

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของซีลสำหรับ

เครื่องจับยึดหัวอ่าน เอช จี เอ

3

Study on Characteristic of the Seal (O-Ring) for HGA Clamp



วิทยา กิตติเลิศกุล

ทรงศักดิ์ ทศบวร

ร/ว.
๖๘๖๓
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **81770**
วัน,เดือน,ปี..... **24 ส.ย. 2551**

b. **11937452**
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของซีลสำหรับ

เครื่องจับยึดหัวอ่าน เอช จี เอ

Study on Characteristic of the Seal (O-Ring) for HGA Clamp



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Characteristic of the Seal (O-Ring) for HGA Clamp



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2007

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของซีลสำหรับเครื่องจับยึดหัวอ่าน เอช จี เอ

Study on Characteristic of the Seal (O-Ring) for HGA Clamp

ผู้จัดทำ

1. นายวิทยา กิตติเลิศกุล
2. นายทรงศักดิ์ ทศบวร

รหัสประจำตัว 47010703

รหัสประจำตัว 47010270



(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร	ศึกษาพฤติกรรมการศึกษาของซิลสำหรับเครื่องจับยึดหัวอ่าน เอช จี เอ
นักศึกษา	วิทยา กิตติเลิศกุล 47010703 ทรงศักดิ์ ทศบวร 47010270
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาลักษณะการสึกกร่อนของซิลโอริง ซึ่งถูกประกอบเข้าอยู่กับเครื่องจับยึดหัวอ่าน ซึ่งใช้ในงานทดสอบฮาร์ดดิสก์ ภายใต้การเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมาที่สภาวะภาระและความเร็วเปลี่ยนแปลงจากการใช้งานจริง ซิลจะมีการเสื่อมและสึกกร่อน โดยจะมีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 10 วัน

โดยตัวแปรตามที่เราต้องการศึกษาคือปริมาตรการสึกกร่อน ซึ่งตัวแปรต้นคือความเร็ว การหล่อลื่น แรงดันลมจากระบบนิวเมติก ความหยابภายในกระบอกสูบ และช่องว่างระหว่างชิ้นงานซึ่งตัวแปรทั้งหมดนี้จะมีผลต่อแรงเสียดทาน แต่โดยเบื้องต้นจะให้ความสำคัญกับการหล่อลื่นและการควบคุมความเร็วกระบอกสูบ และการทดลองโดยเปลี่ยนตัวแปรต่างๆโดยจะวัดผลให้ออกมาในรูปแบบ การสึกกร่อนและจำนวนรอบการใช้งาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์วัดขนาดของการสึกกร่อน แล้วผลจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆที่มาจากการทดลองจะนำไปทำโมเดลทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีผลต่างกำลังสองจากผลการทดลอง

Thesis Title	Study on Characteristic of the Seal (O-Ring) for HGA Clamp
Student	Wittaya Kittilertkul 47010703 Songsak Tossabowon 47010270
Level of Study	Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn

Abstract

This report is to study the abrasive characteristics of seal O-ring for HGA-clamp in hard disk test system. Under the reciprocating motion at various load and speed conditions. In the operation seal is tended to have abrasion which have its mean life cycle about 10 days.

The dependent variable that we have to study is wear volume and the independent are velocity, lubrication, air pressure from the pneumatic system, roughness and the clearance of the piston which depend on friction force. The first importance variable need to adjust to the specify piston velocity and air pressure. The wear volume of the seal measured by optical microscope. The relation of wear volume and its life cycle will be investigated from the test. The mathematical model has been developed by mean of the least square method from the existing experimental results

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และความรู้ ความเข้าใจต่างๆ แก่กลุ่มของข้าพเจ้า

ทั้งนี้ต้องขอบคุณ สุทิน พลบูรณ์ ที่ได้ทำงาน การวิจัยนี้ร่วมกัน ช่วยหาข้อมูลต่างๆ และออกความคิดเห็นต่างๆ ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

ขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติหรือ NECTEC ที่ให้หัวข้องานวิจัยชิ้นนี้ และเงินทุนการวิจัย และบริษัทร่วมงานวิจัยแห่งหนึ่งที่ให้อุปกรณ์การวิจัย ในการทดลองนี้

ขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ต่างๆ ในการศึกษางานวิจัย และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจจนประสบความสำเร็จในการเรียน และงานวิจัยชิ้นนี้

วิทยา กิตติเลิศกุล

ทรงศักดิ์ ทศบวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 Tribology คืออะไร	2
2.1.1 ผลกระทบของความเสียหายจากการสึกหรอต่ออุตสาหกรรม	3
2.2 O-ring	3
2.2.1 ชนิดของ Seal O-ring	3
2.2.2 ทำไมถึงต้องใช้ o-ring ในการซีล	4
2.2.3 คุณสมบัติของ o-ring ที่ควรรู้	4
2.3 การสึกหรอ	4
2.3.1 การสึกหรอแบบแรงดึงแนบติด (Adhesive Wear)	4
2.3.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Fatigue Wear)	5
2.3.4 การสึกหรอจากสารเคมีกัดกร่อน (Corrosive wear)	5
2.4 การสึกหรอของโพลีเมอร์	5
2.4.1 การควบคุมการสึกหรอ	6
2.4.2 การออกแบบโครงสร้าง	6
2.4.3 การตัดแปลงพื้นผิว (Surface Modification)	7
2.4.4 การเสริมแรงด้วยอนุภาคหรือเส้นใย (Particulate หรือ Fibrous Reinforcement)	8
2.4.5 การเตรียมวัสดุประเภทไอพีเอ็น (Inter Penetrating Network: IPN)	9
2.4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของการสึกหรอ	9
2.4.7 พฤติกรรมการสึกหรอของโพลีเมอร์	10
บทที่ 3 ลักษณะงานและปัญหา	13
3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดทดลอง	13
3.2 การดำเนินการ	18
3.3 Flow chart ของระบบ	19
3.4 คุณลักษณะขางไอริง	26
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	25
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์	39
ภาคผนวก	41
บรรณานุกรม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 รูปลักษณะงานประกอบระหว่างลูกสูบ (Collar) กับแท่น (Nest)	13
3.2 รูปหลังการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมด	14
3.3 รูปจำลองส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ โดยรวม	14
3.4 รูปโอริงที่ตำแหน่งต่างๆ	15
3.5 รูปถ่ายลูกสูบทั้งสองส่วน คือส่วนที่เคลื่อนที่กับส่วนที่อยู่นิ่ง จากซ้ายไปขวาตามลำดับ	15
3.6 รูปการขึ้นลงของกระบอกสูบนิวเมติก	16
3.7 รูปการทำงานของระบบ	17
3.8 Air Compressor	18
3.9 ก่อตั้งทดสอบ	18
3.10 แอร์ไดร์เออร์ (Air Drier).....	19
3.11 รูปอุปกรณ์ภายใน	20
3.12 รูปอุปกรณ์ต่างๆ.....	20
3.13 การต่อท่อลม โดยที่สีเทาจะดันลูกสูบขึ้น และสีเหลืองจะดันลูกสูบลง.....	21
3.14 การประกอบชุดกระบอกสูบเข้ากับ Nest.....	21
3.15 รูปวงจรคอนโทรล	22
3.16 โปรแกรม Theben ที่ใช้ในการควบคุม โซรินอย์ควาล์ว	23
3.17 รูปและคุณลักษณะของ โอริงที่สำคัญ	24
4.1 ภาพจำลองและส่วนประกอบของ Nest และ Collar.....	25
4.2 กราฟแสดงมวลที่สูญเสียในการทำงานที่รอบต่างๆ ที่ความดัน 3.0 bar	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟการสูญเสียมวลต่อรอบที่ความดัน 3.0 บาร์	27
4.4 โปรแกรม Matlab ใช้ในการ Fit Data และสร้างกราฟ	28
4.5 ลักษณะการเสียหายของ โอริงแบบขัดถู Abrasive	28
4.6 รูปการเสียหายจากการเกิด Adhesive	29
4.7 กราฟการสูญเสียมวลต่อรอบที่ความดัน 3.0, 3.5, 4.0 บาร์	30
4.8 กราฟการแปรผันของมวลสูญเสียต่อความดันและจำนวนรอบ	31
4.9 กราฟการสูญเสียของมวลต่อความดันในแต่ละรอบการทำงาน	32
4.10 รูปเนื้อยาง โอริงก่อนการทดลองที่กำลังขยาย 100 เท่า	33
4.11 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 2,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า	33
4.12 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 6,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า	34
4.13 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 8,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า	34
4.14 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 10,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า	35
4.15 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 4,000 รอบ ที่ความดัน 3.5 bar ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า	35
4.16 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 6,000 รอบ ที่ความดัน 3.5 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า	36
4.17 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 8,000 รอบ ที่ความดัน 3.5 bar ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า	36
4.18 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 6,000 รอบ ที่ความดัน 4.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า	37
4.19 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 8,000 รอบ ที่ความดัน 4.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า	37
4.20 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 10,000 รอบ ที่ความดัน 4.0 bar ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองมวลสูญเสียในแต่ละความดันและจำนวนรอบ	26
5.1 ตารางเวลาทั้งหมดตลอดโครงการ	40
ก.1 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ	41
ก.2 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ	42
ก.3 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ	43
ก.4 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ไตรโบโลยี (Tribology) เป็นวิชาทางวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการสัมผัสกันของพื้นผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันซึ่งจะมีแรงเสียดทานและเกิดการสึกกร่อน โดยจุดประสงค์หลักคือการลดและกำจัดการสูญเสียจากแรงเสียดทานและการสึกกร่อน ซึ่งต้องใช้ความรู้หลากหลายแขนงในการวิเคราะห์เช่น วิชาเคมี คณิตศาสตร์ เทอร์โมไดนามิกส์ การศึกษาการไหล การถ่ายเทความร้อน วัสดุศาสตร์ การหล่อลื่น ฯลฯ จากกรณีที่สหรัฐอเมริกามีการวิจัยมาว่าการศึกษาไตรโบโลยี ช่วยลดค่าใช้จ่าย สองร้อยพันล้านเหรียญต่อปี ทางศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติหรือ NECTEC ได้เห็นถึงความสำคัญนี้จึงได้สนับสนุนให้เริ่มมีการวิจัยแขนงนี้เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อเป็นการเริ่มการศึกษาวิจัยในเรื่องไตรโบโลยี
- เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปกับโอริง
- เพื่อยืดอายุการใช้งานของโอริงซึ่งช่วยให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างราบรื่น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดังสาเหตุของการเสียหายของยางโอริงซึ่งซีลอยู่กับกระบอกสูบซึ่งถูกขั้บตันด้วยลมนิวเมติก โดยลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบวิ่งขึ้นลงกลับไปกลับมา (Reciprocation)

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 Tribology คืออะไร

Tribology คือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของสัมผัสกันระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีปฏิริยาต่อกัน และมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อกัน ซึ่งได้รวม ไปถึงศาสตร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องด้วย Tribology ถือกำเนิดขึ้นมาจากห้องทดลอง Cavendish ที่งานวิจัยส่วนหนึ่ง คือการศึกษาเกี่ยวกับความเสียดทานและการหล่อลื่นระหว่างของแข็ง และจากงานสัมมนาดำเนินงานหลักในปี ค.ศ.1964 ที่ได้จัดตั้งวิทยาศาสตร์สาขา Tribology ขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วย

- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีด้านวัสดุ 40 %
- วิศวกรรมเครื่องกล 30 %
- ความรู้เรื่องการหล่อลื่น 20 %
- การควบคุมดูแลระบบการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ การวิเคราะห์หาสาเหตุ และการเก็บรวบรวมข้อมูล 10 %

ต่อมาในปี ค.ศ. 1987 ได้มีวิทยาศาสตร์อีกสาขาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับ Tribology โดยตรงเกิดขึ้น คือ วิศวกรรมพื้นผิว (Surface Engineering) ซึ่ง Prof.T.Bell ได้กล่าวไว้ว่า “วิศวกรรมพื้นผิว คือ การออกแบบและปรับปรุงผิวเคลือบและผิวชิ้นส่วนรองรับไปพร้อมกัน เหมือนหนึ่งเป็นระบบเดียวกัน เพื่อให้สมรรถภาพของชิ้นส่วนนั้นสูงขึ้นได้ในราคาถูก ซึ่งจะไม่สามารถทำได้เลยถ้าหากขาดชั้นผิวเคลือบหรือชิ้นส่วนที่เหมาะสมเพียงอย่างเดียว” ในปัจจุบันเราจะพบว่าเทคโนโลยีด้านพื้นผิวหลายประเภทที่พัฒนาขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการด้านทานการสึกหรอ เช่น การทำคาร์บูไรเซชัน (Carburisation) การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical vapour deposition) และการชุบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating เช่น การทำ Hard chrome) เป็นต้น

ตั้งแต่นั้นมา Tribology ก็ได้มีบทบาทสำคัญในการเติบโตอย่างรวดเร็วของวิศวกรรมพื้นผิว จนเกิดเป็นแนวความคิด “ผิวมีดีไซน์” (Designer surface) ขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรม

การเสียดสีและความสามารถในการด้านทานการสึกหรอนั้น ไม่ใช่คุณสมบัติที่เกิดขึ้นจากตัววัสดุ (Intrinsic property) เพียงอย่างเดียว ไม่ใช่เพียงเพราะเป็นวัสดุของแข็ง เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) แล้วจะต้องมีความสามารถในการด้านทานการสึกหรอสูง แต่การเสียดสีและความสามารถในการด้านทานการสึกหรอเป็นลักษณะเฉพาะของ “ระบบ” หนึ่งๆ ซึ่งจะมาจากผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของวัสดุนั้น การแก้ไขปัญหาการสึกหรอโดยการปรับเปลี่ยนระบบและปัจจัยดังกล่าวเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แทนการพัฒนาวัสดุหรือผิวเคลือบให้มีความสามารถในการด้านทานการสึกหรอมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการสึกหรอในเครื่องยนต์หนึ่งๆ อาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้ไขได้ด้วยการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานเช่น ความเร็วรอบแล้วแรงกระทำ (Loads) ให้อยู่ในระดับที่เกิดการสึกหรอแต่เพียงเล็กน้อย แล้วจึงมาเปลี่ยนวัสดุผิวสัมผัส ปรับปรุงระบบกรองอากาศและละอองน้ำมัน และ/หรือ ตกแต่งผิวชิ้นงานขั้นสุดท้ายเพื่อให้ได้ความเรียบผิวที่ต้องการ นอกจากนี้ ในการออกแบบเครื่องจักรบางประเภท เช่น เครื่องยนต์ของรถยนต์ จุดประสงค์ของการใช้ Tribology ในรูปของระบบวิศวกรรมนั้น ไม่เพียงเพื่อลดการเสียดสีและการสึกหรอ แต่รวมไปถึงการลดแรงสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนอีกด้วย

2.1.1 ผลกระทบของความเสียหายจากการสึกหรอต่ออุตสาหกรรม

การสึกหรอที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม ประกอบกับการขาดความรู้ทางด้าน Tribology ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ร้ายแรงและมีราคาแพงตามมา ในปี ค.ศ. 1966 ได้มีการศึกษาเพื่อประมาณมูลค่าของความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดทาง Tribology (เรียกรายงานฉบับนี้ว่า Jost report) โดยก่อนหน้าที่รายงานฉบับนี้จะถูกนำออกเผยแพร่ วิศวกรและนักออกแบบมักจะเพิกเฉยกับปัญหาของการสึกหรอ ซึ่งคงเนื่องมาจากลักษณะความหลากหลายของปัญหา ในรายงาน ได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนว่าการหลีกเลี่ยงปัญหาของการสึกหรอที่เกิดขึ้นตามมา (หนึ่งในสามของทรัพยากรพลังงานของโลกถูกใช้ไปเพื่อชดเชยกับแรงเสียดทานในรูปแบบต่างๆ เพราะฉะนั้นการลดแรงเสียดทานการสึกหรอที่เกิดขึ้นจึงมีผลกระทบเชิงเศรษฐกิจต่อประเทศนั้นๆ สูง) จากการศึกษาในสหราชอาณาจักร อังกฤษแสดงให้เห็นว่า การแก้ปัญหาการสึกหรอที่ถูกต้องในอุตสาหกรรม สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 2 % ของมูลค่ามวลรวมประชาชาติ (GDP) ของประเทศนั้น นอกจากนี้ รายงานของ Jost ยังได้กล่าวถึง ค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ ของอุตสาหกรรมที่สามารถประหยัดได้โดยการนำ Tribology เข้ามาร่วมใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการสึกหรอ

2.2 O-ring

O-ring เป็นซีลชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นรูปร่างวงแหวนซึ่งใช้ในการป้องกันการไหลรั่วของของเหลวหรือแก๊สในงานประกอบกันเพื่อป้องกันการเสียดทานของเนื้อวัสดุที่จะสัมผัสกันโดยตรงซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียมาก ในกรณีที่จะศึกษานี้เป็นการประกอบกันในลักษณะของกระบอกสูบและลูกสูบ ในการปฏิบัติงานจริงนั้น การซีลต้องสามารถรองรับทุกสภาวะทั้งระยะ Clearance, Pressure, Temperature และต้องสามารถป้องกันการรั่วไหลของ Gas, Fluid ได้อย่างมีขีด O-ring เป็น Polymer ชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็น Elastomer ดังนั้นในการคำนวณเราจะพิจารณาเป็น Incompressible, Viscous Fluid ที่ซึ่งมีแรงตึงผิวที่สูงมาก

2.2.1 ชนิดของ Seal O-ring

ซีล ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบ Static Seal และ แบบ Dynamic Seal สำหรับแบบ Static Seal จะใช้กับการทำงานของเครื่องจักรที่ไม่มีเคลื่อนที่ระหว่างพื้นผิวสัมผัส ตัวอย่างที่มีใช้งาน คือ ประเก็น (Gasket), แบบ Dynamic Seal จะใช้กับการทำงานของเครื่องจักรที่มีการหมุน เช่น การหมุนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพลลา (Rotation), การเคลื่อนที่แบบไป-กลับ (Reciprocation), การเคลื่อนที่แบบการแกว่งหรือการสั่น (Oscillation) ตัวอย่างที่มีใช้งาน เช่น Packing, Diaphragm Seals, Mechanical Face Seal

2.2.2 ทำไมถึงต้องใช้ o-ring ในการซีล

- สามารถใช้ในความดัน อุณหภูมิและ ระยะ tolerance ที่หลากหลาย
- ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา
- ไม่มี critical torque เหมือนวัสดุอื่น ทำให้รองรับแรงบิดได้สูงมาก
- สามารถคำนวณช่วงเวลาที่จะเสียหายได้
- มีค่าใช้จ่ายต่ำ

2.2.3 คุณลักษณะ o-ring ที่ควรรู้

O-ring ในกระบอกสูบอาจมีการหมุนบิดเล็กน้อยๆ ได้สาเหตุหลักของการฉีกขาดอยู่ที่การบิดของเนื้อผิว โดยที่สาเหตุหลักของการบิดของยางคือ Friction Force การเปลี่ยนแปลงความดันอย่างกะทันหันอาจทำให้เสื่อมเร็วขึ้นรูปทรงของ O-ring ในขณะที่ถูกกระทำมีส่วนสำคัญต่อการซีล Friction Force ขึ้นอยู่กับแรงอัดที่สวมอยู่ตอนประกอบ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ลักษณะของวัสดุ คุณลักษณะของแก๊สที่ทำการซีล ความหยาบของผิว จึงต้องควรรู้คุณสมบัติทางเคมีของ o-ring (polymer) ที่ใช้

2.3 การสึกหรอ

การสึกหรอของวัสดุใดๆนั้นสามารถแบ่งได้จากสาเหตุของการสึกหรอได้ดังนี้

1. การสึกหรอจากการขัดถู Abrasive wear
2. การสึกหรอจากแรงดึงแนบติด Adhesive wear
3. การสึกหรอจากความล้า Surface fatigue
4. การสึกหรอจากสารเคมีกัดกร่อน Corrosive wear

2.3.1 การสึกหรอแบบแรงดึงแนบติด (Adhesive Wear)

เป็นการถ่ายเทเนื้อวัสดุ (Material Transfer) จากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งภายใต้แรงกระทำ โดยเป็นผลมาจากการที่พื้นผิว 2 ชนิดนั้นอยู่ติดกันหรือเชื่อมติดกัน ซึ่งเมื่อผิวทั้ง 2 ถูกเลื่อนออกจากกันก็จะเกิดการหลุดออกจากพื้นผิววัสดุหนึ่งเนื่องจากจุดที่เชื่อมกันนั้นฉีกขาดและทำให้โพลิเมอร์สามารถหลุดไปกับพื้นผิวของโลหะหรือโพลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ สำหรับการสึกหรอแบบแนบติดนั้นจะพบว่า พลังงานพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาณการสึกหรอของพื้นผิว ดังนั้น โพลิเมอร์ที่มีพลังงานพื้นผิวดำจึงมีแนวโน้มที่จะถ่ายเทเนื้อวัสดุไปยังโพลิเมอร์หรือวัสดุที่มีพลังงานพื้นผิวสูงกว่า นอกจากนี้โพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะมีอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสึกหรอที่ต่ำกว่าเนื่องจากการสึกหรอในลักษณะนี้จะเกี่ยวข้องกับการแตกหัก ณ บริเวณที่เชื่อมติด ดังนั้น ไม่เพียงแต่พลังงานพื้นผิวเท่านั้นแต่พลังงานในการแตกหักก็เป็นปัจจัยที่ควรพิจารณา โดยปกติการสึกหรอแบบแนบติดนี้มักจะเกิดกับวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

2.3.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)

การสึกหรอในลักษณะนี้มักจะพบในโพลีเมอร์ที่มีความเปราะ หรือในโพลีเมอร์ที่นิ่มและเหนียวคล้ายยาง เป็นการสึกหรอซึ่งเกิดจากการขัดถูบริเวณผิวหน้าวัสดุ การที่วัสดุจะหลุดออกจากผิวหน้าไปนั้นเกิดจากการเสียดสีของอนุภาคที่มีความแข็งซึ่งอาจแทรกอยู่ระหว่างผิวของวัสดุ 2 ชนิด หรือฝังอยู่ในวัสดุใดวัสดุหนึ่งเป็นการสึกหรอแบบสามเนื้อ (3-body wear) เมื่อเกิดการเสียด สิ้นผิวหน้าวัสดุจึงหลุดออกในระดับจุลภาค ดังนั้นการสึกหรอแบบนี้จะเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ในการแตกหัก และกลไกการสัมผัสกันของวัสดุ (Contact Mechanics) โดยพลังงานที่ใช้ในการแตกหักจะเป็นตัวกำหนดการเกิดรอยแตก และปริมาณหรือความรุนแรงของการสึกหรอ ซึ่งโพลีเมอร์ที่สามารถต้านทานการสึกหรอแบบนี้ได้จะต้องมีความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Fracture toughness) วัสดุที่มีความแข็งมากและมีความเหนียวมากกว่าจะสามารถต้านทานการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูได้ดีกว่า

2.3.3 การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Fatigue Wear)

การสึกหรอที่เกิดจากการล้านี้ ปัจจัยที่สำคัญที่สุดก็คือ พลังงานในการแตกหัก ดังนั้นสมบัติที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้การสึกหรอประเภทนี้ก็คือ ความเหนียว การสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการสะสมของการเสียหายที่เห็นไม่เด่นชัดนักจากการให้แรงซ้ำไปซ้ำมา หรือการให้แรงกระทำแบบวงรอบ (Cyclic load) เป็นจำนวนมากรอบจนในที่สุดการเสียหายก็เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ เกิดการหลุดออกของอนุภาคจากพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า การสึกหรอแบบนี้มักไม่รุนแรงและจะเกิดเมื่อมีการหมุนหรือการไถลของวัสดุ การสึกหรอแบบนี้มักจะพบควบคู่ไปกับการสึกหรอแบบขัดถูและการสึกหรอแบบแนบติด ถึงแม้ว่าการสึกหรอประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุเช่นเดียวกัน

2.3.4 การสึกหรอจากสารเคมีกัดกร่อน (Corrosive wear)

เป็นการสึกหรอที่เกิดจากกระบวนการทางเคมี เหมาะสำหรับการพิจารณาถึงเนื้อวัสดุที่อาจเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ เช่นการเกิด Oxidization หรือการพิจารณาเรื่องอุณหภูมิในกระบวนการเคมี

2.4 การสึกหรอของโพลีเมอร์

เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะแล้ว โพลีเมอร์โดยส่วนมากจะมีความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำกว่า ในการควบคุมการสึกหรอของโพลีเมอร์นั้นเราจำเป็นต้องเข้าใจถึงกลไกการสึกหรอแต่ละประเภทก่อน การสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโพลิเมอร์สามารถเกิดได้หลายรูปแบบและมีปัจจัยเกี่ยวข้องหลายชนิด อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาการสึกหรอของโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติ 2 ตัวที่ต้องนำมาพิจารณาอยู่เสมอ ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการแตกหัก (Fracture energy) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงในการแตกหัก หรือ Fracture strength) และพลังงานพื้นผิว (surface energy) ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการกำหนดรูปแบบการสึกหรอของโพลิเมอร์ กล่าวคือวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่สูงควรมีพลังงานที่ใช้ในการแตกหักที่สูง

2.4.1 การควบคุมการสึกหรอ

การควบคุมการสึกหรอของโพลิเมอร์เป็นเรื่องที่ไม่ง่ายเท่าไรนัก แต่ก็มีเทคนิคที่จะช่วยลดหรือควบคุมปริมาณการสึกหรอให้เลือกใช้ได้หลายวิธี ได้แก่ การออกแบบโครงสร้างของโพลิเมอร์ให้มีความเหมาะสม การดัดแปลงพื้นผิวของโพลิเมอร์ การเสริมแรงโพลิเมอร์ด้วยอนุภาคหรือเส้นใย และการเตรียมวัสดุประเภท ไอพีเอ็น (Interpenetrating Network: IPN) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.2 การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบให้โพลิเมอร์มีความสามารถทำได้โดยการปรับปรุงปัจจัยทางจุลภาคข้อใดข้อหนึ่งใน 4 ข้อ

1. น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight และ Molecular weight distribution) น้ำหนักโมเลกุลจะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหล (Rheological properties) ของโพลิเมอร์ ตัวอย่างที่เห็นได้อย่างเด่นชัด คือ วัสดุในกลุ่มโพลิเอทิลีน นั่นคือ โพลิเมอร์ชนิดโมเลกุลสูงพิเศษ หรือ Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) ซึ่งจะสามารถควบคุมและต้านทานการสึกหรอได้ดีเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลจะมีผลต่อพลังงานพื้นผิว และพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกหักของโพลิเมอร์ โพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีพลังงานในการต้านทานการแตกหักที่สูง นอกจากนั้นน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลจะมีผลต่อการเกิดรอยร้าว (Crazing : คือ รอยแตกแบบเส้นผมที่เกิดจากแรงดึงเนื่องจากความเค้นหรือเกิดจากการที่พื้นผิวหดตัวเร็วกว่าเนื้อภายใน) ตลอดจนคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทก อีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีส่วนในการควบคุมการสึกหรอของโพลิเมอร์

2. โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล (Backbone structure) สายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีลักษณะที่ต่างกันไป กล่าวคือ โพลิเมอร์บางชนิดสายโซ่โมเลกุลจะมีความยืดหยุ่นดี ใจได้ง่าย ในขณะที่โพลิเมอร์บางชนิดจะมีลักษณะสายโซ่แข็งตึง บิดงอได้ยาก หรือบางชนิดจะมีทั้ง 2 แบบคือ ความยืดหยุ่นและความแข็งแรงอยู่ในสายโซ่เดียวกัน ซึ่งสายโซ่ที่มีความแข็งแรงดีจะมีผลทำให้โพลิเมอร์นั้นมีโมดูลัสที่สูงหรือมีความแข็งแรงสูง หรือทั้งสองอย่าง และการจากศึกษาพบว่า ความต้านทานของการสึกหรอของโพลิเมอร์บางชนิดจะดีที่อุณหภูมิห้อง แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิทำการทดสอบสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น Polycarbonate polysulfone, Polyethersulfone (PES).

Polyimide (PI), Polyamide-imide (PAI), Polyphenylene sulfide (PPS) และ Polyether ether ketone (PEEK) ซึ่งโพลิเมอร์เหล่านี้ล้วนแต่มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลที่แข็งแรงดีทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงดีของสายโซ่

โมเลกุลที่มากขึ้น ไปถึงไม่จำเป็นเท่าไรนัก ความยืดหยุ่นเองก็สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอได้เช่นกัน งานวิจัยของ Jones และ Eiss พบว่าเมื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับโครงสร้างของโพลีอิมิด (Polyimide) ความต้านทานการสึกหรอที่เกิดจากการล้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ โพลีอิมิดที่มีพันธะของออกซิเจน (Oxygen linkage) อยู่ในโครงสร้างมีค่าการสึกหรอต่ำที่สุด จากผลการทดลองให้เห็นชัดเจนว่าโพลีอิมิดชนิด B จะมีการสึกหรอต่ำกว่าที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากพันธะออกซิเจนภายในสายโซ่โมเลกุลที่ส่งผลให้โมเลกุลมีความยืดหยุ่นกว่าโพลีอิมิดอีก 2 นั่นเอง

3. การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Microstructure) โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาหรือการจัดเรียงตัวของโพลิเมอร์สามารถส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอของโพลิเมอร์ได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Tanaka แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ของโพลิเมอร์นั้นจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า ส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) ดังนั้น โครงสร้างส่วนที่เป็นอสัณฐานจะเกิดการสึกหรอได้มากกว่า นอกจากความแตกต่างของลักษณะ โครงสร้างของโพลิเมอร์แล้วนั้น ขนาดของผลึกก็ยังมีผลต่ออัตราการสึกหรออีกด้วย ดังนั้นการควบคุมโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาโดยการควบคุมการเกิดผลึกของโพลิเมอร์จะเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเมอร์ได้

4. โครงสร้างผลึกเหลว (Liquid crystalline structure) จากการศึกษาพบว่า โพลิเมอร์ผลึกเหลว หรือ Liquid crystalline polymer บางชนิดจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดี ตัวอย่างของโพลิเมอร์ผลึกเหลวที่รู้จักกันดีก็คือ เคฟลาร์ (Kevlar) หรือ Poly (Phenyleneophthalamide) ซึ่งมีความต้านทานการขัดถูสูงและนิยมใช้ทำวัสดุที่ต้องรับแรงเสียดทานและต้านทานการสึกหรอ เช่น เบรกของรถบรรทุก เบรกรถยนต์ เป็นต้น

2.4.3 การดัดแปลงพื้นผิว (Surface Modification)

นอกจากการออกแบบ โครงสร้างของ โพลิเมอร์แล้วนั้น วิธีการที่นิยมใช้การเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเมอร์ก็คือ การดัดแปลงสภาพพื้นผิวเพื่อให้มีการสึกหรอต่ำ การเสียดทานต่ำหรือทั้ง 2 อย่าง ซึ่งสามารถทำได้ 3 วิธีคือ

1. Plasma treatment การดัดแปลงสภาพพื้นผิวด้วยเทคนิคพลาสมาเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยสามารถกราฟต์โมโนเมอร์ลงไปยังบนผิวหน้าของโพลิเมอร์ได้ ยกอย่างเช่น การกราฟต์โมโนเมอร์ชนิดเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) หรือเฮกซะฟลูออโรเอทิลีน (Hexafluoroethylene) ลงไปยังบนเส้นใยชนิดดัด หรือลงบนเส้นใยโพลิโพรไพลีน (Polypropylene) ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางด้านต้านทานการสึกหรอดีขึ้น เช่น สามารถทำให้เส้นใยดังกล่าวมีแรงเสียดทานลดลง นอกจากนี้การดัดแปลงพื้นผิวด้วยเทคนิคพลาสมาโดยใช้ก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซเฉื่อย ยังสามารถทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Cross-linked) บนพื้นผิว ซึ่งจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้มากกว่าพื้นผิวที่ไม่มีการเชื่อมขวางหรือแม้กระทั่งการ

คัดแปลงพื้นผิวอินทรีย์ ให้กลายเป็นพื้นเซรามิกซึ่งจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนที่ดีกว่า

2. Surface photopolymerization นอกจากการคัดแปลงพื้นผิวด้วยการใช้พลาสมาดังที่กล่าวมาแล้วนั้น อีกเทคนิคซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันกว้างขวางสำหรับการคัดแปลงพื้นผิวโพลิเมอร์และโลหะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 500 อังสตรอม (Å) ก็คือ การคัดแปลงโดยใช้แสงอุตราไวโอเล็ต (UV) โดยเทคนิคนี้จะเป็นการ โพลิเมอไรซ์ โมโนเมอร์บางชนิดลงบนพื้นผิวโพลิเมอร์ด้วยแสง UV ซึ่งภายหลังจากการ โพลิเมอไรซ์แล้วนั้น โพลิเมอร์ที่เตรียมได้จะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การ โพลิเมอไรซ์เตตระฟลูออโรเอทิลีนและไวนิลโมโนเมอร์อื่นๆ เช่น อิมิด แอนไฮไดรด์ (Anhydrides) ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated hydrocarbon) และคีโตน (Ketone) เป็นต้น

3. Silicone modification นอกจากวิธีทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมา การคัดแปลงพื้นผิวด้วยซิลิโคนก็ทำให้โพลิเมอร์มีค่าความเสียดทานต่ำและมีการสึกหรอบริเวณพื้นผิวที่ต่ำเช่นกัน เช่น การคัดแปลงพื้นผิวโพลิคาร์บอนเนตด้วยสารประกอบไฮบริดระหว่างซิลิโคนและซิลิกาก็สามารถทำให้โพลิคาร์บอนเนตมีความสามารถในการต้านทานการขัดถูและการขีดข่วนที่ดีเทียบเท่าโลหะได้

2.4.4 การเสริมแรงด้วยอนุภาคหรือเส้นใย (Particulate หรือ Fibrous Reinforcement)

วิธีการนี้ คือ การทำวัสดุเชิงประกอบหรือคอมโพสิต โดยการเสริมแรงโพลิเมอร์ด้วยอนุภาคหรือเส้นใยในกรณีของการใช้อนุภาคเสริมแรงนั้นนิยมใช้วัสดุประเภทอีพอกซีเรซิน เพื่อใช้เพิ่มพลังงานในการแตกหักให้กับโพลิเมอร์ที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ซึ่งมีความเปราะ เช่น การเติมอนุภาคของยางเข้าไปในโพลิอิมิดและเรซินอีพอกซี (Epoxy resin) ซึ่งมีความเปราะและมีพลังงานในการแตกหักที่ต่ำ พบว่าภายหลังจากการเติมอนุภาคของยางแล้ว พลังงานในการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้นหลายเท่า ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานในการล้าเพิ่มขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติมผงกราฟิตลงไปโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene : HDPE) ในปริมาณ 30 % นอกจากจะไปเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 2 เท่าแล้วยังไปเพิ่มค่าอัตราการสึกหรออีกประมาณ 30 % ด้วย ดังนั้นกราฟิตจึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมหรือ Filler ให้กับ HDPE ซึ่งต่างจากกรณีของ Teflon หรือ PTFE (Polytetrafluoroethylene) ที่การเติมผงกราฟิตจะไปลดอัตราการสึกหรอลงได้เป็นอย่างดี

สำหรับในกรณีการใช้เส้นใยเสริมแรงนั้นก็สามารถทำให้โพลิเมอร์ เช่น โพลิอิมิด มีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้เช่นกันเส้นใยที่นิยมนำมาใช้เสริมแรง ได้แก่ เส้นใยกราไฟต์ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟลาร์ อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอต่างกันออกไปตามชนิดของวัสดุที่ผสมและก่อให้เกิดการสึกหรอ เช่นวัสดุเชิงประกอบระหว่างกราฟิตและโพลิอิมิดจะสามารถต้านทานการสึกหรอบนพื้นผิวเซรามิกประเภทซิลิโคนไนไตรด์ได้น้อยกว่าพื้นผิวโลหะประเภท

เหล็กกล้าภายใต้ภาวะการทดสอบเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากความขรุขระของเส้นใยกราฟไฟต์และอุณหภูมิระหว่างผิวสัมผัสที่สูงกว่า ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการหล่อลื่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อสัมผัสกับซิลิคอนไนไตรต์ลดลง อย่างไรก็ตามพบว่า การเติมสารหล่อลื่นของแข็งก็ส่งผลต่อการสึกหรอเช่นกัน กล่าวคือพบว่า เมื่อเติม MoS₂ จะส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเชิงประกอบและซิลิคอนไนไตรต์ลดลงอย่างมากเช่นกัน นั่นคือ วัสดุเชิง WSe₂/GaIn นอกจากนี้ความขรุขระของเส้นใยก็มีผลต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบเช่นกัน นั่นคือ วัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยกราฟไฟต์ที่หยาบจะให้ค่าการสึกหรอและการเสียดทานที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยละเอียด

2.4.5 การเตรียมวัสดุประเภทไอพีเอ็น (Inter Penetrating Network: IPN)

การออกแบบหรือวิธีการควบคุมการสึกหรอวิธีสุดท้าย คือ การเตรียมโพลิเมอร์ให้มีลักษณะโครงสร้างตาข่ายที่แทรกหรือเกี่ยวพันกันระหว่างโพลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่า ซึ่งไม่สามารถจะแยกแต่ละเฟสออกจากกันได้โดยวิธีการทางกายภาพ โดยทั่วไปแล้วจะสามารถเตรียมได้จากการ โพลิเมอร์ไรโซโมโนเมอร์เข้าไปภายในโครงสร้างที่เป็นตาข่ายที่มีการเชื่อมขวาง (Cross-linked network) เพื่อให้เกิดเป็น โพลิเมอร์ไอพีเอ็นชนิดเทอร์โมเซต (Thermosetting IPN) นอกจากนี้ไอพีเอ็นชนิดเทอร์โมเซตแล้วก็มีโครงสร้างไอพีเอ็นชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic IPN) เช่นกัน ซึ่งจะเป็น โครงสร้างตาข่ายที่ไม่มีพันธะเชื่อมขวาง (Non-cross-linked network) กล่าวคือ เป็นโพลิเมอร์ที่สามารถไหลตัวได้ที่อุณหภูมิสูงและสามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางที่อุณหภูมิต่ำ ยกตัวอย่างเช่น เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็น ไทรบิล็อกโค โพลิเมอร์ ประกอบด้วยเฟสที่เป็นยางตรงกลางและล้อมรอบด้วยเฟสที่มีลักษณะเป็นแก้ว (Glassy phase) ดังนั้นที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ T_g ทั้งสองเฟสสามารถไหลไปด้วยกันได้ แต่ที่อุณหภูมิห้องโครงสร้างของวัสดุประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นยางตรงกลางและมีพันธะทางกายภาพของโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายแก้วอยู่รอบๆ ซึ่งโครงสร้างแบบไอพีเอ็นนี้พบว่าโพลิเมอร์มีความเหนียว (Toughness) เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ยังไม่มีการศึกษาโดยตรงว่าโครงสร้างแบบนี้จะมีผลมากน้อยเพียงใดต่อการต้านทานการสึกหรอของโพลิเมอร์

2.4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของการสึกหรอ

นอกจากการควบคุมการสึกหรอโดยวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้น ปัจจัยภายนอกบางประการ เช่น อุณหภูมิหรือความชื้น ก็ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเมอร์ได้เช่นกัน Tanaka และ Yamada ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงเสียดทานและการสึกหรอของโพลิเมอร์ทนความร้อนบางชนิด คือ โพลีอิมิด (Polyimide : PI), โพลีเอมิด-อิมิด (Polyamide - imide : PAI), โพลีอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether ether ketone : PEEK), โพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphenylene sulfide : PPS) ชนิดที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว และ โพลีอีเทอร์ซัลโฟน (Polyether sulfone : PES) จากการศึกษาพบว่าแรงเสียดทานของโพลิเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป กล่าวคือ PI, PAI และ PEEK แสดงค่าความเสียดทานที่ต่ำ ในขณะที่ PES มีแรงเสียดทานที่สูง ณ อุณหภูมิสูงกว่า 200°C สำหรับอัตราการสึกหรอพบว่า PI จะมีอัตราการสึกหรอสูงกว่า

PI ถึง 10 เท่า ส่วน PEEK, PPS และ PES จะมีอัตราการสึกหรอต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ และมีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ทำการทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสรานซ์ชั้น (T_g) ของโพลิเมอร์แต่ละชนิดอีกด้วย

Dowson และคณะ ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของรายละเอียดลักษณะของพื้นผิวคู่สัมผัส (Counterface topography) ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของโพลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultra high molecular weight polyethylene : UHMWPE) ภายใต้สภาวะแห้งในบรรยากาศปกติ และในสภาวะเปียก โดยใช้น้ำกลั่น คู่สัมผัสที่นำมาศึกษา คือ เหล็กกล้าไร้สนิม จากการศึกษาพบว่าภายใต้สภาวะแห้งอิทธิพลของลักษณะผิวคู่สัมผัสซึ่งก็คือ เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีต่อการสึกหรอจะค่อนข้างน้อย และในสภาวะเปียก คือ มีน้ำอัตราการสึกหรอของโพลิเมอร์จะลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราการสึกหรอของวัสดุที่อ่อนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคู่สัมผัสที่มีความแข็งจะลดลง เมื่อปรับปรุงคุณภาพของผิวหน้าคู่สัมผัสให้ดีขึ้น กล่าวคือ มีความหยาบลดลงนั่นเอง

2.4.7 พฤติกรรมการสึกหรอของโพลิเมอร์

วัสดุโพลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจในการศึกษาถึงพฤติกรรมหรือกลไกการสึกหรอ โดยส่วนใหญ่่มักจะเป็นพลาสติกวิศวกรรมหรือ โพลิเมอร์เชิงประกอบ ตัวอย่างที่รู้จักกันดี ได้แก่ โพลีอิมิด (PI), โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene : PTFE), โพลีเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE), โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate : PET) ตลอดจน โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นต้น

โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ PET จัดเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางและแพร่หลายมากที่สุดชนิดหนึ่ง เป็นที่รู้กันดีว่า PET มีสมบัติที่ค่อนข้างเปราะ คือ ปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่วัสดุได้รับ ซึ่งมีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของโมเลกุลนี้ล้วนแต่มีบทบาทที่สำคัญต่อพฤติกรรมการสึกหรอทั้งสิ้น นั่นคือ ปริมาณความเป็นผลึกเป็นปัจจัยทางโครงสร้างของโพลิเมอร์ โครงสร้างกึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ที่มีความสำคัญต่อการสึกหรอไม่เพียงแต่กับ PET เท่านั้น มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาค้นคว้าถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึกและการสึกหรอของโพลิเมอร์ เช่น PTFE จะมีปริมาณการสึกหรอลดลงเมื่อความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่โพลีคลอโรไตรฟลูออโรเอทิลีน (Polychlorotrifluoroethylene : PCTFE) ที่มีปริมาณความเป็นผลึก 65% จะมีการสึกหรอมากกว่า PCTFE ที่มีปริมาณความเป็นผลึก 45% จากความแตกต่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกมีผลต่อการสึกหรอค่อนข้างซับซ้อน สำหรับ PET เองนั้นจากงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าโครงสร้างของ PET ที่ปริมาณความเป็นผลึกต่างกันจะมีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาต่างกัน นั่นคือ ที่ปริมาณความเป็นผลึก 8% PET จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน และเมื่อความเป็นผลึกสูงขึ้นเป็น 39% และ 55% PET จะมีโครงสร้างแบบสเฟียรูไลต์ (Spherulite) และเมื่อความเป็นผลึกสูงถึง 75% พบว่า PET จะมีโครงสร้างแบบเส้นใย ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ล้วนแต่มีผลต่อการสึกหรอต่างกันไป จากผลการศึกษาค้นคว้าที่แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานขึ้นกับปริมาณความเป็นผลึกเล็กน้อย ในขณะที่อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น (คล้ายกับ PCTFE) โดยเฉพาะจะเห็นได้ชัดเจนที่ปริมาณความเป็นผลึก 8% และ 39% เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกมากกว่า 40% โดยที่กลไกการสึกหรอจะแตกต่างกัน นั่นคือ ที่ปริมาณความเป็นผลึกต่ำ (ประมาณ 8%) การสึกหรอจะเกิดเนื่องจากถ่ายเทเนื้อ PET ไปที่คู่สัมผัส ในขณะที่ปริมาณความเป็นผลึกสูงการสึกหรอจากการล้าในระหว่างการเลื่อนไถลไปมาระหว่าง PET กับคู่สัมผัสโลหะ รวมแตกต่างของกลไกการสึกหรอนี้เกิดเนื่องจากความแตกต่างทางสัณฐานวิทยานั้นเอง

ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของ โพลีเมอร์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับภาวะและวิธีการทดสอบ ซึ่งมี 4 วิธี ซึ่งจำลองมาจากโอกาสในการใช้งานพลาสติกในทางวิศวกรรมดังต่อไปนี้

1. การทดสอบการสึกกร่อนจากการแตกของฟองอากาศ (Cavitation Erosion Test)

โดยวัดปริมาตรที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ภายหลังจากการทดสอบ 5 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบในน้ำกลั่นและวางเครื่องเจาะคว้านคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic drill) ให้ห่างจากพื้นผิวชิ้นทดสอบ โพลีเมอร์เป็นระยะทาง 0.35 มิลลิเมตร ซึ่งความถี่ที่สูงนี้จะก่อให้เกิดการหลุดออกไปของพื้นผิวชิ้นทดสอบ การทดสอบโดยวิธีนี้เป็นการจำลองภาวะการใช้งานของท่อใบพัดหรือวาล์วที่ใช้งานในเหมืองภายใต้ระบบไฮดรอลิก

2. การทดสอบการสึกกร่อนจากการปะทะของอนุภาคของแข็ง (Particle Erosion Test)

โดยการวัดปริมาตรที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ภายหลังจากการยิงอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) จำนวน 50 กรัม ที่อัตราการไหล 0.123 กรัมต่อวินาที เข้าไปยังท่ออากาศความเร็ว 60 เมตร/วินาที ตรงไปยังชิ้นทดสอบโพลีเมอร์ที่มีขนาด 14 x 14 ตารางมิลลิเมตร และแข็งเป็นมุม 45 องศา การทดลองนี้เป็นการจำลองภาวะการใช้งานเมื่ออนุภาคของวัสดุขูดถูกระทบชิ้นส่วนของเครื่องจักรด้วยความเร็วสูง เช่น พัดลม บีม โดยมีตัวกลางในการลำเลียง คือ ก๊าซหรือของเหลว

3. การทดสอบการสึกกร่อนแบบขัดถู (Abrasion Test)

โดยการวัดปริมาตรหรือน้ำหนักที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ระยะทางในการทดสอบ 3.66 เมตร โดยทำการขัดสีชิ้นทดสอบโพลีเมอร์ตัวอย่างยาว 30 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัด 10 x 10 ตารางมิลลิเมตร ด้วยตัวขัดที่ทำมาจากอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งแทรกอยู่ตรงกลางชิ้นทดสอบและให้แรง 1 กิโลกรัม เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.26 เมตร/วินาที

4. การทดสอบการสึกกร่อนแบบไถล (Sliding Wear Test)

โดยการวัดปริมาตรที่สูญเสียต่อระยะทางในการทดสอบ 1 เมตร ด้วยแรงกระทำ 1 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการสึกหรอของโพลีเมอร์ที่ภาวะคงที่ โดยชิ้นทดสอบโพลีเมอร์ขนาด 10 x 10 ตารางมิลลิเมตร มีลักษณะเป็นรูปแท่ง วางตั้งฉากกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดัน 10 MPa โดยที่ความเร็วในการทดสอบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.25 เมตร/วินาที ทำการทดสอบในน้ำกลั่น ซึ่งเป็นการทดสอบสำหรับโพลีเมอร์ ที่ใช้งานประเภทซีลและรอง
ลิ้นในอุปกรณ์ไฮดรอลิกของเครื่องจักรต่างๆ ซึ่งต้องใช้งานที่ความดันและความเร็วสูง

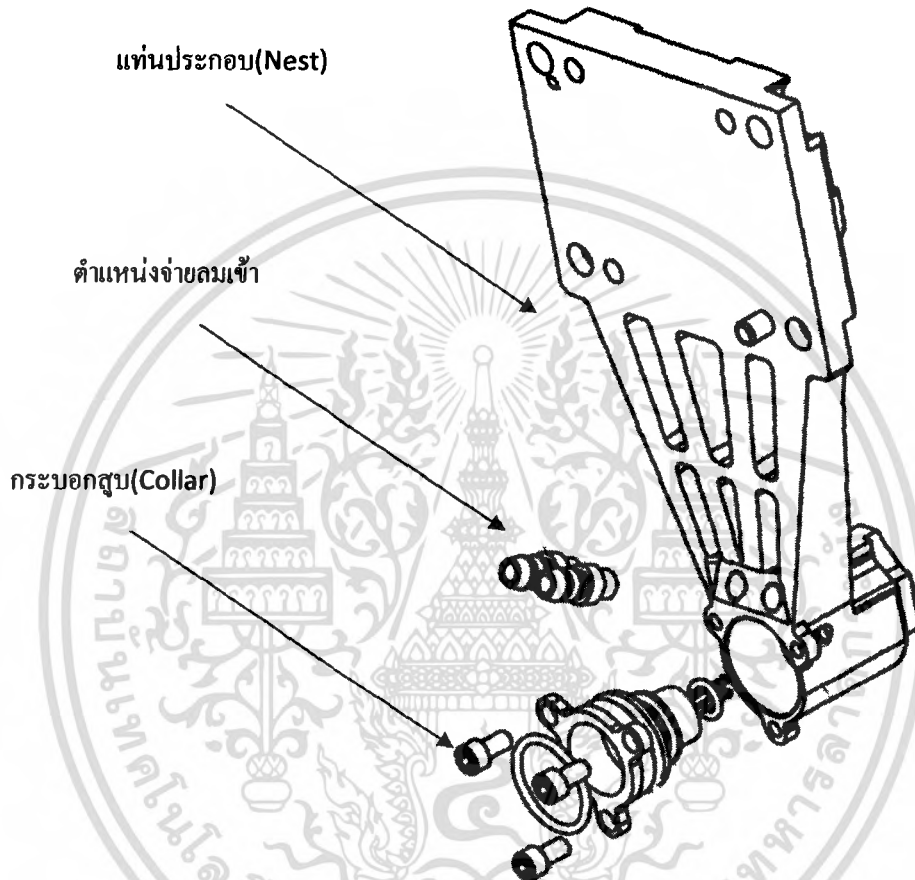


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ลักษณะงานและปัญหา

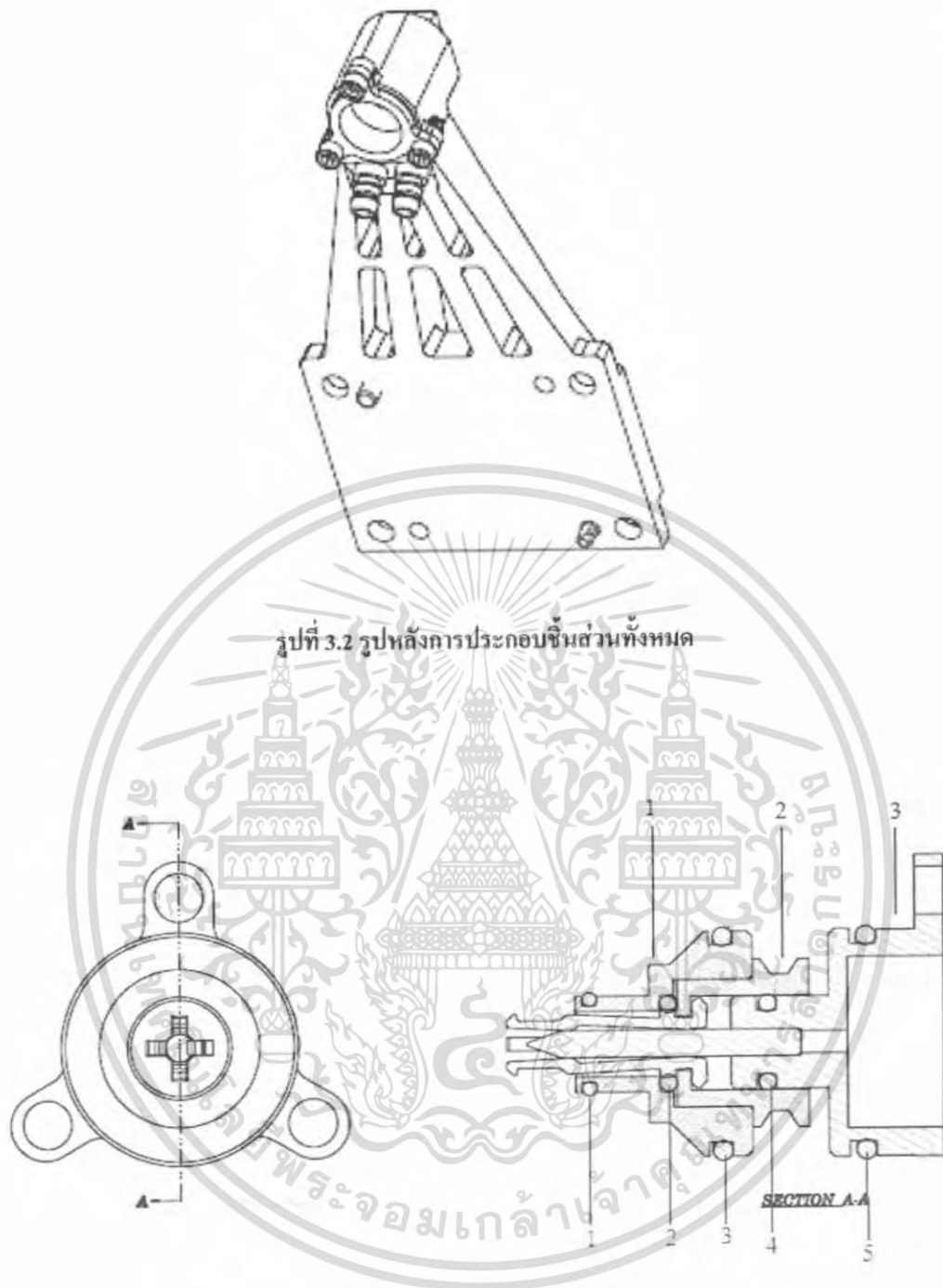
3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดทดลอง



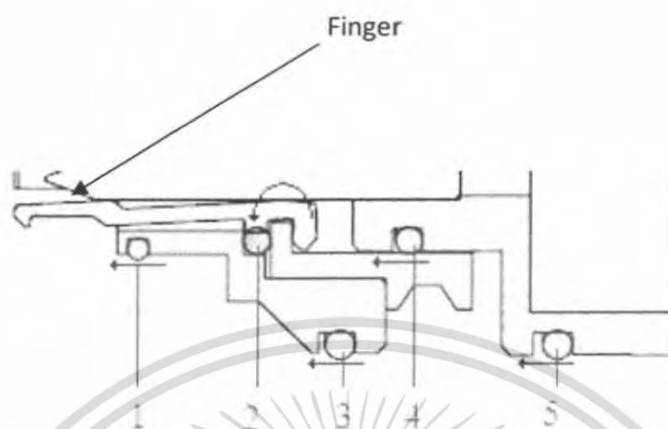
รูปที่ 3.1 รูปลักษณะงานประกอบระหว่างลูกสูบ (Collar) กับแท่น (Nest)

จากรูปที่ 3.1 ลักษณะงานประกอบจะเห็นว่าแท่นประกอบ (Nest) จะถูกจับยึดไว้และจะมีลูกสูบ (Collar) ประกอบเข้าไปในแท่นประกอบและมีตำแหน่งจ่ายลมประกอบเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนลูกสูบให้ขึ้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 รูปโอรังที่ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 3.5 ครอบอกสูบจะวิ่งเข้าและออกกับ Nest ซึ่งที่ครอบอกสูบจะมีโอรังประกอบอยู่ภายในเพื่อป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงภายใน โดยลักษณะของโอรังที่ถูกประกอบภายในครอบอกสูบดังรูป ซึ่งมีโอรังอยู่ห้าชิ้น จะเห็นได้ว่าชั้นที่ 1,3,4,5 จะรับแรงเสียดทาน และชั้นที่ 2 จะรับแรงแบบถูกกด

ส่วน Finger จะเป็นส่วนอิสระที่จะถูกประกอบรวมเข้าไปใน Collar เพื่อใช้ในการจับยึดฮาร์ดดิสก์ในกระบวนการทดสอบฮาร์ดดิสก์ ซึ่งจะถูกทำให้หมุนในลักษณะของคานงัดจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของ Collar

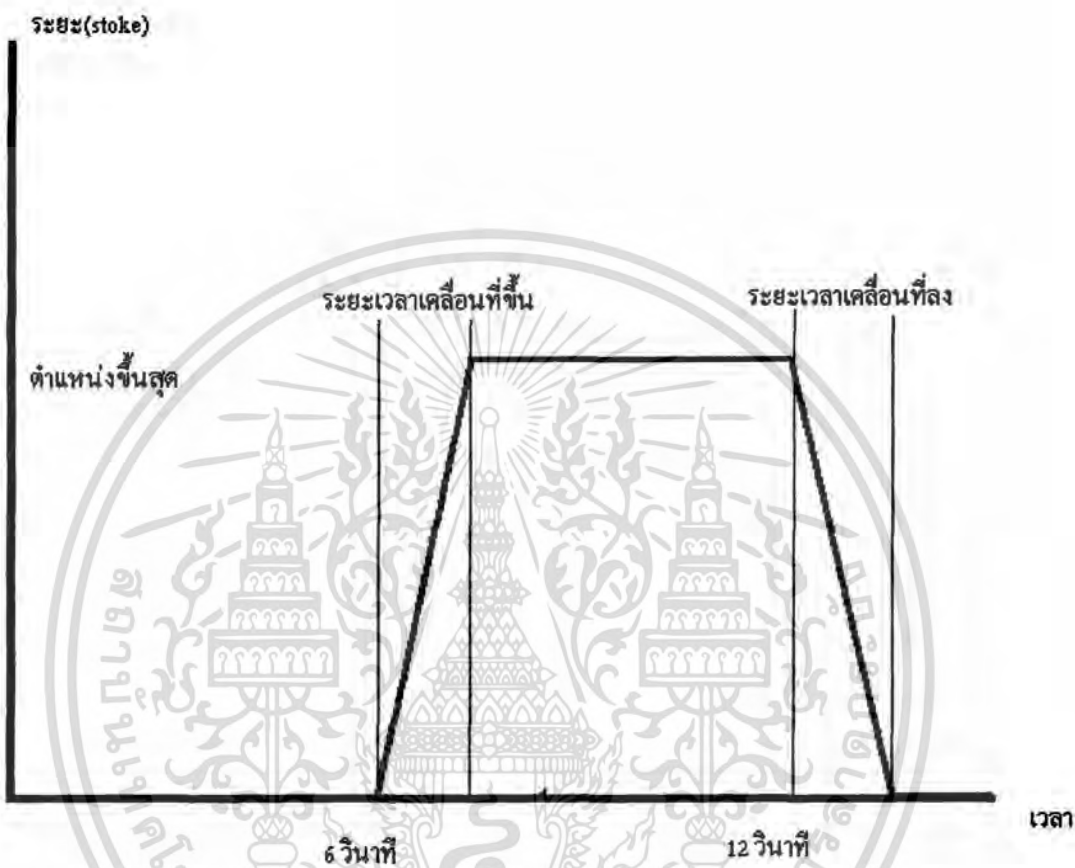


รูปที่ 3.5 รูปถ่ายลูกสูบทั้งสองส่วน คือส่วนที่เคลื่อนที่กับส่วนที่อยู่นิ่ง จากซ้ายไปขวาตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การดำเนินการ

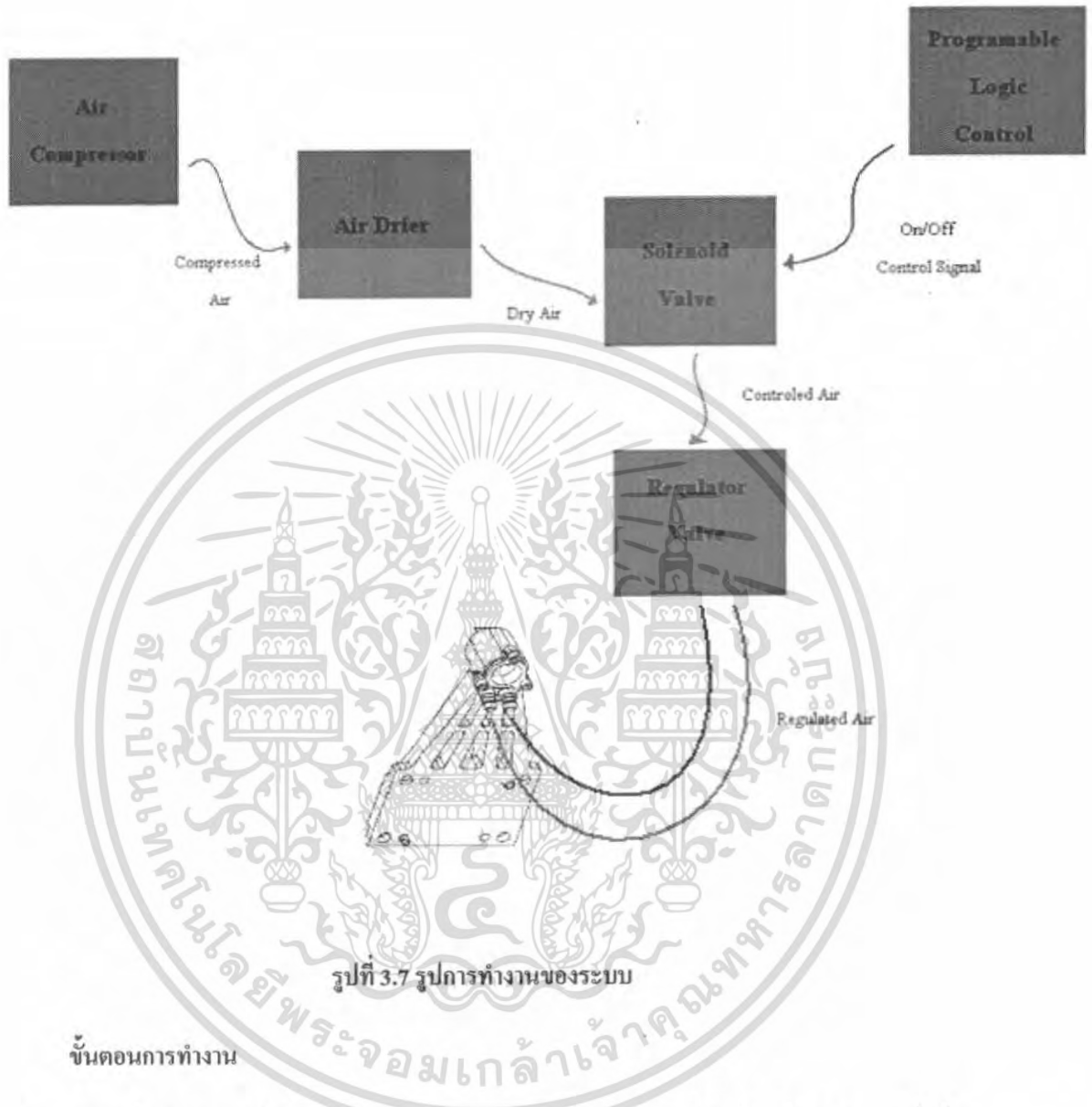
ในการปฏิบัติการจริงลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นหกวินาทีและลงอีกหกวินาที ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ 300 รอบในหนึ่งชั่วโมง



รูปที่ 3.6 รูปการขึ้นลงของกระบอกสูบนิวเมติก

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงนั้น จะมีเวลาที่เสียไปในการเคลื่อนที่จริง ซึ่งเวลาที่เสียไปจะขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความดันลมนิวเมติกที่เราจะปรับ

3.3 Flow chart ของระบบ



รูปที่ 3.7 รูปการทำงานของระบบ

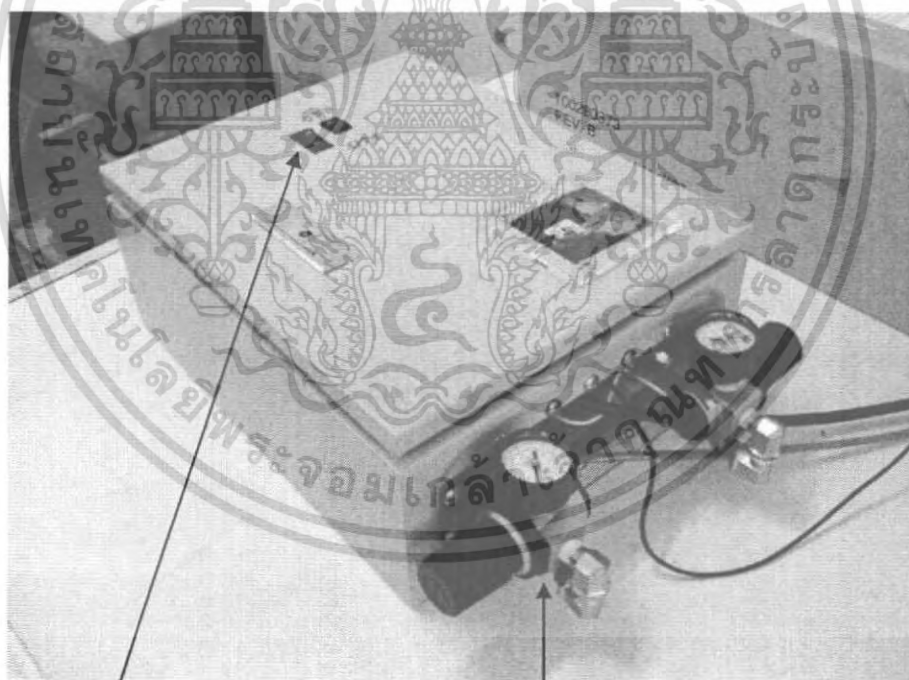
ขั้นตอนการทำงาน

1. ระบบเริ่มจากคอมเพรสเซอร์ (Compressor) จ่ายลมแรงดันสูงไปที่แอร์ดรายเออร์ (Air Drier) เพื่อที่จะทำอากาศให้แห้งขึ้น
2. ดรายเออร์จ่ายอากาศแห้งไปที่โซลีนอยด์ วาล์ว (Solenoid Valve)
3. ใช้PLCในการควบคุมการปิดเปิดของโซลีนอยด์ วาล์ว
4. อากาศที่ถูกปล่อยจากโซลีนอยด์ วาล์ว ส่งไปที่ เรกกูเรเตอร์ (Regulator Valve)
5. เรกกูเรเตอร์ส่งอากาศความดันที่ถูกปรับแล้วไปใช้ในการขับเคลื่อนกระบอกลูกสูบในชุดทดลอง

81770



รูปที่ 3.8 Air Compressor

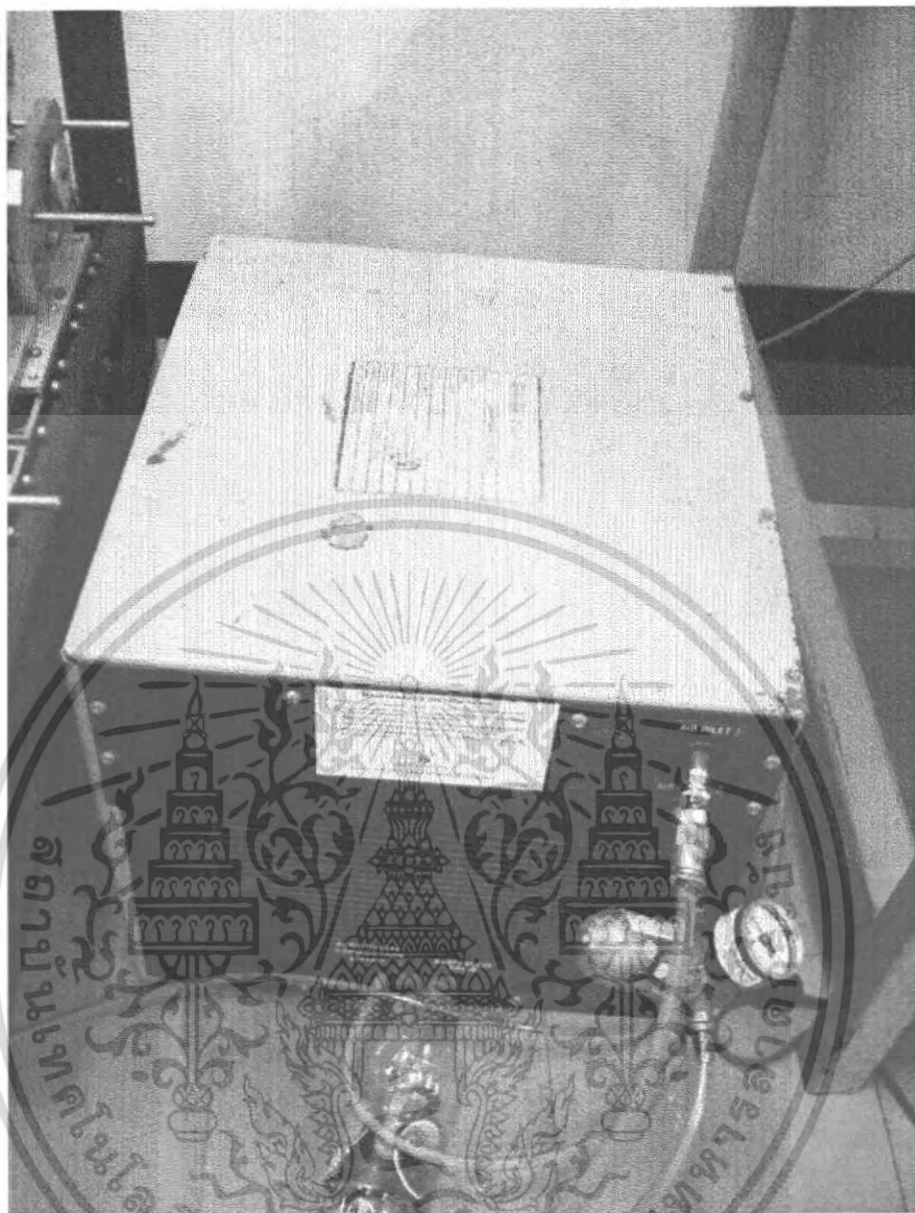


สวิตช์เปิดระบบ

Regulator

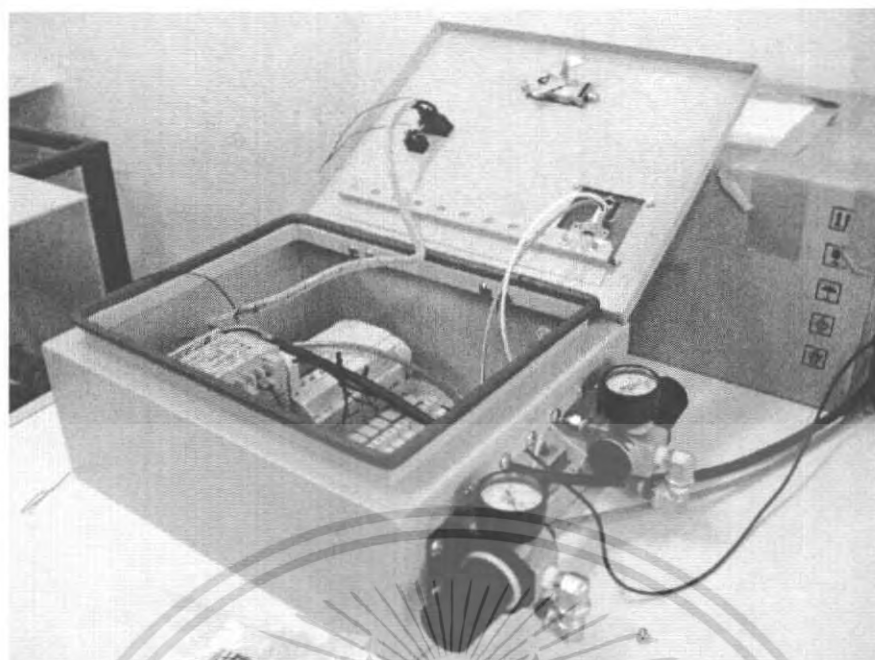
รูปที่ 3.9 กล่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

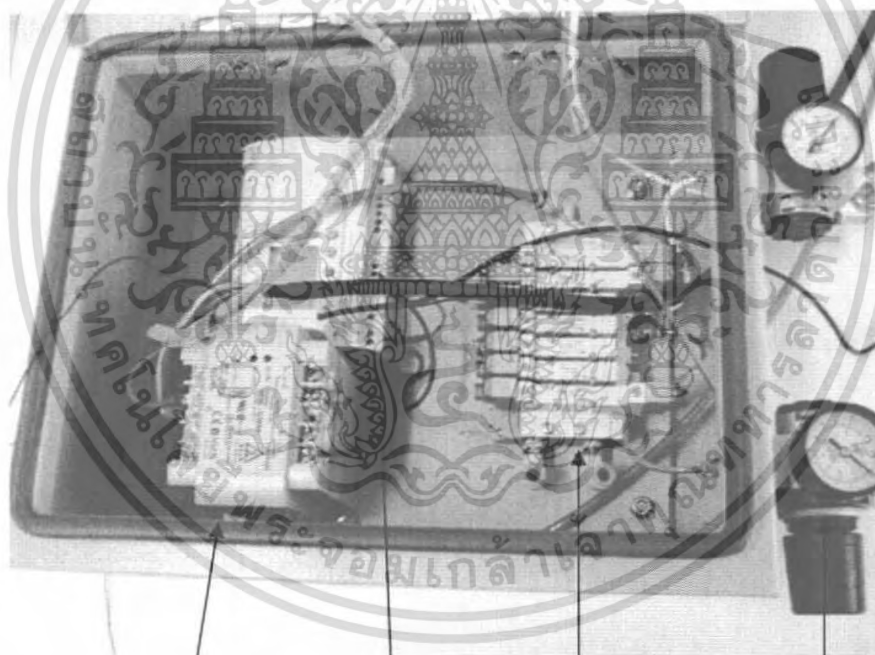


รูปที่ 3.10 แอร์ครายเออร์ (Air Drier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 รูปอุปกรณ์ภายใน



เครื่องแปลงความดันไฟฟ้า

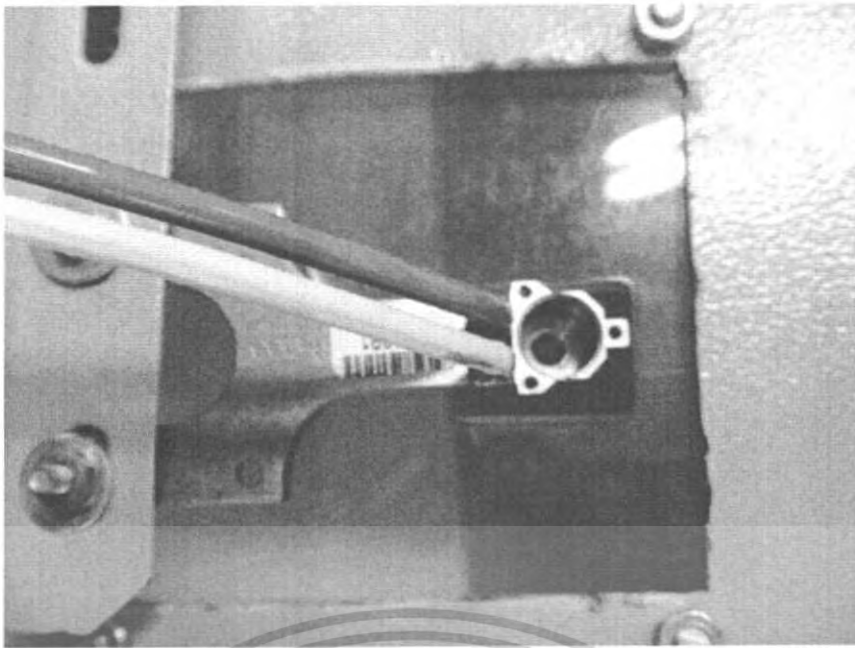
PLC

Solenoid Valve

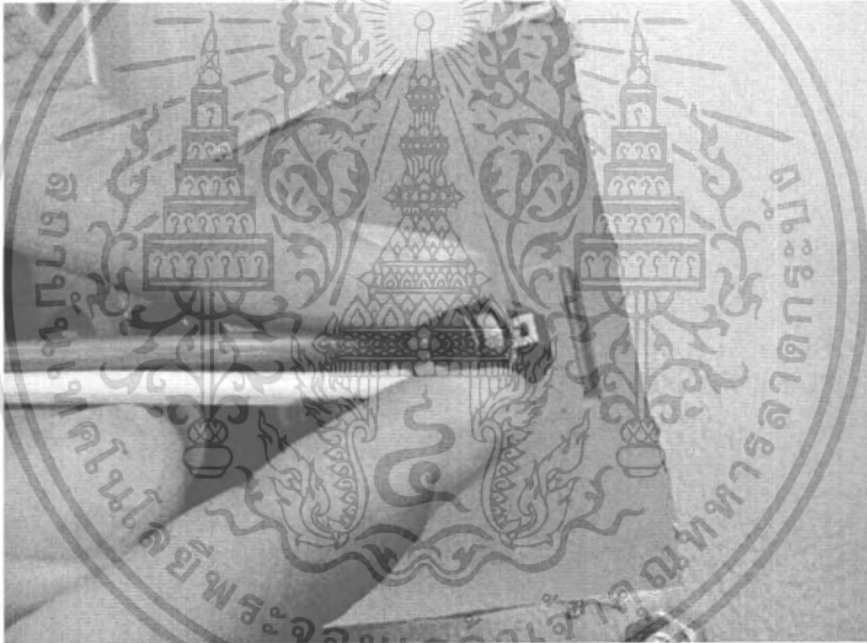
Pressure Regulator

รูปที่ 3.12 รูปอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

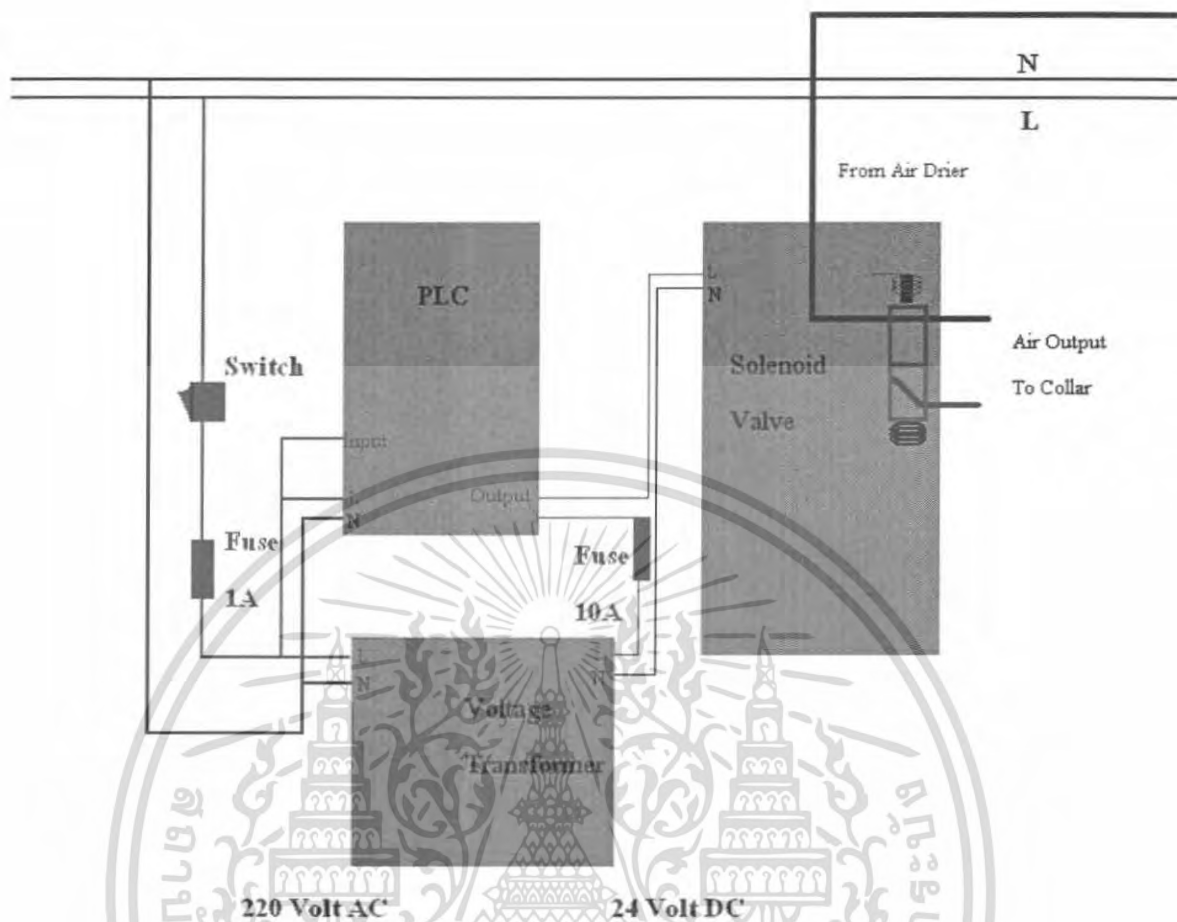


รูปที่ 3.13 การต่อท่อลม โดยที่สีเทาเป็น (เข้า) และสีขาวเป็น (ออก)



รูปที่ 3.14 การประกอบชุดกระบอกสูบเข้ากับ Nest

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

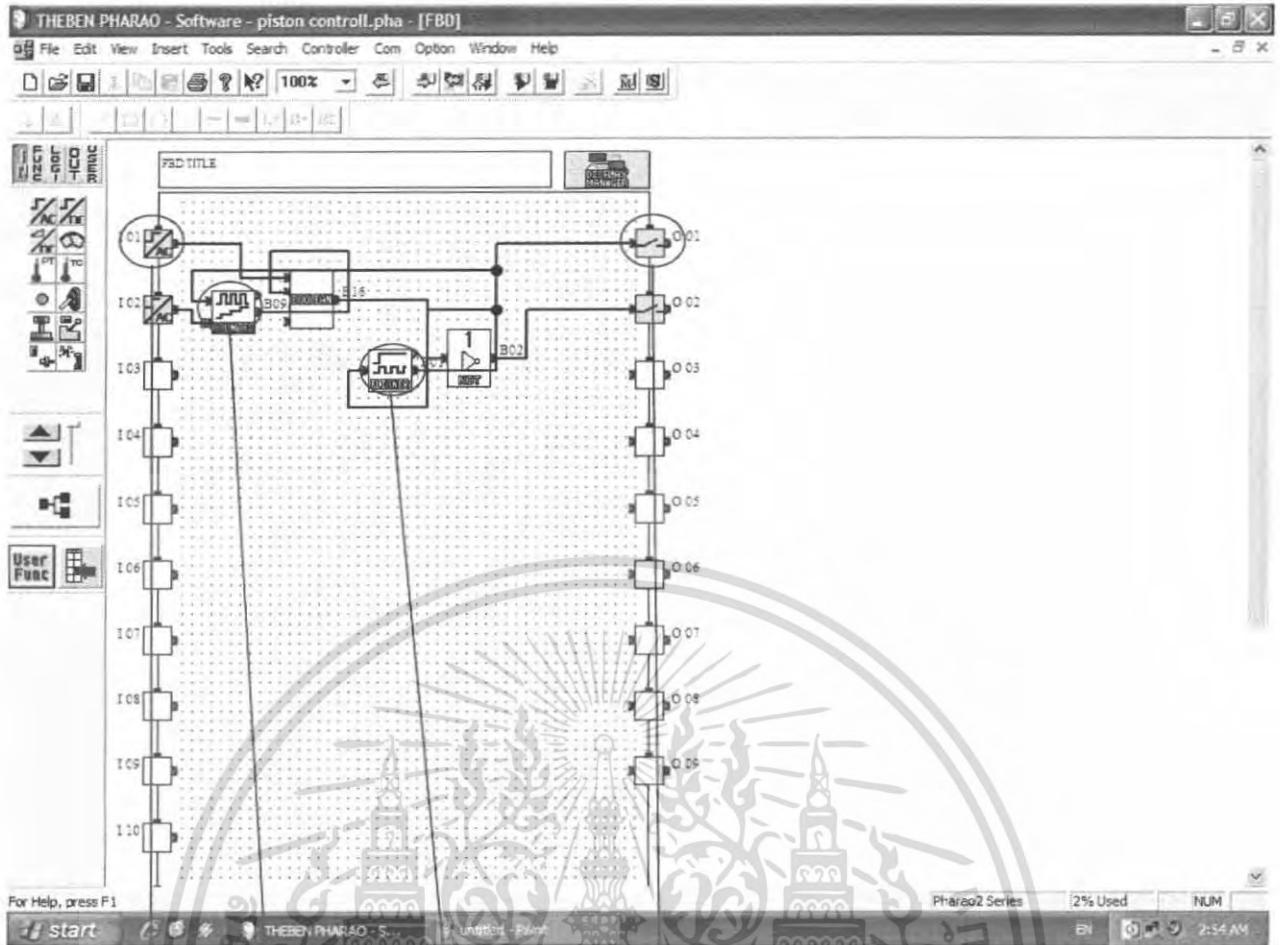


รูปที่ 3.15 รูปวงจรคอนโทรลภายในชุดทดลอง (Test Component)

ขั้นตอนการทำงานในวงจรควบคุม

การควบคุมวงจรเริ่มจากจ่ายไฟ 220 V เข้า PLC ในส่วนไฟเลี้ยงส่วน Input ใช้ฟิวส์ขนาด 1 A และสวิตช์สำหรับตัดวงจรเข้าไฟเลี้ยงอีกส่วนนำไปขึ้นกับวงจรแปลงกระแส ให้เป็นกระแสตรง 24 V ใช้ฟิวส์ขนาด 10 A ต่อไฟด้าน 24 V ต่อไฟไปที่ PLC เพื่อรอการตัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำไว้ ไฟที่ออกจาก PLC จะนำไปเลี้ยง Solenoid Valve เพื่อปรับเปลี่ยนทิศทางลม ลมที่ออกจะมีสองส่วนสำหรับกระบอกสูบในทั้งขาขึ้นและขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



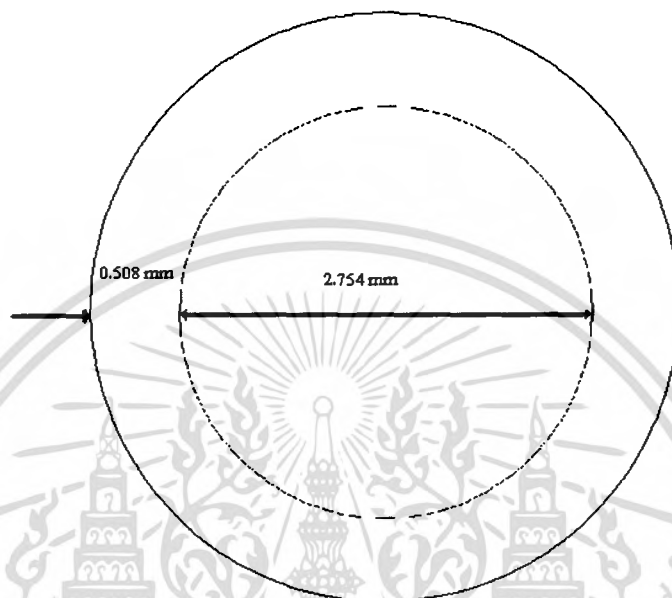
รูปที่ 3.16 โปรแกรม Theben ที่ใช้ในการควบคุมโซลินอยด์ วาล์ว

ส่วนการโปรแกรม PLC ใช้โปรแกรม Theben ในการควบคุม ซึ่งเป็น โปรแกรมแบบ GUI (Graphics User Interface) โดยที่เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงเข้า PLC จะปรากฏที่ Input ว่ามีไฟเข้า และจะจ่ายไฟไปที่ Flicker ซึ่งใช้กำหนดการต่อติดไฟ โดยที่กำหนดให้ต่อไฟหกวินาทีสลับกับตัดไฟหกวินาที ซึ่งจะมีสัญญาณไปถึงTimer ซึ่งใช้กำหนดจำนวนรอบที่ต่อติดจนครบจำนวนที่กำหนดไว้แล้วให้ตัดไฟออกจากระบบ และไฟก็จะจ่ายไปที่ Output ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ามีไฟเข้า ซึ่งจะเกิดการเหนี่ยวนำ Relay Switch ให้ไฟที่ป้อนเข้า PLC ขนาด 24 V คิววงจรนำไปเลี้ยง Solenoid Valve ต่อไปซึ่งจะทำให้ลมป้อนที่ขาเข้า Collar หกวินาทีสลับกับ ป้อนลมที่ขาออกหกวินาทีไปเรื่อยๆจนครบจำนวนรอบที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 คุณลักษณะยางโอริง

Buna-N (Nitrile) O-Rings เป็นยางมาตรฐานที่มีไนไตรเป็นสารประกอบจะเรียกว่า Buna-N มีลักษณะต้านทานต่อสารประกอบน้ำมันและเชื้อเพลิง, แอลกอฮอล์, กรดต่างๆ



Compound#	Color	Hardness Shore A	Tensile Mpa (Psi)	Elongation %	22Hr C/S @ 100C	Low Temp	High Temp
B1000	Black	70	15.0 (2.150)	400	10	-40°C (-40°F)	120°C (248°F)

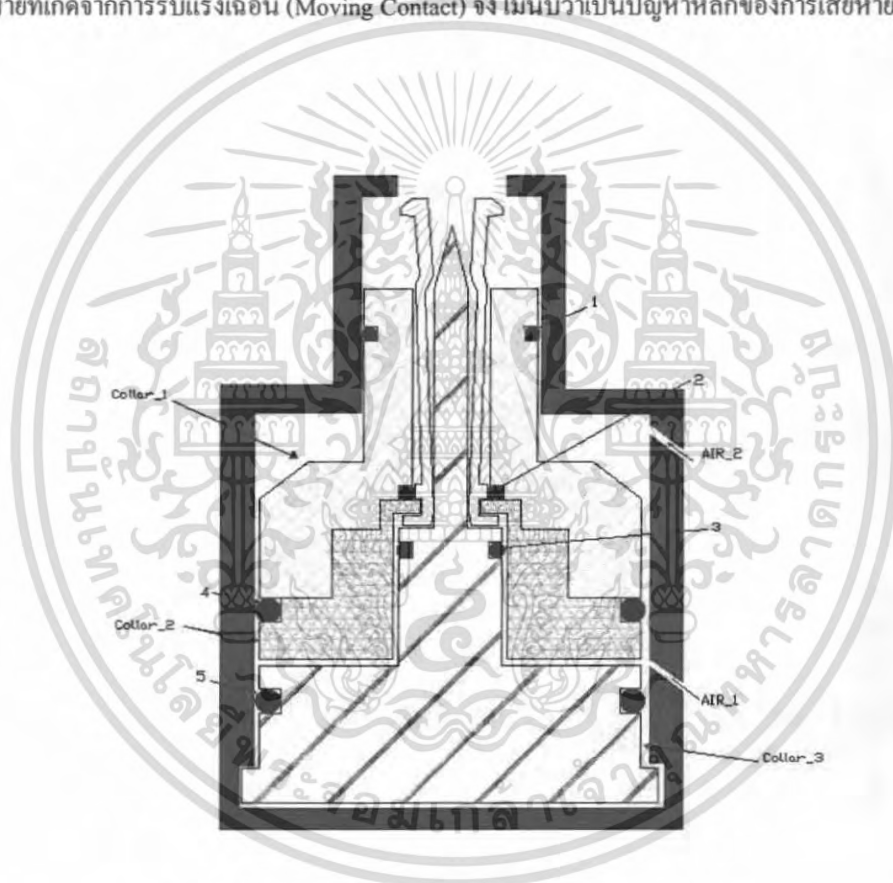
รูปที่ 3.17 รูปและคุณลักษณะยางโอริงที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

จากการทดลองในเบื้องต้นจะสังเกตได้ว่าไอรังตัวบนสุด (ตัวที่หนึ่ง) จะเกิดการเสียหายมากกว่าอีกสี่ตัวที่เหลืออย่างเห็นได้ชัด โดยที่เพียงแค่ออบต่ำๆ จะเห็นการสึกหรอที่ตัวที่หนึ่งแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกว่าตัวอื่นๆ โดยถ้าหากพิจารณาว่าไอรังตัวที่หนึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กและรับแรงเฉือนจากการเคลื่อนที่เลยเสียหาย แต่เนื่องจากไอรังตัวที่สี่เกิดมีลักษณะปัญหาเหมือนกันทุกประการแต่กลับแทบไม่เกิดการสึกหรอเกิดขึ้นเลย ดังนั้นการเสียหายที่เกิดจากการรับแรงเฉือน (Moving Contact) จึงไม่นับว่าเป็นปัญหาหลักของการเสียหายของไอรังตัวที่หนึ่ง



รูปที่ 4.1 ภาพจำลองและส่วนประกอบของ Nest และ Collar

จากรูปที่ 4.1 อาจจะสมมุติว่าการเสียหายเกิดจากแรงดันลมจากช่อง Air_1, Air_2 แต่อาจเนื่องมาจากไอรังตัวที่หนึ่งมีขนาดเล็กจึงเกิดการเสียหายมากกว่าไอรังตัวที่สี่และห้า และเนื่องจากการแก้ตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดต่างๆ และเนื้อไอรังนั้นอาจจะยุ่งยากเกินความจำเป็น ดังนั้นตัวแปรต้นเราจึงสมมติจากความดันลมเท่านั้น

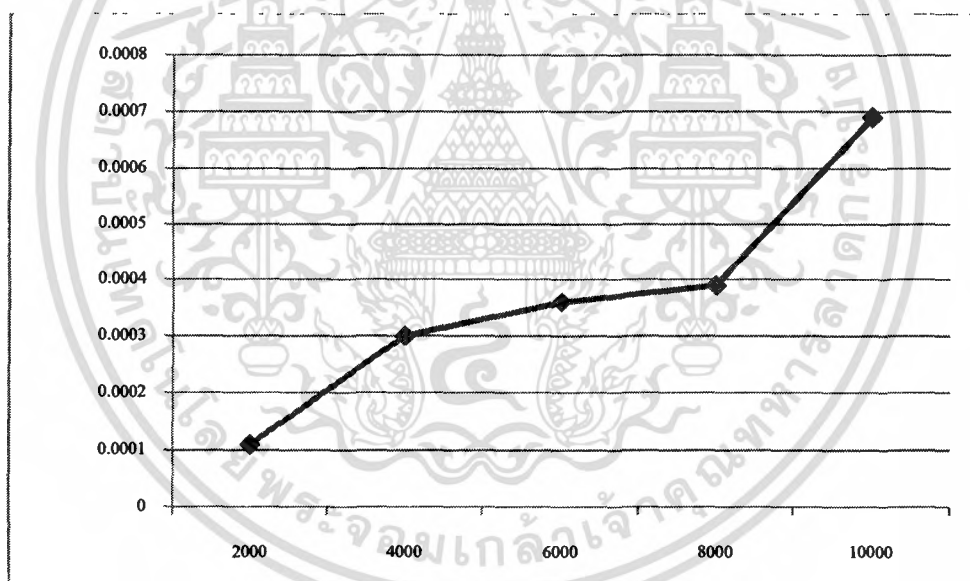
จากแรงดันลมที่ปฏิบัติงานจริงในกระบวนการงานซึ่งใช้ประมาณ 4 บาร์ ในการทดลองนี้เราจึงจะทดสอบปรับความดัน โดยจะปรับความดันเป็น 4.0 บาร์ 3.5 บาร์ 3.0 บาร์ โดยจากการทดสอบไอรังตัวที่หนึ่งจะขาดอยู่ในรอบที่ประมาณ 10,000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจึงทำการทดลองปรับทั้งความดันและจำนวนรอบเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการเสียหายโอริงจากทั้งสองตัวแปรนี้ โดยที่จะวัดความเสียหายโดยการวัดมวลที่สูญเสียไปในที่จำนวนรอบ 2,000, 4,000, 6,000, 8,000, 10,000 และปรับความดัน 3 ระดับจึงใช้โอริงทั้งหมด $3 \times 5 = 15$ ตัว ซึ่งให้ผลการทดลองดังตารางข้างล่าง

P \ T	2,000 Cycle	4,000 Cycle	6,000 Cycle	8,000 Cycle	10,000 Cycle
4.0 Bar	0.00048 gram	0.00073 gram	0.00076 gram	0.00081 gram	0.00108 gram
3.5 Bar	0.00019 gram	0.00042 gram	0.00055 gram	0.00061 gram	0.00090 gram
3.0 Bar	0.00011 gram	0.00030 gram	0.00036 gram	0.00039 gram	0.00069 gram

ตาราง 4.1 ผลการทดลองมวลสูญเสียในแต่ละความดันและจำนวนรอบ

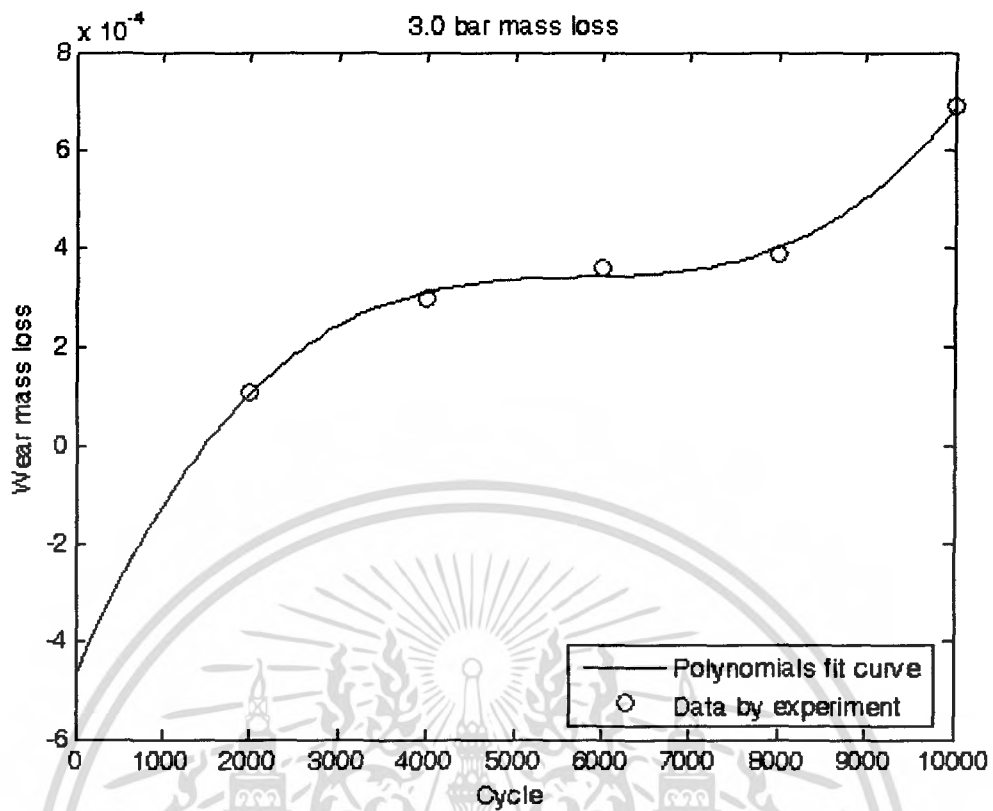


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงมวลที่สูญเสียในการทำงานที่รอบต่างๆ ที่ความดัน 3.0 bar

จากรูปกราฟผลการทดลองความเสียหายจากแรงดันลมที่ความดัน 3.0 บาร์ จะมีลักษณะซึ่งมีโค้งแรกเป็นลักษณะ โค้งคว่ำ ซึ่งมีจุดที่คงตัวอยู่ที่ 6,000 รอบซึ่งเกิดจากการเสียหายแบบ Abrasive คือเกิดจากการขัดถูที่ส่วนยื่นออกมาจนหมด ซึ่งจากกราฟจะสมมุติว่าอยู่รอบที่ 6,000 รอบ

ส่วน โค้งที่สองเป็นลักษณะ Exponential เป็นการเสียหายแบบ Adhesive ซึ่งเริ่มมาตั้งแต่เริ่มการเคลื่อนที่แล้วค่อยๆ เพิ่มแบบทวีคูณ เพราะมีมวลสะสมที่สามารถดึงเนื้อยางให้หลุดออกมามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟการสูญเสียมวลต่อรอบที่ความดัน 3.0 บาร์

กราฟข้างบนเกิดจากการ Fit Data โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งจะฟิตให้เป็นสมการ Polynomial

สมการ *Polynomials*

$$Y = 4.17 \times 10^{-15}X^3 - 7.16 \times 10^{-11}X^2 + 4.15 \times 10^{-7}X - 0.47 \times 10^{-3}$$

Mass loss

$$M = 4.17 \times 10^{-15}N^3 - 7.16 \times 10^{-11}N^2 + 4.15 \times 10^{-7}N - 0.47 \times 10^{-3}$$

โดยที่ M = Mass Lose (gram)

N = จำนวนรอบ (รอบ)

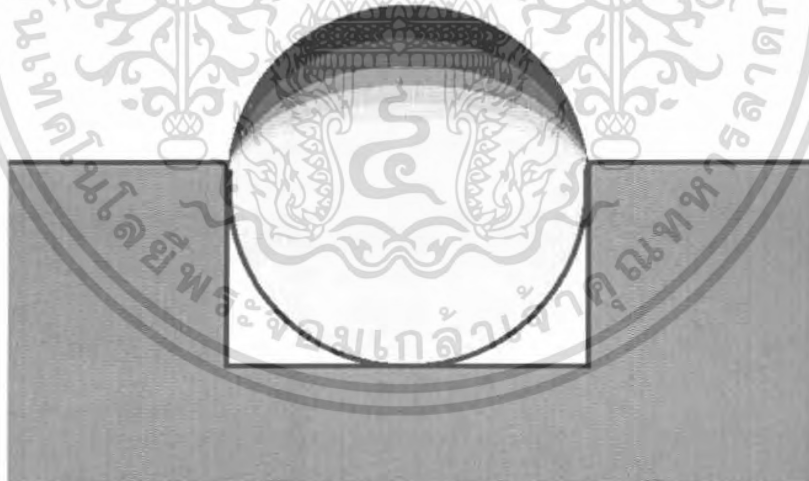
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The screenshot shows the MATLAB environment. The Command Window contains the following code and output:

```

>> y30=[0.00011,0.00030,0.00036,0.00039,0.00069];
y35=[0.00019,0.00035,0.00055,0.00061,0.00090];
y40=[0.00048,0.00073,0.00076,0.00081,0.00108];
x=[2000,4000,6000,8000,10000];
p30=polyfit(x,y30,3);
p35=polyfit(x,y35,3);
p40=polyfit(x,y40,3);
Xaxis=[2000:80:10000];
Yaxis30=polyval(p30,Xaxis);
Yaxis35=polyval(p35,Xaxis);
Yaxis40=polyval(p40,Xaxis);
plot(x,y30,'co',Xaxis,Yaxis30,'-r');
hold on;
plot(x,y35,'go',Xaxis,Yaxis35,'-g');
plot(x,y40,'bo',Xaxis,Yaxis40,'-b');
xlabel('Cycle');
ylabel('Mass loss (gram)');
title('Mass loss per cycle for 3.0,3.5,4.0 bar');
legend('3.0 bar','3.5 bar','4.0bar',4)
hold off
Warning: Polynomial is badly conditioned. Remove repeated data points
or try centering and scaling as described in HELP POLYFIT.
> In polyfit at 70
Warning: Polynomial is badly conditioned. Remove repeated data points
or try centering and scaling as described in HELP POLYFIT.
> In polyfit at 70
Warning: Polynomial is badly conditioned. Remove repeated data points
or try centering and scaling as described in HELP POLYFIT.
> In polyfit at 70
>>
  
```

รูปที่ 4.4 โปรแกรม Matlab ใช้ในการ Fit Data และสร้างกราฟ

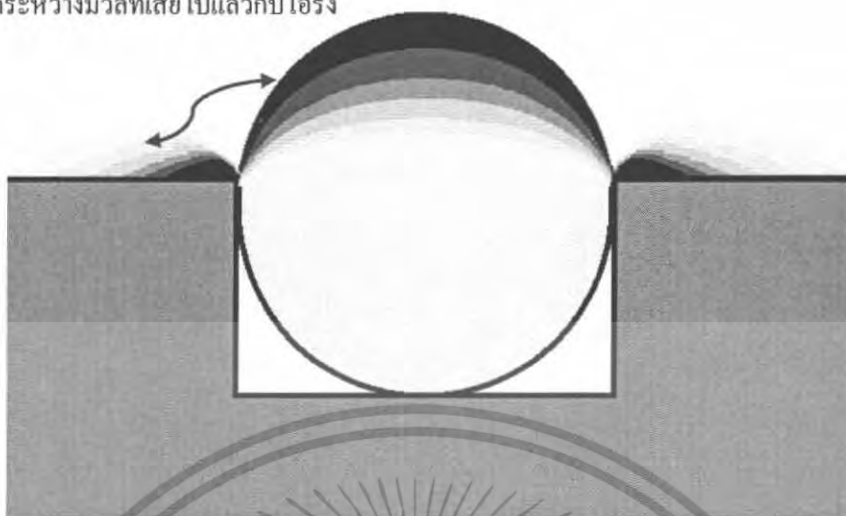


รูปที่ 4.5 ลักษณะการเสียหายของอริงแบบขัดถู Abrasive

จากรูปการเสียหายที่เกิดจากการขัดถูจะเห็นได้ว่าส่วนโค้งนูนจากรูปวงกลมนั้น จะถูกแรงเสียดทานค่อยๆ ขัดจนความนูนที่เหลืออยู่ค่อยๆ สึก ไปจนหมดซึ่งเมื่อ ไม่เหลือความนูนแล้ว การเสียหายที่เกิดจากการขัดถูจะไม่ เกิดขึ้นอีกซึ่งจากกราฟจะประมาณ ได้ว่าเกิดที่รอบประมาณที่ 6,000 รอบ ซึ่งความชันของกราฟจะค่อยๆ ลดลงจน มีจุดสูงสุดของกราฟอยู่ที่รอบ 6,000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

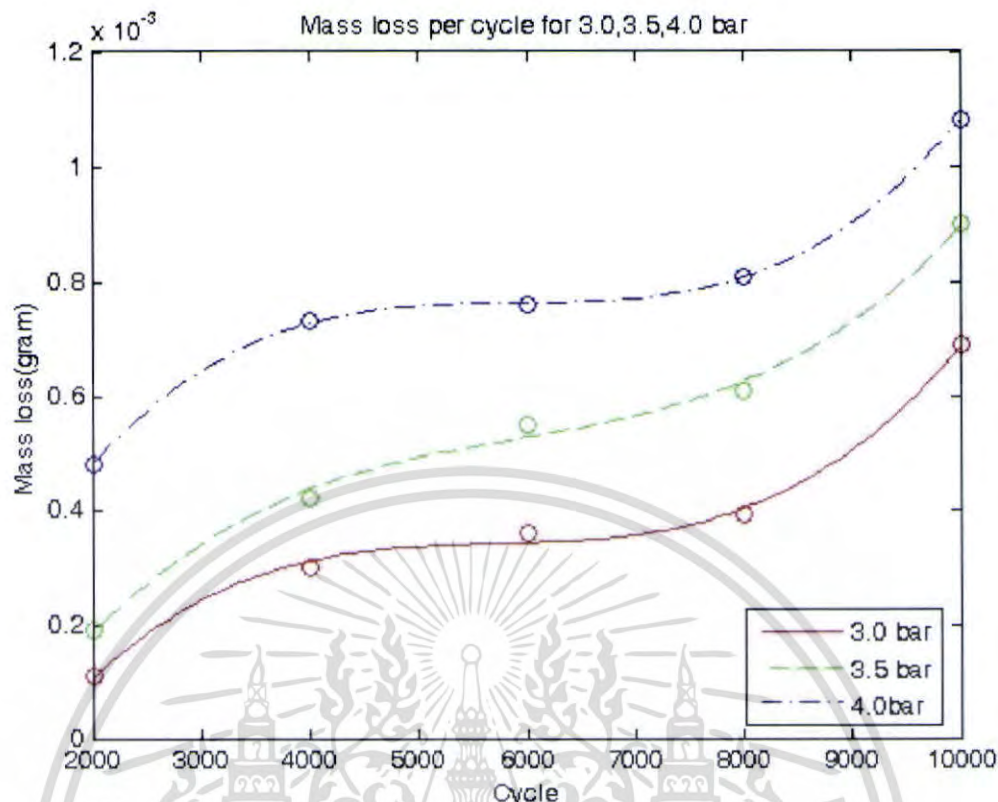
เกิดแรงดึงหนีระหว่างมวลที่เสียไปแล้วกับโอรัง



รูปที่ 4.6 รูปการเสียหายจากการเกิด Adhesive

การสึกหรอที่เกิดจาก Adhesive หรือแรงดึงแนบติดจากเนื้อมวลด้วยกัน โดยการสึกหรอนี้จะเริ่มจากมวลที่สูญหายไปจากการขัดถูเบื้องต้นแล้วมวลนั้นยังติดอยู่ที่ขอบการสัมผัส เมื่อเกิดการสัมผัสกันอีกจะเกิดการดึงหนีระหว่างมวลทั้งสองและค่อยๆ สะสมจนหนาขึ้นเรื่อยๆ เช่น ในรูปมวลสีเข้มคือลักษณะในตอนรอบต่ำๆ เมื่อรอบเดินไปเรื่อยๆ มวลนั้นจะเริ่มสะสมขึ้นเหมือนเขนสีที่ค่อยๆ อ่อนลงดังรูป การเกิด Adhesive จะเป็นลักษณะที่จะเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณแบบ Exponential เพราะแรงดึงสึกหรอจะเพิ่มขึ้นตามมวลที่สะสมอยู่ซึ่งจากกราฟการเสียหายในข้างต้นนั้น จะเห็นว่าหลังจากรอบที่ 6,000 รอบ จะมีลักษณะกราฟที่คงที่อยู่ประมาณระยะหนึ่ง หลังจากนั้นกราฟจะขึ้นแบบ Exponential ไปจนกระทั่งยางโอรังขาดที่ 10,000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟการสูญเสียมวลต่อรอบที่ความดัน 3.0, 3.5, 4.0 บาร์

ที่ 3.0 bar

$$\text{Mass loss}(M) = 4.17 \times 10^{-15} N^3 + 7.16 \times 10^{-11} N^2 + 4.15 \times 10^{-7} N - 0.470 \times 10^{-3}$$

ที่ 3.5 bar

$$\text{Mass loss}(M) = 3.44 \times 10^{-15} N^3 - 6.09 \times 10^{-11} N^2 + 3.94 \times 10^{-7} N - 0.386 \times 10^{-3}$$

ที่ 4.0 bar

$$\text{Mass loss}(M) = 4.58 \times 10^{-15} N^3 - 8.14 \times 10^{-11} N^2 + 4.83 \times 10^{-7} N - 0.198 \times 10^{-3}$$

จากการ Fit Curve ของสัมประสิทธิ์

ให้อยู่ในรูป Parabola

$$\text{Coefficient}(N^3) = (3.74P^2 - 25.77P + 47.82) \times 10^{-15}$$

$$\text{Coefficient}(N^2) = (-6.24P^2 + 42.7P - 79.1) \times 10^{-11}$$

$$\text{Coefficient}(N) = (2.2P^2 - 14.72P + 28.51) \times 10^{-7}$$

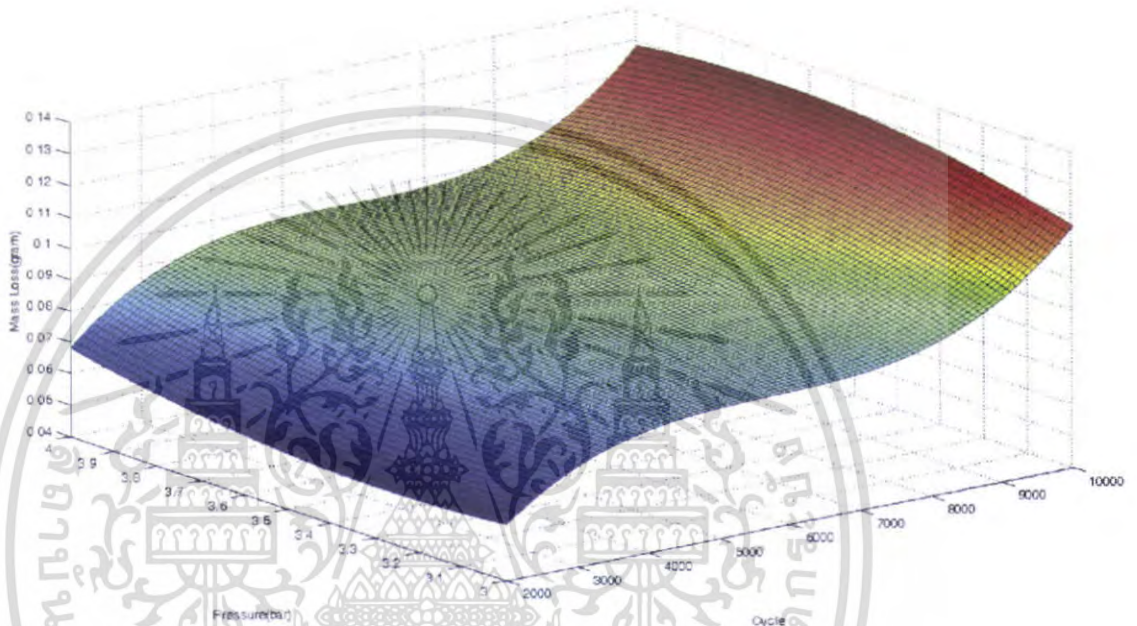
$$\text{Coefficient}(1) = (0.208P^2 - 1.184P + 1.21) \times 10^{-3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการ Fit Data ที่ความดันต่างๆ ได้สมการการกระจายการสึกหรอที่ความดันต่างๆ แล้วนำสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียลกำลังสามซึ่งมีสี่ตัว มาทำการ Fit Curve ของสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีเลขยกกำลังเท่ากัน

ดังนั้นสมการ *Mass Loss*

$$M = (3.74P^2 - 25.77P + 47.82) \times 10^{-15}N^3 + (-6.24P^2 + 42.7P - 79.1) \times 10^{-11}N^2 + (2.2P^2 - 14.72P + 28.51) \times 10^{-7}N + (0.208P^2 - 1.184P + 1.21) \times 10^{-3}$$



รูปที่ 4.8 กราฟการแปรผันของมวลสูญเสียต่อความดันและจำนวนรอบ

จากรูปเป็นการพล็อต 3D Surface โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งนำสมการข้างต้นมาพล็อต

ซึ่งมีการใช้คำสั่งดังนี้

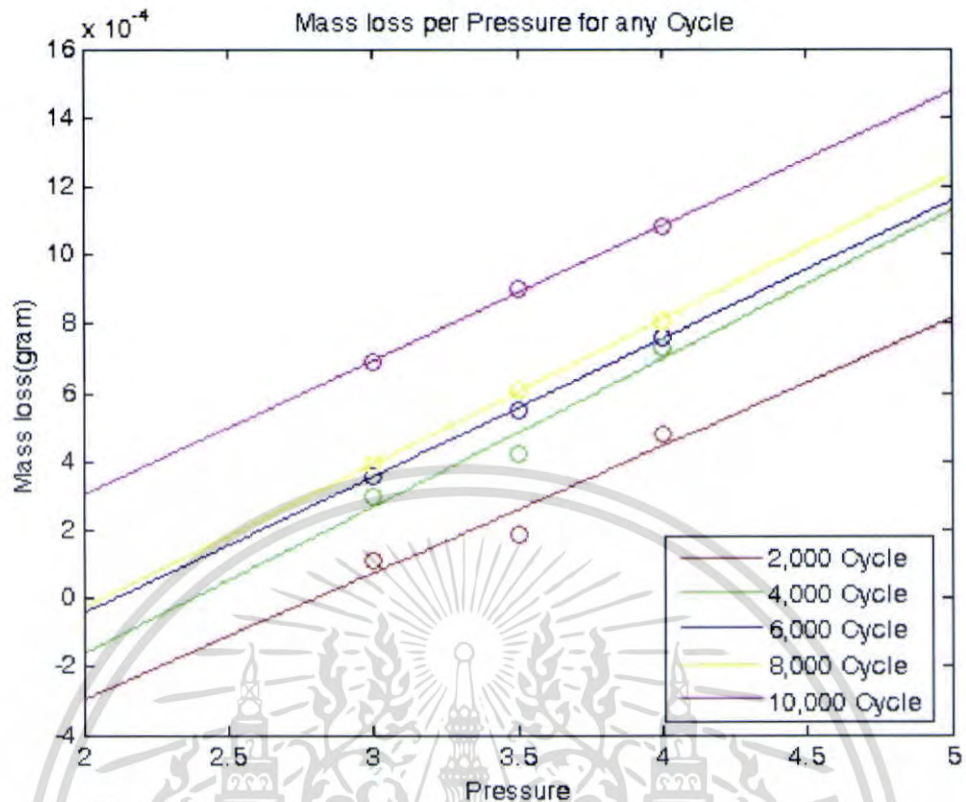
```
[X,Y] = meshgrid(2000:80:10000, 3.0:0.1:4.0);
```

```
Z = ((3.74*(Y.^2)-25.77*Y+47.82)*1.0e-015*(X.^3))+((-6.24*(Y.^2)+42.7*Y-79.1)*1.0e-011*(X.^2))+(2.2*(Y.^2)-14.72*Y+28.51)*1.0e-007*X + ((0.208*(Y.^2)-1.184*Y+1.21)*1.0e-003);
```

```
surf(X,Y,Z)
```

หากพิจารณาเฉพาะการสูญเสียที่เกิดขึ้นในจำนวนรอบ โดยการปรับเปลี่ยนความดันแล้ว ลักษณะกราฟจะประมาณได้ว่าเป็นเส้นตรงที่มีความชันของกราฟต่างๆ โดยที่ความดันต่ำการสึกหรอก็จะต่ำกว่าที่ความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟการสูญเสียของมวลต่อความดันในแต่ละรอบการทำงาน

จากรูปเป็นการประมาณแบบเชิงเส้น โดยทำการประมาณเชิงเส้นตรง ($Y = aX + b$) ใน Matlab แล้วพล็อตกราฟซึ่งที่ความดันต่างๆจะมีค่า a, b ต่างกันดังนี้

ที่ 2,000 รอบ	$M = (0.37P - 1.035) \times 10^{-3}$
ที่ 4,000 รอบ	$M = (0.43P - 1.021) \times 10^{-3}$
ที่ 6,000 รอบ	$M = (0.40P - 0.843) \times 10^{-3}$
ที่ 8,000 รอบ	$M = (0.42P - 0.866) \times 10^{-3}$
ที่ 10,000 รอบ	$M = (0.39P - 0.475) \times 10^{-3}$

โดยที่ M = Mass Loss (grams)
 P = Pressure (bar)

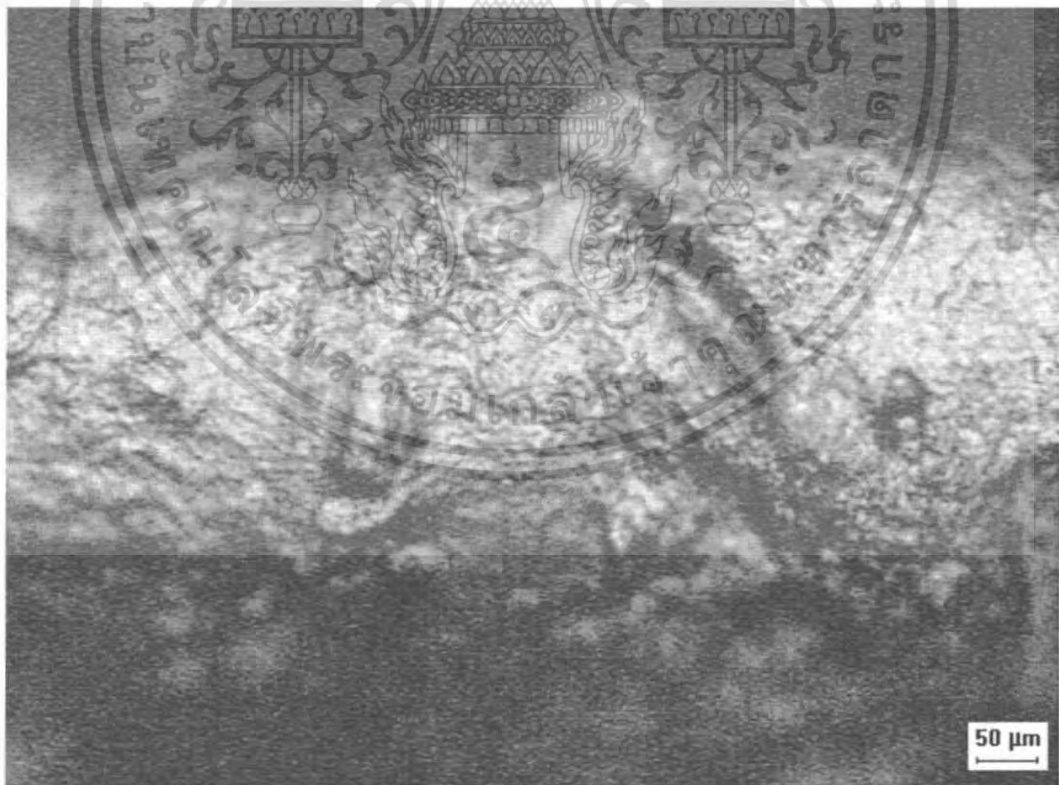
การวัดมวลจะวัดด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดทศนิยมห้าตำแหน่งด้วยความละเอียดสุด 0.00001 กรัม

และนำไปถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ซึ่งมีกำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปเนื้อยางโอริงก่อนการทดลองที่กำลังขยาย 100 เท่า

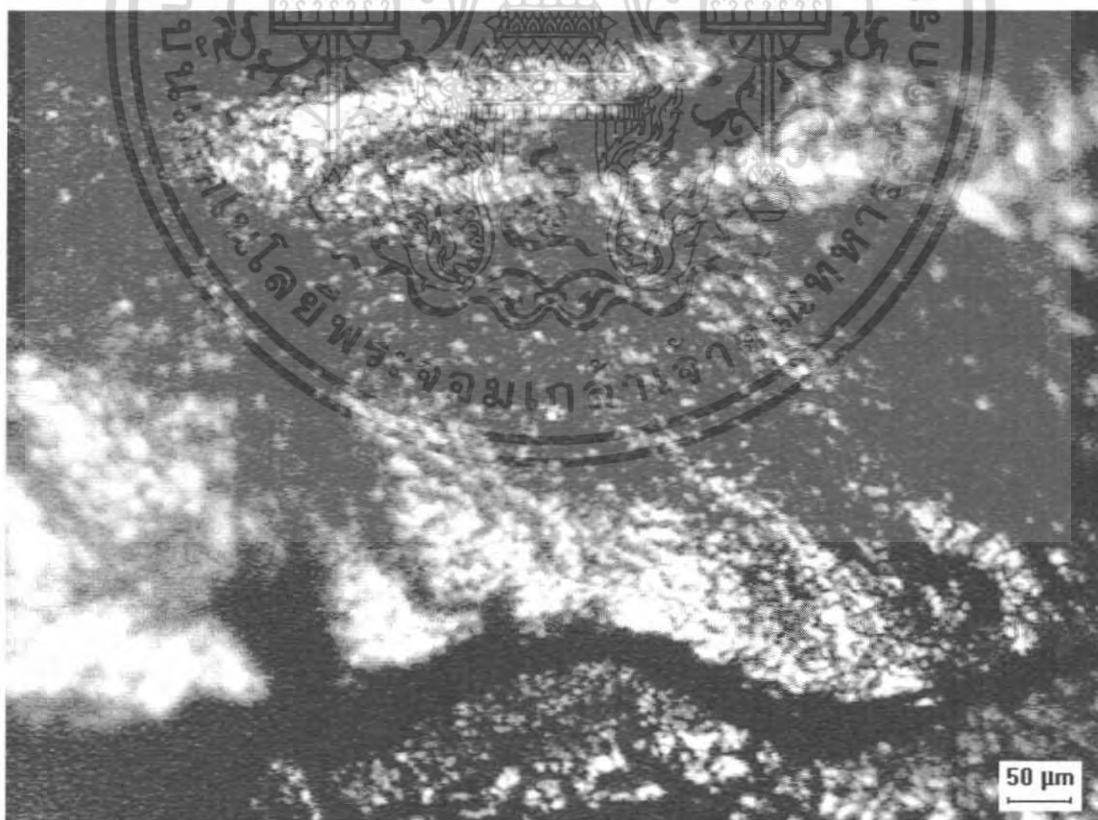


รูปที่ 4.11 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 2,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 6,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.13 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 8,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

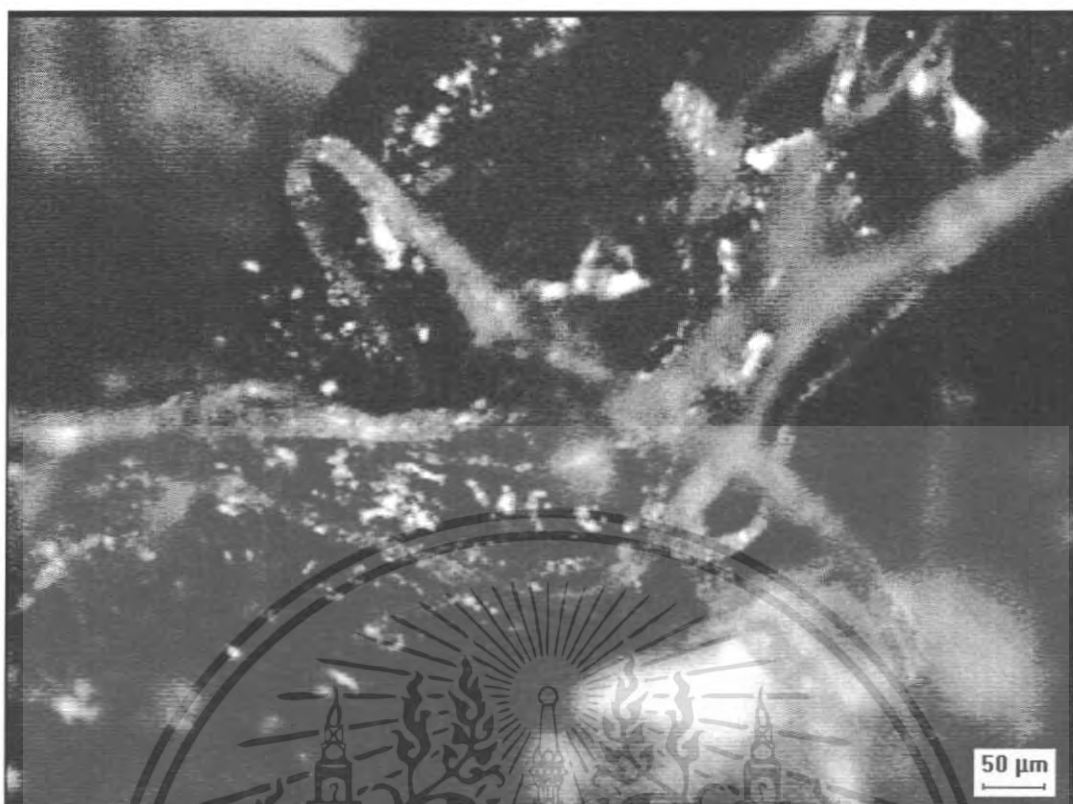


รูปที่ 4.14 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 10,000 รอบ ที่ความดัน 3.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

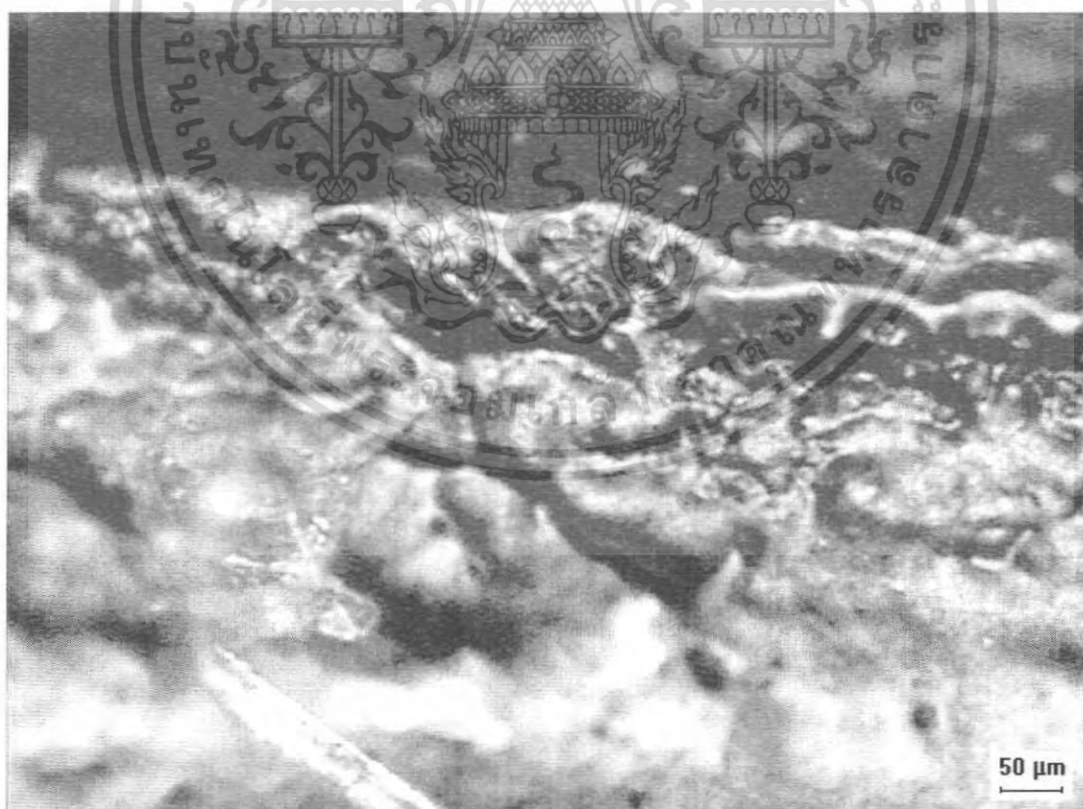


รูปที่ 4.15 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 4,000 รอบ ที่ความดัน 3.5 bar ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 6,000 รอบ ที่ความดัน 3.5 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.17 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 8,000 รอบ ที่ความดัน 3.5 bar ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

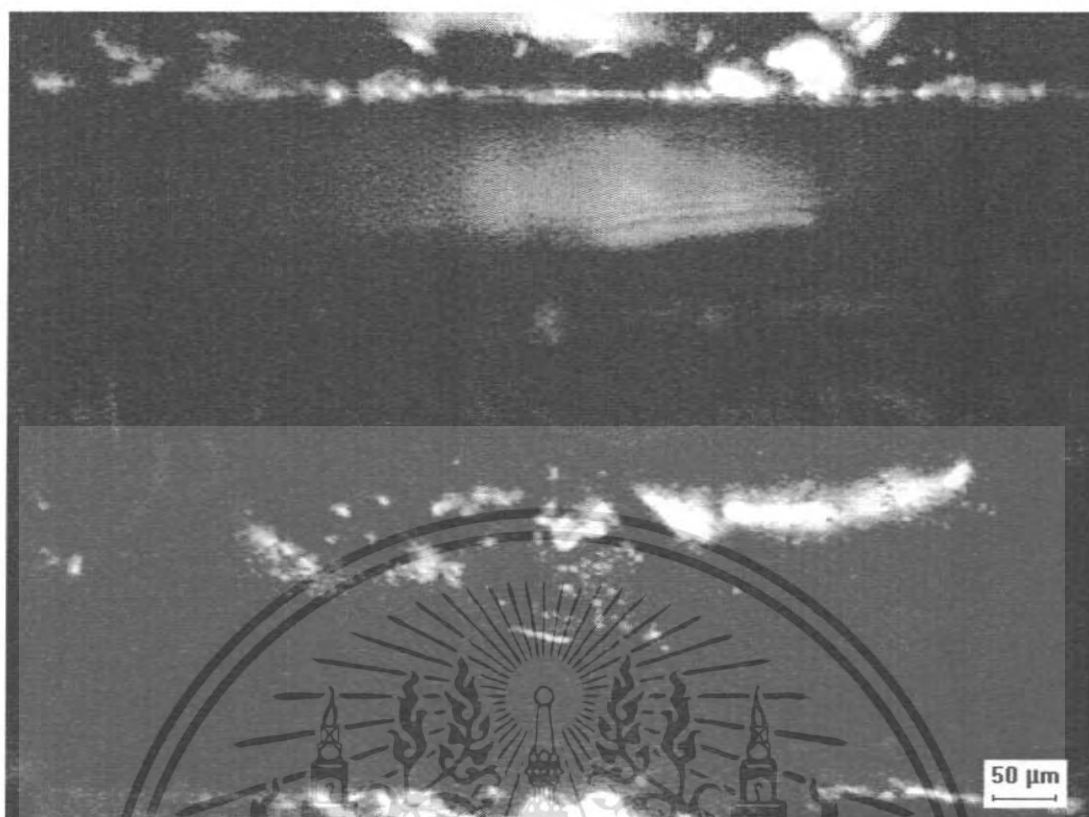


รูปที่ 4.18 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 6,000 รอบ ที่ความดัน 4.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.19 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 8,000 รอบ ที่ความดัน 4.0 bar ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 รูปถ่ายที่จำนวนรอบ 10,000 รอบ ที่ความดัน 4.0 bar ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์

จากการทดลองซึ่งปรับความดันเป็นตัวแปรต้น และควบคุมจำนวนรอบการทำงาน โดยเราจะศึกษาพฤติกรรมการเสียหายของโอริง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ายิ่งปรับความดันมากขึ้นการเสียหายซึ่งเราวัดเป็นมวลที่สูญเสียไปจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่างๆสามค่า (3.0 3.5 4.0 บาร์) ในแกน X กับมวลที่สูญเสียในแกน Y ซึ่งที่จำนวนรอบต่างๆ (2,000, 4,000, 6,000, 8,000, 10,000) จะได้กราฟจากการประมาณเป็นเชิงเส้นซึ่งมีความชันใกล้เคียงกัน $= (0.37 - 0.42) \times 10^{-3}$ หมายความว่ายิ่งเราปรับความดันมากขึ้นการเสียหายก็จะมากขึ้นตามสัดส่วนความดัน

แต่หากเราพิจารณาถึงการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามรอบ โดยให้แกน X เป็นจำนวนรอบและแกน Y เป็น การเสียหายที่ความดันต่างๆ เราจะได้กราฟมาในลักษณะเป็นโพลีโนเมียลกำลังสาม ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งมีลักษณะโค้งคว่ำในช่วงแรกที่รอบ 6,000 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณไปจนขาดที่ประมาณรอบที่ 10,000 รอบ ซึ่งจะอธิบายตามการสมมติฐานว่าเกิดการเสียดสีแบบขัดถู (Abrasive Wear) ในช่วงจนถึงรอบ 6,000 รอบ ซึ่งส่วนนูนของโอริงจะถูกขัดถูจนหมด ตามรูปที่ 4.5 อธิบายถึงการเกิด Abrasive wear หลังจากนั้นจนถึงขาดในรอบที่ 10,000 รอบ จะเกิดการสูญเสียแบบแนบติด (Adhesive wear) ซึ่งอธิบายตามรูปที่ 4.6 โดยกราฟในรูปที่ 4.7 จะมีสามกราฟ เราจึงนำสัมประสิทธิ์ของแต่ละกราฟมา Fit Curve แล้ว Plot กราฟรวมกัน ในเชิงพื้นที่ได้กราฟในรูปที่ 4.8 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นเพียงการทดลองให้ผู้ที่ใช้หาความเหมาะสมในการออกแบบในแต่ละงาน

ตามรูปที่ 4.11 เป็นภาพถ่ายในรอบที่ 2,000 รอบ ซึ่งจะมีร่องรอยขีดขูดเล็กๆจากการขัดถู เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นรอบที่ 6,000 รอบ ในความดันเดียวกันซึ่งมีการขีดขูดที่เป็นร่องลึกมากแล้ว รูปที่ 4.13 เป็นรอบที่ 8,000 รอบ ซึ่งจะ ไม่เห็นร่องรอยขีดขูดแบบเดิม ซึ่งจะเห็นเนื้ออย่างเป็นลอนๆซึ่งเป็นจากคั้งแบบแนบติด ซึ่งเห็นได้ออกมารูปที่ 4.14 เป็นรอบที่ 10,000 จะเห็นการหนืดของเนื้อยางที่ชัดเจนมาก

	ม.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค
รอรับหัวข้อ โครงการ	←→									
ศึกษารายละเอียด งาน			←→							
ออกแบบวิธีการ ทดลอง				←→						
ประกอบอุปกรณ์ ทดลอง					←→					
ทำการทดลอง						←→				
สรุปผลและทำ รายงาน								←→		

ตารางที่ 5.1 ตารางเวลาทั้งหมดตลอดโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ดร.ปนัดดา นิรินาทล้ำพงศ์, Dr. John T.H. Pearce, ดร. วารุณี เปรมานนท์, ดร.ชาวสวน กาญจ โนมัย, Dr.Grame J. Sheppard, ดร.ผกามาศ แซ่หว่าง, ผศ.ดร.ดวงดาว อาจองค์, ดร.สุรพล ราชสุวรรณีย์, ดร.สิทธิชัย วิโรจน์ปัทม์ 2547. การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม – ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
2. **Parker O-Ring Handbook 2001 Edition.** Lexington, KY: Parker Hannifin Corporation.
3. Bruce H. BurrKurt M. Marshek **An equation for the abrasive wear of elastomeric O-ring materials.** *Wear, Volume 81, Issue 2, 1 October 1982, Pages 347-356:*
4. Bruce H. BurrKurt M. Marshek. **O-ring wear test machine.** *Wear, Volume 68, Issue 1, 15 April 1981, Pages 21-32*
5. Xu-Yue Wang, Lawrence Kwok-Yan Li, Yiu-Wing Mai and Yao-Gen Shen. **Theoretical analysis of Hertzian contact fracture: Ring crack.** *Engineering Fracture Mechanics, In Press, Accepted Manuscript, Available online 10 March 2008,*

ภาคผนวก ก.

ตารางคุณสมบัติของโพลีเมอร์ชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุ	คุณสมบัติ		
	อุณหภูมิการใช้งาน (°C)	ความต้านทานแรงดึง MPa (Psi)	ช่วงความแข็ง Shore A
ยางธรรมชาติ โพลีไอโซพรีน	50 ถึง 70	20.7 (3000)	30 ถึง 90
สไตรีนบิวตาไดเอน, บุนะเอส	-50 ถึง 100	6.9(1000)	40 ถึง 90
บิวทิล, ไอโซบิวทิลีน, ไอโซพรีน	-40 ถึง 80	10.3 (1500)	40 ถึง 75
ไนไตรล, บิวตาไดเอน, อะคริโลไนไตรล	-40 ถึง 120	<6.9(1000)	40 ถึง 95
นีโอพรีน, โพลีคลอโรพรีน	-40 ถึง 80	20.7(3000)	40 ถึง 95
ไฮเพลอน, คลอโรซัลฟูเนต, โพลีเอธิลีน	-30 ถึง 120	17.2(2500)	40 ถึง 95
เอธิลีนโพรพิลีนโพลีเมอร์(ยาง EPDM)	-50 ถึง 150	<6.9(1000)	40 ถึง 90
ยางเคพคอลลอไรครีน	-	<6.9(1000)	40 ถึง 85
เอธิลีน/อะคริลิก อีลาสโตเมอร์(Vamac)	-	<6.9(1000)	40 ถึง 85
ซิลิโคน, โพลีซิลิโคนโพลีเมอร์	-70 ถึง 220	10.3 (1500)	40 ถึง 85
ฟลูโอโรอีลาสโตเมอร์ หรือ Viton	-40 ถึง 250	12.4(1800)	55 ถึง 95
เพอร์ฟลูโอโรอีลาสโตเมอร์ หรือ เคลเรซ(Kalrez)	-50 ถึง 300	10.3 (1500)	65 ถึง 95
โอลิพรีน(Aoriprene), ยางยูริเทน	-40 ถึง 100	27.6(4000)	60 ถึง 99
โพลีเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์, Hytel	-40 ถึง 70	38.0(5500)	63

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดวัสดุ	คุณสมบัติ						
	การติดกลับ		ความต้านทาน การเป็นสื่อไฟฟ้า	ฉนวนไฟฟ้า	ความต้านทานกรด		ความต้านทานตัวทำละลาย เอพิทาคไฮโดร คาร์บอน
	เย็น	ร้อน			เจือจาง	เข้มข้น	
ยางธรรมชาติ	E	E	E	G ถึง E	F ถึง G	F ถึง G	P
บุนเอส	G	G	E	G ถึง E	F ถึง G	F ถึง G	P
บิวทิล	P	VG	E	G ถึง E	E	G	P
ไนไตรล	G	G	P	P	G	G	E
นีโอพรีน	VG	VG	G	F ถึง G	E	G	
ไฮเพลอน		G		G	E	VG	G
ยาง EPDM	VG	VG	G	E	E	E	P
ยางเอพิลคลอโรไฮคริน	G	G	G	G	F ถึง G	P	E
Vamac	P	F	G	F ถึง G	O	P	G
ซิลิโคน	E	E	G	E	E	F	P
Viton		G	G	F ถึง G	E	E	E
เคลเรซ	-	-	E	E	E	E	E
ยางยูรีเทน	G	G	E	F ถึง G	F	P	G ถึง E
Hytrel	F	G		F ถึง G	F	P	E

หมายเหตุ O-ดีเค้น, E- ดีเยี่ยม, VG- ดีมาก, G-ดี, F-พอใช้, P-ไม่พอใช้, FL-ค่อนข้างต่ำ, L-ต่ำ, VL- ต่ำมาก

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดวัสดุ	คุณสมบัติ						
	ความต้านทานตัวทำละลาย						การซึม เข้าไปได้ ของก๊าซ
	โอโซน	อายุทาง แสงแดด	อายุทาง ความร้อน(C)	เปลวไฟ	ความร้อน	ความเย็น	
ยางธรรมชาติ	P ถึง F	P	85	P	G	E	FL
บุนเอส	P	P	90	P	F ถึง G	VG	F
บิวทิล	E	VG	120	P	VG	G	VL
ไนทริล	F	P	115	P	G	F ถึง G	L
นีโอพรีน	VG ถึง E	VG	95	G	VG	G	L
ไฮเพลอน	O	O	135	G	E	G	VL
ยาง EPDM	O	O	145	P	E	E	FL
ยางเอพิลคลอ โรไฮคริน	P	G	135	P ถึง F	VG	G ถึง VG	L ถึง FL
Vamac	O	O	165	P	E	G	VL
ซิลิโคน	E	E	205	F ถึง G	O	O	FL
Viton	O	O	205	E	O	G	VL
เคลเรซ	O	O	290	E	VG	G	F
ยางยูรีเทน	E	G	85	F	G	E	FL
Hytrell	E	VG	110	G	E	E	F

หมายเหตุ O -ดีเด่น, E- ดีเยี่ยม, VG- ดีมาก, G-ดี, F-พอใช้, P-ไม่พอใช้, FL-ค่อนข้างต่ำ, L-ต่ำ, VL- ต่ำมาก

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดวัสดุ	คุณสมบัติ							
	ความต้านทานตัวทำละลาย			ความต้านทานต่อ				
	แอโรเมติกไฮโดรคาร์บอน	ที่มีออกซิเจน	แอลกอฮอล์	สารของหัวในน้ำมันหล่อลื่น	น้ำมัน	น้ำมันสัตว์น้ำมันพืช	การดูดซับน้ำ	การทำปฏิกิริยากับออกซิเจน
ยางธรรมชาติ	P	F ถึง G	P	P	P	P ถึง G	VG	G
นูนเอส	P	G	P	P	P	P ถึง G	G ถึง VG	F
บิวทิล	P	G	F ถึง G	P	P	VG	VG	E
ไนทริล	G	P	F	VG	E	VG	G	G
นีโอพรีน	F	P	P	G	G ถึง E	G	G	VG ถึง E
ไฮเพลอน	G	F	P	G ถึง E	G ถึง E	G	VG	E
ยาง EPDM	P	G ถึง VG	P ถึง G	P	P	P ถึง G	VG ถึง E	P
ยางเอพิลคลอโรไซคริน	G	P	F	E	E	E	G	G
Vamac	F	P	P	G	G ถึง E	G	VG ขึ้นไป	O
ซิลิโคน	P	F ถึง G	P	F	F	G ถึง E	E	E
Viton	E	P	P ถึง F	E	E	E	VG	O
เคลเรซ	E	E	E	E	E	E	VG	O
ยางยูรีเทน	F ถึง G	P	P	G ถึง E	G ถึง E	G ถึง E	G ถึง E	E
Hytrell	G	G	G	E	E	E	VG ขึ้นไป	E

หมายเหตุ O-ดีเค่น, E- ดีเยี่ยม, VG- ดีมาก, G-ดี, F-พอใช้, P-ไม่พอใช้, FL-ค่อนข้างต่ำ, L-ต่ำ, VL- ต่ำมาก

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้