สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองผลของอนุภาคนาโนต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในปัญหาการสัมผัสแบบเส้น

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF NANOPARTICLES UNDER THERMOELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION IN LINE CONTACT PROBLEM

T132948

สุนทรี รัตภาสกร
SOUNTAREE RATTAPASAKORN

วพ.
ส814ก
2557
เลขหมู่...
เลขทะเบียน 132948
วัน,เดือน,ปี 10 ก.ย. 2557
b. 18621602
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-D-058-121
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาและการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF NANOPARTICLES UNDER THERMOELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION IN LINE CONTACT PROBLEM

SOUNTAREE RATTAPASAKORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-D-058-121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2014
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองผลของอนุภาคนาโนต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในปัญหาการสัมผัสแบบเส้น

Thesis Title Numerical Study on the Effect of Nanoparticles under Thermoelastohydrodynamic Lubrication in Line Contact Problem

นักศึกษา นางสุนทรี รัตภาสกร

รหัสประจำตัว 49060106

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-D-058-121

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร	
รศ.ดร.วันชัย อัศวภูษิตกุล	
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองผลของอนุภาคนาโนต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในปัญหาการสัมผัสแบบเส้น
นักศึกษา	นางสุนทรี รัตภาสกร
รหัสประจำตัว	49060106
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของอนุภาคของแข็งที่มีต่อเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบฟิล์มบางที่มีการสัมผัสเป็นเส้นในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว ของลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นเรียบ โดยพิจารณาทั้งผิวเรียบและผิวหยาบ เมื่อใช้สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวและของเหลวผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็งชนิดอนุภาคนาโน โดยใช้วิธีคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข หาคำตอบของสมการโมดิไฟย์เรย์โนลด์ สมการพลังงาน สมการการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ สมการการเปลี่ยนแปลงความหนืด ความหนาแน่นและการนำความร้อนของสารหล่อลื่น โดยใช้วิธีระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง ร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน และระเบียบวิธีมัลติกริด เพื่อหาการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น พบว่าเมื่อสารหล่อลื่นเป็นของเหลว สำหรับการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ความหยาบของผิวสัมผัสมีผลอย่างรุนแรงต่ออุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหยาบของผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสารหล่อลื่นเป็นของเหลวผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็งชนิดอนุภาคนาโน กรณีการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งชนิดอนุภาคนาโนมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Numerical Study on the Effect of Nanoparticles under Thermoelastohydrodynamic Lubrication in Line Contact Problem
Student	Mrs.Sountaree Rattapasakorn
Student ID.	49060106
Degree	Doctor of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

This research presents the effects of solid particles on characteristics of steady state and transient condition of thin film thermoelastohydrodynamic for cylinders in line contact with liquid lubricant and nanolubricant with smooth and rough surfaces. The simultaneous systems of time-dependent modified Reynolds equation, elasticity equation and energy equation with initial conditions were solved numerically using multigrid multilevel with full approximate technique to obtain the film pressure profile, film temperature profile and film thickness profile. The simulation results for thin film condition with liquid lubricant, the roughness amplitude has a significant effect on the film pressure and film temperature in the contact region. For increasing the surface roughness, the fluctuation of film thickness, film pressure and film temperature profile strongly depend on surface roughness amplitude. The effects of Al_2O_3 nanoparticle additives, surface roughness and sudden overload on TEHL of two surfaces in line contact were examined. The minimum film thickness increases significantly with an increase in nanoparticle concentration.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ที่สนับสนุนทุนสำหรับการนำเสนอผลงาน

ขอขอบคุณ ดร.เจษฎา พานิชกรณ์ และ ผศ.ดร.ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว ที่ช่วยให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และข้อแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณธิติพงษ์ รัตภาสกร และกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านตลอดจนครูและอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุนทรี รัตภาสกร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XXXI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง	4
2.1 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	4
2.2 คุณสมบัติของวัสดุรับแรง	8
2.3 สมการสมมุติฐานของเฮิรตซ์	16
2.4 สมการเรย์โนลด์	17
2.5 สมการความหนืดของสารหล่อลื่น	21
2.6 สมการพลังงาน	22
บทที่ 3 วิธีเชิงตัวเลข	24
3.1 สมการในรูปแบบไร้มิติ	24
3.2 การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก	25
3.3 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง	28
3.4 ระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน	30
บทที่ 4 ผลการจำลอง	37
4.1 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวเมื่อรับภาระต่าง ๆ	38
4.2 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวเมื่อทรงกระบอกมีค่าความเร็วเฉลี่ยต่าง ๆ	57
4.3 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวเมื่อทรงกระบอกมีค่าความหยาบผิวต่าง ๆ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัวเมื่อทรงกระบอกรับภาระต่างๆ 94

4.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัวเมื่อทรงกระบอกเป็นผิวหยาบต่างๆ.... 117

4.6 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัวเมื่อทรงกระบอกรับภาระแบบไม่คงที่ 128

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....

5.1 สรุปผลการวิจัย 164

5.2 ข้อเสนอแนะ 169

เอกสารอ้างอิง 170

ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 173

ภาคผนวก ข. Flow Chart การคำนวณ 185

ประวัติผู้เขียน 187

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สมการความหนืดของสารหล่อลื่นนาโนตามความเข้มข้นของอนุภาคนาโน........................... 8
4.1 คุณสมบัติของทรงกระบอกและสารหล่อลื่น... 37
4.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นของแข็งอลูมิน่า (Al_2O_3)... 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน CuO	7
2.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน SiO_2	7
2.4 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน TiO_2	8
2.5 ลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบ	9
2.6 ลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบที่อาจทำให้การวัดผิดพลาด	10
2.7 เปรียบเทียบเส้นอ้างอิง 3 แบบ a.) ระบบ M b.) ค่าเฉลี่ย 10 จุด c.) กำลังสองน้อยสุด	11
2.8 แสดงโค้งแอบบอทของพื้นผิวสองแบบที่แตกต่างกัน	14
2.9 แสดงการหาความโค้งน่าจะเป็นจากผิวหยาบที่วัดได้	15
2.10 แสดงแรงที่กระทำต่อเอลิเมนต์ของของไหล	18
3.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด	28
3.2 แสดงการประมาณค่าของเวกเตอร์จากระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ Ω_H ไปเป็นระดับที่มีจำนวนกริดแบบละเอียด Ω_h	33
3.3 การประมาณค่าของเวกเตอร์ส่งถ่ายของระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ (Ω_H) จากการถ่ายโอนค่าจากระดับที่ละเอียดกว่า (Ω_h)	34
3.4 (ก) วัฏจักรของมัลติกริดแบบวี และ (ข) แสดงการถ่ายโอนค่าระหว่างระดับ	35
3.5 วัฏจักรของมัลติกริดแบบ W-cycle	35
3.6 ขั้นตอนการคำนวณแบบ FMG 3 รูปแบบคือ V-cycle, 2V-cycle และ W-cycle	36
4.1 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90	38
4.2 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร	39
4.3 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร	40
4.4 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 41

4.6 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร 41

4.7 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 42

4.8 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 43

4.9 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 44

4.10 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 44

4.11 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 45

4.12 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 45

4.13 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.14 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 47

4.15 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 47

4.16 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 48

4.17 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 48

4.18 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 49

4.19 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 50

4.20 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 50

4.21 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 51

4.22 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.23 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 52

4.24 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 52

4.25 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 54

4.26 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 54

4.27 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 55

4.28 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 55

4.29 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 56

4.30 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.31 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 57

4.32 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 58

4.33 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร 58

4.34 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร 59

4.35 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร 59

4.36 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร 60

4.37 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 61

4.38 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 61

4.39 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.40 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 62

4.41 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 63

4.42 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 63

4.43 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 65

4.44 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 65

4.45 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 สารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 66

4.46 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 66

4.47 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.48 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 67

4.49 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 68

4.50 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 69

4.51 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 69

4.52 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 70

4.53 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 70

4.54 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 71

4.55 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 72

4.56 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.57 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 73

4.58 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 73

4.59 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 74

4.60 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 74

4.61 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 76

4.62 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 76

4.63 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 77

4.64 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 77

4.65 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.66 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 78

4.67 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 79

4.68 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 80

4.69 แสดง ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 81

4.70 แสดง ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 81

4.71 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 82

4.72 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 82

4.73 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.74 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 85

4.75 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 85

4.76 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 86

4.77 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง).... 86

4.78 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 87

4.79 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง).... 87

4.80 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 88

4.81 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)...... 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.82 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % โดยปริมาตร........ 89

4.83 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % โดยปริมาตร........ 90

4.84 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % โดยปริมาตร........ 90

4.85 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตร........ 91

4.86 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตร........ 91

4.87 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตร........ 92

4.88 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร........ 92

4.89 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร........ 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.90 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร........ 93

4.91 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 94

4.92 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 95

4.93 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 95

4.94 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 96

4.95 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 96

4.96 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 97

4.97 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 97

4.98 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 98

4.99 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 98

4.100 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.101 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........... 99
4.102 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.................... 100
4.103 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 101
4.104 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 101
4.105 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 102
4.106 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 103
4.107 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 104
4.108 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 104
4.109 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร.................... 105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.110 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 106

4.111 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 106

4.112 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 107

4.113 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 108

4.114 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 108

4.115 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 110

4.116 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 110

4.117 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 111

4.118 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 (ขยายแกนแนวตั้ง)........ 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.119 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 112

4.120 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 (ขยายแกนแนวตั้ง)................................ 112

4.121 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร................................ 114

4.122 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)................................ 114

4.123 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร................................ 115

4.124 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)................................ 115

4.125 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร................................ 116

4.126 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)................................ 116

4.127 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........... 117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.128 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90......... 118

4.129 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........... 118

4.130 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90..................... 119

4.131 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90......... 119

4.132 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90......... 120

4.133 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.. 121

4.134 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.. 122

4.135 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.. 122

4.136 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.. 123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.137 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 123

4.138 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 124

4.139 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm 125

4.140 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm 125

4.141 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm 126

4.142 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 127

4.143 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 127

4.144 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 128

4.145 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.146 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 129

4.147 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 130

4.148 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 130

4.149 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 131

4.150 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 131

4.151 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 132

4.152 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 133

4.153 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 133

4.154 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.155 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 134

4.156 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 135

4.157 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 136

4.158 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 136

4.159 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 137

4.160 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 138

4.161 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 138

4.162 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90........ 139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.163 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 139

4.164 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 140

4.165 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 140

4.166 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 141

4.167 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 142

4.168 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 142

4.169 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 143

4.170 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร 143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.171 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........................ 144

4.172 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........................ 145

4.173 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........................ 145

4.174 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........................ 146

4.175 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1........................ 147

4.176 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1........................ 147

4.177 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1........................ 148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.178 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 149

4.179 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 149

4.180 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 150

4.181 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90.. 151

4.182 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90.. 151

4.183 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90.. 152

4.184 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90.. 152

4.185 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90.. 153

4.186 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90.. 153

4.187 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.. 154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.188 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 155

4.189 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 155

4.190 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 156

4.191 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 156

4.192 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร........ 157

4.193 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 158

4.194 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 158

4.195 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร........ 159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า
4.196 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90................................ 160
4.197 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90................... 160
4.198 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90................... 161
4.199 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร.. 162
4.200 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร... 162
4.201 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร... 163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A พื้นที่หน้าตัด, m^2

b ความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัส, m

$$b = R_X \left(\frac{8W'_Z}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

C_{WT} สัดส่วนของภาระที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับภาระอ้างอิง

$$C_{WT} = \frac{w'_Z(t)}{w'_0}$$

C_{RT} สัดส่วนของรัศมีความโค้งที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับตำแหน่งอ้างอิง

$$C_{RT} = \frac{R_X(t)}{R_0}$$

$D(X)$ Dimensionless of combined surface roughness ของทรงกระบอก

$E_{1,2}$ ค่า Modulus of Elasticity ของทรงกระบอก 1 และ 2, Pa

E_s ค่า Modulus of Elasticity ของสารหล่อลื่นของแข็ง, Pa

E' Effective Modulus of Elasticity ของทรงกระบอก, Pa

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2}\left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}\right)$$

h ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น, m

h_0 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง, m

H ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ

H_0 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบไร้มิติ

k ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่น , W/(m-K)

k_0 ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศ , W/(m-K)

k_n ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน, W/(m-K)

$\bar{k}$ ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่นนาโนแบบไร้มิติ

$\bar{k}_P$ ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ

$\bar{k}_n$ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนแบบไร้มิติ

m_0 Apparent Viscosity ของสารหล่อลื่น, Pa-s

n Power law index

p ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น, Pa

P ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ

$$P = \frac{p}{P_H}$$

P_H ความดันสูงสุดในการสัมผัสของ Hertz, Pa

$$P_H = E'\left(\frac{W'_Z}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$R_{1,2}$ รัศมีของทรงกระบอก 1 และ 2, m

R_0 รัศมีของทรงกระบอกอ้างอิง, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_X Curvature Sum, m

$$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

S_X อัตราส่วนการลื่นไถล

t เวลา, s

$\bar{t}$ เวลาแบบไร้มิติ

T อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น, K

u ความเร็วของฟิล์มสารหล่อลื่น, m/s

$u_{1,2}$ ความเร็วผิวของทรงกระบอก 1 และ 2, m/s

u_0 ความเร็วผิวอ้างอิง, m/s

u^* ความเร็วของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ

w'_Z ภาระที่กระทำ, N/m

w'_0 ภาระที่กระทำอ้างอิง, N/m

$\dot{W}_0$ ภาระที่กระทำอ้างอิงแบบไร้มิติ

z โคออร์ดิเนต z , m

x โคออร์ดิเนต x, m

X โคออร์ดิเนต x แบบไร้มิติ

z โคออร์ดิเนต z, m

Z โคออร์ดิเนต z แบบไร้มิติ

Z_1 Viscosity-Pressure index

Greek symbols

θ ค่าอุณหภูมิของสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ

μ^* ค่าความหนืดของสารหล่อลื่น, Pa-s

μ_0 ความหนืดของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิง, Pa-s

μ_s ความหนืดของสารหล่อลื่นที่เป็นสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนี่ยน, Pa-s

$\bar{\mu}_P$ ความหนืดของสารหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนแบบไร้มิติ

$\bar{\mu}_R$ ความหนืดของสารหล่อลื่นที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดันแบบไร้มิติ

τ Shear stress, Pa

ρ ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น , kg/m^3

ρ_0 ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง , kg/m^3

ρ_p ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นของแข็ง, kg/m^3

$\emptyset$ เปอร์เซ็นความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งโดยปริมาตร

λ เปอร์เซ็นความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งโดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหล่อลื่นเป็นกลไกที่สำคัญที่จะลดความสูญเสียของพลังงานและการชำรุดในเครื่องจักรกลที่มีการเสียดสีกันของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ โดยเฉพาะในภาวะที่มีสภาพการเสียดสีแบบรุนแรง เนื่องจากภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วน ความหยาบของผิวชิ้นส่วนและปัจจัยอื่นๆ ในขณะที่เกิดการเคลื่อนที่ นอกจากจะมีความเค้นที่เกิดขึ้นและส่งผลต่อความเสียหายของชิ้นส่วน ยังมีความร้อนเกิดขึ้นด้วยเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของน้ำมันจากผลการเปลี่ยนแปลงของความหนืด อีกทั้งในปัจจุบันลักษณะของชิ้นส่วนมีขนาดเล็กลงมากแต่มักถูกออกแบบให้สามารถรับภาระสูงได้ สารหล่อลื่นและสภาวะการหล่อลื่นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการยืดอายุของชิ้นส่วนนั้น ในการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางจำเป็นต้องคิดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากอาจส่งผลต่อผิวของชิ้นส่วนได้ ดังนั้นสารหล่อลื่นแบบของแข็งจึงได้นำมาใช้เพื่อรักษาสภาพของสารหล่อลื่นให้สามารถรับภาระที่กระทำและป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนเกิดการสัมผัสกัน

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางที่มีพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตรไฮโดรไดนามิกที่เกิดขึ้นในทรงกระบอกมีการสัมผัสเป็นเส้นในสภาวะคงตัวและในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นของแข็งมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคนาโน โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำ ความเร็ว และความเข้มข้นของอนุภาคนาโน

1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา

ขนาดฟิล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องจักรแบบสมัยใหม่มีขนาดเล็กลงจนเกือบสัมผัสกัน การปรับปรุงคุณภาพของสารหล่อลื่นได้มีการพัฒนาไปอย่างมากและเริ่มเติมของแข็งลงในสารหล่อลื่นเพื่อให้สามารถคงสภาพการหล่อลื่นในสภาวะที่รุนแรงได้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมการเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีสัมผัสเป็นเส้นโดย Dowson และ Higginson [1] เมื่อปี ค.ศ. 1966 ซึ่งวิธีเชิงตัวเลขนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางทั้งในการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกและเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก ในปี ค.ศ. 1989 Lee และ Hamrock [2] ได้แสดงการคำนวณการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัวด้วยระเบียบวิธีนิวตันราฟสันภายใต้ภาระที่กระทำต่ำ Bhattachajee และ Dast [3] ทำการศึกษาผลของค่าดัชนี power law ที่มีผลต่อความหนาฟิล์มน้ำมันและภาระที่กระทำ Khonsari, Wang และ Qi [4] ได้นำเสนอสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานสำหรับของไหลนอนนิวโตเนียนแบบ Liquid-Solid Lubricant ที่มีการสัมผัสเป็นเส้น ในปี ค.ศ. 1989 ซึ่งพบว่ามีผลกระทบอย่างมากต่อความหนาของฟิล์มน้ำมัน อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ภาระที่กระทำและค่าสัมประสิทธ์ความเสียดทาน ในปี ค.ศ. 1996 Evans และ Snidle [5] ได้พัฒนาสมการที่แสดงว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบของผิวชิ้นงาน Mongkolwongrojn, Aiumpornsin และ Thammakosol [6] ได้นำเสนอผลของการหล่อลื่นแบบ Liquid-Solid Lubricant ว่ามีผลต่ออุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่รับภาระแบบทันทีทันใด ในปี ค.ศ. 2006 Jin, Yang, Cui และ Dowson [7] [8] วิเคราะห์พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นามิกในสภาวะไม่คงตัวของการสัมผัสแบบวงรีสำหรับของไหลนิวโตเนียน เพื่อหาค่าความดันและความหนาของฟิล์มน้ำมันและพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัวมีผลคล้ายกับอิลาสโตไฮโดรไดนามิก ในปี ค.ศ. 2008 Mongkolwongrojn, Wongseedakaew และ Kennedy [9] ได้แสดงการวิเคราะห์การหล่อลื่นแบบกับอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัวสำหรับของไหลนอนนิวโตเนียนภายใต้แรงกระทำแบบแกว่ง พบว่า ความหยาบของผิวชิ้นงาน ความหนืดของสารหล่อลื่น และค่าดัชนี power law มีผลอย่างมากต่อรูปร่างของความหนาฟิล์มน้ำมันและรูปร่างของความดันฟิล์มน้ำมัน ในปี ค.ศ. 2004 Wang, Li, Tong และ Yang [10] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงเมื่อสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียนพบว่าความหนาฟิล์มจะมีค่าลดลงแต่อุณหภูมิสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับเพิ่มขึ้น ในปี ค.ศ. 2012 Mongkolwongrojn และ Panichakorn [11] นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงภายในสภาวะการรับภาระแบบกระแทก พบว่าผลของการรับภาระแบบกระแทกมีผลอย่างรุนแรงต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น Peng [12] แสดงผลว่าการเติมอนุภาคของเพชรและ SiO_2 ลงในน้ำมันพาราฟินช่วยลดการสึกหรอและลดแรงเสียดทานได้ดีกว่าสารหล่อลื่นพาราฟินเพียงอย่างเดียว Murshed [13] และ Chandrasekar [14] พบว่า ค่าการนำความร้อนและความหนืดของสารหล่อลื่นแบบนาโนเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น ในปี ค.ศ. 2012 Shenoy [15] เสนอผลของอนุภาคนาโนในการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของแบริ่ง พบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโนของ TiO_2 ลงในน้ำมันเครื่อง API-SF ช่วยให้สามารถรับภาระได้มากขึ้น ลดการรั่วออกด้านข้างและลดแรงเสียดทาน

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางของทรงกระบอกที่สัมผัสเป็นเส้น เมื่อคิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะคงตัวและในสภาวะไม่คงตัว ด้วยสารหล่อลื่นเหลว และ สารหล่อลื่นนาโน โดยศึกษาความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาแน่นและความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปลี่ยนค่า ภาระ ความเร็ว ความหยาบของผิว ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นนาโน

1.3.2 เพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะคงตัวและในสภาวะไม่คงตัวของทรงกระบอก ที่มีการสัมผัสเป็นเส้น โดยศึกษาความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาแน่นและความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปลี่ยนค่า ภาระ ความเร็ว ความหยาบของผิว ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นนาโน

1.3.3 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้น ในสภาวะคงตัวและในสภาวะไม่คงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาผลของอนุภาคของแข็งที่มีต่อเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบฟิล์มบาง โดยกำหนดขอบเขตของการศึกษาและตัวแปร ดังนี้

1.4.1 ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางของทรงกระบอกที่สัมผัสเป็นเส้น เมื่อคิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น

1.4.2 ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางของทรงกระบอกที่สัมผัสเป็นเส้นที่เกิดขึ้นในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว

1.4.3 สารหล่อลื่นที่ทำการศึกษาเป็นสารหล่อลื่นเหลว (Liquid Lubricant) และสารหล่อลื่นนาโน (Nanolubricant) ที่ร้อยละความเข้มข้นของ Al_3O_2 0.5, 0.75, 1, 1.5 และ 2

1.4.4 ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางของทรงกระบอกที่สัมผัสเป็นเส้นในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของความหยาบผิว ความเร็วของทรงกระบอก ภาระโหลดที่กระทำ ชนิดของสารหล่อลื่น และความเข้มข้นของสารหล่อลื่นนาโน

1.4.5 ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางของทรงกระบอกที่สัมผัสเป็นเส้นเมื่อรับภาระแบบกระแทกเทียบกับการสภาวะการทำงานปกติ ที่ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นนาโน ต่างๆ

1.4.6 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด (Multigrid Method) เพื่อสร้างสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานในสภาวะคงตัวและในภาวะไม่คงตัว เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบฟิล์มบาง เมื่อเป็นสารหล่อลื่นเหลวและสารหล่อลื่นนาโน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวเมื่อสารหล่อลื่น Liquid Lubricant และ Nanolubricant และผลของอนุภาคของแข็งที่มีต่อเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบฟิล์มบาง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นแบบ Nanolubricant ซึ่งจะเป็นการต่อยอดในการพัฒนาวิชาการทางด้าน ไตรโบโลยี (Tribology) และมีส่วนสำคัญต่อการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง

การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเกิดขึ้นในการหล่อลื่นที่รับภาระสูงหรือมีความเร็วของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ต่ำมาก ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าอยู่ในที่น้อยมากจนเกือบสัมผัสกัน ซึ่งเป็นสภาวะที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเนื่องจากความหนืดของสารหล่อลื่นจะอยู่ในช่วง 0.005 ถึง 0.01 และมีค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 7.5 μm ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกที่ค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 7.5 μm

2.1 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil)

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปโดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่น ประเภทของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งได้ ดังนี้

2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่นั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมันแร่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีพอและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ๆ บางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้คือ

- น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (vegetable or animal base oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้งาน

หลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีต่ำเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งาน เมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมาก ความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความลื่น และความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของ น้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา เป็นต้น

- **น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่** (mineral base oil) เป็น**น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซ แก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตา ไข และยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ทีเหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิกมักจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้ สุญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดีพอ

น้ำมันพื้นฐานหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมนั้นสามารถแยกคุณสมบัติได้ 3 พื้นฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับฐานของน้ำมันปิโตรเลียมที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานพาราฟินิก (paraffinic base oil) น้ำมันดิบ พาราฟินิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไฟสูง มีการระเหยตัวต่ำ รักษาคุณสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี จุดไหลเทสูง มีความถ่วงจำเพาะต่ำ มี

คุณสมบัติหล่อลื่นได้ดี เกิดไขได้ดี มีค่าดัชนีความหนืดสูง ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าแข็ง แต่หลุดร่อนำได้ง่าย โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยากมาก มีความต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ฟิล์มน้ำมันเหนียวและแข็งแรง

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานแนพธินิก (naphthenic base oil) น้ำมันดิบฐานแนพธินิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไปต่ำ มีการระเหยตัวต่ำ รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร มีจุดไหลเทต่ำ มีความ

ถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ เมื่อเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว การยึดเกาะโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดีเป็นอย่างส่วน มีความต้องทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบอะโรแมติก (aromatic bas oil) มีคุณสมบัติดังนี้

- มีค่าดัชนีความข้นใสต่ำ มีจุดไหลเทต่ำมาก ไม่มีไข คุณสมบัติทางการหล่อลื่นไม่ดี โครงสร้างการจับตัว

ระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร คุณสมบัติในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ ไม่รักษาคุณสมบัติทางเคมีให้แน่นอน มีความถ่วงจำเพาะสูง

2.1.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (synthetic base oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำเป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมามีอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้คือ

- โพลีแอลฟาโอลิฟิน (polyalphaolefin; PAO) เป็นสารที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำ

การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชั่นดี ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นเพราะราคาถูกลงและสามารถผลิตได้ง่าย

- เอสเทอร์(ester) ไดเอสเทอร์ (diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์(complex ester) เป็นสารที่มี

ค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ของเครื่องบินไอพ่น นอกจากนี้พวกฟอสเฟตเอสเทอร์(phosphate ester) ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

- โพลีไกลคอล(polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง

เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ เป็นต้น

- ซิลิโคน(silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ
- ฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน(halogenated hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน

(chlorofluorocarbons) หรือสารซีเอฟซี(CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจน เพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความอยู่ตัวเชิงความร้อนดีมาก

- โพลีเฟนนิลอีเทอร์(polyphenyl ether) เป็นสารที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมากถึง 800 องศาเซลเซียส

เช่น น้ำมันไฮดรอลิกในยานอวกาศ เนื่องจากมีความอยู่ตัวเชิงความร้อนสูงมาก และมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์ได้ด้วย

2.1.2 **คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน** น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างในตัวเองอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่

- ความหนืด หมายถึงความใสและความข้นของน้ำมันโดยวัสดุที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่เยื่อหล่อลื่นก็จะบางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความหนืดสูดย่อมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มน้ำมันหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่ด้วยกันหลายระบบแต่ที่นิยมใช้คือเซนติสโตกส์ (centistokes, cSt)

- ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

- จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย
- จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวน สำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจำเป็นจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ
- ดัชนีความหนืด (Viscosity index,VI) ตามธรรมดาแล้วนั้นน้ำมันจะมีความหนืดสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำและจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดเพื่อเป็นการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยถ้าค่าดัชนีความหนืดมีค่าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้าค่าดัชนีความหนืดต่ำอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย

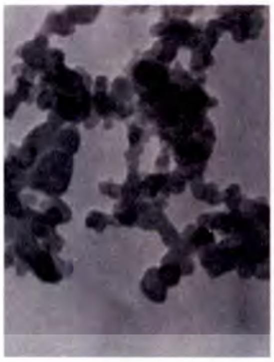
2.1.3 สารหล่อลื่นของแข็ง

ในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาคนาโน เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร [16] และเป็นสารประกอบได้หลายประเภท เช่น CuO, SiO_2, TiO_2 และ Al_2O_3 เป็นต้น ลักษณะรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.1, 2.2, 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ และสมการความหนืดเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนตามตารางที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน CuO [17]

รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน SiO_2 [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน TiO_2 [18]

รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโน Al_2O_3 [19]

ตารางที่ 2.1 แสดงสมการความหนืดของสารหล่อลื่นนาโนตามความเข้มข้นของอนุภาคนาโน [19]

S. No.	Model	Equation
1	Einstein model	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi$
2	Batchelor model	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2$
3	Ward model	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2 + (\eta\phi)^3$
4	Renewed Ward model	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi_e + (\eta\phi_e)^2 + (\eta\phi_e)^3$
5	Krieger–Dougherty equation (K–D model)	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$

where η is the intrinsic viscosity which is equal to 2.5 for hard spheres.

2.2 คุณสมบัติของวัสดุรับแรง

2.2.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว (Geometric characteristics of surfaces)

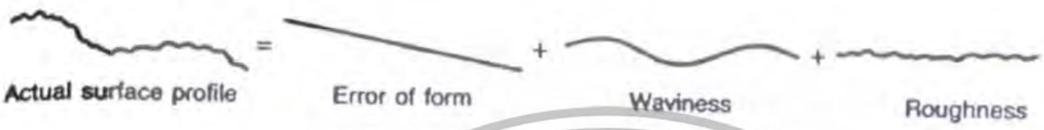
รูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิว โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทแสดงดัง รูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความผิดพลาดของรูปร่าง (Error of form) ผิวที่เบนไปจากรูปแบบที่กำหนดไว้ สาเหตุเนื่องมาจากว่าความผิดพลาดที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต

2. คลื่น (Waviness) คลื่นที่มีเกิดขึ้นจะเป็นแนวยาวในพื้นผิว โดยมักจะเกิดจากความสั่นสะเทือนที่ไม่ต้องการในเครื่องจักร

3. ความหยาบ (Roughness) ความไม่สม่ำเสมอที่รวมอยู่ในคลื่นและความผิดรูปจากการผลิต ซึ่งมักจะเกิดขึ้นขณะการตัดหรือการทำผิวสำเร็จ

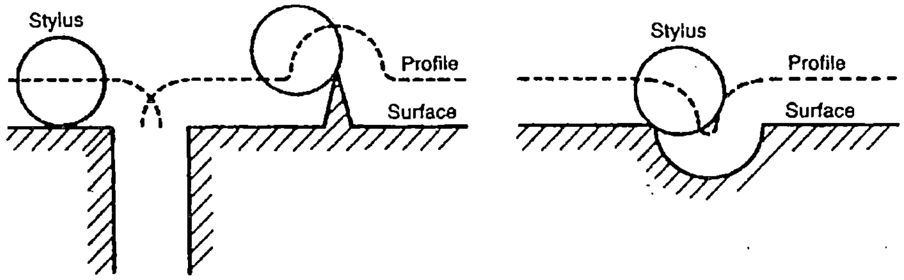


รูปที่ 2.5 ลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบ

2.2.2 การวัดด้วยปลายปากกาแหลม (Stylus measurements)

เครื่องมือวัดผิวหยาบที่มีใช้อยู่โดยทั่วไป จะแบ่งออกเป็น 2 อย่างหลักๆ คือ เครื่องมือที่มีการสัมผัสโดยตรง กับแบบที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือที่ทำการวัดผิวด้วยการใช้ปลายเข็มแหลมในการวัดขนาดของความหยาบ โดยจะอาศัยหลักการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแกนเข็มที่วัดชิ้นงานซึ่งจะมีการเลื่อนขึ้นและลงตามลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัด ในขณะที่แนวแกนเกิดการเลื่อนขึ้นลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นและแปลงออกมาเป็นสัญญาณดิจิตอล และนำสัญญาณที่ได้มากรองสัญญาณอีกครั้งก่อนที่จะทำการพลอตกราฟ ซึ่งแนวความคิดนี้นำเสนอโดย แอบบอทและไฟล์สโตนในปี 1933 โดยทั่วไปปลายเข็มแหลมจะทำมาจากเพชร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 μm และ จะมีแรงกระทำคงที่โดยประมาณไม่เกิน 0.0007 N ซึ่งเป็นไปได้ยากที่ปลายหัวเพชรจะมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวที่ทำการวัด เนื่องจากพื้นผิวที่จะทำการวัดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการวัดจึงอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้จากขนาดของหัวเพชรไม่สัมพันธ์กับพื้นผิวที่ทำการวัด ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงข้อผิดพลาดจากการวัดในพื้นผิวที่มีลักษณะต่างๆ กัน คือกรณีที่เป็นร่องลึกเท่ากับขนาดของปลายเข็มพอดี กรณีที่เป็นยอดแหลมขึ้นมา และกรณีที่เป็นจุดเว้าเท่าหัวเข็มพอดี ซึ่งแนวเส้นที่ได้จะถูกรวมกับขนาดของหัวเข็มเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะได้รูปกราฟของพื้นผิวที่แท้จริงจากการวัดค่าด้วยวิธีนี้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังได้รับความนิยมสูง ความสามารถในการเคลื่อนที่แนวดิ่งของปลายเข็มจะอยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 100,000 และแนวระนาบจะอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 5,000หรืออยู่ในอัตราส่วนของแนวดิ่ง : แนวราบ = 50:1 ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการที่จะเลือกขนาดของการเลื่อนที่ของปลายเข็มกับลักษณะของพื้นผิวที่จะทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบที่อาจทำให้การวัดผิดพลาด

2.2.3 เครื่องมือวัดผิวที่ไม่สัมผัสโดยตรง (Some no contacting measurement Devices)

1. ชุดวัดแบบใช้ลม (Pneumatic Devices) เครื่องมือวัดชนิดนี้จะอาศัยหลักการรั่วของอากาศที่ปลายของหัววัด โดยหัววัดจะมีลักษณะคล้ายหัวฉีดที่ตรงปลายจะเรียบและแบน ขณะที่หัววัดเคลื่อนที่ไปก็จะมีแรงดันลมออกมาบริเวณไหนที่มีการรั่วของลมออกก็แสดงว่าไม่เรียบและมีช่องเล็กๆ อยู่ วิธีนี้นิยมใช้วัดพื้นอาคารที่ต้องการผิวเรียบเนื่องจากสามารถทำการวัดได้เร็ว ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและวัดได้สะดวก อีกทั้งหัววัดยังทนทานต่อสึกหรอเนื่องจากการเสียดสี

2. ชุดวัดแบบเลนส์ (Optical Devices) จะอาศัยหลักการสะท้อนจากแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมาโดยจะคำนวณจากปริมาณของแสงที่มีการสะท้อนกลับซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงลักษณะของพื้นผิวที่วัดได้ วิธีนี้ไม่เหมาะกับการที่จะนำมาใช้กับงานที่มีการเคลื่อนย้ายอยู่เสมอเนื่องจากเลนส์ที่ใช้ในการวัดจะมีความละเอียดอ่อนมาก หากเกิดการเคลื่อนย้ายจะทำให้ตำแหน่งในการตั้งค่าไว้เปลี่ยนไป

3. ชุดกล้องจุลทรรศน์แบบอิเลคตรอน (Electron Microscope Devices) วิธีการวัดแบบนี้จะให้ผลการวัดที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเลนส์ธรรมดา เนื่องจากความยาวของคลื่นจะสั้นมากซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบอิเลคตรอนจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

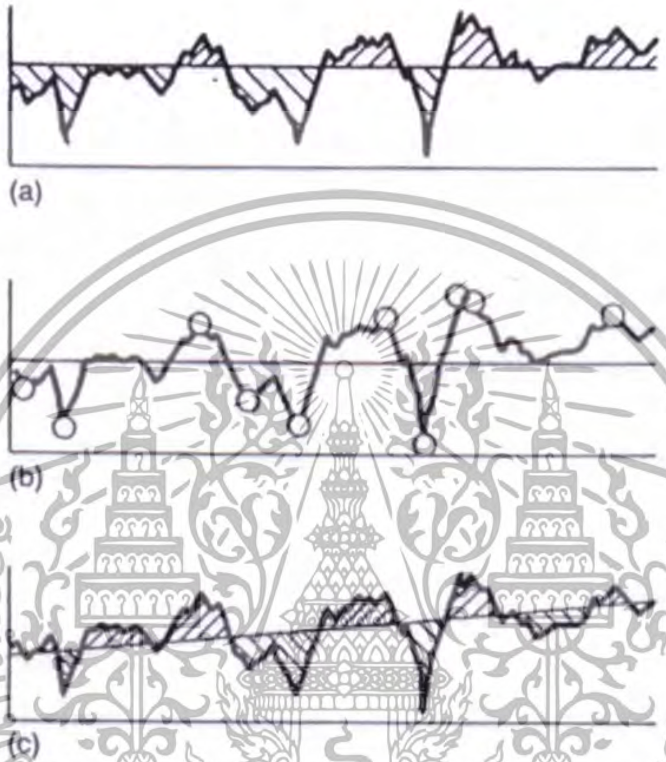
3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบอิเลคตรอนทะลุผ่าน (Transmission Electron Microscopy,TEM) โดยลำของอิเลคตรอนจะทะลุผ่านชิ้นงานที่ทำการวัดผิวและลำแสงจะเกิดการหักเหและกระจายไป และแสดงที่จอภาพเป็นรูปแสดงลักษณะของพื้นผิว วิธีนี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้หาปริมาณการผุกร่อนของผิวโครงสร้าง โดยปรกติแล้วชิ้นงานต้องหนาไม่เกิน
3 μm

3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง (Reflection Electron Microscopy,REM) อิเลคตรอนจะกระจายจากผิวของชิ้นงานและถูกรวมแสง ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า และสัญญาณนี้จะถูกนำมาแสดงเป็นรูปภาพลักษณะผิวของชิ้นงานที่ทำการวัดบนจอมอนิเตอร์ลำแสงของอิเลคตรอนที่ยิงออกไปจะทำให้เกิดเป็นจุดโฟกัสซึ่งชัดเจนสแกนขึ้นบนจอ เรียกว่า “กล้องจุลทรรศน์แบบสแกน” โดยการสแกนแบบนี้สามารถปรับให้มีความละเอียดได้สูงสุดประมาณ 10 mm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าที่ TEM ทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 เส้นอ้างอิง (Reference lines)

ในการคำนวณจะต้องกำหนดตัวแปรเพื่อหาขนาดของความสูงของผิวหยาบ ซึ่งจะต้องมีจุดอ้างอิงว่าความสูงในแต่ละจุดมีขนาดเท่าไร ดังแสดงใน รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบเส้นอ้างอิง 3 แบบ a.) ระบบ M b.) ค่าเฉลี่ย 10 จุด c.) กำลังสองน้อยสุด

1. เฉลี่ย หรือ ระบบเอ็ม (Mean or M system) วิธีค่าเฉลี่ยจะมีพื้นฐานมาจากการเลือกเส้นเฉลี่ยที่จุดกึ่งกลางของรูปร่าง ดังนั้นพื้นที่ด้านบนและด้านล่างเส้นต้องมีค่าเท่ากัน ถ้ารูปร่างกระจายของแต่ละรูปเป็นสี่เหลี่ยม วิธีนี้ก็เท่ากับว่าเป็นการหาค่าความสูงเฉลี่ยของทั้งหมด วิธีนี้อาจเรียกว่า “แนวระดับ” ซึ่งจะไม่ได้รวมค่าที่เป็นความลาดเอียงเข้าไปด้วย

2. ค่าเฉลี่ยสิบจุด (Ten point average) ค่าเฉลี่ยแบบสิบจุดเป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของการหาตำแหน่งจุดที่สูงที่สุดและจุดที่ต่ำที่สุดอย่างละห้าจุด ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้ก็จะเท่ากับ10 จุด เป็นเส้นอ้างอิง

3. วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least squares) วิธีนี้เป็นวิธีที่มีพื้นฐานมาจากเส้นอ้างอิงที่เอียงซึ่งมาแทนที่เส้นแนวระดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นหัวใจหลักของการหาวิธีนี้คือการนำค่าผิดพลาดมารวมกับวิธีที่มีอยู่เพื่อชดเชยค่าเอียงของแนวระดับ สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$z = \bar{m}x + b \tag{2.1}$$

เมื่อ $\bar{m}$ = ค่าความชัน

b = ค่าตัดแกน z

ถ้าเราให้จุดเหล่านี้ คือ $P(x_1, z_1)$,$P(x_2, z_2)$, … ,$P(x_n, z_n)$ เป็นค่าพิกัดที่แต่ละตำแหน่งของจุดบนแกน x โดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1.) ค่าที่ได้จากการวัดที่จุดนั้น

2.) ค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ $z = \bar{m}x + b$ ซึ่งเราจะได้ค่าความแตกต่างของทั้งสองส่วนดังนี้

$$\bar{d}_1 = |z_1 - (\bar{m}x_1 + b)|, \ldots, \bar{d}_n = |z_n - (\bar{m}x_n + b)| \tag{2.2}$$

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเหล่านี้จะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความถูกต้องมากขนาดไหน ซึ่งถ้ากำหนดให้ $\sum_{i=1}^{n} d_i^2 = 0$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการกำหนดสมการมีความถูกต้องแต่ในความเป็นจริงแล้วเป็นไปไม่ได้ จึงได้มีการนำวิธีกำลังสองน้อยสุดมาใช้ เส้นอ้างอิงหรือเส้นเฉลี่ยไม่เพียงแต่จะมีความสำคัญกับแนวทิศทางแกน z ยังมีความสำคัญต่อช่วงตัวอย่างการทดสอบด้วย ซึ่งจะแสดงถึงความแตกต่างของผิวหยาบและคลื่น

$$\bar{f}(\bar{m}, b) = \sum_{i=1}^{n} d_i^2 \tag{2.3}$$

หรือ

$$\bar{f}(\bar{m}, b) = \left(z_1 - (\bar{m}x_1 + b)\right)^2 + \left(z_2 - (\bar{m}x_2 + b)\right)^2 + \cdots + \left(z_n - (\bar{m}x_n + b)\right)^2 \tag{2.4}$$

ในการที่จะหาค่าของ $\bar{m}$ และค่า b สามารถหาได้จาก

$$\frac{\partial}{\partial \bar{m}}\left(\bar{f}(\bar{m}, b)\right) = \frac{\partial}{\partial b}\left(\bar{f}(\bar{m}, b)\right) = 0 \tag{2.5}$$

2.2.5 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณพื้นผิว

สมมุติว่าจะทำการวัดผิวหยาบด้วยเครื่องมือแบบปลายเข็มแหลม ซึ่งเส้นอ้างอิงที่ใช้เป็นแบบเฉลี่ยและแบบกำลังสองน้อยสุด ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ z_i เท่ากับศูนย์ ในการวัดขนาดของผิวหยาบจะนิยมใช้ จะมี 3 แบบคือ

1. เส้นศูนย์กลางเฉลี่ย (Centerline Average , CLA) จะใช้สัญลักษณ์ R_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_a = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|z_i| \tag{2.6}$$

2. ค่ารากที่สองของกำลังสอง (RMS) จะใช้สัญลักษณ์ R_q

$$R_q = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} z_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.7}$$

3. ค่าสูงสุด-ต่ำสุด จะสมมุติให้มีการกระจายของความสูงเป็นแบบเกาส์เซียน ค่า R_q สามารถใช้แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะใช้อธิบายโดยค่า R_t

$$R_t = \max(z) - \min(z) \tag{2.8}$$

กรณีที่มีการกระจายตัวเป็นแบบไซน์ สามารถที่จะหาอัตราส่วนของ $R_q: R_a$ ได้ดังนี้

$$\frac{R_q}{R_a} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \tag{2.9}$$

คำว่า “หยาบ”, “ละเอียด”, “เรียบ” หรือ “เรียบมาก” ซึ่งไม่ควรที่จะนำมาใช้ในการบ่งบอกสภาพของพื้นผิว เนื่องจากไม่มีค่าตัวเลขในการระบุถึงขนาดของความหยาบ ควรหลีกเลี่ยงที่จะนำมาใช้ เช่น ผิวที่มีค่าผิว $R_q = 40\ \mathrm{nm}$ จะจัดว่าหยาบมากสำหรับกลุ่มคนที่ทำงานเกี่ยวกับเลนส์ ขณะเดียวกันก็จะถูกจัดว่าละเอียดมากสำหรับคนที่ทำงานเกี่ยวกับงานขึ้นรูปจากเครื่องจักร

ดังนั้นจะเห็นว่าค่า R_a เพียงอย่างเดียวไม่สามารถระบุลักษณะของผิวได้ ดังนั้นจะต้องระบุค่าความสัมพันธ์ตามแนวแกน z ด้วย ซึ่งเรียกว่า “ช่วงแบริ่ง” คือการตัดยอดของผิวหยาบขนานกับแกน Z แสดงดัง รูปที่ 2.7 ซึ่งจะอธิบายในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

$$l^* = l_1^* + l_2^* + \cdots + l_n^* \tag{2.10}$$

อัตราส่วนของช่วงแบริ่ง จะหาได้ดังนี้

$$t_p = \frac{l^*}{l} \tag{2.11}$$

เมื่อ l ช่วงที่วัด, m

โค้งแอบบอทหรือที่เรียกกันอีกอย่างคือโค้งแบริ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แกนแนวดิ่งเป็นอัตราช่วงแบริ่งคูณด้วย 100 กราฟเหล่านี้จะบ่งบอกให้ทราบถึงค่าผิวที่เบี่ยงเบนจากเส้นเฉลี่ย ซึ่งกราฟเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่ามีค่าความสูงของผิวหยาบเท่าไรและมีปริมาณเท่าไร ซึ่งรูปร่างของผิวหยาบสามารถที่จะอธิบายในเทอมของฟังก์ชั่นการกระจายของความสูง ในรูปของสถิติจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

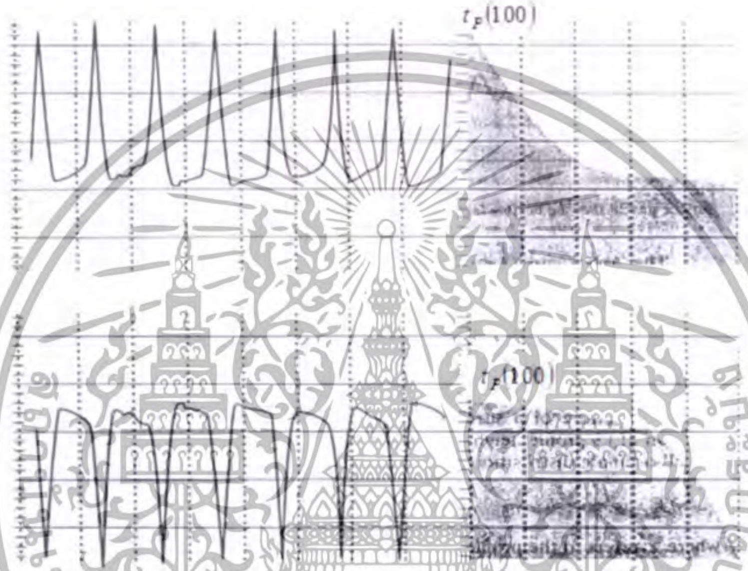
$$\bar{F}(z) = \int_{-\infty}^{z} \bar{\Psi}\, dz \tag{2.12}$$

เมื่อค่า z เป็นค่าความสูงของผิวหยาบที่จุดอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{\Psi}$ เป็นฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของความหนาแน่นของการกระจายความสูง

ฟังก์ชั่นของความน่าจะเป็นอาจจะทำให้เห็นในรูปของอัตราส่วนของความสูงในช่วงที่กำหนด ดังนั้นกราฟแสดงการเบี่ยงเบนจะรวมถึงค่า $z_1, z_2, \cdots, z_3$ ที่บางช่วงของจุดต่อและผลรวมของจำนวนของจุดที่ความสูงบางระดับ รูปที่ 2.8 แสดงวิธีที่ใช้ในการหาโค้งของการกระจายทั้งหมด, โค้งการกระจายในรูปที่ 2.8 เป็นโค้งที่เรียบที่สุดสามารถที่จะเขียนเป็นฮีทโทแกรม ซึ่งโค้งเรียบนี้จะมีการกระจายเป็นแบบเกาส์เซียน



รูปที่ 2.8 แสดงโค้งแอบบอทของพื้นผิวสองแบบที่แตกต่างกัน

ถ้าแนวความคิดนี้เกี่ยวกับการกระจายความสูงนี้มีความหนาแน่นแบบพาราโบลิกหรือฮีทโทแกรม ซึ่งค่า R_a สามารถที่จะประมาณจากค่า R_q ถ้าอัตราส่วนของความสูงในช่วง $z_j - \Delta \leq z_j \leq z_j + \Delta$ แทนค่าด้วย $\bar{\Psi}_j$ สำหรับ $j = -L, \cdots, 0, \cdots, L$ ดังนั้นค่าโดยประมาณที่โค้งก็จะเท่ากับสมการ (2.2) และ (2.3) ดังนั้น

$$R_a = \int_{-L}^{L} |z|\, \bar{\Psi} dz \tag{2.13}$$

$$R_q = \int_{-L}^{L} z^2\, \bar{\Psi} dz \tag{2.14}$$

จากความสัมพันธ์ของเกาส์-ลาปาช สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของความน่าจะเป็น จากการสมมุติจากการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังนี้

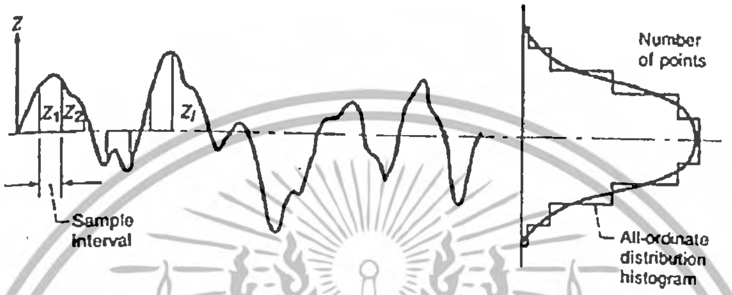
$$\bar{\Psi} = \frac{1}{\bar{\sigma}(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \exp\left(\frac{-(z - z^*)^2}{2\bar{\sigma}^2}\right) \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า $\bar{\sigma}$ เป็นค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน

z^* เป็นค่าที่ห่างจากค่าเฉลี่ยที่เลือกไว้

โดยปกติแล้วช่วงที่จะเกิดโอกาสคือ $[-\infty, \infty]$ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะให้อยู่ในช่วง $\pm 3\bar{\sigma}$ เพราะโดยประมาณ 99.9 % ของโอกาสที่จะเกิดขึ้นกับพื้นที่ของยอดอาจมีการผิดพลาดเล็กน้อยขณะที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการหาความโค้งน่าจะเป็นจากผิวหยาบที่วัดได้

ค่าโมเมนต์ n ของโค้งการกระจาย $\bar{\Psi}dz$ รอบแกนค่าเฉลี่ย หาได้ดังนี้

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} z^n \bar{\Psi} dz \tag{2.16}$$

ซึ่งสามารถที่จะสังเกตถึงโมเมนต์ 2 เท่าของครึ่ง $\bar{\Psi}dz$ จะสมดุลกับเส้น R_a เฉลี่ยในสมการ (2.13) หรือ

$$R_a = 2\int_{0}^{\infty} |z|\,\bar{\Psi} dz \tag{2.17}$$

R_a = 2 เท่าของโมเมนต์ครั้งแรกของครึ่ง $\bar{\Psi}dz$

ค่าโมเมนต์แรกของ $\bar{\Psi}dz$ จะมีค่าเป็น 0 ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับโมเมนต์ที่ 2 ของ $\bar{\Psi}dz$ กับรากที่สองของ R_q ดังสมการ

$$R_q = \bar{\sigma} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} z^2 \bar{\Psi} dz\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.18}$$

ค่าโมเมนต์ที่ 3 ของ $\bar{\Psi}dz$ สัมพันธ์กับยอดแหลมของส่วนโค้ง สามารถที่จะเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้คือ

$$\bar{\alpha} = R_q^{\frac{1}{3}} \int_{-\infty}^{\infty} z^3 \bar{\Psi} dz \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่าความสูงกับความลึกของยอดแหลมมีค่าเท่ากันคือห่างจากเส้นอ้างอิงเท่ากันโดยประมาณ ค่าความลาดเอียงก็จะเป็น 0 นอกจากนี้แล้วผิวที่ลึกมากๆ ก็จะเป็นค่าลบ ค่าโมเมนต์ที่ 4 ของ Ψdz ก็จะสัมพันธ์กับค่าที่จุดสูงสุดหรือความสูงของการแจกแจงความถี่ที่แต่ละจุดโค้งและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{\beta} = R_q^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 \bar{\Psi} dz \tag{2.20}$$

ค่า $\bar{\beta}$ ที่ได้จากการแจกแจงความถี่จะมีค่าเป็นค่าบวกเสมอ โดยค่าที่วัดได้ก็จะสมมาตรสำหรับที่มีการกระจายเป็นแบบเกาส์เซียนค่าโค้งจะมีการแจกแจงความถี่จะปิดที่ 3 เมื่อเส้นรูปร่างของความสูงทั้งหลายจะทับกับเส้นอ้างอิงจะมีค่า β กว้าง ช่วงความโค้งที่มีค่า β มากกว่า 3 จะเรียกว่า “Leptokurtic” ส่วนช่วงความโค้งที่มีค่า β น้อยกว่า 3 จะเรียกว่า “Platykurtic”

สำหรับโค้งที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังสมการที่ (2.16) สามารถเขียนในรูปของโมเมนต์ได้ดังนี้

$$M_n = \frac{1}{\bar{\sigma}(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} z^n \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma^2}\right) dz \tag{2.21}$$

เมื่อค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมาตรฐาน $\bar{\sigma} = R_q$ จากสมการ (2.18) สามารถใช้ได้ ถ้า n เป็นค่าคู่แต่ถ้า n เป็นค่าคี่สามารถหาได้จาก

$$M_n = \frac{n!}{2^{(n/2)}\left(\frac{n}{2}\right)!}\bar{\sigma}^n \tag{2.22}$$

ค่าตัวแปรบางตัวอาจใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับผิวของฟิล์มสารหล่อลื่น ดังค่าในช่วงที่พบมากซึ่งแสดงข้างล่างนี้

ความหนาแน่นของยอดผิวหยาบ 10^2 ถึง 10^6 peak/mm^2
ค่าระยะห่างของยอดผิวหยาบ 1 μm ถึง 75 μm
ค่าความชันของผิวหยาบ 0^o ถึง 25^o
รัศมีของยอดปลายผิวหยาบ ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10 μm ถึง 30 μm

2.3 สมการสมมุติฐานของเฮิรตซ์

การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก เป็นการหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ผิวชิ้นงานไม่ได้สัมผัสกัน มีฟิล์มของสารหล่อลื่นแทรกอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงาน ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าสูงมาก จึงจำเป็นต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่จากความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงที่วัสดุเกิดการสัมผัสกัน Hertz ได้ทำการพิจารณา ความเค้น และ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รูปทรงวงรี (Ellipsoidal) สองอันสัมผัสกันโดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่น โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. วัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุเนื้อเดียวและอยู่ในช่วงที่วัสดุยืดหยุ่น
2. ไม่มีแรงตามแนวสัมผัสระหว่างของแข็ง
3. ช่วงของการสัมผัสจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมี
4. ของแข็งจะอยู่กับที่และอยู่ในสภาวะสมดุล

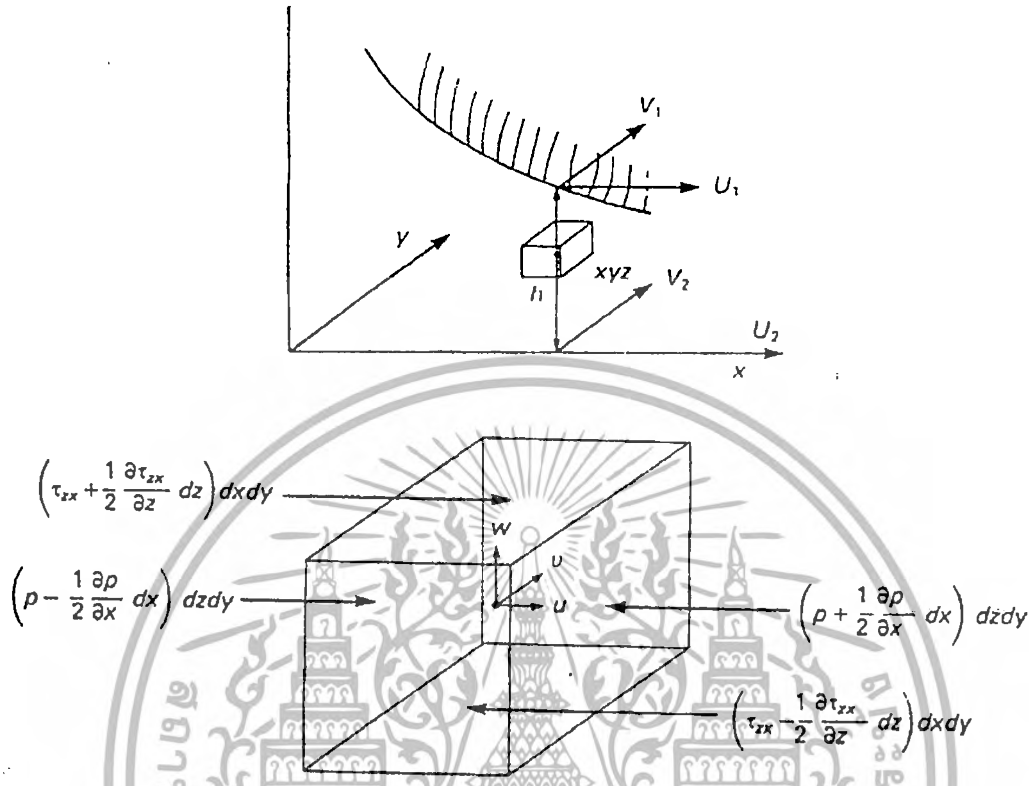
2.4 สมการเรย์โนลด์ (Reynold's equation)

Reynold ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการไหลของของไหลที่ไหลอยู่ระหว่างผิวสัมผัสเพื่อการหาการกระจายความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ดังนั้นสำหรับพฤติกรรมการหล่อลื่นของของผสมระหว่างสารหล่อลื่นกับสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง มีสมมุติฐานดังนี้

1. การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)
2. ของไหลที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นซึ่งผสมสารหล่อลื่นของแข็งแล้วจะมีคุณสมบัติเป็น ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน
3. ไม่คิดแรงจากน้ำหนักของของไหลและแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล
4. ไม่มีการลื่นไถลของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน
5. ความหนาของฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย
6. ไม่คิดถึงผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก
7. แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่างของความดันรวมทั้งไม่คิดความเร่งของของไหล
8. อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของไหลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่มีการชนกันระหว่างอนุภาค
9. อนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีขนาดเท่ากันทุกอนุภาค
10. อนุภาคของแข็งที่เติมลงไปในของไหล ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆกับของไหลนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
132948

เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงในชิ้นส่วนของไหล ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแรงที่กระทำต่อเอลิเมนต์ของของไหล

จากสมดุลของแรงและจากสมมุติฐานที่ 1, 2, 3 และ 7 ตามแนวแกน x และ y จะได้ว่า

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \tag{2.23}$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \tag{2.24}$$

จากสมการการไหลของสารแบบนอนนิวโตเนียนคือ

$$\tau_{xz} = \mu^* \frac{\partial u}{\partial z} \tag{2.25}$$

$$\tau_{yz} = \mu^* \frac{\partial v}{\partial z} \tag{2.26}$$

เมื่อ $\mu^* = \mu(I)$ และ I เป็นค่า second invariant of strain rate หาได้จาก

$$I = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.23) ถึงสมการ (2.26) จะได้ว่า

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\mu^*}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) z + \frac{c_1}{\mu^*} \tag{2.28}$$

$$u = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\int \frac{z}{\mu^*}dz + c_1\int \frac{dz}{\mu^*} + c_2 \tag{2.29}$$

และ

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\mu^*}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) z + \frac{c_3}{\mu^*} \tag{2.30}$$

$$v = \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)\int \frac{z}{\mu^*}dz + c_3\int \frac{dz}{\mu^*} + c_4 \tag{2.31}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบ

$$z = 0 \;:\; u = u_1, \qquad v = v_1, \qquad w = w_1 \tag{2.32}$$

$$z = h \;:\; u = u_2, \qquad v = v_2, \qquad w = w_2 \tag{2.33}$$

จากเงื่อนไขที่ขอบจะได้ว่า

$$u = \left\{\int \frac{z}{\mu^*}dz - h\left[\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\int \frac{dz}{\mu^*}\right\}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \left(\frac{u_2 - u_1}{h}\right)\left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\int \frac{dz}{\mu^*} + u_1 \tag{2.34}$$

$$v = \left\{\int \frac{z}{\mu^*}dz - h\left[\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\int \frac{dz}{\mu^*}\right\}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) + \left(\frac{v_2 - v_1}{h}\right)\left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\int \frac{dz}{\mu^*} + v_1 \tag{2.35}$$

และ

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left\{\frac{z}{\mu^*} - h\left[\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\right\}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \left(\frac{u_2 - u_1}{h}\right)\left(\frac{1}{\mu^*}\right)\left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right] \tag{2.36}$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \left\{\frac{z}{\mu^*} - h\left[\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\right\}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) + \left(\frac{v_2 - v_1}{h}\right)\left(\frac{1}{\mu^*}\right)\left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right] \tag{2.37}$$

เมื่อ

$$\frac{1}{\mu_{ei}} = \frac{1}{h^{i+1}}\int_0^h \left(\frac{z^i}{\mu^*}\right)dz \;, \qquad i = 0,1,2 \tag{2.38}$$

สำหรับการไหลในสองมิติเราสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{2.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิเกรตสมการ (2.39) เทียบกับ z ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง h

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

จาก General rule of Integration (Leibniz integral rule)

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x}[f(x,y,z)]dz = -f(x,y,z)|_{y=h}\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\int_0^h f(x,y,z)dz$$

จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho h^3\left[\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\frac{\partial p}{\partial x}\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{\rho h^3\left[\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\frac{\partial p}{\partial y}\right\} =$$

$$\left(\frac{u_2+u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}(\rho h) + \left(\frac{u_2-u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho h\left[1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\right\} + \tag{2.40}$$

$$\left(\frac{v_2+v_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial y}(\rho h) + \left(\frac{v_2-v_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial y}\left\{\rho h\left[1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\right\} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h)$$

สำหรับปัญหาของทรงกระบอกกับแผ่นเรียบเป็นการหล่อลื่นที่มีการสัมผัสเป็นเส้นเนื่องจากความกว้างของการสัมผัสมีค่าน้อยเมื่อเทียบความยาวของทรงกระบอก

$$\frac{\partial p}{\partial x} \gg \frac{\partial p}{\partial y}$$

สมการ (2.40) จึงลดรูปเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho h^3\left[\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\frac{\partial p}{\partial x}\right\} = \left(\frac{u_2+u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}(\rho h)$$

$$+\left(\frac{u_2-u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho h\left[1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\right\} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) \tag{2.41}$$

โดยที่เงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์

$$p(x_{in}, t) = 0 \ , \ p(x_{out}, t) = \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$
$$p(x,t) \geq 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 สมการความหนาฟิล์ม

ความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าน้อยมากและความดันที่สารหล่อลื่นได้รับมีค่าสูงมาก เป็นผลให้ผิวสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงยืดหยุ่น ดังนั้นสมการของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น จึงต้องพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสเนื่องจากความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วย ความหนาของฟิล์มน้ำมันจึงเป็นไปตามสมการ

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R_X} + d(x) - \frac{2}{\pi E'}\int_{-\infty}^{\infty} p(x')ln(x-x')^2 dx' \tag{2.42}$$

เมื่อเทอม $d(x)$ เป็นค่า Combined surface roughness ของผิวสัมผัส

2.4.2 สมการความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่น เปลี่ยนแปลงตาม ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปในสารหล่อลื่น ความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น Dowson และ Higginson (1966) [1] ได้ทำการทดลองและกำหนดความสัมพันธ์ของความหนาแน่นโดย

$$\rho = \rho_0\left\{\frac{\left(1+\frac{0.6\times10^{-9}p}{1+1.7\times10^{-9}p}\right)\left(1-\beta(T-T_0)\right)}{1-\lambda\left(1-\frac{\rho_0}{\rho_p}\right)}\right\} \tag{2.43}$$

2.5 สมการความหนืดของสารหล่อลื่น

ความหนืดของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับ อัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate) ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น จะได้ว่า

$$\mu^* = \mu_S \bar{\mu}_P \bar{\mu}_R \tag{2.44}$$

เมื่อสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ (Power Law Model)

$$\mu_S = m_0\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{n-1} \tag{2.45}$$

จากทฤษฎีสารแขวนลอยของ Einstein ได้ตั้งสมมุติฐานว่าสารแขวนลอยทุกชนิดจะพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนี่ยนและมีความหนืดโดยเป็นไปตามสมการของ Batchelor [19]

$$\bar{\mu}_P = 1 + \eta\Phi + (\eta\Phi)^{2} \tag{2.46}$$

เมื่อ η คือค่า intrinsic viscosity มีค่าเท่ากับ 2.5 เมื่ออนุภาคนาโนเป็นของแข็งและมีรูปร่างเป็นทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Φ คือค่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนโดยปริมาตร

ความหนืดของหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Rylander [20] และ Roeland [21]

$$\bar{\mu}_R = \exp\{(\ln(\mu_0) + 9.67)(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9}p)^{z_1}) - \gamma(T - T_0)\} \qquad (2.47)$$

2.6 สมการพลังงาน

การกระจายอุณหภูมิของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกสามารถหาได้จากสมการพลังงาน [22]

$$\rho\frac{D\xi}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k\nabla T) + \Omega - \nabla \cdot \left(\sum_i j_i\xi_i\right) \qquad (2.48)$$

เมื่อ Ω เป็นเทอม Viscous Dissipation

$\left(\sum_i j_i\xi_i\right)$ เป็นเทอมของการทำปฏิกิริยาภายในของของผสม

ξ เป็นค่าเอนทาลปี

โดยที่

$$\Omega = 2\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] + \mu\left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right] - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot V)^2$$

$$\xi = e + \frac{p}{\rho}$$

เมื่อ e เป็นเทอมของพลังงานภายในต่อหน่วยมวล จากความสัมพันธ์ในเทอมของอุณหภูมิจะได้ว่า

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{1}{\rho}\left[1 + \frac{T}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P\right]\frac{Dp}{Dt} + C_P\frac{DT}{Dt} \qquad (2.49)$$

จากสมมติฐานไม่มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งกับน้ำมันหล่อลื่นจะได้ว่า

$$\rho C_P\frac{DT}{Dt} = \beta T\frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k\nabla T) + \Omega \qquad (2.50)$$

สำหรับปัญหาของทรงกระบอกกับแผ่นเรียบพบว่าความกว้างของการสัมผัสมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความยาวของทรงกระบอก สมการ (2.50) จึงลดรูปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\beta T\left(\frac{\partial p}{\partial t}+u\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \qquad (2.51)$$

โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ [22]

$$T_1(x,0)=T_0+\frac{1}{\sqrt{\pi\rho_1 C_{P1}k_1u_1}}\int_{x_{in}}^{x}k\frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_{z=0}\frac{dx'}{\sqrt{x-x'}}$$

$$T_2(x,h)=T_0-\frac{1}{\sqrt{\pi\rho_2 C_{P2}k_2u_2}}\int_{x_{in}}^{x}k\frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_{z=h}\frac{dx'}{\sqrt{x-x'}}$$

$$T_1(0,t)=T_0$$

2.6.1 สมการการนำความร้อนของสารหล่อลื่น

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารหล่อลื่นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ผสมในสารหล่อลื่น Xuan [24] และความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับ Wang [25] จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังสมการ

$$k=\ k_0\bar{k} \qquad (2.52)$$

โดยที่

$$\bar{k}=\frac{\bar{k}_n+2\bar{k}_p-2\emptyset(\bar{k}_p-\bar{k}_n)}{\bar{k}_n+2\bar{k}_p+\emptyset(\bar{k}_p-\bar{k}_n)} \qquad \text{Xuan [24]}$$

เมื่อ

$$\bar{k}_P=1+\frac{1.73\times10^{-9}p}{1+6.91\times10^{-9}p} \qquad \text{Wang [24]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีเชิงตัวเลข

3.1 สมการในรูปแบบไร้มิติ

เมื่อคิดค่าต่างๆ ที่ตำแหน่งอ้างอิงและเวลาเริ่มต้นจะได้ว่า

3.1.1 ความเร็วเฉลี่ยของผิวทรงกระบอกที่เวลาเริ่มต้น

$$u_0 = \frac{u_{2,0} + u_{1,0}}{2} \tag{3.1}$$

3.1.2 ความเร็วเฉลี่ยของผิวทรงกระบอกที่เวลาใดๆ

$$\bar{u} = \frac{u_2(t) + u_1(t)}{2} \tag{3.2}$$

3.1.3 รัศมีความโค้งของผิวทรงกระบอกที่ที่ตำแหน่งอ้างอิง

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{r_{1,0}} + \frac{1}{r_{2,0}} \tag{3.3}$$

3.1.4 รัศมีความโค้งของผิวทรงกระบอกที่ที่ตำแหน่งใดๆ

$$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{r_1(t)} + \frac{1}{r_2(t)} \tag{3.4}$$

3.1.5 ค่า Equivalent Modulus of Elasticity ของผิวทรงกระบอก

$$\frac{2}{E'} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \tag{3.5}$$

3.1.6 ความเร็วของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$u = u_0 u^* \tag{3.6}$$

3.1.7 ภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ในรูปแบบไร้มิติ

$$W_0' = \frac{w_0'}{E' R_0} \tag{3.7}$$

3.1.8 ความดันในการสัมผัสของเฮิรตซ์ (Hertzian contact pressure)

$$P_H = E' \left(\frac{W_0'}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.8}$$

3.1.9 ความกว้างของการสัมผัส

$$b = R_0 \left(\frac{8W_0'}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.9}$$

3.1.10 ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$p = P_H P \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 พิกัดตามแกน x

$$x = bX \tag{3.11}$$

3.1.12 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$h = \left(\frac{b^2}{R_0}\right)H \tag{3.12}$$

3.1.13 พิกัดตามแกน z

$$z = hZ = \left[\left(\frac{b^2}{R_0}\right)H\right]Z \tag{3.13}$$

3.1.14 เวลา

$$t = \left(\frac{b}{u_0}\right)\bar{t} \tag{3.14}$$

3.1.15 ความหนาแน่นของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$\rho = \rho_0\bar{\rho} \tag{3.15}$$

3.1.16 ความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$\mu^* = \mu_0\bar{\mu}^* \tag{3.16}$$

3.1.17 ค่าการนำความร้อนของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$k = k_0\bar{k} \tag{3.17}$$

3.1.18 อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$T = T_0\theta \tag{3.18}$$

3.2 การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก

3.2.1 สมการเรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติ

จากสมการเรย์โนลด์ (2.41)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho h^3\left[\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\frac{\partial p}{\partial x}\right\} = \left(\frac{u_2+u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}(\rho h)$$

$$+\left(\frac{u_2-u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho h\left[1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\mu_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_{e0}}\right)}\right]\right\} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) \tag{2.41}$$

แทนค่าจากสมการ (3.1) – (3.16) ลงไปในสมการ (2.41) เพื่อทำให้อยู่ในรูปไร้มิติ

$$\frac{\partial}{\partial(bX)}\left\{(\rho_0\bar{\rho})\left[\left(\frac{b^2}{R_0}\right)H\right]^3\left[\frac{1}{\mu_0\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\left(\frac{1}{\mu_0\bar{\mu}_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\mu_0\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right]\frac{\partial(P_HP)}{\partial(bX)}\right\} = \bar{u}\frac{\partial}{\partial(bX)}\left((\rho_0\bar{\rho})\left[\left(\frac{b^2}{R_0}\right)H\right]\right)$$

$$+\left(\frac{u_2-u_1}{2}\right)\frac{\partial}{\partial(bX)}\left\{(\rho_0\bar{\rho})\left[\left(\frac{b^2}{R_0}\right)H\right]\left[1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\mu_0\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\mu_0\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right]\right\} + \frac{\partial}{\partial\left[\left(\frac{b}{u_0}\right)\bar{t}\right]}\left((\rho_0\bar{\rho})\left[\left(\frac{b^2}{R_0}\right)H\right]\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปใหม่จะได้

$$\left\{\frac{\rho_0 P_H b^4}{\mu_0 R_0^3}\right\}\frac{\partial}{\partial X}\left\{\bar{\rho}H^3\left[\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}}-\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right]\frac{\partial P}{\partial X}\right\}=\left\{\frac{\bar{u}\rho_0 b}{R_0}\right\}\frac{\partial}{\partial X}(\bar{\rho}H)$$

$$+\left(\frac{u_2-u_1}{2}\right)\left\{\frac{\bar{u}\rho_0 b}{R_0}\right\}\frac{\partial}{\partial X}\left\{\bar{\rho}H\left[1-2\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right]\right\}+\left\{\frac{u_0\rho_0 b}{R_0}\right\}\frac{\partial}{\partial \bar{t}}(\bar{\rho}H)$$

ดังนั้นสมการเรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติ

$$\frac{\partial}{\partial X}\left\{\Phi\frac{\partial P}{\partial X}\right\}=\Lambda\left\{C_{UT}\left[\frac{\partial}{\partial X}(\bar{\rho}H)+\left(\frac{S_X}{2}\right)\frac{\partial}{\partial X}\left(\bar{\rho}H\left(1-2\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right)\right)\right]+\frac{\partial}{\partial \bar{t}}(\bar{\rho}H)\right\} \quad (3.19)$$

เมื่อ

$$\Phi=\bar{\rho}H\left[\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}}-\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right] \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{\bar{\mu}_{ei}}=\int_0^1\frac{Z^i}{\bar{\mu}^*}dZ \quad (3.21)$$

$$\Lambda=\frac{u_0\mu_0 R_0^2}{b^3 P_H} \quad (3.22)$$

$$S_X=\frac{u_2(t)-u_1(t)}{\bar{u}} \quad (3.23)$$

$$C_{UT}=\frac{\bar{u}}{u_0} \quad (3.24)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบสำหรับสมการเรย์โนลด์

$$P(X_{inlet},\bar{t})=0\ ,\ P(X_{exit},\bar{t})=\frac{\partial P}{\partial X}=0$$

$$P(X,\bar{t})\geq 0$$

เมื่อ

$X_{inlet}=+5.0$ และ $X_{exit}=-2.0$

3.2.2 สมการความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ

ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นตามสมการ (2.42)

$$h=h_0+\frac{x^2}{2R_X}+d(x)-\frac{2}{\pi E'}\int_{-\infty}^{\infty}p(x')ln(x-x')^2dx' \quad (2.42)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ เป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2C_{RT}} + D(X) - \frac{1}{\pi}\int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P(X')\ln|X - X'|\, dX' \tag{3.25}$$

3.2.3 สมการความหนาแน่นของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติเป็นไปตามสมการ

$$\bar{\rho} = \frac{\left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H P}\right)\left(1 - \beta T_0(\theta - 1)\right)}{1 - \lambda\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_p}\right)} \tag{3.26}$$

3.2.4 สมการความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ

ความหนืดของสารหล่อลื่น เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติเป็นไปตามสมการ

$$\bar{\mu}^* = \bar{\mu}_S \bar{\mu}_P \bar{\mu}_R \tag{3.27}$$

โดยที่

$$\bar{\mu}_S = \left(\frac{m_0 u_0 R_0}{\mu_0 b^2}\right)\left|\frac{1}{H}\frac{\partial u^*}{\partial Z}\right|^{n-1} \tag{3.28}$$

$$\bar{\mu}_P = 1 + 2.5\phi + (2.5\phi)^2 \tag{3.29}$$

$$\bar{\mu}_R = \exp\left\{\frac{(\ln(\mu_0) + 9.67)}{(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H P)^{z_1}) - \gamma T_0(\theta - 1)}\right\} \tag{3.30}$$

3.2.5 สมการสมการสมดุลแรงในรูปแบบไร้มิติ

สมดุลของแรงที่กระทำต่อทรงกระบอกในรูปแบบไร้มิติ

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(X, t)\, dX = C_{WT}\left(\frac{\pi}{2}\right) \tag{3.31}$$

3.2.6 สมการพลังงานในรูปแบบไร้มิติ

จากสมการพลังงาน (2.51) เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิก

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \beta T\left(\frac{\partial p}{\partial t} + u\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \tag{2.51}$$

ในรูปแบบไร้มิติจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = K_{T1}\frac{\bar{\rho} H^2}{\bar{k}}\left(\frac{\partial \theta}{\partial \bar{t}} + u^*\frac{\partial \theta}{\partial X}\right) - K_{T2}\frac{\bar{\mu}}{\bar{k}}\left(\frac{\partial u^*}{\partial X}\right)^2 - K_{T3}\frac{\theta H^2}{\bar{k}}\left(\frac{\partial P}{\partial \bar{t}} + u^*\frac{\partial P}{\partial X}\right) \tag{3.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$K_{T1} = \frac{u_0 \rho_0 c_P b^3}{k_0 R_0^2} \tag{3.33}$$

$$K_{T2} = \frac{\mu_0 u_0^2}{k_0 T_0} \tag{3.34}$$

$$K_{T3} = \frac{\beta u_0 b^3 P_H}{k_0 R_0^2} \tag{3.35}$$

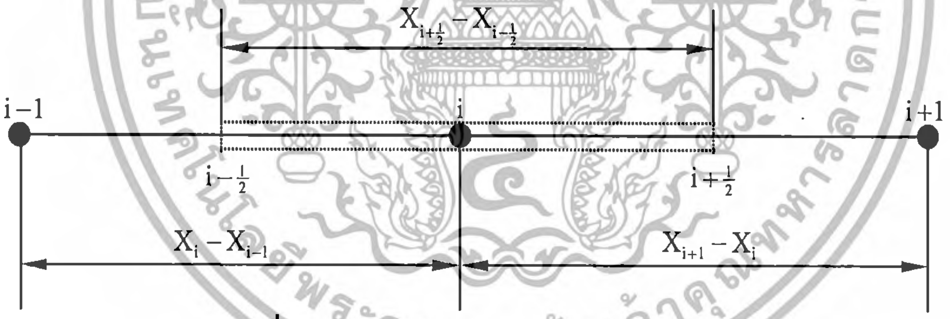
โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ

$$\theta_{1/2} = 1 \pm \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_{1/2} c_{P,1/2} k_{1/2} b^3 u_0 C_{UT} \left(1 - \frac{S_0}{2}\right)}} \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} \left(\frac{\bar{k}}{H}\right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right)_{Z=0/1} \frac{dX'}{\sqrt{X - X'}}$$

$$\theta(X_{inlet}) = 1 \tag{3.36}$$

3.3 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method)

รูปแบบของสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงาน เป็นสมการเอลลิปติกที่อยู่ในรูปของสมการลาปาซ มีความยุ่งยากในการแก้ปัญหา จึงประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด

ที่ตำแหน่ง i ของรูปที่ (3.1) จะแทนค่าด้วยผลต่างแบบกึ่งกลาง (Central Difference) และแทนค่าด้วยผลต่างแบบถอยหลัง (Backward Difference)

สำหรับสมการเรย์โนล์ (Reynold Equation) เมื่อประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial X}\left\{\Phi \frac{\partial P}{\partial X}\right\} = \Lambda \left\{ C_{UT} \left[\frac{\partial}{\partial X}(\bar{\rho} H) + \left(\frac{S_X}{2}\right) \frac{\partial}{\partial X} \left(\bar{\rho} H \left(1 - 2 \frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)} \right) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial t^*}(\bar{\rho} H) \right\}$$

เมื่อประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจะได้ว่า

$$\frac{\Phi_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i}\right) - \Phi_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}\right)}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} = \Lambda C_{UT} \left[\frac{(\bar{\rho} H)_i - (\bar{\rho} H)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + \tag{3.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Lambda C_{UT}\left(\frac{S_X}{2}\right)\left\{\left[\left(\bar{\rho}H\left(1-2\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right)\right)_i-\left(\bar{\rho}H\left(1-2\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right)\right)_{i-1}\right]\Big/(X_i-X_{i-1})\right\}$$

$$+\Lambda\left[\frac{(\bar{\rho}H)_i-(\bar{\rho}H)_i^0}{\bar{t}-\bar{t}^0}\right]$$

เมื่อ

$$\Phi_{i+\frac{1}{2}}=\frac{\Phi_{i+1}+\Phi_i}{2} \tag{3.38}$$

$$\Phi_{i-\frac{1}{2}}=\frac{\Phi_i+\Phi_{i-1}}{2} \tag{3.39}$$

สำหรับสมการพลังงาน (Reynold Equation)

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2}=K_{T1}\frac{\bar{\rho}H^2}{\bar{k}}\left(\frac{\partial\theta}{\partial\bar{t}}+u^*\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)-K_{T2}\frac{\bar{\mu}}{\bar{k}}\left(\frac{\partial u^*}{\partial X}\right)^2-K_{T3}\frac{\theta H^2}{\bar{k}}\left(\frac{\partial P}{\partial\bar{t}}+u^*\frac{\partial P}{\partial X}\right)$$

จากสมการพลังงาน ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่นขึ้นความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นซึ่งมีความซับซ้อน จึงให้อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีการกระจายเป็นแบบพาราโบลิกเพื่อลดความยุ่งยากและเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ สมการการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ได้ดังสมการ[23]

$$\theta(X,Z)=aZ^2+bZ+c \tag{3.40}$$

เงื่อนไขขอบคือ

$$\theta(X,0)=\theta_1 \tag{3.41}$$

$$\theta(X,1)=\theta_2 \tag{3.42}$$

$$\theta\left(X,\frac{1}{2}\right)=\int_0^1\theta(X,Z)dZ=\theta \tag{3.43}$$

จากเงื่อนไขขอบ จะได้ว่า

$$\theta(X,Z)=(3\theta_2-6\theta+3\theta_1)Z^2+(-2\theta_2+6\theta-4\theta_1)Z+\theta_1 \tag{3.44}$$

สำหรับสมการพลังงานใช้ค่าแบบผลต่างแบบถอยหลัง (Backward Differences) เนื่องจากทราบอุณหภูมิที่ทางเข้า ซึ่งจะกำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของสารหล่อลื่น เมื่อประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจะได้ว่า

$$6\theta_2-12\theta_i+6\theta_1=K_{T1}\frac{\bar{\rho}_iH_i^2}{\bar{k}_i}\left[\left(\frac{\theta_i-\theta_i^0}{\bar{t}-\bar{t}^0}\right)+u_i^*\left(\frac{\theta_i-\theta_{i-1}}{X_i-X_{i-1}}\right)\right] \tag{3.45}$$

$$-K_{T2}\frac{\bar{\mu}_i}{\bar{k}_i}\left(\frac{u_i^*-u_{i-1}^*}{X_i-X_{i-1}}\right)^2$$

$$-K_{T3}\frac{\theta_iH_i^2}{\bar{k}_i}\left(\frac{\partial P}{\partial\bar{t}}+u^*\frac{\partial P}{\partial X}\right)\left[\left(\frac{P_i-P_i^0}{\bar{t}-\bar{t}^0}\right)+u_i^*\left(\frac{P_i-P_{i-1}}{X_i-X_{i-1}}\right)\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีนิวตัน-ราฟสัน

ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton – Raphson method) เป็นวิธีที่มีรากฐานมาจากอนุกรมเทย์เลอร์ โดยอนุกรมเทย์เลอร์เป็นอนุกรมที่ใช้ในการหาค่าฟังก์ชั่นที่ตำแหน่ง x_0 จากค่าของฟังก์ชั่นและค่าอนุพันธ์ (derivatives) ที่มีอันดับต่างๆ กันของฟังก์ชั่นนั้นที่ตำแหน่ง x_0 ซึ่งจะหาได้ดังนี้

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) \tag{3.46}$$

ดังนั้นสมการ (3.46) จึงเปรียบเสมือนสมการเส้นตรงและให้ค่าที่ถูกต้องเสมอหากฟังก์ชั่นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตรง ระเบียบวิธีนิวตัน – ราฟสันจะหารากของสมการ $f(x) = 0$ โดยใช้การประมาณฟังก์ชั่นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วยพจน์เพียง 2 พจน์ ดังแสดงในสมการ ต่อไปนี้

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) = 0$$

$$\Delta x = x - x_0 = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \tag{3.47}$$

โดยจะทำการคำนวณซ้ำระหว่างค่าเก่ากับค่าใหม่ที่ได้

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^{k+1} \tag{3.48}$$

เมื่อ

$$\Delta x^{k+1} = \frac{f(x^k)}{f'(x^k)}$$

ทำการตรวจสอบความถูกต้องจนกระทั่ง

$$\left|\frac{x^{k+1} - x^k}{x^{k+1}}\right| \le \varepsilon \tag{3.49}$$

จากสมการเรย์โนลด์ และสมการพลังงานจัดรูปโดยใช้วิธีนิวตันราฟสันได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_{P,i}}{\partial P_i} & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_{\theta,i}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta \theta_i \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} F_{P,i} \\ F_{\theta,i} \end{Bmatrix} \tag{3.50}$$

เมื่อ

$$F_{P,i} = \frac{\Phi_{i+\frac{1}{2}}\left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i}\right) - \Phi_{i-\frac{1}{2}}\left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}\right)}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} - \Lambda C_{UT}\left[\frac{(\bar{\rho}H)_i - (\bar{\rho}H)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}\right] -$$

$$\Lambda C_{UT}\left(\frac{S_X}{2}\right)\left\{\left[\left(\bar{\rho}H\left(1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right)\right)_i - \left(\bar{\rho}H\left(1 - 2\frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0}}\right)}\right)\right)_{i-1}\right] \Big/ (X_i - X_{i-1})\right\}$$

$$-\Lambda\left[\frac{(\bar{\rho}H)_i - (\bar{\rho}H)_i^0}{\bar{t} - \bar{t}^0}\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$F_{\theta,i} = (6\theta_2 - 12\theta_i + 6\theta_1) - K_{T1}\frac{\bar{\rho}_i H_i^2}{\bar{k}_i}\left[\left(\frac{\theta_i - \theta_i^0}{\bar{t} - \bar{t}^0}\right) - u_i^*\left(\frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}\right)\right]$$

$$+ K_{T2}\frac{\bar{\mu}_i}{\bar{k}_i}\left(\frac{u_i^* - u_{i-1}^*}{X_i - X_{i-1}}\right)^2$$

$$+ K_{T3}\frac{\theta_i H_i^2}{\bar{k}_i}\left(\frac{\partial P}{\partial \bar{t}} + u^*\frac{\partial P}{\partial X}\right)\left[\left(\frac{P_i - P_i^0}{\bar{t} - \bar{t}^0}\right) - u_i^*\left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}\right)\right]$$

3.4.1 ระเบียบวิธีมัลติกริด (Multigrid Method)

การแก้ปัญหาสมการไม่เป็นเชิงเส้นยกตัวอย่าง โดยเริ่มจากการจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการไม่ต่อเนื่อง (Discretise equation) ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง(finite difference method) หรือวิธีไฟไนท์วอลลุม (finite volume method) เป็นต้น แบ่งกริดออกเป็นระดับ ๆ แต่ละระดับจะมีจำนวนกริดไม่เท่ากัน ส่วนมากนิยมให้จำนวนกริดในแต่ระดับเป็นสัดส่วนลดลงครึ่งหนึ่งจากจำนวนกริดเดิมหรือเพิ่มขึ้นสองเท่า การคำนวณอาจจะเริ่มจากระดับที่มีความละเอียดของกริดมากที่สุดแล้วส่งค่าลงไปยังระดับที่กริดหยาบกว่าลงไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่หยาบที่สุดหลังจากนั้นส่งค่าที่คำนวณได้กลับมาที่ระดับกริดละเอียดที่สุดทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าผลเฉลยจะลู่เข้าสู่คำตอบหรือผลเฉลยที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ หรืออาจจะเริ่มการคำนวณที่กริดหยาบก่อนแล้วค่อยส่งค่าไประดับที่กริดละเอียดต่อไปขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและรูปแบบของวัฏจักร

$$\mathcal{L}U = f \tag{3.51}$$

เมื่อ $\mathcal{L}$ = ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ (The differential operator)

U = ผลเฉลย (Solution)

f = ฟังก์ชันด้านขวามือ (The right hand side function)

จัดรูปสมการอยู่ในรูปสมการไม่ต่อเนื่องและเขียนอยู่ในรูปเวกเตอร์จะได้

$$L\underline{U} = \underline{f} \tag{3.52}$$

เมื่อ

L = เมตริกประมาณค่าตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ (The matrix operator approximating, $\mathcal{L}$)

$\underline{U}$ = เวคเตอร์ประมาณผลเฉลยโดย U (The solution vector approximating, u)

$\underline{f}$ = เวคเตอร์ประมาณค่าสมการฟังก์ชั่นฝั่งขวามือ (The right hand side vector approximating, f)

การหาผลเฉลยในแต่ละระดับสามารถหาได้ โดยกำหนดให้ Ω_h และ Ω_H แสดงถึงค่าในระดับที่มีกริดละเอียดและระดับที่กริดหยาบตามลำดับ

$$L^{\Omega_\mathrm{h}}\underline{U}^{\Omega_\mathrm{h}} = \underline{f}^{\Omega_\mathrm{h}}\ , \qquad L^{\Omega_\mathrm{H}}\underline{U}^{\Omega_\mathrm{H}} = \underline{f}^{\Omega_\mathrm{H}} \tag{3.53}$$

การแก้ปัญหาขั้นต้นต้องสมมติค่าเริ่มต้น $\underline{\tilde{U}}^{\Omega_\mathrm{h}}$ เพื่อหาค่า $\underline{U}^{\Omega_\mathrm{h}}$ ที่ระดับละเอียด ดังนั้นค่าความผิดพลาด(Error) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underline{e}^{\Omega_h} = \underline{U}^{\Omega_h} - \underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} \quad (3.54)$$

ซึ่งค่าเศษตกค้าง (Residual) ของคำตอบคำนวณได้จาก

$$\underline{r}^{\Omega_h} = \underline{f}^{\Omega_h} - L^{\Omega_h}\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} \quad (3.55)$$

จะได้ว่า

$$\underline{r}^{\Omega_h} = L^{\Omega_h}\underline{U}^{\Omega_h} - L^{\Omega_h}\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} \quad (3.56)$$

สามารถลดรูปได้ ถ้า L^{Ω_h} คือตัวดำเนินการเชิงเส้น

$$L^{\Omega_h}\left(\underline{U}^{\Omega_h} - \underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h}\right) = \underline{r}^{\Omega_h} \quad (3.57)$$

แทนค่าลงไป จะได้ว่า

$$L^{\Omega_h}\underline{e}^{\Omega_h} = \underline{r}^{\Omega_h} \quad (3.58)$$

สำหรับค่าความผิดพลาดที่ระดับที่กริดหยาบ สามารถหาได้จากการส่งค่าเศษตกค้างของผลเฉลยจากระดับละเอียดกว่าที่ส่งลงมาในระดับกริดหยาบกว่า

$$L^{\Omega_H}\underline{e}^{\Omega_H} = I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\underline{r}^{\Omega_h} \quad (3.59)$$

เมื่อ $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ = ตัวดำเนินการถ่ายโอนจากระดับที่กริดละเอียดไปสู่ระดับกริดหยาบ (The fine to coarse grid transfer operator)

ที่ระดับกริดหยาบจะคำนวณซ้ำเพื่อหาผลเฉลยจนกระทั่งได้ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้และส่งค่าผิดพลาดไปยังระดับที่กริดละเอียดกว่าต่อไป

$$\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} = \underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} + I_{\Omega_H}^{\Omega_h}\underline{r}^{\Omega_h} \quad (3.60)$$

เมื่อ $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$ = ตัวดำเนินการถ่ายโอนจากระดับที่กริดหยาบไปสู่ระดับที่กริดละเอียด (The coarse to fine grid transfer operator)

3.4.1.1 การถ่ายโอนค่า (Grid Transfer)

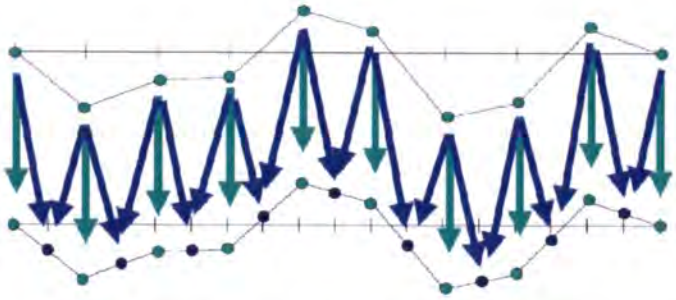
การถ่ายโอนค่า คือการส่งค่าหาค่าตัวดำเนินการถ่ายโอน (Operators) โดยส่งค่าจากระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่าไปยังระดับที่มีจำนวนกริดมากขึ้น การถ่ายโอนค่าจากระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่า (Ω_H) ไปยังระดับที่มีจำนวนกริดมากกว่า (Ω_h) จะเรียกตัวดำเนินการในการถ่ายโอนว่าว่าตัวดำเนินการถ่ายโอนภายแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation Operator, $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$) กำหนดให้ n คือจำนวนกริด และ h คือความกว้างของแต่ละกริดมีค่าเท่ากับ $\Omega_h = 1/n$ ถ้ากำหนดให้ระดับที่มี จำนวนกริดแบบหยาบมีจำนวน กริดเท่ากับ 4 กริด และที่ระดับที่มีจำนวนกริดแบบละเอียดมีจำนวนกริดเป็น 8 กริด ดังนั้นจำนวนกริดภายในระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบและระดับที่มีกริดแบบละเอียดเท่ากับ 3 และ 7 ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.2 (ไม่รวมกริดแรกและกริดสุดท้าย) ซึ่งค่า $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$ คือ

$$I_{\Omega_H}^{\Omega_h}U^{\Omega_H} = U^{\Omega_h} \quad (3.61)$$

เมื่อ U^{Ω_H} คือเวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบหยาบ

U^{Ω_h} คือเวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการประมาณค่าของเวกเตอร์จากระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ Ω_H ไปเป็นระดับที่มีจำนวนกริดแบบละเอียด Ω_h

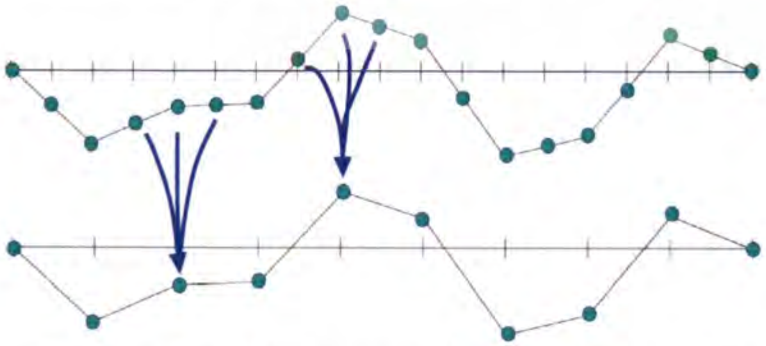
ค่าการถ่ายโอนเชิงเส้นจากระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบไปยังระดับที่มีจำนวนกริดละเอียดขึ้น

$$I_{\Omega_H}^{\Omega_h} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.62}$$

ดังนั้นค่าเวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบละเอียด U^{Ω_h} หาได้จาก

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} U_1^{\Omega_H} \\ U_2^{\Omega_H} \\ U_2^{\Omega_H} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.5U_1^{\Omega_H} \\ U_1^{\Omega_H} \\ 0.5(U_1^{\Omega_H} + U_2^{\Omega_H}) \\ U_2^{\Omega_H} \\ 0.5(U_2^{\Omega_H} + U_3^{\Omega_H}) \\ U_3^{\Omega_H} \\ 0.5U_3^{\Omega_H} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_1^{\Omega_h} \\ U_2^{\Omega_h} \\ U_3^{\Omega_h} \\ U_4^{\Omega_h} \\ U_5^{\Omega_h} \\ U_6^{\Omega_h} \\ U_7^{\Omega_h} \end{Bmatrix} \tag{3.63}$$

การถ่ายโอนค่าจากระดับกริดละเอียดไปยังระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่า ตัวดำเนินการถ่ายโอนจากระดับกริดละเอียด (Ω_h) ไประดับกริดหยาบกว่า (Ω_H) เรียกว่าตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด (Restriction Operator, $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การประมาณค่าของเวกเตอร์ส่งถ่ายของระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ (Ω_H) จากการถ่ายโอนค่าจากระดับที่ละเอียดกว่า (Ω_h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ระดับที่มีจำนวนกริดแบบละเอียดมีจำนวนกริดเท่ากับ 8 กริด และระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบมี 4 กริด ดังนั้นจำนวนกริดภายในระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบและละเอียดเท่ากับ 3 และ 7 ตามลำดับ ค่าตัวดำเนินการถ่ายโอนแบบจำกัด $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ แสดงดังสมการ

$$I_{\Omega_h}^{\Omega_H} U^{\Omega_h} = U^{\Omega_H} \tag{3.64}$$

$$I_{\Omega_h}^{\Omega_H} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{3.65}$$

ดังนั้นค่าเวกเตอร์ที่ระดับกริดหยาบ U^{Ω_H} มีค่าดังนี้

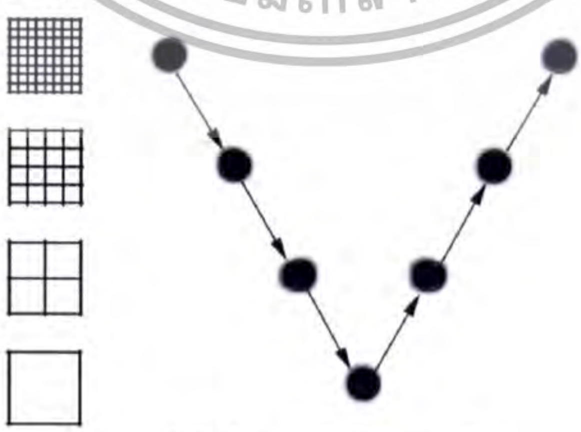
$$\frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} U_1^{\Omega_h} \\ U_2^{\Omega_h} \\ U_3^{\Omega_h} \\ U_4^{\Omega_h} \\ U_5^{\Omega_h} \\ U_6^{\Omega_h} \\ U_7^{\Omega_h} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_1^{\Omega_H} \\ U_2^{\Omega_H} \\ U_3^{\Omega_H} \end{Bmatrix} \tag{3.66}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$ และ $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$I_{\Omega_h}^{\Omega_H} = \frac{1}{2}\left(I_{\Omega_H}^{\Omega_h}\right)^T \tag{3.67}$$

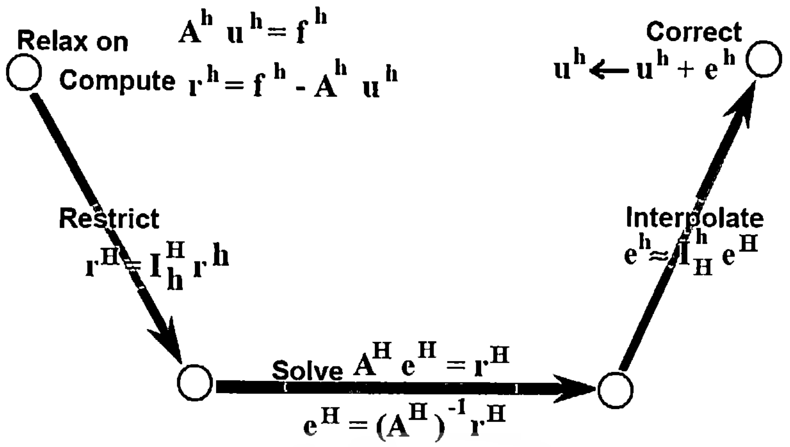
3.4.1.2 วัฏจักรของมัลติกริด (Multigrid Cycles)

วัฏจักรวี (V-cycle) เริ่มต้นคำนวณที่กริดละเอียดก่อนและส่งค่าเศษตกค้าง (Residual) ไประดับที่กริดหยาบขึ้นและจะปรับแก้ค่าความผิดพลาด (Error) จากค่าความผิดพลาดที่ได้จากระดับที่กริดหยาบและทำการคำนวณซ้ำอีกครั้งที่กริดละเอียดจนกว่าจะได้ค่าคำตอบที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้แสดงดังรูปที่ 3.4



(ก) วัฏจักรของมัลติกริดแบบวี

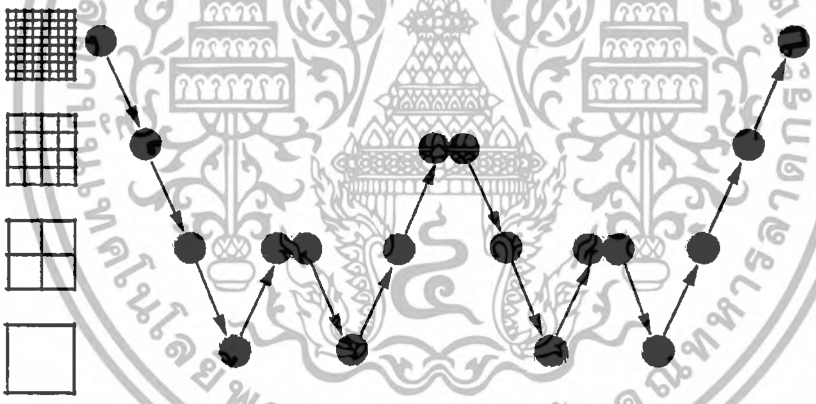
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แสดงการถ่ายโอนค่าระหว่างระดับ

รูปที่ 3.4 (ก) วัฏจักรของมัลติกริดแบบวี และ (ข) แสดงการถ่ายโอนค่าระหว่างระดับ

วัฏจักรดับเบิลยู (W-cycle) การถ่ายโอนค่าระหว่างระดับกริดหยาบและระดับที่กริดละเอียดจะคล้ายวัฏจักรวี วัฏจักรดับเบิลยูมีความแม่นยำสูง แต่ละรอบจะใช้เวลานาน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วัฏจักรของมัลติกริดแบบ W-cycle

3.4.1.3 การประมาณค่าแบบเต็ม (Full Approximation Scheme, FAS)

โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นและเริ่มคำนวณที่ระดับกริดละเอียดที่สุดก่อนดังนั้นค่าเศษตกค้าง (Residual) สามารถหาค่าได้จาก

$$\underline{r}^{\Omega_h} = L^{\Omega_h}\left(\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} + \underline{U}^{\Omega_h}\right) - L^{\Omega_h}\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} \tag{3.68}$$

จะได้ว่า

$$L^{\Omega_h}\left(\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} + \underline{U}^{\Omega_h}\right) = L^{\Omega_h}\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} + \underline{r}^{\Omega_h} \tag{3.69}$$

สำหรับที่ระดับกริดหยาบค่าเริ่มต้นจะเท่ากับผลรวมระหว่างผลเฉลยที่ส่งจากระดับที่ละเอียดกว่าและค่าความผิดพลาด

$$\underline{\widehat{U}}^{\Omega_h} = I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\underline{\widetilde{U}}^{\Omega_h} + \underline{e}^{\Omega_H} \tag{3.70}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการคำนวณหาผลเฉลยที่ระดับหยาบเท่ากับ

$$L^{\Omega_H}\underline{\tilde{U}}^{\Omega_H} = \underline{\hat{f}}^{\Omega_H} \tag{3.71}$$

$$\underline{\hat{f}}^{\Omega_H} = L^{\Omega_H}\left(I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\underline{\tilde{U}}^{\Omega_h}\right) + I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\underline{r}^{\Omega_h} \tag{3.72}$$

ทำการคำนวณซ้ำจะได้ผลเฉลย $\underline{\tilde{U}}^{\Omega_H}$ และจะได้ค่าผิดพลาด $\underline{e}^{\Omega_H}$ เท่ากับ

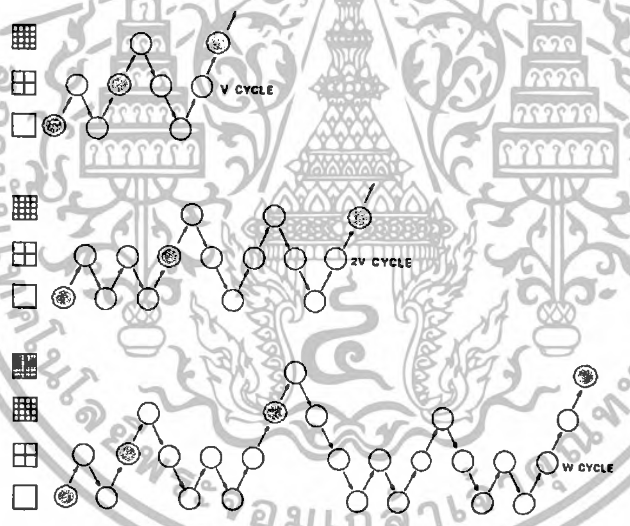
$$\underline{e}^{\Omega_H} = \underline{\tilde{U}}^{\Omega_H} - I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\underline{\tilde{U}}^{\Omega_h} \tag{3.73}$$

ดังนั้นการประมาณค่าที่ระดับละเอียดกว่าจะได้ว่า

$$\underline{\tilde{U}}^{\Omega_h} = \underline{\tilde{U}}^{\Omega_h} + I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\left(\underline{\tilde{U}}^{\Omega_H} - I_{\Omega_h}^{\Omega_H}\underline{\tilde{U}}^{\Omega_h}\right) \tag{3.74}$$

3.4.1.4 มัลติกริดแบบเต็ม (Full Multigrid, FMG)

เริ่มต้นคำนวณที่ระดับกริดละเอียดสุดก่อน (FAS) จะเสียเวลาคำนวณนานต่างกับวิธี FMG ที่เริ่มคำนวณที่ระดับกริดหยาบที่สุดก่อนเพื่อให้ได้ค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมแล้วจึงนำเข้าสู่ V cycle หรือ W cycle ดังรูปที่ 3.6 วงกลมสีเทาหมายถึงคำนวณซ้ำจนได้ค่าคำตอบที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ส่วนวงกลมสีขาวไม่จำเป็นต้องคำนวณจนกระทั่งค่าผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการคำนวณแบบ FMG 3 รูปแบบคือ V-cycle, 2V-cycle และ W-cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการจำลอง

ในการคำนวณผลการจำลองผลของอนุภาคของแข็งที่มีต่อเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบฟิล์มบาง โดยสารหล่อลื่นของแข็งเป็นอนุภาคนาโน ชิ้นส่วนรับแรงและสารหล่อลื่น มีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของทรงกระบอกและสารหล่อลื่น

คุณสมบัติ	
Elasticity modulus, GPa	205
Density, kg/m^3	7850
Poison ratio	0.30
Specific heat, J/(kg-K)	475
Thermal conductivity, W/(m-K)	50.20
Slip Ratio	0.75
Inlet density of the lubricant, kg/m^3	892.80
Inlet viscosity of the lubricant, Pa-s	0.195
Viscosity-Pressure index (Z_1)	0.5685
Specific heat of the lubricant, J/(kg-K)	1870
Thermal conductivity of the lubricant, W/(m-K)	0.126
Inlet temperature of the lubricant, K	313.15
Power law index (n)	0.985
Coefficient of thermal expansively (β), *1/K*	0.00074
Viscosity-Temperature coefficient (γ), *1/K*	0.05763

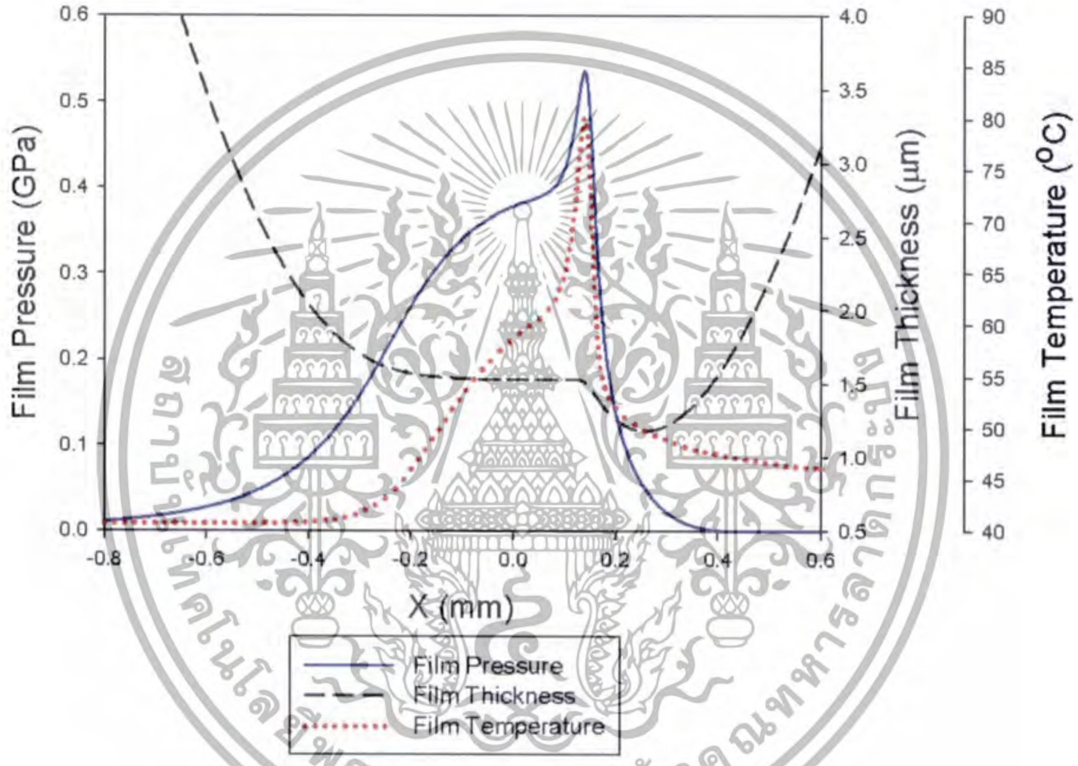
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นของแข็ง alumina (Al_2O_3) [25]

คุณสมบัติ	Alumina
Density, kg/m^3	3890
Specific heat, J/(kg-K)	729
Thermal conductivity, W/(m-K)	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวเมื่อรับภาระต่าง ๆ

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ถึง 800 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ

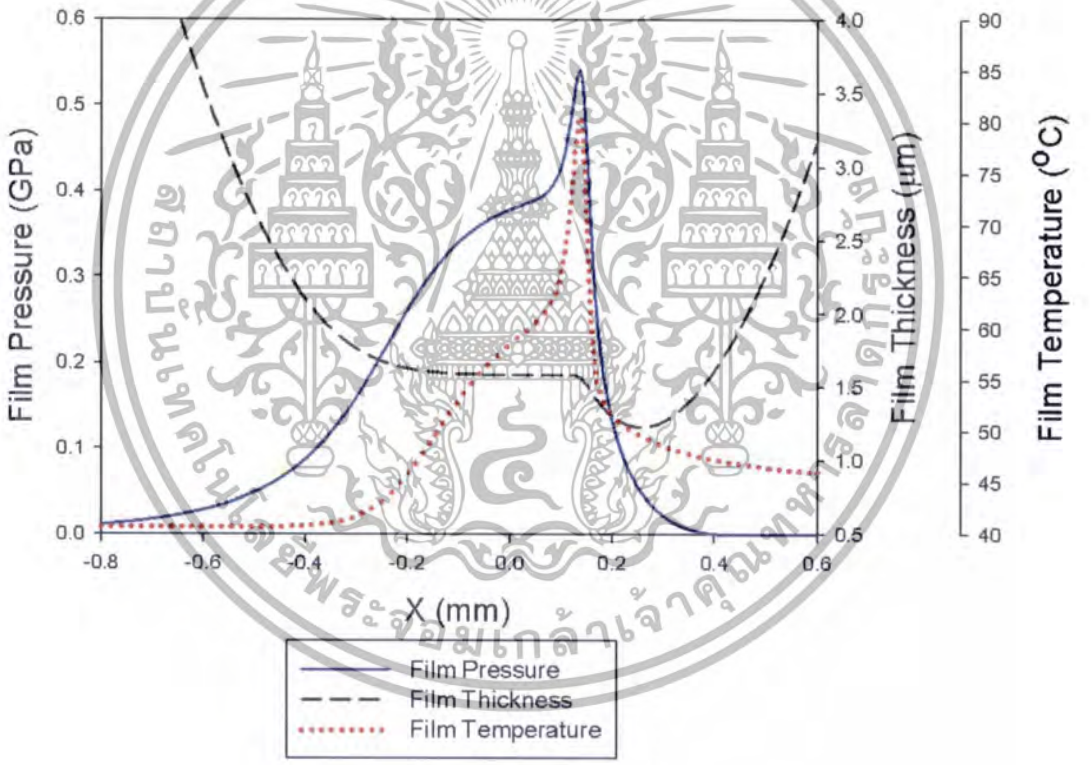


รูปที่ 4.1 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ **0.96 m/s** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

จากการจำลองผลพบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของการสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยพบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อ

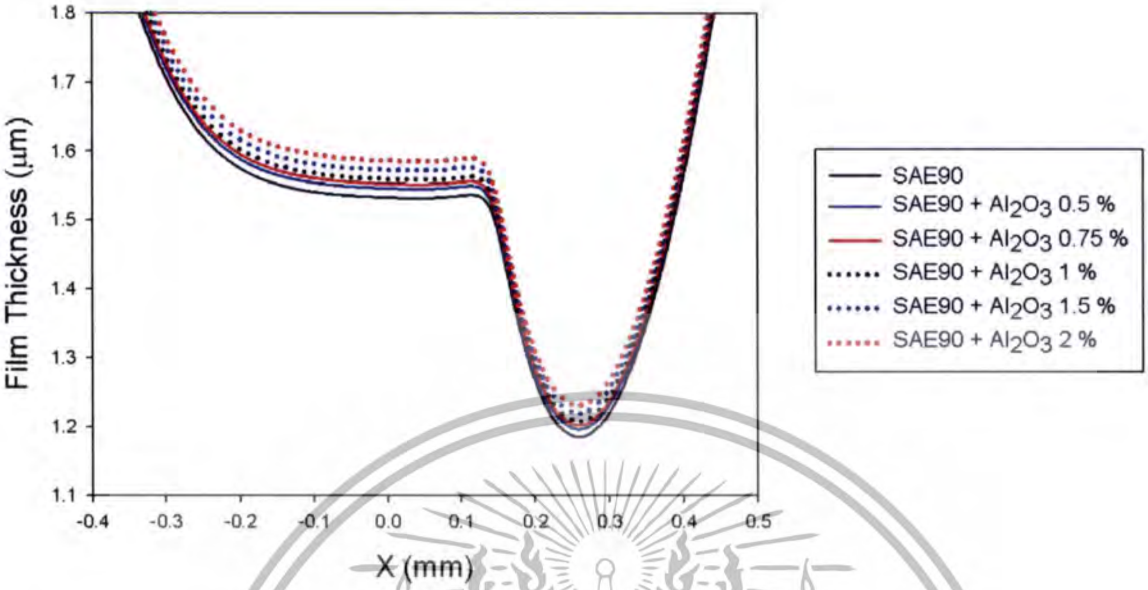
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5407 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1366 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5355 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1392 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 80.6414 °C ที่ตำแหน่ง + 0.1366 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 80.1543 °C ที่ตำแหน่ง + 0.1392 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.2306 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.2567 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.1848 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2580 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0458 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.3 รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 ตามลำดับ

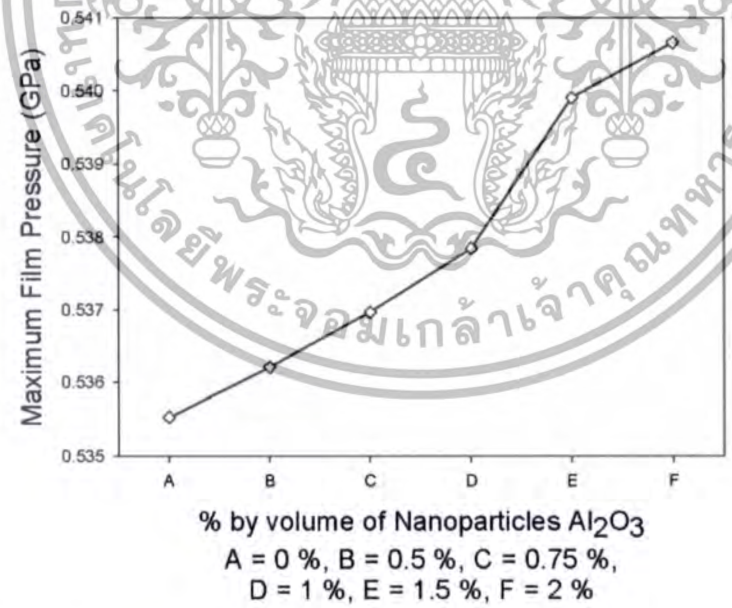


รูปที่ 4.2 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

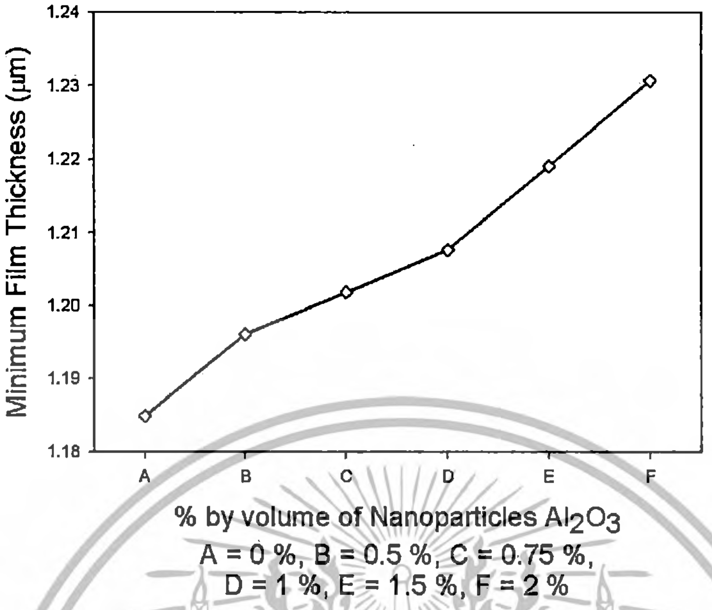


รูปที่ 4.3 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

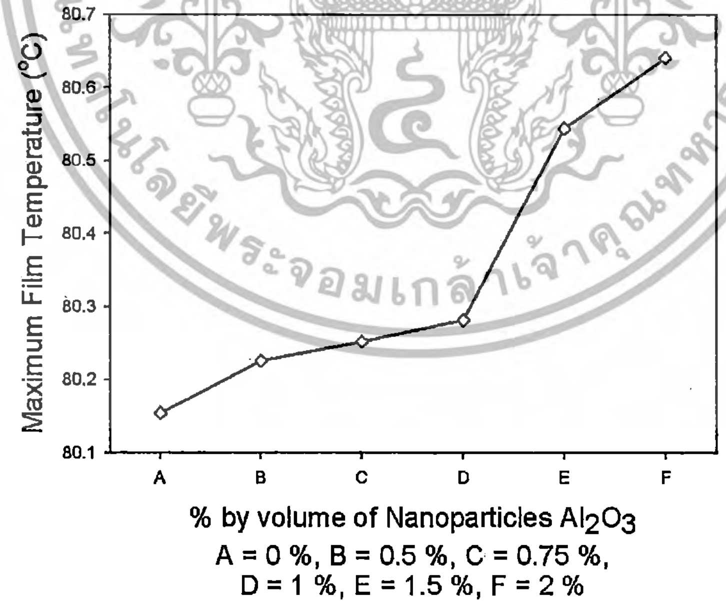


รูปที่ 4.4 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



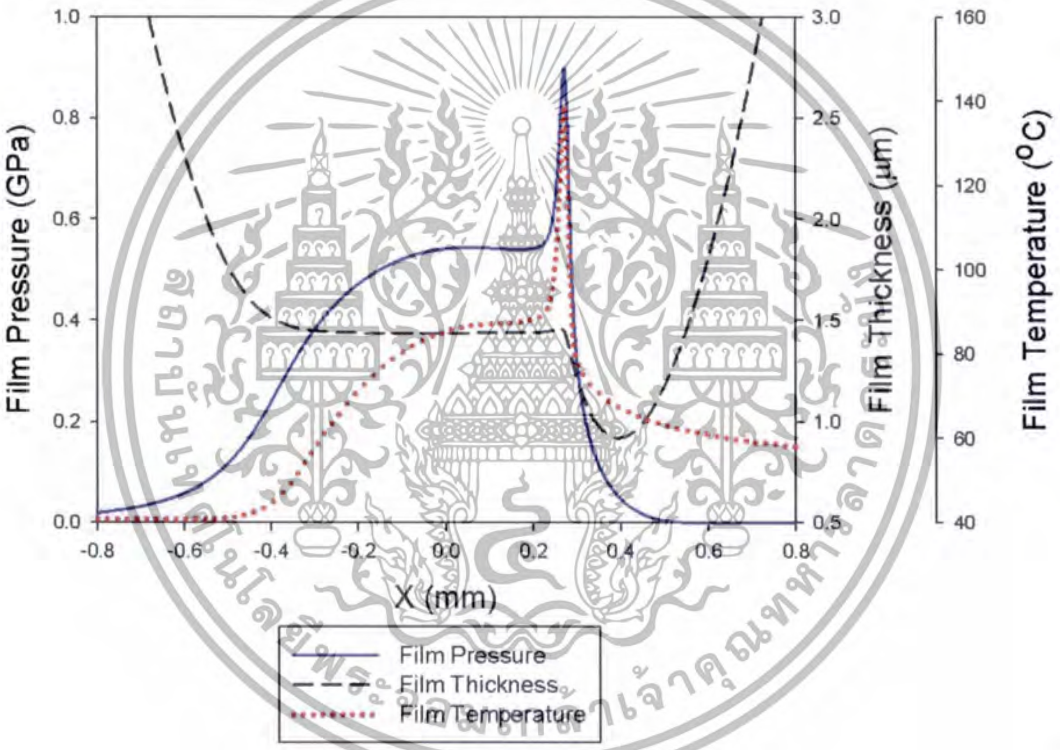
รูปที่ 4.5 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

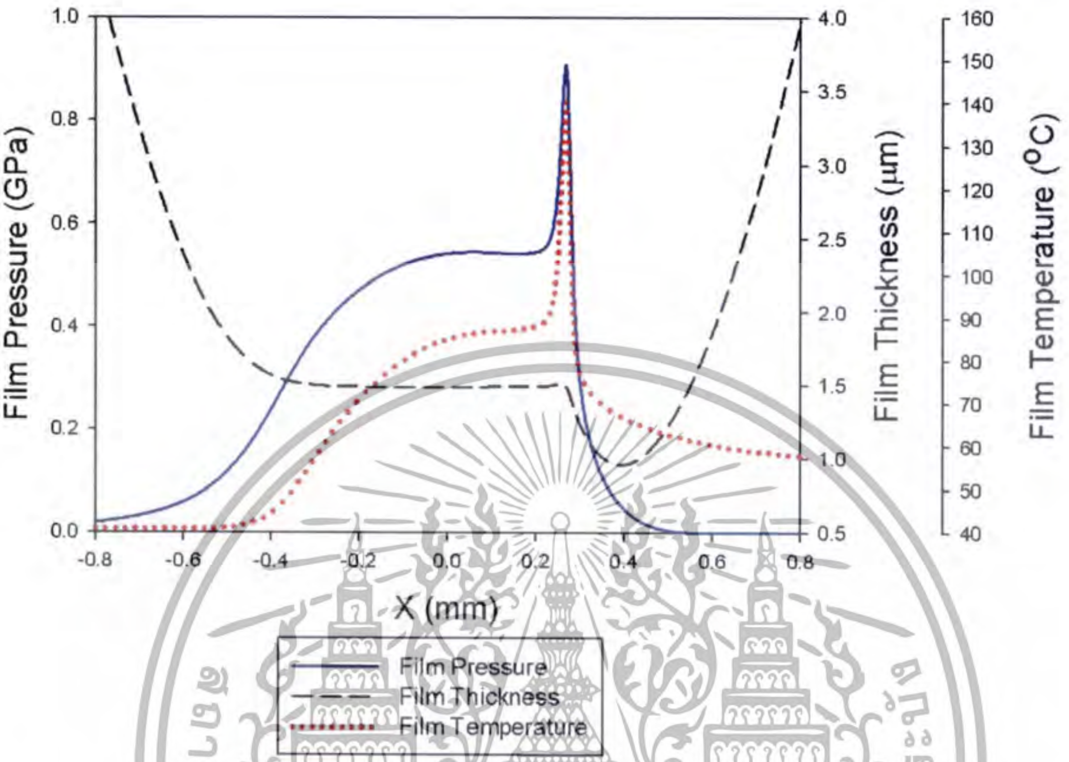
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.12 แสดงผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ จากการจำลองผลพบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

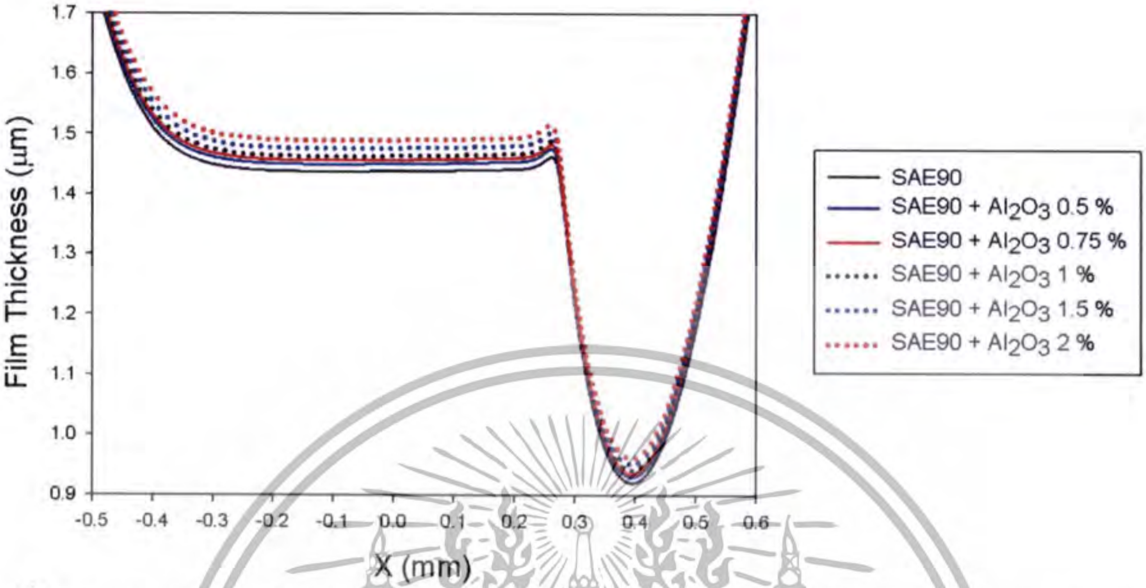
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



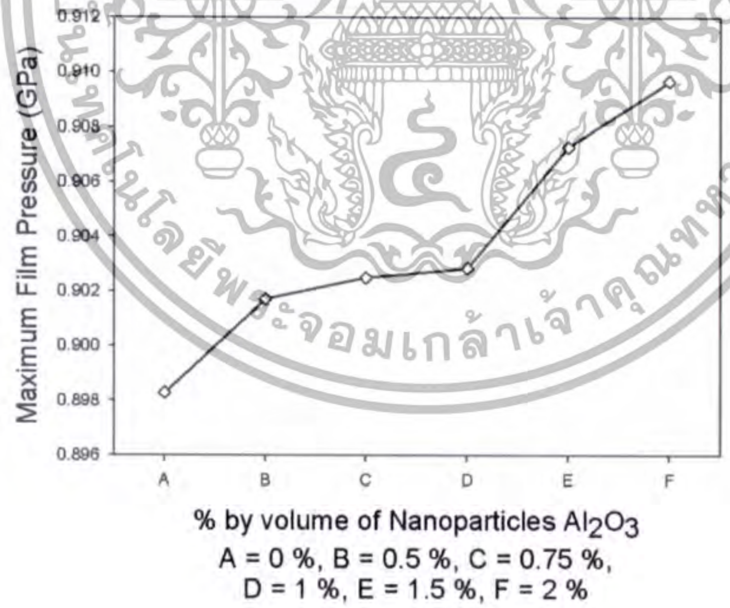
รูปที่ 4.8 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ **400 kN/m** ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ **0.96 m/s** โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

โดยพบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.9097 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.2675 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.8983 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.2712 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 140.4214 °C ที่ตำแหน่ง + 0.2675 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 139.1058 °C ที่ตำแหน่ง + 0.2712 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.9614 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.3919 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.9207 μm ที่ตำแหน่ง + 0.3938 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0407 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.9 รูปที่ 4.10 ถึง 4.12 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

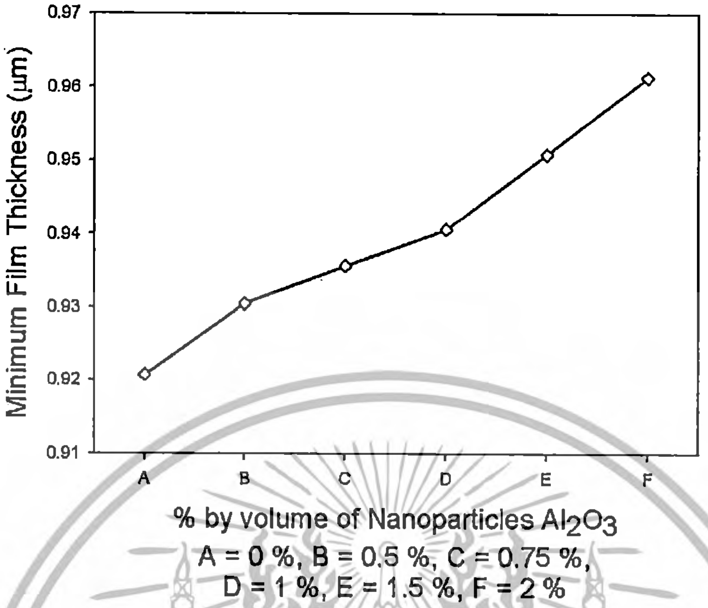


รูปที่ 4.9 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

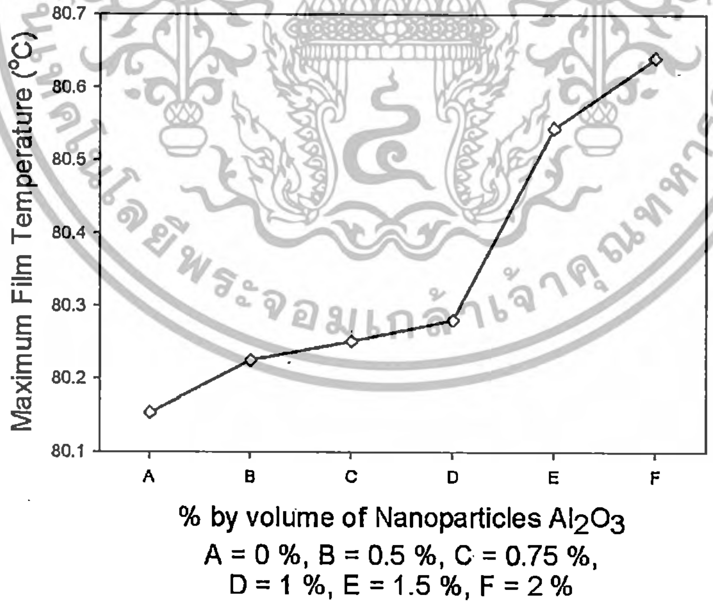


รูปที่ 4.10 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



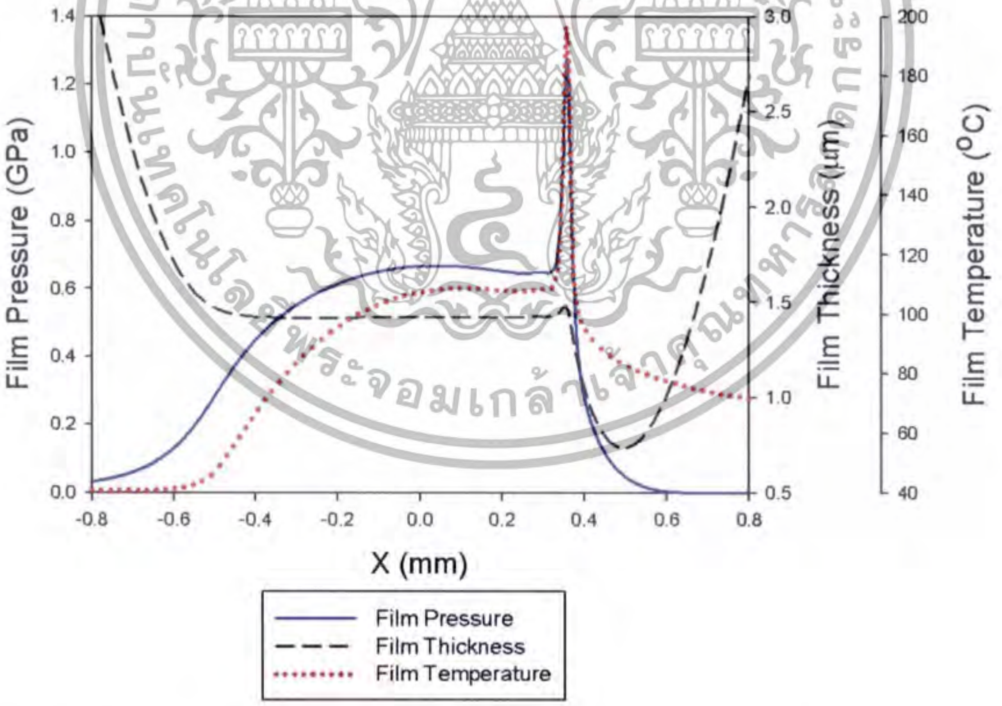
รูปที่ 4.11 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

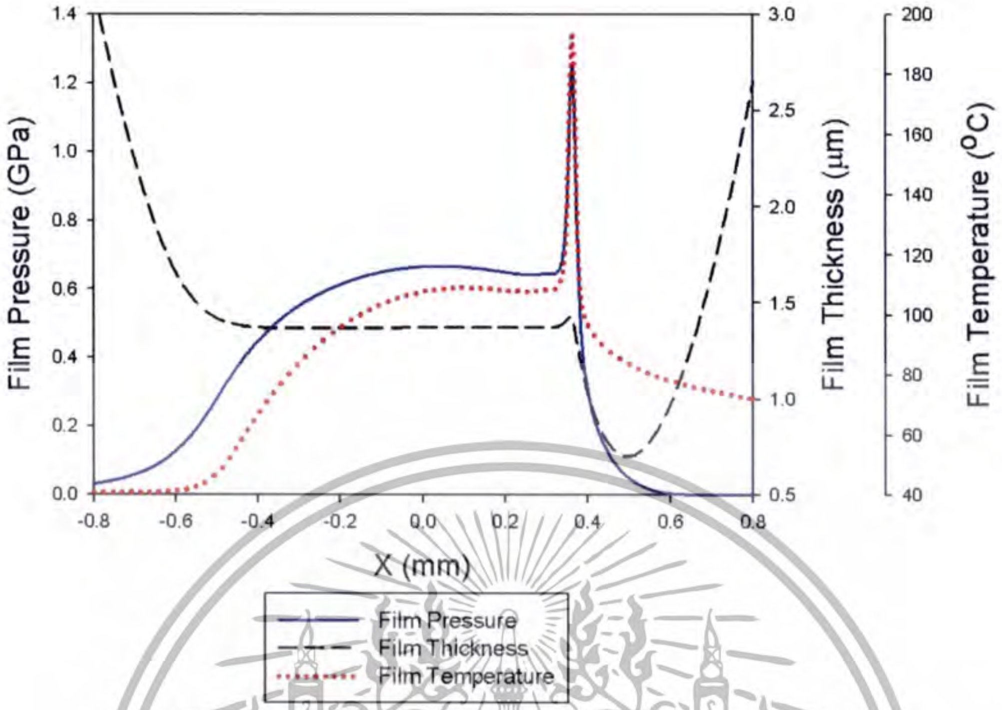
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.18 โดยพบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.2750 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.3594 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.2565 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.3617 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 196.6412 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.3594 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 194.2940 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.3617 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.7334 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.4948 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.7009 μm ที่ตำแหน่ง + 0.4959 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0325 μm

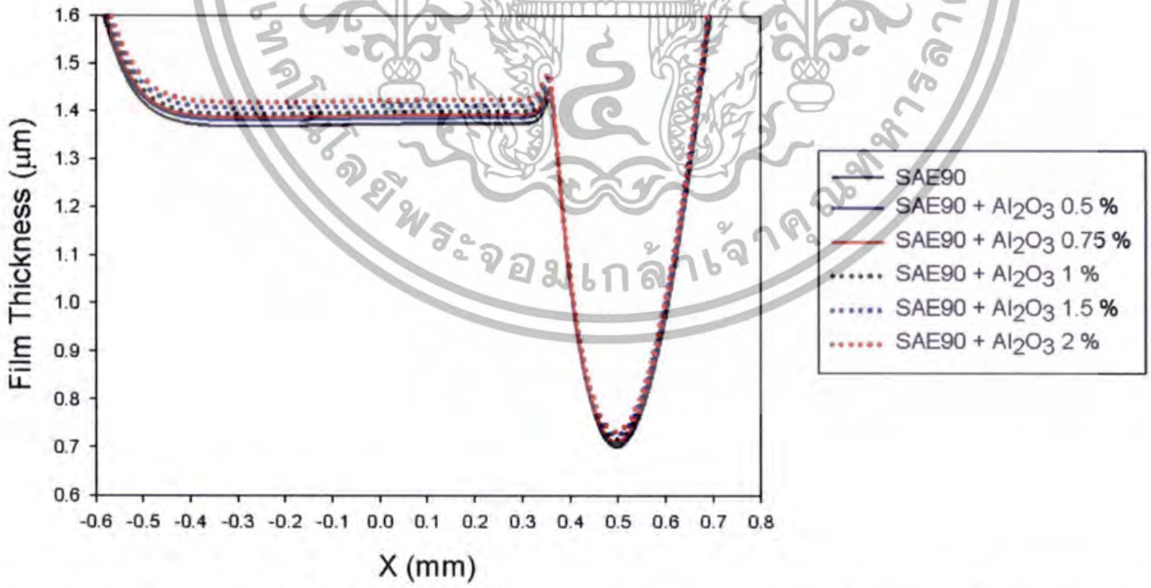


รูปที่ 4.13 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

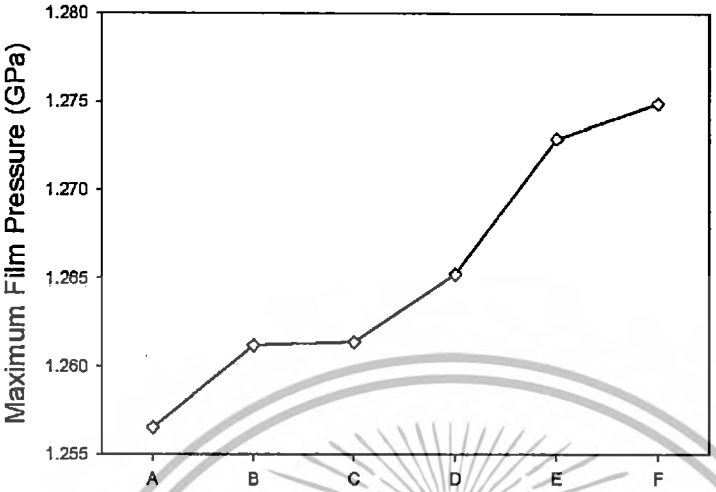


รูปที่ 4.14 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

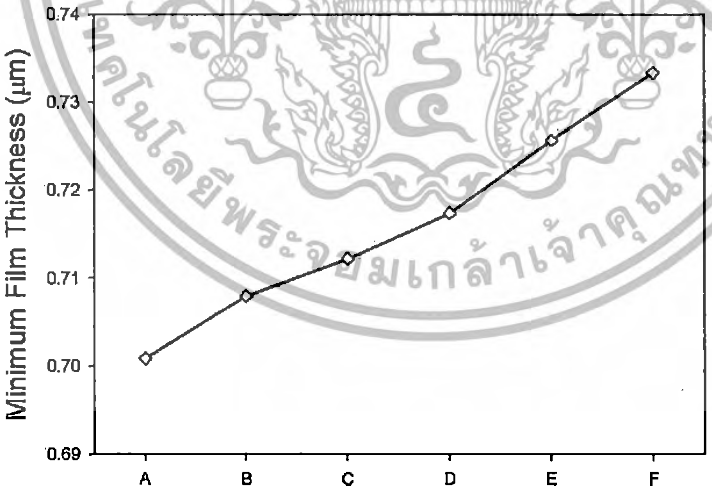


รูปที่ 4.15 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

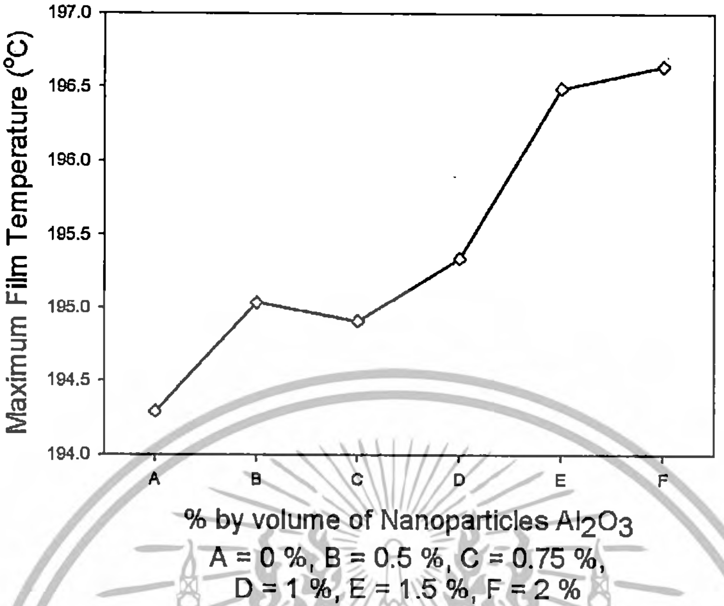


รูปที่ 4.16 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.17 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

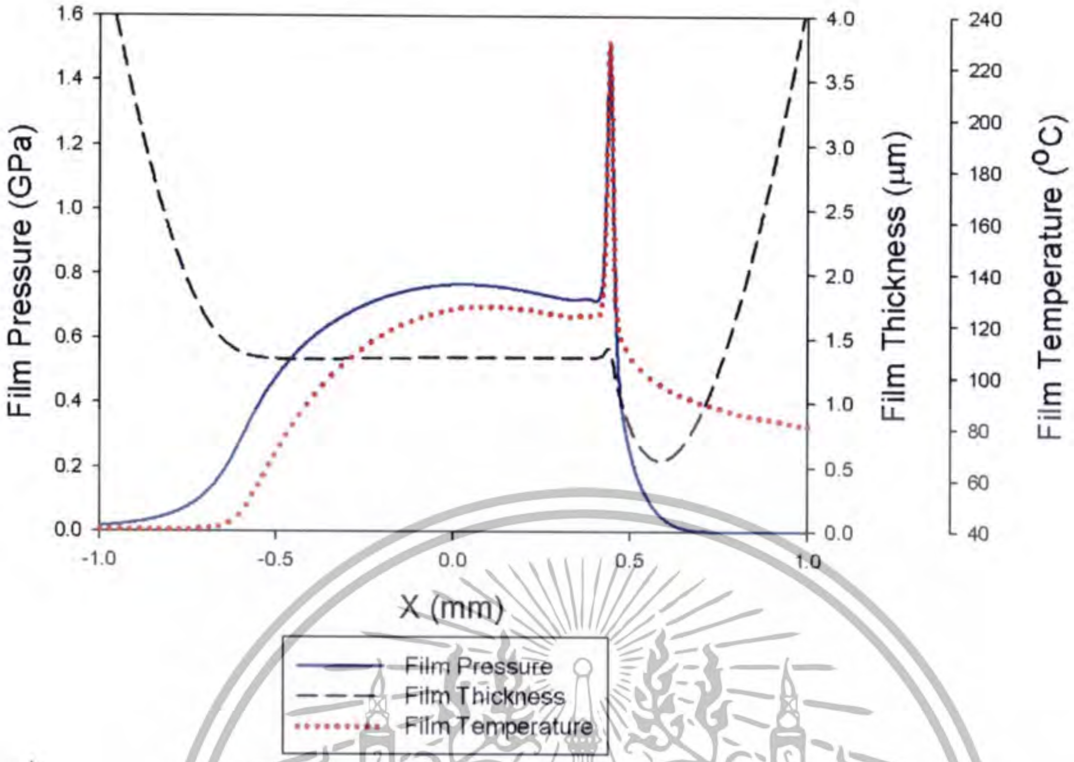
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



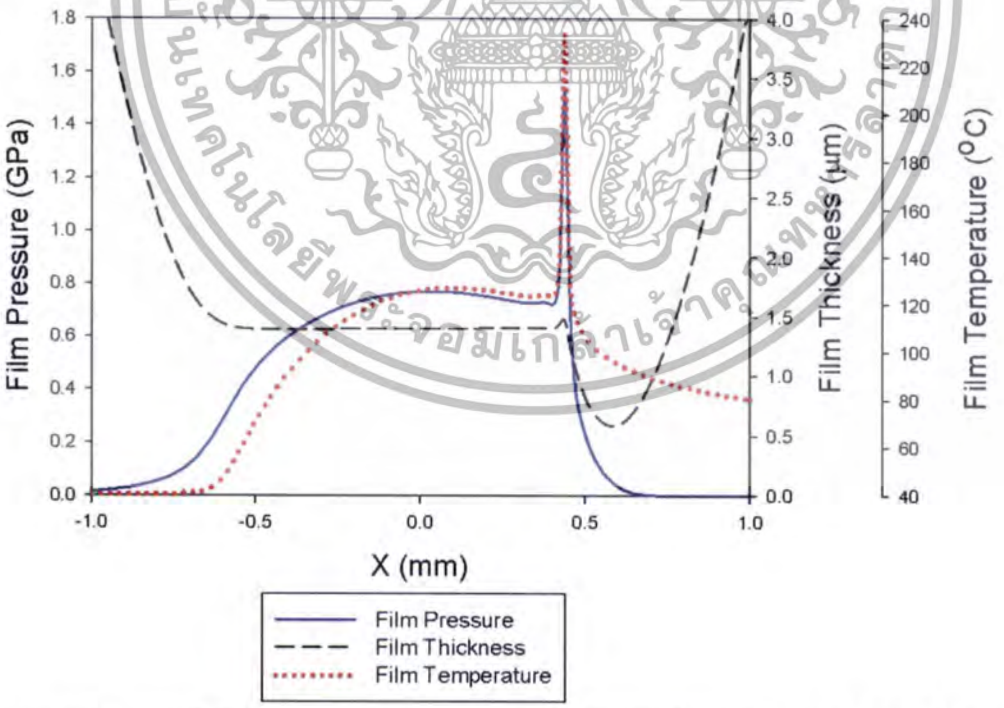
รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

ผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 1.0 %, 1.5 % 2.0 %, 3.0 %, 4.0 % และ 5.0 % ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.24 โดยพบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.5281 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.4360 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.5033 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.4413 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 233.8700 $^{\circ}$C ที่ตำแหน่ง + 0.4360 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 230.8189 $^{\circ}$C ที่ตำแหน่ง + 0.4413 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.5842 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.5831 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.5561 μm ที่ตำแหน่ง + 0.5831 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0011 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

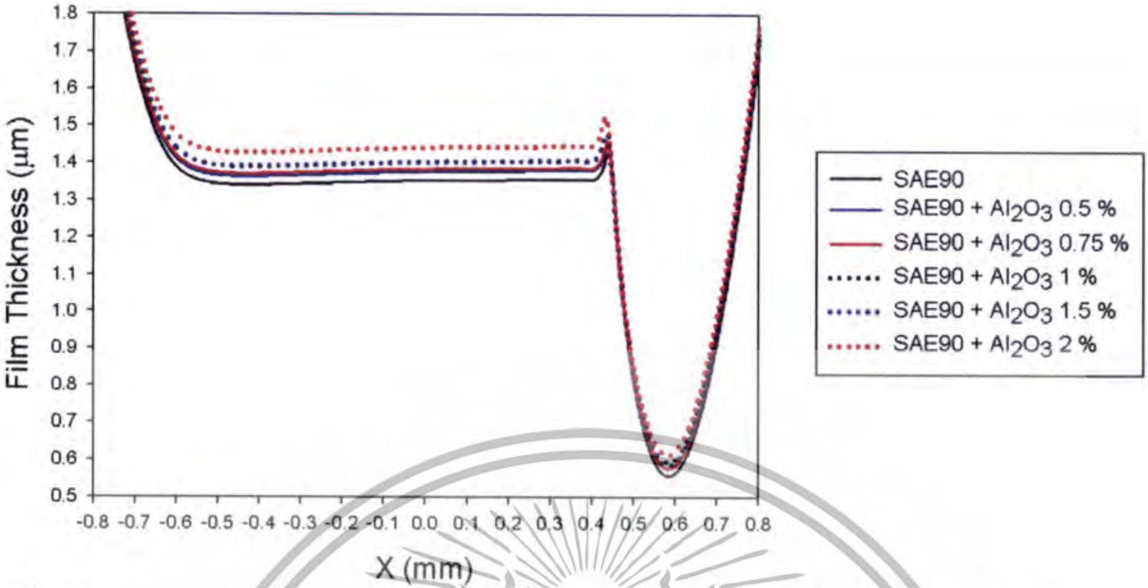


รูปที่ 4.19 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

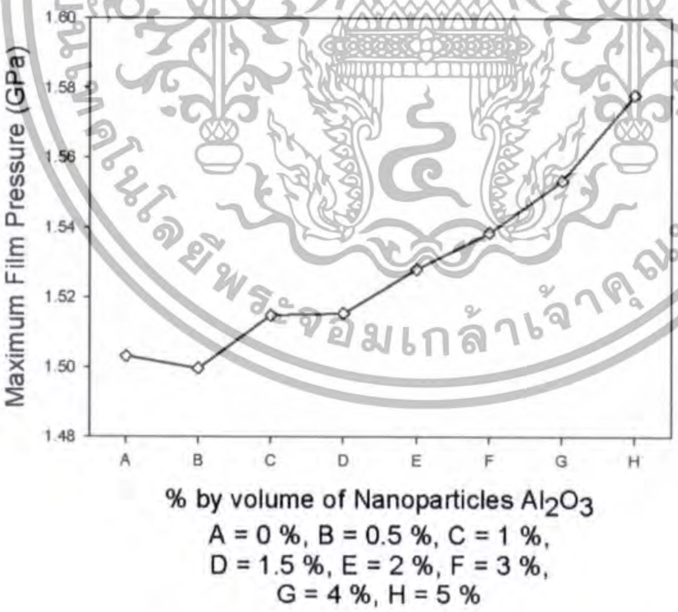


รูปที่ 4.20 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

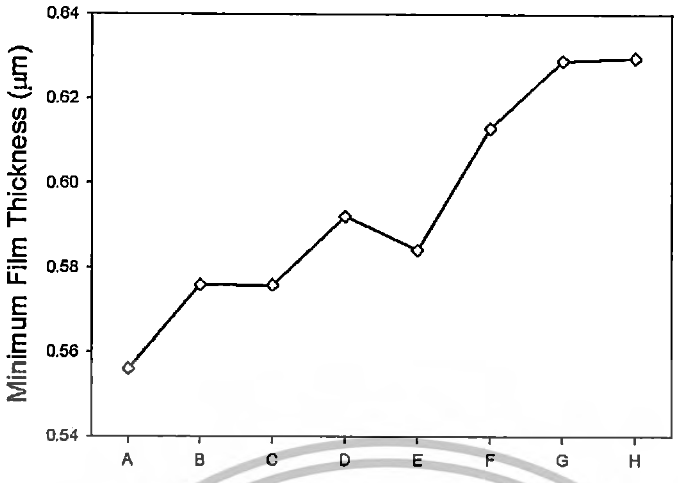


รูปที่ 4.21 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

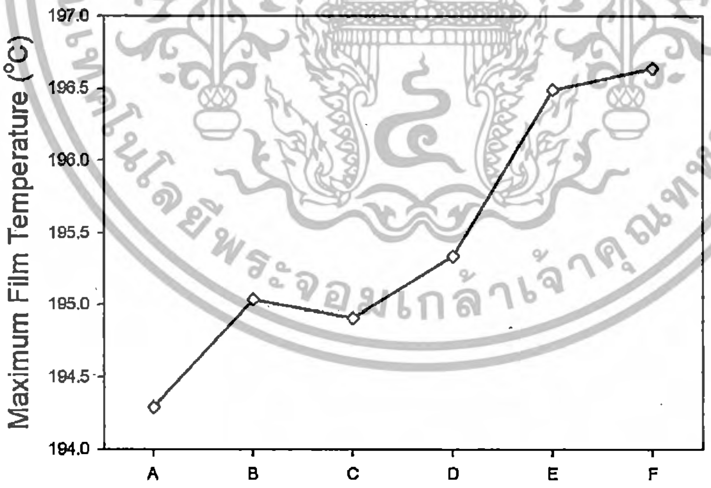


รูปที่ 4.22 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 % และ 5.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 % และ 5.0 % โดยปริมาตร

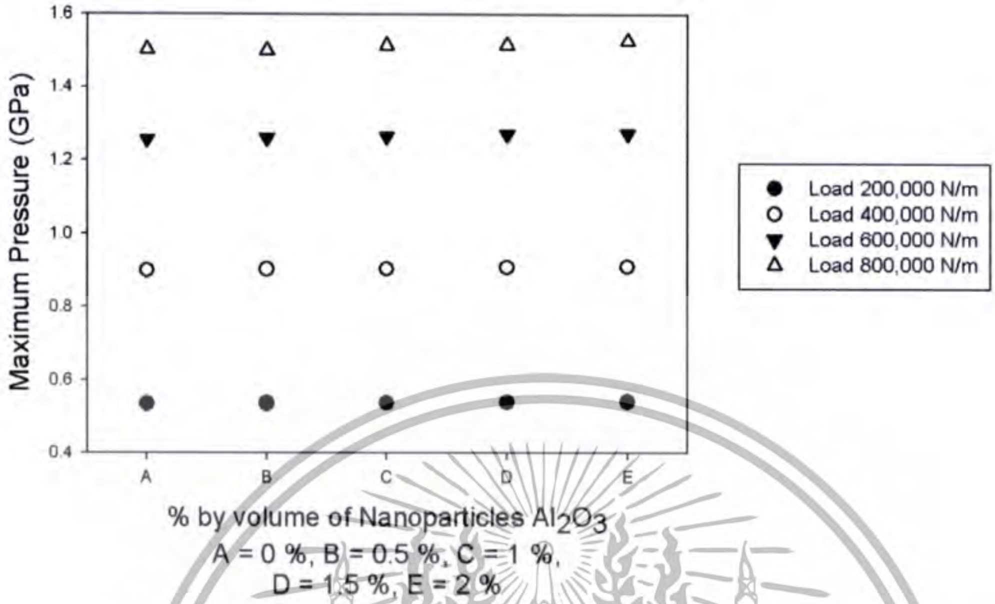


รูปที่ 4.24 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 % และ 5.0 % โดยปริมาตร

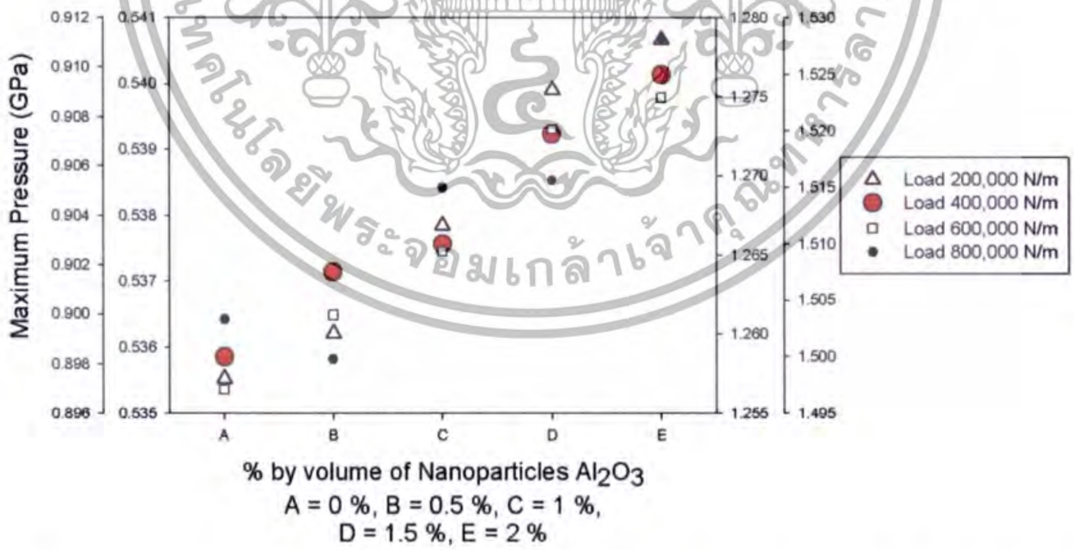
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบเนื่องจากผลของภาระที่ทรงกระบอกรับจาก 200 kN/m เป็น 800 kN/m พบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เป็นไปในทางเดียวกันคือค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆกัน และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆกัน แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุก ๆภาระที่กระทำ โดยในรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าเมื่อลูกกลิ้งรับภาระมากขึ้น ค่าความดันสูงสุดก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น ที่ภาระ 200 kN/m เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5407 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5355 GPa สำหรับที่ภาระ 800 kN/m เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 1.5281 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 1.5033 GPa ส่วนค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดที่ภาระ 200 kN/m เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.2307 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.1849 μm สำหรับที่ภาระ 800 kN/m เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 0.5842 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 0.5561 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 สำหรับค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 โดยที่ภาระ 200 kN/m เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 80.6414 $^{\circ}C$ และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 80.1543 $^{\circ}C$ สำหรับที่ภาระ 800 kN/m เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 233.8700 $^{\circ}C$ และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 230.8189 $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

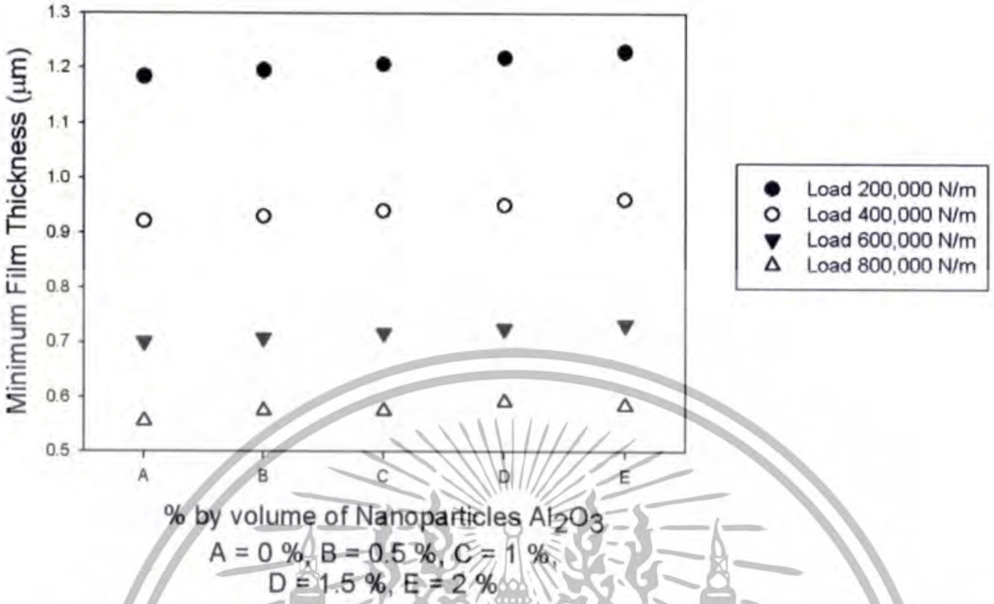


รูปที่ 4.25 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

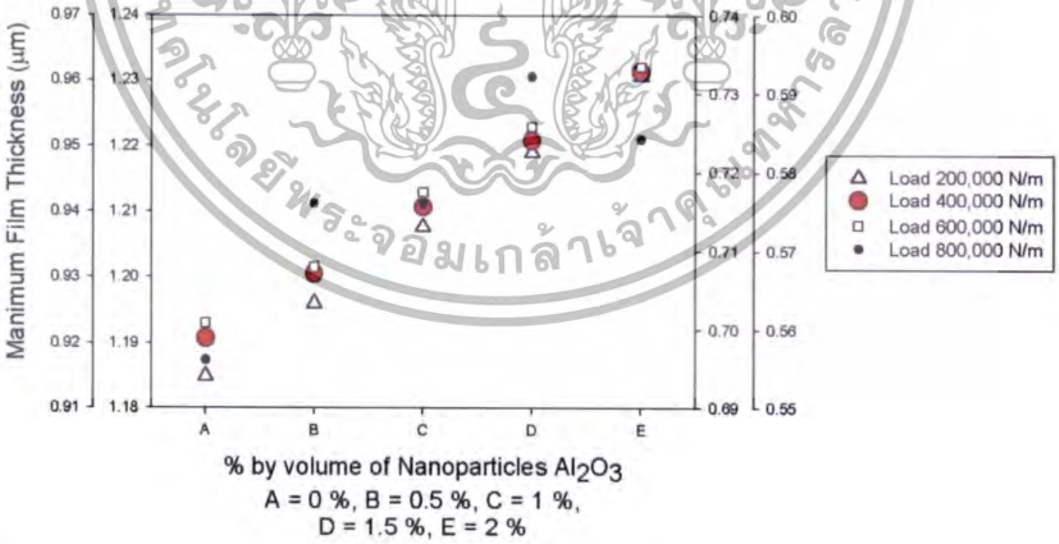


รูปที่ 4.26 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

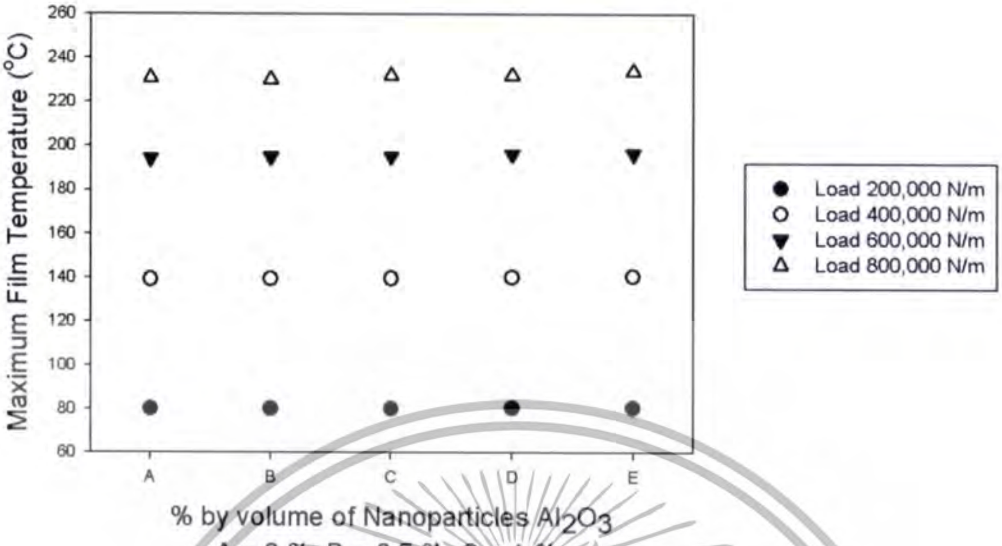


รูปที่ 4.27 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

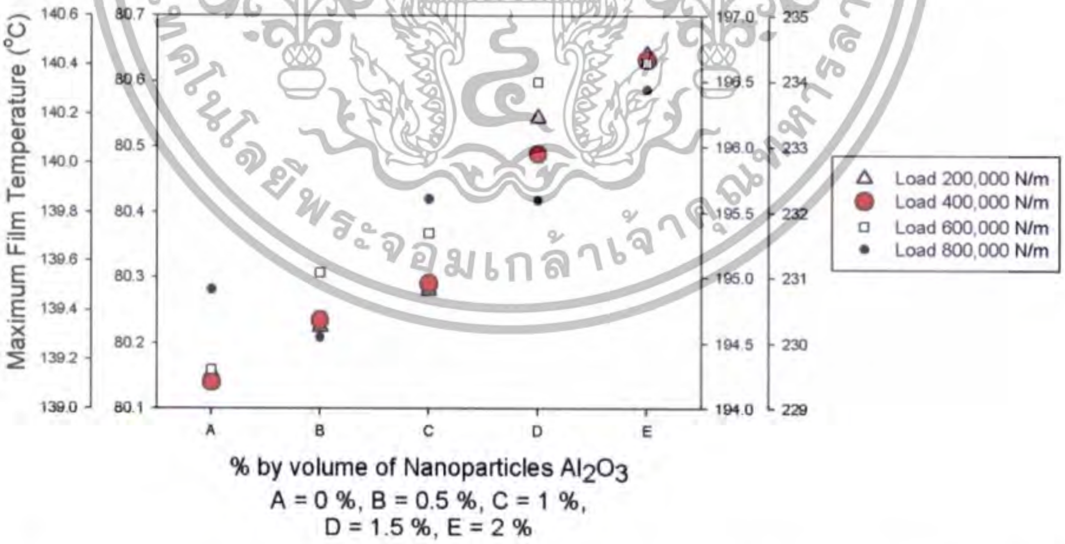


รูปที่ 4.28 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

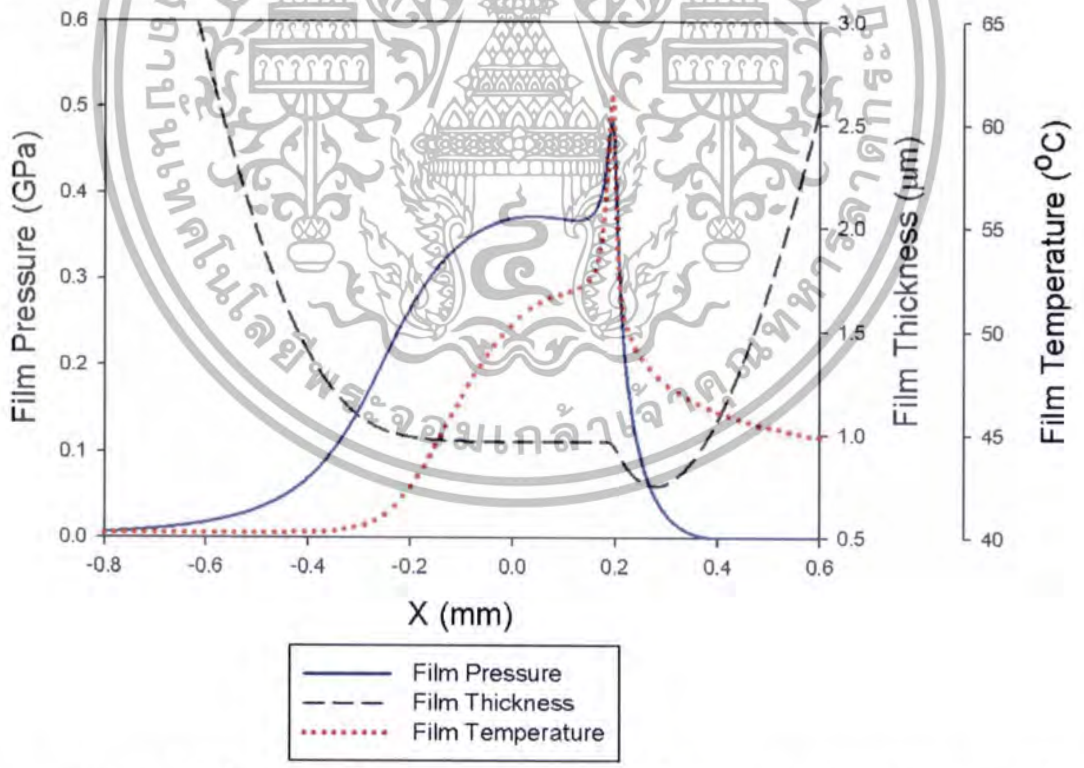


รูปที่ 4.30 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

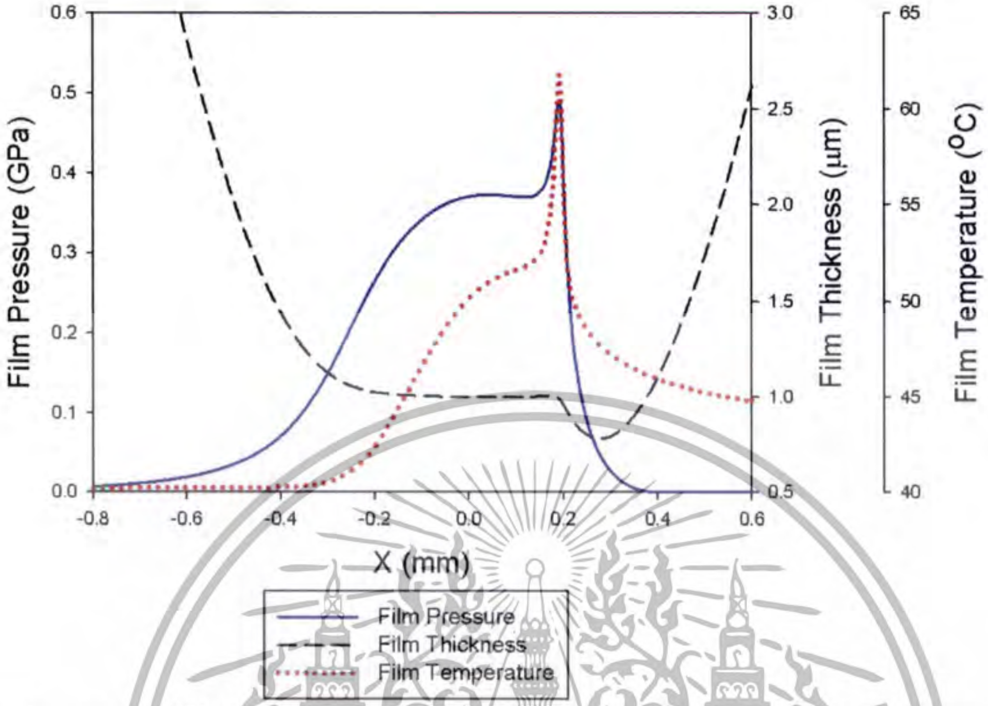
4.2 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวเมื่อทรงกระบอกมีค่าความเร็วเฉลี่ยต่าง ๆ

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ถึง รูปที่ 4.36 พบว่า เมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.4915 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1917 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.4858 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1944 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 61.8411 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.1917 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 61.5285 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.1944 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.7813 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.2765 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.7526 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2778 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0287 μm

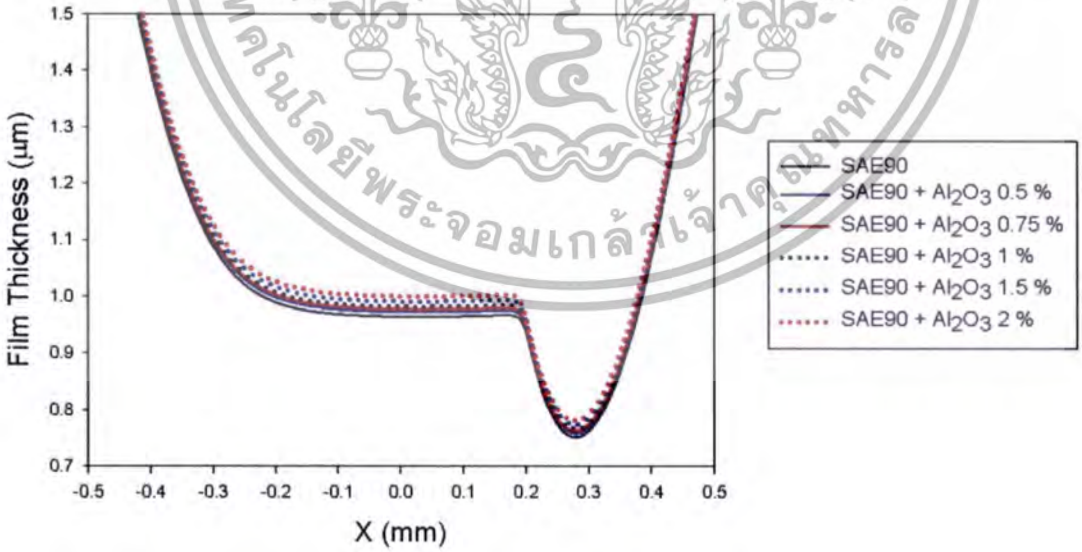


รูปที่ 4.31 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

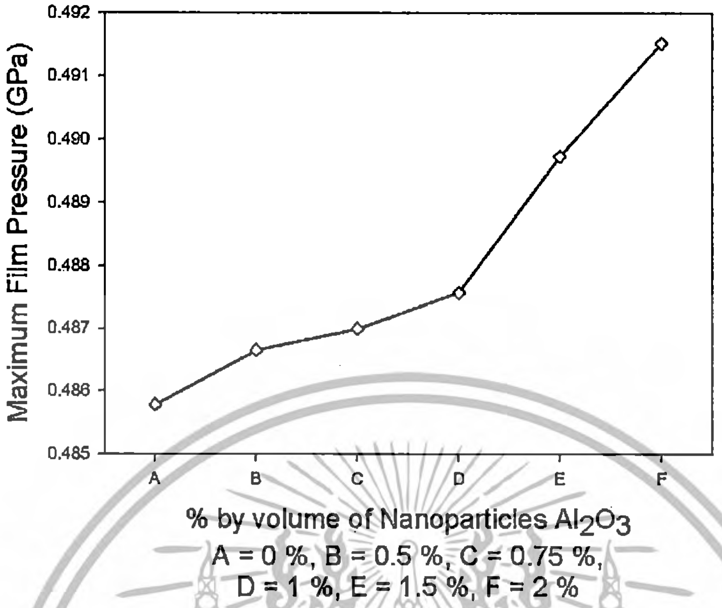


รูปที่ 4.32 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

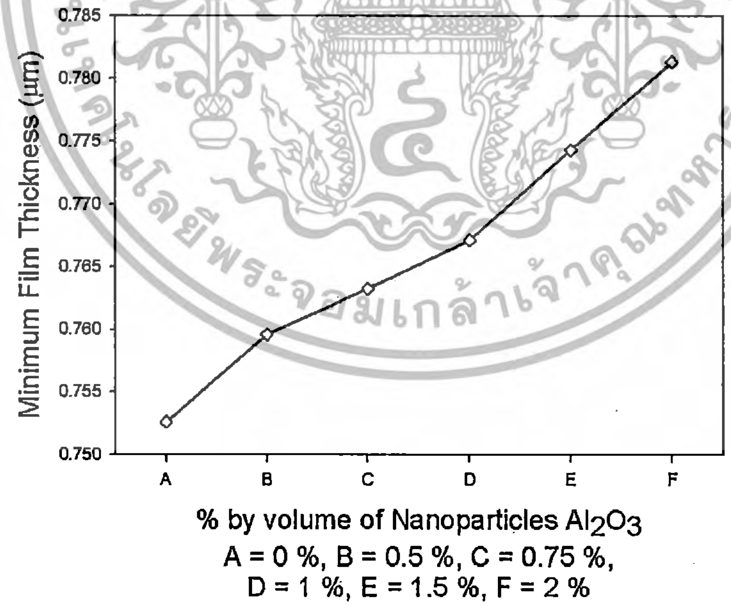


รูปที่ 4.33 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

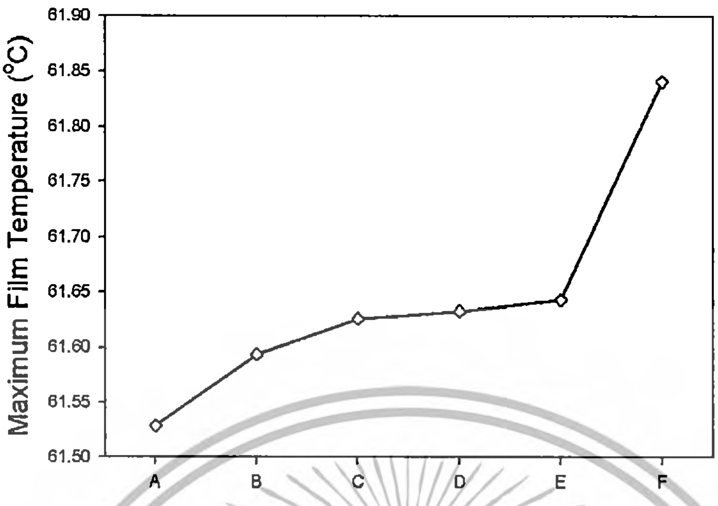


รูปที่ 4.34 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.35 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

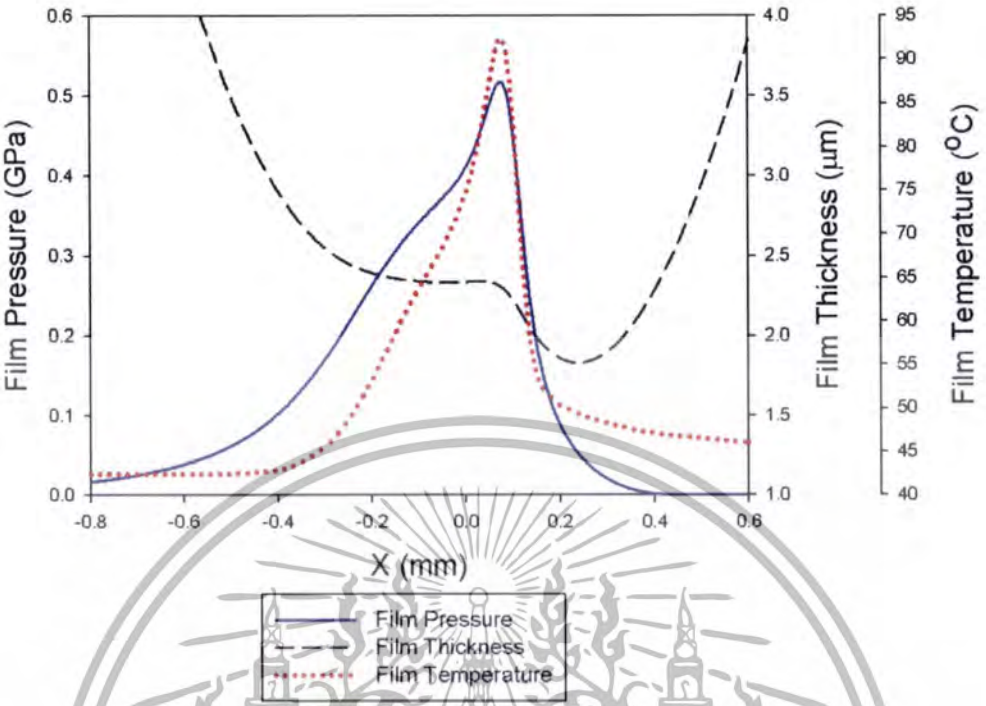
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



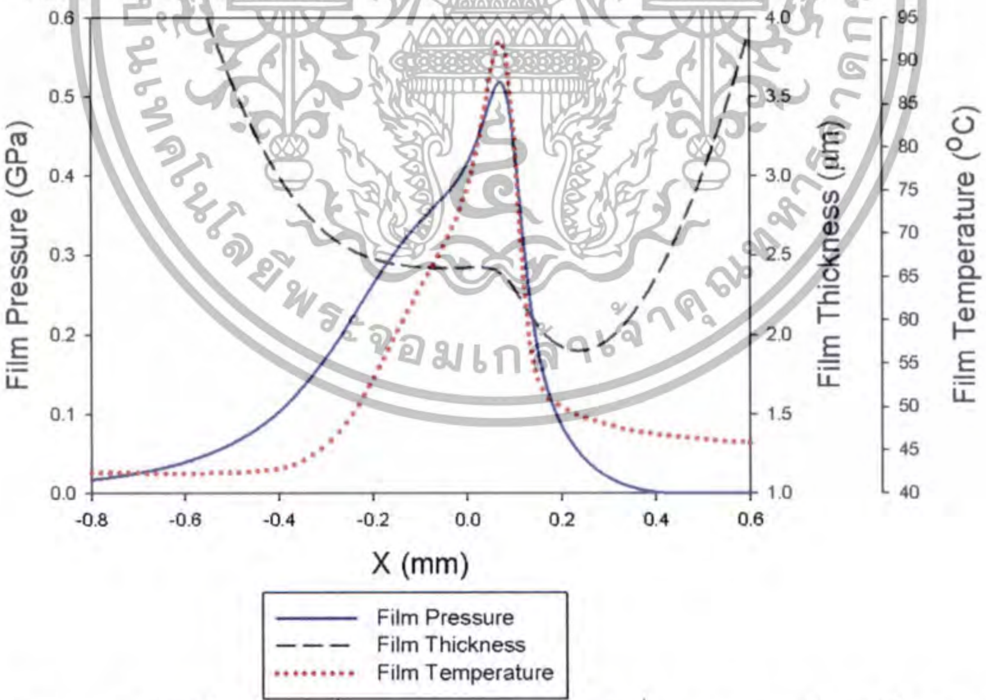
รูปที่ 4.36 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ถึง รูปที่ 4.42 พบว่า เมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5188 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0683 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5181 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0742 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.3289 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.0683 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.3947 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.0742 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.9017 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.2344 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8304 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2371 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0713 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

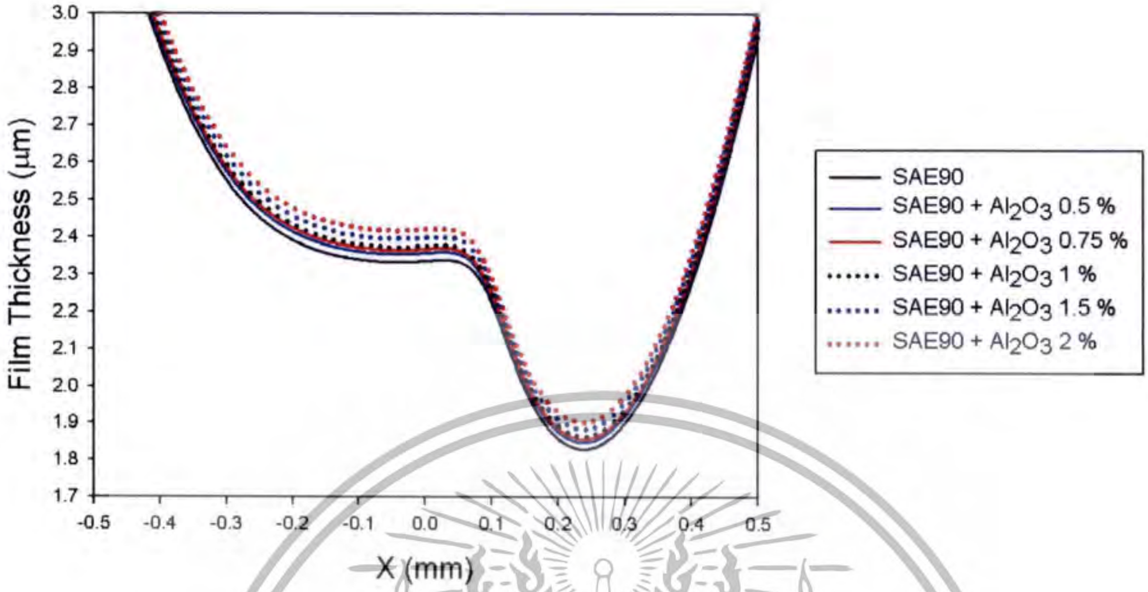


รูปที่ 4.37 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

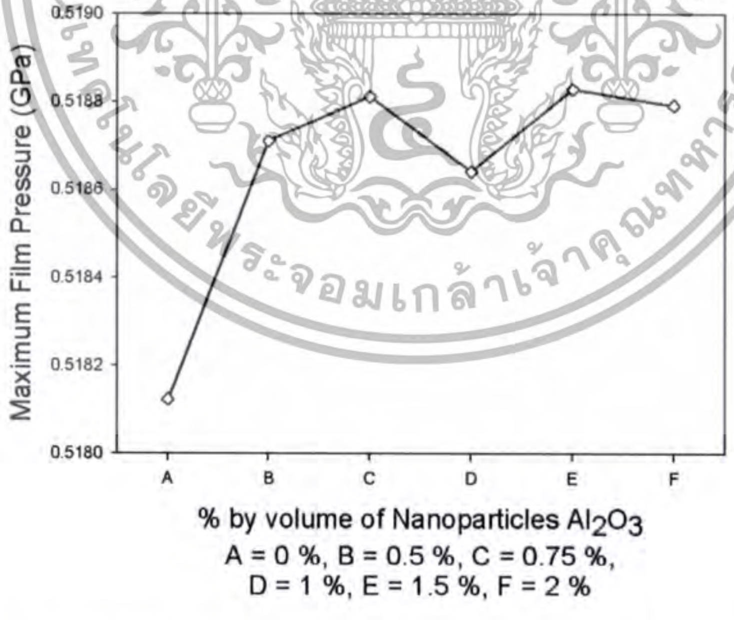


รูปที่ 4.38 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

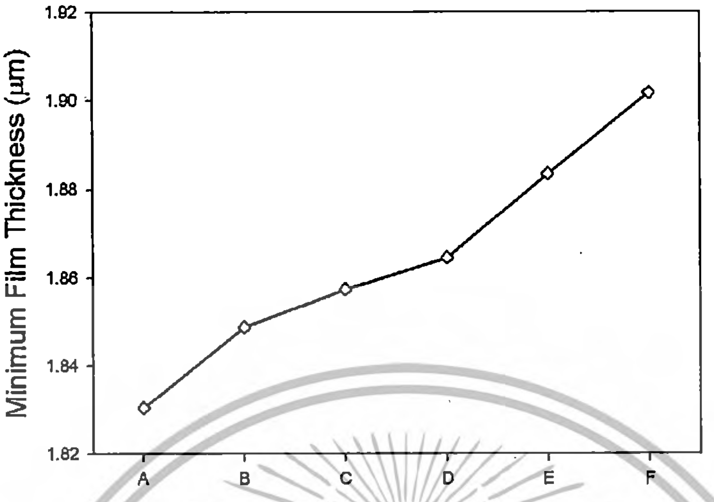


รูปที่ 4.39 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

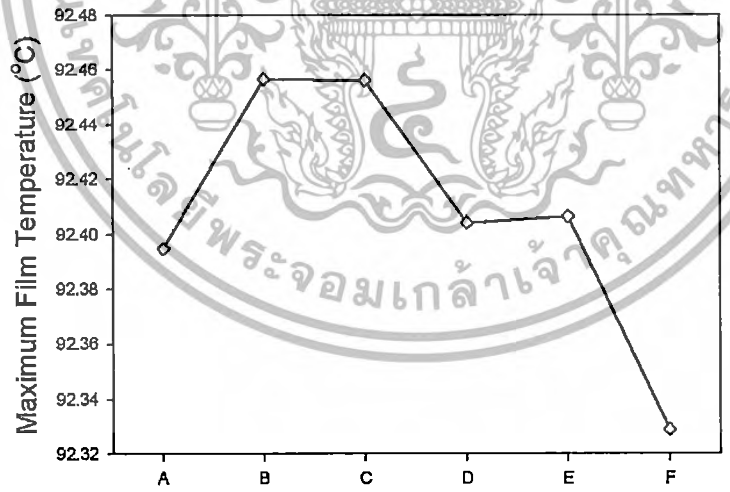


รูปที่ 4.40 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

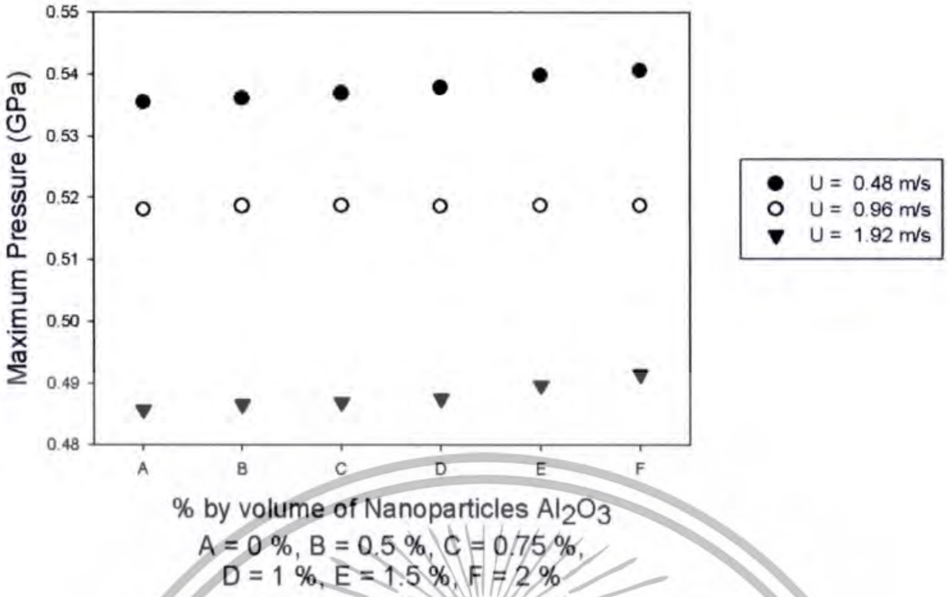


รูปที่ 4.42 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

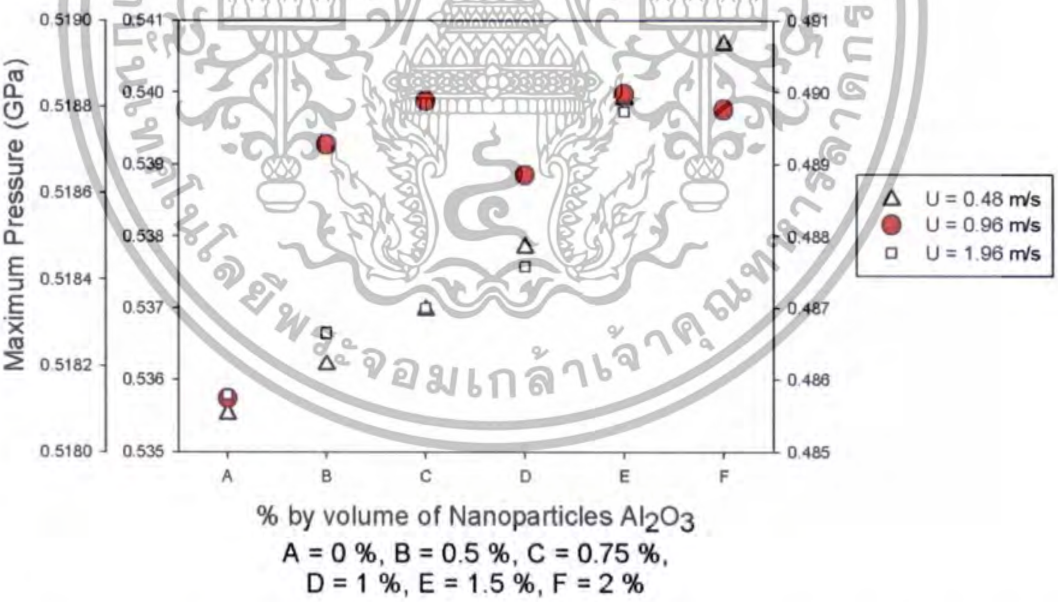
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบเนื่องจากผลของความเร็วเฉลี่ยของทรงกระบอกที่ 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m พบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเป็นไปในทางเดียวกันคือค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆกัน และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุก ๆความเร็วของทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ถึง รูปที่ 4.44 พบว่าเมื่อลูกกลิ้งมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น ค่าความดันสูงสุดก็มีค่าลดลง ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดมีค่าลดลง โดยที่ความเร็ว 0.48 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5407 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5355 GPa สำหรับที่ความเร็ว 1.92 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.4915 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.4858 GPa ส่วนค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดที่ความเร็ว 0.48 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 0.7813 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 0.7526 μm สำหรับที่ความเร็ว 1.92 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.9017 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.8304 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.45 และ 4.46 สำหรับค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.47 และ 4.48 โดยที่ความเร็ว 0.48 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 92.3289 $^{\circ}C$ และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 92.3947 $^{\circ}C$ สำหรับที่ความเร็ว 1.92 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 61.8411 $^{\circ}C$ และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 61.5285 $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

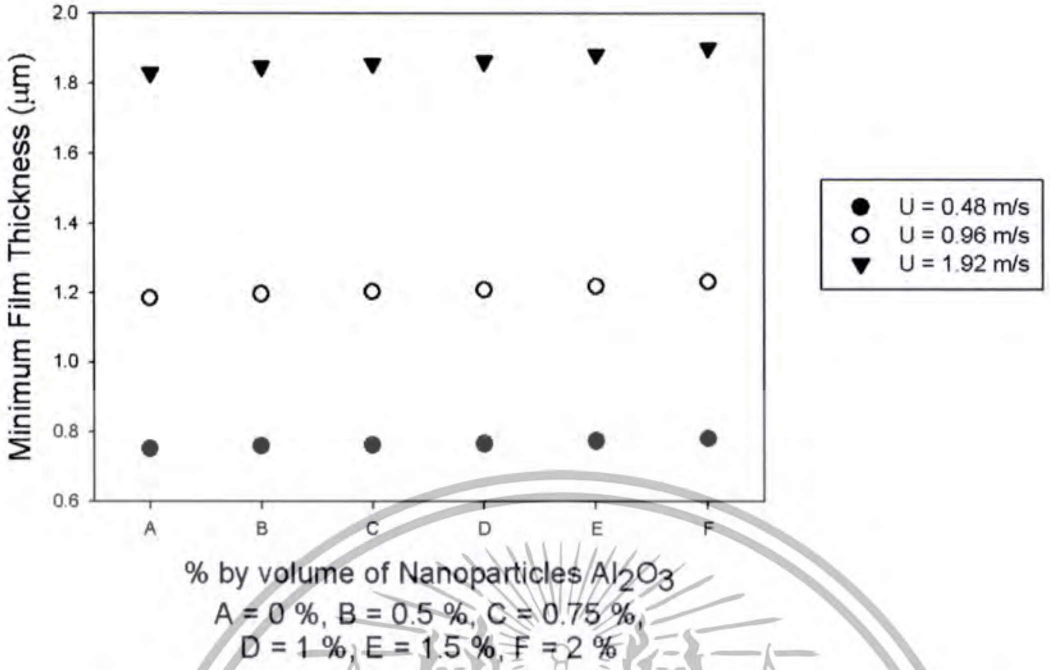


รูปที่ 4.43 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

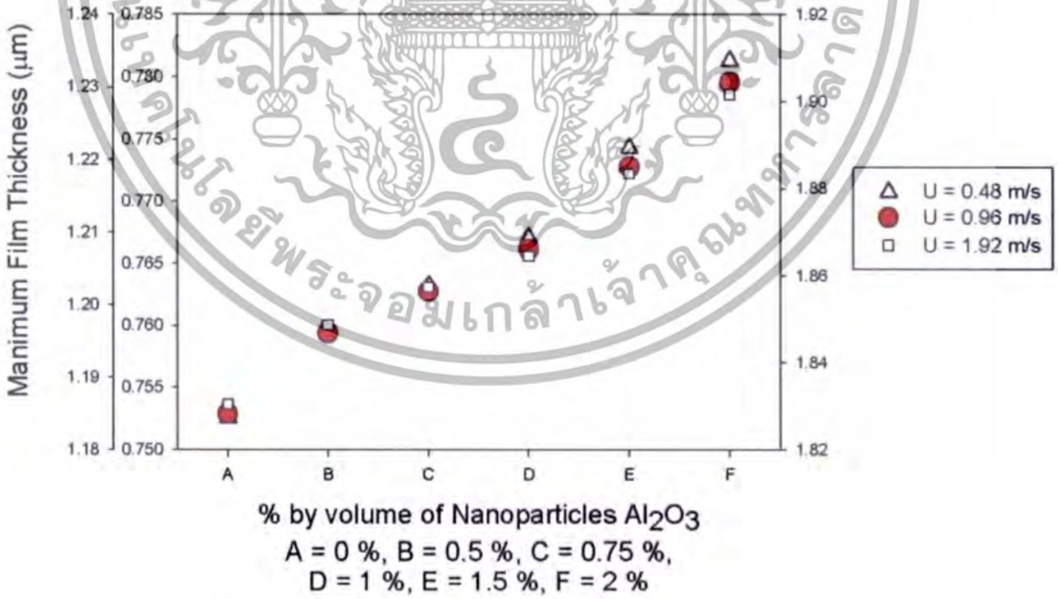


รูปที่ 4.44 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

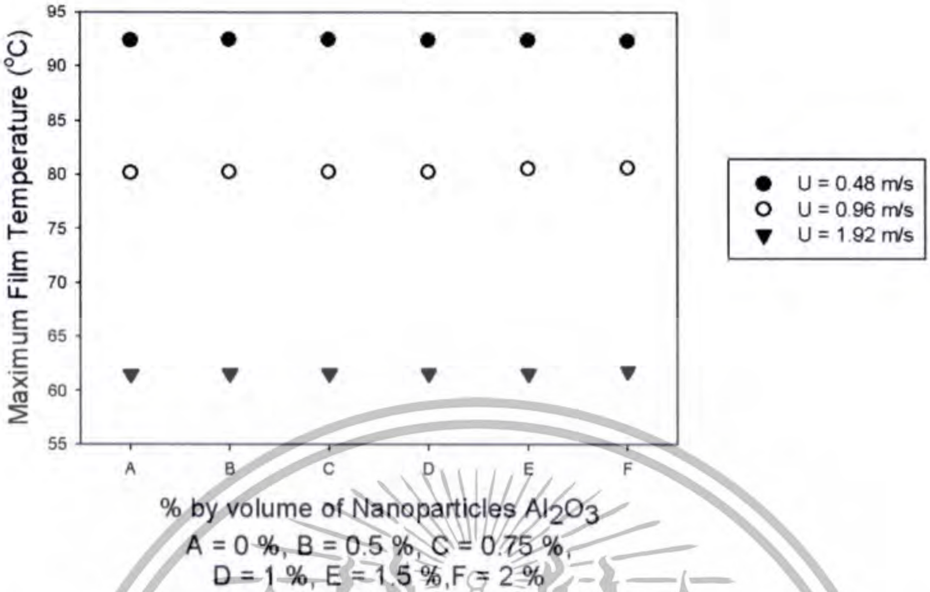


รูปที่ 4.45 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

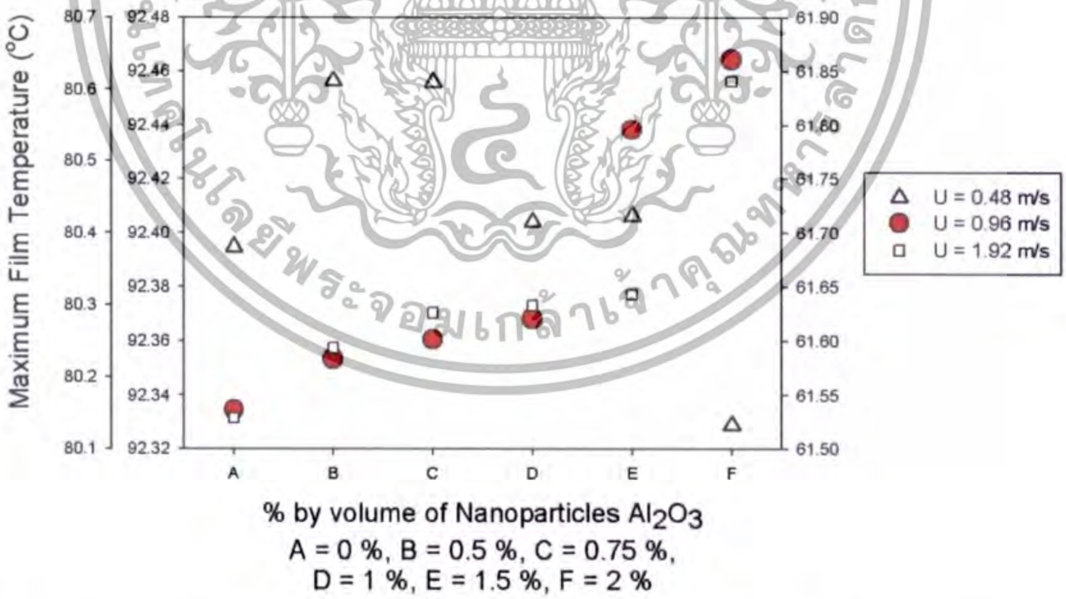


รูปที่ 4.46 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



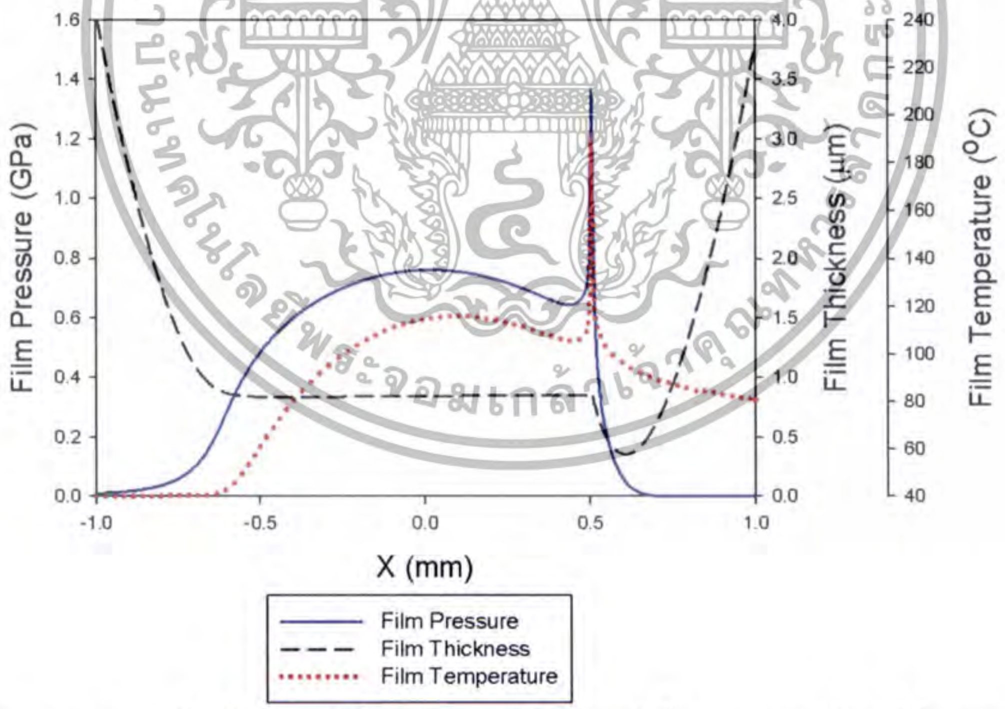
รูปที่ 4.47 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.48 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

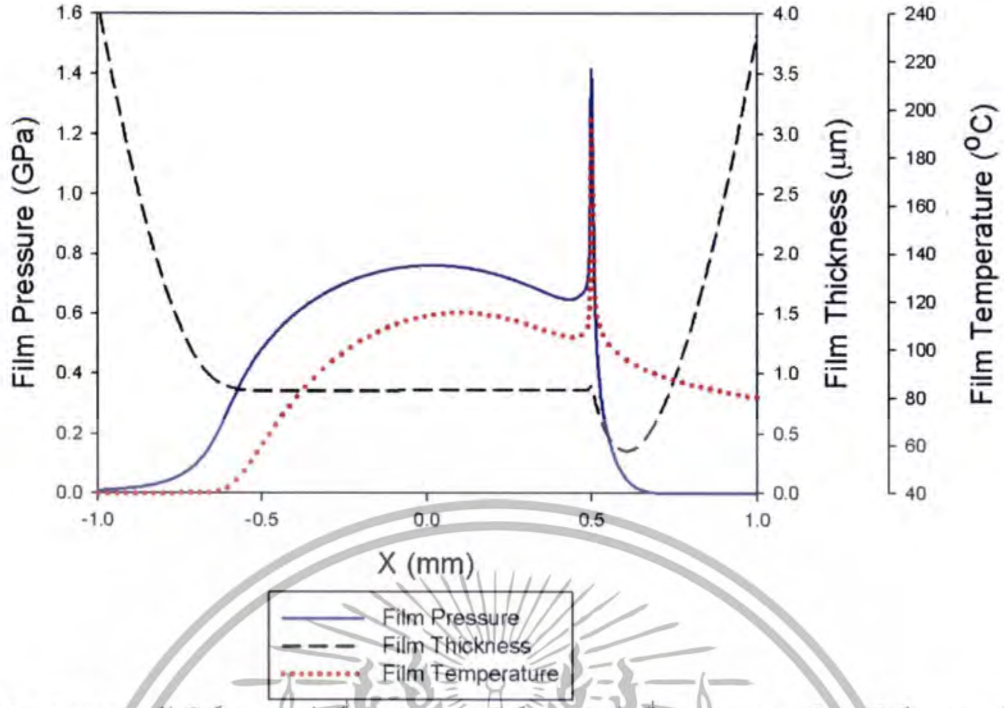
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.49 ถึง รูปที่ 4.54 พบว่า เมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.4164 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.5004 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.3643 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.5030 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 197.4988 $^{\circ}$C ที่ตำแหน่ง + 0.5004 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 190.1144 $^{\circ}$C ที่ตำแหน่ง + 0.5030 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.3560 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.6054 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.3548 μm ที่ตำแหน่ง + 0.6068 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0012 μm

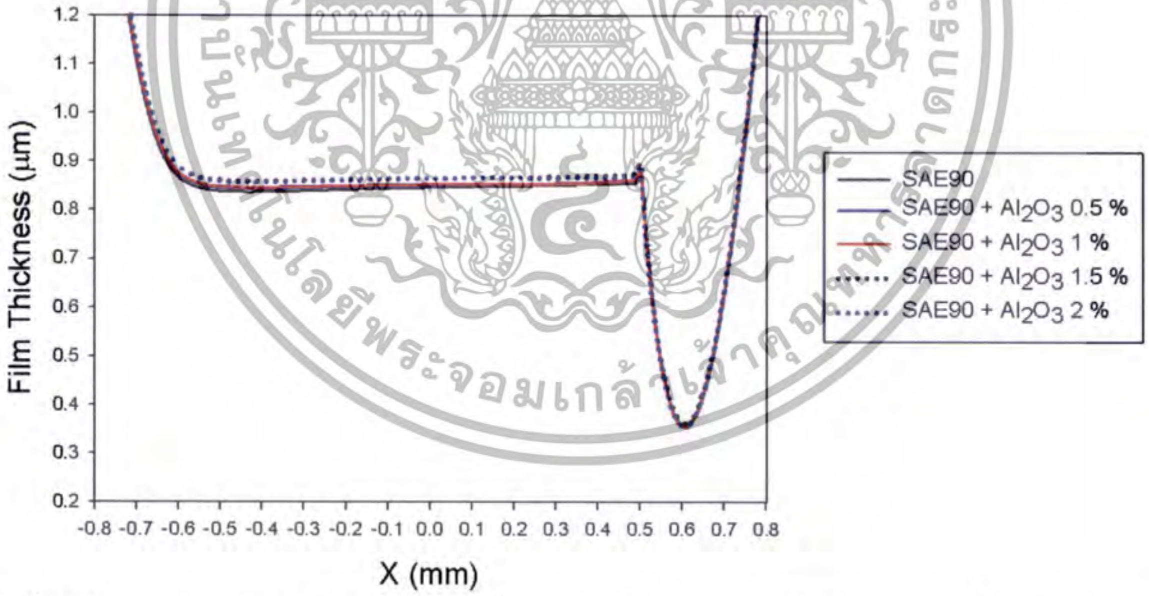


รูปที่ 4.49 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

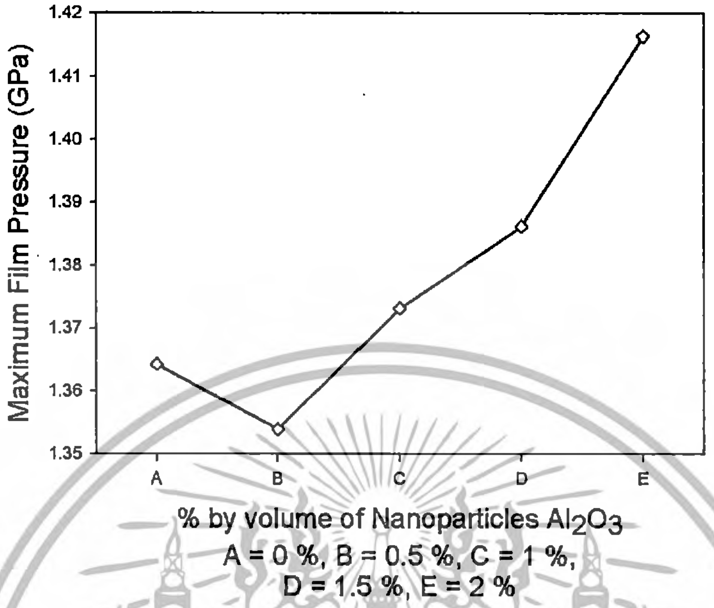


รูปที่ 4.50 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

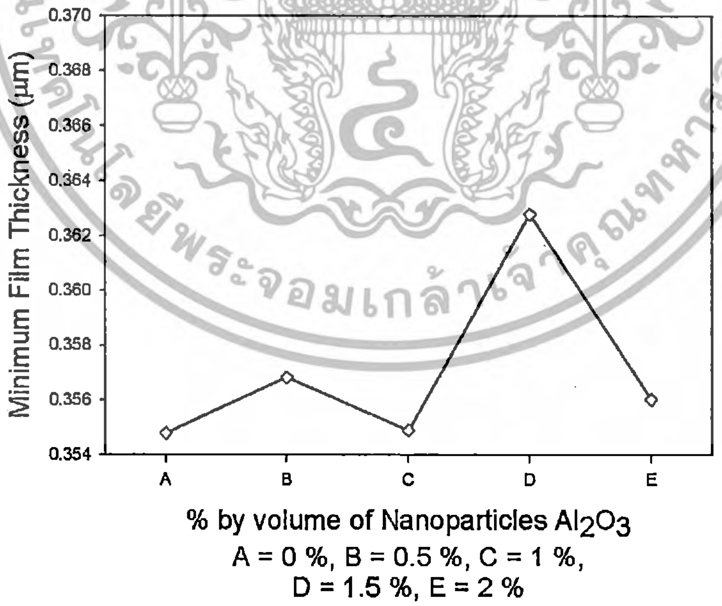


รูปที่ 4.51 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

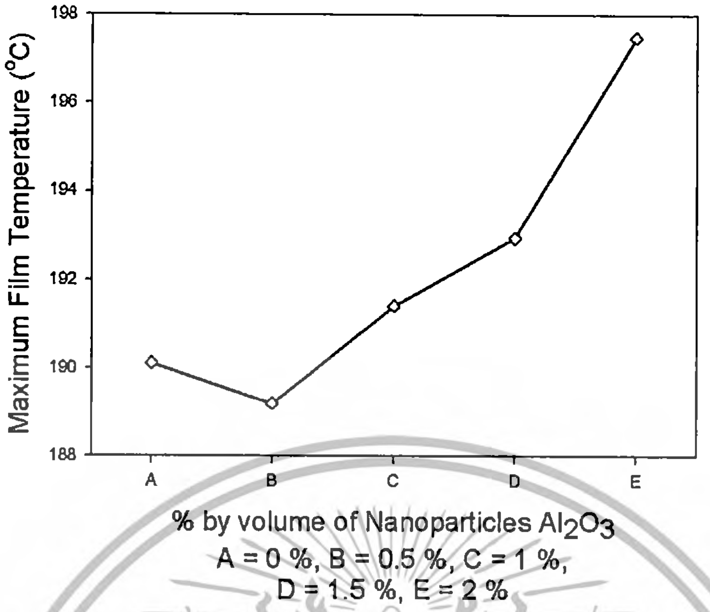


รูปที่ 4.52 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.53 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

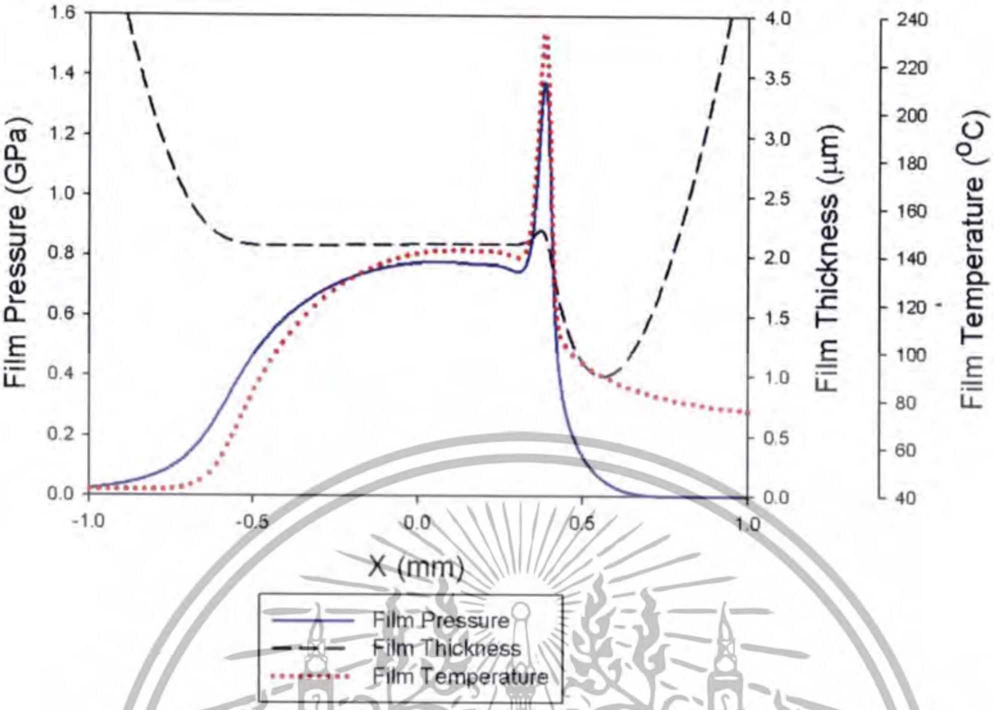
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



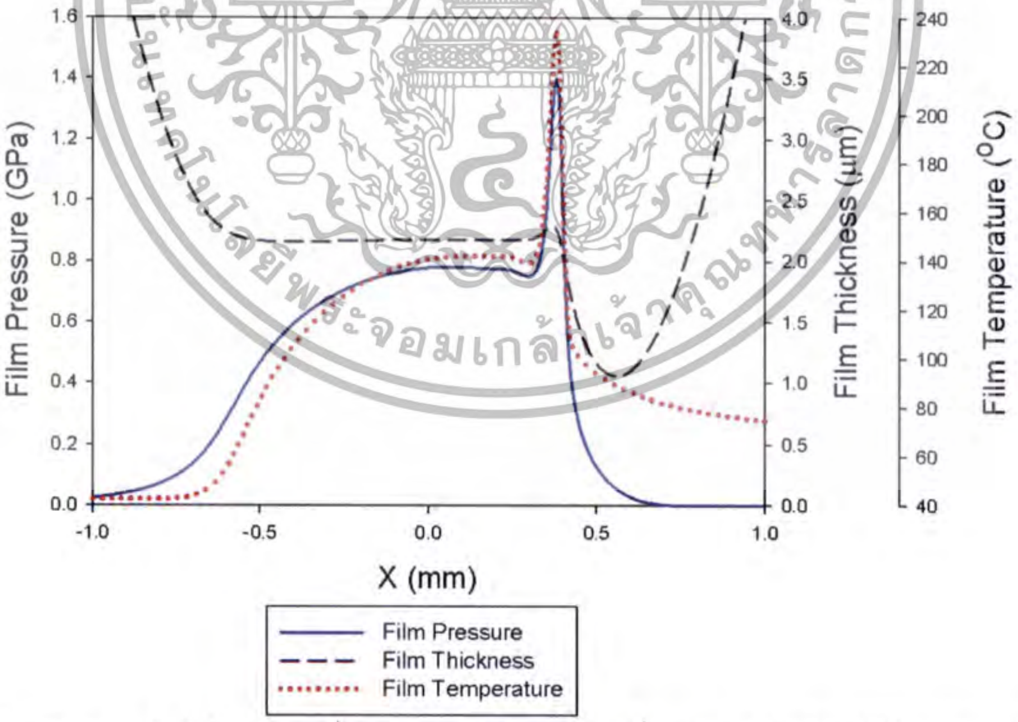
รูปที่ 4.54 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ถึง รูปที่ 4.60 พบว่า เมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.3970 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.3809 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.3822 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.3835 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 235.1814 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.3809 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 233.4908 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.3835 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.0580 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.5595 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.0030 μm ที่ตำแหน่ง + 0.5608 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0550 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

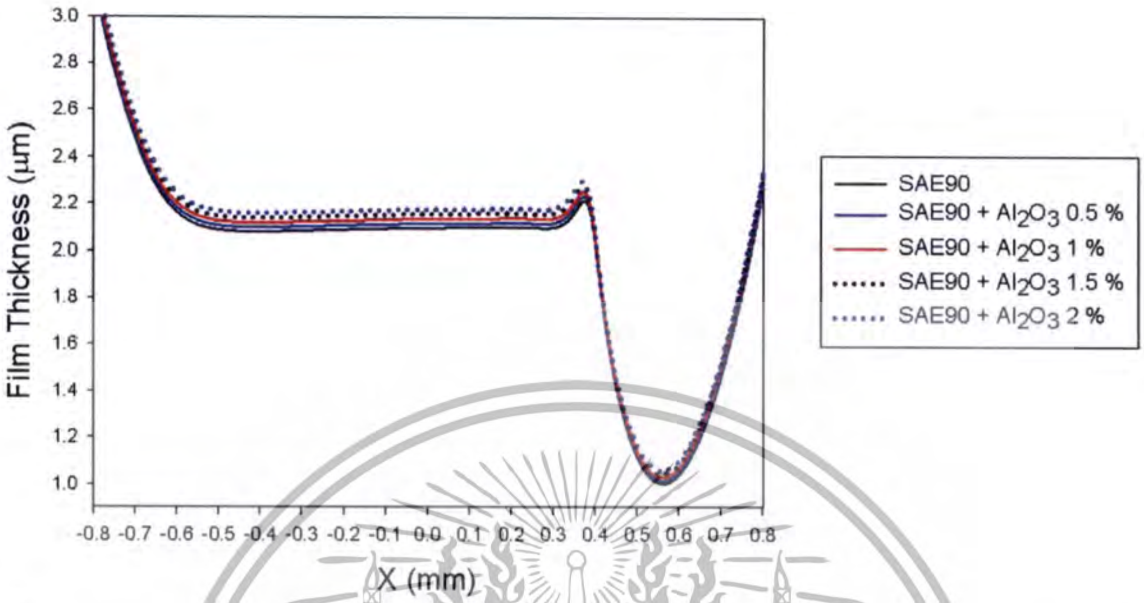


รูปที่ 4.55 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

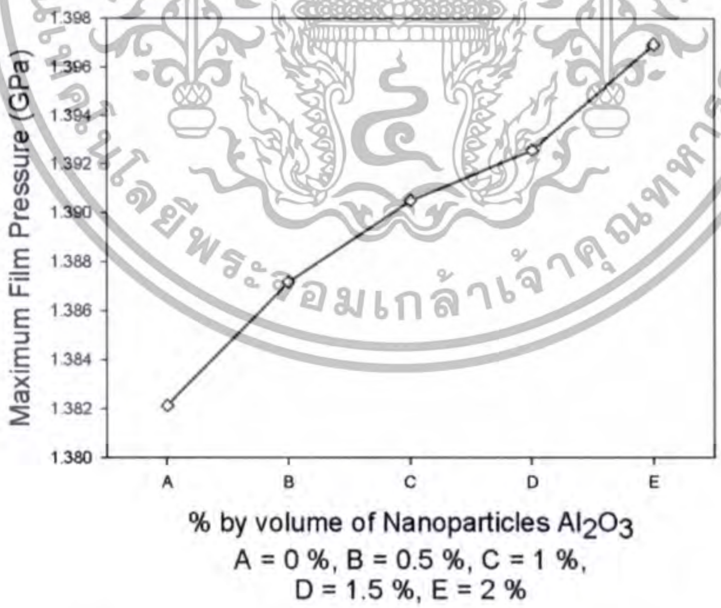


รูปที่ 4.56 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

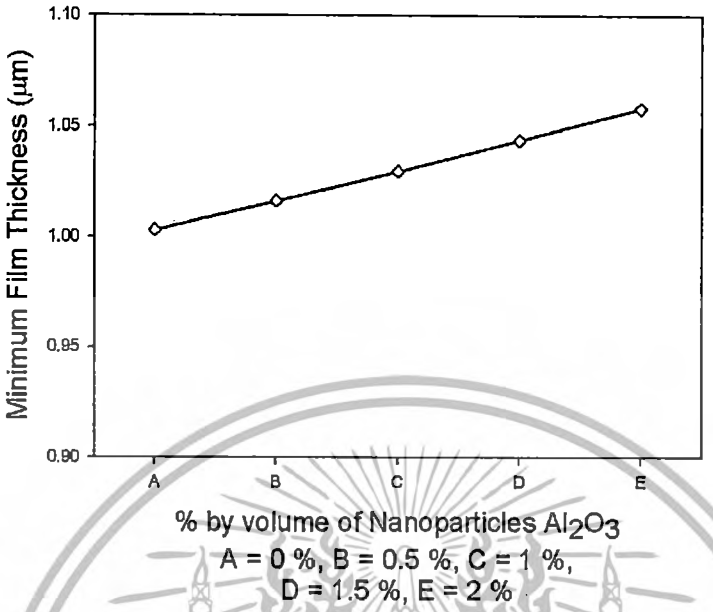


รูปที่ 4.57 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

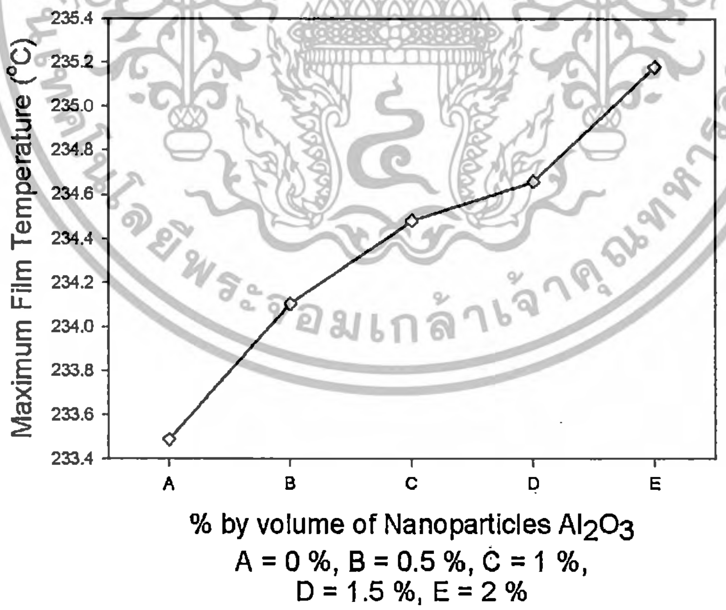


รูปที่ 4.58 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

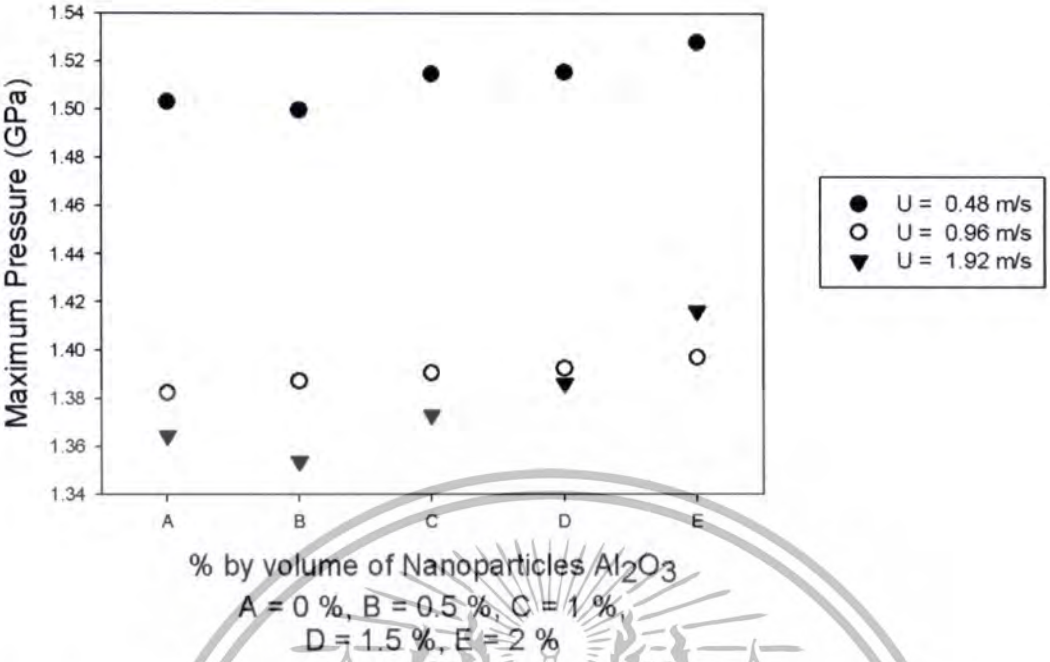


รูปที่ 4.60 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

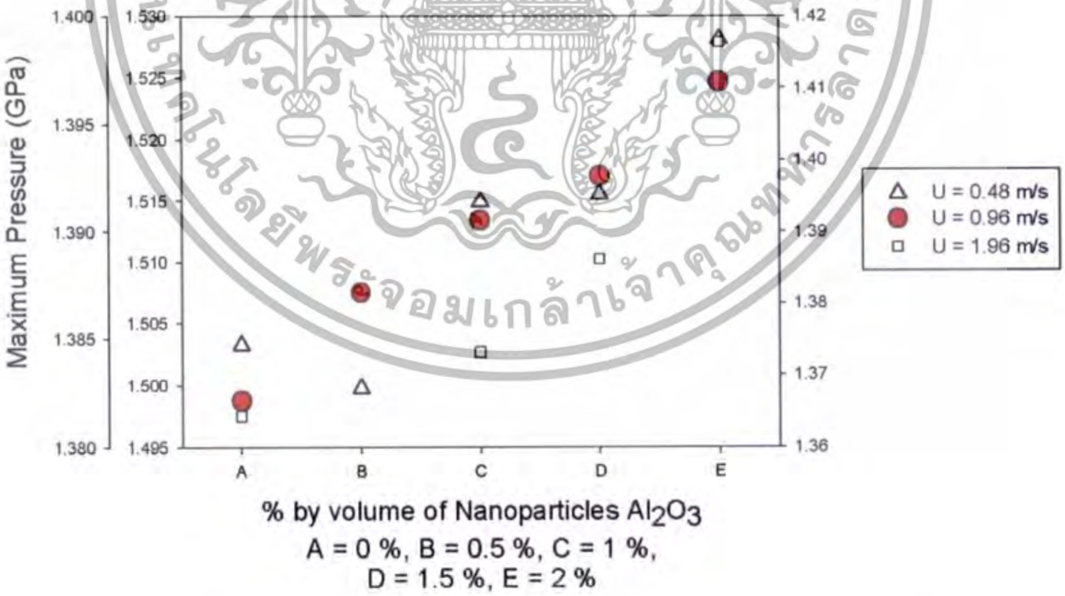
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบเนื่องจากผลของความเร็วเฉลี่ยของทรงกระบอกที่ 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m พบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเป็นไปในทางเดียวกันคือค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆกัน และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุก ๆภาระที่กระทำ ดังแสดงในรูปที่ 4.61 ถึง รูปที่ 4.62 พบว่าเมื่อลูกกลิ้งมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น ค่าความดันสูงสุดก็มีค่าลดลง ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดมีค่าลดลง โดยที่ความเร็ว 0.48 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 1.5281 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 1.5033 GPa สำหรับที่ความเร็ว 1.92 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 1.4164 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 1.3643 GPa ส่วนค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดที่ความเร็ว 0.48 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 0.3560 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 0.3548 μm สำหรับที่ความเร็ว 1.92 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.0580 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.0030 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.63 และ 4.64 สำหรับค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.65 และ 4.66 โดยที่ความเร็ว 0.48 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 235.1814 $^{\circ}C$ และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 233.4908 $^{\circ}C$ สำหรับที่ความเร็ว 1.92 m/s เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 197.4988 $^{\circ}C$ และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 190.1144 $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

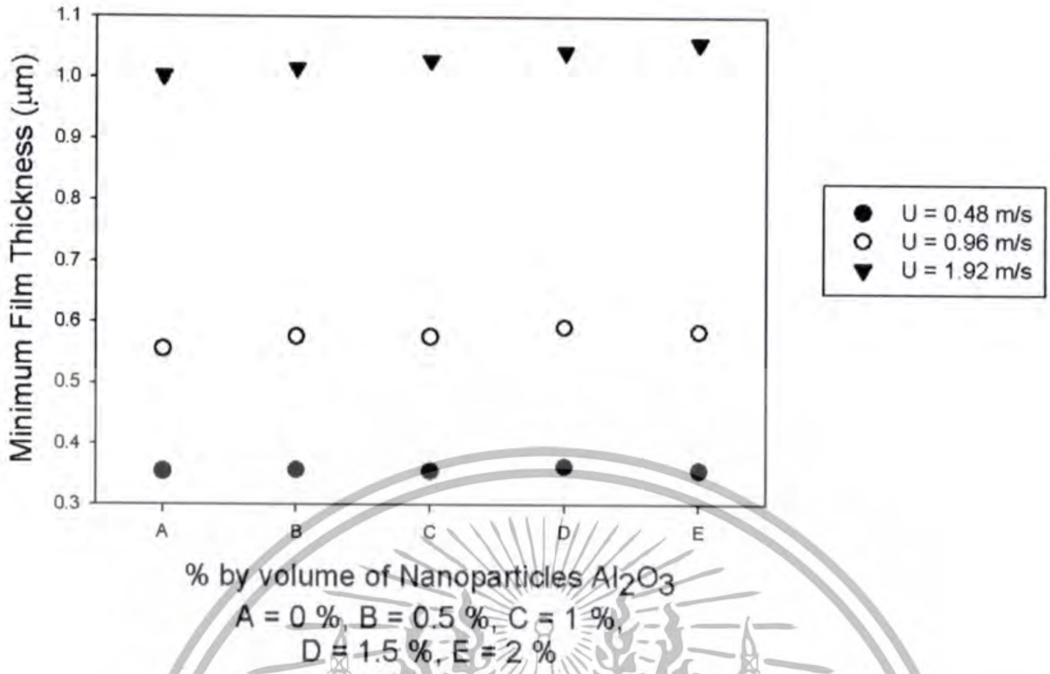


รูปที่ 4.61 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **800 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

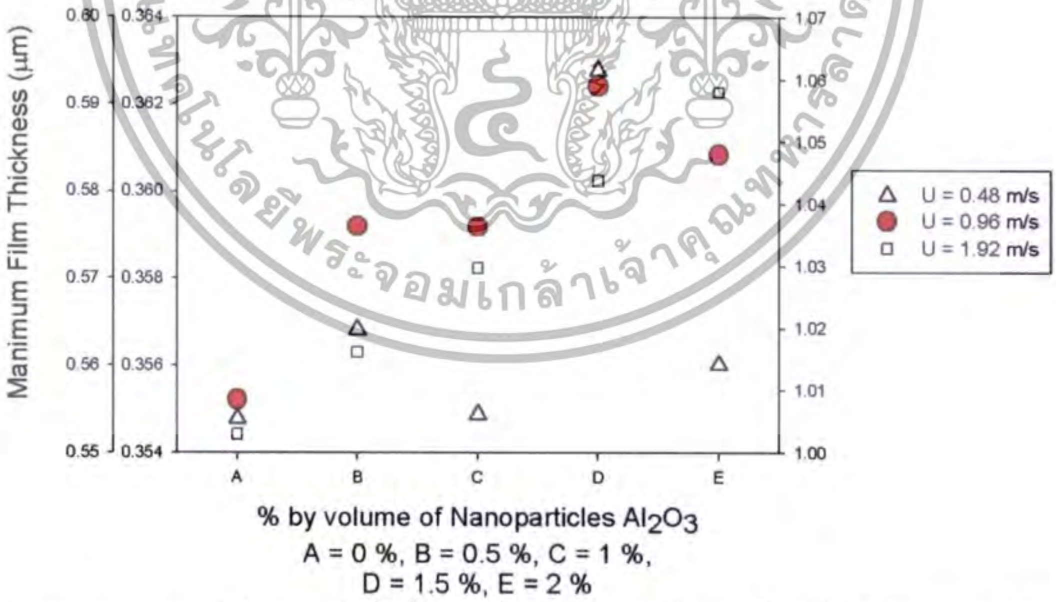


รูปที่ 4.62 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ **800 kN/m** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

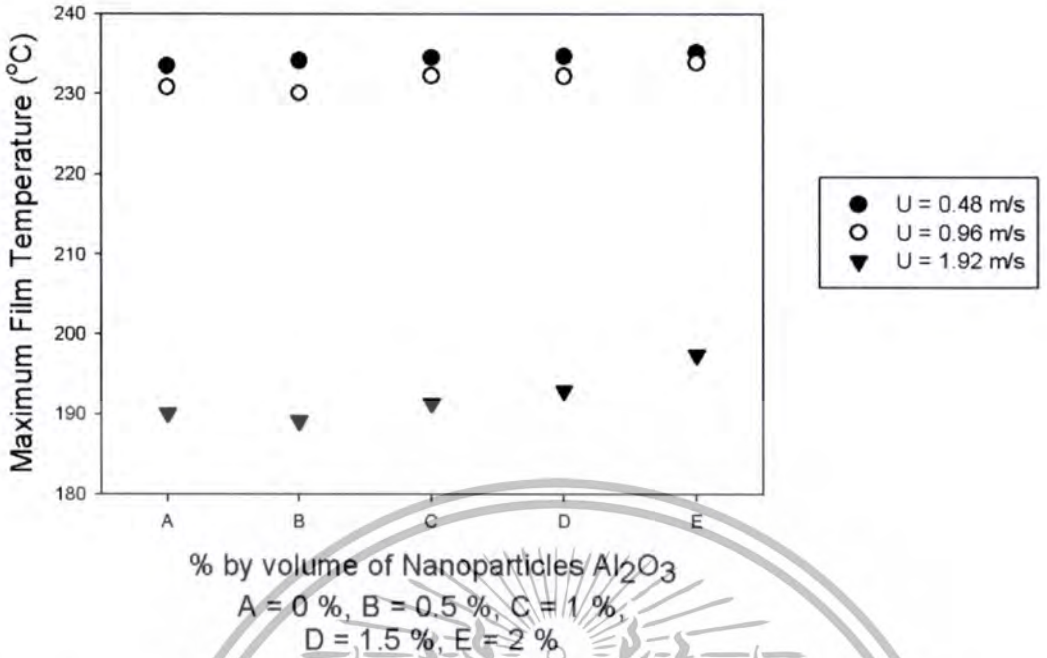


รูปที่ 4.63 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

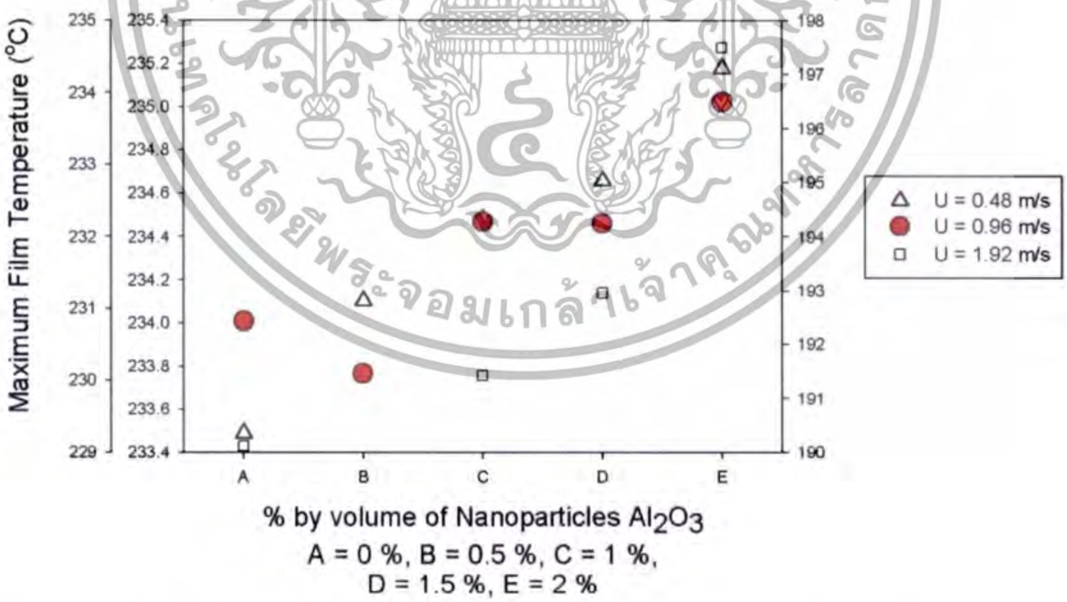


รูปที่ 4.64 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.65 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

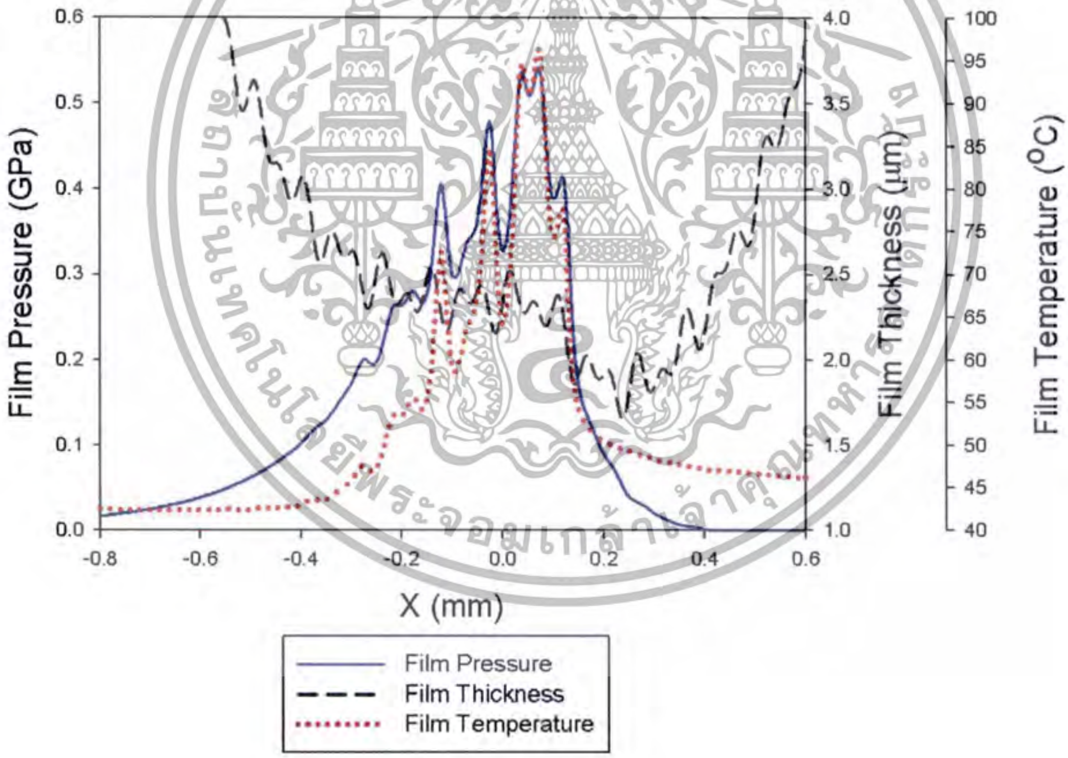


รูปที่ 4.66 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกมีความเร็วเฉลี่ย 0.48 m/s, 0.96 m/s และ 1.92 m/s ทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัวเมื่อทรงกระบอกมีค่าความหยาบผิวต่าง ๆ

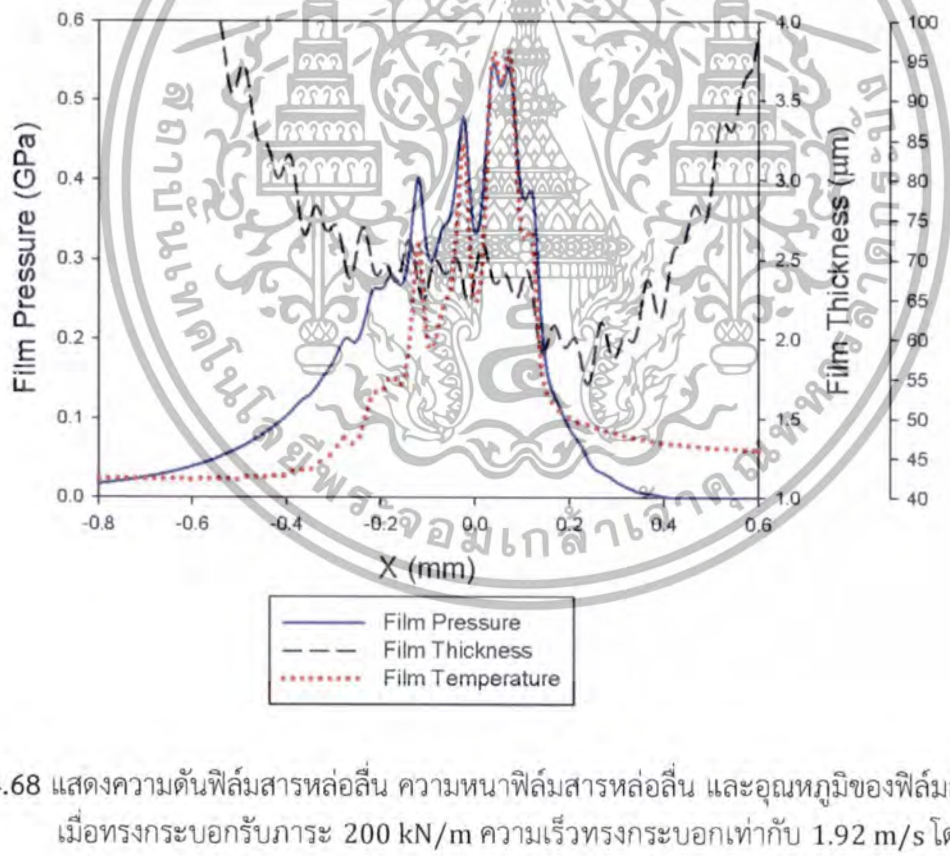
ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นเป็นผิวหยาบทั้งสองชิ้นงาน โดยมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.1 μm สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.67 ถึง รูปที่ 4.72 พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีการกวัดแกว่งตามความหยาบของผิวทรงกระบอก



รูปที่ 4.67 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

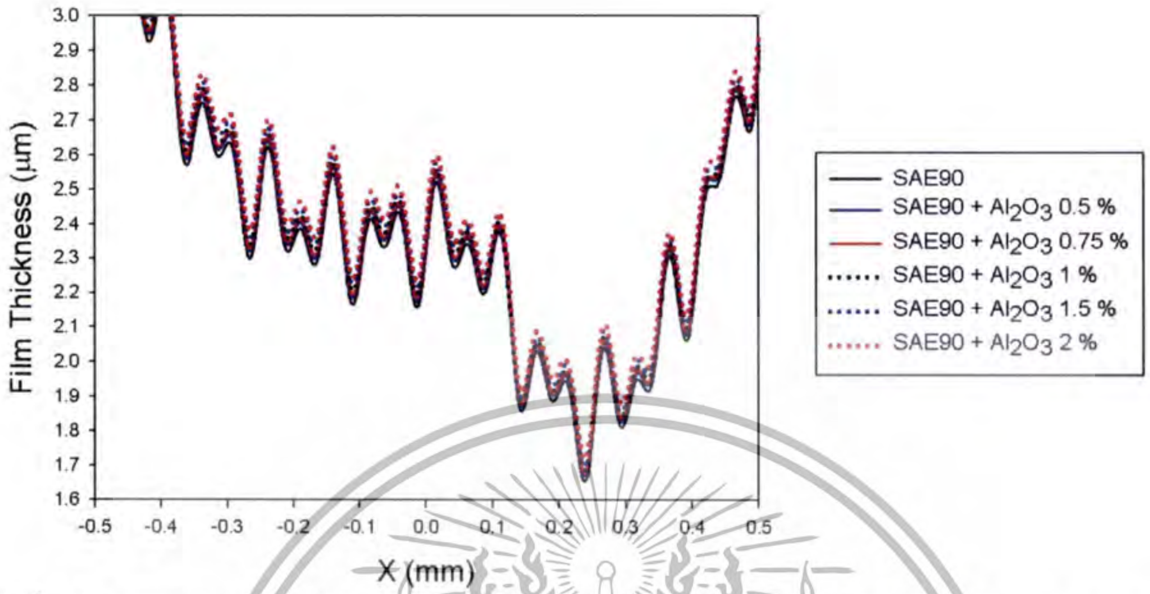
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5464 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0381 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5417 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0709 mm. ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 96.3308 °C ที่ตำแหน่ง + 0.0709 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 96.3511 °C ที่ตำแหน่ง + 0.0709 mm. และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.7202 μm ที่ ตำแหน่ง + 0.2377 mm. ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.6550 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2371 mm. และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงของการสัมผัสประมาณ 0.0652 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.70 รูปที่ 4.71 ถึง 4.72 ตามลำดับ

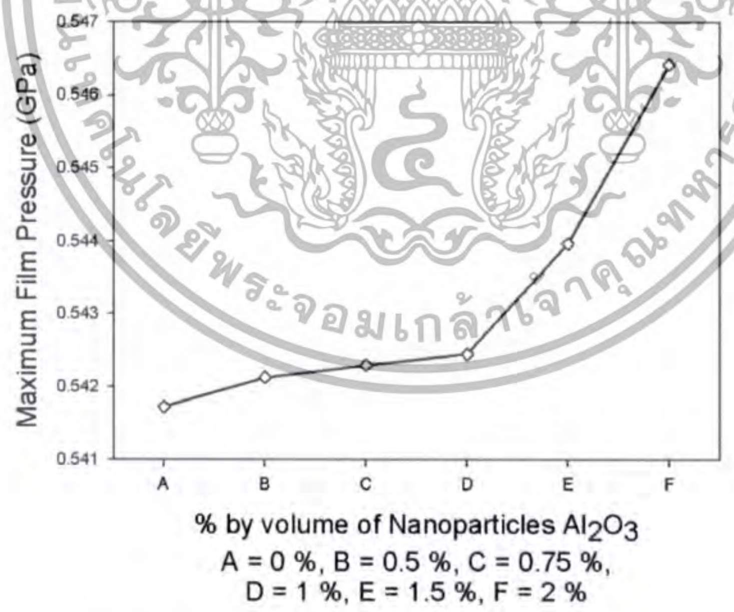


รูปที่ 4.68 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ **1.92 m/s** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโนAl_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

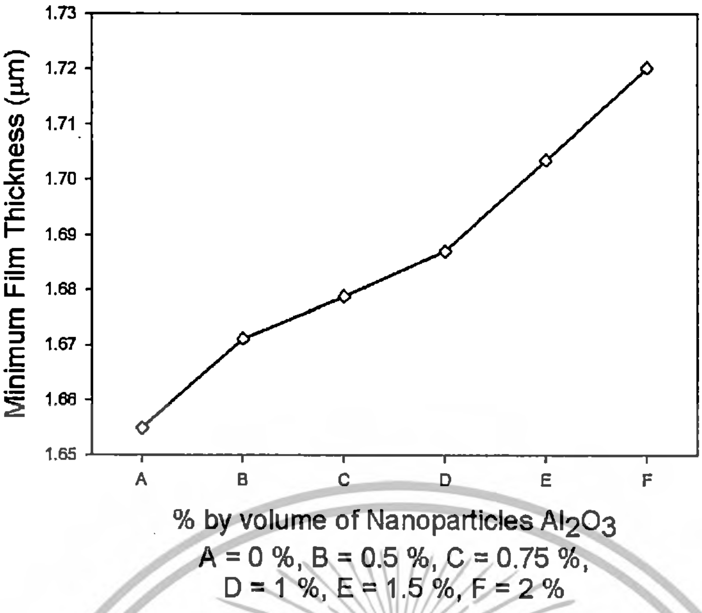


รูปที่ 4.69 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

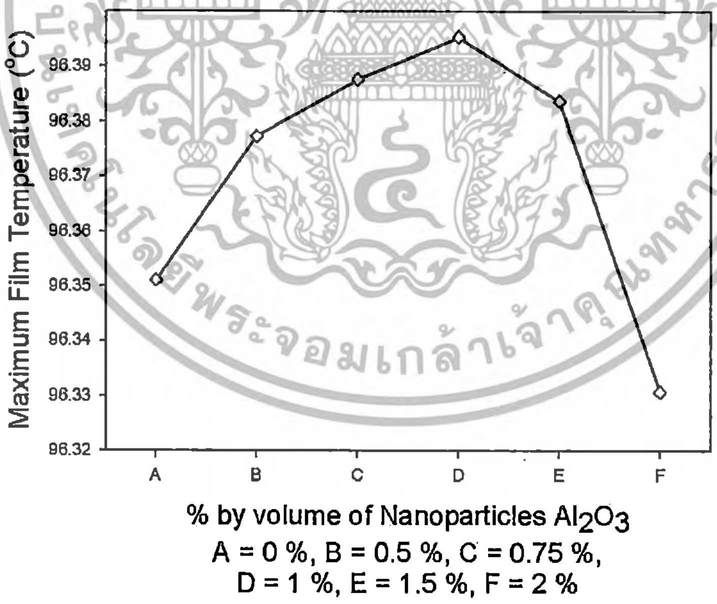


รูปที่ 4.70 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



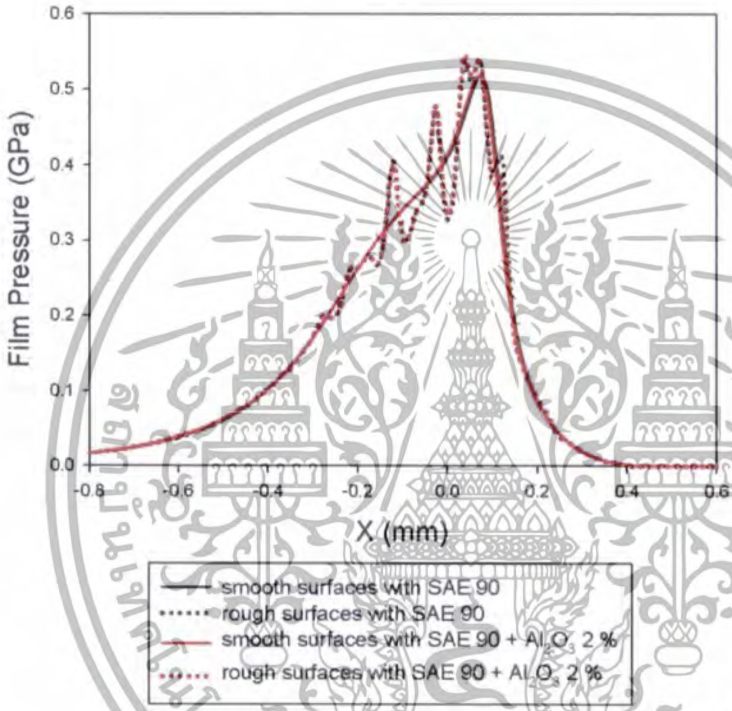
รูปที่ 4.72 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบเนื่องจากผลของค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm กับผิวของทรงกระบอกเรียบ ความเร็วเฉลี่ยของทรงกระบอกรับที่ 1.92 m/s เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 4.73 ถึง รูปที่ 4.81 พบว่าในกรณีการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและผิวหยาบ ลักษณะของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีรูปร่างคล้ายกันแต่กรณีผิวหยาบความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงแบบกวัดแกว่งไปตามความหยาบของผิว ซึ่งการหล่อลื่นแบบผิวเรียบเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5188 GPa ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5181 GPa และถ้าการหล่อลื่นเป็นแบบผิวหยาบเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5464 GPa ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5417 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.73 รูปที่ 4.74 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น ซึ่งการหล่อลื่นแบบผิวเรียบเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.9017 μm ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8304 μm และถ้าการหล่อลื่นเป็นแบบผิวหยาบเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.7202 μm ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.655 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีการหล่อลื่นแบบผิวเรียบเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.3289 $^{\circ}C$ ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.3947 $^{\circ}C$ และถ้าการหล่อลื่นเป็นแบบผิวหยาบเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 96.3308 $^{\circ}C$ ในขณะที่เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 96.3511 $^{\circ}C$ ดังแสดงในรูปที่ 4.75 เมื่อเปรียบเทียบการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและผิวหยาบ ในรูปที่ 4.76 ถึง รูปที่ 4.81 พบว่าในการหล่อลื่นแบบผิวหยาบ ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่ามากกว่าการหล่อลื่นแบบผิวเรียบ และค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆกัน ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าน้อยกว่าการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดมีค่ามากกว่าการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆกัน โดยที่การหล่อลื่นแบบผิวเรียบเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5188 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5181 GPa สำหรับที่ผิวหยาบเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5464 GPa และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5417 GPa ส่วนค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดที่การหล่อลื่นแบบผิวเรียบ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.9017 μm และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.8304 μm สำหรับที่ผิวหยาบ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.7202 μm

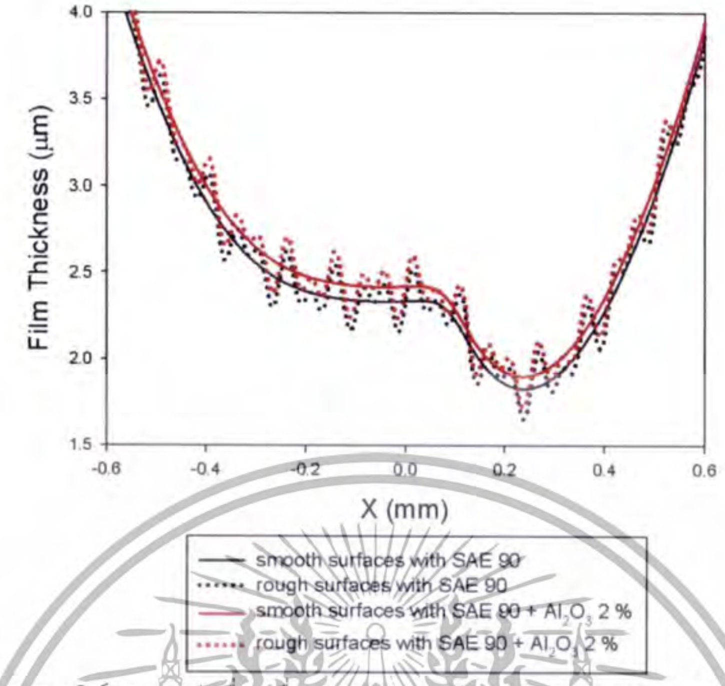
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.6550 μm สำหรับค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.80 และ 4.81 โดยที่การหล่อลื่นแบบผิวเรียบ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 92.3289 °C และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 92.3947 °C สำหรับที่ที่ผิวหยาบ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 96.3308 °C และเมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 มีค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 96.3511 °C

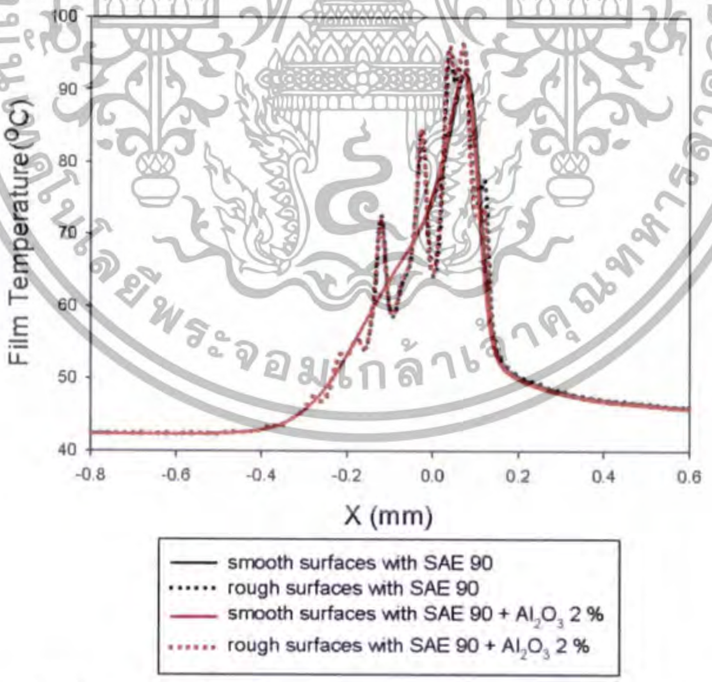


รูปที่ 4.73 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

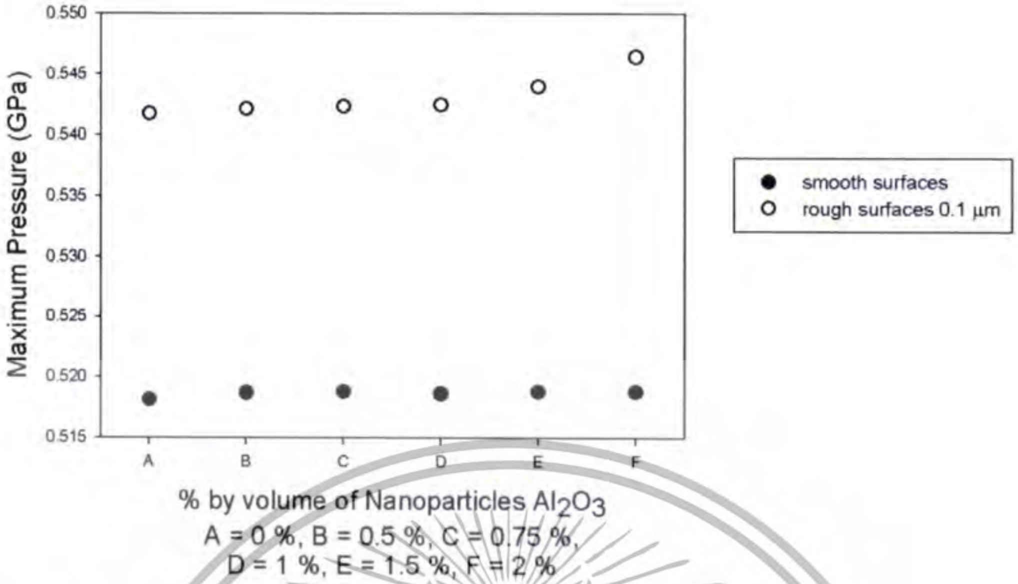


รูปที่ 4.74 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

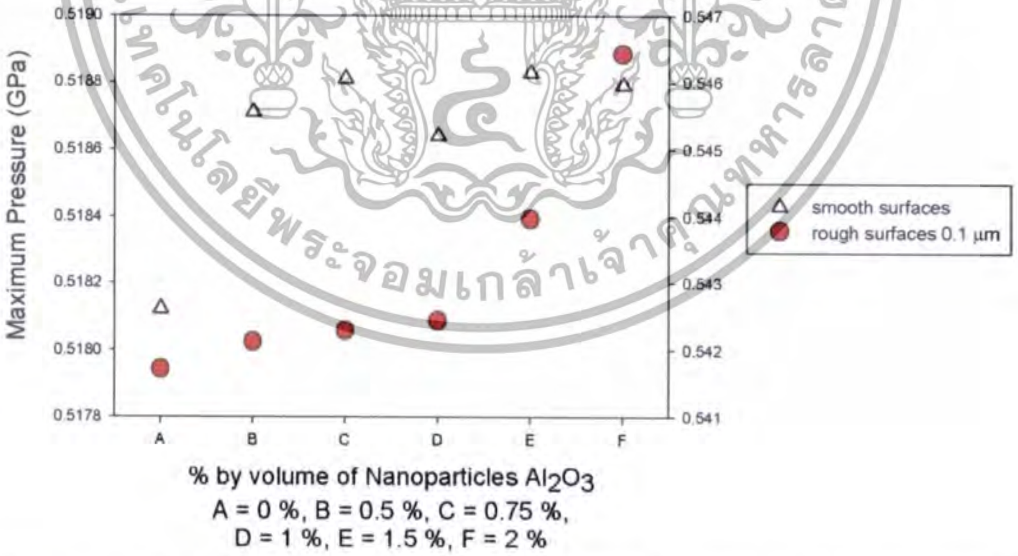


รูปที่ 4.75 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

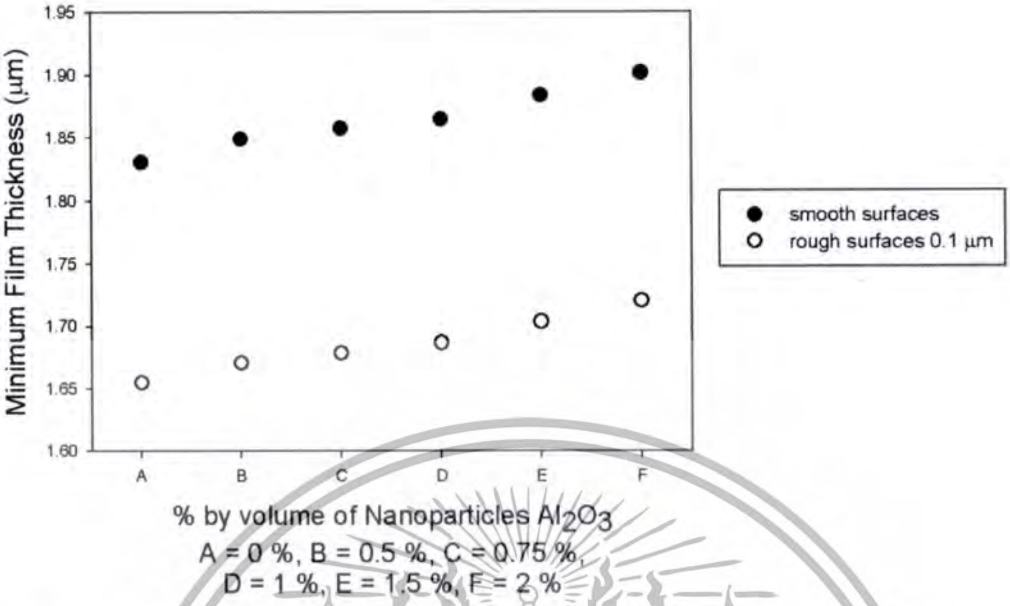


รูปที่ 4.76 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

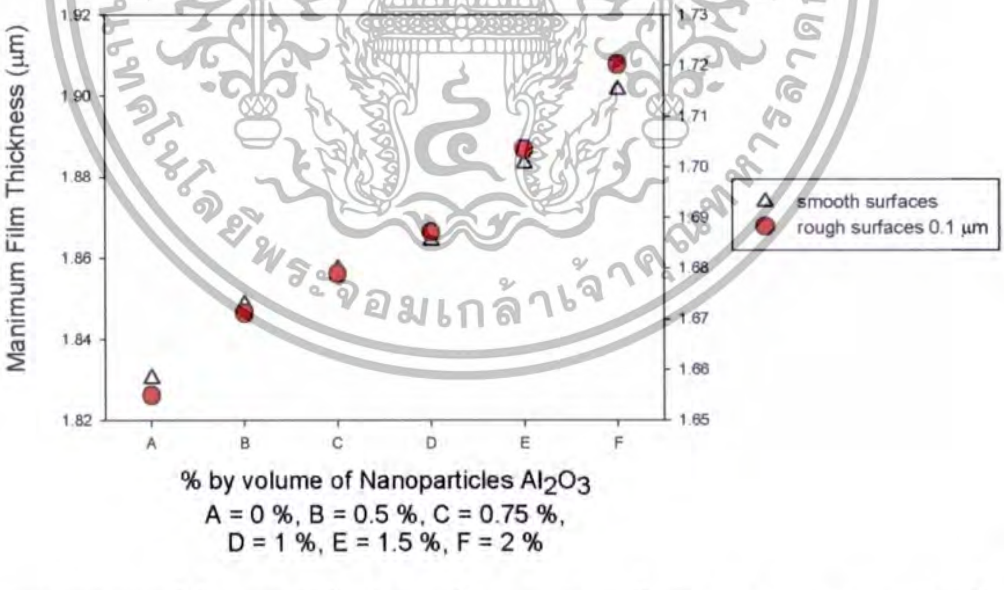


รูปที่ 4.77 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

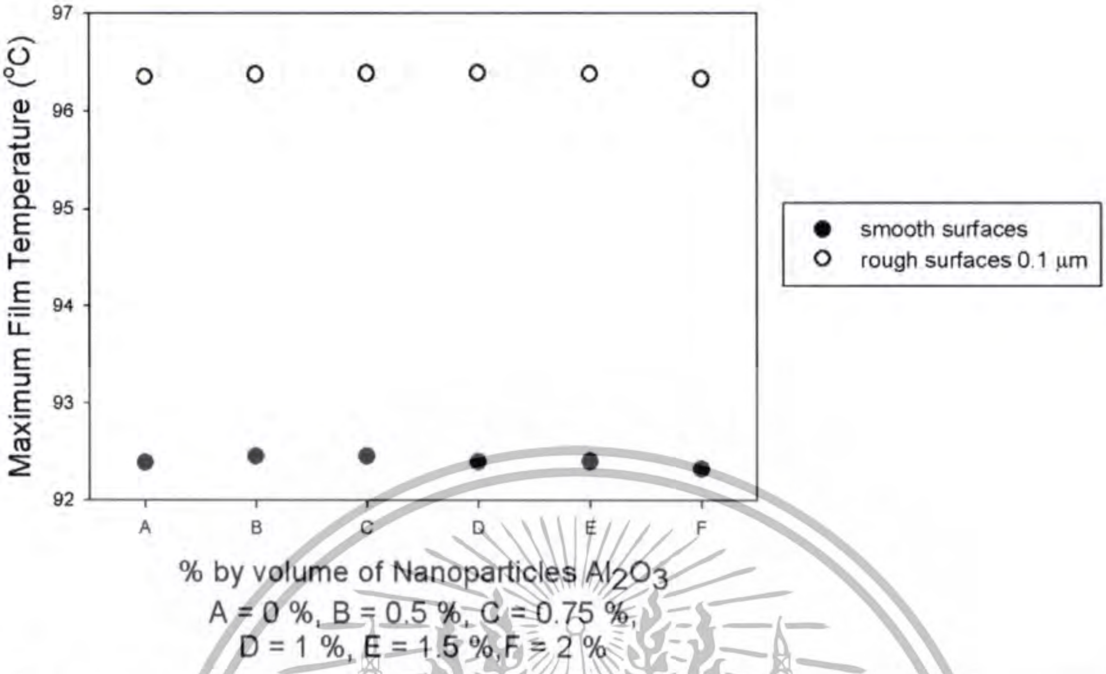


รูปที่ 4.78 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 *μm* และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

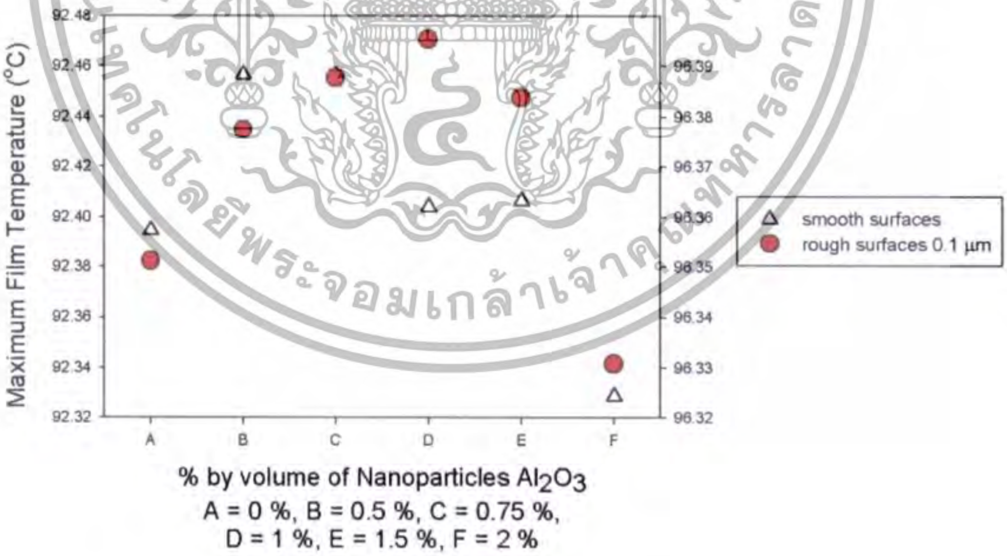


รูปที่ 4.79 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 *μm* และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



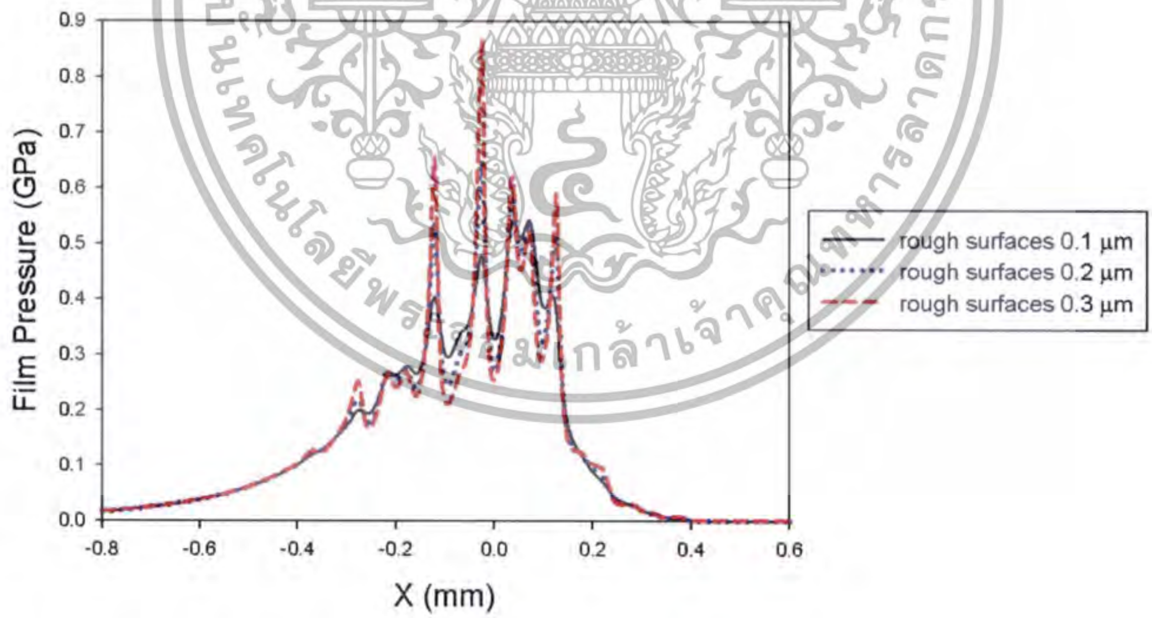
รูปที่ 4.80 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.81 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm และผิวเรียบ ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % และ 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

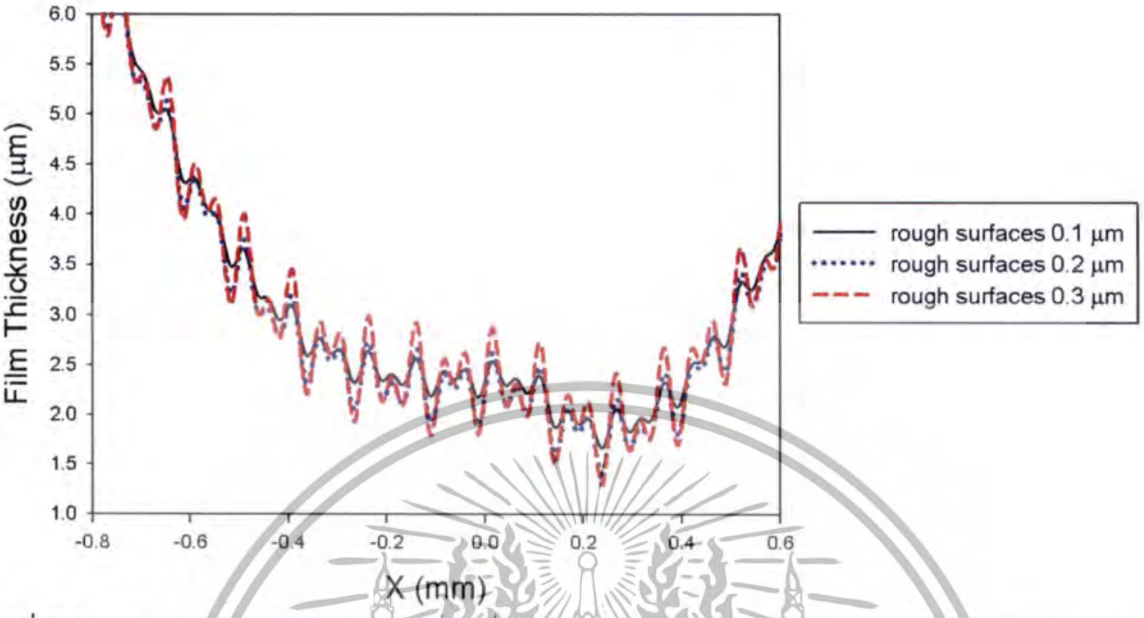
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบเนื่องจากผลของค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ความเร็วเฉลี่ยของทรงกระบอกรับที่ 1.92 m/s เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.82 ถึง รูปที่ 4.90 พบว่า เมื่อผิวมีค่าความหยาบมากขึ้นค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดก็มีค่ามากขึ้นด้วย โดยเท่ากับ 0.5421 GPa 0.6491 GPa และ 0.8665 GPa เมื่อความหยาบผิว 0.1 μm 0.2 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ และความดันสารหล่อลื่นมีความกวัดแกว่งมากขึ้นเมื่อความหยาบผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.82 จากรูปที่ 4.83 พบว่าเมื่อผิวมีค่าความหยาบมากขึ้นค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดจะมีค่าลดลง โดยเท่ากับ 1.6711 μm 1.4019 μm และ 1.2896 μm เมื่อความหยาบผิว 0.1 μm 0.2 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.84 พบว่าเมื่อผิวมีค่าความหยาบมากขึ้นค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเท่ากับ 96.3774 $^{\circ}$C 112.3826 $^{\circ}$C และ 148.0137 $^{\circ}$C เมื่อความหยาบผิว 0.1 μm 0.2 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ และเมื่อเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตรลงในสารหล่อลื่น SAE-90 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเท่ากับ 0.5440 GPa 0.6231 GPa และ 0.8347 GPa ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเท่ากับ 1.7035 μm 1.5276 μm และ 1.3451 μm และค่าอุณหภูมิฟิล์มน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 96.3838 $^{\circ}$C 107.9227 $^{\circ}$C และ 142.7318 $^{\circ}$C เมื่อความหยาบผิว 0.1 μm 0.2 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.85 ถึงรูปที่ 4.90

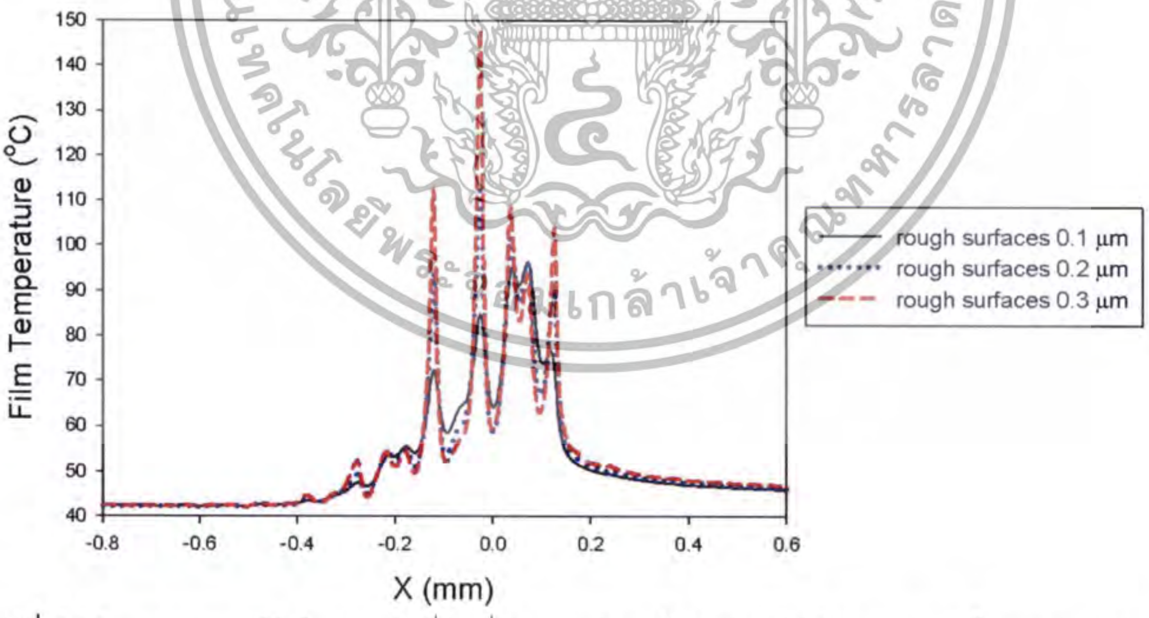


รูปที่ 4.82 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ **200 kN/m** ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ **1.92 m/s** โดยมีค่า Slip Ratio = **0.75** ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

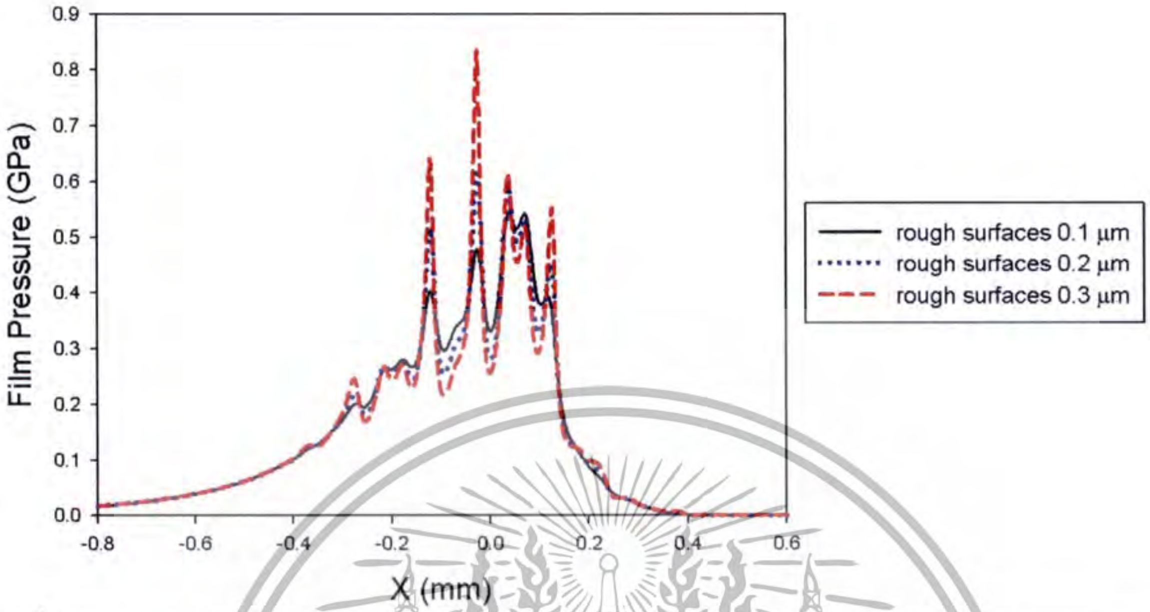


รูปที่ 4.83 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % โดยปริมาตร

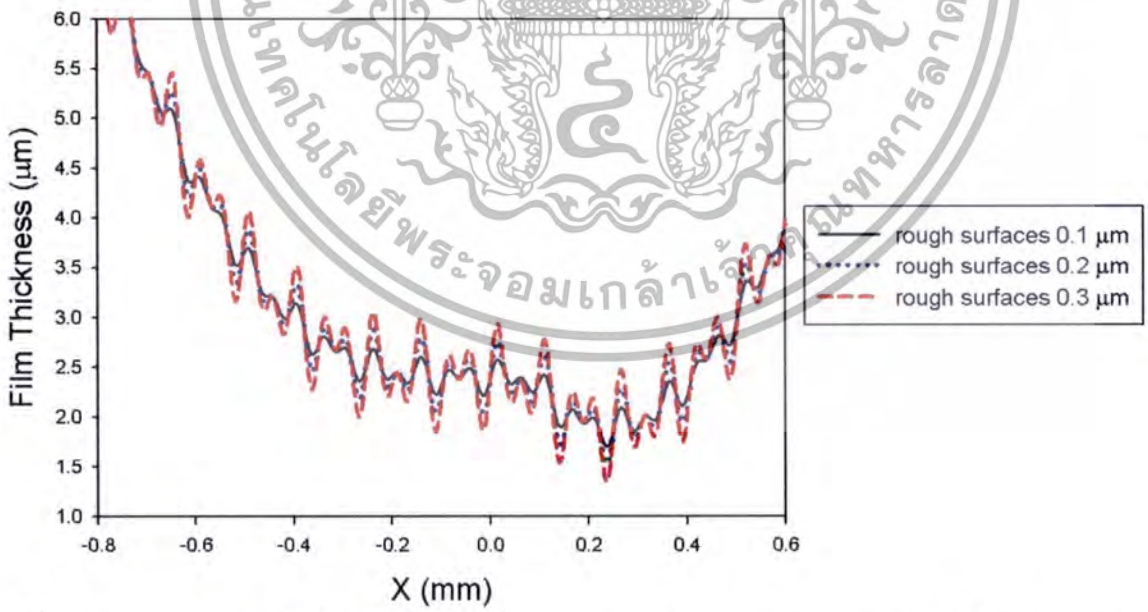


รูปที่ 4.84 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

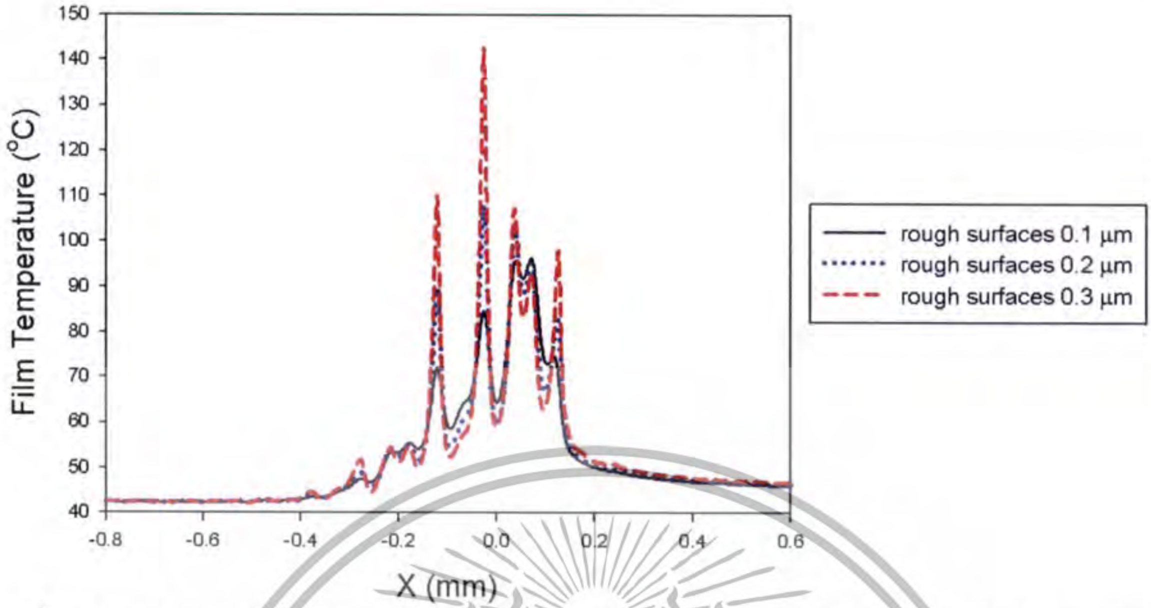


รูปที่ 4.85 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตร

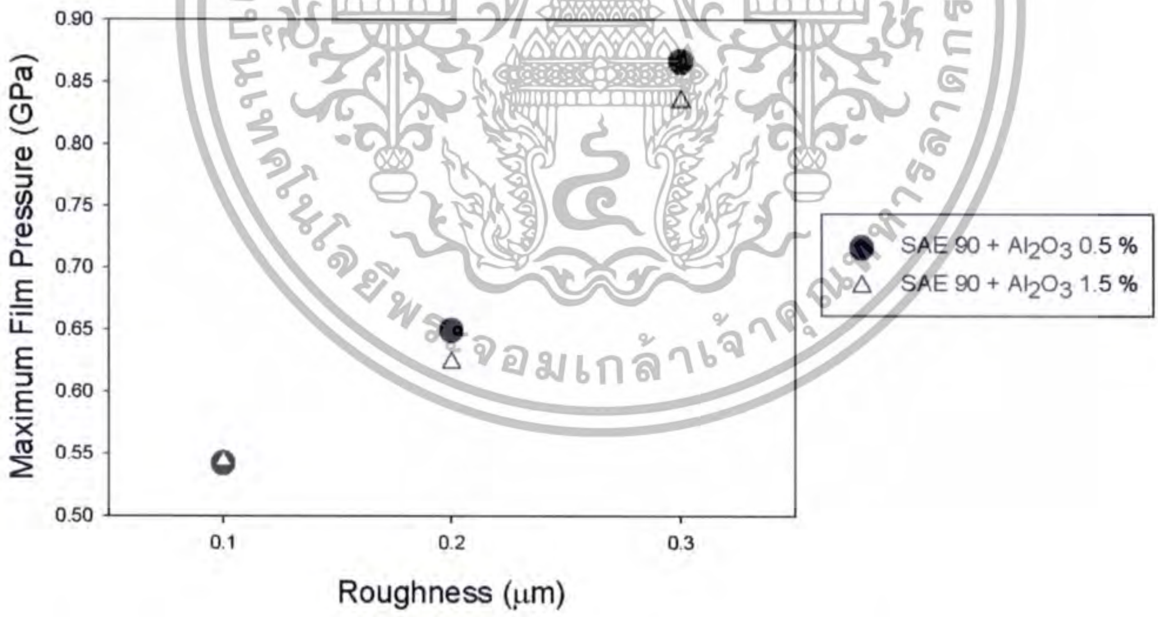


รูปที่ 4.86 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

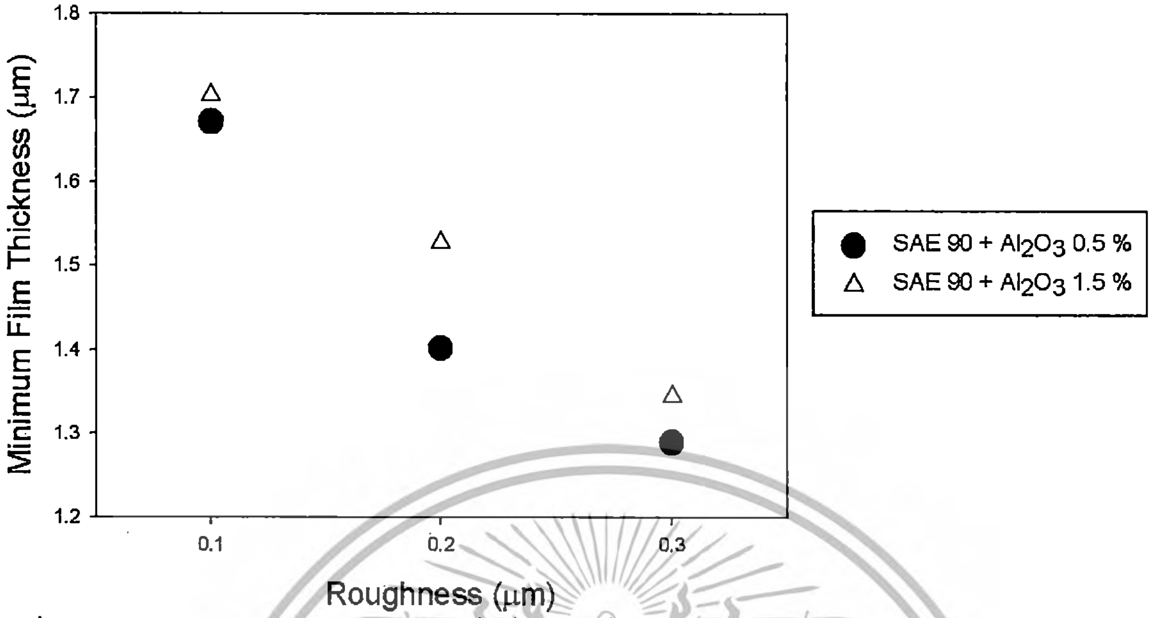


รูปที่ 4.87 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.5 % โดยปริมาตร

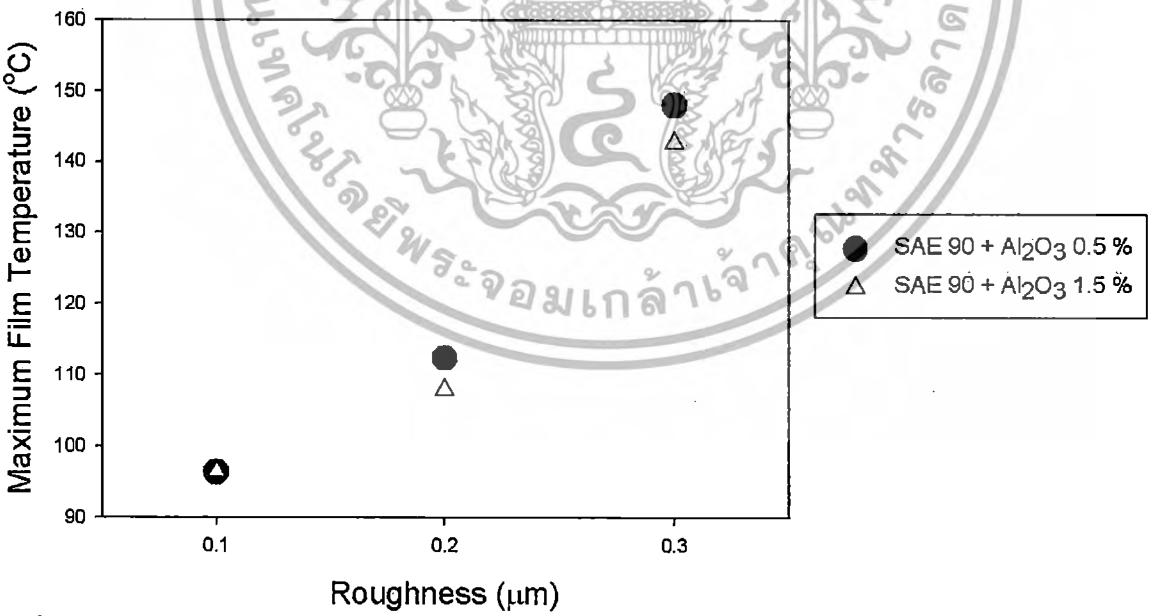


รูปที่ 4.88 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm , 0.2 μm และ 0.3 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.89 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 *μm* , 0.2 *μm* และ 0.3 *μm* ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร

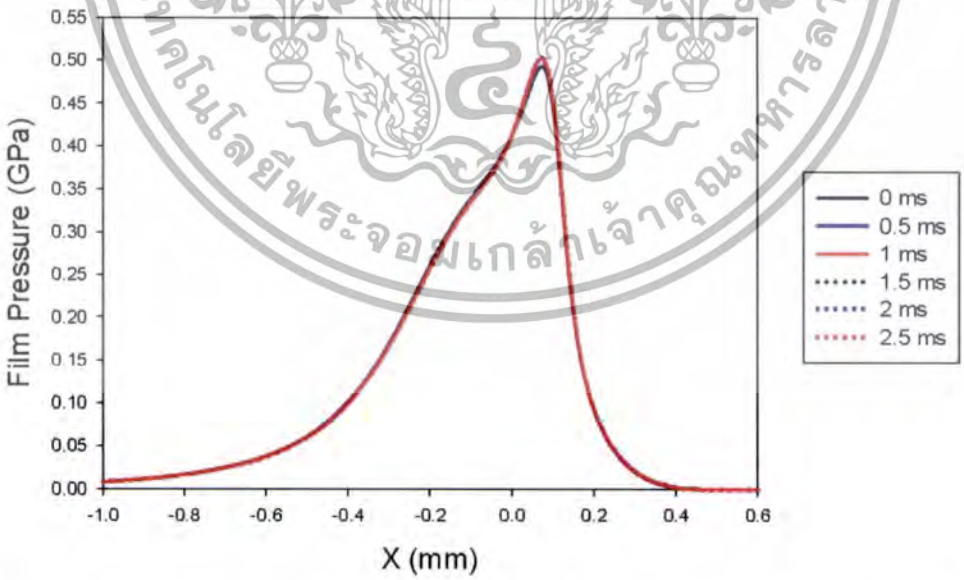


รูปที่ 4.90 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 *μm* , 0.2 *μm* และ 0.3 *μm* ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 0.5 % และ 1.5 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

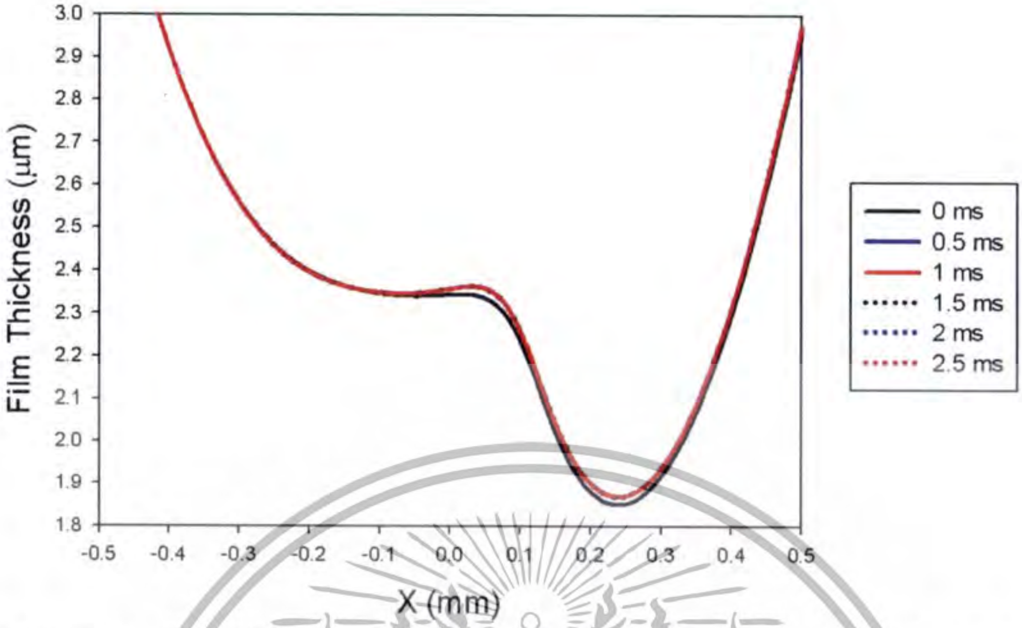
4.4 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัวเมื่อทรงกระบอกรับภาระต่างๆ

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ถึง 800 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบทั้งสองชิ้น สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 1.0 % และ 2.0 % ตามลำดับ จากการจำลองผลดังรูปที่ 4.91 ถึงรูปที่ 4.93ในกรณีสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยที่เวลาเริ่มต้นค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าที่เวลาใดๆ ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดจะมีค่าต่ำกว่าที่เวลาใดๆ และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าที่เวลาใดๆ การเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในทุกๆเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบเดียวกัน โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4933 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 0.5037 GPa และคงที่ที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 0.5028 GPa ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.8499 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 1.8691 μm และคงที่ที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 1.8689 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 93.5320 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 95.3282 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 0.65 ms เท่ากับ 95.1452 $^{\circ}C$ ดังแสดงในรูปที่ 4.94 ถึงรูปที่ 4.96

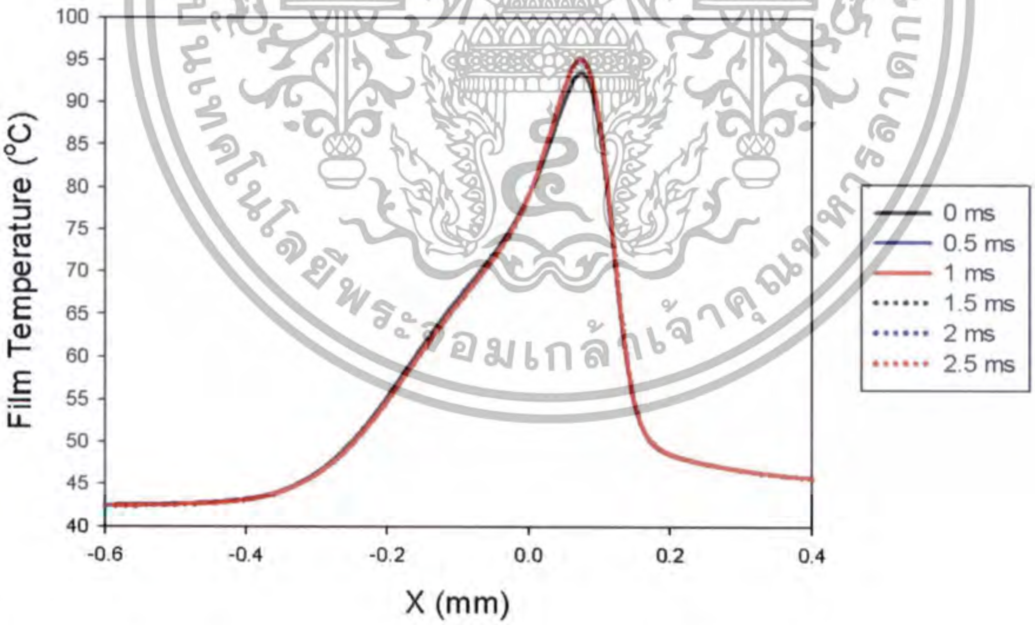


รูปที่ 4.91 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

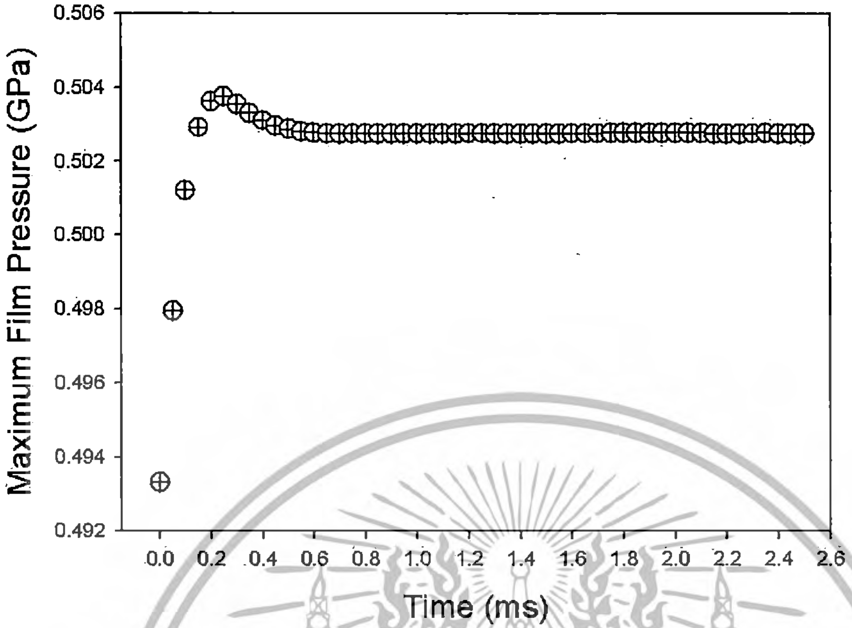


รูปที่ 4.92 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

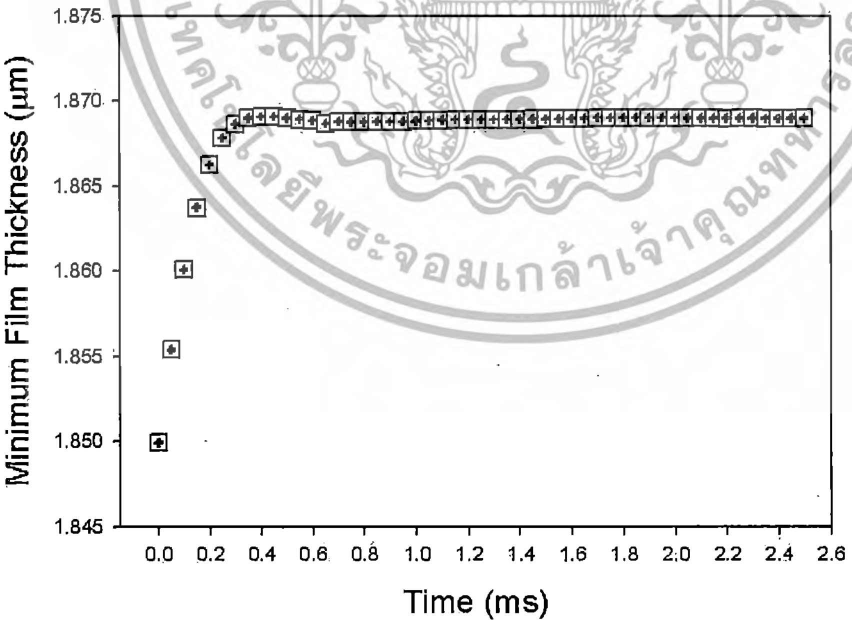


รูปที่ 4.93 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

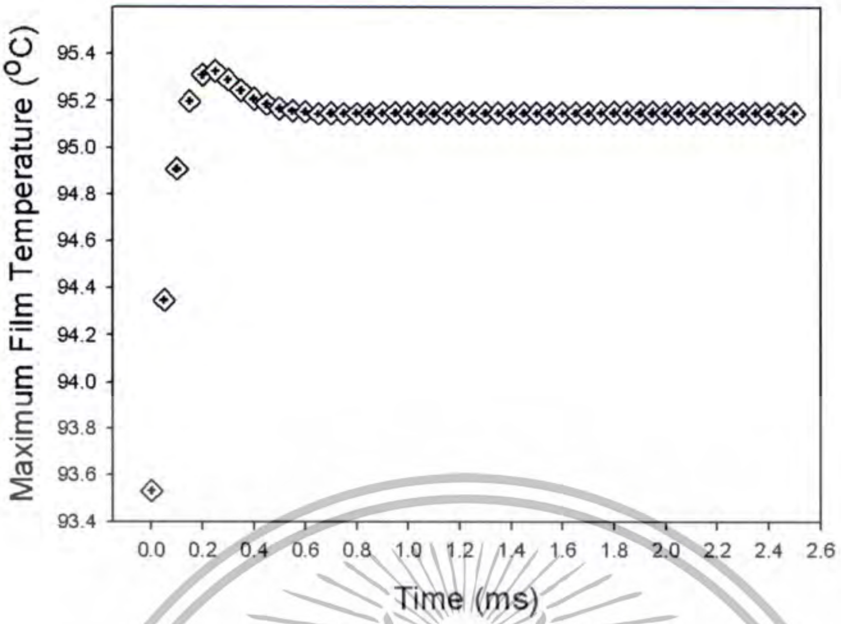


รูปที่ 4.94 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

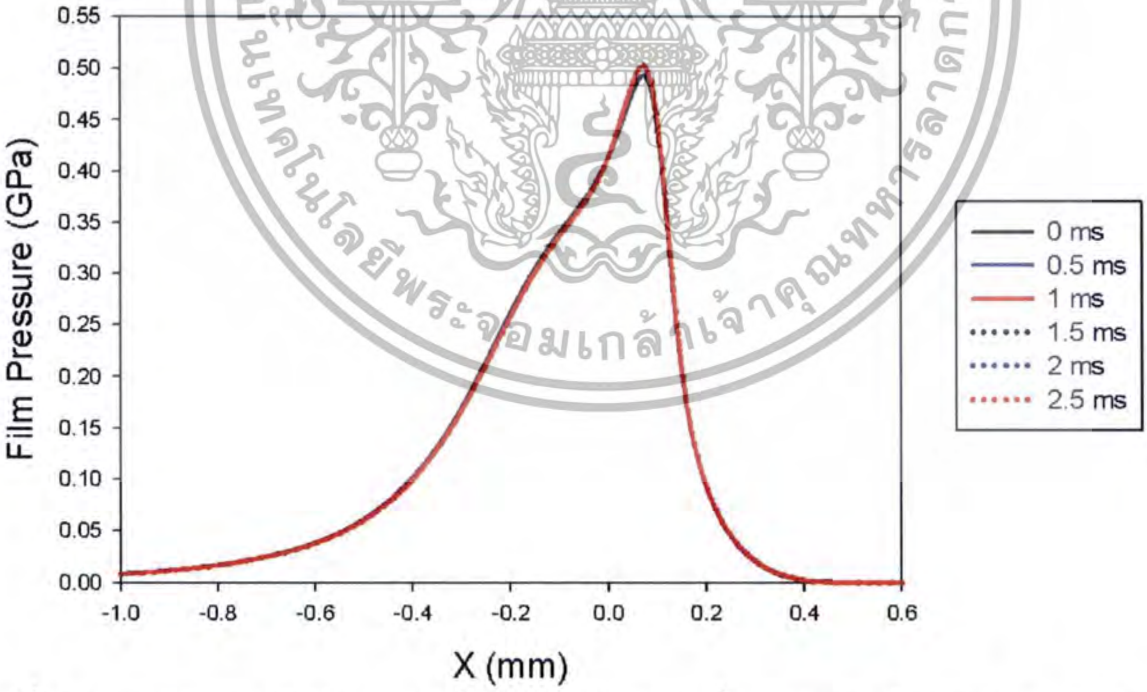


รูปที่ 4.95 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

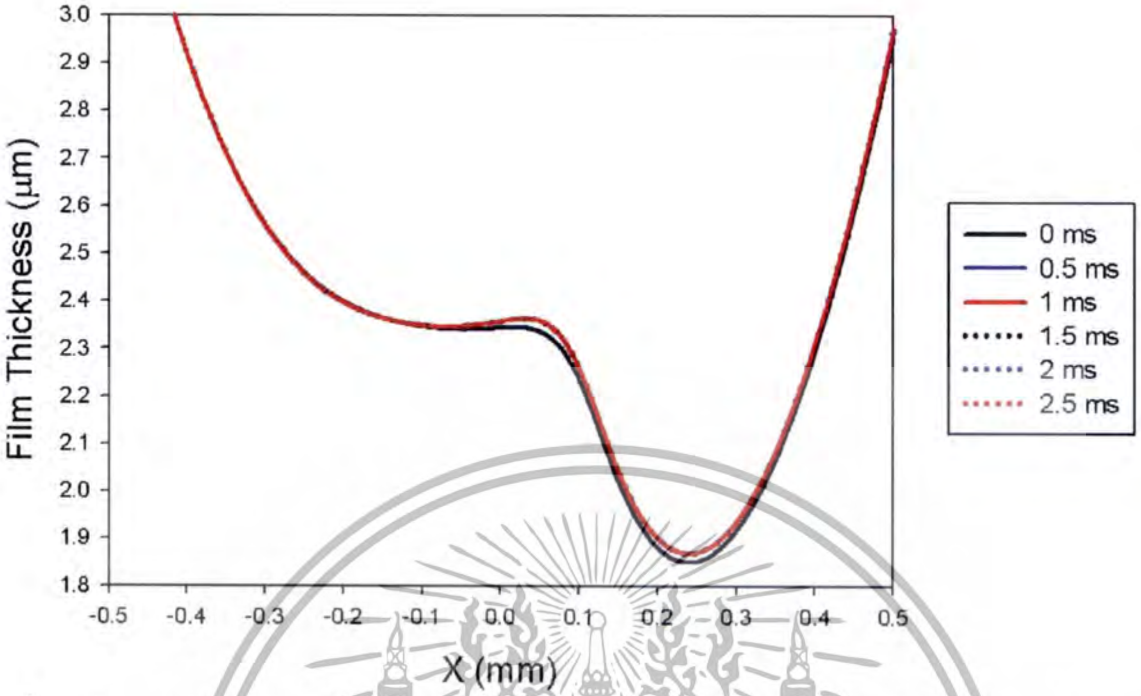


รูปที่ 4.96 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

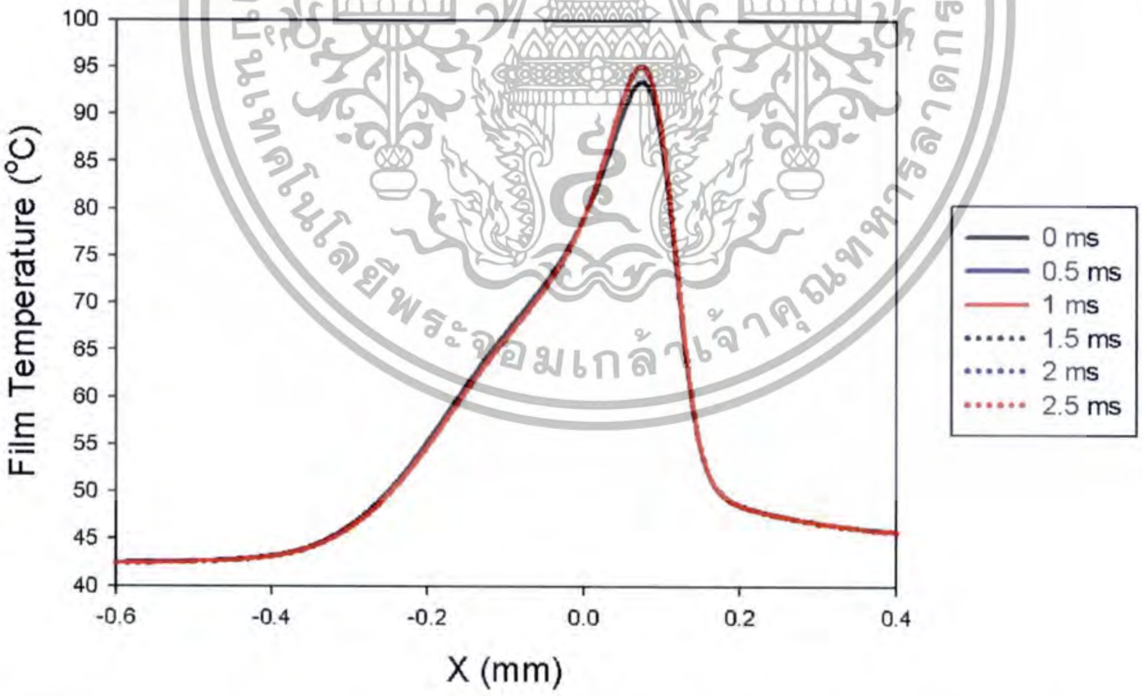


รูปที่ 4.97 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

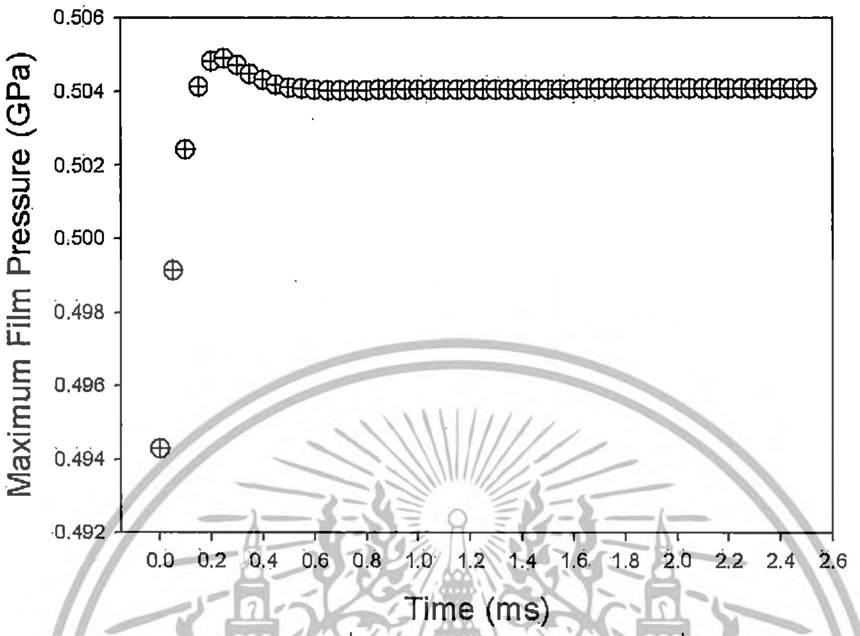


รูปที่ 4.98 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

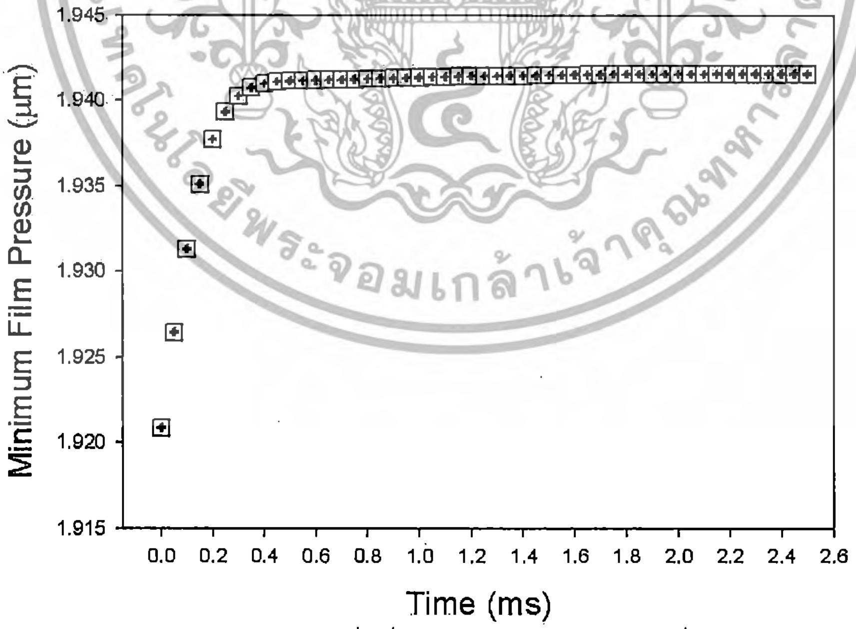


รูปที่ 4.99 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

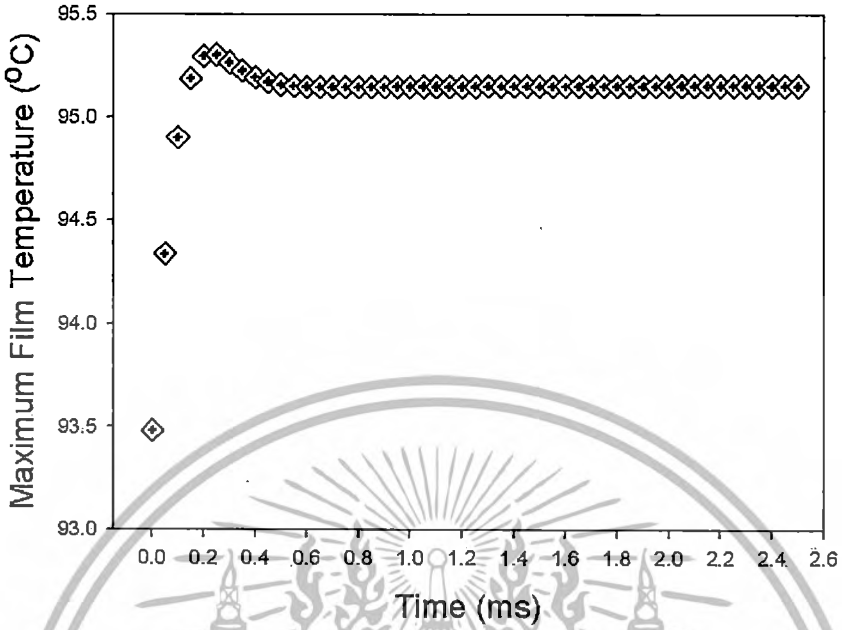


รูปที่ 4.100 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.101 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

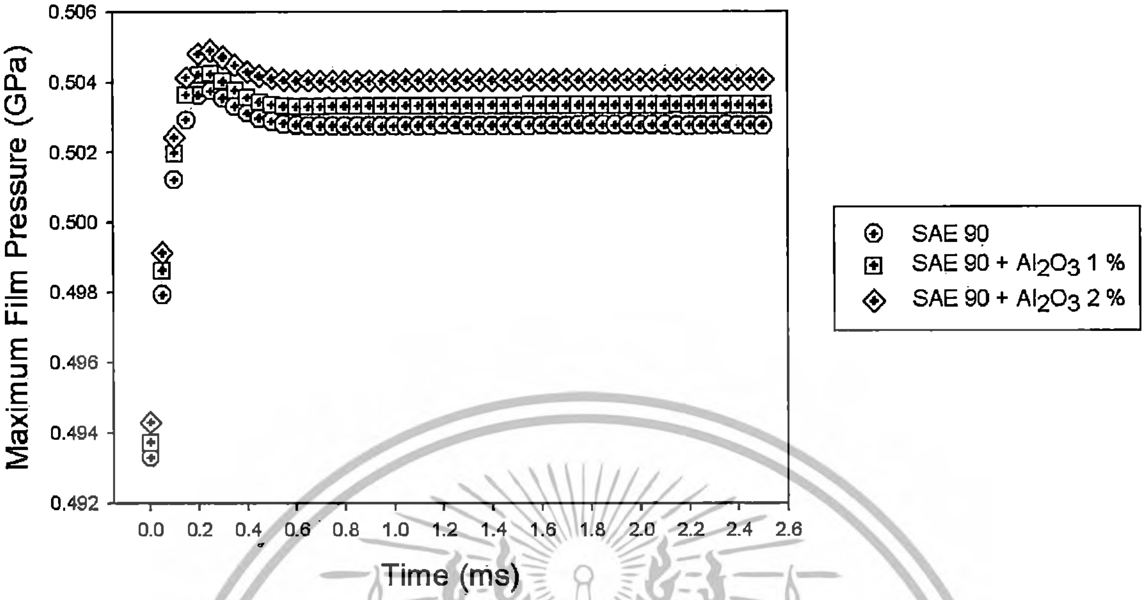
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



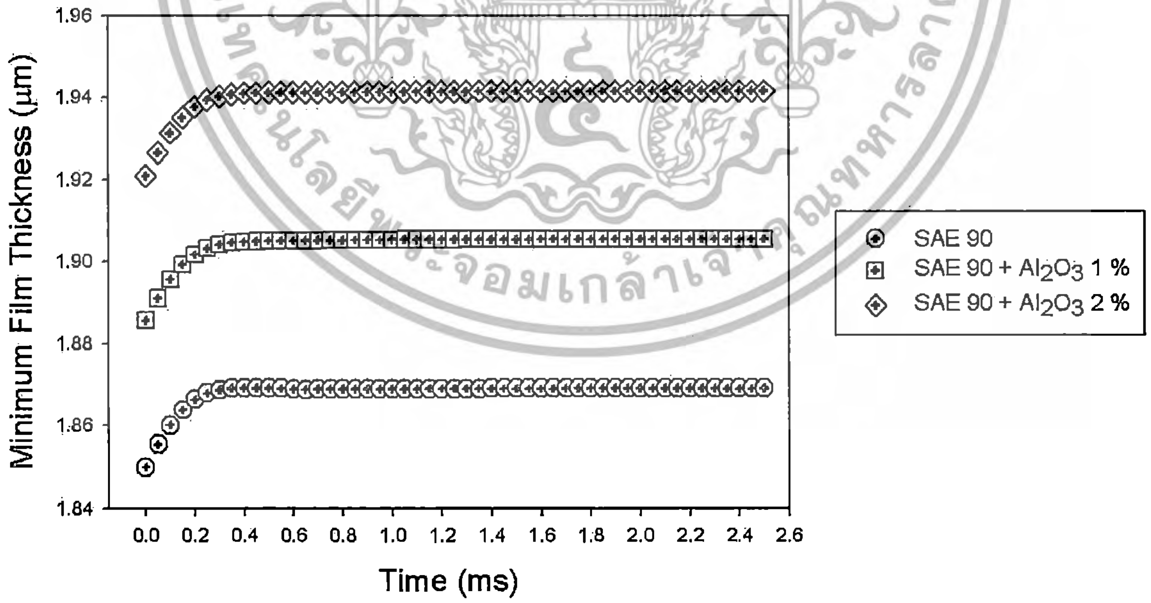
รูปที่ 4.102 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองผลดังรูปที่ 4.97 ถึงรูปที่ 4.99 ในกรณีสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยที่เวลาเริ่มต้นค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าที่เวลาใดๆ ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดจะมีค่าต่ำกว่าที่เวลาใดๆ และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าที่เวลาใดๆ การเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในทุกๆเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบเดียวกันและเป็นรูปร่างเดียวกับกรณีสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4943 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 0.5049 GPa และคงที่ที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 0.5041 GPa ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.9208 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 1.75 ms เท่ากับ 1.9416 μm และคงที่ที่เวลา 1.75 ms เท่ากับ 1.9416 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 93.4832 °C และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 95.3055 °C และคงที่ที่เวลา 0.95 ms เท่ากับ 95.1495 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.100 ถึงรูปที่ 4.102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

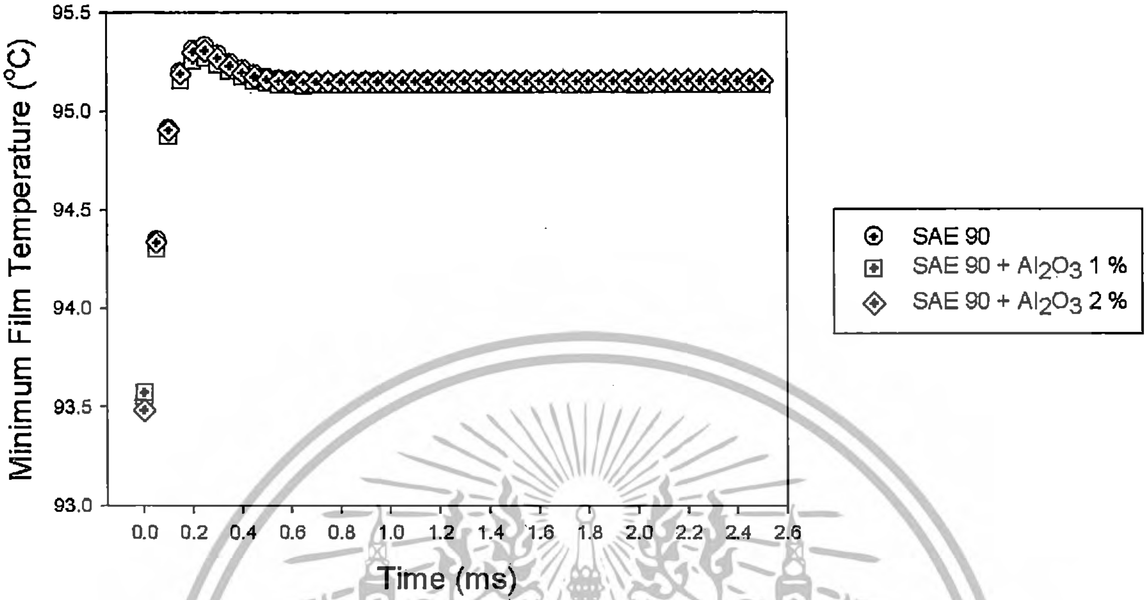


รูปที่ 4.103 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.104 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

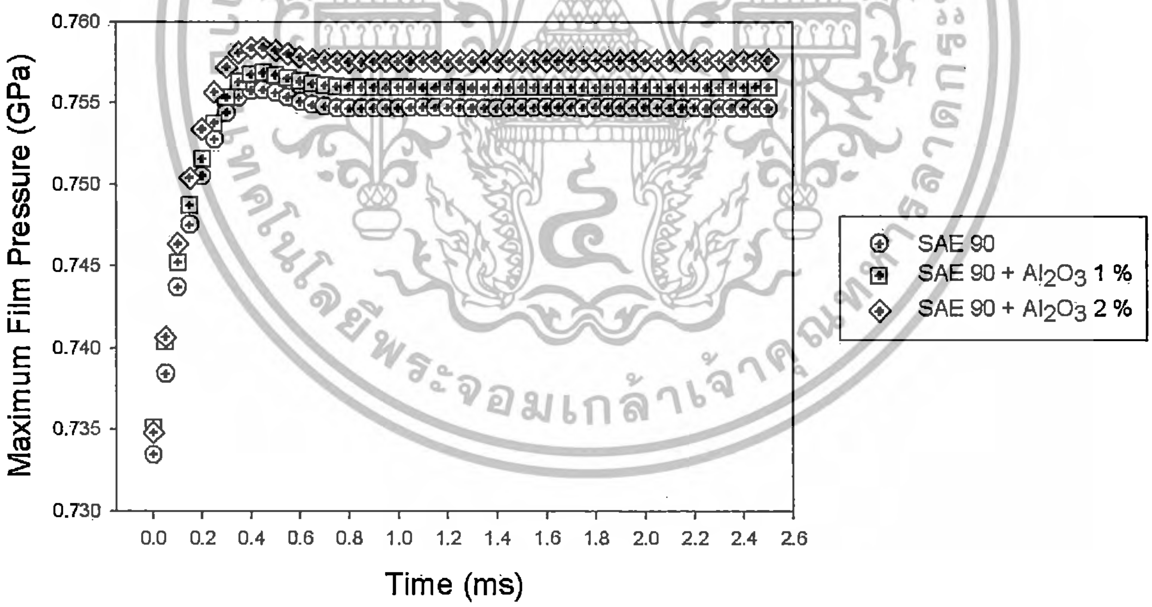


รูปที่ 4.105 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองผลการหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.103 ถึงรูปที่ 4.105 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.4933 GPa 0.4937 GPa และ 0.4943 GPa และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 0.5028 GPa 0.5033 GPa และ 0.5041 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.8499 μm 1.8856 μm และ 1.9208 μm และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 1.8690 μm 1.9055 μm และ 1.9416 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่าใกล้เคียงกับกรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 93.5320 °C 93.5726 °C และ 93.4832 °C และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 95.1492 °C 95.1346 °C และ 95.1545 °C เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

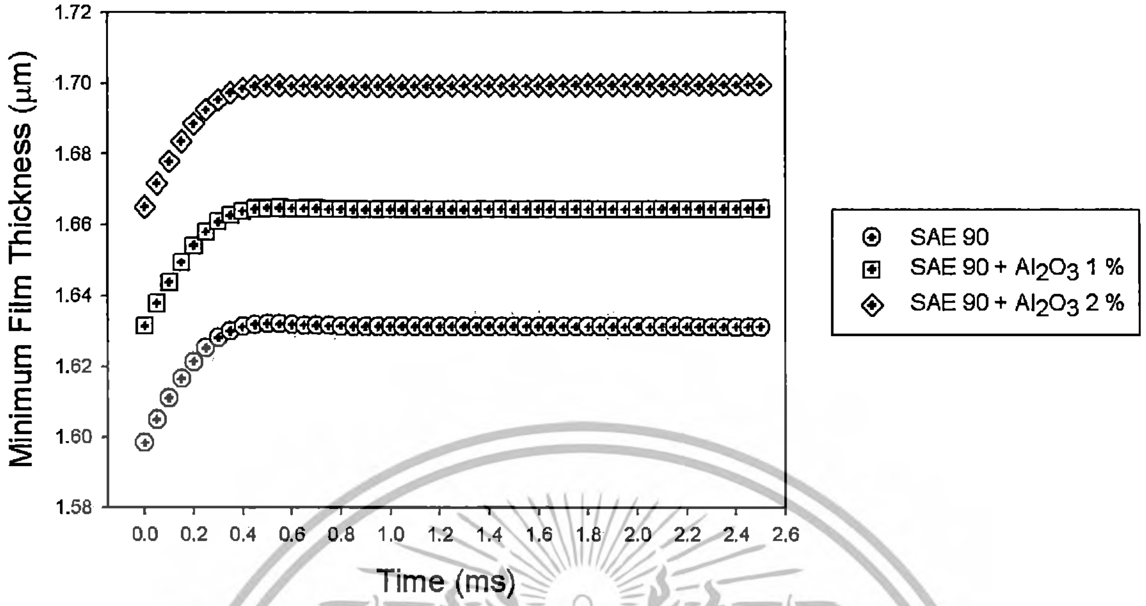
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.106 ถึงรูปที่ 4.108 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.7334 GPa 0.7351 GPa และ 0.7348 GPa และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 0.7547 GPa 0.7560 GPa และ 0.7576 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.5982 μm 1.6314 μm และ 1.6651 μm และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 1.6311 μm 1.6645 μm และ 1.6995 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่าเล็กน้อยในกรณีที่เป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 137.281 $^{\circ}C$ 137.4635 $^{\circ}C$ และ 137.2670 $^{\circ}C$ และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 140.8375 $^{\circ}C$ 140.9583 $^{\circ}C$ และ 141.0930 $^{\circ}C$ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

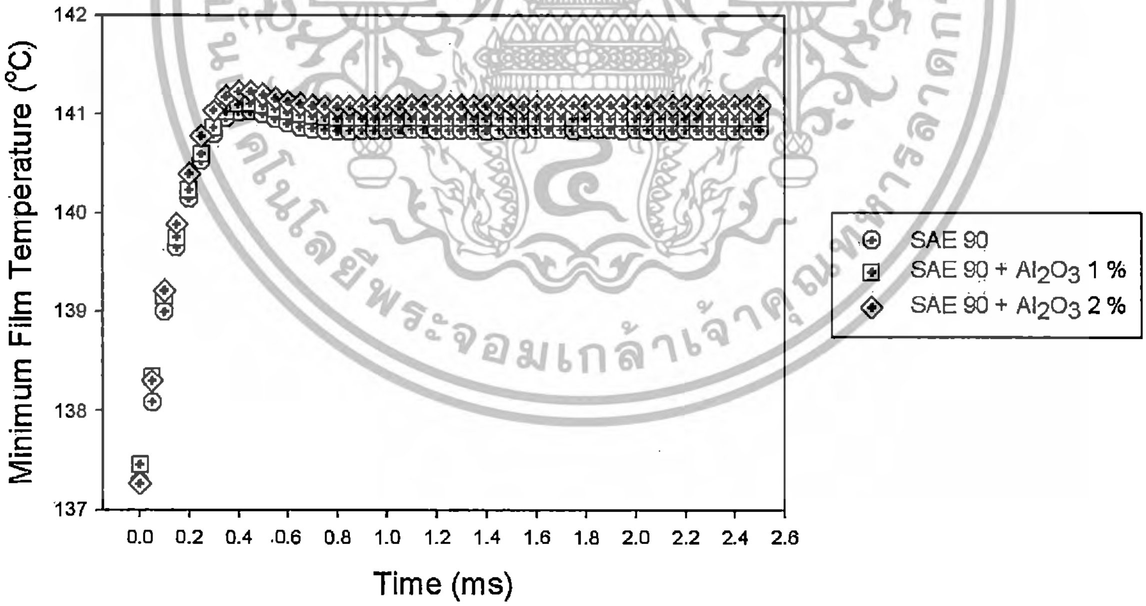


รูปที่ 4.106 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



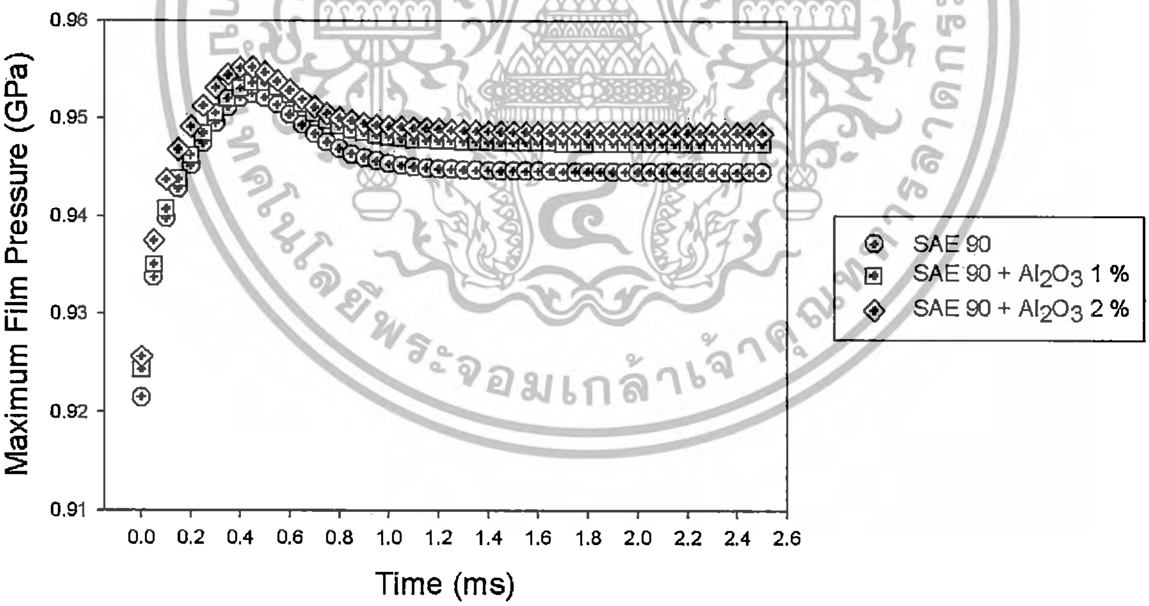
รูปที่ 4.107 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.108 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

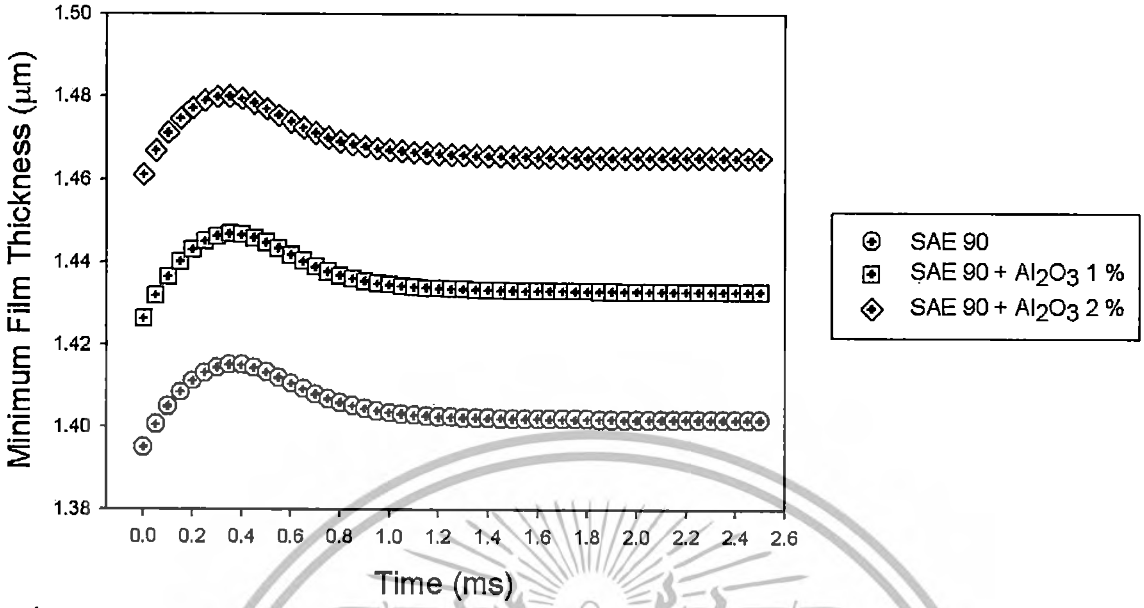
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.109 ถึงรูปที่ 4.111 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.9215 GPa 0.9243 GPa และ 0.9257 GPa และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 0.9445 GPa 0.9474 GPa และ 0.9485 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.3950 μm 1.4263 μm และ 1.4611 μm และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 1.4018 μm 1.4329 μm และ 1.4653 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่าเล็กน้อยในกรณีที่เป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 170.2493 $^{\circ}C$ 170.5804 $^{\circ}C$ และ 170.6787 $^{\circ}C$ และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 174.0117 $^{\circ}C$ 174.3464 $^{\circ}C$ และ 174.4025 $^{\circ}C$ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

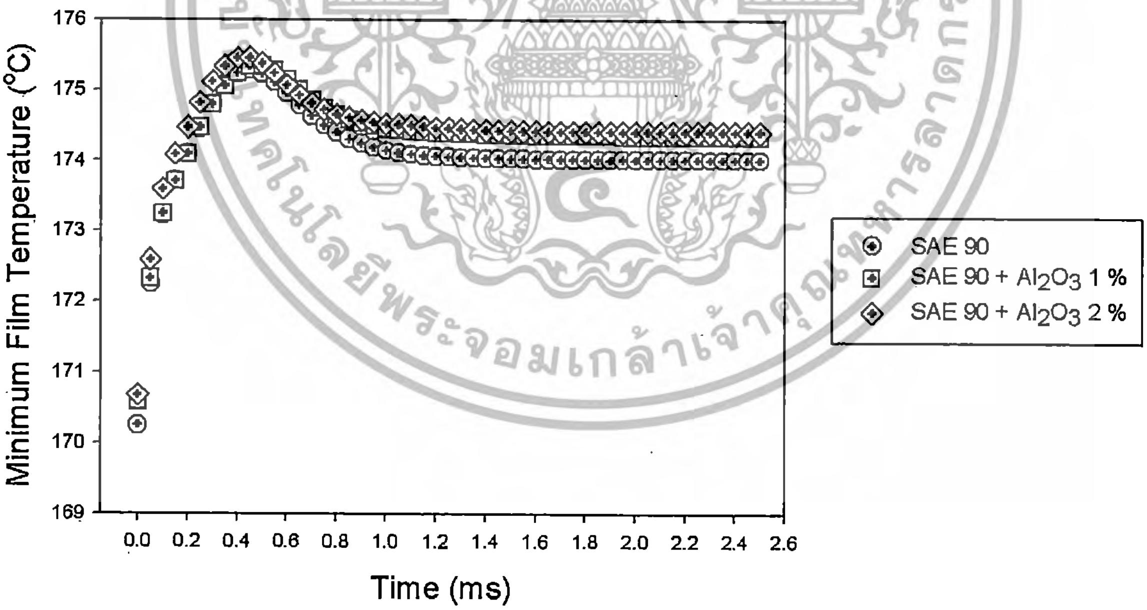


รูปที่ 4.109 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



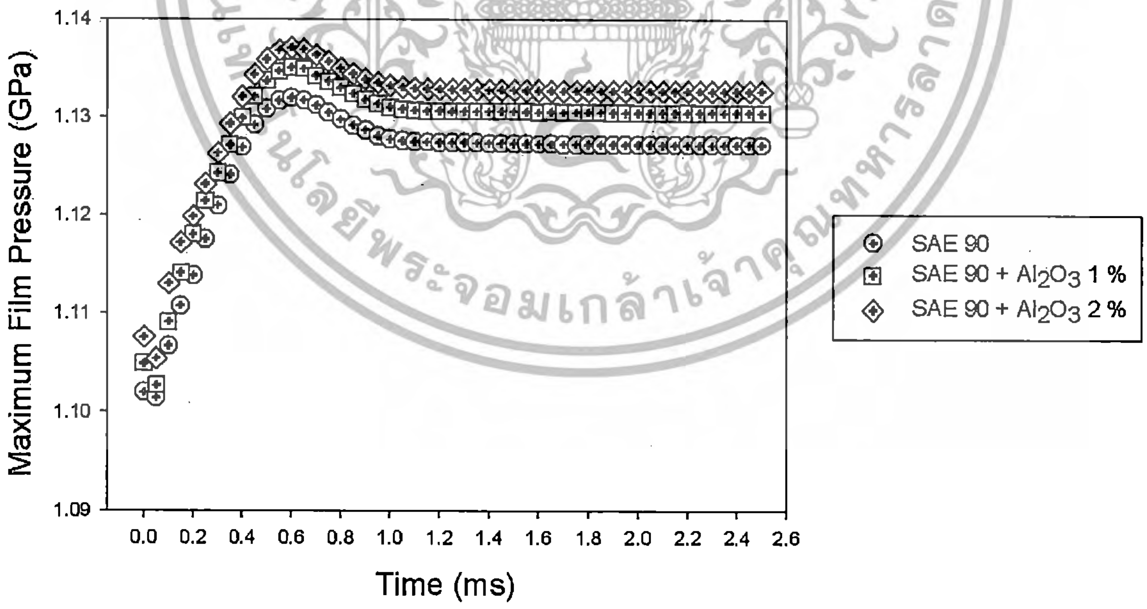
รูปที่ 4.110 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.111 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

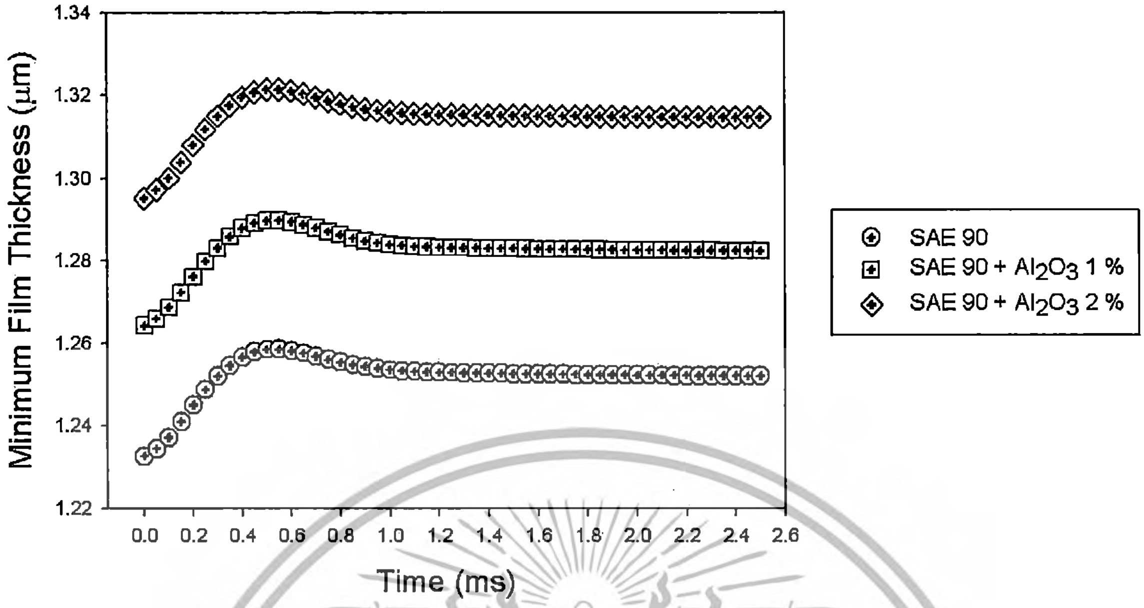
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.109 ถึงรูปที่ 4.111 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.1020 GPa 1.1049 GPa และ 1.1076 GPa และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 1.1272 GPa 1.1304 GPa และ 1.1327 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.2326 μm 1.2642 μm และ 1.2952 μm และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 1.2519 μm 1.2825 μm และ 1.3146 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่าเล็กน้อยในกรณีที่เป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 200.3923 $^{\circ}C$ 200.7327 $^{\circ}C$ และ 201.0398 $^{\circ}C$ และที่เวลา 2.50 ms มีค่าเท่ากับ 204.3446 $^{\circ}C$ 204.6814 $^{\circ}C$ และ 204.8748 $^{\circ}C$ เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

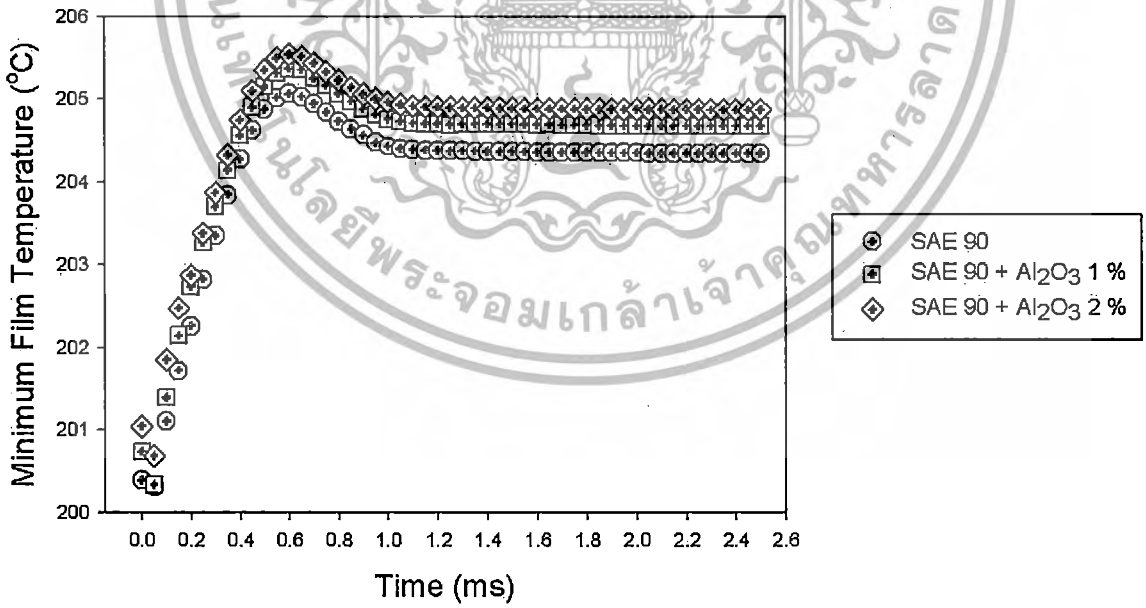


รูปที่ 4.112 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.113 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

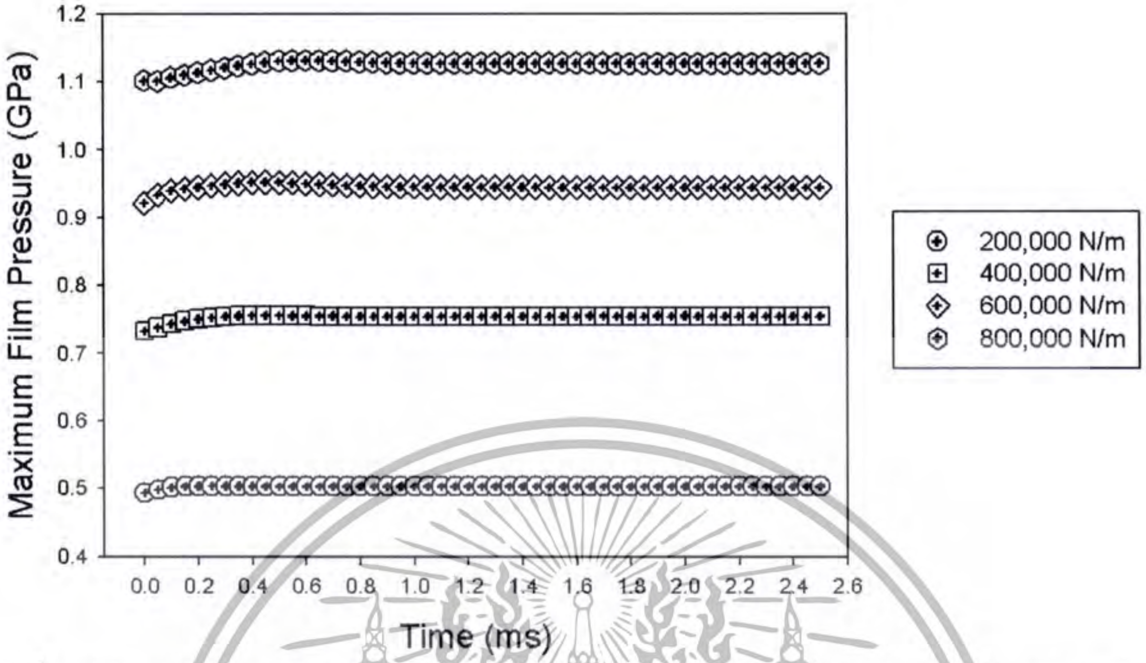


รูปที่ 4.114 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

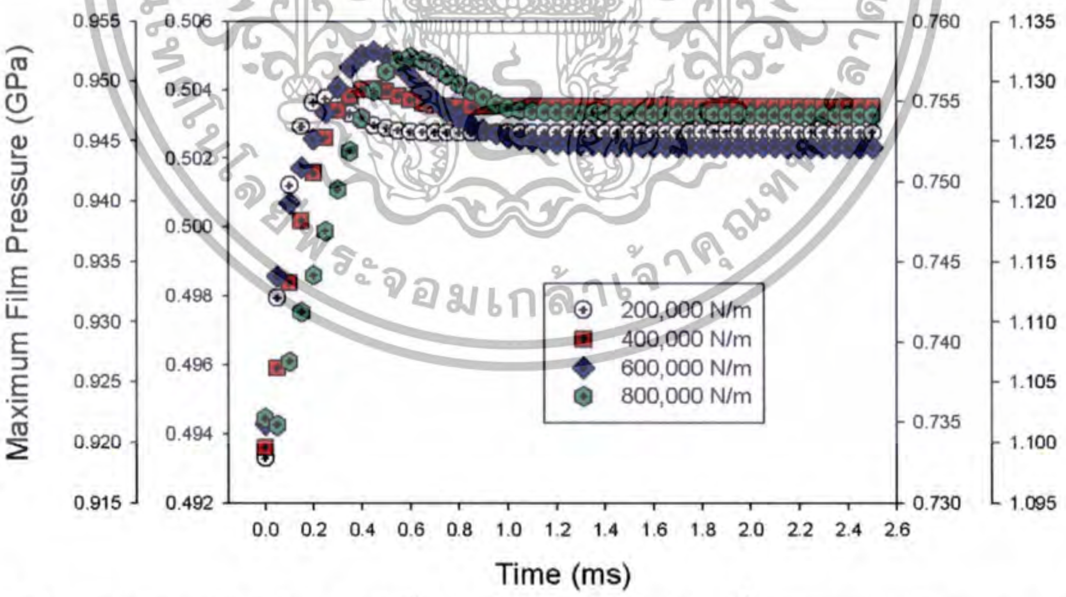
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น และที่ภาระสูงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการหล่อลื่นและมีค่าคงที่ช้ากว่าในกรณีที่ภาระต่ำ โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4933 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 0.5037 GPa และคงที่ที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 0.5028 GPa ที่ภาระ 400 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.7334 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 0.7558 GPa และคงที่ที่เวลา 0.75 ms เท่ากับ 0.7547 GPa ที่ภาระ 600 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.9215 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 0.9525 GPa และคงที่ที่เวลา 1.10 ms เท่ากับ 0.9450 GPa และที่ภาระ 800 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.1020 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.60 ms เท่ากับ 1.1320 GPa และคงที่ที่เวลา 1.20 ms เท่ากับ 1.1275 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.115 และรูปที่ 4.116 สำหรับการพิจารณาค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด พบว่าค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น และที่ภาระสูงค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการหล่อลื่นและมีค่าคงที่ช้ากว่าในกรณีที่ภาระต่ำ โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.8499 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 1.8691 μm และคงที่ที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 1.8689 μm ที่ภาระ 400 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.5982 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.50 ms เท่ากับ 1.6321 μm และคงที่ที่เวลา 0.80 ms เท่ากับ 1.6314 μm ที่ภาระ 600 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.3950 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.35 ms เท่ากับ 1.4151 μm และคงที่ที่เวลา 1.55 ms เท่ากับ 1.4020 μm และที่ภาระ 800 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.2326 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 1.2585 μm และคงที่ที่เวลา 1.60 ms เท่ากับ 1.2525 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.117 และรูปที่ 4.118 ในส่วนค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดพบว่า ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น และที่ภาระสูงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการหล่อลื่นและมีค่าคงที่ช้ากว่าในกรณีที่ภาระต่ำ โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 93.5320 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 95.3282 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 0.65 ms เท่ากับ 95.1452 $^{\circ}C$ ที่ภาระ 400 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 137.2810 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 141.0252 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 1.05 ms เท่ากับ 140.8430 $^{\circ}C$ ที่ภาระ 600 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 170.2493 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 175.2865 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 1.40 ms เท่ากับ 174.0365 $^{\circ}C$ และที่ภาระ 800 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 200.3923 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.60 ms เท่ากับ 205.0659 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 2.05 ms เท่ากับ 204.3499 $^{\circ}C$ ดังแสดงในรูปที่ 4.119 และรูปที่ 4.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

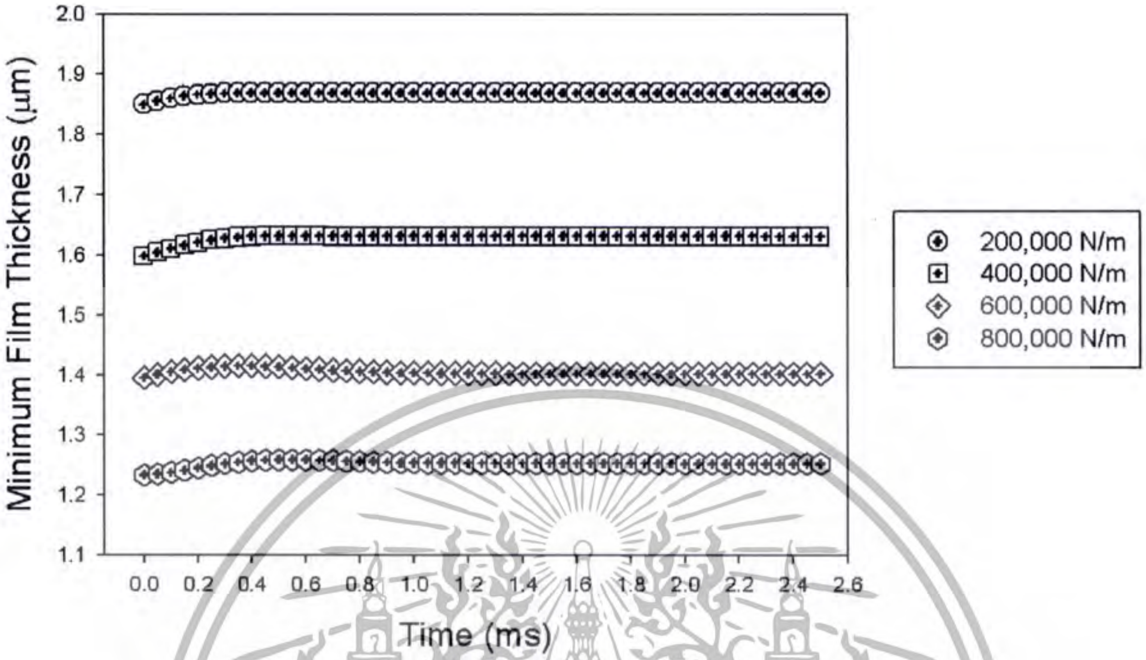


รูปที่ 4.115 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

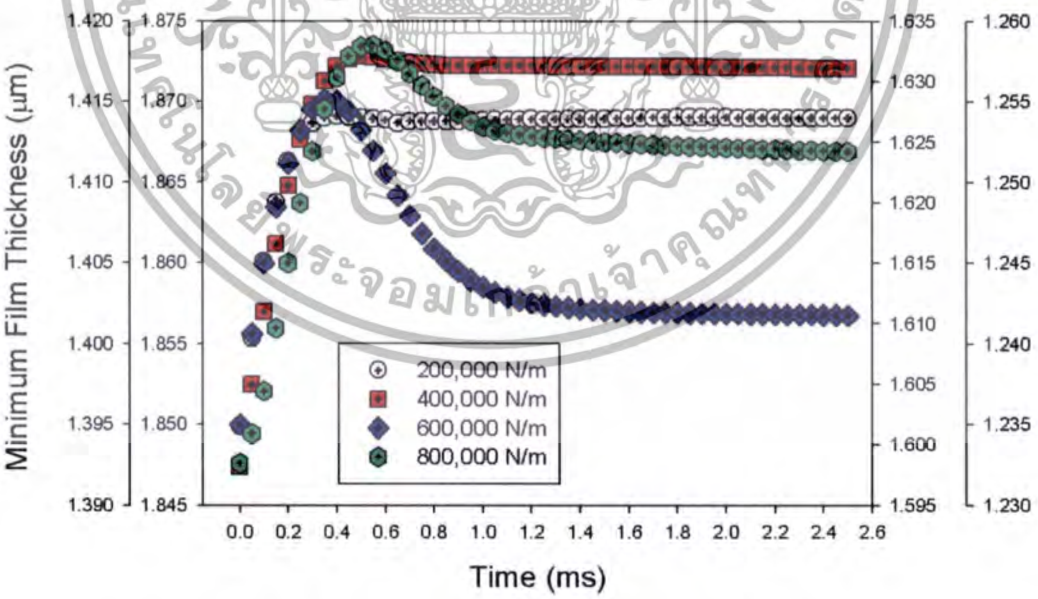


รูปที่ 4.116 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

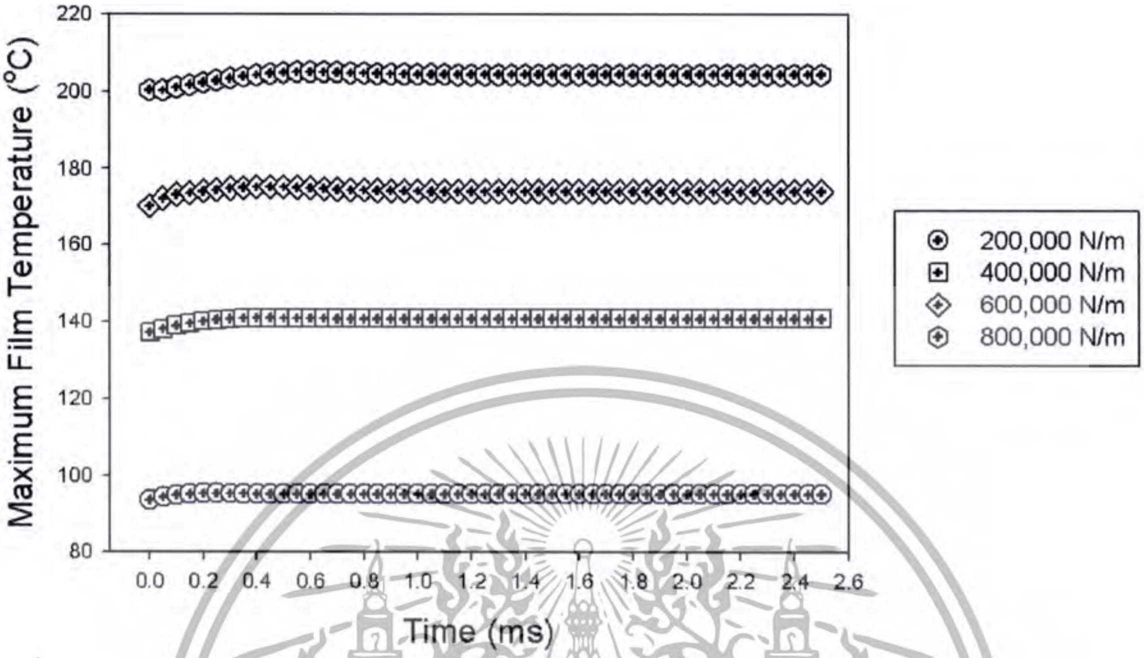


รูปที่ 4.117 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

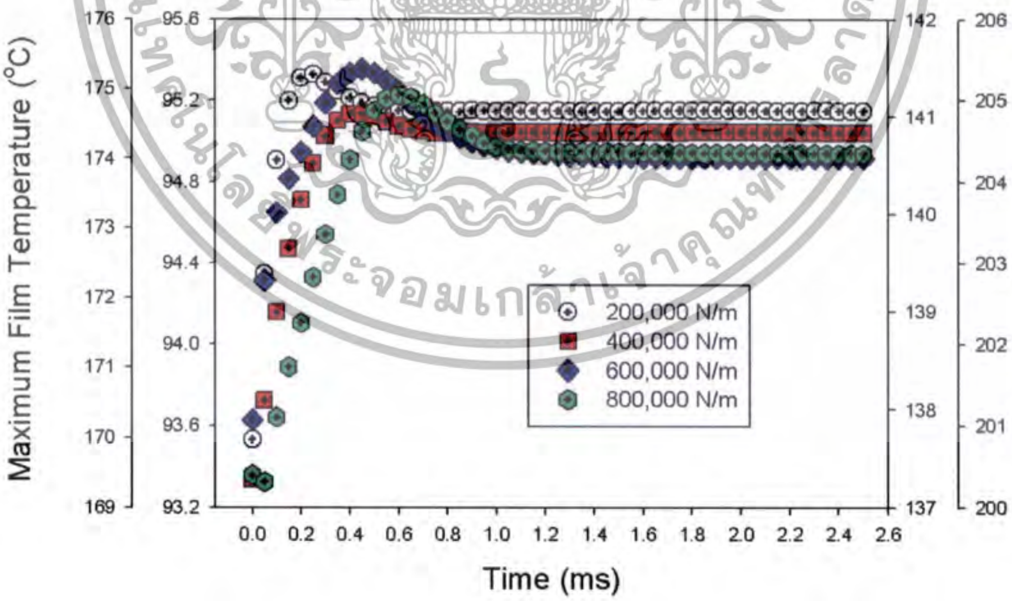


รูปที่ 4.118 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.119 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

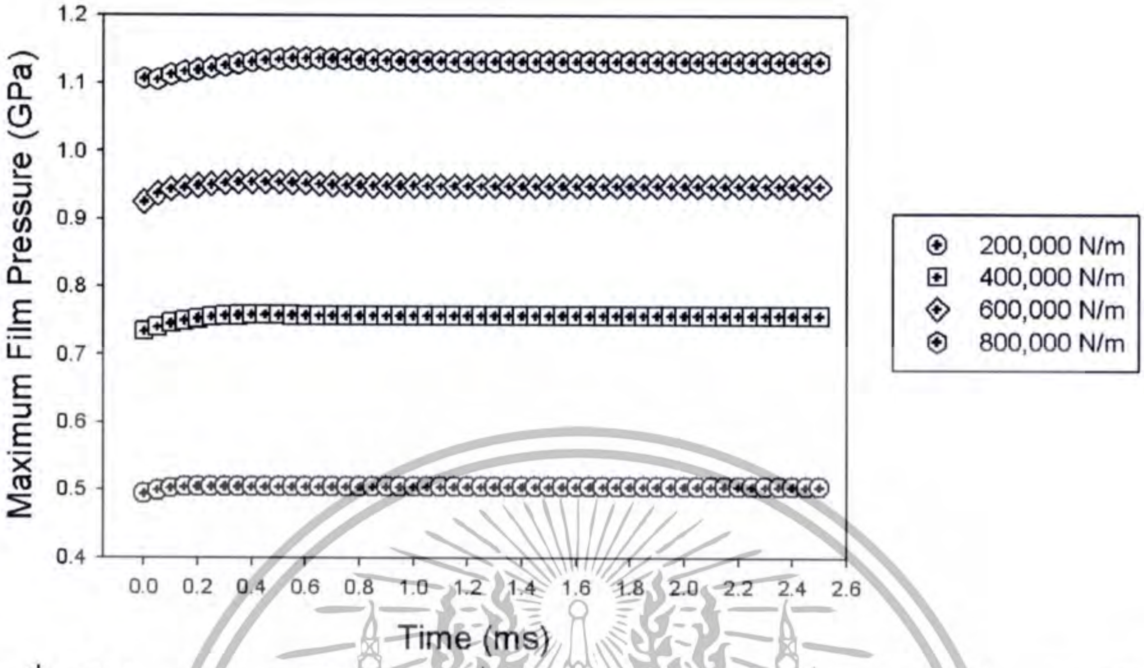


รูปที่ 4.120 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 (ขยายแกนแนวตั้ง)

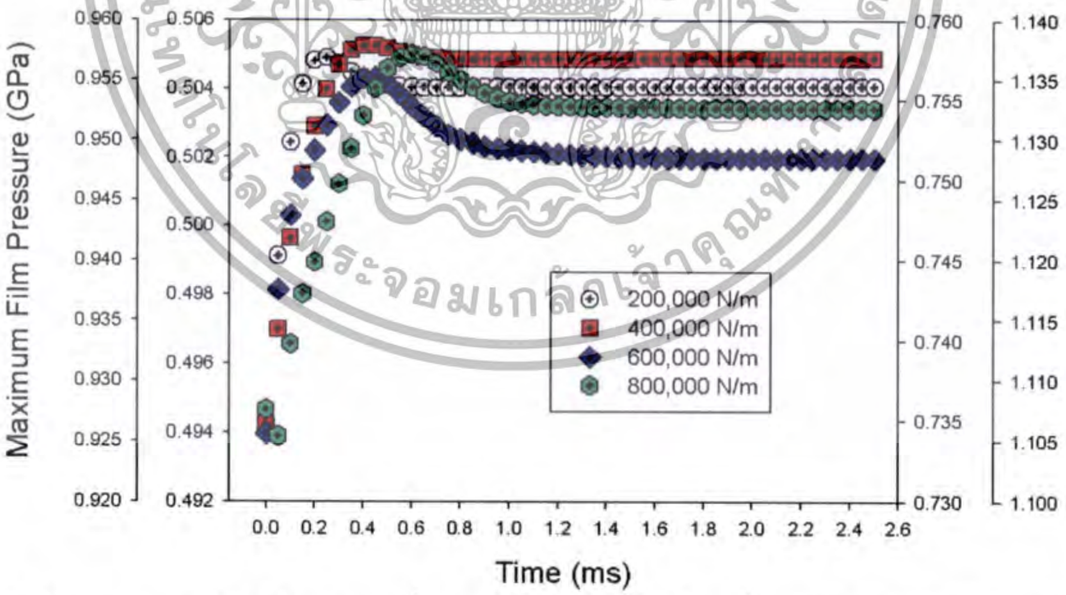
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น และที่ภาระสูงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการหล่อลื่นและมีค่าคงที่ช้ากว่าในกรณีที่ภาระต่ำ โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4943 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 0.5049 GPa และคงที่ที่เวลา 0.55 ms เท่ากับ 0.5041 GPa ที่ภาระ 400 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.7348 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.40 ms เท่ากับ 0.7584 GPa และคงที่ที่เวลา 0.70 ms เท่ากับ 0.7576 GPa ที่ภาระ 600 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.9257 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 0.9552 GPa และคงที่ที่เวลา 1.30 ms เท่ากับ 0.9487 GPa และที่ภาระ 800 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.1076 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.60 ms เท่ากับ 1.1371 GPa และคงที่ที่เวลา 1.50 ms เท่ากับ 1.1327 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.121 และรูปที่ 4.122 สำหรับการพิจารณาค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด พบว่าค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น และที่ภาระสูงค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการหล่อลื่นและมีค่าคงที่ช้ากว่าในกรณีที่ภาระต่ำ โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.9208 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 1.75 ms เท่ากับ 1.9416 μm และคงที่ที่เวลา 1.75 ms เท่ากับ 1.9416 μm ที่ภาระ 400 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.6651 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 2.35 ms เท่ากับ 1.6995 μm และคงที่ที่เวลา 2.35 ms เท่ากับ 1.6995 μm ที่ภาระ 600 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.4611 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.35 ms เท่ากับ 1.4801 μm และคงที่ที่เวลา 1.70 ms เท่ากับ 1.4654 μm และที่ภาระ 800 kN/m ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.2952 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.50 ms เท่ากับ 1.3214 μm และคงที่ที่เวลา 2.15 ms เท่ากับ 1.3147 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.123 และรูปที่ 4.124 ในส่วนค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดพบว่า ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น และที่ภาระสูงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการหล่อลื่นและมีค่าคงที่ช้ากว่าในกรณีที่ภาระต่ำ โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 93.4832 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.25 ms เท่ากับ 95.3055 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 0.95 ms เท่ากับ 95.1495 $^{\circ}C$ ที่ภาระ 400 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 137.2670 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.40 ms เท่ากับ 141.2292 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 0.95 ms เท่ากับ 141.0806 $^{\circ}C$ ที่ภาระ 600 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 170.6787 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.45 ms เท่ากับ 175.4579 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 1.70 ms เท่ากับ 174.4096 $^{\circ}C$ และที่ภาระ 800 kN/m ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 201.0398 $^{\circ}C$ และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.60 ms เท่ากับ 205.5468 $^{\circ}C$ และคงที่ที่เวลา 1.80 ms เท่ากับ 204.8773 $^{\circ}C$ ดังแสดงในรูปที่ 4.125 และรูปที่ 4.126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

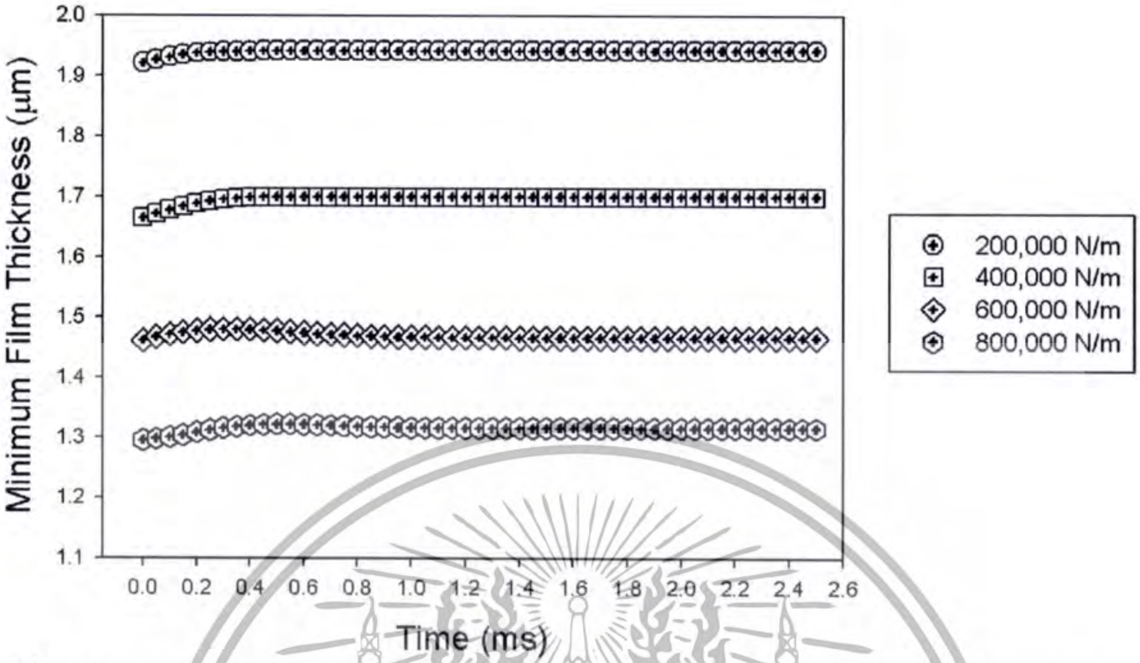


รูปที่ 4.121 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

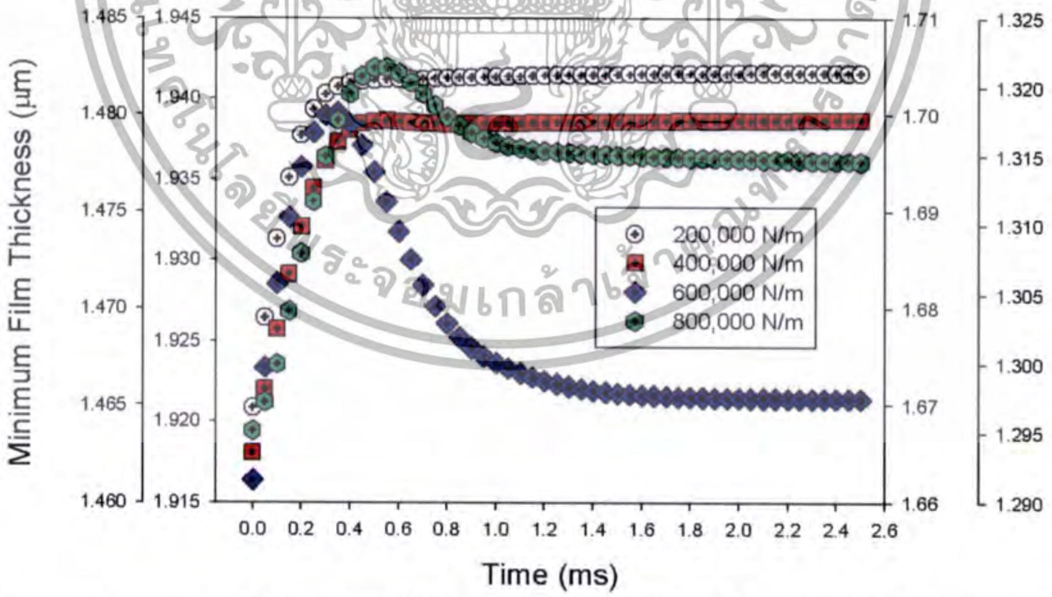


รูปที่ 4.122 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

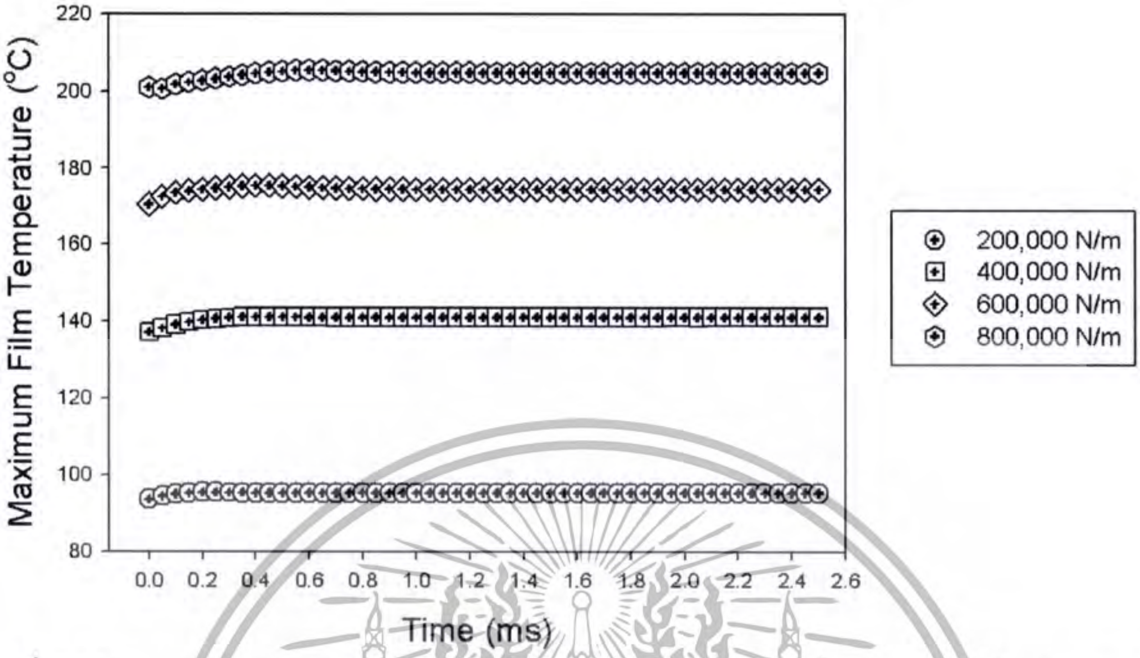


รูปที่ 4.123 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

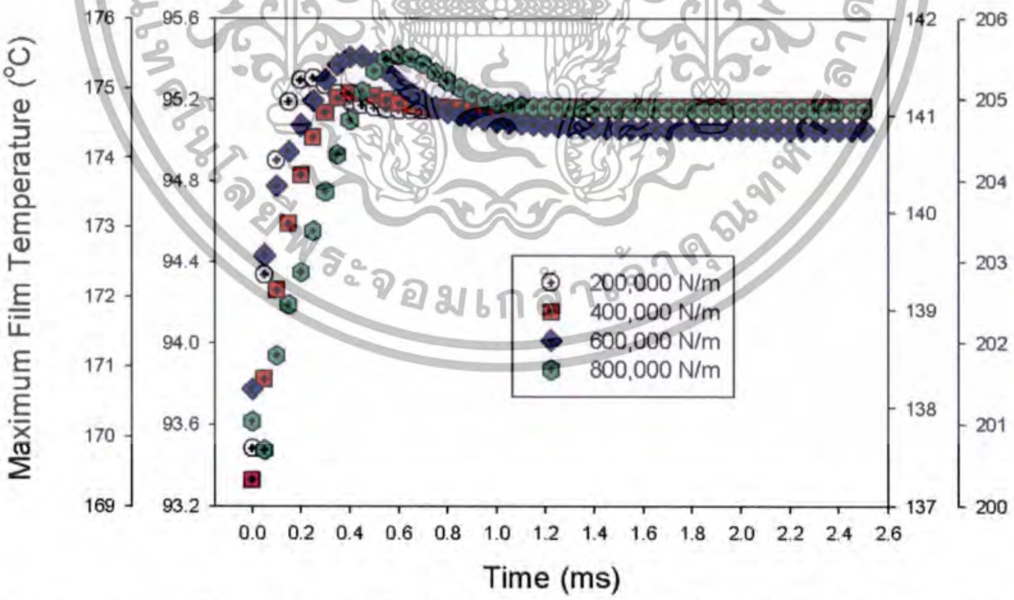


รูปที่ 4.124 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.125 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

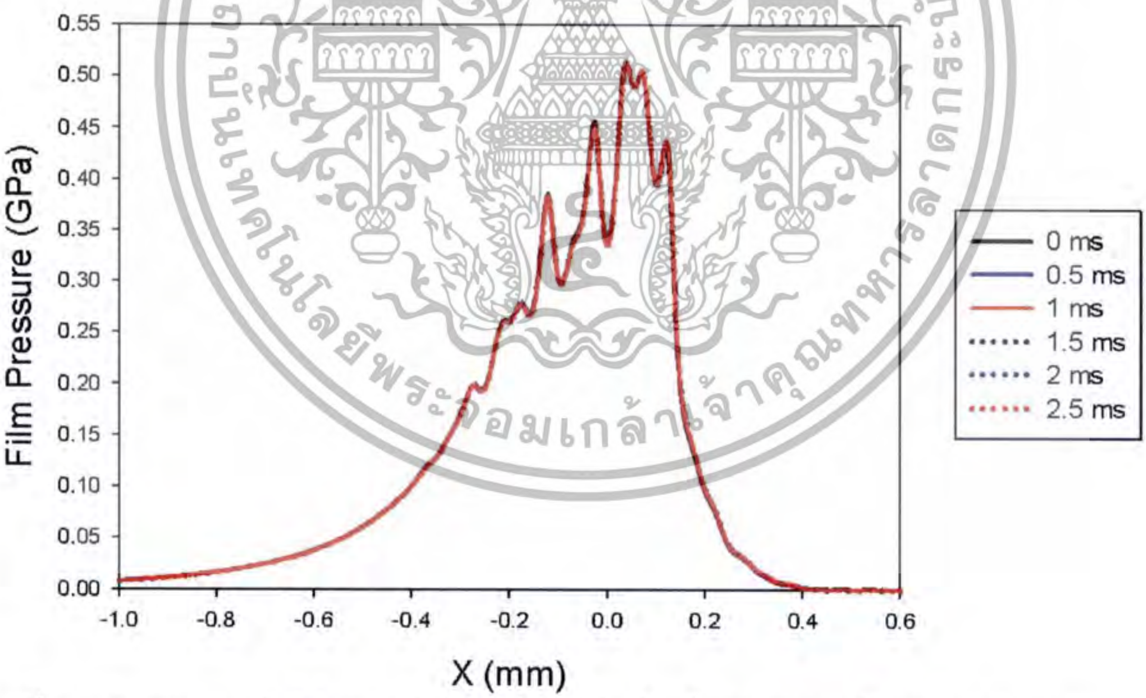


รูปที่ 4.126 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m, 400 kN/m, 600 kN/m และ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร (ขยายแกนแนวตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

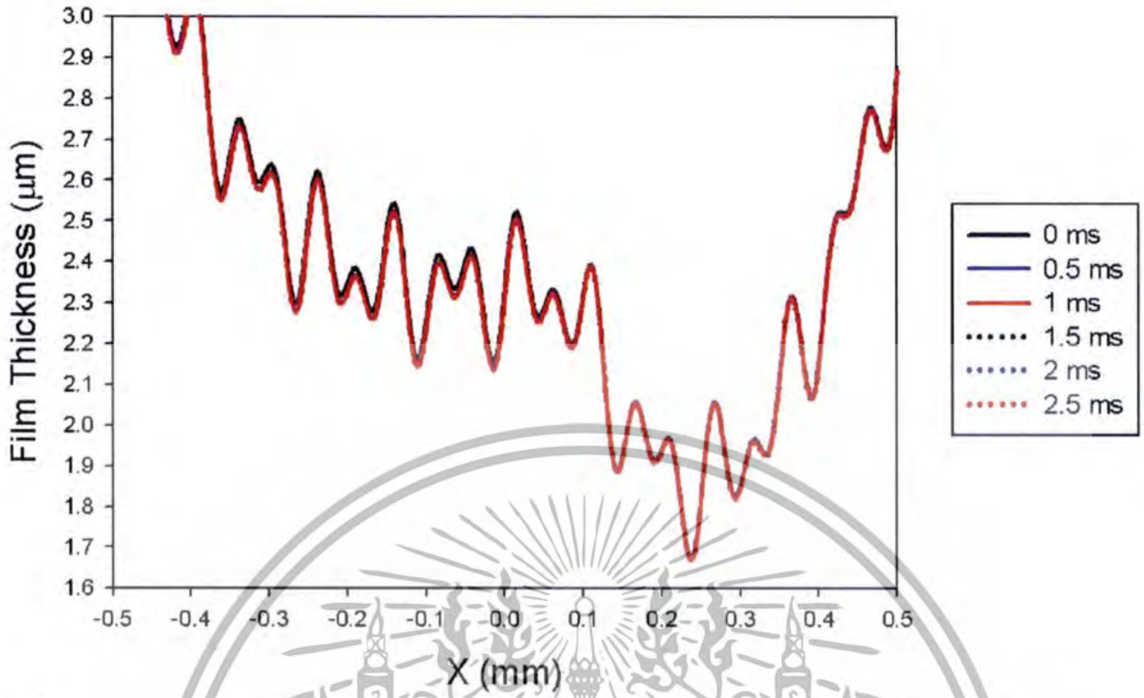
4.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัวเมื่อทรงกระบอกเป็นผิวหยาบ

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/ ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของ ทรงกระบอกเป็นผิวหยาบทั้งสองชิ้นงาน โดยมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.1 μm สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 2.0 % จากการจำลองผลดังรูปที่ 4.127 ถึงรูปที่ 4.129 ในกรณีสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและมีค่าต่ำกว่าที่เวลาเริ่มต้น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดและค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีการกวัดแกว่งตามความหยาบของผิวทรงกระบอก โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันในทุกๆ เวลา

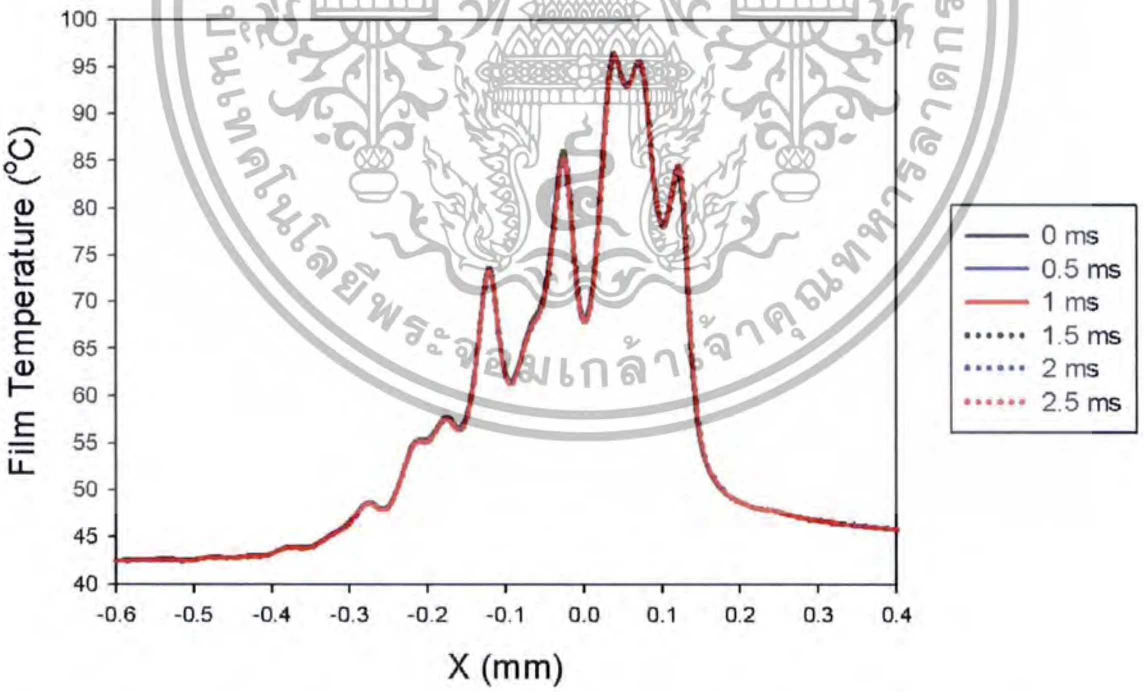


รูปที่ 4.127 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

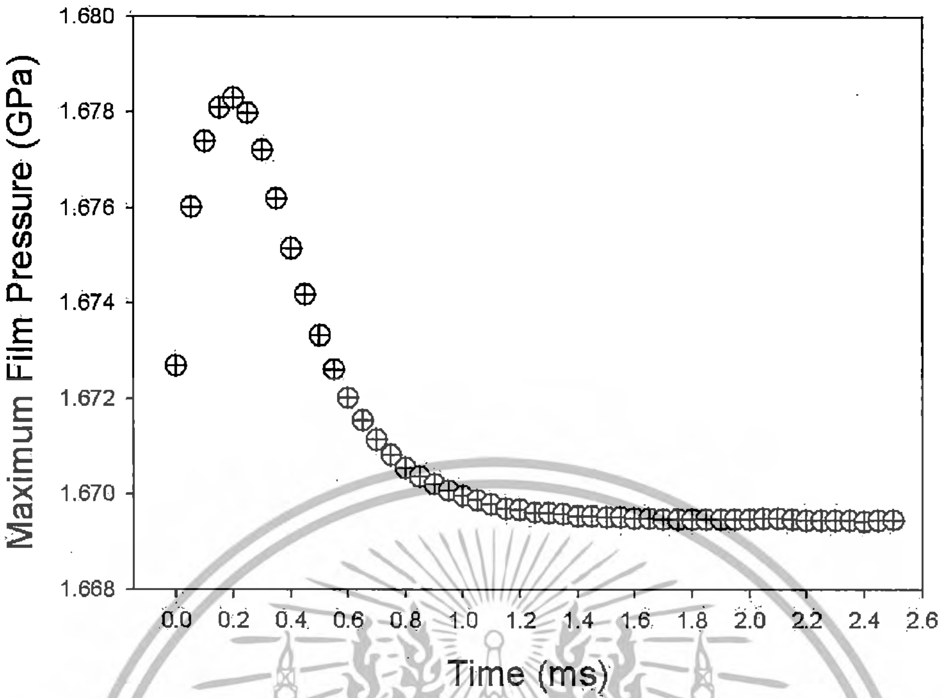


รูปที่ 4.128 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

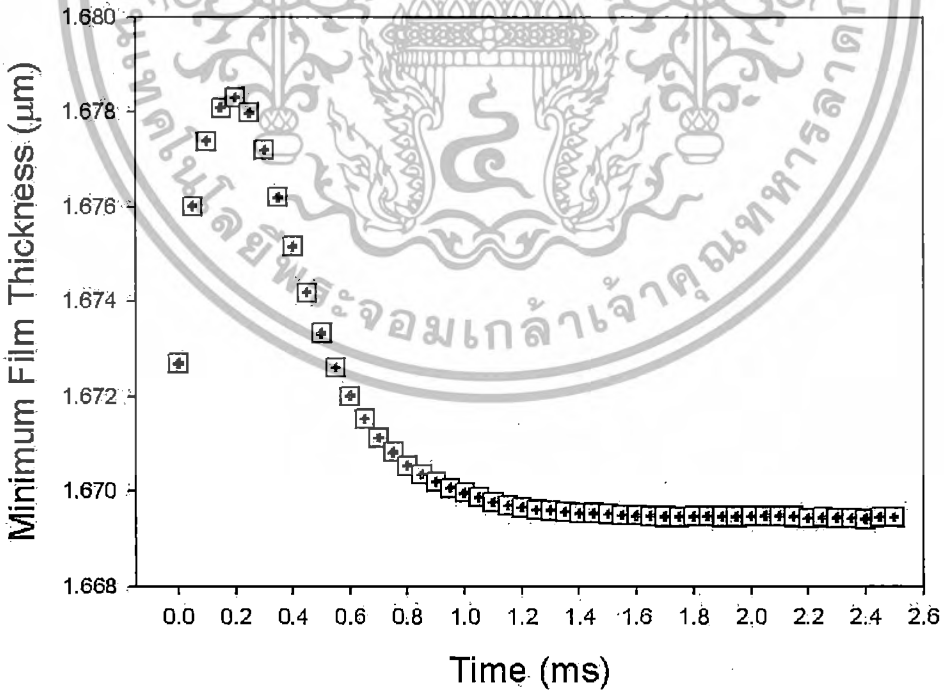


รูปที่ 4.129 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

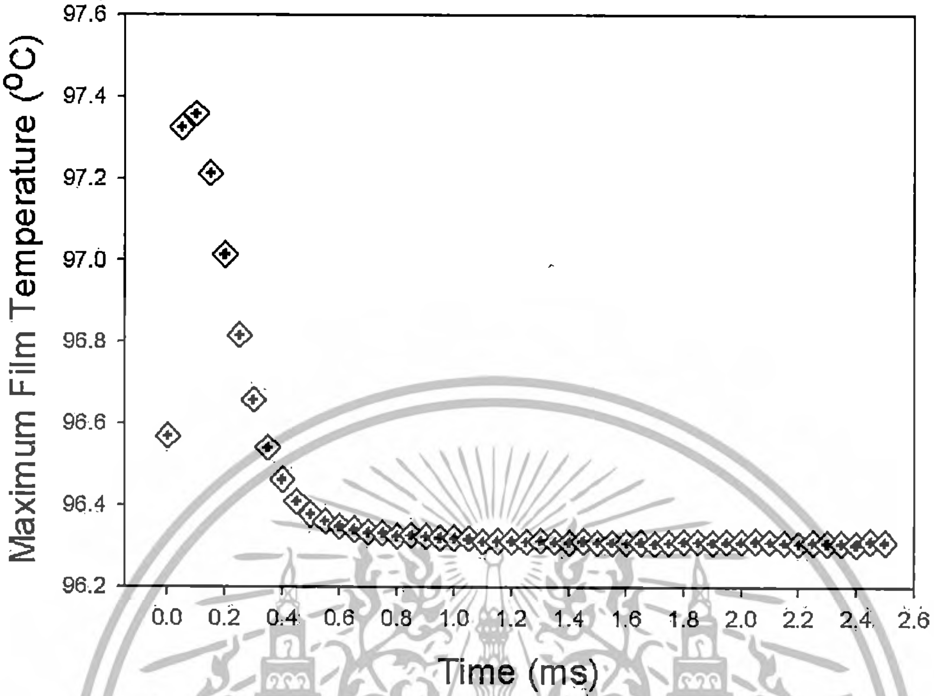


รูปที่ 4.130 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90



รูปที่ 4.131 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

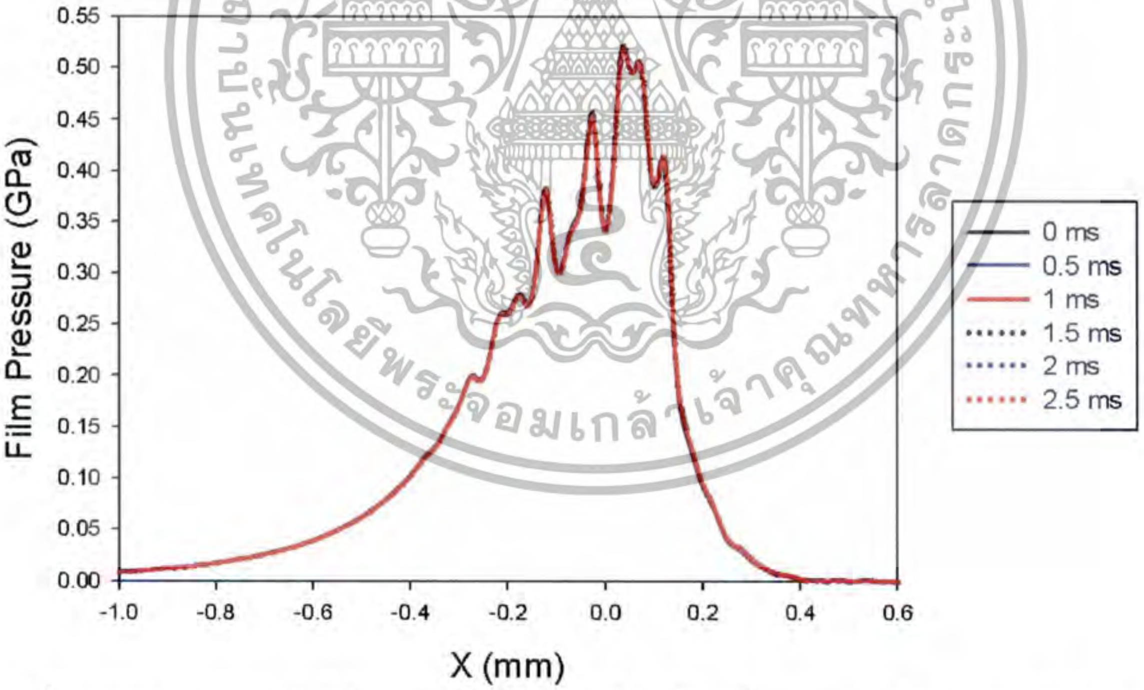


รูปที่ 4.132 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

จากการจำลองผลสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90ในช่วงเวลาเริ่มต้นถึงเวลา 2.50 ms พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.5141 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.10 ms เท่ากับ 0.5185 GPa และคงที่ที่เวลา 0.95 ms เท่ากับ 0.5125 GPa ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.6727 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.20 ms เท่ากับ 1.6783 μm และคงที่ที่เวลา 1.40 ms เท่ากับ 1.6695 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 96.5690 °C และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.10 ms เท่ากับ 97.3590 °C และคงที่ที่เวลา 1.00 ms เท่ากับ 96.3197 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.130 ถึงรูปที่ 4.132

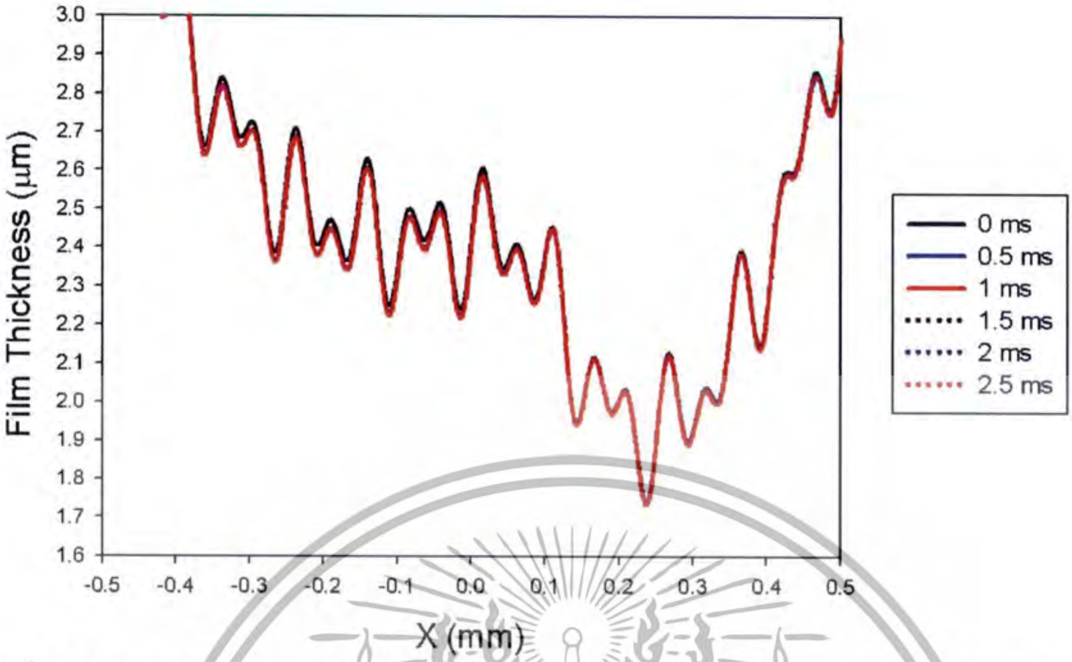
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลดังรูปที่ 4.133 ถึงรูปที่ 4.138 ในกรณีสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 โดยความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและมีค่าต่ำกว่าที่เวลาเริ่มต้น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดและค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีการกวัดแกว่งตามความหยาบของผิวทรงกระบอก โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันในทุกๆ เวลา ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.10 ms เท่ากับ 0.5261 GPa และคงที่ที่เวลา 1.00 ms เท่ากับ 0.5197 GPa ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.7421 μm และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.10 ms เท่ากับ 1.7464 μm และคงที่ที่เวลา 1.50 ms เท่ากับ 1.7361 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 97.7206 °C และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 0.10 ms เท่ากับ 98.5131 °C และคงที่ที่เวลา 1.00 ms เท่ากับ 97.3985 °C

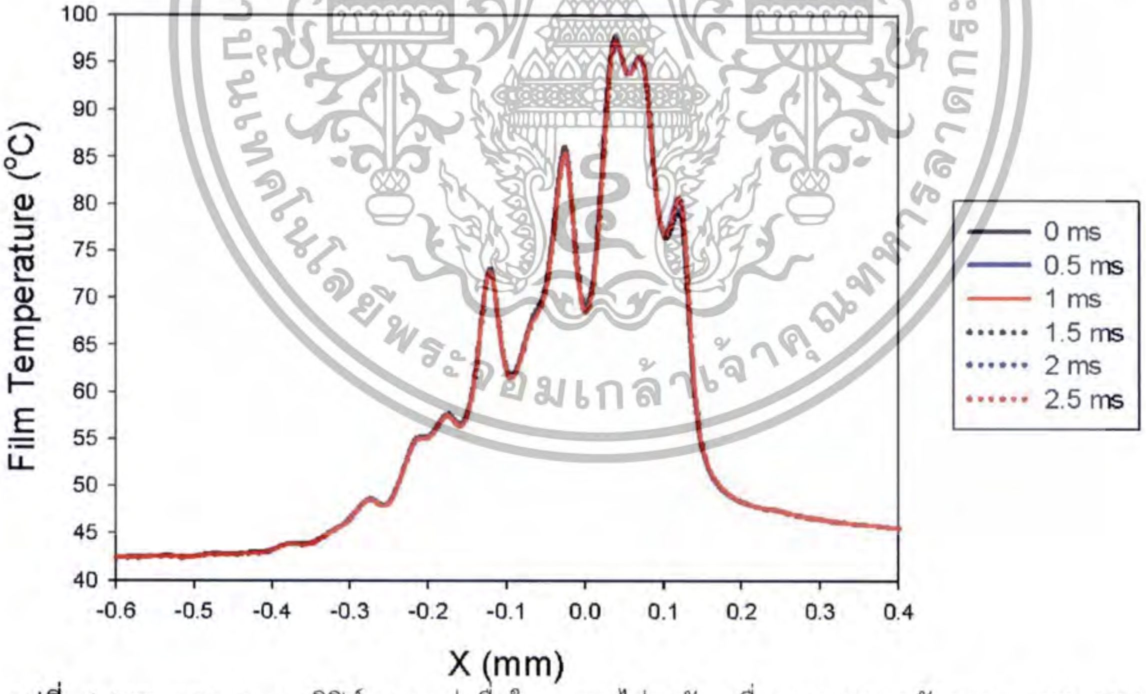


รูปที่ 4.133 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

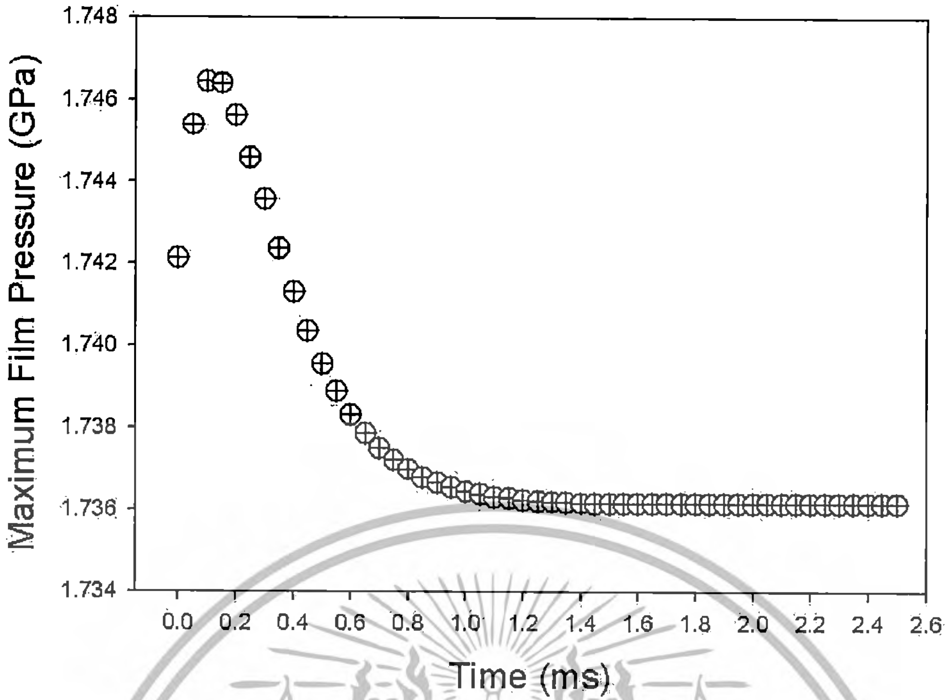


รูปที่ 4.134 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

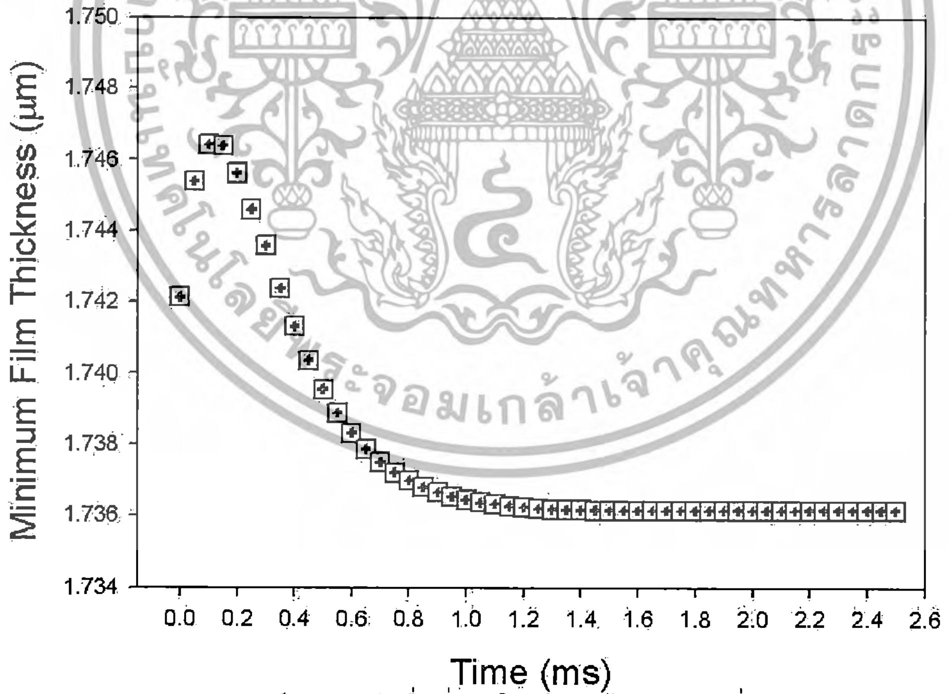


รูปที่ 4.135 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

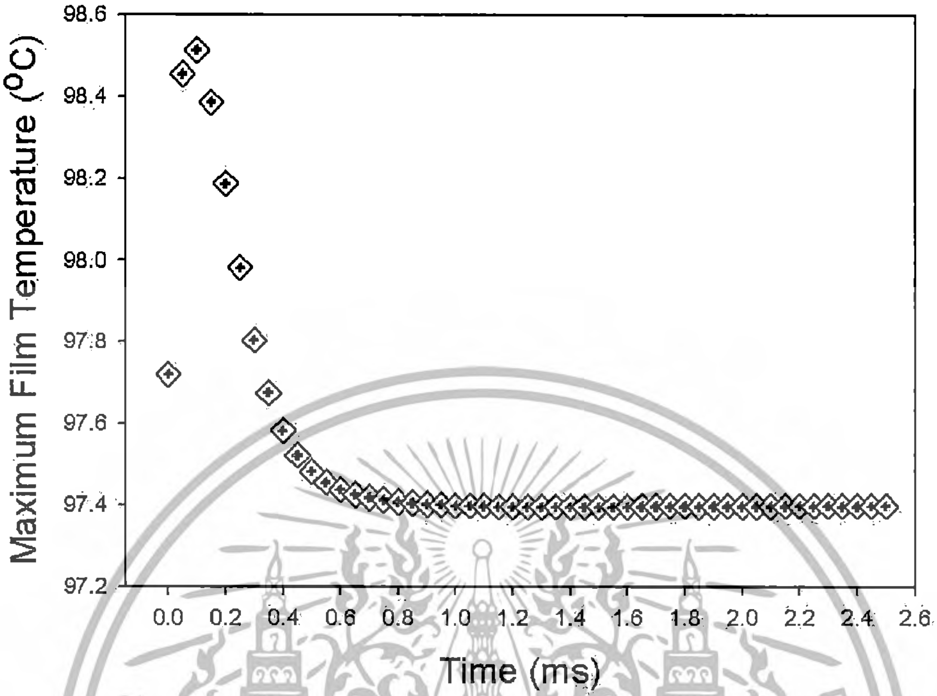


รูปที่ 4.136 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.137 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

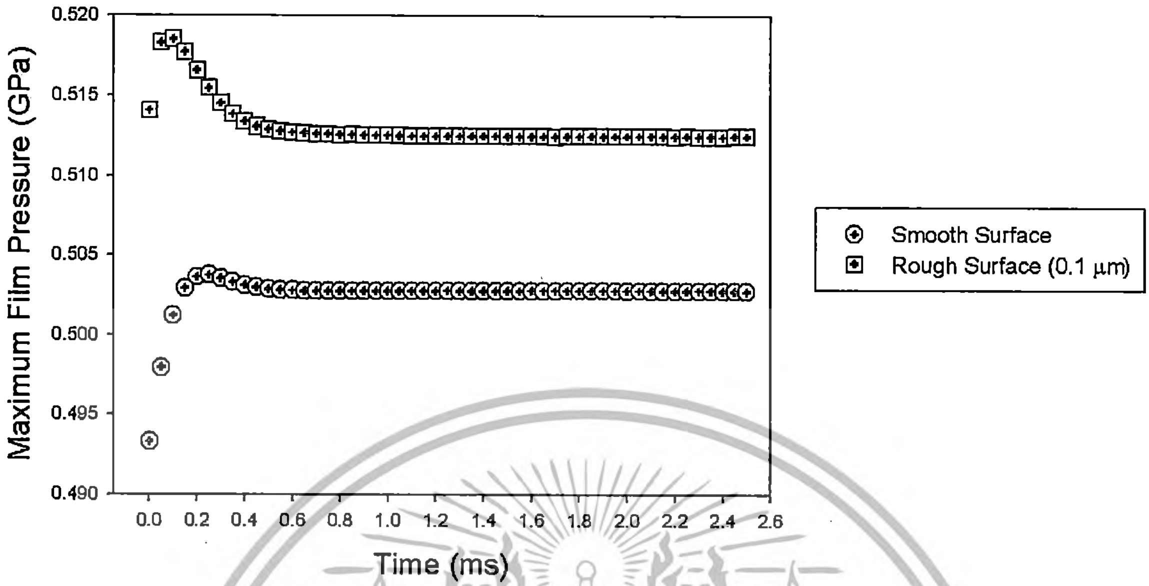
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



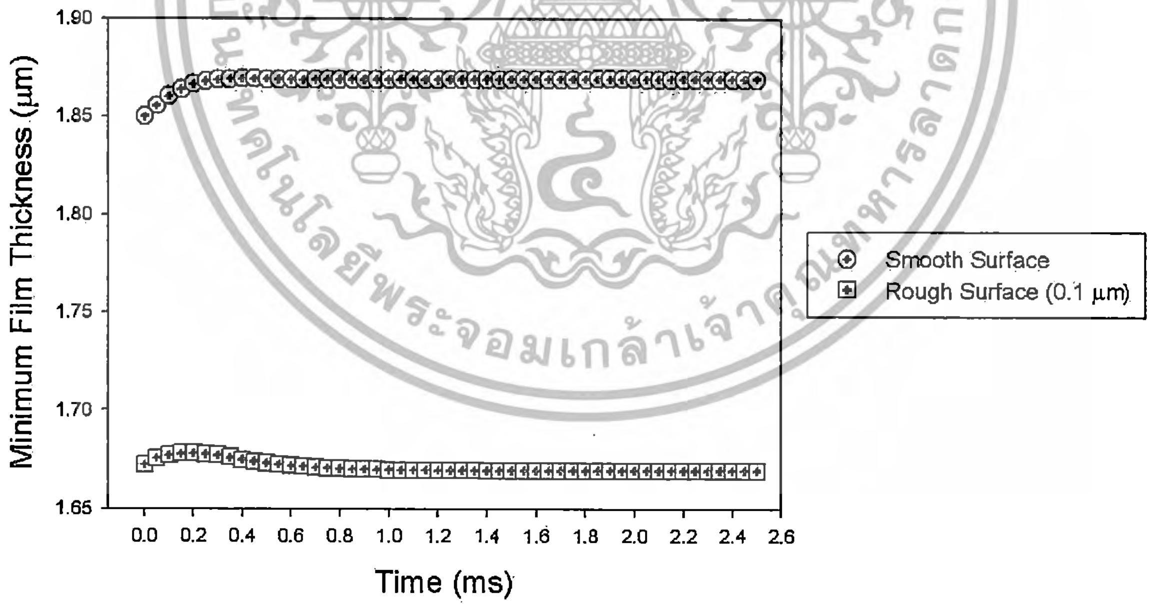
รูปที่ 4.138 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เมื่อทำการจำลองผลเปรียบเทียบระหว่างการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s มีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีผิวหยาบมีค่ามากกว่าในกรณีการหล่อลื่นแบบผิวเรียบ โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4933 GPa ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 0.5028 GPa และค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.5141 GPa ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 0.5125 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.139 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวเรียบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.8499 μm ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 1.8690 μm และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวหยาบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.6727 μm ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 1.6694 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.140 และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 93.5320 °C ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 95.1492 °C และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 96.5690 °C ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 96.3096 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

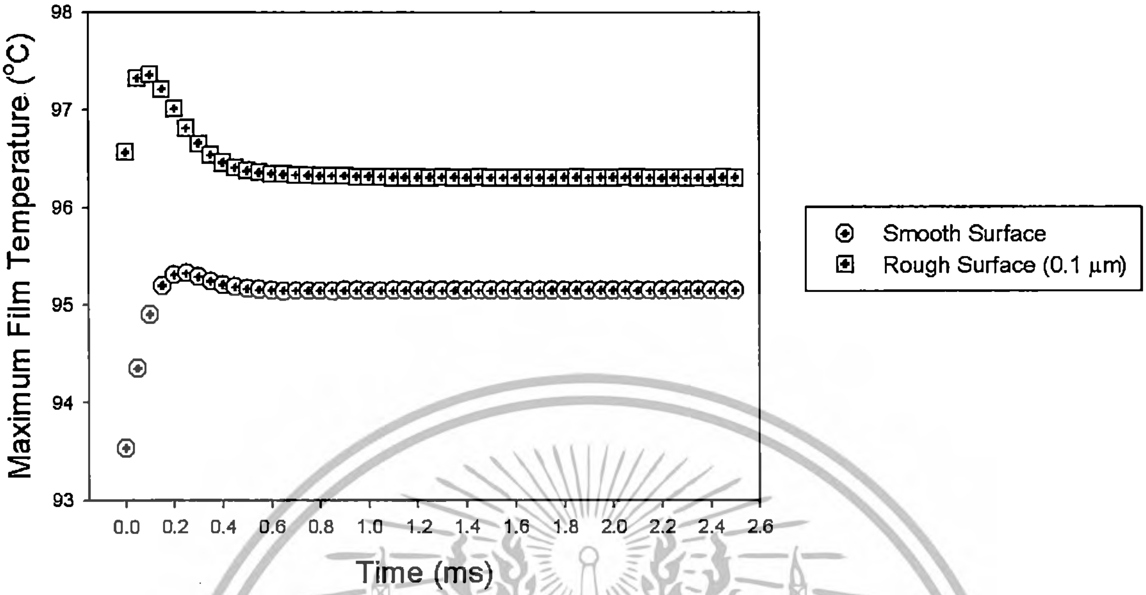


รูปที่ 4.139 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm



รูปที่ 4.140 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

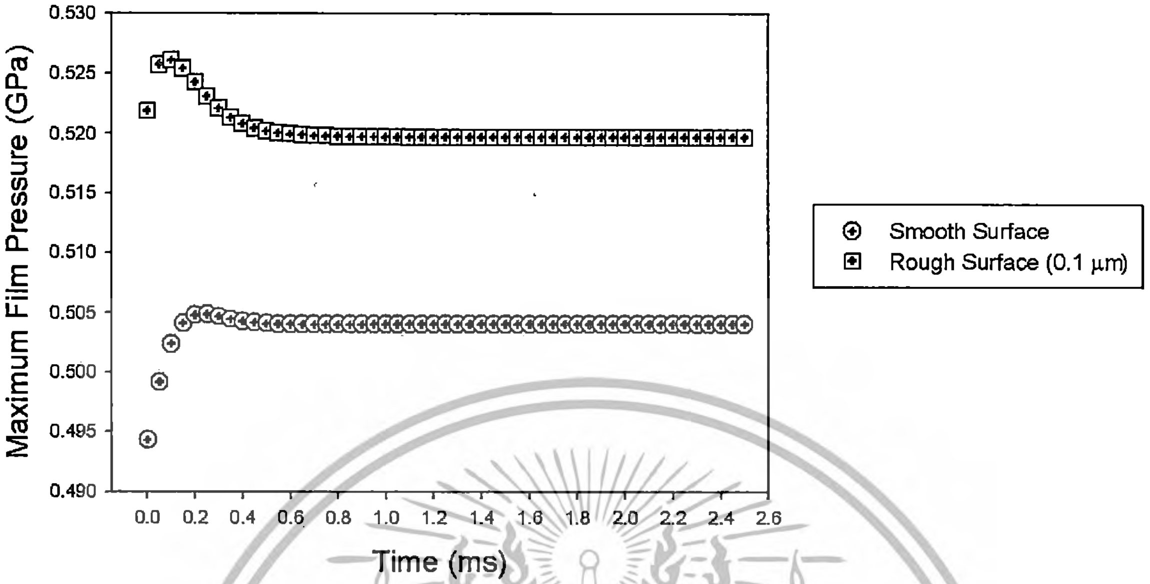
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



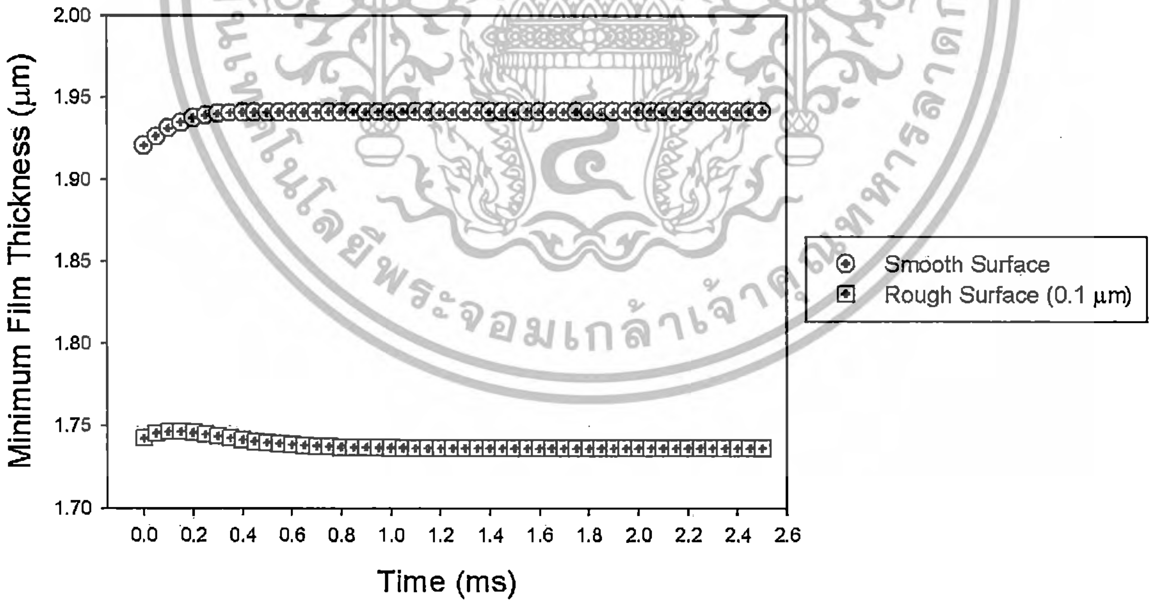
รูปที่ 4.141 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

รูปที่ 4.142 ถึงรูปที่ 4.144 แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s มีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีผิวหยาบมีค่ามากกว่าในกรณีการหล่อลื่นแบบผิวเรียบ โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4943 GPa ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 0.5041 GPa และค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 0.5197 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.142 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวเรียบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.9208 μm ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 1.9416 μm และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวหยาบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.7421 μm ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 1.7361 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.143 และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 93.4832 $^{\circ}C$ ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 95.1545 $^{\circ}C$ และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 97.7206 $^{\circ}C$ ที่เวลา 2.50 ms เท่ากับ 97.3974 $^{\circ}C$ ดังแสดงในรูปที่ 4.144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

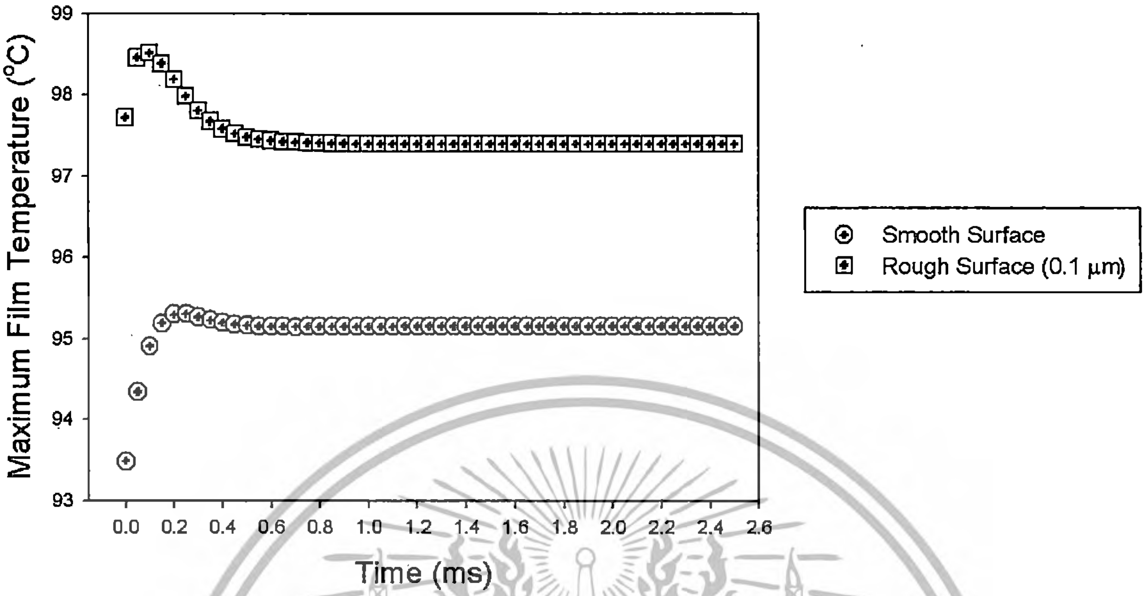


รูปที่ 4.142 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm



รูปที่ 4.143 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

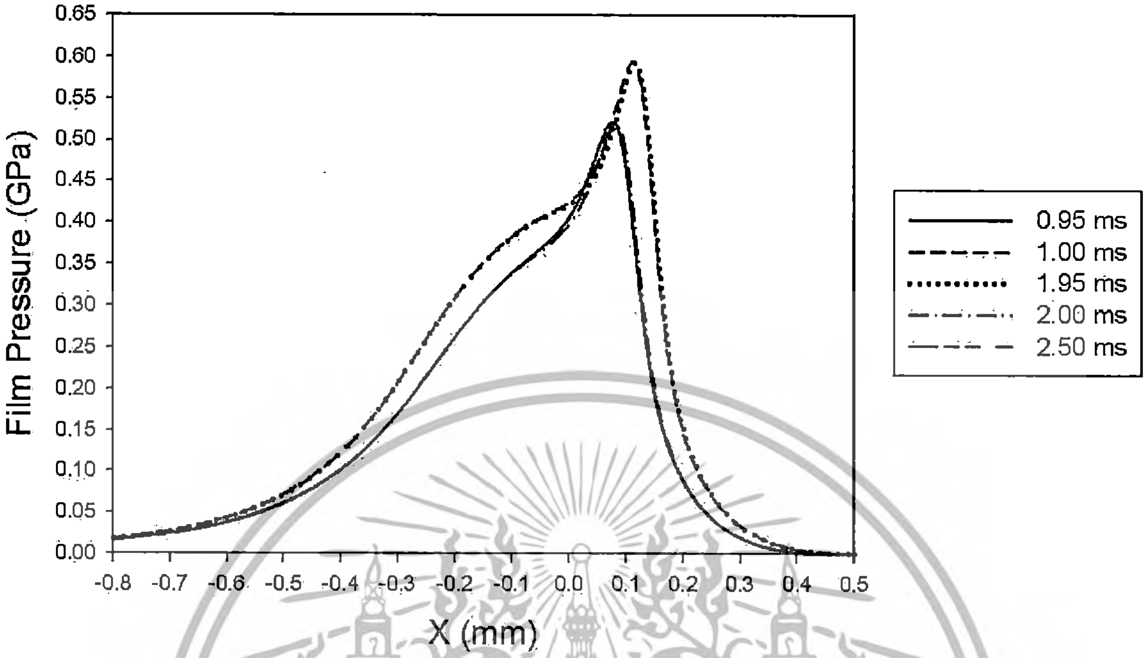


รูปที่ 4.144 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

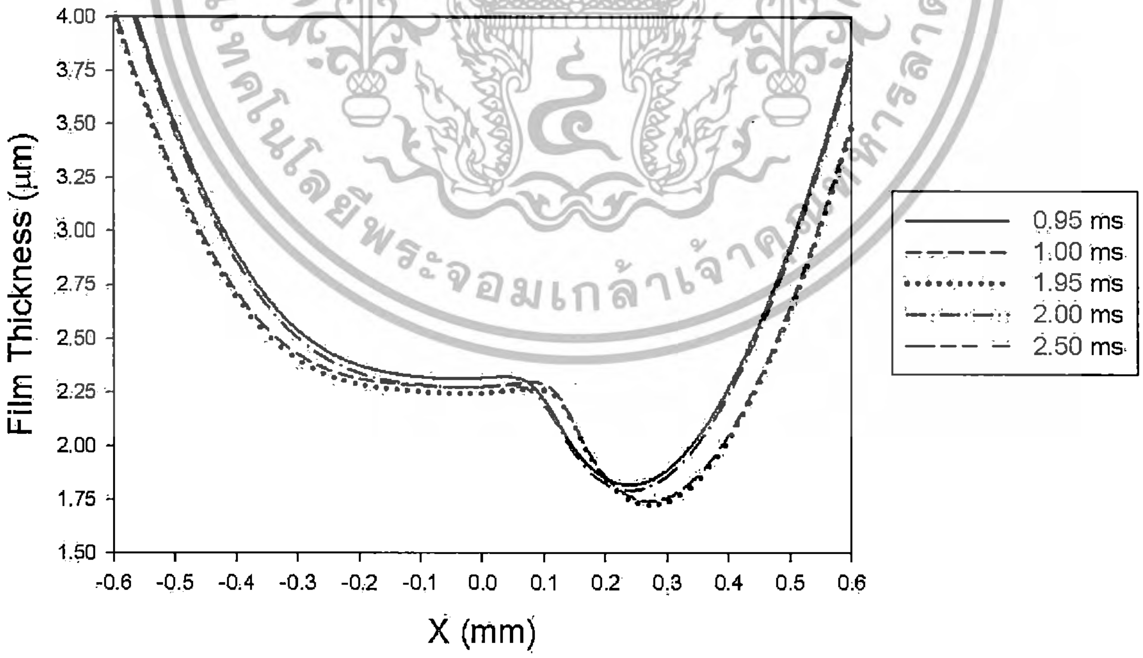
4.6 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัวเมื่อทรงกระบอกรับภาระแบบไม่คงที่

ทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบ สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 1.0 % และ 2.0 % ดังแสดงในรูปที่ 4.145 ถึง รูปที่ 4.159 และทำการจำลองผลการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วผิวเฉลี่ยของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio 0.75 ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบ= 0.1 μm สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่า 1.0 % และ 2.0 % ดังแสดงในรูปที่ 4.160 ถึง รูปที่ 4.174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

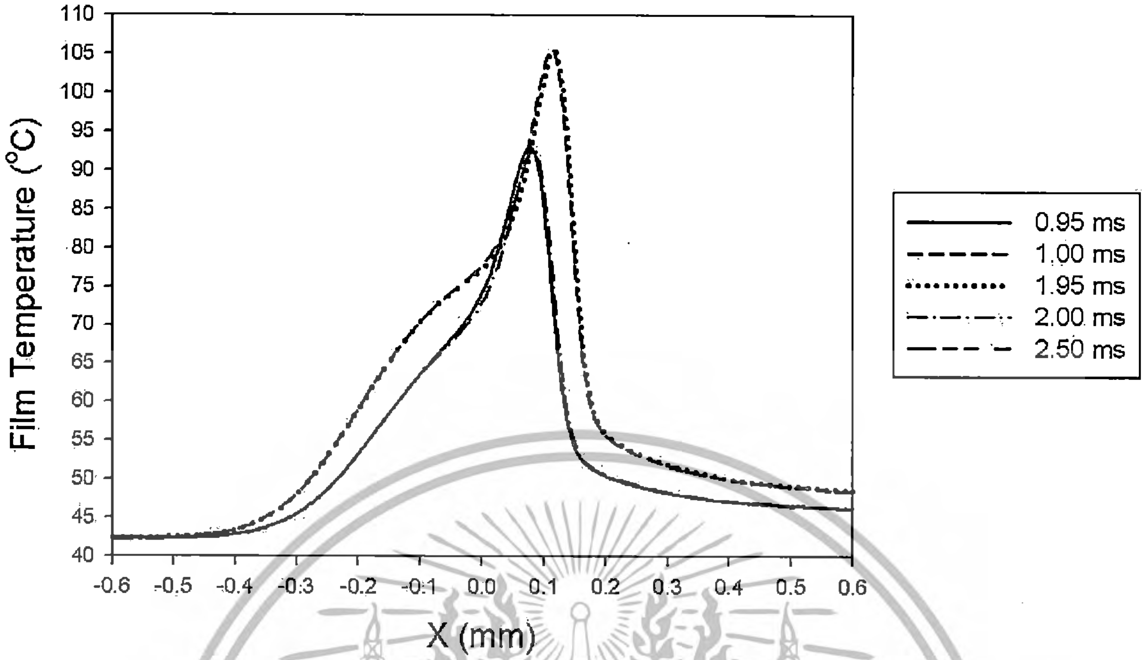


รูปที่ 4.145 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

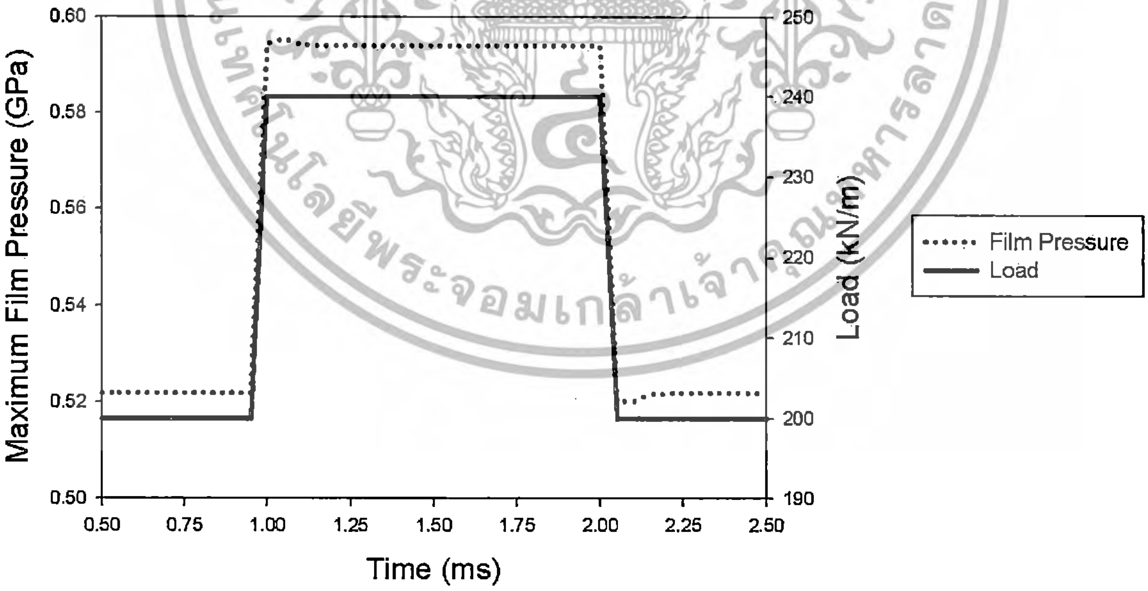


รูปที่ 4.146 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

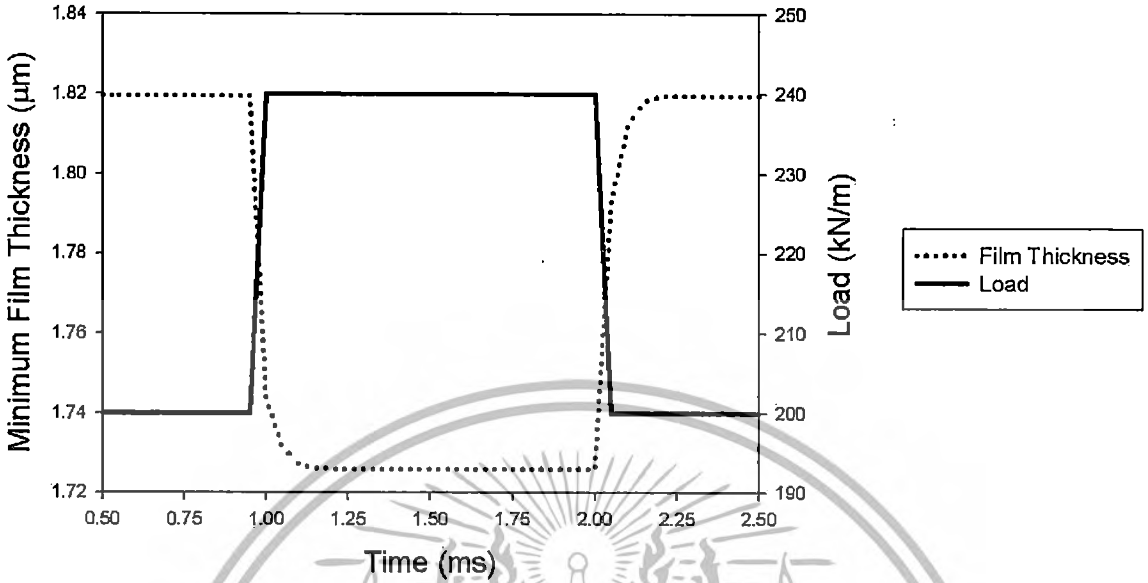


รูปที่ 4.147 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

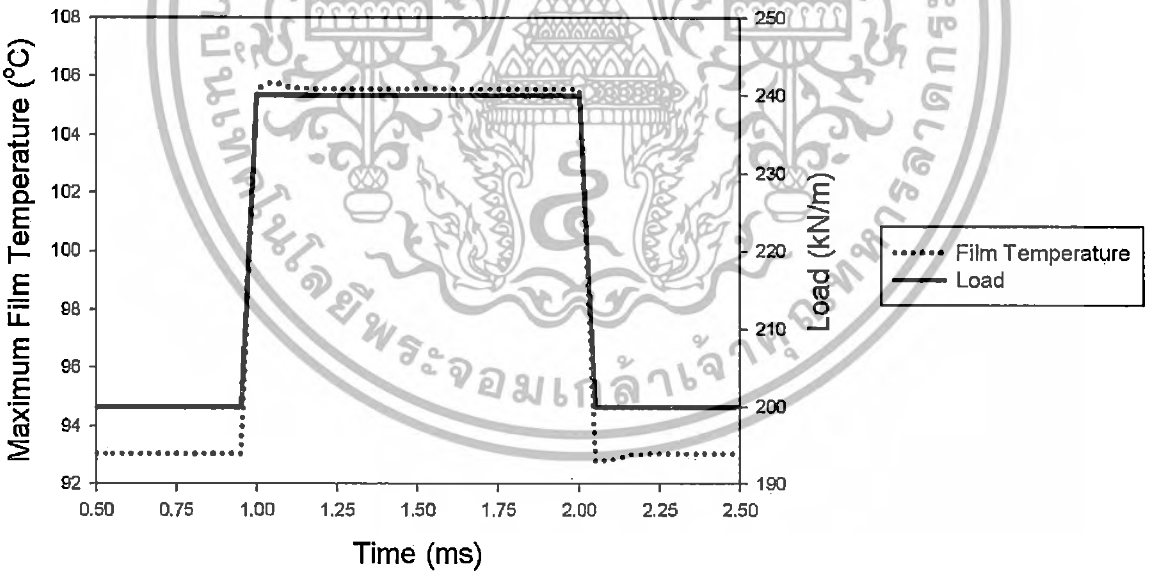


รูปที่ 4.148 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



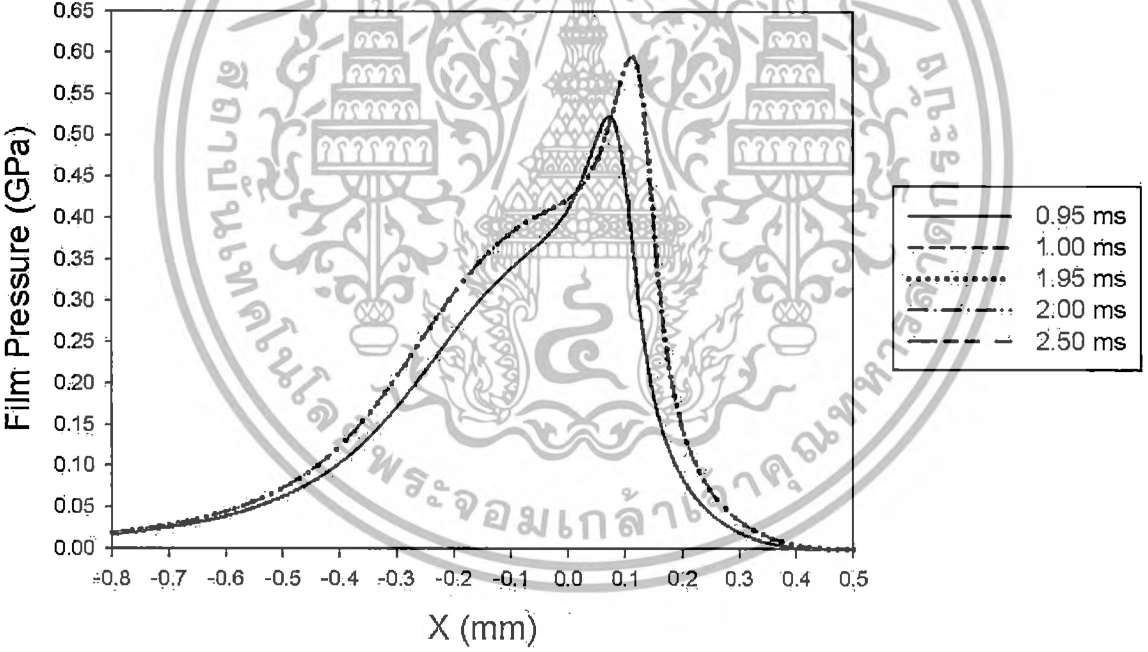
รูปที่ 4.149 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90



รูปที่ 4.150 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

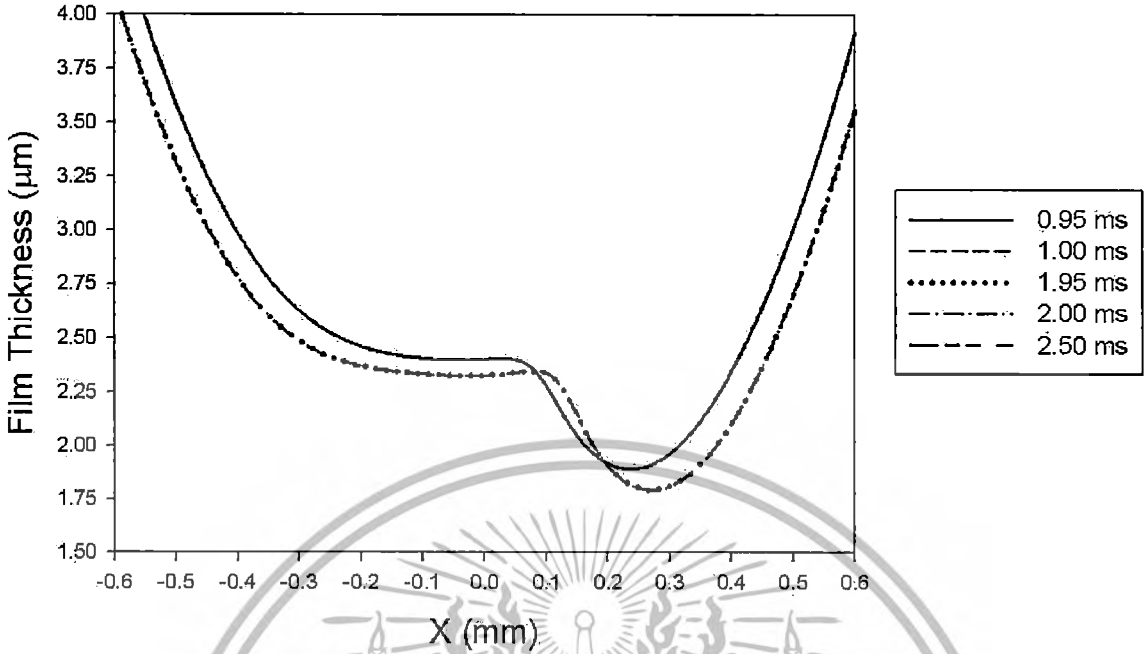
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลในกรณีสารหล่อลื่น SAE-90 ดังแสดงในรูปที่ 4.145 ถึง 4.150 พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น ส่วนค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0762 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8197 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2364 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 93.0604 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.0788 mm. ที่ภาระ 240 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5943 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1103 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.7440 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2653 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 105.5518 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.1103 mm. โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

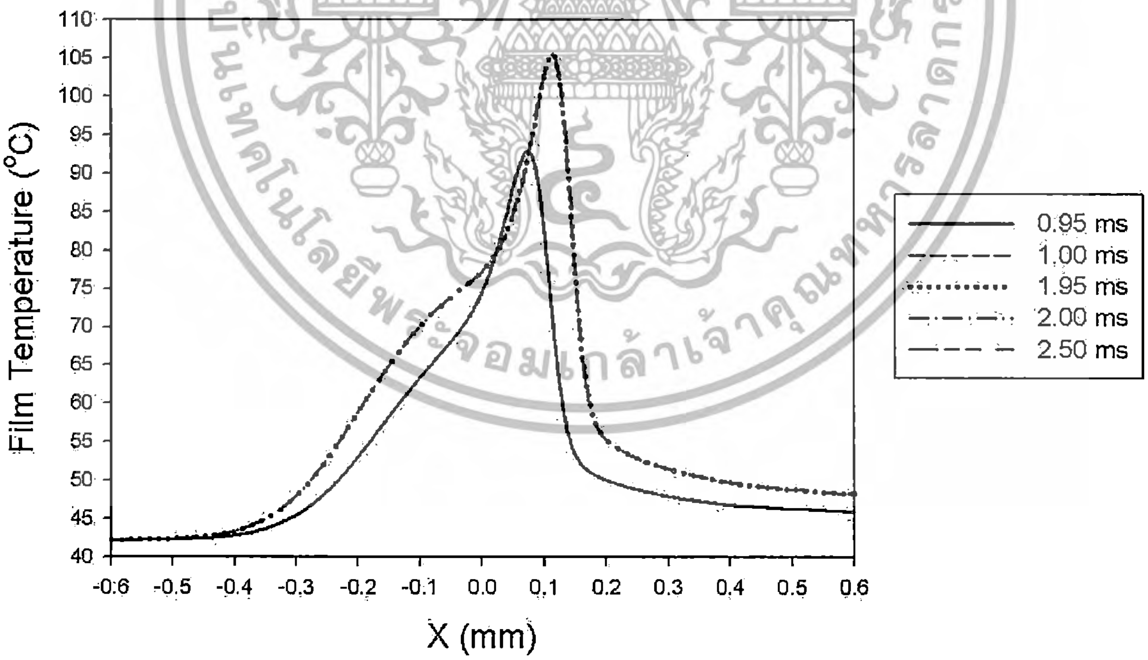


รูปที่ 4.151 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

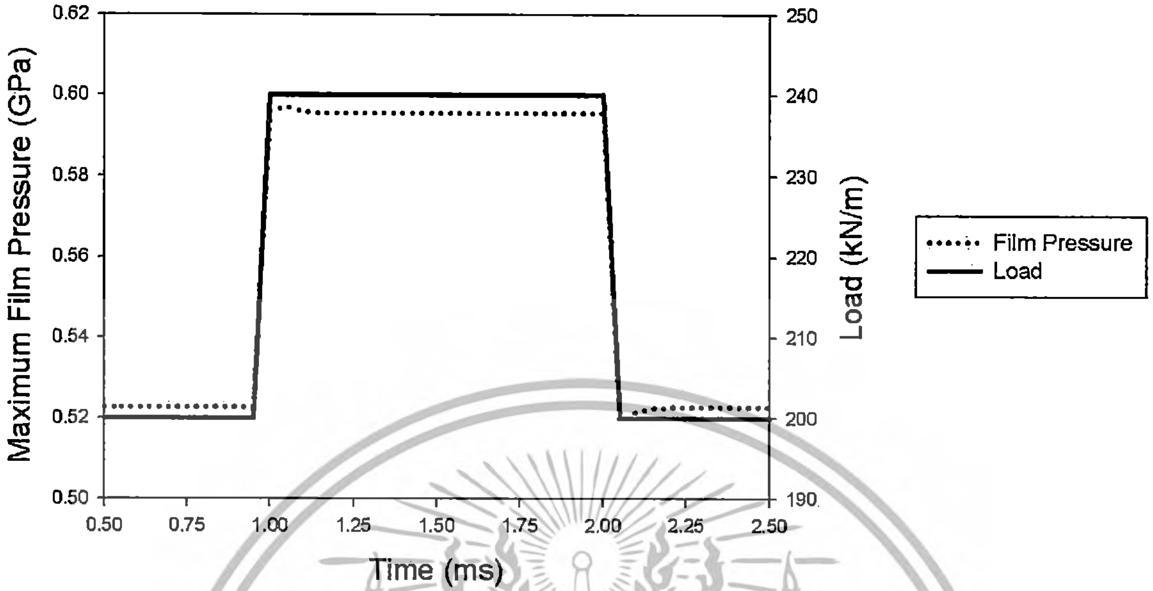


รูปที่ 4.152 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

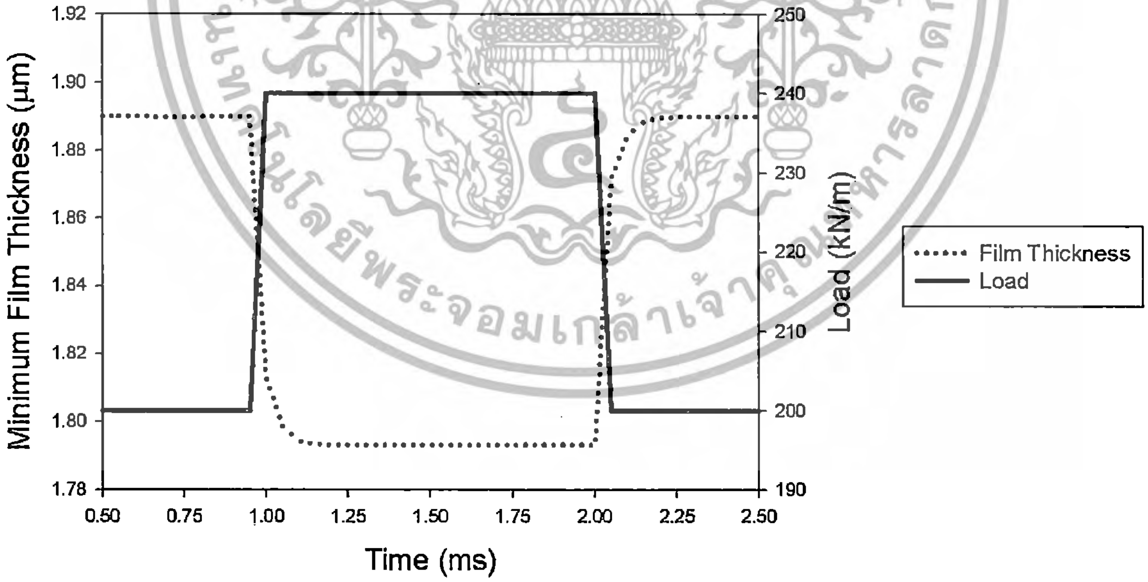


รูปที่ 4.153 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

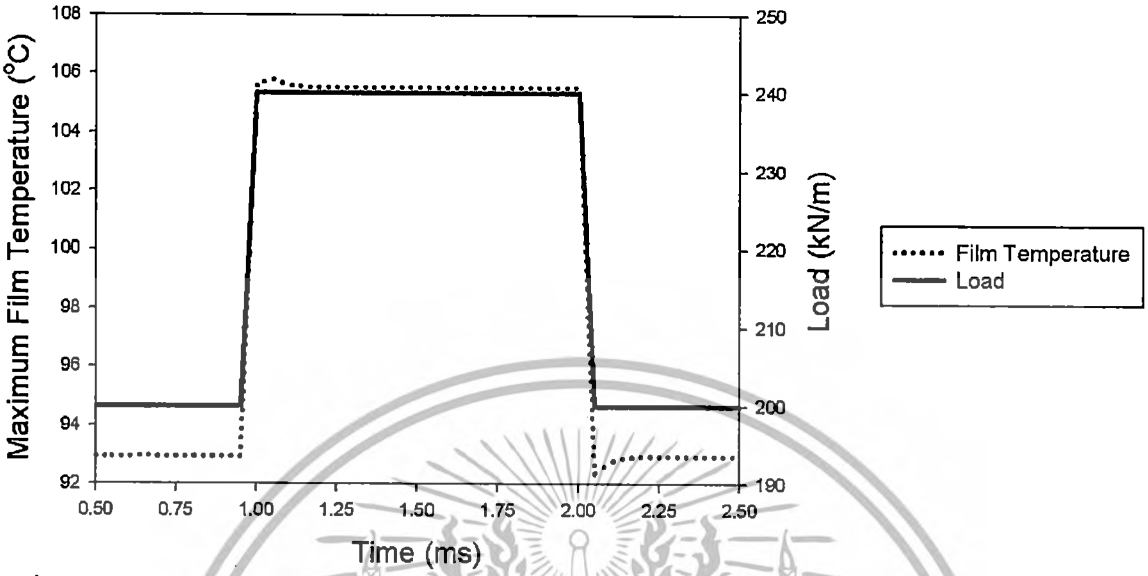


รูปที่ 4.154 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.155 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

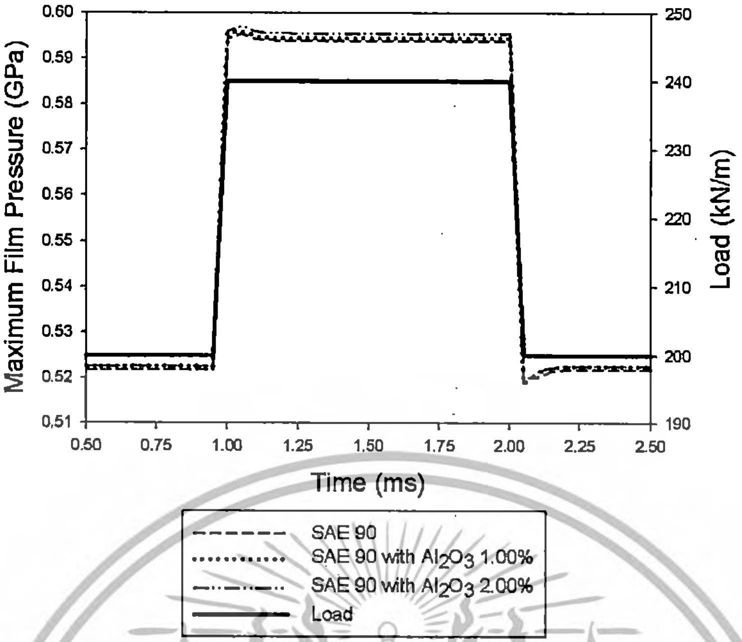
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



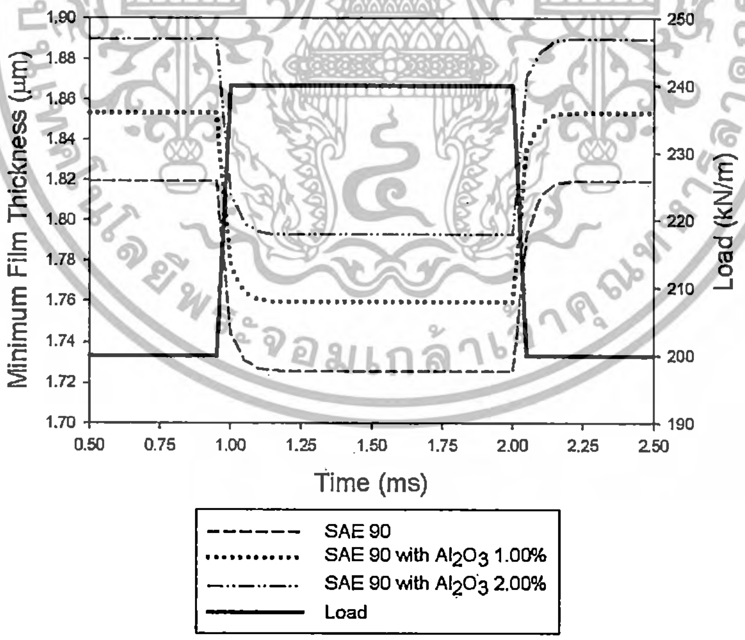
รูปที่ 4.156 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองผลในกรณีสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 4.151 ถึง 4.156 พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น ส่วนค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5226 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8898 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2364 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.9499 °C ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ที่ภาระ 240 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5955 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1103 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.7933 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2705 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 105.5320 °C ที่ตำแหน่ง + 0.1103 mm. โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

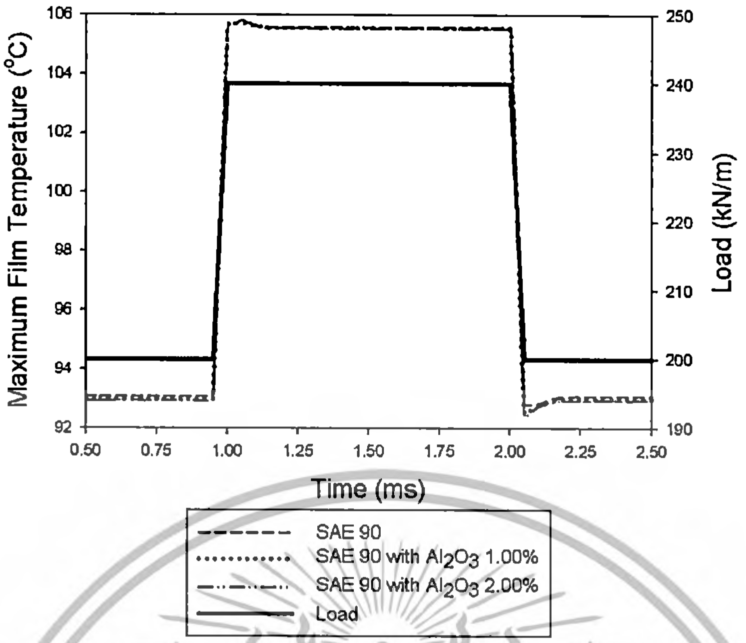


รูปที่ 4.157 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.158 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

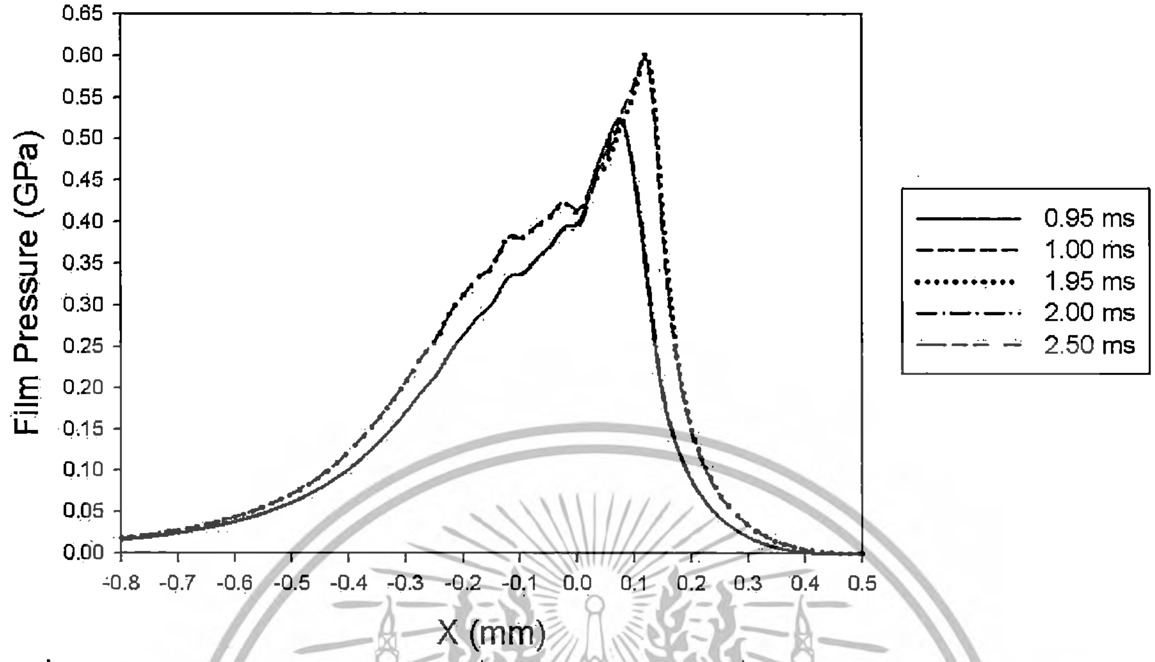
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



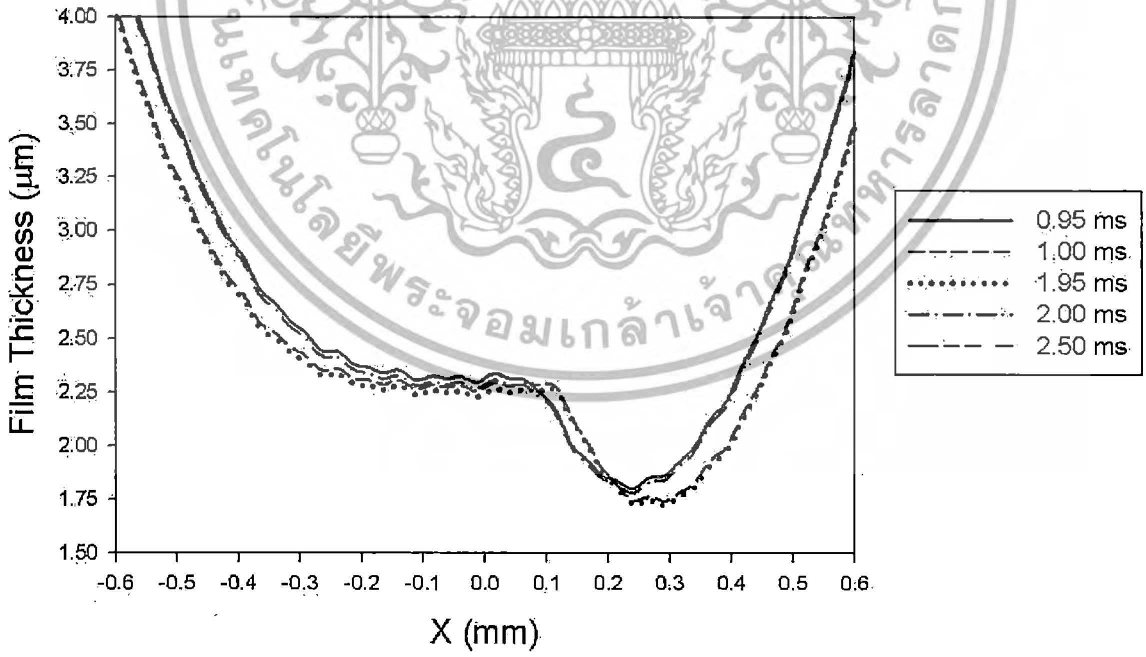
รูปที่ 4.159 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ของทรงกระบอกที่รับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 4.157 ถึงรูปที่ 4.159 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa 0.5225 GPa และ 0.5226 GPa และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5943 GPa 0.5956 GPa และ 0.59601 GPa ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5939 GPa 0.5944 GPa และ 0.5955 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8197 μm 1.8535 μm และ 1.8898 μm และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.7440 μm 1.7770 μm และ 1.8130 μm ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.7259 μm 1.7597μm และ 1.7933 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่าใกล้เคียงกับกรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 93.0604 °C 92.9958 °C และ 92.9499 °C และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 105.5518 °C 105.6756 °C และ 105.6426 °C ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 105.5688 °C 105.5464 °C และ 105.532 °C เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

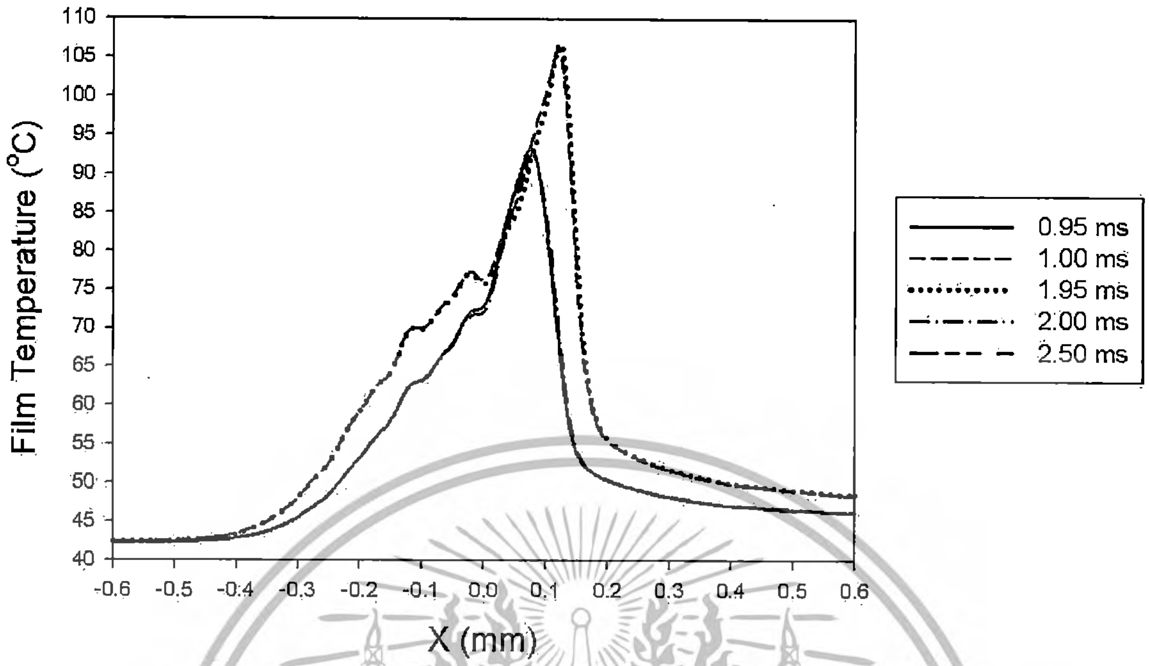


รูปที่ 4.160 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

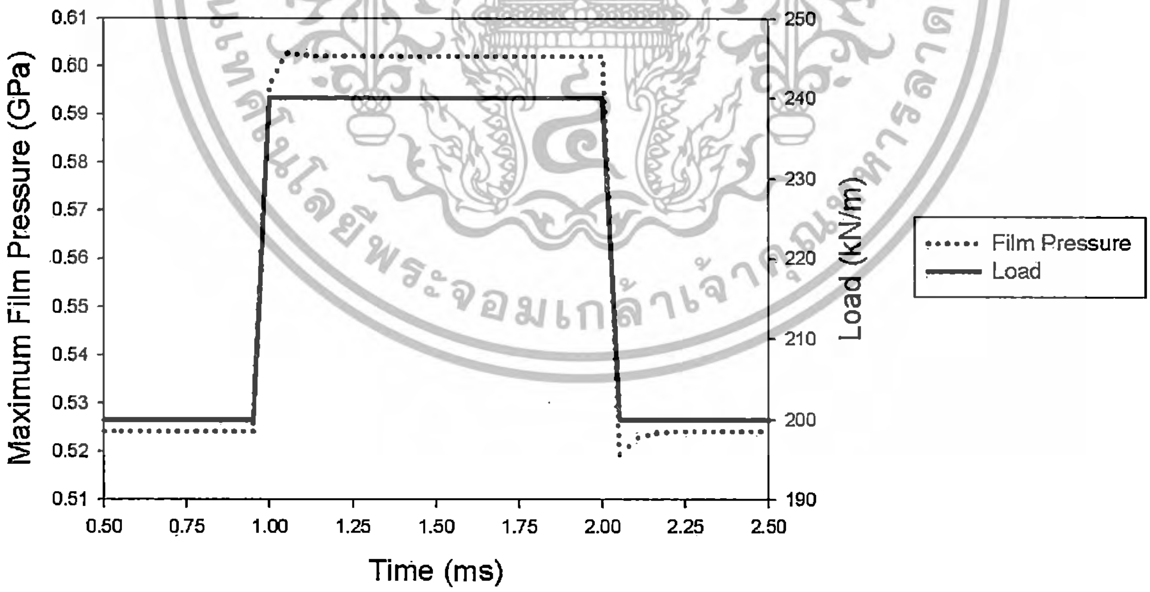


รูปที่ 4.161 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

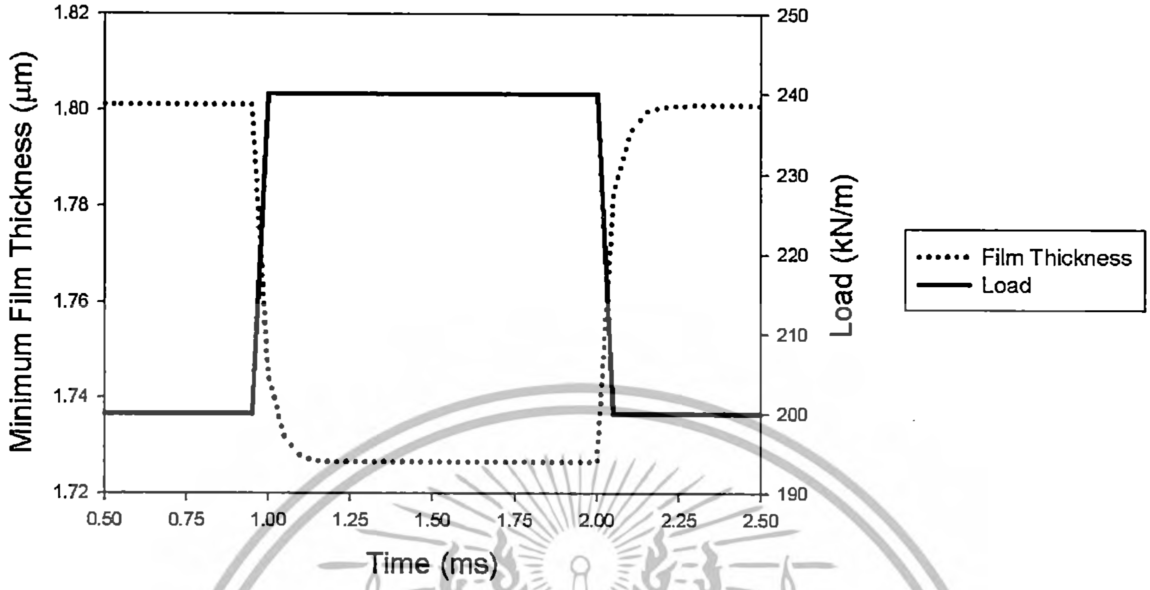


รูปที่ 4.162 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

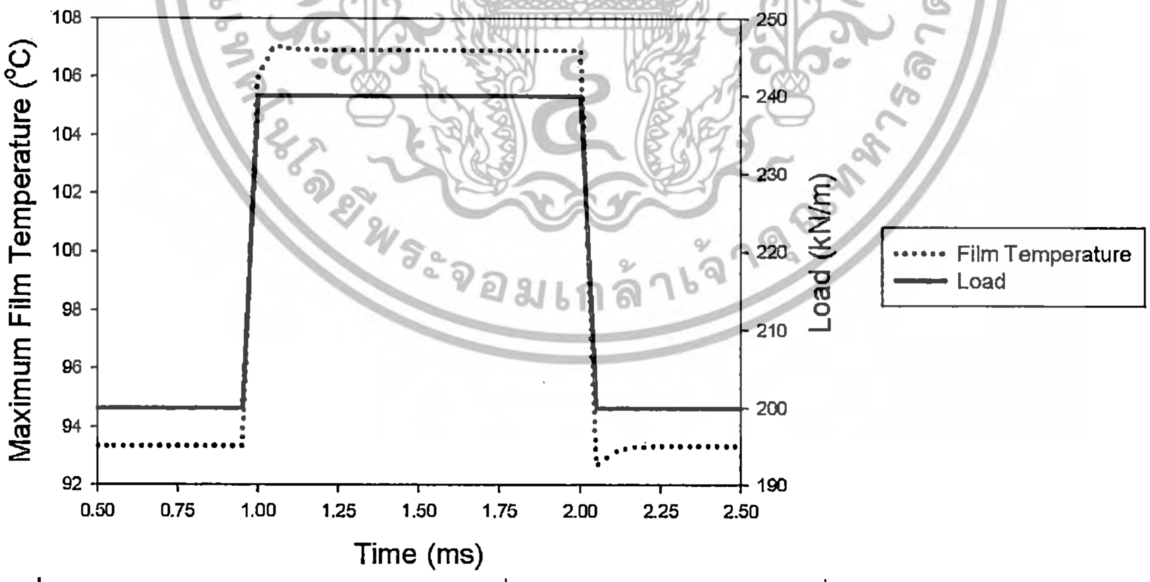


รูปที่ 4.163 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



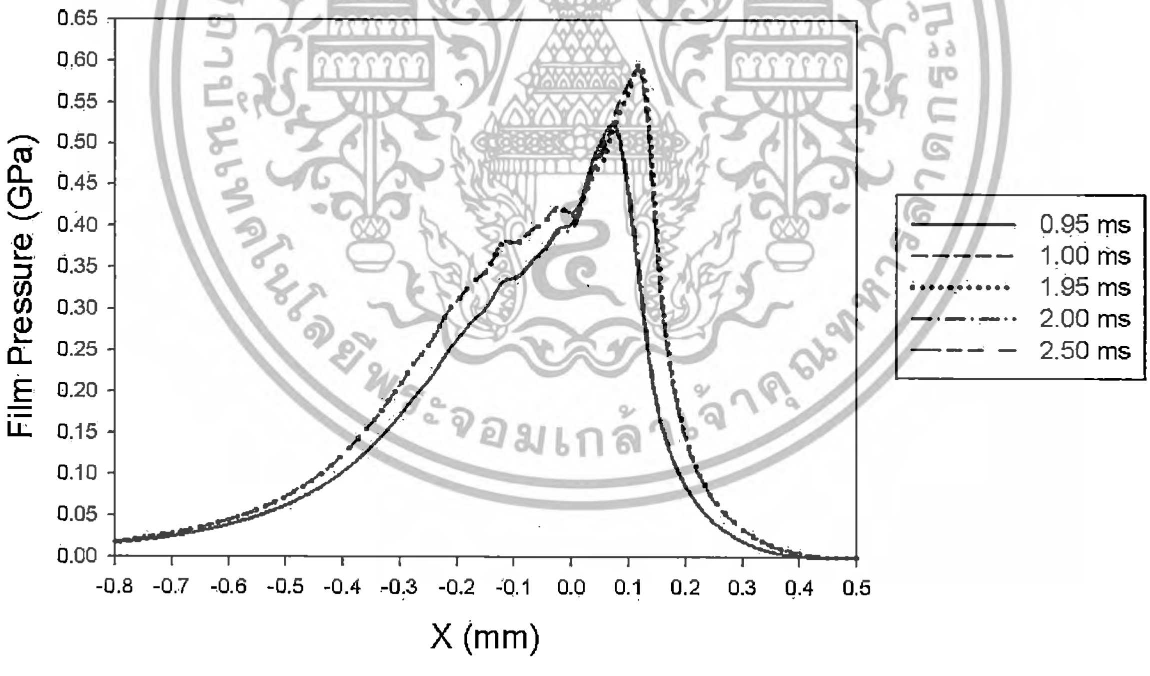
รูปที่ 4.164 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90



รูปที่ 4.165 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

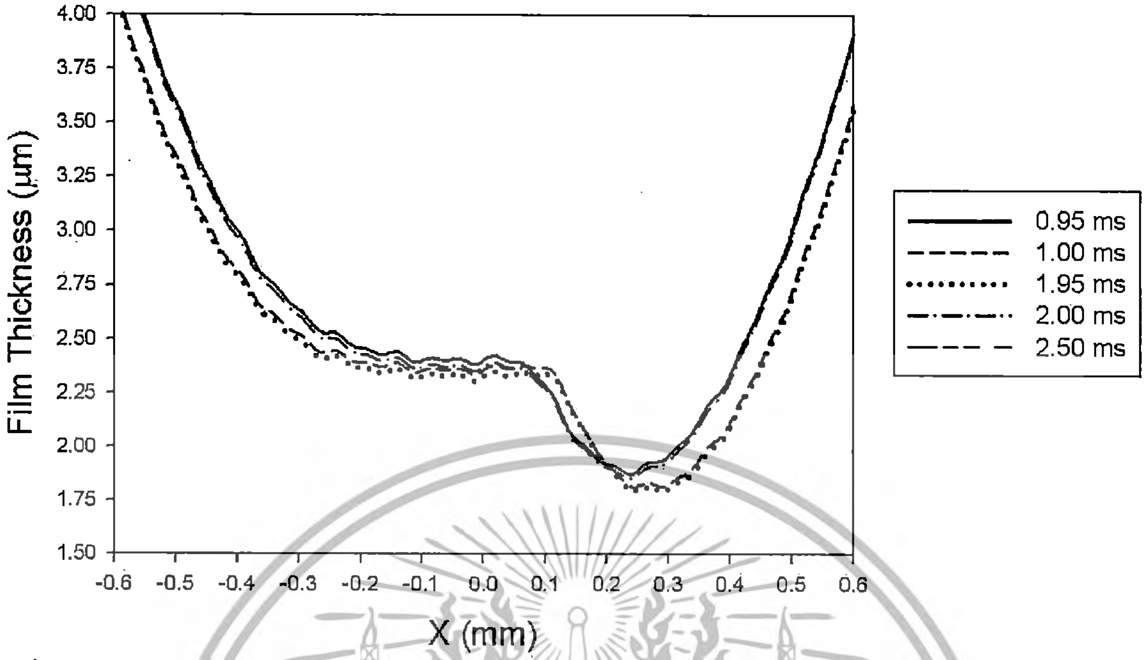
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลในกรณีสารหล่อลื่น SAE-90 และค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.160 ถึง 4.165 พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น ส่วนค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5241 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8011 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2364 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 93.3506 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ที่ภาระ 240 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5961 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1182 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.7449 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2889 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 106.0013 $^{\circ}C$ ที่ตำแหน่ง + 0.1208 mm. โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

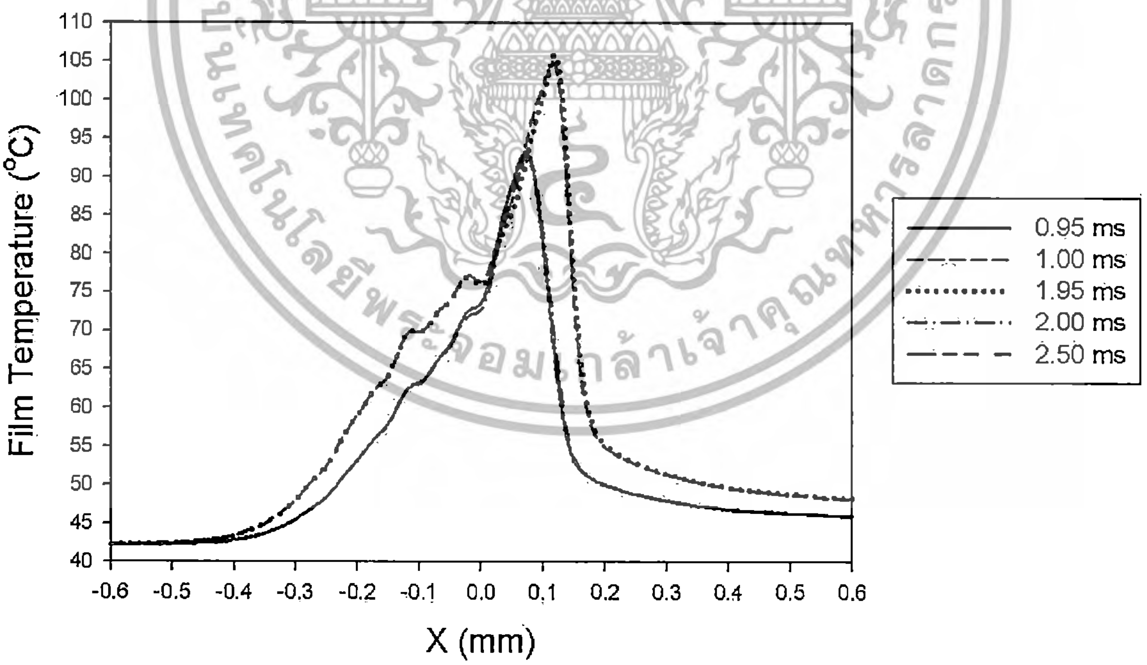


รูปที่ 4.166 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

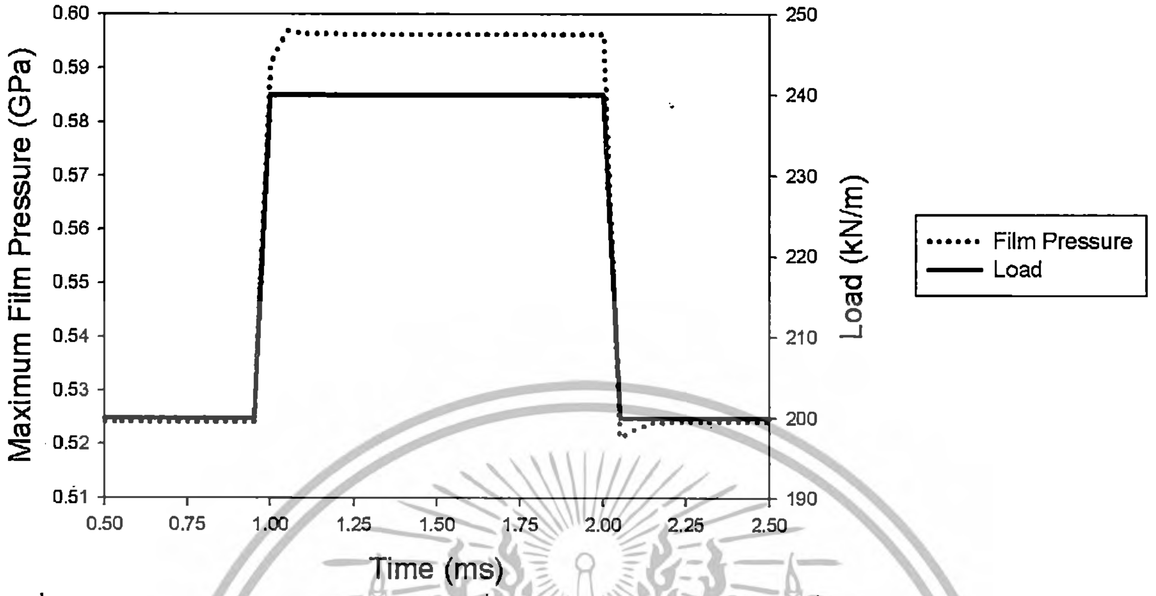


รูปที่ 4.167 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

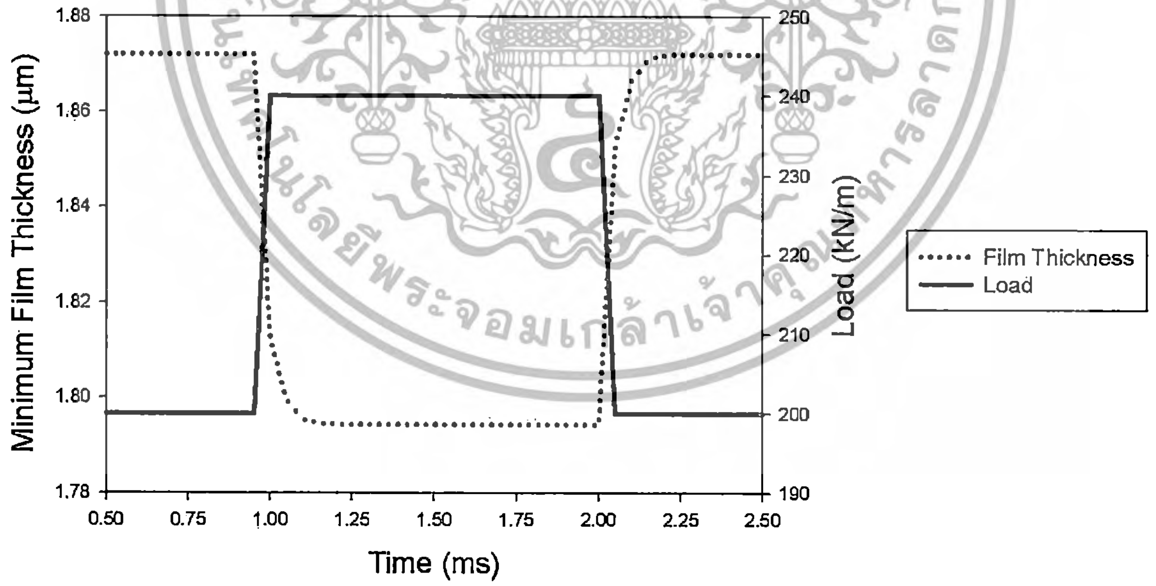


รูปที่ 4.168 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

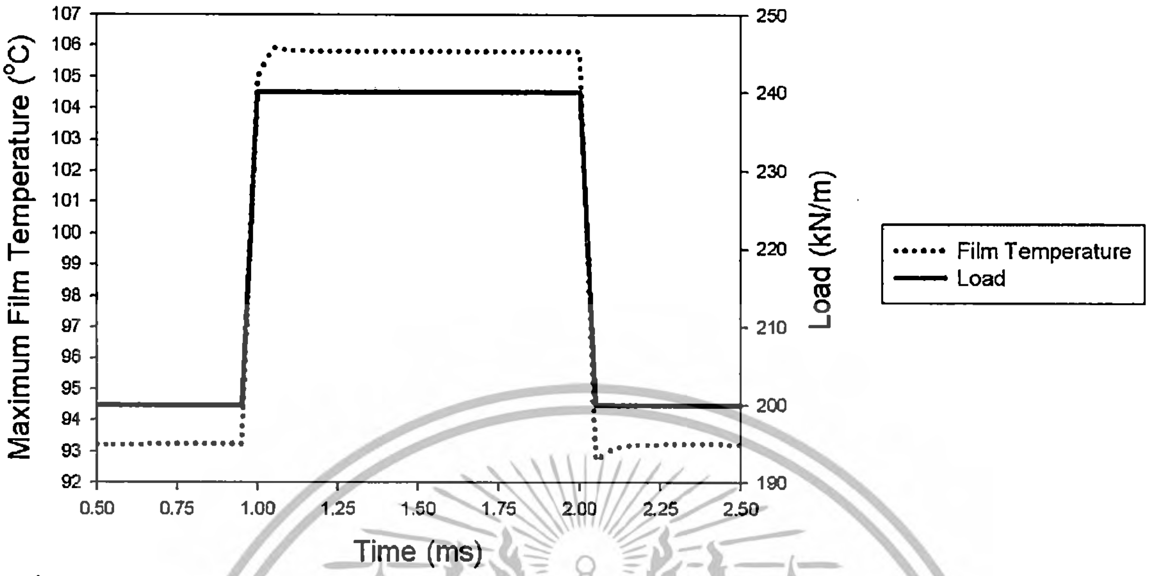


รูปที่ 4.169 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.170 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

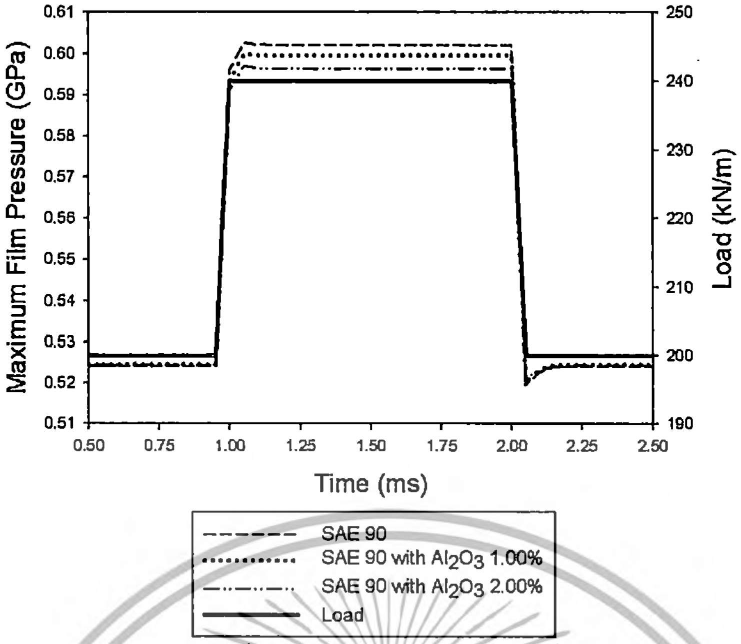
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



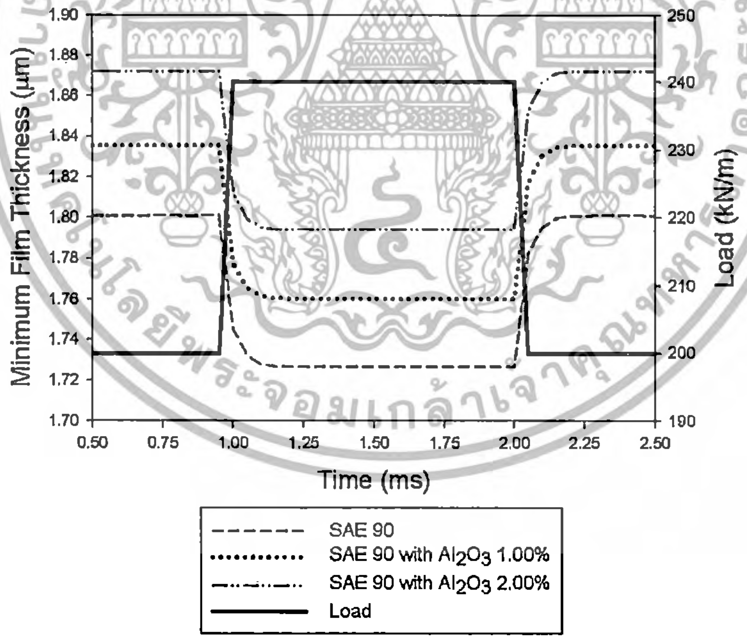
รูปที่ 4.171 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 *μm* ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองผลในกรณีสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร และค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 *μm* ดังแสดงในรูปที่ 4.166 ถึง 4.171 พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น ส่วนค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 240 kN/m ตำแหน่งค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5243 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0709 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8721 *μm* ที่ตำแหน่ง + 0.2364 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 93.2371 °C ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ที่ภาระ 240 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5911 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1156 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8122 *μm* ที่ตำแหน่ง + 0.2443 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 104.9944 °C ที่ตำแหน่ง + 0.1156 mm. โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

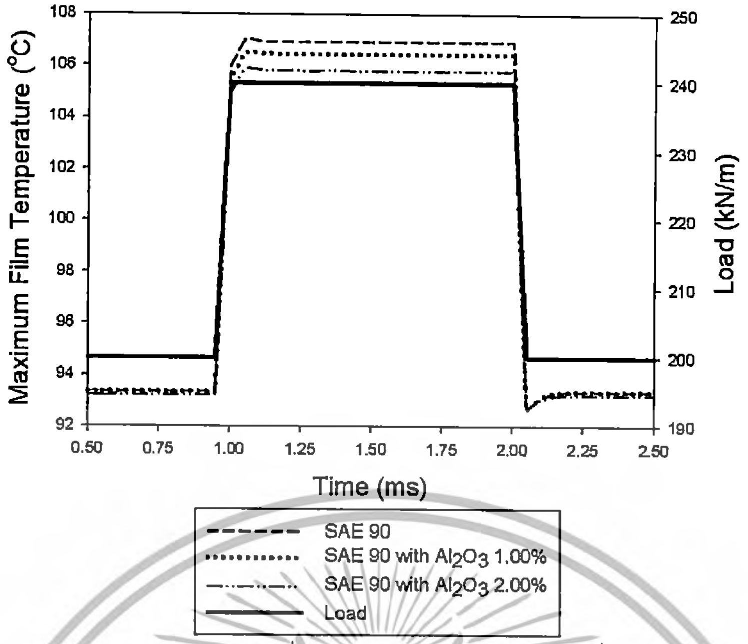


รูปที่ 4.172 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.173 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

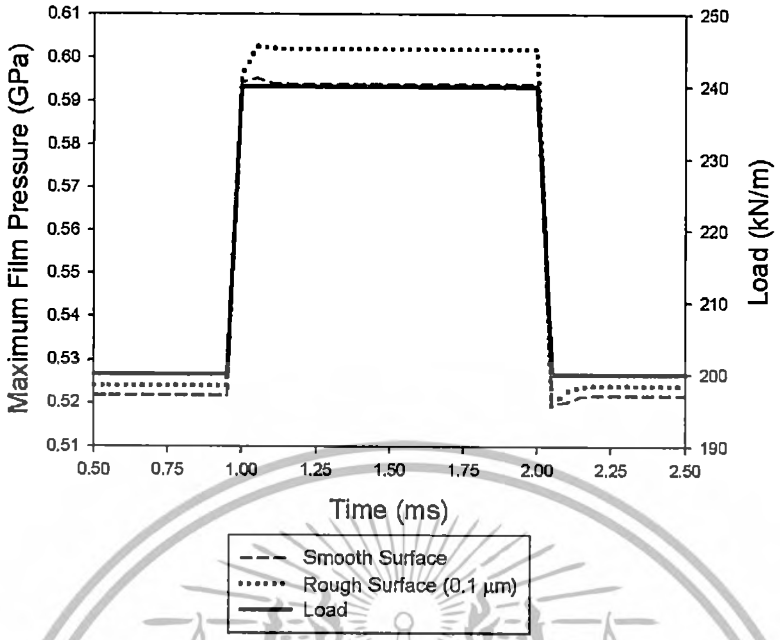
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



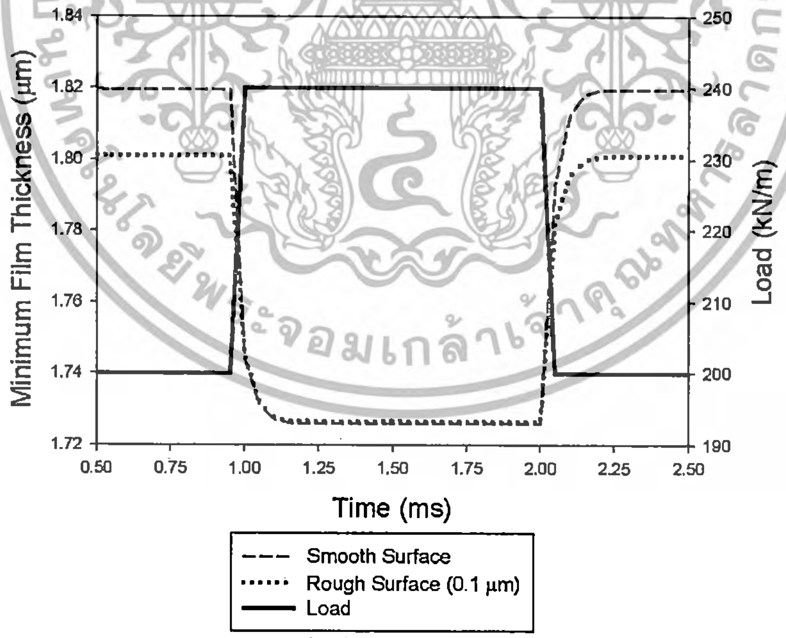
รูปที่ 4.174 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ของทรงกระบอกที่รับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m มีค่าความหยาบของผิวทรงกระบอก = 0.1 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.172 ถึงรูปที่ 4.174 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5241 GPa 0.5245 GPa และ 0.5243 GPa และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5961 GPa 0.5934 GPa และ 0.59111 GPa ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.6020 GPa 0.5995 GPa และ 0.5963 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8011 μm 1.8357 μm และ 1.8721 μm และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.7449 μm 1.7775 μm และ 1.8122 μm ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.7266 μm 1.7603μm และ 1.7944 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 93.3506 $^{\circ}$C 93.3542 $^{\circ}$C และ 93.2371 $^{\circ}$C และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 106.0013 $^{\circ}$C 105.4535 $^{\circ}$C และ 104.9944 $^{\circ}$C ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 106.9265 $^{\circ}$C 106.4650 $^{\circ}$C และ 105.8139°C เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

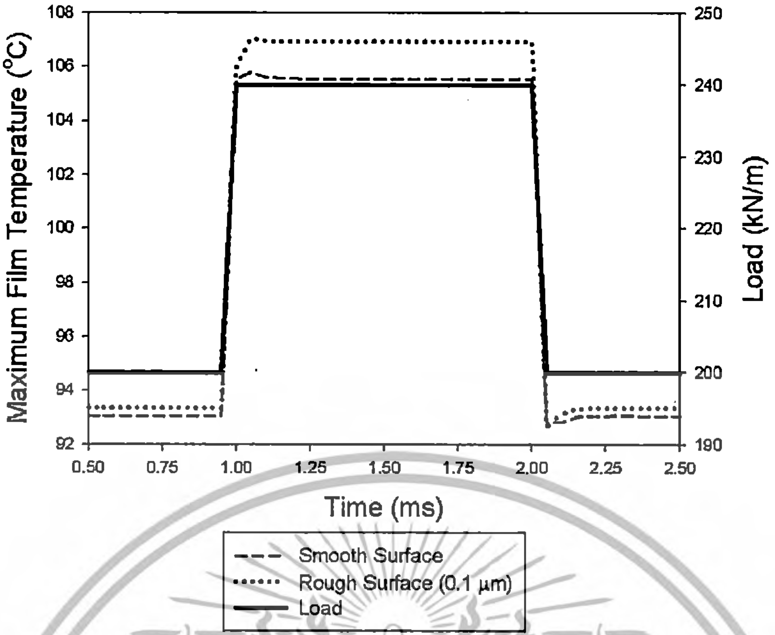


รูปที่ 4.175 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm



รูปที่ 4.176 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

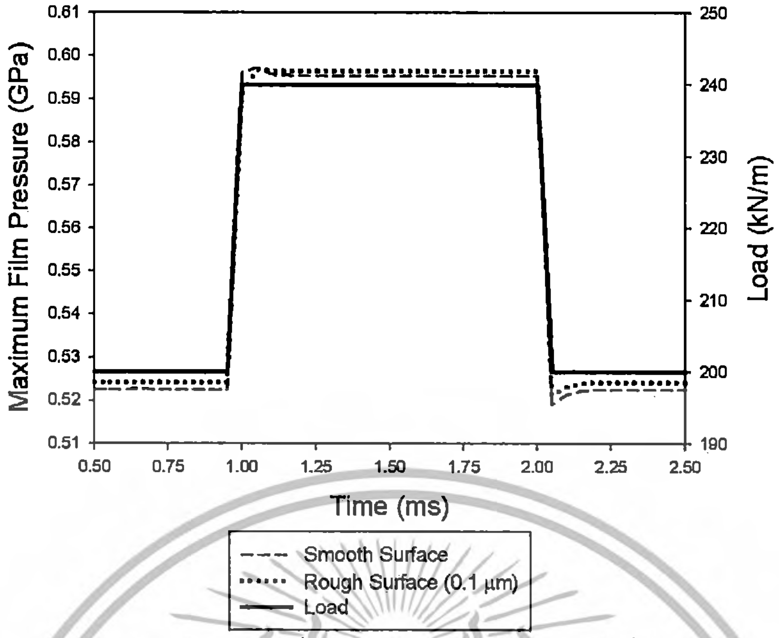
เอกสารนี้เป็นเอกสวรที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



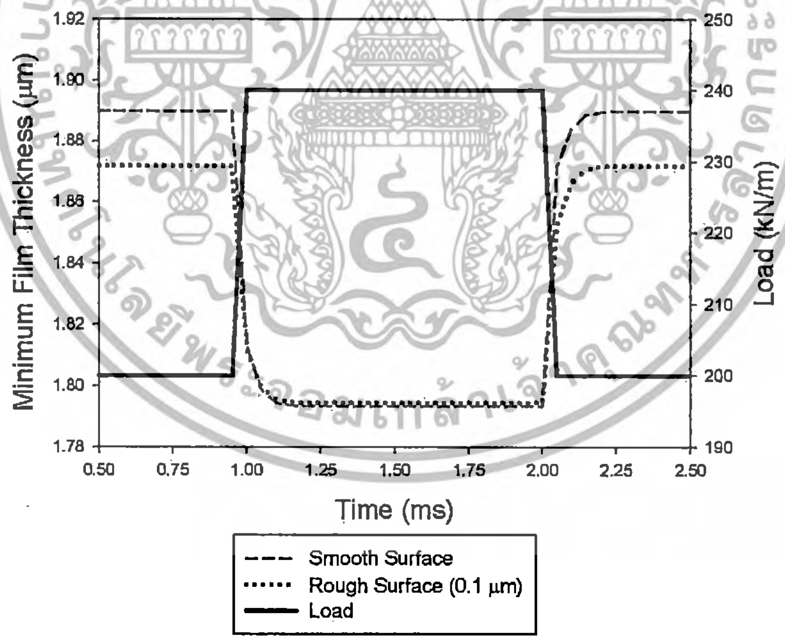
รูปที่ 4.177 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

เมื่อทำการจำลองผลเปรียบเทียบระหว่างการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s มีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีผิวหยาบมีค่ามากกว่าในกรณีการหล่อลื่นแบบผิวเรียบ โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5943 GPa และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5939 GPa ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5241 GPa ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5961 GPa และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.6020 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.175 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวเรียบและผิวหยาบ เมื่อทำการเพิ่มภาระแบบทันทีทันใดมีค่าใกล้เคียงกับภาระเดิม โดยการหล่อลื่นแบบผิวเรียบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8197 μm ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.7440 μm และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.7259 μm ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวหยาบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8011 μm ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.7449 μm และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.7266 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.176 และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลาที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 93.0604 $^{\circ}$C ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 105.5518 $^{\circ}$C และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 105.5688 $^{\circ}$C ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 93.3506 $^{\circ}$C ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 106.0013 $^{\circ}$C และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 106.9265 $^{\circ}$C ดังแสดงในรูปที่ 4.177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

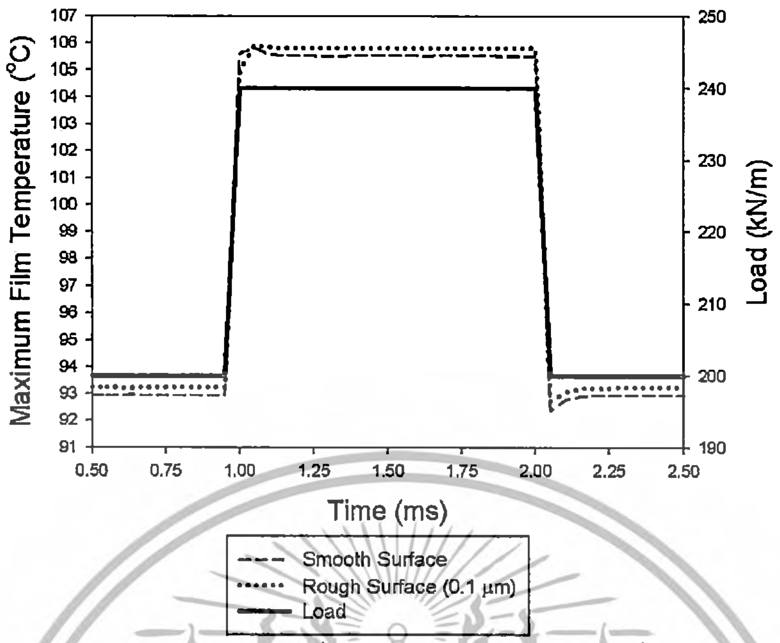


รูปที่ 4.178 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm



รูปที่ 4.179 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

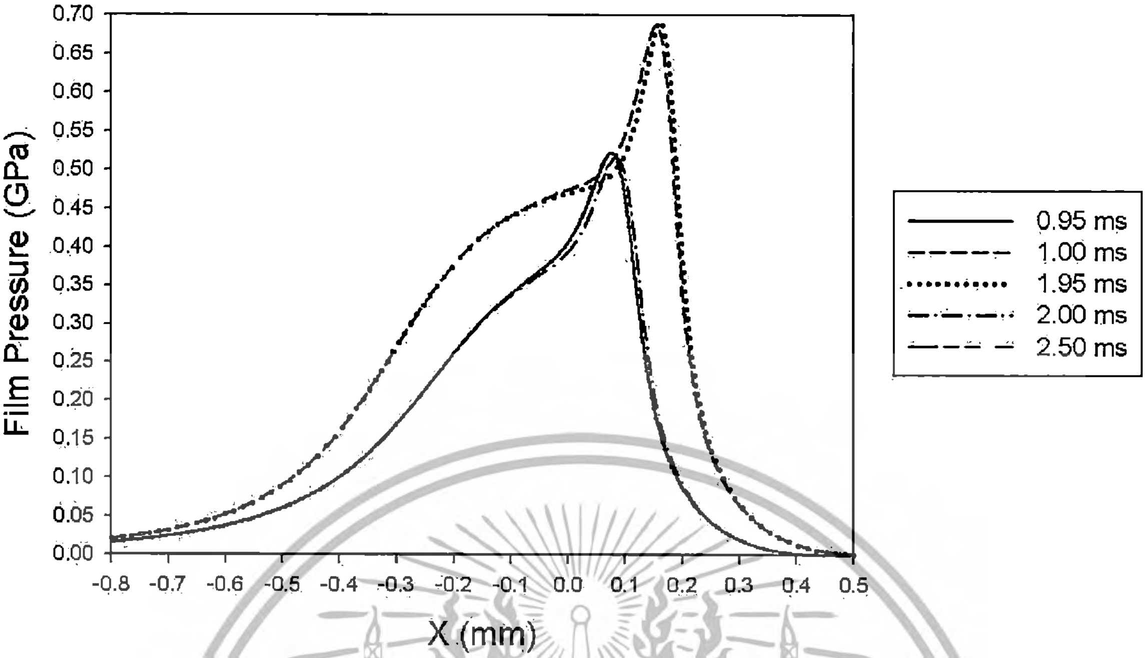
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



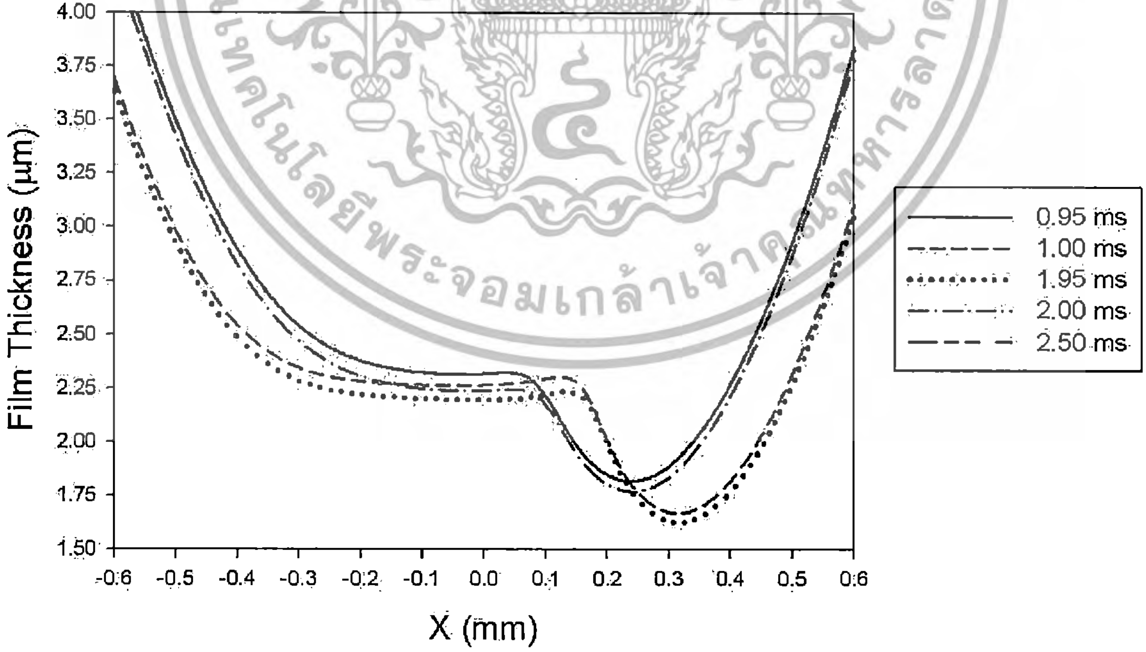
รูปที่ 4.180 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวหยาบ= 0.1 μm

เมื่อทำการจำลองผลเปรียบเทียบระหว่างการหล่อลื่นแบบผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s มีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีผิวหยาบมีค่าใกล้เคียงในกรณีการหล่อลื่นแบบผิวเรียบ โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5226 GPa ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5960 GPa และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5955 GPa ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5243 GPa ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5911 GPa และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5963 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4.178 ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวเรียบและผิวหยาบ เมื่อทำการเพิ่มภาระแบบทันทีทันใดมีค่าใกล้เคียงกับภาระเดิม โดยการหล่อลื่นแบบผิวเรียบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8898 μm ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.8130 μm และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.7933 μm ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวหยาบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8721 μm ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.8122 μm และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.7944 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.179 และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบที่เวลาที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 92.9499 °C ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 105.6426 °C และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 105.5320 °C ค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวหยาบที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 93.2371 °C ที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 104.9944 °C และที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 105.8139 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

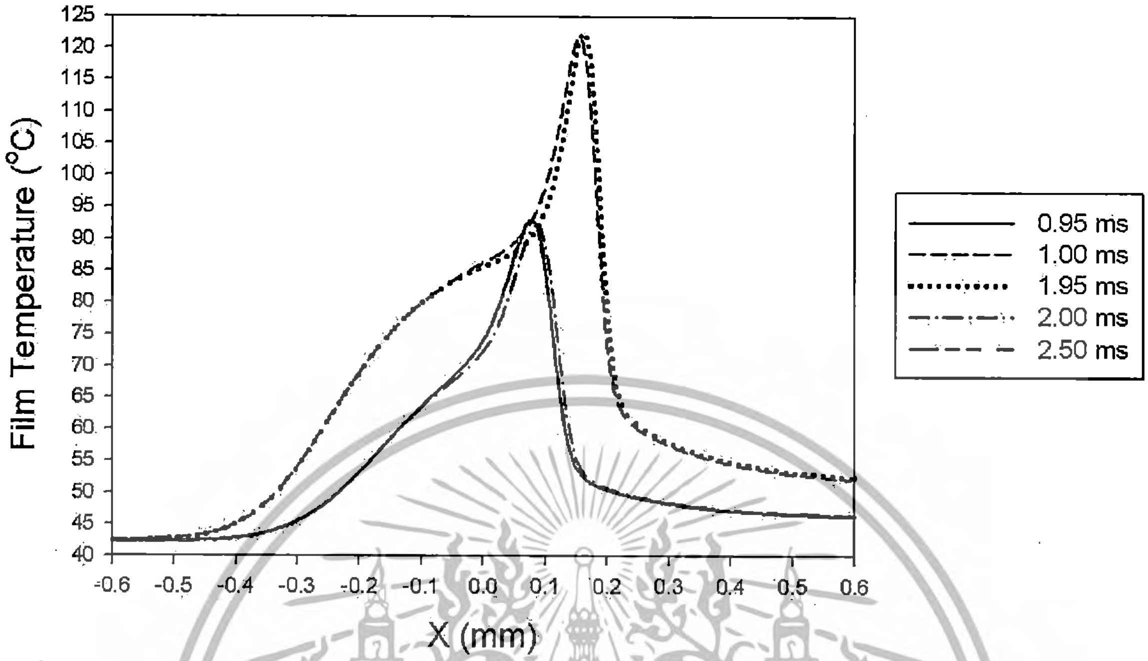


รูปที่ 4.181 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

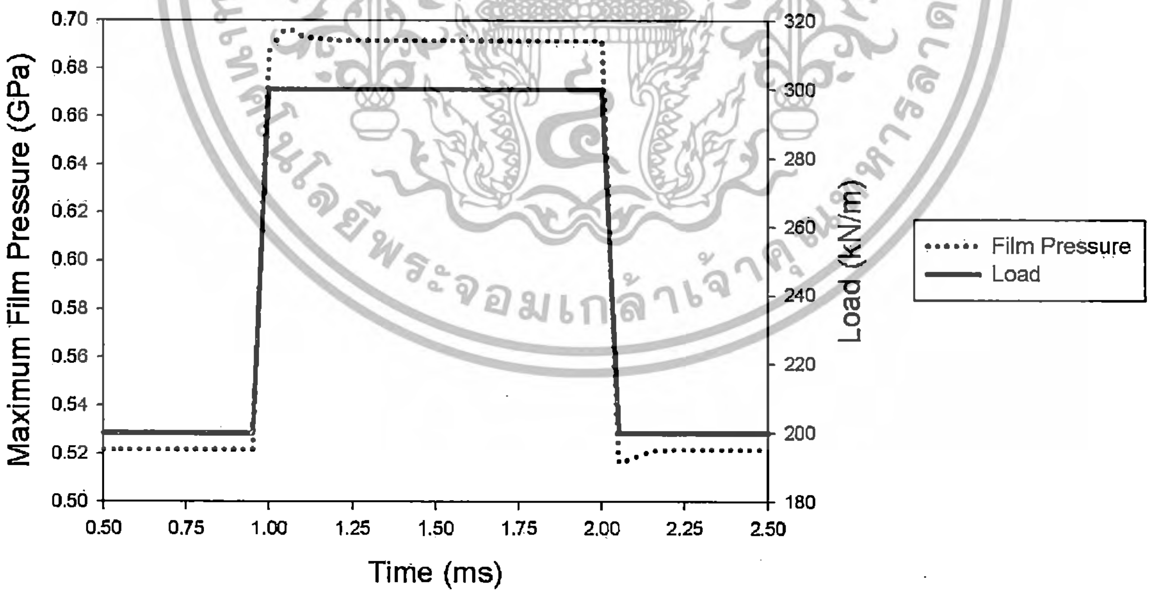


รูปที่ 4.182 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

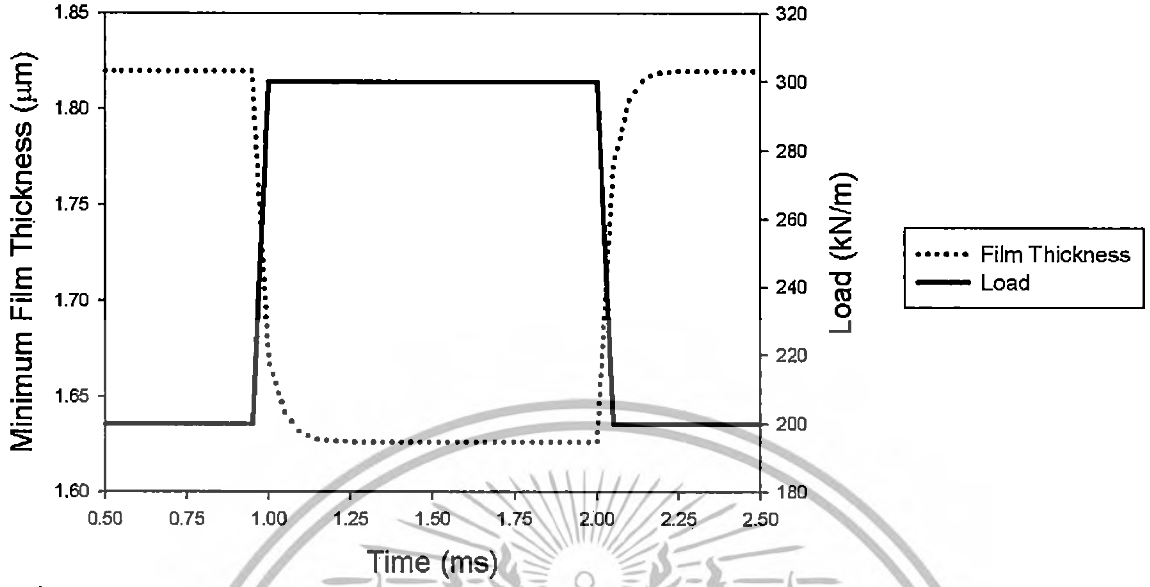


รูปที่ 4.183 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

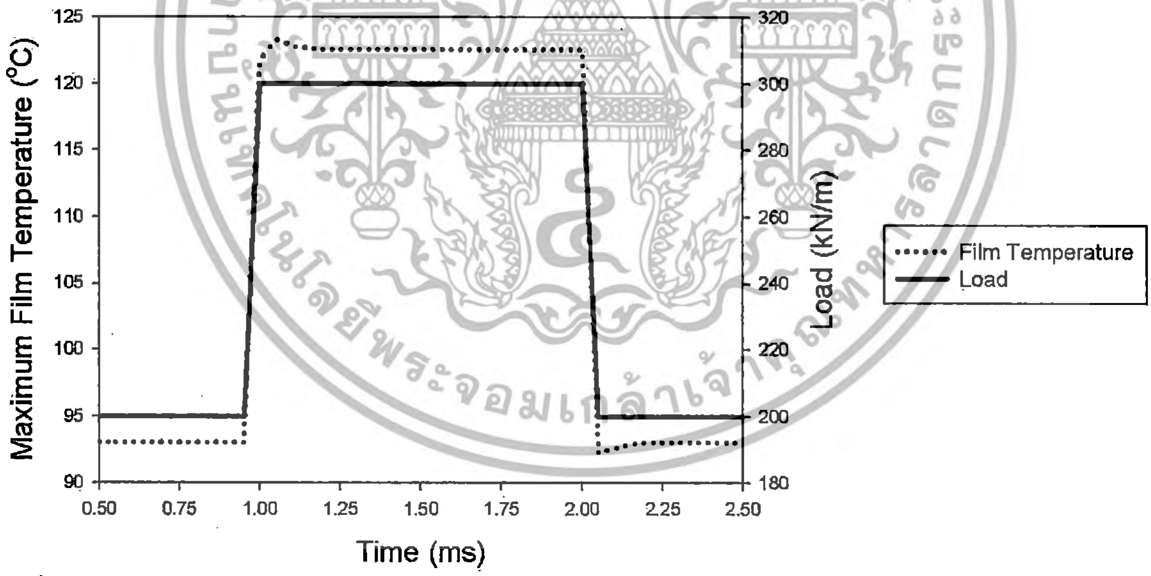


รูปที่ 4.184 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



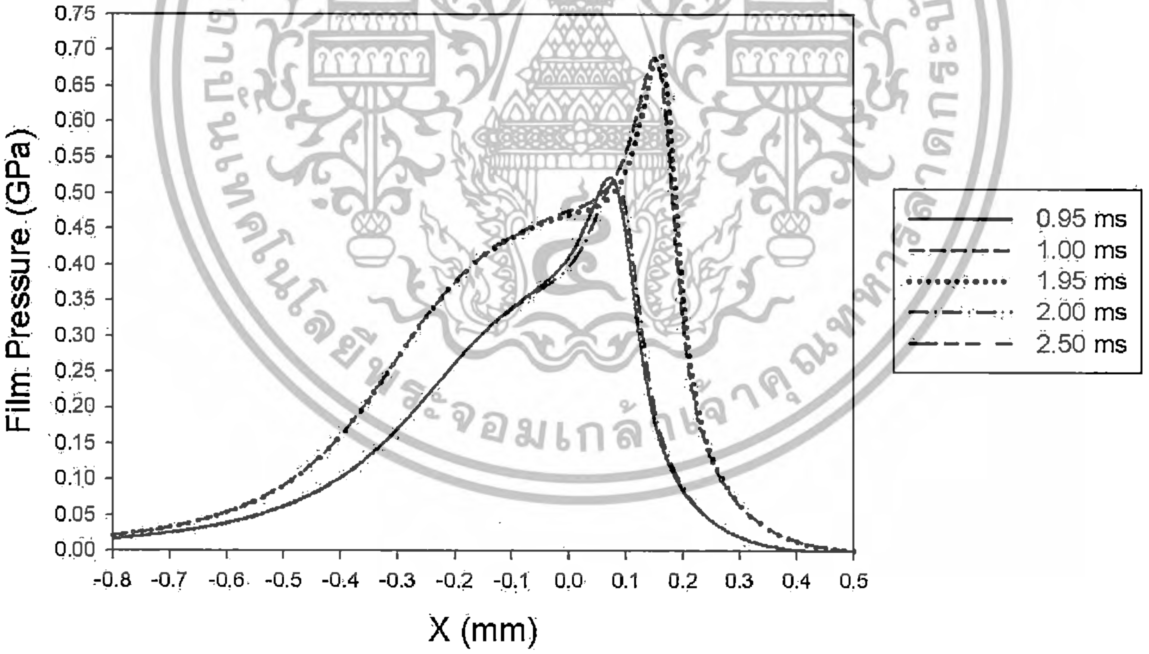
รูปที่ 4.185 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90



รูปที่ 4.186 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

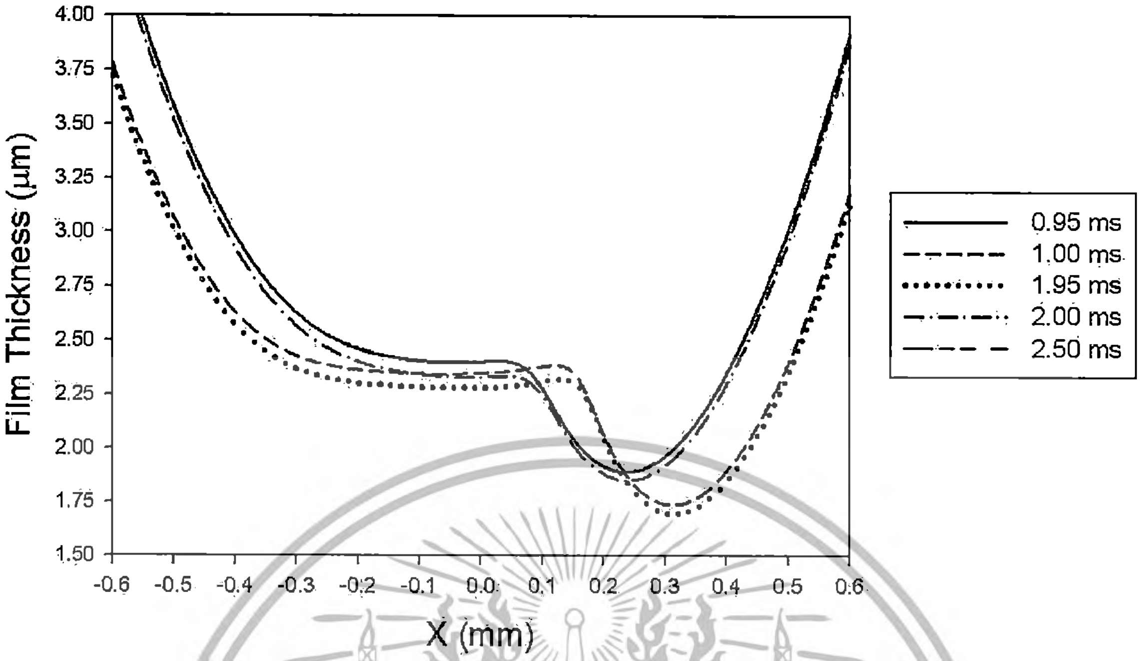
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลในกรณีสารหล่อลื่น SAE-90 ดังแสดงในรูปที่ 4.181 ถึง 4.186 พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 300 kN/m ตำแหน่งค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น ส่วนค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 300 kN/m ตำแหน่งค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0762 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8197 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2364 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 93.0604 $^{\circ}$C ที่ตำแหน่ง + 0.0788 mm. ที่ภาระ 300 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.6873 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1523 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.6689 μm ที่ตำแหน่ง + 0.3126 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 121.7215 $^{\circ}$C ที่ตำแหน่ง + 0.1550 mm. โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

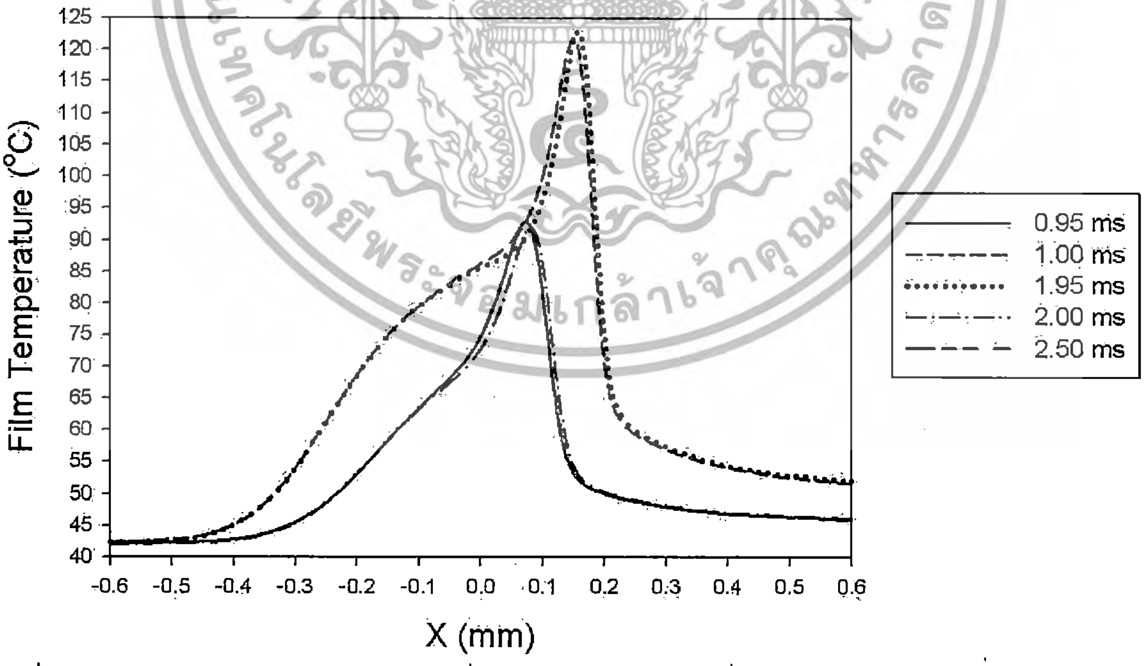


รูปที่ 4.187 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

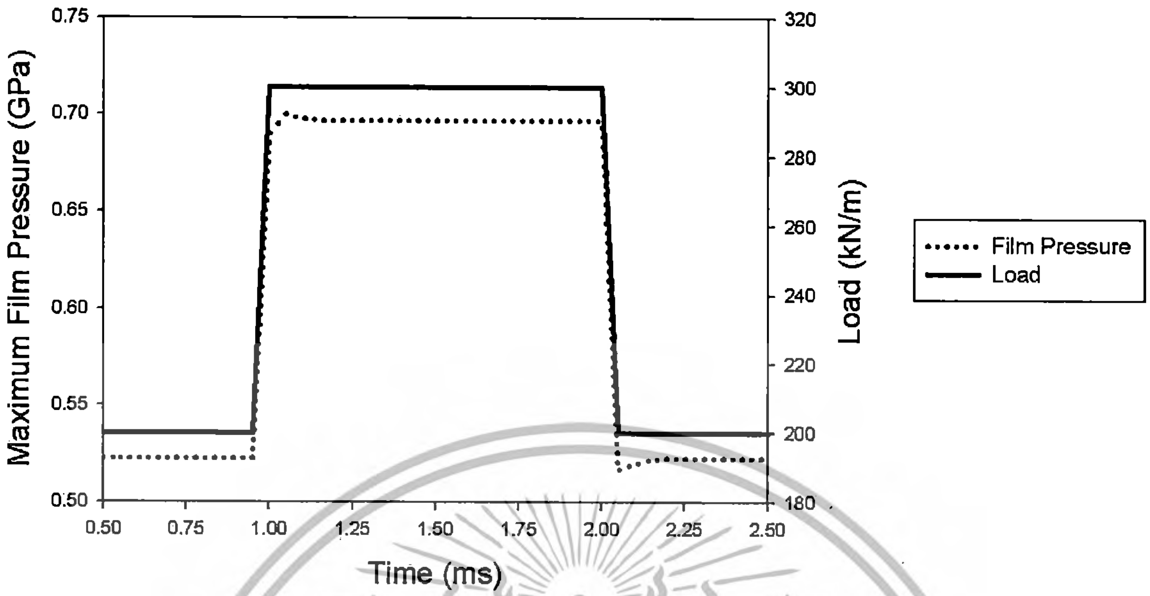


รูปที่ 4.188 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

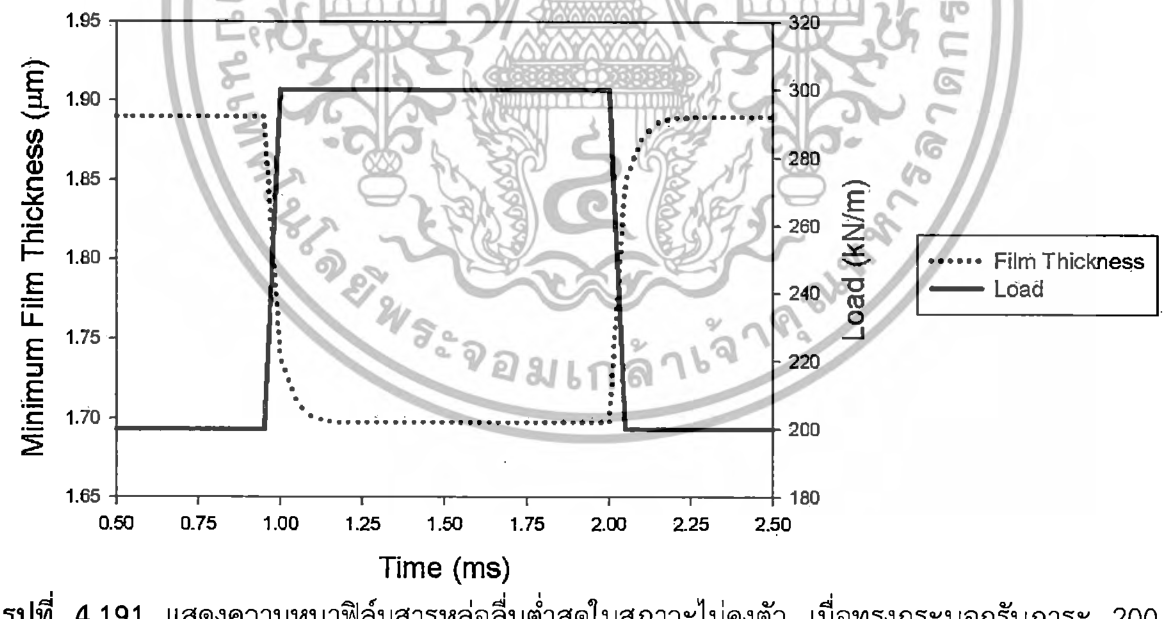


รูปที่ 4.189 แสดงอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

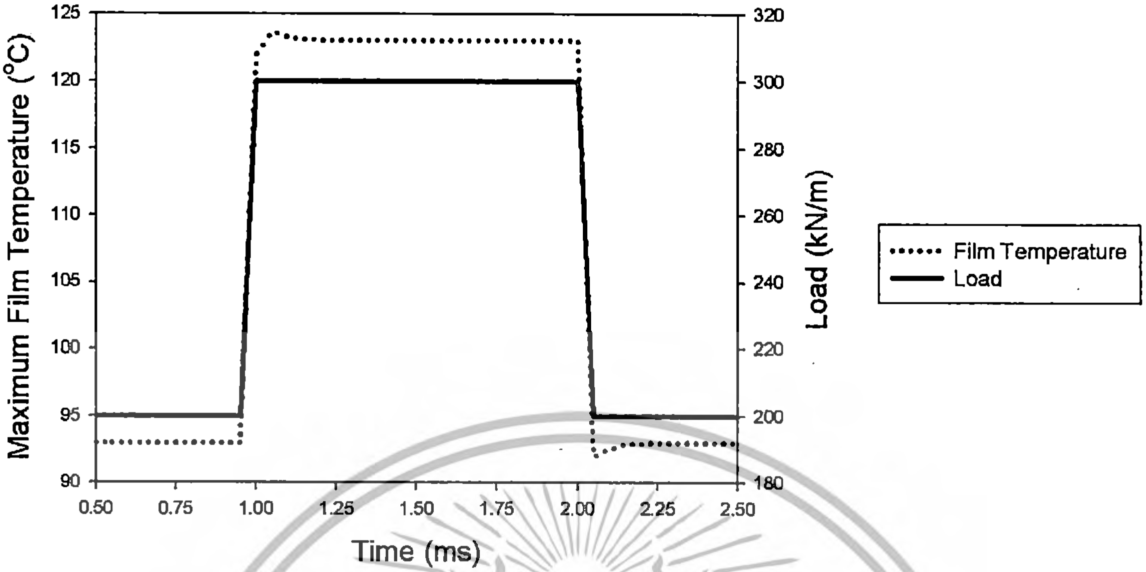


รูปที่ 4.190 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.191 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

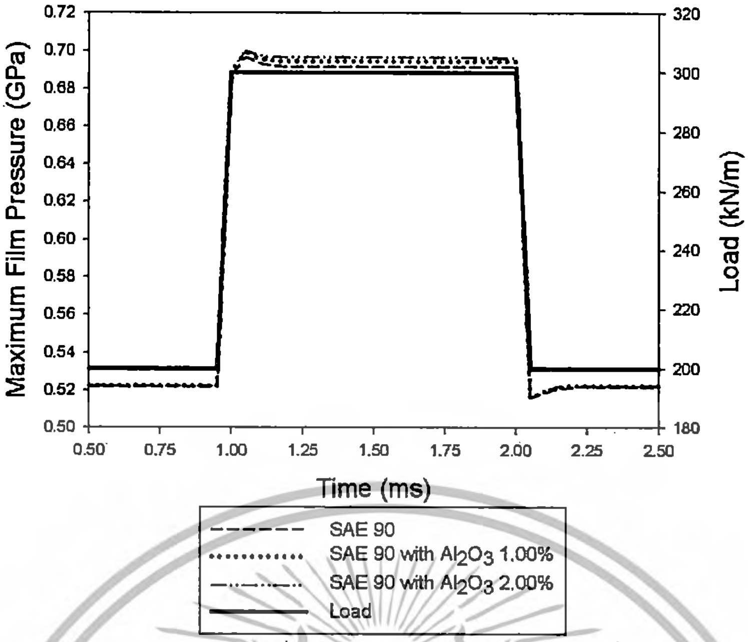
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



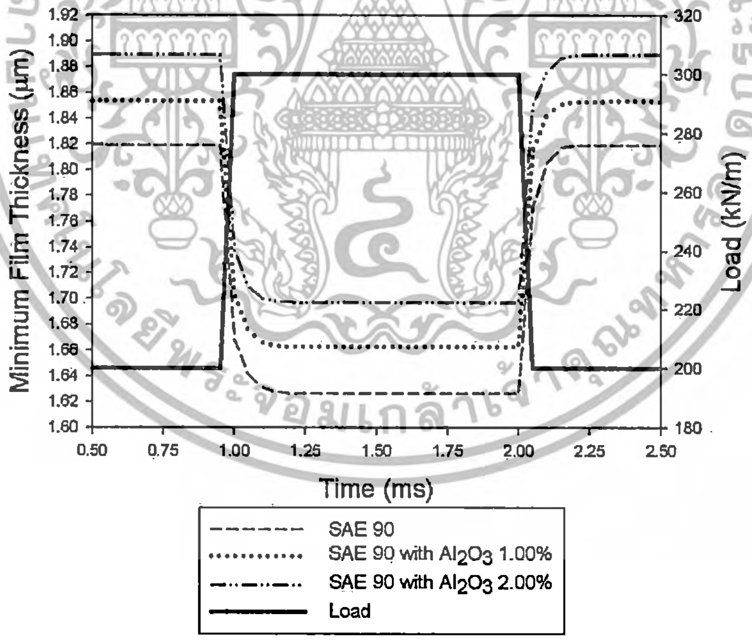
รูปที่ 4.192 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองผลในกรณีสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.187 ถึง 4.192 พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 300 kN/m ตำแหน่งค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น ส่วนค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นทันทีจาก 200 kN/m เป็น 300 kN/m ตำแหน่งค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดอยู่ใกล้ทางออกของการสัมผัสมากขึ้น โดยที่ภาระ 200 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.5226 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.8898 μm ที่ตำแหน่ง + 0.2364 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92.9499 °C ที่ตำแหน่ง + 0.0735 mm. ที่ภาระ 300 kN/m ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.6897 GPa ที่ตำแหน่ง + 0.1497 mm. ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.7376 μm ที่ตำแหน่ง + 0.3126 mm. และค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 121.9059 °C ที่ตำแหน่ง + 0.1523 mm. โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

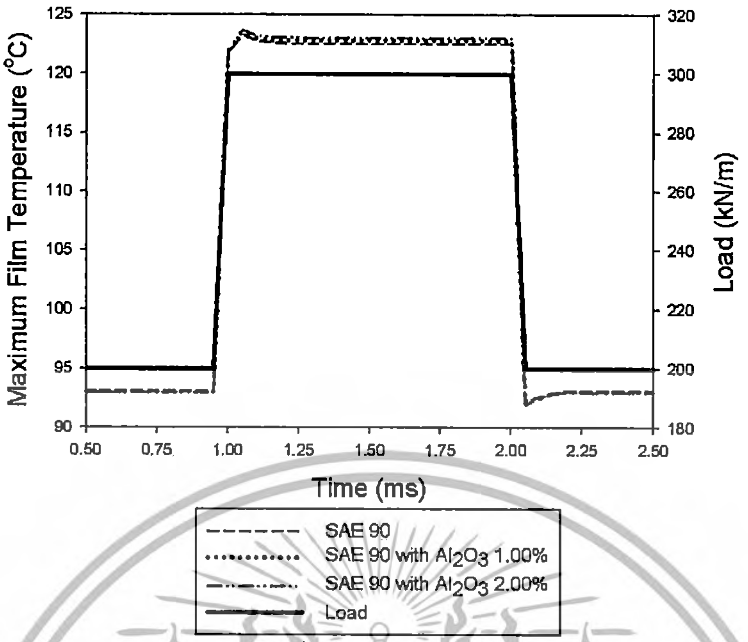


รูปที่ 4.193 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.194 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

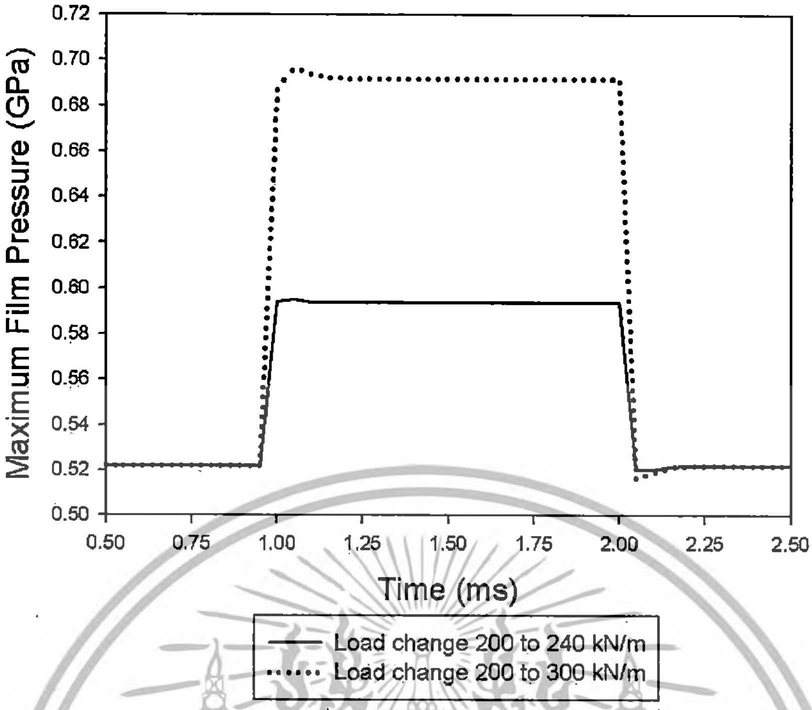
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



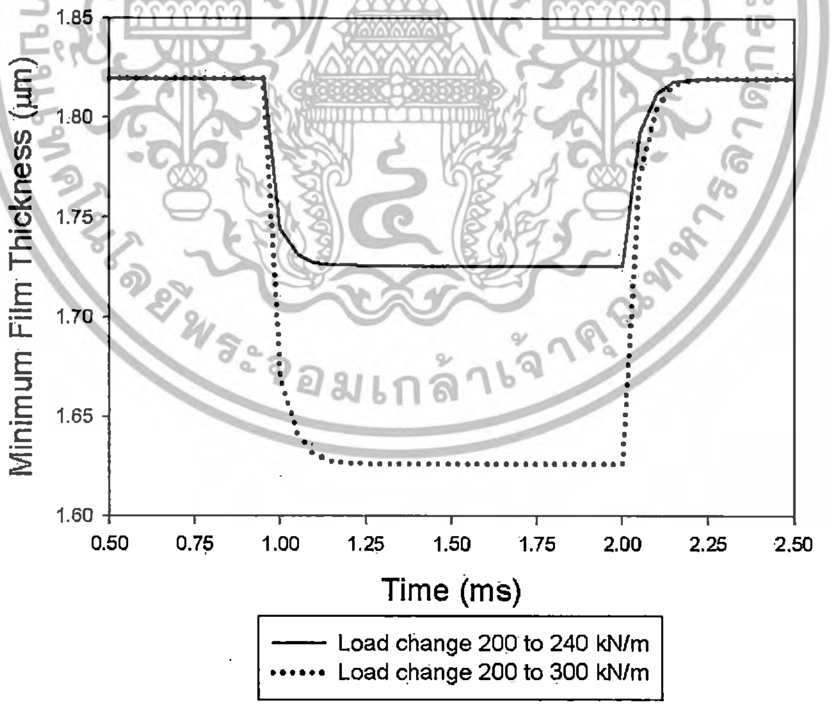
รูปที่ 4.195 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร ของทรงกระบอกที่รับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 300 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 4.193 ถึงรูปที่ 4.195 พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่าเล็กน้อยในกรณีที่เป็นสารหล่อลื่น SAE-90 โดยในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.5219 GPa 0.5225 GPa และ 0.5226 GPa และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.6873 GPa 0.6891 GPa และ 0.6897 GPa ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 0.6917 GPa 0.6946 GPa และ 0.6966 GPa เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่ามากกว่ากรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 เช่นเดียวกัน ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.8197 μm 1.8535 μm และ 1.8898 μm และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.6689 μm 1.7031 μm และ 1.7376 μm ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 1.6265 μm 1.6627 μm และ 1.6973 μm เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 มีค่าใกล้เคียงกับกรณีเป็นสารหล่อลื่น SAE-90 ที่เวลา 0.95 ms มีค่าเท่ากับ 93.0604 °C 92.9958 °C และ 92.9499 °C และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 121.7215 °C 121.8941 °C และ 121.9059 °C ที่เวลา 1.95 ms มีค่าเท่ากับ 122.5654 °C 122.7879 °C และ 123.0394°C เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 1.0 % และ 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

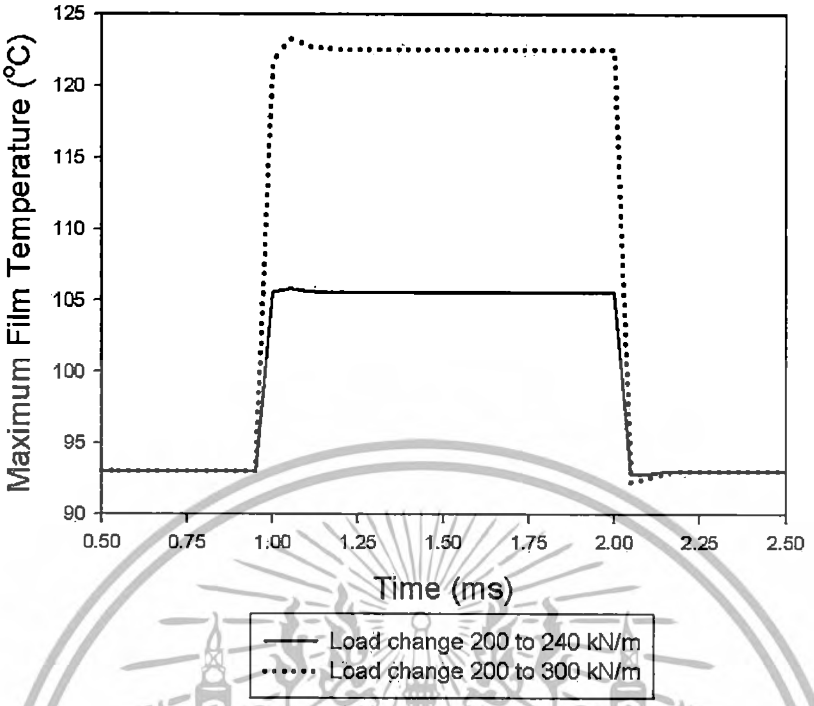


รูปที่ 4.196 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90



รูปที่ 4.197 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

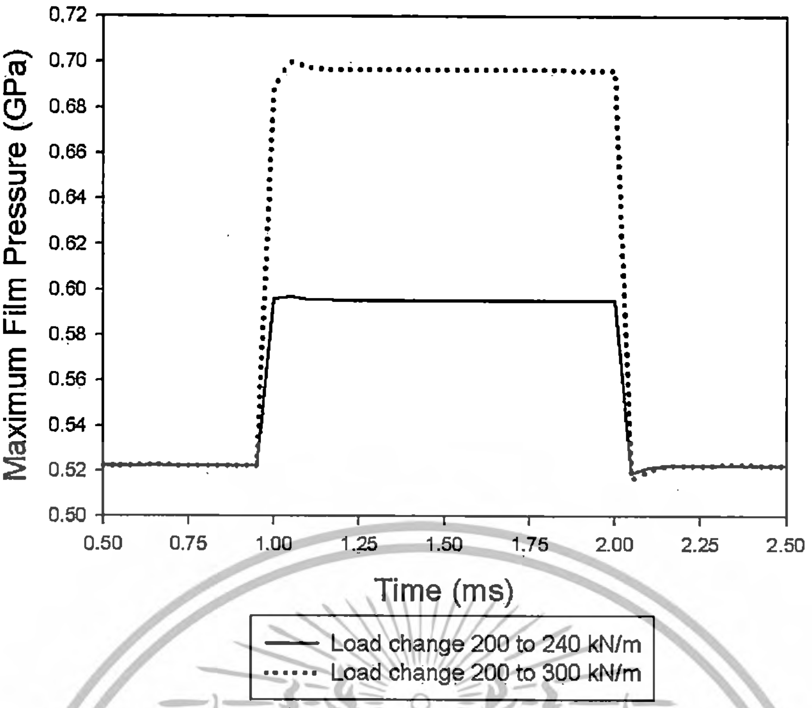
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



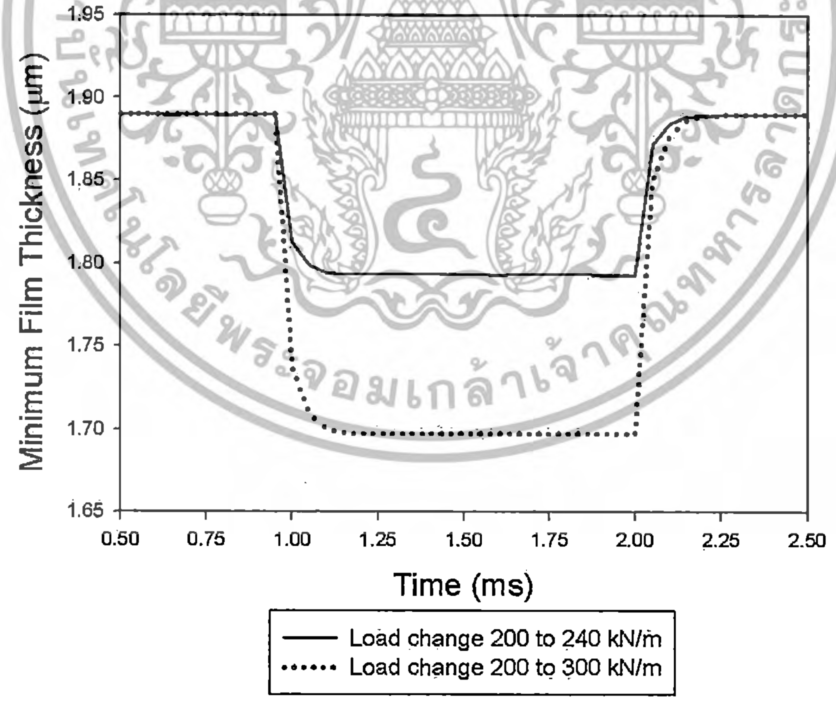
รูปที่ 4.198 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90

จากการจำลองในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ของทรงกระบอกที่รับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 4.196 ถึงรูปที่ 4.198 พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดค่าเท่ากับ 0.5219 GPa และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5943 GPa รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.6873 GPa สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดค่าเท่ากับ 1.8197 μm และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.7440μm รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.6689 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดค่าเท่ากับ 93.0604 $^{\circ}$C และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 105.5518 $^{\circ}$C รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 121.7215 $^{\circ}$C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

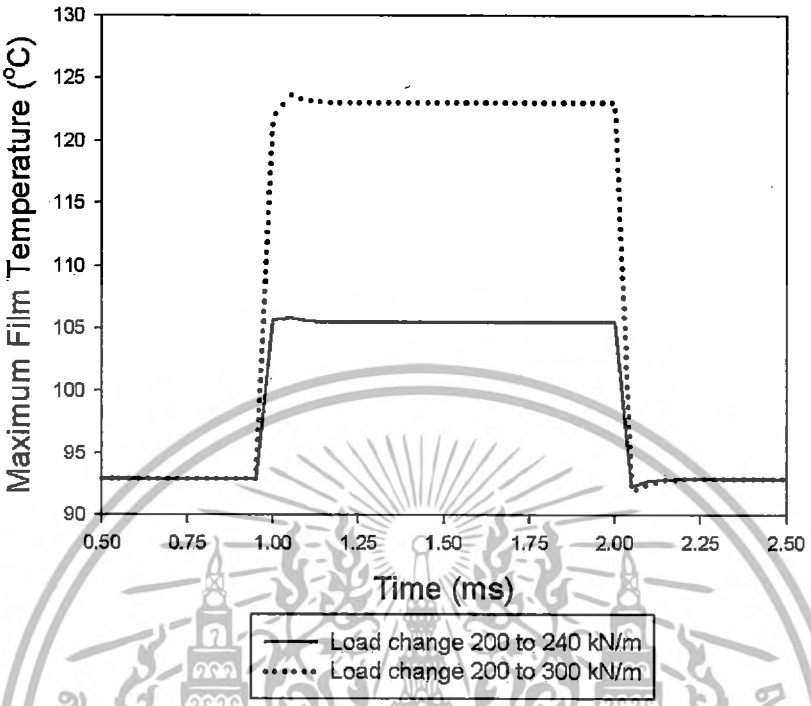


รูปที่ 4.199 แสดงความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.200 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.201 แสดงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในสภาวะไม่คงตัว เมื่อทรงกระบอกรับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s โดยมีค่า Slip Ratio = 0.75 ด้วยสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตร

จากการจำลองในสภาวะไม่คงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.0 % โดยปริมาตรของทรงกระบอกที่รับภาระ 200 kN/m เพิ่มขึ้นทันทีเป็น 240 kN/m และ 300 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 4.199 ถึงรูปที่ 4.201 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดค่าเท่ากับ 0.5226 GPa และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.5960 GPa รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 0.6897 GPa สำหรับค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดค่าเท่ากับ 1.8898 μm และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.8130μm รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 1.7376 μm และค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในขณะที่รับภาระ 200 kN/m ที่เวลา 0.95 ms มีค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดค่าเท่ากับ 92.9499°C และที่เวลา 1.00 ms รับภาระ 240 kN/m มีค่าเท่ากับ 105.6426 $^{\circ}$C รับภาระ 300 kN/m มีค่าเท่ากับ 121.9059 $^{\circ}$C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาผลของอนุภาคของแข็งที่มีต่อเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบฟิล์มบาง โดยพิจารณาความหยาบผิวต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น และเป็นน้ำมันหล่อลื่นผสมสารหล่อลื่นของแข็งแบบอนุภาคนาโน ในสภาวะคงตัวและในภาวะไม่คงตัว โดยใช้วิธีระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง(Finite Difference Method) ระเบียบวิธีนิวตัน- ราฟสัน(Newton-Raphson Method) ร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริต (Mutlgrid Method) หาคำตอบของสมการเรย์โนล์ดประยุกต์ สมการพลังงานประยุกต์ ร่วมกับสมการการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารหล่อลื่น จากการจำลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะคงตัว
กรณีทรงกระบอกเป็นผิวเรียบ

- จากผลการจำลองพบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของการสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น จะมีค่าลดลงและลดลงต่ำสุดที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด
- พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นของสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรต่างๆ มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกัน
- เมื่อภาระที่กระทำต่อทรงกระบอกมีค่าเท่ากัน พบว่าการผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ลงในสารหล่อลื่น SAE – 90 ทำให้ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้นแต่อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้นน้อยมาก ซึ่งพบว่าส่งผลให้ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ภาระคงที่ และความเร็วของทรงกระบอกคงที่ พบว่า ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- เมื่อพิจารณาค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ภาระต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 5.20 MPa คิดเป็น 0.9710 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 11.40 MPa คิดเป็น 1.2690 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 18.50 MPa คิดเป็น 1.4723 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 และที่ภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 24.80 MPa คิดเป็น 1.6497 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ภาระต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 0.4873 ^{o}C คิดเป็น 0.6079 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 1.3156 ^{o}C คิดเป็น 0.9458 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 2.3472 ^{o}C คิดเป็น 1.2080 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 และที่ภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 3.0511 ^{o}C คิดเป็น 1.3218 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่ภาระต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0458 μm คิดเป็น 3.8656 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ภาระ 400 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0407 μm คิดเป็น 4.4205% เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ภาระ 600 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0325 μm คิดเป็น 4.6369 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 และที่ภาระ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0281 μm คิดเป็น 5.0530 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ยของทรงกระบอก พบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นของสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรต่างๆ มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกัน คือความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของการสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลงและลดลงต่ำสุดที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด

- เมื่อเพิ่มความเร็วเฉลี่ยของทรงกระบอก พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดที่ตำแหน่งใกล้ทางออก (spike) ลดลง และค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลง ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดที่ตำแหน่งใกล้ทางออก (spike) ลดลงและค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลง และค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้น

- เมื่อพิจารณาค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 5.70 MPa คิดเป็น 1.1733 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 5.20 MPa คิดเป็น 0.9710 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 0.70 MPa คิดเป็น 0.1351 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 0.3126 $^{\circ}C$ คิดเป็น 0.5081 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 0.4873 $^{\circ}C$ คิดเป็น 0.6079 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดลดลง 0.0658 $^{\circ}C$ คิดเป็น 0.0712 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0287 μm คิดเป็น 3.8134 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0458 μm คิดเป็น 3.8656 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0713 μm คิดเป็น 3.8953 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 52.10 MPa คิดเป็น 3.8188 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 24.80 MPa คิดเป็น 1.6497 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 14.80 MPa คิดเป็น 1.0707 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 7.3844 °C คิดเป็น 3.8841 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 3.0511 °C คิดเป็น 1.3218 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 1.6906 °C คิดเป็น 0.7241 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดที่ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ พบว่าที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 800 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 0.48 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0012 μm คิดเป็น 0.3382 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 0.96 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0281 μm คิดเป็น 5.0530 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0550 μm คิดเป็น 5.4835 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

กรณีทรงกระบอกเป็นผิวหยาบ

- ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามลักษณะความหยาบของผิวทรงกระบอก ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่น จะมีค่ากวัดแกว่ง (Fluctuation) และเปลี่ยนแปลงตามความหยาบผิวอย่างรุนแรงและเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหยาบผิวมีค่ามากขึ้น

- ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าลดลง แต่อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหยาบของผิวทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น

- พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นของสารหล่อลื่น SAE-90 และสารหล่อลื่น SAE-90 ผสมกับอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรต่างๆ มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกัน

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ภาระคงที่ และความเร็วของทรงกระบอกคงที่ พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดลดลงเล็กน้อยและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

- เมื่อพิจารณาค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าที่ผิวเรียบค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 0.70 MPa คิดเป็น 0.1351 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ผิวหยาบค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 4.70 MPa คิดเป็น 0.8676 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าที่ผิวเรียบค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดลดลง 0.0658 $^{\circ}C$ คิดเป็น 0.0712 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ผิวหยาบค่าอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดลดลง 0.0203 $^{\circ}C$ คิดเป็น 0.0210 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

- เมื่อพิจารณาค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดของผิวเรียบและผิวหยาบ 0.1 μm ที่ภาระกระทำต่อทรงกระบอกเท่ากับ 200 kN/m ความเร็วทรงกระบอกเท่ากับ 1.92 m/s เมื่อผสมอนุภาคนาโน Al_2O_3 2.00 % โดยปริมาตร พบว่าที่ผิวเรียบค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0713 μm คิดเป็น 3.8953 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90 ที่ผิวหยาบค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเพิ่มขึ้น 0.0652 μm คิดเป็น 3.9396 % เมื่อเทียบกับสารหล่อลื่น SAE – 90

5.1.2 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในไม่สภาวะคงตัว

กรณีทรงกระบอกเป็นผิวเรียบ

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน Al_2O_3 โดยที่ภาระเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใด พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- เมื่อทรงกระบอกรับภาระมากขึ้น พบว่าค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดจะกวัดแกว่งมากขึ้นและเข้าสู่สภาวะคงที่โดยใช้เวลามากขึ้น
- เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำให้เพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใด พบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะคงที่

กรณีทรงกระบอกเป็นผิวหยาบ

- จากผลการจำลองพบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งใกล้จุดกึ่งกลางของสัมผัส และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ทางออกของการสัมผัส ในขณะที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ทางออกของการสัมผัส โดยค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและมีค่าต่ำกว่าที่เวลาเริ่มต้น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดและค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีการกวัดแกว่งตามความหยาบของผิวทรงกระบอก โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันในทุกๆ เวลา
- เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำให้เพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใด เปรียบเทียบในกรณีของผิวเรียบและผิวหยาบ พบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีการลดลงตลอดช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระแบบทันทีทันใด
- เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของผิวเรียบและผิวหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีภาระแบบทันทีทันใด พบว่า ในกรณีผิวหยาบจะมีการกวัดแกว่งในช่วงเวลาเริ่มต้นมากกว่าผิวเรียบ และใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่มากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยได้มีข้อสมมุติฐานคือ ทรงกระบอกมีการสัมผัสแบบเส้น ซึ่งควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของพฤติกรรมการหล่อลื่นที่มีการสัมผัสกันเป็นวงรี และการหล่อลื่นแบบผสมเพื่อวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อลื่นในสภาวะที่รุนแรง และทำการศึกษาในการหล่อลื่นของอุปกรณ์ที่มีการสัมผัสกันแบบฟิล์มบาง เช่น เฟือง แบริ่ง เป็นต้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Dowson, D. and Higginson, G.R., "Elastohydrody-namic Lubrication:The Fundamental of Roller and Gear Lubrication", **Pergamon Oxford** , 1966.

[2] Lee, R. and Hamrock, B.J. "Squeeze and Entraining Motion in Nonconformal Line Contacts Part II: Elastohydrodynamic Lubrication" **ASME J. Tribol.,** vol. 111, 1989. pp. 8–16.

[3] Bhattachajee R.C. and Dast, N.C. "Power law fluid model incorporated into elastohydrodymic lubrication theory of line contact" **Tribology International,** vol. 29, 1996. pp. 405–413.

[4] Khonsari, M. M., Wang, H. S. and Qi, Y.L. "A Theory of Liquid-Solid Lubrication in Elastohydrodumic Regime" **ASME J.Tribol.,** vol. 111, 1989. pp. 256–265.

[5] Evans H. P. and Snidle R. W. "Analysis of micro-elastohydrodynamic lubrication for engineering contacts" **Tribology International,** vol. 28, 1996. pp. 659–667.

[6] 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, 2006. pp. 771–777.

[7] Jin Z. M., Yang P., Cui J. and Dowson D. "Transient elastohydrodynamic analysis of elliptical contacts. Part I: isothermal and Newtonian Lubricant solution" **Proc. Instn Mech. Engrs Part J: J. Engineering Tribology,** vol.218, 2004. pp.211–224.

[8] Jin Z. M., Yang P., Cui J. and Dowson D. "Transient elastohydrodynamic analysis of elliptical contacts. Part 2: thermal and Newtonian Lubricant solution" **Proc. Instn Mech. Engrs Part J: J. Engineering Tribology,** vol.219, 2005. pp.187–200.

[9] Mongkolwongrojn M., Wongseedahaew K. and Kennedy F. E. "Elastohydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces under Oscillatory Line Contact with Non-Newtonian Lubricant" **STLE Tribology Transactions,** vol.51, 2008. pp. 552–561.

[10] Wang Y., Li H., Tong J. and Yang P. "Transient thermoelastohydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear" **Tribology International**, vol.37, 2004. pp.773–782.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Mongkolwongrojn M. and Panichakorn J. "TEHL Analysis of Rough Surface Spur Gears with Non-Newtonian Lubricants under Sudden Overloads" **JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,** vol.6, 2012. pp. 1031-1045.

[12] Peng D. X., Kang Y., Hwang R. M., Shyr S. S. and Chang Y. P. "Tribological properties of diamond and SiO_2 nanoparticles added in paraffin"**Tribology international,** vol. 42, 2009. pp. 911–917.

[13] 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, 2008. pp. 560–568.

[14] Chandrasekar, M., Suresh, S. and Bose, C. "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3/water nanofluid" **Experimental Thermal and Fluid Science,** vol.34, 2010. pp.210–216.

[15] Shenoy B. S., Binu K. G., Pai R., Rao D. S. and Pai R. S. "Effect of nanoparticles additives on the performance of an externally adjustable fluid film bearing" **Tribology International,** vol. 45, 2012. pp. 38–42.

[16] Charinpanitkul, T., Faungnawakij, K. and Tanthapanichakoon, W. "Review of Recent Research on Nanoparticle Production in Thailand" **Advanced Powder Technology,** vol. 19, 2008. pp. 443–457.

[17] Hwang H., Y.J., Ahn, Y.C., Shin, H.S., Lee, C.G., Kim, G.T., Park, H.S. and Lee, J.K. "Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids" **Current Applied Physics,** vol.6, 2006. pp.1068–1071.

[18] Gao, Y., Sun, R., Zhang, Z. and Xue, Q. "Tribological properties of oleic acid – modified TiO_2 nanoparticle in water" **Materials Science and Engineering,** vol.A286, 2000. pp. 149–151.

[19] Chandrasekar, M., Suresh,. S. and Bose, C. "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3/water nanofluid" **Experimental Thermal and Fluid Science,** vol.34, 2010. pp.210–216.

[20] Roelands, C.J.A. **Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils.** Druk, Netherland : V.R.B.,Groingen. 1969.

[21] Rylander, H.G. "A Theory of Liquid-Solid Hydrodynamic Film Lubrication " **ASLE Journal of the American Society of Lubrication Engineerings**, pp.264-271, 1966.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[22] Hua, D. Y., and Khonsari, M. M., "Elastohydrodynamic Lubrication by Powder Slurries", **ASME Journal of Tribology**, Vol. 118, 1996, pp. 67–73.

[23] Carslaw, J. W., and Jaeger, J. C. **Conduction of Heat in Solids.** London : Oxford University Press. 1959.

[24] Xuan, Y. and Roetzel, W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluid", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol.43, 2000, pp. 3701–3707.

[25] Wang, S., Cusano C. and Conry, T. F., "Thermal analysis of elastohydrodynamic lubrication of line contact using the Ree-Eyring fluid model", **Journal of Tribology**, Vol. 113, 1991, pp. 232-244.

[26] Javadi, M., and Tadari, M. "Experiment investigation of the friction coefficient between aluminium and steel" **Materials Science-Poland**, vol. 24, 2006. pp.305-310.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advanced Materials Research Vol. 739 (2013) pp 470-475
© (2013) Trans Tech Publications, Switzerland
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.739.470

Effect of Al_2O_3 Nanoparticles Additives on Thermo-elastohydrodynamic with Newtonian Lubricant

Sountaree Rattapasakorn[1, a], Mongkol Mongkolwongrojn*[2, b]

[1,2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

[a]sountaree.t@bu.ac.th, [b]kmmongko@kmitl.ac.th

Keywords: Nanoparticles, Thermo-elastohydrodynamic, Modified Reynolds equation.

Abstract. This paper presents the effect of Al_2O_3 nanoparticles additives on thermo–elastohydrodynamic with Newtonian lubricant. The modified Reynolds equation and energy equation have been formulated and solved numerically with initial conditions using multi-grid multi-level method. Simulation results show the operating with Al_2O_3 nanoparticles blended particularly with SAE-90 lubricant. The maximum pressure and temperature decreases, as compared to SAE-90 oil without nanoparticles additives.

Introduction

Now, tribology is a wide ranging. The major objective is reducing material wear and increasing the lifetime of mechanical. Under elastohydrodynamic lubrication (EHL) condition the surface temperature is important factor for lubrication and lubricating film at nanoscale need ability to withstand shear stresses without being ruptured and repeated contacts for a long duration [1]. Dowson and Higginson [2] solved the numerical solution of EHL in 1959. The Newton-Raphson method was introduced to calculated EHL problem by Lee and Hamrock [3] in 1989. Jaw-Ren Lin [4] showed that couple stress fluid increase load carrying in the squeeze film when commpare with Newtonian lubricant. Mongkolwongrojn [5] investigated the film temperature and film thickness of lubricant in contact region under sudden load with non-Newtonian lubricant. In 2009 W.habchi and et al. [6] validated thermal EHL framework for the calculation of film thickness and friction to investigate the effects of variations in material properties.

Governing equation

In the steady state condition the dimensionless modified Reynolds equation in line contact is given as:

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\varepsilon\frac{\partial P}{\partial X}\right) = K\left(\frac{\partial}{\partial X}(\bar{\rho}H)\right) \tag{1}$$

Where

$$K = \bar{u}\mu_0 R_X^2/b^3 P_H \ , \qquad \varepsilon = \bar{\rho}H^3/\bar{\eta}$$

The boundary conditions is obtained as:

$$X = X_{in}\ , P = 0; \ \ X = X_{out}\ , P = \partial P/\partial X = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 115.87.56.168, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand-22/05/13,02:00:31)

Viscosity equation

The apparent viscosity of this research is the multiple of Newtonian lubrication and nanoparticles. The viscosity of Newtonian lubrication according to Roeland [7][8], which depend on pressure and temperature. For the viscosity of nanoparticles in this work use the Batchelor model [9] to dilute fluids dispersed with a solid sphere can be written as:

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_R . \bar{\mu}_{nf} \tag{2}$$

Where

$$\bar{\mu}_R = \exp\{(\ln(\mu_0) + 9.67)(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H P)^{z_1}) - \gamma T_0(\bar{\theta} - 1)\}$$

$$\bar{\mu}_{nf} = 1 + (2.5\phi) + (2.5\phi)^2$$

Density equation

The dimensionless density of Newtonian lubricant is determined by Dowson and Higginson[10].

$$\bar{\rho}_i = \left\{1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H P}\right\}\left(1 - \beta T_0(\bar{\theta} - 1)\right) \tag{3}$$

Film Thickness Equation

The dimensionless film thickness can be written as:

$$H_i = H_0 + \frac{X_i^2}{2} - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{j=0}^{N} P_j \left[\left|\frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j\right| \left|\frac{X_i + X_{i-1}}{2} - X_j\right|\right] \tag{4}$$

Energy Equation

The energy equation is evaluated [11] in the non-dimensional form:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = K_{T1}\left[\frac{\bar{\rho} H^2}{\bar{k}_p}\right]\left[U \frac{\partial \theta}{\partial X}\right] - K_{T2}\left[\frac{\bar{\mu}}{\bar{k}_p}\right]\left[\frac{\partial U}{\partial Z}\right]^2 - K_{T3}\left[\frac{\theta H^2}{\bar{k}_p}\right]\left[U \frac{\partial P}{\partial X}\right] \tag{5}$$

Where

$$K_{T1} = \frac{\bar{u} \rho_0 C_p b^3}{k_0 R_X^2}, K_{T2} = \frac{\mu_0 \bar{u}^2}{k_0 T_0}, K_{T3} = \frac{\beta \bar{u} b^3 P_H}{k_0 R_X^2}, \bar{k}_p = 1 + \frac{1.73 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 6.91 \times 10^{-9} P_H P}$$

The boundary conditions are:

$$\bar{\theta}_{S1/S2} = 1 + D_{1/2} \int_{X_{in}}^{X_i} \left[\frac{\bar{k}_p}{H}\right]\left[\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right]_{Z=0/1} \frac{dX'}{\sqrt{X_i - X'}}$$

$$D_{1/2} = \frac{k_0 R_X}{\sqrt{\pi \bar{u} \rho_{1/2} C_{p,1/2} k_{1/2} b^3 \left[1 \pm \frac{S_X}{2}\right]}}, \theta_{(X=0)} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Results and Discussion

This research solving the enhancement of nanoparticles in Newtonian lubricant with line contact by Newton-Raphson and multigrid method to obtain pressure, film thickness and film temperature in the contact region. The surfaces of roller, lubricant and nanoparticles properties for this calculated are given in Table 1 and Table 2.

Table 1 Physical properties of lubricant and roller material

Property	Roller	Property	SAE-90
Elasticity modulus, GPa	205	Inlet density, kg/m^3	892.80
Density, kg/m^3	7850	Inlet viscosity, Pa-s	0.1946
Poison ratio	0.30	Viscosity-Pressure index	0.5685
Specific heat, J/(kg-K)	475	Specific heat, J/(kg-K)	1870
Thermal conductivity, W/(m-K)	50.20	Thermal conductivity, W/(m-K)	0.126
Velocity of roller	0.96 m/s		

Table 2 Physical properties of alumina (Al_2O_3) [12]

Property	Alumina
Density, kg/m^3	3890
Specific heat, J/(kg-K)	729
Thermal conductivity, W/(m-K)	36

Fig. 1 compares the pressure distribution in various percentages of nanoparticles. The applied load and mean velocity of roller are 850,000 N/m and 0.96 m/s respectively. From the figure, it is observed that more addition of nanoparticles decrease the pressure spike at the exit in the contact region.

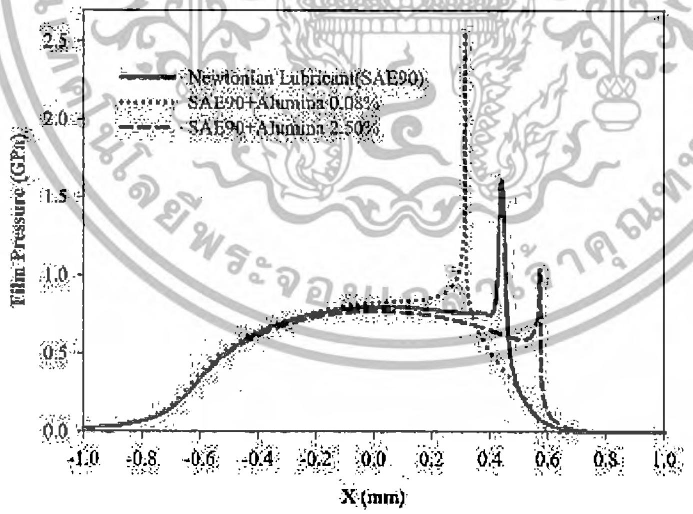


Fig. 1 Pressure profiles at various percentages of nanoparticles additives mixed in SAE-90.

Fig. 2 shows the influence of different percentages nanoparticles additives on the temperature of lubricant. The applied load and mean velocity of roller are 850,000 N/m and 0.96 m/s respectively. It is seen that addition of nanoparticles reduces the temperature rapidly. Fig. 3 shows the fluid film pressure profile, film thickness and film temperature profile in the contact region under applied load 850,000 N/m, rolling speed 0.96 m/s and percentages of nanoparticles additives 2.50% mixed in SAE-90. It is observed that the pressure spike occurs at the end of contact region and film temperature decreases at this point.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

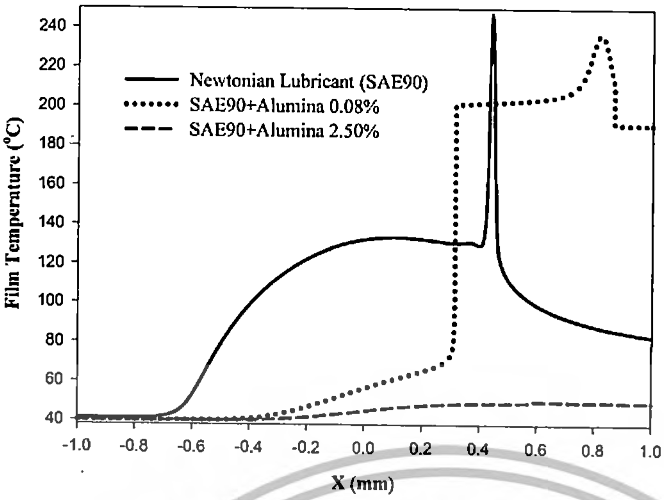


Fig.2 Temperature profiles at various percentages of nanoparticles additives mixed in SAE-90.

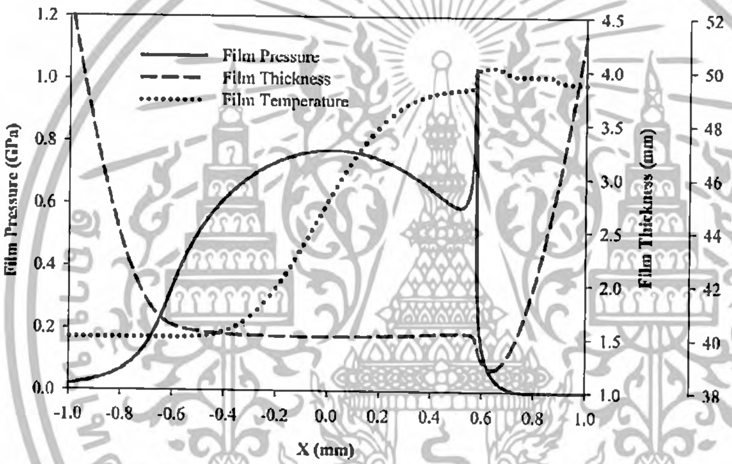


Fig.3 Pressure, film thickness and temperature profiles with nanoparticles additives mixed in SAE-90.

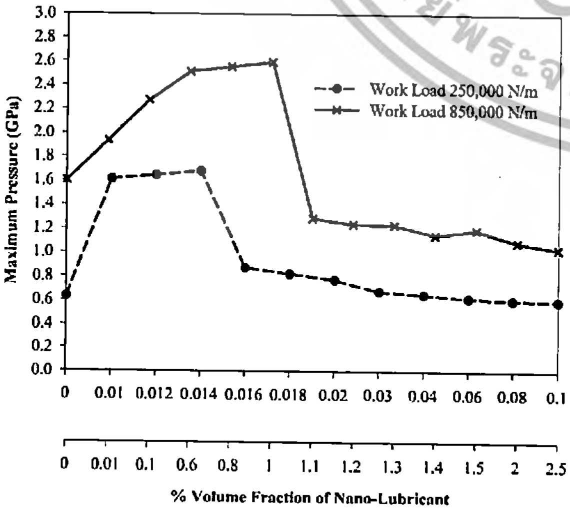


Fig.4 Comparison of maximum pressure at various percentages of nanoparticles additives mixed in SAE-90.

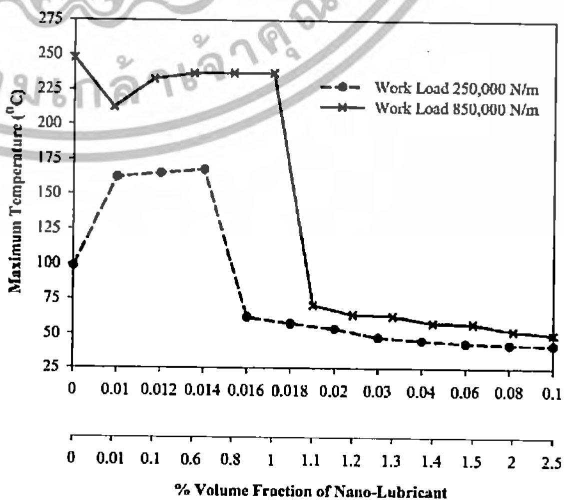


Fig.5 Comparison of maximum temperature at various percentages of nanoparticles additives mixed in SAE-90.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 4 shows the maximum pressure in the contact region for various concentrations of nanoparticles under applied load 250,000 N/m and 850,000 N/m with the same rolling speed 0.96 m/s. It is found that for applied load 250,000 N/m increases concentrations of nanoparticles more than 0.014 % volume fraction of nanoparticles, the maximum pressure is decreased. For increasing the applied load 850,000 N/m, the maximum pressure is decreased when concentrations of nanoparticles are higher than 1.0 % volume fraction of nanoparticles. The maximum film temperature profile of the applied load 250,000 N/m and 850,000 N/m are similar to the profile of maximum pressure as shown in Fig.5.

Conclusions

The two rollers in line contact under thermo-elastohydrodynamic with Al_2O_3 nanoparticles additives and Newtonian lubricant were examined and can be summarized as:

1. The maximum film pressure decreases with the sufficient concentration of Al_2O_3 nanoparticles.
2. The maximum film temperature decreases with the sufficient concentration of Al_2O_3 nanoparticles.
3. A decrease in temperature will occur at the end of contact region.
4. Adding unnecessary Al_2O_3 nanoparticles additives does not result in a decrease in pressure and temperature of lubricant.

Acknowledgment

This research was supported by grant from Thailand Research Fund; Grant No. BRG-5180019. The additional support was received through DSI, KMITL, NSTDA and Bangkok University Thailand.

Corresponding Author

Assc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand, kmmongko@kmitl.ac.th

Nomenclature

Z_1	Viscosity-Pressure index
μ	Equivalent viscosity, Pa-s
μ_0	Inlet viscosity, Pa-s
ρ	Density of lubricant, kg/m^3
ρ_0	Inlet density of lubricant ,kg/m^3
$\emptyset$	Concentration by volume of nanoparticles
b	Semi-width of Hertzian contact, m
H	Dimensionless film thickness
$\bar{k}_p$	Dimensionless thermal conductivity
P_H	Hertzian's contact pressure, Pa
R_X	Radii of curvature of Roller, m
T_0	Inlet temperature, K
$\bar{u}$	Mean velocity of roller, m/s
Z_1	Viscosity-Pressure index
$\bar{\mu}_s$	Dimensionless viscosity of Microfluid, Pa-s
β	Coefficient of thermal expansively, 1/K
$\bar{\theta}_s$	Dimensionless surface temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

[1] Stephen M. Hsu: Nanolubrication: *Concept and Design, in Nanotribology Critical Assessment and Research Needs*, Springer, New Delhi (2006), pp. 327-346.

[2] D. Dowson and G.R. Higginson: *Numerical Solution to Elastohydrodynamic Problem*, J. Mech. Eng. Sci., vol. 1 (1959), pp. 6-15.

[3] R. Lee and B. J. Hamrock: *Squeeze and Entraining Motion in Non-conformal Line Contacts Part II: Elastohydrodynamic Lubrication*, ASME J. Tribol., vol. 111 (1989), pp. 8-16.

[4] Jaw-Ren Lin: *Squeeze film characteristics of finite journal bearings: couple stress fluid model*, Tribology International, Vol. 31 (1998), pp 201–207.

[5] M. Mongkolwongrojn, C. Aiumpornsin and K. Thammakosol: *Theoretical Investigation in Thermoelastohydrodynamic Lubrication With Non-Newtonian Lubricants Under Sudden Load Change*, Journal of Tribology, vol. 128 (2006), pp. 771–777.

[6] W. Habchi and et al.: *Influence of pressure and temperature dependence of thermal properties of a lubricant on the behaviour of circular TEHD contacts*, Tribology International, Vol. 43 (2010), pp. 1842–1850.

[7] Roelands, C.J.A.: *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Rela-tionship of Lubricating Oils*, Druk, V.R.B., Groingen, Netherland (1969).

[8] H.G. Rylander : *A Theory of Liquid-Solid Hydrodynamic Film Lubrication*, ASLE Journal of the American Society of Lubrication Engineering (1966), pp.264-271.

[9] M. Chandrasekar, S. Suresh and A. Chandra Bose: *Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3/Water nanofluid*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34 (2010), pp.210-216.

[10] D. Dowson and G.R. Higginson: *Elastohydrody-namic Lubrication: The Fundamental of Roller and Gear Lubrication*, Pergamon, Oxford (1966).

[11] Hua, D. Y. and Khonsari, M. M.: *Elastohydrodynamic Lubrication by Powder Slurries, ASME J. Tribology*, Vol. 118 (1996), pp. 67-73.

[12] M. Javadi and M.Tajdari: *Experiment investigation of the friction coefficient between aluminium and steel*, Materials Science-Poland, Vol. 24 (2006), pp. 305-310.

จอมเกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advanced Materials Research Vols. 482-484 (2012) pp 1426-1430
Online available since 2012/Feb/27 at www.scientific.net
© (2012) Trans Tech Publications, Switzerland
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1426

Effect of Solid Particle on TEHL under Line Contact with Solid-Liquid Lubricant

S. Rattapasakorn[1, a] and M. Mongkolwongrojn[2, b]

[1, 2] Department of Mechanical Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

[a]sountaree.t@bu.ac.th, [b]kmmongko@kmitl.ac.th

Keywords: Microfluid lubricant, TEHL, Modified Reynolds equation, Energy equation

Abstract The two infinitely long surfaces in line contact under thermoelastohydrodynamic lubrication with solid-liquid lubricants were investigated. The time-dependent modified Reynolds equation elasticity equation and the adiabatic energy equation have been formulated and solved numerically with initial conditions using multi-grid multi-level method with full approximation technique. The characteristics of the two surfaces in line contact under thermoelastohydrodynamic lubrication were presented as; film pressure, film temperature and oil film thickness profiles. The results of solid-liquid lubricants with micro-particle and nano-particle under thermal elastohydrohynamic lubrication were compared with the case of pure liquid lubricant.

Introduction

The lubricant film on the solid surfaces of the machine components operated in severe conditions become very thin. Therefore, the lubricant containing solid particles has greatly improved the lubrication characteristics in order to protect the contact surfaces. The surface temperature is significant factor for lubricating film to withstand shear stresses without being ruptured and repeated contacts for a long duration [1]. Dowson and Higginson [2] solved the numerical solution of EHL in 1959. The Newton-Raphson method was introduced to calculated EHL problem by Lee and Hamrock [3] in 1989. Jaw-Ren Lin [4] showed that couple stress fluid increase load carrying in the squeeze film when commpare with Newtonian lubricant. Mongkolwongrojn and et al [5] investigated the film temperature and film thickness of the lubricant mixed with micro size solid particles in contact region under sudden load with non-Newtonian lubricant. In 2010 W. Habchi and et al. [6] validated thermal EHL framework for the calculation of film thickness and friction coefficient in order to investigate the effects of material properties. D.X. Peng and et al. [7] showed that diamond and SiO_2 nanoparticles as additive in liquid paraffin oil have better anti-wear and anti-friction properties than that for pure paraffin oil. Murched, Leong and Yang [8] founded that the effective thermal conductivity and viscosity of nanofluids were found to significantly increase with the particle volume fraction. Rattapasakorn and Mongkolwongrojn [9] showed a behavior of thin film lubricant with focusing on temperature effect of contact surface. It is found that the film pressure increase but film thickness decrease due to the temperature in the contact regime under TEHL. Therefore, the advantages of the solid particles are to minimize the effect of temperature on thin-film lubrication and to reduce wear in the contact region.

Governing equation

The time independent dimensionless modified Reynolds equation for infinitely long line contact can be expressed as:

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\varepsilon\frac{\partial P}{\partial X}\right) = K\left(\frac{\partial}{\partial X}(\bar{\rho}H)\right) \qquad (1)$$

Where

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = \bar{u}\mu_0 R_x^2 / b^3 P_H , \qquad \varepsilon = \bar{\rho} H^3 / \bar{\eta}$$

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 210.86.135.67-29/02/12,03:37:35)

The Boundary conditions are

$$X = X_{in} , P = 0; \quad X = X_{out} , P = \partial P/\partial X = 0$$

Viscosity equation

The viscosity of a Newtonian lubricant depends on pressure and temperature [10]. For the viscosity of liquid-solid lubrication in this work can be written as [11], [12]

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_R . \bar{\mu}_s \tag{2}$$

Where

$$\bar{\mu}_R = \exp\{(\ln(\mu_0) + 9.67)(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H P)^{Z_1}) - \gamma T_0(\bar{\theta} - 1)\}$$

Density equation

The dimensionless density of Newtonian lubricant according to Dowson and Higginson[13] is followed as

$$\bar{\rho}_i = \left\{1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H P}\right\}\left(1 - \beta T_0(\bar{\theta} - 1)\right) \tag{3}$$

Film Thickness Equation

Including the deformation of the surfaces under line contact the dimensionless film thickness equation can be written as

$$H_i = H_0 + \frac{X_i^2}{2} - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{j=0}^{N} P_j \left[\left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \left| \frac{X_i + X_{i-1}}{2} - X_j \right| \right] \tag{4}$$

Energy Equation

The dimensionless energy equation under line contact according to Hua and Khonsari [14] can be obtained as

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = K_{T1}\left[\frac{\bar{\rho} H^2}{\bar{k}_p}\right]\left[U \frac{\partial \theta}{\partial X}\right] - K_{T2}\left[\frac{\bar{\mu}}{\bar{k}_p}\right]\left[\frac{\partial U}{\partial Z}\right]^2 - K_{T3}\left[\frac{\theta H^2}{\bar{k}_p}\right]\left[U \frac{\partial P}{\partial X}\right] \tag{5}$$

Where

$$K_{T1} = \frac{\bar{u} \rho_0 C_p b^3}{k_0 R_X^2}, K_{T2} = \frac{\mu_0 \bar{u}^2}{k_0 T_0}, K_{T3} = \frac{\beta \bar{u} b^3 P_H}{k_0 R_X^2}, \bar{k}_p = 1 + \frac{1.73 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 6.91 \times 10^{-9} P_H P}$$

The Boundary conditions are

$$\bar{\theta}_{S1/S2} = 1 + D_{1/2} \int_{X_{in}}^{X_i} \left[\frac{\bar{k}_p}{H}\right]\left[\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right]_{Z=0/1} \frac{dX'}{\sqrt{X_i - X'}}$$

$$D_{1/2} = \frac{k_0 R_X}{\sqrt{\pi \bar{u} \rho_{1/2} C_{p,1/2} k_{1/2} b^3 \left[1 \pm \frac{S_X}{2}\right]}}, \theta_{(X=0)} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Numerical Solution

This research is to solve the effect of particles in solid-liquid lubricant in line contact using Newton-Raphson and multi-grid multi-level method to obtain film pressure, film thickness and film temperature in the contact region. The surfaces of roller and the solid-liquid lubricant properties for the calculated are given in Table 1 and Table 2.

Table 1 Physical properties of lubricant and roller material

Property	Roller	Property	SAE-90
Elasticity modulus, GPa	205	Inlet density, kg/m^3	892.80
Density, kg/m^3	7850	Inlet viscosity, Pa-s	0.1946
Poison ratio	0.30	Viscosity-Pressure index	0.5685
Specific heat, J/(kg-K)	475	Specific heat, J/(kg-K)	1870
Thermal conductivity, W/(m-K)	50.20	Thermal conductivity, W/(m-K)	0.126

Table 2 Physical properties of Alumina [15]

Property	Alumina
Density, kg/m^3	3890
Specific heat, J/(kg-K)	729
Thermal conductivity, W/(m-K)	36
Friction Coefficient steel-alumina	0.60
Hardness, GPa	14.124

Results and Discussion

In this research, the two surfaces in line contact under thermal elastohydrodynamic lubrication with SAE-90 oil mixed with alumina particles were investigated. The applied load and mean velocity of roller are 250,000 N/m and 0.96 m/s respectively. The particle size is 2 μm in diameter and percentage of volume fraction is 0.01%. The results show that the film temperature profile and the film pressure profile are almost similar shape but the film temperature decreases rapidly at the exit in the contact region and remained stable at approximately 50 °C. Near the exit of contact region, pressure spike occurs and increases up to 0.641 GPa for film thickness and film temperature at 1.416 μm and 99.14 °C respectively.

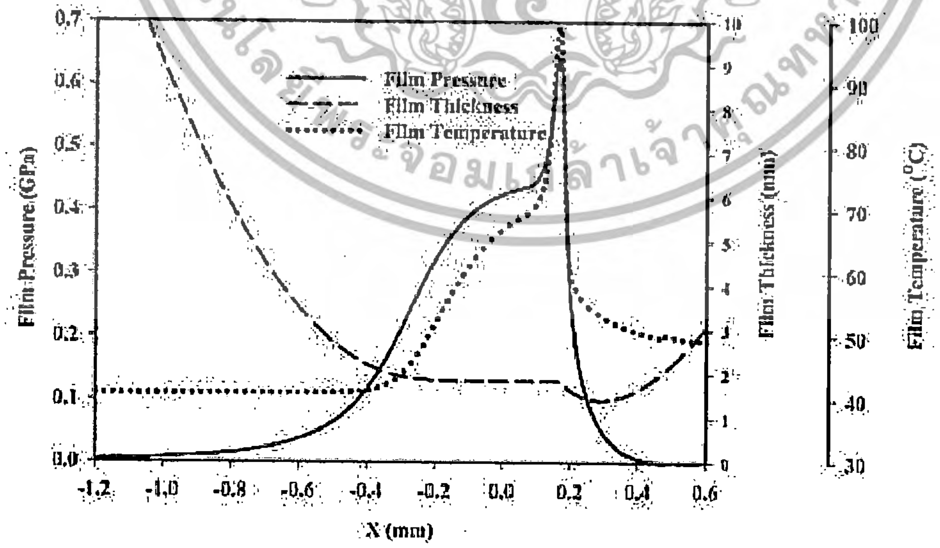


Fig.1 Film pressure, film thickness and temperature profiles for 2 μm alumina particles mixed with SAE-90.

In Figure 2, the maximum pressure of the film pressure profile is 0.635 GPa at x = 0.141 mm for SAE 90 and SAE 90 mixed with micro size particles but the maximum film pressure is only 0.599 GPa at x = 0.222 mm for SAE 90 mixed with nano size particles.

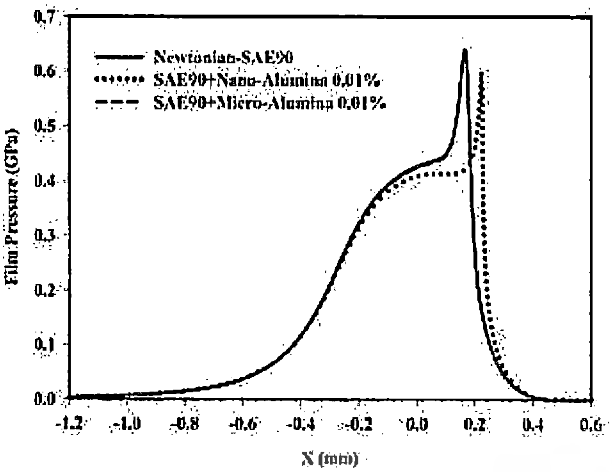


Fig.2 Pressure profiles at various lubricant.

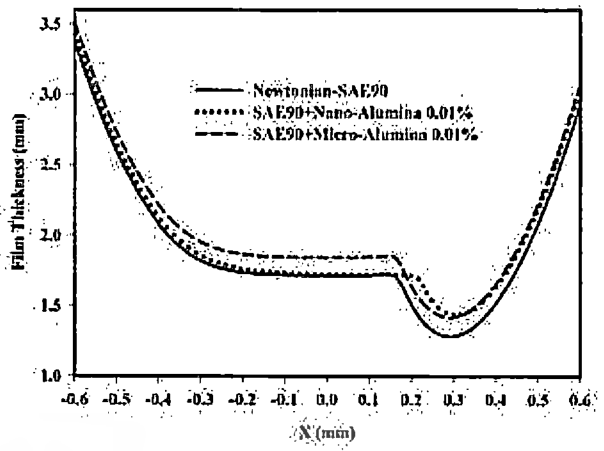


Fig.3 Film thickness profiles at various lubricant.

The minimum film thickness for SAE 90 is 1.282 μm. For SAE 90 mixed with micro size particles and SAE 90 mixed with nano size particles, the minimum film thickness are 1.416 μm and 1.437 μm respectively as shown in Figure 3. Figure 4 shows the maximum temperature for SAE 90 oil, and SAE 90 mixed with micro size particles are both equal to 100 °C. The maximum temperature is 42.05 °C for SAE 90 mixed with nano size particles.

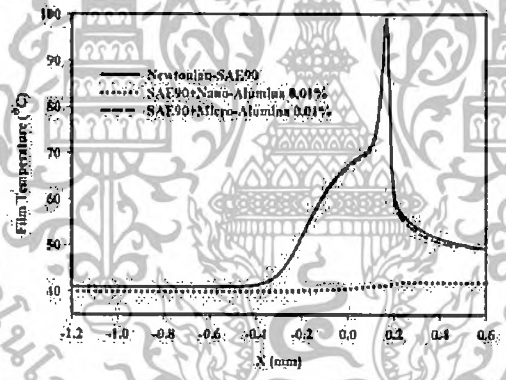


Fig.4 Film temperature profiles at various lubricant.

Conclusions

The transient thermoelastohydrodynamic lubrication characteristics of two surfaces line contact with liquid-solid non-Newtonian fluids were examined numerically. The main results presented can be summarized as:

1. For Sae 90 mixed micro size particles, The film pressure profile, film thickness profile and film temperature profile are almost identical with that for SAE 90 lubricant.
2. For Sae 90 mixed nano size particles, The film temperature decreases rapidly and the maximum temperature position shift to the exit region.

Acknowledgment

This research was supported by grant from Thailand Research Fund; Grant No. BRG-5180019. The additional support was received through DSI, KMITL, NSTDA and Bangkok University Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nomenclature

b	Semi-width of Hertzian contact, m	μ_0	Inlet viscosity, Pa-s
H	Dimensionless film thickness	$\bar{\mu}_s$	Dimensionless viscosity of Microfluid, Pa-s
$\bar{k}_p$	Dimensionless thermal conductivity	ρ_0	Inlet density of lubricant ,kg/m^3
P_H	Hertzian's contact pressure, Pa	β	Coefficient of thermal expansively, 1/K
R_x	Radii of curvature of Roller, m	$\bar{\theta}_s$	Dimensionless surface temperature
T_0	Inlet temperature, K		
$\bar{u}$	Mean velocity of roller, m/s		
Z_1	Viscosity-Pressure index		

References

[1] Stephen M. Hsu: Nanolubrication: *Concept and Design, in Nanotribology Critical Assessment and Research Needs*, Springer, New Delhi (2006), pp. 327-346.

[2] D. Dowson and G.R. Higginson: *Numerical Solution to Elastohydrodynamic Problem*, J. Mech. Eng. Sci., vol. 1 (1959), pp. 6-15.

[3] R. Lee and B. J. Hamrock: *Squeeze and Entraining Motion in Non-conformal Line Contacts Part II: Elastohydrodynamic Lubrication*, ASME J. Tribol., vol. 111 (1989), pp. 8-16.

[4] Jaw-Ren Lin: *Squeeze film characteristics of finite journal bearings: couple stress fluid model*, Tribology International, Vol. 31 (1998), pp. 201–207.

[5] M. Mongkolwongrojn, C. Aiumpornsin and K. Thammakosol: *Theoretical Investigation in Thermoelastohydrodynamic Lubrication With Non-Newtonian Lubricants Under Sudden Load Change*, Journal of Tribology, vol. 128 (2006), pp. 771–777.

[6] W. Habchi and et al.: *Influence of pressure and temperature dependence of thermal properties of a lubricant on the behaviour of circular TEHD contacts*, Tribology International, Vol. 43 (2010), pp. 1842–1850.

[7] D. X. Peng and et al.: *Tribological properties of diamond and SiO_2 nanoparticles added in paraffin*, Tribology International, Vol. 42 (2009), pp. 911–917.

[8] S.M.S Murshed, K.C. Leong and C. Yang: *Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids*, International Journal of Thermal Science, Vol. 47 (2008), pp. 560–568.

[9] S. Rattapasakorn and M. Mongkolwongrojn: *Analysis of Two Surfaces in line contact under TEHL with Non-Newtonian Lubricants*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 148-149 (2012), pp.736-742.

[10] Roelands, C.J.A.: *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Rela-tionship of Lubricating Oils*, Druk, V.R.B., Groingen, Netherland (1969).

[11] M. Chandrasekar, S. Suresh and A. Chandra Bose: *Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3/Water nanofluid*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34 (2010), pp.210-216.

[12] H.G. Rylander : *A Theory of Liquid-Solid Hydrodynamic Film Lubrication*, ASLE Journal of the American Society of Lubrication Engineering (1966), pp.264-271.

[13] D. Dowson and G.R. Higginson: *Elastohydrody-namic Lubrication:The Fundamental of Roller and Gear Lubrication*, Pergamon, Oxford (1966).

[14] Hua, D. Y. and Khonsari, M. M.: *Elastohydrodynamic Lubrication by Powder Slurries, ASME J. Tribology*, Vol. 118 (1996), pp. 67-73.

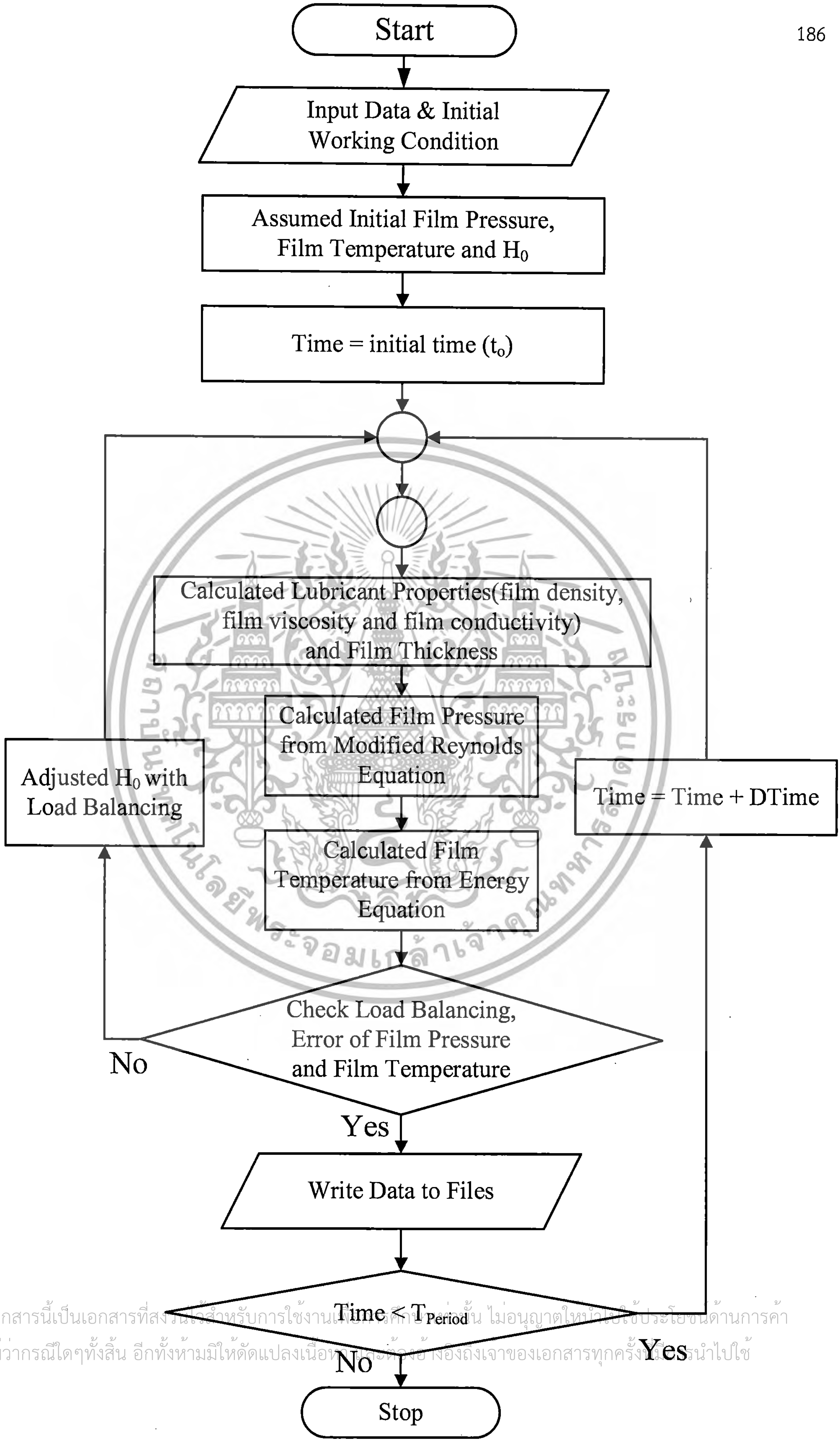
[15] M. Javadi and M.Tajdari: *Experiment investigation of the friction coefficient between aluminium and steel*, Materials Science-Poland, Vol. 24 (2006), pp. 305-310.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Flow Chart ของการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสุนทรี รัตภาสกร
วัน เดือน ปีเกิด	31 สิงหาคม 2514
ที่อยู่	99/134 ถนน 347 ตำบลเชียงรากใหญ่ อำเภอสามโคก จังหวัดปทุมธานี 12160
ประวัติการศึกษา	2536 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	2540 วิศวกรรมศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

2555	: Analysis of Two Surfaces in line contact under TEHL with Non-Newtonian Lubricants, Applied Mechanics and Materials Vols. 148-149 (2012) pp. 778-784.
	: Effect of Solid Particle on TEHL under Line Contact with Solid-Liquid Lubricant, Advanced Materials Research Vols. 482-484 (2012) pp. 1426-1430.
2556	: Effect of Al_2O_3 Nanoparticles Additives on Thermo-Elastohydrodynamic with Newtonian Lubricant, Advanced Materials Research Vol. 739 (2013) pp. 470-475.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้