

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การวิเคราะห์อายุการล้าของชุดปีกนกกลาง**

**Fatigue Life Analysis of a Lower Control Arm**



**ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**

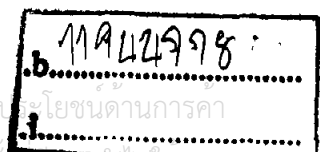
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์อายุการล้าของชุดปีกนกล่าง  
Fatigue Life Analysis of a Lower Control Arm



นาย วิรพล พรอนันต์ชัยกุล  
นางสาว ศุภวรรณ ตั้งคำรงค์ทรัพย์  
นาย ภคณัฐ นุญเชิดชัยยันต์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบเซ

การวิเคราะห์อายุการล้าของชุดปีกนกล่าง  
Fatigue Life Analysis of a Lower Control Arm

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์อายุการถ้ำของชุดปีกนกลาง

ผู้จัดทำ

1. นาย วิธิพล พรอนันต์ชัยกุล รหัสนักศึกษา 47010707
2. นางสาว สุภวรรณ ตั้งดำรงทรัพย์ รหัสนักศึกษา 47010785
3. นาย ภคณัฐ บุญเชิดชัยยันต์ รหัสนักศึกษา 47011013



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์อายุการล้าของชุดปีกนกต่าง

นายวิธิพล พรอนันต์ชัยกุล 47010707  
 นางสาวศุภวรรณ ตั้งคำรงค์ทรัพย์ 47010785  
 นายภักดิ์ภูธร บุญเชิดชัยยันต์ 47011013  
 ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ ทำการวิเคราะห์อายุการล้าของปีกนกด้านหน้าของระบบช่วงล่าง แบบแม็คเฟอร์สันสตรัท (McPherson Strut) ด้วยภาวะกระทำคงที่ ในตอนเริ่มต้นค่าความเค้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS และนำค่าที่ได้ไปหาอายุการล้าด้วยแนวทางทางความเค้น จากนั้นนำค่าความเค้นที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งการวัดค่าความเค้นจะวัดได้จากสเตรนเกจ หลังจากนั้นทำการเสนอวิธีการออกแบบรูปร่างของ ปีกนกใหม่เพื่อเพิ่มอายุการล้า จากการคำนวณพบว่าสามารถปรับปรุงอายุการล้า (คำนวณได้จากทางทฤษฎี) จาก 2,142,285 รอบ เป็น 8,510,913 รอบ

## Fatigue Life Analysis of a Lower Control Arm

Mr.Vitipol Pornananchaikul 47010707

Ms.Suphawan Tungdumrongsub 47010785

Mr.Phakanut Booncherdchaiyan 47011013

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn Advisor

### Abstract

This research describes the analysis of fatigue life on front wishbone of McPherson strut under constant biaxial loading. First, the fatigue life was analyzed by finite element method. In this research, ABAQUS, a commercial program was employed to evaluate stresses and stress-based approach was used to evaluate fatigue life. The simulated stress results were compared with the tested results. The stress was measured by strain gauge. This research also proposes a new shape of wishbone for a longer fatigue life. It illustrates that fatigue life increases greatly from 2,142,286 cycles to 8,510,914 cycles.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่จะกล่าวถึงเพราะเป็นผู้ที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ ก็คืออาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือเสมอมาตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ บริษัท ซี เอช วัฒนา ยนต์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อเครื่องทดสอบ ขอขอบคุณพี่รักชัย พี่อาทิตย์ พี่ไฉ พี่โหน่งและพี่อู๋ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำ การทดลอง ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักหอสมุดกลาง ที่เป็นแหล่งความรู้และเอกสารอ้างอิง ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่สนับสนุนงบประมาณในการทำโครงการตลอดจนเพื่อนร่วมห้องที่เป็นกำลังใจให้กันเสมอมา รวมทั้งบุคคลอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนร่วมให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ลืมไม่ได้ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งคอยเลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี ให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายวิรัช พรอนันต์ชัยกุล  
นางสาวศุภวรรณ ตั้งคำทรงทรัพย์  
นายภักดิ์ภูริ บุญเชิดชัยยันต์

## สารบัญ

## หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการทำงานของระบบกันสะเทือน	3
2.1.1 ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง (Rigid Suspension)	3
2.1.2 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension)	3
2.2 ทฤษฎี และสูตรพื้นฐาน	4
2.2.1 การเปลี่ยนรูปความเค้น (Stress Transformation)	4
2.2.2 กฎของฮุก	5
2.2.3 แผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็ก	5
2.2.4 การวัดความเค้นด้วยสเตรนเกจ (Strain Gauge)	6
2.2.5 ทฤษฎีการเสียหาย (Failure Theories)	7
2.2.6 ขอบเขตของปัญหาความล้า	7
2.2.7 ทฤษฎีการล้า	7
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	10
2.3.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.3.2 การหาการกระจัด	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3	สมการเชิงอนุพันธ์	12
บทที่ 3	อุปกรณ์การทดลอง และการคำนวณ	14
3.1	อุปกรณ์การทดลอง	14
3.1.1	เครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง	14
3.1.2	ชุดเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ (Strain Indicator) และ เครื่องสวิตซ์แอนด์บาลานซ์ยูนิต (Switch and Balance Unit)	14
3.1.3	สเตรนเกจ	15
3.1.4	เครื่องทดสอบแรงดึง ขนาด 30 ตัน	15
3.2	ขั้นตอนการคำนวณ	15
3.3	ตัวอย่างการคำนวณ	16
บทที่ 4	วิธีการทดลอง	18
4.1	การวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	18
4.1.1	การสร้างหรือการนำแบบจำลองของชิ้นงานสู่โปรแกรม	18
4.1.2	การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นงานให้แก่แบบจำลอง	19
4.1.3	การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์ให้แก่แบบจำลอง	19
4.1.4	การกำหนดภาระกระทำและเงื่อนไขขอบให้แก่แบบจำลอง	19
4.1.5	การสร้างเอลิเมนต์	20
4.1.6	การดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลอง	20
4.2	การทดลองปีกนิก	21
4.2.1	ขั้นตอนการติดตั้งปีกนิกกับเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง	23
4.2.2	การติดตั้งสเตรนเกจ	24
4.2.3	การเก็บค่าการทดลอง	26
4.2.4	การสอบเทียบเครื่องมือวัดสเตรนอินดิเคเตอร์	26
4.3	แนวทางในการปรับปรุงความทนทาน	28
4.3.1	การออกแบบจำลองสามมิติ ด้วยโปรแกรม Unigraphics	28
4.3.2	การวิเคราะห์หาความเค้นและอายุการถ้ำ	28
บทที่ 5	ผลการทดลอง	29
5.1	ผลการทดลองจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 การทดลองที่ 1	29
5.1.2 การทดลองที่ 2	29
5.1.3 การทดลองที่ 3	29
5.1.4 การทดลองที่ 4	29
5.2 ผลการทดลองจากเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง	31
5.3 ผลการสอบเทียบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง	32
5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองจากทฤษฎีและปฏิบัติ	33
5.4.1 ผลการเปรียบเทียบความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ณ ตำแหน่งต่างๆ	33
5.4.2 ผลการเปรียบเทียบอายุการล้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ใน 4 การทดลอง	36
5.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองหลังการปรับปรุง	38
5.5.1 ผลการทดลองจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	38
5.5.2 ผลการเปรียบเทียบความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ณ ตำแหน่งต่างๆ	39
5.5.3 ผลการเปรียบเทียบอายุการล้ากับชิ้นงานเดิม	39
<b>บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	<b>40</b>
6.1 สรุปผลการทดลอง	40
6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	41
6.3 ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา	42
6.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	42
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>ก-1</b>
<b>ภาคผนวก ข</b>	<b>ข-1</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแสดงส่วนประกอบของความเค้นดึงฉากและความเค้นเฉือน	4
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดด้วยการวิเคราะห์การล้ารอบสูง	5
2.3 แสดงตำแหน่งแกนของสเตรนเกจแบบสามแกน (Triaxial)	6
2.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงภาระแบบแอมพลิจูดไม่คงที่	8
2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุการล้า (S-N Curve)	9
2.6 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการแบ่งออกส่วนย่อยๆ (Discretization)	10
3.1 เครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง	14
3.2 ชุดเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์และเครื่องสวิตช์แอนด์บาลานซ์ยูนิต์	14
3.3 ลักษณะของสเตรนเกจชนิดสามแกน	15
3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง	15
4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	18
4.2 ซีนปีกนกลางที่นำเข้ามาด้วยนามสกุล *.x_t	19
4.3 การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์ให้แก่แบบจำลองปีกนก	19
4.4 การกำหนดแรงกระทำ และจุดยึด	20
4.5 แรงกระทำต่อล้อ	20
4.6 การแสดงสถานะของการวิเคราะห์แบบจำลอง	21
4.7 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง	22
4.8 การติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง	23
4.9 หน้าจอสำหรับการติดตั้งแรงที่กระทำกับชิ้นงานเพื่อส่งไปยังกระบอกสูบทั้งสองตัว	23
4.10 ตำแหน่งในการติดสเตรนเกจ	24
4.11 การชุบสีบนชิ้นงานก่อนการติดสเตรนเกจ	24
4.12 การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	25
4.13 การติดตั้งของชุดเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ และเครื่องสวิตช์แอนด์บาลานซ์ยูนิต์	25
4.14 ค่าความเครียดที่สามารถอ่านได้บนหน้าจอแสดงผล	26
4.15 รูปร่างของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8	26
4.16 แบบจำลองใหม่หลังการปรับปรุง	28
5.1 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของซีนปีกนกลาง การทดลองที่ 1	29
5.2 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของซีนปีกนกลาง การทดลองที่ 2	30

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลาง การทดลองที่ 3	30
5.4 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลาง การทดลองที่ 4	30
5.5 ตำแหน่งการติดสเตรนเกจบนแบบจำลองปีกนกทั้ง 5 จุด	31
5.6 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 1	34
5.7 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 2	34
5.8 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 3	35
5.9 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 4	35
5.10 การเปรียบเทียบอายุการล้าระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 1	36
5.11 การเปรียบเทียบอายุการล้าระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 2	36
5.12 การเปรียบเทียบอายุการล้าระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 3	37
5.13 การเปรียบเทียบอายุการล้าระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 4	37
5.14 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลางหลังปรับปรุงด้วยแรงกด 8 และ 6 กิโลนิวตันในแกน X และ Y ตามลำดับ	38
5.15 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลางหลังปรับปรุงด้วยแรงกด 8 และ 6 กิโลนิวตันในแกน X และ Y ตามลำดับ	38
5.16 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ก่อนและหลังปรับปรุงกรณีที่ 1	39
5.17 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ก่อนและหลังปรับปรุงกรณีที่ 2	39
6.1 แสดงตำแหน่งของสเตรนเกจบนชิ้นงาน	40
ก-1 แสดงขนาดมาตรฐาน ASTM E8	ก-1

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-2 แสดงภาพการติดสเตรนเกจบนเหล็กทดลอง และตัวสเตรนเกจ	ก-1
ก-3 แสดงลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง ขนาด 30 ตัน	ก-2
ก-4 แสดงลักษณะการเสียหายของชิ้นงานทดสอบ	ก-3
ก-5 แสดงความสัมพันธ์ของ ความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบ	ก-3
ข-1 แสดงกราฟแรงกับระยะเวลา สำหรับการเก็บค่าการขั้บรถจริง	ข-1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4-1 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นป้อนกษนิค JIS G3113 SAPH440	19
4-2 ลักษณะและปริมาณเอลิเมนต์	20
4-3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8	27
5-1 ผลความเครียดในแต่ละตำแหน่งของการทดสอบดึงจากเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ของชิ้นป้อนกลางตามองศาและแรงกระทำตามการทดลองครั้งที่ 1, 2, 3, 4	31
5-2 ค่าความผิดพลาดของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง	32
5-3 ค่าความเครียดปรับแก้ของทุกตำแหน่งในการทดลองทั้ง 4 กรณี	33
ก-1 แสดงค่าความผิดพลาด ของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง	ก-4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

จากการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์นั้น มีพัฒนาทั้งทางด้านสมรรถภาพ อายุการใช้งาน และความสะดวกสบายต่างๆ แต่ที่สุดแล้วการพัฒนาจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักพื้นฐานเสมอ คือ ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียหายของวัสดุ ซึ่งทฤษฎีความเสียหายที่ได้ถูกนำมาแก้ปัญหา ที่เป็นสาเหตุของวัสดุที่เกิดการเสียหาย นั่นคือ ทฤษฎีความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า แต่การจะวิเคราะห์ถึงปัญหาทางด้านความล้า นั้น สามารถหาได้จากการทดลองกับชิ้นงานจริง ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความแน่นอนที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องด้วยปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านคอมพิวเตอร์ และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และถูกนำไปใช้กับงานทางวิศวกรรมมากขึ้น ในโครงการนี้จึงนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการประเมินค่าความเสียหายเนื่องจากความล้าของปีกนก เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อการออกแบบและการพัฒนา

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดความเค้นสูงสุด หรือการกระจายความเค้นที่ไม่เหมาะสมบนปีกนก
- 1.2.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบอายุการล้าจากการทดลองทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาแนวทางการแก้ไขชิ้นปีกนก ให้มีอายุการล้ามากขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองปีกนกของรถยนต์ส่วนบุคคล 4 ที่นั่ง เพื่อหาค่าแรงที่มีความเค้นสูงสุดด้วยโปรแกรม ABAQUS จากการใส่ค่าแรงกระทำครั้งที่ 4 กรณีและคุณสมบัติของวัสดุเสมือนจริง
- 1.3.2 ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง ตรงตามแบบจำลอง เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นของปีกนกจากค่าความเครียดที่เก็บค่าได้ โดยนำสเตรนเกจ เข้ามาติดตั้งที่ตำแหน่งความเค้นสูงของชิ้นงาน ที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อที่ 1
- 1.3.3 เปรียบเทียบค่าความเค้นจากการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเพื่อคำนวณหาอายุการล้า
- 1.3.4 ทำการออกแบบปรับปรุง และจำลองชิ้นงานด้วยโปรแกรม Unigraphics และ ABAQUS เพื่อให้มีค่าอายุการล้ามากขึ้น โดยแนวทางของความเค้น

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

#### 1.4.1 การวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.2 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง
- 1.4.3 เปรียบเทียบอายุการถ้ำจากผลการจำลองและทดลอง
- 1.4.4 ออกแบบใหม่และวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.4.5 เปรียบเทียบและผลการออกแบบใหม่กับชิ้นงานเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการทำงานของระบบกันสะเทือน

ระบบกันสะเทือน ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวรถ เครื่องยนต์ ผู้โดยสาร และสิ่งของใดๆ ที่อยู่ในรถ อีกทั้ง ยังช่วยรองรับ แรงสะเทือนจากถนน และยังช่วยทำให้ผู้ขับขี่รถ สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ไปตามทุกสภาพ และความเร็วของถนน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกด้วย ระบบกันสะเทือนสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

##### 2.1.1 ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง (Rigid Suspension)

แบบดั้งเดิมโดยมากจะพบกับระบบกันสะเทือน เคลื่อนที่ล้อหลังเพราะจะมีเพลาทหมุน (Axle shaft) ต่อออกจากชุดเฟืองท้าย (Differential) ไปสู่ล้อซ้าย และล้อขวาโดยตรง โดยไม่ผ่านข้อต่ออ่อน (Universal Joint)

##### 2.1.2 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension)

ระบบกันสะเทือนที่ได้รับการพัฒนาให้แยกหน้าที่ รองรับน้ำหนัก และแรงสะเทือนระหว่างล้อซ้าย และล้อขวาออกจากกัน เมื่อล้อใดล้อหนึ่งตกหลุมหรือกระแทกสิ่งกีดขวาง แรงสะเทือนที่เกิดขึ้น จะกระทำต่อส่วนใหญ่ ที่ล้อนั้น และจะส่งแรงสะเทือนนี้ไปสู่ตัวรถ และอุปกรณ์ต่อเนื่องกันให้น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดความนุ่มนวลในห้องโดยสารมากที่สุด แบ่ง ได้เป็น 2 แบบ

##### 2.1.2.2 ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ (Double Wishbone)

มีส่วนประกอบที่มองคล้ายกับปีกนกอยู่ 2 ชิ้น ติดตั้งอยู่ด้านบน และด้านล่างอย่างละ 1 ชิ้น ด้านหนึ่งยึดติดกับ โครงรถ อีกด้านหนึ่ง ยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวที่ติดอยู่กับคัมล้อ

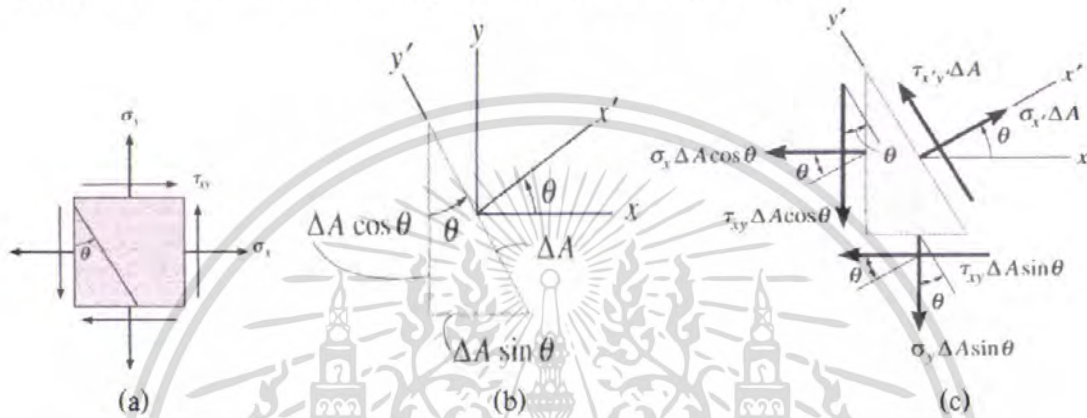
##### 2.1.2.2 ระบบกันสะเทือนอิสระแบบแมคเฟอร์สันสตรัท (McPherson Strut)

ระบบกันสะเทือนแบบแมคเฟอร์สันสตรัท ประกอบด้วยปีกนกด้านล่าง 1 ชิ้น ด้านบนเป็นชุดสตรัท (Strut) รับแรงกระแทกบนพื้นถนน ขึ้นมาที่ล้อ ต่อไปยังแกนปีกนกบน คอยสปริงและโช้คอัพ ไปในตัว ปัจจุบันรถยนต์รุ่นใหม่ ใช้วิธีนำชุดสตรัท มาเป็นระบบกันสะเทือนอิสระกันมากขึ้น รถยนต์บางรุ่น จะใช้ชุดสตรัท เป็นระบบกันสะเทือนทั้ง 4 ล้อ หรืออาจใช้ชุดสตรัท กับระบบล้อหน้า ส่วนระบบกันสะเทือนล้อหลัง ใช้เป็นแบบอื่นๆ ที่เราจะพิจารณานั้นจะเป็นส่วนของปีกนกในชุดกันสะเทือนด้านหน้า ซึ่งระบบกันสะเทือนแบบแมคเฟอร์สันสตรัทเป็นชนิดที่เรานำมาพิจารณาในการทดลองนี้

## 2.2 ทฤษฎี และสูตรพื้นฐาน

### 2.2.1 การเปลี่ยนรูปความเค้น (Stress Transformation)

ผลที่ได้รับคือ สภาวะของหน่วยแรงซึ่งกล่าวถึงเฉพาะหน่วยแรงในสองมิติ หรือหน่วยแรงระนาบ คำนึงตัวแปรที่ต้องพิจารณามีเพียงสามตัว คือ หน่วยแรงตั้งฉากในแนวตั้ง ( $\sigma_y$ ), หน่วยแรงตั้งฉากในแนวราบ ( $\sigma_x$ ), หน่วยแรงเฉือน ( $\tau_{xy}$ ) ค่าหน่วยแรงมากที่สุดมีความสำคัญมาในการวิเคราะห์และออกแบบชิ้นส่วนองค์ประกอบโครงสร้าง เนื่องจากเป็นตัวกำหนดว่าองค์ประกอบนั้นๆ จะรับน้ำหนักได้มากเพียงใด และยังสามารถทำนายลักษณะการวิบัติของวัสดุที่รับน้ำหนักมากเกินไปอีกด้วย



รูปที่ 2.1 (a) แสดงภาพการตัดด้วยระนาบ

(b) แสดงการพิจารณาที่ชิ้นส่วนที่ตัดออกมา

(c) แสดง Free-body Diagram ของชิ้นส่วนที่ตัดออกมา

จากรูปจะได้

$$\begin{aligned} & [\sum F_{x'} = 0] \\ \sigma_x \Delta A - (\tau_{xy} \Delta A \sin \theta) \cos \theta - (\sigma_y \Delta A \sin \theta) \sin \theta - (\tau_{xy} \Delta A \cos \theta) \sin \theta - (\sigma_x \Delta A \cos \theta) \cos \theta &= 0 \\ \sigma_x &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} (2 \sin \theta \cos \theta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} & [\sum F_{y'} = 0] \\ \tau_{x'y'} \Delta A - (\tau_{xy} \Delta A \cos \theta) \cos \theta + (\sigma_x \Delta A \cos \theta) \sin \theta + (\tau_{xy} \Delta A \sin \theta) \sin \theta - (\sigma_x \Delta A \sin \theta) \cos \theta &= 0 \\ \tau_{x'y'} &= (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (2.2)$$

จากความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta, \quad \cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$$

$$\text{และ} \quad \cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}, \quad \sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

แทนในสมการ 2.1 และ 2.2 จะได้เป็น

$$\sigma_x' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (2.4)$$

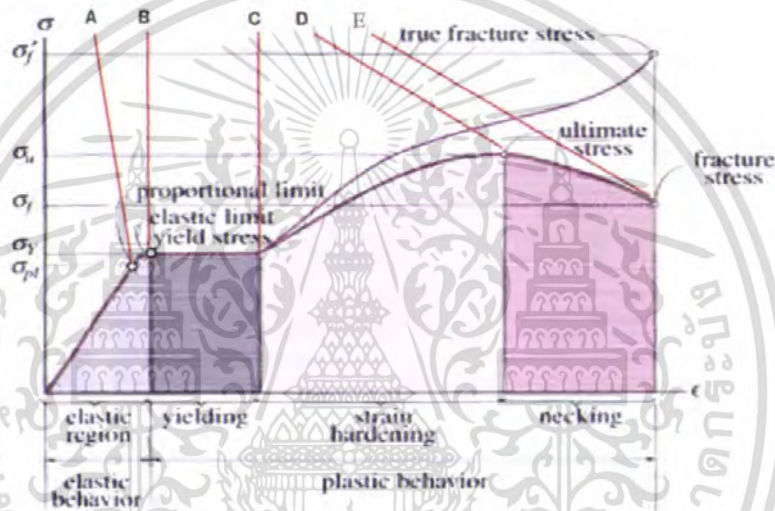
$$\sigma_{y'y} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2.5)$$

### 2.2.2 กฎของฮุก

ในการใช้งานส่วนมากแล้วชิ้นงานส่วนโครงสร้างจะมีการเสียรูปทรงน้อย คืออยู่ในช่วงแรกที่เป็นเส้นตรงของเส้นกราฟหน่วยแรง-ความเครียดภายใต้สภาวะการเสียรูปทรงหรือความเครียดน้อย หน่วยแรงจะแปรผันเป็นเส้นตรงกับความเครียด ความสัมพันธ์ ถูกเรียกโดยทั่วไปว่า กฎของฮุก (Hook's law)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.6)$$

### 2.2.3 แผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็ก



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดด้วยการวิเคราะห์การล้ารอบสูง แผนภูมิเริ่มต้นเป็นเส้นตรงจากจุด O ถึง A ความสัมพันธ์หน่วยแรง-ความเครียดในช่วงนี้นอกจากจะเป็นเส้นตรงแล้วยังแปรตามเป็นสัดส่วนกันอีกด้วย แต่เมื่อเลยจุด A ไปแล้วก็จะไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจุด A จึงถูกเรียกว่า ขีดจำกัดปฏิกิริยา (Proportional limit) สำหรับเหล็กคาร์บอนจะอยู่ระหว่าง 210-350 MPa แต่ในเหล็กกล้าสูงอาจมีค่ามากกว่า 500 MPa ความชันของเส้นตรง OA คือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กมีค่าประมาณ 210 GPa

เมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัดปฏิกิริยา ความเครียดจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าเดิมทำให้ความชันลดลงจนอยู่ในแนวราบที่จุด B คือจุดคราก การครากเกิดขึ้นในช่วงจากจุด B ถึง C มีความยาวประมาณ 10-15 เท่าของช่วงอีลาสติก ในช่วงนี้เหล็กจะยืดออกโดยไม่ต้องเพิ่มแรงดึง หลังจากเกิดการครากอย่างมากแล้วเมื่อเลยจุด C เหล็กจะเริ่มเกิด ความเครียดแข็งตัว (Strain hardening) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงผลึกโครงสร้างทำให้มีความต้านทานต่อการเสียรูปทรงเพิ่มขึ้น เส้นกราฟจึงมีความชันเป็นบวกจาก C ถึง D หน่วยแรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่จุด D เรียกว่า หน่วยแรงขีดสุดหรือหน่วยแรงประลัย (Ultimate stress) หลังจากนั้นการยืดตัวต่อไปจะใช้แรงน้อยลงและขาดในที่สุดที่จุด E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อชิ้นงานทดสอบถูกยึดออก ด้านข้างก็จะหดแคบลง ผลของการลดลงของพื้นที่ยังไม่ค่อยมีผลต่อการคำนวณหน่วยแรงจนกระทั่งถึงจุด C แต่หลังจากนั้น การลดลงของพื้นที่จะเริ่มมีผลต่อเส้นความสัมพันธ์ ในช่วงหน่วยแรงขีดสุดจะเห็นการลดลงของพื้นที่ได้อย่างชัดเจน เรียกว่าเกิดคอคอดขึ้นในชิ้นงานเหล็กทดสอบ ถ้าใช้พื้นที่จริง ณ จุดคอคอดมาคำนวณหน่วยแรงจะได้เส้นความสัมพันธ์หน่วยแรง-ความเครียดจริง (เส้นประ CE' ในรูปที่ 2.2) แต่เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ถูกใช้งานที่ระดับหน่วยแรงต่ำกว่าขีดจำกัดปฏิกิริยา จึงให้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม

#### 2.2.4 การวัดความเค้นด้วยสเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจ คือเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดจากชิ้นงาน ใช้งานโดยการนำไปติดตั้งกับชิ้นงานที่ต้องการ แล้วจึงเชื่อมต่อกับวงจรวัดสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge circuit) เพื่อทำการเก็บค่าหรืออ่านค่าจากตัวสเตรนเกจ โดยวงจรวัดสโตนบริดจ์นั้นเราสามารถเลือกต่อได้หลายแบบเช่น Full Bridge, Half bridge, Quarter Bridge ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับวงจร นอกจากนี้ตัวสเตรนเกจนั้น มีอยู่หลายชนิด เช่น สเตรนเกจแบบหนึ่งแกน (Uniaxial), แบบสองแกน (Biaxial), แบบสามแกน (Triaxial) เป็นต้น ซึ่งถ้าเป็นแบบสามแกนนั้นสามารถคำนวณได้จาก Strain Transformation Equation ดังนี้

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \cos \theta_1 \sin \theta_1 \quad (2.7)$$

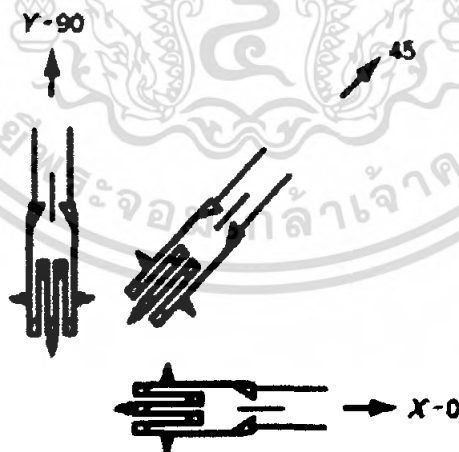
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \cos \theta_2 \sin \theta_2 \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \cos \theta_3 \sin \theta_3 \quad (2.9)$$

โดย  $\varepsilon_1$  คือ ค่าความเครียดที่เก็บค่าได้ที่ตำแหน่ง 0 องศา,  $\varepsilon_2$  คือ ค่าความเครียดที่เก็บค่าได้ที่ตำแหน่ง 45 องศา

$\varepsilon_3$  คือ ค่าความเครียดที่เก็บค่าได้ที่ตำแหน่ง 90 องศา,  $\varepsilon_x$  คือ ค่าความเครียดแกน X ดังในรูปที่ 2.3

$\varepsilon_y$  คือ ค่าความเครียดแกน Y ดังในรูปที่ 2.3 และ  $\gamma_{xy}$  คือ ค่าความเครียดเฉือนในระนาบ XY



รูปที่ 2.3 แสดงตำแหน่งแกนของสเตรนเกจแบบสามแกน (Triaxial)

## 2.2.5 ทฤษฎีการเสียหาย (Failure theories)

เราสามารถทำนายการเสียหาย (เกิดการครากแล้วหรือ แตกหัก) ของวัสดุได้ด้วยทฤษฎีดังต่อไปนี้

### 2.2.5.1 Maximum principal stress theory

### 2.2.5.2 Maximum shear stress theory

### 2.2.5.3 Distortion energy theory

ในที่นี้เราจะใช้ วิธี Distortion energy theory ซึ่งทฤษฎีนี้จะสมมุติให้พลังงานความเครียดรวมสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ Volumetric (Hydrostatic) strain energy และ Shape (Distortion or Shear) strain energy ดังนั้นพลังงานที่ทำให้เกิดการครากจะมาจากส่วนหลัง ทฤษฎีจึงกล่าวไว้ว่า “การครากจะเกิดขึ้นเมื่อ Distortion energy มีค่ามากกว่าความเค้นแรงดึงสูงสุด” และทฤษฎีนี้เป็นที่รู้จักกันในนามของค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ ดังนี้

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

## 2.2.6 ขอบเขตของปัญหาความล้า

เราสามารถจำแนกปัญหาความล้า โดยอาศัยจำนวนรอบของภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วน จนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดความเสียหายเป็นเกณฑ์ ได้เป็น 2 ช่วงคือ

### 2.2.6.1 Low-cycle fatigue (LCF)

ปัญหาความล้าในช่วงของ LCF จะหมายถึงปัญหาที่อายุความล้า หรือจำนวนรอบของภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วนจนกระทั่งเสียหายมีค่าน้อย ซึ่งหมายความว่าขนาดของภาระที่มากระทำจะต้องมีค่ามาก ดังนั้นปัญหาความล้าในช่วงของ LCF จะเกี่ยวข้องกับการคราก (Yield) ของวัสดุและแนวทางที่เหมาะสมในการเข้าถึงปัญหาก็คือ แนวทางของความเครียด

### 2.2.6.2 High-cycle fatigue (HCF)

ปัญหาความล้าในช่วงของ HCF จะถือว่าพฤติกรรมของวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic region) และแนวทางในการเข้าถึงปัญหาที่เหมาะสมก็คือแนวทางของความเค้นซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปสำหรับอายุความล้าที่แบ่งกันระหว่าง LCF และ HCF นั้น ไม่สามารถจะระบุลงไปได้อย่างชัดเจนแต่ในที่นี้จะถือว่าอายุความล้าที่แบ่งขอบเขตระหว่าง LCF และ HCF มีค่าเท่ากับ 1,000 รอบ

โดยโครงการนี้ได้เลือกใช้หลักการขอบเขตของปัญหาความล้าแบบ High-cycle fatigue (HCF) เนื่องจากขนาดของภาระที่มากระทำอยู่ในช่วงของพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic region) จึงเลือกใช้แนวทางของความเค้นในการเข้าถึงปัญหา

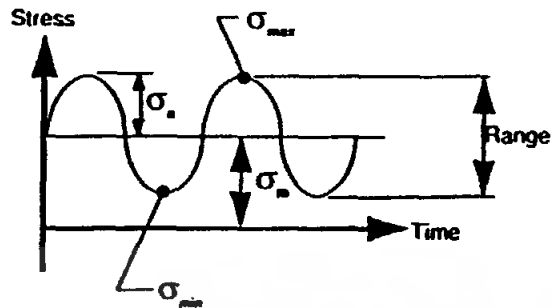
## 2.2.7 ทฤษฎีการล้า

ภาระการเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่

ภาระกระทำเป็นรอบแบบแอมพลิจูดคงที่ (Constant amplitude loading) หมายถึงภาระกระทำเป็นรอบที่มีขนาดของภาระสูงสุด และขนาดของภาระต่ำสุดคงที่ตลอดระยะเวลาที่ภาระกระทำ (ดังรูปที่ 2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุลักษณะของภาระชนิดนี้ต้องใช้ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ในการบ่งบอกลักษณะของภาระ 2 ตัว เช่น ภาระสูงสุดกับภาระต่ำสุด ภาระเฉลี่ยกับแอมพลิจูด



รูป 2.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงภาระแบบแอมพลิจูดไม่คงที่

พิสัยความเค้น ( $\Delta\sigma$ )

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.11)$$

ความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ )

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.12)$$

แอมพลิจูดความเค้น ( $\sigma_a$ )

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.13)$$

อัตราส่วนความเค้น (R)

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.14)$$

อัตราส่วนแอมพลิจูด (A)

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} \quad (2.15)$$

ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดไม่คงที่

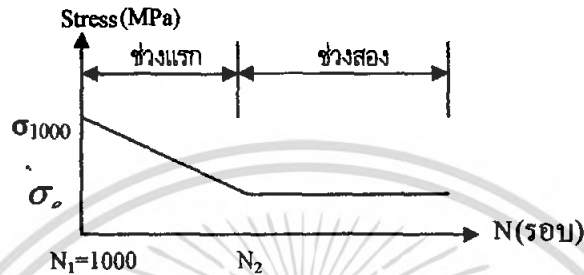
การเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดไม่คงที่ (Variable amplitude loading) คือภาระเปลี่ยนแปลงที่ขนาดของภาระสูงสุด และต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาที่ภาระกระทำ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ ดังนี้

1. ภาระเกินพิกัด และภาระต่ำกว่าพิกัด (Overload / Underload)
2. ภาระเป็นขั้น (step loading)
3. Programmed block loading
4. ภาระแบบสุ่ม (Random loading)
5. Flight-simulation loading

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เส้นกราฟความเค้น-อายุการล้า

พื้นฐานสำคัญของการเข้าถึงปัญหาความล้าโดยแนวทางของความเค้นนั้นก็คือ เส้นกราฟความเค้น-อายุการล้า (stress-life: S-N Curve) การสร้างเส้นกราฟดังกล่าวทำได้โดยนำชิ้นงานทดสอบ ณ ภาวะทดสอบที่มีค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นศูนย์ แต่มีค่าความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงต่างๆกัน จดบันทึกจำนวนรอบตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเสียหายเช่นนี้เรื่อยไป โดยทั่วไปแล้วเส้นกราฟดังกล่าวจะมีแกนตั้งเป็น “ความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง (Alternating stress)” และแกนอนเป็น “อายุความล้า (Fatigue life)”



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุการล้า (S-N Curve)

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าเส้นกราฟความเค้น-อายุ นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกมีลักษณะเป็นฟังก์ชันลด กล่าวคือเมื่อความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงอายุความล้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น (หรือในทางตรงกันข้ามเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นอายุความล้าจะลดลง) และในช่วงที่สองจะเป็นเส้นตรงราบที่มีค่าแกนตั้ง (ความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง) คงที่ และเราเรียกค่าคงที่ดังกล่าวนี้ว่า “ขีดจำกัดความทนทาน (Endurance limit)” หรือ “ขีดจำกัดความล้า (Fatigue limit)” ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $\sigma_e$  บริเวณทั้งสองถูกแบ่งด้วยจุดที่เรียกว่า “Knee point” สำหรับจุดใดๆ ที่มีอายุความล้าจำกัด ( $N < 10^6$ ) ค่า  $\sigma_e$  สามารถเรียกได้อีกอย่างว่า “Fatigue strength”

ดังนั้นจากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า แนวทางของความเค้นนั้นเหมาะสมกับปัญหา HCF ทำให้แกนราบ (อายุความล้า) มิได้มีจุดเริ่มต้นที่อายุความล้าเท่ากับศูนย์ แต่จะเริ่มที่ค่า  $N_1$  แทน ในที่นี้จะกำหนดให้  $N_1$  เท่ากับ 1,000 รอบ และแทนความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงที่อายุความล้า  $N_1$  ด้วยสัญลักษณ์  $\sigma_{1,000}$  โดยที่ค่า  $\sigma_{1,000}$  นี้สามารถประมาณได้จากค่าความต้านแรงดึงของวัสดุ สำหรับค่า  $N_2$  ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการหักมุมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ แต่โดยปกติแล้วเรานิยมใช้ค่า  $N_2$  เท่ากับ  $10^6$  รอบ

ในกรณีของวัสดุที่ไม่มี Knee point เช่น อะลูมิเนียม นั้น ที่นี้จะถือว่าวัสดุนั้นมีค่าขีดจำกัดความทนทานเท่ากับความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง ณ อายุความล้า  $N_2$  เท่ากับ  $5 \times 10^5$  รอบ

ถ้าเส้นกราฟความเค้น-อายุ ในช่วง  $N_1 < N < N_2$  สามารถประมาณได้เป็นเส้นตรงบนสเกลแบบ semi-log แล้วสมการที่ใช้แทนจุดข้อมูลด้านซ้ายมือของ Knee point จะอยู่ในรูป

$$\sigma_a = A(N)^B \quad (2.16)$$

แต่ถ้าจุดข้อมูลในช่วงเดิมสามารถประมาณได้เป็นเส้นตรงบนสเกลแบบ log-log สมการที่ใช้แทนจุดข้อมูลด้านซ้ายมือของ Knee point จะอยู่ในรูป

$$\sigma_a = A(N)^B \quad (2.17)$$

สำหรับกรณีที่  $N_1 = 1,000$  และ  $N_2 = 10^6$  รอบ ค่าคงตัว A และ B ในสมการ 2.17 ข้างบนนี้ จะหาได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ

$$A = 10^{\log\left(\frac{\sigma_{1000}^2}{\sigma_e}\right)} \quad (2.18)$$

และ

$$B = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{\sigma_{1000}}{\sigma_e}\right) \quad (2.19)$$

โดยที่สมการ (2.17) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อค่าความเค้นเฉลี่ยนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในกรณีที่ค่าความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ ( $\sigma_a$ ) ดังเช่น โครงการงานนี้ เราจะสามารถเลือกใช้ ความสัมพันธ์ของกูดแมน (Goodman) ดังนี้

$$\sigma_{a,mean \neq 0} = A \left( \frac{1 - \sigma_m}{\sigma_u} \right) N^b \quad (2.20)$$

โดย  $\sigma_m$  คือ ความเค้นเฉลี่ย และ  $\sigma_u$  คือความเค้นประลัย

### 2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบและใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อจะแก้สมการ ซึ่งเป็นการช่วยแก้ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน สามารถใช้วิเคราะห์ด้านกลศาสตร์ของแข็ง การถ่ายเทความร้อน และพลศาสตร์ อาทิเช่น การวิเคราะห์หาความเค้น การหาอายุการล้า การสั่นสะเทือนของชิ้นงาน เป็นต้น ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะจำลองรูปร่างลักษณะเดิมโดยการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้น ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) และเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (Node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงแก้ระบบสมการดังกล่าว ซึ่งจะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมน



#### รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการแบ่งออกส่วนย่อยๆ (Discretization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3.1.1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ (Discretization) โดยการสร้างรูปร่างของปัญหา (Geometry) อย่างถูกต้อง ซึ่งมีหลายวิธี อาทิเช่น

1. Direct stiffness method
2. Direct weighted residual method
3. Minimum potential energy method
4. Variational method

การแบ่งงานที่คืบนั้นอาจแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นส่วนใหญ่ๆ ก่อนแล้วค่อยแบ่งย่อยเพื่อความสวยงามของเอลิเมนต์ที่ได้ในชิ้นงาน โดยคำนึงว่าบริเวณที่มีความเค้นสูง ควรแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็ก ส่วนบริเวณถัดออกไปอาจมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ปัญหา

2.3.1.2 การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$\begin{Bmatrix} \hat{f}_{1x} \\ \hat{f}_{2x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{d}_{1x} \\ \hat{d}_{2x} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (2.23)$$

โดย  $\{f\}$  คือเมตริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ  $[k]$  คือเมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ และ  $\{d\}$  คือเมตริกซ์การกระจัดที่จุดต่อ

2.3.1.3 การแก้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เป็นระบบรวมและการกำหนดเงื่อนไขขอบ คือการรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ด้วยวิธีซูเปอร์โพสิชัน (Superposition method) โดยอาศัยหลักสมมูลของแรงที่จุดต่อเอลิเมนต์และการต่อเนื่องของโครงสร้าง ได้ดังสมการ

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (2.25)$$

$\{F\}$  คือเมตริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อของระบบ  $[K]$  คือเมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ของระบบ และ  $\{d\}$  คือเมตริกซ์การกระจัดที่จุดต่อ ซึ่ง สมการนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของ Nodal forces และ Nodal displacements ซึ่งมี Global matrix เป็นตัวแสดงความสัมพันธ์ เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากไม่ทราบค่า  $\{d\}$  ได้โดยตรงจากค่า  $[K]$  ที่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน และตัวกำหนด (Determinant) มีค่าเท่ากับศูนย์

### 2.3.2 การหาการกระจัด

การหาการกระจัดจากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ระบบรวม โดยการแก้สมการหา  $d_1, d_2, \dots, d_n$  จากสมการ (2.27) และการหาค่าความเค้นหรือความเครียดอาจเป็นอีกจุดประสงค์หนึ่งในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความเค้น ความเครียด โมเมนต์หรืออายุการถ่วง

### 2.3.3 สมการเชิงอนุพันธ์

จากความสัมพันธ์ของการกระจัดของแต่ละเอลิเมนต์ สามารถคำนวณหาแรงกระทำและความเค้นของแต่ละจุดได้ ซึ่งแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งแสดงความสมดุลในแนวแกน X, Y และ Z บนชิ้นงานสามมิติ เมื่อไม่คิดน้ำหนักของตนเองดังสมการ

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \quad (2.28)$$

โดย  $\sigma_x, \sigma_y$  และ  $\sigma_z$  แทนความเค้นในแนวแกน x, y หรือ z ตามลำดับ และ  $\tau_{xy}, \tau_{xz}$  และ  $\tau_{yz}$  แทนความเค้นเฉือน  $F_x, F_y$  และ  $F_z$  แทนแรงกระทำวัตถุในแกน x, y และ z ดังนั้นสถานะความเค้น ณ จุดใดๆ โดยค่าดังกล่าวหรือเขียนเป็น

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{เมื่อ} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2.29)$$

นอกจากสมการทางด้านความเค้นแล้ว ของแข็งนั้นมักเกิดความเครียดขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon - \epsilon_0\} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

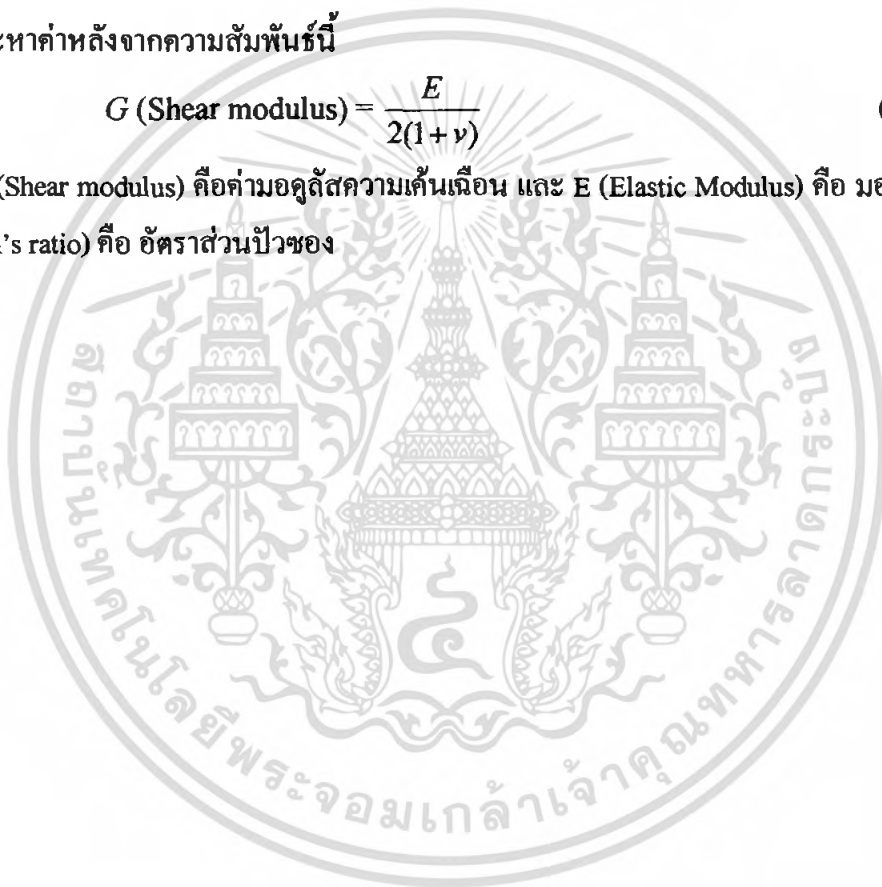
โดย  $E_0$  แทนความเครียดขั้นต้นที่อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างกัน

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

จะเห็นว่ามีค่าคงที่สองตัวที่ต้องหามาจากการทดลอง  $E$  และ  $\nu$ , Poisson's ratio (ค่าหลังนี้หายาก) แต่เราจะหาค่าหลังจากความสัมพันธ์นี้

$$G \text{ (Shear modulus)} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.32)$$

โดย  $G$  (Shear modulus) คือค่ามอดูลัสความเค้นเฉือน และ  $E$  (Elastic Modulus) คือ มอดูลัสของยัง และ  $\nu$  (Poisson's ratio) คือ อัตราส่วนปัวซอง



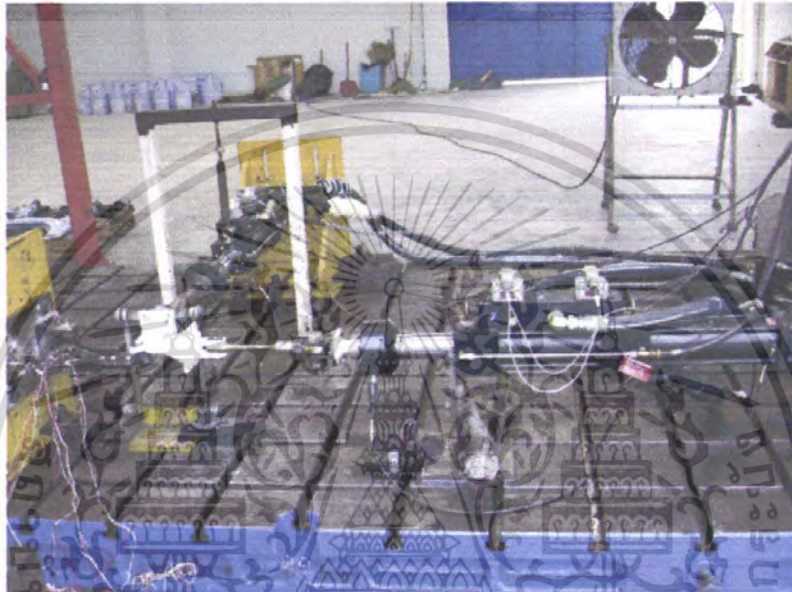
## บทที่ 3

### อุปกรณ์การทดลองและการคำนวณ

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาความเครียดของปีกนกประกอบด้วย

##### 3.1.1 เครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง

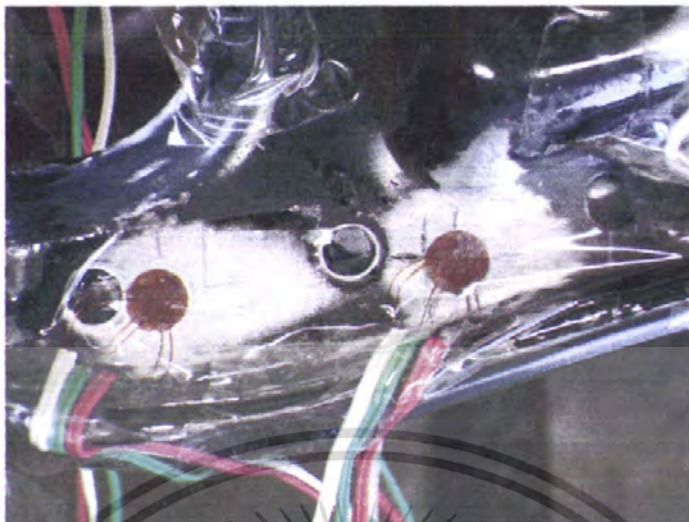
##### 3.1.2 ชุดเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ (Strain Indicator) และ เครื่องเครื่องสวิตซ์แอนด์บาลานส์ยูนิต (Switch and Balance Unit)



รูปที่ 3.2 แสดงชุดเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์และเครื่องสวิตซ์แอนด์บาลานส์ยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 สเตรนเกจ ชนิด 3 แกน คือ 0, 45, 90 องศา



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของสเตรนเกจชนิดสามแกน

### 3.1.4 เครื่องทดสอบแรงดึง ขนาด 30 ตัน



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง

## 3.2 ขั้นตอนการคำนวณ

3.2.1 นำค่าความเครียด ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณเพื่อหาค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ซึ่งเริ่มจาก การหาค่าความเค้น จากสมการ (2.6)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

3.2.2 ทำการหาค่า  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  ของสเตรนเกจจากสมการ (2.7), (2.8), (2.9) ตามลำดับ

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \cos \theta_1 \sin \theta_1$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \cos \theta_2 \sin \theta_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \cos \theta_3 \sin \theta_3$$

ซึ่งค่า  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  หาได้จากการทดลอง

3.2.3 หาค่า  $\tau_{xy}$  จากสมการ  $\tau_{xy} = G\gamma$  ; โดยที่ค่า  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

3.2.4 หาค่า  $\sigma_{von}$  (ความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress)) จากสมการ (2.10)

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

3.2.5 หาอายุการล้า จากสมการ (2.12), (2.13) และ (2.20)

$$\sigma_{a,mean \neq 0} = A \left( \frac{1 - \sigma_m}{\sigma_u} \right) N^b$$

### 3.3 ตัวอย่างการคำนวณ

จากการทดลองที่ 1 ของจุดที่ติดตั้งสเตรนเกจ จุดที่ 4 จากรูปที่ 4.10 ในบทที่ 4 วิธีการทดลอง โดยกำหนดค่าต่างๆที่ต้องใช้ ดังนี้

แกน	0°	45°	90°
$\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-448	-340	-95

ให้ค่า  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$

หาค่าความเค้น (Stress) จากสมการ (2.6)

แกน 0°;  $\sigma = E \cdot (\varepsilon \times k)$  ; k = ค่าปรับแก้

$$\sigma = (210 \cdot 10^9) (-448 \times 10^{-6} \times 1.02106)$$

$$\sigma = -96.06 \text{ MPa}$$

แกน 45°;  $\sigma = (210 \cdot 10^9) (-340 \times 10^{-6} \times 1.02106)$

$$\sigma = -72.90 \text{ MPa}$$

แกน 90°;  $\sigma = (210 \cdot 10^9) (-95 \times 10^{-6} \times 1.02106)$

$$\sigma = -20.37 \text{ MPa}$$

หาค่า  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  จากสมการ (2.7), (2.8), (2.9) ตามลำดับ

แกน 0°;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \cos \theta_1 \sin \theta_1$

$$-457.43488 = \varepsilon_x (\cos^2(0)) + \varepsilon_y (\sin^2(0)) + \gamma_{xy} (\cos(0) \sin(0))$$

$$-457.43 = \varepsilon_x (1) + \varepsilon_y (0) + \gamma_{xy} (1)(0)$$

$$\varepsilon_x = -457.43 \quad \mu(\text{mm} / \text{mm})$$

แกน 45°;  $\varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \cos \theta_3 \sin \theta_3$

$$-347.1604 = \varepsilon_x (\cos^2(90)) + \varepsilon_y (\sin^2(90)) + \gamma_{xy} (\cos(90) \sin(90))$$

$$-347.1604 = \varepsilon_x (0) + \varepsilon_y (1) + \gamma_{xy} (0)(1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= -347.16 && \mu(\text{mm/mm}) \\ \text{แกน } 90^\circ; & \varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \cos \theta_2 \sin \theta_2 \\ -97.0007 &= \varepsilon_x (\cos^2(45)) + \varepsilon_y (\sin^2(45)) + \gamma_{xy} (\cos(45) \sin(45)) \\ \gamma_{xy} &= 305.30 && \mu(\text{mm/mm}) \end{aligned}$$

หาค่า  $\tau_{xy}$  จาก

$$\tau_{xy} = G\gamma$$

หาค่า G จากสมการ (2.32) ;  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

$$G = \frac{210 \cdot 10^9}{2(1+0.3)}$$

$$G = 80.77 \quad \text{GPa}$$

$$\therefore \tau_{xy} = (80.76923077 \cdot 10^9) \times (305.29694 \cdot 10^{-6})$$

$$\therefore \tau_{xy} = 24.66 \quad \text{MPa}$$

ดังนั้นเราสามารถหาค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ได้จากสมการ (2.10) ดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma_{von} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \\ \therefore \sigma_{von} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(-96.06 + 20.37)^2 + (-20.37 - 0)^2 + (0 + (-96.06))^2 + 6[(24.66)^2 + 0 + 0]} \\ \sigma_{von} &= 89.387 \quad \text{MPa} \end{aligned}$$

$\therefore$  ความเค้นที่ได้ที่จุด 4 ของการทดลองที่ 1 (กดในแนวแกน x และแนวแกน y) มีค่า 89.387 MPa การคำนวณหาอายุการล้า

จาก  $\sigma_{a, mean=0} = A \left( \frac{1 - \sigma_m}{\sigma_u} \right) N^b$

ค่า  $\sigma_a$  และ  $\sigma_m$  จาก  $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$        $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

โดยจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดมีค่า 290.561 MPa และความเค้นต่ำสุด 0 MPa จึงได้

$$\sigma_a = \frac{290.561 - 0}{2} = 145.2805 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{290.561 + 0}{2} = 145.2805 \quad \text{MPa}$$

ค่า A = 1309 และ b = -0.113 จากค่าคุณสมบัติของชิ้นงาน และแทนค่าได้

$$145.2805 = 1309 \left( \frac{1 - 145.2805}{445} \right) N^{-0.113}$$

$$\log N = \log 0.16478$$

$$N \approx 8,510,915 \quad \text{รอบ}$$

ดังนั้น อายุการล้าของชิ้นงานมีค่า 8,510,915 รอบ

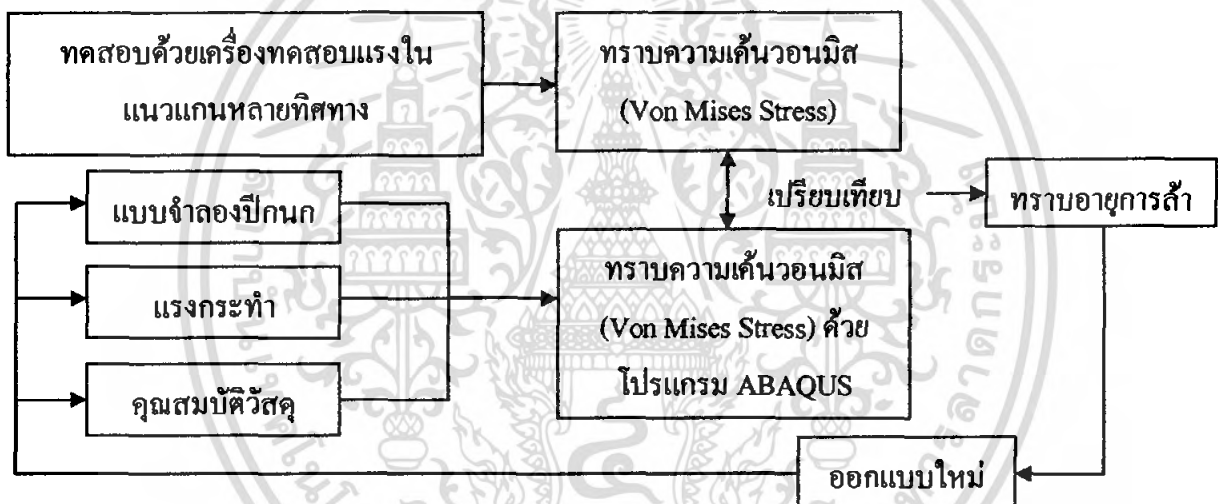
## บทที่ 4

### วิธีการทดลอง

การทดลองประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1. การวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 2. ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง 3. เปรียบเทียบผลการจำลองและทดลอง 4. ออกแบบใหม่และวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 5. เปรียบเทียบผลการออกแบบใหม่กับชิ้นงานเดิม

#### 4.1 การวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

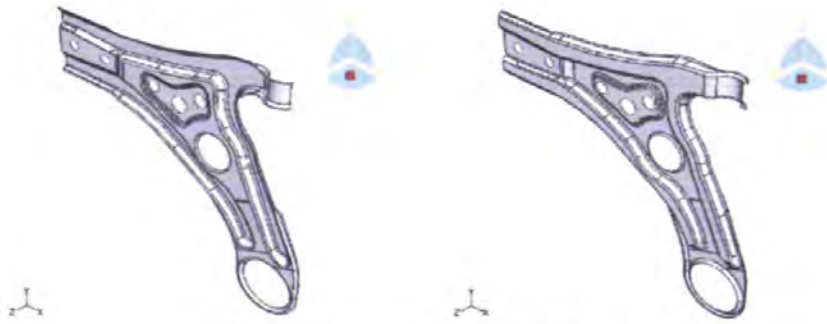
การวิเคราะห์หาความเค้นของแบบจำลองปีกนกด้วยโปรแกรม ABAQUS มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 4.1.1 การสร้างหรือการนำแบบจำลองของชิ้นงานสู่โปรแกรม

การนำแบบจำลองมาสู่โปรแกรมนั้นสามารถนำเข้ามาได้หลายนามสกุล อาทิเช่น ACIS file (\*.sat), IGES file (\*.igs, \*.iges), Step file (\*.step, \*.stp), Catia V4 file (\*.model) หรือ Parasolid (\*.x\_t) เป็นต้น โดยปีกนกนี้มีนามสกุล \*.x\_t จำนวนสองชิ้นที่มีลักษณะสมมาตรกันทุกประการ แล้วนำรวมกันกลายเป็นชิ้นเดียวกัน



รูปที่ 4.2 ชิ้นปีกนกต่างที่นำเข้ามาด้วยนามสกุล \*.x\_t

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นปีกนกชนิด JIS G3113 SAPH440

Young's modulus (GPa)	210
Tensile strength (MPa)	445
Yield strength (MPa)	306
Elongation (%)	40.3
Fatigue strength coefficient, $A$	1309
Fatigue strength exponent, $b$	-0.113
Chemical composition	P<0.04, S<0.04

#### 4.1.2 การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นงานให้แก่แบบจำลอง

การกำหนดลักษณะของวัสดุ ต้องถูกกำหนดให้แก่ชิ้นงาน เป็นการแสดงรายละเอียดวัสดุของชิ้นงานเช่นความยืดหยุ่นของวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ หรือการนำความร้อน เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์ปีกนกนี้คือชิ้นปีกนกต่าง ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.1

#### 4.1.3 การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์ให้แก่แบบจำลอง

จากการวิเคราะห์แบบจำลองนั้น เป็นการจำลองแรงกระทำลงที่ คังนั้นผู้ทำการทดสอบต้องกำหนดลักษณะของการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.3

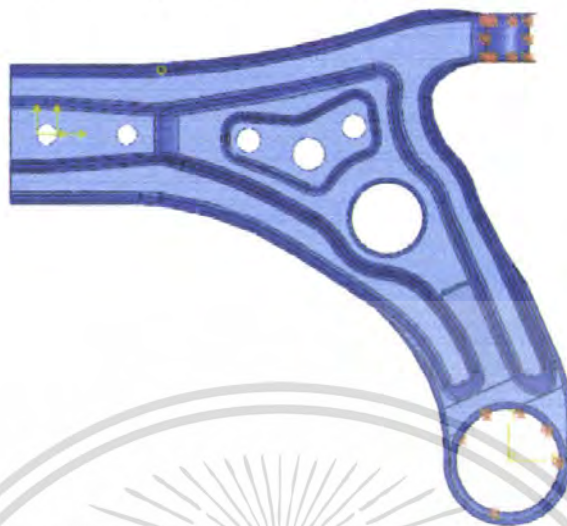


รูปที่ 4.3 การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์ให้แก่แบบจำลองปีกนก

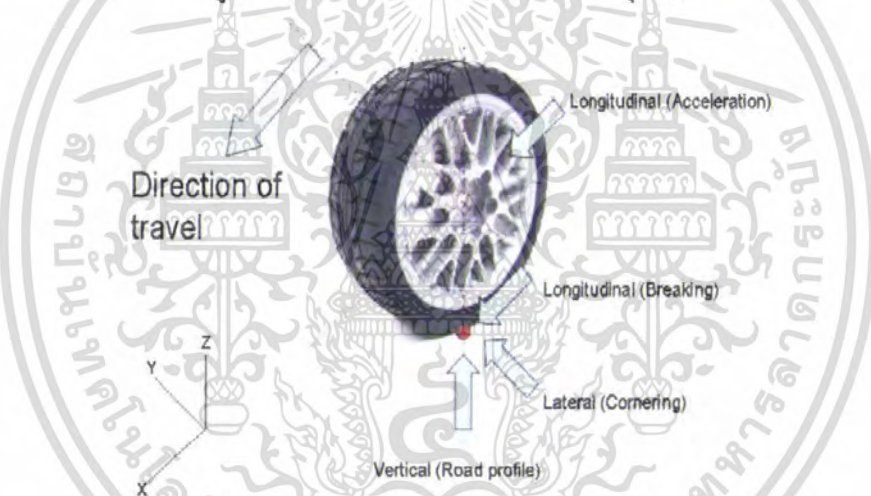
#### 4.1.4 การกำหนดภาระกระทำและเงื่อนไขขอบให้แก่แบบจำลอง

แรงกระทำที่กระทำต่อปีกนกนี้มี 2 แนวแกนได้แก่แนวแกน X เป็นแรงในการเร่งและแรงในการห้ามล้อ และแนวแกน Y (ดังรูปที่ 4.5) เป็นแรงในการเลี้ยว จึงจำลองแรงกระทำเป็นแรงกระทำคงที่ โดยมีขนาด 8000 นิวตัน ในแกน X และ 6000 นิวตัน ในแกน Y ซึ่งรวมมีขนาด 10 กิโลนิวตัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีทั้งแรงกด และแรงดึง จึงรวมได้เป็น 4 ผลการทดลองและกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) เป็นการกำหนดลักษณะจุดยึด 2 บริเวณ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การกำหนดแรงกระทำ และจุดยึด



รูปที่ 4.5 แรงกระทำต่อล้อ

#### 4.1.5 การสร้างเอลิเมนต์

กำหนดชนิดเอลิเมนต์ให้เป็นเอลิเมนต์เชิงเส้นสามมิติลักษณะสี่เหลี่ยมชนิดแผ่นบาง และส่วนที่ไม่สามารถเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมได้ ให้เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแทน

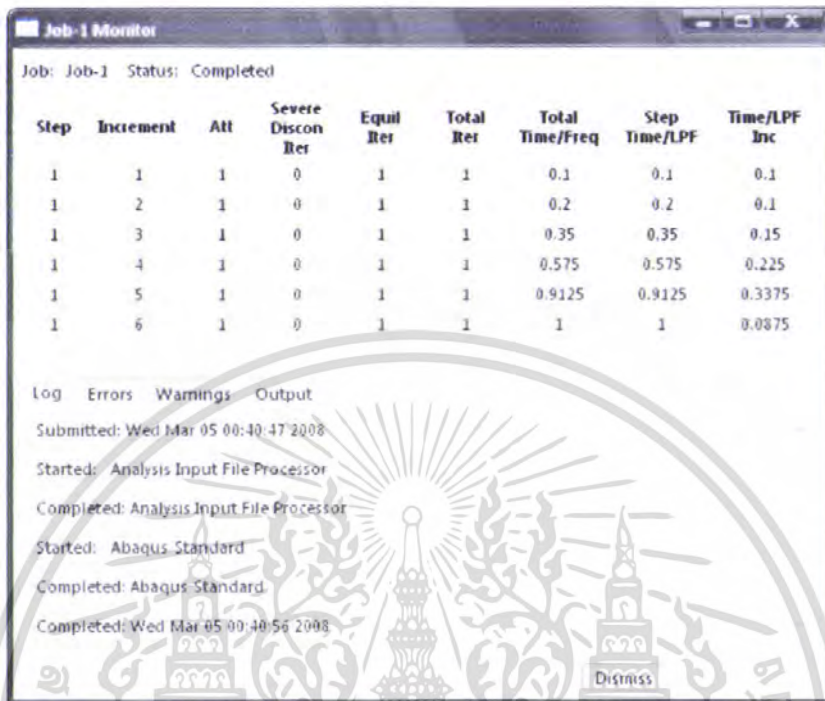
ตารางที่ 4.2 ลักษณะและปริมาณเอลิเมนต์

1 <sup>st</sup> Order Linear Shell Element	
Total Nodes	35399
Total Element	34934
Thickness (mm)	1.8

#### 4.1.6 การดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการประมวลผลโดยระยะเวลาจะขึ้นอยู่กับการแบ่งขนาดของเอลิเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแบบจำลองและประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองจากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวข้างต้น และเราสามารถเลือกฟังก์ชัน Monitoring เพื่อเฝ้าดูการวิเคราะห์ขณะทำการวิเคราะห์ได้เช่นกัน



Job: Job-1 Status: Completed

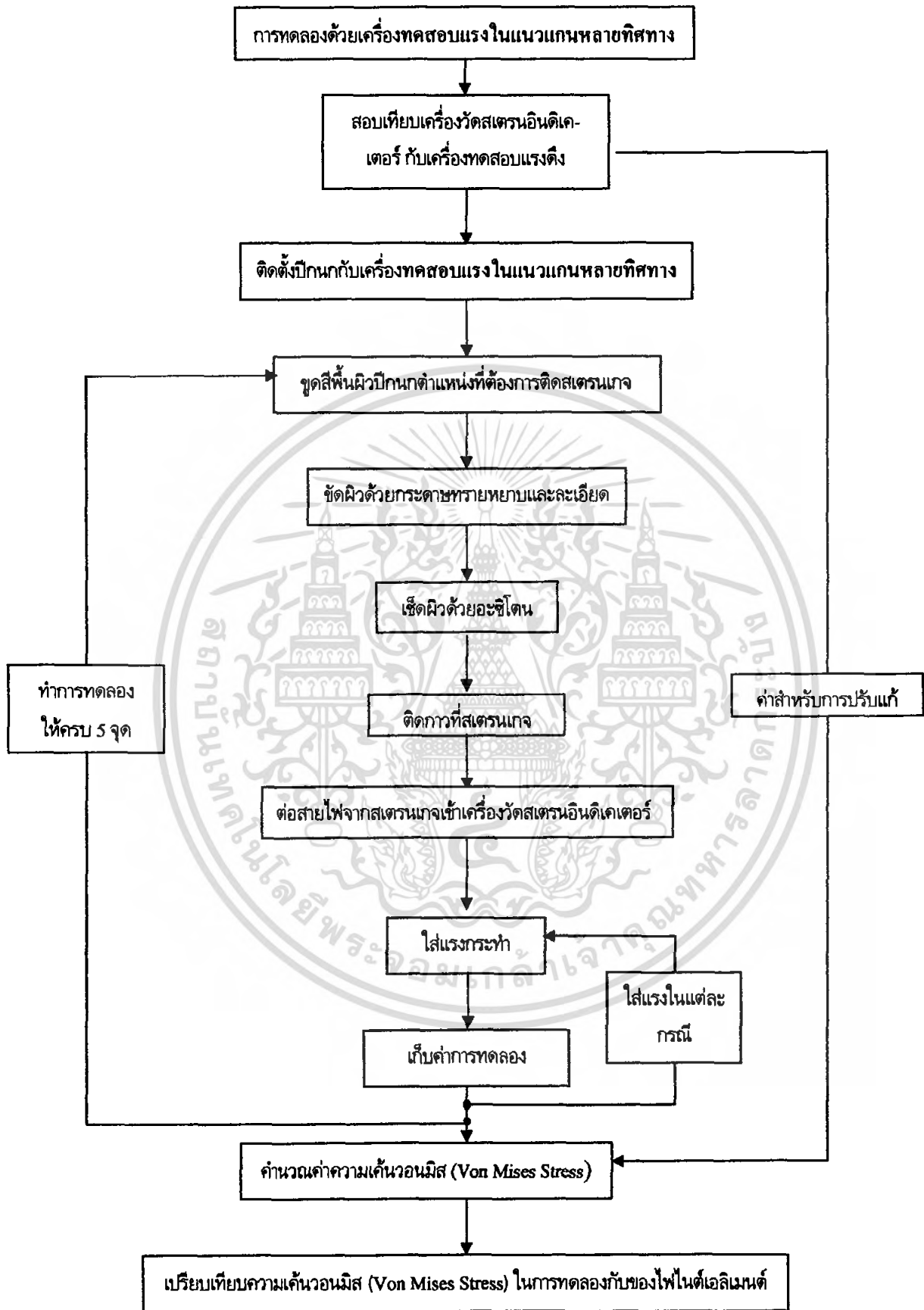
Step	Increment	Att	Severe Discon Rer	Equil Rer	Total Rer	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	1	1	0.1	0.1	0.1
1	2	1	0	1	1	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	1	1	0.35	0.35	0.15
1	4	1	0	1	1	0.575	0.575	0.225
1	5	1	0	1	1	0.9125	0.9125	0.3375
1	6	1	0	1	1	1	1	0.0875

Log Errors Warnings Output  
 Submitted: Wed Mar 05 00:40:47 2008  
 Started: Analysis Input File Processor  
 Completed: Analysis Input File Processor  
 Started: Abaqus Standard  
 Completed: Abaqus Standard  
 Completed: Wed Mar 05 00:40:56 2008

รูปที่ 4.6 การแสดงสถานะของการวิเคราะห์แบบจำลอง

#### 4.2. การทดสอบปีกนก

การทดสอบปีกนกเพื่อต้องการวัดค่าความเครียดในจุดต่างๆ ของปีกนกโดยการใช้เครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง ซึ่งเครื่องนี้สามารถตั้งค่าแรงกระทำได้ โดยมีแรงกระทำผ่านกระบอกสูบไฮดรอลิกที่มีอยู่ 2 กระบอก จัดวางตัวในแนวแกน X และ Y เป็นตัวใส่แรงกระทำ (Actuator) ให้กับชิ้นงาน โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ขั้นตอนการติดตั้งปีกนกกับเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง

##### 4.2.1.1 ติดตั้งปีกนกเข้ากับเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง



รูปที่ 4.8 การติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง

4.2.1.2 การตั้งค่าแรงที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจากการเก็บค่าการทดสอบขับรถบนถนนจริงสามารถนำมาใช้หาค่าแรงกระทำสูงสุดในแต่ละแกนได้จากโปรแกรม RPC Pro โดยที่แรงสูงสุดในแนวแกน X จะเท่ากับ 8 กิโลนิวตัน และแรงสูงสุดในแนวแกน Y เท่ากับ 6 กิโลนิวตัน จากนั้นตั้งค่าแรงในโปรแกรม ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง คือ

1. การทดสอบแรงกดทั้งในแกน X และ Y
2. การทดสอบแรงกดในแกน X และแรงดึงในแกน Y
3. การทดสอบแรงดึงในแกน X และแรงกดในแกน Y
4. การทดสอบแรงดึงทั้งในแกน X และ Y

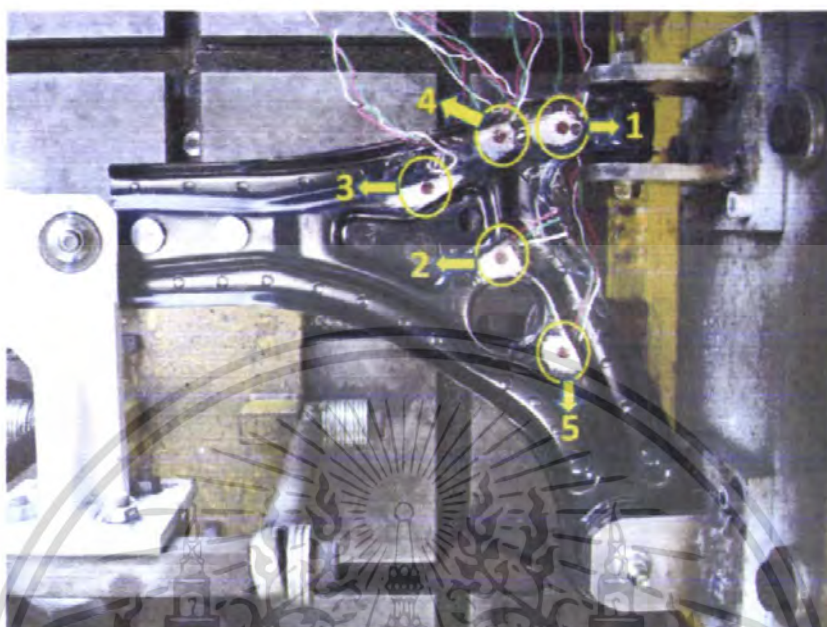
Meters 1 < Robin_2Channel.cfg >	
Ch 1 Load	
▲	6.019 kN
▼	6.019 kN
Ch 2 Load	
▲	7.990 kN
▼	7.990 kN
Ch 1 Stroke	
▲	16.12 mm
▼	16.12 mm
Ch 2 Stroke	
▲	12.34 mm
▼	12.34 mm

รูปที่ 4.9 หน้าจอสำหรับการติดตั้งแรงที่กระทำกับชิ้นงานเพื่อส่งไปยังกระบอกสูบทั้งสองตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การติดตั้งสเตรนเกจ

ในการทดลองนี้จะใช้สเตรนเกจ ชนิดสามแกนมี เกจแฟคเตอร์(Gauge Factor) เท่ากับ 2.06 ซึ่งนำมาติดตั้งบนปีกนกทั้งหมด 5 จุดดังรูปที่ 4.10 และมีขั้นตอนการติดตั้งดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งในการติดสเตรนเกจ

4.2.2.1 ทำการชุบผิวชิ้นงานในส่วนที่จะทำการติดสเตรนเกจ ให้สีที่เคลือบหลุดออก และให้มองเห็นเนื้อเหล็กจริง



รูปที่ 4.11 การชุบสีบนชิ้นงานก่อนการติดสเตรนเกจ

4.2.2.2 นำกระดาษทรายแบบหยาบ (Number 320) มาขัดบริเวณที่ทำการชุบผิวงาน แล้วนำกระดาษทรายแบบละเอียด (Number 400) มาขัดซ้ำอีกที เพื่อให้พื้นผิวมันเรียบไม่ขรุขระหรือเป็นรอยขีดลึกลงจากขั้นตอนแรกทำการชุบสีออก และเพื่อให้สเตรนเกจสัมผัสกับเนื้อเหล็กได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

4.2.2.3 ทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานในบริเวณที่ต้องการติด หลังการขัดจากกระดาษทราย ด้วยสารอะซิโตน (Acetone) เพื่อให้ผิวนั้นปราศจากฝุ่นละอองและเศษต่างๆ

4.2.2.4 ติดสเตรนเกจที่ชิ้นงาน โดยหยดกาวลงบนสเตรนเกจก่อนแล้วจึงวางลงบนชิ้นงาน ตรงจุดที่ต้องการติดตั้ง แล้วนำแผ่นพลาสติกใสมาวางทับลงบนสเตรนเกจแล้วใช้นิ้วมือออกแรงกด เพื่อให้สเตรนเกจสัมผัสกับชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำเทปกาวยใสมาปิดโดยไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้น

4.2.2.5 นำสายไฟของสเตรนเกจมาต่อกับเครื่องสวิตช์แอนคัลบาลานส์ยูนิต แบบ Quarter Bridge โดยเครื่องสวิตช์แอนคัลบาลานส์ยูนิต นี้จะเชื่อมต่อกับเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ซึ่งใช้อ่านค่าความเครียด (หน่วยเป็น  $\mu$  (mm/mm)) ดังรูปที่ 4.13 และตั้งค่า เกจแฟกเตอร์ (Gauge Factor) เท่ากับ 2.06



รูปที่ 4.13 การติดตั้งของชุดเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ และ เครื่องสวิตช์แอนคัลบาลานส์ยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 การเก็บค่าการทดลอง

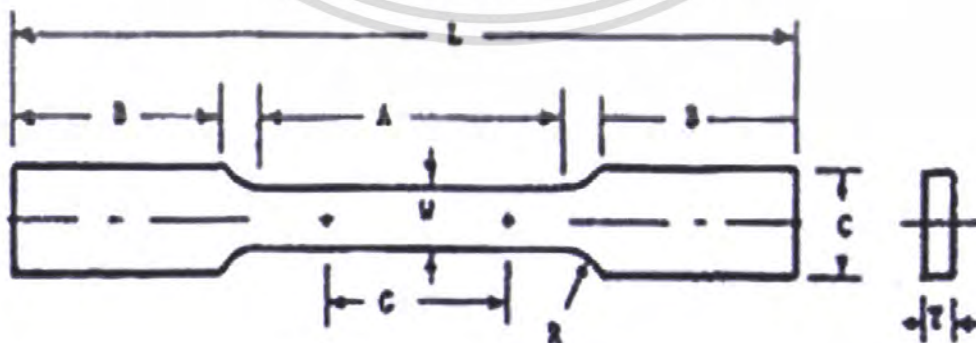


รูปที่ 4.14 แสดงค่าความเครียดที่สามารถอ่านได้บนหน้าจอแสดงผล

เมื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจ เสร็จสิ้น จะเริ่มทำการใส่แรงกระทำตามที่ได้ตั้งค่าไว้ทั้ง 4 กรณีตามลำดับ โดยการทดลองนี้จะเป็นแรงคงที่ (Static) โดยกระบอกสูบทำการกดและดึงค้างไว้ ซึ่งเราสามารถเก็บค่าที่ได้จากหน้าจอแสดงผลของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ แต่เนื่องจากหน้าจอแสดงผลสามารถแสดงผลได้เพียงค่าเดียว แต่เนื่องจากสเตรนเกจที่นำมาใช้นั้นเป็นชนิด 3 แกน จึงต้องใช้ 3 ช่อง (Channel) ในการติดตั้ง ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนช่อง (Channel) เพื่ออ่านและเก็บค่าความเครียดในแต่ละแกน

### 4.2.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัดสเตรนอินดิเคเตอร์

การสอบเทียบเครื่องมือวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ นี้จะทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าความเครียดของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ กับค่าความเครียดของเครื่องวัดทดสอบแรงดึง ซึ่งการทดลองจะเป็นไปตามรูปแบบการทดสอบมาตรฐาน ASTM E8 หรือ Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials โดยเหล็กที่ใช้ทดสอบจะมีรูปร่าง และขนาด ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 รูปร่างของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8

Dimension					
		Specimen A			
		Standard		Alternative	
		in.	mm.	in.	mm.
G	Gage length	2.000 ± 0.010	50 ± 0.250	1.000 ± 0.005	25 ± 0.130
W	Width(Notes 1 and 2)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.250	0.500 ± 0.010	12.500 ± 0.025
T	Thickness	Thickness of material		Thickness of material	
R	Radius of fillet, min.	0.5	13	0.5	13
L	Overall length, min.	8	200	7.25	180
A	Length of reduced section, min	3	75	2.25	60
B	Length of grip section, min	2	50	2	50
C	Width of grip section, approximate	0.75	20	0.75	20

เราทำการติดตั้งเหล็กทดลองกับเครื่องทดสอบแรงดึง โดยมีการติดตั้งตรงแกนที่เหล็กทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

4.2.4.1 ติดตั้งชิ้นงาน (ที่มีสเตรนเกจติดอยู่) กับเครื่องทดสอบ

4.2.4.2 กำหนดคุณสมบัติและขนาดต่าง ดังนี้

ความหนา 12 มิลลิเมตร

ความกว้าง 11.8 มิลลิเมตร

กำหนดระยะยึดสูงสุดที่ต้องการ 20 มิลลิเมตร

กำหนดช่วงของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหัก (Fracture) = 6500 นิวตัน

Gauge Range = 50 ± 0.25 มิลลิเมตร

ความเร็วในการดึง 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที

เลือกผลลัพธ์ ดังนี้ Upper yield strength, Maximum stress, Elastic modulus, Stress, Shear Stress, Strain, Shear Strain

4.2.2.3 ทำการดึงชิ้นทดสอบจริงและเก็บค่า โดยดึงจนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน

4.2.2.4 หยุดเครื่อง และนำชิ้นงานออก

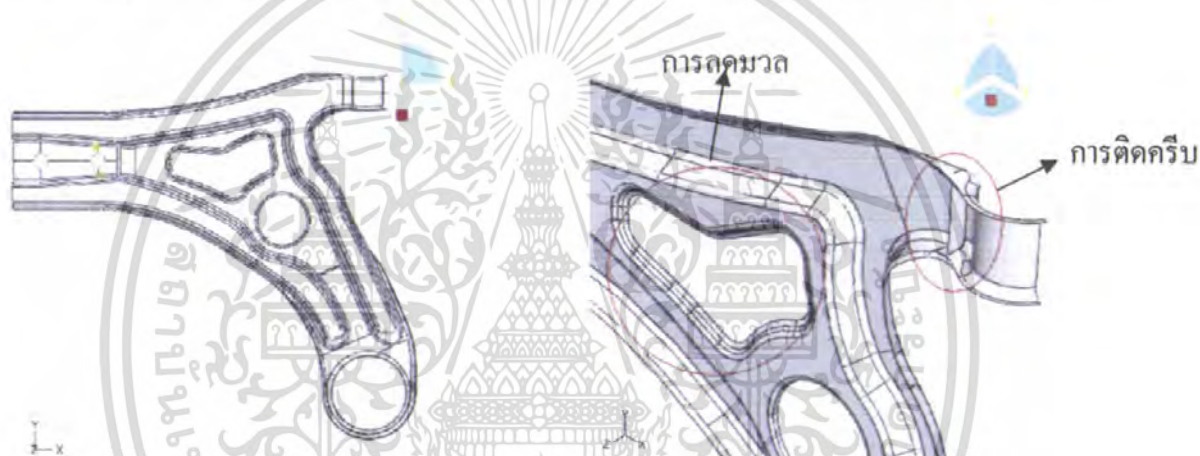
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเริ่มทำการดึงหน้าจอแสดงผลของเครื่องทดสอบแรงดึง จะแสดงค่าแรง, ระยะยืดและกราฟที่ดำเนินไป ส่วนเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ก็จะแสดงค่าความเครียด (หน่วยเป็น  $\mu(mm/mm)$ ) ทำการเก็บค่าจนกระทั่งถึงจุดสุดท้ายนั่นคือ เหล็กเกิดการแตกหัก แล้วนำค่าความเครียดที่ได้จากเครื่องทดสอบของเครื่องทดสอบแรงดึง และเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ มาเปรียบเทียบกับเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด ของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์

### 4.3 แนวทางในการปรับปรุงความทนทาน

#### 4.3.1 การออกแบบจำลองสามมิติ ด้วยโปรแกรม Unigraphics

การออกแบบใหม่เพื่อเพิ่มอายุการถ้่า โดยพิจารณาตำแหน่งที่มีความเค้นมากที่สุด ด้วยการเพิ่มครีบริดจรูปที่ 4.16 เพื่อการกระจายความเค้น และลดมวลที่เกิดกับชิ้นงานในบริเวณที่มีความเค้นน้อยหรือตำแหน่งที่แรงกระทำส่งผลกระทบต่อชิ้นงานได้น้อย ซึ่งจะ ไม่มีผลต่อการเสียหายของชิ้นงาน



รูปที่ 4.16 แบบจำลองใหม่หลังการปรับปรุง

#### 4.3.2 การวิเคราะห์หาความเค้นและอายุการถ้่า

การวิเคราะห์หาความเค้น โดยทำตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.1 ด้วยแรงกระทำและจุดยึดเดียวกัน และคำนวณอายุการถ้่า เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุง

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถพิจารณา และเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง จากนั้นนำจุดที่มีค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) สูงสุดมาทำการออกแบบใหม่เพื่อลดค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) โดยพิจารณาเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

#### 5.1 ผลการทดลองจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 5.1.1 การทดลองที่ 1

การทดลองโดยใส่แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตันในแกน Y ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.1

##### 5.1.2 การทดลองที่ 2

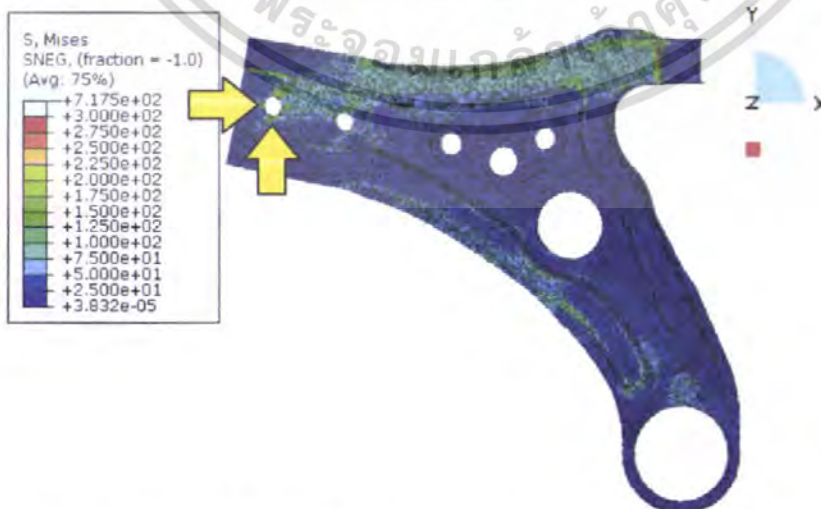
การทดลองโดยใส่แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตันในแกน Y ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.2

##### 5.1.3 การทดลองที่ 3

การทดลองโดยใส่แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตันในแกน Y ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.3

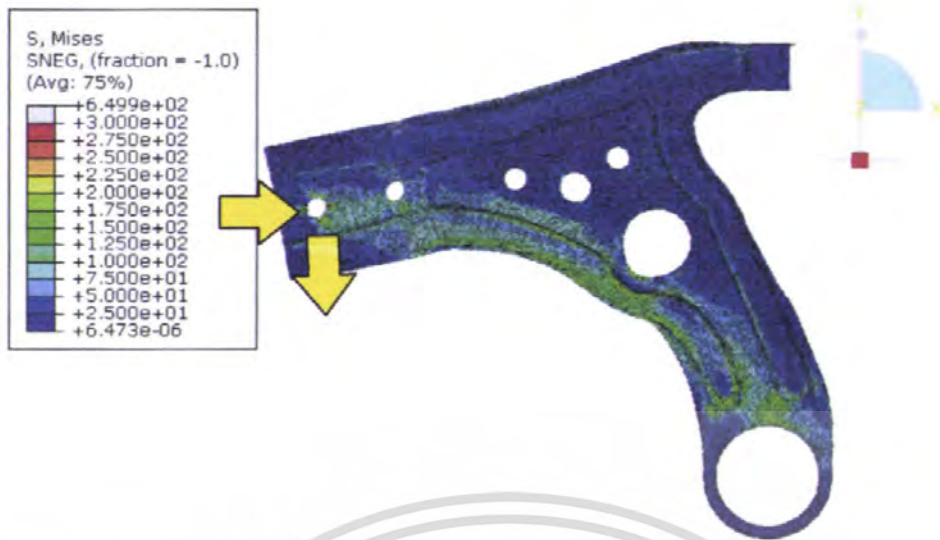
##### 5.1.4 การทดลองที่ 4

การทดลองโดยใส่แรงกด 8 กิโลนิวตัน ในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตัน ในแกน Y ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.1 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกต่าง การทดลองที่ 1

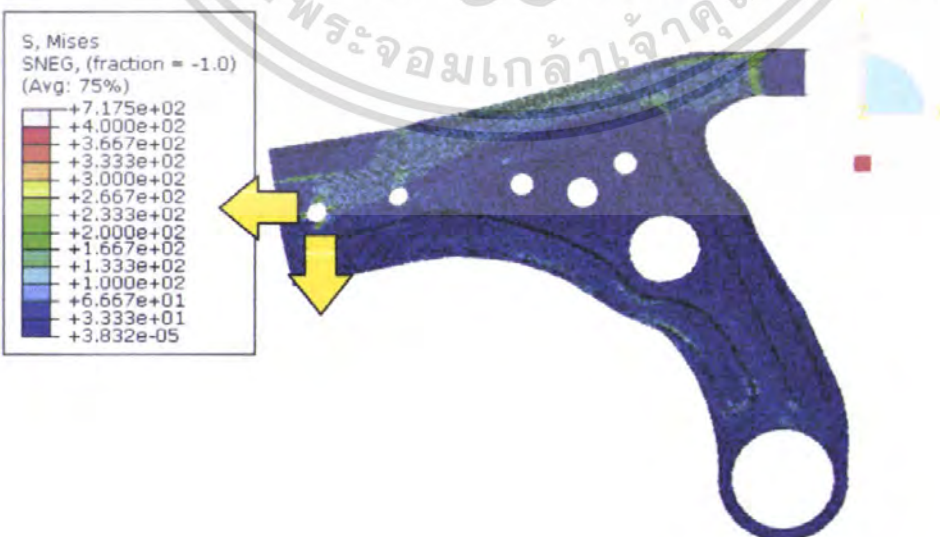
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลาง การทดลองที่ 2



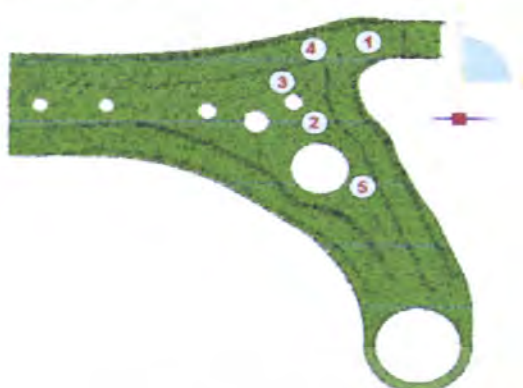
รูปที่ 5.3 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลาง การทดลองที่ 3



รูปที่ 5.4 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลาง การทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการทดลองจากเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง



รูปที่ 5.5 ตำแหน่งการติดเซนเซอร์บนแบบจำลองปีกนกทั้ง 5 จุด

จากการทดสอบปีกนก สามารถทราบค่าความเครียดได้จากเครื่องสเตรนอินดิเคเตอร์ ด้วยสเตรนเกจชนิดสามแกน ได้แก่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  ที่ตำแหน่งทั้ง 5 บนปีกนก ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งทำให้ค่าความเครียดจากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลความเครียดในแต่ละตำแหน่ง ของการติดเซนเซอร์จากเครื่องสเตรนอินดิเคเตอร์ของชิ้นปีกนกต่างมุมมองและแรงกระทำตามการทดลองกรณีที่ 1, 2, 3, 4

องศา	จุดที่	ค่าความเครียด ( $\mu$ (mm/mm))			
		การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3	การทดลองที่ 4
$0^\circ$	1	-251	32	15	181
	2	53	-54	38	-45
	3	-274	104	-41	219
	4	-448	120	-18	370
	5	-99	196	-117	72
$45^\circ$	1	-73	75	-32	54
	2	99	-148	109	-81
	3	-61	27	-2	44
	4	-340	80	-42	252
	5	-39	84	-49	31
$90^\circ$	1	98	20	-12	-42
	2	54	-83	60	-38
	3	102	102	29	91
	4	-95	-95	-143	47
	5	20	20	11	-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลการสอบเทียบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

จากการสอบเทียบเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง จะได้ผลดังตารางที่ 5.2 ซึ่งเป็นการเทียบค่าความเครียดระหว่างเครื่องทั้งสอง

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความผิดพลาดของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

ค่าความเครียดที่ได้จาก เครื่องสเตรนอินดิเค- เตอร์ ( $\mu$ (mm/mm))	ค่าความเค้นที่ได้จาก เครื่องทดสอบแรงดึง (MPa)	ค่าความเครียด เปรียบเทียบ ( $\mu$ (mm/mm))	ค่าความ ผิดพลาด (%)
13	3.744	18.441	29.505
20	5.367	26.438	24.351
305	62.853	324.397	5.979
520	107.133	527.746	1.468
681	139.691	688.124	1.035
838	172.034	847.453	1.112
1011	207.203	1020.698	0.951
1172	241.339	1188.855	1.418
1309	273.339	1346.490	2.784

$$\text{ดังนั้น ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย} = \frac{5.979 + 1.468 + 1.035 + 1.112 + 0.95 + 1.418 + 2.784}{7} = 2.107\%$$

หมายเหตุ ค่าความผิดพลาด 29.505%, 24.351% นั้นไม่ได้นำมาคิดรวมเนื่องจาก ช่วงเริ่มการทดลอง การจับชิ้นงาน ไม่กระชับมีผลทำให้เกิดการไถล (Slip) ซึ่งนับเป็นความผิดพลาดของเครื่องทดสอบแรงดึง เนื่องจากทราบค่าความผิดพลาดของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ จึงสามารถทำการปรับแก้ค่าความเครียดจากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง ได้ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความเครียดปรับแก้ของทุกตำแหน่งในการทดลองทั้ง 4 กรณี

องศา	จุดที่	ค่าความเครียดปรับแก้ ( $\mu$ (mm/mm))			
		การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3	การทดลองที่ 4
0°	1	-256.291	32.674	15.316	184.812
	2	54.122	-55.137	38.800	-45.948
	3	-279.778	106.190	-41.864	223.613
	4	-457.432	122.527	-18.379	377.792
	5	-101.081	200.128	-119.464	73.516
45°	1	-74.542	76.580	-32.674	55.137
	2	101.081	-151.117	111.296	-82.706
	3	-62.280	27.569	-2.042	44.927
	4	-347.167	81.685	-42.885	257.307
	5	-39.826	85.769	-50.032	31.653
90°	1	100.060	20.421	-12.253	-42.885
	2	55.141	-84.748	61.264	-38.800
	3	104.155	104.150	-29.611	-92.917
	4	-97.001	-97.004	-146.012	47.990
	5	20.428	20.420	11.232	-10.211

#### 5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองจากทฤษฎีและปฏิบัติ

การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) และอายุการถ้ำของการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง กับการจำลอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละการทดลอง สามารถแสดงได้เป็นกราฟแห่งดังต่อไปนี้

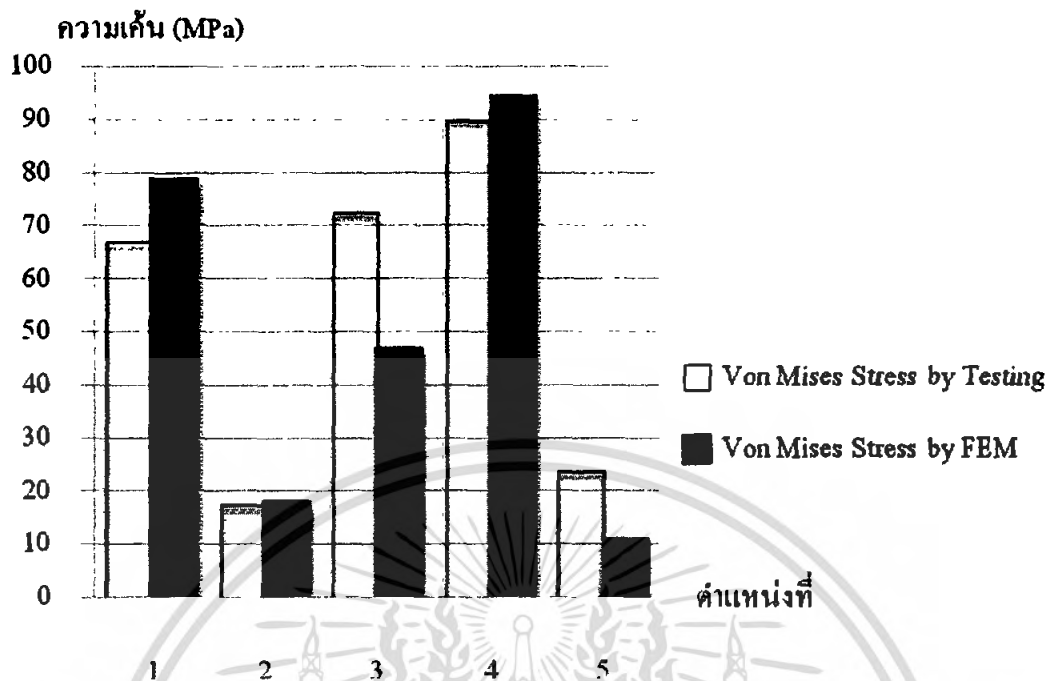
##### 5.4.1 ผลการเปรียบเทียบความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ณ ตำแหน่งต่างๆ

5.4.1.1 การทดลองที่ 1 แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตันในแกน Y ดังรูปที่ 5.6

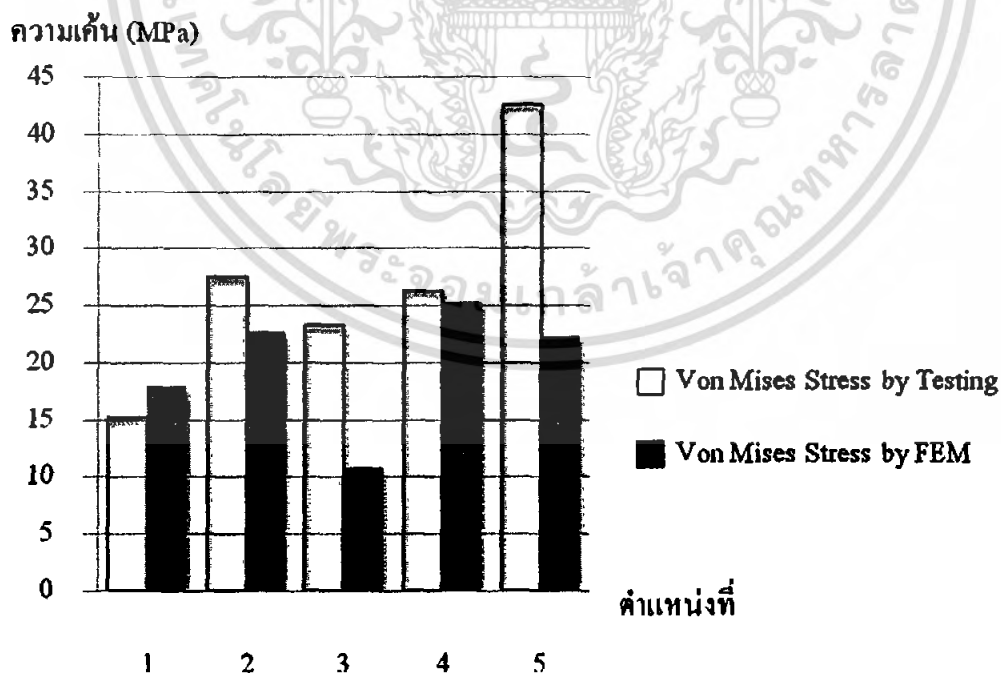
5.4.1.2 การทดลองที่ 2 แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงดึง 6 กิโลนิวตันในแกน Y ดังรูปที่ 5.7

5.4.1.3 การทดลองที่ 3 แรงดึง 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตันในแกน Y ดังรูปที่ 5.8

5.4.1.4 การทดลองที่ 2 แรงดึง 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงดึง 6 กิโลนิวตันในแกน Y ดังรูปที่ 5.9

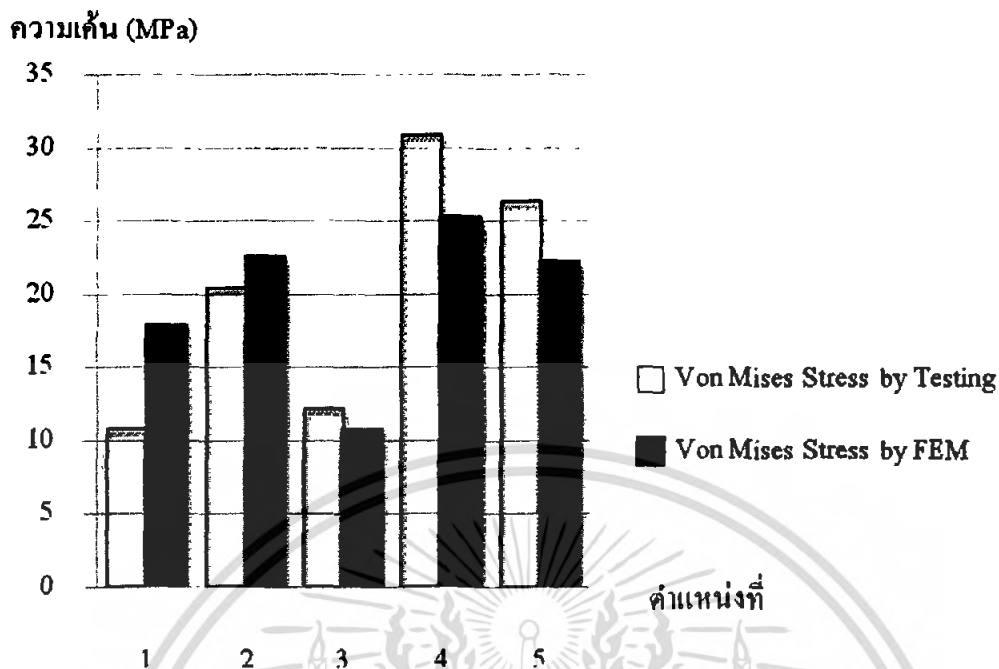


รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 1

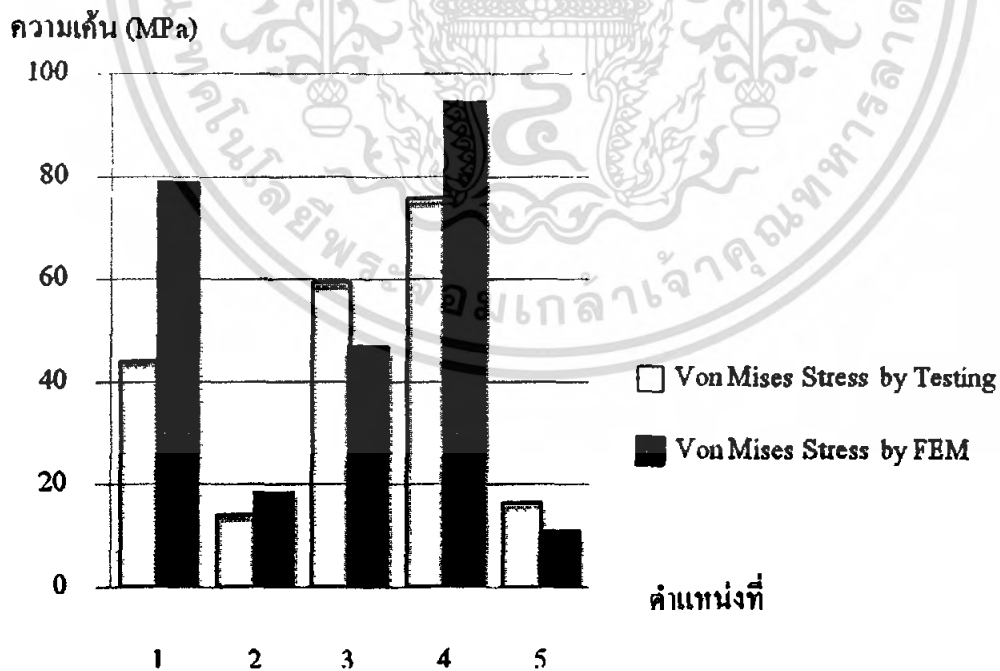


รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ระหว่างการทดลองกับการจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.2 ผลการเปรียบเทียบอายุการฉ่ำ ณ ตำแหน่งต่างๆ ใน 4 การทดลอง

Fatigue Life

(log of Cycles)

25

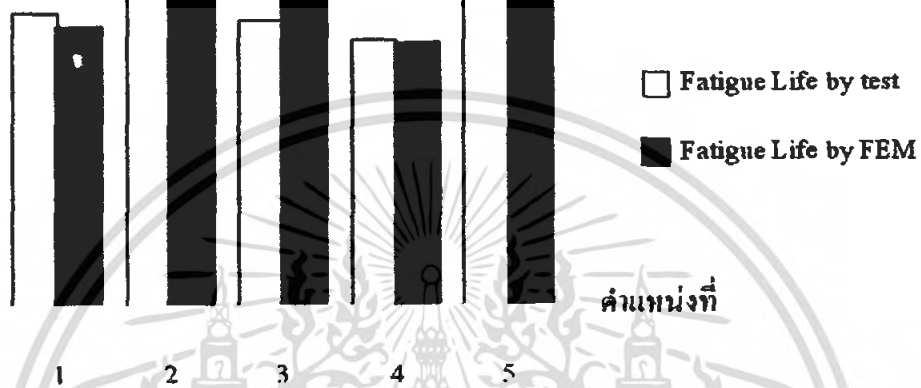
20

15

10

5

0



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบอายุการฉ่ำระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 1

Fatigue Life

(log of Cycles)

25

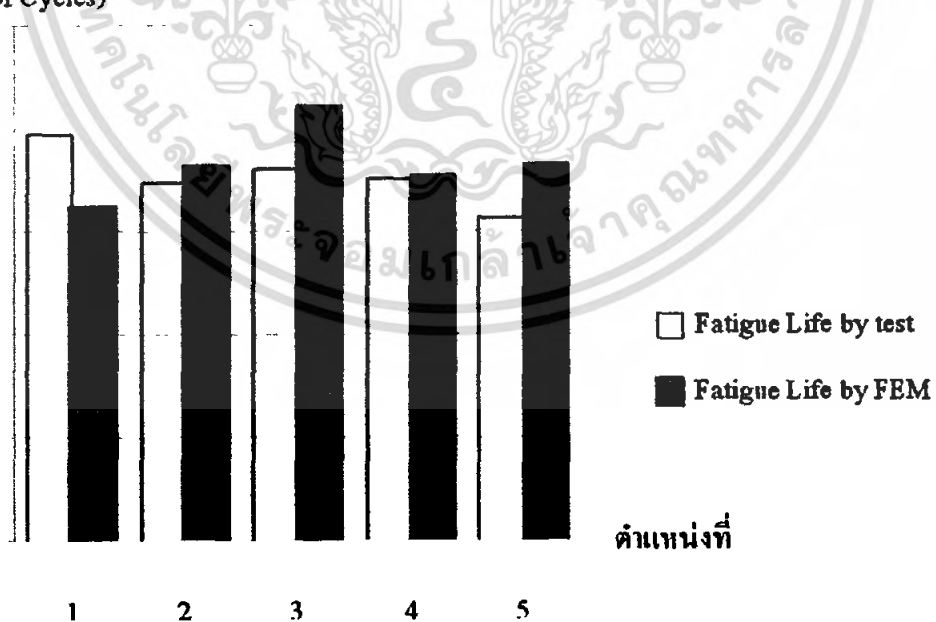
20

15

10

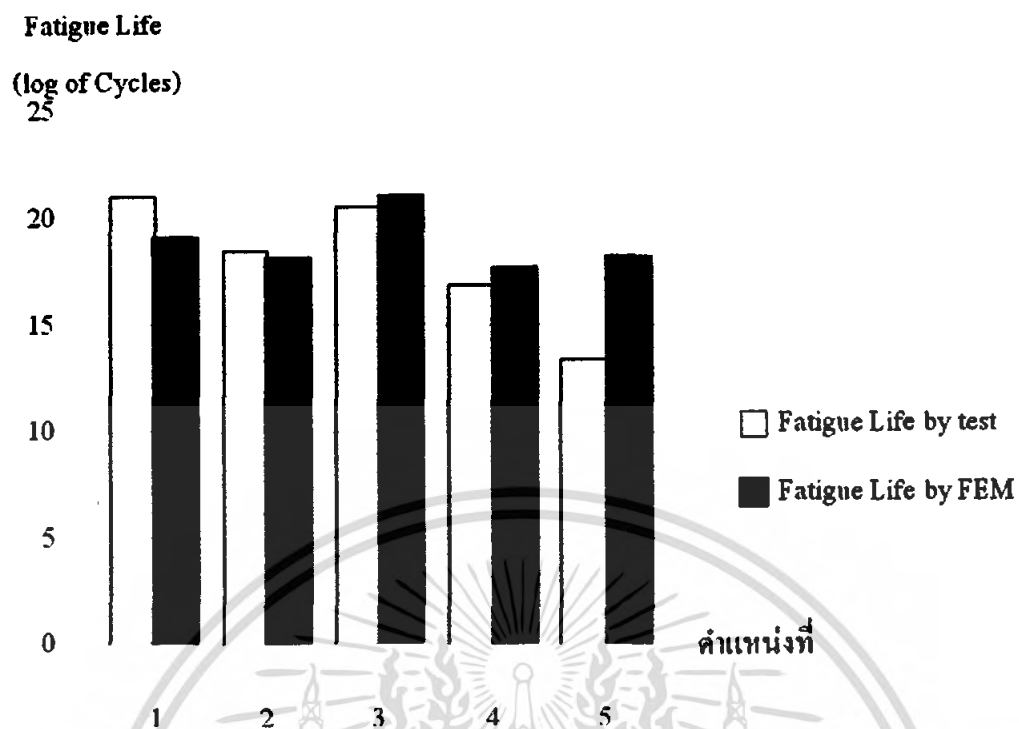
5

0

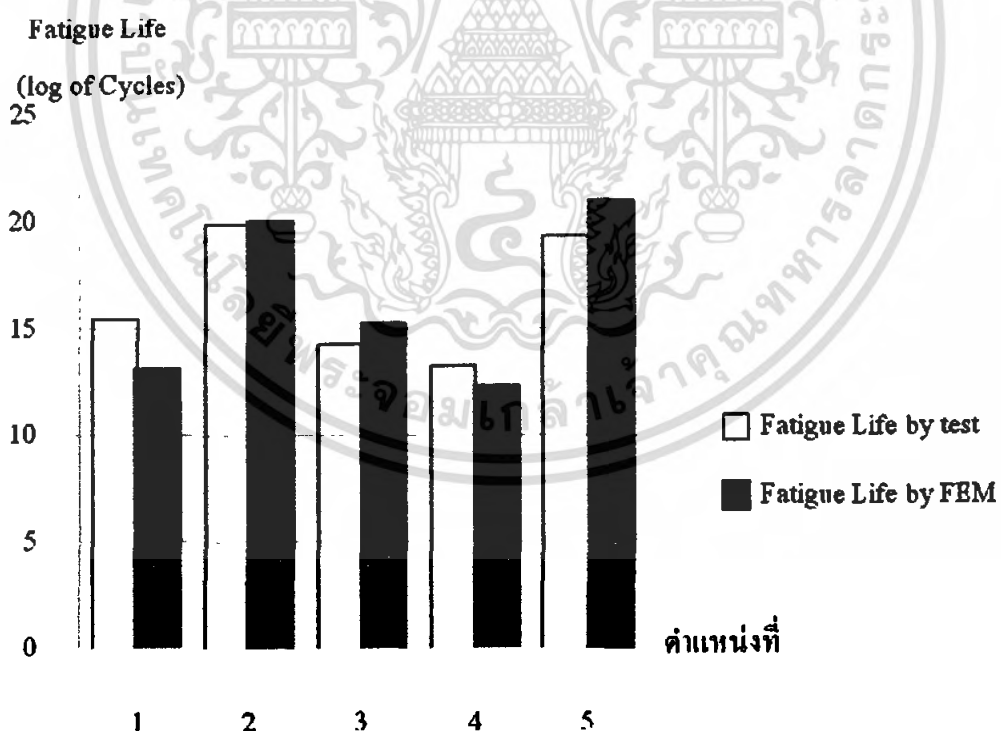


รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบอายุการฉ่ำระหว่างการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบอายุการล้าระหว่างการทดลองกับการจำลอง  
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบอายุการล้าระหว่างการทดลองกับการจำลอง  
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองหลังการปรับปรุง

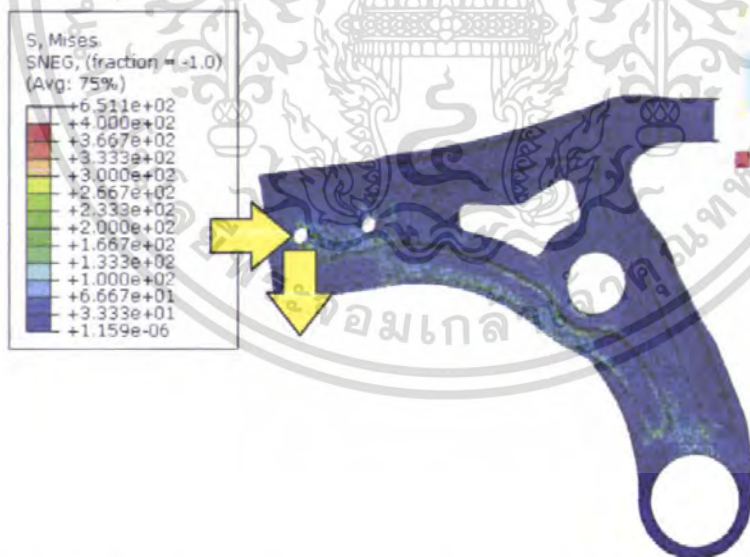
### 5.5.1 ผลการทดสอบจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.5.1.1 การทดลองที่ 1<sup>1</sup> แรงกด 8 และ 6 กิโลนิวตัน ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.14

5.4.2.2 การทดลองที่ 2<sup>1</sup> แรงกด 8 แรงดึง 6 กิโลนิวตัน ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลางหลังปรับปรุง ด้วยแรงกด 8 และ 6 กิโลนิวตันในแกน X และ Y ตามลำดับ



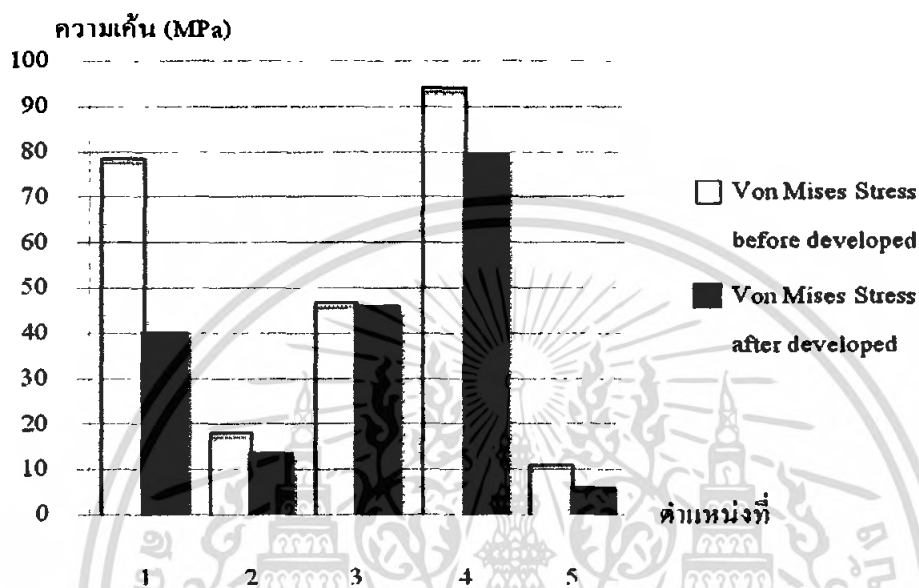
รูปที่ 5.15 Contours ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ของชิ้นปีกนกกลางหลังปรับปรุง ด้วยแรงกด 8 และดึง 6 กิโลนิวตันในแกน X และ Y ตามลำดับ

<sup>1</sup> เนื่องจากผลการจำลองที่แรงกระทำขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางกันข้ามจึงได้ผลการทดสอบเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกวีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

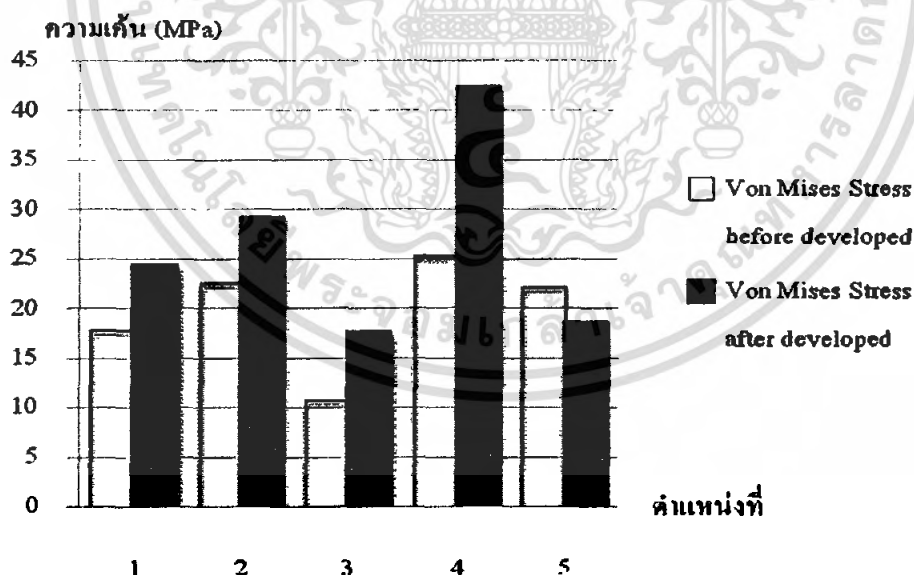
### 5.5.2 ผลการเปรียบเทียบความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ณ ตำแหน่งต่างๆ

5.5.2.1 การทดลองที่ 1<sup>1</sup> แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงกด 6 กิโลนิวตัน ในแกน Y  
 ดังรูปที่ 5.14

5.5.2.2 การทดลองที่ 2<sup>1</sup> แรงกด 8 กิโลนิวตันในแกน X และแรงดึง 6 กิโลนิวตัน ในแกน Y  
 ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ก่อนและหลังปรับปรุงกรณีที่ 1



รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ก่อนและหลังปรับปรุงกรณีที่ 2

### 5.5.3 ผลการเปรียบเทียบอายุการล้ากับชิ้นงานเดิม

อายุการล้าใหม่ที่ได้มีค่า 8,510,913 รอบ เมื่อเทียบกับอายุการล้าเดิม 2,142,285 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

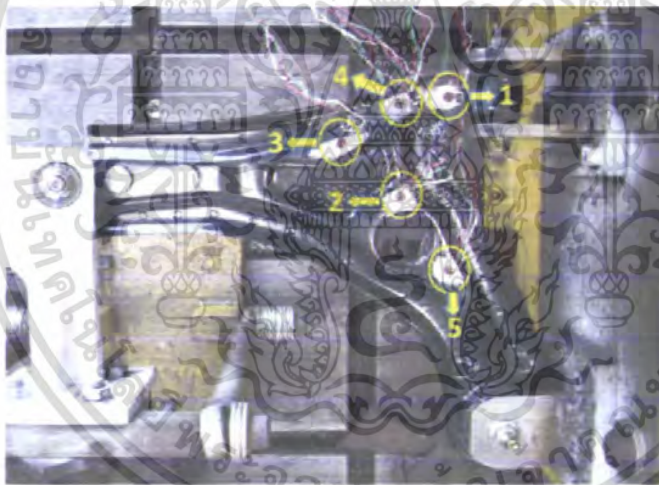
### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากจำลองการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็น 4 การทดลองคือ

1. แรงกดแกน X 8 กิโลนิวตัน และแรงกดแกน Y 6 กิโลนิวตัน
2. แรงกดแกน X 8 กิโลนิวตัน และแรงดึงแกน Y 6 กิโลนิวตัน
3. แรงดึงแกน X 8 กิโลนิวตัน และแรงกดแกน Y 6 กิโลนิวตัน
4. แรงดึงแกน X 8 กิโลนิวตัน และแรงดึงแกน Y 6 กิโลนิวตัน

จากการจำลองในการทดลองที่ 1 และ 4 ด้วยขอบเขต และวัสดุชนิดเดียวกันนั้น พบว่ามีค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากันเนื่องจากแรงกระทำ เมื่อขนาดแรงกระทำเท่ากัน ทิศทางตรงกันข้าม จึงมีผลให้ค่า ความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ที่เกิดทุกๆ เอลิเมนต์เท่ากัน และเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 และ 3 ที่มีผลเท่ากัน



รูปที่ 6.1 แสดงตำแหน่งของสเตรนเกจบนชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 การทดลองพบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงมีค่า 321.85 เมกกะปาสกาล ซึ่งมีผลให้มีอายุการล้าที่ 2,142,285 รอบ อยู่บริเวณใกล้ข้อต่อยึดชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีการทดลองเกิดขึ้นเพื่อยืนยันการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองสามมิติ ด้วยการติดสเตรนเกจวัดค่าความเครียดในแต่ละตำแหน่ง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ต่างกันเฉลี่ย 28.20 % ดังรูปที่ 6.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตำแหน่ง 1 ค่าความเค้นจากโปรแกรมมีแนวโน้มมากกว่าการทดสอบทุกการทดลอง เนื่องจากการทดสอบจริงนั้นมียางช่วยดูดซับแรงในช่วงข้อต่อ ซึ่งความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่า 44.61 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง 2 ค่าความเค้นจากโปรแกรมมีแนวโน้มมากกว่าการทดสอบทุกการทดลอง เนื่องจากการทดสอบจริงนั้นมียางช่วยดูดซับแรงในช่วงข้อต่อ ในการทดลอง 1, 3 และ 4 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 14.943% แต่การทดลองที่ 2 ความเค้นจากการทดสอบจริงมากกว่าโปรแกรม 17.99 %

ตำแหน่งที่ 3 ความเค้นจากการทดสอบ มีแนวโน้มมากกว่าจากโปรแกรมทุกการทดลอง เนื่องจากเป็นความผิดพลาดของการติดตตรนเกจ เพราะตำแหน่งที่ติดนั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 30.67%

ตำแหน่งที่ 4 ความเค้นจากโปรแกรมมีแนวโน้มมากกว่าการทดสอบ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 12.961%

ตำแหน่งที่ 5 ความเค้นจากการทดสอบ มีแนวโน้มมากกว่าจากโปรแกรมทุกการทดลอง อาจเนื่องมาจากอยู่ใกล้รู ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความความเค้นมากมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 30.67%

ด้วยเหตุนี้ ผู้ทำการทดลองจึง ได้มีการออกแบบใหม่เพื่อเพิ่มอายุการล้า ด้วยการจำลองและออกแบบชิ้นงานใหม่ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นจากการออกแบบชิ้นงานใหม่ และชิ้นงานก่อนออกแบบ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS สามารถสรุปได้ ดังนี้

การออกแบบใหม่จะมีค่าความเค้นกระจายจากตำแหน่งที่มีความเค้นสูง ไปสู่ตำแหน่งอื่นที่มีความเค้นต่ำกว่า ซึ่งตำแหน่งต่างๆที่วัดค่าออกมาอาจมีลักษณะสูงขึ้น แต่อายุการล้าจะมากขึ้นเนื่องจากตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดได้ ลดค่าลงจาก 321.58 เมกกะปาสคาล เหลือ 290.56 เมกกะปาสคาล ทำให้อายุการล้ามากขึ้น และการออกแบบใหม่ได้คำนึงถึงการลดต้นทุนด้วยการลดน้ำหนักลง 17.88 กรัมต่อชิ้น ซึ่งส่งผลให้กระจายความเค้นตามจุดต่างๆ ดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 และมีค่าไม่มากพอต่อการทำให้ชิ้นงานเสียหาย ด้วยการเสริมความแข็งแรงด้วยการสร้างครีปเพื่อกระจายความเค้นบริเวณคอคอดออกสู่บริเวณใกล้เคียง จนได้อายุการล้าใหม่ที่ 8,510,913 รอบ

## 6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลอง เครื่องทดสอบ ไม่เอื้ออำนวยต่อการทดสอบหาอายุการล้า ด้วยแรงกระทำไม่คงที่ ดังนั้นจึงเปรียบเทียบจากค่าความเค้นที่แรงกระทำคงที่แทนการทดสอบนั้น

การออกแบบใหม่จะมีค่าความเค้นกระจายจากตำแหน่งที่มีความเค้นสูง ไปสู่ตำแหน่งอื่นที่มีความเค้นต่ำกว่า ซึ่งตำแหน่งต่างๆที่วัดค่าออกมาอาจมีลักษณะสูงขึ้น แต่อายุการล้าจะมากขึ้นเนื่องจากตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุด จะมีค่าความเค้นลดค่าลงจาก 321.58 เมกกะปาสคาล เหลือ 290.56 เมกกะปาสคาล ทำให้อายุการล้ามากขึ้น และการออกแบบใหม่ได้คำนึงถึงการลดต้นทุนด้วยการลดมวลของวัสดุลง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นที่มากขึ้น โดยความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินค่าที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหาย และมีการเสริมความแข็งแรงด้วยการสร้างครีปเพื่อกระจายความเค้นบริเวณคอคอดออกสู่บริเวณใกล้เคียง

และความผิดพลาดทั้งหมดอาจเนื่องมาจาก

- ผู้ทำการทดสอบยังมีประสบการณ์และความชำนาญไม่มากพอ
- การประเมินเชิงตัวเลขของ โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบจริงมีกำหนดขอบเขตไม่เหมือนการจำลองด้วยโปรแกรมเช่น ติดตั้งยางที่ตำแหน่ง ข้อต่อเพื่อป้องกันการเสียหายของตัวจับชิ้นงาน
  - การติดตั้งสเตรนเกจ ที่ผิดพลาด
  - การลื่นไถลของตัวจับกับชิ้นงานที่เครื่องทดสอบแรงดึง ในช่วงเริ่มแรกของการสอบเทียบ
- การออกแบบใหม่ครั้งนี้ ได้ศึกษาเพียงการออกแบบเพื่อแรงกระทำตามการทดลอง 4 การทดลองข้างต้นเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นแรงสูงสุด แต่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาด ได้ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำที่เปลี่ยนไป

### 6.3 ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา

จากการออกแบบและจำลองชิ้นงาน ใหม่มีค่าที่คลาดเคลื่อนกับ โปรแกรม เพื่อลดค่าผิดพลาดจึงขอแนะนำดังนี้

1. ในการติดตั้งชุดทดลองเพื่อการสอบเทียบกับเครื่องทดสอบแรงดึง ควรยึดเหล็กทดสอบกับตัวยึดให้แน่นเพื่อป้องกันการลื่นไถลของชิ้นงานทดสอบในขณะที่ทำการดึง
2. ควรทดลองในสภาพแวดล้อมที่ไม่ถูกรบกวนจากภายนอก
3. ในการจำลองแบบทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ควรสร้างเอลิเมนต์ให้มีลักษณะที่เหมาะสมเพื่อเป็นการลดค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นจากการวิเคราะห์
4. การติดตั้งสเตรนเกจ ให้มีตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการทดสอบใน โปรแกรมมากที่สุดเพื่อให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้น

### 6.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาอายุการล้าของปีกนกให้มีอายุการล้ามากขึ้น
2. ทำให้ทราบถึงอายุการล้า ของปีกนกเดิม
3. ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของความเค้นที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอายุการล้าของปีกนกให้เพิ่มขึ้น
4. ได้รับความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการล้า และพื้นฐานในการใช้โปรแกรม ABAQUS สำหรับการวิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์ต่างๆ จากโปรแกรม

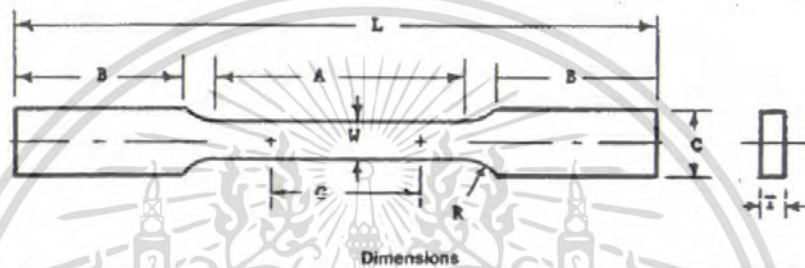
## บรรณานุกรม

- [1] S.C. Fan. *Mechanics of Materials*. R.C. Hibbeler, Singapore, 2003
- [2] P.Orlov. *Fundamentals of machine design*, "Fundamentals of machine design", MIR Publishers, Moscow. , 1976
- [3] Daniel Inman *J.Engineering Vibration*. Prentice-Hall International Inc, 2001
- [4] Y. Nadot, V. Denier. "Fatigue failure of suspension arm: experimental analysis and multiaxial criterion", *Engineering Failure Analysis*, 2003
- [5] Fourlaris, R. Ellwood, Jones T.B. "The reliability of test results from simple test samples in predicting the fatigue performance of automotive components", *Materials & Design*, 2006.
- [6] Norman E. Dowling. "Mechanical behavior of materials", Prentice hall international, inc., 1999
- [7] ผศ.ดร.วรวงศ์ ตั้งศรีรัตน์. "เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์", กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2548
- [8] วุฒิชัย กปิลกาญจน์. "กลไกและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกล", กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์ เซ็นเตอร์, 2533
- [9] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. "การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 2", กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2536, หน้า 255-264
- [10] มนตรี พิรุณเกษตร. *วิศวกรรมการต้นสะเทือน*. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2542
- [11] เก่งกล้า เรืองฤทธิ์, นาย ศักรินทร์ ไวยกุล. "การประเมินความถี่และออกแบบปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปเดอร์", *ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2546

## ภาคผนวก ก.

## การสอบเทียบเครื่องมือวัดสเตรนอินดิเคเตอร์

การสอบเทียบเครื่องมือวัดสเตรนอินดิเคเตอร์นี้จะทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าความเครียดของเครื่องมือวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ กับค่าความเครียดของเครื่องทดสอบแรงดึง ซึ่งการทดลองจะเป็นไปตามรูปแบบการทดสอบมาตรฐาน ASTM E8 หรือ Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials โดยเหล็กที่ใช้ทดสอบจะมีรูปร่าง และขนาด ดังรูปที่ ก-1



		Specimen A			
		Standard		Alternative	
		in.	mm	in.	mm
G	Gage length	$2.00 \pm 0.01$	$50 \pm 0.25$	$1.00 \pm 0.005$	$25 \pm 0.13$
W	Width (Notes 1 and 2)	$0.500 \pm 0.01$	$12.5 \pm 0.25$	$0.500 \pm 0.01$	$12.5 \pm 0.25$
T	Thickness	thickness of material			
R	Radius of fillet, min	$1/2$	13	$1/2$	13
L	Overall length, min	8	200	$7\frac{1}{4}$	180
A	Length of reduced section, min	3	75	$2\frac{1}{4}$	60
B	Length of grip section, min	2	50	2	50
C	Width of grip section, approximate	$3/4$	20	$3/4$	20

รูปที่ ก-1 แสดงขนาดมาตรฐาน ASTM E8

เราทำการติดตั้งเหล็กทดลองกับเครื่องทดสอบแรงดึง ขนาด 30 ตัน โดยมีการติดสเตรนเกจอยู่ที่เหล็กทดลอง ซึ่งขั้นตอนนี้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

## 1. เตรียมผิวชิ้นงานก่อนติดสเตรนเกจ และติดตั้งชิ้นงานกับเครื่องทดสอบ



รูปที่ ก-2 แสดงภาพการติดสเตรนเกจบนเหล็กทดลอง และตัวสเตรนเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสเตรนเกจที่ใช้มีคุณลักษณะ ดังนี้

เกจแฟกเตอร์ (Gage Factor)	= $2.06 \pm 1.0\%$
Gage Length	= 2 มิลลิเมตร
Gage Resistance ( $24^{\circ}C, 50\%RH$ )	= $120.4 \pm 0.4 \Omega$
Adoptable Thermal Expansion	= $11.7 \text{ PPM}/^{\circ}C$
Temperature coefficient of gage factor	= $+0.008\%/^{\circ}C$

2. กำหนดคุณสมบัติและขนาดต่าง ดังนี้

ความหนา 12 มิลลิเมตร

ความกว้าง 11.8 มิลลิเมตร

กำหนดระยะขีดสูงสุดที่ต้องการ 20 มิลลิเมตร

กำหนดช่วงของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหัก (Fracture) = 6500 นิวตัน

Gauge Range =  $50 \pm 0.25$  มิลลิเมตร

ความเร็วในการดึง 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที

เลือกค่า Output เป็น Upper Yield strength, Elastic modulus, Stress, Shear

Stress, Strain, Shear Strain

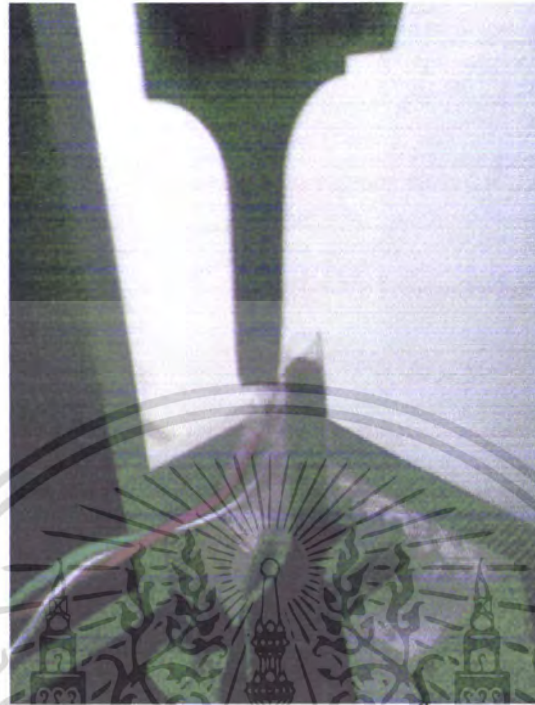
3. ทำการดึงขึ้นทดสอบจริงและเก็บค่า โดยดึงจนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน



รูปที่ ก-3 แสดงลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง ขนาด 30 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

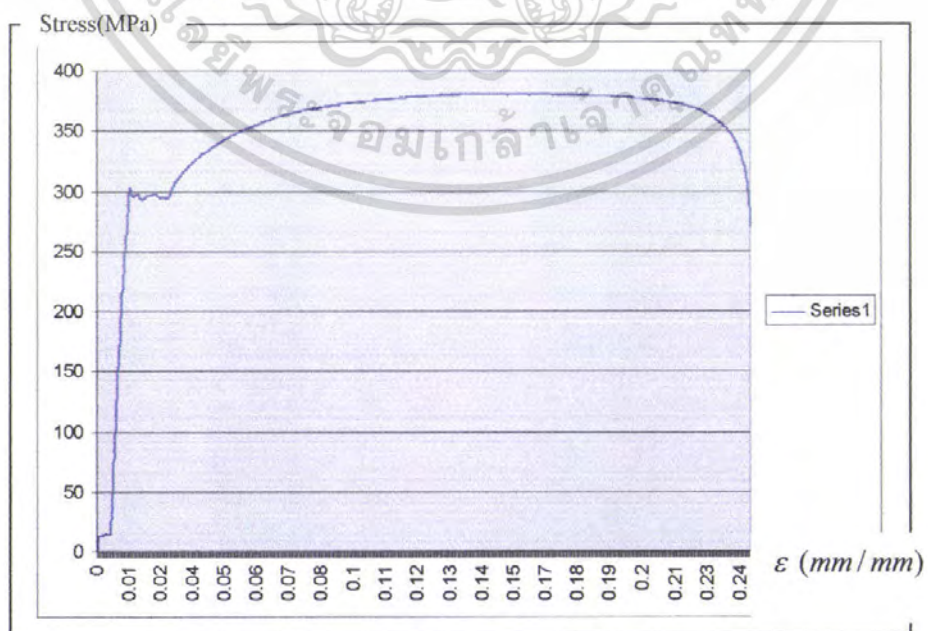
4. หยุดเครื่องและเก็บค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ



รูปที่ ก-4 แสดงลักษณะการเสียหายของชิ้นงานทดสอบ

5. นำผลลัพธ์มาพิจารณาและสอบเทียบกับเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์

5.1 วิเคราะห์ผลลัพธ์เพื่อหาค่าความเครียดจากเครื่องทดสอบแรงดึง เนื่องจากเราไม่สามารถอ่านค่าความเครียดจากเครื่องได้อย่างถูกต้อง เพราะความผิดพลาดเริ่มต้นของตัวจับชิ้นงาน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปต่อไปนี้



รูปที่ ก-5 แสดงความสัมพันธ์ของ ความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอชเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2 คำนวณหาค่าความเครียดของเครื่องทดสอบแรงดึง

จาก  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$  โดยค่า  $\sigma$ ,  $E$  เราทราบจากผลลัพธ์ของเครื่อง

### 5.3 นำค่าความเครียดจากเครื่องทั้ง 2 มาเปรียบเทียบหาค่าปรับแก้

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าความผิดพลาดของเครื่องวัดสเตรนอินดิเคเตอร์ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

ค่าความเครียดที่ได้จากเครื่องสเตรนอินดิเคเตอร์ ( $\mu(mm/mm)$ )	ค่าความเค้นที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง (MPa)	ค่าความเครียดเปรียบเทียบ ( $\mu(mm/mm)$ )	ค่าความผิดพลาด (%)
13	3.744	18.441	29.505
20	5.367	26.438	24.351
305	62.853	324.397	5.979
520	107.133	527.746	1.468
681	139.691	688.124	1.035
838	172.034	847.453	1.112
1011	207.203	1020.698	0.951
1172	241.339	1188.855	1.418
1309	273.339	1346.490	2.784

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย} &= \frac{5.979 + 1.468 + 1.035 + 1.112 + 0.95 + 1.418 + 2.784}{7} \\ &= 2.107\% \end{aligned}$$

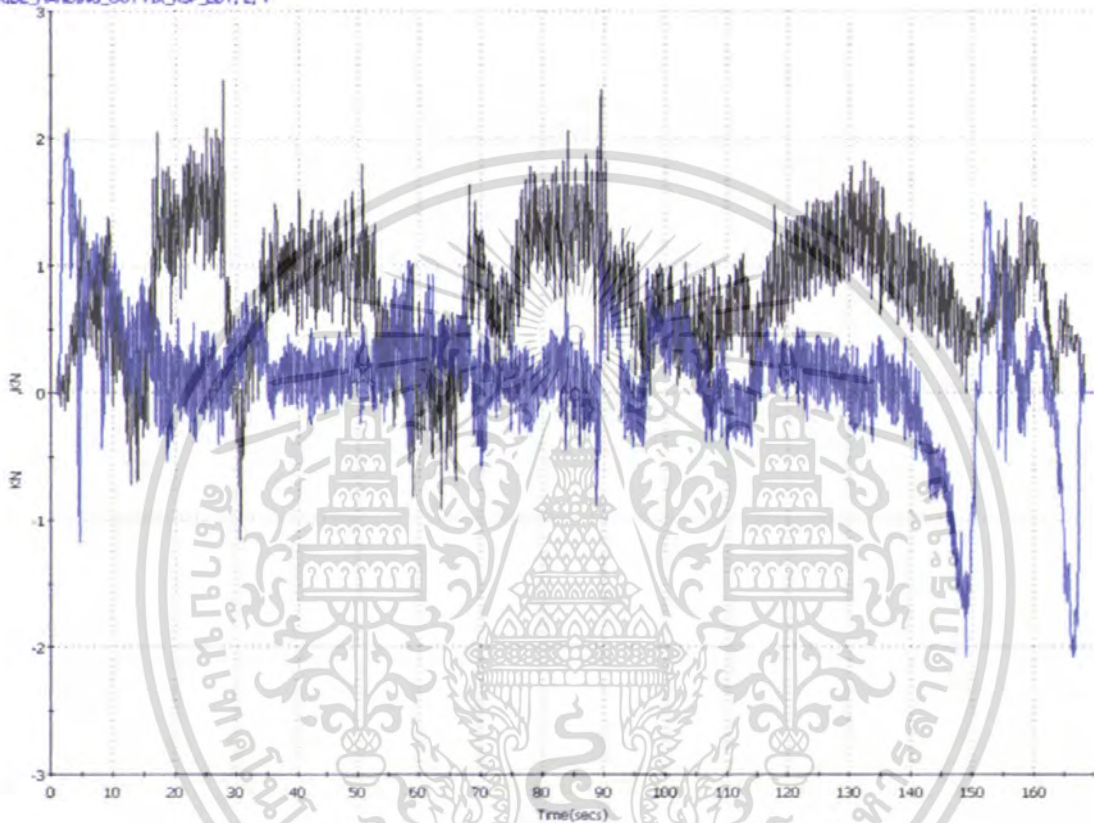
หมายเหตุ ค่าความผิดพลาด 29.505%, 24.351% นั้นไม่ได้นำมาคิดรวมเนื่องจาก ช่วงเริ่มการทดลองการจับชิ้นงานไม่กระชับมีผลทำให้เกิดการ ไถล (Slip) ซึ่งนับเป็นความผิดพลาดของเครื่องทดสอบแรงดึง

## ภาคผนวก ข. แรงกระทำในการทดลอง

แรงกระทำที่ใช้ในการทดลองสามารถหาได้จากข้อมูลการจับจริงดังรูป ข-1 ซึ่งเป็นกราฟ

ระหว่างแรงกับระยะเวลา

`U_RIDE_HANDING_OUT FIX_RSP_BOT. 1, X`  
`U_RIDE_HANDING_OUT FIX_RSP_BOT. 2, Y`



รูปที่ ข-1 แสดงกราฟแรงกับระยะเวลา สำหรับการเก็บค่าการจับจริง

จากนั้นจึงนำกราฟที่ได้ข้างต้นนั้นเข้าสู่โปรแกรมอาร์พีซีโพร (RPC Pro) เพื่อหาค่าแรงกระทำจากกราฟเป็นค่าสูงสุด นั่นคือ ในแกน X (สีดำ) เท่ากับ 8 กิโลนิวตัน ในแกน Y (สีน้ำเงิน) เท่ากับ 6 กิโลนิวตัน ซึ่งค่าแรงที่ได้นั้น คือค่าที่นำไปใช้ในการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนหลายทิศทาง โดยนำไปใส่ในโปรแกรมดังรูป 4.9