4145
E-mail: Thongchai@dome.eng.cmu.ac.th
 3. การศึกษา
Doctor of Philosophy 2544 Vanderbilt University, Tennessee, U.S.A.
(Mechanical Engineering)
Master of Science 2541 Vanderbilt University, Tennessee, U.S.A.
(Mechanical Engineering)
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต 2535 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
(เกียรตินิยม อันดับสอง)
 4. การวิจัย
 - 4.1 หัวหน้าโครงการวิจัย
 - 4.1.1 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง ผลของ ระยะห่าง จำนวน และ ทิศทาง
ของสกรู ต่อการกระจายตัวของความเค้นในกระดุกต้นขา ได้รับการสนับสนุนจาก
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นเวลา 2 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม
2549 ถึง 30 มิถุนายน 2551
 - 4.1.2 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง ผลของชั้นกาวบางต่อการเสียรูปของ
รอยต่อที่ใช้หมุดย้ำ ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(สกว.) เป็นเวลา 2 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2545 ถึง 30 มิถุนายน 2547
 - 4.1.3 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของรอยต่อ
สำหรับวัสดุที่ไม่เหมือนกันโดยใช้กาว ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยี

โลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ
สิ่งแวดล้อม เป็นเวลา 1 ปี ตั้งแต่ 8 ตุลาคม 2546 ถึง 7 ตุลาคม 2547

4.1.4 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง เรื่อง การศึกษาการกระจายตัวของ
ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสابอกทางจราจร ได้รับการสนับสนุนจาก คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นเวลา 1 ปี ตั้งแต่ 1 สิงหาคม 2547
ถึง 31 กรกฎาคม 2548

4.1.5 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง เรื่อง การศึกษาการจัดทำกรอบแผน
ยุทธศาสตร์พลังงานระดับจังหวัดแบบบูรณาการ จังหวัด ลำพูน ได้รับการ
สนับสนุนจาก สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์ กระทรวงพลังงาน เป็นเวลา 3
เดือน ตั้งแต่ 1 กรกฎาคม 2547 ถึง 30 กันยายน 2547

4.1.6 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง เรื่อง การศึกษาการจัดทำแผน
ยุทธศาสตร์พลังงานระดับจังหวัดแบบบูรณาการ จังหวัด ลำปาง พะเยา และ
เชียงใหม่ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์ กระทรวง
พลังงาน เป็นเวลา 3 เดือน ตั้งแต่ 20 พฤษภาคม 2548 ถึง 19 สิงหาคม 2548

4.1.7 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องต้นแบบเครื่องเรียง
ขนม ได้รับการสนับสนุนตามโครงการ IPUS โดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการ
วิจัย (สกว) เป็นเวลา 1 ปี (2546 - 2547)

4.1.8 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง การศึกษาการกระจายตัวของความเค้น
ที่เกิดขึ้นบนเสابอกทางจราจรได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นเวลา 1 ปี (2546 -2547)

4.1.9 หัวหน้าโครงการ งานวิจัยเรื่อง เรื่อง การพัฒนาความแข็งแรงของถนน
ต่อการด้าโดยการเคลือบด้วยยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ได้รับการสนับสนุนจาก
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นเวลา 1 ปี (2545 -2546)

4.2 นักวิจัยร่วม

4.2.1 นักวิจัยร่วม โครงการ ให้ความรู้เรื่อง Energy Audit แก่หน่วยงานของ
รัฐและจังหวัด (ที่ปรึกษาให้ความรู้และแนะนำให้คำปรึกษาเรื่อง Energy Audit
ภาคเหนือ) ได้รับการสนับสนุนจาก กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน เป็นเวลา 8 เดือน ตั้งแต่ มีนาคม 2550 ถึง
พฤศจิกายน 2550

4.2.2 รองหัวหน้าโครงการและนักวิจัยร่วมในตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมยานยนต์/พลศาสตร์ งานวิจัยเรื่อง โครงการศึกษาและพัฒนาตัวแบบหน่วยสืบสวนอุบัติเหตุจากการขนส่งและจราจร พื้นที่ศึกษา: จังหวัดเชียงใหม่ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กระทรวงคมนาคม เป็นเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ ตุลาคม 2548 ถึง กันยายน 2549

4.2.3 นักวิจัยร่วม งานวิจัยเรื่อง การศึกษาดัชนีการใช้พลังงาน (Energy Utilization Index: EUI) ของหน่วยงานราชการ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน เป็นเวลา 18 เดือน ตั้งแต่ 17 มีนาคม 2549 ถึง 16 กันยายน 2550

4.2.4 นักวิจัยร่วม งานวิจัยเรื่อง การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการระบายอากาศของหลังคารับรังสีอาทิตย์ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน เป็นระยะเวลา 15 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2547 ถึง 31 ธันวาคม 2548

4.3 วารสารวิชาการ

4.3.1 Thongchai Fongsamootr, Tawan Sutcharikul, and Carol A. Rubin, "DISTORTION ANALYSES OF COMBINED ADHESIVE-RIVETED LAP JOINTS," Strength, Fracture and Complexity, An International Journal, vol.2, n.4, 2004, pp.137-147

4.3.2 Thongchai Fongsamootr, "Effect of Panel Thickness on the Distortion of the Non-Countersunk Riveted Lap Joints," Engineering Journal Chiang Mai University, vol.10, November 2003, pp.1-7.

4.4 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

4.4.1 Thongchai Fongsamootr, Nopparat Seehawong, and Boonsiva Buranastidporn, "Influence of Thread Length and Diameter of Mini-screw Implants on Stress Distribution in the Bone Using Finite Element Method" The 9th Asian Symposium on Visualization, Hong Kong, 4-9 June, 2007

4.4.2 Nivej Doungsupa, Thongchai Fongsamootr, Yottana Khunatron, and Sukdipown Thiansem, " Simulation of Combustion in

Ceramic Fiber Kiln Using Computational Fluid Dynamics," The 11th Tri-University International Joint Seminar & Symposium, Chiang Mai, Thailand, 26 - 31 October 2004

4.4.3 Thongchai Fongsamootr, "The Effect of Rubber Coating on the Strength of Asphalt Concrete," Engineering and Technology Conference 2003 (EnTech2003), Kuching, Malaysia, 30 July - 1 August 2003.

4.4.4 Thongchai Fongsamootr, Charoenyut Dechwayukul, Notsanop Kamnerdtong, Carol A. Rubin, and George T. Hahn, " Parametric Study of Combined Adhesive-Riveted Lap Joints," The 5th International conference of Fracture and Solids, Tohoku University, Sendai, Japan, 20 - 22 October 2003.

4.5 การประชุมวิชาการระดับชาติ

4.5.1 ธงชัย ฟองสมุทร, " การวิเคราะห์ความเค้นของรอยต่อแบบหมุดย้ำ และกาว," The second Aerospace Engineering Conference of Thailand , เชียงใหม่, 18 - 19 สิงหาคม 2547

4.5.2 สุธรรม อรุณ และ ธงชัย ฟองสมุทร, " การวิเคราะห์พฤติกรรมของ รอยต่อแบบกาวสำหรับวัสดุที่ไม่เหมือนกันภายใต้ภาวะรับแรงดึง," การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, ขอนแก่น, 18 - 20 ตุลาคม 2547

4.5.3 จักรชัย สุวรรณเนา, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง, และ ธงชัย ฟองสมุทร, "Effects of Riveted-Pitch Distance on the Stress Concentration Factor of Riveted Lap Joints," การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 3, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 8 - 9 ธันวาคม 2547.

4.5.4 Charoenyut Dechwayukul, Thongchai Fongsamootr, Wiriya Thongruang, and Jugchai Suwannao, " Effect of crack-length extension on the stiffness of 2-D adhesive shear lap joint," วิศวกรรม มอช วิชาการ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา, 21 - 22 August 2003.

4.5.5 ธงชัย ฟองสมุทร, กัญญารัตน์ ตันกอง, ฉัตรชัย พันธุ์ผจญ, และ พิทวัส ประพันธ์ "การระบายความร้อนโดยใช้ระบบ รูปซ-พอนด์," วิศวกรรม วิชาการ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หาดใหญ่ จังหวัด สงขลา, 21 - 22 สิงหาคม 2546.

4.5.6 Charoenyut Dechwayukul, Wiriya Thongruang, Jugchai Suwannao, and Thongchai Fongsamootr, " Spring Elements for modelling of 2-D adhesively bonded lap joints," The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Bangkok-Prachinburi, 15 - 17 October 2003.

4.5.7 Thongchai Fongsamootr, Charoenyut Dechwayukul, Notsanop Kamnerdtong, Carol A. Rubin, and George T. Hahn, " Analysis of The Distortion and Fatigue of Sealed Riveted Lap Joints," The 16th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, 14 - 16 October 2002.

4.5.8 Charoenyut Dechwayukul , Thongchai Fongsamootr, Notsanop Kamnerdtong, Carol A. Rubin, and George T. Hahn, " Effects of Thin Sealant-Like Adhesive Layer on Countersunk Riveted Lap Joint," MSAT II: Materials Science and Technology for Sustainable Development of Thailand, Bangkok, Thailand, 6 - 7 August 2002.

