

การหล่อลื่นของกาบรองลื่นเพลากลม แบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ด้วยน้ำมันถั่วเหลือง

Thermohydrodynamic Lubrication of Journal Bearing with Soybean-based Oil

มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และ อุทาน หนูจันทร์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนน ชลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 02-3269987 , โทรสาร 02-3269063

Mongkol Mongkolwongrojn and U-than Nujunkaew

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok 10520, Thailand

Tel: 02-3269987 , Fax 02-3269063

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอพฤติกรรมการทางสถิตยศาสตร์ของ Thermohydrodynamic journal bearing โดยใช้ น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ผสมกับสารเติมแต่ง ความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลืองหาได้จากการทดลอง โดยใช้ Power law model และสมการ เรย์โนลด์ กับ สมการ Adiabatic energy equation ได้ถูกประยุกต์ใช้ในการคำนวณแรงดันเพลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันถั่วเหลือง ผสมสารเติมแต่ง ผลการคำนวณเชิงตัวเลขได้แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมัน และการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน

Abstract

This paper presented the static characteristic of thermohydrodynamic journal bearing with soybean-based oil. The non-Newtonian soybean-based oil was mixed with additive. The relationship between shear stress and shear strain rate of the soybean-based oil can be obtained and can be expressed as experimentally the power-law model. Reynolds equation and adiabatic energy equation were formulated to calculate the static characteristic of journal bearing with soybean-based oil. Numerical results show the oil film pressure distribution and temperature distribution.

1. บทนำ

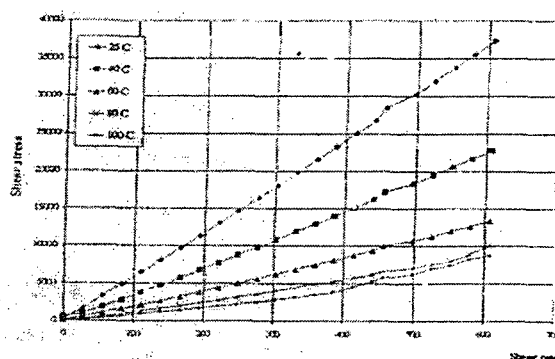
เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทาน และความร้อนจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่น ซึ่งในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่จะเป็นน้ำมันแร่ นับวันยังมีราคาแพงมากขึ้น ซึ่งในบทความนี้จะได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งจะมีราคาถูกกว่าและไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายความดันและการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันถั่วเหลือง ที่นำมา

ใช้เป็นสารหล่อลื่นโดยการเติมสารเติมแต่ง เพื่อไม่ให้ความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ได้

2. ทฤษฎี

2.1 Flow Characteristic ของน้ำมันถั่วเหลือง

ในบทความนี้ได้ใช้น้ำมันถั่วเหลืองผสมสารเติมแต่งที่เป็น polyisobutylene 4% และ silicone oil 0.02% โดยนำหลัก Flow characteristic ของน้ำมันถั่วเหลืองได้มาจากการทดลองดังรูปที่ 1 โดยใช้ rotational rheometer according



Temperature, C	m	n	μ , mPa.s
25	46.862	1.043	60.723
40	23.916	1.071	36.686
60	11.975	1.094	21.100
80	5.744	1.145	13.760
100	0.587	1.497	11.730

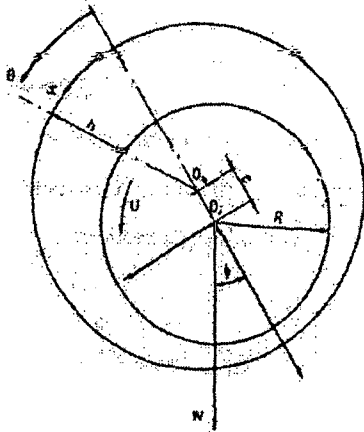
รูปที่ 1 Flow characteristic curve ของน้ำมันถั่วเหลือง
จากผลการทดลองเราทราบว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีพฤติกรรมเป็นของไหล non-Newtonian แบบ dilatant ซึ่งค่าระหว่าง shear stress และ shear

rate เป็น nonlinear ซึ่งเราสามารถประมาณการได้โดยใช้ power-law model

$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy} \quad (1)$$

ค่า m เป็นค่าของความหนืด, n เป็นค่าดัชนีของ power-law model, τ เป็นค่าความเค้นเฉือน และ du/dy เป็นค่าอัตราการเฉือน

2.2 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ (Modified Reynolds's equation)



รูปที่ 2 ทางเรขาคณิตของ การรองรับเส้นเพลากลม

ในกรณีที่เป็น 2 มิติ จากสมการที่ (1) จะได้

$$\mu = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (2a)$$

$$\tau_{yz} = m \left(\frac{dw}{dy} \right)^{n-1} \frac{dw}{dy} \quad (2b)$$

ค่า τ_{xy} และ ค่า τ_{yz} คือค่าความเค้นเฉือนในทิศทาง x และ ทิศทาง z ตามลำดับ ค่า u, w เป็นความเร็วในทิศทาง x และ z ตามลำดับจาก power-law model สำหรับ shear viscosity จะได้

$$\mu = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

จากสมการ Navier-Stokes ในทิศทาง x และ z

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (4b)$$

จากสมการที่ (1) ถึง (4) นำมาเขียนใหม่ได้เป็นสมการ modified Reynolds ดังสมการที่ (5)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{(u)^n}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5)$$

โดยมีสมการความหนาของฟิล์มน้ำมันเป็น

$$h = c(1 + \epsilon \cos \theta) \quad (6)$$

เขียนสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} x &= R\theta, & z &= \bar{z}L \\ h &= \bar{h}C, & P &= \left(\frac{mn(u)^n R}{C^{n+1}} \right) \bar{P} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

นำสมการที่ (7) แทนลงในสมการที่ (5) จะได้สมการ modified Reynolds ไร้มิติดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{h}^{n+2} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + n \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{h}^{n+2} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right) \\ &= \frac{6mn}{\mu} \left(\frac{U}{c} \right)^{n-1} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

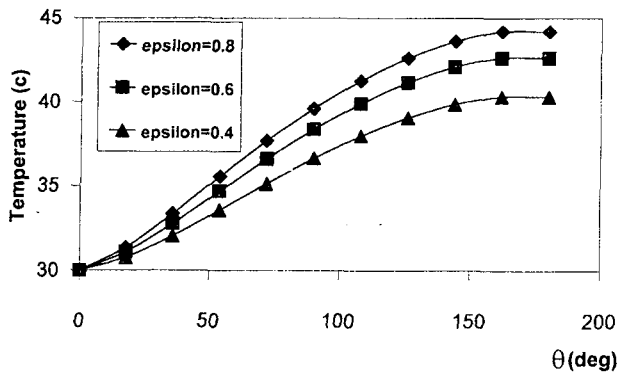
$$\begin{aligned} & \rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &= \tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (9)$$

k = heat conductivity coefficient

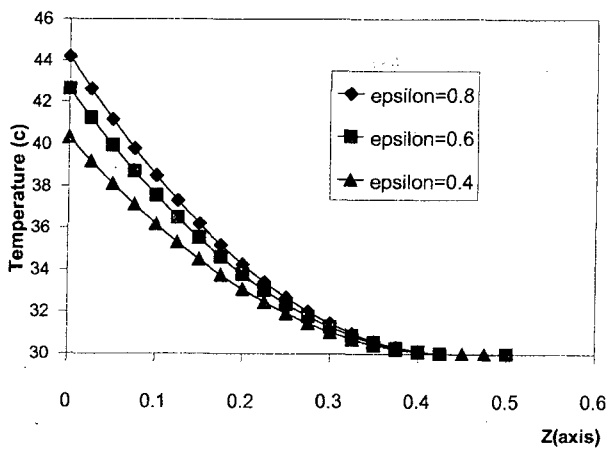
อินทิเกรตสมการที่ (10) ตลอดความหนาของฟิล์มน้ำมัน

4. ผลการคำนวณ

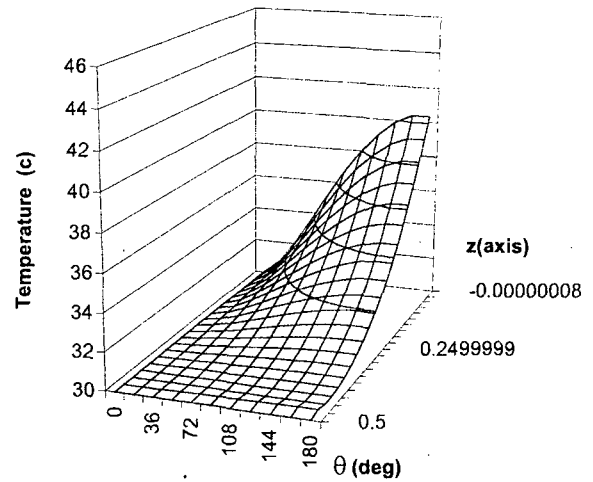
พฤติกรรมทางสถิติของกาบรอลเส้นเพลากลมด้วยน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสารเติมแต่ง ในการคำนวณได้กำหนด ความยาวของ กาบรอลเส้นเพลากลมเท่ากับ 150 mm และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกาบรอลเส้นเท่ากับ 50 mm และมีระยะ radial clearance ratio เท่ากับ 0.08 ให้ความเร็วรอบของเพลากับ 1000 rpm จะได้ผลดังนี้



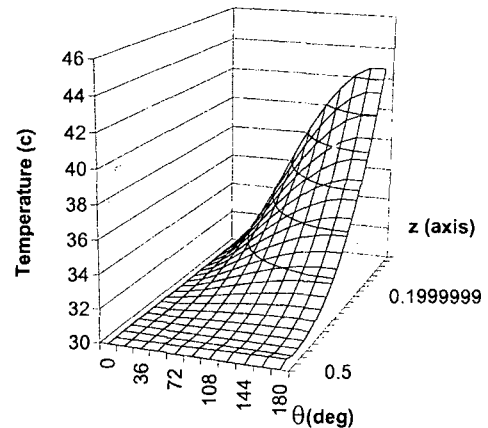
รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นในแนวแกน θ



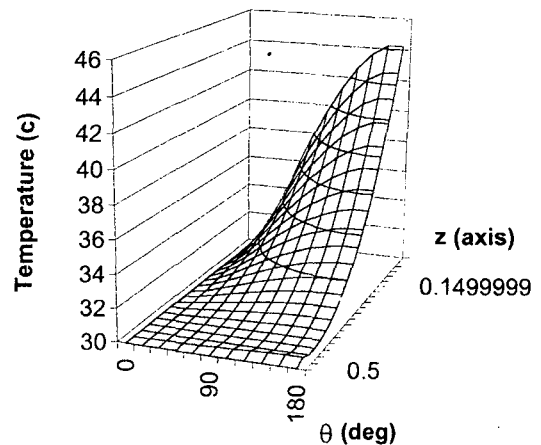
รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นในแนวแกน z



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ $\epsilon = 0.4$



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ $\epsilon = 0.6$



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ $\epsilon = 0.8$

$$\rho c_p \int_0^h \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) \quad (10)$$

$$= \int_0^h u \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy + \int_0^h w \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy$$

จากการอินทิเกรตสมการที่ (10) จะได้ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\int_0^h \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy = h \left(u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + w_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \frac{1}{h} \int_0^h u dy = \frac{u}{3} - \frac{h^{n+1}}{12\mu n-1} \frac{\partial p}{\partial x} \\ w_m &= \frac{1}{h} \int_0^h w dy = -\frac{h^{n+1}}{12\mu n-1} \frac{\partial p}{\partial z} \\ T_m &= \frac{1}{h} \int_0^h T dy \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ในกรณีที่ความเร็วสูงค่าการนำความร้อน (heat conduction) จากฟิล์ม น้ำมันไปยังเพลลา (journal) และผิวกบปเพลลา (bearing surface) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะเป็นไปตามข้อสมมุติว่าทั้งเพลลาและกบปรองล้นเป็น การหุ้มฉนวนโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0 \quad (13)$$

จากการสมดุลย์ของแรงในฟิล์มน้ำมันเราจะได้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

แทนสมการที่ (12) , (13) , (14) , (15) ลงในสมการที่ (11) จะได้

$$\rho c_p \left[\left(\frac{uh}{2} - \frac{h^{n+2}}{12\mu n-1} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial x} - \left(\frac{h^{n+2}}{12\mu n-1} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right] =$$

$$m \left(\frac{u}{c} \right)^{n-1} \left[\left(\frac{hu}{2} - \frac{h^{n+2}}{12\mu n-1} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{h^{n+2}}{12\mu n-1} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (15)$$

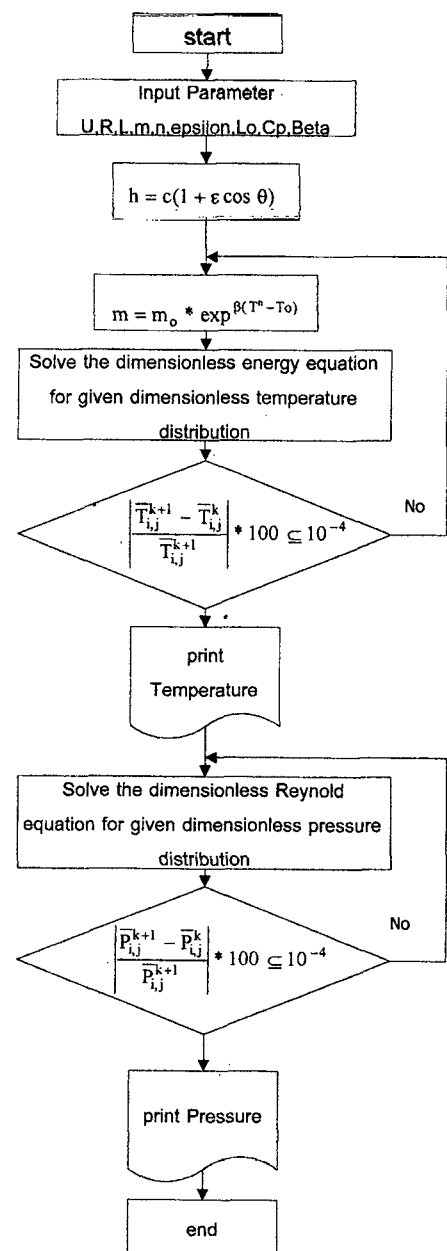
$$\frac{\bar{m}}{m_0} = \exp \left\{ -\beta(T - T_0) \right\} \quad (16)$$

$$\bar{T} = \beta(T - T_0)$$

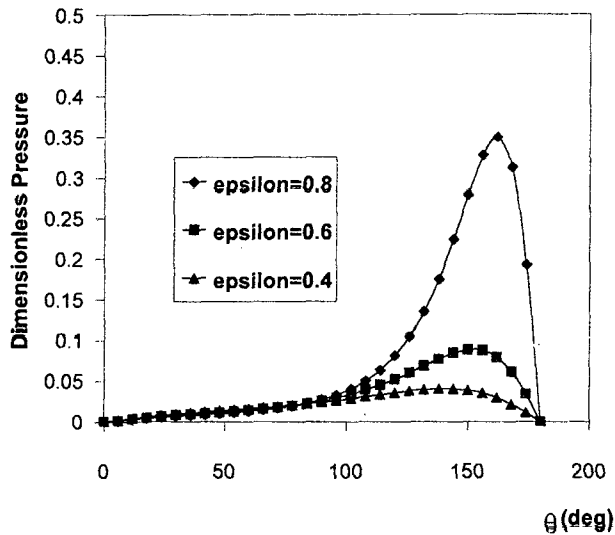
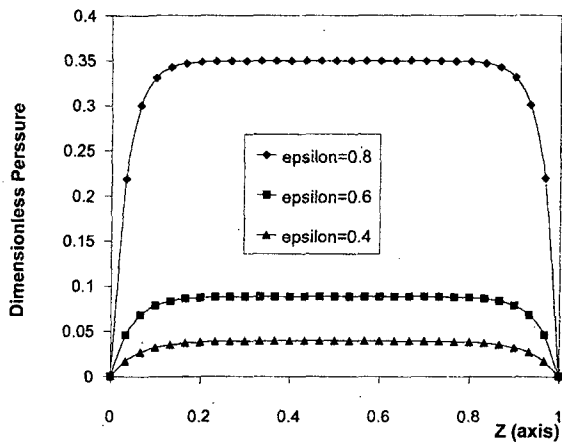
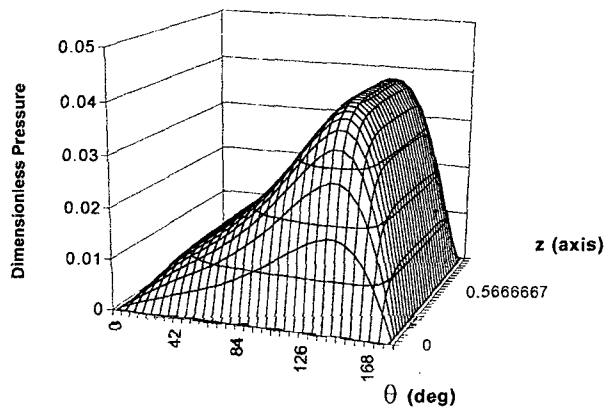
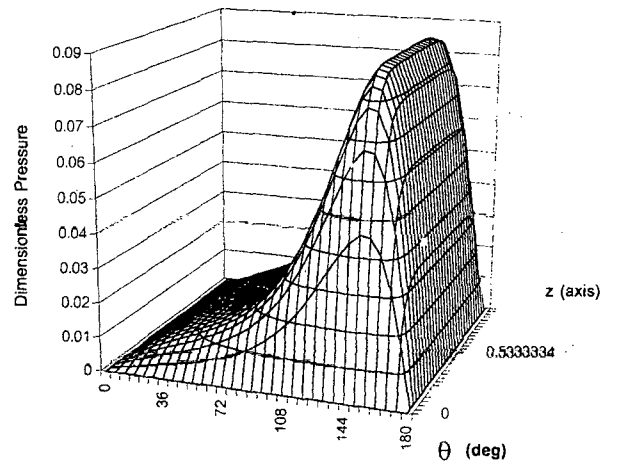
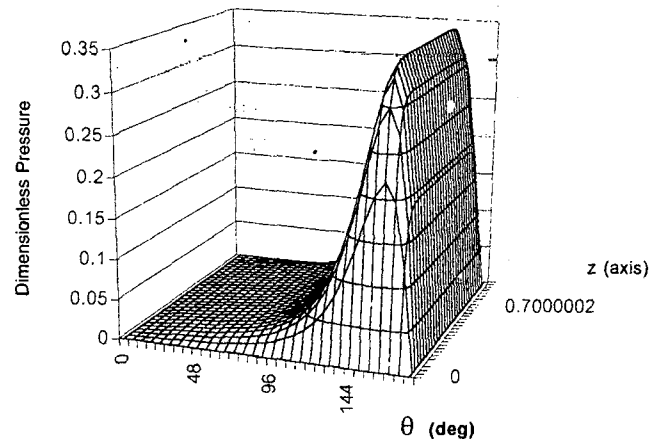
ในสมการที่ (17) คือตัวแปรไร้มิติ ค่า m เป็นค่าดัชนีความหนืด ค่า β เป็นค่าดัชนีของอุณหภูมิความหนืด m_0 จะเป็นค่า ดัชนีของความหนืด น้ำมันที่ทางเข้า และ T_0 เป็นอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้า

3.ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

จากสมการ modified Reynolds และสมการ energy equation ที่ เป็น dimensionless เราทำการคำนวณไปพร้อมๆกันโดยใช้วิธี finite difference ตาม flow chart ดังแสดงในรูปที่ 3 นี้



รูปที่ 3 flow chart แสดงการคำนวณ

รูปที่ 9 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันในแกน θ รูปที่ 10 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันในแกน z รูปที่ 11 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่ $\epsilon = 0.4$ รูปที่ 12 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่ $\epsilon = 0.6$ รูปที่ 13 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่ $\epsilon = 0.8$

จากรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่า ϵ หรือค่าอัตราการเยื้องศูนย์มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ยิ่งถ้าค่า ϵ มากค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันยิ่งสูงขึ้น ส่วนในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 13 จะเป็นค่าการกระจายของแรงดันน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและค่าอัตราการเยื้องศูนย์ (ϵ)

5.สรุป

การศึกษาพฤติกรรมของแบบรีંગเพลากลมแบบ Thermohydrodynamicหล่อลื่นด้วยน้ำมันถั่วเหลืองสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) น้ำมันถั่วเหลืองมีคุณสมบัติเป็นของไหล non-Newtonian สามารถเขียนสมการในรูปของ power-law model
- 2) การกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมันและการกระจายของอุณหภูมิ น้ำมันจะขึ้นต่อกัน แรงเสียดทานของน้ำมันทำให้เกิดความร้อนมีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำมันเปลี่ยนแปลง
- 3) อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีผลต่อแรงดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมัน

- 4) การกระจายอุณหภูมิและการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจะขึ้นกับค่าอัตราความเยื้องศูนย์กลาง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Conner,J.,Bayd,J.,Avallane E.A, " Standard Handbook of Lubrication Engineering" ,Mc-Graw Hill, New York, 1968.
- [2] Horowitz, H.H.,Steindler F.E.," The Calculated Journal Bearing Performance of Polymer Thickened Lubricants", ASLE Trans., Vol.3 No.1;1960
- [3] Horowitz, H.H.,Steindler F.E.," Calculated Performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearing", ASLE Trans.,Vol.4,1961.
- [4] Hashimoto, H., Wada, S., " The Effects of Fluid Inertia Forces in Parallel Circular Squeeze Film Bearings Lubricated with Pseudo-Plastic Fluid" ,ASME
- [5] Dien,Y.G. and Elrod,H.G.," A Generalized Steady State Reynolds Equation for the Non-Newtonian Fluid with Application to Journal Bearings", Transaction of the ASME Journal of Lubrication Technology, 1983,Vol.105.