



การปรับปรุงอายุการใช้งานของซีลสำหรับชุดจับยึดหัวอ่าน Improvement of the Usable Life of HGA Clamp Seal

สุทิน พลบูรณ์ และ มงคล มงคลวงศ์โรจน์

Suthin Pholboorn and Mongkol Mongkolwongrojn

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ฯ

โทร. 084-903-8993, E-mail : suthin_27@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการสึกหรอของซีลสำหรับชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ และทำการปรับปรุงอายุการใช้งานของซีลให้ยาวนานขึ้น ปริมาณการสึกหรอวัดด้วยเครื่องชั่งละเอียด เนื่องจากการสึกหรอของซีลส่วนใหญ่เกิดจากการถูกขัดถูจากความเค้นเฉือนเมื่อมีการเคลื่อนที่ ในการปรับปรุงอายุการใช้งานของซีลจึงต้องทำการลดการสึกหรอด้วยการลดความเค้นเฉือนโดยการเพิ่มพื้นที่ในการรับแรงเฉือน ในการทดลองนี้จึงได้ทำการเพิ่มขนาดของซีลขึ้นไปอีก 25 % ซึ่งเป็นขนาดที่มีการใช้งานในตำแหน่งอื่นอยู่แล้ว จากการทดลองจะพบว่าทั้งซีลขนาดใหญ่และขนาดเล็กจะมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น เมื่อทั้งความดันและจำนวนรอบการใช้งานเพิ่มมากขึ้น แต่ซีลขนาดใหญ่จะมีการสึกหรอน้อยกว่าซีลขนาดเล็กมากและยังมีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าด้วย ซีลขนาดใหญ่ช่วยให้การสึกหรอลดลงถึง 85.51 % ที่ความดัน 3.0 บาร์ และจำนวนรอบการใช้งานเท่ากับ 10,000 รอบ ซึ่งเป็นความดันที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน

ABSTRACT

This paper presents the study of the wearing characteristics for HGA clamp seal and includes the improvement of the usable life of seal. The wear rate can be measured by using the precise weighting machine. The most wear occurs from the abrasion of shear stress while in motion. The improvement of the usable life of seal is done by reduce wear from shear stress by increasing the area to support shear force. This experiment increases the size of seal about 25 % from the old size. The new size of seal is the same size which uses in the other positions. The result of the experiment can show that both of the new size and the old size increase wear when increase both of operated pressure and cycles of the motion. The new size can get wear and wear rate lower than the old size. The new size can reduce wear about 85.51 % at the operated pressure at 3.0 bar and the cycle of motion at 10,000 cycles. This operated pressure is the optimum pressure to use in this system.

1. บทนำ

วัสดุอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เพราะวัสดุประเภทนี้มีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไตรโบโลยีที่มีความเหมาะสมในการใช้งาน ด้วยเหตุที่ว่าเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้ดี จึงนิยมนำมาทำเป็นวัสดุชนิดป้องกันการรั่วไหลของของไหลในระบบที่เรียกว่า ซีล (Seal) หรือ โอ-ริง (O-ring)

ได้มีการพยายามปรับปรุงสมรรถภาพของซีลให้มีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น นั่นคือ มีการสึกหรอน้อยลง และการศึกษาคุณสมบัติทางกลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับซีลเพื่อคัดเลือกว่าซีลที่มีความเกี่ยวข้องต่อประสิทธิภาพในการทำงาน มีการทดลองและจำลองด้วยไฟไนต์อีเลเมนต์กับ PTFE (Polytetrafluoroethylene) Seals ที่รับแรงในแนวรัศมีพบว่าที่ความเร็วรอบ 2,000-6,000 rpm ค่าของ Friction Coefficient μ จะลดลง

เมื่อเพิ่มความเร็วรอบและแรงกระทำที่ผิวสัมผัสสำหรับการสึกกร่อน (Wear) จะพบว่าที่ความเร็วรอบและความดันสูงๆจะเกิดการสึกกร่อนมาก แต่จะเกิดการสึกกร่อนน้อยที่ความดันน้อยกว่า 0.5 MPa และความเร็วรอบน้อยกว่า 3,000 rpm [4]

ได้มีการทดลองการเลื่อนไถลของคู่สัมผัสระหว่าง PTFE-PTFE, PA66-PA66 (Polyamide 66) และ PPS-PPS (Polyphenylene Sulfide) ภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบแห้งและใช้สารหล่อลื่น พบว่า สารหล่อลื่นทำให้แรงเสียดทานลดลงได้ทุกคู่สัมผัส สำหรับอัตราการสึกกร่อนจะช่วยลดลงได้เฉพาะคู่ของ PTFE-PTFE และ PPS-PPS แต่คู่ของ PA66-PA66 สารหล่อลื่นไม่ช่วยให้การสึกกร่อนลดลงเลย [1]

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ทำการปรับปรุงอายุการใช้งานของซีลที่ทำจาก NBR (Nitrile Butadiene Rubber) ที่ใช้งานในชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะการรับโหลดและจำนวนรอบในการทำงาน พร้อมทั้งหาสภาวะการทำงานที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนของซีลน้อยที่สุดเพื่อให้อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด

2. การปรับปรุงอายุการใช้งานของซีล

2.1 หลักการปรับปรุงอายุการใช้งานของซีล

สำหรับหลักการที่ใช้ในการปรับปรุงอายุการใช้งานของซีลให้นานขึ้นที่นำมาพิจารณาในการทดลองครั้งนี้ คือ

1. การใช้สารหล่อลื่น

การใช้สารหล่อลื่นเป็นการทำให้ซีลยืดอายุการใช้งานขึ้นได้ เพราะเป็นการลดแรงเสียดทานขณะมีการเคลื่อนที่ แต่เนื่องจากการใช้งานจริงไม่มีการใช้สารหล่อลื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น การทดลองนี้จึงไม่มีการใช้สารหล่อลื่น

2. การเลือกใช้วัสดุต่างชนิดกัน

การเลือกใช้วัสดุหลายๆชนิดเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดจากวัสดุแต่ละชนิดที่แตกต่างกันว่าวัสดุชนิดใดให้อายุการใช้งานของซีลยาวนานที่สุด แต่ในการทำงานจริงมีขอบเขตจำกัด ไม่มีการใช้วัสดุชนิดอื่นๆ นอกจาก

NBR ดังนั้น การทดลองนี้จึงไม่มีการเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นด้วย

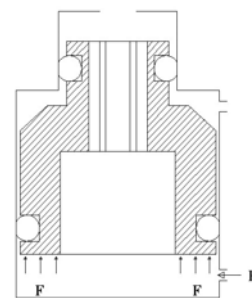
3. การเพิ่มขนาดของซีล

การเพิ่มขนาดของซีลให้มากขึ้นโดยใช้วัสดุชนิดเดิมเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มอายุการใช้งานของซีล เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการรับแรง ซึ่งจะส่งผลให้ความเค้นเฉือนมีขนาดลดลงเมื่อรับแรงขนาดที่เท่าๆกันกับซีลขนาดเดิม

โดยสรุป กระบวนการที่นำมาใช้ในการปรับปรุงอายุการใช้งานของซีลในการทดลองนี้คือ การเพิ่มขนาดของซีลขึ้นไปอีก 25 % จากขนาดเดิม ซึ่งก็คือซีลขนาดเดียวกันกับที่ใช้งานในอีก 2 ตำแหน่งที่เหลือ

2.2 ความเค้นที่เกิดจากซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่

2.2.1 แรงที่กระทำกับชุดจับยึดหัวอ่าน



รูปที่ 1 แสดงแรงที่กระทำกับชุดจับยึดหัวอ่านขณะเคลื่อนที่ขึ้น

เมื่อป้อนแรงดัน (P) เข้าระบบ จะเกิดแรง (F) ที่ทำให้ระบบเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น พิจารณาดังสมการ

$$F = P * A \quad (3.1)$$

โดยที่

$$A = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2)$$

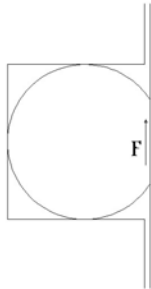
ดังนั้น

$$F = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) * P \quad (3.2)$$

- P คือ ความดันใช้งาน (bar)
 F คือ แรงที่เกิดจากความดัน (N)
 A คือ พื้นที่รับแรง (mm^2)
 D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
 D_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)

จะพบว่าแรง (F) จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องสวมและความดัน (P) ใช้งาน

2.2.2 ความเค้นของซีลขนาดเก่า



รูปที่ 2 แสดงการรับความเค้นของซีลขนาดเก่า

เมื่อป้อนความดัน (P) เข้าไปในระบบ จะเกิดแรง (F) ซึ่งเป็นแรงที่ไปกระทำกับซีลให้เกิดการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกัน ดังนั้น จึงเกิดความเค้นเฉือนขึ้นกับซีล ดังสมการ

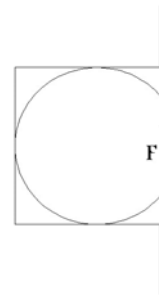
$$\tau_o = \frac{F}{a_o} \quad (3.3)$$

แทนค่า F จากสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.3) จะได้

$$\tau_o = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2) * P}{4 * a_o} \quad (3.4)$$

- τ_o คือ ความเค้นเฉือน (N/mm^2)
 a_o คือ พื้นที่รับแรง (mm^2)

2.2.3 ความเค้นของซีลขนาดใหม่



รูปที่ 3 แสดงการรับความเค้นของซีลขนาดใหม่

เมื่อป้อนความดัน (P) เข้าไปในระบบจะเกิดแรง (F) ซึ่งเป็นแรงที่ไปกระทำกับซีลให้เกิดการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกัน ดังนั้น จึงเกิดความเค้นเฉือนขึ้นกับซีล ดังสมการ

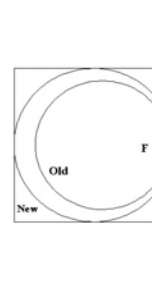
$$\tau_N = \frac{F}{a_N} \quad (3.5)$$

แทนค่า F จากสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.5) จะได้

$$\tau_N = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2) * P}{4 * a_N} \quad (3.6)$$

- τ_N คือ ความเค้นเฉือน (N/mm^2)
 a_N คือ พื้นที่รับแรง (mm^2)

2.2.4 การเปรียบเทียบพื้นที่รับแรงของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่การรับแรงของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่

ซิลแบบเก่ามีขนาดเท่ากับ 0.110×0.020 นิ้ว แต่ซิลแบบใหม่มีขนาดเท่ากับ 0.090×0.025 นิ้ว ซึ่งจะพบว่าซิลแบบใหม่มีความหนาแน่นมากกว่าซิลแบบเก่าเท่ากับ 0.005 นิ้ว หรือเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม 25 % และในการถ่วงสวมนซิลแบบใหม่จึงต้องถ่วงลงไปให้ลึกกว่าร่องสวมนซิลแบบเก่าด้วย อย่างไรก็ตาม ซิลแบบใหม่ก็ยังมีส่วนที่ในการถูกบีบอัดมากกว่าซิลแบบเก่า โดยที่มีระยะ Clearance เท่ากับ 0.002087 นิ้ว หรือ 0.053 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4 เพื่อรักษาความเป็นซิลในการป้องกันการรั่วไหลของของไหลที่ใช้ภายในระบบ

เพราะฉะนั้น จะพบว่า

$$a_N > a_O \quad (3.7)$$

จะพบว่า ที่เงื่อนไขการทำงานความดัน (P) เดียวกัน จะได้ว่า

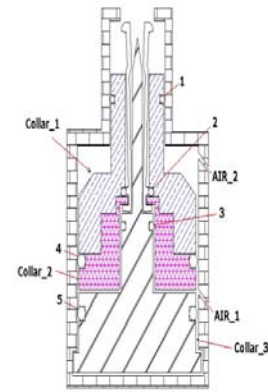
$$\tau_N < \tau_O \quad (3.8)$$

แสดงว่า การเพิ่มพื้นที่ของซิลทำให้ความเค้นเฉือนลดลง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสึกหรอลดลงตามไปด้วย

3. วิธีการทดลอง

3.1 ภาพแสดงชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

ชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลักๆ คือ ชุด Collar 3 ชุด โดยชุดที่ 1 และชุดที่ 2 จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลงไปด้วยกัน แต่ชุดที่ 3 จะไม่มีการเคลื่อนที่ โดยมีซิลทั้งหมด 5 ชุด ที่มีขนาดที่แตกต่างกันทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลของของไหล ในการเคลื่อนที่ จะเป็นการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมาโดยอาศัยแรงดันที่ทางเข้าที่ 1 และทางเข้าที่ 2 ดังรูปที่ 5

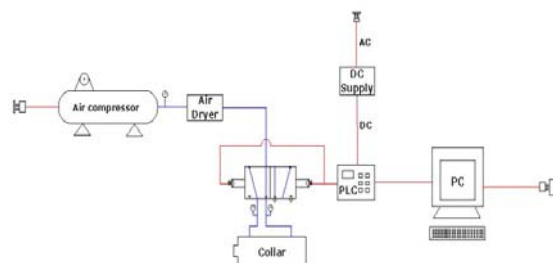


รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (HGA Clamp)

3.2 หลักการทำงานของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

เมื่อแรงดันเข้าที่ทางเข้าที่ 1 จะทำให้ Collar ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 เคลื่อนที่ขึ้นไปพร้อมกันจนสุดระยะแล้ว จะทำการค้างเอาไว้เป็นเวลา 6 วินาที เพื่อให้กันตรงปลายทำการจับยึดหัวอ่านเอาไว้เพื่อทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของหัวอ่านต่อไป หลังจากผ่านไปแล้ว 6 วินาที แรงดันก็จะเข้าที่ทางเข้าที่ 2 ซึ่งจะทำให้ Collar ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 เคลื่อนที่ลงไปพร้อมกันจนถึงระยะต่ำสุด ซึ่งจะค้างเวลาเอาไว้ 6 วินาที จึงเคลื่อนที่ขึ้นและลงอย่างนี้ไปเรื่อยๆ โดยสรุปคือ ในการเคลื่อนที่ขึ้นและลง 1 รอบ จะใช้เวลา 12 วินาที นั่นคือ มีการเคลื่อนที่ 5 รอบต่อนาที หรือ 300 รอบต่อชั่วโมง

3.3 แบบจำลองส่วนประกอบของชุดทดลอง



รูปที่ 6 แสดงแบบจำลองส่วนประกอบของชุดทดลอง

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักของซิลชุดที่ 1 ก่อนการประกอบเข้ากับชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ บันทึกค่าที่ได้
2. ประกอบซิลชุดที่ 1 และซิลชุดอื่นๆเข้ากับชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
3. ประกอบชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ประกอบซิลทุกชุดเข้ากับชุดยึดชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
4. ปรับค่าความดันที่ทางเข้าที่ 1 และทางเข้าที่ 2 ของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไว้ที่ 3.0 บาร์ และจำนวนรอบตั้งค่าไว้ที่ 2,000 รอบ
5. หลังจากเดินเครื่องได้ครบ 2,000 รอบแล้วให้หยุดการเดินเครื่องและถอดชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ออก
6. ถอดซิลชุดที่ 1 ของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ออกแล้วนำไปชั่งน้ำหนักหลังการทดลอง บันทึกค่าที่ได้
7. ทำการเปลี่ยนซิลของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ออกทุกชุดและประกอบตัวใหม่ทุกชุด แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง ข้อ 6 โดยการเพิ่มจำนวนรอบขึ้นทีละ 2,000 รอบ จนถึง 10,000 รอบ และเพิ่มความดันขึ้นทีละ 0.5 บาร์ จนถึง 4.0 บาร์

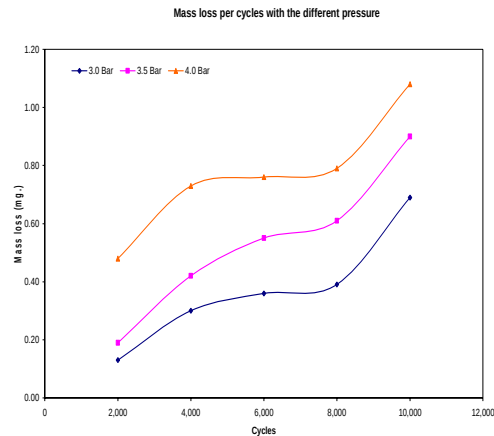
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการทดลองจะพบว่า ซิลที่เกิดการสึกหรอมากที่สุดจนทำให้ต้องหยุดระบบเพื่อเปลี่ยนซิลทุกชุด คือ ซิลชุดที่ 1 เหตุที่ต้องทำการเปลี่ยนซิลทุกชุด เพราะเมื่อถอดชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ออกมาจากชุดยึดแล้วซิลทุกชุดจะมีสภาพที่ไม่พร้อมในการใช้งานต่อไปได้ เพราะจะเกิดการสึกหรอขึ้นเหมือนกัน แต่มีสภาพที่น้อยกว่าซิลชุดที่ 1 ดังนั้นในการพิจารณาการสึกหรอของซิลจึงทำการโฟกัสไปที่ซิลชุดที่ 1 เป็นประเด็นหลัก

4.1 ผลการทดลองของซิลขนาดเก่า

จากรูปที่ 7 เมื่อจำนวนรอบการใช้งานและความดันใช้งานเพิ่มขึ้น จะพบว่ามวลที่สูญเสียไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาก โดยความดันใช้งานเท่ากับ 3.0 บาร์ จะมีมวลที่สูญเสียไปน้อยที่สุดในทุกๆจำนวนรอบการใช้งาน นั่นคือ

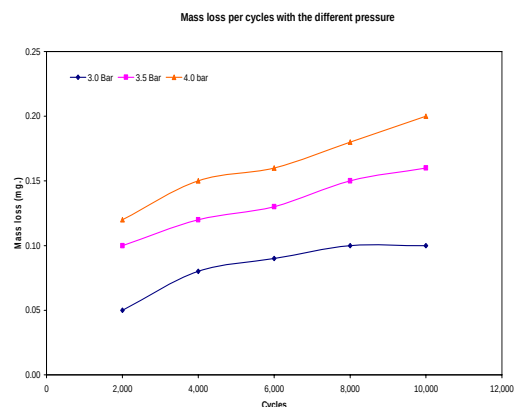
มีปริมาณการสึกหรอน้อยที่สุด จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน



รูปที่ 7 แสดงมวลที่สูญเสียไปต่อจำนวนรอบที่ความดันที่แตกต่างกันของซิลขนาดเก่า

4.2 ผลการทดลองของซิลขนาดใหม่

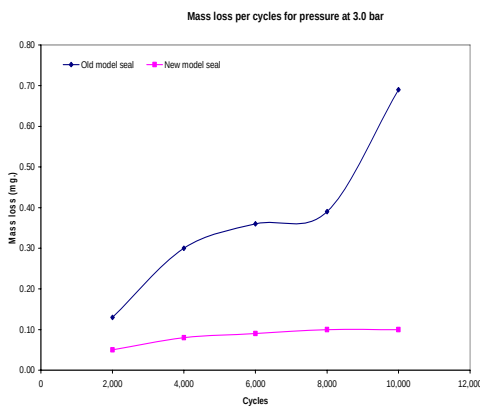
จากรูปที่ 8 เมื่อจำนวนรอบการใช้งานและความดันใช้งานเพิ่มขึ้น จะพบว่ามวลที่สูญเสียไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยความดันใช้งานเท่ากับ 3.0 บาร์ จะมีมวลที่สูญเสียไปน้อยที่สุดในทุกๆจำนวนรอบการใช้งาน นั่นคือมีปริมาณการสึกหรอน้อยที่สุด จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน



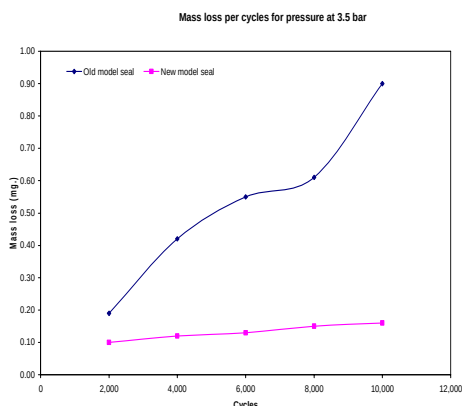
รูปที่ 8 แสดงมวลที่สูญเสียไปต่อจำนวนรอบที่ความดันที่แตกต่างกันของซิลขนาดใหม่

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่

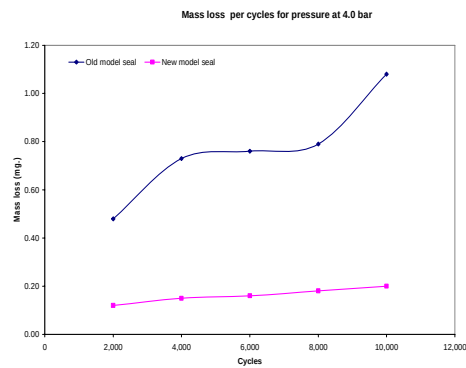
เมื่อนำผลการทดลองของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่มาทำการเปรียบเทียบการสึกหรอที่ความดันเดียวกัน ดังรูปที่ 9 – 11 จะพบว่า ซีลขนาดเก่ามีอัตราการสึกหรอมากกว่าซีลขนาดใหม่ในทุกๆจำนวนรอบการใช้งาน โดยที่ซีลขนาดใหม่จะมีอัตราการสึกหรอน้อยมาก และการสึกหรอลดลงถึง 85.51 % ที่ความดัน 3.0 บาร์ และจำนวนรอบเท่ากับ 10,000 รอบ ซึ่งเป็นความดันที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่ที่ความดันใช้งานเท่ากับ 3.0 บาร์



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่ที่ความดันใช้งานเท่ากับ 3.5 บาร์



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของซีลขนาดเก่าและขนาดใหม่ที่ความดันใช้งานเท่ากับ 4.0 บาร์

5. บทสรุป

วัสดุอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ในการทำซีลสำหรับชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ให้ผลการทดลองที่สามารถสรุปได้ว่า ซีลสามารถลดการสึกหรอได้โดยการเพิ่มขนาดเพื่อลดความเค้นเฉือน ในการทดลองนี้ได้ทำการเพิ่มขนาดของซีลขึ้นไปอีก 25 % จากขนาดเก่า จากการทดลองจะพบว่าทั้งซีลขนาดใหม่และขนาดเก่าจะมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น เมื่อทั้งความดันและจำนวนรอบการใช้งานเพิ่มมากขึ้น แต่ซีลขนาดใหม่จะมีการสึกหรอน้อยกว่าซีลขนาดเก่ามากและยังมีอัตราการสึกหรอที่น้อยกว่าด้วย โดยที่ซีลขนาดใหม่ช่วยทำให้การสึกหรอลดลงถึง 85.51 % ที่ความดันใช้งานเท่ากับ 3.0 บาร์ และจำนวนรอบการใช้งานเท่ากับ 10,000 รอบ ซึ่งเป็นความดันที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งมายังศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับทำการวิจัย ขอขอบคุณมายัง บริษัท ซีเคท (เทคโนโลยี) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bin-Bin Jia, Tong-Sheng Li, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Cong, “Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated condition.” *Wear* 262, 2007 : 1353-1359.
- [2] J.-M. Degrange, M. Thomine, Ph. Kapsa, J.M. Pelletier, L. Chazeau, G. Vigier, G. Dudragne, L. Guerbe, “Influence of viscoelasticity on the tribological behaviour of carbon black filled nitrile rubber (NBR) for lip seal application.” *Wear* 259, 2005 : 684-692.
- [3] T. Raparelli, A. Manuello, L. Mazza, “Experimental and numerical study of friction in an elastomeric seal for pneumatic cylinders.” *Tribology International*, Vol. 30, No. 7, 1997 : 547-552.
- [4] Hai Sui, Heiko Pohl, Uwe Schomburg, Gerd Upper, Steffen Heine, “Wear and friction of PTFE seals.” *Wear* 224, 1999 : 175-182.
- [5] Shi-Quan Lai, Li Yueb, Tong-Sheng Li, Zhi-Meng Hua. “The friction and wearproperties of polytetrafluoroethylenefilled with ultrafine diamond.” *Wear*. 260, 2006 : 462–468.
- [6] H. Unal, U. Sen, A. Mimaroglu. “An approach to friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composite.” *Materials and Design*. 27, 2006 : 694–699.
- [7] J. Vande Voort, S. Bahadur. “The growth and bonding of transfer film and the role of CuS and PTFE in the tribological behavior of PEEK.” *Wear*. 181-183, 1995 : 212-221.
- [8] S. Bahadur, V.K. Polineni. “Tribological studies of glass fabric-reinforced polyamide composites filled with CuO and PTFE.” *Wear*. 200, 1996 : 95-104.
- [9] Z.P. Lu, K. Friedrich. “On sliding friction and wear of PEEK and its composites.” *Wear*. 181-183, 1995 : 624-631.