

การศึกษาเชิงทดลองทางโทรโบโลยีของระบบบังคับล้อ

EXPERIMENTAL STUDY ON TRIBOLOGY IN AN AUTOMOBILE STEERING SYSTEM



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **61478**  
วัน,เดือน,ปี. **18 ก.ค. 2549**

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EXPERIMENTAL STUDY ON TRIBOLOGY IN AN AUTOMOBILE STEERING SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE BACHELOR OF ENGINEER IN  
MECHANICAL ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2004**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองทางไทรโบโลยีในระบบบังคับเลี้ยว

EXPERIMENTAL STUDY ON TRIBOLOGY IN AN AUTOMOBILE STEERING SYSTEM

ผู้จัดทำ

1. นาย บุญฤทธิ์ วจนะวิวัฒน์ รหัสประจำตัว 44010744
2. นาย พิมุกต์ เฟ่งพิศ รหัสประจำตัว 44010782



อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเชิงทดลองทางไทรโบโลยีของระบบบังคับลิ้น

นาย บุญฤทธิ์ วนะวิวัฒน์	44010744
นาย พิภักดิ์ เฟ่งพิศ	44010782
รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยที่จะนำเสนอนี้เป็นการศึกษาทาง "ไทรโบโลยี" ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสึกหรอ การหล่อลื่น และความเสียดทานของระบบบังคับลิ้นของรถไฟฟ้่า 2 ชั้น ในส่วนแรกนั้นเป็นส่วนของการสร้างชุดทดลองที่มีสถานะต่างๆ ให้เหมือนกับสถานะการใช้งานจริง โดยใช้ชุดโซลินอยด์ว่าลั่วควบคุมทิศทางมอเตอร์ไฮดรอลิกเพื่อขับเคลื่อนแทนการหมุนกลับไปกลับมาด้วยมือ แรงกดจากกระบอไฮดรอลิกแทนน้ำหนักของคนและตัวรถ และแผ่นปูนซีเมนต์แทนสภาพพื้นผิวของถนนในการใช้งาน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาแนวโน้มการสึกหรอของชุดเฟืองบังคับลิ้นที่รอบต่าง ๆ จากการใช้งานในสถานะใกล้เคียงจริง โดยการนำชิ้นส่วนที่ผ่านการใช้งานมาส่องด้วยกล้องส่องขยายโลหะกำลังสูงเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น และการวัดค่าความเครียดที่เกิดจากแรงบิด ที่เกิดขึ้นในบริเวณแกนพวงมาด้วย สเตรน เกจ และอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ด้วยออสซิลอสโคป ทำให้ทราบค่าแรงบิดที่ใช้ในการหมุน โดยใช้เป็นค่าอ้างอิงโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้หลังจากการปรับปรุงและจุดเชื่อมต่อของระบบบังคับลิ้น แล้วนำค่ามาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการทดลอง เช่น น้ำหนักกดกับค่าความเครียดที่เกิดจากแรงบิด เวลาที่ใช้ในการหมุนแต่ละรอบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบบังคับลิ้นให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## EXPERIMENTAL STUDY ON TRIBOLOGY IN AN AUTOMOBILE STEERING SYSTEM

Boonyarit Wajanawiwat 44010744

Pimuk Pengpis 44010782

Assoc.Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongrojn Advisor

### ABSTRACT

This project concern the experimental study of tribology in electric-car steering system. First of all, The design and development of the test equipments were presented in this project. The hydraulic motor and solenoids valve were selected for implement to drive and control the steering system in order to get high reliability testing system. The loads were applied to the steering system by using hydraulic jack. Microscope was used to inspect the failure behaviors on rack & pinion in the real practical working conditions . Torque measurement device was also developed using strain gauges and were installed on the steering shaft . The results of the experiments were investigated and compared in order to obtain the best steering system for the electric vehicle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมากต่อโครงการ ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความรู้ในวิชาต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้ ขอขอบคุณอาจารย์มณฑา สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือ ในการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับโครงการ และขอขอบคุณ พี่สมนึก นักศึกษาปริญญาโทที่สละเวลาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ บริษัท ไทย ชัมมิท ออโต้พาร์ท จำกัด และ สถาบันยานยนต์ ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนด้านอุปกรณ์และข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์สำหรับโครงการ

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้จัดทำทั้งสองที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเราตลอดมา

นาย บุญฤทธิ์ วนะวิวัฒน์  
นาย พิมุทธิ์ เพ่งพิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2. ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	3
2.1 ระบบบังคับลิ้นวในรถยนต์	3
2.1.1 ปลอกของแกนพวงมาลัย	3
2.1.2 ระบบบังคับลิ้นวแบบ แร็คและพินเนียน	3
2.1.3 แขนเชื่อมโยงของระบบบังคับลิ้นว	4
2.1.4 การตรวจสอบแก้ไขปัญหาของระบบบังคับลิ้นว	5
2.2 คาน	6
2.2.1 ทฤษฎีการออกแบบและคำนวณของคาน	6
2.3 สเตรนเกจ	7
2.3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของ สเตรนเกจ	7
2.3.2 หลักการทำงานของ สเตรนเกจ	8
2.3.3 รูปแบบการติดตั้ง สเตรนเกจ เข้ากับวัสดุ	10
2.3.4 คุณสมบัติจำเพาะของ สเตรนเกจ ในอุดมคติ	11
2.3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้	11
2.4 การกัดกร่อน	12
2.4.1 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)	12
2.4.2 การกัดกร่อน-ความล้า (Fatigue Corrosion)	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.7 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)	13
2.5 ไสโครลิก	14
2.5.1 มอเตอร์ไสโครลิก	14
2.5.2 เกจความกดดัน	15
2.5.3 การบังคับมอเตอร์ไสโครลิก	16
บทที่ 3. การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.1 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแรงกด	19
3.1.1 หลักการออกแบบ	19
3.1.2 หลักการคำนวณ	21
3.2 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ต้นกำลังหมุนพวงมาลัย	21
3.2.1 หลักการออกแบบ	22
3.2.1.1 อุปกรณ์จับยึดแกนพวงมาลัย	22
3.2.1.2 อุปกรณ์จับยึดมอเตอร์ไสโครลิกและ โครรงด	22
3.2.1.3 อุปกรณ์มอเตอร์ไสโครลิกและชุดต้นกำลัง ไสโครลิก	23
3.2.1.4 อุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไสโครลิก	24
3.2.2 หลักการคำนวณเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแรงกด	26
3.3 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์เก็บผลการทดลอง	27
บทที่ 4. วิธีการทดลอง	31
4.1 การทดลองความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน	31
4.2 การทดลองการปรับปรุงระบบบังคับเลี้ยว	32
บทที่ 5. ผลการทดลอง	34
5.1 ผลการตรวจสอบพื้นผิวความสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์	34
5.2 ผลการตรวจสอบพื้นผิวความสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ	39
5.3 ผลการทดลองของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจาก การหมุนพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการหมุนต่อ 1 รอบ	43
บทที่ 6. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	51
6.1 สรุปผลงานวิจัย	51
6.1.1 สรุปผลการทดลองส่วนของการสร้างชุดทดลองของระบบบังคับเลี้ยวรถไฟฟ้า	51
6.1.2 สรุปผลการทดลองความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.3	สรุปผลการทดลองการปรับปรุงระบบบังคับลิ้ว	52
6.2	ข้อเสนอแนะ	52

### สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก. ตาราง สมการ โกงตัวของคาน	54
ภาคผนวก ข. ตาราง ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัสดุหน้าตัดรูปตัว C	55
ภาคผนวก ค. กราฟแสดงการ calibration ของเกจ วัดความดัน ต่อน้ำหนัก	56
ภาคผนวก ง. ตารางบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อจำนวนรอบที่ทำการทดลอง	56
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งาน ที่บริเวณด้านข้างของ พินิเยน กำลังขยาย 100 เท่า	57
ภาคผนวก ฉ. ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งาน ที่บริเวณด้านบนของ พินิเยน กำลังขยาย 100 เท่า	57
ภาคผนวก ช. ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งาน ที่บริเวณระหว่างเฟือง แร็ค กำลังขยาย 100 เท่า	58
ภาคผนวก ซ. ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งาน ที่บริเวณด้านบนของ พินิเยน กำลังขยาย 200 เท่า	58
ภาคผนวก ฌ. ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งาน ที่บริเวณด้านข้างของ พินิเยน กำลังขยาย 200 เท่า	58
ภาคผนวก ฉ. ตารางแสดงผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงความตึงเครียดไฟฟ้า จากการหมุนพวงมาลัย	59
ภาคผนวก ฎ. ตารางแสดงการ Calibration แรงบิดที่ก้านพวงมาลัยต่อค่า $\Delta V$	61
ภาคผนวก ฏ. ตารางแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณ สลักล้อ ด้านขวา	61
ภาคผนวก ฐ. ตารางแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณ สลักล้อ ด้านซ้าย	61
ภาคผนวก ท. ตารางแสดงค่าตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก	62
ภาคผนวก ธ. รูปแสดงภาพการนำเสนอโครงการ	63
บรรณานุกรม	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

## บทที่ 2. ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2.1 การตรวจสอบแก้ไขปัญหาของระบบบังคับลิ้ว	5
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะวัสดุที่ใช้ทำ สเตรนเกจ	9
ตารางที่ 2.3 แสดงคุณลักษณะของ สเตรนเกจ ในอุดมคติ	11



## สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2. ทฤษฎีและการคำนวณที่ใช้ในการทดลอง	
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบบังคับความเร็ว	3
รูปที่ 2.2 ระบบบังคับความเร็วแบบ แร็คและพิเนียน	4
รูปที่ 2.3 แชนเชื่อมโยงของระบบบังคับความเร็วแบบต่าง ๆ	5
รูปที่ 2.4 ลักษณะของการติดตั้ง สเตรนเกจ แบบต่าง ๆ	8
รูปที่ 2.5 แสดงการต่อ สเตรนเกจ เข้ากับวงจรบริดจ์	8
รูปที่ 2.6 แสดงการวัดค่าความเครียดของวัสดุโดยใช้ อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ต่อเข้ากับ สเตรนเกจ	9
รูปที่ 2.7 ลักษณะของการติดตั้ง สเตรนเกจ กับ วัสดุชนิดต่าง ๆ	10
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทิศทางการหมุนของเฟืองมอเตอร์	15
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะส่วนประกอบเกจวัดความดัน	16
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการควบคุมมอเตอร์ไฮดรอลิกวงจรเปิด	17
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะวงจรรีเลย์ช่วยและรีเลย์หลัก	18
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะวงจรบังคับอัตโนมัติ ด้วยสวิตช์ปุ่มกดและสวิตช์สัมผัส	18
บทที่ 3. การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะระบบบังคับความเร็วและช่วงหน้าของรถ	19
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะคานสำหรับสร้างแรงกดและวัสดุสร้างแรงต้านที่ล้อ	20
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะแม่แรงไฮดรอลิกอุปกรณ์ยึดจับกับโครงรถ	20
รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าระหว่างน้ำหนักและความดัน สำหรับการตั้งค่าเกจความดันที่แม่แรงไฮดรอลิก	21
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะอุปกรณ์ยึดยึดแกนพวงมาลัย	22
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะอุปกรณ์ยึดยึดมอเตอร์ไฮดรอลิกและโครงรถ	23
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะชุดต้นกำลังไฮดรอลิกที่ใช้ ในการขับมอเตอร์ไฮดรอลิก	24
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงาน และทิศทางการของมอเตอร์ไฮดรอลิก	25
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะ แผนภาพวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม	25
รูปที่ 3.10 แสดงการติดตั้ง สเตรน เกจ ที่แกนหมุนพวงมาลัย	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะ สเตรน เกจ	28
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะอุปกรณ์ให้กำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า	28

### สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะ Oscilloscope	29
รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะชุดกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง	29
รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง	30
บทที่ 4. วิธีการทดลอง	
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นส่วนของ แร็คและพินเนน	31
รูปที่ 4.2 ลักษณะการปรับปรุงตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก	32
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการติดตั้งลูกหมากคันชักก่อนปรับปรุง และหลังทำการปรับปรุง	32
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงบิดที่ ก้านพวงมาลัยและความแตกต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	33
บทที่ 5. ผลการทดลอง	
รูปที่ 5.1 แสดงพื้นผิวความรู้สึกหรือที่บริเวณด้านข้างของ พินเนน กำลังขยาย 100 เท่า	34
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านข้างของ พินเนน กำลังขยาย 100 เท่า	34
รูปที่ 5.3 แสดงพื้นผิวความรู้สึกหรือที่บริเวณด้านข้างของ พินเนน กำลังขยาย 200 เท่า	35
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านข้างของ พินเนน กำลังขยาย 200 เท่า	35
รูปที่ 5.5 แสดงพื้นผิวความรู้สึกหรือบริเวณด้านบนของ พินเนน กำลังขยาย 100 เท่า	36
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านบนของ พินเนน กำลังขยาย 100 เท่า	36
รูปที่ 5.7 แสดงพื้นผิวความรู้สึกหรือบริเวณด้านบนของ พินเนน กำลังขยาย 200 เท่า	37
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านบนของ พินเนน กำลังขยาย 200 เท่า	37
รูปที่ 5.9 แสดงพื้นผิวความรู้สึกหรือบริเวณระหว่างพิน แร็ค กำลังขยาย 100 เท่า	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.10 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณระหว่างเฟือง แร็ค กำลังขยาย 100 เท่า	38
---	----

### สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.11 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณสลักล้อด้านซ้าย	39
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณสลักล้อด้านซ้าย	40
รูปที่ 5.13 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณสลักล้อด้านขวา	40
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณสลักล้อด้านขวา	41
รูปที่ 5.15 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณรูยึดลูกหมากคันชักที่แขน ไอเดิล	41
รูปที่ 5.16 แสดงลักษณะความเสียหายบริเวณยางหุ้มลูกหมากคันชัก	42
รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะความเสียหายบริเวณยางหนุน	42
รูปที่ 5.18 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกด ตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักก่อนปรับปรุง	43
รูปที่ 5.19 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆ ของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 1.	43
รูปที่ 5.20 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกด ตัวถังต่างๆ ของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 2.	44
รูปที่ 5.21 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆ ของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 3.	45
รูปที่ 5.22 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆ ของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 4.	45
รูปที่ 5.23 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆ ของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 5.	46
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่เกิดตัวถังและแรงบิดที่ ก้านพวงมาลัยของแต่ละตำแหน่งการปรับปรุง	47
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่เกิดตัวถังและความถี่ใน การหมุนของแต่ละตำแหน่งที่ทำการปรับปรุง	47
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ก้านพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการ การหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 600 Psi	48
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ก้านพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการ การหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 700 Psi	48
รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ก้านพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 800 Psi	
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ใน	49
การหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 900 Psi	

**สารบัญรูป(ต่อ)**

หน้า

รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการหมุนและตำแหน่ง	
การติดตั้งที่ความดันที่กคตั่วถึงต่างๆ	50
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและตำแหน่ง	
การติดตั้งที่ความดันที่กคตั่วถึงต่างๆ	50



## บทที่ 1.

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในการทำงานทางวิศวกรรมย่อมต้องการข้อมูลที่ต้องต้องใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา ในเชิงวิศวกรรม ซึ่งการศึกษาถึงผลการใช้งานจริงจากการทดลองก็ย่อมจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีประโยชน์ เนื่องจากทาง บริษัทไทยซัมมิต ออโตพาร์ท จำกัด ได้ทำการพัฒนารถไฟฟ้า 2 ที่นั่งที่ผลิตขึ้นเองในประเทศโดยทำการพัฒนางานสำเร็จเป็นรถไฟฟ้าที่ใช้งานและทำการจำหน่ายแล้วแต่ยังมีข้อบกพร่องบางประการของระบบบังคับเลี้ยวโดยเมื่อใช้งานจริงจะมีความฝืดค่อนข้างมากทำให้ต้องใช้แรงในการหมุนเลี้ยวค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับขนาดและน้ำหนักของรถซึ่งมีน้ำหนักไม่มากนัก ซึ่งไม่สะดวกสบายในการใช้งาน และเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งก็จะเกิดความเสียหายขึ้นที่ชิ้นส่วนข้อต่อในบริเวณเฟืองสปายน์ และบริเวณส่วนเชื่อมคันส่งกับสลักล้อ ทำให้เกิดเป็นปัญหาในการใช้งาน จึงต้องทำวิเคราะห์หาสาเหตุต่างๆ ที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายดังกล่าว และการวิเคราะห์หาสาเหตุนั้น ผู้วิจัยเห็นว่ารถไฟฟ้าจะเกิดการเสียหายจากการใช้งานปกติ ดังนั้นการทดลองจึงต้องพยายามให้สถานะต่างๆ มีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริง โดยสร้างชุดทดลองที่สามารถปรับค่าที่มีผลเกี่ยวข้องกับการทดลองได้ เช่น น้ำหนักกดตำแหน่งของแกนพวงมาลัย สภาพพื้นผิวที่สัมผัสกับยาง

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นของระบบบังคับเลี้ยวจากการใช้งานของรถไฟฟ้าสองที่นั่ง
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการใช้งาน
- 1.2.3 สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงชิ้นส่วนของระบบบังคับเลี้ยวรวมถึงการคาดคะเนชิ้นส่วนที่จะเสียหายก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องต้นแบบของเครื่องทดสอบระบบบังคับเลี้ยว

#### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากใช้งานระบบบังคับเลี้ยว
- 1.3.2 สร้างอุปกรณ์ทดสอบที่จำลองการใช้งานจริงของระบบบังคับเลี้ยว
- 1.3.3 ปรับปรุงส่วนของระบบบังคับเลี้ยวที่มีผลต่อการหมุนเลี้ยว
- 1.3.4 ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบของการใช้งานระบบบังคับเลี้ยว
- 1.3.5 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบของการใช้งานระบบบังคับเลี้ยว

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ทำการศึกษาการทำงานของระบบบังคับเลี้ยว
- 1.4.2 ทำการศึกษาระบบไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบไฮดรอลิกต้นกำลังและวงจรควบคุมทิศทาง
- ระบบไฮดรอลิกที่ใช้สร้างแรงกด

1.4.3 ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบบังคับลิ้น

1.4.4 จัดทำและปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบบังคับลิ้น

1.4.5 ทำการทดสอบระบบบังคับลิ้น

1.4.6 บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบระบบบังคับลิ้น

1.4.7 ปรับปรุงตำแหน่งของชิ้นส่วนระบบบังคับลิ้นเพื่อให้ได้ผลการใช้งานที่ดีขึ้น

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 นำความรู้พื้นฐานมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหา

1.5.2 สามารถทำการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม

1.5.3 นำชุดทดลองไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

1.5.4 แก้ไขปรับปรุงข้อผิดพลาดที่เกิดจากการใช้งานจริงของระบบบังคับลิ้นในรถไฟฟ้า



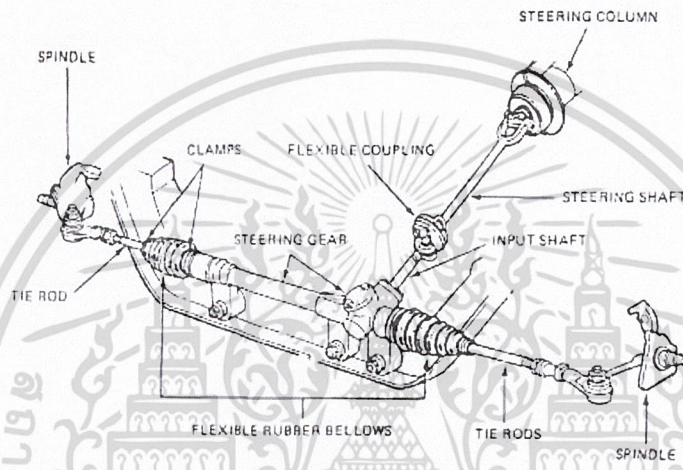
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2.

### ทฤษฎีและการคำนวณที่ใช้ในการทดลอง

#### 2.1 ระบบบังคับเลี้ยวในรถยนต์

ระบบบังคับเลี้ยวเริ่มตั้งแต่พวงมาลัย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่คนขับรถใช้สำหรับบังคับทิศทาง การเคลื่อนที่ของรถ การบังคับเลี้ยวจากพวงมาลัยจะถูกส่งลงไปยังแกนพวงมาลัยและผ่านคู่ต่อประคบ 1-2 ตัวก่อนจะผ่านไปยังชุดเฟืองบังคับเลี้ยว ระบบบังคับเลี้ยวที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบธรรมดาและแบบแร็คและพินเนียน โดยชุดเฟืองจะบังคับเลี้ยวจะถูกเชื่อมต่อกับคันส่งดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยว

##### 2.1.1 ปลดล็อกของแกนพวงมาลัย

สำหรับทุกๆ ไปปลดล็อกของแกนพวงมาลัยใช้สำหรับรองรับก้านพวงมาลัย โดยมีลูกปืนช่วยทำให้การเคลื่อนที่ของแกนพวงมาลัยเป็นไปอย่างอิสระ ปลดล็อกของแกนพวงมาลัยเป็นส่วนหนึ่งของรถยนต์ที่ถูกพัฒนาให้มีความซับซ้อนมากขึ้นในปัจจุบัน

ในปัจจุบันรถยนต์ได้มีการรวมอุปกรณ์หลายอย่างเข้าไว้ด้วยกันที่ปลดล็อกของแกนพวงมาลัย เช่น แตรที่พวงมาลัย, สวิตช์ไฟเลี้ยวที่อยู่บริเวณพวงมาลัย และโดยปกติจะมีสวิตช์จูดะเปิดโดยไม่เพียงแต่ควบคุมการสตาร์ทเครื่องยนต์และการทำงานของเครื่องยนต์เท่านั้น แต่ยังล็อกแกนพวงมาลัยจากการหมุนและล็อกการจูดะเปิดเมื่อถอดกุญแจออก และในรถยนต์รุ่นใหม่ๆ ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้ปุ่มกดและหมุนเพื่อนำกุญแจออก

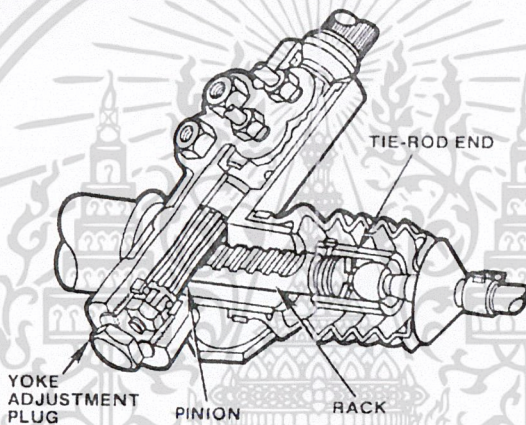
##### 2.1.2 ระบบบังคับเลี้ยวแบบ แร็คและพินเนียน

ระบบบังคับเลี้ยวแบบ แร็คและพินเนียน นั้นมีการใช้งานที่ง่ายและน้ำหนักเบากว่าในระบบบังคับเลี้ยวแบบธรรมดา และเป็นที่ยอมรับว่ามีอัตราตอบสนองรวมทั้งให้ความรู้สึกที่ดีกว่า โดยทั่วไปรถสี่ล้อขนาดเล็กและน้ำหนักเบาจะใช้ระบบบังคับเลี้ยวแบบ แร็คและพินเนียน ส่วนระบบบังคับเลี้ยวแบบธรรมดาจะใช้ในรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามข้อด้อยในระบบบังคับเลี้ยวแบบ แร็คและพีนีอน ก็ยังมีคือ การส่งผ่านความ สั่นสะเทือนจากถนนมาสู่พวงมาลัยที่มากเกินไป โดยได้มีการทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการติด ปลอกยางเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน และบางครั้งแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการติดตั้งอุปกรณ์กันสะบัดเพื่อลด แรงสั่นสะเทือนซึ่งอุปกรณ์กันสะบัดเป็นส่วนที่ทำหน้าที่หน่วงเพื่อเพิ่มความต้านทานการสั่นคล้อยการ ทำงานของ โช๊ค แอ็บซอบเบอร์ ในช่วงล่างของรถยนต์ อุปกรณ์กันสะบัดนี้จะเชื่อมต่ออยู่กับโครงรถยนต์ และก้านของกระบอกสูบจ่ออยู่กับแขนเชื่อมโยงต่างๆของระบบบังคับเลี้ยว

ก้านพวงมาลัยนั้นเชื่อมต่อไปยังเพ็องพีนีอนซึ่งขบอยู่กับพินเพ็องของเพ็องแร็ค เมื่อเพ็องพีนีอน หมุน เพ็องแร็คจะถูกขับให้เคลื่อนไปตามทิศทางที่ต้องการโดยมีการรองรับด้วยปลอกที่อยู่ในห้องเพ็อง เพื่อตัวให้มีการเคลื่อนตัวได้ในแนวด้านข้างเวลาหมุน ส่วนยางที่ยึดหุ้มที่อยู่ด้านข้างใช้เพื่อป้องกันฝุ่น และน้ำต่างๆจากภายนอกและในส่วนของยางปลายห้องเพ็องจะถูกใช้เพื่อป้องกันการรั่วออกของจารบี

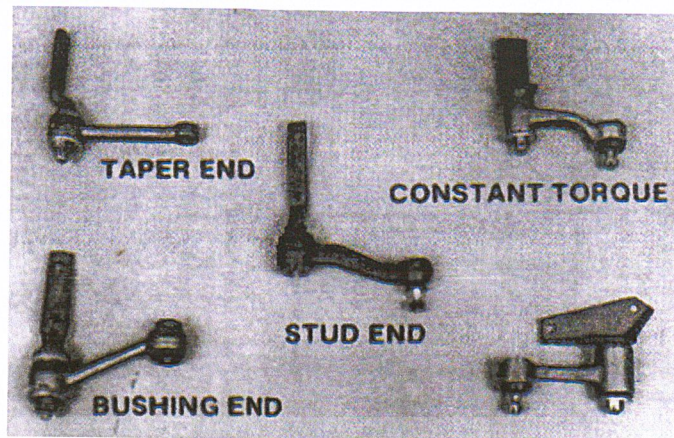


รูปที่ 2.2 ระบบบังคับเลี้ยวแบบ แร็คและพีนีอน

### 2.1.3 แขนเชื่อมโยงของระบบบังคับเลี้ยว

1. ลูกหมากคันชัก ส่วนมากเป็นแบบ บอลล์และช็อกเก็ต ซึ่งคล้ายกับ บอลล์ จอยท์ ที่ใช้โลหะหรือยางเพื่อรักษาความต้านทาน (เล็กน้อย) ระหว่างบอลล์และช็อกเก็ต
2. คันชักและชุดเพ็องพวงมาลัย แร็คและพีนีอน
3. คันชักและชุดเพ็องพวงมาลัยแบบธรรมดา
4. แขนไอเดิลและแขนเชื่อมส่วนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แขนเชื่อมโยงของระบบบังคับเลี้ยวแบบต่าง ๆ

#### 2.1.4 การตรวจสอบแก้ไขปัญหาของระบบบังคับเลี้ยว

##### ตารางที่ 2.1 การตรวจสอบแก้ไขปัญหาของระบบบังคับเลี้ยว

ปัญหาที่พบ	สาเหตุ	แนวทางการแก้ไข
การหลวมคลอนในระบบบังคับเลี้ยว	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปรับลูกปืนล้อหน้าหลวมเกินไป</li> <li>- คับลิ้งค์ของแกนพวงมาลัยสีกหรือ</li> <li>- บอลล์จอยท์ตัวบนสีก</li> <li>- การเชื่อมต่อพวงมาลัยกับแกนพวงมาลัย, แขนพิตแมน, คันชัก, สลักเชื่อม หลวม</li> <li>- ลูกปืนของชุดเฟืองระบบบังคับเลี้ยว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปรับตั้งให้ถูกต้อง</li> <li>- เปลี่ยนใหม่</li> <li>- ตรวจสอบและเปลี่ยนใหม่ ถ้าจำเป็น</li> <li>- ชันด้วยความแน่นที่พอเหมาะและเปลี่ยนใหม่ถ้าจำเป็น</li> <li>- ปรับตั้งให้ถูกต้อง</li> </ul>
คันชักหลวมคลอน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ซีล เสียและสารหล่อลื่นรั่วออกไปทำให้เกิดการสึกหรอ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสียหายใหม่และเติมสารหล่อลื่นให้พอเหมาะ</li> </ul>
พวงมาลัยหนักใช้แรงในการหมุนพวงมาลัยมาก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ลมยางอ่อน</li> <li>- แขนเชื่อมต่างๆต้องการการหล่อลื่น</li> <li>- ยึดแกนคันชัก, แขนไอเดิลแน่นเกินไป</li> <li>- ปลอกแกนของระบบเฟือง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เติมลมยางให้เหมาะสม</li> <li>- ใส่อุปกรณ์หล่อลื่นที่เหมาะสม</li> <li>- ใส่อุปกรณ์หล่อลื่น, เปลี่ยนใหม่ถ้าจำเป็น</li> <li>- ปรับตั้งปลอกแกนพวงมาลัยให้ได้ศูนย์</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	บังคับเลี้ยวไม่ได้ศูนย์ - ปรับชุดเฟืองระบบบังคับเลี้ยว แน่นเกินไป - ล้อหน้าไม่ได้ศูนย์	- ปรับการติดตั้งให้ถูกต้อง - ตรวจสอบศูนย์ล้อและปรับตั้ง ศูนย์ให้ถูกต้อง
การเลี้ยวไม่ดี	- แขนเชื่อมหรือบอลล์จอยท์ ต้องการสารหล่อลื่น - ปรับชุดเฟืองระบบบังคับเลี้ยว แน่นเกินไป - ปลอกแกนของระบบเฟือง บังคับเลี้ยวไม่ได้ศูนย์ - ล้อหน้าไม่ได้ศูนย์	- ใส่อจารหล่อลื่นให้เหมาะสม - ปรับตั้งให้ถูกต้อง - ปรับตั้งปลอกแกนพวงมาลัย - ตรวจสอบศูนย์ล้อและปรับตั้ง ศูนย์ให้ถูกต้อง

## 2.2 กาน

### 2.2.1 ทฤษฎีการออกแบบและคำนวณของกาน

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากรับแรงในแนวค้ำเช่นเดียวกับกานทั่วไป ฉะนั้นจึงใช้ความเค้นดัด (bending stress) และการยุบตัว (deflection) เป็นข้อจำกัดในการออกแบบ ความเค้นดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวนอกของกาน ณ ตำแหน่งที่โมเมนต์ดัด (bending moment) มีค่าสูงสุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

สมการความเค้นดัดสูงสุด

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I}$$

โดยที่ M คือ โมเมนต์ดัด

C คือ ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปยังผิวนอกสุด

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

สำหรับค่า โมเมนต์ความเฉื่อย ของเหล็กหน้าตัดชนิดใดได้จากตารางค่า โมเมนต์ความเฉื่อย ของวัสดุในภาคผนวก ข

สมการระยะการโก่งตัวของกานสูงสุด

$$y_{\max} = \frac{FL^3}{48EI}$$

สมการ โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M_x = \frac{Fx}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ก็ต้องเข้าใจถึงวิธีการหาโมเมนต์คดสูงสุดและการยุบตัวของคานจากกลศาสตร์วัสดุเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพราะลักษณะของแรงและชนิดของคานอาจจะไม่ตรงกับตารางต่างๆซึ่งแสดงไว้อย่างจำกัดก็ได้

### 2.3 สเตรนเกจ ( สเตรนเกจ)

สเตรนเกจ เป็นตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistor) ชนิดหนึ่ง ที่แปรค่าความต้านทานตามระยะการยืดหดตัวของ สเตรนเกจ เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก จึงสามารถใช้ติดตั้งบนวัสดุต่างๆ เพื่อวัดค่าความเครียด (Strain) ของวัสดุได้โดยสะดวก ค่าความเครียดที่วัดได้นี้ สามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าต่าง ๆ เพื่อออกและบำรุงรักษา เครื่องจักรกลและ โครงสร้างทางวิศวกรรม รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ อีกมากมาย

เมื่อ ที่ติดตั้งบนวัสดุถูกออกแรงดึงหรือกด ให้ยืดหรือหดตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ สเตรนเกจ จะเปลี่ยนแปลงดังสมการ

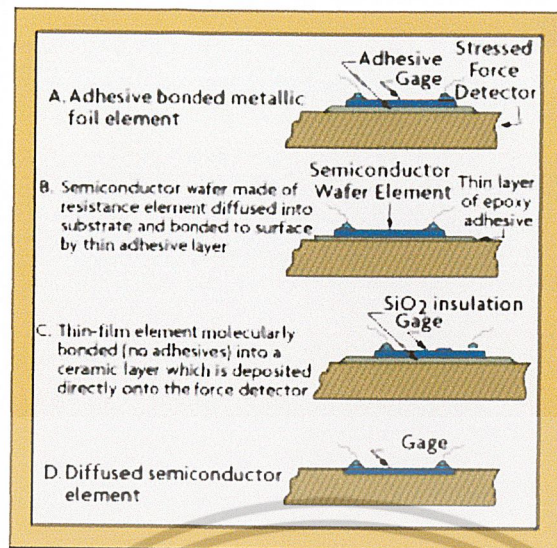
$$K_s = \frac{(\Delta R/R)}{(\Delta L/L)} = \frac{(\Delta R/R)}{\epsilon}$$

#### 2.3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของ สเตรนเกจ

โครงสร้างโดยทั่วไปของ สเตรนเกจ จะประกอบไปด้วย เส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.0127 มม. ถึง 0.0254 มม. ส่วนความยาวนั้นมีหลายขนาด ขึ้นกับความต้องการใช้งาน เมื่อเราให้ความเครียดถูกจำกัดที่ค่าใดค่าหนึ่ง (ขึ้นกับชนิดของวัสดุ) ขณะเดียวกันจะมีแรงดึงขึ้นภายในเป็น T ซึ่งค่าแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นลวด แต่มันจะมีค่าลดลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ลักษณะของเส้นลวด สเตรนเกจ ที่ใช้กันทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Unbonded Type และ Bonded Type แต่แบบที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมจะเป็นแบบ Bonded Type ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แสดงลวดความต้านทาน สเตรนเกจ แบบ Bonded Type จะเห็นว่าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

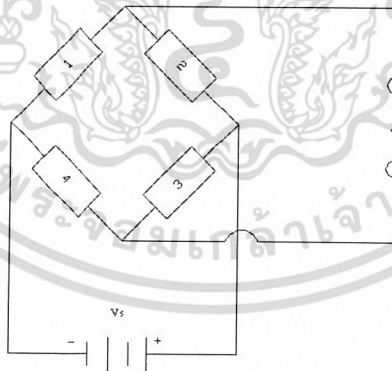
1. Foil คือตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทำมาจาก Resistive Foil ใช้ในงานทั่วไป
2. Wire สเตรนเกจ คือตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทำมาจาก Resistive Wire ใช้ในการวัดที่อุณหภูมิสูง ซึ่งลวดที่ใช้ยึดติดแน่นอยู่กับพลาสติกหรือกระดาษ หรือซีเมนต์ หนึ่ง สเตรนเกจ ชนิดที่เป็นแผ่นโลหะบาง จะมีข้อดีกว่าแบบเส้นลวด คือ มีขนาดบางกว่า มีความไวในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เป็นเชิงเส้นดี
3. Semiconductor สเตรนเกจ คือตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทำมาจาก Semiconductor ใช้ในการวัดที่ต้องการความละเอียดสูง



รูปที่ 2.4 ลักษณะของการติดตั้ง สเตรนเกจ แบบต่างๆ

### 2.3.2 หลักการทำงานของ สเตรนเกจ

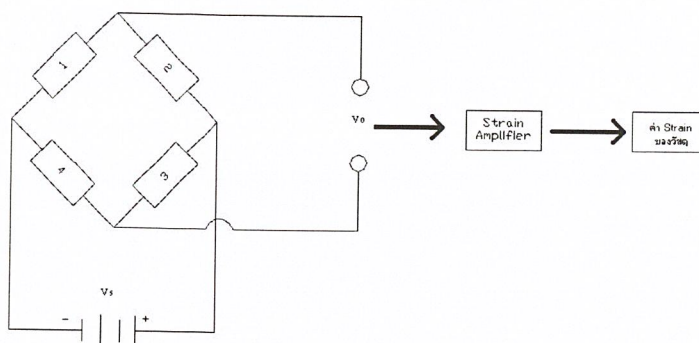
จากหลักการทำงานของ สเตรนเกจ ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน เมื่อมีความเครียดเกิดขึ้น ดังนั้น การต่อร่วมกับวงจร ไฟฟ้าอื่นๆ จึงต้องมีความถูกต้อง และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูง ซึ่งวงจรที่มีคุณสมบัติดังกล่าวที่ดีแบบหนึ่ง คือ วงจรบริดจ์ โดยการต่อตัวต้านทานของ สเตรนเกจ ให้เป็นวงจรบริดจ์ อีกทั้งต้องมีการต่อไฟกระแสตรง หรือกระแสสลับเข้ากับวงจรบริดจ์ เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการต่อ สเตรนเกจ เข้ากับวงจรบริดจ์

ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ สเตรนเกจสามารถหาได้โดยวัดค่าความแตกต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าในวงจรบริดจ์ แต่เนื่องจากความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก จึงต้องใช้วงจรขยายหรือใช้ Strain Amplifier ขยายความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



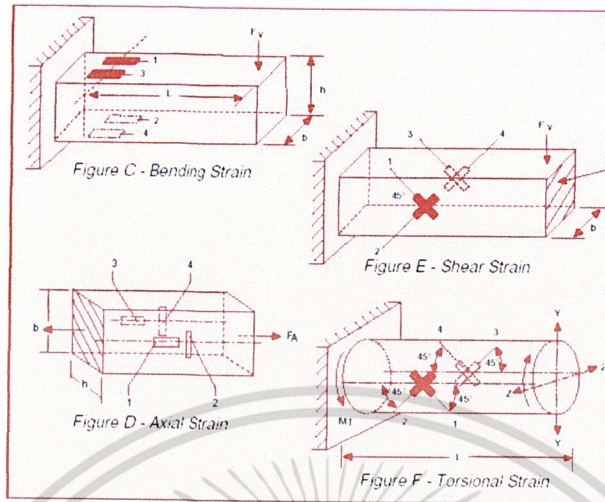
รูปที่ 2.6 แสดงการวัดค่าความเครียดของวัสดุโดยใช้ อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ต่อเข้ากับ สเตรนเกจ

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะวัสดุที่ใช้ทำ สเตรนเกจ

Common name	Composition	Gage Factor	Temp coefficient Of resistance	Resistance. Ohms per ft.in 1-millimeter Diameter	Stress equivalent to 10°C on steel psi.
Nichrome	Ni-0.80, Cr-0.20	2	300	638	2000
Maganin	Ni-0.04, Mn-0.12, Cu-0.84	0.47	Nil	260	-400
Advance		2.1	-	-	-66
Copel	Ni-0.45, Cu-0.55	2.4	2,-2	290	-200
Constantan		2.1	-	-	-60
Chromel-C	Ni-0.64, Fe-0.25, Cr-0.11	2.5	-	640	980
Iso-elastic	Ni-0.36, Cr-0.08, Fe-0.52, Mo-0.005	3.5	175	680	5000
Nickel	-	-12.1	6000	70	-13500
Platinum	-	4.8	3000	80	-
Soft Iron	-	4.2	5000	68	-
Carbon	-	20	-500	45000	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 รูปแบบการติดตั้ง สเตรนเกจ เข้ากับวัสดุ



รูปที่ 2.7 ลักษณะของการติดตั้ง สเตรนเกจ กับ วัสดุชนิดต่าง ๆ

ค่าความต้านทานนั้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดความยาวของเส้นลวดต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

$$\frac{dL}{L} = \varepsilon_a \quad (\text{axial strain})$$

$$\frac{dD}{D} = \varepsilon_t \quad (\text{transverse strain})$$

$$\frac{dD/D}{dL/L} = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_t} = \nu \quad (\text{poisson's ratio})$$

หากค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขณะที่เกิดความเครียดขึ้นแล้ว มันจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อวัสดุนั้นๆ กล่าวคือ ผลที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในเนื้อวัสดุ ซึ่งบางทีอาจเรียกว่า Piezo resistance effect or Bridgeman effect

$$\frac{d\rho/\rho}{dl/l} = \Psi E$$

สำหรับกรณีที่ว่าวัสดุนั้นมีค่าความยืดหยุ่นถูกจำกัด นั่นคือค่า  $\frac{d\rho}{\rho}$  ก่อนข้างคงที่ ส่วนค่าของ  $\Psi$

จะเรียกว่า Bridgeman coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 คุณสมบัติจำเพาะของ สเตรนเกจ ในอุดมคติ

Specification	Resistance strain gauge
1. Size	Very small
2. Weight	Insignificant
3. Ease of attachment to test piece	Relatively simple
4. Sensitivity to Strain	Fair-higher output would be very advantageous
5. Sensitivity to ambient variables	Slightly affected, but the gauge can usually be Protected or the variable compensated for
6. Static and dynamic strain indication	Will indicate both with equal ease
7. Remote indication and recording	Easily accomplish
8. Expense	Most gauge are comparatively inexpensive
9. Gauge length	Shortest gauge length presently available is 1/64 in.

### ตารางที่ 2.3 แสดงคุณลักษณะของ สเตรนเกจ ในอุดมคติ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำขึ้นอย่างมากและ สเตรนเกจ ก็ได้มีการพัฒนาเช่นเดียวกัน โดยได้มีการนำเอาสารกึ่งตัวนำมาสร้างเป็น สเตรนเกจ ซึ่งจะใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางของวัสดุจำพวกเยอมาเนียม หรือซิลิกอน ซึ่ง gauge แบบนี้จะมีค่า gauge factor สูงมาก ขณะเดียวกันจะมีความเปราะ และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานสูง

### 2.3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้

- $K_s$  คือ ค่า gauge factor (อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียด)
- $R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ สเตรนเกจ แต่ละตัว
- $\Delta R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ สเตรนเกจ
- $V_o$  คือ ค่าความต่างศักย์ ( Output )
- $V_s$  คือ ค่าความต่างศักย์ ( Input )
- $L$  คือ ค่าความยาวของวัสดุ
- $\Delta L$  คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ
- $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การกัดกร่อน

การกัดกร่อน หรือ corrosion คือการเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้คุณสมบัติของโลหะเปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อน เป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่าย จากปัญหาการกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นค่าซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรีไซเคิลใหม่ทดแทนส่วนที่ชำรุดเสียหายจนไม่อาจใช้งานได้อีกต่อไป บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไป เช่น การออกแบบเพื่อใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน การกัดกร่อน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอน โดยที่โลหะประกอบด้วยอะตอมโลหะเกาะเกี่ยวกันตลอดเนื้อโลหะด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ ที่มีคู่อิเล็กตรอนที่พันธะเป็นชนิดไม่ประจำ โลหะจึงมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนย้ายได้ ที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้าด้วยกัน โลหะจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน อิเล็กตรอนที่พันธะจะหลุดออกทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็น ไอออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเล็กตรอนครบเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่เรียกว่า เซลล์การกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเล็กตรอนเป็นขั้วแอโนด (anode) อิเล็กตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเล็กตรอนเป็นขั้วคาโทด (cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ให้อิออนเดินทางครบเซลล์ ดังนั้นการกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้โดยทั่วไป อาจกล่าวได้ว่าโลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็ว- ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึงมาจากโลหะและสิ่งแวดล้อม

### 2.4.1 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะ ที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อนในแนวอื่นก็เกิดได้ แต่น้อย

pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือเป็นหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ

pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของ โครงสร้างทั้งหมดที่น้อยลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้อาณาเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเฉพาะที่และเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน การป้องกันโดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบ pitting ไม่ควรนำมาใช้ในการสร้างโรงงานหรือเครื่องมือ วัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกัน เช่นการเติมโมลิบดีนัมลงไปเหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ pitting โดยจะทำให้เกิดผิว passive ที่มีความเสถียรมากกว่า คือมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมาก วัสดุ 2 ชนิดนี้ประพฤติตัวต่างกันคือชนิดหนึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในน้ำทะเล แต่อีกชนิดหนึ่งสามารถใช้ได้ในบางกรณี

#### 2.4.2 การกัดกร่อน-ความล้า (Fatigue Corrosion)

ความล้าหรือ Fatigue เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ กัน หรือซ้ำแล้วซ้ำเล่า แรงที่กระทำเป็นได้ทั้ง Tensile และ compressive stress จนที่สุดแล้วโลหะนั้นก็แตกเสียหาย(fracture) โดยปกติแล้วการกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าค่า yield point และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่งและในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกลและทางเคมี โดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย

#### 2.4.3 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตัก้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อไอออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้

#### ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

1. ความเค้น ต้องเป็นความเค้นดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตัก้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อนหรืออาจจะเกิดจากการเชื่อมก็ได้

#### 2. สภาพแวดล้อม

การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหายเนื่องจาก cracking ที่เกิดขึ้นโดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อกรกัดกร่อนกับ tensile stress คำว่า tensile stress มุ่งหมายเอาความเค้นที่กระทำกับโลหะ (applied stress) และความเค้นภายใน (internal residual stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากการกัดกร่อน ตัวอย่าง เช่น นีอิตและสกรูเมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนจะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างนีอิตและสกรู อย่างไรก็ตามปริมาณของผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่าปริมาณดั้งเดิมของโลหะ มันจึงทำให้เกิด tensile stress ขึ้นบนสกรูซึ่งเสียหายด้วยกระบวนการ cracking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดกร่อนแบบนี้ปกคิมิลักษณะพิเศษ คือ

1. ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะในโลหะผสมเท่านั้น ในโลหะบริสุทธิ์ไม่เกิด
2. ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด
3. การอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก
4. การป้องกันแบบคาโรติกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับ stress corrosion cracking ได้แก่

- อุณหภูมิ
- องค์ประกอบสารละลาย
- องค์ประกอบของโลหะ
- ขนาดของแรงเค้น
- โครงสร้างของแรงเค้น

การแตกหักเสียหาย (cracking) พบว่ามีทั้งแบบแตกไปตามขอบเกรน (intergranular cracking) และแบบผ่ากลางเกรน (transgranular cracking)

การป้องกัน

1. ลดความเค้นในเนื้อโลหะลง หรือลดความเค้นที่กระทำกับผิวโลหะ
2. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม
3. เลือกโลหะที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
4. ใช้การป้องกันแบบคาโรติก
5. ใช้สารยับยั้ง

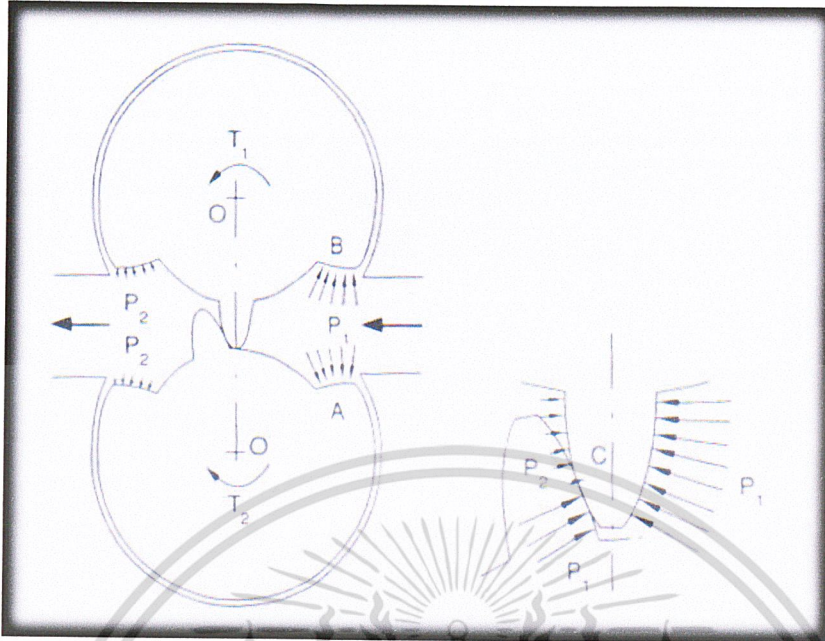
## 2.5 ไฮดรอลิก

### 2.5.1 มอเตอร์ไฮดรอลิก

มอเตอร์ไฮดรอลิก คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานของการไหลให้เป็นพลังงานกลในแนวหมุน (Rotary) เพื่อให้เกิดแรงบิด (Torque) และอัตราการไหล (Flow) มอเตอร์ไฮดรอลิกทำงานได้จากการไม่สมดุลของชุดหมุนซึ่งแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

ในการทดลองนี้ได้ใช้มอเตอร์ไฮดรอลิกแบบเฟือง (Gear Motor) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ คือ ตัวเรือนมอเตอร์ (Housing) ซึ่งมีช่องน้ำมันเข้า (Inlet Port) และช่องน้ำมันออก (Outlet Port) ประกอบรวมอยู่กับชุดอุปกรณ์การหมุนประกอบด้วยเฟือง 2 ตัวคือ เฟืองขับ (Drive Gear) ซึ่งต่อเข้ากับแกนของโหลด และเฟืองอีกตัวคือ เฟืองตาม (Driven Gear) ซึ่งจะหมุนตามเฟืองขับในทิศทางตรงข้ามกัน ความดันด้านเข้าของมอเตอร์จะเท่ากับความดันของน้ำมันในระบบส่วนอีกด้านหนึ่งจะเป็นความดันภายใต้ความดันของถังน้ำมัน ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าเฟืองที่ไม่ได้ขบกันจะมีความดันกระทำทั้งสองข้างทำให้มีความดันสมดุลกัน ส่วนเฟืองที่ขบกันจะเป็นจุดที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล จึงเป็นผลให้เฟืองหมุนในทิศทางตามลูกศรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทิศทางการหมุนของเฟืองมอเตอร์

แรงบิดของมอเตอร์ไฮดรอลิก (Motor Torque)

สมการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฮดรอลิก

$$T = \frac{V_d \times P}{2\pi}$$

ความเร็วของมอเตอร์ไฮดรอลิกและปั๊มไฮดรอลิก

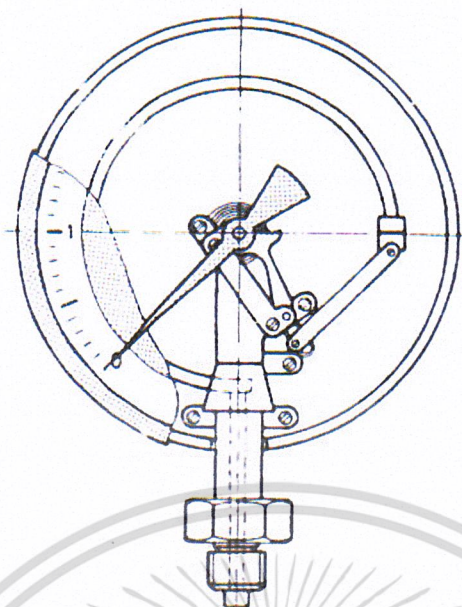
สมการหาค่าความเร็วของมอเตอร์ไฮดรอลิกและปั๊มไฮดรอลิก

$$N = \frac{Q}{V_d}$$

### 2.5.2 เกจความกดดัน

เกจความกดดัน ทำหน้าที่เตือนความกดดันในวงจรไฮดรอลิก หากใส่ข้อต่อเกจไว้ในวงจรช่วงต่างๆ ตรวจสอบความกดดันแต่ละช่วงได้โดยง่าย ตัวเกจทำงานด้วยกลไกท่อแบนโค้ง มักเรียกว่า ท่อขดใส่ไก่ ความกดดันยิ่งมาก ท่อแบนจะพยายามเหยียดตรง ดันกระเดื่องให้เข็มเกจชี้ตัวเลขสัมพันธ์กับความกดดันที่กระทำต่อท่อแบนนั้น ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



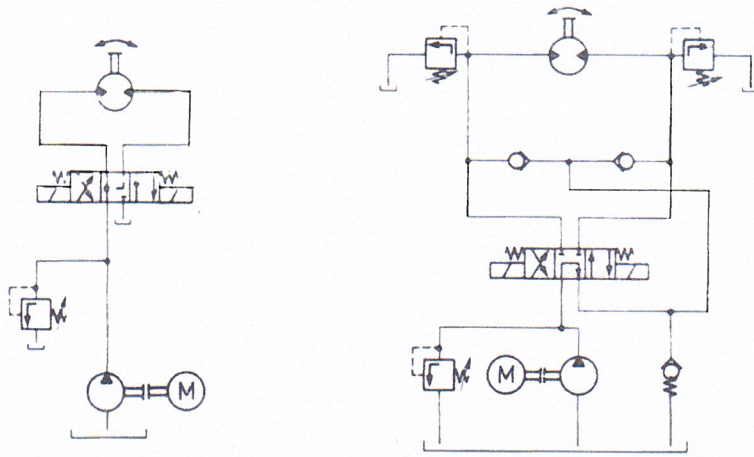
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะส่วนประกอบเกจวัดความดัน

### 2.5.3 การบังคับมอเตอร์ไฮดรอลิก

**วงจรถัด** เป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ป้อนคู่น้ำมันจากถัง ส่งไปยังมอเตอร์โดยตรง แล้วปล่อยคืนกลับถึงทันที น้ำมันไหลไปทางเดียว ระบายความร้อนได้ดี ความสกปรกเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งระบบ จึงต้องใช้ถังน้ำมันขนาดใหญ่

**วงจรถัด** ส่วนใหญ่ใช้เป็นชุดพลังงานขับไฮดรอลิก (fluid-drive) มีความกะทัดรัดและความรวดเร็วในการทำงาน ป้อนกับมอเตอร์มักประกอบเป็นหน่วยเดียวกัน ปรับความเร็วรอบได้อย่างไม่มีขั้นความเร็ว ป้อนเป็นแบบปรับได้ ส่งน้ำมันออกได้ 2 ทาง คือปรับโรเตอร์ป้อนไปทางตรงข้าม ป้อนจะส่งน้ำมันกลับทิศทาง ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางทันที กลับทิศทางหมุนได้ง่ายและรวดเร็วเป็นข้อดี แต่เกิดความร้อนในระบบสูง จำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนน้ำมัน ไฮดรอลิกเพิ่มขึ้น

การควบคุมมอเตอร์ไฮดรอลิกวงจรถัด ดังรูปด้านซ้ายของรูปที่ 2.10 ใช้ลิ้นทิศทาง 4/3 มีตำแหน่งพักอิสระอาจเกิดอันตรายต่อวงจรได้ เพราะมอเตอร์จะหยุดหมุนทันทีทันใด เมื่อปิดสวิทช์ จึงนิยมใช้ลิ้นทิศทาง 4/3 ที่มีตำแหน่งพักไหลกลับ ร่วมกับลิ้นจำกัดความกดดันและท่ออุดเติมน้ำมันได้ ดังรูปด้านขวาของรูปที่ 2.10 ป้องกันมอเตอร์ถูกถลอก



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการควบคุมมอเตอร์ไฮดรอลิกวงจรเปิด

ในปริบตาที่มอเตอร์หยุดการทำงานหลังปิดสวิตช์ แรงโน้มถ่วงจากการหมุนของส่วนประกอบที่มอเตอร์เคยขับให้หมุน จะกลายเป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หยุดหมุนกลายเป็นปั้มน้ำมัน คูดน้ำมันไปทิศทางที่น้ำมันป้อนเข้ามอเตอร์ ผลกระทบอาจเป็นอันตรายต่อท่อทางคูดและทางส่งที่มอเตอร์หมุน จึงต้องลื่นจำกัดความกดดันให้น้ำมันไหลออกได้ทั้งการหมุนซ้ายและหมุนขวา เช่นเดียวกับทางเข้ามอเตอร์ต่อดว้ยลื่นกันกลับ

การบำรุงรักษาระบบไฮดรอลิก

-ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของปั้มไฮดรอลิก

1. ตัวปั้มเอง ขึ้นกับวัสดุ-โลหะที่ทำปั้ม การผลิต ชัดแต่งผิว และความแข็งของผิวขึ้นส่วนปั้ม
2. การบำรุงรักษา ระบบไฮดรอลิกและสภาพโดยรวมของระบบ
3. น้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งจะรวมเอาถึง คุณภาพของน้ำมัน ความชื้นใต อุณหภูมิของน้ำมันในขณะ

ระบบทำงาน ระดับความสกปรกหรือการปะปนของฝุ่น-อนุภาคของแข็งในน้ำมัน และการกรองน้ำมันไฮดรอลิก

พื้นฐานวงจรเลย์

คอนแทกรีเลย์ต่อวงจรไฟเมนตามอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงสวิตช์เปิดอยู่ คือขณะมีกระแสไฟฟ้าควบคุมรีเลย์ พอปิดสวิตช์ตัดกระแสไฟควบคุมรีเลย์ คอนแทกรีเลย์ถอยหลังกลับคืนเองด้วยแรงสปริงภายในรีเลย์ที่ใช้เป็นรีเลย์ปกติ คอนแทกเปิด (ขณะไม่ใช้งานคอนแทกทุกตัวเปิด) คอนแทกชุดหนึ่งอยู่กับที่ อีกชุดหนึ่งเคลื่อนที่ได้ การที่จะใช้รีเลย์ขนาดใหญ่หรือรีเลย์หลักต่อวงจรเมนนั้นไม่ปลอดภัย จึงนิยมใช้รีเลย์ช่วย

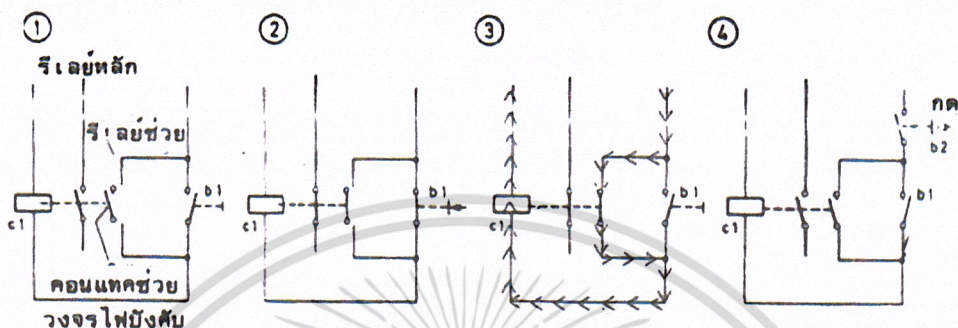
รีเลย์ช่วย ใช้เพิ่มความสามารถในการตัดต่อรีเลย์หลัก ที่ควบคุมวงจรที่ใช้กระแสไฟมากๆ เพราะรีเลย์หลักต้องใช้กระแสไฟควบคุมมากด้วย ใช้สวิตช์ธรรมดาไม่ปลอดภัยพอ ดังนั้นจึงใช้สวิตช์ควบคุมรีเลย์ช่วยแทนควบคุมรีเลย์หลัก ดังรูปที่ 2.11

- 1) ปกติคอนแทกรีเลย์ทุกตัว เปิดค้างด้วยสปริงรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) เมื่อกดสวิตช์ปุ่มกด b1 รีเลย์ c1 เหนี่ยวมาให้คอนแทกต่อกัน
- 3) ปลดสวิตช์ปุ่มกด b1 คอนแทกรีเลย์ยังต่อกัน กระแสไฟควบคุมผ่านทางคอนแทกช่วย
- 4) ตัดวงจรรีเลย์ทั้งหมดด้วยสวิตช์ b2 รีเลย์หยุดการทำงานทันที

ในระบบนิวแมติกทั่วไป การบังคับการทำงานของวงจรนิวแมติก นิยมบังคับด้วยสัญญาณไฟฟ้า คือใช้รีเลย์ เป็นวงจรล่อภายในตัวเอง



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะวงจรรีเลย์ช่วยและรีเลย์หลัก

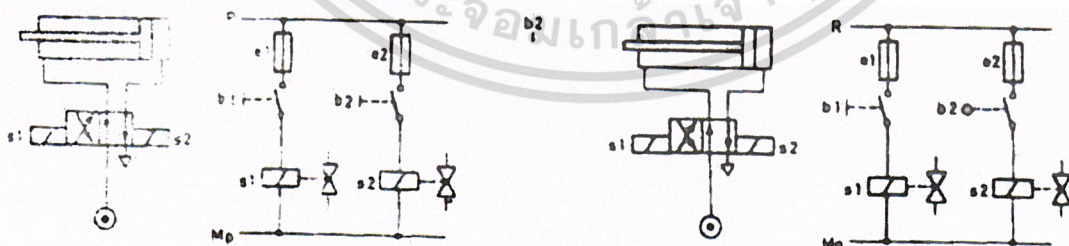
การบังคับลิ้นทิสทางไฟฟ้า

การเขียนแบบวงจรบังคับอัตโนมัติด้วยนิวแมติกผสมไฟฟ้า ต้องแยกเป็นวงจรนิวแมติกและวงจรไฟฟ้า

คนละวงจร วงจรไฟฟ้าให้แสดงด้วยแบบวงจรกระแสเท่านั้น ลิ้นทิสทางที่ใช้ทั่วไปมี 2 ประเภท คือ ลิ้นทิสทางโซลีนอยด์ 2 ด้าน และ ลิ้นทิสทางโซลีนอยด์ด้านเดียว

การบังคับด้วยลิ้นทิสทางโซลีนอยด์ 2 ด้าน (impulse valve)

การบังคับด้วยลิ้นทิสทางโซลีนอยด์ 2 ด้าน บังคับด้วยปุ่มกดโดยตรง โซลีนอยด์ใช้สวิตช์ปุ่มกด ตัวละสวิตช์ เมื่อกดสวิตช์โซลีนอยด์คือให้ลิ้นทำงาน



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะวงจรบังคับอัตโนมัติด้วยสวิตช์ปุ่มกดและสวิตช์สั่นกด

แบบวงจรกระแส ของวงจรไฟฟ้าเมนกับวงจรไฟฟ้าควบคุม ดังรูปด้านซ้ายของรูปที่ 2.12 มีเอกลักษณ์เหมือนกัน ถ้าสวิตช์ปุ่มกดถอยกลับ b2 แทนด้วยสวิตช์สั่นกด การถอยกลับของกระบอกลมจะขึ้นกับช่วงชัก สวิตช์กดถูกสั่นกดของก้านสูบกระบอกลมระหว่างเดินหน้า ดังรูปด้านขวาของรูปที่

2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3.

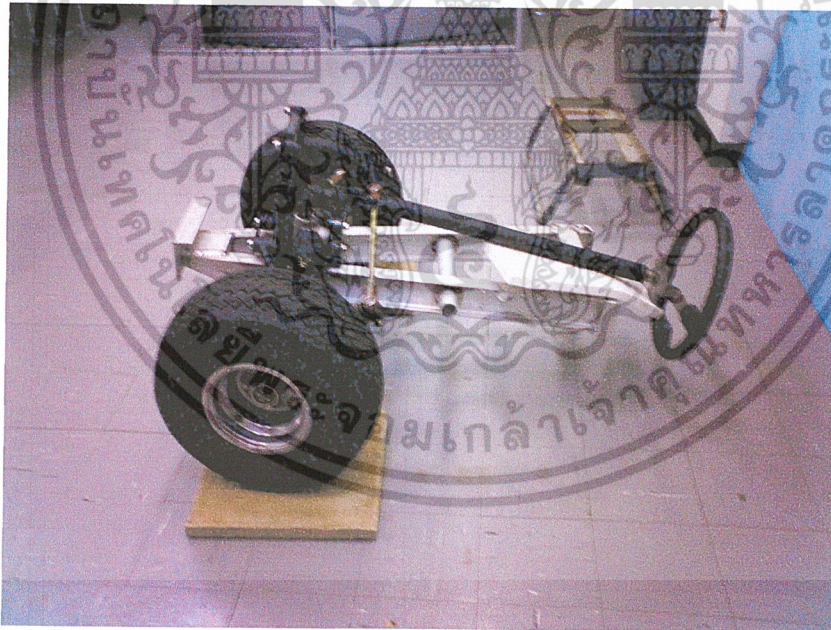
#### การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแรงกด

###### 3.1.1 หลักการออกแบบ

เนื่องจากการทดลองระบบบังคับเลี้ยวเราต้องการทำการทดลองในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของรถไฟฟ้าซึ่งในการใช้งานจริงนั้นย่อมมีแรงกระทำต่อโครงสร้างของรถไฟฟ้าและต่อระบบบังคับเลี้ยวที่เกิดจากน้ำหนักของรถและน้ำหนักจากการบรรทุกทั้งผู้โดยสารและสัมภาระ ในการใช้งานของรถไฟฟ้าจะรับน้ำหนักของล้อหน้า 180 Kg และล้อหลัง 540 Kg ในการทดลองนี้จะทำการทดลองโดยใช้เฉพาะส่วนหน้าของรถไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 3.1

ในการสร้างแรงกดต่อรถได้ออกแบบให้ทำงานโดยใช้คานเหล็กที่สามารถเปลี่ยนวัสดุสร้างแรงด้านที่ผิวสัมผัสกับล้อรถและในการทดลองนี้ใช้คอนกรีตแผ่นเป็นวัสดุสร้างแรงด้านดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้งานร่วมกับแม่แรงไฮดรอลิกที่ติดตั้งเกวียดแรงดันและอุปกรณ์ยึดจับกับโครงรถดังแสดงในรูปที่ 3.3 และเพื่อทราบค่าแรงกดต่อรถที่จะใช้ในการทดลอง และหลังจากประกอบโครงรถเข้ากับชุดทดลองจะต้องทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างน้ำหนักและความดันที่อ่านได้จากเกจของแม่แรงไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 3.4

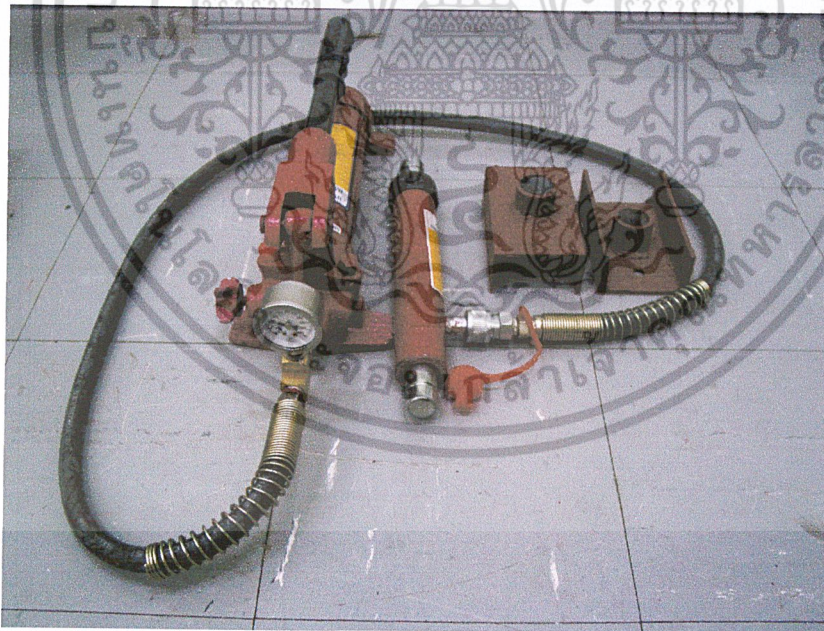


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะระบบบังคับเลี้ยวและช่วงหน้าของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

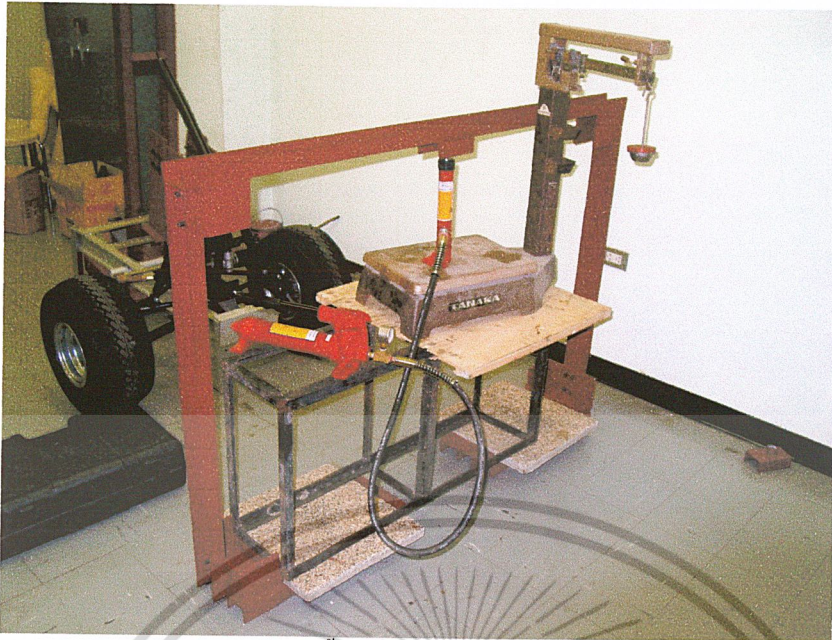


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะกานสำหรับสร้างแรงกดและวัสดุสร้างแรงดันที่ลื้อ



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะแม่แรงไฮดรอลิกอุปกรณ์ยึดจับกับโครงรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าระหว่างน้ำหนักและความดันสำหรับการตั้งค่าगेจความดันที่แม่แรงไฮดรอลิก

### 3.1.2 หลักการคำนวณ

จากตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของ วัสดุวิศวกรรมจะได้ค่า  $E = 200 \text{ GPa}$

กำหนดได้ระยะการโก่งตัวมากที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.01 \text{ m}$

แรง  $F$  ที่กระทำกับคาน มีค่าเท่ากับ  $200 \text{ Kg}$

ความยาวของคาน มีค่าเท่ากับ  $1.55 \text{ m}$ .

Safety Factor มีค่าเท่ากับ  $1.5$

สมการระยะการโก่งตัวของคานสูงสุด

$$y_{\max} = \frac{FL^3}{48EI}$$

$$0.1 = \frac{(200)(1.55)^3}{(48)(200 \times 10^9)(I)}$$

$$I = 0.0761 \times 10^{-6}$$

$$I_{\text{actual}} = I \times \text{SafetyFactor}$$

$$I_{\text{actual}} = 0.0761 \times 10^{-6} \times 1.5$$

$$I_{\text{actual}} = 0.114 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

เนื่องจากความเหมาะสมของวัสดุที่มีในท้องตลาดจึงเลือกใช้วัสดุขนาด  $C75 \times 7$  ซึ่งมีค่า

$$I = 0.103 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

### 3.2 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ต้นกำลังหมุนพวงมาลัย

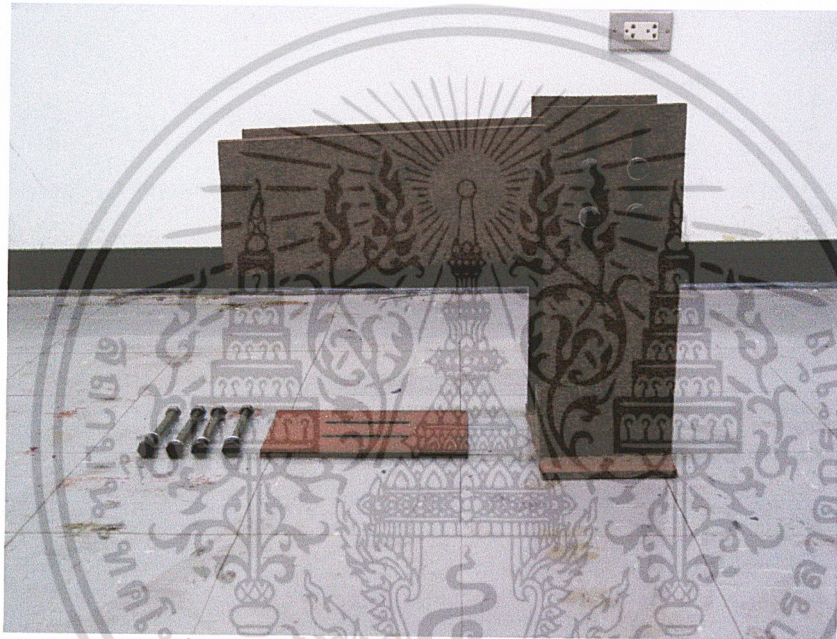
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 หลักการออกแบบ

#### 3.2.1.1 อุปกรณ์จับยึดแกนพวงมาลัย

เพื่อสร้างชุดทดลองให้คล้ายสภาวะการทำงานจริงในรถไฟฟ้าจึงต้องทำการออกแบบอุปกรณ์จับยึดพวงมาลัยให้มีตำแหน่งใกล้เคียงกับรถจริงมากที่สุดโดยยึดติดกับโครงรถ และในการทดลองเพื่อให้ได้การใช้งานที่ดีขึ้นจึงทำการออกแบบร่องเลื่อนของสกรูเพื่อให้สามารถปรับตำแหน่งการจับยึดแกนพวงมาลัยดังแสดงในรูปที่ 3.5

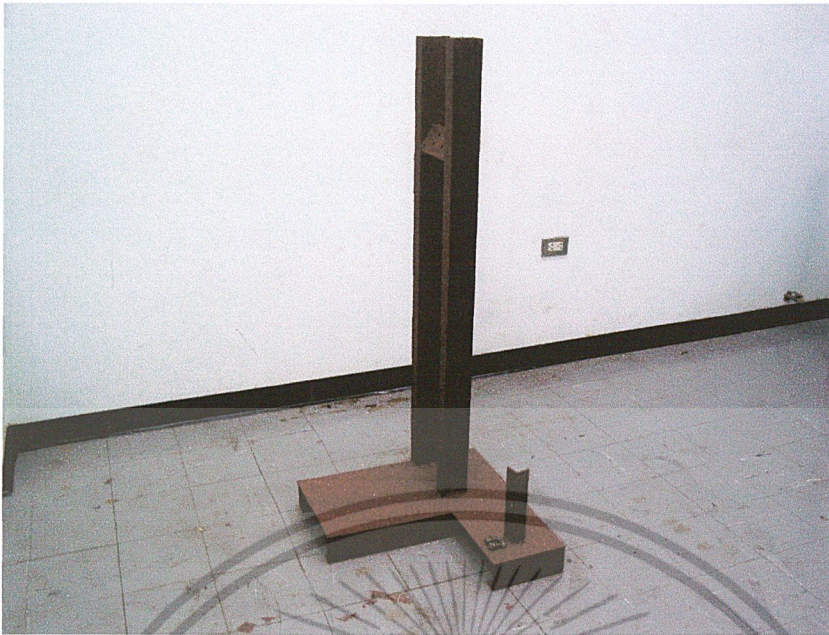
ในชุดทดลองจะสามารถทำการเลื่อนได้ทั้ง 3 ทิศทางโดยการปรับตำแหน่งนี้จะทำให้ตำแหน่งการใช้งานของพวงมาลัยเปลี่ยนไปและตำแหน่งของการติดตั้งชิ้นส่วนของระบบบังคับก็เลยเปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะอุปกรณ์จับยึดแกนพวงมาลัย

#### 3.2.1.2 อุปกรณ์จับยึดมอเตอร์ไฮดรอลิกและโครงรถ

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เฉพาะช่วงหน้าของรถซึ่งในการทดลองจะต้องทำให้โครงรถอยู่ในแนวระนาบขนานกับพื้นจึงต้องทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดโครงรถ โดยทำให้โครงรถมีความสูงอยู่ในระดับความสูงเดียวกันตลอดดังแสดงในรูปที่ 3.6



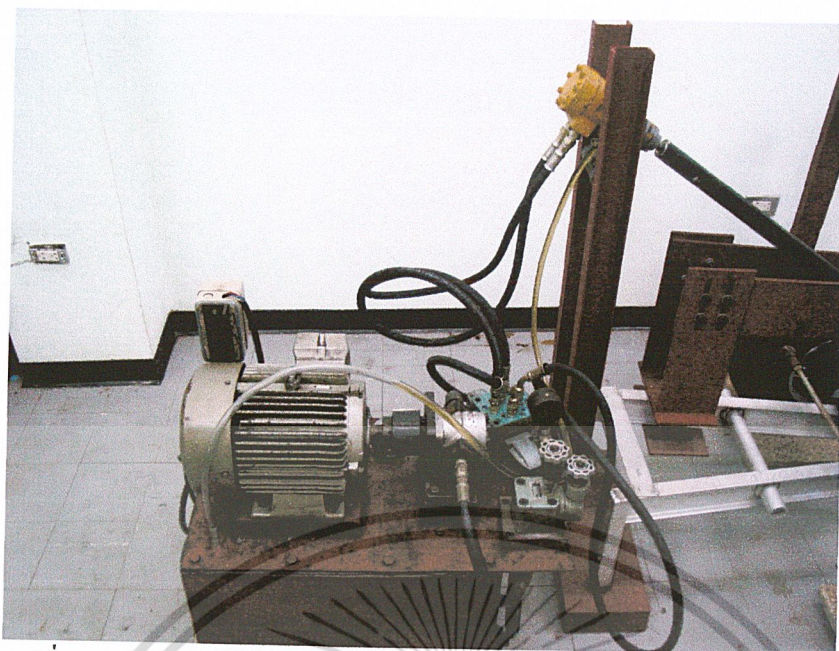
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะอุปกรณ์จับยึดมอเตอร์ไฮดรอลิกและ โครงรถ

### 3.2.1.3 อุปกรณ์มอเตอร์ไฮดรอลิกและชุดต้นกำลังไฮดรอลิก

เพื่อให้การทดลองสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้การหมุนพวงมาลัยจากแรงของคนและทำการทดลองได้อย่างต่อเนื่องจึงต้องทำการออกแบบอุปกรณ์ที่หมุนพวงมาลัยแทนคนและหมุนในทิศทางไปกลับทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้หมุนพวงมาลัยนี้ประกอบไปด้วย

1. ถังน้ำมันไฮดรอลิก
2. ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกและมอเตอร์ไฟฟ้า
3. วาล์วควบคุมความดัน
4. วาล์วควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก
5. มอเตอร์ไฮดรอลิก
6. Coupling joint
7. อุปกรณ์จับยึดมอเตอร์ไฮดรอลิกและ โครงรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะชุดต้นกำลังไฮดรอลิกที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฮดรอลิก

#### 3.2.1.4 อุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิก

เมื่อสามารถสร้างอุปกรณ์ที่ทำการหมุนพวงมาลัยแทนแรงคนได้แล้วต่อไปเพื่อให้การทดลองเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องโดยที่ระบบบังคับเลี้ยวจะทำงานในทิศทางไปและกลับโดยอัตโนมัติ จึงทำให้ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิก

ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิก

1. เริ่มต้นและหยุดการทำงานของชุดทดลอง
2. สลับทิศทางการทำงานของชุดทดลองโดยอัตโนมัติ
3. นับรอบการทดลองโดยให้การเลี้ยวจากซ้ายสุดไปขวาสุดและกลับมาขั้วซ้ายสุดอีกครั้งเป็น 1

รอบการทำงานของระบบบังคับเลี้ยว

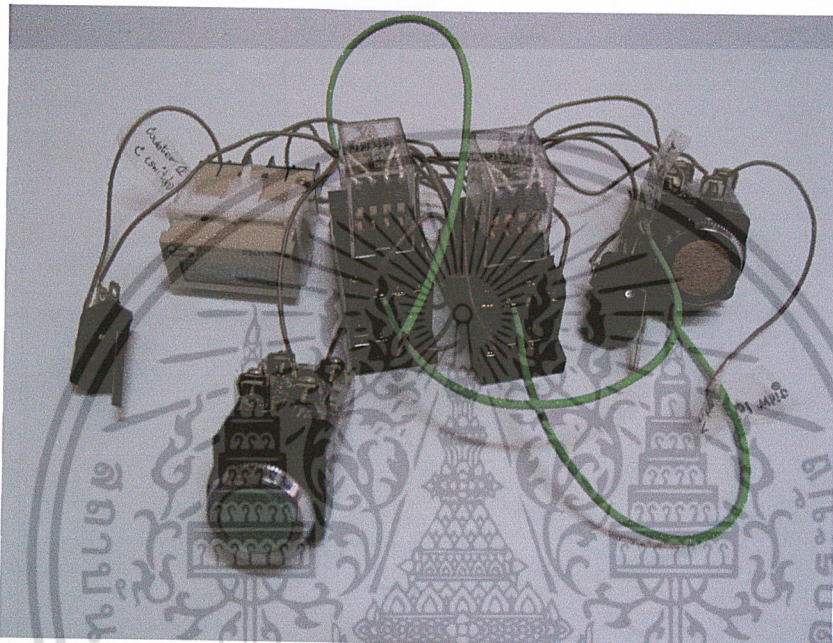
ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 3.8 มีดังนี้

1. สวิตช์ไฟฟ้าแบบปิด-เปิด
2. ลิมิต สวิตช์
3. รีเลย์
4. อุปกรณ์นับรอบการทำงาน

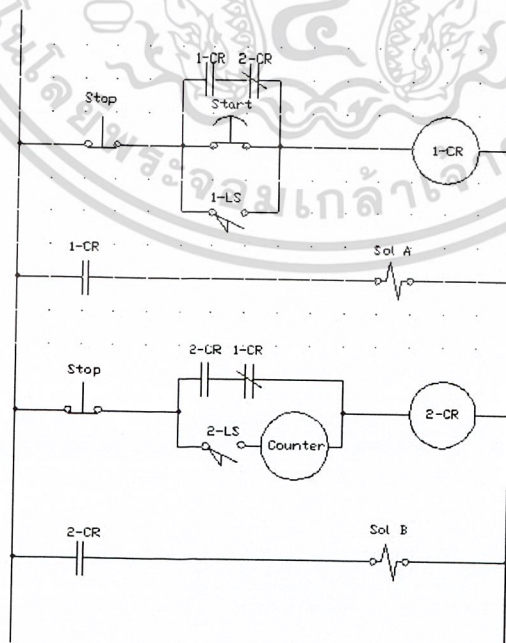
การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิกจะต้องทำงานร่วมกับวาล์วควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกแบบ 4/3 โดยที่ตำแหน่งซ้ายจะทำให้ น้ำมันไฮดรอลิกไหลในทิศทางปกติและในตำแหน่งขวาจะสลับทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกและสุดท้ายในตำแหน่งกลางจะหยุดการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิก จะทำการติดตั้งลิมิต สวิตช์ไว้ที่โครงรถไถลบริเวณแขนไอเดิล เมื่อระบบบังคับเลี้ยวทำงานแขนไอเดิลจะเคลื่อนที่มาสัมผัสลิมิต สวิตช์ และจากนั้น รีเลย์ จึงควบคุมทิศทางของไฟฟ้าไปยังวาล์วควบคุมทิศทางไหลของน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อให้สลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฮดรอลิกและทิศทางการเลี้ยวของระบบบังคับเลี้ยว และในขณะเดียวกันกับจังหวะที่แขน ไอเดิล สัมผัสกับ ลิมิต สวิตช์ฝั่งซ้าย อุปกรณ์นำรอบการทำงานจะทำการนำรอบการทำงานของระบบบังคับเลี้ยวไปด้วย



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานและทิศทางของมอเตอร์ไฮดรอลิก



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะ แผนภาพวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 หลักการคำนวณเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแรงกด

ปริมาตรของมอเตอร์ไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 40 c.c.

ความดันที่อ่านค่าได้จาก Pressure Gauge มีค่าประมาณ 20 Bar

ปริมาตรของปั๊มไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 12 c.c.

ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับปั๊มไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 1450 rpm

สมการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฮดรอลิก

$$T = \frac{V_d \times p}{2\pi}$$

$$T = \frac{40 \times (20 \times 10^5)}{2\pi}$$

$$T = 12.73 \text{ N.m.}$$

สมการหาค่าความเร็วของมอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิก

$$N = \frac{Q}{V_d}$$

$Q$  ที่ไหลจากปั๊มไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ  $Q$  ที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ไฮดรอลิก

$$(N \times V_d)_{pump} = (N \times V_d)_{motor}$$

$$N = \left( \frac{N \times V_d}{V_d} \right)$$

$$N = \frac{1450 \times 12}{40}$$

$$N = 435 \text{ rpm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์เก็บผลการทดลอง

เพื่อทำการเก็บผลการทดลองทั้งในส่วนของความถี่หรือและในส่วนของการวัดค่าแรงบิดที่ใช้ในการหมุนแกนพวงมาลัยจึงมีการนำอุปกรณ์เก็บผลต่างๆมาใช้ในการเก็บค่าเช่น

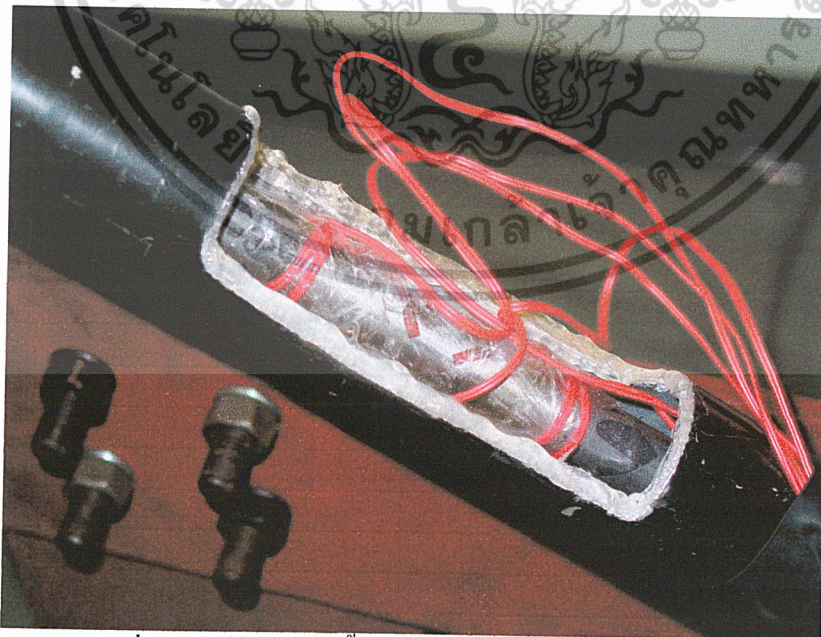
ทำการติดตั้ง สเตรน เกจ ไว้ที่แกนพวงมาลัยเพื่อวัดค่าแรงบิดที่เกิดจากการหมุนพวงมาลัยดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยเมื่อเกิดแรงบิดที่แกนพวงมาลัย สเตรน เกจจะมีการยืดตัวในแนวแกนที่มีการติดตั้ง สเตรน เกจ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ถูกจ่ายให้โดยอุปกรณ์ให้กำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าและทำการแสดงผลผ่านทาง oscilloscope

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บผลการทดลองมีดังนี้

1. สเตรน เกจ
2. อุปกรณ์ให้กำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า
3. Oscilloscope

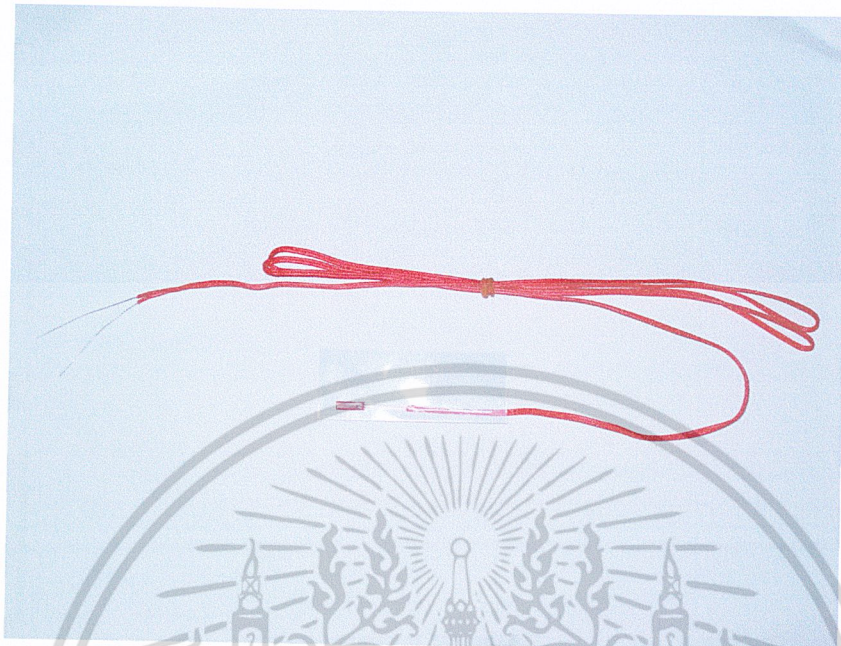
และเนื่องจากการทำการทดลองค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ยังไม่ใช่ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่แกนพวงมาลัยจึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและความแตกต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จาก Oscilloscope โดยการให้แรงบิดที่ทราบค่าแก่แกนพวงมาลัยและอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ทราบค่าแรงบิดที่แกนพวงมาลัยในการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากการทดลอง

เมื่อนำอุปกรณ์ทั้งหมดทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแรงกดและอุปกรณ์เก็บผลการทดลองมาประกอบรวมกันกับโครงรถและระบบบังคับเลี้ยวจะได้ชุดทดลองที่จะใช้ในโครงงานนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.10 แสดงการติดตั้ง สเตรน เกจ ที่แกนพวงมาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

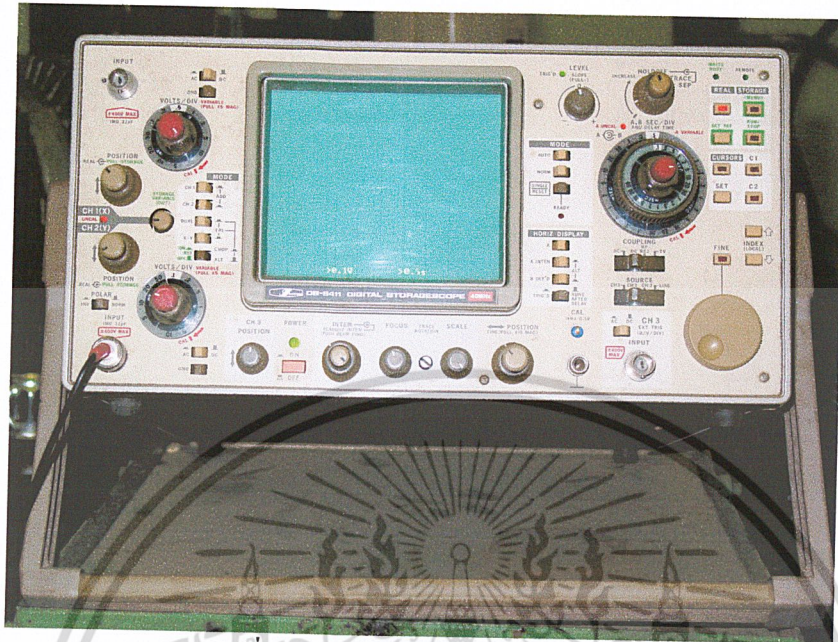


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะ สเตอรน เกจ



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะอุปกรณ์ให้กำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

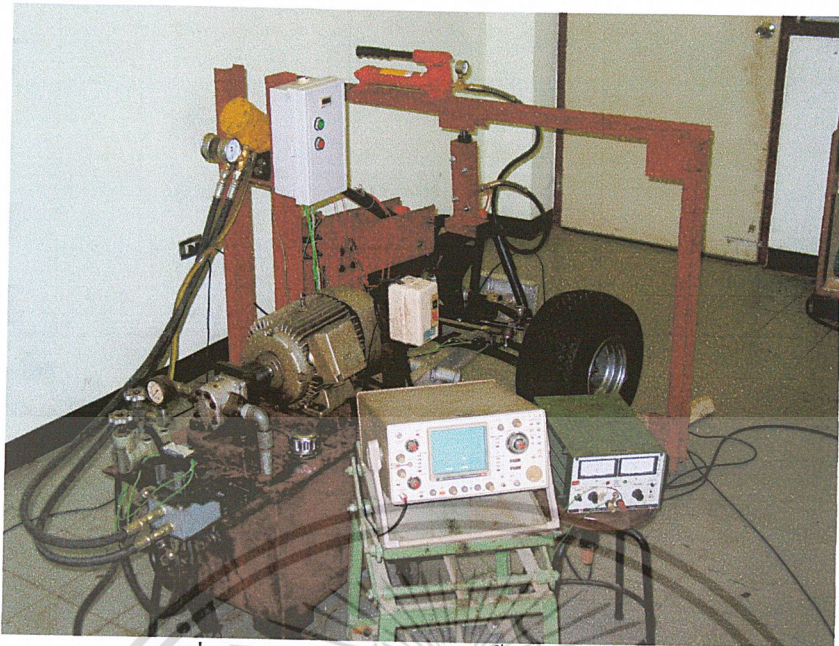


รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะ Oscilloscope



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะชุดกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4.

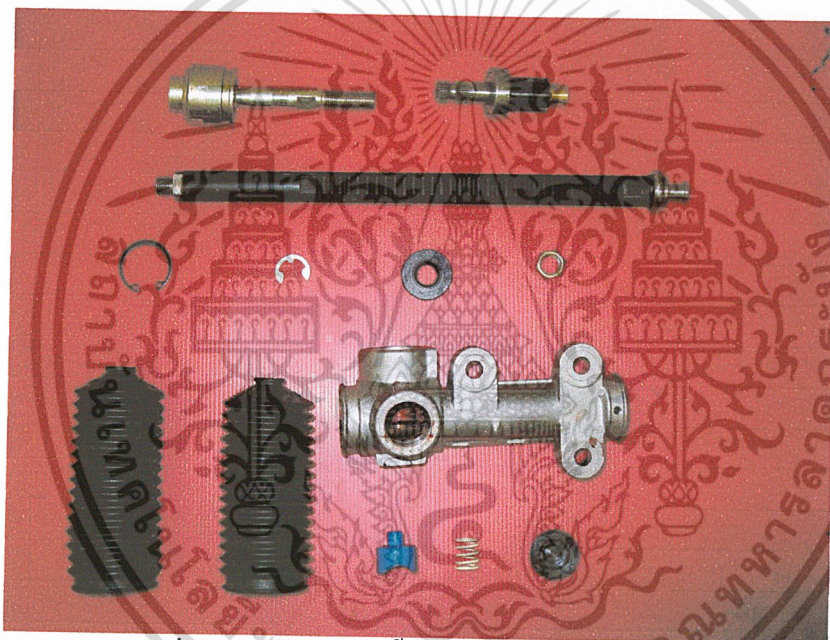
### วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการทดลองความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้งานและ การทดลองปรับปรุงระบบบังคับลิ้น

#### 4.1 การทดลองความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดสอบร่องรอยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับจากการใช้งานต่อชิ้นส่วนต่างๆของ แร็คและพิเนียนดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจำลองสภาวะการใช้งานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน

4.1.1 ใช้แม่แรงไฮดรอลิกที่ผ่านการ Calibration มาเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในภาคผนวก ด้วยน้ำหนักประมาณ 180 กิโลกรัมกดลงบนบริเวณคานยึดช็อคอัพ โดยให้แรงนี้คงที่ไว้ตลอดเวลาของการทดลอง



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นส่วนของ แร็คและพิเนียน

4.1.2 จับยึดแกนยึดพวงมาลัยให้ได้ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ทางบริษัทผู้ผลิตกำหนดมา ด้วยการปรับชุดจับยึดให้ได้ตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุด

4.1.3 ทำการทดลองด้วยการใช้มอเตอร์ไฮดรอลิกขับแกนพวงมาลัยให้หมุนซ้ายและขวากลับไปมาด้วยการใช้การสัมผัสของแขนไฮดรอลิกที่ ลิมิต สวิทช์แล้วส่งสัญญาณไปชุดวงจรไฟฟ้าที่ควบคุมชุด โซลินอยด์แล้ว เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

4.1.4 การตรวจสอบรอยการเสียหายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ประมาณ 100-200 เท่าในบริเวณ เฟืองเรีค และ เฟืองพีเนียน หลังจากผ่านการใช้งานทุก ๆ 50000 รอบจนครบ 200000 รอบ เพื่อศึกษาแนวโน้มของลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น

#### 4.2 การทดลองการปรับปรุงระบบบังคับเลี้ยว

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองหาความสัมพันธ์ในปรับปรุงระบบบังคับเลี้ยวในส่วนของจุดเชื่อมต่อกับคันชักซึ่งเป็นการปรับระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อกันชักกับจุดหมุนของสลักล้อ

4.2.1 หาค่าแรงบิดที่ใช้ในการหมุนพวงมาลัยก่อนการปรับปรุง โดยใช้น้ำหนักกดตั้งแต่ 600-900 Psi แล้วนำค่าที่ได้ไว้เป็นค่าอ้างอิง

4.2.2 ทำการสร้างแกนเชื่อมต่อในบริเวณคันชักขึ้นใหม่โดยสามารถปรับระยะได้ทั้งหมด 6 ตำแหน่งแต่ใช้งานได้ 5 ตำแหน่งเนื่องจากคันชักตัวในงอได้ไม่เพียงพอโดยในแต่ละตำแหน่งของการปรับปรุงมีระยะดังแสดงในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.2 ลักษณะการปรับปรุงตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก



ก่อนการปรับปรุง



หลังการปรับปรุง

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการติดตั้งลูกหมากคันชักก่อนปรับปรุงและหลังทำการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ทำการ Calibration เปรียบเทียบระหว่างแรงบิดกับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงเพื่อให้การทดลองมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงบิดที่ก้านพวงมาลัยและความแตกต่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

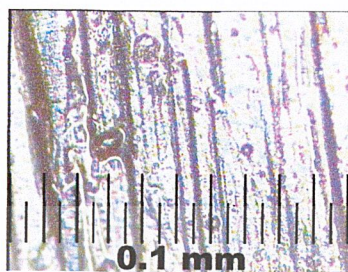
4.2.4 ทำการทดลองโดยนำค่าที่ได้จากการทดลองในแต่ละตำแหน่งมาวิเคราะห์หาตำแหน่งที่ใช้แรงในการหมุนน้อยที่สุดใน 5 ตำแหน่ง ด้วยการเก็บค่าความเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดในแต่ละตำแหน่งและแต่ละน้ำหนักกดแล้วนำค่าความต่างศักย์เพียงครั้งหนึ่งมาวิเคราะห์เนื่องจากความต่างศักย์สูงสุดเกิดจากการหมุนไปกลับไปกลับมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

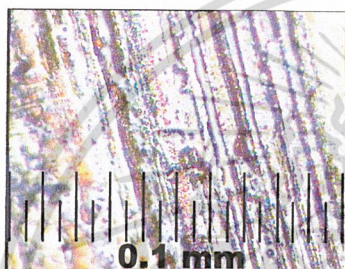
## บทที่ 5.

## ผลการทดลอง

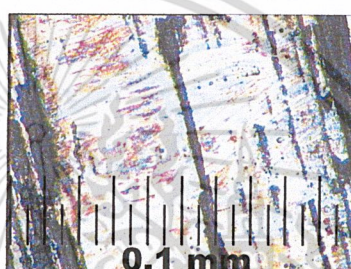
## 5.1 ผลการตรวจสอบพื้นผิวความสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์



0 รอบ



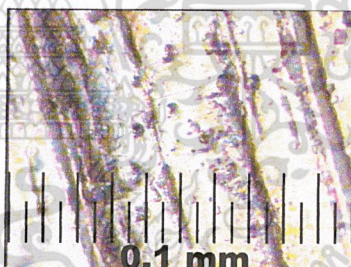
50000 รอบ



100000 รอบ

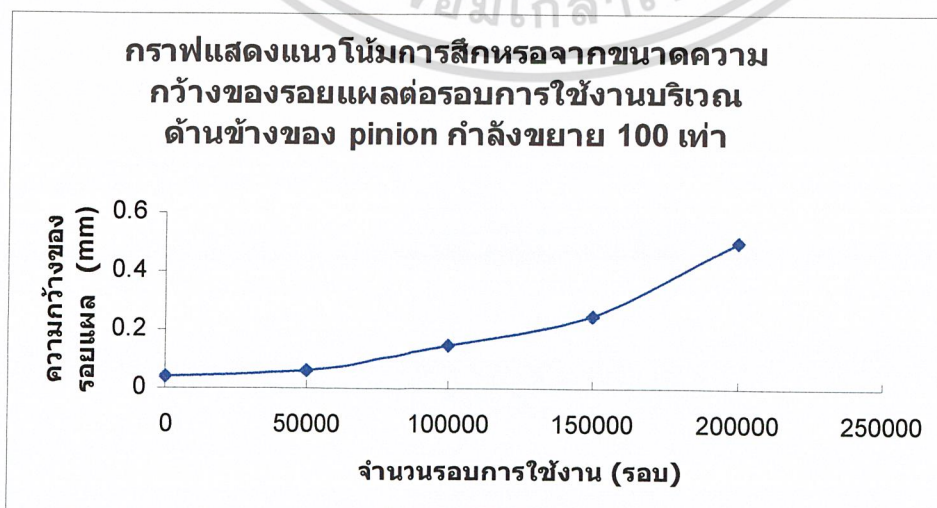


150000 รอบ

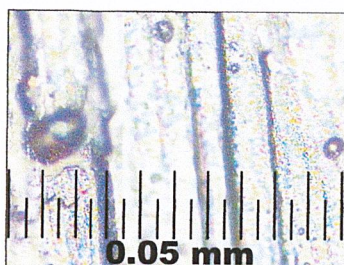


200000 รอบ

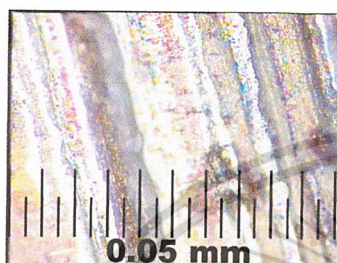
รูปที่ 5.1 แสดงพื้นผิวความสึกหรอที่บริเวณด้านข้างของ พินเนียน กำลังขยาย 100 เท่า



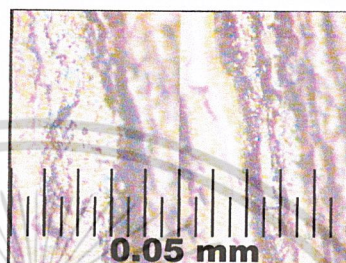
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านข้างเฟือง พินเนียน กำลังขยาย 100 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



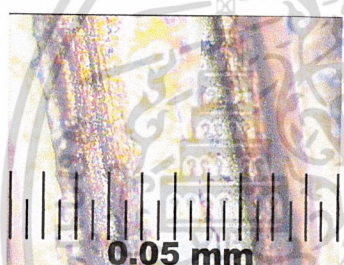
0 รอบ



50000 รอบ



100000 รอบ

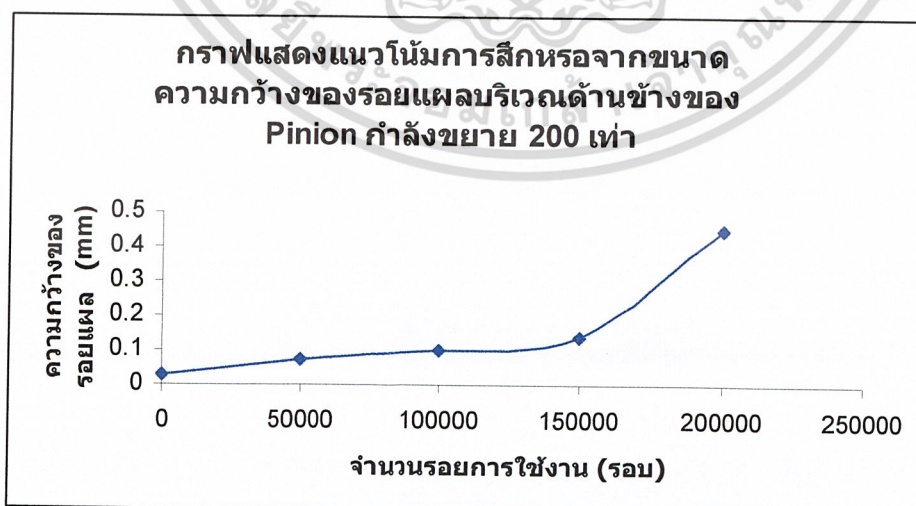


150000 รอบ



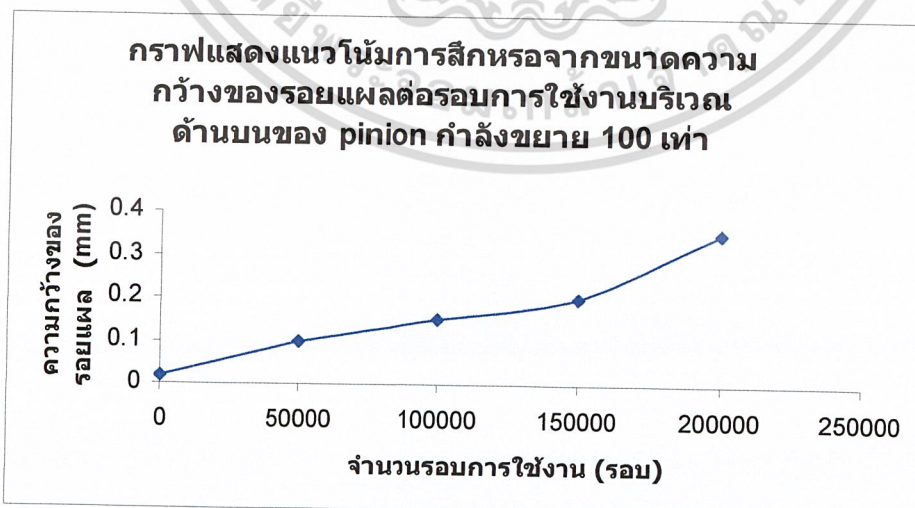
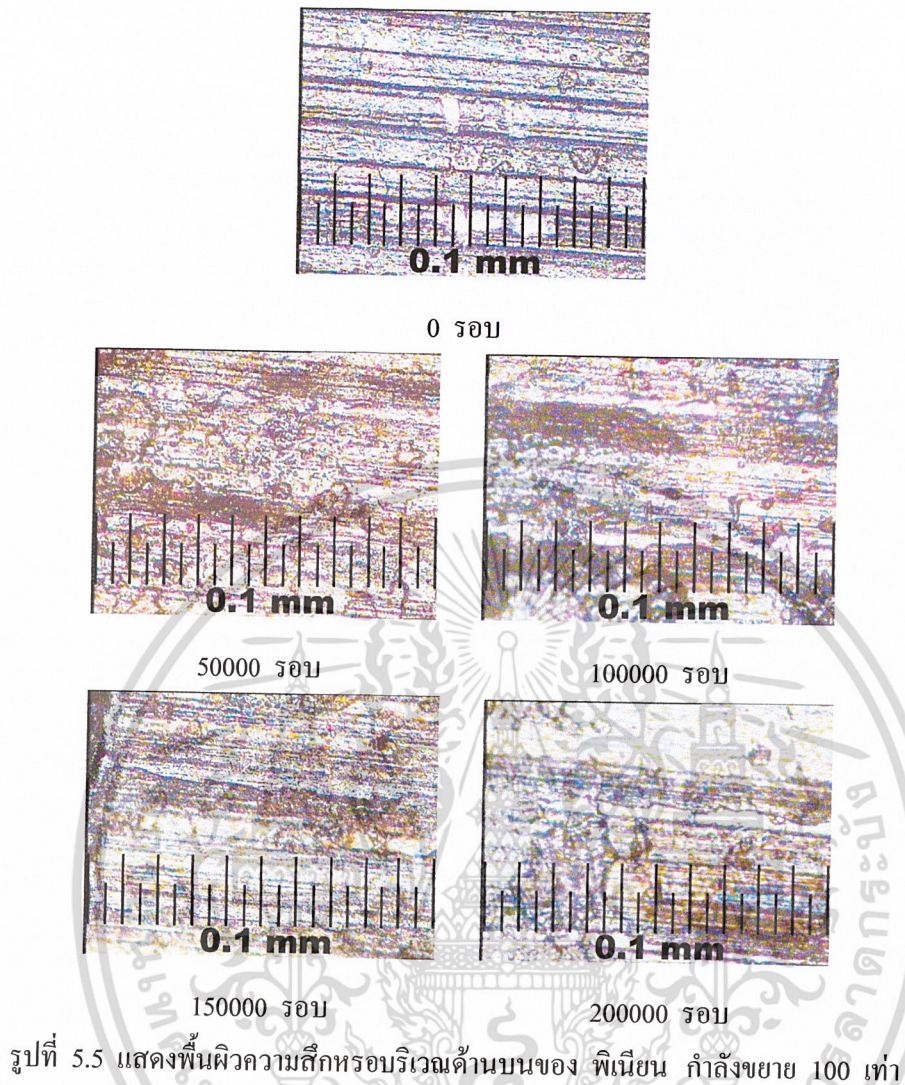
200000 รอบ

รูปที่ 5.3 แสดงพื้นผิวความลึกหรือที่บริเวณด้านข้างของ พิเนียน กำลังขยาย 200 เท่า



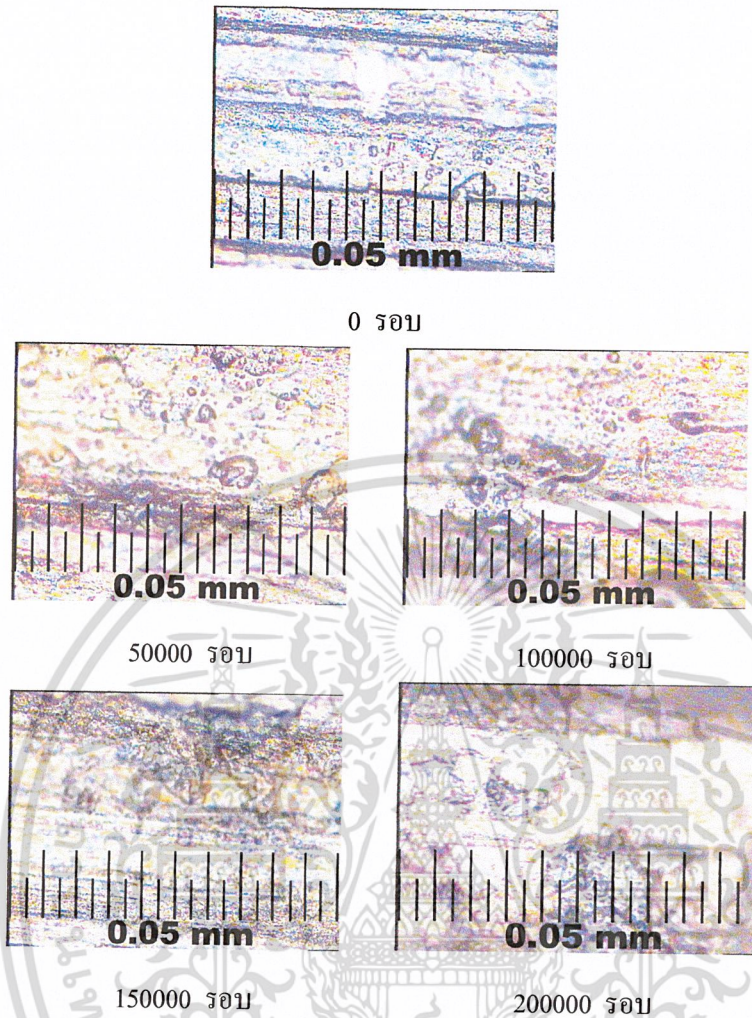
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านข้างของเฟือง พิเนียน กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

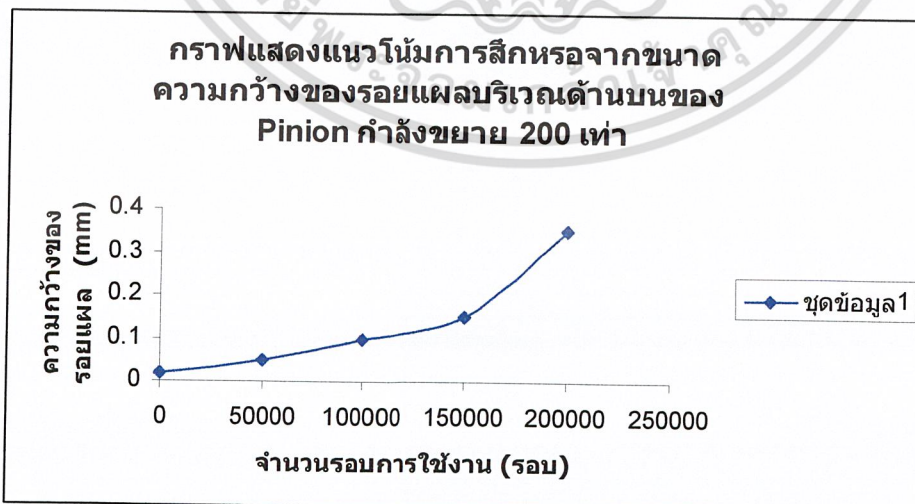


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านบนของเฟือง พิเนียน กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

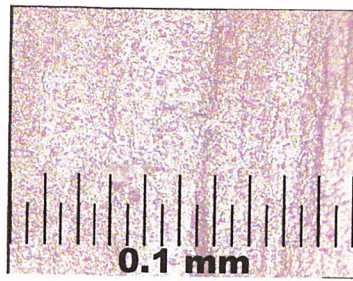


รูปที่ 5.7 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณด้านบนของ พิเนียน กำลังขยาย 200 เท่า

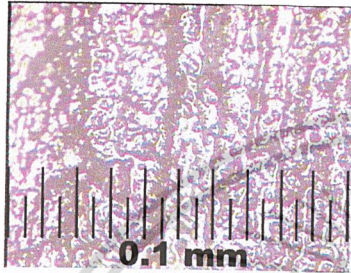


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณด้านบนของเฟือง พิเนียน กำลังขยาย 200 เท่า

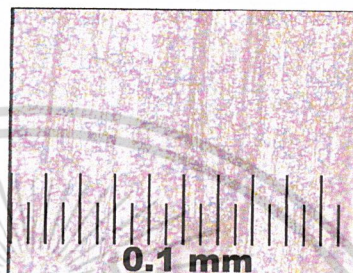
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



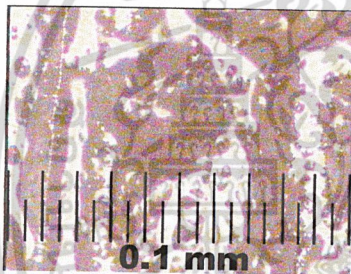
0 รอบ



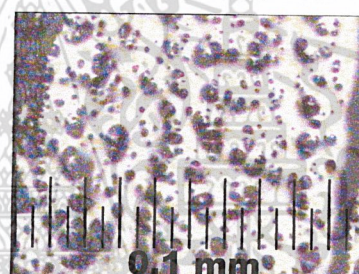
50000 รอบ



100000 รอบ

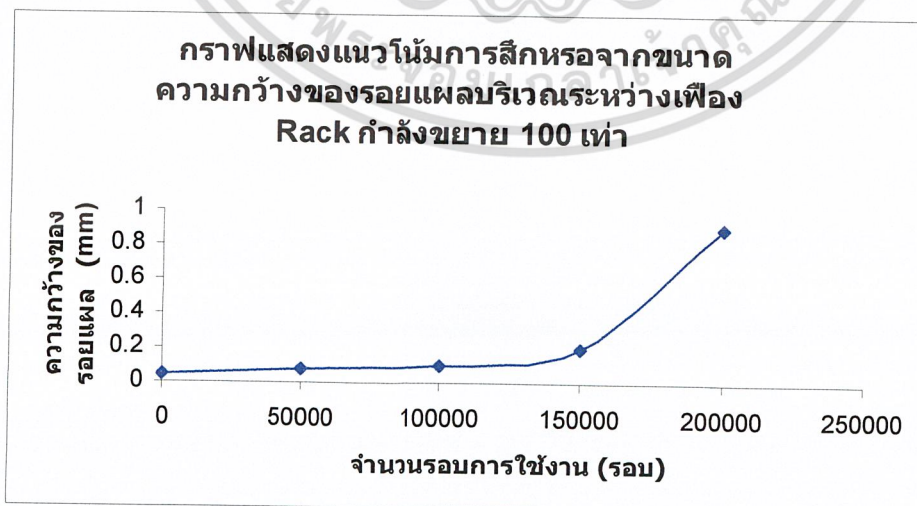


150000 รอบ



200000 รอบ

รูปที่ 5.9 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณระหว่างเฟือง แร็ค กำลังขยาย 100 เท่า

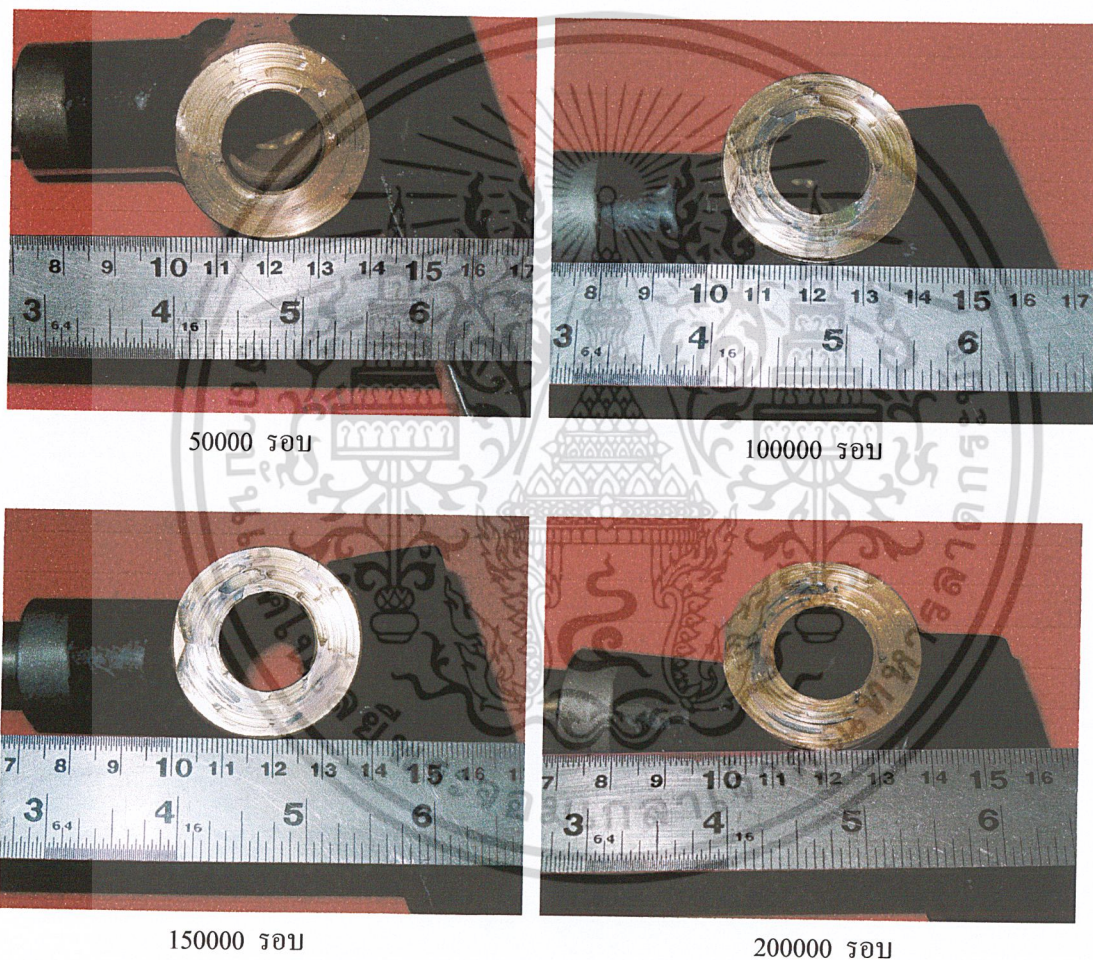


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณระหว่างเฟือง แร็ค กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

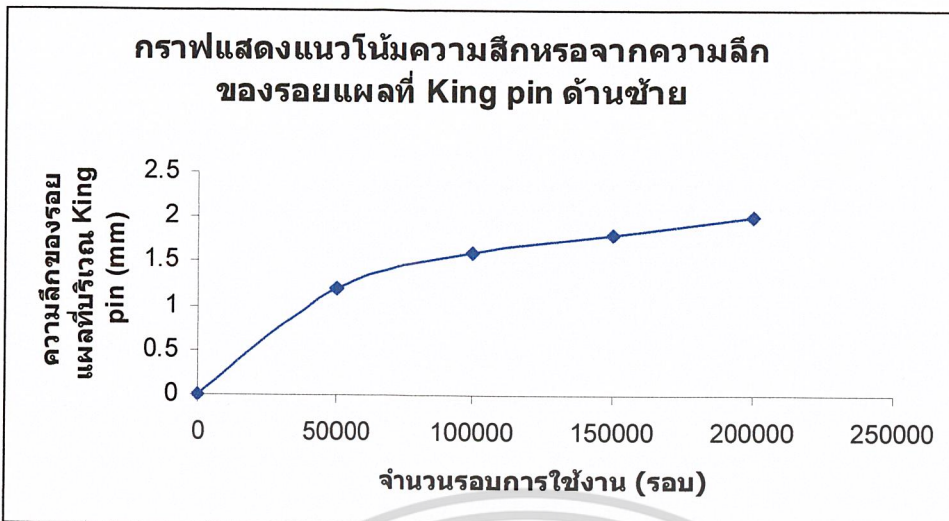
จากรูปที่ 5.2 , 5.4 , 5.6 , 5.8 , 5.10 เป็นกราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอจากบริเวณต่างๆของทั้งเฟือง แร็คและพินเนียน ที่กำลังขยาย 100 และ 200 เท่า แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มการสึกหรอในช่วงแรกของการทดลองคือ 0 - 150000 รอบ มีพฤติกรรมการสึกหรอไม่มากแต่หลังจากรอบที่ 150000 ไปถึง 200000 รอบ จะพฤติกรรมการสึกหรอเพิ่มขึ้นมาก

## 5.2 ผลการตรวจสอบพื้นผิวความสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ

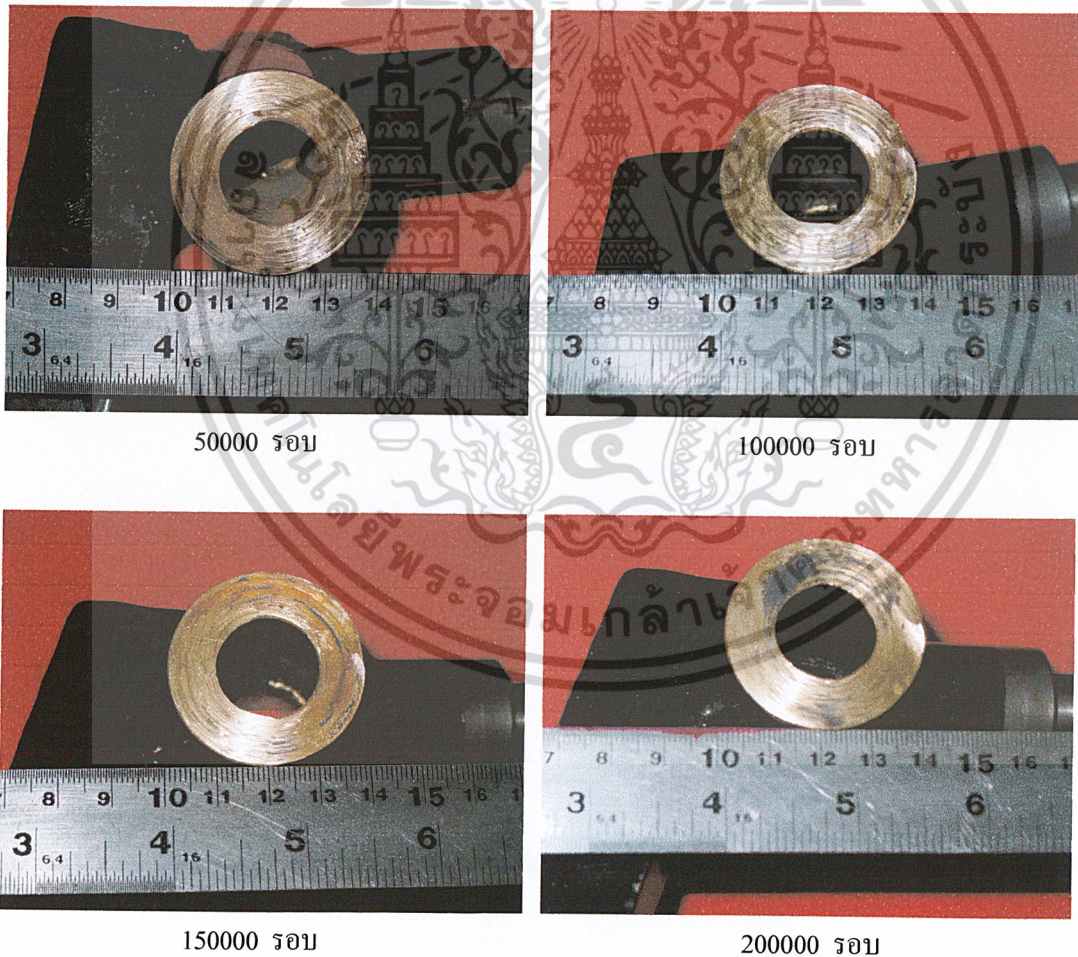


รูปที่ 5.11 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณสลักลือด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

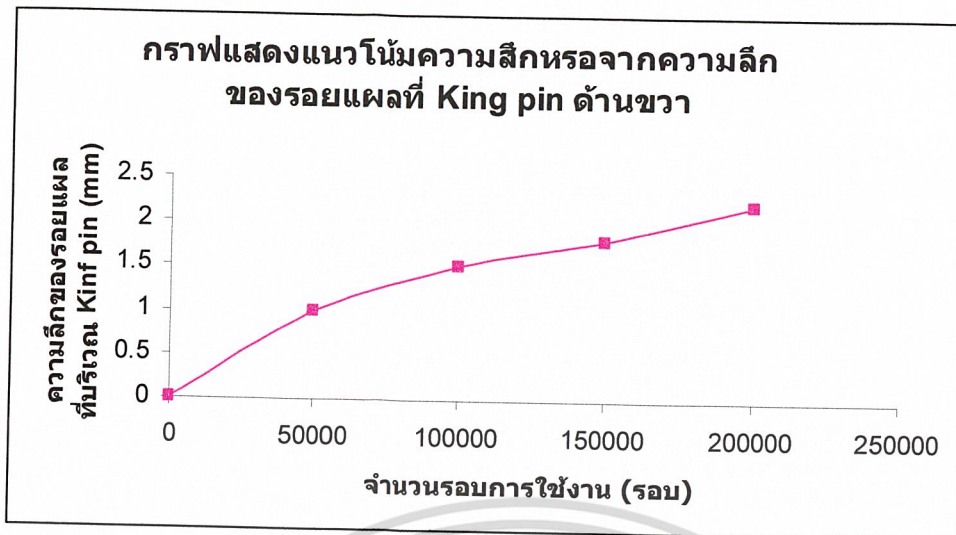


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณสลักข้อด้านซ้าย



รูปที่ 5.13 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณสลักข้อด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



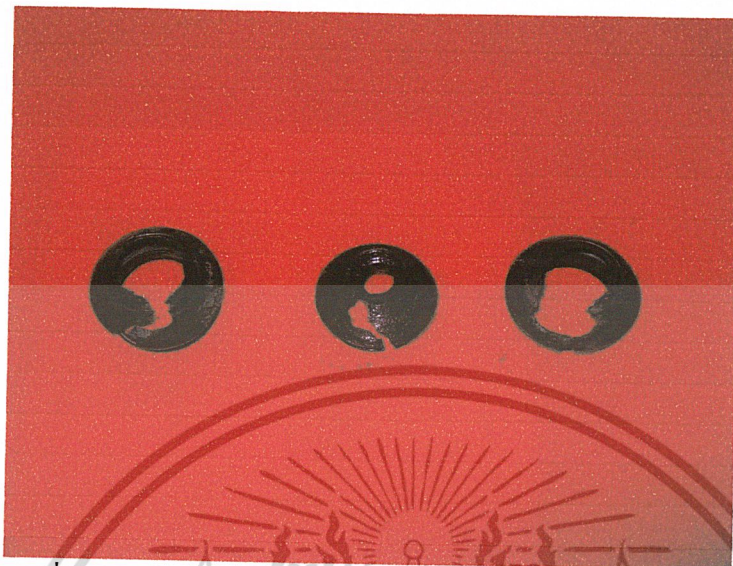
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณสลักล้อด้านขวา

จากรูปที่ 5.12 , 5.14 เป็นกราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอบริเวณสลักล้อทั้งสองด้าน แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการสึกหรอในช่วงแรกคือจาก 0 – 50000 รอบจะมีการสึกหรอมาก เนื่องจากแรงเสียดทานจากความแน่นของการประกอบปลอกสลักล้อในระยะแรก แต่หลังจากรอบที่ 50000 จะมีพฤติกรรมการสึกหรอลดลง เนื่องจากความเสียดทานจากความแน่นนี้ได้ลดลงเพราะการสึกหรอทำให้เกิดระยะหลวมมากขึ้น



รูปที่ 5.15 แสดงพื้นผิวความสึกหรอบริเวณรูยึดลูกหมากคันชักที่แขนไอเดิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แสดงลักษณะความเสียหายบริเวณขางหุ้มลูกหมากคันชัก



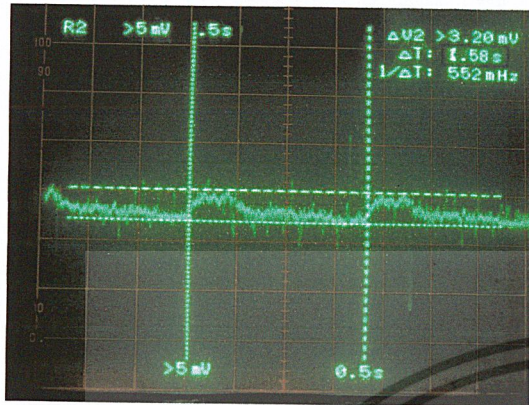
รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะความเสียหายบริเวณขางหูแหวน

จากรูปที่ 5.15, 5.16, 5.17 แสดงลักษณะความเสียหายที่บริเวณอื่นๆ โดยมีสาเหตุหลักจากลักษณะการติดตั้ง และวัสดุที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลการทดลองของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการหมุนพวงมาลัยและเวลาที่ในการหมุนต่อ 1 รอบ

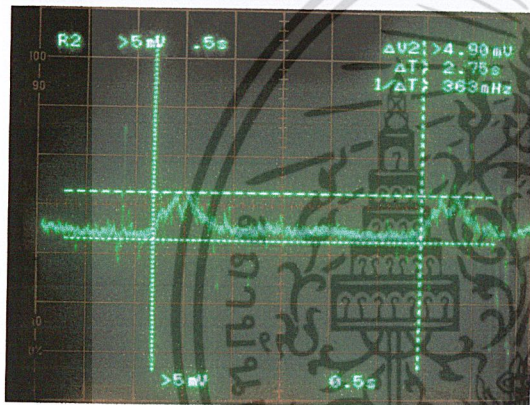
#### 5.3.1 ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักก่อนปรับปรุง



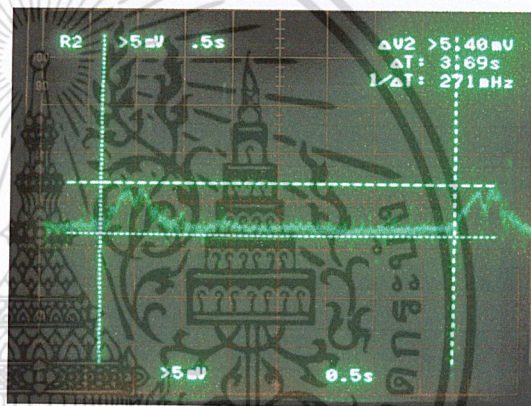
600 Psi



700 Psi



800 Psi



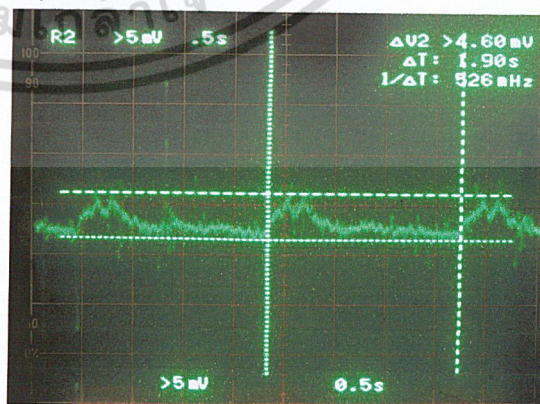
900 Psi

รูปที่ 5.18 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักก่อนปรับปรุง

#### 5.3.2 ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 1.

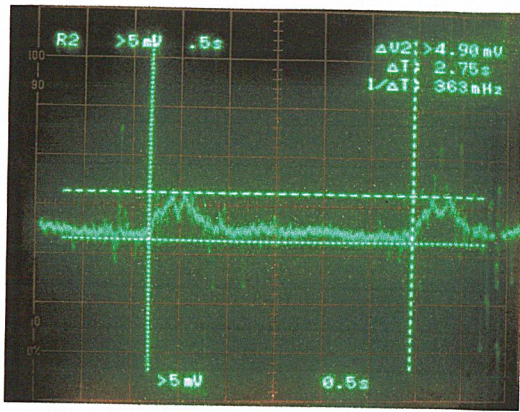


600 Psi

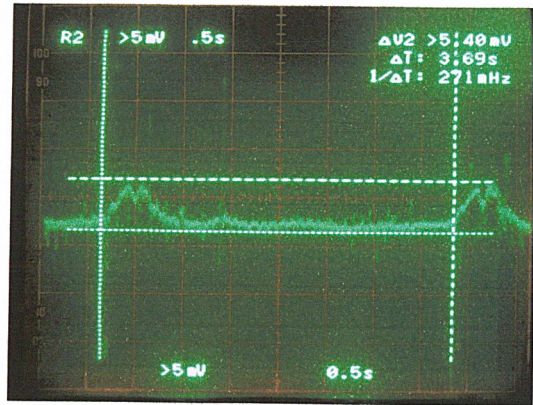


700 Psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



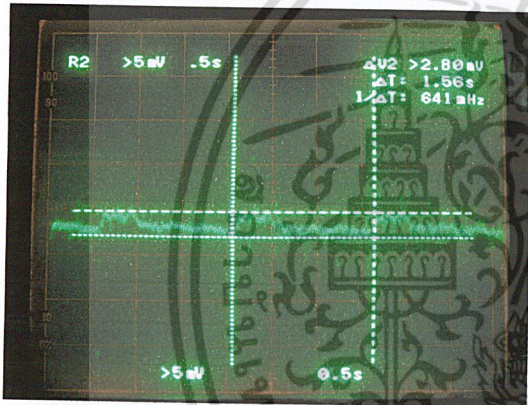
800 Psi



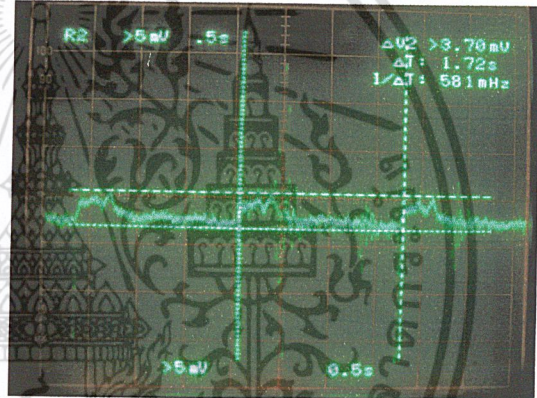
900 Psi

รูปที่ 5.19 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 1.

### 5.3.3 ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 2.



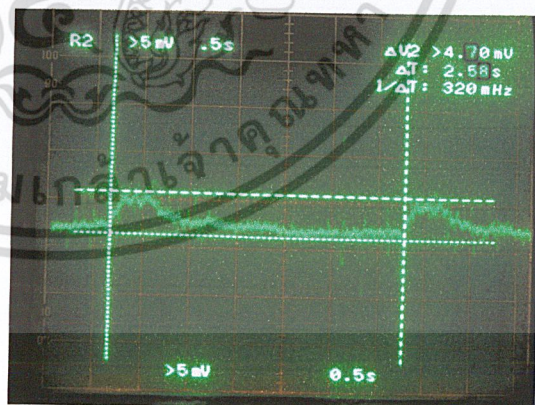
600 Psi



700 Psi



800 Psi

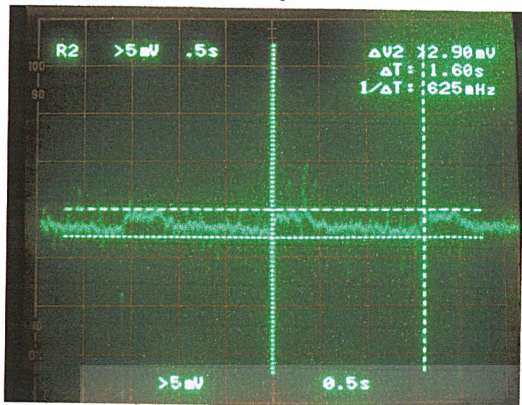


900 Psi

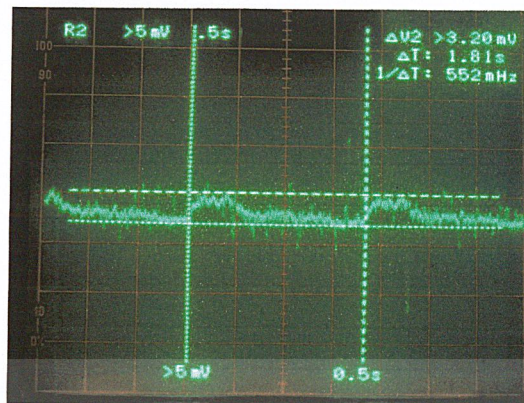
รูปที่ 5.20 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

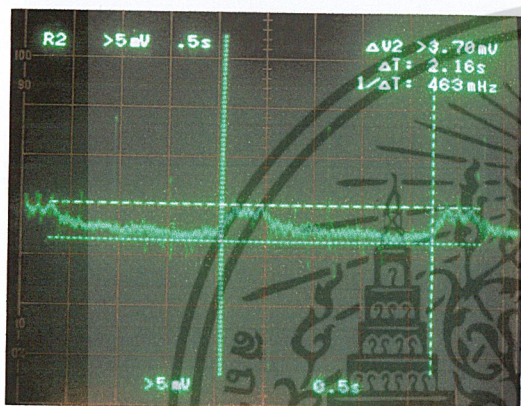
5.3.4 ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 3.



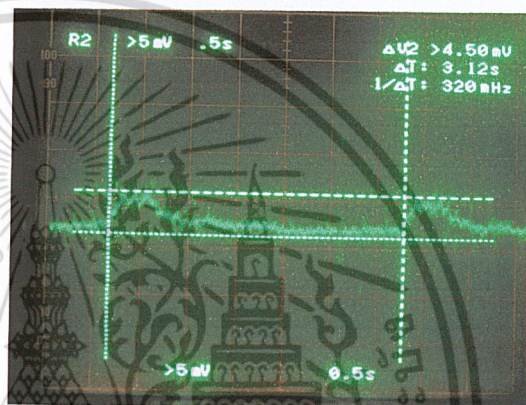
600 Psi



700 Psi



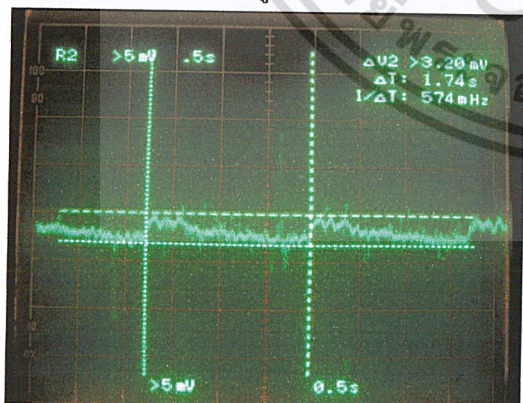
800 Psi



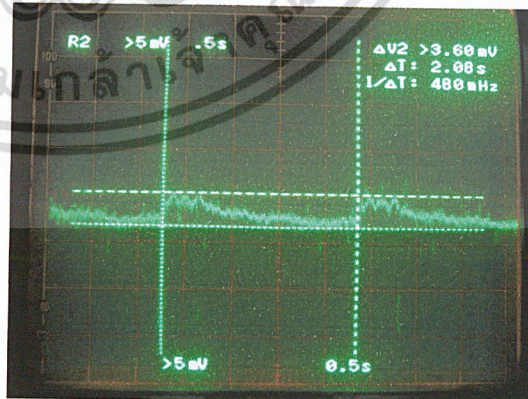
900 Psi

รูปที่ 5.21 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 3.

5.3.5 ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 4.

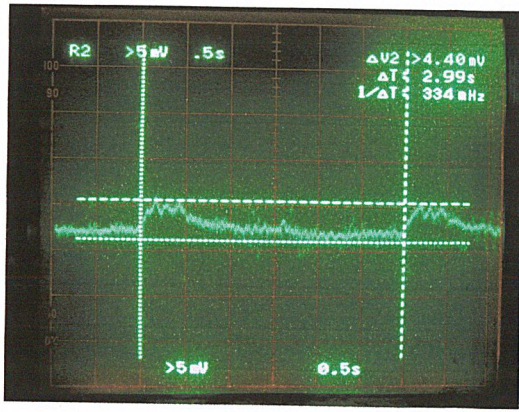


600 Psi

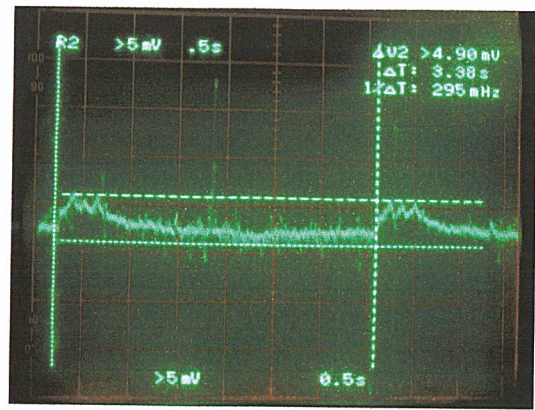


700 Psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



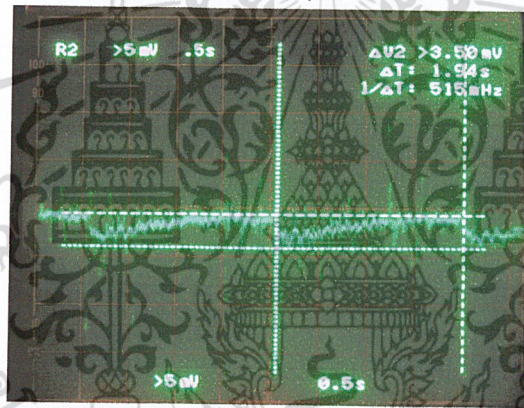
800 Psi



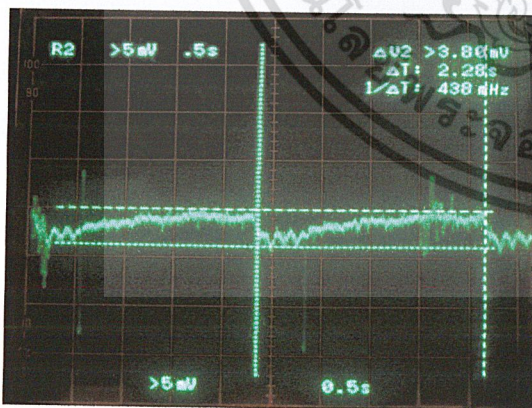
900 Psi

รูปที่ 5.22 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 4.

5.3.6 ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 5



600 Psi



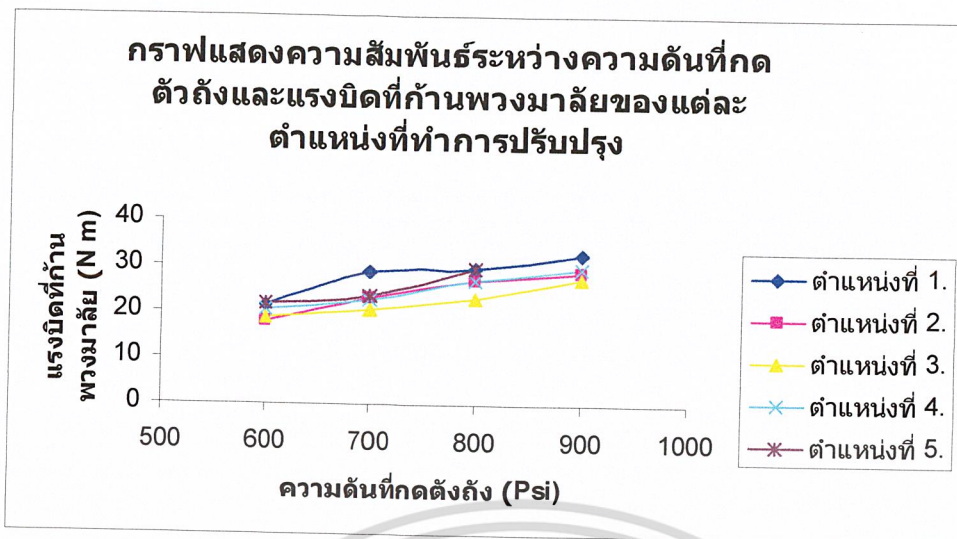
700 Psi



800 Psi

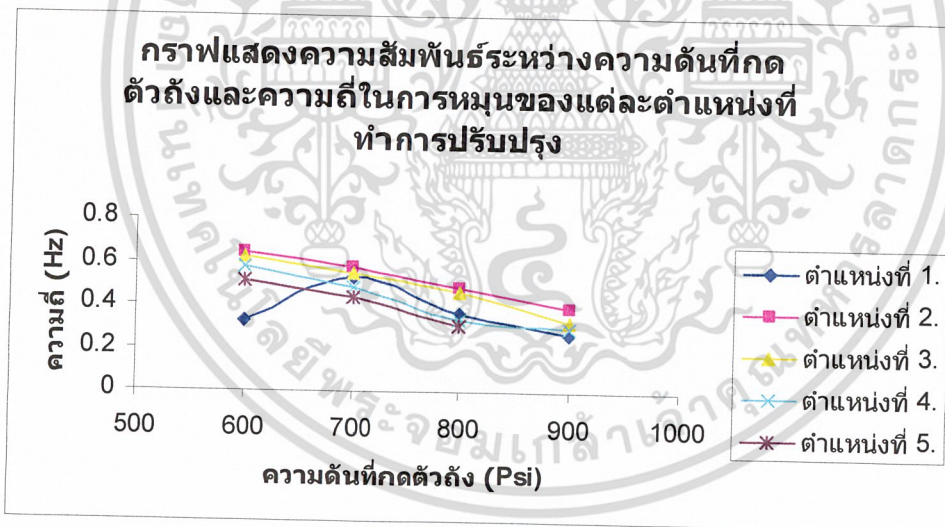
รูปที่ 5.23 แสดงการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและคาบเวลาที่แรงกดตัวถังต่างๆของตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่กดตัวถังและแรงบิดที่แกนพวงมาลัยของแต่ละตำแหน่งการปรับปรุง

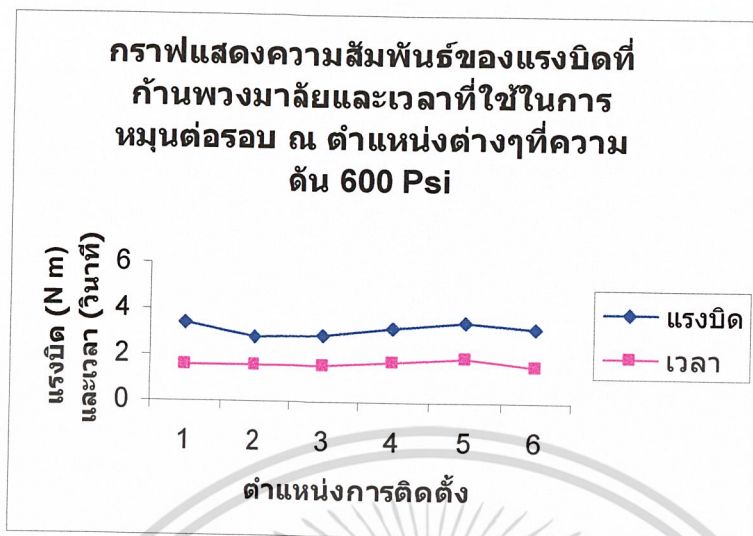
จากรูปที่ 5.24 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบแรงบิดที่แกนพวงมาลัยของแต่ละตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในตำแหน่งที่ 3. ใช้แรงบิดที่แกนพวงมาลัยโดยเฉลี่ยน้อยที่สุด และตำแหน่งที่ 1. ใช้แรงมากที่สุด



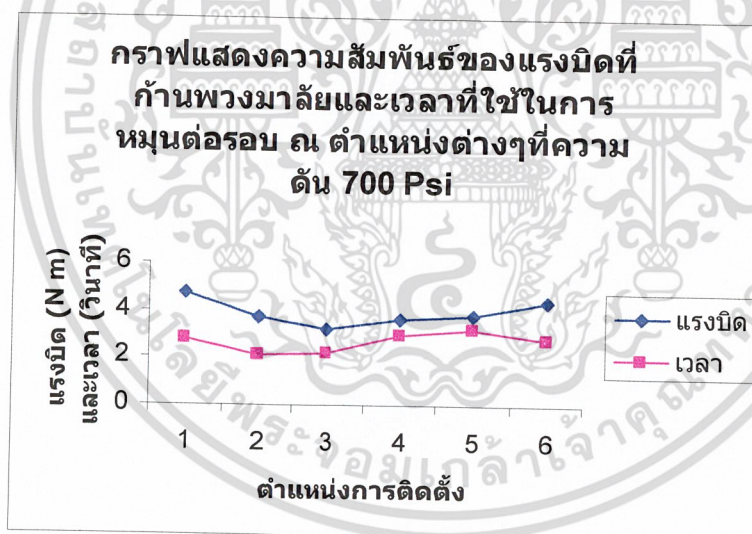
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่กดตัวถังและความถี่ในการหมุนของแต่ละตำแหน่งที่ทำการปรับปรุง

จากรูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบความถี่ในการหมุนแกนพวงมาลัยของแต่ละตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในตำแหน่งที่ 2. มีความถี่ในการหมุนแกนพวงมาลัยโดยเฉลี่ยมากที่สุด และตำแหน่งที่ 1. มีความถี่ต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

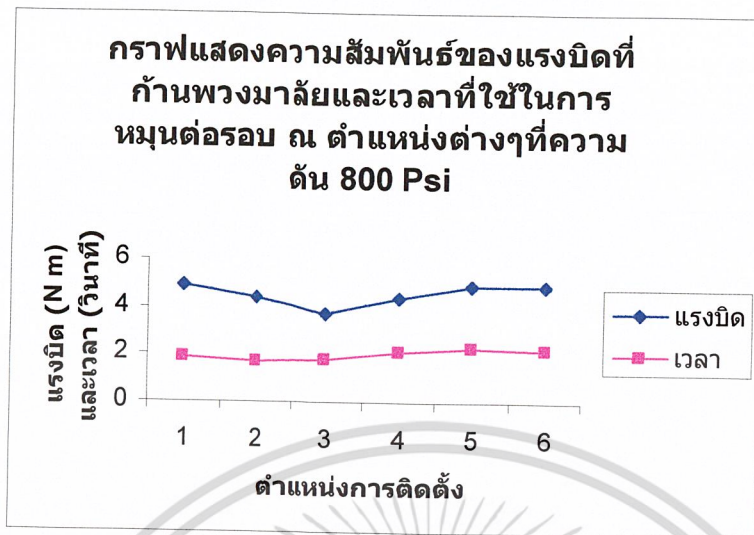


รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ก้านพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 600 Psi

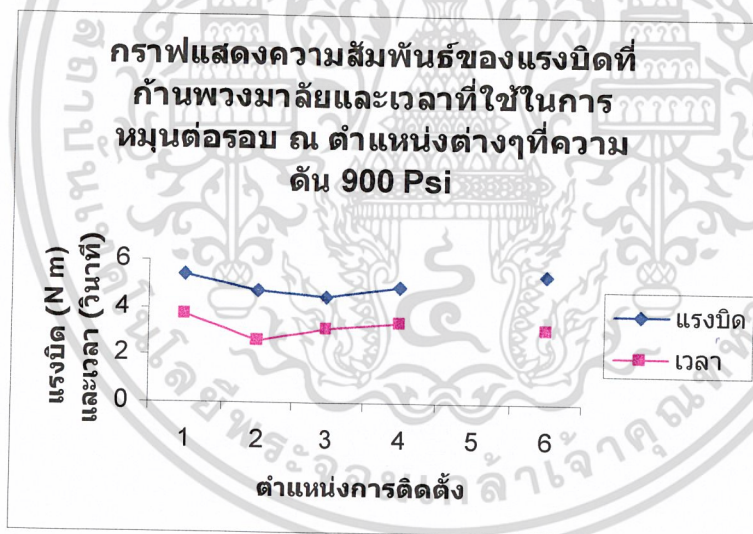


รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ก้านพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 700 Psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



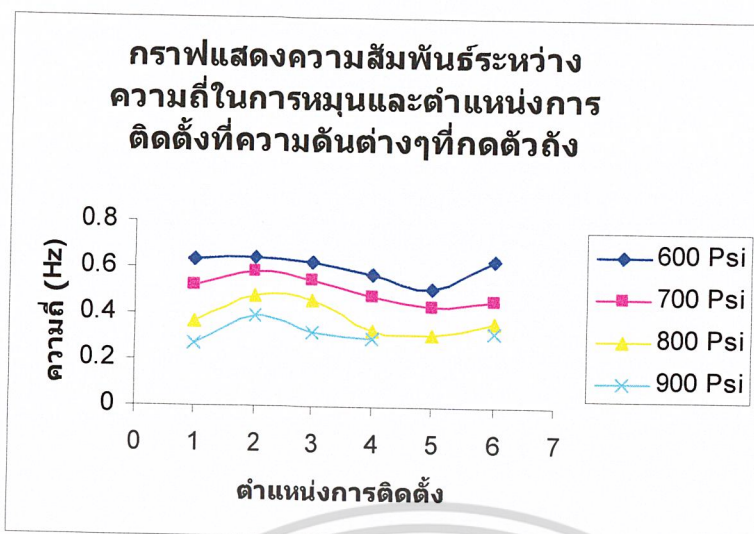
รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 800 Psi



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการหมุนต่อรอบ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ความดัน 900 Psi

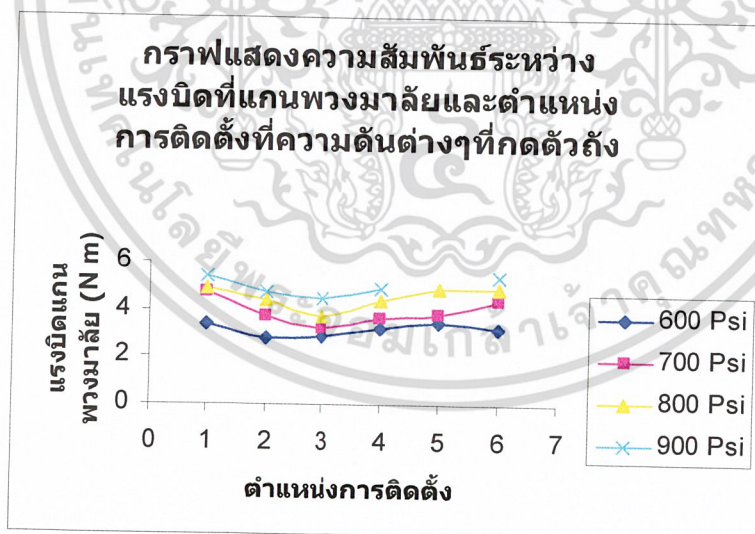
ตั้งแต่รูปที่ 5.26 ถึง 5.29 เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและเวลาที่ใช้ในการหมุนต่อรอบ ณ แรงกดตัวถังต่างๆ จากกราฟแสดงให้เห็นว่า โดยเฉลี่ยที่ตำแหน่งการติดตั้งที่ 2. และ 3. ใช้ทั้งแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและเวลาในการหมุนต่อรอบน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการหมุนและตำแหน่งการติดตั้งที่ความดันที่กวดตัวถังต่างๆ

จากกราฟที่ 5.30 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบความถี่ในการหมุนแกนพวงมาลัยของแต่ละแรงกวดตัวถัง จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในตำแหน่งที่ 2. มีความถี่ในการหมุนของแกนพวงมาลัยมากที่สุด โดยตำแหน่งที่ 6. คือค่าจากตำแหน่งก่อนการปรับปรุง และค่าในตำแหน่งที่ 5. ของความดัน 900 Psi ไม่มีเนื่องจากระบบบังคับด้วยมือไม่สามารถทำงาน ณ ตำแหน่งนั้นที่ความดัน 900 Psi



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่แกนพวงมาลัยและตำแหน่งการติดตั้งที่ความดันที่กวดตัวถังต่างๆ

จากรูปที่ 5.31 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบแรงบิดที่แกนพวงมาลัยของแต่ละแรงกวดตัวถัง จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในตำแหน่งที่ 3. ใช้แรงบิดที่แกนพวงมาลัยโดยเฉลี่ยน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6.

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาไตรโบลีของระบบบังคับความเร็วในรถไฟฟ้า ซึ่งการทดลองนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนดังที่กล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์ข้างต้นแล้ว โดยสามารถแยกการสรุปผลการทดลองต่าง ๆ ได้ดังนี้ ส่วนแรกเป็นส่วนการสร้างชุดอุปกรณ์การทดลอง อีกส่วนเป็นการทดลองโดยแต่ละส่วนนั้นมีผลการทดลองที่ได้แตกต่างกัน สามารถแยกการสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 6.1.1 สรุปผลการทดลองส่วนของการสร้างชุดทดลองของระบบบังคับความเร็วรถไฟฟ้า

จากข้อมูลสถานะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานรถไฟฟ้าทำให้สามารถสร้างชุดทดลองที่สามารถปรับค่าสถานะต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ชุดทดลองสามารถสร้างแรงกดได้ตั้งแต่ 0 ถึง 250 กิโลกรัม ซึ่งอยู่ในช่วงของน้ำหนักที่ใช้งานคือ ประมาณ 200 กิโลกรัม
2. ชุดอุปกรณ์จับยึดแกนพวงมาลัยซึ่งสามารถปรับตำแหน่งการจับยึดได้ทั้งในทั้ง แกน X แกน Y และแกน Z ทำให้ตำแหน่งของแกนพวงมาลัยมีความคล้ายคลึงกับการติดตั้งจริงในรถไฟฟ้า
3. ชุดทดลองสามารถปรับเปลี่ยนพื้นผิวสัมผัสกับยางได้ โดยในการทดลองนี้ใช้พื้นผิวคอนกรีตผสมกรวดหยาบ
4. ชุดทดลองสามารถวัดแรงที่ใช้ในการหมุน ,จำนวนรอบที่หมุนไปแล้ว และ เวลาที่ใช้ในการหมุนต่อหนึ่งรอบ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทดลองทางไตร โบลี

##### 6.1.2 สรุปผลการทดลองความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน

จากการทดลองในสถานะที่กำหนดเป็นระยะเวลาประมาณ 12 สัปดาห์ โดยมีการใช้งาน 200000 รอบทำให้ได้ผลการทดลองดังนี้

1. เมื่อพิจารณาภาพจากกล้องจุลทรรศน์พบว่าขนาดของร่องรอยการเสียหายมีความสัมพันธ์กับรอบของการใช้งาน โดยรอยที่เกิดขึ้นเป็นรอยที่ขยายเพิ่มจากรอยที่มีอยู่แล้วซึ่งเกิดมาจากการผลิตในขั้นตอนการทำผิวสำเร็จ และจากกราฟแสดงแนวโน้มการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าหลังจากที่รอยแผ่ขยายขนาดขึ้นก็จะทำให้แนวโน้มการขยายขนาดของรอบแผลมีเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น ถ้าชิ้นส่วนที่ผลิตมีรอยอยู่แล้วน้อยหรือไม่มีรอยเลยจะทำให้การความเสียหายจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น
2. จากการทดลองพบว่าในส่วนของ พิเนียน นั้นมีความเสียหายที่มากกว่าในส่วนของ แร็ค โดยในส่วนของ แร็ค นั้น นอกจากรอยการเสียหาย มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วยังมีการกัดกร่อนแบบรูเข็มซึ่งเป็นการกัดกร่อนแบบที่ทำให้เกิดความเสียหายที่มีความรุนแรงมากกว่าการกัดกร่อนแบบอื่น ๆ ซึ่งสาเหตุนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจเกิดจากการที่ พิเนียน มีการสัมผัสในตำแหน่งเดียวกันซ้ำ ๆ มากกว่า แร็ค ในจำนวนรอบการใช้งานที่เท่ากัน ดังนั้น ในการออกแบบควรออกแบบให้ พิเนียน มีผิวสำเร็จที่ตีขึ้นหรือวัสดุที่ความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

### 6.1.3 สรุปผลการทดลองการปรับปรุงระบบบังคับเดียว

จากการปรับปรุงตำแหน่งของคันชัก 5 ตำแหน่งต่าง ๆ กันทำให้ได้ผลการทดลองดังนี้

1. เมื่อพิจารณาผลการปรับปรุงตำแหน่งของคันชักพบว่า ในตำแหน่งที่ 3 ของการปรับปรุงระบบบังคับเดียวให้ค่า แรงบิดที่ในการหมุนโดยเฉลี่ยในแต่ละน้ำหนักที่กดน้อยที่สุดและยังมีค่าน้อยกว่าแรงบิดที่ใช้ในการหมุนก่อนการปรับปรุง
2. จากการทดลองพบว่าแรงต้านการบิดที่ใช้ในการหมุนนั้นส่วนหนึ่งมาจากมุมการของหมุนที่งอของ inner tie-rod end โดยพบว่าถ้ามุมที่งอมีค่ามากเกินไปเช่นในตำแหน่งที่ 5 แรงที่ใช้ก็มีแนวโน้มที่มากขึ้น
3. เนื่องจากแรงต้านจากการเพิ่มขึ้นมุมของ inner tie-rod end ทำให้ไม่สามารถหมุนพวงมาลัยได้ในแรงมากขึ้นในบางตำแหน่งของคันชัก

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างชุดทดลองนั้น อุปกรณ์ที่ใช้บางชิ้นผ่านการใช้งานมานาน เช่น มอเตอร์ไฮดรอลิกมีความเร็วในการหมุนช้าและจะไม่เท่ากัน ทำให้ผลการทดลองที่ได้ อาจมีการคาดเคลื่อน ซึ่งถ้าใช้อุปกรณ์ใหม่ที่มีมาตรฐานแล้วน่าจะทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

ในส่วนการทดลองและผลการทดลอง การทดสอบความเสียหายนั้นการทดสอบไม่ได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีความเสียหายเกิดขึ้นทำให้ต้องมีการหยุดเครื่องเพื่อซ่อมแซม และในการทดลองนั้นใช้เวลาในการทดลองที่ยาวนานซึ่งต้องคอยควบคุมตลอดเวลาทำให้ผู้ทดลองไม่สามารถทำการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง และในการตรวจสอบรอยความเสียหายนั้นการใช้กล้องจุลทรรศน์ยังติดปัญหาในเรื่องของขนาดชิ้นงานที่ใหญ่แต่ต้องการกำลังขยายมากซึ่งทำให้การตรวจสอบนั้นค่อนข้างที่จะทำได้ยากเนื่องจากระยะจากตัวกล้องถึงฐานที่วางชิ้นงานค่อนข้างแคบ ถ้าใช้กล้อง scanning electro microscope น่าจะทำให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นการจากการศึกษาทางโทร โปโลยีของระบบบังคับเดียวนี้จึงน่าจะเป็นพื้นฐานและแนวทางในการสร้างอุปกรณ์ทดลองและการทดสอบระบบบังคับที่ดีได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

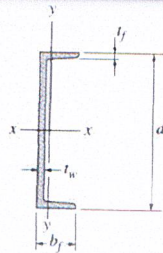
ตาราง การโค้งตัวของคาน

Beam	Slope	Deflection	Elastic Curve
	$\theta_{max} = \frac{-PL^2}{16EI}$	$v_{max} = \frac{-PL^3}{48EI}$	$v = \frac{-Px}{48EI} (3L^2 - 4x^2)$ $0 \leq x \leq L/2$
	$\theta_1 = \frac{-Pab(L+b)}{6EI}$ $\theta_2 = \frac{Pab(L+a)}{6EI}$	$v _{x=a} = \frac{-Pba}{6EI} (L^2 - b^2 - a^2)$	$v = \frac{-Pbx}{6EI} (L^2 - b^2 - x^2)$ $0 \leq x \leq a$
	$\theta_1 = \frac{-M_0L}{3EI}$ $\theta_2 = \frac{M_0L}{6EI}$	$v_{max} = \frac{-M_0L^2}{\sqrt{243EI}}$	$v = \frac{-M_0x}{6EI} (x^2 - 3Lx + 2L^2)$
	$\theta_{max} = \frac{-wL^3}{24EI}$	$v_{max} = \frac{-5wL^4}{384EI}$	$v = \frac{-wx}{24EI} (x^3 - 2Lx^2 + L^3)$
	$\theta_1 = \frac{-3wL^3}{128EI}$ $\theta_2 = \frac{7wL^3}{384EI}$	$v _{x=L/2} = \frac{-5wL^4}{768EI}$ $v_{max} = -0.006563 \frac{wL^4}{EI}$ at $x = 0.4598L$	$v = \frac{-wx}{384EI} (16x^3 - 24Lx^2 + 9L^3)$ $0 \leq x \leq L/2$ $v = \frac{-wL}{384EI} (8x^3 - 24Lx^2 + 17L^2x - L^3)$ $L/2 \leq x < L$
	$\theta_1 = \frac{-7w_0L^3}{360EI}$ $\theta_2 = \frac{w_0L^3}{45EI}$	$v_{max} = -0.00652 \frac{w_0L^4}{EI}$ at $x = 0.5193$	$v = \frac{-w_0x}{360EI} (3x^4 - 10L^2x^2 + 7L^4)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตาราง ค่า โมเมนต์ความเฉื่อย ของวัสดุ ( Moment of inertia )



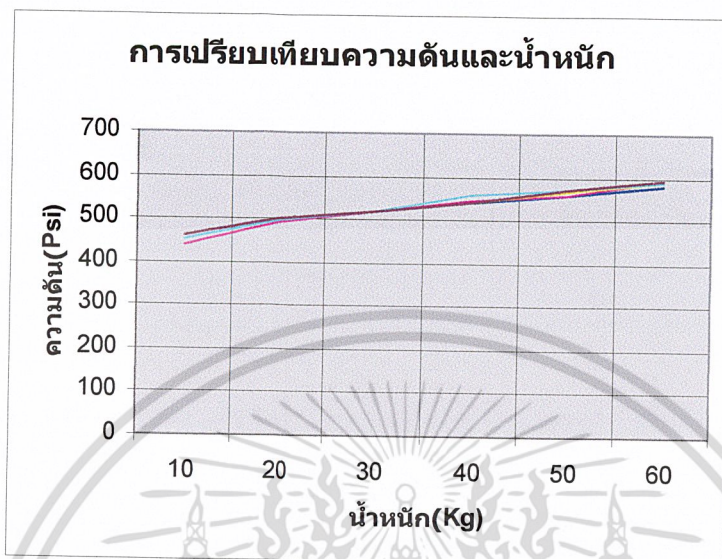
American Standard Channels or C Shapes SI Units

Designation	Area A	Depth d	Web thickness t <sub>w</sub>	Flange		x-x axis				y-y axis			
				width b <sub>f</sub>	thickness t <sub>f</sub>	I	Z	S	r	I	Z	S	r
mm × kg/m	mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	mm	10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	mm
C380 × 74	9 480	381.0	18.20	94.4	16.50	168	1 120	882	133	4.58	134	61.8	22.0
C380 × 60	7 610	381.0	13.20	89.4	16.50	145	937	761	138	3.84	113	55.1	22.5
C380 × 50	6 430	381.0	10.20	86.4	16.50	131	826	688	143	3.38	102	50.9	22.9
C310 × 45	5 690	305.0	13.00	80.5	12.70	67.4	551	442	109	2.14	71.0	33.8	19.4
C310 × 37	4 740	305.0	9.83	77.4	12.70	59.9	479	393	112	1.86	62.9	30.9	19.8
C310 × 31	3 930	305.0	7.16	74.7	12.70	53.7	416	352	117	1.61	57.2	28.3	20.2
C250 × 45	5 690	254.0	17.10	77.0	11.10	42.9	436	338	86.8	1.61	61.9	27.1	17.0
C250 × 37	4 740	254.0	13.40	73.3	11.10	38.0	377	299	89.5	1.40	52.3	24.3	17.2
C250 × 30	3 790	254.0	9.63	69.6	11.10	32.8	316	258	93.0	1.17	44.4	21.6	17.6
C250 × 23	2 900	254.0	6.10	66.0	11.10	28.1	259	221	98.4	0.949	38.5	19.0	18.1
C230 × 30	3 790	229.0	11.40	67.3	10.50	25.3	275	221	81.7	1.01	40.5	19.2	16.3
C230 × 22	2 850	229.0	7.24	63.1	10.50	21.2	221	185	86.2	0.803	33.6	16.7	16.8
C230 × 20	2 540	229.0	5.92	61.8	10.50	19.9	205	174	88.5	0.733	32.0	15.8	17.0
C200 × 28	3 550	203.0	12.40	64.2	9.90	18.3	226	180	71.8	0.824	35.6	16.5	15.2
C200 × 20	2 610	203.0	7.70	59.5	9.90	15.0	179	148	75.8	0.637	28.3	14.0	15.6
C200 × 17	2 180	203.0	5.59	57.4	9.90	13.6	156	134	79.0	0.549	25.9	12.8	15.9
C180 × 22	2 790	178.0	10.60	58.4	9.30	11.3	159	127	63.6	0.574	26.9	12.8	14.3
C180 × 18	2 320	178.0	7.98	55.7	9.30	10.1	138	113	66.0	0.487	23.4	11.5	14.5
C180 × 15	1 850	178.0	5.33	53.1	9.30	8.87	117	99.7	69.2	0.403	20.6	10.2	14.8
C150 × 19	2 470	152.0	11.10	54.8	8.70	7.24	119	95.3	54.1	0.437	22.3	10.5	13.3
C150 × 16	1 990	152.0	7.98	51.7	8.70	6.33	101	83.3	56.4	0.360	18.8	9.22	13.5
C150 × 12	1 550	152.0	5.08	48.8	8.70	5.45	84.1	71.7	59.3	0.288	16.3	8.04	13.6
C130 × 13	1 700	127.0	8.25	47.9	8.10	3.70	71.4	58.3	46.7	0.263	15.0	7.35	12.4
C130 × 10	1 270	127.0	4.83	44.5	8.10	3.12	57.5	49.1	49.6	0.199	12.5	6.18	12.5
C100 × 11	1 370	102.0	8.15	43.7	7.50	1.91	46.0	37.5	37.3	0.180	11.4	5.62	11.5
C100 × 8	1 030	102.0	4.67	40.2	7.50	1.60	37.0	31.4	39.4	0.133	9.32	4.65	11.4
C75 × 9	1 140	76.2	9.04	40.5	6.90	0.862	28.2	22.6	27.5	0.127	8.91	4.39	10.6
C75 × 7	948	76.2	6.55	38.0	6.90	0.770	24.6	20.2	28.5	0.103	7.64	3.83	10.4
C75 × 6	781	76.2	4.32	35.8	6.90	0.691	21.3	18.1	29.8	0.082	6.57	3.32	10.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

กราฟแสดงการ calibration ของ เกจ วัดความดัน ต่อน้ำหนัก



ภาคผนวก ง.

ตารางบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อจำนวนรอบที่ทำการทดลอง

รอบ	บริเวณและลักษณะความเสียหาย
50	ยางคันส่งขวขาด
1000	น็อตยึดปีกนกบน สลักล้อ คลายตัว
4000	น็อตลูกหมากคันชักคลายตัว
10000	ยางล้อรถสึกเล็กน้อย
30000	ยางคันชักซ้ายขาด
35000	ยางคันชักขวาขาดและหลุด
40000	มีเสียงดังบริเวณ King pin ด้านซ้ายอย่างต่อเนื่อง
45000	เสียงดังมากขึ้นและมีความฝืดมากจนมอเตอร์ไฮดรอลิกไม่สามารถหมุนได้ จึงทำการลดน้ำหนักเหลือ 600 Psi และคลายน็อตที่ King pin แล้วทำการทดลองต่อโดยยังมีเสียงดังอยู่บ้าง
47000	ยางหุ้มคันส่งซ้ายขาด
48500	มีเสียงดังเนื่องจากความฝืดที่ สลักล้อ และหยุดหมุนที่ 600 psi มีเศษผงโลหะที่เกิดจากการสึกของ Bush ทองเหลืองตกรบริเวณใต้ สลักล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบ	บริเวณและลักษณะความเสียหาย
50000	ถอดชิ้นส่วนต่างๆในระบบบังคับเลี้ยวเพื่อทำการตรวจสอบความเสียหายที่บริเวณ Pin คั่น ชัก pin คั่นส่ง และ แร็ค and พิเนียน ด้วยการส่องดูร่องรอยความสึกหรือจากกล้อง microscope ทำการเปลี่ยนคั่นชักใหม่และประกอบชิ้นส่วนต่างๆกลับ
56000	ยางหุ้มคั่นชักขาด
57400	สปารีย์พวงมาลัยตัวบนรูด
100000	ถอดชิ้นส่วนต่างๆในระบบบังคับเลี้ยวเพื่อทำการตรวจสอบความเสียหายที่บริเวณ Pin คั่น ชักpin คั่นส่ง และ แร็ค and พิเนียน ด้วยการส่องดูร่องรอยความสึกหรือจากกล้อง microscope Bush ท่องเหลือสึกเพิ่มขึ้นโดย ด้านขวาหนา 84.4 มม. ด้านซ้ายหนา 84.6 ม.ม.

ภาคผนวก จ.

ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งานที่บริเวณด้านข้างของ พิเนียน กำลังขยาย 100 เท่า

จำนวนรอบการทดลอง (รอบ)	ขนาดความกว้างของรอยแผล (mm.)
0	0.04
50000	0.06
100000	0.15
150000	0.25
200000	0.50

ภาคผนวก ฉ.

ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งานที่บริเวณด้านบนของ พิเนียน กำลังขยาย 100 เท่า

จำนวนรอบการทดลอง (รอบ)	ขนาดความกว้างของรอยแผล (mm.)
0	0.02
50000	0.10
100000	0.15
150000	0.20
200000	0.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งานที่บริเวณระหว่างเฟือง แร็ค กำลังขยาย 100 เท่า

จำนวนรอบการทดลอง (รอบ)	ขนาดความกว้างของรอยแผล (mm.)
0	0.05
50000	0.08
100000	0.10
150000	0.20
200000	0.90

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งานที่บริเวณด้านบนของ ฟิเนียน กำลังขยาย 200 เท่า

จำนวนรอบการทดลอง (รอบ)	ขนาดความกว้างของรอยแผล (mm.)
0	0.02
50000	0.05
100000	0.10
150000	0.15
200000	0.35

ภาคผนวก ฉ.

ตารางแสดงขนาดความกว้างของรอยแผลต่อรอบการใช้งานที่บริเวณด้านข้างของ ฟิเนียน กำลังขยาย 200 เท่า

จำนวนรอบการทดลอง (รอบ)	ขนาดความกว้างของรอยแผล (mm.)
0	0.03
50000	0.07
100000	0.10
150000	0.14
200000	0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

ตารางแสดงผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการหมุนพวงมาลัย

ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักก่อนปรับปรุง

ความดันที่ใช้กด ตัวรถ ( $psi$ )	ความแตกต่างของค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุด ( $\Delta V$ )( $mV$ )	ระยะเวลาที่ใช้หมุนต่อ รอบการทำงาน ( $\Delta T$ )( $sec$ )	แรงบิดที่แกน พวงมาลัย ( $N \cdot m$ )
600	3.5	1.94	21.892
700	3.8	2.28	23.5585
800	4.9	3.23	29.669
900	-	-	-

ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 1.

ความดันที่ใช้กด ตัวรถ ( $psi$ )	ความแตกต่างของค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุด ( $\Delta V$ )( $mV$ )	ระยะเวลาที่ใช้หมุน ต่อรอบการทำงาน ( $\Delta T$ )( $sec$ )	แรงบิดที่แกน พวงมาลัย ( $N \cdot m$ )
600	3.4	1.58	21.3365
700	4.7	1.9	28.558
800	4.9	2.75	29.669
900	5.4	3.69	32.4465

ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 2.

ความดันที่ใช้กด ตัวรถ ( $psi$ )	ความแตกต่างของค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุด ( $\Delta V$ )( $mV$ )	ระยะเวลาที่ใช้หมุน ต่อรอบการทำงาน ( $\Delta T$ )( $sec$ )	แรงบิดที่แกน พวงมาลัย ( $N \cdot m$ )
600	2.8	1.56	18.0035
700	3.7	1.72	23.003
800	4.4	2.08	26.8915
900	4.7	2.58	28.558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 3.

ความดันที่ใช้กด ตัวรถ ( <i>psi</i> )	ความแตกต่างของค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุด ( $\Delta V$ )( <i>mV</i> )	ระยะเวลาที่ใช้หมุน ต่อรอบการทำงาน ( $\Delta T$ )( <i>sec</i> )	แรงบิดที่แกน พวงมาลัย ( <i>N · m</i> )
600	2.9	1.60	18.559
700	3.2	1.81	20.2255
800	3.7	2.16	23.003
900	4.5	3.12	27.447

ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 4.

ความดันที่ใช้กด ตัวรถ ( <i>psi</i> )	ความแตกต่างของค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุด ( $\Delta V$ )( <i>mV</i> )	ระยะเวลาที่ใช้หมุน ต่อรอบการทำงาน ( $\Delta T$ )( <i>sec</i> )	แรงบิดที่แกน พวงมาลัย ( <i>N · m</i> )
600	3.2	1.74	20.2255
700	3.6	2.08	22.4475
800	4.4	2.99	26.8915
900	4.9	3.38	29.669

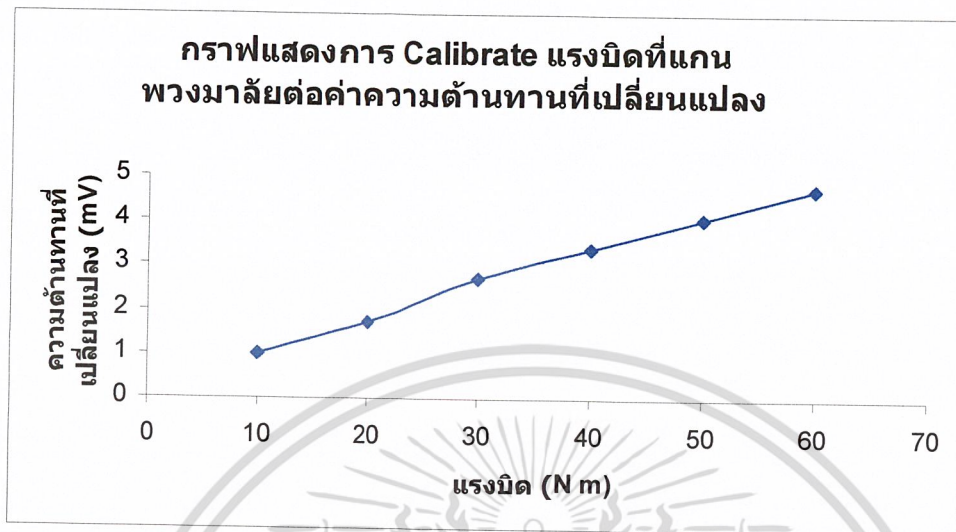
ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชักหลังการปรับปรุง ตำแหน่งที่ 5.

ความดันที่ใช้กด ตัวรถ ( <i>psi</i> )	ความแตกต่างของค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุด ( $\Delta V$ )( <i>mV</i> )	ระยะเวลาที่ใช้หมุน ต่อรอบการทำงาน ( $\Delta T$ )( <i>sec</i> )	แรงบิดที่แกน พวงมาลัย ( <i>N · m</i> )
600	3.5	1.94	21.9375
700	3.8	2.28	23.5585
800	4.9	3.23	29.669
900	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงการ Calibrate แรงบิดที่แกน พวงมาลัยต่อค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง  $\Delta V$



ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณ สลักล้อ ด้านขวา

จำนวนรอบการทดสอบ (รอบ)	ความสึกที่วัดได้จากความสึกหรอ (mm.)
0	0
50000	1.2
100000	1.6
150000	1.8
200000	2.0

ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงแนวโน้มความสึกหรอบริเวณ สลักล้อ ด้านซ้าย

จำนวนรอบการทดสอบ (รอบ)	ความสึกที่วัดได้จากความสึกหรอ (mm.)
0	0
50000	1.0
100000	1.5
150000	1.8
200000	2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงค่าตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก

ตำแหน่งการติดตั้งลูกหมากคันชัก	ระยะห่างจากศูนย์กลางสลักล้อยในแนวยาวของรถ (mm.)	ความสูงจากปลอกสลักล้อย (mm.)	ระยะห่างจากศูนย์กลางสลักล้อยในแนวกว้างของรถ (mm.)
ก่อนปรับปรุง	101.9	89.5	25.4
1	73	88	58
2	83	89	58
3	93	90	58
4	103	91	58
5	113	92	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

รูปแสดงภาพการนำเสนอโครงการงาน

**การศึกษากาไรโบริโลยีเชิงจลนศาสตร์ในระบบบังคับเลี้ยว**  
**Experimental Study on Tribology in an Automobile Steering System**

โดย  
**บุญฤทธิ์ วรรณวิวัฒน์ , พิชญภัค เพ่งพิศ**  
 อาจารย์ที่ปรึกษา  
**รศ.ดร. มงคล ชงกลวรกิจโรจน์**

**บทคัดย่อ**

การศึกษากาไรโบริโลยีเชิงจลนศาสตร์ในระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเสียดสีที่เกิดขึ้นในขณะขับขี่ โดยพิจารณาถึงผลกระทบของแรงเสียดสีที่มีต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบบังคับเลี้ยว การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การเสียดสีที่เกิดขึ้นในขณะขับขี่ และหาวิธีลดผลกระทบจากการเสียดสีที่เกิดขึ้น

**วัตถุประสงค์**

1. เพื่อศึกษาการเสียดสีที่เกิดขึ้นในระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์  
 2. เพื่อหาวิธีลดผลกระทบจากการเสียดสีที่เกิดขึ้น

**วิธีปฏิบัติ**

การศึกษานี้ดำเนินการขึ้นที่ห้องปฏิบัติการกาไรโบริโลยีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง โดยใช้เครื่องมือวัดการเสียดสีแบบ Pin-on-Disk และเครื่องมือวัดการเสียดสีแบบ Ball-on-Disk เพื่อศึกษาการเสียดสีที่เกิดขึ้นในขณะขับขี่ และหาวิธีลดผลกระทบจากการเสียดสีที่เกิดขึ้น

**อุปกรณ์ทดลอง**

Pin-on-Disk Tribometer, Ball-on-Disk Tribometer, Pin Calibration Device, Data Acquire, Air Pressure Gauge, Hydraulic Cylinder, เครื่องวัดอุณหภูมิ

**ผลการทดลอง**

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นในระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบบังคับเลี้ยว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นในขณะขับขี่สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการลดผลกระทบจากการเสียดสีที่เกิดขึ้น

**รูปผลการทดลอง**

รูปผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นในระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบบังคับเลี้ยว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นในขณะขับขี่สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการลดผลกระทบจากการเสียดสีที่เกิดขึ้น

**สรุปผลการทดลอง**

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นในระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบบังคับเลี้ยว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นในขณะขับขี่สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการลดผลกระทบจากการเสียดสีที่เกิดขึ้น

**ภาค วิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง**  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม

- [1] Mechanics of material / R.C. Hibbeler , published by Prentice Hall , Inc.
- [2] Fluid Power with Applications / Anthony Esposito , published by Prentice Hall , Inc
- [3] Hydraulic Components Technical Catalogue / Srithong Engineering Company Limited
- [4] Omron Best Components / Torterakit Intertrade Company Limited
- [5] พจนานุกรมศัพท์ยานยนต์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน , ๒๕๔๒ ,ISBN 974-8123-35-9
- [6] Mechanical engineering design, Seventh edition / Joseph E. Shigley, Charles R. mischke, Richard G. Budynas.
- [7] Website , <http://www.efunda.com/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้