

การศึกษาเชิงตัวเลขของสมรรถนะแบริงเพลากลมจากผลของค่าความยืดหยุ่น  
ความหยาบผิว และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$

NUMERICAL STUDY OF JOURNAL BEARING PERFORMANCE INFLUENCED  
BY ELASTIC MODULUS, SURFACE ROUGHNESS AND  $Al_2O_3$



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2566

KMITL 2023-EN-D-058-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY OF JOURNAL BEARING PERFORMANCE INFLUENCED  
BY ELASTIC MODULUS, SURFACE ROUGHNESS AND  $Al_2O_3$



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

KMITL 2023-EN-D-058-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงตัวเลขของสมรรถนะแบริงเพลากลม จากผลของค่าความยืดหยุ่น ความหยาบผิว และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$
ชื่อนักศึกษา	นางสาววสิพรรณ กันเนื่อง
รหัสประจำตัว	60601190
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. จิตรารภรณ์ วงศางาม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของค่าความยืดหยุ่นของแผ่นแบริง ความหยาบผิวแผ่นแบริง และสารหล่อลื่นเติมแต่งอนุภาค  $Al_2O_3$  ต่อสมรรถนะแบริงเพลากลม การกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นในแบริงเพลากลมคำนวณจากสมการเรย์โนลด์ และการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นคำนวณจากสมการพลังงาน โดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และหาค่าตอบด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ภายใต้เงื่อนไขการกระทำซ้ำมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน  $1 \times 10^{-6}$  เส้นทางการเคลื่อนที่ของศูนย์กลางเพลาคำนวณจากสมการการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น และหาค่าตอบเชิงตัวเลข ด้วยวิธีรุงเงอ-คุททออันดับสี่ ใช้โปรแกรมภาษาซี ในการคำนวณหาค่าคุณลักษณะของแบริงเพลากลม ผลการคำนวณพบว่าแบริงที่มีความหยาบผิวตามแนวยาว ส่งผลให้อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับภาระ และย่านเสถียรภาพของแบริงลดลง การใช้น้ำผสมสารเติมแต่งอนุภาค  $Al_2O_3$  2% ทำให้แบริงผิวหยาบตามยาวที่มีค่าแอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน อุณหภูมิลดลงร้อยละ 14.33 มุมแอททิจูดเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.78 อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาลดลงร้อยละ 1.14 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้น้ำที่ไม่เติม  $Al_2O_3$  ดังนั้นสารเติมแต่งอนุภาค  $Al_2O_3$  จึงส่งผลให้ย่านเสถียรภาพ และความสามารถในการรับภาระของแบริงผิวหยาบตามยาวสูงขึ้น แบริงที่มีค่าความยืดหยุ่นต่ำจะมีย่านเสถียรภาพ และความสามารถในการรับภาระต่ำกว่าแบริงที่มีค่าความยืดหยุ่นสูง เมื่อเปรียบเทียบ  $E = 5$  GPa และ  $E = 200$  GPa ภายใต้  $\epsilon = 0.8$  และ  $L/D = 1$   $E = 5$  GPa จะมีค่าความสามารถในการรับภาระต่ำกว่าร้อยละ 73.1 ค่าความดันน้อยกว่าร้อยละ 80.6 และค่าความหนาฟิล์มสูงกว่าร้อยละ 160.3 แบริงวัสดุนี้ช่วยทำให้ความดันลดลง ความหนาฟิล์มของไหลเพิ่มขึ้น จึงทำให้การสึกหรอน้อยลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบริงยาวนานขึ้น สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ช่วยทำให้ระบบเพลาลดลงและแบริงรับภาระได้สูงขึ้น ความเสียหายเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบเพลาลดลงและแบริงมีความเสถียรดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Numerical Study of Journal Bearing Performance Influenced by Elastic Modulus, Surface Roughness and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Student</b>	Miss Waleephan Gunnuang
<b>Student ID.</b>	60601190
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Jittraporn Wongsangam
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongroj

## ABSTRACT

This research aims to study the influence of elastic modulus, surface roughness, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the performance of journal bearings. The Reynolds equation and energy equation were formulated and numerically solved to determine the pressure and temperature of a fluid film lubricant by the finite difference method. The Gauss-Seidel method was utilized with convergence criteria equal to  $1 \times 10^{-6}$ . The journal trajectory was examined from the linear equation of motion by using the fourth-order Runge-Kutta method. The computer programs were developed in the C language to examine the performance characteristics of the journal bearings. The results show that longitudinal roughness increases the temperature and decreases both the load-carrying capacity and the stability region. For  $A_r = 4 \mu\text{m}$ , the use of water mixed with 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has a significant effect on the longitudinal roughness; the attitude angle increases by 1.78%, while the eccentricity ratio decreases by 1.14% compared to pure water. Therefore, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> significantly increases the load-carrying capacity and stability region of the longitudinal roughness. Compared to the high elastic modulus, the low elastic modulus reduced the load-carrying capacity and stability region. Compared to  $E = 200 \text{ GPa}$  at  $\epsilon = 0.8$  and  $L/D = 1$ , when  $E = 5 \text{ GPa}$ , the load-carrying capacity and pressure are reduced by 73.1% and 80.6%, respectively, while the minimum film thickness is increased by 160.3%. Soft bearings reduce the pressure while increasing the film thickness, which prevents bearing wear and extends bearing life. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> increases the load-carrying capacity and friction, which improves the stability of journal-bearing systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำจาก ผศ.ดร.จิตราภรณ์ วงศาغام และ ผศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและให้ข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน พลเรือตรีวัชรวิฑูรย์ เอี่ยมสะอาด และ พลเรือเอกวิรัชวัฒน์ วงษ์ดนตรี ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจกับข้าพเจ้าอย่างเสมอมา

ขอขอบคุณบุคลากร และเพื่อน ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่าน ที่ให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณบุคลากร และเพื่อน ในคณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่า และประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วลีพรรณ กั้นเนื่อง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	9
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.6 ผลการศึกษา.....	9
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.8 ขั้นตอนของการศึกษา.....	10
บทที่ 2 คุณสมบัติของแบริ่ง และสารหล่อลื่น.....	11
2.1 การแบ่งลักษณะผิวการสัมผัสของแบริ่ง.....	11
2.2 วัสดุแบริ่ง.....	12
2.2.1 การเปลี่ยนลักษณะยึดหยุ่น.....	12
2.3 การแบ่งลักษณะการหล่อลื่น.....	15
2.4 สารหล่อลื่น.....	17
2.4.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	17
2.4.2 น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐาน SAE.....	20
2.4.3 น้ำมันซิลิโคน.....	21
2.4.4 ความหนืด.....	22
2.5 สารเพิ่มคุณภาพสถานะของแข็ง.....	26
2.5.1 กราไฟต์.....	28
2.5.2 โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน.....	29
2.5.3 โมลิตินัมไดซัลไฟด์.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีการหล่อลื่นในเพลากลม.....	31
3.1 สมการเรย์โนลด์สำหรับของไหลที่มีแบบจำลองความหนืดคาโอ.....	31
3.2 การประยุกต์ใช้สมการเรย์โนลด์สำหรับแบริงเพลากลม.....	37
3.3 สมการพลังงานของสารหล่อลื่นในแบริงเพลากลม.....	39
3.4 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในแบริงเพลากลม.....	42
3.5 ความดันและอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของสารหล่อลื่น.....	44
3.6 ความดันและอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของสารหล่อลื่น.....	44
3.7 ค่าความสามารถในการรับภาระ.....	44
3.8 แรงเสียดทาน.....	45
3.9 ทฤษฎีการคำนวณแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลາเอียง.....	46
3.9.1 สมการความหนาของฟิล์มของแบริงเพลากลมที่มีการวางแนว ของเพลาเอียง.....	46
3.10 ทฤษฎีสารเติมแต่งอนุภาคนาโนในแบริงเพลากลม.....	47
3.10.1 ลักษณะทางกายภาพของนาโนฟลูอิดสำหรับสารหล่อลื่นน้ำมัน.....	47
3.10.2 สมการการคำนวณการเติมอนุภาคนาโนในแบริงเพลากลม.....	48
3.10.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ.....	48
3.11 ทฤษฎีการคำนวณผลของค่าความยืดหยุ่น.....	48
3.11.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความหนืด-ความดัน-อุณหภูมิ.....	48
3.11.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น-ความดัน-อุณหภูมิ.....	49
3.11.3 สมการความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อพิจารณาผลของค่าความยืดหยุ่น.....	49
3.12 การแก้สมการเรย์โนลด์สำหรับแบริงเพลากลม.....	49
3.13 การแก้สมการพลังงานสำหรับแบริงเพลากลม.....	51
3.14 การคำนวณเสถียรภาพของเพลา.....	52
บทที่ 4 ผลการคำนวณ.....	57
4.1 ผลของการวางแนวเพลาเอียงของแบริงเพลากลม.....	57
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลม และสารหล่อลื่น.....	57
4.1.2 ผลการคำนวณ.....	58

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบร็งเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแบบนิวโตเนียน.....	71
4.2.1	สมบัติของแบร็งเพลากลม และสารหล่อลื่นนิวโตเนียน.....	71
4.2.2	ผลการคำนวณ.....	73
4.3	ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบร็งเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นแบบน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน.....	79
4.3.1	สมบัติของแบร็งเพลากลม และสารหล่อลื่นนอน-นิวโตเนียน.....	79
4.3.2	ผลการคำนวณ.....	80
4.4	ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบร็งเพลากลมผิวหยาบ เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำ.....	84
4.4.1	ลักษณะทางกายภาพของแบร็งเพลากลม และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ .....	84
4.4.2	ผลการคำนวณ.....	85
4.4.3	ผลการคำนวณเส้นทางเดินของศูนย์กลางเพลาสําหรับแบร็งผิวหยาบ.....	106
4.5	ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อแบร็งเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน.....	114
4.5.1	สมบัติของแบร็งเพลากลม และสารหล่อลื่น.....	115
4.5.2	ผลการคำนวณ.....	116
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย.....	134
5.1	สรุปผลแบร็งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลາเอียง.....	134
5.2	สรุปผลสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบร็งเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมัน.....	135
5.3	สรุปผลสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบร็งเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำ.....	136
5.4	สรุปผลค่าความยืดหยุ่นต่อแบร็งเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน.....	138
5.5	ข้อเสนอแนะ.....	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม.....	142
ภาคผนวก ก.....	154
ภาคผนวก ข.....	155
ประวัติผู้เขียน.....	190



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของวัสดุแบร็ง	14
2.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม (น้ำมันแร่) ที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน	19
2.3 สมบัติของน้ำมัน SAE 10W50	26
2.4 สารหล่อลื่นของแข็งที่มีใช้ทั่วไป	27
2.5 สมบัติบางประการของเซรามิกส์ที่นิยมใช้ในด้านโทรโบโลยี	30
4.1 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลม	58
4.2 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน	58
4.3 ผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร็ง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าความสามารถในการรับภาระของแบร็งเพลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบร็งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียงโดยมีมุมเอียงเท่ากับ $45^\circ$ ( $\alpha = 45^\circ$ )	62
4.4 ผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร็ง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแบร็งเพลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบร็งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียงโดยมีมุมเอียงเท่ากับ $45^\circ$ ( $\alpha = 45^\circ$ )	63
4.5 ผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร็ง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าพารามิเตอร์มวลของแบร็งเพลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบร็งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียงโดยมีมุมเอียงเท่ากับ $45^\circ$ ( $\alpha = 45^\circ$ )	63
4.6 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลม เมื่อเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ในสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน	72
4.7 สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$	72
4.8 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน	72
4.9 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลมเมื่อเติมอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ในสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน	79
4.10 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นนอน-นิวโตเนียน	80
4.11 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลม เมื่อเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ในสารหล่อลื่นของแบร็งเพลากลมโดยสารหล่อลื่นเป็นน้ำ	85

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 แสดงผลค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่าง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	88
4.13 แสดงผลค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่าง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	89
4.14 แสดงผลค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่าง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลง ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_n$ ) ที่ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน.....	90
4.15 แสดงผลค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	91
4.16 แสดงผลค่ามุมเอททิจูด ( $\Phi$ ) เปรียบเทียบระหว่าง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	92
4.17 แสดงผลค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน.....	93
4.18 แสดงผลค่าแรงเสียดทานแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน.....	95
4.19 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	98
4.20 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\eta}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	98
4.21 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\eta\eta}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	99
4.22 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\eta\xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	99
4.23 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.24 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi v}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	102
4.25 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\eta v}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	103
4.26 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\nu \xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	103
4.27 แสดงผลค่าพารามิเตอร์มวลของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่าง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลง ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน.....	105
4.28 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลมในกรณีแบร็งที่มีความหยาบผิว.....	106
4.29 ผลการจำลองสำหรับความหยาบผิวแบบตามยาว ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1 และค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34.....	108
4.30 ผลการจำลองสำหรับความหยาบผิวแบบตามขวาง ที่อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 1 ค่าความสามารถในการรับภาระ แบบไร้มิติเท่ากับ 7.34.....	108
4.31 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลมกรณีผลของค่าความยืดหยุ่น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน.....	115
4.32 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นกรณีผลของค่าความยืดหยุ่น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน.....	115
4.33 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระ แบบไร้มิติ ( $W$ ).....	123
4.34 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แบบไร้มิติ.....	124
4.35 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด แบบไร้มิติ.....	125
4.36 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด แบบไร้มิติ.....	126

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.37 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด แบบไร้มิติ.....	127
4.38 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มวล เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เมื่อ $L/D=1$ .....	128
4.39 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย แบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )....	129
4.40 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระ แบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )....	130
4.41 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด แบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )....	131
4.42 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์ม สารหล่อลื่นแบบ ไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	132
4.43 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	133

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของแบริงตามลักษณะผิวการสัมผัสของแบริง	
(ก) ผิวแบบคงรูป (ข) ผิวแบบไม่คงรูป.....	11
2.2 แสดงตำแหน่งของอะตอม เมื่อ (ก) ก่อนมีแรงมากระทำ (ข) เมื่อมีแรงมากระทำ	
(ค) หลังการเปลี่ยนลักษณะยืดหยุ่นในช่วงของการยืดหยุ่น.....	12
2.3 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่อเลขซัมเมอร์เฟลด์	
(ก) การหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี (ข) การหล่อลื่นแบบผสม	
(ค) การหล่อลื่นแบบฟิล์มของไหล.....	15
2.4 รูปแสดงโครงสร้างทั่วไปของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานของน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม).....	18
2.5 แสดงชนิดของการจัดเรียงโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม)	
ประกอบด้วย (ก) พาราฟินแบบโซ่ตรง (ข) พาราฟินแบบโซ่กิ่ง (ค) แนพทีน	
(ง) แอโรแมติก.....	18
2.6 แสดงความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราเฉือนในฟิล์มของไหล.....	22
2.7 แสดงสมบัติของไหลแบบนิวโตเนียน และแบบนอน-นิวโตเนียน	
(ก) ความสัมพันธ์ของความหนืดกับอัตราเฉือน	
(ข) ความสัมพันธ์ของอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือน.....	23
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราความเครียดเฉือนของแบบจำลองฟลาวเวอร์ลอร์.....	24
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมัน SAE10W50	
ที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งมีลักษณะแบบจำลองความหนืดคาร์โอ.....	25
2.10 เปรียบเทียบแบบจำลองความหนืดฟลาวเวอร์ลอร์ และแบบจำลองความหนืดคาร์โอ.....	25
2.11 โครงสร้างของกราไฟต์.....	28
2.12 โครงสร้าง PTFE.....	29
2.13 โครงสร้างของโมลิตินีมไดซัลไฟด์.....	30
3.1 รูปแบบผิวหยาบตามขวางซึ่งขวางการไหลของสารหล่อลื่น.....	43
3.2 รูปแบบผิวหยาบตามยาวตามแนวการไหลของสารหล่อลื่น.....	43
3.3 แสดงลักษณะการวางแนวของเพลลาเอียงของแบริงเพลากลม.....	47
3.4 แสดงรูปของความสัมพันธ์ของผลต่างสลิปเนื่อง.....	49
3.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของแบริงเพลากลม.....	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริงเพลากลมที่เพลาดตรงศูนย์ (ไม่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m = 0$ ) และไม่มีมุมเอียง ( $\alpha = 0^\circ$ )) ทำงานภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	59
4.2 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริงเพลากลม แบบที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ( $D_m = 0.1, \alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงาน ภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.8.....	59
4.3 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริงเพลากลม แบบที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ( $D_m = 0.2, \alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงาน ภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.8.....	60
4.4 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริงเพลากลม แบบที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ( $D_m = 0.3, \alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงาน ภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.8.....	60
4.5 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริงเพลากลม แบบที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ( $D_m = 0.4, \alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงาน ภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.8.....	61
4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระของฟิล์มน้ำมัน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลากลมที่เพลาดตรงศูนย์ และแบริงเพลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	64
4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลากลมที่เพลาดตรงศูนย์ และแบริงเพลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	64
4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลากลม ที่เพลาดตรงศูนย์ และแบริงเพลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	65

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มต่ำสุด เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	65
4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลม ที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	66
4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\varepsilon\varepsilon}$ ) เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	66
4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\varepsilon\psi}$ ) เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	67
4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\varepsilon}$ ) เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	67
4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\psi}$ ) เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5 - 0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	68
4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\varepsilon\varepsilon}$ ) เมื่ออัตราส่วน ความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนว แกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	68

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไรริมิตี ( $B_{\varepsilon\nu}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	69
4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไรริมิตี ( $B_{\nu\varepsilon}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	69
4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไรริมิตี ( $B_{\nu\nu}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	70
4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ ).....	70
4.20 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อการกระจายของความดันของแบริงเพลลากลมเมื่อทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN.....	74
4.21 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อค่าของความดันสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ.....	75
4.22 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อการกระจายอุณหภูมิของแบริงเพลลากลมเมื่อทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN.....	75
4.23 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ค่าอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ.....	76
4.24 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อการกระจายความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นของแบริงเพลลากลม เมื่อทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN.....	76
4.25 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ.....	77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อค่าแรงเสียดทาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ.....	77
4.27 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ.....	78
4.28 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อค่ามุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ.....	78
4.29 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมัน ของแบริงเพลลากลม เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง เท่ากับ 0.87 ( $\varepsilon = 0.87$ ).....	82
4.30 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อความดันสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน ในแบริงเพลลากลม เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ).....	82
4.31 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อค่าความสามารถในการรับภาระ ในแบริงเพลลากลม เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ).....	83
4.32 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่ออุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน ในแบริงเพลลากลม เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ).....	83
4.33 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อความเสียดทานของฟิล์มน้ำมัน ในแบริงเพลลากลมเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง ของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ).....	84
4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ .....	88
4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ .....	89
4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติ ของฟิล์มสารหล่อลื่นเทียบกับค่าแอมพลิจูดของความหยาบผิว เมื่อสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ 2% และ 0%.....	90

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง เทียบกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ .....	91
4.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เทียบกับความเข้มข้น ของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ .....	92
4.39 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเทียบกับค่าแอมพลิจูด ของความหยาบผิว เมื่อสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ 2% และ 0%.....	93
4.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ .....	94
4.41 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงเสียดทานแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เทียบกับ ค่าแอมพลิจูดของความหยาบผิว เมื่อสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ 2% และ 0%.....	94
4.42 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $\eta$ ) $K_{\xi\xi}$ ( $\chi$ ) $K_{\xi w}$ เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ โดยแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน.....	96
4.43 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $\eta$ ) $K_{vw}$ ( $\chi$ ) $K_{v\xi}$ เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ โดยแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน.....	97
4.44 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $\eta$ ) $B_{\xi\xi}$ ( $\chi$ ) $B_{\xi w}$ เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ โดยแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน.....	100
4.45 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $\eta$ ) $B_{vw}$ ( $\chi$ ) $B_{v\xi}$ เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ โดยแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน.....	101
4.46 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลต่อความเข้มข้นของสารเติมแต่ง อนุภาคนาโน $Al_2O_3$ โดยมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน.....	104
4.47 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลต่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ที่ 2% และ 0%.....	104
4.48 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยาบผิวแบบตามยาว ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 5.7 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 และอัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยابผิวแบบตามขวาง ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.78 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	110
4.50 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยابผิวแบบตามยาว ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.0 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 6.12 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 2.....	111
4.51 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยابผิวแบบตามขวาง ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.0 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 6.12 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 2.....	112
4.52 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยابผิวแบบตามยาว ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 7.5 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 3.92 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.5.....	113
4.53 การเปรียบเทียบผลของการคำนวณการกระจายของความดันฟิล์ม เทียบกับผลของ Jain และคณะ [50].....	116
4.54 การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	123
4.55 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	124
4.56 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	125
4.57 การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	126
4.58 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.....	127

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มวลเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เมื่อ $L/D=1$ .....	128
4.60 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วน ความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	129
4.61 การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	130
4.62 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริง เท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	131
4.63 การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิต่ำสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	132
4.64 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ).....	133

## รายการสัญลักษณ์

$A_h$	แอมพลิจูดของความหยาบ (roughness amplitude, m)
$b$	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (N*s/m)
$B$	สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ (dimensionless damping coefficient), $B = \frac{cob}{w}$
$B_{\xi\xi}$	สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติตามแนวแกน $\xi$ , $B_{\xi\xi} = \frac{cob_{\xi\xi}}{w}$
$c$	รัศมีเคลียร์แรนซ์ (bearing radial clearance, m)
$c_j$	ความร้อนจำเพาะของน้ำมันหล่อลื่น (specific heat of lubricant, J/(kg*K))
$D_m$	องศาการเอียง (degree of misalignment)
$d_p$	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (m)
$e$	ระยะเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง (eccentricity of journal bearing, m)
$e'$	ระยะเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง มองจากระนาบกลาง กรณีเพลลามีการเอียง
$e'_{max}$	ระยะเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริงสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ มองจากระนาบกลาง กรณีเพลลามีการเอียง
$E$	ค่าความยืดหยุ่น (elastic modulus, Pa)
$F_{\xi}$	แรงในแนวตั้ง
$F_{\psi}$	แรงในแนวระนาบ
$F_{\Phi}$	แรงตั้งฉากเส้นวางตัว (fluid force component perpendicular to line of center, N)
$F_r$	แรงตามแนวเส้นวางตัว (fluid force component along line of center, N)
$F_{fric}$	แรงเสียดทาน (friction force, N)
$\bar{F}_{fric}$	แรงเสียดทานแบบไร้มิติ, $\bar{F}_{fric} = \frac{c}{\mu_0 U L r} F_{fric}$
$\bar{F}_{fric,c}$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ, $\bar{F}_{fric,c} = \frac{r}{c} \frac{F_{fric}}{w}$
$h$	ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น (m)
$\bar{h}$	ความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติ, $\bar{h} = \frac{h}{c}$
$I$	ค่ากำลังสองของอัตราความเครียดเฉือน (second invariant of the strain rate tensor, s <sup>-2</sup> )
$k$	สัมประสิทธิ์ของสปริง (N/m)
$K$	สัมประสิทธิ์ของสปริงแบบไร้มิติ, $K = \frac{ck}{w}$
$K_{\xi\xi}$	สัมประสิทธิ์ของสปริงแบบไร้มิติตามแนวแกน $\xi$ , $K_{\xi\xi} = \frac{ck_{\xi\xi}}{w}$
$k_j$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารหล่อลื่น, W/(m*K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$L$	ความกว้างของแบริง (bearing length along the axial axis , m)
$m$	มวลของเพลลา (kg)
$M$	มวลไร้มิติ, $M = \frac{mc\omega^2}{w}$
$\Omega^2 M$	พารามิเตอร์มวล (mass parameter)
$n$	ดัชนีเพาเวอร์ลอว์ (power-law exponent or flow behavior index)
$N$	ความเร็วรอบของเพลลา (rpm)
$p$	ความดัน (fluid film pressure, Pa)
$P$	ความดันแบบไร้มิติ
$r$	รัศมีของเพลลา (m)
$t$	เวลา (s)
$\bar{t}$	เวลาแบบไร้มิติ ( $\bar{t} = \omega_p t$ )
$T$	อุณหภูมิฟิล์มน้ำมัน (K)
$T_0$	อุณหภูมิอ้างอิง (313 K) (inlet fluid temperature)
$T_1$	อุณหภูมิของแผ่นแบริง (K)
$T_2$	อุณหภูมิของเพลลา (K)
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ยตามความหนาฟิล์ม, $T_m = \frac{1}{h} \int_0^h T dz$ , K
$\bar{T}$	อุณหภูมิแบบไร้มิติ, $\bar{T} = \frac{\rho C_p c^2}{\mu_0 \omega r^2} (T - T_0)$
$u$	ความเร็วของของไหลในแนวแกน $x$ (velocity of lubricant in x-direction , m/s)
$\bar{u}$	ความเร็วแบบไร้มิติของของไหลตามแนวแกน $x$ , $\bar{u} = \frac{u}{\bar{u}}$
$u_1$	ความเร็วของแผ่นรองเลื่อนตามแนวแกน $x$ (m/s)
$u_2$	ความเร็วของเพลลาตามแนวแกน $x$ (m/s)
$\bar{u}$	ความเร็วเฉลี่ยของเพลลากับแผ่นแบริง ตามแนวแกน $x$ , $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$ ,
$u_m$	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในแนวแกน $x$ , $u_m = \frac{1}{h} \int_0^h u dz$
$v$	ความเร็วของของไหลในแนวแกน $y$ (velocity of lubricant in y-direction, m/s)
$v_1$	ความเร็วของแผ่นรองเลื่อนตามแนวแกน $y$ (m/s)
$v_2$	ความเร็วของเพลลาตามแนวแกน $y$ (m/s)
$v_m$	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในแนวแกน $y$ , $v_m = \frac{1}{h} \int_0^h v dz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\tilde{v}$	ความเร็วเฉลี่ยของเพลากับแผ่นแบริง ตามแนวแกน $y$ , $\tilde{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$
$w$	ความเร็วของของไหลในแนวแกน $z$ (velocity of lubricant in z-direction, m/s)
$w_1$	ความเร็วของแผ่นรองลื่นตามแนวแกน $z$ (m/s)
$w_2$	ความเร็วของเพลตามแนวแกน $z$ (m/s)
$w$	ภาระโหลด หรือความสามารถในการรับภาระต่อหนึ่งหน่วยความยาวแบริง (N หรือ N/m)
$W$	ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ, $W = \frac{1}{\mu_0 UL} \left( \frac{c}{r} \right)^2 w$
$x$	โคออร์ดิเนตแกน $x$ (coordinate in x-direction), $x = \theta r$
$y$	โคออร์ดิเนต $y$ (coordinate in the axial direction)
$z$	โคออร์ดิเนต $z$ (coordinate across fluid film direction)

## อักษรกรีก

$\delta h_D$	ระยะการเสียดรูปของแบริงในช่วงยึดหยุ่น (m)
$\delta h_1$	ความหยาบของผิวแผ่นแบริง (m)
$\beta$	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ (1/K)
$\rho$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น (density of the lubricant, kg/m <sup>3</sup> )
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น ในรูปไร้มิติ, $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$
$\gamma$	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ (1/K)
$\omega$	ความเร็วเชิงมุมของเพล (angular velocity of journal, rad/s)
$\omega_p$	ความเร็วเชิงมุมของจุดศูนย์กลางกลางเพล (angular velocity of whirl, rad/s)
$\varepsilon$	อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลและแบริง (eccentricity ratio of journal bearing), $\varepsilon = e/c$
$\lambda$	ค่าคงที่เวลา (a characteristic relaxation time constant, s)
$\lambda_r$	ความยาวคลื่นของผิวหยาบ (wave length of roughness, m)
$\Omega$	อัตราส่วนการแกว่ง หรืออัตราส่วนความเร็วเชิงมุมของเพล (whirl ratio), $\Omega = \frac{\omega_p}{\omega}$
$\alpha$	มุมเอียง (angle of misalignment)

## อักษรกรีก (ต่อ)

$\theta$	มุมวัดจากแกน $\xi$ (rad), $\theta = x/r$
$\Phi$	มุมแอททิจูด หรือมุมวางตัวของเพลลา (attitude angle, rad)
$\mu_0$	ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนต่ำ (limiting low shear viscosity, Pa*s)
$\mu_\infty$	ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนสูง (limiting high shear viscosity, Pa*s)
$\mu_{eq}$	ความหนืดสมมูล (equivalent viscosity, Pa*s)
$\bar{\mu}^*$	ความหนืดแบบไร้มิติ, $\bar{\mu}^* = \frac{\mu^*}{\mu_0}$
$\bar{\eta}$	ความหนืดแบบไร้มิติ, $\bar{\eta} = \frac{\eta}{\mu_0}$
$\tau_{xx}$	ความเค้นเฉือนตามแนวแกน $x$ (component of shear stress in x-direction, Pa)
$\tau_{yy}$	ความเค้นเฉือนตามแนวแกน $y$ (component of shear stress in y-direction, Pa)
$\xi$	โคออร์ดิเนตแกนแนวตั้ง (coordinate in vertical direction)
$\psi$	โคออร์ดิเนตแกนแนวระดับ (coordinate in horizontal direction)
$\Delta\xi$	ระยะขจัดตามแนวแกน $\xi$
$\Delta\xi'$	ความเร็วที่ศูนย์กลางเพลลาตามแนวแกน $\xi$
$\Delta\psi$	ระยะขจัดตามแนวแกน $\psi$
$\Delta\psi'$	ความเร็วที่ศูนย์กลางเพลลาตามแนวแกน $\psi$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

เจอร์นัลแบริง (journal bearing) หรือ กาบรองลื่นเพลากลม เป็นแบริงเพื่อรองรับเพลากลม หรือเจอร์นัล การทำงานของแบริงเพลากลมนั้น จะมีช่องว่างที่เป็นชั้นของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยจะอยู่ระหว่างผิวของเพลากลม (journal) และแบริง (bearing) ชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเสียดสีกันระหว่างผิว (surface) ของเพลากลมและแบริง ในการทำงาน การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากการหมุนของเจอร์นัล หรือเพลากลม จะทำให้เกิดความดันที่เรียกว่า ความดันไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic) แรงที่เกิดขึ้นจะกระทำในตำแหน่งที่ผ่านตามแนวรัศมี โดยผ่านศูนย์กลางของเพลากลมและแบริง ในชั้นของฟิล์มของไหลนี้จะเกิดความเค้นเนื่องจากความหนืด ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวเพลลา ตัวอย่างของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกในแบริงเพลากลม เช่น แบริงเพลากลมที่ใช้รองรับการหมุนของเพลลา เช่น ใช้ในคอมเพรสเซอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปัม หรือใช้รองรับเพลลาข้อเหวี่ยงในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ซึ่งกรณีที่แกนของเพลากลมและแบริงวางแนวไม่ขนานกัน จะทำให้เกิดการเอียง การที่แกนเพลากลมเกิดการเอียง ทำให้การวางแนวของเพลลาเอียง หรือเกิดการเอียงของจุดศูนย์กลางของแนวแกนเพลากลม (misalignment) การที่แนวแกนเกิดการเอียงขึ้นในขณะที่กำลังทำงานนั้นจะส่งผลต่อความดันที่เกิดขึ้นในฟิล์มสารหล่อลื่น เนื่องจากความหนาของฟิล์มต่ำสุด เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเอียงของแนวแกน และส่งผลทำให้อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เช่น เพลลาแกว่งไปแกว่งมา ทำให้ส่งผลต่างๆ ตามมา เช่น ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง ทำให้เกิดการแตกหักเสียหาย เป็นต้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดของการวางแนวของเพลลาไม่อยู่ในเส้นตรงของแกนเพลากลม อาจเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น อาจเกิดมาจากการเอียงเนื่องจากการติดตั้ง อาจเกิดจากการที่ในขณะที่ทำงานมีการรับภาระแรงมากไป อาจเกิดจากน้ำหนักของเพลลา อาจเกิดจากการรับแรงกระทำที่เกิดจากการวางแนวของเพลลาไม่อยู่ในเส้นตรง ซึ่งทำให้เพลลาไม่สมดุล อาจเกิดจากการแกว่งในขณะที่กำลังทำงาน หรืออาจเกิดจากการทำงานที่ภาระโหลดสูงมาก ๆ อาจเกิดจากผลของความร้อนทำให้เกิดการผิดรูป (distortion) อาจเกิดจากกรรมวิธีการผลิตภายในโรงงานผลิตที่ไม่สามารถทำให้การวางแนวของเพลลาอยู่ในเส้นตรงได้ และอาจเกิดจากการหมุนของเพลลาในขณะที่ทำงาน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากชุดคัปปลิงของเพลลา (shaft coupling) ดังนั้นในการทำงานจริงทำให้ยากที่จะหลีกเลี่ยงการเอียง (misalignment)

การหล่อลื่นในงานวิจัยนี้ใช้สารหล่อลื่น 2 ประเภทหลักๆ คือ น้ำมัน และน้ำ การหล่อลื่นโดยใช้น้ำมันนั้นมีข้อเสีย คือ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาแพง ในขณะที่การใช้น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารหล่อลื่นนั้นไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัยต่อระบบนิเวศน์ [1-3] การออกแบบง่าย มีการสิ้นเปลืองต่ำ มีคุณสมบัติในการหล่อเย็น และมีความเสียดทานต่ำ [4] ดังนั้นการหล่อลื่นในปัจจุบันนี้จึงมีการใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำ [1, 5-8] มาใช้งานแทนการใช้น้ำมัน ซึ่งเป็นที่นิยมขึ้น [5] เพราะมีความปลอดภัย และหาได้ง่าย โดยเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ [9, 6] เช่น มีการใช้ในอุตสาหกรรมเรือที่ต้องคำนึงถึงมลภาวะทางทะเล และสิ่งแวดล้อมจากการที่เกิดการรั่วไหลของน้ำมันที่เกิดขึ้นจากระบบการขับเคลื่อนของเรือ หรือเรือดำน้ำ ปัจจุบันมีการทำวิจัยเชิงประจักษ์ที่หล่อลื่นด้วยน้ำ ซึ่งนิยมใช้ในระบบการขับเคลื่อนของเรือ มีการวิจัยพัฒนาการหล่อลื่นในแบริงรองรับเพลลาใบจักร (propeller shafts หรือ marine stern tube bearing) ในเรือเดินสมุทร ซึ่งใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำ [4, 10, 11] กอปรกับการเดินเรือต้องอยู่ภายใต้อนุสัญญาระหว่างประเทศว่าด้วยการป้องกันมลพิษจากเรือ (international convention for the prevention of pollution from ships; MARPOL) [12, 13] เนื่องจากต้องคำนึงถึงมลภาวะทางทะเลที่เกิดขึ้น เพราะว่าอาจจะส่งผลกระทบต่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) [14] นอกจากนี้การหล่อลื่นด้วยน้ำยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมด้านการจัดส่งสินค้า และมีการใช้ในโรงงานที่เกี่ยวข้องกับอาหารหรืออุตสาหกรรมทางการบริโภคอีกด้วย เนื่องจากคุณประโยชน์ในด้านความปลอดภัย

การใช้การหล่อลื่นด้วยน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับแรงไฮโดรไดนามิกที่เกิดขึ้นกับการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน นั้นพบว่าค่าของแรงไฮโดรไดนามิกที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่าการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน โดยการที่ค่าความหนืดของน้ำนั้นมีค่าน้อยกว่าจะส่งผลให้ค่าความหนาฟิล์มจึงมีค่าต่ำลงมาก ซึ่งการเติมสารเติมแต่ง หรืออนุภาคในสารหล่อลื่น (lubricant additives) จะทำให้ความเสียดทานที่ผิวภายใต้การทำงานที่ความเร็วต่ำมาก หรือสภาวะที่รับภาระสูงๆ ทำให้เกิดการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง งานวิจัยในปัจจุบันนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มสมรรถนะการหล่อลื่น เพื่อให้การหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นเป็นน้ำนั้นมีความสามารถในการรับภาระได้มากขึ้น [10]

สารเติมแต่งอนุภาค (lubricant additives) ถูกใช้ครั้งแรกในช่วงทศวรรษของปี ค.ศ. 1920 และเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น โดยมีขนาดของการเติมแตกต่างกันไปตามชนิดของการใช้งาน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อนุภาคนาโนชนิดอะลูมินา ( $Al_2O_3$  nanoparticles) เนื่องจาก  $Al_2O_3$  มีความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงมีค่าความเสถียรของรูปร่างสูง และยังมีคุณสมบัติต้านทานทางเคมีสูง รวมถึงมีความทนต่อความร้อน ซึ่งในงานวิจัยพบว่า  $Al_2O_3$  มีค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวสูงถึง 2,050 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงๆได้ (ระหว่าง 1,800-1,850 องศาเซลเซียส) ชนิดของเซรามิกส์ทางด้านไตรโบโลยี [15] แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ (ก) ประเภทมือออกไซด์ และ (ข) ไม่มีออกไซด์ แบ่งเป็นไนไตรด์ กับคาร์ไบด์ สำหรับเซรามิกส์ที่มีความแข็งแรงสูงมาก ได้แก่ เพชร และ คิวบิก โบรอนไนไตรด์ ซึ่งจะใช้ในงานแบบเฉพาะด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการหล่อลื่น สามารถทำได้ด้วยการเติมสารเติมแต่งในสารหล่อลื่น (lubricant additives) โดยวัตถุประสงค์หลักใหญ่ๆของการเติมสารเติมแต่ง คือ เพื่อเพิ่มความสามารถในการหล่อลื่น (lubricating capacity) และเพิ่มความทนทานในการหล่อลื่น (lubricating durability) [10, 15] โดยมีการศึกษาพัฒนามาตั้งแต่ช่วงทศวรรษ ค.ศ. 1940 เรื่อยมา จนถึงปัจจุบัน วัตถุประสงค์ในการเติมสารเติมแต่งมีหลายประการ เช่น เติมเพื่อช่วยปรับปรุงความเสียดทาน และต้านแวน (wear) เติมเพื่อป้องกันการเกิด stick-slips หรือ ที่เรียกว่า friction modifier [16, 17] เป็นการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส จึงมีการเติมสารเติมแต่งอนุภาค (additives) ลงไปในสารหล่อลื่น จะมีผลต่อความหนืด และความหนาแน่นของสารหล่อลื่น ในขณะที่แบริ่งเพลากลมทำงาน ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนลงไปในสารหล่อลื่นจะเป็นการป้องกันความเสียหาย ซึ่งส่งผลให้การแตกหัก หรือเกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ผิวมีค่าลดลง ในกรณีที่แบริ่งเพลากลมทำงานที่ภาวะโหลดสูง จะส่งผลให้ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงที่สุดมีค่าสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงขึ้นด้วย การเพิ่มสมรรถนะโดยสารเติมแต่งอนุภาคนาโน (nanoparticle additives) ลงไปในสารหล่อลื่นนั้นจะช่วยลดอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เนื่องจากคุณสมบัติของอนุภาคนาโนที่ดีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเย็นลงได้อย่างรวดเร็ว และสารเติมแต่งอนุภาคนาโนจะทำให้ความหนาของฟิล์มของสารหล่อลื่นเพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้นอนุภาคนาโนนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับเป็นสารหล่อเย็น

เนื่องจากในกระบวนการผลิตไม่สามารถทำให้แบริ่งมีผิวเรียบสนิทได้ เมื่อแบริ่งเพลากลมทำงานภายใต้ภาวะโหลดสูงๆ หรือกรณีฟิล์มบาง ผลของความหยาบผิวแบริ่ง จะมีผลมากต่อสมรรถนะการหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลม ในการพิจารณาสมรรถนะการหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลม จะประกอบไปด้วย (ก) สมรรถนะทางด้านสถิติศาสตร์ เช่น ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริ่ง ( $\varepsilon$ ) มุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) แรงเสียดทาน ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ความสามารถในการรับโหลด ความหนาต่ำสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าของอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น และ (ข) สมรรถนะทางด้านพลศาสตร์ เช่น สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสปริง และสัมประสิทธิ์ความหน่วง ค่าพารามิเตอร์มวล หรือค่าความเสถียรในขณะที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริ่ง ( $\varepsilon$ ) สูง ๆ ในรูปของย่านเสถียรภาพของเพลลา ปัจจุบันนี้ แบริ่งเพลากลมส่วนใหญ่จะทำงานที่สภาวะการรับภาระสูง และความเร็วยิ่งสูง หากชนิดของสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียนจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นลดน้อยลง ซึ่งผลของ shear-thinning effect และผลความแข็งอ่อนของวัสดุแบริ่งนั้น ก็ส่งผลต่อสมรรถนะการหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลมเช่นเดียวกัน เมื่อระบบเพลลาและแบริ่งทำงานหนักมากไป ทำให้เกิดการผิดรูปเนื่องจากความร้อนหรือเกิดการเอียงของเพลลาได้ จึงได้ทำการพิจารณาผลของการเอียงเนื่องจากการรับภาระมากไปพร้อมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาสมรรถนะทางด้านสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ของแบริงเพลากลม พิจารณาผลของความยืดหยุ่นของวัสดุแบริง และผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโนอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ในสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำ และน้ำมัน เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของแบริงเพลากลม

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยทางการหล่อลื่นมีการพัฒนาจนปัจจุบันนี้ เริ่มจาก Osborne Reynolds (ช่วงปี ค.ศ. 1842-1912) [18] ซึ่งเป็นผู้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหล โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบความหนืดคงที่ (isoviscous) โดยในปี ค.ศ. 1886 นำเสนอสมการการกระจายของความดันต่อมาเกิดการพัฒนาด้านการหล่อลื่นอย่างมากจากการใช้สมการเรย์โนลด์เพื่อใช้คำนวณเชิงตัวเลขสำหรับหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก [19-23] ภายใต้สารหล่อลื่นเป็นแบบนิวโตเนียน มีผู้วิจัยศึกษาผลของการเปลี่ยนของความหนืดสารหล่อลื่นต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกในรูปของโมเดลต่างๆ [24, 25] ภายใต้สภาวะไอโซเทอร์มัล ในปี ค.ศ. 1966 Dyson และ Wilson [26] ได้นำเสนอพาวเวอร์ลอว์โมเดล (power law model) โดย Roeland [27] นำเสนอความสัมพันธ์ของความหนืด-อุณหภูมิ-ความดันของสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมัน ต่อมามีการศึกษาการหล่อลื่นโดยของไหลเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน Carreau [28] ได้นำเสนอแบบจำลองสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียนที่มีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน มีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อหาการกระจายของความดันโดยใช้สมการเรย์โนลด์สำหรับสารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน ซึ่งจะมีช่วงที่ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นลดลงตามคุณสมบัติของของไหลแบบนอน-นิวโตเนียน [29, 30] ซึ่งอุณหภูมิส่งผลทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นลดลง ดังนั้นผลของอุณหภูมิจึงมีผลต่อสมรรถนะของการหล่อลื่น ซึ่งในปี ค.ศ. 1975 Majumdar [31] แสดงผลการคำนวณสมการความดันควบคู่กับสมการพลังงานโดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ภายใต้สมมติฐานว่าเป็นกรณีแอดเดียแบติก โดยสรุปว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลงเมื่อพิจารณาอุณหภูมิร่วมด้วย ซึ่งความดันจะลดลงมากขึ้นเมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) สูงขึ้น Pinkus และ Bupara [32] ได้แสดงการคิดผลของการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยแสดงสมรรถนะของสถิตยศาสตร์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแบริงเพลากลมที่มีร่องและศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่อเพลลาที่มีการวางแนวของเพลลาไม่อยู่ในเส้นตรง ปี ค.ศ. 1980 WADA และคณะ [33] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการหล่อลื่นในแบริงเพลากลมเมื่อสารหล่อลื่นของไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าของเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิจึงส่งผลให้ความดัน และเลขซัมเมอร์เฟลด์ลดลง ในขณะที่ค่ามุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เพิ่มขึ้น และผลของอุณหภูมิจึงมีผลต่ออายุของเสถียรภาพ โดยเฉพาะที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ต่ำ ๆ ในปี ค.ศ. 1983 Dien และ Elrod [34]

ได้แสดงสมการสำหรับการหาค่าสมรรถนะของแบริงเพลากลม โดยใช้วิธีเพอร์เทอร์เบชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(perturbation method) ในการสร้างสมการเรย์โนลด์สำหรับสารหล่อลื่นของไหลนอน-นิวโตเนียน แบบพาวเวอร์ลอว์ Goenka และ Oh [35] ได้นำเสนอการวิเคราะห์การหล่อลื่นแบบฮิสเทโรติก ไดนามิกส์ โดยคิดผลของการเกิดคาวิตีชัน แสดงผลของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นโดยคิดการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา Bourgin และ Gay [36] Williams และ Symmons [37] พบว่าคุณสมบัติไดนามิกของฟิล์มสารหล่อลื่นมีผลทำให้ค่าความดัน ค่าความสามารถในการรับภาระ และค่าแรงเฉือนลดลง ในขณะที่มุมแอททิจูด ( $\phi$ ) ของเพลลาเพิ่มมากขึ้น โดยในปี ค.ศ. 1986 Khonsari และ Beaman [38] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ ซึ่งพิจารณาอุณหภูมิผสมของน้ำมันที่ป้อนเข้า (supply oil) กับอุณหภูมิที่ไหลตามแนวแบริง (recirculating oil) ในปี ค.ศ. 1987 Mitsui [39] แสดงผลของอุณหภูมิโดยพิจารณาการเกิดคาวิตีชัน ซึ่งอุณหภูมิผิวแบริงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วรอบของแบริงเพลลา และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนืดของสารหล่อลื่น ในขณะที่มีค่าลดลงตามค่าของอัตราส่วนเคลียร์เรนซ์ Buckholz [40, 41] Jiin-Yuh และคณะ [42] ใช้สมการของ Dien และ Elrod [34] เพื่อศึกษาผลของผลของการหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน ในแบริงเพลลา พบว่าเมื่อลดค่าดัชนีพาวเวอร์ลอว์จะทำให้ความดัน อุณหภูมิ ความสามารถรับภาระ และแรงเสียดทานลดลง แต่มุมแอททิจูด ( $\phi$ ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น Peiran และ Shizhu [24] ทำการแสดงผลของสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน โดยได้แสดงว่าผลของอุณหภูมิมีผลต่อการลดลงของความหนืดมากกว่าการที่น้ำมันมีคุณสมบัติไดนามิก โดยความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะลดลงอย่างมากในสถานะที่อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น มีนักวิจัยทำการศึกษาผลของการเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความยืดหยุ่น (elastic distortion) ในแบริงเพลลา [43-46] การเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่นหรือเกิดการยุบตัว (deformation) ในแบริงเพลลาจะมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะการทำงานของแบริงเพลลา เมื่อเข้าสู่สมดุล การเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่น หรือยุบตัว (deformation) จะส่งผลต่อการกระจายของความดัน และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ดังนั้นแบริงที่เกิดการยุบตัว (deformation) จะมีค่าความดันที่ต่ำกว่าแบริงที่ไม่เกิดการยุบตัว เมื่อความดันลดเพราะคุณสมบัติความยืดหยุ่น จะส่งผลต่อความหนาฟิล์ม ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) และค่าความหนืดของสารหล่อลื่น ในปี ค.ศ. 1996 Khonsari และคณะ [47] แสดงแผนภาพสำหรับทำนายค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิของเพลลา ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 Knight และ Barrett [48] แสดงการวิเคราะห์ความดันและอุณหภูมิ โดยใช้สมมติฐานว่าอุณหภูมิของฟิล์มหล่อลื่นตามความหนาฟิล์มมีรูปแบบเป็นสมการพาราโบลา เพื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มหล่อลื่นตามแนวรัศมีของแบริง

การออกแบบการคำนวณสำหรับแบริงเพลลานั้นตั้งสมมติฐานว่าเป็นการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก ซึ่งถ้าแบริงเพลลาทำงานที่สถานะในการรับภาระโหลดสูงๆ และมีคาร์ซีเคลียร์เรนซ์ต่ำ ๆ จะทำให้เป็นการหล่อลื่นแบบฮิสเทโรติกไดนามิกได้ มีผู้วิจัยศึกษาแบริงเพลลาภายใต้การหล่อลื่นแบบฮิสเทโรติกไดนามิกโดยพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยืดหยุ่น หรือการยุบตัว (deformation) ของผิวแบริง ดังนี้ Taylor และ o'Callaghan [49] Oh และ Huebner [45] Jain และคณะ [50] ได้แสดงวิธีการใช้ไฟไนต์อีเลเมนต์ (Finite Element) ในการแก้ปัญหาแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในแบริงเพลากลม Lahma และคณะ [51] Mokhiamer และคณะ [52] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าคุณลักษณะทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลากลมที่หล่อลื่นด้วยของไหลแบบนิวโตเนียนโดยคิดผลของคุณสมบัติยืดหยุ่น Oh และ Huebner [45] Jain และคณะ [50] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ผลของการยุบตัวของแบริง เมื่อใช้สารหล่อลื่นประเภท piezoviscous โดย Goenka และ Oh [35] Van der Tempel และคณะ [53] Majumdar และคณะ [54] Prabhakaran Nair และคณะ [43] Sharda และคณะ [46] ทำการหาค่าผลของการยุบตัวเนื่องจากความยืดหยุ่น (elastic deformation) ในแบริงเพลากลม ซึ่งสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่น หรือการยุบตัวของแบริงทำให้แบริงมีเสถียรภาพที่ไม่ดี โดยเฉพาะที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) มีค่ามากกว่า 0.8 และกรณีที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของสปริง (spring coefficient) ตามแนวรัศมีมีค่าลดลงอย่างมาก Lahmar และคณะ [55] Mokhiamer และคณะ [52] แสดงเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขในการหาคุณลักษณะทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลากลมแบบที่เป็นชั้น ๆ โดยสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน โดยทำการพิจารณาค่าผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่นของแบริง Bouyer และ Fillon [56] ทำการศึกษาค่าผลวิเคราะห์ผลของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก โดยแสดงว่าผลของสารหล่อลื่นแบบอัดตัวไม่ได้มีผลต่อสมรรถนะทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลากลม Kim และ Cho [57] แสดงโมเดลการไหลเฉื่อยโดยพิจารณาการเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่น (elastic deformation) ซึ่ง Drobrica และ คณะ [58] แสดงผลการคำนวณภายใต้หล่อลื่นแบบผสม (mixed lubrication) Bou-Saï d และ Ehret [59] ศึกษาผลของ shear-thinning ที่มีต่อความสามารถในการรับภาระโหลดแบบกระแทก โดยใช้แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์ พบว่าผลของสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียนจะลดความสามารถในการรับภาระโหลดของเจอร์นอลแบริง ทำให้เส้นทางเดินของเจอร์นอลแบริงมีการแกว่งตัวมากกว่าสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน ในปี ค.ศ. 2010 Mongkolwongroj และคณะ [60] แสดงสมการเรย์โนลด์ และสมการพลังงาน ภายใต้แอเดียแบติก สารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียนใช้โมเดลของคาโอ เพื่อใช้คำนวณสมรรถนะของแบริงเพลากลม โดยปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของแบริงเพลากลมอีกประการหนึ่ง คือ ผลของการวางแนวแกนเพลลาเอียง (misalignment) ซึ่งอาจจะเกิดการเอียงได้ในขณะที่ติดตั้ง ในขณะทำงาน หรืออาจเกิดจากผลของตัวแปรอื่น ๆ ของการรับภาระโหลดในขณะทำงาน จึงส่งผลให้เกิดการวางแนวของเพลลาไม่อยู่ในเส้นตรง (misalignment) [61, 62] ถ้าหากสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำ เช่น การหล่อลื่นที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำ [63, 64] อาจส่งผลต่อสมรรถนะของการทำงานด้วย ในการศึกษาวิจัยผลของการเอียงของแนวแกนเพลลาได้มีนักวิจัยทำการทดลองหาผลของการเอียงของแนวแกนเพลลา ในปี ค.ศ. 1932 MaKee และ McKee ทำการทดลองโดยพบว่าผลการเอียงมีผลต่อตำแหน่งที่เกิดขึ้นของค่าของความดันสูงสุด [65] Dubois และคณะ [66] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองหาค่าคุณสมบัติของการเอียงของแบริงเพลากลมแบบไฮโดรไดนามิก ซึ่งการกระจายของความดันฟิล์มที่เกิดขึ้นไม่สมมาตร และมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันสูงสุด Sharda และคณะ [67] ได้ทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากแบริงเพลากลมการวางแนวของเพล่าไม่อยู่ในเส้นตรง หรือมีการเอียงที่มีการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก Khonsari และคณะ [68] แสดงทฤษฎีการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกด้วยสารหล่อลื่นผสมของแข็ง Khonsari และคณะ [69] แสดงการใช้ทฤษฎีข้างต้นเพื่อแสดงพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก โดยสารหล่อลื่นผสมของแข็ง Guha [70] ทำการศึกษาลักษณะทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพล่าไม่อยู่ในเส้นตรง พิจารณาผลความหยาบผิวร่วมด้วย โดยปกติแล้วแบริงจะมีผิวหยาบ ซึ่งอาจจะมีผลต่อสมรรถนะของแบริงเมื่อรับภาระโหลดสูงๆ Sun และ Changlin [71] ทำการวิเคราะห์ผลของแบริงเพลากลมแบบแนวแกนเพล่าที่มีการวางแนวของเพล่าเอียง ซึ่งเกิดจากการเกิดการยุบตัว (deformation) Majumdar และ Ghosh [72] วิเคราะห์เสถียรภาพแบริงด้วยวิธีเพอร์เทอร์เบชัน (perturbation method) พบว่าถ้าผิวแบริงหยาบ และผิวเพล่าเรียบจะทำให้เสถียรภาพเจอร์นอลแบริงดีขึ้น Ramesh และ Majumda [73] ใช้วิธีนอน-ลิเนียร์เพื่อแสดงเสถียรภาพของแบริงผิวหยาบ Turaga และคณะ [74] Gururajan และ Prakash [75] ได้ทำการศึกษาผลของความหยาบที่มีต่อลักษณะการหล่อลื่นของเจอร์นอลแบริง

นักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาค้นคว้าผลของการเติมสารในสารหล่อลื่นต่อสมรรถนะของการหล่อลื่น ในปี ค.ศ.1989 Khonsari และคณะ [76] ได้นำเสนอทฤษฎีการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกด้วยสารหล่อลื่นแบบของไหลผสมของแข็ง โดยต่อมาในปี ค.ศ.1990 Khonsari และคณะ [77] ได้ใช้ทฤษฎีนี้ศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกด้วยของไหลผสมของแข็ง โดยสรุปว่าอนุภาคของสารหล่อลื่นแบบของแข็งจะทำให้ความหนาฟิล์มเพิ่มมากขึ้น และรับภาระโหลดได้มากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น ตามเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง Hua และ Khonsari [78] ได้ทำการวิจัยการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นของแข็งโดยการใช้โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ( $\text{MoS}_2$ ) ผสมกับเอทิลีนไกลคอล โดยสารผสมมีลักษณะคล้ายโคลน เมื่อใช้สารนี้เป็นสารหล่อลื่นจะช่วยลดความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน โดยใช้แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์

ในการวิจัยศึกษาสมรรถนะของแบริงเพลากลมด้วยสารเติมแต่งอนุภาคของแข็งนั้น ปัจจุบันงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่ nanofluids ซึ่งพบว่าการผสมสารเติมแต่งหรือสารเติมแต่งอนุภาคนาโนมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการของหล่อลื่น และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน โดยมีผู้วิจัยศึกษาหลากหลาย [79-85] และยังช่วยป้องกันการเกิดการสัมผัส (contact) ระหว่างผิว และเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของการหล่อลื่น เช่น ช่วยให้การรับภาระโหลดได้มากขึ้น ทำให้ความเสียดทานน้อยลง ในขณะทำงาน [86, 87] นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการเกิดการสึกกร่อน หรืออัตราแวร์ (wear rate) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้น้อยลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นที่ไม่ได้เติมอนุภาคของแข็ง [80][77] Ye และคณะ [87] แสดงผลของการผสมอนุภาคนาโนชนิด Nickel Oxythiomolybdate ( $\text{NiMoO}_2\text{S}_2$ ) และ Pentaerythritol tetraester (PETE) ในน้ำมันสังเคราะห์ โดยพบว่าดีต่อคุณสมบัติการหล่อลื่น ช่วยลดความเสียหายที่อุณหภูมิสูงกว่า  $300^\circ\text{C}$  [80] Mongkolwongroj และคณะ [88] ได้ทำการหาค่าของอุณหภูมิ ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นที่มีการผสมอนุภาค  $\text{MoS}_2$  ขนาดไมโครในช่วงของการสัมผัสภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระแบบฉับพลัน ภายใต้การหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน ซึ่งใช้แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์ โดยพิจารณาว่า  $\text{MoS}_2$  เป็นสารแขวนลอยในสารหล่อลื่น SAE 90 ช่วยลดค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น และสามารถรับภาระได้เพิ่มขึ้น Mongkolwongroj และ Sountaree [89] ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ซึ่งสารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน Mongkolwongroj และ Panichakorn [90] แสดงผลของอนุภาคขนาดไมโครสำหรับการหล่อลื่นในพื้นผิวตรง Peng และคณะ [84] ได้แสดงผลของอนุภาคนาโน  $\text{SiO}_2$  และ อนุภาคนาโนเพชร (diamond nanoparticles) ในพาราฟินเหลว โดยพบว่าทำให้มีคุณสมบัติต้านการแวร์ (anti-wear) และต้านการเสียดทาน (anti-friction) ดีกว่าพาราฟินเหลวบริสุทธิ์ Ngyen และคณะ [91, 92] แสดงสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในน้ำเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และพบว่าเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 6% โดยปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 40% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติม ซึ่ง Nanofluids มีผลต่อการปรับปรุงในด้านของคุณสมบัติทางความร้อน [93, 94, 85] Murshed และคณะ [95] พบว่าค่าการนำความร้อนและความหนืดของ Nanofluids เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโนมีค่าเพิ่มขึ้น Chadrusekar และคณะ [96] แสดงผลของ Nanofluids ที่เกิดจากสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในน้ำ พบว่าเมื่อทำการเติมอนุภาคที่ความเข้มข้น 0.33-5% โดยปริมาตร จะทำให้ค่าความหนืดของสารมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Yu และคณะ [97] ได้แสดงว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโนทำให้ค่าอัตราส่วนการนำความร้อนสูงขึ้น ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน Sheynoy และคณะ [98] ได้แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโนภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก โดยใช้น้ำมันเครื่อง API-SF ผสมกับอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  พบว่าสามารถรับภาระได้สูงขึ้น ช่วยลดความเสียหายลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมอนุภาคนาโน Wang และคณะ [99] ทำการหาผลของแบริงเพลากลมแบบการวางแนวของเพล่าเอียง และคิดผลของการเกิดการยุบตัวหรือการเปลี่ยนลักษณะยึดหยุ่น (deformation) ภายใต้การหล่อลื่นเป็นแบบผสมโดยไม่คิดผลของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากงานวิจัยพบว่าเมื่อผิวของแบรริงมีความหยาบจะส่งผลต่อสมรรถนะของแบรริงเพลากลม ซึ่งในขณะทำงานความหยาบผิวจะทำให้เกิดความดันเพิ่มสูงขึ้น บริเวณยอดแหลมของความหยาบ และอาจทำให้แบรริงเสียหายได้ ซึ่งการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะช่วยรับภาระโหลด และช่วยทำให้ความดันที่เพิ่มสูงนี้มีค่าลดลงได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาเสถียรภาพของแบรริงผิวเรียบและผิวหยาบ ผลของค่าความยืดหยุ่น และผลการวางแผนของเพลาด้าน โดยสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

- (1) การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ
- (2) ไม่คิดแรงน้ำหนักของของไหลและแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล
- (3) ไม่มีการสั่นไหลของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน
- (4) ความหนาของฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย
- (5) ไม่คิดถึงผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก
- (6) แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่างของความดันรวมทั้งไม่คิดความเร่งของของไหล
- (7) อนุภาคนาโนผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันกับสารหล่อลื่น

### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความยืดหยุ่น ความหยาบผิวแบรริง และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อสมรรถนะของระบบเพลาด้านและแบรริง

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาคุณลักษณะของแบรริงเพลากลม โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

- (1) สารหล่อลื่นเป็นน้ำมัน และน้ำ
- (2) สารหล่อลื่นน้ำมันเป็นนิวโตเนียน และแบบนอน-นิวโตเนียน
- (3) การวิจัยใช้วิธีจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 1.6 ผลการศึกษา

เสถียรภาพของแบรริงเพลากลมสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  การใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำผสมสารเติมแต่งอนุภาค  $Al_2O_3$  ทำให้แบรริงความสามารถรับภาระเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อายุเสถียรภาพของแบรริงเพลากลมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแบรริงที่มีผิวหยาบตามแนวยาว และเสถียรภาพของแบรริงเพลากลมสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มค่าความยืดหยุ่นของวัสดุแบรริง

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่ได้จากผลการศึกษา ทำให้ได้รับองค์ความรู้ใหม่ ดังนี้

(1) ผลของวัสดุ นีม จะช่วยเพิ่มความหนาฟิล์มของไหลระหว่างเพลลาและแบริง การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอุณหภูมิของฟิล์มของไหลจะขึ้นอยู่กับสภาวะในการทำงานของระบบเพลลาและแบริง เนื่องจากของไหลนอน-นิวโตเนียนมีค่าความหนืดแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการทำงาน

(2) ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโนจะมีผลช่วยทำให้ระบบเพลลา และแบริงมีความเสถียรดีขึ้น

## 1.8 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎี และขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงคุณสมบัติของแบริง และสารหล่อลื่น

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการหล่อลื่นในแบริงเพลลา กลม เพื่อหาการกระจายความดัน การกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน เสถียรภาพของแบริงเพลลา กลม ทฤษฎีการคำนวณสำหรับการแก้ปัญหาการหล่อลื่นในระบบเพลลาและแบริงซึ่งการวางแนวของเพลลาเอียง และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในแบริงเพลลา กลม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการคำนวณผลด้านสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ โดยพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันและน้ำ พิจารณาผลเนื่องจากผิวของแบริงมีความหยาบผิว ซึ่งความหยาบผิวแบ่งเป็น แบบตามยาว และแบบตามขวาง และผลของค่าความยืดหยุ่นต่อสมรรถนะของแบริงเพลลา กลม

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# สมบัติของแบริ่ง และสารหล่อลื่น

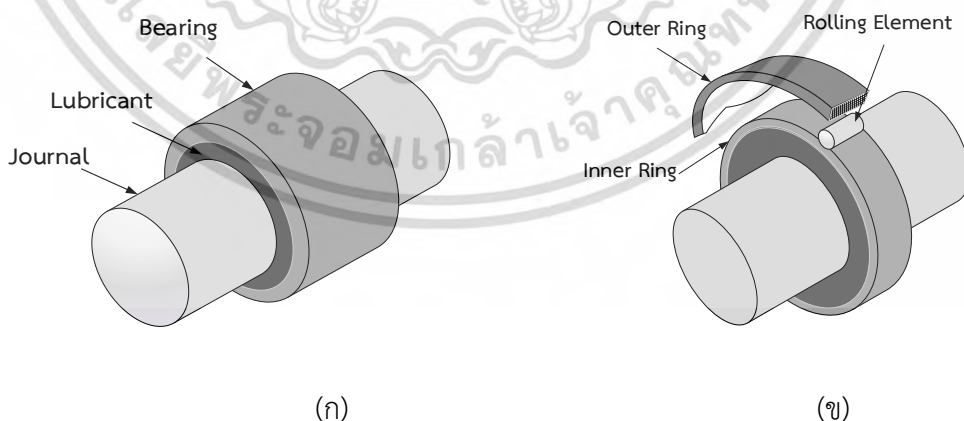
### 2.1 การแบ่งลักษณะผิวการสัมผัสของแบริ่ง

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุแบริ่ง คือ วัสดุที่ใช้ต้องมีค่าความเสียดทานน้อย มีอัตราการสึกหรอต่ำ และมีอายุการใช้งานยาวนาน นอกจากนี้ ในการเลือกวัสดุแบริ่งนั้น ยังต้องคำนึงถึงความจำเป็นของการใช้งาน คุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานที่ต้องใช้ เช่น ขนาด และน้ำหนัก ปัญหาในการติดตั้งหรือสามารถใช้งานร่วมกับวัสดุอื่นได้ และยังคงคำนึงถึงค่าใช้จ่าย เพื่อเลือกแบริ่งให้เหมาะสมที่สุดต่อการใช้งานในแต่ละประเภท [100, 101] เพื่อให้การทำงานของชิ้นส่วนของอุปกรณ์ หรือเครื่องจักรกลทำงานได้อย่างราบเรียบ และมีประสิทธิภาพ

ผิวสัมผัสทางกายภาพของแบริ่ง [100] แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

ก. ผิวการสัมผัสแบบคงรูป คือ พื้นผิวบนของตัวแบริ่งมีรูปร่างแนบชิดพอดีกับผิวล่าง เช่น แบริ่งเพลากลม พื้นผิวของเพลากลมจะแนบกับพื้นผิวของกบารองลื่น ถึงแม้ภาระจะเพิ่มขึ้นแต่พื้นที่ในการรับภาระยังคงที่เสมอ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\pi$  คูณกับรัศมีและความยาวของแบริ่ง โดยรูป 2.1 (ก) แสดงตัวอย่างลักษณะของผิวการสัมผัสแบริ่งแบบคงรูป

ข. ผิวการสัมผัสแบบไม่คงรูปพื้นผิวบนและล่างของแบริ่งจะไม่แนบชิดพอดีกับผิวล่าง ทำให้มีพื้นที่ในการหล่อลื่นเล็กกว่าผิวการสัมผัสแบบคงรูป เมื่อภาระเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่การหล่อลื่นระหว่างผิวบนและผิวล่างของแบริ่งเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างน้อยก็พื้นที่การหล่อลื่นแบบคงรูป เช่น โรลเลอร์แบริ่ง โดยรูป 2.1 (ข) แสดงตัวอย่างลักษณะของผิวการสัมผัสแบริ่งแบบไม่คงรูป



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของแบริ่งตามลักษณะผิวการสัมผัสของแบริ่ง (ก) ผิวแบบคงรูป (ข) ผิวแบบไม่คงรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วัสดุแข็ง

ประเภทของวัสดุแข็ง แบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ [100] ได้แก่ โลหะ เซรามิก โพลีเมอร์ และสารผสม

ก. โลหะ เป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี และแสงผ่านไม่ได้

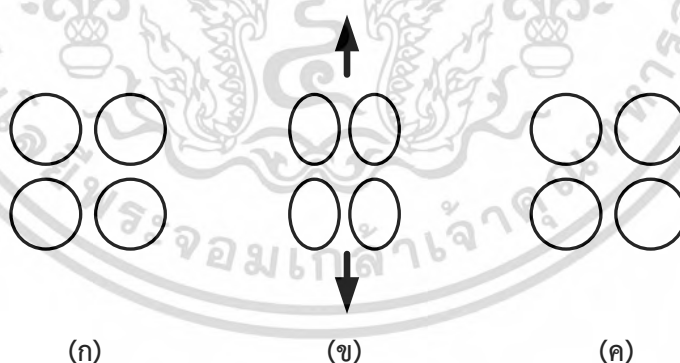
ข. เซรามิก ประกอบด้วยโลหะ และสารที่ไม่ใช่โลหะ เช่น ออกไซด์ ไนเตรด คาร์ไบด์ ตัวอย่าง ของเซรามิก เช่น ซีเมนต์ แก้ว ซึ่งเซรามิกเป็นวัสดุไม่นำไฟฟ้า และยังเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งมีความสามารถทนอุณหภูมิได้สูง มีความแข็ง แต่เปราะ

ค. โพลีเมอร์ เป็นสารที่มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน โดยมีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ มีค่าความหนาแน่นต่ำ และมีความยืดหยุ่นสูง ตัวอย่าง เช่น พลาสติก และยาง

ง. สารผสม เป็นสารที่ประกอบด้วยสารมากกว่า 1 ชนิด เช่น ไฟเบอร์กลาส ซึ่งประกอบด้วยสารประเภทเซรามิก และสารประเภทโพลีเมอร์รวมกัน ทำให้มีค่าสมบัติที่แข็งเหมือนแก้ว และมีความยืดหยุ่นเหมือนโพลีเมอร์

### 2.2.1 การเปลี่ยนลักษณะยืดหยุ่น (Elastic deformation)

การเปลี่ยนลักษณะยืดหยุ่น [102-104] มีการศึกษาพัฒนาโดยจากการทำการทดสอบชิ้นงานโดยให้แรงกระทำกับวัสดุโดยทำการทดสอบภายใต้การดึง ซึ่งการเปลี่ยนลักษณะยืดหยุ่นนี้เป็นกระบวนการผันกลับได้ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างอะตอมสามารถแสดง ดังรูปที่ 2.2 [102]



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของอะตอม เมื่อ (ก) ก่อนมีแรงมากระทำ (ข) เมื่อมีแรงมากระทำ (ค) หลังการเปลี่ยนลักษณะยืดหยุ่นในช่วงของการยืดหยุ่น [102]

ในการเปลี่ยนลักษณะการยืดหยุ่นนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่กระทำต่อวัสดุ โดยจะสัมพันธ์กับความเค้นที่เกิดขึ้น ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของวัสดุ หรือความสามารถในการดึง หรือยืดของวัสดุ โดยอาจถูกพิจารณาว่าเป็นค่าที่บอกถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็ง (stiffness) ของวัสดุในการที่จะต้านทานต่อการยุบตัว โดยจะมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงหรือกด โดยขนาดทางด้านข้างจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย คือเมื่อออกแรงดึงตามแนวแกนนอกจากจะทำให้เกิดความเค้น และความเครียดตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางแล้วยังทำให้เกิดความเค้นและความเครียดทางด้านข้างอีกด้วย S.D. Poisson ได้ทำการทดลองและให้นิยามของอัตราส่วนระหว่างระหว่างความเครียดตามแนวด้านข้างเทียบกับแนวแกน เรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ โดยตารางที่ 2.1 แสดงค่าสมบัติของวัสดุแบริงที่ใช้งานสำหรับการหล่อลื่น [101, 100, 105]

สมการความเค้นตามแนวแกน ( $\sigma$ ) และความเครียดตามแนวแกน ( $\epsilon$ ) [106, 15] แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ความเค้นตามแนวแกน

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

ความเครียดตามแนวแกน

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $P$  = แรงกระทำซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดที่แรงกระทำก่อนการทดสอบ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร ( $m^2$ )

$\Delta L$  = ความยาวที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น เมตร (m)

$L_0$  = ความยาวเดิม หรือความยาวก่อนการทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

สมการของส่วนที่เป็นเส้นตรงในแผนผังแสดงสมบัติของวัสดุซึ่งอยู่ในย่านยืดหยุ่นของแผนผังความเค้น-ความเครียด คือ กฎของฮุก ( Hooke's Law) ตามชื่อของโรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) [102, 106] ความชันของส่วนที่เป็นเส้นตรงนี้ คือ ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) แสดงดังสมการที่ 2.3

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.3)$$

อัตราส่วนระหว่างระหว่างความเครียดตามแนวด้านข้าง ( $\epsilon_{lat}$ ) เทียบกับแนวแกน ( $\epsilon_{long}$ ) เรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ [106, 100, 102] แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \tag{2.4}$$

ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุแข็ง [100, 101]

	Hardness	Density (g/cc)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Thermal conductivity (W/(m K)	Coefficient of expansion (10 <sup>6</sup> /°C)	Poisson ratio at 20°C
<b>Metals</b>							
Lead babbitt	21 B	10.1	69	29	24	25	-
Tin babbitt	25 B	7.4	79	52	55	23	-
Copper lead	25 B	9.0	55	52	290	20	-
Silver	25 B	10.5	160	76	410	20	-
Aluminum alloy	45 B	2.9	150	71	10	24	0.33
Lead bronze	60 B	8.9	230	97	47	18	0.33
Tin bronze	70B	8.8	310	110	50	18	0.33
Zinc alloy	95 B	5.1	320	79	125	26	0.27
Steel	150 B	7.8	520	210	50	12	0.30
Cast iron	180 B	7.2	240	160	52	10	0.26
<b>Porous metals</b>							
Bronze	40 B	6.4	120	11	29	16	0.22
Iron	50 B	6.1	170	97	28	10	0.22
Aluminum	55 RH	2.3	100	7	137	22	-
<b>Plastics</b>							
Acetal	94 RM	1.42	69	2.8	0.22	80	-
Nylon	79 RM	1.14	79	2.8	0.24	80	0.40
PTFE	60 SD	2.17	21	0.4	0.24	130	-
Phenolic	100 RM	1.36	69	6.9	0.28	28	-
Polyester	78 SD	1.45	59	2.3	0.19	95	-
Polyethylene, high density	69 SD	0.95	-	0.9	0.5	126	0.35
Polyimide	52 RE	1.43	73	3.2	0.43	50	-
<b>Ceramics</b>							
Alumina	1470 V	3.8	220	370	35	7.1	0.22
Silicon carbide	2460 V	3.3	500	430	85	4.5	0.14
Silicon nitride	1700 V	3.2	520	310	30	3.5	0.28
Tungsten carbide	91 RA	14.2	900	560	70	6	-
Zirconium oxide	1200 V	5.5	690	150	1.7	8	0.3
<b>Other nonmetallic</b>							
Carbon graphite	75 SS	1.7	14	14	9	3	-
Wood	-	0.68	8	12	0.19	5	-
Rubber	65 SA	1.2	10	0.04	0.16	77	0.50

Notes: B = Brinell, kg/ mm<sup>2</sup>; R = Rockwell, SD = Shore durometer, SS = Shore scleroscope, V = Vickers , kg/mm<sup>2</sup>.

Conversion factors: psi = MPa/ 6.895 × 10<sup>-6</sup>; kg/ mm<sup>2</sup> = MPa/10.

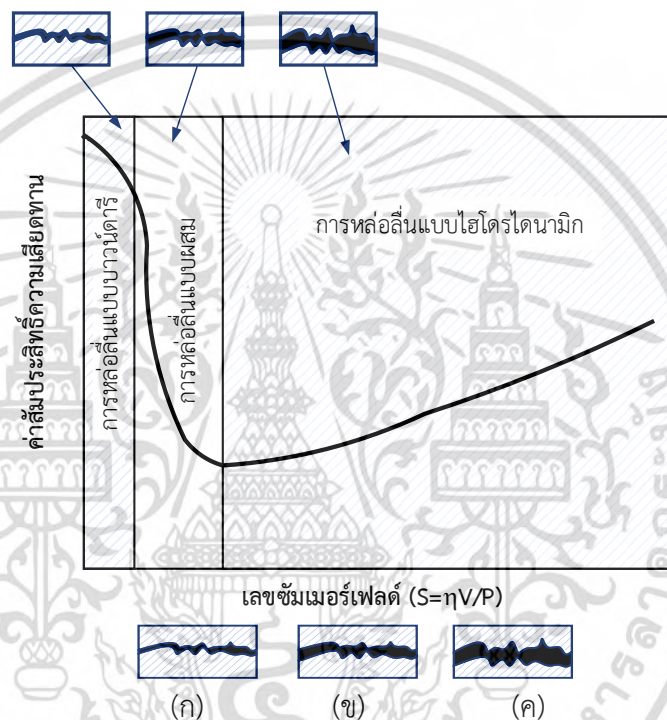
As a broad approximation for metals, hardness in kg/ mm<sup>2</sup> = 3×tensile yield strength in kg/ mm<sup>2</sup>.

Source: Ruff, 1977; Hamrock, 1994; misc. แหล่งที่มา: [105, 100, 101]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การแบ่งลักษณะการหล่อลื่น

การหล่อลื่นมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะลดความฝืด หรือความเสียดทาน หรือทำเพื่อควบคุมแรงเสียดทาน ช่วยลดการสึกหรอ และลดความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่มีการเสียดสีกัน ซึ่งปกติแล้วการหล่อลื่นทำได้โดยการใช้สารหล่อลื่นใส่เข้าไปอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่ทำงานเคลื่อนที่ เพื่อให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทำงานแบบราบรื่น และสามารถใช้งานได้ตามอายุการใช้งาน ในการเลือกสารหล่อลื่นจำเป็นต้องพิจารณาระยะห่างระหว่างผิวของชิ้นงาน ค่าแรงกระทำบนผิวของชิ้นงาน และคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ของผิวชิ้นงานในสภาวะการทำงาน [107]



รูปที่ 2.3 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่อเลขซิมเมอร์เฟลด์  
(ก) การหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี (ข) การหล่อลื่นแบบผสม (ค) การหล่อลื่นแบบฟิล์มของไหล

ภาพแสดงลักษณะของการหล่อลื่น ดังรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่อเลขซิมเมอร์เฟลด์  $S = \eta V / P$  [15] โดย  $\eta$  คือ ค่าความหนืด  $V$  คือ ค่าความเร็วสัมผัส และ  $P$  คือ ค่าแรงที่กระทำ เรียกโดยทั่วไปว่า stribek curve [108-110, 100, 111, 112] ใช้ชื่อตามชื่อของนักวิจัย Richard Stribeck [109] (คศ.1861-1950) ซึ่งทำการแบ่งการหล่อลื่นตามสภาวะความเสียดทาน โดยเริ่มจากเพลลาหยุดนิ่ง มีระยะห่างด้วยชั้นของโมเลกุลของฟิล์มสารหล่อลื่น เรียกว่า การหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกรณีนี้จะขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำเบร้ง รวมถึงความหยาบของผิว (อาจจะเกิดได้ในกรณีที่สารหล่อลื่นไม่เพียงพอ หรือมีความเร็วต่ำ ๆ) เมื่อความเร็วเพิ่ม จะเริ่มแบ่งชั้นฟิล์มบางโดยความหนาฟิล์ม ซึ่งจะเพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามความเร็ว แต่ค่าความเสียหายจะลดลงในช่วงเริ่มต้นของการหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์ และความเสียหายจะลดลงอย่างมากในช่วงของการหล่อลื่นแบบผสม เมื่อฟิล์มแยกชั้น โดยไม่มีการสัมผัสกันของเพลลา จะเป็นช่วงของการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา หรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก ซึ่งค่าความเสียหายจะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความหนืดของสารหล่อลื่น โดยค่าความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามค่าของความเร็ว

การแบ่งลักษณะของการหล่อลื่นสามารถแบ่งลักษณะการหล่อลื่น ได้เป็น 4 แบบ [100] คือ

(1) การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก พบมากในแบริงที่มีลักษณะเป็นแบบคงรูป ซึ่งฟิล์มสารหล่อลื่นหนามากพอที่จะป้องกันไม่ให้ผิวบน และผิวล่างสัมผัสกัน โดยที่ความเสียหายจากการหล่อลื่นเกิดจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในสารหล่อลื่นเท่านั้น โดยทั่วไปความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำกว่า 5 MPa ซึ่งไม่มีผลทำให้เกิดการยุบตัวของพื้นผิวแบริงได้ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นขึ้นกับความเร็วของแบริง ความหนืดของน้ำมัน และขนาดรัศมีของเพลลา

(2) การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก พบในแบริงแบบไม่คงรูป ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นยังมากพอที่จะป้องกันให้ผิวบน และผิวล่างของแบริงไม่สัมผัสกัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ วัสดุแบบนิ่ม และวัสดุแบบแข็ง

ก. การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของแบริงวัสดุแบบแข็ง คือ แบริงทำจากวัสดุที่เป็นโลหะที่แข็ง ซึ่งมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) สูง ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมาก โดยทั่วไปประมาณ 0.5 – 3 GPa จึงทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนตามค่าความดัน ความเสียหายจากการหล่อลื่นเกิดจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในสารหล่อลื่น เช่นเดียวกับกรณีของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก

ข. การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของแบริงวัสดุแบบนิ่ม คือแบริงมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ต่ำ คือ แม้ว่าจะมีภาระโหลดน้อย ก็จะทำให้เกิดการยุบตัวของผิวแบริงได้ง่าย การยุบตัวของผิวแบริงทำให้ความดันลงด้วย จึงทำให้ความหนืดสารหล่อลื่นเปลี่ยนไปเนื่องจากผลของความดันได้ไม่มากนัก

(3) การหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์ คือ ผิวบน และผิวล่างไม่ได้แยกจากกันด้วยสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นประมาณ 1-10 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารหล่อลื่น คุณสมบัติการหล่อลื่นขึ้นกับลักษณะกายภาพ และลักษณะทางเคมีของผิวสารหล่อลื่น ความเสียหายเกิดจากลักษณะของผิวโลหะ และผิวของฟิล์ม

(4) การหล่อลื่นแบบผสม เป็นช่วงระหว่างการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก และการหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์ กล่าวคือในการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ผิวบน และผิวล่าง

จะมีการสัมผัสกันบ้างบางส่วน ซึ่งในการวิเคราะห์การหล่อลื่นจึงต้องคำนึงถึงผลของสมบัติฟิล์มสารหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก และแบบบาวนด์รีพร้อมกัน [15]

## 2.4 สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น คือ สารที่ใช้สำหรับการหล่อลื่นชิ้นส่วนของอุปกรณ์ เครื่องยนต์ หรือเครื่องจักรกล อาจอยู่ในสถานะของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ ขึ้นอยู่กับการประยุกต์เพื่อนำไปใช้งาน สารหล่อลื่นที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในลักษณะของของเหลว [113, 100] เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว หรือไขข้น เช่นจาระบี เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียม โดยส่วนใหญ่ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้คือ น้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม) [18, 101] โดยขั้นตอนของการผลิตน้ำมันหล่อลื่น แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่ในนั้นมีหลายประเภท ประกอบไปด้วย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืช หรือสัตว์ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม) และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ ซึ่งอาจจะมีการเติมสารเติมแต่งบางอย่าง เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของงานแต่ละประเภท โดยแนวโน้มของการศึกษาวิจัยในอนาคตทางด้านของไตรโบโลยี [102] จะมุ่งไปเน้นที่กรีนไตรโบโลยี (green tribology) [114, 3] ซึ่งการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้นเป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมายในการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs)

### 2.4.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

#### 2.4.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืช หรือสัตว์

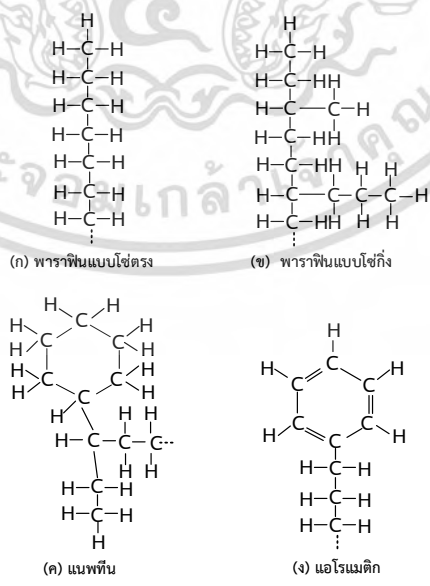
น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืช หรือสัตว์ มีความนิยมนิยมน้อย เนื่องจากมีค่าความคงตัวทางเคมีต่ำ ทำให้เสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะที่ใช้งาน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืช หรือสัตว์นั้นจะมีออกซิเจนรวมอยู่รวมกับไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงมีแนวโน้มรวมกับน้ำได้ง่ายกว่าน้ำมันแร่ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการออกซิเดชัน [3] ได้ระหว่างการหล่อลื่น โดยส่งผลทำให้ผิวของโลหะเป็นรอยสึกกร่อน และยังทำให้เกิดการเหนียว ทำให้เพิ่มการต้านทานต่อการเคลื่อนที่ แต่ก็สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ด้วยการเติมสารที่ต้านการเกิดออกซิเดชัน [15] ดังนั้นในการนำไปใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพ จึงทำให้ราคาค่อนข้างสูง ซึ่งจะใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันแร่ หรือน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความลื่นได้ ตัวอย่างของน้ำมันพื้นฐานจากพืช ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ตัวอย่างของน้ำมันจากไขของสัตว์ ได้แก่ น้ำมันหมู น้ำมันปลา และโลมา [102]

### 2.4.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม)

เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดี และราคาไม่แพง กระบวนการผลิตได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียม โดยเอาส่วนที่อยู่ด้านล่างของหอกกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อปรับปรุงคุณภาพเนื่องจากน้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ ปกติจะมีคุณภาพยังไม่ดีพอที่จะนำไปใช้ จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการขจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป เพื่อให้มีความคงตัวทางเคมี และความร้อน โดยน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาใช้ จะมีการแบ่งตามดัชนีของความหนืด โดยแบ่งเป็น ประเภทที่มีความหนืดสูง กลาง และต่ำ โดยประเภทความหนืดต่ำ จะมีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนอยู่ระหว่าง 250 (ประมาณ 18 คาร์บอนอะตอม) ซึ่งในประเภทที่มีความหนืดสูงอาจจะมีค่าของน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ถึง 1000 [115, 101] โดยลักษณะโครงสร้างทั่วไปของโมเลกุลของน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแสดงโครงสร้างทั่วไปของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานของน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม) [101]



รูปที่ 2.5 แสดงชนิดของการจัดเรียงโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม)

[80] ประกอบด้วย (ก) พาราฟินแบบโซ่ตรง (ข) พาราฟินแบบโซ่กิ่ง (ค) แนพทีน (ง) แอโรแมติก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม (น้ำมันแร่) ที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน จากพาราฟินิก	น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน จากแนพทีนิก	น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน จากแอโรแมติก
<ul style="list-style-type: none"> <li>• จุดวาบไฟสูง</li> <li>• การระเหยตัวต่ำ</li> <li>• รักษาสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี</li> <li>• จุดไหลเทสูง</li> <li>• ความถ่วงจำเพาะต่ำ</li> <li>• สมบัติการหล่อลื่นดี</li> <li>• เกิดไขได้ดี</li> <li>• ดัชนีความหนืดสูง</li> <li>• ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าแข็ง แต่หลุดร่อนได้ง่าย</li> <li>• โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยากมาก</li> <li>• ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง</li> <li>• ฟิล์มน้ำมันเหนียวและแข็งแรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• จุดวาบไฟต่ำ</li> <li>• การระเหยตัวต่ำ</li> <li>• จุดไหลเทต่ำ</li> <li>• รักษาสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร</li> <li>• ความถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี</li> <li>• สมบัติการหล่อลื่นต่ำ</li> <li>• ดัชนีความหนืดต่ำ</li> <li>• ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว</li> <li>• โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันดีเป็นบางส่วน</li> <li>• มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ความถ่วงจำเพาะสูง</li> <li>• จุดไหลเทต่ำมาก</li> <li>• สมบัติการหล่อลื่นไม่ดี</li> <li>• ไม่มีไข</li> <li>• โครงสร้างการจับตัวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร</li> <li>• มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันต่ำ</li> </ul>

ส่วนประกอบหลักของน้ำมันแร่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย พาราฟิน (paraffin) ที่มีการจัดเรียงโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบแบบโซ่ตรง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 (ก) หรืออาจการมีจัดเรียงโครงสร้างแบบโซ่กิ่งร่วมด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 (ข) ส่วนประกอบหลักต่อมา คือ แนพทีน (naphthene) จะมีลักษณะการเรียงโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบวงร่วมด้วย แสดงดังรูปที่ 2.5 (ค) และส่วนประกอบสุดท้าย ที่มีสัดส่วนค่อนข้างน้อยมาก คือ แอโรมาติก (aromatic) มีลักษณะการเรียงโครงสร้างของอะตอมคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.5 (ง) ซึ่งวงของอะตอมคาร์บอนมีทั้งพันธะเดี่ยว และพันธะคู่ ซึ่งถ้าจำนวนของอะตอมคาร์บอนในโซ่ของพาราฟินสูงกว่าจำนวนของคาร์บอนในวงของแนพทีนมาก จะเรียกน้ำมันนี้ว่าพาราฟินิก (paraffinic) แต่ถ้าสัดส่วนของจำนวนคาร์บอนในวงของแนพทีนมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย จะเรียกน้ำมันชนิดนี้ว่า แนพทีนิก (naphthenic) [102, 115] โดยจะมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ถ้าแบ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปิโตรเลียม หรือน้ำมันแร่ตามสมบัติพื้นฐานข้างต้น จะแบ่งเป็น 3 พื้นฐานหลัก [15] ด้วยกัน คือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพาราฟินิก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากแนพทินิก และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากแอโรแมติก โดยมีสมบัติแสดงดังตาราง 2.2 [116]

#### 2.4.1.3 น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันสังเคราะห์ (synthetic base oils) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่สูง จึงมีราคาค่อนข้างแพง โดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสำหรับงานพิเศษเฉพาะ เช่น มีดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น ในการแบ่งชนิดของน้ำมันสังเคราะห์ แบ่งเป็น 4 ประเภทหลักๆ ตามโครงสร้างทางเคมี [15] คือ โพลีโอลิฟิน (polyolefin) โพลีไกลคอล (polyglycol) ซิลิโคน (silicone) และ เอสเทอร์ (ester) ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้ [117, 116, 15] มีดังนี้

ก. โพลีแอลฟาโอลิฟิน (polyalphaolefin; PAO) เป็นสารที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นเพราะราคาถูก และสามารถผลิตได้ง่าย

ข. เอสเทอร์ (ester) ไดเอสเทอร์ (diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (complex ester) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความคงตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ ของเครื่องบินไอพ่น นอกจากนี้ ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) ยังใช้ทำน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

ค. โพลีไกลคอล (polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูง และมีจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ

ง. ซิลิโคน (silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ

จ. ฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน (halogenated hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon) หรือสารซีเอฟซี (CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจน เพราะมีความคงตัวทางเคมี และความร้อนดีมาก

ฉ. โพลีฟีนิลอีเทอร์ (polyphenyl ether) เป็นสารที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมาก ถึง 800 องศาเซลเซียส เช่น น้ำมันไฮดรอลิกในยานอวกาศ เนื่องจากมีความคงตัวทางความร้อนสูงมาก และมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์

#### 2.4.2 น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐาน SAE

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดเกรดเดี่ยว และชนิดเกรดรวม ซึ่งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับสภาพของงานแต่ละอย่าง ลักษณะที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิด [117] มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว SAE ได้เป็นผู้วางมาตรฐานเกี่ยวกับการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิด โดยสังเกตจากตัวเลขแสดงค่าความหนืด ถ้าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดต่ำ แสดงว่าความหนืดจะมีค่าน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดสูง เช่น น้ำมันหล่อลื่น SAE20 และ SAE50 คือ ที่อุณหภูมิเดียวกัน น้ำมันหล่อลื่น SAE50 จะมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE20

น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำกว่าเบอร์ที่แสดงไว้ หลัง SAE จะตามด้วยตัว W ซึ่งเป็นการแสดงการทดลองวัดความหนืดที่ 0 องศาฟาเรนไฮต์ (ในกรณีที่ไม่มี W จะทดสอบที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์) เช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE20 และน้ำมันเครื่องชนิด SAE20W แสดงว่า น้ำมันเครื่องชนิด SAE20W จะมีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE20 ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นชนิดที่มี W ตามท้ายมักจะใช้กับฤดูหนาว หรือในที่ที่มีอากาศเย็น เพื่อช่วยตอนสตาร์ทเครื่องยนต์ที่เย็น ตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นเกรดเดียวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ เช่น SAE5W SAE10W SAE20 SAE20W SAE30 SAE40 SAE50

ข. น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวม น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมนี้ อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว ดังนั้นจึงสามารถใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียวได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE10W50 คือ ที่อุณหภูมิ 0 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้ จะมีความหนืดเท่ากับน้ำมันเครื่องชนิด SAE10W แต่ที่อุณหภูมิ 210 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้ จะมีความหนืดเท่ากับน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE50 ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE10W50 สามารถใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นต่อไปนี้ได้ เช่น SAE10W SAE 20W SAE20 SAE30 SAE40 และ SAE50 เป็นต้น

สาเหตุที่น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมสามารถมีคุณสมบัติได้ดังกล่าวข้างต้น เพราะน้ำมันชนิดนี้ได้เติมสารประกอบบางอย่างลงไป ซึ่งเรียกว่า สารปรับปรุงค่าดัชนีความหนืด ซึ่งเป็นสารเคมีที่เรียกว่าโพลีเมอร์ โดยสารนี้จะเข้าไปรวมตัวกับบริเวณส่วนประกอบของโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน เพื่อจะฟอร์มตัวให้เป็นโมเลกุลที่ยาวมาก และตราบไต่ที่น้ำมันหล่อลื่น มีอุณหภูมิลดลง โมเลกุลที่เป็นสายยาวนี้จะคลายตัวออกไปปนกับโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นอีก โมเลกุลนี้ก็ยิ่งคลายออก ความหนืดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว

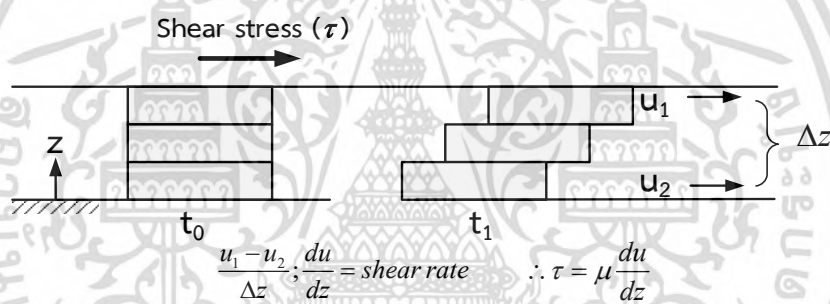
#### 2.4.3 น้ำมันซิลิโคน

ซิลิโคนเป็นน้ำมันใสคล้ายน้ำ เป็นสารสังเคราะห์จากการรวมตัวกันเป็นสายโซ่ของอะตอมซิลิกอน และอะตอมออกซิเจน พอลิไดเมทิลซิลิโคนที่ เป็นน้ำมันซิลิโคนตระกูลหนึ่งที่ใช้กันมาก มีเกรดความหนืดตั้งแต่ 5 cSt จนถึง 600,000 cSt ที่อุณหภูมิ 25°C คุณสมบัติเด่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำมันซิลิโคน [117, 15] คือ ความหนืดไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงสามารถใช้ได้ดีในกรณี ที่อุณหภูมิสูงและมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน

#### 2.4.4 ความหนืด

จากรูปที่ 2.3 ในช่วงของการหล่อลื่นแบบฟิล์มของไหล จะเห็นว่าความเสียดทาน เกิดจากฟิล์มสารหล่อลื่น โดยค่าความเสียดทานมีค่ามากขึ้นตามความเร็ว จะเห็นได้ว่าความเสียดทาน มีค่าขึ้นกับความหนืดของฟิล์มของไหล คือ ค่าความหนืดเป็นตัวชี้วัดความต้านทานของสารหล่อลื่น ต่อการไหล พิจารณารูปที่ 2.6 ทำการแบ่งชั้นของฟิล์มของไหลเป็นชั้น ๆ และกระทำโดยแรงเฉือน ทำให้แต่ละชั้นเคลื่อนที่ โดยที่ชั้นบนจะมีความเร็วกว่าชั้นล่าง เนื่องจากฟิล์มของไหลมีแรงโมเลกุล ต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งผลรวมมีค่าเท่ากับแรงเฉือนที่กระทำ ซึ่งแรงต้านแรงเฉือนนี้อยู่ในทอมของความหนืดพลวัต (dynamic or absolute viscosity) หรือเรียกว่า ความหนืด (viscosity) ซึ่งความแตกต่างของความเร็วของแต่ละชั้น เรียกว่า เกรเดียนท์ของความเร็ว หรืออัตราเฉือน (shear rate)

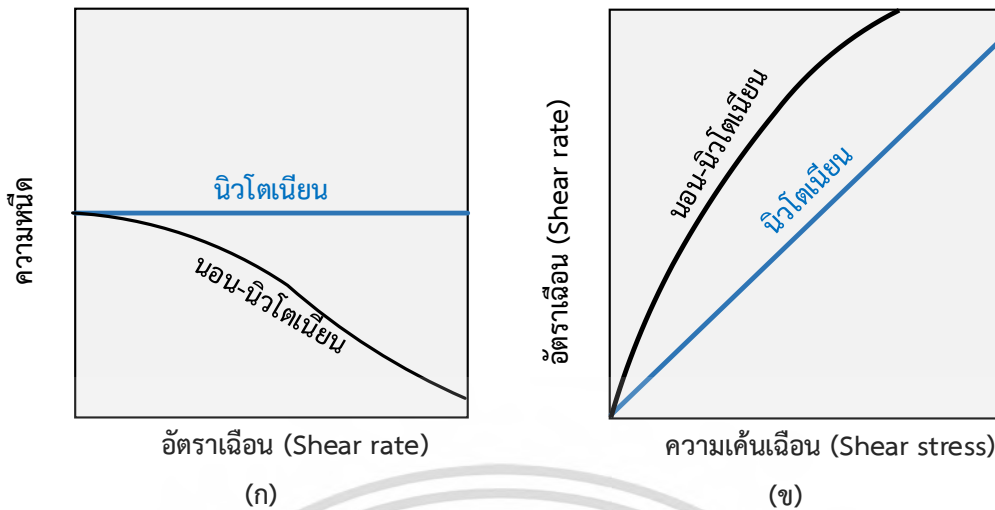


รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราเฉือนในฟิล์มของไหล

พิจารณารูปที่ 2.6 ระบายของผิวบน และล่างเคลื่อนที่ โดยมีพื้นที่เท่ากับ  $A$  จึงต้องมีแรงกระทำ  $F$  เพื่อให้ค่าความเร็วแผ่นบนมีค่าเท่ากับ  $U$  ถ้าระยะห่างระหว่างผิวที่เคลื่อนที่บน และล่างเท่ากับ  $h$  และของไหลมีความหนืด  $\mu$  ดังนั้นแรงกระทำ  $F = \mu UA/h$  ; ความหนืดของของไหล  $\mu = (F/A)/(U/h) = \tau/\dot{\gamma} = \text{shear stress}/\text{shear rate}$  โดยรูปที่ 2.7 แสดงความแตกต่างของสมบัติของของไหลแบบนอน-นิวโตเนียน และนิวโตเนียน ซึ่งสารหล่อลื่นที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรง หรือเป็นเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 2.7 (ข) เรียกว่า ของไหลแบบนิวโตเนียน ซึ่งความหนืดของของไหลแบบนิวโตเนียนจะเป็นอิสระกับอัตราเฉือน แสดงดังรูป 2.7 (ก) โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) และอัตราเฉือน แสดงดังสมการที่ 2.5

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงสมบัติของไหลแบบนิวโตเนียน และแบบนอน-นิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ของความหนืดกับอัตราเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ของอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม) และน้ำมันสังเคราะห์บริสุทธิ์ [101] ซึ่งมีขนาดของโมเลกุลใกล้เคียงกัน จึงมีสมบัติคล้ายกัน คือ ค่าของความหนืดไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (shear rate) ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิ น้ำมันเพิ่มสูงขึ้น ทางผู้ผลิตจึงทำการเติมสารประกอบประเภทโพลิเมอร์ลงไป เพื่อเพิ่มค่าดัชนีความหนืดน้ำมัน หรือเพิ่มค่าดัชนีความข้นใส [86] แต่มีผลทำให้น้ำมันมีความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน (shear stress,  $\tau$ ) และอัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate,  $\dot{\gamma}$ ) ไม่เป็นเชิงเส้น หรือสารหล่อลื่นมีสมบัติเป็นของไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ซึ่งมีแบบจำลองค่าความหนืดในรูปของสมการ ดังนี้

2.4.4.1 แบบจำลองความหนืดพาวเวอร์ลอว์ (Power-law model)

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้เพื่อแสดงค่าความหนืดของของไหลแบบนอน-นิวโตเนียน คือ แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์ สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ ดังนี้

$$\mu = m \left( \frac{du}{dz} \right)^{n-1} \tag{2.6}$$

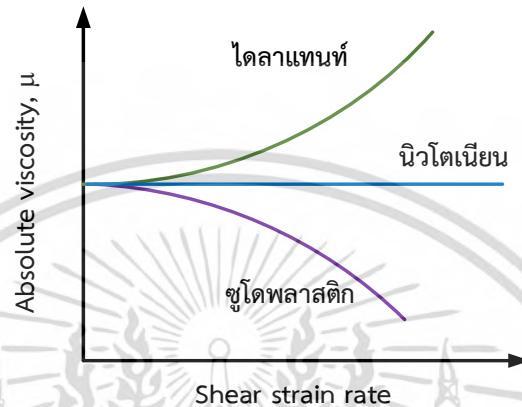
$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dz} \right) = m \left( \frac{du}{dz} \right)^n \tag{2.7}$$

เมื่อ  $m$  คือ สัมประสิทธิ์การคงตัวของของไหล (fluid consistency coefficient)

$n$  คือ ดัชนีพาวเวอร์ลอว์ (power-law index)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (2.6) ถ้า  $n = 1$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน และถ้า  $n > 1$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลแบบนอน-นิวโตเนียนชนิดโตลาแทนท์ ซึ่งความหนืดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น และถ้า  $n < 1$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลแบบนอน-นิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก ซึ่งค่าความหนืดจะมีค่าน้อยลง เมื่อค่าของอัตราเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น [9, 100] แสดงดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราความเค้นเฉือนของแบบจำลองพาวเวอร์ลอว์

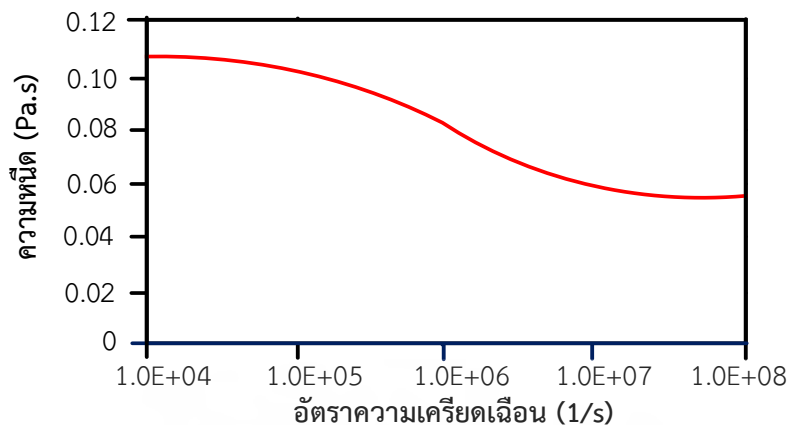
#### 2.4.4.2 แบบจำลองความหนืดคาร์โร (Carreau model)

ที่ระดับค่าความเค้นเฉือนต่ำ ๆ น้ำมันจะมีค่าความหนืดคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง และเมื่อระดับค่าความเค้นเฉือนสูงๆ น้ำมันก็จะมีค่าความหนืดคงที่อยู่ที่อีกค่าหนึ่ง โดยความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนค่าอย่างมากจากที่ระดับความเค้นเฉือนต่ำ ๆ ไปยังความเค้นเฉือนสูงๆ เนื่องจากที่ระดับค่าความเค้นเฉือนสูงๆจะมีผลทำให้สายโซ่ของโมเลกุลของสารเพิ่มคุณภาพนั้นเกิดการขาด คือ โมเลกุลอาจจะเกิดการสลายตัว (degradation) [86] ได้ ซึ่งทำให้โครงสร้างโมเลกุลแตกออก ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง และส่งผลให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลง ซึ่งลักษณะของการลดลงของความหนืดเมื่ออยู่ในสภาวะความเค้นเฉือนสูงๆ นี้ เรียกว่า shear thinning [101, 118] ซึ่งกรณีลักษณะดังกล่าวมานี้ จึงใช้แบบจำลองความหนืดคาร์โร [28] ในการพิจารณา ซึ่งมีรูปแบบสมการ คือ

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) (1 + \lambda^2 I)^{\frac{n-1}{2}} \quad (2.8)$$

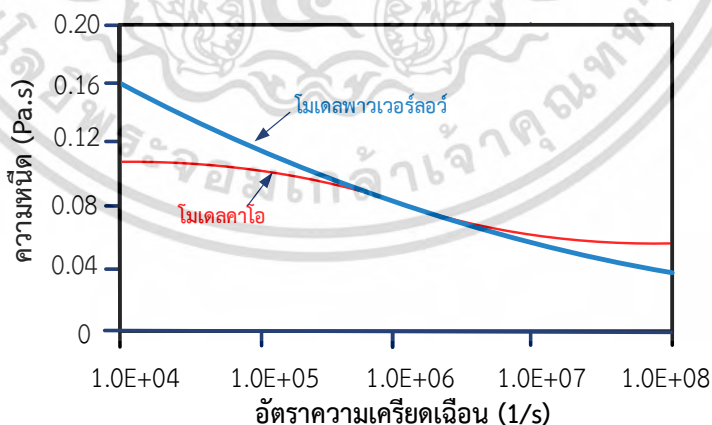
$$I = \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราความเคียดเฉือนของน้ำมัน SAE10W50 ที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งมีลักษณะแบบจำลองความหนืดคาร์โอ

รูปที่ 2.9 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราความเคียดเฉือนของแบบจำลองความหนืดคาร์โอของน้ำมัน SAE10W50 โดยตารางที่ 2.3 คือ สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นน้ำมัน SAE10W50 [119, 117] ซึ่งรูปที่ 2.10 เป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองความหนืดคาร์โอกับแบบจำลองพาวเวอร์ลอว์ของน้ำมัน จะสังเกตได้ว่าในช่วงอัตราความเคียดเฉือนที่มีค่าต่ำกว่า  $1.2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  และช่วงที่อัตราความเคียดเฉือนมีค่าสูงกว่า  $1.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์จะไม่สามารถให้ค่าความหนืดได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการใช้แบบจำลองความหนืดคาร์โอในการวิเคราะห์คุณลักษณะของการหล่อลื่นด้วยของไหลแบบนอน-นิวโตเนียน จะได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องกว่าการใช้แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบแบบจำลองความหนืดพาวเวอร์ลอว์ และแบบจำลองความหนืดคาร์โอ

ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมัน SAE 10W50 [119, 117]

สารหล่อลื่น SAE10W50	ค่า
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนต่ำ, $\mu_0$	0.107 Pa·s
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนสูง, $\mu_\infty$	0.054 Pa·s
Power-law exponent, $n$	0.341
Characteristic relaxation time constant, $\lambda$	$3.0 \times 10^{-6}$ s
ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, $\rho$	$875 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารหล่อลื่น, $c_f$	$1,900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
อุณหภูมิเริ่มต้นของสารหล่อลื่น, $T_0$	313 K
Viscosity-Pressure index, $z$	0.60
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ, $\gamma$	$0.0310174 \text{ K}^{-1}$
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ, $\beta$	$0.000788 \text{ K}^{-1}$
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $k_f$	$0.126 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

## 2.5 สารเพิ่มคุณภาพสถานะของแข็ง

วัตถุประสงค์ในการใช้สารเพิ่มคุณภาพสถานะของแข็ง คือ เพื่อลดความเสียหายและการสึกกร่อน โดยเฉพาะการหล่อลื่นที่ต้องทำงานเฉพาะด้าน เช่น ทำงานที่อุณหภูมิสูงหรือที่สภาวะวิกฤติ หรือทำงานอยู่ในช่วงของอุณหภูมิการทำงานค่อนข้างกว้าง อุปกรณ์ที่ต้องทำงานในอวกาศ ทำงานในสภาวะสุญญากาศ หรือรังสีนิวเคลียร์ เป็นต้น ซึ่งสารหล่อลื่นพื้นฐานทั่วไป เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือจาระบี ไม่สามารถทนต่อการใช้งานเฉพาะด้านแบบนี้ได้ ตัวอย่างเช่น การหล่อลื่นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นิยมใช้การหล่อลื่นแบบแห้งด้วยสารหล่อลื่นของแข็ง [120] การลดแรงเสียดทานด้วยสารเพิ่มคุณภาพสถานะของแข็ง สามารถทำได้ด้วยการเคลือบที่ผิวของวัสดุ [121, 101] ซึ่งจะมีกรรมวิธีการเคลือบ และขัดเกลาเพื่อให้เรียบเนียนเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ เรียงเป็นชั้นซ้อน ๆ กัน ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำ ชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่วางซ้อน ๆ กันนี้ จะสามารถเลื่อนไถลอย่างง่ายตามแนวแรงเฉือนที่มากระทำ ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติลดแรงเสียดทานได้ดี ซึ่งสมบัติของสารหล่อลื่นของแข็งนั้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ โดยตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติบางประเภทของสารหล่อลื่นของแข็ง [101]

ตารางที่ 2.4 สารหล่อลื่นของแข็งที่มีใช้ทั่วไป [101]

ชนิดวัสดุ	ค่าอุณหภูมิที่ใช้งานได้ (°C)				ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ย (Average friction coefficient)	
	ต่ำสุด		สูงสุด		ใน Air	ใน N <sub>2</sub> หรือ ใน vacuum
	ใน Air	ใน N <sub>2</sub> หรือ ใน vacuum	ใน Air	ใน N <sub>2</sub> หรือ ใน vacuum		
MoS <sub>2</sub>	-240	-240	370	820	0.10-0.25	0.05-0.10
Graphite	-240	—	540	Unstable in vacuum	0.10-0.30	0.02-0.45
PTFE	-70	-70	290	290	0.02-0.15	0.02-0.15
Calcium fluoride-barium fluoride Eutectic Ca <sub>2</sub> -BaF <sub>2</sub> <sub>v</sub>	430	430	820	820	0.10-0.25 above 540°C 0.25-0.40 Below 540 °C	ค่าเท่ากับใน Air

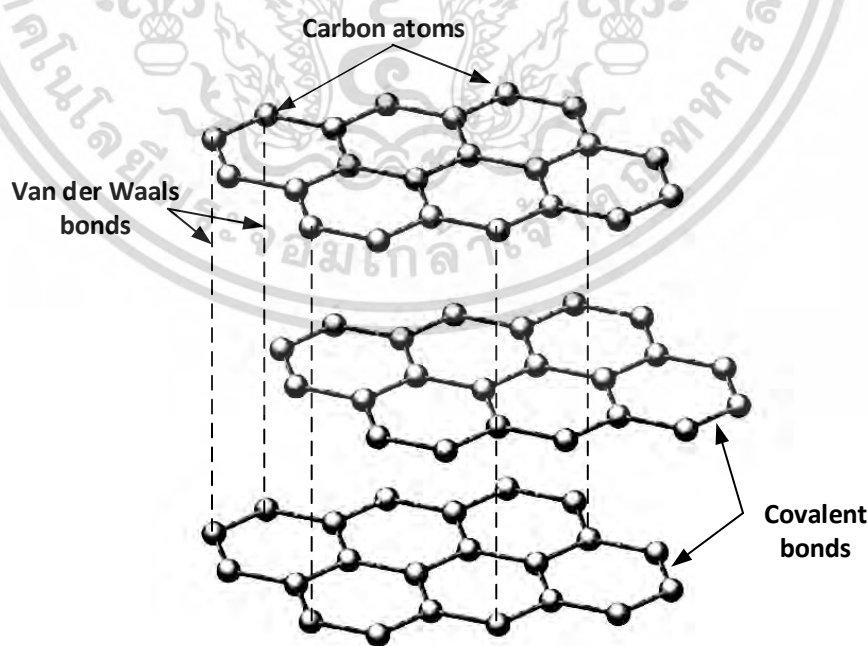
Source: kenedy et al. 1998 [101]

สารหล่อลื่นของแข็งจำพวกผงใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น จาระบี และก๊าซ เพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นของแข็งทำมาจากวัสดุอนินทรีย์ อาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นของแข็งคั้นระหว่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจใช้ผงสารหล่อลื่นของแข็งผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อเสริมสมรรถภาพในการรับภาระงานหนัก เมื่อเติมไปในสารหล่อลื่นที่มีสถานะของเหลว สารเพิ่มคุณภาพชนิดของแข็งจะช่วยทำหน้าที่ลดความฝืด หรือแรงเสียดทานในส่วนที่วัสดุเสียดสีกัน ส่งผลให้การสึกหรอลดลง อีกทั้งยังลดการใช้พลังงาน และยังทำให้รับภาระงานหนักได้มากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสจะมีลักษณะยื่นหรือเป็นขอบหลุมทั่วผิว มีความขรุขระ หรือผิวมีความหยาบ แม้ว่าจะมีฟิล์มสารหล่อลื่นอยู่ระหว่างผิว แต่ยังสามารถเกิดการสัมผัสระหว่างยอดของส่วนที่ยื่นออกมาได้จึงมีโอกาสเกิดความเสียหายได้มากขึ้น เช่น อาจเกิดจากมีอนุภาคของแข็งปนเปื้อนในน้ำมันที่มากกระทำ กอปรกับในขณะที่ทำงาน มีผลทั้งอุณหภูมิและความดัน อาจส่งผลช่วงสัมผัสอยู่ในช่วงสภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี (boundary lubrication) [122] ได้เมื่อฟิล์มของสารหล่อลื่นไม่มากพอที่จะรองรับภาระแรงที่กดทับ แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้น การสึกหรอจะเพิ่มขึ้น และผิวของวัสดุจะเกิดการยุบตัว ตรงส่วนที่เป็นยอดแหลมของส่วนที่ยื่นออกมาจะเกิดการขบกัน และติดกัน (cold welding) [123, 124] เมื่อเกิดการกระทำซ้ำจะทำให้เกิดความเสียหายและเกิดอนุภาคขนาดเล็ก (third particles) ส่งผลให้เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพสถานะของแข็งเข้าไป เพื่อช่วยป้องกันชิ้นของฟิล์มสารหล่อลื่นไม่ให้เกิดความเสียหายของชั้นฟิล์ม โดยสารเพิ่มคุณภาพของแข็งจะมีขนาดเล็ก และสารบางชนิดอาจจะมีโครงสร้างของการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบรูปสี่เหลี่ยมรังผึ้ง หรือเป็นแผ่นชั้น ในการใช้งานอาจจะใช้วิธีเคลือบบนผิวของวัสดุคล้ายชั้นฟิล์มบาง ๆ วางซ้อน ๆ กัน โครงสร้างที่เป็นชั้นบาง ๆ นี้สามารถเลื่อนได้ง่ายทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเลื่อนไถลไปในแนวราบได้ง่าย และสามารถรับแรงในแนวตั้งได้สูงมาก ดังนั้นเมื่อเกิดสภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี หรือผิวเกิดการสัมผัสกัน ตัวชิ้นบางๆ นี้จะถูกเหวี่ยงออกไปแทนผิวของวัสดุที่รองรับ ดังนั้นจึงทำให้สามารถรับภาระที่สูง ๆ ได้ โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายที่ยอดผิวสารเพิ่มคุณภาพสถานะของแข็ง หรือสารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นกราไฟต์ และโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติบางประการของเซรามิกส์ที่นิยมใช้ในด้านไตรโบโลยี [15] แบ่งเป็นเซรามิกส์ประเภทออกไซด์ เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{MgO}$   $\text{ZrO}_2$  และเซรามิกส์ประเภทนอน-ออกไซด์ โดยกลุ่มที่นิยมใช้ คือ ไนไตรต์ เช่น  $\text{TiN}$   $\text{CrN}$   $\text{Si}_3\text{N}_4$  และ คาร์ไบด์ เช่น  $\text{TiC}$   $\text{SiC}$   $\text{ZrC}$  ส่วนเซรามิกส์ชนิดอื่นๆ คือ BNC และ Diamond นั้นจะมีค่าความแข็งสูงที่สุด

### 2.5.1 กราไฟต์ (graphite)

กราไฟต์เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน หรือไม่เกิดออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่น หรือชั้น [15] โดยในหนึ่งชั้นของอะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.11 เรียกว่า แกรฟีน (graphene) ซึ่งมีความเค้นเฉือนต่ำ หรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ เนื่องจากอะตอมในระนาบยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ มีแรงดึงดูดระหว่างอะตอมน้อย แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งไม่แข็งแรง ทำให้ชั้นของกราไฟต์นั้น แยกออกจากกันได้ง่าย หรือเลื่อนผ่านไปมาได้ง่าย มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ [125] โดยลักษณะโครงสร้างลามลาร์ (lamellar structures) ของกราไฟต์ [126, 127] ทำให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติที่ดีสำหรับการหล่อลื่น

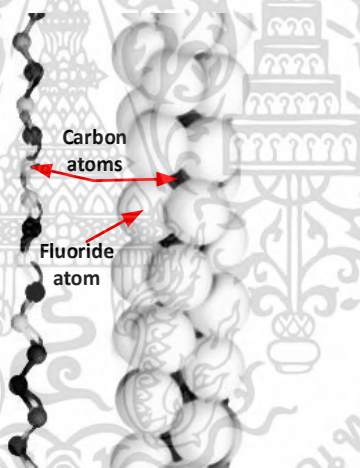


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของกราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 โพลีเตตราฟลูออไรด์เอทิลีน (polytetra fluoroethylen, PTFE)

สารเพิ่มคุณภาพของแข็งชนิด PTFE เป็นโพลิเมอร์ โดยมีลักษณะอ่อนนุ่ม คล้ายขี้ผึ้ง ลื่น มีสีขาวทึบ มีสมบัติทางกลสูงมาก [128] เป็นสารที่มีความเสียดทานต่ำ [129] เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็งชนิดอื่น ดังนั้นจึงลดแรงเสียดทานได้เป็นอย่างดี PTFE เป็น fluoroethylene ( $C_2F_4$ )<sub>n</sub> [122] [130] ซึ่งมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 2.12 โครงสร้างจะมีรูปร่างซิกแซกสลับกันเป็นรูปหกเหลี่ยม ด้วยระยะห่างคงที่ 0.562 nm โดยมีคาร์บอนจำนวน 13 อะตอมใน 180° สาเหตุที่ทำให้ PTFE มีความเสียดทานต่ำ คือ มีการยึดเกาะของหน้าสัมผัสต่ำ แต่จะมีแรงยึดเกาะในอีกด้านสูง คือ ถ้าจะใช้พลังงานในการแยกสลาย ต้องใช้พลังงานสูงถึง 466 kJ/mol ดังนั้นจึงมีความเสถียรสูงมาก PTFE ยังเป็นสารที่ไม่ละลายในสารใด ๆ เนื่องจาก PTFE มีสายโซ่คาร์บอนที่เกือบทุกอะตอมของ fluoroethylene ป้องกันเกือบทั้งหมด จึงมีสภาพเสมือนมีเกราะเคลือบสายโซ่คาร์บอน จึงทำให้สามารถทนต่อสารเคมี นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติการเป็นฉนวน มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง และมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่สูง



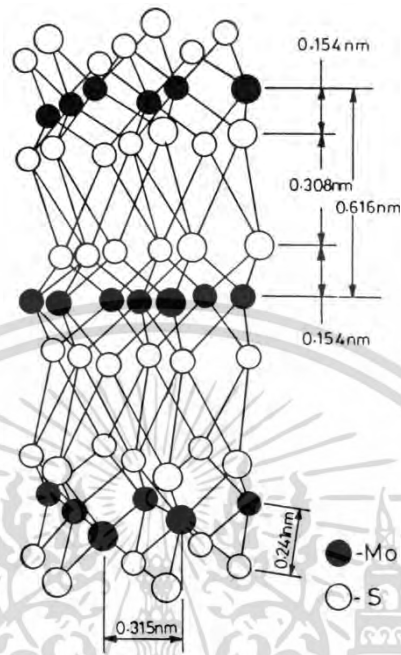
รูปที่ 2.12 โครงสร้าง PTFE [130]

### 2.5.3 โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (molybdenum disulfide, MoS<sub>2</sub>)

โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS<sub>2</sub>) มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกันกับกราฟไฟต์ [126, 127] โดยมีอะตอมของโมลิบดีนัมประกอบด้วยอะตอมของกำมะถันเรียงเป็นลำดับ (S:Mo:S:S:Mo:S:...) แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งมีการจัดวางของอะตอมมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม โดยแต่ละอะตอมของโมลิบดีนัมจะมีปริซึมรูปสามเหลี่ยมของอะตอมของกำมะถันเรียงโดยรอบเป็นระยะ 0.241 nm ระนาบที่อยู่ใกล้กันจะมีระยะห่างของอะตอมของกำมะถันคือ 0.308 nm โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์มีคุณสมบัติการหล่อลื่นดี โดยมีอุณหภูมิระเหิดที่ 450°C และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 400°C ซึ่งโมลิบดีนัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดซัลไฟต์ไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และไม่เหมาะกับการนำไปใช้เป็นสารหล่อลื่นร่วมกับ ออกซิเจน และไม่ควรรใช้โมลิตินัมไดซัลไฟต์เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของโมลิตินัมไดซัลไฟต์ ( $\text{MoS}_2$ )

ตารางที่ 2.5 สมบัติบางประการของเซรามิกส์ที่นิยมใช้ในด้านไตรโบโลยี [15]

ชนิด	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{ZrO}_2/\text{MgO}$	$\text{SiC}$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	$\text{SiALON}$	BNC	Diamond
จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	2050	2590	-	2500	1900		3200	3825
อุณหภูมิสูงสุดของการใช้งาน ( $^{\circ}\text{C}$ )	1800-1850	1500		1550	1400-1500	1500		
ค่าความแข็งวิกเกอร์	1800-2000	1200	1200	300	1450-1550	1500	4700	7000-10 000
ค่าความยืดหยุ่น (GPa)	300-400	200	200	420	290-315	290	660	1054
อัตราส่วนปัวซอง	0.25-0.27	0.29	0.29	0.15	0.26-0.27	0.26	-	0.07-0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการหล่อลื่นในแบริงเพลากลม

### 3.1 สมการเรย์โนลด์สำหรับของไหลที่มีแบบจำลองความหนืดคาโอ

สมการเรย์โนลด์เป็นสมการที่ใช้หาการกระจายความดันฟิล์มน้ำมันซึ่งมีสมมติฐาน [100] ดังนี้

- 1) การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ
- 2) ไม่คิดแรงน้ำหนักของของไหล และแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล
- 3) ไม่มีการสิ้นเปลืองของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน
- 4) ความหนาของฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง

ความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย

- 5) ไม่คิดถึงผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก
- 6) แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่าง

ของความดัน รวมทั้งไม่คิดความเร่งของของไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือนสำหรับสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบความหนืดเสมือน  $\mu_{eq}$  ดังนี้

$$\tau_{zx} = \mu_{eq} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.1)$$

$$\tau_{zy} = \mu_{eq} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.2)$$

แบบจำลองนอน-นิวโตเนียน ในรูปของแบบจำลองความหนืดคาร์โอ [28] สามารถเขียนได้ด้วยสมการ

$$\mu_{eq} = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) (1 + \lambda^2 I)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $I$  คือ

$$I = \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจัดรูปใหม่ โดยแทนสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือน สำหรับสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน ในรูปของแบบจำลองความหนืดคาร์โอ ดังนี้

$$\tau_{zx} = \mu_{eq} \frac{\partial u}{\partial z} = \left\{ \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) (1 + \lambda^2 I)^{\frac{n-1}{2}} \right\} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.5)$$

$$\tau_{zy} = \mu_{eq} \frac{\partial v}{\partial z} = \left\{ \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) (1 + \lambda^2 I)^{\frac{n-1}{2}} \right\} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.6)$$

จากสมการโมเมนต์ จะได้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (3.8)$$

ใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation theory) [131] ซึ่งอธิบายโดย Dien และ Elrod [34] ความเร็วของของไหล  $u$  และ  $v$  สามารถเขียนได้เป็น

$$u = u^* + \delta u' \quad (3.9)$$

$$v = v^* + \delta v' \quad (3.10)$$

$\delta$  คือ ค่าพารามิเตอร์แอมพลิจูดแบบไร้มิติ ( $\delta \ll 1$ ) แทนสมการ (3.9) และสมการ (3.10) ในสมการที่ (3.4) จะได้

$$I = \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} + \delta \frac{\partial u'}{\partial z} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial v^*}{\partial z} + \delta \frac{\partial v'}{\partial z} \right\}^2 \quad (3.11)$$

$$I = \left\{ \left( \frac{\partial u^*}{\partial z} \right)^2 + 2\delta \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u'}{\partial z} + \delta^2 \left( \frac{\partial u'}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left\{ \left( \frac{\partial v^*}{\partial z} \right)^2 + 2\delta \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial v'}{\partial z} + \delta^2 \left( \frac{\partial v'}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \left\{ \left( \frac{\partial u^*}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v^*}{\partial z} \right)^2 \right\} + 2\delta \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial v'}{\partial z} \right\} = I^* + \delta I' \quad (3.13)$$

กระจาย  $\mu_{eq}$  ในรูปอนุกรมเทย์เลอร์ จะได้

$$\mu_{eq} = \mu(I^*) + \delta I' \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} = \mu^* + \delta \mu' \quad (3.14)$$

$$\mu^* = \mu(I^*) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) (1 + \lambda^2 I^*)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3.15)$$

$$\mu' = I' \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} = 2 \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial v'}{\partial z} \right\} \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \quad (3.16)$$

$$\mu' = 2 \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial v'}{\partial z} \right\} (\mu - \mu_\infty) \left( \frac{n-1}{2} \right) (1 + \lambda^2 I^*)_{I=I^*}^{-\frac{n-1}{2}} \lambda^2 \quad (3.17)$$

กระจายความเค้นเฉือนในสมการ (3.1) และ (3.2) จะได้

$$\tau_{zx} = (\mu^* + \delta \mu') \frac{\partial (u^* + \delta u')}{\partial z} = \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) + \delta \left( \mu^* \frac{\partial u'}{\partial z} + \mu' \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) \quad (3.18)$$

$$\tau_{zy} = (\mu^* + \delta \mu') \frac{\partial (v^* + \delta v')}{\partial z} = \left( \mu^* \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) + \delta \left( \mu^* \frac{\partial v'}{\partial z} + \mu' \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) \quad (3.19)$$

จากสมการโมเมนต์ สามารถเขียนเกรเดียนต์ความดัน ดังสมการ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \delta \frac{\partial \Xi}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) + \delta \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial u'}{\partial z} + \mu' \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \delta \frac{\partial \Xi}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) + \delta \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial v'}{\partial z} + \mu' \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) \quad (3.21)$$

เมื่อ  $\Xi$  เรียกว่า ความดันอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.20) และ (3.21) จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \Xi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial u'}{\partial z} + \mu' \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial u'}{\partial z} + 2 \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial v'}{\partial z} \right\} \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \Xi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial v'}{\partial z} + \mu' \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu^* \frac{\partial v'}{\partial z} + 2 \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial v'}{\partial z} \right\} \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) \quad (3.24)$$

โดยกำหนดเงื่อนไขขอบ ดังนี้

$$u^*(z=0) = u_1, u^*(z=h) = u_2, v^*(z=0) = v_1, v^*(z=h) = v_2 \quad (3.25)$$

$$u'(z=0) = 0, u'(z=h) = 0, v'(z=0) = 0, v'(z=h) = 0 \quad (3.26)$$

ทำการหาปริพันธ์ (integrate) สมการ (3.22) และทำการแทนค่าเงื่อนไขขอบจากสมการ (3.25) จะได้

$$u^* = \frac{u_2 - u_1}{h} z + u_1 \quad (3.27)$$

$$v^* = \frac{v_2 - v_1}{h} z + v_1 \quad (3.28)$$

$$I^* = \frac{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}{h^2} \quad (3.29)$$

ทำการหาปริพันธ์สมการ (3.23) และ (3.24) และทำการแทนค่าเงื่อนไขขอบจากสมการ (3.26) จะได้

$$u' = \frac{z(z-h)}{2} \left[ \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial \Xi}{\partial x} - \frac{2 \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \frac{\partial u^*}{\partial z} \left[ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial \Xi}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial \Xi}{\partial y} \right]}{(\mu^*)^2 \left( 1 + 2 \frac{I^*}{\mu^*} \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \right)} \right] \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v' = \frac{z(z-h)}{2} \left\{ \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial \Xi}{\partial y} - \frac{2 \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \frac{\partial v^*}{\partial z} \left[ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial \Xi}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial \Xi}{\partial y} \right]}{(\mu^*)^2 \left( 1 + 2 \frac{I^*}{\mu^*} \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \right)} \right\} \quad (3.31)$$

ถ้า  $v_1 = v_2 = 0$ ,  $\frac{\partial v^*}{\partial z} = 0$  จะได้

$$I^* = \left( \frac{\partial u^*}{\partial z} \right)^2 = \frac{(u_2 - u_1)^2}{h^2} \quad (3.32)$$

$$\eta = \mu^* + 2I^* \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \quad (3.33)$$

$$\eta = \mu^* + 2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 (\mu_0 - \mu_\infty) \left( \frac{n-1}{2} \right) \left( 1 + \lambda^2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 \right)^{\frac{n-3}{2}} \lambda^2 \quad (3.34)$$

แทนค่า  $\left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*}$  ในสมการที่ (3.33) ลงในสมการ (3.30) และ (3.31) จะได้

$$u' = \frac{z(z-h)}{2} \left\{ \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial \Xi}{\partial x} - \frac{(\eta - \mu^*)}{\eta \mu^*} \frac{\partial \Xi}{\partial x} \right\} = \frac{z(z-h)}{2} \left\{ \frac{1}{\eta} \frac{\partial \Xi}{\partial x} \right\} \quad (3.35)$$

$$v' = \frac{z(z-h)}{2} \left\{ \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial \Xi}{\partial y} \right\} \quad (3.36)$$

แทนสมการ (3.27) (3.28) (3.35) และ (3.36) ลงในสมการ (3.9) และ (3.10)

$$u = \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right) z + u_1 + \frac{z(z-h)}{2} \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.37)$$

$$v = \left( \frac{v_2 - v_1}{h} \right) z + v_1 + \frac{z(z-h)}{2} \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $Q_x$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของแบริงในทิศทางแกน  $x$  และ  $Q_y$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของแบริงในทิศทางแกน  $y$  สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_x = \int_0^h \rho u dz = \rho \bar{u} h - \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.39)$$

$$Q_y = \int_0^h \rho v dz = \rho \bar{v} h - \frac{\rho h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.40)$$

เมื่อ  $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$  และ  $\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$

จากสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (3.41)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.41) เทียบกับ  $z$  ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง  $h$

$$\int_0^h \frac{\partial \rho}{\partial t} dz + \int_0^h \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} dz + \int_0^h \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} dz + \int_0^h \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} dz = 0 \quad (3.42)$$

โดยใช้สูตร

$$\int_{h_1}^{h_2} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1}^{h_2} f(x, y, z) dz - f(x, y, h_2) \frac{\partial h_2}{\partial x} + f(x, y, h_1) \frac{\partial h_1}{\partial x} \quad (3.43)$$

กำหนดให้ความหนาแน่น  $\rho$  เป็นค่าเฉลี่ยตามแนวความหนาของฟิล์ม ดังนั้น ผลการหาปริพันธ์แต่ละเทอมในสมการที่ (3.42) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_0^h \frac{\partial \rho}{\partial t} dz = -\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_0^h \rho dz \right) = -\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial \rho}{\partial t} = h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.44)$$

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dz = -(\rho u)_{z=h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h \rho u dz \right) = -\rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} \quad (3.45)$$

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dz = -(\rho v)_{z=h} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_0^h \rho v dz \right) = -\rho v_2 \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (3.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dz = \rho(w_2 - w_1) = \rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \rho v_2 \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.47)$$

ทำการแทนสมการที่ (3.44) ถึง (3.47) ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = -\frac{\partial \rho h}{\partial t} \quad (3.48)$$

แทนสมการ (3.39) และ (3.40) ลงใน (3.48)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho \tilde{u} h - \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \tilde{v} h - \frac{\rho h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right\} = -\frac{\partial \rho h}{\partial t} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\tilde{u} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12\tilde{v} \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (3.50)$$

ดังนั้นสมการ (3.50) จึงเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์การกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยใช้แบบจำลองความหนืดคาร์โอสำหรับสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน

### 3.2 การประยุกต์ใช้สมการเรย์โนลด์ส์สำหรับแบริงเพลากลม

กรณีของแบริงเพลากลมนั้น กำหนดให้  $u_1 = 0$ ,  $\tilde{u} = \frac{u_2}{2}$ ,  $v_1 = v_2 = \tilde{v} = 0$  ดังนั้นจากสมการ (3.50) ซึ่งเป็นสมการเรย์โนลด์ส์สำหรับการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมัน สามารถจัดรูปได้ใหม่ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6u_2 \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (3.51)$$

จากสมการที่ (3.47) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \rho(w_2 - w_1) - \rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} - \rho v_2 \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.52)$$

แทนสมการ (3.52) ลงในสมการที่ (3.51) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6u_2 \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12 \left( \rho(w_2 - w_1) - \rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} - \rho v_2 \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -6u_2 \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12\rho(w_2 - w_1) \quad (3.54)$$

$$\text{เมื่อ} \quad u_2 = \omega r - e \frac{d\Phi}{dt} \cos(\theta - \Phi) + \frac{de}{dt} \sin(\theta - \Phi) \quad (3.55)$$

$$w_2 = \omega r \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{de}{dt} \cos(\theta - \Phi) - r \frac{d\Phi}{dt} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.56)$$

แทนสมการ (3.55) และ สมการ (3.56) ลงในสมการ (3.54) จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ &= -6 \left( \omega r - e \frac{d\Phi}{dt} \cos(\theta - \Phi) + \frac{de}{dt} \sin(\theta - \Phi) \right) \left( \frac{\partial \rho h}{\partial x} \right) \\ & \quad + 12\rho \left( \omega r \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{de}{dt} \cos(\theta - \Phi) - r \frac{d\Phi}{dt} \frac{\partial h}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.57)$$

ถ้าพิจารณาเฉพาะเทอมที่เป็นอันดับหนึ่ง สมการด้านขวามือของสมการ (3.57) จะลดลงเหลือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\omega r \frac{\partial \rho h}{\partial x} - 12r \frac{d\Phi}{dt} \frac{\partial \rho h}{\partial x} + 12\rho \left( \frac{de}{dt} \cos(\theta - \Phi) \right) \quad (3.58)$$

เนื่องจาก  $x = \theta r$  จึงได้สมการเรย์โนลด์ส์สำหรับของไหลที่มีแบบจำลองความหนืดคาร์โอ ซึ่งเขียนโดย Mongkolwongrojn และ Aiumpronsin [60] ดังนี้

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\omega \left( 1 - \frac{2}{\omega} \frac{d\Phi}{dt} \right) \frac{\partial \rho h}{\partial \theta} + 12\rho \frac{de}{dt} \cos(\theta - \Phi) \quad (3.59)$$

ในการวิเคราะห์การกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีแบบจำลองความหนืดคาร์โอ โดยกำหนดค่าสภาวะขอบในการวิเคราะห์ ดังนี้

$$\text{ที่ทางเข้าน้ำมัน} \quad : \quad p(\theta = 0) = 0$$

$$\text{ที่ด้านข้างทั้งสองด้าน} \quad : \quad p(y = 0) = 0 \quad \text{และ} \quad p(y = L) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ที่จุดเกิดควาเวชัน} \quad : \quad p(\theta_c) = \frac{\partial p}{\partial \theta} \Big|_{\theta_c} = 0$$

### 3.3 สมการพลังงานของสารหล่อลื่นในแบริงเพลากลม

ในการหาอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสามารถหาได้จากสมการพลังงาน โดยมีรูปสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \rho c_f \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &+ \tau_{zx} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \tau_{zy} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{dp}{dx} + v \frac{dp}{dy} \right) + q \end{aligned} \quad (3.60)$$

เทอมด้านซ้ายมือ คือ การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาในทิศทางแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ตามลำดับ ส่วนเทอมของสมการขวา 3 สมการ คือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเทอมต่อมา คือ พลังงานที่เกิดจากความต้านทานภายใน (internal friction) เรียกว่า viscous dissipation term และเทอม  $q$  คือ แหล่งกำเนิดพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เนื่องจากความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นบางมากเมื่อทำการเทียบกับความยาวของย่านสัมผัส ดังนั้นการนำความร้อนตามแนวแกน  $x$  จึงน้อยกว่าตามแนวแกน  $z$  จึงไม่คิดการนำความร้อนตามแกน  $x$  และไม่คิดการพาความร้อนตามความหนาฟิล์ม ดังนั้นสมการ (3.60) จึงลดรูปเป็นสมการ (3.61)

$$\rho c_f \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \tau_{zx} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \tau_{zy} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{dp}{dx} + v \frac{dp}{dy} \right) \quad (3.61)$$

ทำการปริพันธ์สมการพลังงานตลอดความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho c_f \int_0^h \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dz &= \int_0^h \frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \int_0^h \tau_{zx} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz + \int_0^h \tau_{zy} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) dz \\ &+ \int_0^h \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{dp}{dx} + v \frac{dp}{dy} \right) dz \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \rho c_f \int_0^h \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dz &= \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=h} - \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} + \int_0^h \tau_{zx} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz + \int_0^h \tau_{zy} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) dz \\ &+ \int_0^h \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{dp}{dx} + v \frac{dp}{dy} \right) dz \end{aligned} \quad (3.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นบางมาก ดังนั้นในการปริพันธ์ซ้ายมือของสมการ สามารถใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตามความหนาฟิล์ม ( $T_m$ ) และค่าความเร็วเฉลี่ยตามความหนาฟิล์ม ( $u_m, v_m$ ) คือ

$$\begin{aligned} u_m &= \frac{1}{h} \int_0^h u dz = \frac{1}{h} \int_0^h \left\{ \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right) z + u_1 + \frac{z(z-h)}{2} \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} dz \\ &= \frac{1}{h} \left[ \frac{h}{2} (u_1 + u_2) - \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \tilde{u} - \frac{h^2}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$\begin{aligned} v_m &= \frac{1}{h} \int_0^h v dz = \frac{1}{h} \int_0^h \left\{ \left( \frac{v_2 - v_1}{h} \right) z + v_1 + \frac{z(z-h)}{2} \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right\} dz \\ &= \frac{1}{h} \left[ \frac{h}{2} (v_1 + v_2) - \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = \tilde{v} - \frac{h^2}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.65)$$

แทนค่าอุณหภูมิเฉลี่ย และความเร็วเฉลี่ย สามารถเขียนสมการย่อยของสมการ (3.63) ในแต่ละเทอม ได้ดังสมการ (3.66-3.69)

$$\begin{aligned} \rho c_f \int_0^h \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dz &= \rho c_f h \left( \frac{\partial T_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) \\ &= \rho c_f h \left( \frac{\partial T_m}{\partial t} + \left\{ \tilde{u} - \frac{h^2}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \frac{\partial T_m}{\partial x} + \left\{ \tilde{v} - \frac{h^2}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} \int_0^h \tau_{zx} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz &= (\tau_{zx} u)_{z=h} - \int_0^h u d\tau_{zx} = (\tau_{zx} u)_{z=h} - \int_0^h u \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \\ &= (\tau_{zx} u)_{z=h} - \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h u dz = \left\{ \mu^* \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right) + \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} u_2 - \left\{ \tilde{u} h - \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} \int_0^h \tau_{zy} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) dz &= (\tau_{zy} v)_{z=h} - \int_0^h v d\tau_{zy} = (\tau_{zy} v)_{z=h} - \int_0^h v \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz \\ &= (\tau_{zy} v)_{z=h} - \frac{\partial p}{\partial y} \int_0^h v dz = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} v_2 - \left\{ \tilde{v} h - \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{h^3}{12\mu^*} \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^h \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{dp}{dx} + v \frac{dp}{dy} \right) dz = \beta h T_m \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u_m \frac{dp}{dx} + v_m \frac{dp}{dy} \right) \quad (3.69)$$

$$= \beta h T_m \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \left\{ \ddot{u} - \frac{h^2}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \frac{dp}{dx} + \left\{ \ddot{v} - \frac{h^2}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \frac{dp}{dy} \right)$$

กำหนดให้  $\ddot{v}=0$  ทำการ จัดรูปสมการ 3.66 ใหม่ จะได้สมการพลังงานสำหรับสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน โดยใช้แบบจำลองความหนืดของคาร์โอ ซึ่งเขียนโดย Mongkolwongrojn และ Aiumprorsin [60] ดังนี้

$$\rho c_f h \frac{\partial T_m}{\partial t} + \rho c_f h \ddot{u} \frac{\partial T_m}{\partial x} - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T_m}{\partial x} - \rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial T_m}{\partial y} = \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=h} - \left( k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0}$$

$$+ \mu^* u_2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right) + \left( u_2 \frac{h}{2} - \ddot{u} h + \beta h T_m \ddot{u} \right) \frac{dp}{dx} + \left( \frac{h^3}{12\eta} - \beta T_m \frac{h^3}{12\eta} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2$$

$$+ \left( \frac{h^3}{12\mu^*} - \beta T_m \frac{h^3}{12\mu^*} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 + \beta h T_m \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.70)$$

กรณีของแบริงเพลากลมในงานวิจัยนี้ สมมติฐานให้การทำงานอยู่ในสภาวะของแอเดียแบติก ดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแบริงเพลากลม คือ

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} = 0 \quad (3.71)$$

และเนื่องจาก  $u_1 = 0$ ,  $\ddot{u} = \frac{u_2}{2}$  และ  $x = \theta r$  ถ้าพิจารณาในสภาวะสมดุล ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังนี้

$$\left( \rho c_f \frac{u_2}{2} h - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right) \frac{\partial T_m}{r \partial \theta} + \left( -\rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \frac{\partial T_m}{\partial y}$$

$$= \mu^* \left( \frac{u_2^2}{h} \right) + \left( \beta h T_m \frac{u_2}{2} \right) \frac{dp}{r d\theta} + \left( \frac{h^3}{12\eta} - \beta T_m \frac{h^3}{12\eta} \right) \left( \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right)^2 \quad (3.72)$$

$$+ \left( \frac{h^3}{12\mu^*} - \beta T_m \frac{h^3}{12\mu^*} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2$$

ซึ่งสมการ (3.72) เป็นสมการที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน เมื่อสารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน โดยใช้แบบจำลองความหนืดของคาร์โอ โดยกำหนดสภาวะขอบ คือ  $T(\theta=0) = T_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในแบริงเพลากลม

สมการความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อพิจารณาความหยาบผิว และการยุบตัว หรือ การเปลี่ยนลักษณะยึดหยุ่น (deformation) ของผิวแบริง แสดงดังสมการ (3.73)

$$h = c + e \cos(\theta - \Phi) - \delta h_1(x, y) + \delta h_2(x, y) + \delta h_D(x, y, p) \quad (3.73)$$

เมื่อ  $\delta h_1(x, y)$  และ  $\delta h_2(x, y)$  เป็นความหยาบของผิวแบริง และผิวเพลลา ตามลำดับ รูปแบบของความหยาบในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท คือ (1) ผิวหยาบแบบตามขวาง คือ ความหยาบ มีลักษณะวางตัวแบบขวางการไหลของน้ำมัน ดังรูปที่ 3.1 และ (2) ผิวหยาบแบบตามยาว คือ คลื่นความหยาบมีลักษณะวางตัวเป็นแนวให้น้ำมันไหลไปตามร่องความหยาบได้ ดังรูปที่ 3.2

ถ้าแอมพลิจูดของส่วนสูงความหยาบเท่ากับ  $A_h$  และความยาวคลื่นความหยาบเท่ากับ  $\lambda_h$  เขียนสมการความหยาบได้ดังนี้

กรณีหยาบตามขวาง

$$\delta h_1(x, y) = A_h \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda_h}\right) \quad (3.74)$$

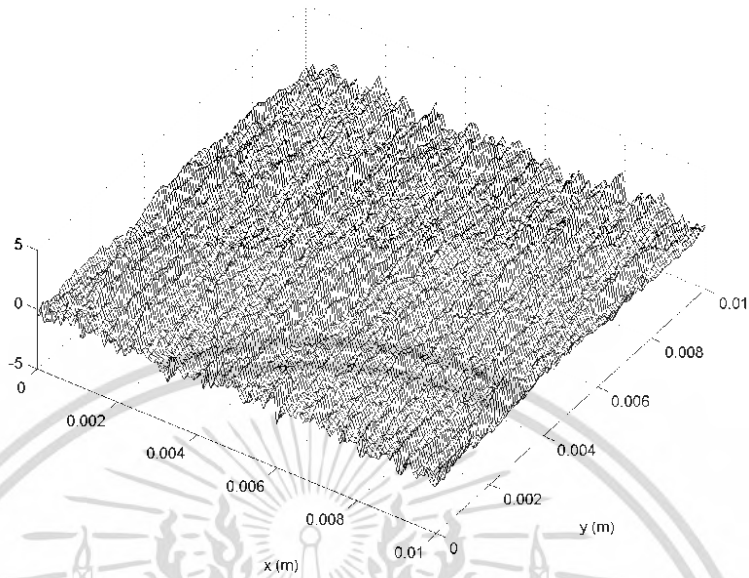
กรณีหยาบตามยาว

$$\delta h_2(x, y) = A_h \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda_h}\right) \quad (3.75)$$

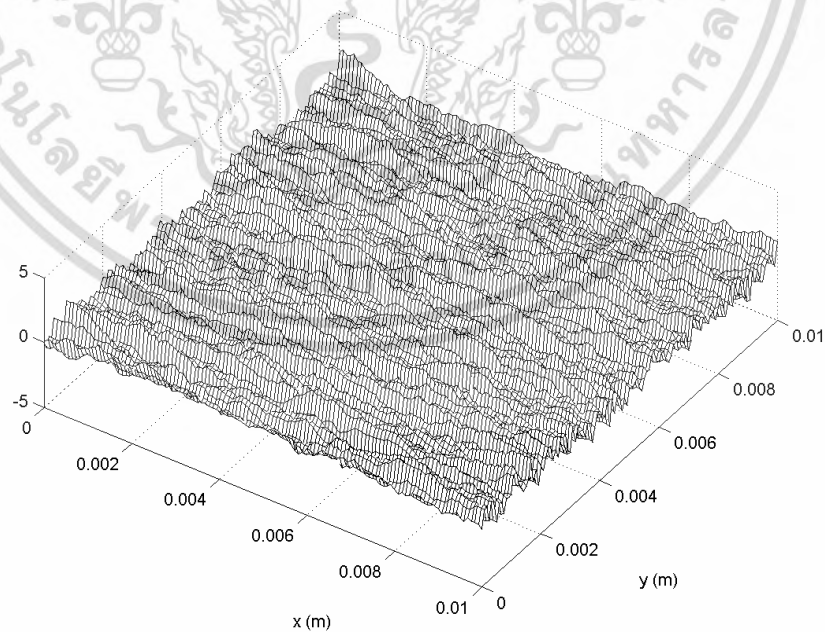
$\delta h_D(x, y, p)$  เป็นการยุบตัวของผิวแบริง Dobrica [58] กล่าวว่าสำหรับพื้นผิวที่แบ่งเป็นกริด  $M \times N$  กริด การยุบตัวของแต่ละกริดจะขึ้นกับความดันที่กริดนั้น โดยสมการการยุบตัว คือ

$$\delta h_D(x, y, p) = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \int_{y_l - \frac{\Delta y}{2}}^{y_l + \frac{\Delta y}{2}} \int_{x_k - \frac{\Delta x}{2}}^{x_k + \frac{\Delta x}{2}} \frac{dx dy}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2}} p_{k,l} \quad (3.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 รูปแบบผิวหยาบตามขวาง ซึ่งขบวนการไหลของสารหล่อลื่น [117]



รูปที่ 3.2 รูปแบบผิวหยาบตามยาวตามแนวการไหลของสารหล่อลื่น [117]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ความดันและอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

จาก Dowson และ Higginson [132] ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน แสดงดังสมการ 3.77

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right) (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.77)$$

### 3.6 ความดันและอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของสารหล่อลื่น

ความดัน และอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนไป ตามทฤษฎีของ Roelands [27]

$$\mu^* = \mu_0^* \exp \left\{ (\ln \mu_0 + 9.67) \left( -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^Z \right) - \gamma(T - T_0) \right\} \quad (3.78)$$

$$\eta = \eta_0 \exp \left\{ (\ln \mu_0 + 9.67) \left( -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^Z \right) - \gamma(T - T_0) \right\} \quad (3.79)$$

เมื่อ  $\mu_0^*$  และ  $\eta_0$  เป็นค่าความหนืดภายใต้อุณหภูมิ และความดันอ้างอิง ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\mu_0^* = \left\{ \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left( 1 + \lambda^2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \right\} \quad (3.80)$$

$$\eta_0 = \left\{ \begin{aligned} & \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left( 1 + \lambda^2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \\ & + 2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 (\mu_0 - \mu_\infty) \left( \frac{n-1}{2} \right) \left( 1 + \lambda^2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 \right)^{\frac{n-3}{2}} \lambda^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.81)$$

### 3.7 ค่าความสามารถในการรับภาระ

ผลรวมของแรงไฮโดรไดนามิกในแนวตั้ง ( $F_\xi$ ) และแนวระดับ ( $F_\psi$ ) คือ ค่าความสามารถในการรับภาระของแบริงเพลากลม

$$F_\xi = - \int_0^{L/\theta} \int_0^\theta p \cos \theta r d\theta dy \quad (3.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{\psi} = -\int_0^L \int_0^{\theta^*} p \sin \theta r d\theta dy \quad (3.83)$$

ทำการแตกแรงเข้าตามแนวเส้นที่ผ่านศูนย์กลางของเพลากลมกับแบริง ( $F_r$ ) และแตกแรงเข้าแกนที่ตั้งฉากกับแนวเส้นที่ผ่านศูนย์กลางของเพลากลมกับแบริง ( $F_{\phi}$ ) คือ

$$F_r = -F_{\xi} \cos \Phi - F_{\psi} \sin \Phi \quad (3.84)$$

$$F_{\phi} = F_{\xi} \sin \Phi - F_{\psi} \cos \Phi \quad (3.85)$$

ดังนั้นจะได้ค่าภาระแรงไฮโดรไดนามิกส์ ( $w$ )

$$w = (F_r^2 + F_{\phi}^2)^{1/2} \quad (3.86)$$

โดยมุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) คือ

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{F_{\phi}}{F_r} \right) \quad (3.87)$$

### 3.8 แรงเสียดทาน

เนื่องจากความเค้นเฉือน  $\tau_{zx}$  เท่ากับ

$$\tau_{zx} = \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) + \mu^* \frac{\partial \delta u'}{\partial z} + 2 \left\{ \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial \delta u'}{\partial z} + \frac{\partial v^*}{\partial z} \frac{\partial \delta v'}{\partial z} \right\} \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \frac{\partial u^*}{\partial z} \quad (3.88)$$

ถ้า  $v_1 = v_2 = 0$ ,  $\frac{\partial v^*}{\partial z} = 0$  และแทนสมการ (3.33) ลงในสมการ (3.88) จะได้

$$\tau_{zx} = \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) + \frac{\partial \delta u'}{\partial z} \left\{ \mu^* + 2 \left( \frac{\partial u^*}{\partial z} \right)^2 \left( \frac{\partial \mu_{eq}}{\partial I} \right)_{I=I^*} \right\} = \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) + \eta \frac{\partial \delta u'}{\partial z} \quad (3.89)$$

$$\delta u' = \frac{z(z-h)}{2} \left\{ \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \quad (3.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \delta u'}{\partial z} = \left( z - \frac{h}{2} \right) \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.91)$$

$$\tau_{zx} = \left( \mu^* \frac{\partial u^*}{\partial z} \right) + \left( z - \frac{h}{2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.92)$$

$$\tau_{zx}|_{z=h} = \mu^* \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right) + \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} \quad (3.93)$$

แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นที่ผิวของเพลากลม หรือ  $z=h$  ได้แรงเสียดทานจากสารหล่อลื่น

$$F_{fric} = \int_0^L \int_0^{2\pi r} \tau_{zx}|_{z=h} dx dy \quad (3.94)$$

$$F_{fric} = \int_0^L \int_0^{2\pi r} \frac{\mu^*}{h} u_2 dx dy \quad (3.95)$$

### 3.9 ทฤษฎีการคำนวณแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลายิ่ง

ในการศึกษาการวางเพลายิ่ง สาเหตุของการเอียงอาจเกิดเนื่องจากการบิดตัวหรือเกิดจากการบิดตัว ซึ่งนอกจากสาเหตุดังกล่าวแล้ว ยังสามารถเกิดการผิดรูปจากผลของอุณหภูมิ ความร้อน จากการใช้งานหนัก หรือการที่ระบบเพลาลูกและแบริงรับภาระมากเกินไปในขณะที่ทำงาน ซึ่งต่างจากตอนเริ่มต้นที่เพลานิ่งหรือตรงศูนย์ ดังนั้นเมื่อมีการใช้งานไประยะหนึ่ง การวางตัวของแนวเพลายิ่งเดิมตรงศูนย์ อาจเกิดการเอียงได้ แสดงดังรูปที่ 3.3 พิจารณาระบบเพลาลูกและแบริง แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก) ประกอบไปด้วยแบริงจำนวน 2 ตัว ที่รองรับเพลาลูกตรงศูนย์ สมมติให้แรงที่กระทำ (load) ที่สภาวะคงตัว ทำให้เกิดการเอียงของแนวเพลาลูกในช่องว่างของฟิล์มสารหล่อลื่น แสดงเส้นประของรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งผลของเพลายิ่งจะส่งผลต่อสมรรถนะของระบบเพลาลูกและแบริงได้ จึงได้ทำการคำนวณหาผลกระทบอันเนื่องจากการเกิดการเอียงของเพลาลูก

#### 3.9.1 สมการความหนาของฟิล์มของแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลายิ่ง

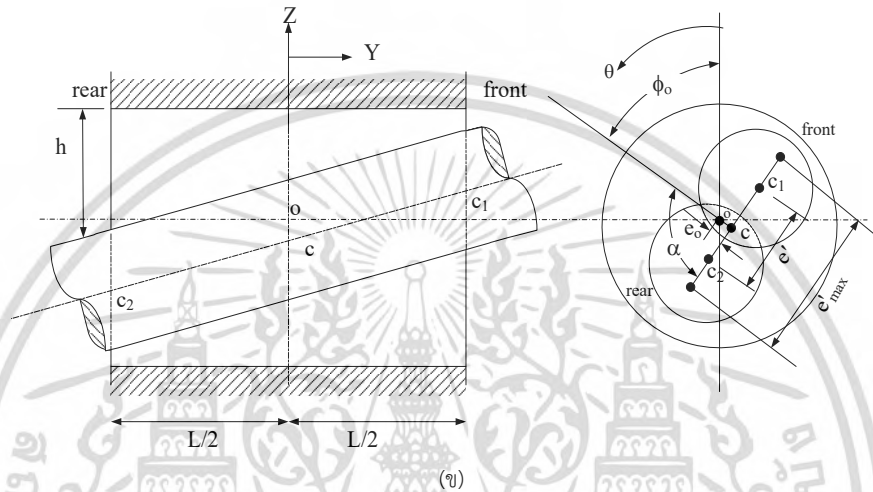
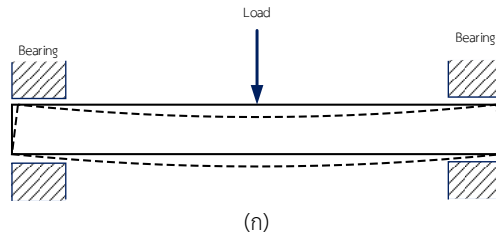
ในการพิจารณาทฤษฎีของแบริงเพลากลมแบบที่มีการวางแนวของเพลายิ่ง การหาความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ( $h$ ) สามารถหาได้จากรูปร่างของแบริง รัศมีเคลียร์แรนซ์ ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาลูกและแบริง ( $\varepsilon$ ) ดังรูปที่ 3.3 (ข)

$$h = c \left( (1 + \varepsilon_0 \cos(\theta - \Phi_0)) + \varepsilon' (2y/L) \cos(\theta - \alpha - \Phi_0) \right) \quad (3.96)$$

$$\varepsilon'_{\max} = 2 \left[ (1 - \varepsilon_0^2 \sin^2 \alpha)^{1/2} - \varepsilon_0 |\cos \alpha| \right] \quad (3.97)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\varepsilon' = D_m \varepsilon'_{\max}$  (3.98)



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการวางแนวของเพลลาเอียงของแบร์ริงเพลลากลม

### 3.10 ทฤษฎีสารเติมแต่งอนุภาคนาโนในแบร์ริงเพลลากลม

#### 3.10.1 ลักษณะทางกายภาพของนาโนฟลูอิด (nanofluid) สำหรับสารหล่อลื่นน้ำมัน

นาโนฟลูอิด (nanofluid) คือ สารที่ผสมด้วยอนุภาคนาโน เช่น น้ำมันผสมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  หรือน้ำผสมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในการคำนวณนี้ได้ทำการสมมติให้สารหล่อลื่นและอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ผสมกันเป็นเฟสเดียวกัน ดังนั้นค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.99 และ 3.100 [96] [133]

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{par} + (1 - \phi) \rho_{oil} \tag{3.99}$$

$$C_{P,nf} = \phi C_{P,par} + (1 - \phi) C_{P,oil} \tag{3.100}$$

ใช้สมการจาก Brinkman [134]

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \mu_{oil} \tag{3.101}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10.2 สมการการคำนวณสารเติมแต่งอนุภาคนาโนในแบริงเพลากลม

ในการวิเคราะห์การหล่อลื่นโดยใช้สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ส์สำหรับสภาวะคงตัว สารหล่อลื่นเป็นน้ำ หรือพิจารณาเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6U \frac{\partial(\rho h)}{r \partial \theta} \quad (3.102)$$

โดยสมการพลังงานสำหรับนาโนฟลูอิด (nanofluid) ภายใต้สภาวะแบบแอเดียบาติก แสดงดังนี้

$$\begin{aligned} & \left( \rho C_{p,nf} \frac{U}{2} h - \rho C_{p,nf} \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right) \frac{\partial T}{r \partial \theta} + \left( -\rho C_{p,nf} \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \\ & = \mu \left( \frac{U^2}{h} \right) + \left( \beta h T \frac{U}{2} \right) \frac{\partial p}{r \partial \theta} + \left( \frac{h^3}{12\mu} - \beta T \frac{h^3}{12\mu} \right) \left( \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right)^2 \\ & + \left( \frac{h^3}{12\mu} - \beta T \frac{h^3}{12\mu} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.103)$$

### 3.10.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ

สำหรับสารหล่อลื่นเป็นน้ำ ค่าความหนาแน่น และความหนืดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ แสดงดังสมการ

$$\rho = \rho_{nf} (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.104)$$

$$\mu = \mu_{nf} \exp\{-\gamma(T - T_0)\} \quad (3.105)$$

## 3.11 ทฤษฎีการคำนวณผลของค่าความยืดหยุ่น

### 3.11.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความหนืด-ความดัน-อุณหภูมิ

ในการวิเคราะห์นั้น ความดัน และอุณหภูมิส่งผลกับความหนืด ( $\eta$ ) ของสารหล่อลื่น ซึ่งจากความสัมพันธ์ของ Roelands [27] แสดงได้ดังสมการ

$$\eta = \eta_0 \exp\left\{(\ln \mu_0 + 9.67) \left(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^2\right) - \gamma(T - T_0)\right\} \quad (3.106)$$

โดยที่ความหนืด  $\eta_0$  คือ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิอ้างอิงและที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น-ความดัน-อุณหภูมิ

ในการคำนวณ พบว่าความหนาแน่นของสารหล่อลื่นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ดังสมการ 3.107

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right) (1 - \beta(T - T_0)) \tag{3.107}$$

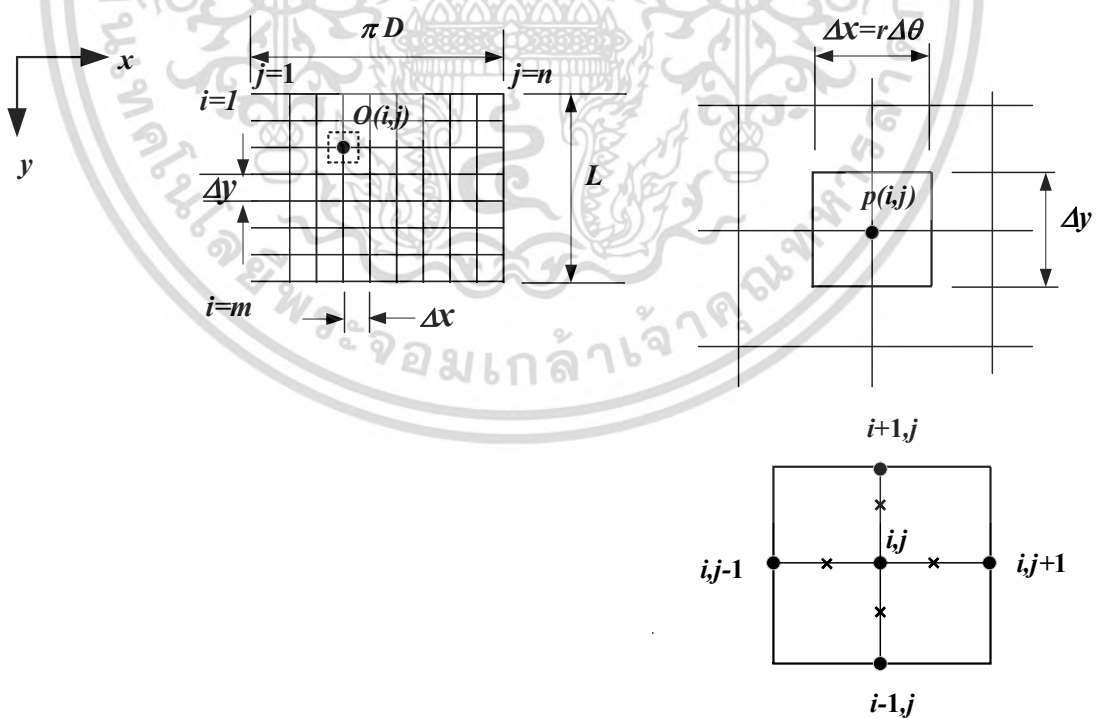
3.12.3 สมการความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อพิจารณาผลของค่าความยืดหยุ่น

ความสูง หรือความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น  $h$  สามารถหาได้จากรูปร่างของแบริงรัศมีเคลียร์แรนซ์ ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) และการเกิดการยุบตัวของแบริง ดังสมการ

$$h = c + e \cos(\theta - \Phi) + \delta h_D(x, y, p) \tag{3.108}$$

โดยที่  $\delta h_D(x, y, p)$  คือ ค่าการยุบตัวของแบริง นำเสนอโดย Dobrica และคณะ [58]

3.12 การแก้สมการเรย์โนลด์สำหรับแบริงเพลลากลม



รูปที่ 3.4 แสดงรูปของความสัมพันธ์ของผลต่างสี่บเนือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาฟิล์มน้ำมันโดยทำการคลี่ฟิล์มน้ำมันออก แบ่งฟิล์มน้ำมันออกเป็นสี่เหลี่ยมเล็ก โดยมีความยาวตามแกน  $x$  เท่ากับ  $x$  และมีความกว้างตามแกน  $y$  เท่ากับ  $y$  โดยกำหนดจุด node  $i, j$  โดยมีจำนวน node เท่ากับ  $m \times n$  ตามรูปที่ 3.4 ซึ่งจากสมการเรย์โนลด์์ ทำการกระจายให้อยู่ในรูปแบบผลต่างสี่เหลี่ยม เมื่อกำหนดให้  $i$  เป็นตำแหน่งตามแกน  $y$  และ  $j$  เป็นตำแหน่งตามแกน  $\theta r$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j+0.5}}{(r\Delta\theta)^2} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j-0.5}}{(r\Delta\theta)^2} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i+0.5,j}}{(\Delta y)^2} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i-0.5,j}}{(\Delta y)^2} \right) p_{i,j} \\ &= \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j+0.5}}{(r\Delta\theta)^2} p_{i,j+1} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j-0.5}}{(r\Delta\theta)^2} p_{i,j-1} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i+0.5,j}}{(\Delta y)^2} p_{i+1,j} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i-0.5,j}}{(\Delta y)^2} p_{i-1,j} \\ & \quad - 6\omega \left( 1 - \frac{2}{\omega} \dot{\Phi} \right) \left( -\rho e \sin(\theta - \Phi) + h \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right) - 12\rho \dot{e} \cos(\theta - \Phi) \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$p_{i,j} = \frac{\left\{ \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j+0.5}}{(r\Delta\theta)^2} p_{i,j+1} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j-0.5}}{(r\Delta\theta)^2} p_{i,j-1} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i+0.5,j}}{(\Delta y)^2} p_{i+1,j} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i-0.5,j}}{(\Delta y)^2} p_{i-1,j} \right\} - 6\omega \left( 1 - \frac{2}{\omega} \dot{\Phi} \right) \left( -\rho e \sin(\theta - \Phi) + h \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right) - 12\rho \dot{e} \cos(\theta - \Phi)}{\left\{ \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j+0.5}}{(r\Delta\theta)^2} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\eta} \right)_{i,j-0.5}}{(r\Delta\theta)^2} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i+0.5,j}}{(\Delta y)^2} + \frac{\left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \right)_{i-0.5,j}}{(\Delta y)^2} \right\}} \quad (3.110)$$

ในการหาค่าคำตอบของสมการ ใช้วิธีทำซ้ำ (iteration) โดยการกำหนดเงื่อนไขของการลู่ออกของคำตอบ

$$\frac{\sum_i \sum_j |P_{ij}^n - P_{ij}^{n-1}|}{\sum_i \sum_j P_{ij}^n} \leq 1 \times 10^{-6} \quad (3.111)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.13 การแก้สมการพลังงานสำหรับแบริงเพลากลม

จากสมการพลังงาน สามารถกระจายในรูปผลต่างสี่เหลี่ยม

$$\begin{aligned}
 & \left( \rho c_f \frac{u_2}{2} h - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) \left( \frac{T_{m,i,j} - T_{m,i,j-1}}{r\Delta\theta} \right) \\
 & + \left( -\rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right) \left( \frac{T_{m,i,j} - T_{m,i-1,j}}{\Delta y} \right) \\
 & = \mu^* \left( \frac{u_2^2}{h} \right) + \left( \beta h T_m \frac{u_2}{2} \right) \left( \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) + \left( \frac{h^3}{12\eta} - \beta T_m \frac{h^3}{12\eta} \right) \left( \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right)^2 \\
 & + \left( \frac{h^3}{12\mu^*} - \beta T_m \frac{h^3}{12\mu^*} \right) \left( \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.112}$$

$$\begin{aligned}
 & \left( \rho c_f \frac{u_2}{2} h - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) \left( \frac{T_{m,i,j}}{r\Delta\theta} \right) - \left( \rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right) \left( \frac{T_{m,i,j}}{\Delta y} \right) \\
 & = \left( \rho c_f \frac{u_2}{2} h - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) \frac{T_{m,i,j-1}}{r\Delta\theta} - \left( \rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right) \left( \frac{T_{m,i-1,j}}{\Delta y} \right) \\
 & + \mu^* \left( \frac{u_2^2}{h} \right) + \left( \beta h T_m \frac{u_2}{2} \right) \left( \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) + \left( \frac{h^3}{12\eta} - \beta T_m \frac{h^3}{12\eta} \right) \left( \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right)^2 \\
 & + \left( \frac{h^3}{12\mu^*} - \beta T_m \frac{h^3}{12\mu^*} \right) \left( \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.113}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,i,j} & = \frac{\left( \rho c_f \frac{u_2}{2} h - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) \frac{T_{m,i,j-1}}{r\Delta\theta} - \left( \rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right) \left( \frac{T_{m,i-1,j}}{\Delta y} \right) + \mu^* \left( \frac{u_2^2}{h} \right) + \left( \beta h T_m \frac{u_2}{2} \right) \left( \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) + \left( \frac{h^3}{12\eta} - \beta T_m \frac{h^3}{12\eta} \right) \left( \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right)^2 + \left( \frac{h^3}{12\mu^*} - \beta T_m \frac{h^3}{12\mu^*} \right) \left( \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right)^2}{\left( \rho c_f \frac{u_2}{2} h - \rho c_f \frac{h^3}{12\eta} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2r\Delta\theta} \right) \left( \frac{1}{r\Delta\theta} \right) - \left( \rho c_f \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta y} \right) \left( \frac{1}{\Delta y} \right)}
 \end{aligned} \tag{3.114}$$

ใช้วิธีทำซ้ำในหาคำตอบสมการ และทำการกำหนดเงื่อนไขของการลู่เข้าของคำตอบ

$$\frac{\sum_i \sum_j |T_{m,ij}^n - T_{m,ij}^{n-1}|}{\sum_i \sum_j T_{m,ij}^n} \leq 1 \times 10^{-6} \tag{3.115}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

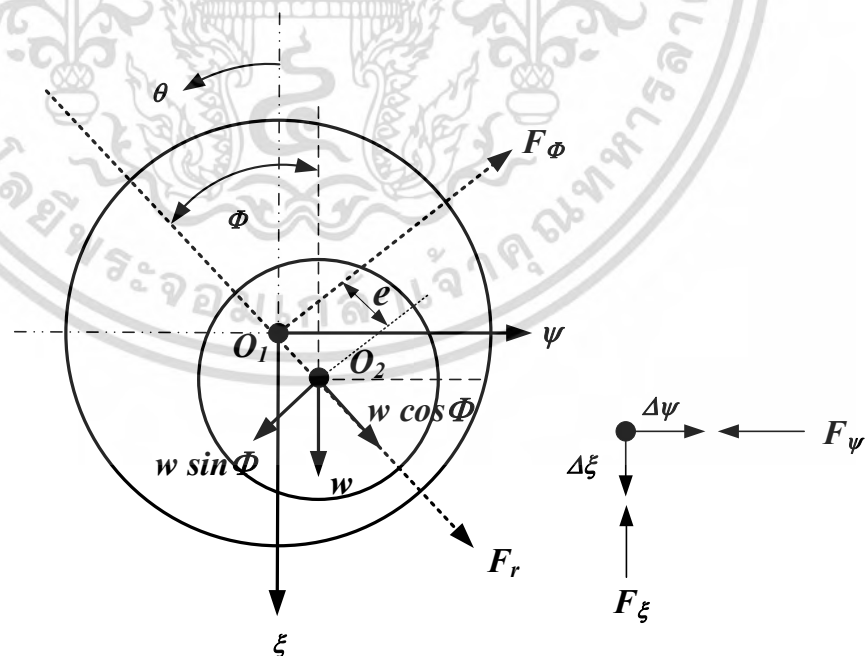
### 3.14 การคำนวณเสถียรภาพของเพลลา

ในการวิเคราะห์คำนวณนำทฤษฎีของ Lund [135] โดยนำมาประยุกต์ใช้กับสารหล่อลื่นที่ใช้แบบจำลองความหนืดคาร์โอ สามารถสร้างเมตริกของความดันตามแกน  $\xi - \psi$  ได้ดังนี้

$$\left[ \begin{array}{c} p_s \\ p_\xi \\ p_\psi \\ p'_\xi \\ p'_\psi \end{array} \right] \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h_s^3}{12\eta} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h_s^3}{12\mu^*} \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] \begin{array}{c} p_s \\ p_\xi \\ p_\psi \\ p'_\xi \\ p'_\psi \end{array} \quad (3.116)$$

$$= \left[ \begin{array}{c} \frac{U}{2r} \frac{\partial(\rho \cos \theta)}{\partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h_s^2 \cos \theta}{4\eta} \frac{\partial p_s}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h_s^2 \cos \theta}{4\mu^*} \frac{\partial p_s}{\partial y} \right) \\ \frac{U}{2r} \frac{\partial(\rho \sin \theta)}{\partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h_s^2 \sin \theta}{4\eta} \frac{\partial p_s}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h_s^2 \sin \theta}{4\mu^*} \frac{\partial p_s}{\partial y} \right) \\ \rho \cos \theta \\ \rho \sin \theta \end{array} \right]$$

เมื่อ  $p_s = (p)_s$ ,  $p_\xi = \left( \frac{\partial p}{\partial \xi} \right)_s$ ,  $p_\psi = \left( \frac{\partial p}{\partial \psi} \right)_s$ ,  $p'_\xi = \left( \frac{\partial p}{\partial \xi} \right)_s$ ,  $p'_\psi = \left( \frac{\partial p}{\partial \psi} \right)_s$



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของแบริงเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = h_s + \Delta\xi \cos\theta + \Delta\psi \sin\theta \quad (3.117)$$

$$h_s = (c + e \cos(\theta - \Phi)) - \delta h_1(x, y) + \delta h_2(x, y) + \delta h_D(x, y, p) \quad (3.118)$$

ในการพิจารณาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบริงเพลากลม กำหนดให้เพลามีระยะขจัดตามแกน  $\xi$  และ  $\psi$  เท่ากับ  $\Delta\xi$  และ  $\Delta\psi$  ไปจากตำแหน่งสมดุล  $\xi_0$  และ  $\psi_0$  และความเร็วที่ศูนย์กลางเพลาดตามแกน  $\xi$  และ  $\psi$  เท่ากับ  $\Delta\dot{\xi}$  และ  $\Delta\dot{\psi}$  คือ ค่าความเร็วแตกต่างไปจากตำแหน่งสมดุล สมการการเคลื่อนที่ของเพลาสถิตสามารถเขียนอยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์ความหน่วง โดยสมมติว่าเพลากร่งและสมมาตร เมื่อเพลากเกิดการขยับอย่างทันทีทันใดจากสภาวะสมดุลเนื่องจากภาวะเปลี่ยน ก็จะทำให้เพลากเกิดการสั่นแบบธรรมชาติตามทิศทางในแนวราบ และแนวตั้ง โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F_\xi = F_{\xi_0} + k_{\xi\xi}\Delta\xi + k_{\xi\psi}\Delta\psi + b_{\xi\xi}\Delta\dot{\xi} + b_{\xi\psi}\Delta\dot{\psi} \quad (3.119)$$

$$F_\psi = F_{\psi_0} + k_{\psi\xi}\Delta\xi + k_{\psi\psi}\Delta\psi + b_{\psi\xi}\Delta\dot{\xi} + b_{\psi\psi}\Delta\dot{\psi} \quad (3.120)$$

โดย

$$k_{\xi\psi} = \left( \frac{\partial F_\xi}{\partial \psi} \right)_0 \quad k_{\xi\xi} = \left( \frac{\partial F_\xi}{\partial \xi} \right)_0 \quad k_{\psi\xi} = \left( \frac{\partial F_\psi}{\partial \xi} \right)_0 \quad k_{\psi\psi} = \left( \frac{\partial F_\psi}{\partial \psi} \right)_0 \quad (3.121)$$

$$b_{\xi\psi} = \left( \frac{\partial F_\xi}{\partial \dot{\psi}} \right)_0 \quad b_{\xi\xi} = \left( \frac{\partial F_\xi}{\partial \dot{\xi}} \right)_0 \quad b_{\psi\xi} = \left( \frac{\partial F_\psi}{\partial \dot{\xi}} \right)_0 \quad b_{\psi\psi} = \left( \frac{\partial F_\psi}{\partial \dot{\psi}} \right)_0 \quad (3.122)$$

$$\begin{bmatrix} F_\xi \\ F_\psi \end{bmatrix} = \iint p \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} r d\theta dy \quad (3.123)$$

การกระจายเทอมของความดันโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ [136, 137,138]

$$p = p_0 + p_\xi \Delta\xi + p_\psi \Delta\psi + p'_\xi \Delta\dot{\xi} + p'_\psi \Delta\dot{\psi} \quad (3.124)$$

$$F_\xi = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} (p_0 + p_\xi \Delta\xi + p_\psi \Delta\psi + p'_\xi \Delta\dot{\xi} + p'_\psi \Delta\dot{\psi}) \cos\theta r d\theta dy \quad (3.125)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{\psi} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} (p_0 + p_{\xi} \Delta \xi + p_{\psi} \Delta \psi + p'_{\xi} \Delta \dot{\xi} + p'_{\psi} \Delta \dot{\psi}) \sin \theta \, rd\theta dy \quad (3.126)$$

$$\begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} (p_0 + p_{\xi} \Delta \xi + p_{\psi} \Delta \psi + p'_{\xi} \Delta \dot{\xi} + p'_{\psi} \Delta \dot{\psi}) \cos \theta \, rd\theta dy \\ -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} (p_0 + p_{\xi} \Delta \xi + p_{\psi} \Delta \psi + p'_{\xi} \Delta \dot{\xi} + p'_{\psi} \Delta \dot{\psi}) \sin \theta \, rd\theta dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{\xi} \\ \Delta \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.127)$$

$$w - \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_0 \cos \theta \, rd\theta dy \right) = m \Delta \ddot{x} + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\xi} \Delta \xi \cos \theta \, rd\theta dy - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\psi} \Delta \psi \cos \theta \, rd\theta dy \right) \\ + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\xi} \Delta \dot{\xi} \cos \theta \, rd\theta dy - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\psi} \Delta \dot{\psi} \cos \theta \, rd\theta dy \right) \quad (3.128)$$

$$0 - \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_0 \sin \theta \, rd\theta dy \right) = m \Delta \ddot{z} + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\xi} \Delta \xi \sin \theta \, rd\theta dy - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\psi} \Delta \psi \sin \theta \, rd\theta dy \right) \\ + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\xi} \Delta \dot{\xi} \sin \theta \, rd\theta dy - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\psi} \Delta \dot{\psi} \sin \theta \, rd\theta dy \right) \quad (3.129)$$

$$m \Delta \ddot{\xi} + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\xi} \cos \theta \, rd\theta dy \Delta \dot{\xi} \right) + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\psi} \cos \theta \, rd\theta dy \Delta \dot{\psi} \right) \\ + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\xi} \cos \theta \, rd\theta dy \Delta \xi \right) + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\psi} \cos \theta \, rd\theta dy \Delta \psi \right) = 0 \quad (3.130)$$

$$m \Delta \ddot{\psi} + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\xi} \sin \theta \, rd\theta dy \Delta \dot{\xi} \right) + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_{\psi} \sin \theta \, rd\theta dy \Delta \dot{\psi} \right) \\ + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\xi} \sin \theta \, rd\theta dy \Delta \xi \right) + \left( -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_{\psi} \sin \theta \, rd\theta dy \Delta \psi \right) = 0 \quad (3.131)$$

$$m \Delta \ddot{\xi} + b_{\xi\xi} \Delta \dot{\xi} + b_{\xi\psi} \Delta \dot{\psi} + k_{\xi\xi} \Delta \xi + k_{\xi\psi} \Delta \psi = 0 \quad (3.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m\Delta\ddot{\psi} + b_{\psi\xi}\Delta\dot{\xi} + b_{\psi\psi}\Delta\dot{\psi} + k_{\psi\xi}\Delta\xi + k_{\psi\psi}\Delta\psi = 0 \quad (3.133)$$

$$\begin{bmatrix} k_{\xi\xi} & k_{\xi\psi} \\ k_{\psi\xi} & k_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_\xi r \cos\theta \, rd\theta dy & -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_\psi r \cos\theta \, d\theta dy \\ -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_\xi r \sin\theta \, rd\theta dy & -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p_\psi r \sin\theta \, rd\theta dy \end{bmatrix} \quad (3.134)$$

$$\begin{bmatrix} b_{\xi\xi} & b_{\xi\psi} \\ b_{\psi\xi} & b_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_\xi r \cos\theta \, rd\theta dy & -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_\psi r \cos\theta \, d\theta dy \\ -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_\xi r \sin\theta \, rd\theta dy & -\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p'_\psi r \sin\theta \, rd\theta dy \end{bmatrix} \quad (3.135)$$

สมการการเคลื่อนที่ของเพลลา คือ

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{\xi} \\ \Delta\ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\xi\xi} & b_{\xi\psi} \\ b_{\psi\xi} & b_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\xi} \\ \Delta\dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{\xi\xi} & k_{\xi\psi} \\ k_{\psi\xi} & k_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\xi \\ \Delta\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.136)$$

เขียนเทอมสัมประสิทธิ์ความหน่วง และสัมประสิทธิ์สปริงในรูปแบบไร้มิติ ได้ดังนี้

$$\frac{w}{c\omega^2} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{\xi} \\ \Delta\ddot{\psi} \end{bmatrix} + \frac{w}{c\omega} \begin{bmatrix} B_{\xi\xi} & B_{\xi\psi} \\ B_{\psi\xi} & B_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\xi} \\ \Delta\dot{\psi} \end{bmatrix} + \frac{w}{c} \begin{bmatrix} K_{\xi\xi} & K_{\xi\psi} \\ K_{\psi\xi} & K_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\xi \\ \Delta\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.137)$$

คำตอบของสมการ 3.136 คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta\xi \\ \Delta\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{\Omega t\omega} \quad (3.138)$$

แทนลงในสมการ 3.136

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \Omega^2 e^{\Omega t\omega} + \begin{bmatrix} B_{\xi\xi} & B_{\xi\psi} \\ B_{\psi\xi} & B_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \Omega e^{\Omega t\omega} + \begin{bmatrix} K_{\xi\xi} & K_{\xi\psi} \\ K_{\psi\xi} & K_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{\Omega t\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.139)$$

$$\begin{bmatrix} M_p + \Omega B_{\xi\xi} + K_{\xi\xi} & \Omega B_{\xi\psi} + K_{\xi\psi} \\ \Omega B_{\psi\xi} + K_{\psi\xi} & M_p + \Omega B_{\psi\psi} + K_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{\Omega t\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.140)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้หมายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristic equation คือ

$$(M_p + \Omega B_{\xi\xi} + K_{\xi\xi})(M_p + \Omega B_{\psi\psi} + K_{\psi\psi}) - (\Omega B_{\psi\xi} + K_{\psi\xi})(\Omega B_{\xi\psi} + K_{\xi\psi}) = 0 \quad (3.141)$$

ค่าพารามิเตอร์มวล (mass parameter),  $M_p$

$$M_p = M\Omega^2 = \left( \frac{c\omega^2 m}{w} \right) \Omega^2 ; \Omega = \frac{\omega_p}{\omega} \quad (3.142)$$

$$M\Omega^2 = \frac{K_{\xi\xi} B_{\psi\psi} + K_{\psi\psi} B_{\xi\xi} - K_{\xi\psi} B_{\psi\xi} - K_{\psi\xi} K_{\psi\psi}}{B_{\xi\xi} + B_{\psi\psi}} \quad (3.143)$$

$$\Omega^2 = \frac{(K_{\psi\psi} - M\Omega^2)(K_{\xi\xi} - M\Omega^2) - K_{\psi\xi} K_{\xi\psi}}{B_{\xi\xi} B_{\psi\psi} - B_{\psi\xi} B_{\xi\psi}} \quad (3.144)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการคำนวณ

ผลของค่าความยืดหยุ่น ผลของความหยาบผิว และผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อสมรรถนะของระบบเพลลาและแบริง ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้สมการเรย์โนลด์ สมการพลังงาน ร่วมกับแบบจำลองของคาโอสำหรับสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน และสมการการเคลื่อนที่ของระบบเพลลาและแบริง เพื่อแสดงผลพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ของระบบเพลลาและแบริง เช่น การกระจายของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น การกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความสามารถในการรับภาระของแบริงเพลลา กลม คำนวณหาแรงเนื่องจากความผิดขณะที่เพลลาหมุนเนื่องสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน รวมถึงค่ามุมแอททิจูด (attitude angle,  $\Phi$ ) ซึ่งผลต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำงาน เช่น การทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร โดยฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเพลลาและแบริงจะทำหน้าที่เป็นเสมือนสปริง (spring) และแดมเปอร์ (damper) ซึ่งการวิเคราะห์ความเสถียรของแบริงเพลลา กลม นั้น จะเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์สปริง ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง และเส้นทางเดินของจุดศูนย์กลางของเพลลา

#### 4.1 ผลของการวางแนวเพลลาเอียงของแบริงเพลลา กลม

ในการพิจารณาระบบเพลลาและแบริง ซึ่งมีแนวแกนของเพลลาตรงศูนย์ (alignment) แต่แนวแกนเพลลาอาจจะเกิดการเอียง (misalignment) ได้จากหลาย ๆ สาเหตุ เช่น เกิดการเอียงจากกระบวนการผลิต หรือเกิดจากความผิดพลาดของกระบวนการติดตั้ง หรือเกิดจากการใช้งาน เช่น การรับภาระที่มากเกินไป ทำให้เกิดการเอียงของเพลลาในช่องว่างของฟิล์มสารหล่อลื่น ซึ่งอาจจะส่งผลต่อสมรรถนะของระบบเพลลาและแบริงได้ จึงทำการศึกษาผลของของการวางแนวเพลลาเอียงต่อพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ และพลศาสตร์ของแบริงเพลลา กลม ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) ใช้แบบจำลองคาโอสำหรับสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน โดยรูปที่ 3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของแบริงเพลลา กลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง มืองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา (degree of misalignment,  $D_m$ ) และมุมเอียง (angle of misalignment,  $\alpha$ )

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลลา กลม และสารหล่อลื่น

ในการคำนวณ ใช้สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลลา กลม และสมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน แสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ ความละเอียดของกริดในการคำนวณเท่ากับ  $270 \times 90$  ใช้วิธีการทำซ้ำ โดยกำหนดเงื่อนไขการลู่เข้าของคำตอบให้มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของแปรงเฟลากลม

สมบัติ	รายละเอียด
ค่ารัศมีของเฟลากลม, $r$	0.015 m
รัศมีเคลียร์เรนซ์, $c$	60 $\mu$ m
ความยาวของแปรง, $L$	0.030 m
ความเร็วรอบ, $N$	3,000 rpm

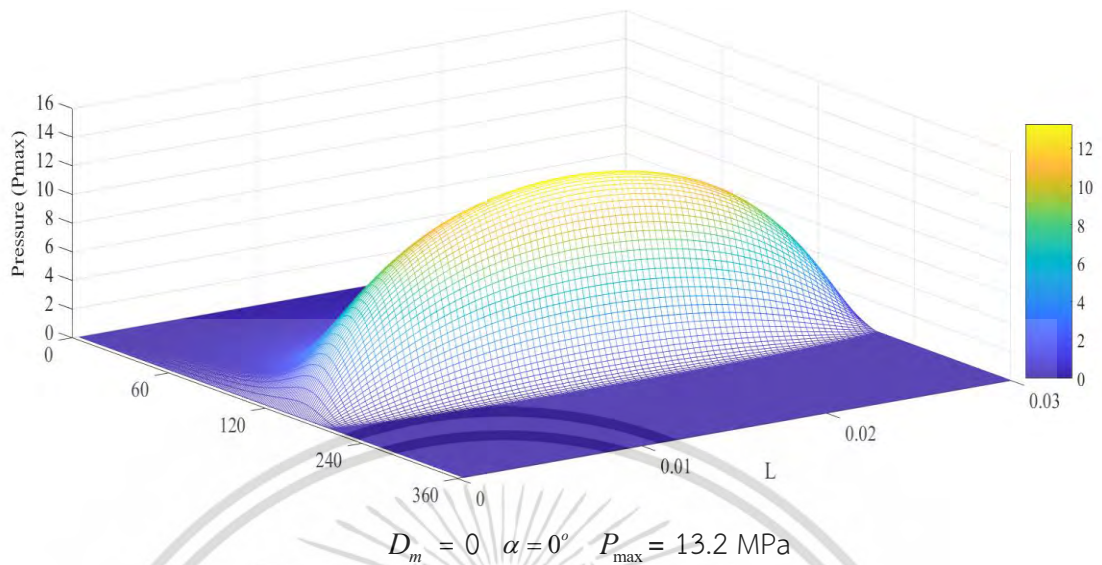
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
ชนิดของสารหล่อลื่น	SAE10W50
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนต่ำ, $\mu_0$	0.107 Pa·s
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนสูง, $\mu_\infty$	0.054 Pa·s
Characteristic relaxation time constant, $\lambda$	$3.0 \times 10^{-6}$ s
ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, $\rho$	$875 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารหล่อลื่น, $C_{p,f}$	$1,900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
อุณหภูมิเริ่มต้นของสารหล่อลื่น, $T_0$	313 K
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ, $\gamma$	$0.0310174 \text{ K}^{-1}$

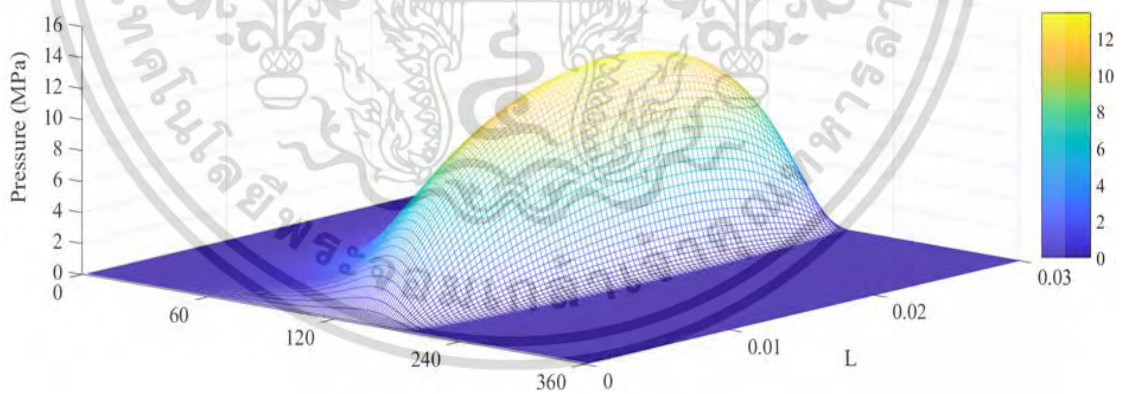
#### 4.1.2 ผลการคำนวณ

การกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นของแปรงเฟลากลมที่มีการวางแนวแกนของเฟลาอยู่ในแนวเส้นตรง หรือเฟลาที่ตรงศูนย์ (alignment) คือ องศาการเอียงของแนวแกนเฟลา ( $D_m = 0$ ) และค่ามุมของการเอียง ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $0^\circ$  พบว่าค่าของความดันสูงสุดมีค่า 13.2 MPa แสดงดังรูปที่ 4.1

การกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อการวางแนวเอียง (misalignment) ที่ค่าอัตราส่วนความเอียงศูนย์ของเฟลาและแปรงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ ) และค่ามุมของการเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ ) ซึ่งมีค่าองศาการเอียงของแนวแกนเฟลาเท่ากับ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 ( $D_m = 0.1$  0.2 0.3 และ 0.4) แสดงดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 ตามลำดับ

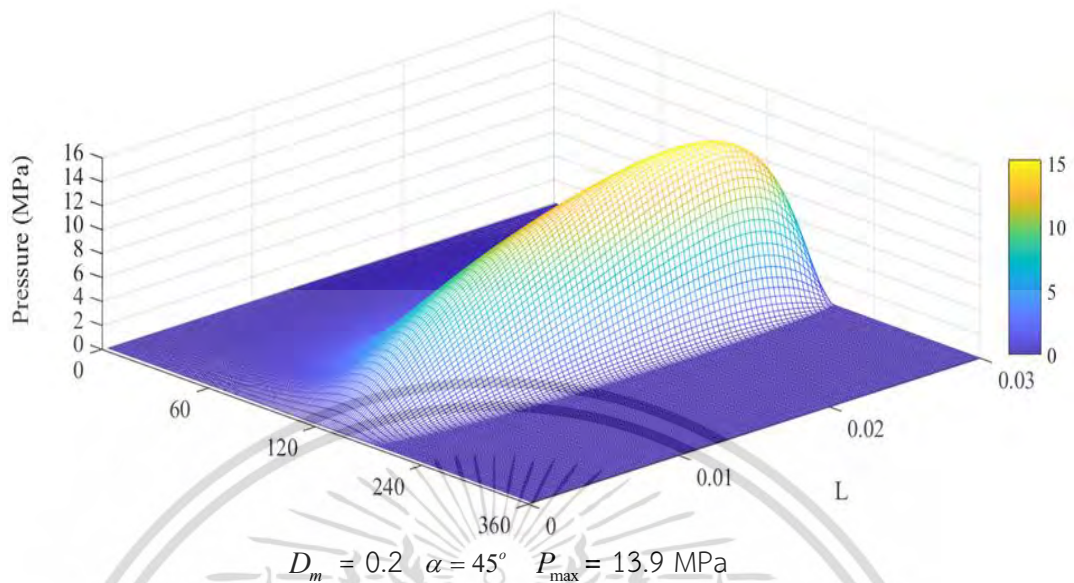


**รูปที่ 4.1** แสดงการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแปรงเพลากลมที่เพลาดตรงศูนย์ (ไม่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลาด  $(D_m = 0)$  และไม่มีมุมเอียง  $(\alpha = 0^\circ)$ ) ทำงานภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลาดและแปรงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

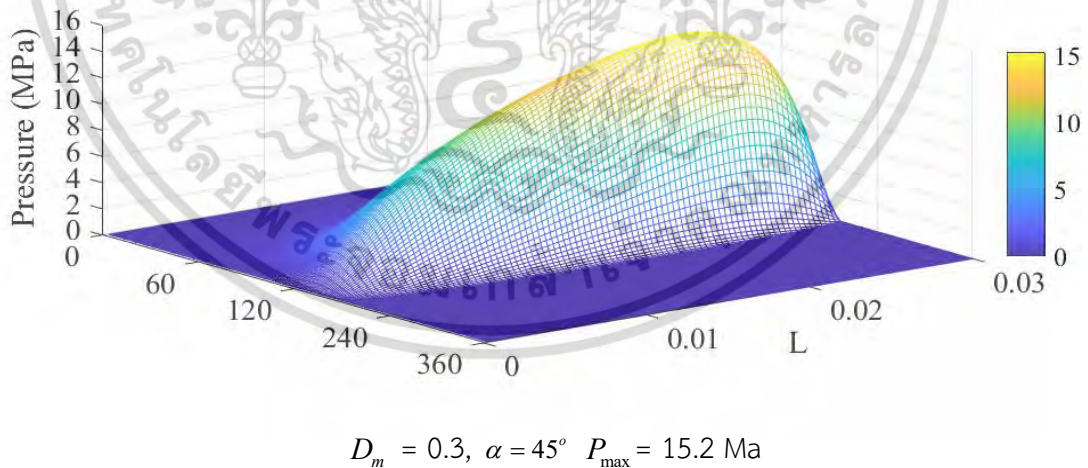


**รูปที่ 4.2** แสดงการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแปรงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลาดเอียง  $(D_m = 0.1, \alpha = 45^\circ)$  โดยทำงานภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์ของเพลาดและแปรงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

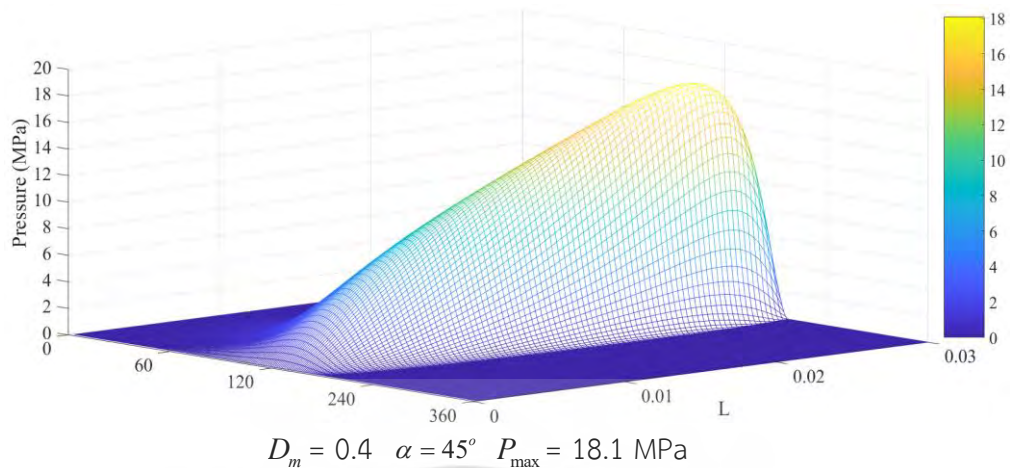


รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริ่งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลาดิ่ง ( $D_m = 0.2$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงานภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาดิ่งและแบริ่งเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )



รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริ่งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลาดิ่ง ( $D_m = 0.3$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงานภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาดิ่งและแบริ่งเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.5** แสดงการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในแบริ่งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลາเอียง ( $D_m = 0.4$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ) โดยทำงานภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริ่งเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

เมื่อพิจารณาค่าความดันสูงสุดของรูปที่ 4.2 ซึ่งมีองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.1 ( $D_m = 0.1$ ) พบว่าค่าความดันสูงสุดของฟิล์มน้ำมันมีค่าเท่ากับ 13.4 MPa เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5 ที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.4 ( $D_m = 0.4$ ) ซึ่งค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 18.1 MPa ดังนั้นที่องศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.4 ( $D_m = 0.4$ ) มีค่าความดันสูงสุดสูงกว่าองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.1 ( $D_m = 0.1$ ) ถึงร้อยละ 35.1

เมื่อองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.2 ( $D_m = 0.2$ ) ค่าความดันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 13.9 MPa แสดงดังรูปที่ 4.2 และที่องศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.3 ( $D_m = 0.3$ ) ค่าความดันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 15.2 MPa แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่องศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.4 ( $D_m = 0.4$ ) ที่มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 18.1 MPa พบว่าความดันสูงสุดของฟิล์มน้ำมันเมื่อองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.4 ( $D_m = 0.4$ ) นั้นมีค่ามากกว่าองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.3 ( $D_m = 0.3$ ) ถึงร้อยละ 19.1 และมีความมากกว่าองศาการเอียงของแนวแกนเพลาท่ากับ 0.2 ( $D_m = 0.2$ ) ถึงร้อยละ 30.2 ตำแหน่งของความดันสูงสุดจะเปลี่ยนตำแหน่งไป โดยจะย้ายไปบริเวณท้าย ซึ่งการเอียงมีผลต่อตำแหน่งของการเกิดความดันสูงสุด [65]

ค่าความสามารถในการรับภาระ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย และค่าพารามิเตอร์มวลสำหรับแบริ่งเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลาเอียง ( $D_m = 0.2$  0.3 และ 0.4) ซึ่งมีค่ามุมเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ ) ที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลาและแบริ่งเท่ากับ 0.7 และ 0.8 ( $\varepsilon = 0.7, 0.8$ ) แสดงดังตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าความสามารถในการรับภาระ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย และค่าพารามิเตอร์มวล พบว่า ค่าความสามารถในการรับภาระ และค่าพารามิเตอร์มวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) แต่ในทางตรงกันข้ามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) ต่อค่าความสามารถในการรับภาระ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย และค่าพารามิเตอร์มวล พบว่าค่าความสามารถในการรับภาระ และค่าพารามิเตอร์มวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) แต่ในทางตรงกันข้ามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าลดลง ซึ่งผลจากตารางที่ 4.5 แสดงว่าการเอียงทำให้เสถียรภาพดีขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ ( $D_m = 0$  และ  $\alpha = 0^\circ$ ) กับกรณีที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ( $D_m = 0.2$  0.3 และ 0.4) พบว่าแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงที่สุด แต่มีค่าความสามารถในการรับภาระต่ำสุด

ดังนั้นผลจากตารางที่ 4.3-4.5 เมื่อเปรียบเทียบผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) ที่มีต่อคุณลักษณะแบริง พบว่า ที่ค่ามุมเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ ) ค่า  $D_m$  ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.2 ไป 0.4 ส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับภาระเพิ่มมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลง และเสถียรภาพดีขึ้น

**ตารางที่ 4.3** ผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าความสามารถในการรับภาระของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง โดยมีมุมเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ )

$\varepsilon$	ความสามารถในการรับภาระ (kN)			
	เพลลาตรงศูนย์ ( $D_m = 0$ $\alpha = 0^\circ$ )	เพลลาเอียง มีมุมเอียง $\alpha = 45^\circ$		
		องศาการเอียง $D_m = 0.2$	องศาการเอียง $D_m = 0.3$	องศาการเอียง $D_m = 0.4$
0.7	3.08	3.15	3.25	3.43
0.8	4.58	4.67	4.79	4.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

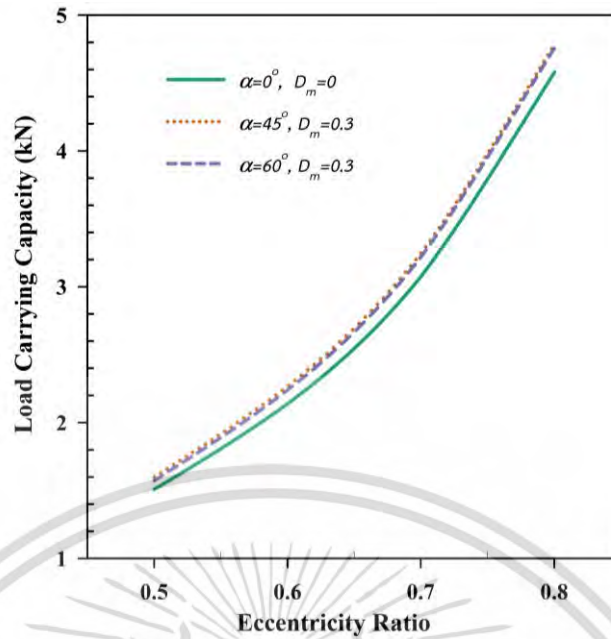
ตารางที่ 4.4 ผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแบริงเพลลา กลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง โดยมีมุมเอียง เท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ )

$\varepsilon$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน			
	เพลลาตรงศูนย์กลาง ( $D_m = 0 \alpha = 0^\circ$ )	เพลลาเอียง มีมุมเอียง $\alpha = 45^\circ$		
		องศาการเอียง $D_m = 0.2$	องศาการเอียง $D_m = 0.3$	องศาการเอียง $D_m = 0.4$
0.7	$8.03 \times 10^{-3}$	$7.84 \times 10^{-3}$	$7.59 \times 10^{-3}$	$7.16 \times 10^{-3}$
0.8	$5.56 \times 10^{-3}$	$5.44 \times 10^{-3}$	$5.29 \times 10^{-3}$	$5.04 \times 10^{-3}$

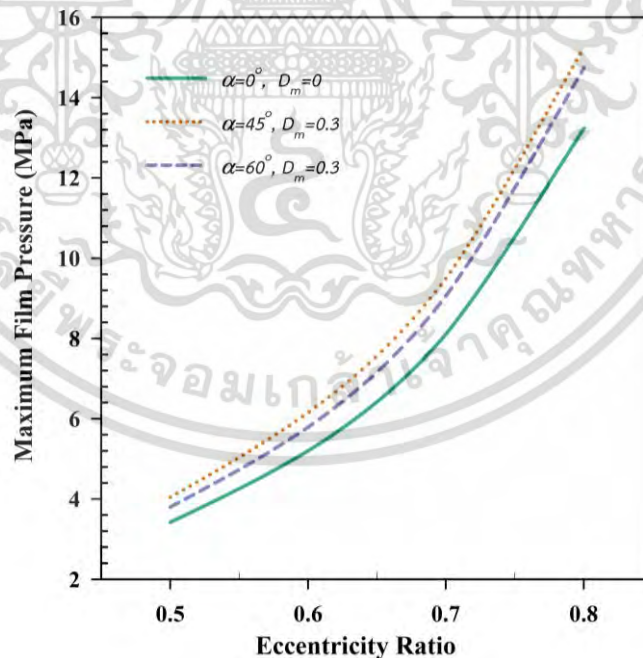
ตารางที่ 4.5 ผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ต่อค่าพารามิเตอร์มวลของแบริงเพลลา กลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง โดยมีมุมเอียง เท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ )

$\varepsilon$	พารามิเตอร์มวล			
	เพลลาตรงศูนย์กลาง ( $D_m = 0 \alpha = 0^\circ$ )	เพลลาเอียง มีมุมเอียง $\alpha = 45^\circ$		
		องศาการเอียง $D_m = 0.2$	องศาการเอียง $D_m = 0.3$	องศาการเอียง $D_m = 0.4$
0.7	7.33	7.74	8.35	10.09
0.8	8.22	9.09	10.64	16.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

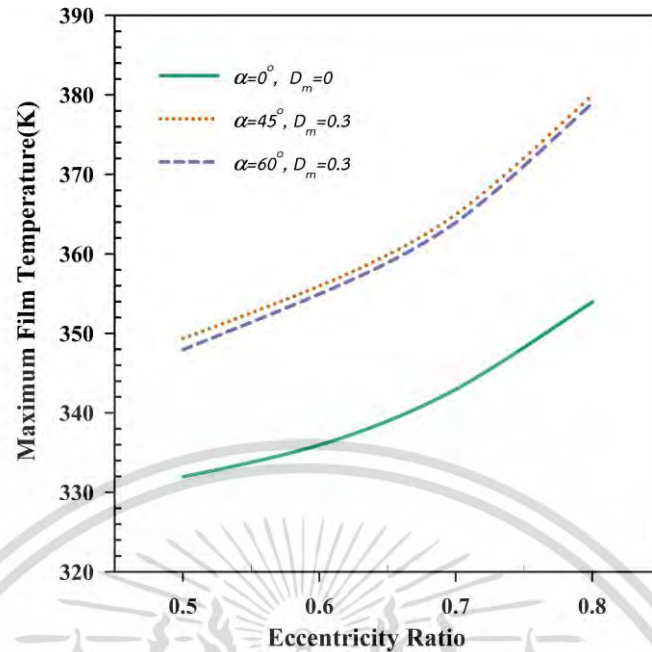


รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระของฟิล์มน้ำมัน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบรริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบรริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบรริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

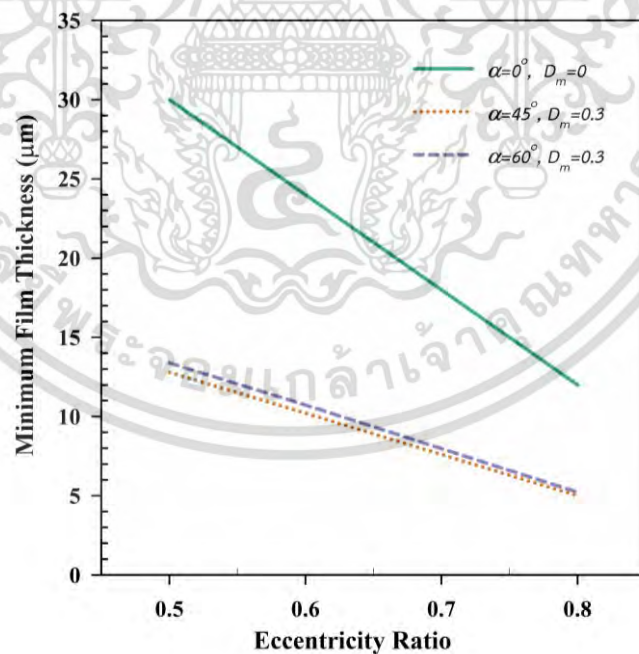


รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบรริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบรริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบรริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

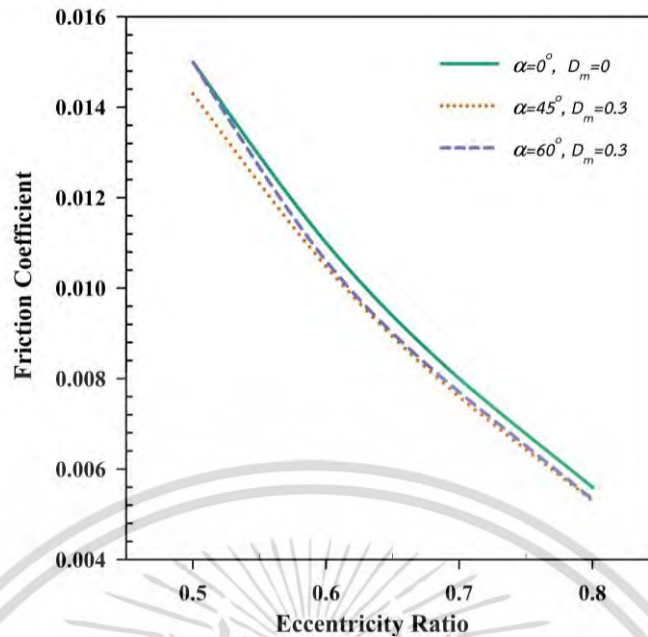


รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลางและแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

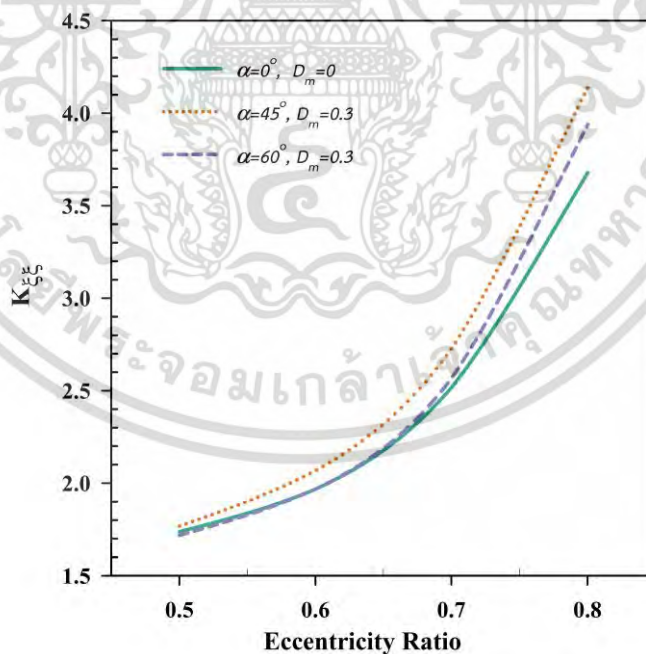


รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มต่ำสุด เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลางและแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

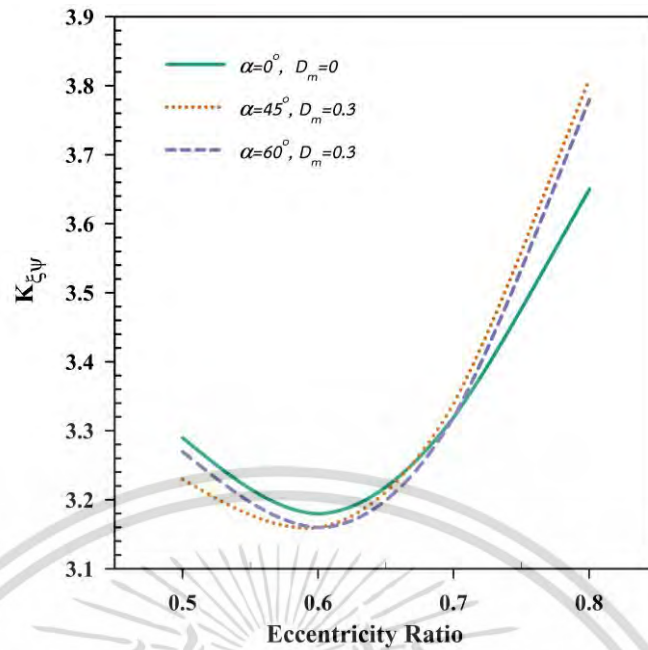


รูปที่ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

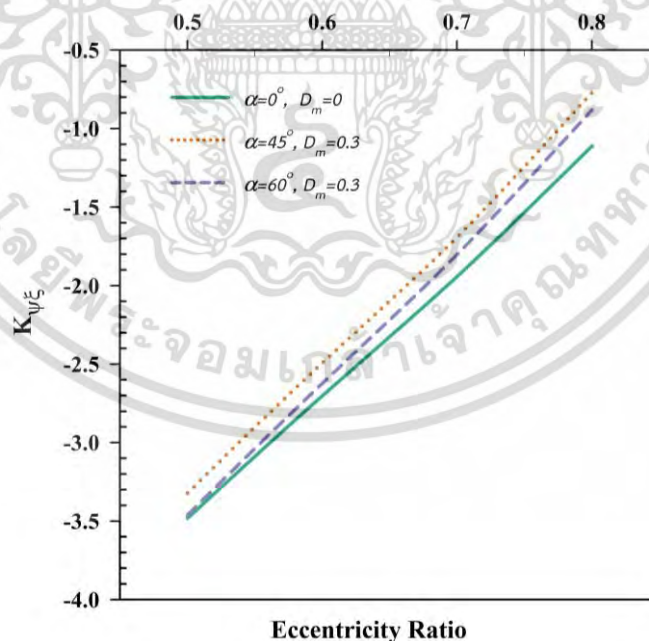


รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{zz}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์กลาง และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

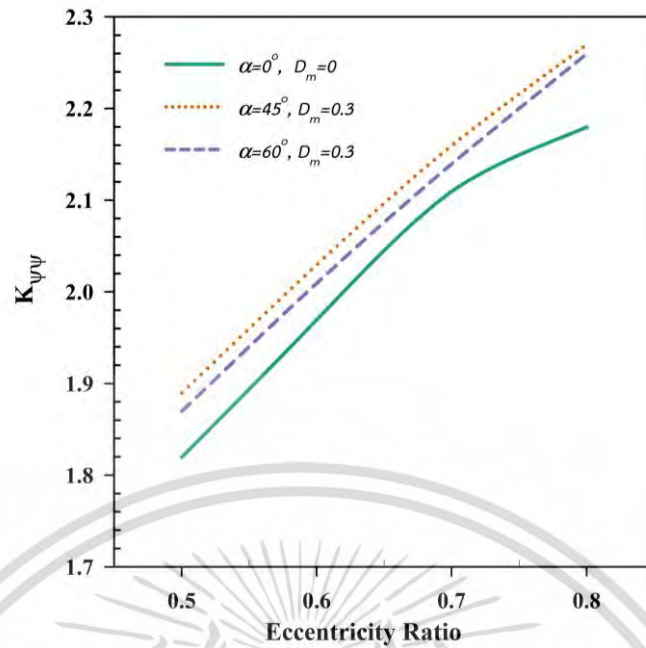


รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\psi}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\epsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

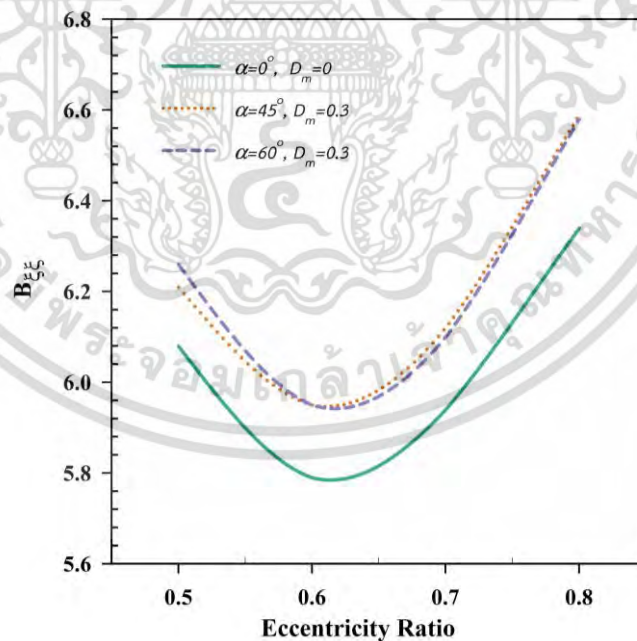


รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\xi}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\epsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

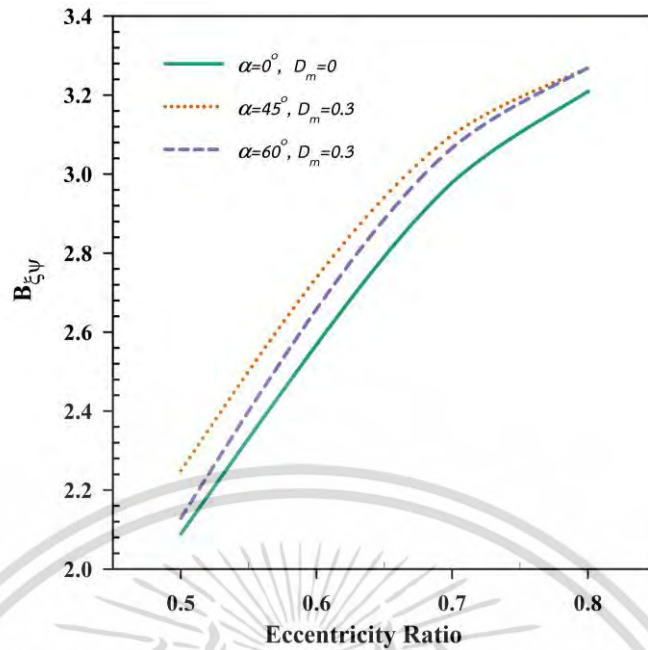


รูปที่ 4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\psi}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

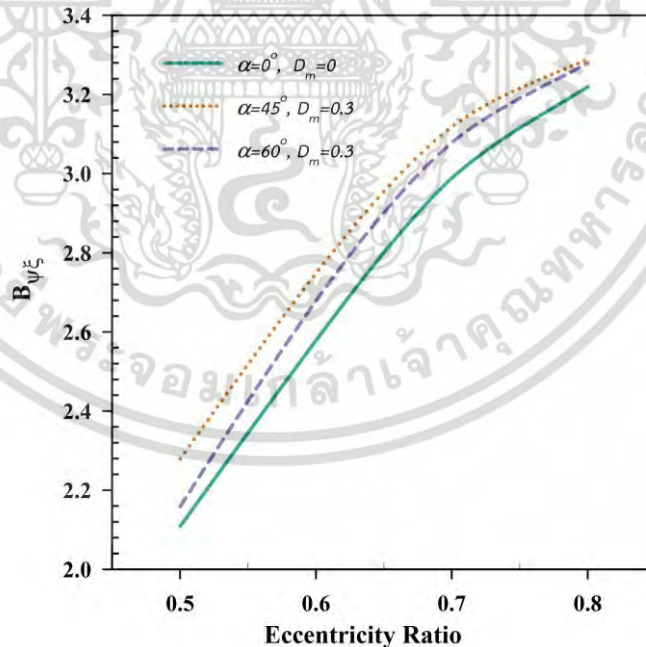


รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\xi}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

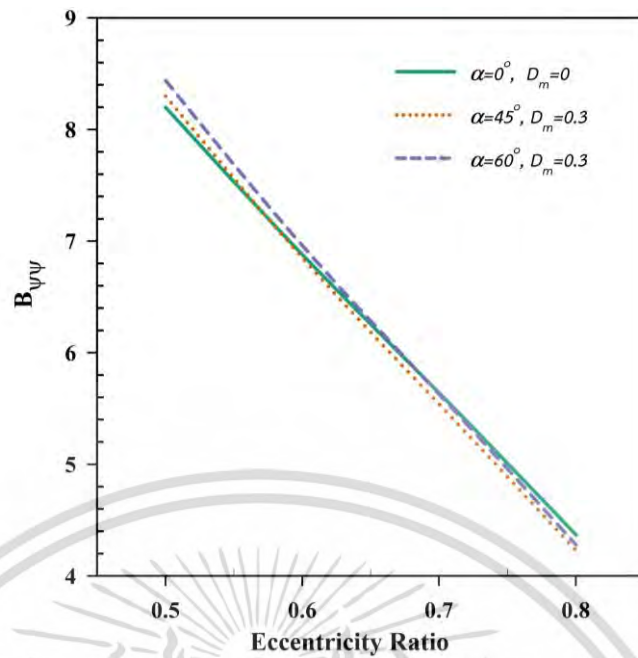


รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\zeta, \psi}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

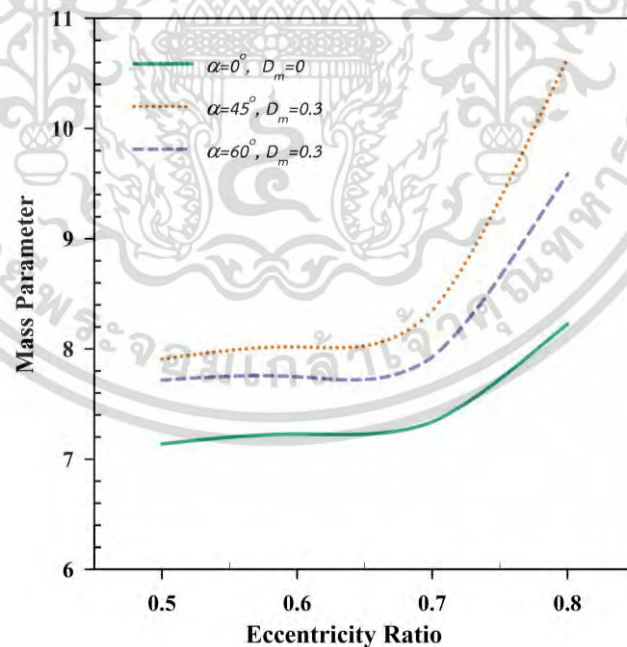


รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\psi, \zeta}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแบริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแบริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\psi}$ ) เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแปริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแปริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแปริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )



รูปที่ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางกลางของเพลลาและแปริงเท่ากับ 0.5 ถึง 0.8 ( $\varepsilon = 0.5-0.8$ ) ของแปริงเพลลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ และแปริงเพลลากลมที่มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมเอียง ( $\alpha$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง (มีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) และมีมุมการเอียง ( $\alpha$ )) ประกอบไปด้วย ค่าความสามารถในการรับภาระ ค่าความดันสูงสุด ค่าอุณหภูมิสูงสุด ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.10 ตามลำดับ ทำการเปรียบเทียบแบริงเพลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ ( $D_m=0, \alpha=0$ ) กับแบริงเพลากลมที่มีแนวของเพลลาเอียง ซึ่งมีองศาการเอียงของแนวแกนเพลลาเท่ากับ  $0.3$  ( $D_m=0.3$ ) โดยมีค่ามุมเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  ( $\alpha=45^\circ, 60^\circ$ ) ที่ทำงานภายใต้อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง เท่ากับ  $0.5$  ถึง  $0.8$  ( $\varepsilon=0.5-0.8$ )

ผลทางพลศาสตร์ของแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ทำการเปรียบเทียบกับแบริงเพลากลมที่เพลลาตรงศูนย์ แสดงดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.19 โดยค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ  $K_{\xi\xi}$   $K_{\xi\eta}$   $K_{\eta\xi}$  และ  $K_{\eta\eta}$  แสดงดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ  $B_{\xi\xi}$   $B_{\xi\eta}$   $B_{\eta\xi}$  และ  $B_{\eta\eta}$  แสดงตามรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.18 ตามลำดับ โดยผลของค่าพารามิเตอร์มวลแสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติของแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียงที่มุมการเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha=45^\circ$ ) จะมีค่ามากกว่ามุมการเอียงเท่ากับ  $60^\circ$  ( $\alpha=60^\circ$ )

ดังนั้นจากรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.20 เปรียบเทียบผลของค่ามุมเอียง ( $\alpha$ ) ที่มีต่อแบริงเพลากลมพบว่าค่ามุมเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\alpha=45^\circ$ ) ให้ผลดีต่อคุณลักษณะทางสถิติศาสตร์ และพลศาสตร์ของแบริงเพลากลม ดีกว่าค่ามุมเอียงเท่ากับ  $60^\circ$  ( $\alpha=60^\circ$ ) และค่ามุมเอียง ( $\alpha$ ) ดีกว่าแบบตรงศูนย์ เมื่อทำการพิจารณาผลขององศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) พบว่าค่าความสามารถในการรับภาระจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อองศาการเอียงของแนวแกนเพลลา ( $D_m$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น

## 4.2 ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบริงเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแบบนิวโตเนียน

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นน้ำมันแบบนิวโตเนียน ต่อพฤติกรรมทางสถิติของแบริงเพลากลม เมื่อการวางแนวของเพลลาตรงศูนย์ (alignment) ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) ทำการแสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  5% และ 10% โดยปริมาตร โดยกำหนดให้สารหล่อลื่นน้ำมันนิวโตเนียน SAE20 และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ผสมกันเป็นเฟสเดียว

### 4.2.1 สมบัติของแบริงเพลากลม และสารหล่อลื่นนิวโตเนียน

สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลมที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6 และค่าสมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยสารหล่อลื่นมีสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกายภาพของแบรริงเพลากลม เมื่อเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
ความยาวของแบรริง, $L$	0.030 m
รัศมีเคลียร์เรนซ์, $c$	30 $\mu$ m
อัตราเร็วรอบ, $N$	3,000 rpm
ค่าความยืดหยุ่น, $E$	100 GPa
ค่าอัตราส่วนปัวซองของแบรริง, $\nu$	0.3

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$

สมบัติ	รายละเอียด
ความหนาแน่นของอนุภาค, $\rho_{par}$	3,890 $kg \cdot m^{-3}$
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค, $C_{P,par}$	729 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
ชนิดของสารหล่อลื่น	SAE 20
ความหนืดของสารหล่อลื่น, $\mu_{oil}$	0.050 mPa·s
ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, $\rho_{oil}$	875 $kg \cdot m^{-3}$
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารหล่อลื่น, $C_{P,oil}$	1,900 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
อุณหภูมิทางเข้าของสารหล่อลื่น, $T_0$	313 K
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ, $\gamma$	0.0310174 $K^{-1}$
ค่าสัมประสิทธิ์สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ, $\beta$	0.000788 $K^{-1}$
Viscosity-Pressure index, $Z$	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการคำนวณ

การกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อแบริงเพลากลมทำงานที่ค่าความสามารถในการรับภาระเท่ากับ 3 kN แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่เติมในน้ำมันนิวโตเนียน SAE20 ที่ความเข้มข้น 5% และ 10% โดยปริมาตร เทียบกับน้ำมันนิวโตเนียน SAE20 ที่ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จากผลที่แสดง พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ส่งผลต่อการกระจายของฟิล์มของความดันของน้ำมัน คือ ทำให้ค่าความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นลดลง

ค่าความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ ตั้งแต่ 0.5 kN ถึง 3.5 kN แสดงดังรูปที่ 4.21 ทำการพิจารณาค่าความดันสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน และทำการเปรียบเทียบผลของการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในน้ำมันนิวโตเนียน SAE 20 เทียบกับกรณีที่ไม่เติม พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง โดยมีค่าแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เมื่อทำการพิจารณาที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน คือ ที่ค่าเท่ากับ 3 kN พบว่าสำหรับน้ำมัน SAE20 ที่ไม่เติมนั้นจะมีค่าความดันสูงสุดของเท่ากับ 7.63 MPa โดยที่สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  5% จะมีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 7.46 MPa และสำหรับสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  10% จะมีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 7.27 MPa แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความสามารถในการรับภาระ 1 kN จากผลการคำนวณพบว่าน้ำมันนิวโตเนียน SAE20 ทั้งกรณีที่ไม่เติม และกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะมีค่าความดันสูงสุดเท่ากัน คือ 2.1 MPa ดังนั้นสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลต่อการลดลงของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น และจะมีผลมากเมื่อแบริงเพลากลมทำงานภายใต้สภาวะการรับภาระที่สูง ๆ

ผลการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นแสดงดังรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN โดยรูปที่ 4.23 แสดงการกระจายของอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ จากผลที่แสดง พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลช่วยในการลดอุณหภูมิ และเมื่อทำการพิจารณาที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่แบริงเพลากลมทำงานภายใต้การรับภาระที่สูงมาก ๆ

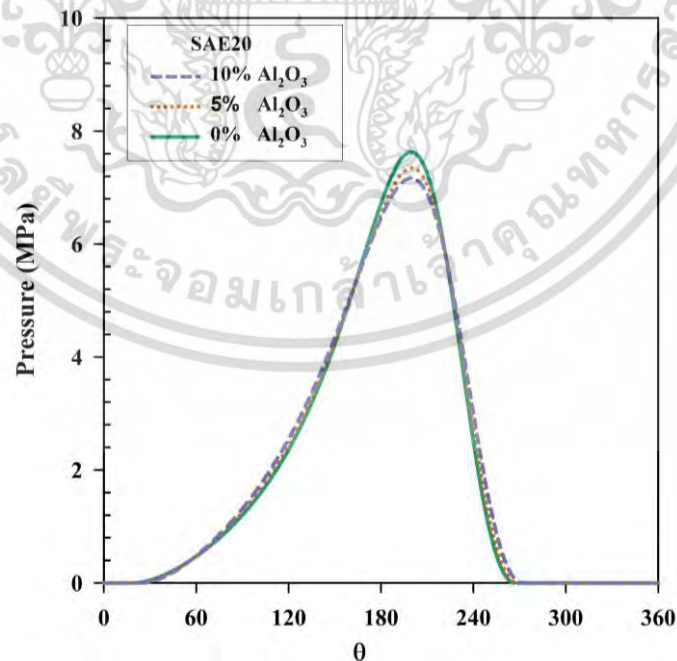
ผลของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นแสดงรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ค่าความสามารถในการรับภาระมีค่าเท่ากับ 3 kN และรูปที่ 4.25 แสดงผลต่อความหนาของฟิล์มต่ำสุดของสารหล่อลื่นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ จากผลที่แสดง พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะส่งผลทำให้ฟิล์มของสารหล่อลื่นหนามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงเสียดทานของฟิล์มสารหล่อลื่นแสดงรูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ จากผลที่แสดง พบว่าค่าแรงเสียดทานแปรผันตามกับค่าความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  การเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานเกิดจากการที่สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น

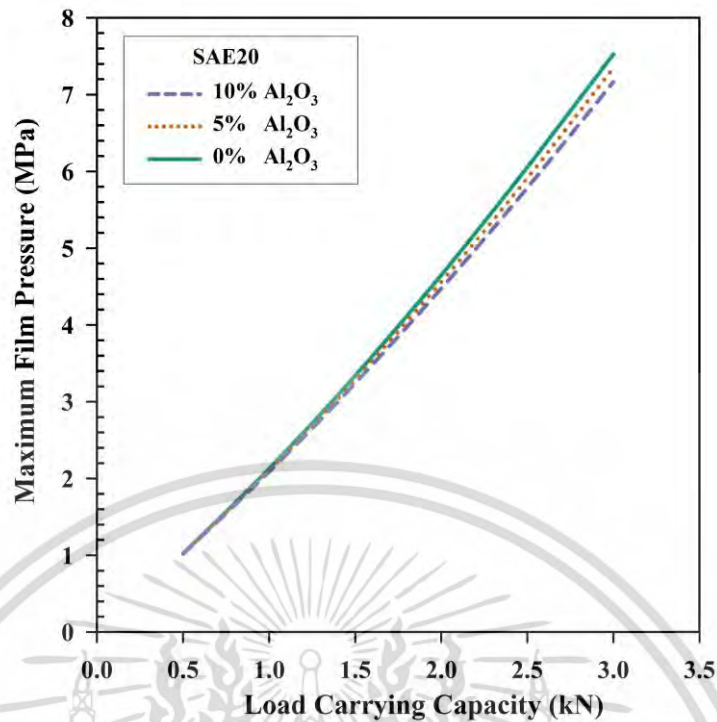
ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.27 โดยรูปที่ 4.28 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่ามุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) จากผลที่แสดง พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีผลทำให้มุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เพิ่มขึ้น แต่ทำให้อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ลดลง ดังนั้นสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ช่วยทำให้สมรรถนะของแบริงเพลลากลมดีขึ้น เนื่องจากทำให้แบริงเพลลาสามารถทำงานภายใต้การรับภาระที่สูงขึ้นได้

จากการวิเคราะห์ผลการคำนวณเชิงตัวเลขของการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในน้ำมันนิวโตเนียน SAE20 ต่อพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลลาสามารถสรุปได้ว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ส่งผลให้ค่าความดัน ค่าอุณหภูมิ และค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) มีค่าลดลง และส่งผลอย่างมากเมื่อแบริงเพลลาทำงานที่สภาวะการรับภาระที่สูง ๆ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความเสียดทาน และค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายเนื่องจากการแวร์ (wear)

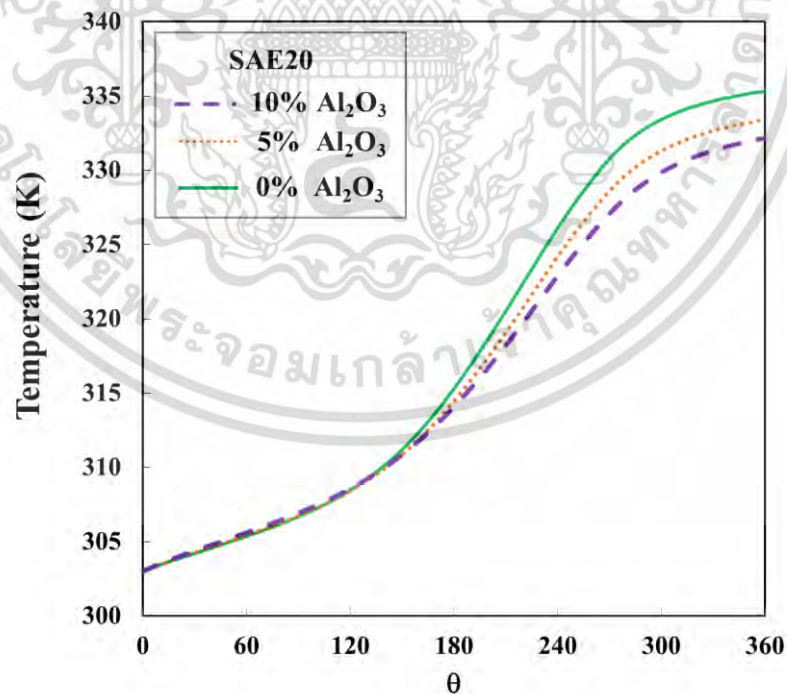


รูปที่ 4.20 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อการกระจายของความดันของแบริงเพลลา กลม เมื่อทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

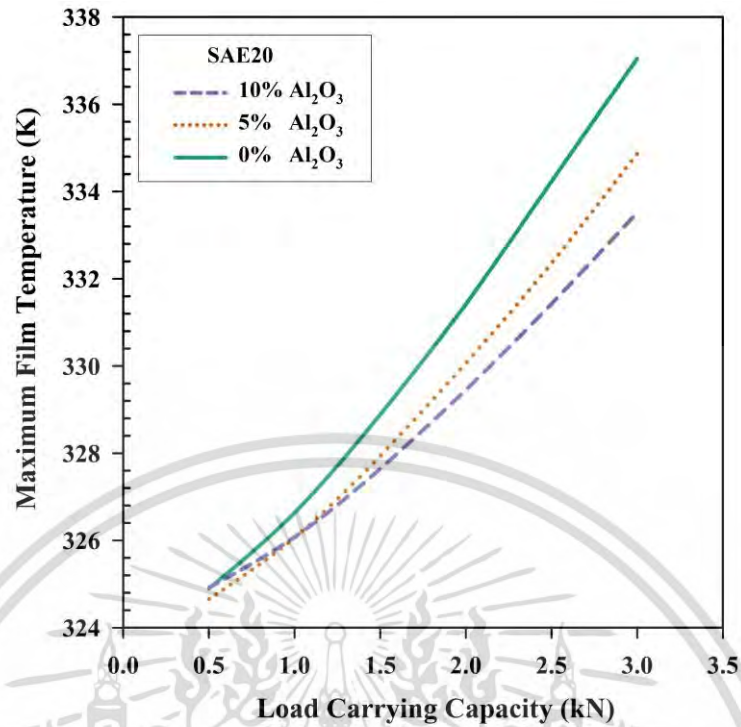


รูปที่ 4.21 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่าของความดันสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ

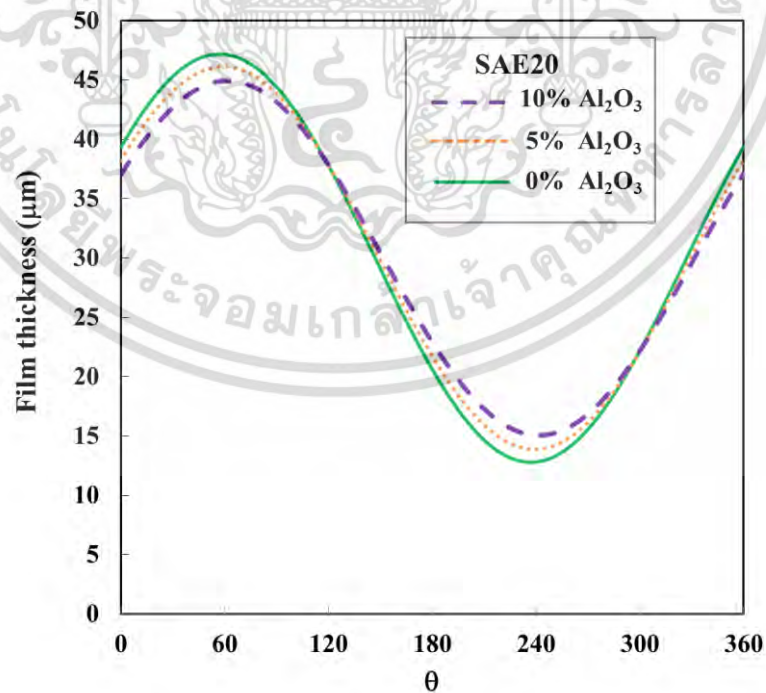


รูปที่ 4.22 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อการกระจายอุณหภูมิของแบริงเพลากลมเมื่อทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

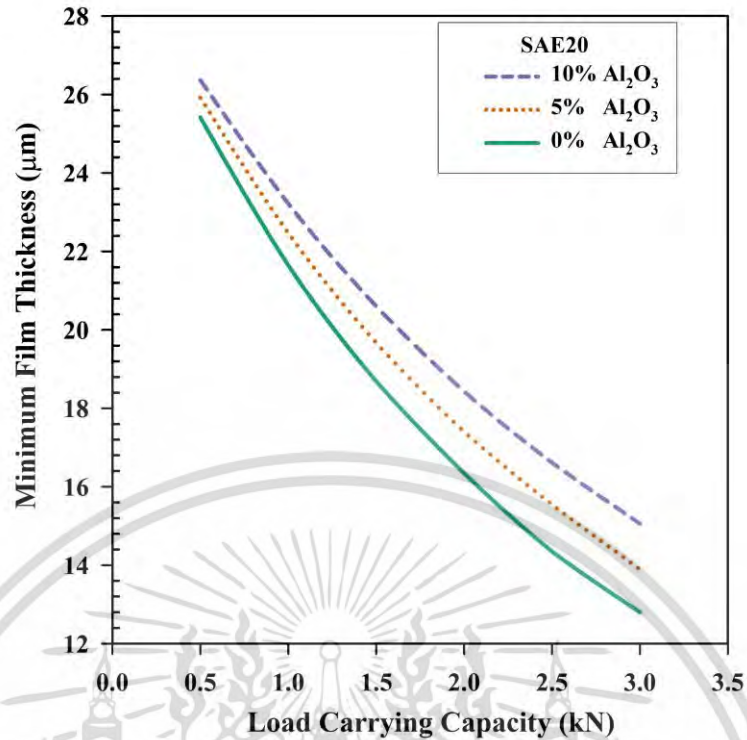


รูปที่ 4.23 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อค่าอุณหภูมิสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ

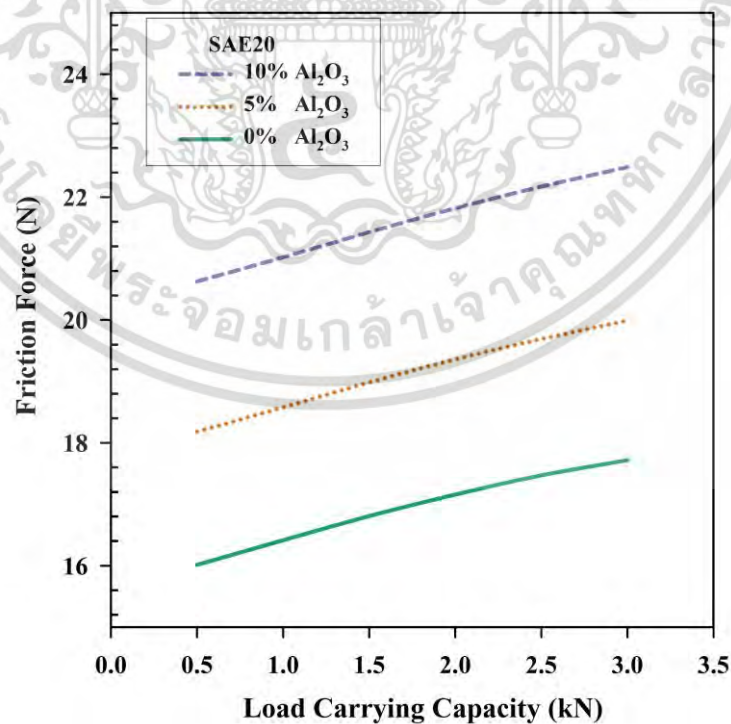


รูปที่ 4.24 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อการกระจายความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลม เมื่อทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ 3 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

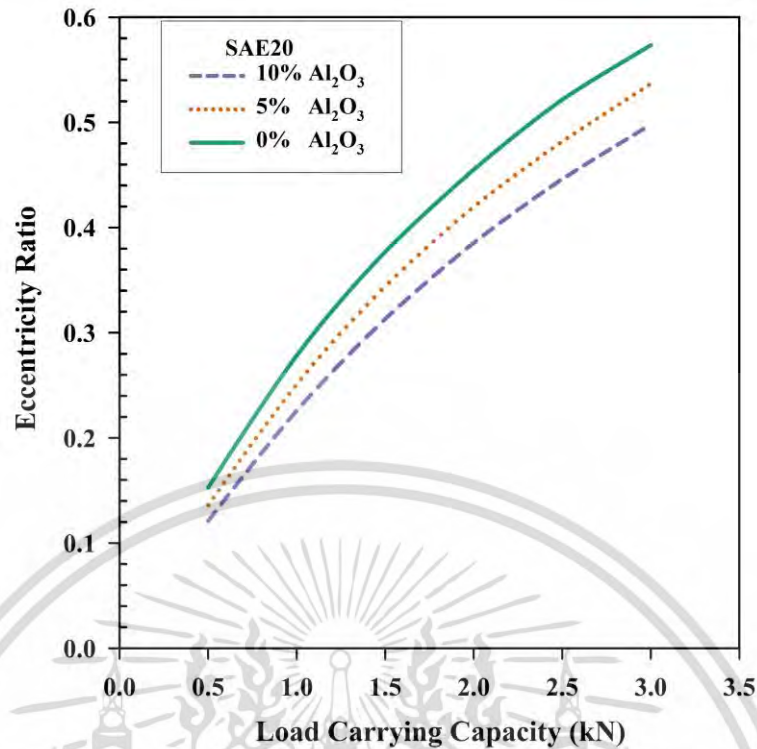


รูปที่ 4.25 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่าความหนาฟิล์มต่ำสุด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ

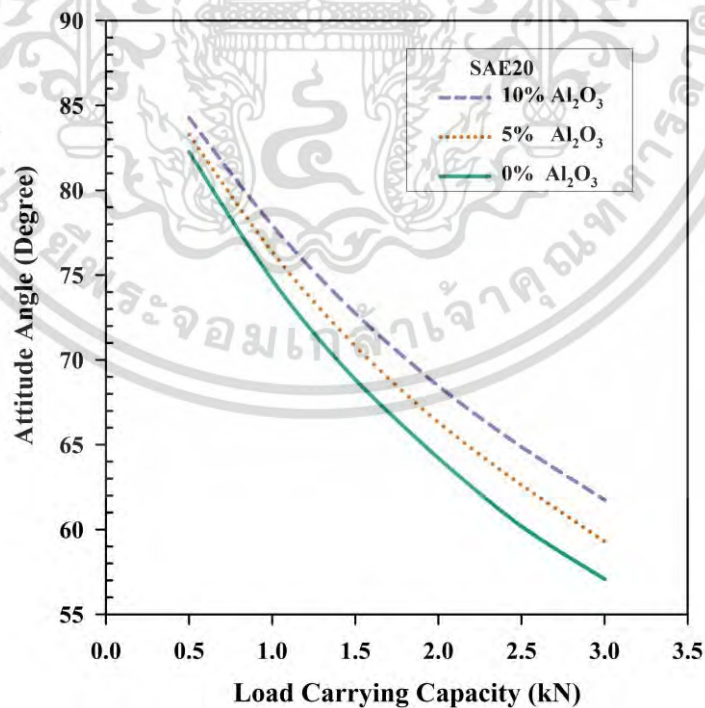


รูปที่ 4.26 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่าแรงเสียดทาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ



รูปที่ 4.28 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่ามุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบริงเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นแบบน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน

ผลการคำนวณเชิงตัวของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน ต่อพฤติกรรมทางสถิติของแบริงเพลากลม โดยใช้แบบจำลองความหนืดของคาโอ ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) ทำการแสดงผลทางสถิติศาสตร์ของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% และ 5% โดยปริมาตร โดยกำหนดให้สารหล่อลื่นน้ำมันนอน-นิวโตเนียน SAE10W50 และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ผสมกันเป็นเฟสเดียว

#### 4.3.1 สมบัติของแบริงเพลากลม และสารหล่อลื่นนอน-นิวโตเนียน

สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลมที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยที่สารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลมเมื่อเติมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
รัศมีของเพลากลม, $r$	0.015 m
ความยาวของแบริง, $L$	0.030 m
อัตราเร็วรอบ, $N$	4,000 rpm
รัศมีเคลียร์เรนซ์, $c$	30 $\mu$ m
ค่าความความยืดหยุ่น, $E$	70 GPa
ค่าอัตราส่วนปัวซองของแบริง, $\nu$	0.3

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นนอน-นิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
ชนิดของสารหล่อลื่น	SAE10W50
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนต่ำ, $\mu_0$	0.107 Pa·s
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนสูง, $\mu_\infty$	0.054 Pa·s
ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, $\rho$	875 kg·m <sup>-3</sup>
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารหล่อลื่น, $C_{p,oil}$	1,900 J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
อุณหภูมิเริ่มต้นของสารหล่อลื่น, $T_0$	313 K
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ, $\gamma$	0.0310174 K <sup>-1</sup>
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ, $\beta$	0.000788 K <sup>-1</sup>

#### 4.3.2 ผลการคำนวณ

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อการกระจายของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นทำงานภายใต้อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.87 แสดงดังรูปที่ 4.29 เมื่อพิจารณาสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 5% ในน้ำมันนอน-นิวโตเนียน SAE10W50 ความดันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.25 MPa ไป 9.37 MPa หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.57 เนื่องจากสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีผลทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความดันของฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงขึ้นเมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) เดียวกัน

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าความดันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น และจะมีผลอย่างมากเมื่อทำงานภายใต้อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) ของเพลลาสูงๆ

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่อของการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ทำให้ค่าความสามารถในการรับภาระมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในสารหล่อลื่น เมื่อพิจารณา

ที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน พบว่าน้ำมัน SAE10W50 ที่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าความสามารถในการรับภาระสูงกว่าน้ำมัน SAE10W50 ธรรมดา เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง ( $\varepsilon$ ) เดียวกัน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอนุภาคนาโน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในสารหล่อลื่นอาจมีผลต่อสมบัติอื่นๆ ของสารหล่อลื่น เช่น การสึกหรอของเพลลาและแบร์ริง การเกิดฟิล์มแข็ง และการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทาน เป็นต้น

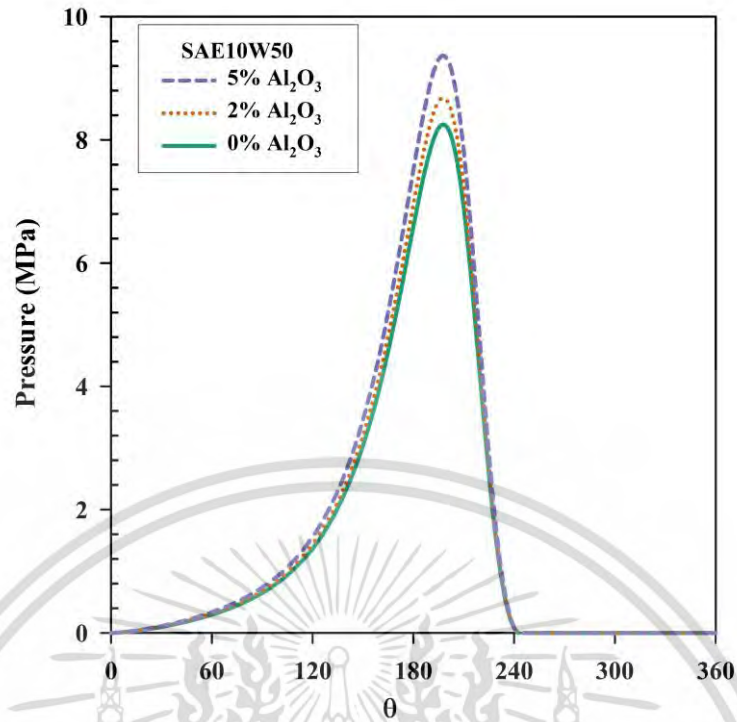
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Al_2O_3$  สามารถทำงานได้ดีกว่าแบบไม่เติม เนื่องจากขณะทำงานสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้แบรริงเพลากลมมีค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\varepsilon$ ) ต่ำกว่าแบรริงเพลากลมแบบไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ดังนั้นจึงสามารถทำงานที่ค่าความสามารถในการรับภาระสูงๆ ได้ดีกว่าแบบไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$

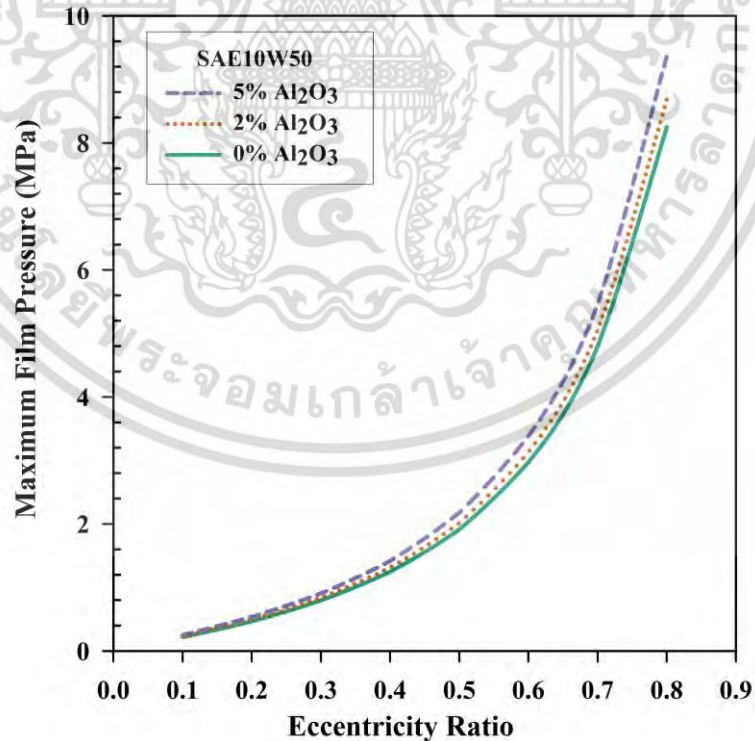
ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่ออุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโนมีผลต่ออุณหภูมิเพียงเล็กน้อย

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อแรงเสียดทานเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลอย่างมากต่อแรงเสียดทาน คือ เมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เพิ่มขึ้น แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น และในการที่ความเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงนั้นเกิดจากการที่สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีคุณสมบัติที่ดีในการถ่ายเทความร้อน คือ สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำตัวเสมือนเป็นสารหล่อเย็น ช่วยรับความร้อนในขณะที่แบรริงเพลากลมทำงาน

จากการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ว่า การหล่อลื่นในแบรริงเพลากลมที่มีการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตเนียน SAE10W50 ส่งผลดีต่อพฤติกรรมทางสทิตยศาสตร์ของแบรริงเพลากลม คือ สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้แบรริงเพลากลมสามารถรับภาระได้มากขึ้น และมีผลต่ออุณหภูมิ คือ ทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยการที่อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมากนั้นเกิดจากการที่สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีพฤติกรรมคล้ายกับสารหล่อเย็น คือ ทำหน้าที่ช่วยรับความร้อน จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยมาก

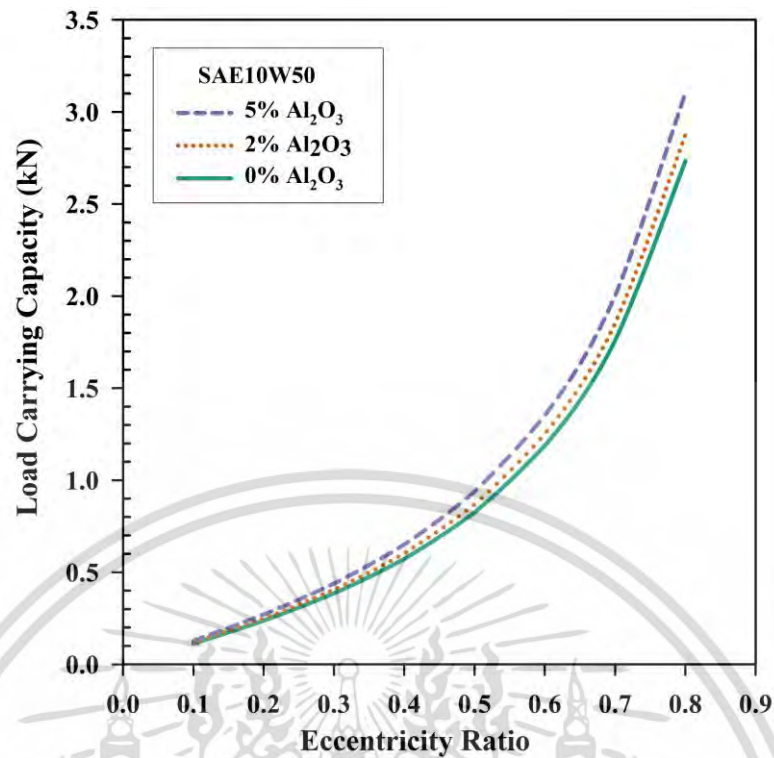


รูปที่ 4.29 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันของแบรริงเพลากลมเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริงเท่ากับ 0.87 ( $\varepsilon = 0.87$ )

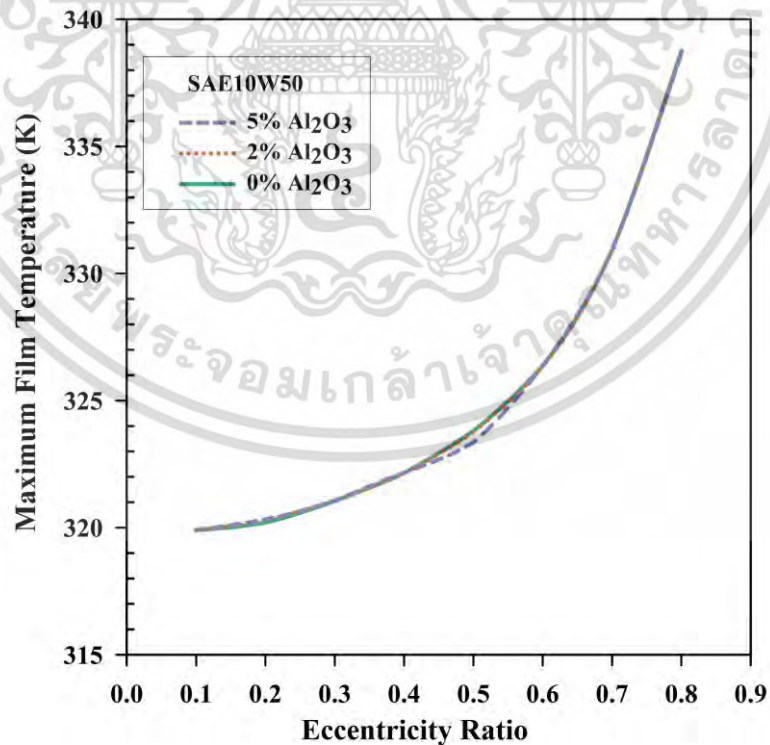


รูปที่ 4.30 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อความดันสูงสุดของฟิล์มน้ำมันในแบรริงเพลากลมเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\varepsilon$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

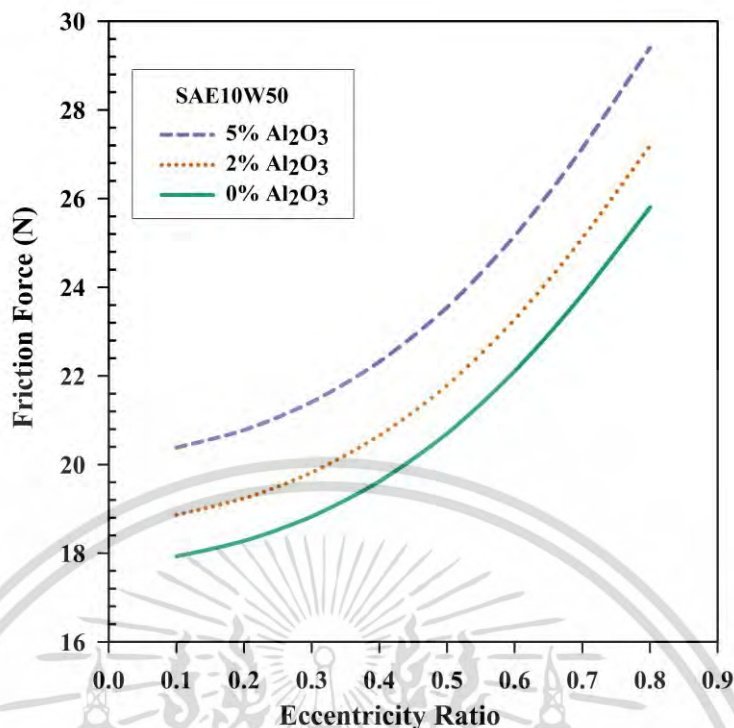


รูปที่ 4.31 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อค่าความสามารถในการรับภาระในแบริงเพลากลมเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ )



รูปที่ 4.32 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ออุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มน้ำมันในแบริงเพลากลมเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อความเสียหายของฟิล์มน้ำมันในแบริงเพลากลมเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลากลมและแบริง ( $\varepsilon$ )

#### 4.4 ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อแบริงเพลากลมผิวหยาบ เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำ

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในสารหล่อลื่นเป็นน้ำ เมื่อเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ตั้งแต่ 0.5% ถึง 2% โดยปริมาตร ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) ของแบริงเพลากลม ในกรณีผิวแบริงเรียบ และกรณีผิวแบริงมีความหยาบ จำนวน 2 แบบ คือ ผิวหยาบแบบตามยาว และผิวหยาบแบบตามขวาง ในการคำนวณเลือกช่วงของความหยาบให้อยู่ในช่วงที่มีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) ตั้งแต่ 0.5 ไมครอน ถึง 5 ไมครอน เนื่องจากขอบเขตของกรรมวิธีการผลิต (machining quality) ของแบริง แสดงผลของพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ และพลศาสตร์ของแบริงเพลากลม และแสดงผลของเสถียรภาพ ในรูปของเส้นทางเดินของจุดศูนย์กลางของเพลาร่วมด้วย

##### 4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของแบริงเพลากลม และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $\text{Al}_2\text{O}_3$

ในการคำนวณใช้สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลม แสดงดังตารางที่ 4.11 โดยกำหนดให้แบริงเพลากลมมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ( $L/D=1$ ) และมีค่าอัตราส่วนเคลียร์เรนซ์ต่อรัศมี ( $c/r$ ) เท่ากับ 0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลม เมื่อเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโนในสารหล่อลื่นของแบริงเพลากลม โดยสารหล่อลื่นเป็นน้ำ

สมบัติ	รายละเอียด
รัศมีของเพลากลม, $r$	0.015 m
รัศมีเคลียร์แรนซ์, $c$	30 $\mu$ m
ค่าความหนืดอ้างอิง, $\mu_0$	0.693 mPa·s
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ, $\gamma$	0.0153 K <sup>-1</sup>
ความยาวของแบริง, $L$	0.03 m
อุณหภูมิเริ่มต้นสารหล่อลื่น, $T_0$	313 K
สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ, $\beta$	0.000385 K <sup>-1</sup>
ความยาวคลื่นของผิวหยาบ, $\lambda_1$	5 $\mu$ m

#### 4.4.2 ผลการคำนวณ

ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อคุณลักษณะทางสถิติศาสตร์ของแบริงเพลากลมที่มีสารหล่อลื่นเป็นน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.41 และแสดงผลดังตารางที่ 4.12 ถึงตารางที่ 4.18 ซึ่งเป็นการแสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  และแสดงผลของความหยาบผิวแบบตามยาว และผิวแบบตามขวาง โดยเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) ซึ่งแบริงเพลากลมทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7

ผลของค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 4.34 ซึ่งพบว่าค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นของผิวหยาบตามขวางมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเรียบ และผิวแบบตามยาว นอกจากนี้พบว่าค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นลดลงเมื่อความเข้มข้นสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เพิ่มขึ้น โดยตารางที่ 4.12 เป็นตารางแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีค่า 0% และ 2% ซึ่งค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น สำหรับแบริงที่มีผิวหยาบตามขวางลดลงร้อยละ 2.95 ผิวหยาบตามยาวมีค่าลดลงร้อยละ 1.78 และสำหรับผิวเรียบมีค่าลดลงร้อยละ 1.38 ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นเป็นน้ำ จะส่งผลให้ค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเล็กน้อย

ผลของค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นแสดงดังรูปที่ 4.35 ซึ่งพบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นลดลง โดยเฉพาะกรณีของผิวหยาบตามยาว ซึ่งจะมีค่าลดลงมากกว่าผิวเรียบและผิวหยาบตามขวาง ค่าผลการเปรียบเทียบที่ 0% และ 2% แสดงดังตาราง 4.13 โดยอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นสำหรับผิวเรียบมีค่าลดลงร้อยละ 5.74 ผิวหยาบตามขวางลดลงร้อยละ 7.47 และสำหรับผิวหยาบตามยาวลดลงถึงร้อยละ 14.33 ดังนั้นสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่น และมีผลอย่างมากต่อแบริงผิวหยาบแบบตามยาว

รูปที่ 4.36 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) ต่ออุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นในขณะที่ทำงานภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระ ( $W$ ) เท่ากับ 7 ของแบริงผิวหยาบตามยาว และผิวหยาบตามขวาง ของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% เทียบกับ 0% โดยพบว่า เมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) เพิ่มขึ้น อุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าสูงขึ้นแบบไม่เชิงเส้น ตารางที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% เทียบกับ 0% เมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่า 5 ไมครอน 4 ไมครอน และ 3 ไมครอน พบว่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นสำหรับแบริงผิวหยาบตามยาวมีค่าลดลงถึงร้อยละ 23.3 ที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) เท่ากับ 5 ไมครอน ในขณะที่ลดลงไปร้อยละ 14.33 ที่แอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน และ มีค่าลดลงร้อยละ 10.13 ที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) เท่ากับ 3 ไมครอน เมื่อทำการพิจารณาผลของผิวหยาบตามขวาง พบว่าผิวหยาบตามขวางจะมีค่าของการลดของอุณหภูมิ ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงแบบลดลงซึ่งน้อยกว่าแบบตามยาว โดยสำหรับผิวหยาบตามขวางมีค่าอุณหภูมิสูงสุดลดลงไปร้อยละ 7.66 ที่แอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) เท่ากับ 5 ไมครอน ซึ่งที่แอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) เท่ากับ 4 ไมครอน มีค่าลดลงร้อยละ 7.47 และที่แอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) เท่ากับ 3 ไมครอน มีค่าลดลงร้อยละ 6.69

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่ามากกว่า 3 ไมครอน หรือเมื่อค่าของอัตราส่วนของแอมพลิจูดความหยาบต่อเคลียร์แรนซ์นั้นมีค่ามากกว่า 10% ( $A_h/c > 0.1$ ) สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะมีผลอย่างมากต่อการช่วยลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแบริงที่มีความหยาบตามยาว เมื่อพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  สำหรับผิวหยาบตามขวาง พบว่ามีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่าความหยาบแบบตามยาว

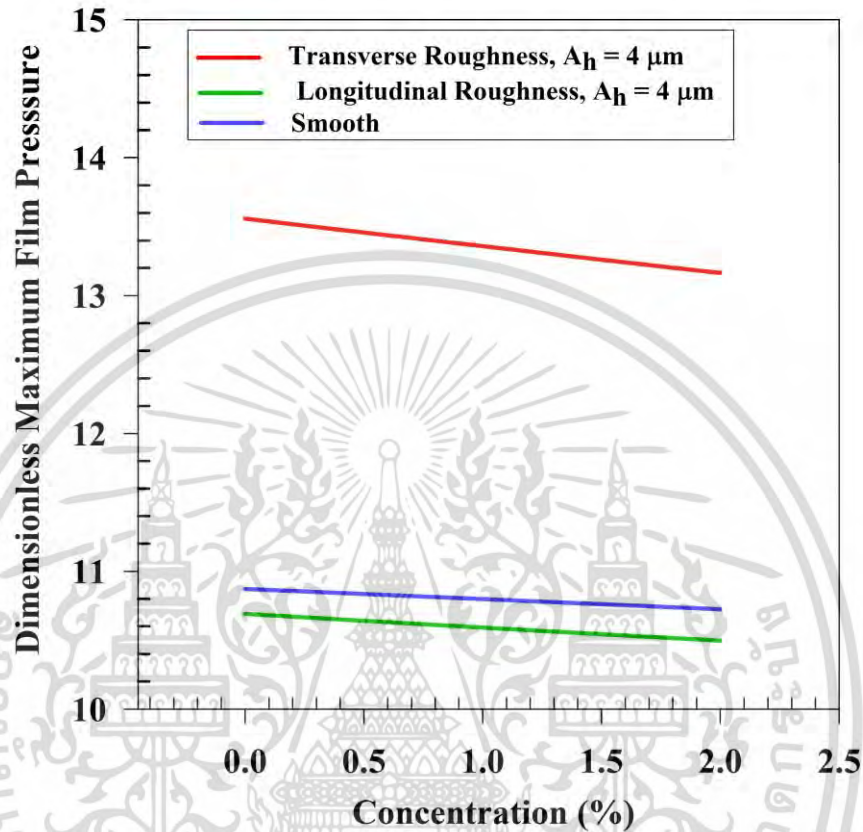
ผลสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.37 และตารางที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  2% กับกรณีไม่เติม พบว่าการเติมทำให้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 0.88 สำหรับผิวเรียบ สำหรับผิวหยาบตามขวางลดลงร้อยละ 1.07 ส่วนในกรณีของผิวหยาบตามยาว พบว่าลดลงร้อยละ 1.14 โดยผลที่แสดงในรูปที่ 4.38 สารเติมแต่งอนุภาคทำให้ค่าของมุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตารางที่ 4.16 แสดงผลต่อมุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) ของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  2% เทียบกับ 0% โดยพบว่าค่ามุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) สำหรับผิวเรียบมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.83 ในกรณีของผิวหยาบตามขวางเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.69 และในกรณีของผิวหยาบตามยาวพบว่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.78 เนื่องจากสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.39 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  และผลของความหยาบผิวที่มีต่อความหนาฟิล์มต่ำสุดของสารหล่อลื่น จากผลที่ได้พบว่าเมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่ามากขึ้น ค่าของความหนาฟิล์มต่ำสุดจะลดลงอย่างมาก ผลของสารเติมแต่งอนุภาคแสดงดังตารางที่ 4.17 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่า 5 ไมครอน 4 ไมครอน และ 3 ไมครอน เมื่อมีสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% เทียบกับ 0% เมื่อพิจารณาที่ความหยาบผิวที่มีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) 5 ไมครอน เทียบกับกรณีที่ไม่เติม พบว่าความหยาบแบบตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 21.42 ในขณะที่ผิวหยาบตามขวางเพิ่มขึ้นน้อยกว่า คือ เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 6.67 ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดของแบริงเพลากลมผิวหยาบตามยาว และผิวหยาบตามขวาง ดังรูปที่ 4.40 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าของความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าของความหนาฟิล์มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Mongkolwongroj และ Rattapasakorn [89]

รูปที่ 4.41 แสดงผลของค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) และผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อแรงเสียดทานแบบไรมิตีของแบริงเพลากลมผิวหยาบ โดยพบว่าค่าของแรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งแบบตามยาว และตามขวาง เมื่อทำการพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะมีผลทำให้ค่าแรงเสียดทานแบบไรมิตีของแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยตารางที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบผลสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อค่าแรงเสียดทานแบบไรมิตี สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ค่าแรงเสียดทานแบบไรมิตีของแบริงผิวหยาบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากรณีที่มีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่าเท่ากับ 5 ไมครอน พบว่าความหยาบผิวตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.23 ในขณะที่ความหยาบผิวตามขวางเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.72 ดังนั้นกรณีความหยาบผิวแบบตามขวาง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลต่อค่าแรงเสียดทานแบบไรมิตีมากกว่าแบบตามยาว

สรุปผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ คือ ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำ จะทำให้คุณสมบัติของฟิล์มสารหล่อลื่นลดลง ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพล่าและแบริง ( $\epsilon$ ) ลดลง แต่มุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีผลอย่างมากเมื่ออัตราส่วนของค่าแอมพลิจูดของความหยาบต่อเคลียร์แรนซ์ ( $A_h/c$ ) มีค่ามากกว่า 0.1

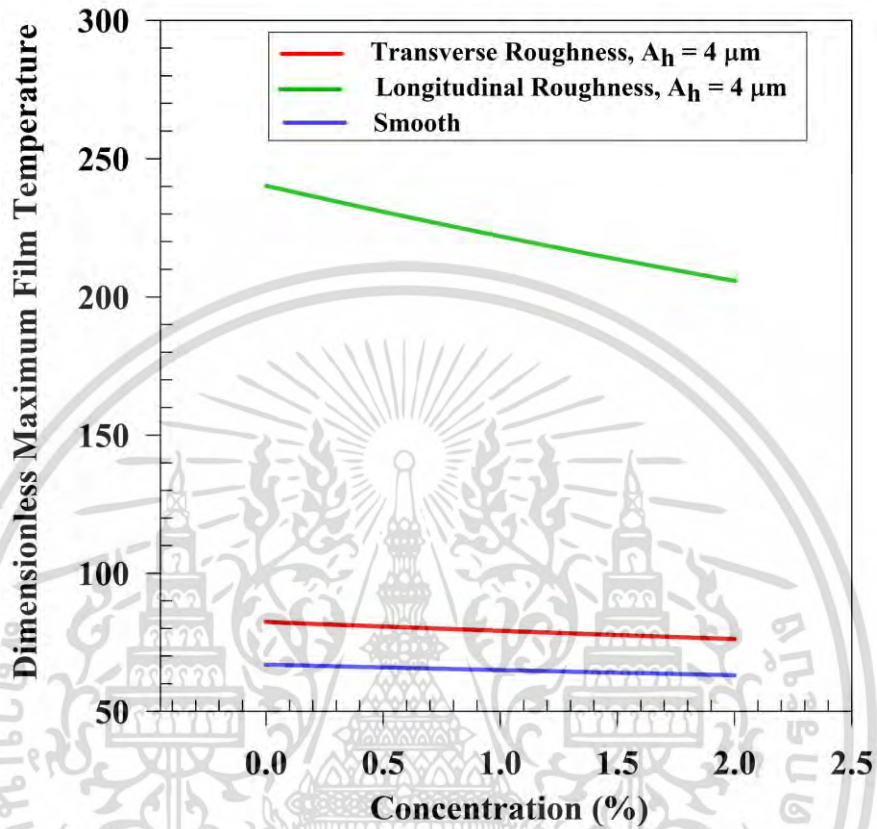


รูปที่ 4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ตารางที่ 4.12 แสดงผลค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	ความดันสูงสุดแบบไร้มิติ		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h = 4$ ไมครอน)	13.56	13.16	ลดลง 2.95%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h = 4$ ไมครอน)	10.69	10.50	ลดลง 1.78%
ผิวเรียบ	10.87	10.72	ลดลง 1.38%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

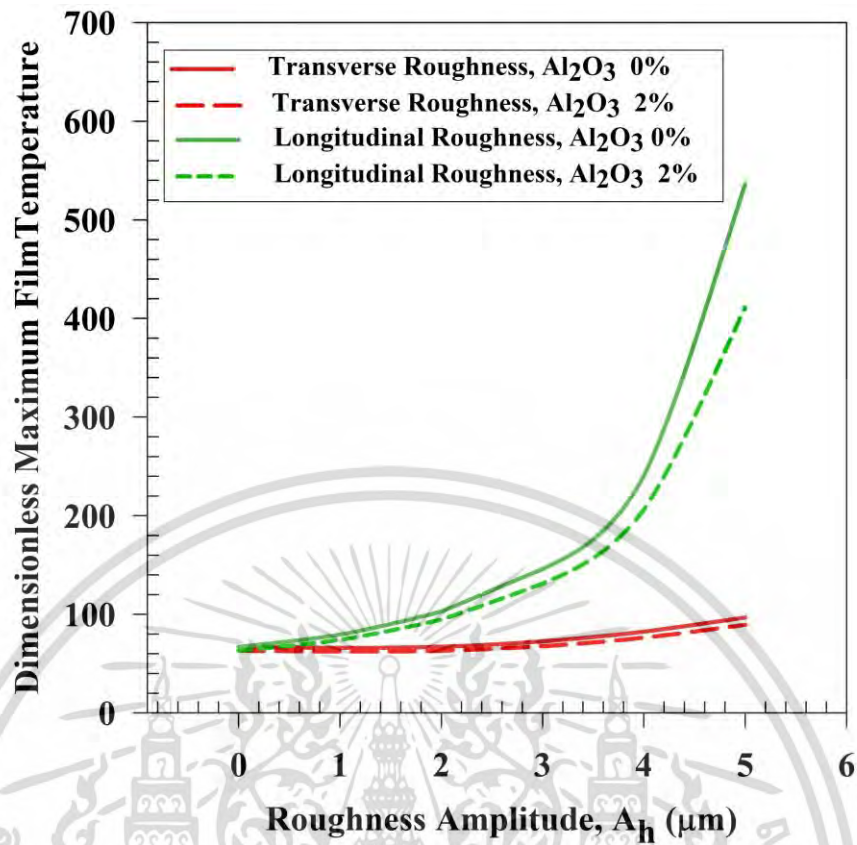


รูปที่ 4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ตารางที่ 4.13 แสดงผลค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	อุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติ		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h = 4$ ไมครอน)	82.33	76.18	ลดลง 7.47%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h = 4$ ไมครอน)	240.2	205.78	ลดลง 14.33%
ผิวเรียบ	66.92	63.08	ลดลง 5.74%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

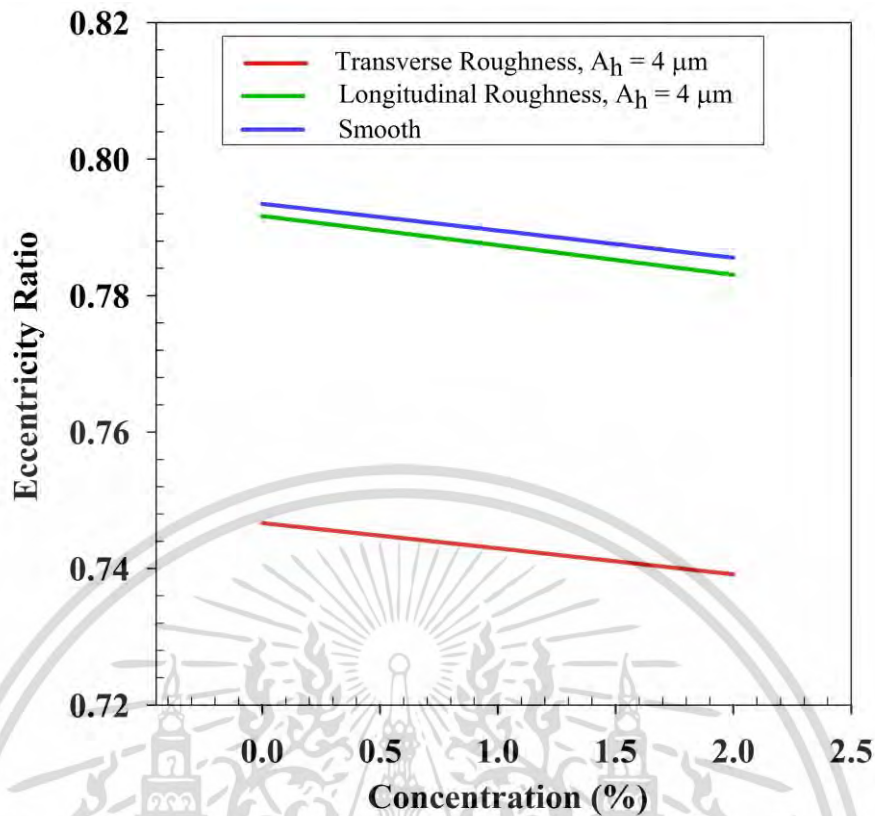


รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเทียบกับค่าแอมพลิจูดของความหยาบผิว เมื่อสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% และ 0%

ตารางที่ 4.14 แสดงผลค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) ที่ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน

รูปแบบของความหยาบ		ค่าความอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติ		การเปลี่ยนแปลง
		ไม่เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามยาว	$A_h = 5$ ไมครอน	536.34	411.12	ลดลง 23.30%
	$A_h = 4$ ไมครอน	240.2	205.78	ลดลง 14.33%
	$A_h = 3$ ไมครอน	145.79	131.02	ลดลง 10.13%
ผิวหยาบตามขวาง	$A_h = 5$ ไมครอน	96.68	89.27	ลดลง 7.66%
	$A_h = 4$ ไมครอน	82.33	76.18	ลดลง 7.47%
	$A_h = 3$ ไมครอน	72.48	67.63	ลดลง 6.69%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

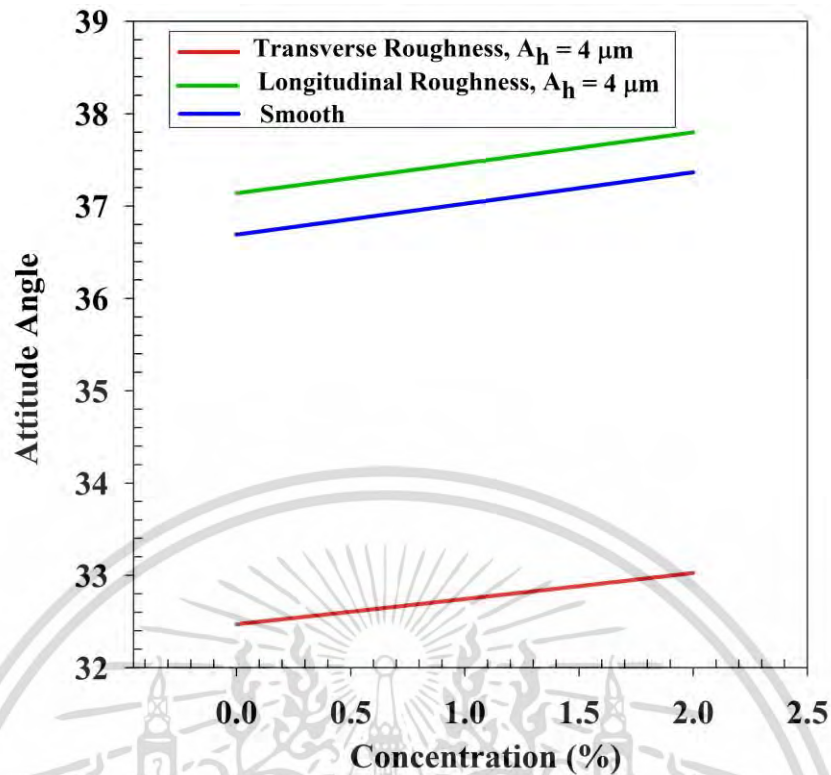


รูปที่ 4.37 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง เทียบกับ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ตารางที่ 4.15 แสดงผลค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\epsilon$ ) เปรียบเทียบ ระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง ของเพลลาและแบรริง ( $\epsilon$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h = 4$ ไมครอน)	0.747	0.739	ลดลง 1.07%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h = 4$ ไมครอน)	0.792	0.783	ลดลง 1.14%
ผิวเรียบ	0.793	0.786	ลดลง 0.88%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

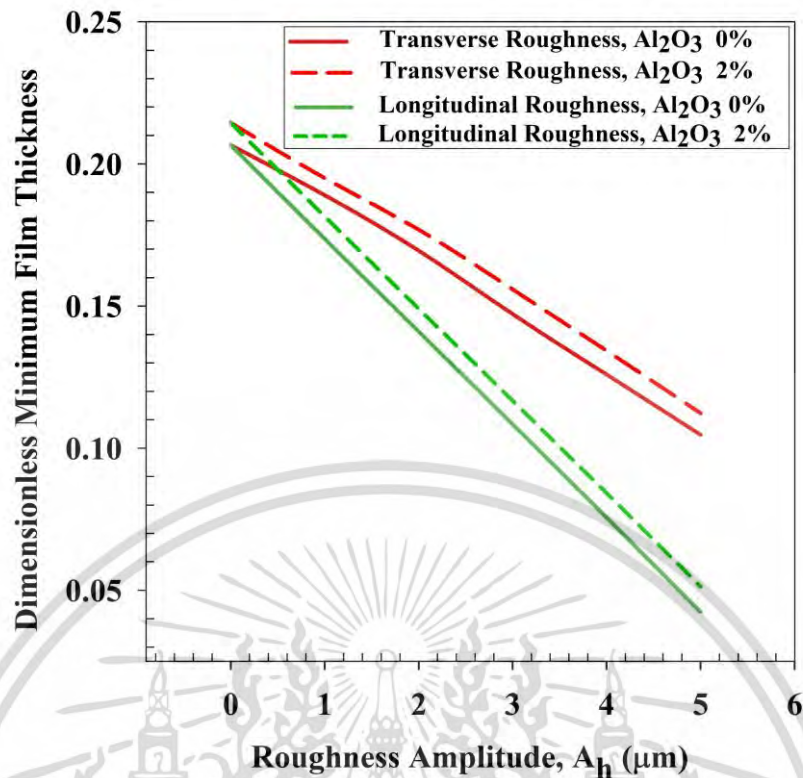


รูปที่ 4.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ตารางที่ 4.16 แสดงผลค่ามุมแอททิจูด ( $\Phi$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	มุมแอททิจูด (attitude angle, $\Phi$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h = 4$ ไมครอน)	32.47	33.02	เพิ่มขึ้น 1.69%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h = 4$ ไมครอน)	37.14	37.8	เพิ่มขึ้น 1.78%
ผิวเรียบ	36.69	37.36	เพิ่มขึ้น 1.83%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

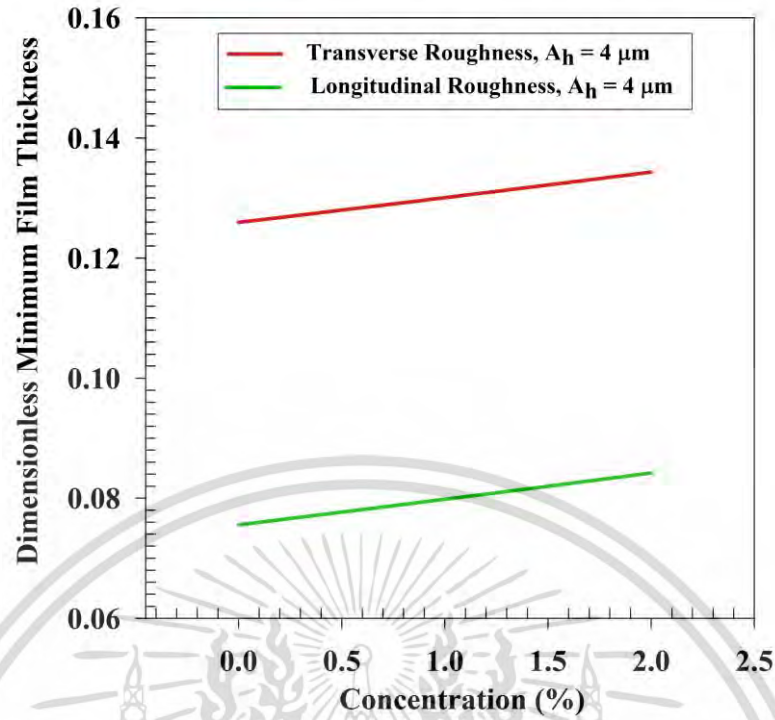


รูปที่ 4.39 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเทียบกับค่าแอมพลิจูดของความหยาบผิว เมื่อสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% และ 0%

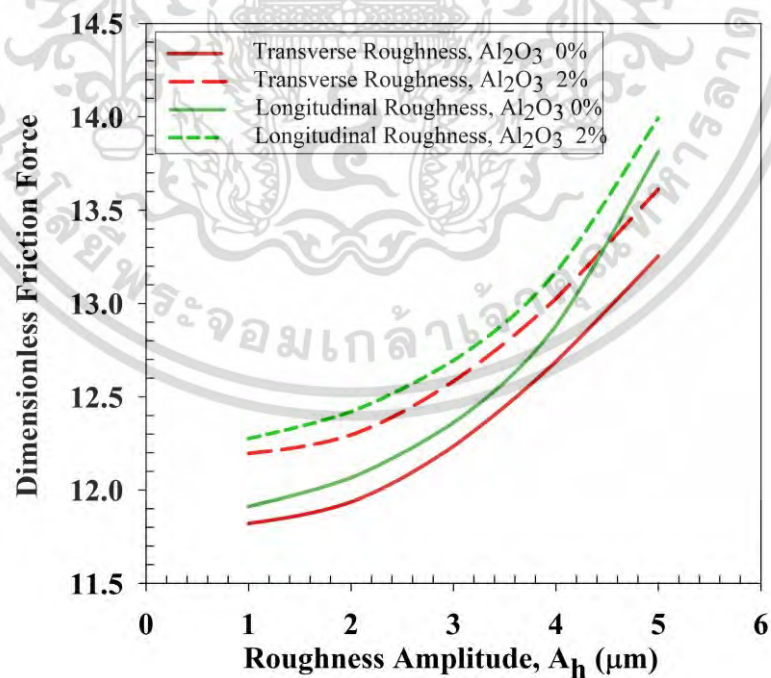
ตารางที่ 4.17 แสดงผลค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน

รูปแบบของความหยาบ		ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติ		การเปลี่ยนแปลง
		ไม่เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามยาว	$A_h = 5$ ไมครอน	0.042	0.051	เพิ่มขึ้น 21.42%
	$A_h = 4$ ไมครอน	0.076	0.084	เพิ่มขึ้น 10.53%
	$A_h = 3$ ไมครอน	0.108	0.117	เพิ่มขึ้น 8.33%
ผิวหยาบตามขวาง	$A_h = 5$ ไมครอน	0.105	0.112	เพิ่มขึ้น 6.67%
	$A_h = 4$ ไมครอน	0.126	0.134	เพิ่มขึ้น 6.35%
	$A_h = 3$ ไมครอน	0.147	0.156	เพิ่มขึ้น 6.12%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$



รูปที่ 4.41 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงเสียดทานแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเทียบกับค่าแอมพลิจูดของความหยาบผิว เมื่อสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% และ 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

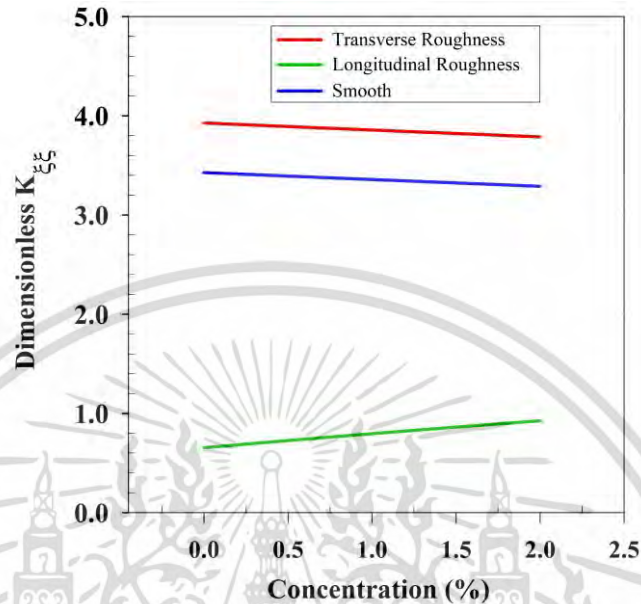
ตารางที่ 4.18 แสดงผลค่าแรงเสียดทานแบบไรมิติของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน

รูปแบบของความหยาบ		ค่าแรงเสียดทานแบบไรมิติ		การเปลี่ยนแปลง
		ไม่เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	เติม $\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามยาว	$A_h = 5$ ไมครอน	13.82	13.99	เพิ่มขึ้น 1.23%
	$A_h = 4$ ไมครอน	12.88	13.17	เพิ่มขึ้น 2.25%
	$A_h = 3$ ไมครอน	12.36	12.7	เพิ่มขึ้น 2.75%
ผิวหยาบตามขวาง	$A_h = 5$ ไมครอน	13.25	13.61	เพิ่มขึ้น 2.72%
	$A_h = 4$ ไมครอน	12.69	13.03	เพิ่มขึ้น 2.68%
	$A_h = 3$ ไมครอน	12.24	12.58	เพิ่มขึ้น 2.78%

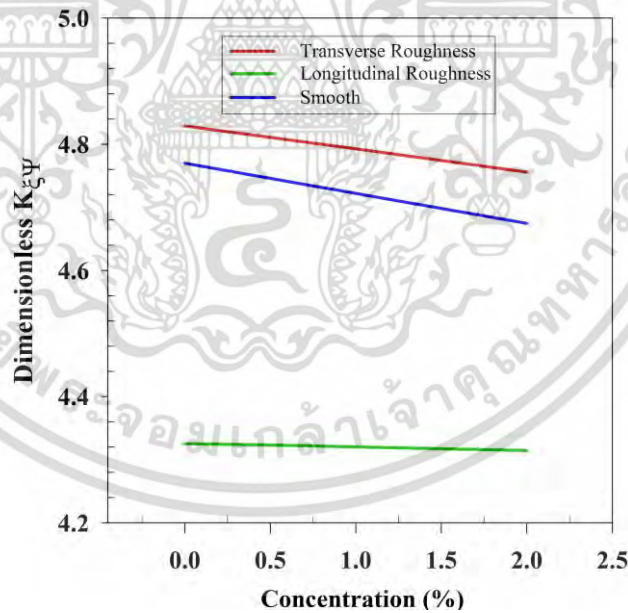
รูปที่ 4.42 และ 4.43 แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไรมิติเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0% ถึง 2% จากรูปที่ 4.42 (ก) แสดงว่า  $K_{\xi\xi}$  ของผิวหยาบตามขวางและผิวเรียบมีค่าลดลง ในขณะที่  $K_{\xi\xi}$  ของผิวหยาบตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น และจากรูป 4.42 (ข) พบว่า  $K_{\xi w}$  ของผิวเรียบ และผิวหยาบตามขวางลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.43 พบว่า  $K_{vw}$  และ  $K_{v\xi}$  ของผิวหยาบตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $K_{vw}$ ,  $K_{\xi w}$ ,  $K_{v\xi}$  และ  $K_{vw}$  ของผิวหยาบตามขวาง และผิวเรียบลดลงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น โดยตารางที่ 4.19 ถึงตารางที่ 4.22 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิ์สปริงแบบไรมิติ โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบกรณีที่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% เทียบกับกรณีที่ไม่เติม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จากผลที่ได้พบว่าผิวหยาบแบบตามยาว  $K_{\xi\xi}$  เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 43  $K_{v\xi}$  เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.04 ในขณะที่ค่า  $K_{\xi w}$  และ  $K_{vw}$  ลดลงร้อยละ 0.46 และ 0.4 ตามลำดับ ผิวหยาบแบบตามขวาง  $K_{\xi\xi}$ ,  $K_{v\xi}$ ,  $K_{\xi w}$  และ  $K_{vw}$  ลดลงร้อยละ 3.56, 1.02, 1.45 และ 0.35 ตามลำดับ และผิวเรียบ  $K_{\xi\xi}$ ,  $K_{v\xi}$ ,  $K_{\xi w}$  และ  $K_{vw}$  ลดลงร้อยละ 4.08, 2.79, 2.09 และ 1.03 ตามลำดับ แสดงว่าผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีผลอย่างมากต่อกรณีผิวหยาบแบบตามยาว

รูปที่ 4.44 ถึงรูปที่ 4.45 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) ต่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไรมิติ โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบกรณีที่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% เทียบกับกรณีที่ไม่เติม แสดงดังตารางที่ 4.23 ถึงตารางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 4.26 จากผลที่ได้พบว่า  $B_{\xi\xi}$ ,  $B_{\xi\psi}$  และ  $B_{\psi\xi}$  มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น แต่  $B_{\psi\psi}$  เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ทั้งผิวเรียบ ผิวหยาบตามขวาง และผิวหยาบตามยาว



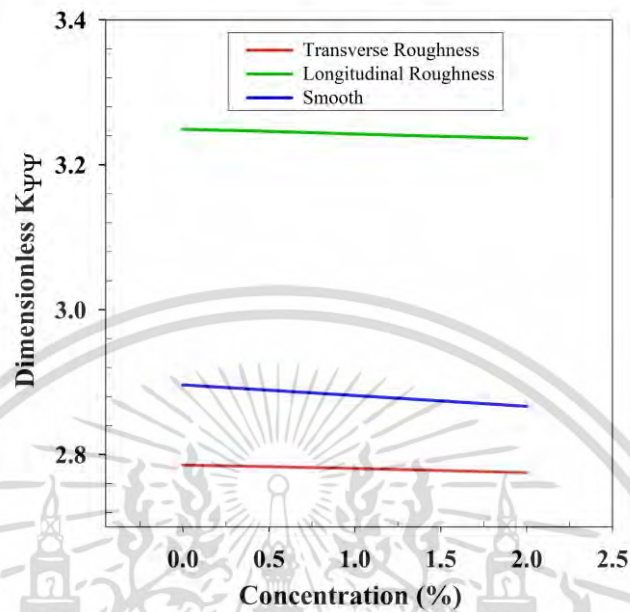
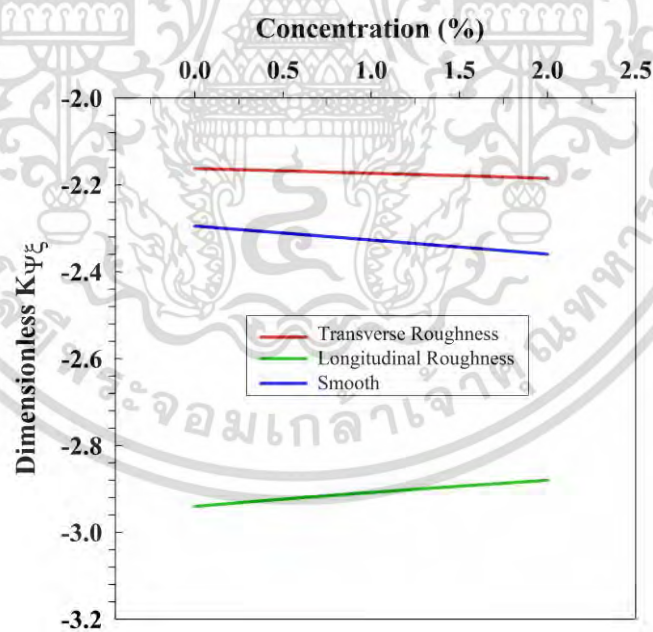
(ก) สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\xi}$ )



(ข) สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\psi}$ )

รูปที่ 4.42 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ (ก)  $K_{\xi\xi}$  (ข)  $K_{\xi\psi}$  เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยแบบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\psi}$ )(ข) สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\xi}$ )

รูปที่ 4.43 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ (ก)  $K_{\psi\psi}$  (ข)  $K_{\psi\xi}$  เทียบกับ ความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยแบบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\xi}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h=4$ ไมครอน)	3.93	3.79	ลดลง 3.56%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h=4$ ไมครอน)	0.65	0.93	เพิ่มขึ้น 43.00%
ผิวเรียบ	3.43	3.29	ลดลง 4.08%

ตารางที่ 4.20 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\nu}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\xi\nu}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h=4$ ไมครอน)	4.83	4.76	ลดลง 1.45%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h=4$ ไมครอน)	4.33	4.31	ลดลง 0.46%
ผิวเรียบ	4.77	4.67	ลดลง 2.09%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

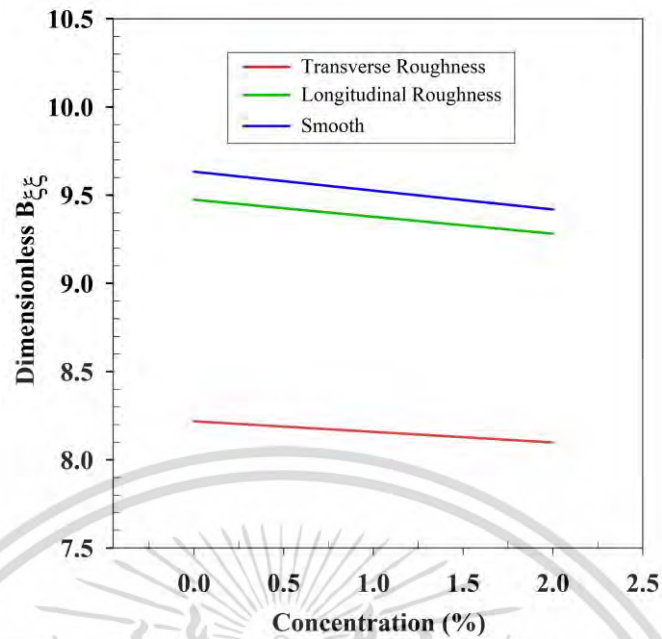
ตารางที่ 4.21 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\psi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\psi}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h=4$ ไมครอน)	2.785	2.775	ลดลง 0.35%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h=4$ ไมครอน)	3.249	3.236	ลดลง 0.40%
ผิวเรียบ	2.896	2.866	ลดลง 1.03%

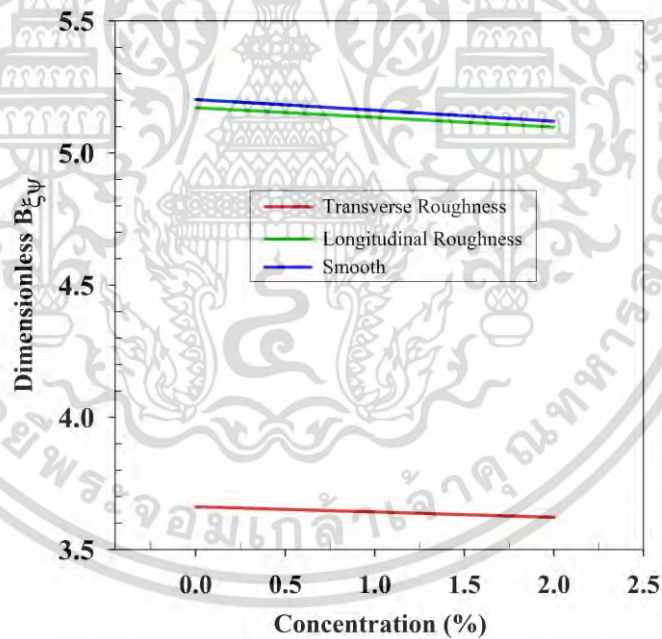
ตารางที่ 4.22 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์สปริงแบบไร้มิติ ( $K_{\psi\xi}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h=4$ ไมครอน)	-2.163	-2.185	ลดลง 1.02%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h=4$ ไมครอน)	-2.94	-2.88	เพิ่มขึ้น 2.04%
ผิวเรียบ	-2.295	-2.359	ลดลง 2.79%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



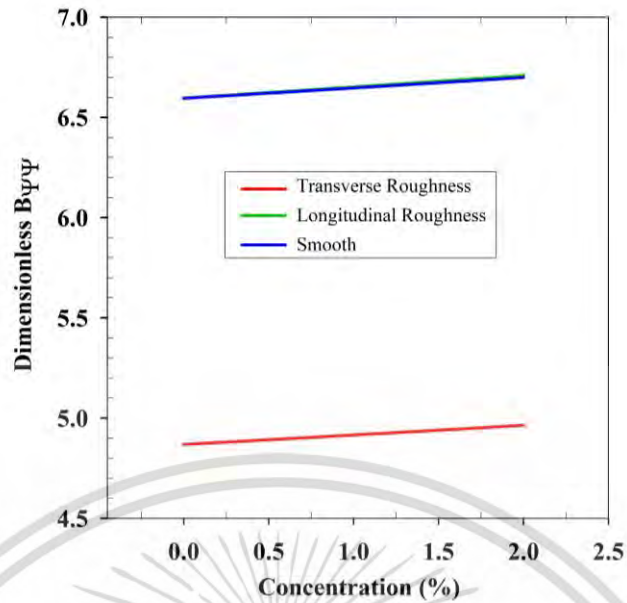
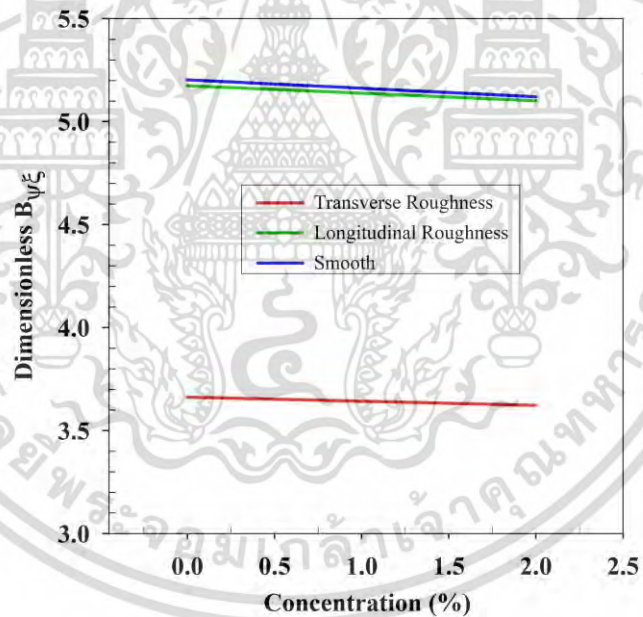
(ก) สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\xi}$ )



(ข) สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\psi}$ )

รูปที่ 4.44 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ (ก)  $B_{\xi\xi}$  (ข)  $B_{\xi\psi}$  เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\psi\psi}$ )(ข) สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\psi\xi}$ )

รูปที่ 4.45 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ (ก)  $B_{\psi\psi}$  (ข)  $B_{\psi\xi}$  เทียบกับความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยแบริงเพลากลมผิวหยาบมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\xi}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\xi}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h=4$ ไมครอน)	8.22	8.1	ลดลง 1.46%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h=4$ ไมครอน)	9.47	9.28	ลดลง 2.00%
ผิวเรียบ	9.63	9.42	ลดลง 2.18%

ตารางที่ 4.24 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\nu}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{\xi\nu}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h=4$ ไมครอน)	3.66	3.62	ลดลง 1.09%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h=4$ ไมครอน)	5.17	5.1	ลดลง 1.35%
ผิวเรียบ	5.2	5.12	ลดลง 1.54%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

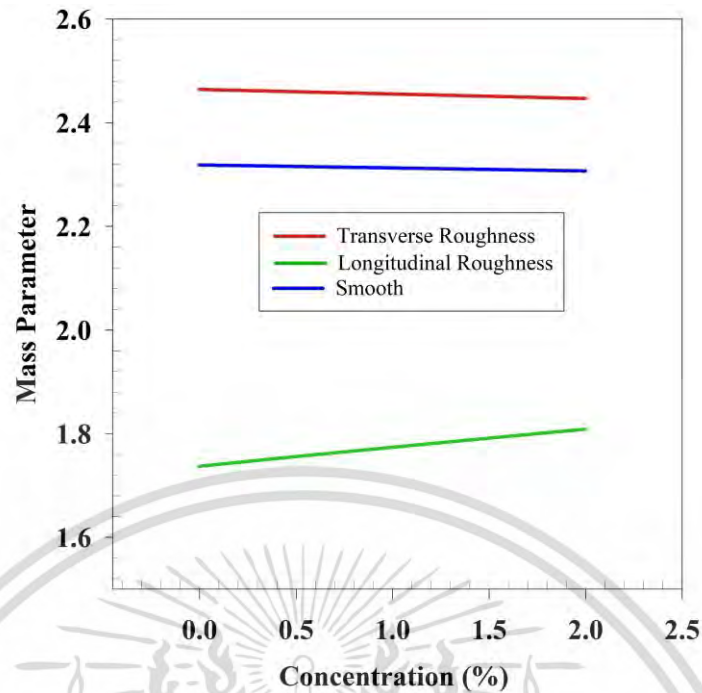
ตารางที่ 4.25 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{vv}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{vv}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$Al_2O_3$ (0%)	$Al_2O_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h = 4$ ไมครอน)	4.87	4.96	เพิ่มขึ้น 1.85%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h = 4$ ไมครอน)	6.6	6.71	เพิ่มขึ้น 1.67%
ผิวเรียบ	6.6	6.7	เพิ่มขึ้น 1.52%

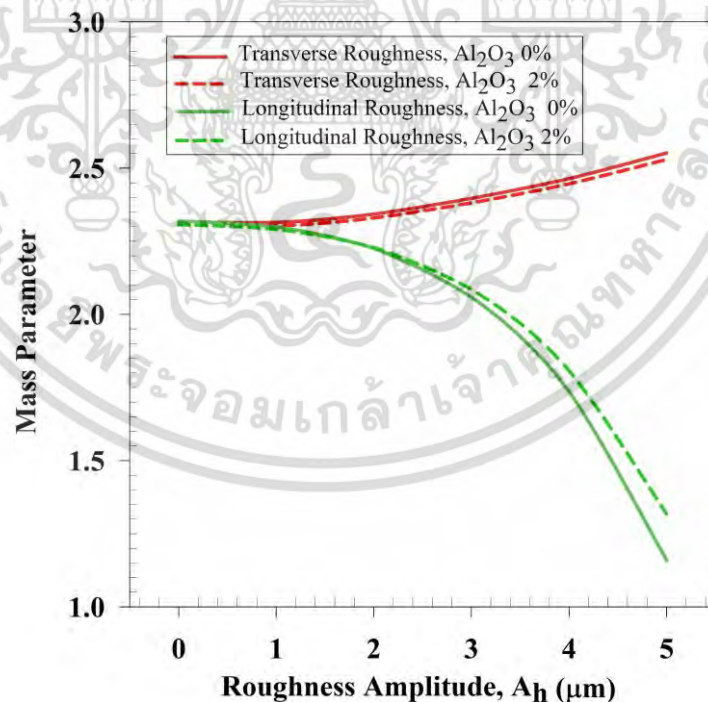
ตารางที่ 4.26 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{vz}$ ) เปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% และ 0%

รูปแบบของความหยาบ	สัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบไร้มิติ ( $B_{vz}$ )		การเปลี่ยนแปลง
	ไม่เติม	เติม	
	$Al_2O_3$ (0%)	$Al_2O_3$ (2%)	
ผิวหยาบตามขวาง ( $A_h = 4$ ไมครอน)	5.17	5.1	ลดลง 1.35%
ผิวหยาบตามยาว ( $A_h = 4$ ไมครอน)	3.66	3.62	ลดลง 1.09%
ผิวเรียบ	5.2	5.12	ลดลง 1.54%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลต่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน



รูปที่ 4.47 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลต่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ 2% และ 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.27 แสดงผลค่าพารามิเตอร์มวลของฟิล์มสารหล่อลื่นเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% และ 0% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน 4 ไมครอน และ 5 ไมครอน

รูปแบบของความหยาบ		พารามิเตอร์มวล		การเปลี่ยนแปลง	
		ไม่เติม $Al_2O_3$ (0%)	เติม $Al_2O_3$ (2%)		
ผิวหยาบตามยาว	$A_h = 5$ ไมครอน	1.16	1.319	เพิ่มขึ้น	13.70%
	$A_h = 4$ ไมครอน	1.737	1.81	เพิ่มขึ้น	4.20%
	$A_h = 3$ ไมครอน	2.059	2.086	เพิ่มขึ้น	1.31%
ผิวหยาบตามขวาง	$A_h = 5$ ไมครอน	2.55	2.53	ลดลง	0.78%
	$A_h = 4$ ไมครอน	2.464	2.447	ลดลง	0.69%
	$A_h = 3$ ไมครอน	2.397	2.382	ลดลง	0.62%

ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อค่าพารามิเตอร์มวลของแบริงเพลากลมเมื่อแบริงมีความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 4.46 พบว่าค่าพารามิเตอร์มวลของผิวแบบเรียบและผิวหยาบแบบตามขวางมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เพิ่มขึ้น แต่สำหรับกรณีของผิวหยาบแบบตามยาว พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์มวลมีค่าสูงขึ้น

ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อค่าพารามิเตอร์มวลของแบริงผิวหยาบตามยาวและตามขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) ซึ่งสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% และ 0% แสดงดังรูปที่ 4.47 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแอมพลิจูดความหยาบ ( $A_h$ ) กับค่าของพารามิเตอร์มวล พบว่าผิวหยาบตามขวางมีค่าพารามิเตอร์มวลเพิ่มขึ้นเมื่อแอมพลิจูดความหยาบ ( $A_h$ ) เพิ่มขึ้น แต่สำหรับผิวหยาบตามยาว ค่าพารามิเตอร์มวลมีค่าลดลงเมื่อแอมพลิจูดความหยาบ ( $A_h$ ) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วนของแอมพลิจูดของความหยาบต่อเคลียร์เรนซ์ ( $A_h/c$ ) มีค่ามากกว่า 0.1 และเมื่อพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อค่าพารามิเตอร์มวล พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ย่านเสถียรภาพของผิวหยาบตามขวางลดลงเล็กน้อย แต่ในทางตรงกันข้าม สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ย่านเสถียรภาพของผิวหยาบตามยาวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) มีค่ามากกว่า 3 ไมครอน

จากผลการคำนวณสรุปได้ว่าค่าย่านเสถียรภาพของผิวหยาบแบบตามขวางมีค่ามากกว่าแบบผิวเรียบ โดยผิวหยาบแบบตามยาวจะมีค่าย่านเสถียรภาพต่ำที่สุด สำหรับสารเติมแต่งอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำ จะทำให้ย่านเสถียรภาพของแบริงเพลากลมที่แบริงมีผิวเรียบ และผิวหยาบตามขวางมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ในทางตรงกันข้าม สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ย่านเสถียรภาพของแบริงเพลากลมที่มีความหยาบผิวตามยาวดีขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$

#### 4.4.3 ผลการคำนวณเส้นทางการเดินของศูนย์กลางเพลาสําหรับแบริงผิวหยาบ

จากผลที่ได้จากการวิจัย [139] สามารถสรุปได้ว่า สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ช่วยทำให้คุณสมบัติในการหล่อลื่นของแบริงดีขึ้น คือ เพิ่มความสามารถในการรับภาระ เพิ่มความหนาฟิล์ม ทั้งในกรณีที่ผิวแบริงเป็นแบบเรียบ และแบบผิวหยาบ อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยที่ผ่านมา เป็นการแสดงผลในกรณีที่แบริงเพลากลมมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ( $L/D = 1$ ) ดังนั้นในงานวิจัยส่วนนี้ จึงทำการแสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เมื่อ  $L/D$  เปลี่ยน โดยทำการคำนวณพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบริงเพลากลม เมื่อพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% และไม่เติม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำ แสดงเสถียรภาพของแบริงเพลากลมในรูปของเส้นทางการเดินของจุดศูนย์กลางเพลาสําหรับ  $L/D = 0.5$  1 และ 2 ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างแบริงที่มีความหยาบผิวแบบตามยาว และแบบตามขวาง โดยสมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลม แสดงดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 สมบัติทางกายภาพของแบริงเพลากลมในกรณีที่แบริงมีความหยาบผิว

สมบัติ	รายละเอียด
รัศมีของเพลากลม, $r$	0.015 m
รัศมีเคลียร์เรนซ์, $c$	30 $\mu$ m
ความยาวของแบริง, $L$	0.015 m, 0.03 m, 0.06 m

ในการพิจารณาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบริงเพลากลม เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สปริง และสัมประสิทธิ์ความหน่วง ทำการเขียนสมการการเคลื่อนที่ของเพลาสสามารถเขียนอยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์สปริง และสัมประสิทธิ์ความหน่วง โดยสมมติว่าเพลากร่งและสมมาตร เปลาเกิดการขยับอย่างทันทีทันใดจากสภาวะสมดุลเนื่องจากภาระเปลี่ยน ก็จะทำให้เพลาสเกิดการสั่นแบบธรรมชาติตามทิศทางในแนวราบ และแนวตั้ง แสดงผลทางพลศาสตร์ของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นเป็นน้ำ ภายใต้ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 ที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ ( $A_h$ ) 4 ไมครอน โดยผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.29 ถึงตารางที่ 4.30 และแสดงดังรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.52 ซึ่งเป็นการแสดงเสถียรภาพของแบริงเพลากลม

ในรูปแบบเส้นทางการเดินของศูนย์กลางเพลาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 และตารางที่ 4.30 แสดงผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นเป็นน้ำ สำหรับแปรงที่มีผิวหยาบตามยาว และตามขวาง ตามลำดับ ที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1 พบว่าค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแปรง ( $\varepsilon$ ) มีค่าลดลงทั้งผิวหยาบแบบตามยาวและตามขวาง สำหรับแปรงที่มีความหยาบผิวตามยาว พิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  2% เมื่อเทียบกับกรณีไม่เติม พบว่าค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแปรง ( $\varepsilon$ ) มีค่าลดลงจาก 0.797 เป็น 0.788 และสำหรับความหยาบผิวแบบตามขวาง พบว่ามีค่าลดลงเช่นเดียวกันจาก 0.754 เป็น 0.746 และเมื่อพิจารณาที่ค่าของมวลไร้มิติ ( $M$ ) พบว่าความหยาบผิวแบบตามขวางนั้น มีค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) สูงกว่าผิวหยาบแบบตามยาว ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับการวิจัยของ Mongkolwongroj และ Aiumpronsin [60] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Turaga และคณะ [140] สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ส่งผลให้ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) ผิวหยาบแบบตามยาวมีค่าเพิ่มมากขึ้น และมีร้อยละของการเพิ่มสูงกว่าผิวหยาบแบบตามขวาง นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาค่าของ  $K_{\varepsilon\varepsilon}$  พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะมีผลอย่างมากต่อแปรงผิวหยาบแบบตามยาว เนื่องจาก  $K_{\varepsilon\varepsilon}$  ของผิวหยาบแบบตามยาวมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 36.36 ในขณะที่  $K_{\varepsilon\varepsilon}$  ของผิวหยาบแบบตามขวางมีค่าลดลง 4.2%

เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลากลม เมื่อแปรงมีความหยาบผิวแบบตามยาว ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน โดยมวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 5.7 ที่ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1 เมื่อเปรียบเทียบผลของกรณีสารหล่อลื่นเป็นน้ำที่มีการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  แสดงดังรูปที่ 4.48 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลาสำหรับกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีเส้นทางเดินที่มีการลู่ออกอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.48 (ก) ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีที่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ซึ่งพบว่าเส้นทางเดินมีการลู่ออก และขนาดของวงโคจรมีขนาดเล็กกว่ากรณีแบบไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  แสดงดังรูป 4.48 (ข) ดังนั้นสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ช่วยทำให้แปรงผิวหยาบแบบตามยาวมีเสถียรภาพดีขึ้นอย่างชัดเจน

เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลากลม เมื่อแปรงมีความหยาบผิวแบบตามขวาง ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน โดยมวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.78 ที่ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.49 พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลเพียงเล็กน้อยต่อเสถียรภาพของแปรงเพลลากลมผิวหยาบตามขวาง รูปที่ 4.50 แสดงเส้นทางเดินของศูนย์กลางของสำหรับแปรงผิวหยาบแบบตามยาวที่มีค่าแอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน โดยมวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.0 ที่ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 6.12 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 2 เมื่อพิจารณากรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่น แสดงดังรูป 4.50 (ก) พบว่าเส้นทางเดินของศูนย์กลางเพลลาสำหรับแบบริงที่มีผิวหยาบตามยาวมีการลู่ออกอย่างเห็นได้ชัด ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะทำให้แบบริงผิวหยาบแบบตามยาวมีเสถียรภาพดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูป 4.50 (ข)

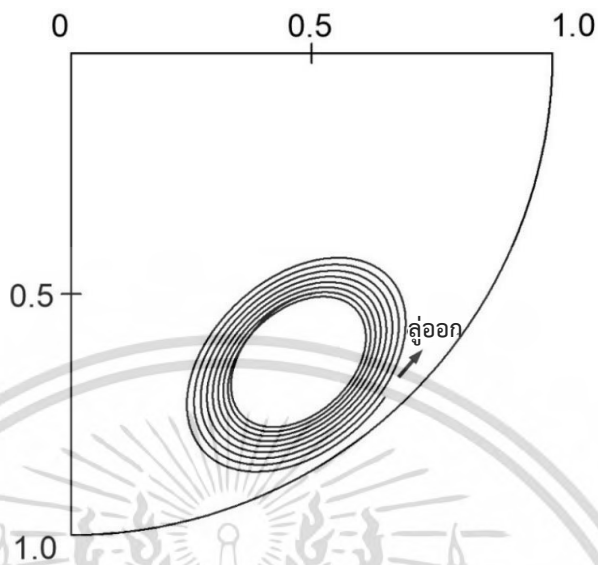
**ตารางที่ 4.29** ผลการจำลองสำหรับความหยาบผิวแบบตามยาว ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1 และค่าความสามารถในการรับภาระแบบไรรีมิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34

สมบัติ	ไม่เติม $Al_2O_3$ (0%)	เติม $Al_2O_3$ (2%)	การเปลี่ยนแปลง
$\varepsilon$	0.797	0.788	1.130 %
$\Phi$	36.25	36.89	1.77 %
$M$	5.423	5.699	5.09 %
$K_{\xi\xi}$	0.748	1.02	36.36 %
$K_{\xi\psi}$	4.201	4.198	0.07 %
$K_{\psi\xi}$	-2.695	-2.639	2.08 %
$K_{\psi\psi}$	3.121	3.116	0.16 %
$B_{\xi\xi}$	9.216	9.041	1.9 %
$B_{\xi\psi}$	4.889	4.833	1.15 %
$B_{\psi\xi}$	4.896	4.839	1.16 %
$B_{\psi\psi}$	6.058	6.177	1.96 %

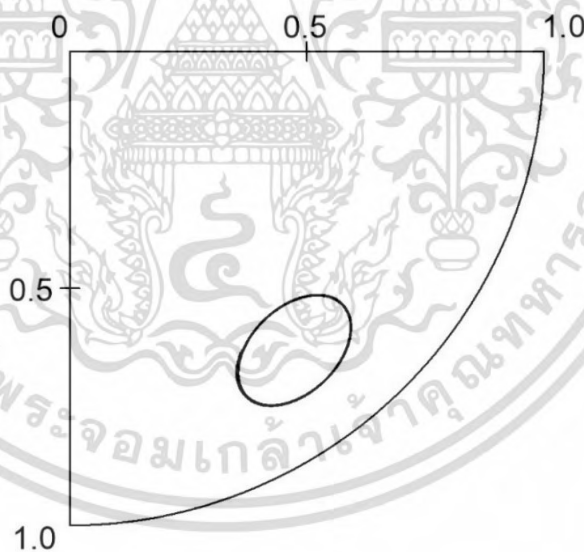
**ตารางที่ 4.30** ผลการจำลองสำหรับความหยาบผิวแบบตามขวาง ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1 และค่าความสามารถในการรับภาระแบบไรรีมิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34

สมบัติ	ไม่เติม $Al_2O_3$ (0%)	เติม $Al_2O_3$ (2%)	การเปลี่ยนแปลง
$\varepsilon$	0.754	0.746	1.060 %
$\Phi$	31.68	32.24	1.77 %
$M$	6.728	6.78	0.77 %
$K_{\xi\xi}$	4.44	4.254	4.19 %
$K_{\xi\psi}$	4.799	4.727	1.5 %
$K_{\psi\xi}$	-1.774	-1.815	2.31 %
$K_{\psi\psi}$	2.755	2.751	0.15 %
$B_{\xi\xi}$	7.98	7.884	1.2 %
$B_{\xi\psi}$	3.462	3.439	0.66 %
$B_{\psi\xi}$	3.464	3.441	0.66 %
$B_{\psi\psi}$	4.497	4.6	2.29 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



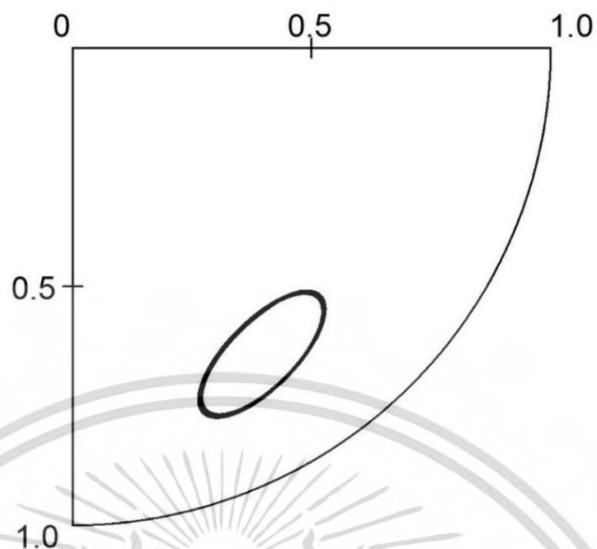
(ก) ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  0%) เส้นแสดงการลู่ออก



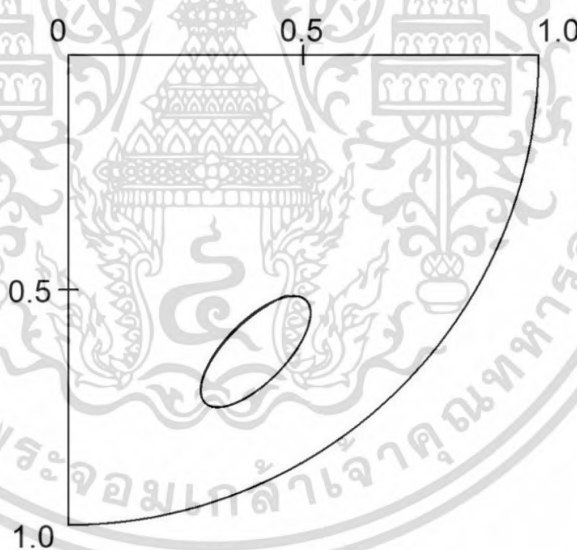
(ข) เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  2%) เส้นมีแสดงการลู่เข้า

**รูปที่ 4.48** เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยาบผิวแบบตามยาว ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 5.7 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



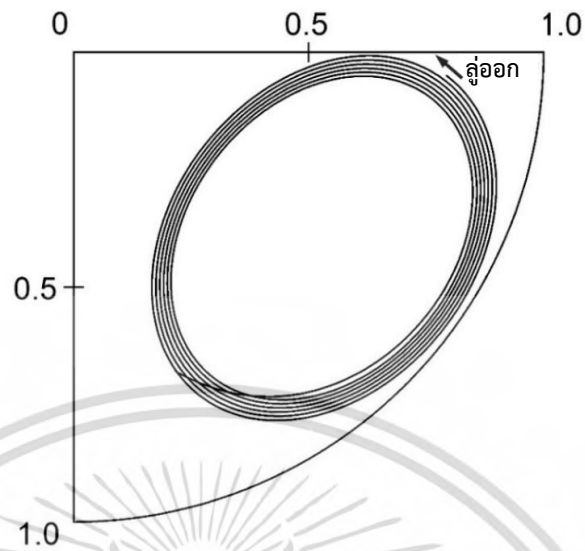
(ก) ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  0%) เส้นแสดงการหลอมเข้า



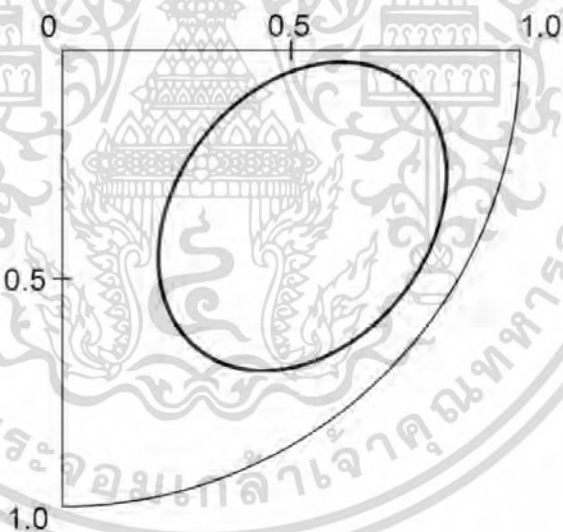
(ข) เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  2%) เส้นแสดงการหลอมเข้า

รูปที่ 4.49 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเฟลา เมื่อความหนาแน่นแบบตามขวาง ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.78 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 7.34 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



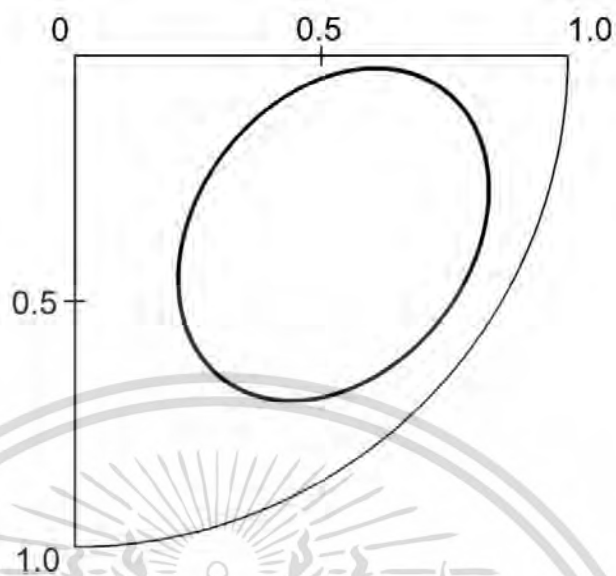
(ก) ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  0%) เส้นแสดงการลู่ออก



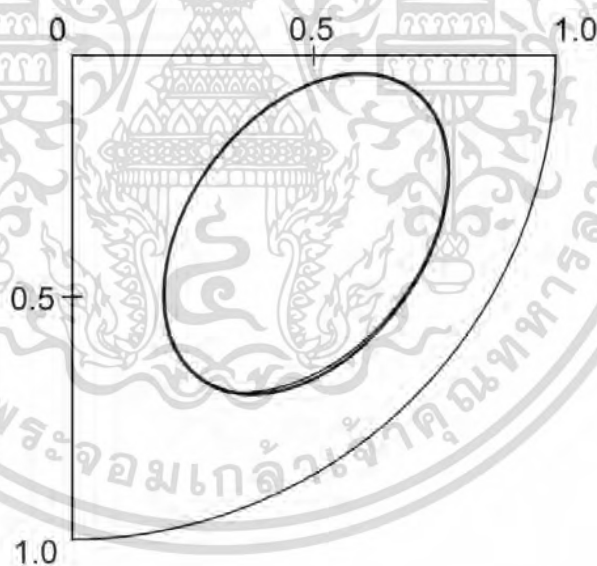
(ข) เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  2%) เส้นแสดงการลู่เข้า

รูปที่ 4.50 เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหนายืดแบบตามยาว ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.0 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 6.12 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



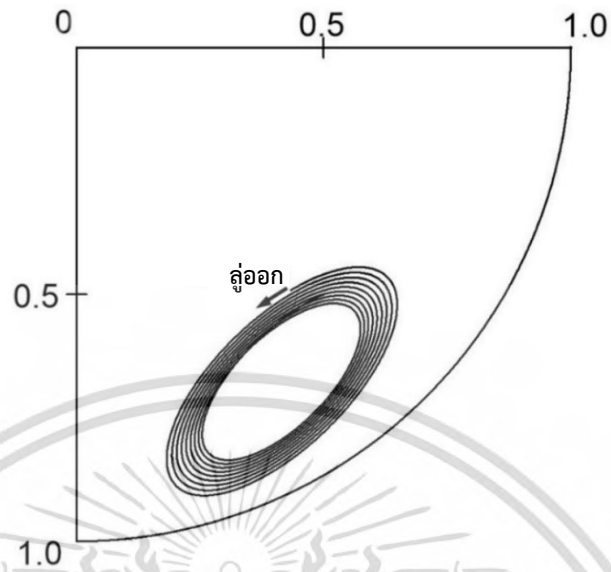
(ก) ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  0%) เส้นแสดงการหลอมเข้า



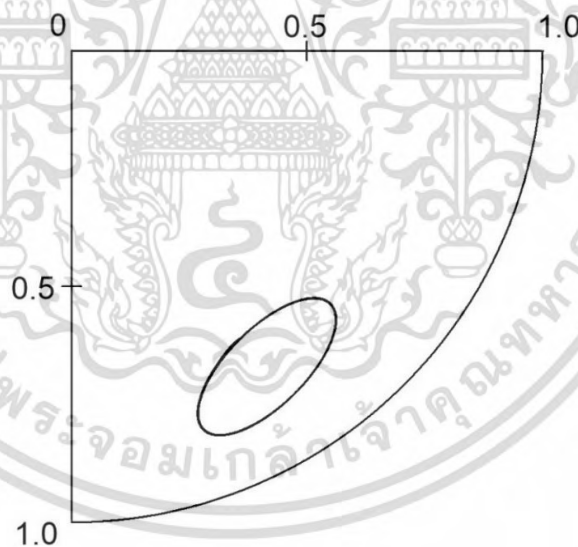
(ข) เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  2%) เส้นแสดงการหลอมเข้า

**รูปที่ 4.51** เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเฟลลา เมื่อความหนาพิวแบบตามขวาง ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.0 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 6.12 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  0%) เส้นแสดงการลู่ออก



(ข) เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  2%) เส้นแสดงการลู่เข้า

**รูปที่ 4.52** เส้นทางเดินของศูนย์กลางของเพลลา เมื่อความหยาบผิวแบบตามยาว ที่ค่ามวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 7.5 มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 3.92 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทางการเดินของศูนย์กลางของเพลากลม เมื่อแบริงมีความหยวบผิวแบบตามขวาง ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดของความหยวบเท่ากับ 4 ไมครอน โดยมวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 6.0 ที่ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 6.12 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 2 แสดงดังรูปที่ 4.51 เมื่อพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อเส้นทางการเดินของศูนย์กลางเพลากลม พบว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลเพียงเล็กน้อยต่อเสถียรภาพของเพลากลมแบริงผิวหยวบแบบตามขวาง

เส้นทางการเดินของศูนย์กลางของเพลากลม เมื่อแบริงมีความหยวบผิวแบบตามยาว ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดของความหยวบเท่ากับ 4 ไมครอน โดยมวลไร้มิติ ( $M$ ) เท่ากับ 7.5 ที่ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 3.92 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.52 เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 4.52 (ก) พบว่าเส้นทางการเดินมีการลู่ออกสำหรับกรณีที่ไม่เติม แต่เมื่อเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  พิจารณารูปที่ 4.52 (ข) พบว่าเส้นทางการเดินของศูนย์กลางเพลากลมมีการลู่ออกอย่างเห็นได้ชัด

จากการวิเคราะห์ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อเสถียรภาพในลักษณะของเส้นทางการเดินของศูนย์กลางเพลากลม ที่ค่าของอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.5 1 และ 2 สามารถสรุปได้ว่า สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแบริงผิวหยวบแบบตามยาว

#### 4.5 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อแบริงเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน

แสดงผลการคำนวณค่าความยืดหยุ่น หรือผลของความแข็ง-นิ่มของวัสดุ ต่อพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ของแบริงเพลากลมภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยใช้แบบจำลองของคาโอสำหรับสารหล่อลื่นน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน แสดงผลของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำแบริงที่ ค่าของอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.5 ถึง 1.25 และแสดงผลที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลากลมและแบริง ( $\epsilon$ ) เท่ากับ 0.2 ถึง 0.9 ทำการเปรียบเทียบวัสดุ ประกอบไปด้วยวัสดุแบบนิ่มที่สุด ( $E = 5$  GPa) วัสดุแบบนิ่มปานกลาง ( $E = 10$  GPa และ 70 GPa) แสดงผลเปรียบเทียบกับวัสดุแบบแข็ง ( $E = 200$  GPa) และแสดงผลเทียบกับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL)

#### 4.5.1 สมบัติของแบร็งเพลากลมและสารหล่อลื่น

ผลเชิงตัวเลขของค่าความยืดหยุ่น หรือผลของสมบัติความแข็ง-นิ่มของวัสดุแบร็ง ในการคำนวณใช้สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลมดังตารางที่ 4.31 และใช้สมบัติสารหล่อลื่น แบบนอน-นิวโตเนียนดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.31 สมบัติทางกายภาพของแบร็งเพลากลมกรณีผลของค่าความยืดหยุ่น โดยสารหล่อลื่น เป็นแบบนอน-นิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
รัศมีของเพลากลม, $r$	0.015 m
รัศมีเคลียร์แรนซ์, $c$	$30 \mu\text{m}$
อัตราเร็วรอบ, $N$	3,000 rpm
ค่าอัตราส่วนปัวซองของแบร็ง, $\nu$	0.3

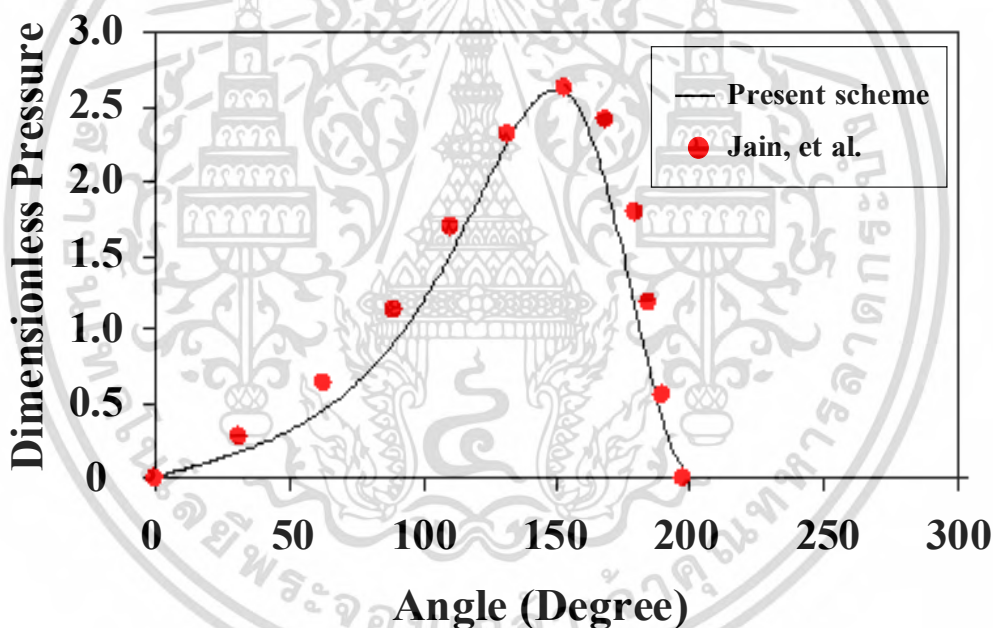
ตารางที่ 4.32 สมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นกรณีผลของค่าความยืดหยุ่น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน

สมบัติ	รายละเอียด
ชนิดของสารหล่อลื่น	SAE 10W50
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนต่ำ, $\mu_0$	0.107 Pa·s
ความหนืดจำกัดที่ความเครียดเฉือนสูง, $\mu_\infty$	0.054 Pa·s
Power law exponent, $n$	0.341
Characteristic relaxation time constant, $\lambda$	$3 \times 10^{-6}$
ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, $\rho$	$875 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $c_f$	$1900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
อุณหภูมิเริ่มต้นสารหล่อลื่น, $T_0$	313 K
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ, $\gamma$	$0.0310174 \text{ K}^{-1}$
สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ, $\beta$	$0.000788 \text{ K}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 ผลการคำนวณ

ในการคำนวณผลของค่าความยืดหยุ่น พิจารณาค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เพื่อทำการหาค่าของพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ เช่น ภาระแรงแบบไร้มิติ ความดันสูงสุดแบบไร้มิติ ความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติ สัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติ และ อุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มน้ำมันแบบไร้มิติ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์มวล ทำการคิดผลของความยืดหยุ่นวัสดุ ทำการเปลี่ยนค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ของวัสดุแบริง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 GPa 10 GPa 70 GPa และ 200 GPa เพื่อยืนยันความถูกต้องของการคำนวณ แสดงโดยรูปที่ 4.53 เป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่คำนวณได้ กับผลการคำนวณของ Jain และคณะ [50] ที่ค่า  $c/r = 8 \times 10^{-4}$ ,  $\mu = 3.3 \times 10^{-4}$  Pa·s,  $\omega = 100\pi$  rad/s,  $r = 25 \times 10^{-3}$  m,  $\varepsilon = 0.6$ ,  $E = 162$  GPa, และ  $\nu = 0.3$  ซึ่งผลที่แสดงมีค่าสอดคล้องกัน



รูปที่ 4.53 การเปรียบเทียบผลของการคำนวณการกระจายของความดันฟิล์มเทียบกับผลของ Jain และคณะ [50]

การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติที่ตำแหน่งของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.54 พบว่าค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง โดยสำหรับวัสดุนี้ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) จะมีผลต่อค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติเล็กน้อย เมื่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์ เอกสารนี้ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่ากรณีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) ซึ่งเป็นกรณีการหล่อลื่นที่ไม่คิดความยืดหยุ่นของวัสดุแบริงนั้น จะมีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติมีค่าสูงที่สุด คือ เท่ากับ 3.46 เมื่อพิจารณากรณีการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) ที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa พบว่าค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) มีค่าเท่ากับ 3.26 2.54 1.09 และ 0.73 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.7 0.8 และ 0.9 สำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยเปรียบเทียบผลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับผลของค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติจะมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ต่ำลง พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าความสามารถในการรับภาระลดลงถึงร้อยละ 77.5 ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa และ 70 GPa มีค่าลดลงร้อยละ 66.7 และร้อยละ 22 ตามลำดับ

สามารถสรุปได้ว่า วัสดุที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ต่ำ ๆ หรือวัสดุเหนียวจะมีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติน้อยกว่าวัสดุแข็ง หรือวัสดุที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) สูง ๆ และจะมีผลอย่างมากต่อแบริงเพลลาที่ทำงานที่ภาระสูงๆ ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติของแบริงเพลลาที่มีวัสดุแข็งจะมีค่าสูงกว่าวัสดุนิ่มอย่างมาก โดยเฉพาะผลของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติสูงที่สุด โดยความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับภาระนี้เกิดจากผลของการเปลี่ยนลักษณะยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อแบริงเพลลาทำงานภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) จะมีค่าความสามารถในการรับภาระลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะกรณีที่วัสดุนั้นมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ต่ำ ๆ

การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติเทียบกับอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.55 ซึ่งพบว่าผลในกรณีของวัสดุแบริงทั้งแบบแข็ง และแบบนิ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เพิ่มขึ้น พิจารณาที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติในกรณีการหล่อลื่นที่ไม่คิดค่าความยืดหยุ่นของวัสดุแบริงนั้นมีค่า 1.01 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติสำหรับกรณีที่ คิดผลของความยืดหยุ่นของวัสดุแบริงที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) 200 GPa 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa นั้น มีค่าเท่ากับ 1.20 1.54 3.34 และ 4.66 ตามลำดับ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติจะมีค่าลดลงเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อทำงานที่ภาระโหลดสูงๆ โดยตารางที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.7 0.8 และ 0.9 ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยเปรียบเทียบผลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับผลของค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติ มีค่าลดลงเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 289.4 ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa และ 70 GPa มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 179.2 และร้อยละ 28.2 ตามลำดับ

ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเทียบกับอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.56 พบว่าค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติของกรณีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (THL) นั้นมีค่าเท่ากับ 0.10 ซึ่งเมื่อพิจารณาความยืดหยุ่นของวัสดุที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa พบว่ามีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติ เท่ากับ 0.15 0.20 0.43 และ 0.56 ตามลำดับ โดยตารางที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.7 0.8 และ 0.9 สำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยเปรียบเทียบผลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับผลของค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติมีค่าลดลงเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 284.8 ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa และ 70 GPa มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 196.3 และร้อยละ 40 ตามลำดับ

ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติเทียบกับอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.57 พบว่าค่าของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น โดยสำหรับวัสดุนี้ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) มีผลต่ออุณหภูมิเล็กน้อย แต่มีผลอย่างมากต่อการหล่อลื่น

แบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลา  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติในกรณีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) มีค่าเท่ากับ 19.94 เมื่อพิจารณาความยืดหยุ่นของวัสดุที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa พบว่ามีค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติ เท่ากับ 17.72 14.64 8.60 และ 6.88 ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) สูงขึ้น โดยตารางที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.7 0.8 และ 0.9 สำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยเปรียบเทียบผลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับผลของค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติจะมีค่าการลดลงเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติลดลงถึง 61.2% ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa และ 70 GPa มีค่าลดลงร้อยละ 51.5 และร้อยละ 17.4 ตามลำดับ

ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ เทียบกับอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง แสดงดังรูปที่ 4.58 พบว่าค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น มีผลเล็กน้อยต่อวัสดุที่มีสำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) พิจารณาผลของวัสดุแบริงที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติในกรณีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) มีค่าเท่ากับ 4.65 ซึ่งเมื่อพิจารณาความยืดหยุ่นของวัสดุที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa พบว่ามีค่าของค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ เท่ากับ 4.20 2.94 1.02 และ 0.65 ตามลำดับ โดยตารางที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.7 0.8 และ 0.9 สำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยเปรียบเทียบผลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับผลของค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดลดลงถึงร้อยละ 84.5 ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa และ 70 GPa มีค่าลดลงร้อยละ 75.5 และร้อยละ 30.1 ตามลำดับ

เมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) และอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) สูงๆ ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดจะมีค่าลดลงอย่างมาก ทำให้เกิด shear thinning effect [101,118] ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการยินยอมจากผู้จัดทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดขึ้นเมื่อค่าอัตราความเครียดเฉือนสูง ส่งผลทำให้ความหนืดลดลง จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงสุด และอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งผลของค่าความยืดหยุ่นในกรณีวัสดุนี้มีผลอย่างมากต่อความดัน เนื่องจากผลของการยุบตัวที่ทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสมากขึ้น และผลของความหนาฟิล์มที่สูงขึ้น

ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลเทียบกับค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) แสดงดังรูปที่ 4.59 พบว่าการถลอกลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) จะมีค่าพารามิเตอร์มวลเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อย่านเสถียรภาพมากเมื่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) สูง ๆ ในขณะที่ย่านเสถียรภาพของวัสดุนี้ภายใต้การถลอกลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) นั้นจะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) เพิ่มขึ้น และย่านเสถียรภาพเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น โดยตารางที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) เท่ากับ 0.7 0.8 และ 0.9 สำหรับการถลอกลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) โดยเปรียบเทียบผลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับผลของค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลมีค่าลดลงเมื่อวัสดุมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) เท่ากับ 0.9 พบว่าที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าพารามิเตอร์มวลลดลงร้อยละ 21.9 ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa และ 70 GPa มีค่าลดลงร้อยละ 16.5 และร้อยละ 5.3 ตามลำดับ

ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติสำหรับแบริงเพลลากลมที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) เท่ากับ 0.8 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 0.5 0.75 1 และ 1.25 แสดงดังรูปที่ 4.60 ซึ่งจากผลพบว่าการถลอกลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการถลอกลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) ซึ่งเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติมีค่าลดลง และจะมีผลมากที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) สูง ๆ โดยตารางที่ 4.39 แสดงผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ ที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa และ 70 GPa เทียบกับ 200 GPa ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $L/D$  เท่ากับ 0.5 การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติของแบริงเพลลากลม

ที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa 70 GPa มีค่าร้อยละ 145 ร้อยละ 86.7 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 11.4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.25 พิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติของแบริงเพลากลม พบว่าการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติของแบริงเพลากลมสำหรับค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa 10 GPa 70 GPa มีค่าร้อยละ 236.4 ร้อยละ 144.5 และร้อยละ 22.1 ตามลำดับ ดังนั้นค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) จะมีผลอย่างมากที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) สูง ๆ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติมีค่าลดลงเมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาอยู่ที่ 4.61 ซึ่งเป็นผลของค่าความยืดหยุ่นต่อความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) พบว่า ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) ของแบริงเพลากลมที่ค่าความยืดหยุ่น เท่ากับ 5 GPa นั้น จะมีค่าต่ำสุด นอกจากนี้ยังมีค่าน้อยที่สุดเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 พิจารณาที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.25 พบว่าแบริงเพลากลมที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ คือ 0.68 เมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa มีค่าเท่ากับ 1.0 โดยที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 70 GPa มีค่าเท่ากับ 2.22 และที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa มีค่าเท่ากับ 2.73 โดยสำหรับเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) พบว่าค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เท่ากับ 2.82 โดยตารางที่ 4.40 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) ที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa เทียบกับ 200 GPa มีการเปลี่ยนแปลงแบบลดลง ซึ่งการลดลงนี้จะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น แบริงที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ต่ำกว่า ก็จะมีการยุบตัว ทำให้พื้นที่ในการรับภาระมากกว่าแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) จึงส่งผลให้ความดันต่ำกว่า ดังนั้นค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) จะมีค่าต่ำกว่าการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL)

การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติแสดงดังรูปที่ 4.62 โดยค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติมีค่ามากขึ้นเมื่อวัสดุแบริงมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ลดลง จะเห็นผลชัดเจนที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) สูง ๆ แสดงดังตาราง 4.41 พบว่ามีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.25 และมีค่าสูงสุดที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa เมื่อทำการพิจารณาที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.25 พบว่าเมื่อแบริงเพลากลมที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติ คือ 0.68 เมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 0.54 ที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 70 GPa มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 0.30 และที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa มีค่า

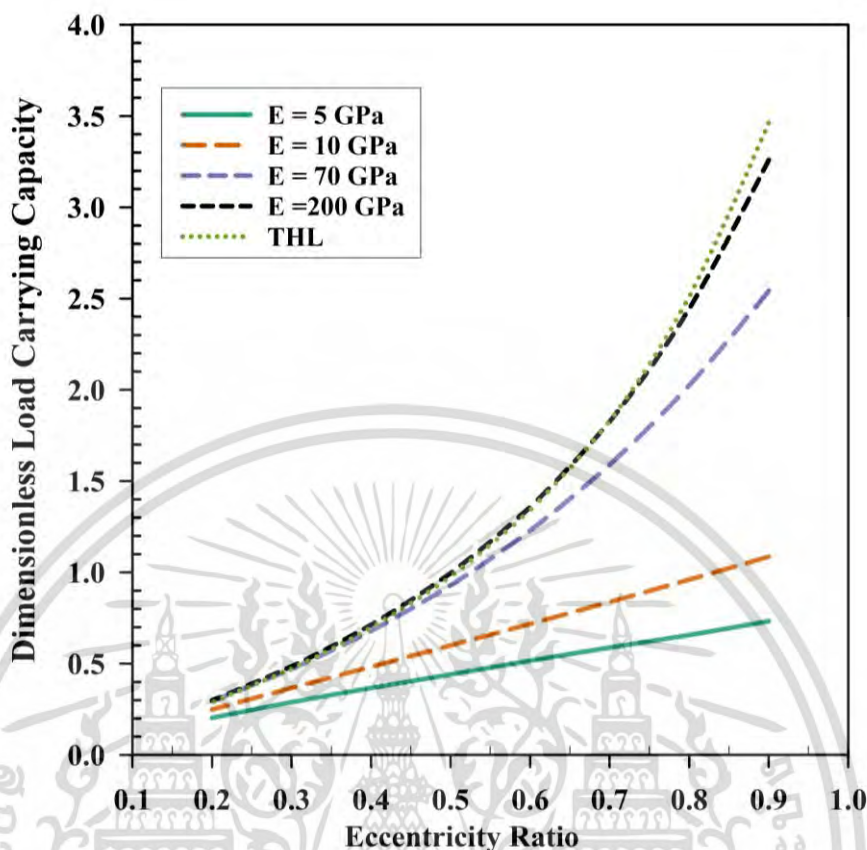
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 0.24 โดยสำหรับเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (TEHL) พบว่ามีค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) ต่ำสุดเท่ากับ 0.20 ในทางตรงกันข้าม พบว่าค่าของอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง เมื่อวัสดุแบริงมีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.63 เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) กับค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติ พบว่าสำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) นั้นเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เพิ่มขึ้นค่าของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติก็จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) นั้นจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เพิ่มขึ้น และพบว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติมีค่าต่ำสุดเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.25 ที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa

เมื่อพิจารณาค่าของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1.25 พบว่าเมื่อแบริงเพลากลมที่มีค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 5 GPa มีค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติ คือ 6.15 โดยที่เมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 10 GPa มีค่าของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 7.58 ขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 70 GPa มีค่าของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 12.12 และที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เท่ากับ 200 GPa มีค่าของอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 13.99 โดยสำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก (THL) พบว่ามีค่าอุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติเท่ากับ 14.83 ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติต่อผลของค่าความยืดหยุ่นแสดงดังตารางที่ 4.42 พบว่าเมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ลดลงนั้น ค่าร้อยละของการลดลงจะมีค่าเพิ่มขึ้น และการลดลงของอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เพิ่มขึ้น

ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อค่าพารามิเตอร์มวล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) แสดงดังรูปที่ 4.64 พบว่าย่านเสถียรภาพของจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เพิ่มขึ้น และมีผลต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) อย่างมาก เมื่อค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) เพิ่มขึ้น พบว่าย่านเสถียรภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) และจะมีผลอย่างมากที่ค่าของอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) สูงๆ โดยตารางที่ 4.43 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวลที่ค่าความยืดหยุ่น ( $E$ ) ที่เท่ากับ 70 GPa 10 GPa และ 5 GPa เทียบกับ 200 GPa ที่ค่า  $L/D$  เท่ากับ 0.75 1 และ 1.25 ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์มวลจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบลดลง โดยเฉพาะที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) สูงๆ ดังนั้นเสถียรภาพของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก (TEHL) สามารถปรับปรุงได้ด้วยค่าความยืดหยุ่น ( $E$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

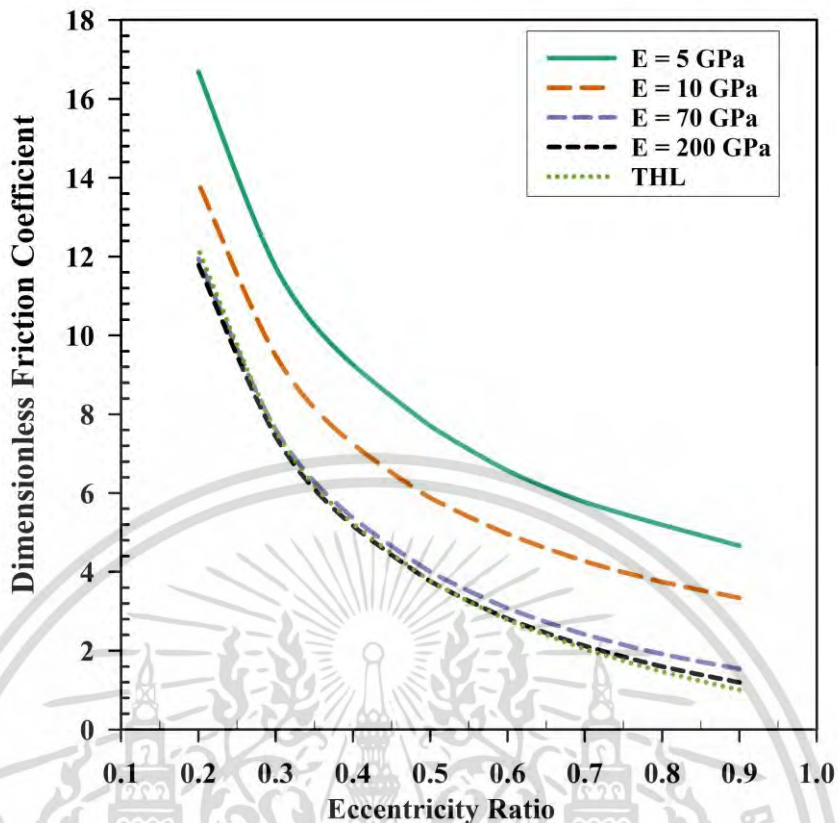


รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.33 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ )

อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\epsilon$ )	การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
	0.9	ลดลง 77.5%	ลดลง 66.7%
0.8	ลดลง 73.1%	ลดลง 60.7%	ลดลง 17.2%
0.7	ลดลง 67.8%	ลดลง 54.2%	ลดลง 12.9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

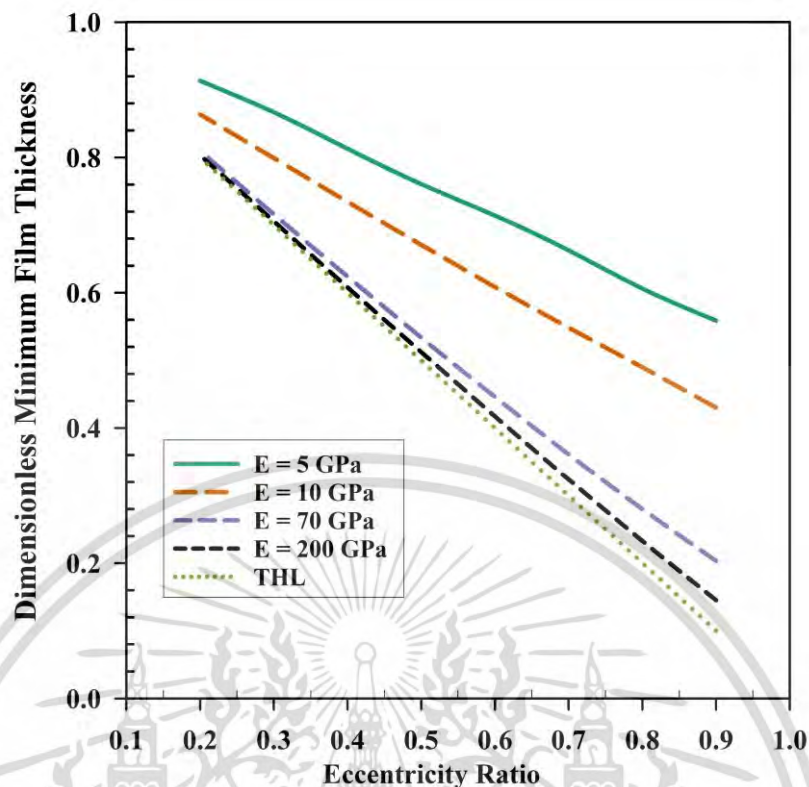


รูปที่ 4.55 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร็ง ( $\epsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.34 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ

อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร็ง ( $\epsilon$ )	การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติเมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
	0.9	เพิ่มขึ้น 289.4%	เพิ่มขึ้น 179.2%
0.8	เพิ่มขึ้น 224.6%	เพิ่มขึ้น 134.2%	เพิ่มขึ้น 19.8%
0.7	เพิ่มขึ้น 171.8%	เพิ่มขึ้น 101.1%	เพิ่มขึ้น 13.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

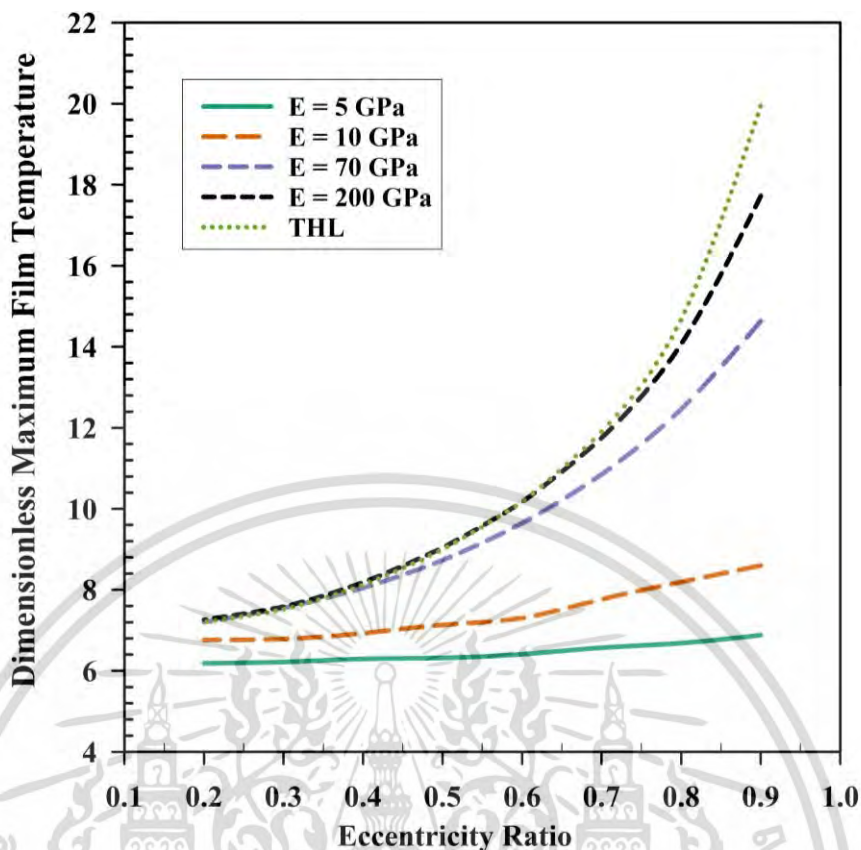


รูปที่ 4.56 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.35 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ

อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ( $\varepsilon$ )	การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติเมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
0.9	เพิ่มขึ้น 284.8%	เพิ่มขึ้น 196.3%	เพิ่มขึ้น 40.0%
0.8	เพิ่มขึ้น 160.3%	เพิ่มขึ้น 110.4%	เพิ่มขึ้น 20.2%
0.7	เพิ่มขึ้น 104.6%	เพิ่มขึ้น 69.4%	เพิ่มขึ้น 11.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

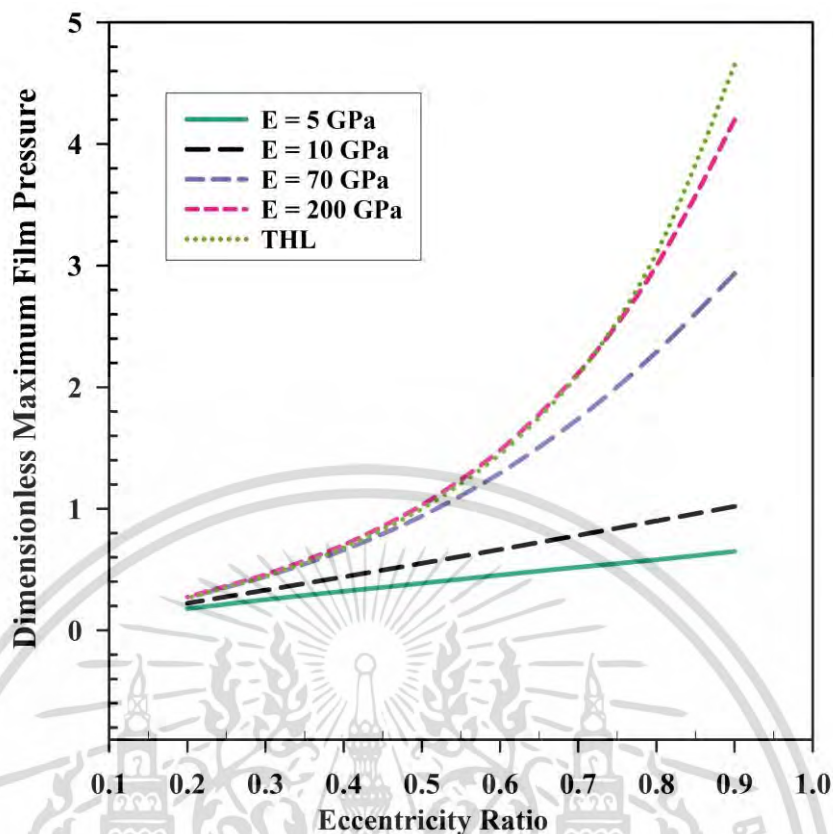


รูปที่ 4.57 การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\epsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.36 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ

อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\epsilon$ )	การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติเมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
	0.9	ลดลง 61.2%	ลดลง 51.5%
0.8	ลดลง 52.5%	ลดลง 41.8%	ลดลง 11.4%
0.7	ลดลง 44.1%	ลดลง 34.0%	ลดลง 7.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

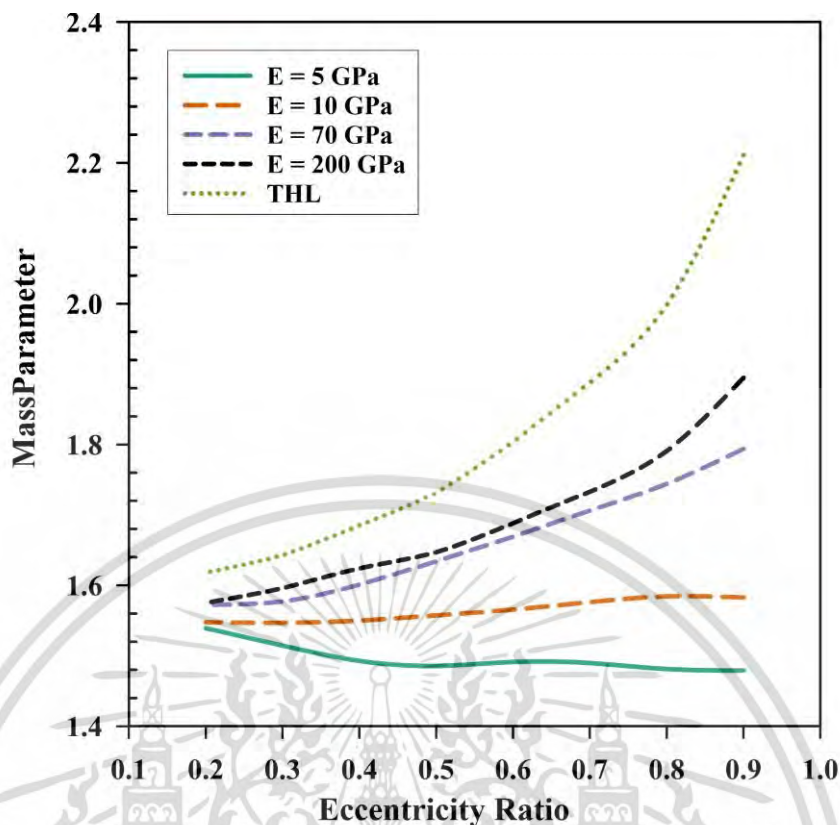


รูปที่ 4.58 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\varepsilon$ ) ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.37 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติ

อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบรริง ( $\varepsilon$ )	การเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดแบบไร้มิติเมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
	0.9	ลดลง 84.5%	ลดลง 75.7%
0.8	ลดลง 80.6%	ลดลง 70.0%	ลดลง 23.6%
0.7	ลดลง 75.4%	ลดลง 63.1%	ลดลง 17.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

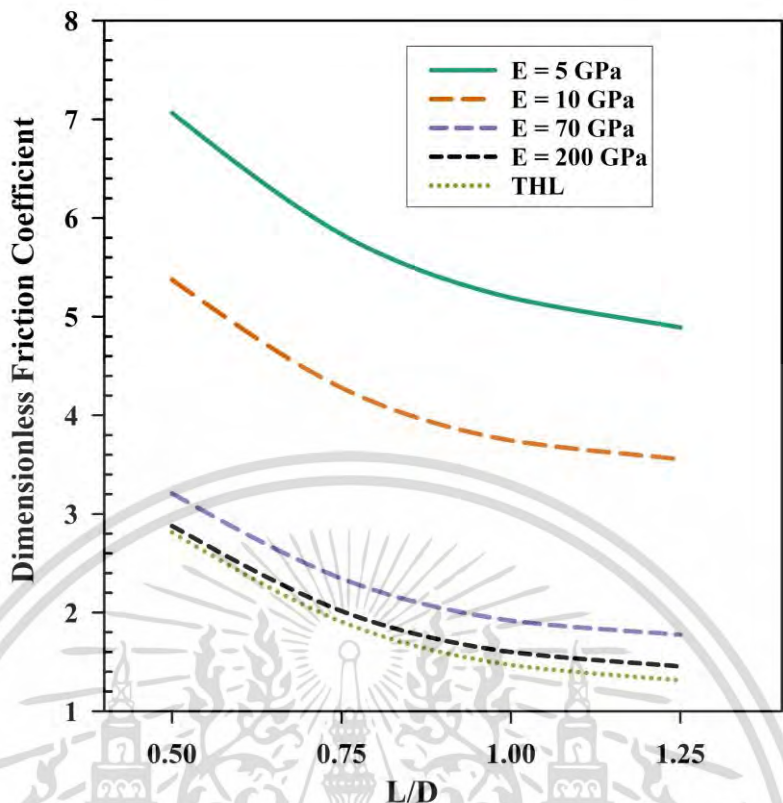


รูปที่ 4.59 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มวลเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแปริง ( $\varepsilon$ ) เมื่อ  $L/D=1$

ตารางที่ 4.38 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มวล เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแปริง ( $\varepsilon$ ) เมื่อ  $L/D=1$

อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแปริง ( $\varepsilon$ )	การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์มวลเมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความยืดหยุ่น
	5 GPa	10 GPa	70 GPa
0.9	ลดลง 21.9%	ลดลง 16.5%	ลดลง 5.3%
0.8	ลดลง 17.3%	ลดลง 11.5%	ลดลง 2.6%
0.7	ลดลง 14.0%	ลดลง 9.1%	ลดลง 1.6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

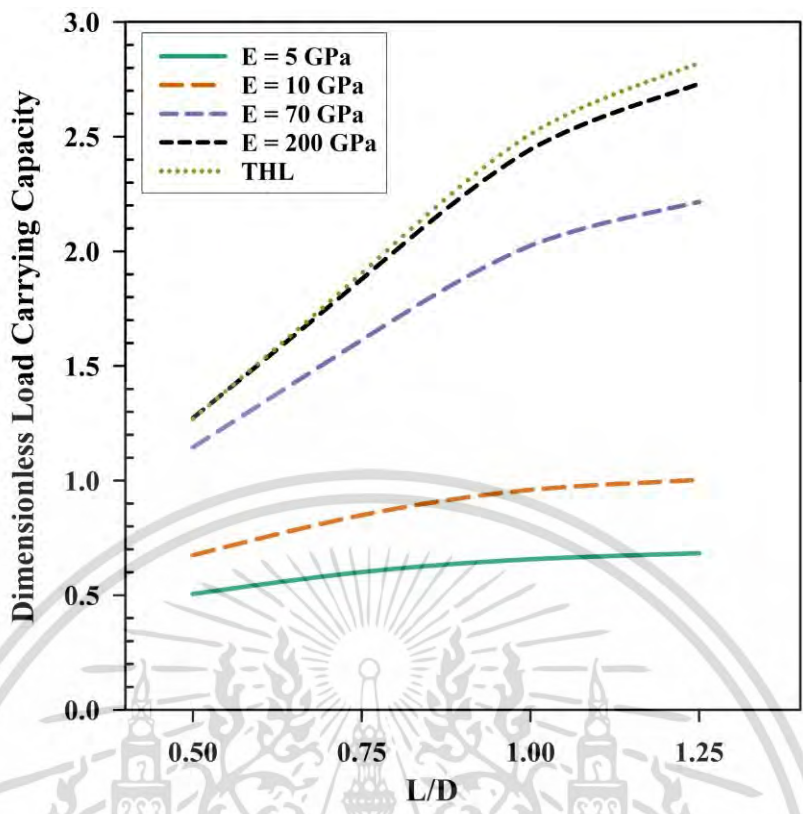


รูปที่ 4.60 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริ่งเท่ากับ 0.8 ( $\epsilon = 0.8$ )

ตารางที่ 4.39 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริ่งเท่ากับ 0.8 ( $\epsilon = 0.8$ )

อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ )	การเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบไร้มิติ เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
	0.5	เพิ่มขึ้น 145.5%	เพิ่มขึ้น 86.7%
0.75	เพิ่มขึ้น 189.6%	เพิ่มขึ้น 112.3%	เพิ่มขึ้น 16.3%
1	เพิ่มขึ้น 224.6%	เพิ่มขึ้น 134.2%	เพิ่มขึ้น 19.8%
1.25	เพิ่มขึ้น 236.4%	เพิ่มขึ้น 144.5%	เพิ่มขึ้น 22.1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

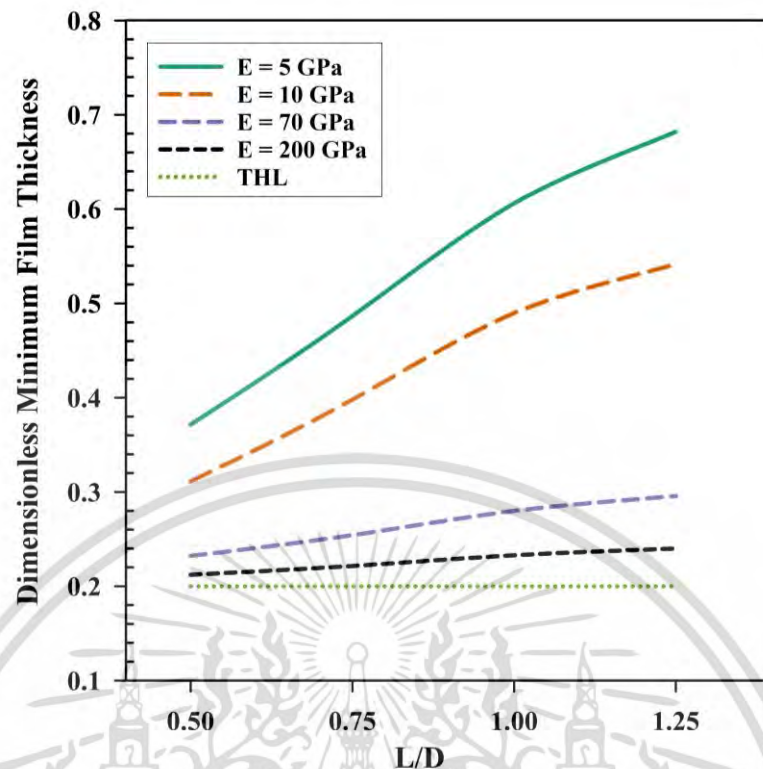


รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\epsilon = 0.8$ )

ตารางที่ 4.40 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\epsilon = 0.8$ )

อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ )	การเปลี่ยนแปลง ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไร้มิติ ( $W$ ) เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความยืดหยุ่น
	5 GPa	10 GPa	70 GPa
0.5	ลดลง 60.3%	ลดลง 47.1%	ลดลง 10.0%
0.75	ลดลง 68.0%	ลดลง 54.8%	ลดลง 14.1%
1	ลดลง 73.1%	ลดลง 60.7%	ลดลง 17.2%
1.25	ลดลง 75.0%	ลดลง 63.2%	ลดลง 18.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

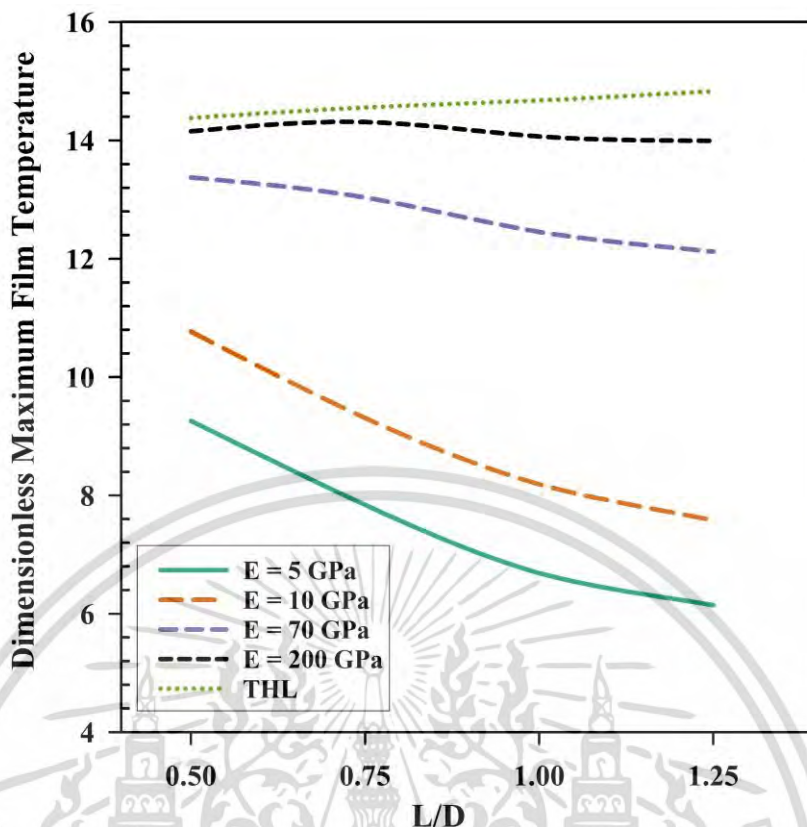


รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

ตารางที่ 4.41 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ )	การเปลี่ยนแปลง ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดแบบไร้มิติ เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความยืดหยุ่น
	5 GPa	10 GPa	70 GPa
0.5	เพิ่มขึ้น 75.0%	เพิ่มขึ้น 46.6%	เพิ่มขึ้น 9.4%
0.75	เพิ่มขึ้น 119.7%	เพิ่มขึ้น 79.7%	เพิ่มขึ้น 14.7%
1	เพิ่มขึ้น 160.3%	เพิ่มขึ้น 110.4%	เพิ่มขึ้น 20.2%
1.25	เพิ่มขึ้น 184.0%	เพิ่มขึ้น 125.6%	เพิ่มขึ้น 23.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

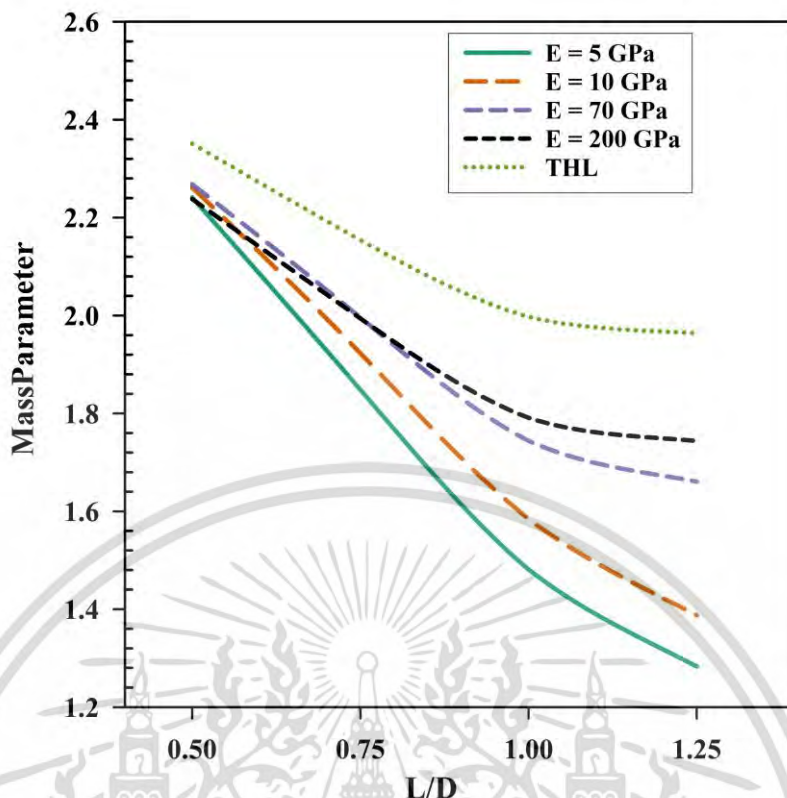


รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

ตารางที่ 4.42 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ( $\varepsilon = 0.8$ )

อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ )	การเปลี่ยนแปลง ค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
0.5	ลดลง 34.6%	ลดลง 23.9%	ลดลง 5.5%
0.75	ลดลง 45.2%	ลดลง 34.9%	ลดลง 8.9%
1	ลดลง 52.5%	ลดลง 41.8%	ลดลง 11.4%
1.25	ลดลง 56.1%	ลดลง 45.8%	ลดลง 13.4%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริงเท่ากับ 0.8 ( $\epsilon = 0.8$ )

ตารางที่ 4.43 ผลของค่าความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์มวล ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริงเท่ากับ 0.8 ( $\epsilon = 0.8$ )

อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ )	การเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์มวล เมื่อเทียบกับค่าความยืดหยุ่น 200 GPa		
	ค่าความยืดหยุ่น 5 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 10 GPa	ค่าความยืดหยุ่น 70 GPa
	0.75	ลดลง 7.3%	ลดลง 3.6%
1	ลดลง 17.3%	ลดลง 11.5%	ลดลง 2.6%
1.25	ลดลง 26.4%	ลดลง 20.4%	ลดลง 4.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการหาค่าสมรรถนะทางด้านการหล่อลื่นของแบริงเพลากลม เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะของการหล่อลื่น ทำการพิจารณาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่มีต่อสมรรถนะของแบริงเพลากลม แสดงผลของความหยาบผิวแบริง ประกอบไปด้วย ผิวหยาบแบบตามขวาง และผิวหยาบแบบตามยาว ซึ่งผลของแบริงผิวหยาบนั้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และความดันฟิล์มน้ำมัน แสดงผลการคำนวณลักษณะของการวางของแกนเพลลาเอียงต่อสมรรถนะของแบริงเพลากลม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการยืดอายุการใช้งานของแบริงเพลากลม ในงานวิจัยนี้ใช้ชนิดของสารหล่อลื่น 2 ประเภท คือ น้ำมัน และน้ำ เนื่องจากปัจจุบันการใช้น้ำเป็นสารหล่อลื่นใช้กันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ และนิยมใช้ในระบบการส่งกำลังในเรือเดินสมุทร เมื่อแบริงเพลากลมทำงานภายใต้ภาระสูงๆ จะเกิดผลของการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากอัตราความเครียดเฉือน (shear-thinning effect) ต่อสารหล่อลื่นได้ จึงได้ทำการพิจารณาผลของค่าความยืดหยุ่นของวัสดุแบริง และผลของการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นต่อสมรรถนะการหล่อลื่นของแบริงเพลากลม เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะการหล่อลื่นของแบริงเพลากลม ซึ่งประกอบไปด้วย ผลของการเอียงของแนวเพลลา ผลของความหยาบของผิวแบริง ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นน้ำมันและน้ำ ผลของค่าความยืดหยุ่นของวัสดุแบริง โดยใช้วิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลสรุปของการวิจัย แสดงดังนี้

#### 5.1 สรุปผลแบริงเพลากลมที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง

ผลของการวางแนวแกนเพลลาไม่อยู่ในเส้นตรง หรือเอียง ในการคำนวณ กำหนดให้แบริงเพลากลมมีอัตราการเอียงของแนวแกนขึ้นกับค่าขององศาของการเอียงของแนวแกนเพลลา (degree of misalignment,  $D_m$ ) และมุมเอียง (angle of misalignment,  $\alpha$ ) แบริงเพลากลมมีขนาดอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 และอัตราส่วนรัศมีต่อรัศมีเคลียร์แรนซ์เท่ากับ 250 ( $r/c = 250$ ) สำหรับการหล่อลื่นของแบริงเพลากลมแบบที่มีการวางแนวของเพลลาเอียง ในการคำนวณใช้แบบจำลองความหนืดคาร์โอสำหรับสารหล่อลื่นนอน-นิวโตเนียน SAE10W50 สรุปผลได้ดังนี้

ค่าความสามารถในการรับภาระ และย่านเสถียรภาพจะมีค่าสูงขึ้นตามองศาของการเอียง ที่ค่ามุมเอียงเท่ากับ  $45^\circ$  เมื่อค่าองศาของการเอียงเท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 เปรียบเทียบกับเพลลาตรงศูนย์ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ค่าความสามารถในการรับภาระมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.96 4.58 และ 8.95 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงร้อยละ 2.16 4.86

และ 9.35 และค่าพารามิเตอร์มวลเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.58 29.4 และ 104.9 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาของการเอียงเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับภาระเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลง และเสถียรภาพดีขึ้น

## 5.2 สรุปผลสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบริงเพลากลมเมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมัน

สรุปผลการคำนวณของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในน้ำมันแบบนิวโตเนียน ชนิด SAE20 และน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน ชนิด SAE10W50 มีรายละเอียด ดังนี้

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในน้ำมันแบบนิวโตเนียน ชนิด SAE20 ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก แบริงเพลากลมมีขนาดอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 กำหนดให้น้ำมัน SAE20 และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ผสมเป็นเฟสเดียวกัน สรุปผลได้ดังนี้

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 10% เทียบกับผลในกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน คือ ที่ 3 kN ต่อความดัน อุณหภูมิ ความหนาฟิล์ม แรงเสียดทาน มุมแอททิจูด และอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลากลมและแบริง พบว่า ความดันสูงสุดลดลงร้อยละ 4.72 อุณหภูมิสูงสุดลดลงร้อยละ 1.0 ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.65 แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นร้อยละ 26.94 ค่ามุมแอททิจูดเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.18 อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลากลมและแบริงลดลงร้อยละ 13.13

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะมีผลมากเมื่อแบริงเพลากลมทำงานภายใต้การรับภาระที่สูง ๆ ที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะช่วยให้อุณหภูมิ และความดันลดลง เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลากลมและแบริงเดียวกัน สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ช่วยทำให้รับภาระโหลดได้สูงขึ้นมากกว่ากรณีที่ไม่เติม เนื่องจากที่ค่าความสามารถในการรับภาระเดียวกัน การเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  จะทำให้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลากลมและแบริงมีค่าลดลง ดังนั้นสมรรถนะของแบริงเพลากลมจึงดีขึ้น

ผลการคำนวณผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน ชนิด SAE10W50 ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ที่มีขนาดอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 กำหนดให้น้ำมัน SAE 10W50 และสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ผสมเป็นเฟสเดียวกัน สรุปผลได้ดังนี้

ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน เปรียบเทียบผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  5% เทียบกับกรณีที่ไม่เติม ที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพลลาและแบริงเดียวกัน คือ ที่ 0.8 ต่อความดัน ความสามารถในการรับภาระ อุณหภูมิ แรงเสียดทาน พบว่า ค่าความดันมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.57 เนื่องจากการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นสูงขึ้น ค่าความสามารถในการรับภาระเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.53 อุณหภูมิ ลดลงร้อยละ 0.032 ค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.96 การที่ความเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิ มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีลักษณะของการทำงานคล้ายกับ สารหล่อเย็น คือ ช่วยรับความร้อนออกไปจากฟิล์มน้ำมัน

ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นในแบริงเพลลาสามารถปรับปรุงได้ด้วยสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  คือ ช่วยทำให้แบริงเพลลาสามารถทำงานได้ที่ภาระงานสูงๆ และช่วยทำให้แบริงเพลลาสามารถรับภาระได้มากขึ้น ซึ่งการที่ความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ฟิล์มสารหล่อลื่นหนามากขึ้น จะเป็นการช่วยป้องกันความเสียหายเมื่อทำงานภายใต้ภาระสูง ๆ จึงช่วยยืดอายุการใช้งานของแบริงเพลลา

### 5.3 สรุปผลสารเติมแต่งอนุภาคนาโน $Al_2O_3$ ต่อแบริงเพลลาเมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำ

สรุปผลการคำนวณใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำ ศึกษาผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อคุณลักษณะทางสถิติศาสตร์ และพลศาสตร์ของแบริงเพลลาผิวหยาบ ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก กำหนดให้น้ำและสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ผสมเป็นเฟสเดียวกัน พิจารณาผลของสารหล่อลื่นเป็นน้ำเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% เทียบกับน้ำที่ไม่เติมสารเติมแต่ง มีรายละเอียด ดังนี้

ผลของอุณหภูมิของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ 2% เทียบกับกรณีที่ไม่เติมต่อค่าอุณหภูมิที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบผิว 5 ไมครอน 4 ไมครอน และ 3 ไมครอน ของผิวหยาบแบบตามยาว และแบบตามขวาง พบว่าที่แอมพลิจูดของความหยาบ 5 ไมครอน ผิวหยาบแบบตามยาวอุณหภูมิผลลดร้อยละ 23.3 ผิวหยาบแบบตามขวางอุณหภูมิผลลดร้อยละ 7.66 ที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 4 ไมครอน ผิวหยาบแบบตามยาวอุณหภูมิผลลดร้อยละ 14.33 ผิวหยาบแบบตามขวางอุณหภูมิผลลดร้อยละ 7.47 และที่แอมพลิจูดของความหยาบ 3 ไมครอน ผิวหยาบแบบตามยาวอุณหภูมิผลลดร้อยละ 10.13 ผิวหยาบแบบตามขวางอุณหภูมิผลลดร้อยละ 6.69 สามารถสรุปได้ว่า สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลดีในการช่วยทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง และส่งผลต่อผิวหยาบแบบตามยาวมากกว่าผิวหยาบตามขวาง

ผลของความหยาบผิวของแบริงเพลลา ที่มีขนาดอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ( $L/D = 1$ ) ที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบ 5 ไมครอน 4 ไมครอน และ 3 ไมครอน สามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าของอัตราส่วนของแอมพลิจูดต่อเคลียร์เรนซ์มีค่ามากกว่า 10% หรือค่าแอมพลิจูดของความหยาบมีค่ามากกว่า 3 ไมครอน สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลอย่างมากต่อการช่วยลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยเฉพาะผิวหยาบแบบตามยาว โดยเงื่อนไขของการสรุปผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อแบริงผิวหยาบจะทำการพิจารณาที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  2% กับกรณีไม่เติม ที่ค่าของแอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน ผิวหยาบแบบตามยาวมีค่าอุณหภูมิลดลงร้อยละ 14.33 ผิวหยาบแบบตามขวางลดลงร้อยละ 7.47 ความหนาฟิล์มต่ำสุดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อผิวหยาบแบบตามยาวมากกว่าผิวหยาบตามขวางคือ ผิวหยาบแบบตามยาวมีความหนาฟิล์มต่ำสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.53 ผิวหยาบตามขวางมีความหนาฟิล์มต่ำสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.35 ผิวหยาบแบบตามยาวมีมุมแอททิจูดเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.78 ผิวหยาบตามขวางมีมุมแอททิจูดเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.69 ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงสำหรับผิวหยาบตามยาวลดลงร้อยละ 1.14 และผิวหยาบตามขวางมีค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงลดลงร้อยละ 1.07

สรุปผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อย่านเสถียรภาพ สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ทำให้ย่านเสถียรภาพของแบริงเพลลากลมที่แบริงมีผิวแบบเรียบ และแบริงมีผิวแบบหยาบตามขวางมีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ย่านเสถียรภาพของผิวหยาบแบบตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของความเข้มข้นของสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  เนื่องจากแบริงผิวหยาบตามยาวจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการรับภาระ และย่านเสถียรภาพของแบริงลดลง ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นจึงมีผลดีต่อคุณลักษณะของการหล่อลื่นในแบริงผิวหยาบแบบตามยาวมากกว่าแบบตามขวาง

กรณีความหยาบผิวแบบตามขวาง สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีผลต่อค่าแรงเสียดทานแบบไรรีมีติมากกว่าแบบตามยาว การเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ต่อแรงเสียดทานแบบไรรีมีติของแบริงผิวหยาบ โดยทำให้ค่าแรงเสียดทานแบบไรรีมีติของแบริงเพลลากลมผิวหยาบมีค่าเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแอมพลิจูดของความหยาบมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งแบบตามยาว และแบบตามขวาง ผลของสารเติมแต่งอนุภาคนาโนที่ 2% ต่อค่าแรงเสียดทานแบบไรรีมีติเทียบกับกรณีที่ไม่เติม ที่ค่าแอมพลิจูดของความหยาบเท่ากับ 4 ไมครอน ความหยาบผิวตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.25 ในขณะที่ความหยาบผิวตามขวางเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.68

ผิวหยาบตามขวางในกรณีที่ไม่เติม จะมีเสถียรภาพสูงกว่าผิวแบบตามยาวในกรณีที่ไม่เติม คือที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 และค่าความสามารถในการรับภาระเท่ากับ 7.34 พบว่าผิวหยาบแบบตามขวางมีค่ามวลไรรีมีติเท่ากับ 6.73 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผิวหยาบแบบตามยาว เนื่องจากผิวหยาบแบบตามยาวมีค่ามวลไรรีมีติเท่ากับ 5.42

ผลการเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% ต่อค่ามวลไรรีมิติ และค่าสัมประสิทธิ์สปริง  $K_{\text{eff}}$  เปรียบเทียบกับกรณีไม่เติม พบว่าผิวหยาบแบบตามขวางมีค่ามวลไรรีมิติเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.77 ในขณะที่ค่ามวลไรรีมิติของผิวหยาบแบบตามยาวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 5.09 และค่าสัมประสิทธิ์สปริง  $K_{\text{eff}}$  ของผิวหยาบตามขวางลดลงร้อยละ 4.19 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สปริง  $K_{\text{eff}}$  ของผิวหยาบแบบตามยาวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 36.36 ดังนั้นสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ช่วยทำให้เสถียรภาพของแบริงเพลากลมที่มีความหยาบผิวตามยาวดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพในรูปของเส้นทางเดินของศูนย์เพลลาเมื่อเปลี่ยนขนาดอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 1 0.75 และ 2 สารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ส่งผลต่อแบริงผิวหยาบแบบตามยาวมากที่สุด ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 ค่ามวลไรรีมิติเท่ากับ 7.5 ค่าความสามารถในการรับภาระเท่ากับ 3.92 โดยลักษณะของเส้นทางเดินของศูนย์เพลลาของแบริงผิวหยาบตามยาวในกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีการลู่ออกอย่างเห็นได้ชัด การเติมสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2% ช่วยทำให้เส้นทางเดินของผิวหยาบตามยาวมีการลู่ออกอย่างชัดเจน แสดงว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ช่วยทำให้เสถียรภาพของแบริงเพลากลมผิวหยาบดีขึ้น ดังนั้นสมรรถนะของแบริงเพลากลมผิวหยาบแบบตามยาวสามารถปรับปรุงได้ด้วยสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$

#### 5.4 สรุปผลค่าความยืดหยุ่นต่อแบริงเพลากลม เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน

สรุปผลการคำนวณของค่าความยืดหยุ่นของวัสดุแบริงต่อสมรรถนะแบริงเพลากลม โดยใช้แบบจำลองความหนืดคาร์โธ สำหรับสารหล่อลื่นน้ำมันแบบนอน-นิวโตเนียน ชนิด SAE10W50 พิจารณาผลของค่าความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำแบริงต่อสมรรถนะของแบริงเพลากลม ภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก เปรียบเทียบผลที่ค่าของอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 และ 1.25 และเปรียบเทียบผลที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง 0.2 และ 0.8 เทียบกับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิก มีรายละเอียดดังนี้

การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ค่าความสามารถในการรับภาระแบบไรรีมิติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริง ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 และอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 วัสดุนี้มากที่สุด ( $E = 5 \text{ GPa}$ ) จะมีค่าความสามารถในการรับภาระต่ำกว่าวัสดุแบบแข็ง ( $E = 200 \text{ GPa}$ ) ร้อยละ 73.1 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไรรีมิติสูงกว่าวัสดุแข็งร้อยละ 160.3 มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติสูงกว่าวัสดุแข็งร้อยละ 224.6 อุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติต่ำกว่าวัสดุแบบแข็งร้อยละ 52.5 ค่าความดันสูงสุดแบบไร้มิติของฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำกว่าวัสดุแข็งร้อยละ 80.6 เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุที่นุ่มที่สุดจะมีค่ามากกว่าการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกร้อยละ 203 ในขณะที่ค่าของอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติจะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 เมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.8 อุณหภูมิสูงสุดแบบไร้มิติของวัสดุที่นุ่มที่สุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.06 วัสดุแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 93.76 เมื่อค่าของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 ทำการเปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 และ 0.75 วัสดุแบบนิ่มที่สุดที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 จะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติต่ำกว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 ร้อยละ 21.6 และสำหรับวัสดุแข็งที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 จะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติต่ำกว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 ร้อยละ 2.23 ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.8 ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติของวัสดุที่นุ่มที่สุดลดลงร้อยละ 33.63 ค่าความหนาฟิล์มของวัสดุแข็งลดลงร้อยละ 71.01 ดังนั้นค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาฟิล์มที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเท่ากับ 0.8 วัสดุแบบนิ่มที่สุดที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 จะมีค่าความหนาฟิล์มต่ำกว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 ร้อยละ 28.62 และสำหรับวัสดุแข็งที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 จะมีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดแบบไร้มิติต่ำกว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 ร้อยละ 7.72 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติจะลดลงแบบ

ไม่เชิงเส้นเมื่อค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเยื้อง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.8 ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติของวัสดุแบบนี้มีค่าลดลงร้อยละ 68.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแบบไร้มิติของวัสดุแข็งมีค่าลดลงร้อยละ 86.44

ผลของค่าความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำแบริงต่อสมรรถนะการหล่อลื่นของแบริงเพลลากลมภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก สรุปได้ดังนี้

วัสดุนี้มีค่าความหนาฟิล์มสูงกว่าวัสดุแข็ง ความหนาฟิล์มลดลงเมื่อค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ค่าความหนาฟิล์มลดลงเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มมีลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

วัสดุนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงกว่าวัสดุแข็ง สัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงเมื่อค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

วัสดุนี้มีค่าความสามารถในการรับภาระต่ำกว่าวัสดุแข็ง ค่าความสามารถในการรับภาระเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการรับภาระเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงสูงขึ้น ค่าความสามารถในการรับภาระเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

วัสดุนี้มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าวัสดุแข็ง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของเพลลาและแบริงสูงขึ้น อุณหภูมิมีลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

แบริงวัสดุนี้ทำให้ความดันลดลง เนื่องจากความหนาฟิล์มของไหลระหว่างเพลลาและแบริงเพิ่มขึ้น จึงทำให้การสึกหรอน้อยลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบริงยาวนานขึ้น สำหรับแบริงเพลลากลมที่ทำงานที่สภาวะการทำงานหนัก ผลของอุณหภูมิ ผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะยืดหยุ่น หรือเกิดการยุบตัวของวัสดุ รวมถึงสมบัติของสารหล่อลื่นนอน-นิวโตเนียน ทำให้เกิดการลดลงของค่าความสามารถในการรับภาระ และเกิดการลดลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นภายใต้การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก มีค่ามากกว่าเทอร์โมไฮโดรไดนามิก ดังนั้นเสถียรภาพของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก สามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มค่าความยืดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 ข้อเสนอแนะ

(1) วิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่น จะเป็นการผสมกันแบบของไหลเฟสเดียว ดังนั้น ข้อจำกัดของวิธีนี้คือจะเติมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ได้ในปริมาณที่ไม่มาก ในกรณีที่เติมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ในสารหล่อลื่นด้วยปริมาณที่มาก ๆ ควรทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนเพื่อให้ได้แบบจำลอง ความหนืดที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

(2) ควรศึกษาผลของสารหล่อลื่นของแข็งผสมในสารหล่อลื่น ในกรณีที่รับภาระแรง แบบกระแทก ซึ่งคาดว่าสารเติมแต่งอนุภาคนาโนจะช่วยทำให้เจอร์นอลแบริงมีเสถียรภาพได้ดีกว่า กรณีไม่เติม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Pai, R., and Hargreaves, D. J., **Water lubricated bearings**. in: M. Nosonovsky, B. Bhushan (Eds.), *Green Tribology: Biomimetics, Energy Conservation and Sustainability*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [2] Shinde, A. B., Pawar, P. M., Gaikwad, S., Shaikh, P. A., and Khedkar, Y., **Analysis of water lubricated bearing with different features to improve the performance: Green Tribology**. in: P.M. Pawar, B.P. Ronge, R. Balasubramaniam, S. Seshabhattar (Eds.), *Techno-Societal 2016*, Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [3] Nosonovsky, M., and Bhushan, B. "Green tribology: principles, research areas and challenges" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol.368 (1929), 2010. pp. 4677-4694.
- [4] Guo, Z., Yuan, C., Liu, A., and Jiang, S. "Study on tribological properties of novel biomimetic material for water-lubricated stern tube bearing" *Wear*, vol.376-377 2017. pp. 911-919.
- [5] Deng, X., Watson, C., Weaver, B., Wood, H., and Fittro, R., "Lubricant inertia in water lubricated bearings". *ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Volume 1A*, Symposia: Keynotes; Advances in Numerical Modeling for Turbomachinery Flow Optimization; Fluid Machinery; Industrial and Environmental Applications of Fluid Mechanics; Pumping Machinery, 2017.
- [6] Hua, X., Wang, J., Zhu, J., and Liu, W. J. "Study on tribological behavior of water-lubricated bearings " *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, vol.07 (01), 2008. pp. 115-121.
- [7] Majumdar, B. C., Pai, R., and Hargreaves, D. J. "Analysis of water-lubricated journal bearings with multiple axial grooves" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol.218 (2), 2004. pp. 135-146.
- [8] Yoshimoto, S., Anno, Y., Tamura, M., Kakiuchi, Y., and Kimura, K. "Axial load capacity of water-lubricated hydrostatic conical bearings with spiral grooves (On the Case of Rigid Surface Bearings)" *Journal of Tribology*, vol.118 (4), 1996. pp. 893-899.

[9] Wen, S., and Huang, P., **Principles of tribology**. John Wiley & Sons. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกจำหน่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Dong, C., Yuan, C., Wang, L., Liu, W., Bai, X., and Yan, X. "Tribological properties of water-lubricated rubber materials after modification by MoS<sub>2</sub> nanoparticles" **Scientific Reports**, vol.6 (1), 2016. pp.35023.
- [11] Avishai, D., and Morel, G. "Experimental Investigation of Lubrication Regimes of a Water-Lubricated Bearing in the Propulsion Train of a Marine Vessel" **Journal of Tribology**, vol.143 (4), 2020. pp.041803
- [12] Julian, M. "MARPOL 73/78: the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships" **Maritime Studies**, vol.2000 (113), 2000. pp. 16-23.
- [13] Organization, I. M., **International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)**. International Maritime Organization (IMO)
- [14] Čampara, L., Hasanspahić, N., and Vujičić, S. "Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines" **SHS Web Conf.**, vol.58 2018. pp. 01004.
- [15] Takadom, J., **Materials and Surface Engineering in Tribology**. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [16] Bart, J. C. J., Gucciardi, E., and Cavallaro, S., **7 - Formulating lubricating oils**. in: J.C.J. Bart, E. Gucciardi, S. Cavallaro (Eds.), *Biolubricants*, Woodhead Publishing, 2013.
- [17] Dong, C., Shi, L., Li, L., Bai, X., Yuan, C., and Tian, Y. "Stick-slip behaviours of water lubrication polymer materials under low speed conditions" **Tribology International**, vol.106 2017. pp. 55-61.
- [18] Gegner, J., **Tribology: fundamentals and advancements**. BoD–Books on Demand. 2013.
- [19] Zhu, D., and Wen, S.-Z. "A full numerical solution for the thermoelasto-hydrodynamic problem in elliptical contacts" vol.106 (2), 1984. pp. 246-254.
- [20] Hamrock, B. J., and Jacobson, B. O., **Elastohydrodynamic lubrication of rectangular contacts**. 1983.
- [21] Dowson, D., and Higginson, G. R. "A Numerical Solution to the Elasto-Hydrodynamic Problem" **Journal of Mechanical Engineering Science**, vol.1 (1), 1959. pp. 6-15.
- [22] Dowson, D. "A generalized Reynolds equation for fluid-film lubrication" **International Journal of Mechanical Sciences**, vol.4 (2), 1962. pp. 159-170.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Ghosh, M., and Hamrock, B. "Thermal elastohydrodynamic lubrication of line contacts" **ASLE transactions**, vol.28 (2), 1985. pp. 159-171.
- [24] Peiran, Y., and Shizhu, W. "A generalized Reynolds equation for non-Newtonian thermal elastohydrodynamic lubrication" vol.112 (4), 1990. pp. 631-636.
- [25] Johnson, K. L., and Tevaarwerk, J. "Shear behaviour of elastohydrodynamic oil films" **Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences**, vol.356 (1685), 1977. pp. 215-236.
- [26] Dyson, A., and Wilson, A., **Paper 3: film thicknesses in elastohydrodynamic lubrication by silicone fluids**. Proceedings of the institution of mechanical engineers, conference proceedings, 180, SAGE Publications Sage UK: London, England, 1965.
- [27] Roelands, C. J. A. "Correlational aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils" vol.1966.
- [28] Carreau, P. J. "Rheological equations from molecular network theories" **Transactions of the Society of Rheology**, vol.16 (1), 1972. pp. 99-127.
- [29] Wang, S., and Zhang, H. "Combined effects of thermal and non-Newtonian character of lubricant on pressure, film profile, temperature rise, and shear stress in EHL" vol.1987.
- [30] Conry, T., Wang, S., and Cusano, C. "A Reynolds-Eyring equation for elastohydrodynamic lubrication in line contacts" vol.1987. pp.
- [31] Majumdar, B. C. "The thermohydrodynamic solution of oil journal bearings" **Wear**, vol.31 (2), 1975. pp. 287-294.
- [32] Pinkus, O., and Bupara, S. S. "Adiabatic solutions for finite journal bearings" **Journal of Lubrication Technology**, vol.101 (4), 1979. pp. 492-496.
- [33] Wada, S., Hashimoto, H., and Nakagawa, T. "Thermohydrodynamic lubrication of journal bearings in turbulent flow" **Bulletin of JSME**, vol.23 (179), 1980. pp. 773-780.
- [34] Dien, I. K., and Elrod, H. G. "A generalized steady-state Reynolds equation for non-newtonian Fluids, With Application to Journal Bearings" **Journal of Lubrication Technology**, vol.105 (3), 1983. pp. 385-390.
- [35] Goenka, P., and Oh, K. "The elastohydrodynamic solution of journal bearings under dynamic loading" **Journal of Tribology**, vol.107 1985. pp. 389.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] Bourgin, P., and Gay, B. "Determination of the load capacity of a finite width journal bearing by a finite-element method in the case of a non-newtonian lubricant" vol.1984. pp.
- [37] Williams, P., and Symmons, G. "Analysis of hydrodynamic journal bearings lubricated with non-newtonian fluids" **Tribology international**, vol.20 (3), 1987. pp. 119-124.
- [38] Khonsari, M. M., and Beaman, J. J. "Thermohydrodynamic Analysis of Laminar Incompressible Journal Bearings" **A S L E Transactions**, vol.29 (2), 1986. pp. 141-150.
- [39] Mitsui, J. I. "A study of thermohydrodynamic lubrication in a circular journal bearing" **Tribology International**, vol.20 (6), 1987. pp. 331-341.
- [40] Buckholz, R. "On the role of a non-Newtonian fluid in short bearing theory" vol.1985..
- [41] Buckholz, R. "Effects of power—law, non-newtonian lubricants on load capacity and friction for plane slider bearings" vol.1986.
- [42] Jiin-Yuh, J., and Chong-Ching, C. "Adiabatic analysis of finite width journal bearings with non-Newtonian lubricants" **Wear**, vol.122 (1), 1988. pp. 63-75.
- [43] Prabhakaran Nair, K., Sukumaran Nair, V. P., and Jayadas, N. H. "Static and dynamic analysis of elastohydrodynamic elliptical journal bearing with micropolar lubricant" **Tribology International**, vol.40 (2), 2007. pp. 297-305.
- [44] Higginson, G. R. "Paper 1: The Theoretical effects of elastic deformation of the bearing liner on journal bearing performance" **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings**, vol.180 (2), 1965. pp. 31-38.
- [45] Oh, K., and Huebner, K. "Solution of the elastohydrodynamic finite journal bearing problem" **Journal of Lubrication Technology**, vol.95 (3), 1973. pp. 342-351.
- [46] Sharda, H. B., Chandrawat, H. N., and Bahl, R. C. "Stability study of an offset bearing including EHD effects" **International Journal of Mechanical Sciences**, vol.32 (10), 1990. pp. 843-850.
- [47] Khonsari, M., Fillon, M., and Jang, J. "On the generalization of thermohydrodynamic analyses for journal bearings" vol.1996.
- [48] Knight, J., and Barrett, L. "Analysis of tilting pad journal bearings with heat transfer effects" vol.1988.

- [49] Taylor, C., and O'callaghan, J. "A numerical solution of the elastohydrodynamic lubrication problem using finite elements" **Journal of Mechanical Engineering Science**, vol.14 (4), 1972. pp. 229-237.
- [50] Jain, S., Sinhasan, R., and Singh, D. "A study of EHD lubrication in a journal bearing with piezoviscous lubricants" **ASLE transactions**, vol.27 (2), 1984. pp. 168-176.
- [51] Lahmar, M., Haddad, A., and Nicolas, D. "Elastohydrodynamic analysis of one-layered journal bearings" **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, vol.212 (3), 1998. pp. 193-205.
- [52] Mokhiamer, U. M., Crosby, W. A., and El-Gamal, H. A. "A study of a journal bearing lubricated by fluids with couple stress considering the elasticity of the liner" **Wear**, vol.224 (2), 1999. pp. 194-201.
- [53] Van Der Tempel, L., Moes, H., and Bosma, R. "Numerical simulation of dynamically loaded flexible short journal bearings" **Journal of Tribology**, vol.107 (3), 1985. pp. 396-401.
- [54] Majumdar, B. C., Brewe, D. E., and Khonsari, M. M. "Stability of a rigid rotor supported on flexible oil journal bearings" **Journal of Tribology**, vol.110 (1), 1988. pp. 181-187.
- [55] Lahmar, M., Ellagoune, S., and Bou-Saïd, B. "Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of a Compliant Journal Bearing Considering Static and Dynamic Deformations of the Bearing Liner" **Tribology Transactions**, vol.53 (3), 2010. pp. 349-368.
- [56] Bouyer, J., and Fillon, M. "On the significance of thermal and deformation effects on a plain journal bearing subjected to severe operating conditions" **Transactions-american society of mechanical engineers journal of tribology**, vol.126 2004. pp. 819-822.
- [57] Kim, T.-W., and Cho, Y.-J. "Average flow model with elastic deformation for CMP" **Tribology International**, vol.39 (11), 2006. pp. 1388-1394.
- [58] Dobrica, M. B., Fillon, M., and Maspeyrot, P. "Mixed Elastohydrodynamic Lubrication in a Partial Journal Bearing—Comparison Between Deterministic and Stochastic Models" **Journal of Tribology**, vol.128 (4), 2006. pp. 778-788.
- [59] Bou-Saï D, B., and Ehret, P. "Inertia and shear-thinning effects on bearing behavior with impulsive loads" vol.1994.

- [60] Mongkolwongrojn, M., and Aiumpronsin, C. "Stability analysis of rough journal bearings under TEHL with non-Newtonian lubricants" **Tribology International**, vol.43 (5-6), 2010. pp. 1027-1034.
- [61] Jang, J. Y., and Khonsari, M. M. "On the Characteristics of Misaligned Journal Bearings" **Lubricants**, vol.3 (1), 2015. pp. 27-53.
- [62] Nikolakopoulos, P. G., and Papadopoulos, C. A. "A study of friction in worn misaligned journal bearings under severe hydrodynamic lubrication" **Tribology International**, vol.41 (6), 2008. pp. 461-472.
- [63] Ren, T., and Feng, M. "Stability analysis of water-lubricated journal bearings for fuel cell vehicle air compressor" **Tribology International**, vol.95 2016. pp. 342-348.
- [64] Zhang, X., Yin, Z., Gao, G., and Li, Z. "Determination of stiffness coefficients of hydrodynamic water-lubricated plain journal bearings" **Tribology International**, vol.85 2015. pp. 37-47.
- [65] Makee, S., and Mckee, T. "Pressure distribution in the oil film of journal bearing" **Transactions of the ASME**, vol.54 1932. pp. 149-165.
- [66] Dubois, G., Ocvirk, F., and Wehe, R. "Properties of misaligned journal bearings" **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, vol.79 (6), 1957. pp. 1205-1211.
- [67] Sharda, H. B., Chandrawat, H. N., and Bahl, R. C. "EHD analysis of a misaligned journal bearing" **International Journal of Mechanical Sciences**, vol.35 (5), 1993. pp. 415-423.
- [68] Khonsari, M. M., Wang, S. H., and Qi, Y. L. "A Theory of liquid-solid lubrication in elastohydrodynamic regime" **Journal of Tribology**, vol.111 (3), 1989. pp. 440-444.
- [69] Khonsari, M. M., Wang, S. H., and Qi, Y. L. "A theory of thermo-elastohydrodynamic lubrication of liquid-solid lubricated cylinders" **Journal of Tribology**, vol.112 (2), 1990. pp. 259-265.
- [70] Guha, S. "Analysis of steady-state characteristics of misaligned hydrodynamic journal bearings with isotropic roughness effect" **Tribology International**, vol.33 (1), 2000. pp. 1-12.
- [71] Sun, J., and Changlin, G. "Hydrodynamic lubrication analysis of journal bearing considering misalignment caused by shaft deformation" **Tribology International**, vol.37 (10), 2004. pp. 841-848.

- [72] Majumdar, B. C., and Ghosh, M. K. "Stability of a rigid rotor supported on rough oil journal bearings" **Journal of Tribology**, vol.112 (1), 1990. pp. 73-77.
- [73] Ramesh, J., and Majumdar, B. C. "Stability of rough journal bearings using nonlinear transient method" **Journal of Tribology**, vol.117 (4), 1995. pp. 691-695.
- [74] Turaga, R., Sekhar, A., and Majumdar, B. "The effect of roughness parameter on the performance of hydrodynamic journal bearings with rough surfaces" **Tribology international**, vol.32 (5), 1999. pp. 231-236.
- [75] Gururajan, K., and Prakash, J. "Surface roughness effects in infinitely long porous journal bearings" **Journal of Tribology**, vol.121 (1), 1999. pp. 139-147.
- [76] Khonsari, M., Wang, S., and Qi, Y. "A theory of liquid-solid lubrication in elastohydrodynamic regime" **Journal of Tribology**, vol.111 (3), 1989. pp. 440-444.
- [77] Khonsari, M., Wang, S., and Qi, Y. "A theory of thermo-elastohydrodynamic lubrication of liquid-solid lubricated cylinders" vol.1990.
- [78] Hua, D. Y., and Khonsari, M. M. "Elastohydrodynamic lubrication by powder slurries" **Journal of Tribology**, vol.118 (1), 1996. pp. 67-73.
- [79] Li, S., Dong, C., Yuan, C., and Bai, X. "Effects of TiO<sub>2</sub> nano-particles on wear-resistance and vibration-reduction properties of a polymer for water-lubricated bearing" **Wear**, vol.522 2023. pp. 204713.
- [80] **Chapter 3 - Lubricants and Their Composition**, in: G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor (Eds.), **Engineering Tribology (Fourth Edition)**, Butterworth-Heinemann, Boston, 2014.
- [81] Li, H., Wang, L., He, Y., Hu, Y., Zhu, J., and Jiang, B. "Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids" **Applied Thermal Engineering**, vol.88 2015. pp. 363-368.
- [82] Duangthongsuk, W., and Wongwises, S. "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime" **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol.53 (1), 2010. pp. 334-344.
- [83] Kim, S. H., Choi, S. R., and Kim, D. "Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation" **Journal of Heat Transfer**, vol.129 (3), 2006. pp. 298-307.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [84] Peng, D. X., Kang, Y., Hwang, R. M., Shyr, S. S., and Chang, Y. P. "Tribological properties of diamond and SiO<sub>2</sub> nanoparticles added in paraffin" **Tribology International**, vol.42 (6), 2009. pp. 911-917.
- [85] Duangthongsuk, W., and Wongwises, S. "Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid" **International Communications in Heat and Mass Transfer**, vol.35 (10), 2008. pp. 1320-1326.
- [86] Martini, A., Ramasamy, U. S., and Len, M. "Review of Viscosity Modifier Lubricant Additives" **Tribology Letters**, vol.66 (2), 2018. pp. 58.
- [87] Ye, P., Jiang, X., Li, S., and Li, S. "Preparation of NiMoO<sub>2</sub>S<sub>2</sub> nanoparticle and investigation of its tribological behavior as additive in lubricating oils" **Wear**, vol.253 (5), 2002. pp. 572-575.
- [88] Mongkolwongrojn, M., Aiumpornsin, C., and Thammakosol, K. "Theoretical Investigation in thermoelastohydrodynamic lubrication with non-Newtonian lubricants under sudden load change" **Journal of Tribology**, vol.128 (4), 2006. pp. 771-777.
- [89] Mongkolwongrojn, M., and Rattapasakorn, S. "Effect of nanoparticle additives on rough surface cylinder in line contact under TEHL with non-Newtonian lubricant" **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, vol.8 (3), 2014. pp. JAMDSM0042-JAMDSM0042.
- [90] Mongkolwongrojn M., and Panichakorn J. "Effect of micro-particles on rough surface spur gears under TEHL with non-Newtonian lubricant" **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, vol.10 (9), 2016. pp. JAMDSM0105-JAMDSM0105.
- [91] Nguyen, C. T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S., and Angue Mintsu, H. "Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?" **International Journal of Thermal Sciences**, vol.47 (2), 2008. pp. 103-111.
- [92] Nguyen, C. T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., and Angue Mintsu, H. "Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon" **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol.28 (6), 2007. pp. 1492-1506.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [93] Agarwal, D. K., Vaidyanathan, A., and Sunil Kumar, S. "Experimental investigation on thermal performance of kerosene-graphene nanofluid" **Experimental Thermal and Fluid Science**, vol.71, 2016. pp. 126-137.
- [94] Nguyen, C. T., Roy, G., Gauthier, C., and Galanis, N. "Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid for an electronic liquid cooling system" **Applied Thermal Engineering**, vol.27 (8), 2007. pp. 1501-1506.
- [95] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., and Yang, C. "Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids" **International Journal of Thermal Sciences**, vol.47 (5), 2008. pp. 560-568.
- [96] Chandrasekar, M., Suresh, S., and Chandra Bose, A. "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid" **Experimental Thermal and Fluid Science**, vol.34 (2), 2010. pp. 210-216.
- [97] Yu, W., Xie, H., Li, Y., Chen, L., and Wang, Q. "Experimental Investigation on the Thermal Transport Properties of Ethylene Glycol Based Nanofluids Containing Low Volume Concentration Diamond Nanoparticles" **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol.380 (1-3), 2011. pp. 1-5.
- [98] Shenoy, B., Binu, K., Pai, R., Rao, D., and Pai, R. S. "Effect of nanoparticles additives on the performance of an externally adjustable fluid film bearing" **Tribology International**, vol.45 (1), 2012. pp. 38-42.
- [99] Wang, Y., Jane Wang, Q., and Lin, C. "A mixed-EHL analysis of effects of misalignments and elastic deformations on the performance of a coupled journal-thrust bearing system" **Tribology International**, vol.39 (4), 2006. pp. 281-289.
- [100] Hamrock, B. J. "Fundamentals of fluid film lubrication McGraw-Hill" **Inc. Hightstown, NJ**, vol.1994.
- [101] Khonsari, M. M., and Booser, E. R., **Applied tribology: bearing design and lubrication**. John Wiley & Sons. 2017.
- [102] Bhushan, B., **Principles and applications to tribology**. John Wiley & Sons. 2013.
- [103] Goodier, J. N., and Hodge, P. G., **Elasticity and plasticity: The mathematical theory of elasticity [by] JN Goodier. The mathematical theory of plasticity**. Wiley. 1958.

- [104] Shigley, J. E., and Mischke, C. R., **Mechanical engineering design**, McGraw-Hill. 1989.
- [105] Ruff, A. "Typical properties of sliding contact materials" **Tribology Data Handbook**, CRC Press, Boca Raton, New York, vol.1997. pp. 493-494.
- [106] Hibbeler, R. C., **Mechanics of materials**. Pearson Prentice Hall. 2011.
- [107] มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และ ฮีโร่ อ่าซิโมโตะ, **ทฤษฎีการหล่อลื่น**. 2536.
- [108] **Chapter 4 - Hydrodynamic lubrication**. in: G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor (Eds.), **Engineering Tribology (Fourth Edition)**, Butterworth-Heinemann, Boston, 2014.
- [109] Stribeck, R., **Kugellager für beliebige Belastungen**. Buchdruckerei AW Schade, Berlin N. 1901.
- [110] Gümbel, L. "Das problem der Lagerreibung" **Mbl. Berlin. Bez. Ver. dtsh. Ing**, vol.5 1914. pp. 87-104.
- [111] Lu, X., Khonsari, M. M., and Gelinck, E. R. M. "The stribeck curve: Experimental Results and Theoretical Prediction" **Journal of Tribology**, vol.128 (4), 2006. pp. 789-794.
- [112] Woydt, M., and Wäsche, R. "The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens" **Wear**, vol.268 (11), 2010. pp. 1542-1546.
- [113] Will, J. G., **Lubrication Fundamentals**. United States of America: Marcel Dekker. Inc. New York. 1980.
- [114] Palacio, M., and Bhushan, B. "A review of Ionic liquids for green molecular lubrication in nanotechnology" **Tribology Letters**, vol.40 (2), 2010. pp. 247-268.
- [115] Furby, N., Mineral oils. **Interdisciplinary Approach to Liquid Lubricant Technology: Proceedings of a NASA Sponsored Symposium Held January 11-13, 1972 in Cleveland, Ohio, 318**, Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space ..., 1973.
- [116] เจษฎา พาณิชกรณ. "การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรงด้วยน้ำมันผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

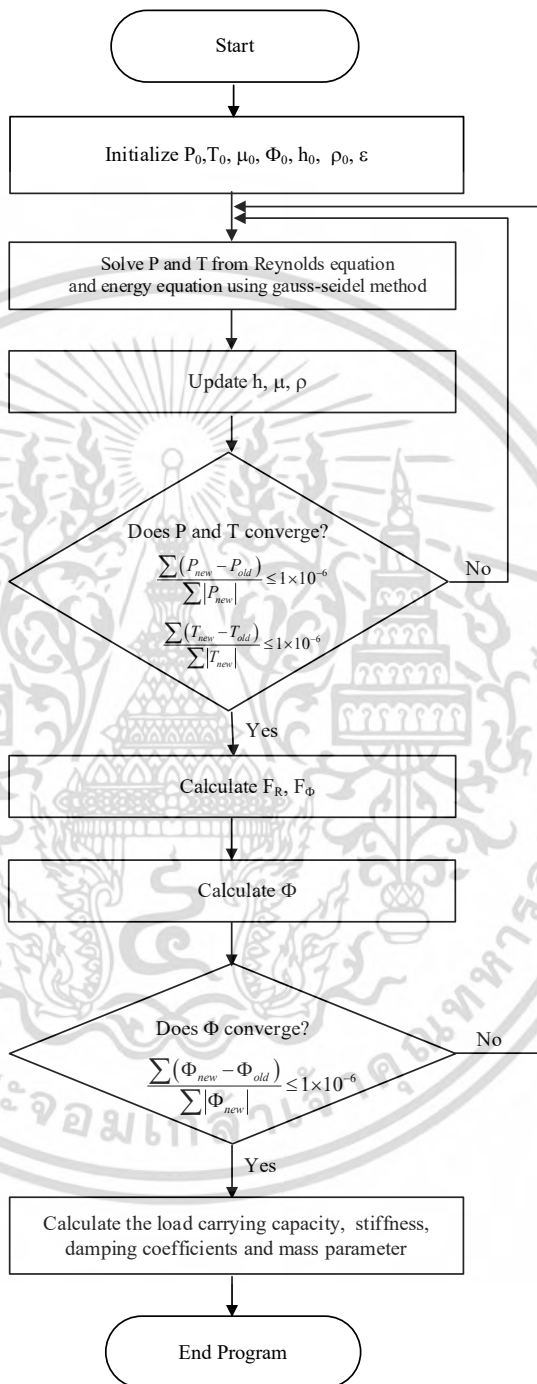
- [117] ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน. “ผลของความหยาบที่ผิวต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [118] Marx, N., Ponjavic, A., Taylor, R. I., and Spikes, H. A. "Study of permanent shear thinning of VM polymer solutions" **Tribology Letters**, vol.65 (3), 2017. pp. 106.
- [119] Booser, E. R., **Tribology Data Handbook: An Excellent Friction, Lubrication, and Wear Resource**. CRC Press. 1997.
- [120] Mang, T., and Dresel, W., **Lubricants and lubrication**. John Wiley & Sons. 2007.
- [121] Lipp, L., "Solid Lubricants-Their Advantages and Limitations" vol.32 (11), 1976. pp. 574-584.
- [122] Totten, G. E., **Handbook of lubrication and tribology: Volume I application and maintenance**, second edition. 2006.
- [123] Wagle, D. V., and Baker, G. A. "Cold welding: a phenomenon for spontaneous self-healing and shape genesis at the nanoscale" **Materials Horizons**, vol.2 (2), 2015. pp. 157-167.
- [124] Merstallinger, A., Holzbauer, R., and Bamsey, N. "Cold welding in hold Down points of space mechanisms due to fretting when omitting grease" **Lubricants**, vol.9 (8), 2021. pp. 72.
- [125] Vollath, D., **Nanoparticles-nanocomposites nanomaterials: an introduction for beginners**. John Wiley & Sons. 2013.
- [126] Hutchings, I., and Shipway, P., **4 - Lubricants and lubrication**. in: I. Hutchings, P. Shipway (Eds.), **Tribology (Second Edition)**, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [127] Hutchings, I., and Shipway, P., **3 - Friction**. in: I. Hutchings, P. Shipway (Eds.), **Tribology (Second Edition)**, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [128] Rae, P. J., and Dattelbaum, D. M. "The properties of poly (tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression" **Polymer**, vol.45 (22), 2004. pp. 7615-7625.
- [129] Radulovic, L. L., and Wojcinski, Z. W., **PTFE (Polytetrafluoroethylene; Teflon®)**. in: P. Wexler (Ed.) **Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)**, Academic Press, Oxford, 2014.
- [130] Brown, E. N., Rae, P. J., Dattelbaum, D. M., Clausen, B., and Brown, D. W. "In-situ Measurement of Crystalline Lattice Strains in Polytetrafluoroethylene" **Experimental Mechanics**, vol.48 (1), 2008. pp. 119-131.
- [131] Bush, A., **Perturbation methods for engineers and scientists**. Routledge. 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [132] Dowson, D., and Higginson, G. R., **Elasto-hydrodynamic lubrication: the fundamentals of roller and gear lubrication**. Pergamon Press. 1966.
- [133] Pak, B. C., and Cho, Y. I. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles" **Experimental Heat Transfer an International Journal**, vol.11 (2), 1998. pp. 151-170.
- [134] Brinkman, H. "The viscosity of concentrated suspensions and solutions" **The Journal of Chemical Physics**, vol.20 (4), 1952. pp. 571-571.
- [135] Lund, J. W. "Review of the concept of dynamic coefficients for fluid film journal bearings" **ASME Journal of Tribology**, vol.109 1987.
- [136] Çengel, Y. A., and Palm, W. J., **Differential Equations for Engineers and Scientists**. McGraw Hill. 2013.
- [137] Zhilin, L., Zhonghua, Q., and Tang, T. "Numerical solution of differential equations" **Introduction to finite difference and finite element methods**, printed in the United Kingdom by Clays, vol.2018.
- [138] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553.
- [139] Gunnuang, W., Aiumbhornsin, C., Wongsan-Ngam, J., and Mongkolwongrojn, M. "Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on the performance characteristics of rough journal bearings" **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol.1137 (1), 2021. pp. 012022.
- [140] Turaga, R., Sekhar, A. S., and Majumdar, B. C. "The effect of roughness parameter on the performance of hydrodynamic journal bearings with rough surfaces" **Tribology International**, vol.32 (5), 1999. pp. 231-236.

## ภาคผนวก ก

ภาพแสดง Flow chart ในการคำนวณ

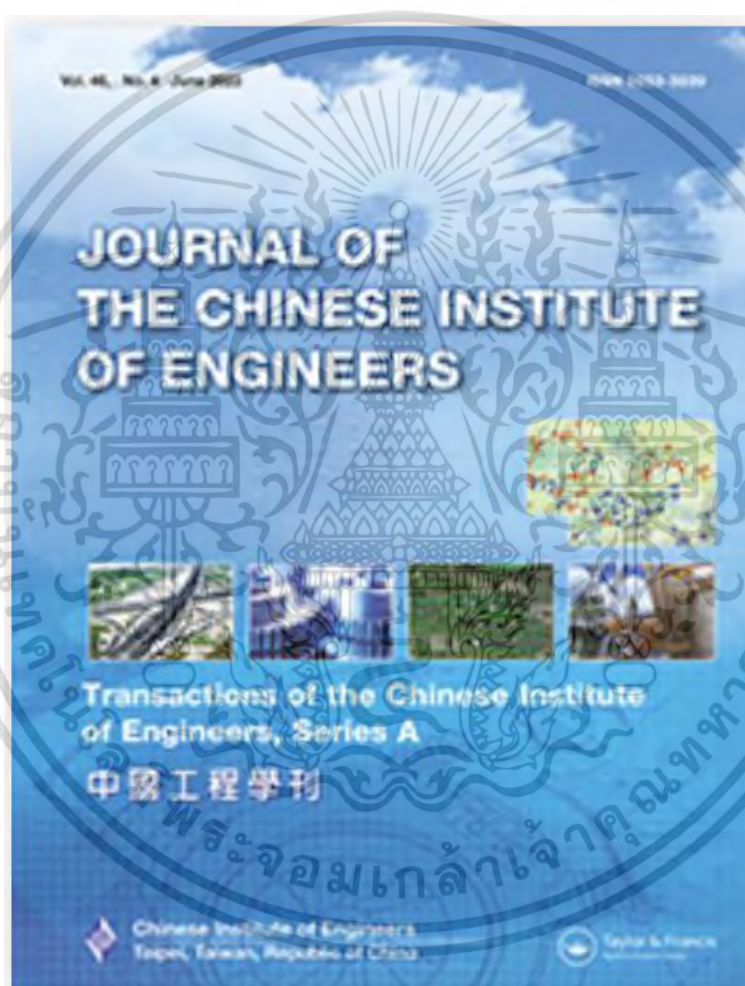


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

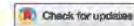
## ภาคผนวก ข

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Gunnuang, W., Aiumbhornsinsin, C., Wongsangam, J., and Mongkolwongroj, M. "Effect of bearing materials on journal bearings under TEHL with lubricant based on Carreau model." **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, vol.43 (2), 2020. pp. 162-170.
2. Gunnuang, W., Aiumbhornsinsin, C., Wongsangam, J., and Mongkolwongroj, M. "Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on the performance characteristics of rough journal bearings." **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol.1137 (1), 2021. pp. 012022.
2. Gunnuang, W., Aiumbhornsinsin, C., Wongsangam, J., and Mongkolwongroj, M., "Stability analysis of rough journal bearings with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives." **Proc. The 12<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering**, Phuket, Thailand, 2022. pp.133-141.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Effect of bearing materials on journal bearings under TEHL with lubricant based on Carreau model

Waleephan Gunnuang <sup>a</sup>, Chatchai Aiumbhornsri <sup>b</sup>, Jittraporn Wongsan-Ngam <sup>a</sup> and Mongkol Mongkolwongrojn <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand; <sup>b</sup>Department of Maritime Engineering, Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Sri Racha Campus, Chonburi, Thailand; <sup>c</sup>College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

### ABSTRACT

This work presents a transient analysis of journal bearings under thermal elastohydrodynamic lubrication (TEHL) based on the Carreau model. The effects of the elastic modulus of the bearing liner have been investigated using numerical simulations. A time-dependent modified Reynolds equation and an adiabatic energy equation based on the Carreau model have been formulated and numerically solved to examine the performance of the journal bearings. The results show that the minimum film thickness and the friction coefficient both increase with decreasing bearing liner elastic modulus. In contrast, the dimensionless load carrying capacity, dimensionless maximum film temperature, and dimensionless maximum film pressure all decrease with decreasing bearing liner elastic modulus. The stability regions tend to decrease in size for journal bearings under TEHL, especially for journal bearings composed of soft materials.

### ARTICLE HISTORY

Received 28 June 2017  
Accepted 12 November 2019

### KEYWORDS

Thermal elastohydrodynamic lubrication; non-Newtonian Carreau fluid; journal bearings

### 1. Introduction

The useful life of journal bearings with shear thinning lubricants under severe operating conditions are a great concern and it is very important to be able to predict accurately the performance characteristics of the bearings. When journal bearings operate under heavy radial loads, the deformation of the bearing material often affects the bearing clearance space geometry to such an extent that the actual performance characteristics become significantly different from those computed for rigid bearings. The lubricating film and film pressure between the elastic bearing liner and the journal under thermal elastohydrodynamic lubrication (TEHL) must be adjusted to achieve equilibrium. Moreover, the lubricants mix with various additives and cause shear thinning effects under severe operating conditions. Therefore, it is necessary to ensure that the journal bearings are designed and work properly. Previous research works in journal bearings under elastohydrodynamic lubrication (EHL) are reviewed. Taylor and O'Callaghan (1972), Oh and Huebner (1973), and Jain, Sinhasan, and Singh (1984) implemented the finite element method to solve the elastohydrodynamic problem for journal bearings. Jain, Sinhasan, and Singh (1984) found that both the maximum pressure and the load-carrying capacity of a journal bearing under EHL can be increased by introducing a piezo-viscous lubricant. Goenka and Oh (1985); van der Tempel, Moes, and Bosma (1985); Majumdar, Brewster, and Khonsari (1988) and Sharda, Chandrawat, and Bahl (1990, 1993) examined the transient elastohydrodynamic lubrication and the stability of flexible journal bearings under dynamic loads. Lahmar, Haddad, and Nicolas (1998) and Mokhiamer, Crosby, and El-Gamal (1999) presented a numerical technique for investigating the static

characteristics of layered journal bearings lubricated with Newtonian lubricants, considering the elastic deformation of the bearing liners. Elsharkawy and Guedouar (2001) presented an inverse analysis of one-layered journal bearings under EHL to predict the eccentricity ratio, the lubricant viscosity at atmospheric pressure, the pressure-viscosity coefficient and the bulk modulus of the lubricant for machine condition monitoring. Hirani, Athre, and Biswas (2001) investigated the film thickness and power loss of crankshaft bearings lubricated with shear thinning lubricants using effective thermal analysis to account for the combination effect of temperature and shear thinning on the film thickness and power loss. They found that shear thinning lubricant strongly affects the power loss, minimum film thickness, and temperature rise. Bouyer and Fillon (2004) found that TEHL analysis resulted in significantly different static characteristics from a plain journal bearing with an incompressible fluid. They also found that an incompressible TEHL had a significant effect on the static characteristics of a plain journal bearing. An average flow model was developed and implemented for rough deformable pads by Kim and Cho (2006). Dobrica, Fillon, and Maspeyrot (2006) investigated the mixed EHL of partial journal bearings for both rigid and elastic rough pads. The results were compared with those for the smooth surface model. Wang, Wang, and Lin (2006) investigated the effects of misalignments and elastic deformations on a journal thrust-bearing system in mixed lubrication which neglected thermal effect. Prabhakaran Nair, Sukumaran Nair, and Jayadas (2007) presented the effect of deformation of the bearing liner on static and dynamic characteristics of an elliptical journal bearing with micropolar lubricants. The stability of short journal bearings lubricated with

**CONTACT** Mongkol Mongkolwongrojn [kmmongko@gmail.com](mailto:kmmongko@gmail.com) College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

© 2019 The Chinese Institute of Engineers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a non-Newtonian couple stress fluid have been examined by Lin (2008). The stability limits are presented with various system parameters and couple stress parameters. Lahmar, Ellagoune, and Bou-Saïd (2010) investigated the dynamic performance characteristics and stability of water-lubricated rubber-lined journal bearings and found that the dynamic performance characteristics and stability of the compliant finite length journal bearings are affected by surface coatings from soft materials. The generalized Reynolds equation and adiabatic energy equation based on Carreau model have been newly developed and solved successfully by the authors since 2010 as in the references. More recently, the central film thickness formula with shear thinning lubricants based on Carreau viscosity model was presented by Katyal and Kumar (2012). The research work was extended for widely varying load conditions and piezo-viscous coefficients based on pressure-viscosity model. However, there have been very few studies of journal bearings lubricated with shear thinning lubricants based on Carreau viscosity model under TEHL.

The emphasis in this research work is to investigate the combined effect of the elastic modulus of bearing liner materials and the shear thinning behavior of non-Newtonian lubricants on the performance characteristics of journal bearings under TEHL. A modified Reynolds equation and an adiabatic energy equation have been formulated based on non-Newtonian Carreau model with the elasticity equation and equation of motion to obtain accurate performance predictions of journal bearings under severe conditions.

## 2. Theory

### 2.1. Modified reynolds equation

The Carreau model is used here to investigate the shear thinning behavior of TEHL lubricants. The relationship between the shear stress and shear rate for a non-Newtonian shear thinning fluid can be approximated as

$$\tau_{zx} = \mu_{eq} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\tau_{zy} = \mu_{eq} \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

where the equivalent viscosity  $\mu_{eq}$  is as presented in the Carreau model by Carreau (1972). (Carreau 1972)

$$\mu_{eq} = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left( 1 + \lambda^2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \right)^{\frac{n-1}{2}}. \quad (3)$$

To solve the TEHL problem, the coupled time-dependent modified Reynolds equation, the energy equation with a pressure-temperature dependency and the compressibility of the lubricant properties must be formulated and solved based on the Carreau model to examine the characteristics of journal bearings. Applying the method described by Dien and Elrod (1983), the time-dependent Reynolds equation based on the Carreau model was formulated by Mongkolwongrojn and Aiumprongsin (2010) and can be written as (Mongkolwongrojn and Aiumprongsin 2010)

$$\frac{\partial}{r \partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\omega r \left( 1 - \frac{2}{\omega} \dot{\Phi} \right) \frac{\partial \rho h}{r \partial \theta} + 12\rho \dot{e} \cos(\theta - \Phi), \quad (4)$$

where

$$\mu^* = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left( 1 + \lambda^2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 \right)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (5)$$

$$\eta = \mu^* + 2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left( \frac{n-1}{2} \right) \left( 1 + \lambda^2 \left( \frac{u_2 - u_1}{h} \right)^2 \right)^{\frac{n-3}{2}} \lambda^2. \quad (6)$$

### 2.2. Approximate adiabatic energy equation

The mean film temperature distribution within the lubricant film of a journal bearing can be solved using the approximate adiabatic energy equation based on the Carreau model with appropriate boundary conditions. This equation was described by Mongkolwongrojn and Aiumprongsin (2010) and can be written as (Mongkolwongrojn and Aiumprongsin 2010)

$$\begin{aligned} & \left( \rho c_r \frac{u_2}{2} h - \rho c_r \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right) \frac{\partial T}{r \partial \theta} + \left( -\rho c_r \frac{h^3}{12\mu^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \\ & = \mu^* \left( \frac{u_2^2}{h} \right) + \left( \beta h T \frac{u_2}{2} \right) \frac{\partial p}{r \partial \theta} + \left( \frac{h^3}{12\eta} - \beta T \frac{h^3}{12\eta} \right) \left( \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right)^2 \\ & + \left( \frac{h^3}{12\mu^*} - \beta T \frac{h^3}{12\mu^*} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 + \beta h T \frac{\partial p}{\partial t} - \rho c_r h \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.3. Boundary conditions

From Reynolds conditions, it is assumed that positive pressure terminates at  $\theta_c$ , the zero pressure gradient angle. The boundary conditions for the pressure and temperature in Equations (4) and (7) are

- (1) At the film inlet:  $p(\theta = 0) = 0$  and  $T(\theta = 0) = T_0$
- (2) At the bearing sides:  $p(y = 0) = 0$  and  $p(y = L) = 0$
- (3) At the start of cavitation:  $p(\theta_c) = \frac{\partial p}{\partial \theta} \Big|_{\theta_c} = 0$

### 2.4. Apparent viscosity and density equation

In the case of TEHL, the apparent viscosity and density must be included in the correction factor for the viscosity-pressure-temperature relation. The present uses the exponential pressure - temperature - viscosity relationship proposed by Roelands (1966) for a lubricant can be written as (Roelands 1966)

$$\eta = \eta_0 \exp \left\{ (1n \mu_0 + 9.67) \left( -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^2 \right) - \gamma(T - T_0) \right\}, \quad (8)$$

where  $\eta_0$  is the viscosity in equation (6) at the reference temperature  $T_0$ .

The density - pressure - temperature relationship of the lubricant proposed by Dowson and Higginson (1966) can be written as (Dowson and Higginson 1966)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right) (1 - \beta(T - T_0)) \quad (9)$$

**2.5. Film distribution equation**

The oil film thickness  $h$  is related to the bearing geometry, radial clearance, eccentricity ratio, and bearing liner deformation as

$$h = c + e \cos(\theta - \Phi) + \delta h_D(x, y, p), \quad (10)$$

where  $\delta h_D(x, y, p)$  is the bearing deformation as described by Dobrica, Fillon, and Maspeyrot (2006). The bearing can be discretized as  $M \times N$  equally sized elements as (Dobrica, Fillon, and Maspeyrot 2006)

$$\delta h_D(x, y, p) = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \int_{y_l - \frac{\Delta y}{2}}^{y_l + \frac{\Delta y}{2}} \int_{x_k - \frac{\Delta x}{2}}^{x_k + \frac{\Delta x}{2}} \frac{dx dy}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2}} p_{k,l} \quad (11)$$

**2.6. Load carrying capacity**

For a known pressure field, the hydrodynamic forces on the bearings in the vertical ( $F_\xi$ ) and horizontal ( $F_\psi$ ) directions can be obtained from

$$F_\xi = - \int_0^L \int_0^{2\pi} p \cos \theta r d\theta dy, \quad (12)$$

and

$$F_\psi = - \int_0^L \int_0^{2\pi} p \sin \theta r d\theta dy, \quad (13)$$

respectively.

**2.7. Friction force**

The friction force of the lubricant film can be obtained by integrating the shear stress on the journal surface as

$$F_{fric} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{\mu^* u_2}{h} r d\theta dy + \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{h}{2} \frac{dp}{d\theta} d\theta dy. \quad (14)$$

The friction coefficient is the ratio of the friction force over the total load, written as

$$\bar{F}_{fric,c} = \frac{F_{fric}}{W}. \quad (15)$$

**2.8. Journal bearing stability**

To analyze the stability of a journal bearing by assigning two identical masses supported on two identical bearings under stationary load, the equation motion of journal bearing in Figure 1 becomes

$$mc \left[ \frac{d^2 \epsilon}{dt^2} - \epsilon \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)^2 \right] = F_r + W \cos \Phi, \quad (16)$$

$$mc \left[ \epsilon \frac{d^2 \Phi}{dt^2} + 2 \frac{d\epsilon}{dt} \frac{d\Phi}{dt} \right] = F_\phi - W \sin \Phi. \quad (17)$$

The linearized equations of the journal motion can be written as

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\xi\xi} & b_{\xi\psi} \\ b_{\psi\xi} & b_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{\xi\xi} & k_{\xi\psi} \\ k_{\psi\xi} & k_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \psi \end{bmatrix} = 0. \quad (18)$$

The dimensionless spring and dimensionless damping coefficients can be obtained as

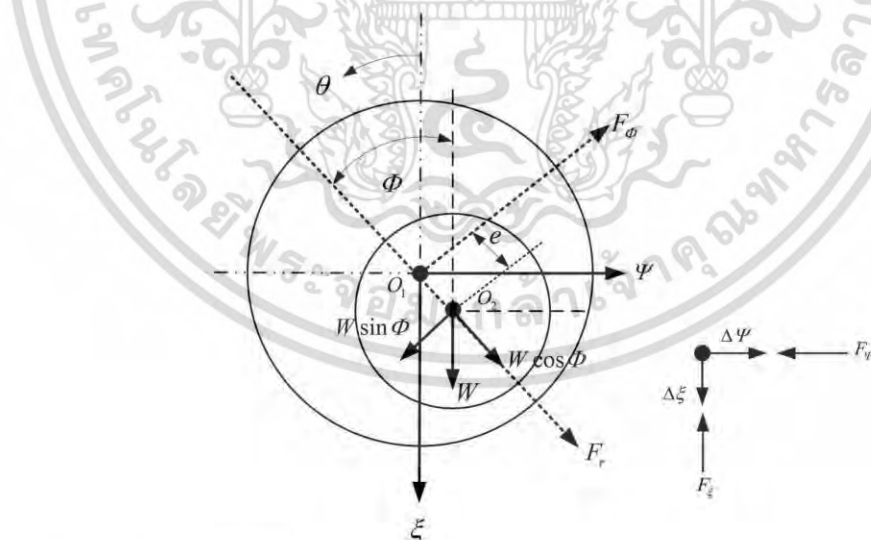


Figure 1. Geometry of the journal bearing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} K_{\xi\xi} & K_{\xi\psi} \\ K_{\psi\xi} & K_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \frac{c}{W} \begin{bmatrix} k_{\xi\xi} & k_{\xi\psi} \\ k_{\psi\xi} & k_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \frac{c}{W} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_\xi}{\partial \xi} & \frac{\partial F_\xi}{\partial \psi} \\ \frac{\partial F_\psi}{\partial \xi} & \frac{\partial F_\psi}{\partial \psi} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} B_{\xi\xi} & B_{\xi\psi} \\ B_{\psi\xi} & B_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \frac{c\omega}{W} \begin{bmatrix} b_{\xi\xi} & b_{\xi\psi} \\ b_{\psi\xi} & b_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \frac{c\omega}{W} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_\xi}{\partial \xi} & \frac{\partial F_\xi}{\partial \psi} \\ \frac{\partial F_\psi}{\partial \xi} & \frac{\partial F_\psi}{\partial \psi} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

At the threshold of instability, the dimensionless critical mass parameter  $M_{CR}\Omega^2$  can be written as

$$M_{CR}\Omega^2 = \frac{K_{\xi\xi}B_{\psi\psi} + K_{\psi\psi}B_{\xi\xi} - K_{\xi\psi}B_{\psi\xi} - K_{\psi\xi}B_{\xi\psi}}{B_{\psi\psi} + B_{\xi\xi}}. \quad (21)$$

If the dimensionless mass parameter is smaller than the dimensionless critical mass parameter,  $M_{CR}\Omega^2$ , the system will be stable. However, the system will be unstable when the dimensionless mass parameter is larger than or equal to the dimensionless critical mass parameter. The threshold of stability is found using Equation (21).

### 3. Numerical solution

The simultaneous system of time-dependent modified Reynolds, energy equations under TEHL with non-Newtonian lubricant based on Carreau model and elastic equation were numerically solved using finite difference method and a multi-grid multi-level method with a full approximation technique. The numerical solution involves the determination of a pressure distribution, temperature distribution and film thickness distribution. The geometry of the full circular finite journal bearing is shown in Figure 1. The journal bearing can be described as the lubricant film of the unwrapped journal, neglecting the effect of curvature. Discrete forms of the Reynolds, energy equations and elastic equation were numerically solved using flowchart as shown in Figure 2 with a maximum grid of  $256 \times 128$  in the  $\theta$  and  $y$  directions, respectively, through an iterative scheme as demonstrated in Mongkolwongrojn and Aiumprongsin (2010). The relative accuracy for this calculation was less than or equal to  $1 \times 10^{-6}$ . Based on the developed algorithm to solve the TEHL problem, the applied load is constant and acts in the vertical direction. The pressure, temperature, film thickness, viscosity, density, and hydrodynamic force are simultaneously calculated within the TEHL regime. The bearing material in Table 1 and the lubricant properties of the lubricant in Table 2 (Booser 1997) were used for the calculation.

### 4. Results and discussion

The deformable full circular journal bearings operating under TEHL regime with the non-Newtonian Carreau model were examined for different values of eccentricity and  $L/D$  ratio. The results include the static characteristics of the dimensionless load carrying capacity, dimensionless maximum film pressure, dimensionless minimum film thickness, friction coefficient, and dimensionless maximum film temperature. The stability analysis of the journal bearings were also examined using the linearized method. The results of the journal bearing characteristics under TEHL were compared with those

of journal bearings under the thermohydrodynamic lubrication (THL) regime.

Figure 3 shows a comparison between the film pressure distribution obtained from the present scheme and those presented by Jain, Sinhasan, and Singh (1984) under isoviscous conditions for  $c/r = 8 \times 10^{-4}$ ,  $\mu = 3.3 \times 10^{-4}$  Pa s,  $\omega = 100\pi$  rad/s,  $r = 25 \times 10^{-3}$  m,  $\varepsilon = 0.6$ ,  $E = 162$  GPa, and  $\nu = 0.3$ . The results obtained from the present scheme are very close to those of Jain, Sinhasan, and Singh (1984), thus confirming its validity.

For  $L/D = 1$ , the full circular journal bearings under TEHL with elastic bearing liner and lubricated with a non-Newtonian lubricant based on the Carreau model, the friction coefficient and dimensionless load carrying capacity are compared with thermohydrodynamic journal bearings at different eccentricity ratios, as shown in Figure 4. When the eccentricity ratio;

$\varepsilon = 0.9$  at severe operating conditions, the friction coefficient and dimensionless load carrying capacity are  $2.02 \times 10^{-3}$  and 3.46 for the journal bearings under THL. For the journal bearings under TEHL with a soft bearing liner material;  $E = 5$  GPa, the friction coefficient and dimensionless load carrying capacity are  $9.32 \times 10^{-3}$  and 0.73; for  $E = 10$  GPa, the friction coefficient and dimensionless load carrying capacity are  $6.68 \times 10^{-3}$  and 1.09; and for  $E = 70$  GPa, the friction coefficient and dimensionless load carrying capacity are  $3.08 \times 10^{-3}$  and 2.54. For a hard bearing liner material, with  $E = 200$  GPa, the friction coefficient and dimensionless load carrying capacity are  $2.4 \times 10^{-3}$  and 3.26. When journal bearings with low elastic bearing liner materials are subjected to severe operating conditions, the dimensionless load-carrying capacity under TEHL is significantly lower than that for journal bearings under THL due to the increase of both elastic deformation and viscosity. For TEHL, the friction coefficient decreases as the material elastic modulus of the bearing liner is increased, and it is also decreased significantly for high eccentricity ratio but the dimensionless load-carrying capacity increases as either the material elastic modulus of the bearing liner is increased or with the increasing of eccentricity ratio. The elastic modulus of bearing liner material significantly affects the characteristics of journal bearings in the TEHL regime operating under severe conditions.

The variations in the dimensionless minimum film thickness, dimensionless maximum film temperature, and dimensionless maximum film pressure for journal bearings under TEHL and THL with eccentricity ratio are shown in Figure 5. The dimensionless minimum film thickness rapidly and linearly decreases with increasing eccentricity ratio for both TEHL and THL, since lubricant shear rate increases with the increasing of eccentricity ratio. In this research journal bearing with  $E = 200$  GPa, operated at  $\varepsilon = 0.9$ , shear rate is  $1.08 \times 10^6$  1/s but for  $E = 5$  GPa, shear rate is reduced to  $2.81 \times 10^5$  1/s. Therefore, lubricant viscosity in Equation (3) is reduced significantly due to shear thinning effect, especially for high elastic modulus material. For  $\varepsilon = 0.9$ , the dimensionless minimum film thickness of the journal bearings under TEHL for a soft bearing material with  $E = 5$  GPa at  $\theta = 231.9^\circ$  is 0.56. For  $E = 10$  GPa, the dimensionless minimum film thickness at  $\theta = 231.9^\circ$  is 0.43, and for  $E = 70$  GPa, the dimensionless minimum film thickness at  $\theta = 226.5^\circ$  is 0.20. For hard bearing liner materials, when  $E = 200$  GPa, the dimensionless minimum film thickness at  $\theta = 226.5^\circ$  is 0.15. When compared with journal bearings under THL operating at  $\varepsilon = 0.9$ , the

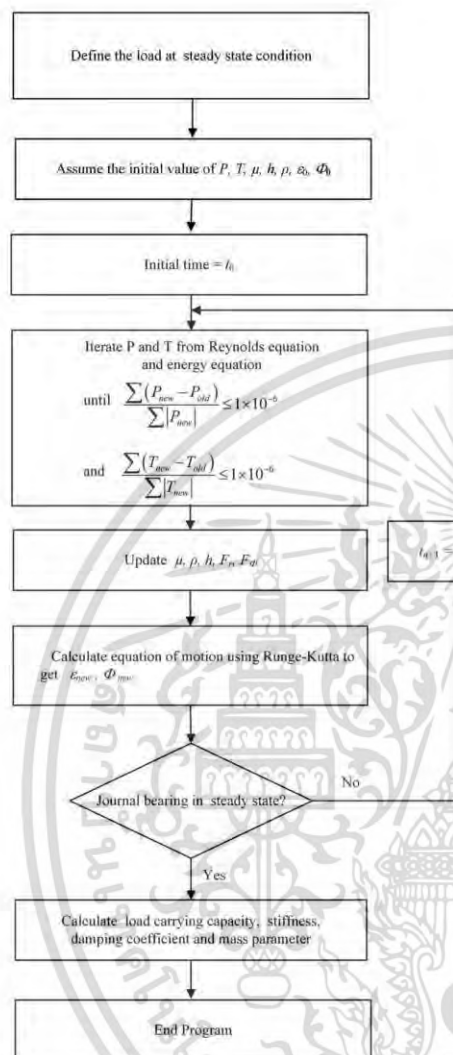


Figure 2. Flowchart.

Table 1. Physical properties of journal bearings.

Parameter	Detail
Journal radius, $r$	0.015 m
Radius clearance, $c$	30 $\mu$ m
Rotational speed, $N$	3000 rpm
Elastic modulus of bearing liner, $E$	5 GPa, 10 GPa, 70 GPa, 200 GPa
Poisson ratio of bearing, $\nu$	0.3

dimensionless minimum film thickness at  $\theta = 223.8^\circ$  is 0.10. The relationship of dimensionless minimum film thickness in Figure 5 is linear with difference slope. The slope for high elastic bearing liner is a little larger than the slope for low elastic bearing liner materials. The dimensionless maximum film

Table 2. Physical properties of the lubricant.

Parameter	Detail
Lubricant type	SAE 10W50
Limiting viscosity at low shear rate, $\mu_0$	0.107 Pa s
Limiting viscosity at high shear rate, $\mu_\infty$	0.054 Pa s
Power-law exponent, $n$	0.341
Characteristic relaxation time constant, $\lambda$	$3 \times 10^{-6}$
Lubricant density, $\rho$	875 kg/m <sup>3</sup>
Lubricant specific heat, $c_f$	1900 J/kg K
Inlet lubricant temperature, $T_0$	313 K
Viscosity-Pressure index, $Z$	0.60
Viscosity-Temperature coefficient, $\gamma$	0.0310174 K <sup>-1</sup>
Coefficient of thermal expansivity, $\beta$	0.000788 K <sup>-1</sup>

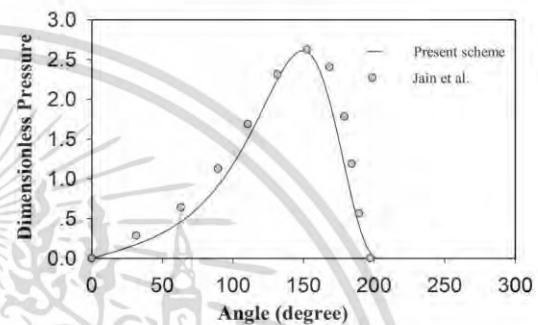


Figure 3. Comparison between pressure distributions computed for finite journal bearings and those given in Jain, Sinhasan, and Singh (1984).

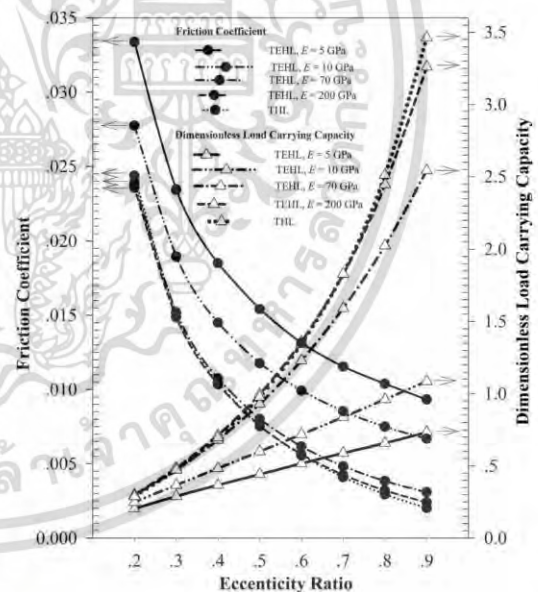


Figure 4. Variations in the friction coefficient and dimensionless load-carrying capacity with the eccentricity ratio for an  $L/D$  ratio of 1.

temperature at the outlet increases nonlinearly with increasing eccentricity ratio for both TEHL and THL conditions. When the journal bearing is operated at  $\epsilon = 0.9$ , the dimensionless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

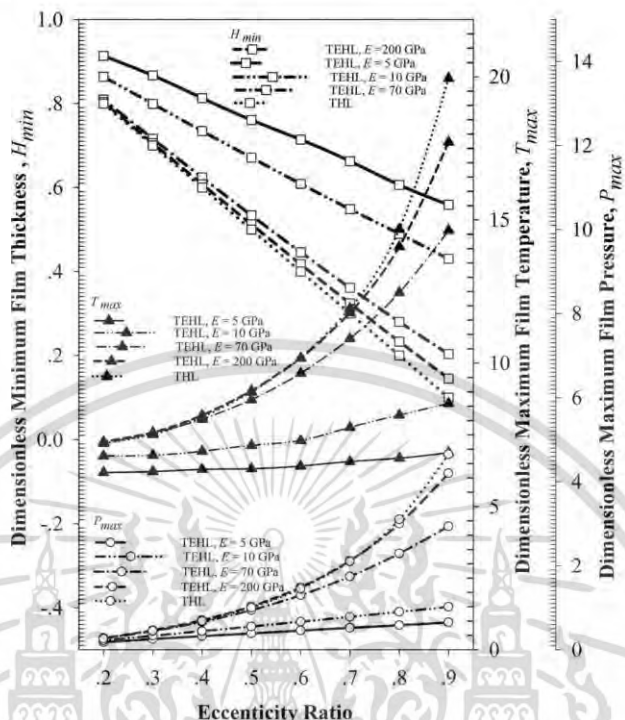


Figure 5. Variations in the dimensionless minimum film thickness, dimensionless maximum film temperature, and dimensionless maximum film pressure with the eccentricity ratio for an  $L/D$  ratio of 1.

maximum film temperature is 19.94 for journal bearing under THL. The dimensionless maximum film temperature for TEHL with a soft bearing material with  $E = 5$  GPa is 6.88. For low elastic modulus material, bearing materials with  $E = 10$  GPa, the dimensionless maximum film temperature is 8.60, and for  $E = 70$  GPa, the dimensionless maximum film temperature is 14.64. For hard bearing materials, with  $E = 200$  GPa, the dimensionless maximum film temperature is 17.72.

As shown in Figure 5, the dimensionless maximum film pressure increases with eccentricity ratio for journal bearings under both TEHL and THL. When  $\epsilon = 0.9$ , the dimensionless maximum film pressure of journal bearings operating under TEHL for soft bearing materials with  $E = 5$  GPa is 0.65, and for  $E = 10$  GPa, the dimensionless maximum film pressure is 1.02. For hard bearing materials, with  $E = 70$  GPa, the dimensionless maximum film pressure is 2.94, and for  $E = 200$  GPa, the dimensionless maximum film pressure is 4.20. For journal bearings operating under THL at  $\epsilon = 0.9$ , the dimensionless maximum film pressure is 4.65. Therefore, under TEHL, the elastic modulus of bearing liner significantly affects the maximum film pressure, especially for low elastic modulus bearing liner; low film pressure, large contact area, and large film thickness. The simulation results show that the dimensionless minimum film thickness is strongly affected for low elastic modulus bearing liner, but the dimensionless maximum film temperature and

dimensionless maximum film pressure exhibit only a small affect for low elastic modulus bearing liner because the film pressure and film viscosity decrease due to deformations of the low elastic modulus bearing liner.

Figure 6 shows the variations in the friction coefficient and dimensionless load-carrying capacity of journal bearings operating at  $\epsilon = 0.8$  under TEHL and THL for different  $L/D$  ratios. When  $L/D = 0.5$ , the relative increase in the friction coefficients of journal bearings under TEHL for hard bearing materials with  $E = 200$  GPa and for low elastic modulus bearing material  $E = 70$  GPa and  $E = 10$  GPa, for soft bearing material  $E = 5$  GPa are 2.5%, 14%, 91%, and 151%, respectively, when compared to those under THL. When  $L/D = 1.25$ , the relative increase in the friction coefficients under TEHL for hard bearing materials with  $E = 200$  GPa and for low elastic modulus bearing material  $E = 70$  GPa and  $E = 10$  GPa and for soft bearing materials  $E = 5$  GPa are 11%, 36%, 172%, and 273%, respectively, when compared to those operated under THL. The effects of the material elastic modulus are more pronounced for large  $L/D$  ratios than that for small  $L/D$  ratios, and the friction coefficient increases only slightly for low elastic modulus bearing liner. In contrast, the dimensionless load-carrying capacity becomes very small for journal bearings operated at  $L/D = 0.5$  under TEHL for soft bearing materials with  $E = 5$  GPa. When the journal bearings operate at  $L/D = 0.5$ , the dimensionless load carrying capacity for TEHL with a hard bearing material at  $E = 200$  GPa is 1.27, and for low elastic modulus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

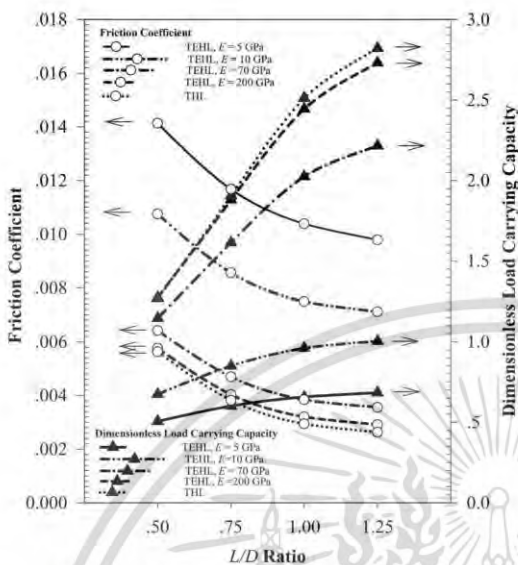


Figure 6. Variations in the dimensionless load carrying capacity and friction coefficient with the  $L/D$  ratio at an eccentricity ratio of 0.8.

material  $E = 70$  GPa, and  $E = 10$  GPa, the dimensionless load carrying capacity is 1.14 and 0.67, respectively. For a soft bearing material,  $E = 5$  GPa, the dimensionless load carrying capacity is 0.51. For journal bearings operating under THL at  $L/D = 0.5$ , the dimensionless load carrying capacity is 1.27. Therefore, for low elastic modulus bearing liner, the dimensionless load-carrying capacity of journal bearings under TEHL trends to increase and is close to that under THL due to the increase of viscosity for low modulus bearing liner materials.

The variations in dimensionless minimum film thickness and dimensionless maximum film temperature for  $\epsilon = 0.8$  are shown in Figure 7. For journal bearings under both THL and TEHL, the dimensionless minimum film thickness increases rapidly as the  $L/D$  ratio is increased. The effects of the bearing materials are significant for large  $L/D$  ratios. The dimensionless minimum film thickness is large for journal bearings under TEHL with a soft bearing material. When the journal bearings operate at  $L/D = 0.5$ , for journal bearings under TEHL with soft bearing materials with  $E = 5$  GPa and with low elastic modulus bearing materials  $E = 10$  GPa and  $E = 70$  GPa and for hard bearing materials  $E = 200$  GPa, the dimensionless film thicknesses are 0.37, 0.31, 0.23 and 0.21, respectively. These values are compared to the dimensionless minimum film thickness of 0.20 for journal bearings under THL. In contrast, the dimensionless maximum film temperature is greatly increased for materials with large elastic modulus materials. For journal bearings under TEHL, the dimensionless maximum film temperature decreases rapidly with the  $L/D$  ratio, but the dimensionless maximum film temperature for journal bearings under THL increases slightly. When the journal bearings under TEHL are operated at  $L/D = 0.5$ , the dimensionless maximum film temperatures for soft bearing material  $E = 5$  GPa and for low elastic modulus bearing materials  $E = 10$  GPa and  $E = 70$  GPa and for hard bearing materials  $E = 200$  GPa are 9.26, 10.77, 13.37 and

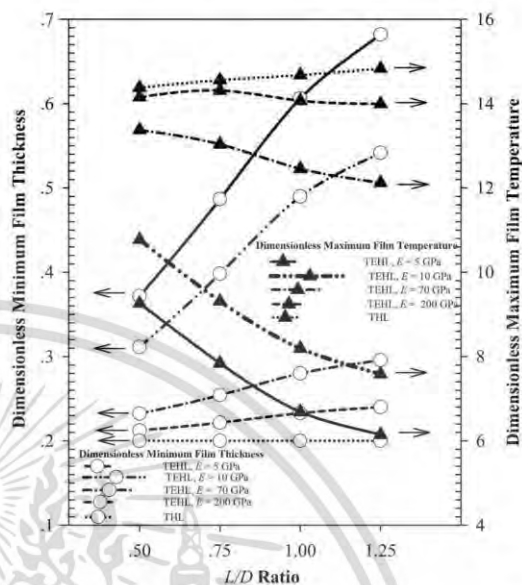


Figure 7. Variations in the dimensionless minimum film thickness and dimensionless maximum film temperature with the  $L/D$  ratio at an eccentricity ratio of 0.8.

14.38, respectively. Friction coefficient is an important parameter affected by shear thinning behavior. It decreases with decreases in lubricant viscosity and vice-versa. Friction loss raises the lubricant temperature and reduces viscosity. In TEHL, for journal bearing with low elastic modulus bearing liner materials, the film thickness is large due to large contact area and low film pressure. This research presents the analysis of the combined effects of shear thinning behavior, film temperature, and film pressure included elastic modulus of bearing liner material on the performance of journal bearing with non-Newtonian lubricant based on Carreau model under TEHL.

The size of the stability region increases as the elastic modulus of the bearing liner is increased for journal bearing under TEHL, as shown in Figure 8. In the case of THL, the size of the stability region dramatically increases with the increasing of eccentricity ratio, especially for low eccentricity ratios. Moreover, the size of the stability region increases slightly with the increasing of eccentricity ratio. For large eccentricity ratio, the stability region size tends to increase significantly with decreasing  $L/D$  ratio, especially for journal bearings under TEHL with a soft material.

5. Conclusions

The static and dynamic characteristics of journal bearings under TEHL with the shear thinning lubricant based on Carreau model were examined for bearing liners with various elastic modulus values. The validity of the present model was confirmed by comparison with previous research (Jain, Sinhasan, and Singh 1984). The current findings can be summarized as follows:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

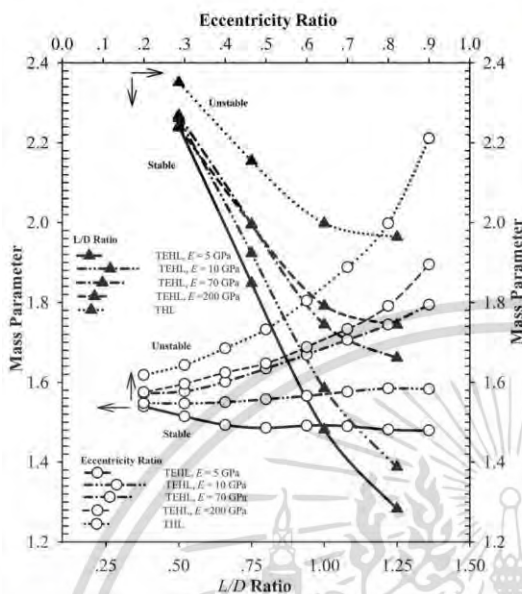


Figure 8. Variation in the mass parameter with the  $L/D$  ratio and with the eccentricity ratio for an  $L/D$  ratio of 1.

- (1) For short journal bearings with low elastic modulus bearing liner material and lubricated with non-Newtonian based on Carreau model, the performance characteristics of the bearing under TEHL such as minimum film thickness, maximum film temperature, load-carrying capacity and stability trend to be improved when compared with that for hard journal bearing liner.
- (2) For journal bearings operating under severe conditions, the effects of temperature, deformation, compressibility, and non-Newtonian rheology are closely tied to the results in the reduction of both load capacity and maximum temperature. However, the minimum film thickness and friction coefficient are large for bearings under TEHL as compared to journal bearings under the THL regime.
- (3) For journal bearings under TEHL, the dimensionless load-carrying capacity increases with the increase of eccentricity ratio and it also increases with  $L/D$  ratio. The dimensionless maximum temperature increases nonlinearly with the increasing of eccentricity ratio, but it decreases with  $L/D$  ratio. The minimum film thickness decreases linearly with the increasing of eccentricity ratio and it also decreases with the decreasing of  $L/D$  ratio. The friction coefficient decreases nonlinearly with the increasing of eccentricity ratio and  $L/D$  ratio.
- (4) Under TEHL, for journal bearings with finite length, the stability can be improved by increasing the bearing liner stiffness.

**Nomenclature**

$c$	Bearing radial clearance, (m)
$c_f$	Specific heat of lubricant, (J/(kg·K))
$e$	Eccentricity of a journal bearing, (m)
$E$	Elastic modulus of bearing liner (Pa)
$F_{fric}$	Friction force, N
$\bar{F}_{fric}$	Dimensionless friction force, $\bar{F}_{fric} = (c/\mu_0 UL)F_{fric}$
$F_f$	Force along the line of centers
$F_\theta$	Force perpendicular with the line of centers
$h$	Oil film thickness, (m)
$\bar{h}$	Dimensionless film thickness, $\bar{h} = h/c$
$L$	Journal bearing length along the axial axis, (m)
$m$	Mass of journal, (kg)
$M$	Dimensionless critical mass, $M = \omega^2 m/W$
$n$	The power law exponent
$N$	Rotational speed, (rpm)
$p$	Fluid film pressure, Pa
$\bar{p}$	Dimensionless film pressure, $\bar{p} = (c^2/\mu_0 \omega r^2)(p - p_{atm})$
$r$	Journal radius, (m)
$t$	Time, (s)
$T$	Mean temperature of lubricant across the film, (K)
$T_0$	Inlet fluid temperature, (K)
$\bar{T}$	Dimensionless film temperature, $\bar{T} = (\rho C_p c^2/\mu_0 \omega r^2)(T - T_0)$
$u$	Velocity of lubricant in x-direction, (m/s)
$u_1$	Velocity of bearing liner, (m/s)
$u_2$	Velocity of journal, (m/s)
$v$	Velocity of lubricant in the y-direction, (m/s)
$W$	Resultant fluid force, (N)
$\bar{W}$	Dimensionless load, $\bar{W} = W(1/\mu_0 UL)(c/r)^2$
$x$	Coordinate in the circumferential direction, $x = \theta r$
$y$	Coordinate in the axial direction
$\beta$	Coefficient of thermal expansion, (1/K)
$\gamma$	Viscosity-temperature coefficient, (1/K)
$\epsilon$	Eccentricity ratio
$\theta$	Circumferential angle of journal bearing, (rad)
$\lambda$	A relaxation time constant, (s)
$\mu_0$	Limiting low shear viscosity, (Pa·s)
$\mu_{\infty}$	Limiting high shear viscosity, (Pa·s)
$\nu$	Poisson ratio
$\rho$	Density of the lubricant, (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau_{xx}$	Component of shear stress in the x-direction, (Pa)
$\tau_{xy}$	Component of shear stress in the y-direction, (Pa)
$\omega$	Angular velocity, (rad/s)
$\omega_d$	Angular velocity of whirl, (rad/s)
$\Phi$	Attitude angle, (rad)
$\Omega$	Whirl ratio, $\Omega = \omega_d/\omega$

**Acknowledgments**

We would like to acknowledge for the permission of the reprint to the Society of Tribologists and Lubrication Engineers and Taylor & Francis; Jain, S.C., R. Sinhasan, and D.V. Singh. 1984. "A Study of EHD Lubrication in a Journal Bearing with Piezoviscous Lubricants." *ASLE transactions* 27 (2): 168–176. The authors wish to thank the anonymous reviewers of the paper for their very helpful comments.

**ORCID**

- Waleephan Gunnuang <http://orcid.org/0000-0002-7715-1355>
- Chatchai Aiumbhornsin <http://orcid.org/0000-0002-4684-3738>
- Jitraporn Wongsan-Ngam <http://orcid.org/0000-0001-9412-9144>
- Mongkol Mongkolwongrajn <http://orcid.org/0000-0002-9214-9704>

**References**

Booser, E. R. 1997. *Tribology Data Handbook: An Excellent Friction, Lubrication, and Wear Resource*. Florida: CRC Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Bouyer, J., and M. Fillon. 2004. "On the Significance of Thermal and Deformation Effects on a Plain Journal Bearing Subjected to Severe Operating Conditions." *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Tribology* 126 (4): 819–822. doi:10.1115/1.1792678.
- Carreau, P. J. 1972. "Rheological Equations from Molecular Network Theories." *Transactions of the Society of Rheology* 16 (1): 99–127. doi:10.1122/1.549276.
- Dien, I. K., and H. G. Elrod. 1983. "A Generalized Steady-State Reynolds Equation for Non-Newtonian Fluids, with Application to Journal Bearings." *Journal of Lubrication Technology* 105 (3): 385–390. doi:10.1115/1.3254619.
- Dobrica, M. B., M. Fillon, and P. Maspeyrot. 2006. "Mixed Elastohydrodynamic Lubrication in a Partial Journal Bearing – Comparison between Deterministic and Stochastic Models." *Journal of Tribology* 128 (4): 778–788. doi:10.1115/1.2345404.
- Dowson, D., and G. R. Higginson. 1966. *Elasto-Hydrodynamic Lubrication: The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication*. Vol. 23. Oxford: Pergamon Press.
- Elsharkawy, A. A., and L. H. Guedouar. 2001. "Direct and Inverse Solutions for Elastohydrodynamic Lubrication of Finite Porous Journal Bearings." *Journal of Tribology* 123 (2): 276–282. doi:10.1115/1.1308025.
- Goenka, P. K., and K. P. Oh. 1985. "The Elastohydrodynamic Solution of Journal Bearings under Dynamic Loading." *Journal of Tribology* 107 (3): 389–394. doi:10.1115/1.3261088.
- Hirani, H., K. Athre, and S. Biswas. 2001. "Lubricant Shear Thinning Analysis of Engine Journal Bearings." *Tribology Transactions* 44 (1): 125–131. doi:10.1080/10402000/08982435.
- Jain, S. C., R. Sinhasan, and D. V. Singh. 1984. "A Study of EHD Lubrication in a Journal Bearing with Piezoviscous Lubricants." *ASLE Transactions* 27 (2): 168–176. doi:10.1080/05698198408981558.
- Katyal, P., and P. Kumar. 2012. "Central Film Thickness Formula for Shear Thinning Lubricants in EHL Point Contacts under Pure Rolling." *Tribology International* 48: 113–121. doi:10.1016/j.triboint.2011.11.007.
- Kim, T. W., and Y. J. Cho. 2006. "Average Flow Model with Elastic Deformation for CMP." *Tribology International* 39 (11): 1388–1394. doi:10.1016/j.triboint.2005.12.002.
- Lahmar, M., S. Ellagoune, and B. Bou-Said. 2010. "Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of a Compliant Journal Bearing considering Static and Dynamic Deformations of the Bearing Liner." *Tribology Transactions* 53 (3): 349–368. doi:10.1080/10402000903312356.
- Lahmar, M., A. Haddad, and D. Nicolas. 1998. "Elastohydrodynamic Analysis of One-layered Journal Bearings." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 212 (3): 193–205. doi:10.1243/1350650981542001.
- Lin, J. R. 2008. "Weakly Nonlinear Bifurcation Analysis of a Short Journal Bearing Lubricated with Non-Newtonian Couple Stress Fluids." *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 31 (4): 721–727. doi:10.1080/02533839.2008.9671426.
- Majumdar, B. C., D. E. Brewster, and M. M. Khonsari. 1988. "Stability of a Rigid Rotor Supported on Flexible Oil Journal Bearings." *Journal of Tribology* 110 (1): 181–187. doi:10.1115/1.3261562.
- Mokhiamer, U. M., W. A. Crosby, and H. A. El-Gamal. 1999. "A Study of a Journal Bearing Lubricated by Fluids with Couple Stress considering the Elasticity of the Liner." *Wear* 224 (2): 194–201. doi:10.1016/S0043-1648(98)00320-2.
- Mongkolwongrojn, M., and C. Aiumprongsin. 2010. "Stability Analysis of Rough Journal Bearings under TEHL with Non-Newtonian Lubricants." *Tribology International* 43 (5–6): 1027–1034. doi:10.1016/j.triboint.2009.12.039.
- Oh, K. P., and K. H. Huebner. 1973. "Solution of the Elastohydrodynamic Finite Journal Bearing Problem." *Journal of Lubrication Technology* 95 (3): 342–351. doi:10.1115/1.3451827.
- Prabhakaran Nair, K., V. P. Sukumaran Nair, and N. H. Jayadas. 2007. "Static and Dynamic Analysis of Elastohydrodynamic Elliptical Journal Bearing with Micropolar Lubricant." *Tribology International* 40 (2): 297–305. doi:10.1016/j.triboint.2005.09.017.
- Roelands, C. J. A. 1966. "Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating oils." Ph.D. dissertation. Technical University of Delft.
- Sharda, H. B., H. N. Chandrawat, and R. C. Bahl. 1990. "Stability Study of an Offset Bearing Including EHD Effects." *International Journal of Mechanical Sciences* 32 (10): 843–850. doi:10.1016/0020-7403(90)90163-D.
- Sharda, H. B., H. N. Chandrawat, and R. C. Bahl. 1993. "EHD Analysis of a Misaligned Journal Bearing." *International Journal of Mechanical Sciences* 35 (5): 415–423. doi:10.1016/0020-7403(93)90012-J.
- Taylor, C., and J. F. O'Callaghan. 1972. "A Numerical Solution of the Elastohydrodynamic Lubrication Problem Using Finite Elements." *Journal of Mechanical Engineering Science* 14 (4): 229–237. doi:10.1243/JMES\_JOUR\_1972\_014\_030\_02.
- van der Tempel, L., H. Moes, and R. Bosma. 1985. "Numerical Simulation of Dynamically Loaded Flexible Short Journal Bearings." *Journal of Tribology* 107 (3): 396–401. doi:10.1115/1.3261093.
- Wang, Y., Q. J. Wang, and C. Lin. 2006. "A Mixed-EHL Analysis of Effects of Misalignments and Elastic Deformations on the Performance of a Coupled Journal-Thrust Bearing System." *Tribology International* 39 (4): 281–289. doi:10.1016/j.triboint.2005.01.033.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on the performance characteristics of rough journal bearings

Waleephan Gunnuang<sup>1</sup>, Chatchai Aiumbhornsri<sup>2,\*</sup>, Jitraporn Wongsan-Ngam<sup>1</sup>, and Mongkol Mongkolwongrojn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520

<sup>2</sup>Department of Maritime Engineering, Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Chonburi Thailand 20230

<sup>3</sup>College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520

\* Corresponding Author: chataium@gmail.com

### Abstract

This paper investigates the influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on static and dynamic characteristics of water-lubricated rough journal bearings under thermo-hydrodynamic lubrication (THL). The time-dependent modified Reynolds equation and the approximated adiabatic energy equation have been formulated and solved numerically with boundary conditions and initial conditions. The results are presented for dimensionless maximum film pressure, dimensionless maximum film temperature, dimensionless minimum film thickness, eccentricity ratio, attitude angle, dimensionless friction force, spring constants, damping coefficients and mass parameters for both journal bearings with transverse roughness patterns and with longitudinal roughness patterns under a dimensionless load of 7. The results show that journal bearings with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives tend to significantly increase load carrying capacity and minimum film thickness by decreasing both the eccentricity ratio and temperature rise for longitudinal roughness patterns. For journal bearings with longitudinal roughness patterns and lubricated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives, the stability region tends to increase.

**Keywords:** Journal bearing, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives, Longitudinal rough surface, Transverse rough surface

### 1. Introduction

In modern machines with minimized energy losses, ceramics are used as bearing materials for high-speed water-lubricated bearings. In ceramic bearings, the surface may be covered with the desired surface roughness patterns. Thermal effects in lubrication are important to the performance characteristics of bearings, see examples; Pinkus and Bupara [1], Smith and Tichy [2]. The performance characteristics of journal bearings have been studied by numerous researchers. Hashimoto and Mongkolwongrojn [3] studied the performance characteristics of turbulent partial journal bearings including surface roughness effects. They found that surface roughness significantly affected the bearing



Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

1

characteristics, especially for operating under turbulent film conditions. In 2004, Bouyer and Fillon [4] presented the incompressible thermoelastohydrodynamic film pressure has a significant effect on the performance characteristics of a plain journal bearing. The water film thickness can be very thin due to the thermohydrodynamic lubrication; therefore, the effect of surface roughness is very important. Majumdar and Ghosh [5], Tur Turaga, Sekhar [6] investigated the stability of a rough journal bearing using the perturbation technique. They found that stability can be improved significantly for rough surface journal bearings. Gururajan [7] studied the influence of surface roughness on bearing characteristics.

In recent years, many researches on nanoparticles show the enhancement of the heat transfer rate by increasing thermal conductivity and increasing thermal dispersion properties for cooling liquids (Nguyen, Desgranges [8], Xuan and Roetzel [9], Yu, Xie [10]). Recent research at the microscale is necessary to learn about the microstructure of nanofluids in order to understand the flow characteristics and heat transfer process of the nanofluid. Nanoparticle additives have attracted interest because of their enhanced thermal properties. Peng, Kang [11] showed that the use of diamond and SiO<sub>2</sub> nanoparticles as additives in liquid paraffin oil have better anti-wear and anti-friction properties than paraffin oil. The thermal conductivity and viscosity of nanofluids increase significantly with nanoparticle concentration (Murshed, Leong [12], Chandrasekar, Sures [13]). Shenoy, Binu [14] presented the effect of nanoparticle additives on hydrodynamic characteristics of an externally adjustable fluid film bearing. The bearing operated with API-SF engine oil blended with TiO<sub>2</sub> nanoparticles. The results showed that bearings with nanoparticle additives have better load-carrying capacity, reduced end leakage and increased friction when compared to API-SF engine oil and base oil without nanoparticle additives. Mongkolwongrojn and Rattapasakorn [15] studied a rough cylinder on a flat surface under TEHL with non-Newtonian lubricant blended with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives. The addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles significantly increased the film thickness both under normal loads and under sudden overloads due to the squeezing effect. The results have shown that nanoparticles significantly affected thermal elastohydrodynamic performance, especially under transient conditions. Mongkolwongrojn and Aiumprornsin [16] showed the effects of surface roughness in journal bearings under EHL; for longitudinal pattern, the increase in temperature was higher than both transverse and smooth patterns. As a result, the stability regions of the longitudinal pattern were smaller than a transverse pattern. Gunnuang, Aiumprornsin [17, 18] showed that Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives can reduce the temperature.

The objective of this study is to investigate the performance characteristics of a journal bearing with minimize energy losses. In this analysis, the rough journal bearings with water blended with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives under THL have been formulated and solved using finite difference techniques.

## 2. Theory

### 2.1 Physical properties of nanofluids

The thermo-physical properties of nanofluids in this research assume that the nanoparticles are well dispersed in water and can be written as Equation (1) and equation (2) (Pak and Cho [19], Chandrasekar, Suresh [13])

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_{par} + (1-\varphi) \rho_{water} \quad (1)$$

$$C_{p,nf} = \varphi C_{p,par} + (1-\varphi) C_{p,water} \quad (2)$$

Brinkman [20] suggested an equation for calculating the viscosity of the suspension, which is defined as follows:

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \mu_{water} \quad (3)$$

The lubricant density and viscosity depend on the temperature and can be written as follows:

$$\rho = \rho_{ref} (1 - \beta(T - T_0)) \tag{4}$$

$$\mu = \mu_{ref} \exp\{-\gamma(T - T_0)\} \tag{5}$$

2.2 Linearization of bearing reaction

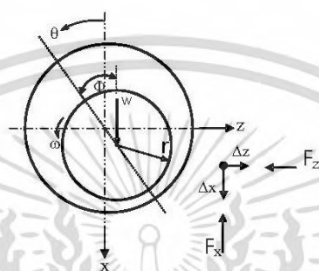


Figure 1. Geometry of the journal bearing

According to Lund [21], for the x-z coordinates in Figure 1, using the perturbation technique, five non-dimensional equations of bearing reaction can be obtained as follows:

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_s \\ \bar{p}_x \\ \bar{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{\rho} \cos \theta) \\ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{\rho} \sin \theta) \\ \bar{\rho} \cos \theta \\ \bar{\rho} \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\bar{\rho} \bar{h}_s^2 \cos \theta}{4\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}_s}{\partial \theta} \right) \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\bar{\rho} \bar{h}_s^2 \sin \theta}{4\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}_s}{\partial \theta} \right) \\ \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\bar{\rho} \bar{h}_s^2 \cos \theta}{4\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}_s}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\bar{\rho} \bar{h}_s^2 \sin \theta}{4\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}_s}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \tag{6}$$

where  $\bar{p}_s = (\bar{p})_s$ ,  $\bar{p}_x = \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial X}\right)_s$ ,  $\bar{p}_z = \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial Z}\right)_s$ ,  $\bar{p}_x = \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial X}\right)_s$ ,  $\bar{p}_z = \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial Z}\right)_s$ ,  $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$ ,  $\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}$

The film thickness can be expressed as

$$\bar{h}_s = (1 + \varepsilon \cos(\theta - \Phi)) - \delta \bar{h}_1 \tag{7}$$

where  $\delta \bar{h}_1$  is the roughness height of the journal bearing and can be written as follows:

$$\delta \bar{h}_1 = \frac{A_h}{c} \sin(2\pi r \theta / \lambda_1) \quad (\text{for transverse roughness}) \tag{8}$$

$$\delta \bar{h}_1 = \frac{A_h}{c} \sin(2\pi r y / \lambda_1) \quad (\text{for longitudinal roughness}) \tag{9}$$

The boundary conditions for the film pressure at the start of cavitation and the bearing sides are

$$\bar{p}(\theta_c) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \Big|_{\theta_c} = 0, \bar{p}(\theta=0) = 0 \text{ and } \bar{p}(\bar{y}=1) = 0 \quad (10)$$

### 2.3 Energy equation

According to Majumdar [22], the dimensionless adiabatic energy equation can be written as shown in equation (11)

$$\left( 6\bar{h} \frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) \frac{\partial \bar{T}_m}{\partial \theta} - \left( \frac{1}{\lambda^2} \frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} \right) \frac{\partial \bar{T}_m}{\partial \bar{y}} = \frac{12\bar{\mu}}{\bar{h}} + \frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}} \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{1}{\lambda^2} \frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}} \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} \right)^2 \quad (11)$$

The boundary conditions for the film temperature at the film inlet and the gradient of the film temperature at the half of length are as follows:

$$\bar{T}(\theta=0)=0, \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} \Big|_{\bar{y}=\frac{1}{2}} = 0 \quad (12)$$

### 2.4 Load-carrying capacity and Friction force

The forces due to the hydrodynamic pressure on the journal in the x-z coordinate system are calculated as

$$(\bar{F}_x)_s = - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_x \cos \theta d\theta d\bar{y}, \quad (\bar{F}_z)_s = - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_z \sin \theta d\theta d\bar{y} \quad (13)$$

The friction force in the fluid film is obtained by integrating the shear stress on the journal surface. The non-dimensional friction force  $\bar{F}_{fric}$  is given as follows:

$$\bar{F}_{fric} = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{1}{\bar{h}} d\theta d\bar{y} + \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\bar{h}}{2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} d\theta d\bar{y} \quad (14)$$

### 2.5 Journal bearing stability

The linearized equation of journal motion can be written as

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{X} \\ \Delta \ddot{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xz} \\ B_{zx} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ \Delta \dot{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} \\ K_{zx} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Z \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

where the non-dimensional spring and damping coefficients can be obtained as follows:

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} \\ K_{zx} & K_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2\pi & - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_x \cos \theta d\theta d\bar{y} & - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_z \cos \theta d\theta d\bar{y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_x \sin \theta d\theta d\bar{y} & - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_z \sin \theta d\theta d\bar{y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xz} \\ B_{zx} & B_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2\pi & - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_x \cos \theta d\theta d\bar{y} & - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_z \cos \theta d\theta d\bar{y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_x \sin \theta d\theta d\bar{y} & - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{p}_z \sin \theta d\theta d\bar{y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{where } \bar{p}_x = \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right), \bar{p}_y = \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right), \bar{p}_z = \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right), \bar{p}_z = \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right)$$

The solutions for dimensionless critical mass parameter  $M_{CR} \bar{\Omega}^2$

$$M_{CR} \bar{\Omega}^2 = \frac{K_{xx} B_{zz} + K_{zz} B_{xx} - K_{xz} B_{zx} - K_{zx} B_{xz}}{B_{xx} + B_{zz}} \quad (18)$$

### 3. Numerical Solution

In the present study, the characteristics of full journal bearing with roughness surface were examined with the bearing parameters and lubricant properties as shown in Table 1. The diameter to width ratio of the bearing is 1, and the clearance to radius ratio is 0.002. The static pressure; in Equation (6) and temperature in Equation (11) are solved simultaneously. The second order central difference scheme described by Majumdar [22], were employed for the discretization of pressure equation and energy equation. The applied load is assumed to be constant in magnitude and implemented in the vertical direction. The pressure, temperature, eccentricity ratio, film thickness, viscosity, density and hydrodynamic force are also simultaneously calculated within the thermohydrodynamic regime. The relative accuracy in pressure, temperature and force components were less than or equal to  $1 \times 10^{-6}$ . Based on the analysis, a computer program was developed to solve the thermohydrodynamic problems of finite journal bearing using 270 by 90 nodes.

Table 1. Physical properties of the journal bearing and lubricant properties

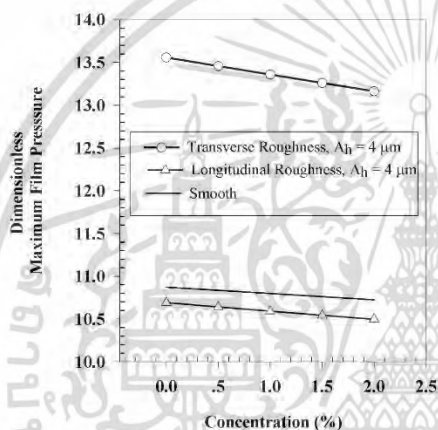
Parameter	Detail
Journal radius, $r$	0.015 m
Radius clearance, $c$	30 $\mu\text{m}$
Reference viscosity, $\mu_0$	0.693 m Pa s
Viscosity-Temperature coefficient, $\gamma$	0.0153 $\text{K}^{-1}$
Bearing length, $L$	0.03 m
Inlet lubricant temperature, $T_0$	313 K
coefficient of thermal expansivity, $\beta$	0.000385 $\text{K}^{-1}$
Wavelength of roughness, $\lambda_1$	5 mm
Density of $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\rho_{par}$	3890 $\text{kg m}^{-3}$
Specific heat of $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $C_{p,par}$	729 $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

### 4. Results

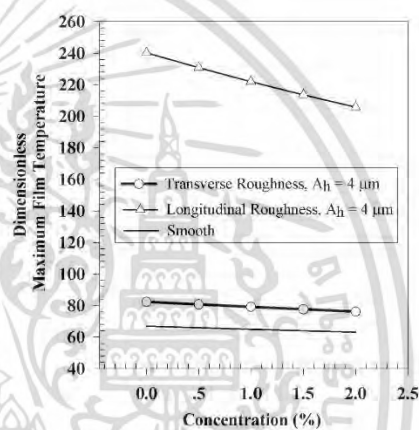
Figures 2-9 show the effects of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentration on the steady-state characteristics of water-lubricated journal bearings under the dimensionless load  $W=7$  for smooth bearings, transverse roughness pattern bearings and longitudinal roughness pattern bearings.

Figure 2 shows the effects of the variations in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentrations on the dimensionless maximum film pressure under dimensionless load  $W$  equal to 7. For the transverse roughness pattern, the dimensionless maximum film pressure of journal bearings lubricated with clean water and lubricated with water mixed with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles are 13.56 and 13.16 respectively. The decrease in the maximum film pressure is 2.95%. For journal bearings with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles, the dimensionless maximum film pressures of the longitudinal roughness pattern and smooth surface decrease 1.78% and 1.38% respectively, when compared with journal bearings lubricated without  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles. The dimensionless maximum film pressure decreases slightly with an increase in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles added.

Figure 3 shows the effect of variations in the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentration on dimensionless maximum film temperature. The results show that addition of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive decreases the dimensionless maximum film temperature, especially for the longitudinal roughness pattern. For smooth surface journal bearings, the dimensionless maximum film temperature of journal bearings lubricated with clean water and lubricated with water mixed with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles are 66.92 and 63.08, which is a decrease of 5.74%. For transverse patterns, the addition of 0% to 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives can reduce dimensionless maximum film temperature from 82.33 to 76.18, a decrease of 7.47%. In the case of longitudinal patterns, the dimensionless maximum film temperature of journal bearings lubricated with clean water and lubricated with water mixed with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles are 240.20 and 205.78, respectively, a decrease of 14.33%. The  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive has a great effect on dimensionless maximum film temperature for journal bearings with longitudinal roughness patterns.



**Figure 2.** Variation of dimensionless maximum film pressure with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7

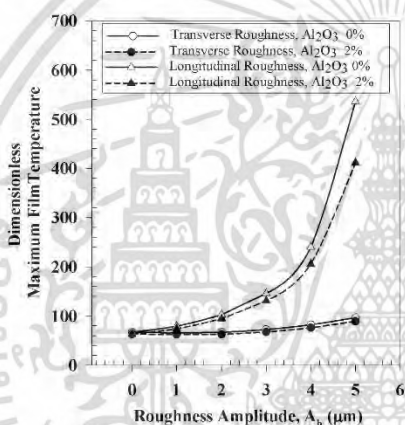


**Figure 3.** Variation of dimensionless maximum temperature with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7

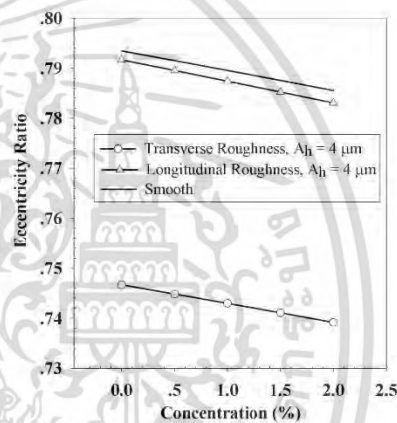
Figure 4 shows the variation of dimensionless maximum film temperature with surface roughness for longitudinal and transverse roughness patterns when the journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7. The dimensionless maximum film temperature is nonlinearly increased with an increase of roughness amplitude. For journal bearings with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive, the decrease of the dimensionless maximum film temperature for longitudinal roughness patterns with roughness amplitudes  $5 \mu\text{m}$ ,  $4 \mu\text{m}$ , and  $3 \mu\text{m}$  are 23.3%, 14.33%, and 10.13%, respectively, when compared to journal bearings lubricated without nanoparticles added. The decreases in the dimensionless maximum film temperature for the transverse roughness pattern with roughness amplitudes  $5 \mu\text{m}$ ,  $4 \mu\text{m}$ , and  $3 \mu\text{m}$  are 7.66%, 7.47%, and 6.69%, respectively, when compared to journal bearings lubricated with clean water. The roughness surface has a significant effect on the increase of the film temperature, especially for the longitudinal roughness pattern. From the results in Figures 2-4, It is clear that for roughness amplitudes higher than  $3 \mu\text{m}$  or larger than 10% of the clearance;  $A_h/c > 0.1$ , the addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles has a significant effect on the reduction of the temperature rise for longitudinal roughness patterns; the reduction of the temperature rise for transverse roughness

patterns is small when compared with that for longitudinal roughness patterns. These results are useful in understanding the influence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles on the longitudinal roughness patterns of journal bearings.

The effects of the concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles on eccentricity ratio and attitude angle of the journal bearings are shown in Figure 5 and Figure 6. With the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive concentration ranging from 0% to 2%, the eccentricity ratio of journal bearings decreases from 0.793 to 0.786, a decrease of 0.88% for a smooth surface; the eccentricity ratio decreases from 0.747 to 0.739, a decrease of 1.07% for the transverse roughness pattern; and the eccentricity ratio decreases from 0.792 and 0.783, a decrease of 1.14% for the longitudinal roughness pattern, as shown in Figure 5. The attitude angle of the journal bearing increases from 36.69 to 37.36, an increase of 1.83% for a smooth surface; the attitude angle increases from 32.47 to 33.02, an increase of 1.69% for the transverse roughness pattern; and the attitude angle increases from 37.14 to 37.8, an increase of 1.78% for the longitudinal roughness pattern as shown in Figure 6.



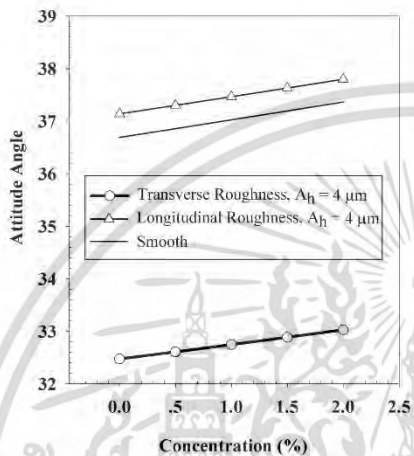
**Figure 4.** Variation of dimensionless maximum film temperature with roughness amplitude when the journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7



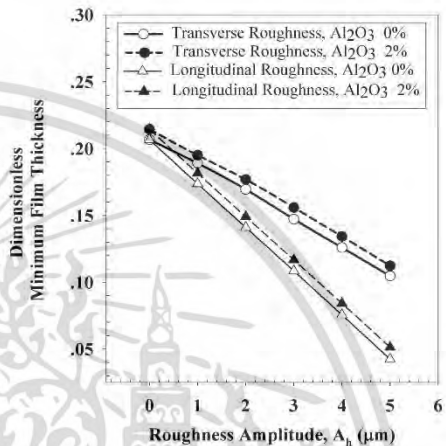
**Figure 5.** Variation of eccentricity ratio with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7

Figure 7 shows the variation of dimensionless minimum film thickness with roughness amplitude for longitudinal and transverse roughness patterns when the journal bearing is operated under dimensionless load  $W$  equal to 7. For a longitudinal roughness pattern at high roughness amplitude, the decrease of the dimensionless minimum film thickness is higher than for the transverse pattern; however, the addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles significantly affects the increase of the dimensionless minimum film thickness. For journal bearings with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles, the increase of the dimensionless minimum film thickness for transverse roughness patterns with roughness amplitudes 5  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  are 6.67%, 6.35% and 6.12%, respectively, when compared to journal bearings lubricated without nanoparticles added. For journal bearings with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles added, the increases of the dimensionless minimum film thickness are 21.4%, 10.53% and 8.33% for longitudinal roughness patterns with roughness amplitudes 5  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$ , respectively, when compared with bearings lubricated without nanoparticles added. The addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles has a significant effect on the increase of dimensionless minimum film thickness, as shown in Figure 8. The addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles increases the dimensionless friction force due to the increase of viscosity. Figure 9 shows that the

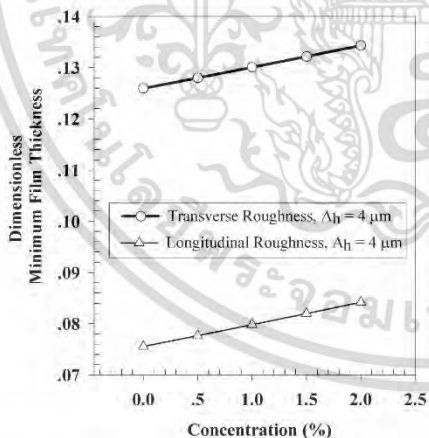
addition of  $Al_2O_3$  nanoparticles from 0% to 2%, the dimensionless friction force of a longitudinal bearing with 5  $\mu m$  in amplitude increases from 13.82 to 13.99, respectively, this is an increase of 1.23%. For transverse roughness patterns 5  $\mu m$  in amplitude, the dimensionless friction force increases from 13.25 to 13.61, an increase of 2.72%.



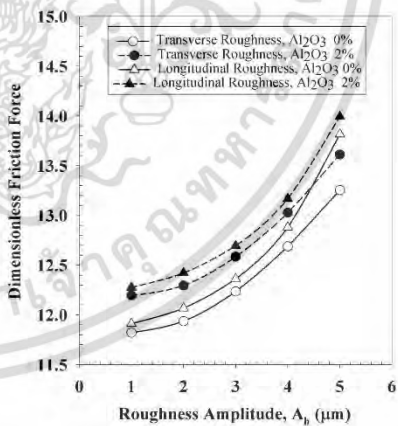
**Figure 6.** Variation of attitude angle with  $Al_2O_3$  nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7



**Figure 7.** Variation of dimensionless minimum film thickness with roughness amplitude when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7



**Figure 8.** Variation of dimensionless minimum film thickness with  $Al_2O_3$  nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7



**Figure 9.** Variation of dimensionless friction force with roughness amplitude when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7

The addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles decreases film temperature and increases minimum film thickness by reducing the eccentricity ratio or increasing the attitude angle. The  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives have a significant effect on temperature when the roughness amplitude to clearance ratio,  $A_r/c$ , is higher than 0.1. The effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives on the dynamic characteristics of journal bearings under the dimensionless load  $W$  equal to 7 are shown in Figures 10-12.

Figure 10 shows the variation of dimensionless spring coefficients with the concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles for different roughness patterns. The spring constants  $K_{xx}$  and  $K_{zz}$  for longitudinally rough surfaces increase significantly with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentration, but all the other dimensionless spring coefficients,  $K_{xx}$ ,  $K_{xz}$ ,  $K_{zx}$  and  $K_{zz}$ , for both transversely rough surfaces and smooth surfaces decrease with the concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles. To compare bearings lubricated with water blended with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles and lubricated with clean water for the longitudinally rough surface, the spring constant,  $K_{xx}$  increases from 0.65 to 0.93, an increase of 43%, and  $K_{zz}$  increases from -2.94 to -2.88, an increase of 2.04%. For longitudinally rough surfaces, spring constant  $K_{xz}$  decreases slightly from 4.33 to 4.31, a decrease of 0.46%. For both transversely rough surfaces and smooth surfaces, the spring constant  $K_{xz}$  decreases significantly by 1.45% and 2.09%, respectively, when the use of 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles is compared with the use of clean water. This means that the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive has great effect on increasing the spring constants  $K_{xx}$  and  $K_{zz}$  for journal bearings with longitudinal roughness patterns.

Figure 11 shows the variation of dimensionless damping coefficients with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentrations for different roughness patterns. The results clearly show that dimensionless damping coefficients  $B_{xx}$ ,  $B_{xz}$  and  $B_{zx}$  decrease with the increase in the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentration, but  $B_{zz}$  increases with the increase in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentration for both transverse and longitudinal roughness patterns. For the transverse roughness patterns, damping coefficients are small when compared with the damping coefficients for smooth surfaces, but the damping coefficients for longitudinally rough surfaces are close to the damping coefficients for smooth surfaces. At 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentration, the damping coefficients  $B_{xx}$ ,  $B_{xz}$ ,  $B_{zx}$  and  $B_{zz}$  for a transversely rough surface are 14%, 29.3%, 29.3%, and 26% smaller, respectively, than those for smooth surfaces.

Figure 12 shows the variation of the critical mass parameter with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentration and roughness amplitude when journal bearings are operated under dimensionless load  $W$  equal to 7; the critical mass parameter indicates the stability region of the journal bearing. The stability region of the bearing with transverse roughness pattern increases with an increase in roughness amplitude, but the stability region of the longitudinal roughness bearing decreases with an increase in roughness amplitude, especially when the value of roughness amplitude to clearance ratio,  $A_r/c$ , is more than 0.1.

For the longitudinally rough surface, the mass parameter of water-blended  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is larger than that for clean water by 1.31%, 4.20% and 13.79% for roughness amplitudes of 3  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$ , respectively. For the transversely rough surface, the mass parameter of water-mixed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is smaller than that for clean water. The values of mass parameters decrease 0.62%, 0.69% and 0.78% for roughness amplitudes of 3  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$ , respectively. The addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles tends to slightly decrease the stability region for transverse roughness patterns, but it is significant in increasing the stability region for longitudinal roughness patterns, especially when the roughness amplitude is higher than 0.3  $\mu\text{m}$ . Comparing the mass parameter of water-blended 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with the mass parameter of clean water, the transverse roughness pattern decreases 0.69% (from 2.464 to 2.447), the smooth surface decreases 0.52% (from 2.319 to 2.307) and the longitudinal roughness pattern significantly increases 4.20% (from 1.737 to 1.81). The results show that the concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles tends to slightly decrease the stability region of both smooth surfaces and transverse roughness patterns, but for bearings with longitudinal roughness patterns, the stability region increases significantly with an increase in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle concentration.

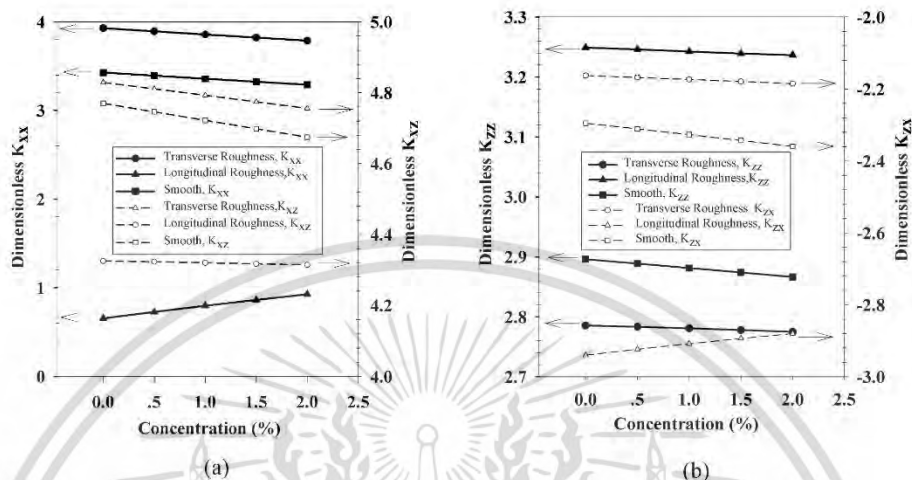


Figure 10. Variation of dimensionless spring coefficients with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load W equal to 7 for (a)  $K_{xx}$ ,  $K_{xz}$  and (b)  $K_{zz}$ ,  $K_{zx}$

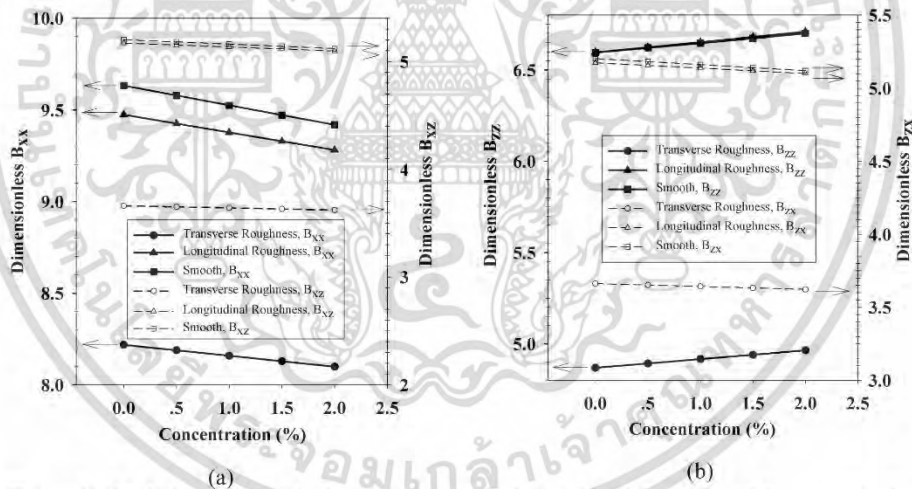
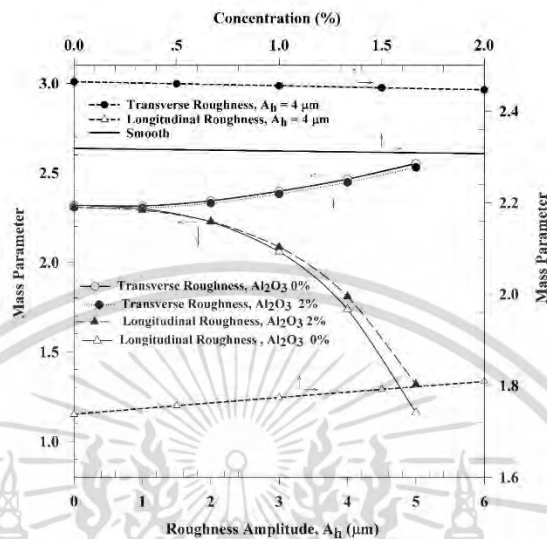


Figure 11. Variation of dimensionless damping coefficients with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles concentration when journal bearing operated under dimensionless load W equal to 7 for (a)  $B_{xx}$ ,  $B_{xz}$  and (b)  $B_{zz}$ ,  $B_{zx}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Figure 12.** Variation of the mass parameter with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles concentration and roughness amplitude when journal bearing operated under dimensionless load  $W$  equal to 7

## 5. Conclusions

The static and dynamic characteristics of rough journal bearings with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives under thermohydrodynamic lubrication were theoretically examined. The time-dependent modified Reynolds equation and the approximated adiabatic energy equation were formulated and solved numerically. This research can be summarized as follows.

- 1) For journal bearings with smooth and rough surfaces with both transverse roughness patterns and longitudinal roughness patterns under static characteristics, the increase of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles significantly effect on the reduction of both the film temperature and the eccentricity ratio. Therefore, the load-carrying capacity and minimum film thickness are increased for journal bearings with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles.
- 2) For dynamics characteristics, journal bearings with longitudinally roughness and lubricated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles tend significantly to increase the stability regions.

## Nomenclature

$A_h$	Roughness amplitude, m
$b$	Damping coefficient, N s/m
$B_{xx} \dots B_{zz}$	Dimensionless damping coefficient, $B = c \omega b / w$
$c$	Radius clearance, m
$C_{p,nf}$	Specific heat capacity of nanofluids, J /kg K
$C_{p,par}$	Specific heat capacity of solid particles, J /kg K
$C_{p,water}$	Specific heat capacity of water, J /kg K
$F_{fric}$	Friction Force, N
$\bar{F}_{fric}$	Dimensionless friction force, $\bar{F}_{fric} = (c^2 / \mu_0 \omega r^3 L) F_{fric}$
$h$	Film thickness, m

$\bar{h}$	Dimensionless film thickness, $\bar{h}=h/c$
$k$	Stiffness coefficient, N/m
$K_{xx} \dots K_{zz}$	Dimensionless stiffness coefficient, $K=c k/w$
$L$	Bearing length, m
$M$	Dimensionless mass, $M=(c\omega^2/w)m$
$p$	Fluid film pressure, Pa
$\bar{p}$	Dimensionless film pressure, $\bar{p}=(c^2/\mu_0\omega r^2)(p-p_{atm})$
$r$	Journal radius, m
$T$	Mean temperature of lubricant across the film, K
$T_0$	Inlet lubricant temperature, K
$\bar{T}$	Dimensionless film temperature, $\bar{T}=(\rho C_p c^2/\mu_0\omega r^2)(T-T_0)$
$w$	Load, N
$W$	Dimensionless load, $W=(c^2/\mu_0\omega r^3 L)w$
$x$	Coordinate in a vertical direction
$y$	Coordinate in an axial direction
$z$	Coordinate in a horizontal direction
$\Omega$	Angular velocity of whirl, rad/s
$\bar{\Omega}$	Whirl ratio, $\bar{\Omega}=\Omega/\omega$
$\omega$	Angular velocity, rad/s
$\varepsilon$	Eccentricity ratio of journal bearing, $\varepsilon=e/c$
$\theta$	The circumferential angle measured from the vertical axis, rad
$\phi$	Attitude angle, rad
$\varphi$	Particle volume concentration
$\lambda_1$	The wave length of roughness, m
$\beta$	Coefficient of thermal expansivity, 1/K
$\gamma$	Viscosity-Temperature coefficient, 1/K
$\rho$	The apparent density of lubricant at the reference temperature, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{nf}$	The density of nanofluids, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{par}$	The density of solid particles, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{water}$	The density of water, kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	The apparent viscosity of the lubricant, Pa.s
$\mu_{nf}$	The viscosity of nanofluids, Pa.s
$\mu_{water}$	The viscosity of water, Pa.s
$\Delta X$	Dimensionless displacement in the x-direction, $\Delta X=\Delta x/c$
$\Delta Z$	Dimensionless displacement in the z-direction, $\Delta Z=\Delta z/c$

### References

- [1] Pinkus O and Bupara S S 1979 *J. Lubr. Technol.* **101**(4) 492-496
- [2] Smith R N and Tichy J A 1981 *J. Lubr. Technol.* **103**(3) 443-452
- [3] Hashimoto H and Mongkolwongrojn M 1994 *ASME J. Tribol.* **116**(4) 672-680
- [4] Bouyer J and Fillon M 2004 *ASME J. Tribol.* **126**(4) 819-822
- [5] Majumdar B C and Ghosh M K 1990 *J. Tribol.* **112**(1) 73-77
- [6] Turaga R Sekhar A S and Majumdar B C 1999 *Tribol. Int.* **32**(5) 231-236

- [7] Gururajan K and Prakash J 1999 *J. Tribol.* **121**(1) 139-147
- [8] Nguyen C T Desgranges F Galanis N Roy G Maré T, Boucher S and Angue M H 2008 *Int. J. Therm. Sci.* **47**(2) 103-111
- [9] Xuan Y and Roetzel W 2000 *Int. J. Heat Mass Transfer.* **43**(19) 3701-3707
- [10] Yu W Xie H Li Y Chen L and Wang Q 2011 *Colloids Surf. A.* **380**(1) 1-5
- [11] Peng D X Kang Y Hwang R M Shyr S S and Chang Y P 2009 *Tribol. Int.* **42**(6) 911-917
- [12] Murshed S M S Leong K C and Yang C 2008 *Int. J. Therm. Sci.* **47**(5) 560-568
- [13] Chandrasekar M Suresh S and Chandra Bose A 2010 *Exp. Therm Fluid Sci.* **34**(2) 210-216
- [14] Shenoy B Binu K Pai R Rao D and Pai R S 2012 *Tribol. Int.* **45**(1) 38-42
- [15] Mongkolwongrojn M and Rattapasakorn S 2014 *J. Adv. Mech. Des. Syst.* **8**(3) JAMDSM0042-JAMDSM0042
- [16] Mongkolwongrojn M and Aiumpronsin C 2010 *Tribol. Intl.* **43**(5) 1027-1034
- [17] Gunnuang W Aiumpronsin C and Mongkolwongrojn M 2013 *Proc. Int. Conf. on Mechanical Engineering (Pattaya, Chonburi)* p 138
- [18] Gunnuang W Aiumpronsin C and Mongkolwongrojn M 2015 *Appl. Mech. Mater.* **751** 137-142
- [19] Pak B C and Cho Y I 1998 *Exp. Heat Transfer* **11**(2) 151-170
- [20] Brinkman H 1952 *J. Chem Phys.* **20**(4) 571-571
- [21] Lund J W 1987 *J. Tribol.* **109**(1) 37-41
- [22] Majumdar B C 1975 *Wear.* **31**(2) 287-294

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 12<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering  
13<sup>th</sup> – 16<sup>th</sup> December 2022  
Phuket, Thailand



AMM0004

## Stability Analysis of Rough Journal Bearings with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle Additives

W Gunnuang<sup>1</sup>, C Aiumbhornsin<sup>2,\*</sup>, J Wongsan-Ngam<sup>1</sup>, and M Mongkolwongroj<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, School of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

<sup>2</sup>Department of Maritime Engineering, Faculty of International Maritime Studies,  
Kasetsart University, Sri Racha, Chonburi, 20230, Thailand

<sup>3</sup>College of Advanced Manufacturing Innovation,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

\* Corresponding Author: chataium@gmail.com

**Abstract.** This research focuses on the influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on the stability of rough journal bearings lubricated with water mixed with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. The dynamic characteristics of the rough journal bearings with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles were examined in terms of journal center trajectories for different values of the length-to-diameter ratio of bearings (L/D=0.5, 1, 2). The stability of journal bearings has been examined using the linearizing-bearing-reaction method under adiabatic conditions. The results show that the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives significantly improved the stability of water-lubricated journal bearings with longitudinal roughness patterns.

### 1. Introduction

Lubrication by water has been widely used in marine and food industries. The advantage of water lubrication is that it reduces the pollution released to the environment that otherwise occurs from using oil lubrication. Hirani and Verma [1] presented bearing wear and analyzed seawater lubrication in a marine shaft bearing under low-speed conditions. Qin et al. [2] showed that the new type of water-lubricated stern tube bearings could reduce noise and improve the low-speed performance. In addition, water lubrication can generate a small temperature rise due to its low viscosity.

Earlier authors that have studied such concepts concluded that the addition of particles greatly improved the lubrication characteristics that develop the heat transfer properties of fluids [3-7]. It is difficult to prevent the manufacturing errors caused by the surface roughness, which has a significant effect on the performance of journal bearings. In addition, to be inherently stable, the dynamic effects of the journal bearings should be avoided during operations because the stability of the journal bearing is very important. Therefore, the surface roughness should be considered in the analysis because it has a significant influence on the stability, especially when journal bearings are operated under severe conditions.

The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additive is used for decreasing the temperature rise on the fluid lubricant; moreover, it increases the film thickness of the lubricant, consequently preventing wear and maintaining

the life of the journal bearings. Mongkolwongrojn et al. [8] and Gunnuang et al. [9] determined the film thickness; moreover, the friction coefficient increased with an increasing particle concentration, which substantially affects the performance of rough journal bearings. Gunnuang and Aiumbhornsri [10] showed that the addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles improves the performance characteristics of bearings by increasing the load-carrying capacity and minimum film thickness of both smooth and rough surface patterns for  $L/D=1$ .

This research aims to determine the influence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives on the stability of water-lubricated rough journal bearings. The stability results have been solved through the numerical method and illustrated in terms of the journal center trajectory for various values of the length-to-diameter ratio ( $L/D=0.5, 1, 2$ ) on the journal bearings with transverse and longitudinal surface roughness patterns.

## 2. Theory

### 2.1 Reynolds equation

The pressure profile of the lubricant film within the bearing clearance is governed by the Reynolds equation in unsteady form and can be written as

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \left( \frac{\omega}{2} - \frac{d\Phi}{dt} \right) \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

where  $\mu$  is the lubricant viscosity, which is a function of the film temperature.

### 2.2 Equation of journal motion

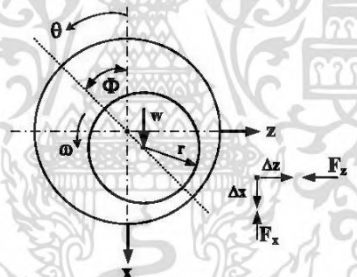


Figure 1. Journal bearing geometry.

According to Lund [11], the equation of the journal motion can be written as

$$m\Delta\ddot{x} + b_{xx}\Delta\dot{x} + k_{xx}\Delta x + b_{xz}\Delta\dot{z} + k_{xz}\Delta z = 0 \quad (2)$$

$$m\Delta\ddot{z} + b_{zz}\Delta\dot{z} + k_{zz}\Delta z + b_{zx}\Delta\dot{x} + k_{zx}\Delta x = 0 \quad (3)$$

where  $\Delta x$  and  $\Delta z$  are the small amplitude motions measured from the static equilibrium position. Performing a first-order Taylor series expansion of the film pressure gives

$$p = p_0 + p_x \Delta x + p_z \Delta z + p_{\dot{x}} \Delta \dot{x} + p_{\dot{z}} \Delta \dot{z} \quad (4)$$

where  $p_0 = (p)_0$ ,  $P_x = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_0$ ,  $P_z = \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_0$ ,  $P_{\dot{x}} = \left(\frac{\partial p}{\partial \dot{x}}\right)_0$ ,  $P_{\dot{z}} = \left(\frac{\partial p}{\partial \dot{z}}\right)_0$

The equation of motion can be written in dimensionless form as

$$M \Delta \ddot{X} + B_{xx} \Delta \dot{X} + K_{xx} \Delta X + B_{xz} \Delta \dot{Z} + K_{xz} \Delta Z = 0 \quad (5)$$

$$M \Delta \ddot{Z} + B_{zz} \Delta \dot{Z} + K_{zz} \Delta Z + B_{zx} \Delta \dot{X} + K_{zx} \Delta X = 0 \quad (6)$$

where the dimensionless spring and damping coefficients can be obtained as follows:

$$M = \frac{c\omega^2}{w} m \quad (7)$$

$$B_{xx} = -\frac{c\omega}{w} \iint p_x r \cos \theta d\theta dy \quad (8)$$

$$B_{zz} = -\frac{c\omega}{w} \iint p_z r \cos \theta d\theta dy \quad (9)$$

$$B_{zx} = -\frac{c\omega}{w} \iint p_x r \sin \theta d\theta dy \quad (10)$$

$$B_{xz} = -\frac{c\omega}{w} \iint p_z r \sin \theta d\theta dy \quad (11)$$

$$K_{xx} = -\frac{c}{w} \iint p_x r \cos \theta d\theta dy \quad (12)$$

$$K_{zz} = -\frac{c}{w} \iint p_z r \cos \theta d\theta dy \quad (13)$$

$$K_{zx} = -\frac{c}{w} \iint p_x r \sin \theta d\theta dy \quad (14)$$

$$K_{xz} = -\frac{c}{w} \iint p_z r \sin \theta d\theta dy \quad (15)$$

### 3. Numerical Solution

The parameters of the journal bearings and the physical properties of the lubricant are shown in Table 1 and Table 2, respectively. The values of the length-to-diameter ratio of bearings with transverse and longitudinal roughness patterns are 0.5, 1, and 2. The energy equation, lubricant viscosity, and film thickness equations [10] have been used. The modified Reynolds and energy equations under adiabatic conditions were discretized using the finite difference method. The relative accuracy for the calculation is less than or equal to  $1 \times 10^{-6}$ . The dynamic performance characteristics of water-lubricated journal bearings with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives are examined and presented in terms of the journal center trajectory. The path started at the position near the eccentric point between the journal and bearing. The calculation of the equation of motion is carried out through the fourth-order Runge–Kutta method.

Table 1. Parameters of the journal bearings.

Parameter	Detail
Journal radius, $r$	0.015 m
Radius clearance, $c$	30 $\mu\text{m}$
Bearing length, $L$	0.015 m, 0.03 m, 0.06 m

Table 2. Physical properties of the lubricant and nanoparticles.

Parameter	Detail
Lubricant type	water
The density of $\text{Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles, $\rho_{par}$	3890 $\text{kg m}^{-3}$
Specific heat capacity of $\text{Al}_2\text{O}_3$ nanoparticle, $C_{p, par}$	729 $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Inlet lubricant temperature, $T_0$	313 K

### 4. Results

In this study, the roughness amplitude is 4  $\mu\text{m}$  for both transverse and longitudinal roughness patterns. Table 3 shows the effect of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive on the dynamic characteristics of water-lubricated journal bearings at different roughness patterns for  $L/D=1$ . The results show that the eccentricity ratios of both the longitudinal and transverse patterns decrease with an increasing concentration of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additive. For journal bearings lubricated with water mixed with 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles, the eccentricity ratio decreases from 0.797 to 0.788 for longitudinal roughness patterns and from 0.754 to 0.746 for transverse roughness patterns. In addition, it clearly shows that the dimensionless mass of the transverse roughness patterns is higher than the longitudinal roughness patterns and is in good agreement with the previously published work [12]. Furthermore,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives significantly increase  $K_{xx}$  for longitudinal roughness patterns, whereas they slightly decrease  $K_{xx}$  for the transverse patterns. For longitudinal roughness patterns,  $K_{xx}$  increased from 0.748 to 1.02, or approximately 36.4% compared with clean water without  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle additives. Therefore, the addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles significantly improves the stability of journal bearings with longitudinal roughness patterns.

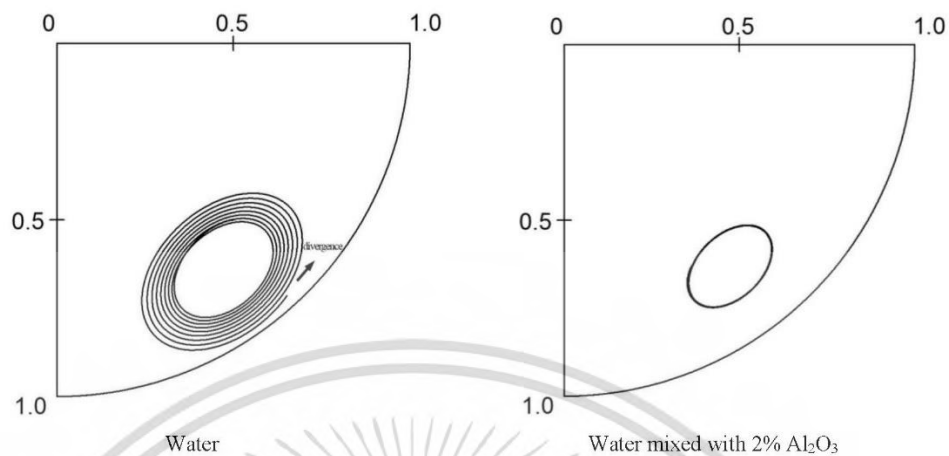
**Table 3.** The simulation results for longitudinal and transverse roughness patterns at  $L/D=1$ .

Parameter	Longitudinal patterns		Transverse patterns	
	Water	Water mixed with 2% $Al_2O_3$	Water	Water mixed with 2% $Al_2O_3$
$W$	7.345	7.345	7.345	7.345
$\varepsilon$	0.797	0.788	0.754	0.746
$\Phi$	36.25	36.89	31.68	32.24
$M$	5.423	5.699	6.728	6.78
$K_{xx}$	0.748	1.02	4.44	4.254
$K_{yy}$	4.201	4.198	4.799	4.727
$K_{zz}$	-2.695	-2.639	-1.774	-1.815
$K_{xy}$	3.121	3.116	2.755	2.751
$B_{xx}$	9.216	9.041	7.98	7.884
$B_{yy}$	4.889	4.833	3.462	3.439
$B_{zz}$	4.896	4.839	3.464	3.441
$B_{xy}$	6.058	6.177	4.497	4.6

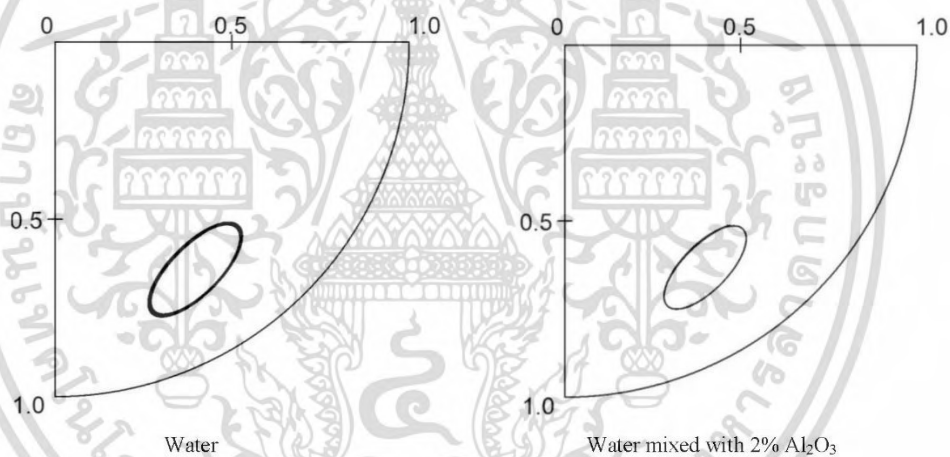
Figure 2 shows the effects of the  $Al_2O_3$  nanoparticle additive on the journal center trajectory of water-lubricated journal bearings for transverse roughness patterns and longitudinal roughness patterns under a dimensionless load-carrying capacity of 7.34 when  $L/D=1$ . The journal bearings operated at the dimensionless mass of transverse and longitudinal roughness patterns are 6.78 and 5.7, respectively. It is clear from this figure that the center trajectory of journal bearings lubricated with water mixed with 2%  $Al_2O_3$  nanoparticles is more stable than clean water. The divergence of the line path of the center trajectory for longitudinal roughness patterns for clean water is clearly shown in Figure 2(a). Therefore, the addition of  $Al_2O_3$  nanoparticles increases the stability only slightly for transverse roughness patterns while dramatically increasing the stability of journal bearings with longitudinal roughness patterns.

Figure 3 shows the effects of the  $Al_2O_3$  nanoparticle additive on the journal center trajectory of water-lubricated journal bearings for transverse roughness patterns and longitudinal roughness patterns when  $L/D=2$ . The journal bearing operated at the dimensionless load-carrying capacity is 6.12, and the dimensionless mass is 6.0 for both transverse and longitudinal roughness patterns. The elliptic orbital path of water mixed with 2%  $Al_2O_3$  nanoparticles is more stable than that of clean water. In addition, the journal center trajectory for the longitudinal roughness patterns of clean water is a divergence line, as shown in Figure 3(a). Therefore, the  $Al_2O_3$  nanoparticle additive significantly increases the stability, especially for journal bearings with longitudinal roughness patterns.

Figure 4 shows the effects of the  $Al_2O_3$  nanoparticle additive on the journal center trajectory of water-lubricated journal bearings for longitudinal roughness patterns when  $L/D=0.5$ . The journal bearings are operated at a dimensionless load-carrying capacity of 3.92 and dimensionless mass of 7.5. The simulation results show that the stability of the journal bearings of the water mixed with 2%  $Al_2O_3$  nanoparticle additives is increased due to the elliptical orbital path being smaller than clean water. Considering the line path of the journal center trajectory, the  $Al_2O_3$  nanoparticle additive is dramatically affected, increasing the stability of the water-lubricated journal with longitudinal roughness patterns.



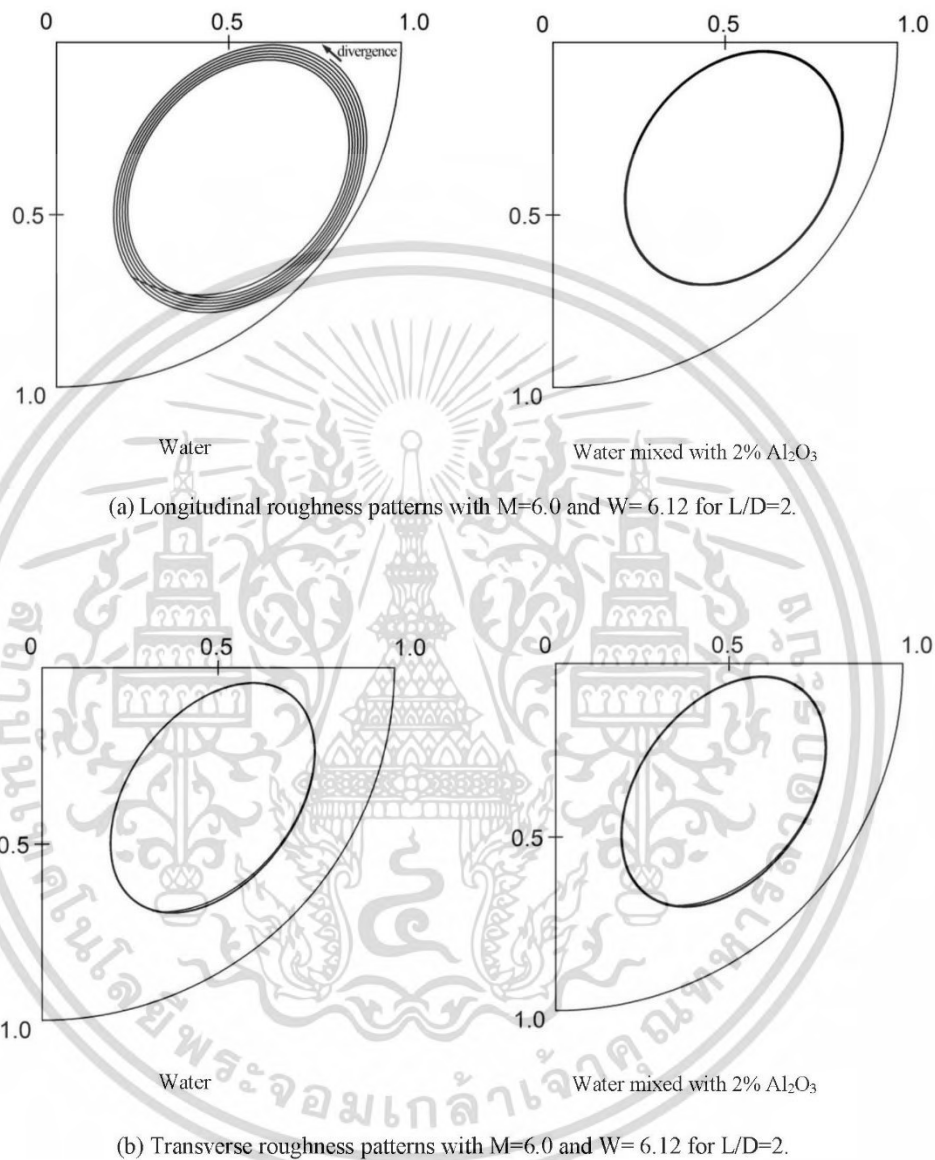
(a) Longitudinal roughness patterns with  $M=5.7$  and  $W=7.34$  for  $L/D=1$ .



(b) Transverse roughness patterns with  $M=6.78$  and  $W=7.34$  for  $L/D=1$ .

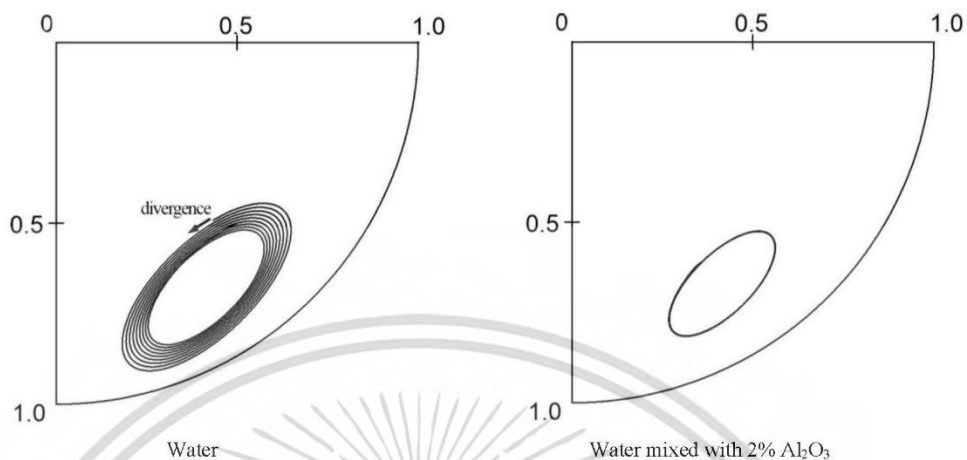
**Figure 2.** Variation in the journal center trajectory with the  $Al_2O_3$  nanoparticle concentration of the water-lubricated journal bearings at  $L/D=1$ . (a) Longitudinal patterns. (b) Transverse patterns.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Figure 3.** Variation in the journal center trajectory with the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle concentration of the water-lubricated journal bearings at  $L/D=2$ . (a) Longitudinal patterns. (b) Transverse patterns.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Longitudinal roughness patterns with  $M=7.5$  and  $W= 3.92$  for  $L/D=0.5$ .

**Figure 4.** Variation in the journal center trajectory with the  $Al_2O_3$  nanoparticle concentration of the water-lubricated journal bearings at  $L/D=0.5$  for longitudinal roughness patterns with  $M=7.5$  and  $W= 3.92$ .

**5. Conclusions**

The dynamic characteristics of water-lubricated journal bearings with  $Al_2O_3$  nanoparticle additives for transverse and longitudinal roughness patterns under thermo-hydrodynamic lubrication were theoretically examined using the journal center trajectory at different values of the length-to-diameter ratio ( $L/D=0.5, 1, 2$ ). In summary, the addition of  $Al_2O_3$  nanoparticles improves the stability of water-lubricated journal bearings with longitudinal roughness patterns.

**Nomenclature**

- $b$  damping coefficient, N s/m
- $B_{xx} \dots B_{zz}$  dimensionless damping coefficient,  $B = c \omega b / w$
- $h$  film thickness, m
- $k$  stiffness coefficient, N/m
- $K_{xx} \dots K_{zz}$  dimensionless stiffness coefficient,  $K = c k / w$
- $L$  bearing length, m
- $M$  dimensionless mass,  $M = c \omega^2 m / w$
- $p$  fluid film pressure, Pa
- $r$  journal radius, m

$w$	load, N
$W$	dimensionless load, $W = (c^2/\mu_0 \omega r^3 L) w$
$x$	coordinate in a vertical direction
$y$	coordinate in an axial direction
$z$	coordinate in a horizontal direction
$\omega$	angular velocity, rad/s
$\varepsilon$	eccentricity ratio of journal bearing, $\varepsilon = e/c$
$\theta$	circumferential angle measured from the vertical axis, rad
$\phi$	attitude angle, rad
$\mu$	apparent viscosity of the lubricant, Pa.s
$\Delta X$	dimensionless displacement in the x direction, $\Delta X = \Delta x/c$
$\Delta Z$	dimensionless displacement in the z direction, $\Delta Z = \Delta z/c$

#### References

- [1] Hirani H and Verma M 2009 *Tribol. Int.* **42** 378-390
- [2] Qin H-l Zhou X-c Zhao X-z Xing J-t and Yan Z-m 2015 *Wear.* **328-329** 257-261
- [3] Nguyen C T Desgranges F Galanis N Roy G Maré T Boucher S and Angue Mintsas H 2008 *Int. J. Therm. Sci.* **47**(2) 103-111
- [4] Xuan Y and Roetzel W 2000 *Int. J. Heat Mass Transf.* **43** 3701-3707
- [5] Yu W Xie H Li Y Chen L and Wang Q 2011 *Colloids, Surf. A. Physicochem. Eng. Asp.* **380**(1-3) 1-5
- [6] Murshed S M S Leong K C and Yang C 2008 *Investigations of Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids.* *International Int. J. Therm. Sci.* **47**(5) 560-568
- [7] Chandrasekar M Suresh S and Chandra Bose A 2010 *Exp. Therm. Fluid. Sci.* **34**(2) 210-216
- [8] Mongkolwongrojn M Aiumprorsin C and Thammakosol K 2006 *J. Tribol.* **128**(4) 771-777
- [9] Gunnuang W Aiumprorsin C and Mongkolwongrojn M 2015 *Appl. Mech. Mater.* **751** 137-142
- [10] Gunnuang W Aiumprorsin C Wongsangam J and Mongkolwongrojn M 2021 *IOP. Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **1137**(1) 012022
- [11] Lund JW 1987 *J. Tribol.* **109**(1) 37-41
- [12] Mongkolwongrojn M and Aiumprorsin C 2010 *Tribol. Int.* **43**(5) 1027-1034

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	วลีพรรณ กันเนื่อง
วัน เดือน ปีเกิด	17 เมษายน 2518
ที่อยู่	ต.ตงพระราม อ.เมือง จ.ปราจีนบุรี 25000
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้