

การออกแบบรูปร่างรอบตัวเรือนยึดซีลของแมคคานิคอลซีลสำหรับวิธีการประกอบแบบหดตัว Housing-Circumferential Body Design of Mechanical Seal for Warm Shrink Fit Assembly

วุฒิพงษ์ บุญแก้ว*, ชาญ ถนัดงาน และ สมฤกษ์ ปรุงฉาการ

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

*ติดต่อ: E-mail: wuttipong_mpe@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการจำลองเพื่อการพัฒนากระบวนการประกอบแบบหดตัวด้วยการออกแบบรูปร่างรอบตัวเรือนยึดซีล เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือ ต้องการลดต้นทุนที่สูงในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปซีลวงแหวนหน้าสัมผัสซิลิคอนคาร์ไบด์จะหลุดออกจากตัวเรือนยึดซีลเมื่ออยู่ในอุณหภูมิแวดล้อมที่เกิน 100 °C เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้น กาวเคมีแบบพิเศษถูกใช้สำหรับทำให้ชิ้นส่วนทั้งสองติดกันแต่ไม่ถูกหล่อนามัยสำหรับระบบปั๊มในอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นวิธีการประกอบแบบหดตัวมีแนวโน้มใช้ได้จริงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ใช้โปรแกรม ANSYS-Workbench 14.0 สำหรับจำลองและวิเคราะห์การกระจายของความเค้นและความแน่นในแนวแกนของแมคคานิคอลซีล วัสดุที่ทำตัวเรือนยึดซีลคือ SUS 316L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูคว้าน 50 mm. ความลึก 3.5 mm. ความหนา 12 mm. ตัวอย่างรูปร่างการกลึงตกร่อง 5 รูปแบบรอบตัวเรือนยึดซีล ซีลวงแหวนหน้าสัมผัสทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 47 mm. ความหนา 5 mm. ผลการจำลองแสดงว่ารูปร่างการกลึงตกร่องรอบตัวเรือนยึดซีลที่แตกต่างกันมีความเค้นและแรงตามแนวแกนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ประโยชน์ที่ได้คือใช้สำหรับการออกแบบและการกำหนดค่าที่ยอมรับได้ของการสวมแบบหดตัวระหว่างตัวเรือนยึดซีลกับวงแหวนหน้าสัมผัส

คำหลัก: แมคคานิคอลซีล, วิธีการประกอบแบบหดตัว, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper presents the simulation procedure for development warm shrink fit assembly processes of the mechanical seal-housing-circumferential body design. The aim of this research used for reducing a conventional high cost try-out approach in shop floor. For general case, the silicon carbide face seal always loosed and disconnected from its housing when operating in ambient condition over 100 degree Celsius. In order to avoid this damage, some special chemical glue used for joints both parts together, but it was not a preferable sanitary of pumping system in food industries. Therefore, the shrink fit assembly processes are trend to be practically. The FEM simulation tool uses ANSYS-Workbench 14.0 for modeling and analysis of the distributed compressive stress and axial force tightness of those mechanical seals assembly. The housing material is a SUS 316L with a bore diameter 50 mm, depth 3.5 mm and a circumferential thickness about 12 mm. The five examples of slot profile laid on each circumferential of housing body. The face seal made of a silicon carbide with an outside diameter 50 mm, inside 47 mm and thickness 5 mm. Form the resultants of simulation studies shown that five different circumferential profile slots have the explicit different stresses and tightening axial forces. The advantages of that information used for design and define the tolerances of the interference fit between a face seal and housing.

Keywords: Mechanical Seal , Shrink fit , FEM

1. บทนำ

แมคคานิคอลซีล (Mechanical Seal) คือ อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลทางกลทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลของของไหลออกจากช่องว่างระหว่างแกนเพลากับผนังเสื้อปั๊ม มีส่วนประกอบหลักอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่หมุนตามเพลลา (Rotating) ประกอบด้วย ซีลตัวที่หนึ่ง (Primary Seal) ซีลตัวที่สอง (Secondary Seal) และสปริง ส่วนที่สองคือส่วนที่อยู่นิ่ง (Stationary) ประกอบด้วย วงแหวนประกบหน้าซีล (Mating Ring) และโอริง (O-Ring) มาประกอบรวมกันเป็นชุดใช้สำหรับสวมใส่บนแกนเพลลาตรงบริเวณห้องซีลหน้าปั๊ม (Stuffing Box) โดยแรงของสปริงดันซีลตัวที่หนึ่งซึ่งหมุนตามเพลลาให้ผิวหน้าสัมผัสแนบสนิทกับผิวหน้าสัมผัสของ วงแหวนประกบหน้าซีล อาจจะทำจากวัสดุที่ต่างกันเพื่อให้วัสดุที่อ่อนกว่าสึกหรอก่อนวัสดุที่แข็งกว่าและยืดระยะเวลาการรั่วไหลของของไหล การสัมผัสกันระหว่างคู่สัมผัสเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการป้องกันการรั่วไหลของของไหลขณะที่เพลลาหมุนผิวหน้าสัมผัสของคู่สัมผัสจะมีฟิล์มของของไหลแทรกอยู่และมีความดัน ความร้อน และมีสถานะความดัน – ความเร็ว เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของคู่สัมผัส แมคคานิคอลซีลมีใช้ในระบบปั๊มโรงงานผลิตและแปรรูปอาหาร สารเคมี ปิโตรเลียม ไฟฟ้า น้ำ เป็นต้น ข้อดีของแมคคานิคอลซีลเมื่อเทียบกับประเภอื่น ๆ คือ อายุการใช้งานยาวนาน ต้นทุนในการซ่อมแซมและการบำรุงรักษาต่ำ ไม่ทำให้เพลลาเสียหาย และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการรั่วไหลของของไหลดีกว่าซีลแบบอื่นและสามารถทนต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิ ความดันและความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างผิวหน้าสัมผัสได้ดี

วิธีการประกอบซีลวงแหวนหน้าสัมผัส (Face Seal) เข้ากับตัวเรือนยัดซีล (Housing of Mechanical Face Seal) ด้วยวิธีการหดตัว (Shrink Fit) โดยใช้หลักการการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion) ด้วยการให้ความร้อนตัวเรือนยัดซีลที่ทำจากวัสดุสแตนเลส เมื่อตัวเรือนยัดซีลได้รับความร้อนรูคว้านที่เจาะไว้สำหรับใส่ซีลวงแหวนหน้าสัมผัสนั้นขยายตัวใหญ่กว่าเดิมพอที่จะให้ซีลวงแหวนหน้าสัมผัสที่ทำจากวัสดุซิลิคอนคาร์ไบด์ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ หรือ สแตนเลสที่ทำจากวัสดุเดียวกับตัวเรือนยัดซีลใส่เข้าไปได้ เมื่อตัวเรือนยัดซีลเย็นตัวรูคว้านหดตัวลงและรัดซีลวงแหวนหน้าสัมผัสแน่นเข้าด้วยกัน แมคคานิคอลซีลเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิใช้งานเกิน

100 °C จากสถานะงานในปัจจุบันพบว่าซีลวงแหวนหน้าสัมผัสที่ถูกรัดติดอยู่กับตัวเรือนยัดซีลได้หลุดออกจากรันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น เนื่องจากได้รับความร้อนจากการใช้งานและเกิดการหลวมในงานสวมซึ่งสถานะการณ์ปัจจุบันยังไม่ทราบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับตัวเรือนยัดซีลและซีลวงแหวนหน้าสัมผัสขณะได้รับความร้อน การหลุดของวงแหวนหน้าสัมผัสทำให้เกิดการรั่วไหลของของไหล ส่งผลให้เพลลาเกิดการกัดกร่อนจนสึกหรอและสภาวะแวดล้อมสกปรก สูญเสียเวลาและต้นทุนต่อการหยุดเดินเครื่องเพื่อทำการตรวจสอบซ่อมแซมหรือเปลี่ยนอะไหล่เนื่องจากการเสียหายของซีล

จากสาเหตุดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการดำเนินการวิจัยเพื่อออกแบบตัวเรือนยัดซีลให้มีความเหมาะสมต่อวิธีการประกอบแบบหดตัว รวมถึงสภาวะการใช้งานจริงที่อุณหภูมิใช้งานเกิน 100 °C จนกระทั่งถึง 150 °C โดยการวิเคราะห์การกระจายความเค้นอัดและความแน่นในแนวแกนเพลลาของการประกอบที่เกิดขึ้นบนตัวเรือนยัดซีลเปรียบเทียบกับระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการสำเร็จรูป [1,2] และทำการทดลองจริง ซึ่งผลการวิจัยจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาแมคคานิคอลซีลในเชิงประสิทธิภาพและคุณภาพ

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 เพื่อพัฒนารูปารอบตัวเรือนยัดซีลให้เหมาะสมกับวิธีการประกอบวงแหวนหน้าสัมผัสด้วยวิธีการหดตัว (Shrink Fit)

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

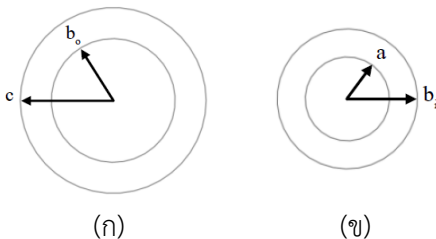
1.2.1 ตัวเรือนยัดซีลทำจากวัสดุสแตนเลสเกรด SUS 316L ความยาว 10.5 ± 0.20 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 54.5 ± 0.20 mm เส้นผ่านศูนย์กลางรูคว้านดก ร่องสำหรับใส่ซีลวงแหวนหน้าสัมผัส $50.0^{+0.08}_{-0.10}$ mm ความลึก 3.5 ± 0.20 mm

1.2.2 ซีลวงแหวนหน้าสัมผัสทำจากวัสดุซิลิคอนคาร์ไบด์ ความหนา 5.0 ± 0.20 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 47.0 ± 0.20 mm

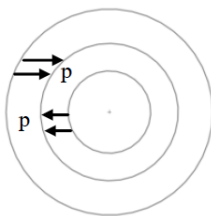
1.2.3 อุณหภูมิที่ใส่อบตัวเรือนยัดซีล 300 - 350 °C ใช้เวลา 15 - 25 นาที

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเค้นเนื่องจากอัดกระบอกเข้าด้วยกัน (Stresses produced by shrink fit) [3] กระบอกมีความดันภายในหรือความดันภายนอก หรือทั้งความดันภายในและความดันภายนอกกระทำในเวลาเดียวกันซึ่งทำให้เกิดความเค้นเชิงรัศมี (Radial stress) และความเค้นเชิงเส้นรอบวง (Tangential stress) ขึ้นภายในผนังนั้น ถ้ากระบอกสมมาตรความเค้นเชิงเส้นรอบวงที่รัศมีใดของผนังจะมีค่าคงที่ตลอดเส้นรอบวง ส่วนความเค้นเชิงเส้นรัศมีจะเป็นฟังก์ชันกับรัศมี การอัดหรือสวมชิ้นส่วนสองชิ้นเข้าด้วยกันทั่วไปรัศมีนอกของชิ้นส่วนในจะใหญ่กว่ารัศมีในของชิ้นส่วนนอกเล็กน้อย ดังนั้นหลังจากการอัดจะเกิดความดันขึ้นในบริเวณผิวที่ชิ้นส่วนทั้งสองสัมผัสกันซึ่งเรียกว่า ความดันจากการอัด (Shrink-fit pressure) การอัดกระบอกเข้าด้วยกันจะช่วยลดความเค้นภายในผนังของกระบอกที่มีความดันกระทำภายในกระบอก คือ หลังจากการอัดกระบอกเข้าด้วยกันแล้วทำให้กระบอกส่วนนอกมีความเค้นดึงเชิงเส้นรอบวงเกิดขึ้นที่ผนัง และกระบอกส่วนในจะมีความเค้นอัดเชิงเส้นรอบวงเกิดขึ้นที่ผนัง ความเค้นที่เกิดขึ้นเรียกว่า Prestressed composite cylinder



รูปที่ 1 (ก) กระบอกนอกรัศมี c และ b_o , (ข) กระบอกในรัศมี b_i และ a



รูปที่ 2 กระบอกอัดเข้าด้วยกัน

p คือ ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของกระบอกทั้งสองหลังจากอัดเข้าด้วยกัน

δ คือ ความแตกต่างของรัศมีนอกของกระบอกในกับรัศมีในของกระบอกนอก

b คือ รัศมีโดยประมาณของกระบอกตรงจุดที่สัมผัสกัน(หลังจากอัดเข้าด้วยกัน)

b_o คือ รัศมีในของกระบอกนอก

b_i คือ รัศมีนอกของกระบอกใน

c คือ รัศมีนอกของกระบอกนอก

a คือ รัศมีในของกระบอกใน

σ_r คือ ความเค้นตามแนวรัศมี

σ_θ คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง

E_o คือ ค่ายังโมดูลัสวัสดุของกระบอกนอก

E_i คือ ค่ายังโมดูลัสวัสดุของกระบอกใน

μ_o คือ อัตราส่วนปัวซองของกระบอกนอก

μ_i คือ อัตราส่วนปัวซองของกระบอกใน

หลังจากอัดกระบอกเข้าด้วยกันแล้วกระบอกนอกจะยืดตัว ส่วนที่ยืดออกหาได้โดย

$$(u)_{r=b_o} = \frac{bp}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \mu_o \right) \quad (1)$$

ส่วนกระบอกในจะหดตัว ส่วนที่หดตัวหาได้จาก

$$(u)_{r=b_i} = -\frac{bp}{E_i} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \mu_i \right) \quad (2)$$

เนื่องจาก

$$(u)_{r=b_o} - (u)_{r=b_i} = \delta \quad (3)$$

ดังนั้น

$$\delta = \frac{bp}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \mu_o \right) + \frac{bp}{E_i} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \mu_i \right) \quad (4)$$

ถ้ากระบอกทั้งสองทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน $E_o = E_i = E$ และ $\mu_o = \mu_i = \mu$ เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$p = \frac{E\delta}{b} \left(\frac{(c^2 - b^2)(b^2 - a^2)}{2b^2(c^2 - a^2)} \right) \quad (5)$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการอัดกระบอกเข้าด้วยกัน (Prestresses) ที่ผนังของกระบอกในคือ

$$\sigma_r = -\frac{bp^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{bp^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (7)$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการอัดกระบอกเข้าด้วยกันที่ผนังด้านในของกระบอกนอก

$$\sigma_r = -\frac{bp^2}{c^2 - b^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta} = -\frac{bp^2}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (9)$$

ในการออกแบบจะใช้ความเค้นที่ผิวด้านในของกระบอกนอก ความเค้นเหล่านั้นคือ

$$\sigma_{\theta} = \frac{p(b^2 + c^2)}{c^2 - b^2}, \sigma_r = -p \quad (10)$$

และความเค้นเฉือนสูงสุดที่ผิวด้านในคือ

$$\tau_{\max} = \frac{pc^2}{c^2 - b^2} = \frac{E\alpha^2(b^2 - a^2)}{2b^3(c^2 - a^2)} \quad (11)$$

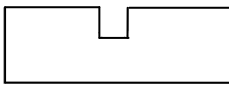
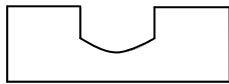
ถ้ากระบอกดังกล่าวมีความดันกระทำที่ผิวด้านใน ความดันที่ผนังของกระบอกทั้งหมดจะเท่ากับความเค้นเนื่องจากความดันที่ผิวด้านใน p_i และความเค้นที่เกิดจากการอัดกระบอกเข้าด้วยกัน

3. การดำเนินการวิจัย

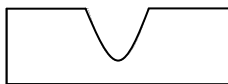
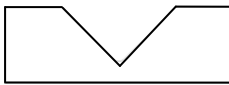
ศึกษารูปร่างการกลึงตรึงรอบตัวเรือนยัดซีลซึ่งมีรูปร่างการกลึงตรึง 5 รูปแบบ คือ Circular-Shaped Groove, Parabola-Shaped Groove, Square-Shaped Groove, U-Shaped Groove และ V-Shaped Groove เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวเรือนยัดซีลในกระบวนการอบตัวเรือนยัดซีล, ความเค้นและความแน่นในแนวเส้นรอบวงของตัวเรือนยัดซีลในกระบวนการประกอบแบบหดตัว(Shrink Fit)เข้ากับซีลวงแหวนหน้าสัมผัส



(ก) Circular-Shaped Groove (ข) U Shaped Groove

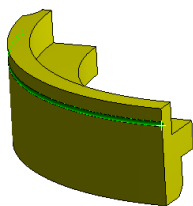


(ค) Square-Shaped Groove (ง) V-Shaped Groove



(จ) Parabola-Shaped Groove

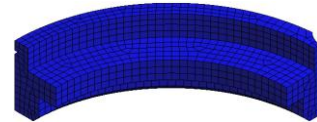
รูปที่ 4 รูปร่างการกลึงตรึง



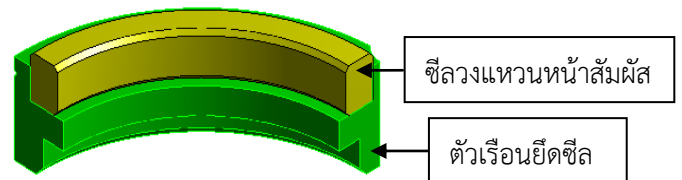
รูปที่ 3 ตำแหน่งการกลึงตรึงรอบตัวเรือนยัดซีล

3.1 การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อดำเนินการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการอบตัวเรือนยัดซีล แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์ 17,452 เอลิเมนต์ และความเค้นและความแน่นในแนวเส้นรอบวงของตัวเรือนยัดซีลในกระบวนการประกอบแบบหดตัวของตัวเรือนยัดซีลเข้ากับ ซีลวงแหวนหน้าสัมผัส แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์ 24,619 เอลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติและเนื่องจากรูปร่างของตัวเรือนยัดซีลและซีลวงแหวนหน้าสัมผัสมีความสมมาตร ดังนั้นจึงวิเคราะห์แบบจำลองเพียงหนึ่งในสี่ส่วนของแบบจำลองเพื่อลดจำนวนของเอลิเมนต์รวมทั้งเวลาในการวิเคราะห์



รูปที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวเรือนยัดซีล

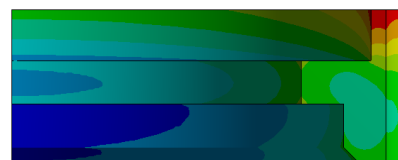


รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเค้นและความแน่นในแนวเส้นรอบวงของตัวเรือนยัดซีล

4. ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

4.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวเรือนยัดซีล



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของตัวเรือนยัดซีล

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับการอบตัวเรือนยัดซีลก่อนประกอบซีลวงแหวนหน้าสัมผัส การอบตัวเรือนยัดซีลจะอบที่

อุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอผลของอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 1

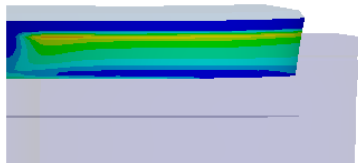
ตารางที่ 1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวเรือนยึดซีล

Groove Shaped	การกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวเรือนยึดซีลที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที	
	Max (°C)	Min (°C)
Circular	344.28	344.26
Parabola	341.23	341.14
Square	340.41	340.31
U	342.87	342.79
V	344.81	344.79

4.2 ผลความเค้นและความแน่นในแนวเส้นรอบวง



รูปที่ 7 ความเค้นรอบตัวเรือนยึดซีล



รูปที่ 8 ความแน่นระหว่างผิวสัมผัสของตัวเรือนยึดซีลกับซีลวงแหวนหน้าสัมผัส

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปร่างการกลึงเครื่องรอบตัวเรือนยึดซีลที่มีผลต่อความเค้นและความแน่นของการประกอบตัวเรือนยึดซีลเข้ากับซีลวงแหวนหน้าสัมผัส รูปแบบ Parabola-Shaped Groove ให้ค่าความเค้นน้อยที่สุด ส่วนรูปแบบ Circular-Shaped Groove ให้ค่าความแน่นที่มากที่สุด แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเค้นและความแน่นในแนวเส้นรอบวงของตัวเรือนยึดซีล

Groove Shaped	ความเค้น (MPa)		ความแน่น (MPa)
	Max	Min	Max
Circular	232.88	3.5568	50.523
Parabola	228.45	3.3235	47.562
Square	333.98	5.1913	44.586
U	244.59	2.6188	46.638
V	246.06	2.3599	47.520

5.สรุป

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองตัวเรือนยึดซีลและซีลวงแหวนหน้าสัมผัสเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเค้นและความแน่นในแนวเส้นรอบวงโดยการกำหนดรูปร่างการกลึงเครื่องรอบตัวเรือนยึดซีลที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ผลจากการวิเคราะห์พบว่ารูปร่างการกลึงเครื่องรอบตัวเรือนยึดซีลแบบ Circular-Shaped Groove และ Parabola-Shaped Groove ยังส่งผลให้การกระจายความเค้นและความแน่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างตัวเรือนยึดซีลกับซีลวงแหวนหน้าสัมผัสมีความสม่ำเสมอเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] H.Y. Kim , C. Kim , W.B. Bae , S.M. Han , Development of optimization technique of warm shrink fitting process for automotive transmission parts (3D FE analysis) , Materials Processing Technology 187–188 (2007) 458–462
- [2] T. J. KIM , H. Y. KIM , B. C. HWANG , H. J. KANG and C. KIM , Improved method for analyzing automotive transmission parts (shaft/gear) manufactured using the warm shrink fitting process , Automotive Technology, Vol. 10, No. 5, pp. 611–618 (2009)
- [3] Y. Zhang , B. McClain , X.D. Fang , Design of interference fits via finite element method , Mechanical Sciences 2000;42:1835-1850
- [4] J. Karassik .et al. Pump handbook 2nd ed . New York . McGraw-Hill,c1986