

การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรง
ด้วยน้ำมันผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง

THERMOELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF SPUR GEAR
TEETH IN LINE CONTACT
WITH LIQUID-SOLID LUBRICANTS

เจษฎา พานิชกรณ์
JESDA PANICHAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรง
ด้วยน้ำมันผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง

THERMOELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF SPUR GEAR
TEETH IN LINE CONTACT
WITH LIQUID-SOLID LUBRICANTS



เจษฎา พานิชกรณ์

JESDA PANICHAKORN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....69089
วัน,เดือน,ปี.....- 7 ก.พ. 2550

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**THERMOELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF SPUR GEAR
TEETH IN LINE CONTACT
WITH LIQUID-SOLID LUBRICANTS**

JESDA PANICHAKORN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรงด้วยน้ำมัน
ผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง
Thermoelastohydrodynamic Lubrication of Spur Gear Teeth in Line Contact
with Liquid-Solid Lubricants

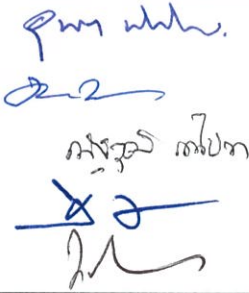
นักศึกษา นายเจษฎา พานิชกรณ

รหัสประจำตัว 45060615

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อนุรัตน์	พินิจโสภณ	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ดร.ณัฐวุฒิ	เดโชพา	
รศ.ดร.ศิริศักดิ์	หาญชูวงศ์	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 ธันวาคม 2549 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....16.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรง ด้วยน้ำมันผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง
นักศึกษา	นายเจษฎา พานิชกรณั
รหัสนักศึกษา	45060615
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ของเฟืองฟันตรง ซึ่งสัดส่วนของความโค้งที่ผิวสัมผัส จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทำการศึกษาในกรณี ที่สารหล่อลื่นเป็นแบบน้ำมันผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง (MoS_2) ซึ่งมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน การศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้การจำลองด้วยวิธีคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข โดยใช้วิธีของนิวตันราฟสัน เพื่อหาการกระจายของความดัน การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความหนืด และการกระจายของความหนาแน่น ของฟิล์มสารหล่อลื่น รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการทำงานของเฟืองฟันตรง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง ภาระที่กระทำ ความเร็วรอบในการทำงานของเฟือง ความหยาบของผิวฟันเฟือง ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงไป ในสารหล่อลื่น และขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ในสารหล่อลื่น

จะพบว่า เมื่อผสมสารหล่อลื่นของแข็งลงไป ในสารหล่อลื่น จะทำให้ความดันฟิล์มของสารหล่อลื่นลดลง แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อฟันเฟืองรับภาระเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลง เมื่อฟันเฟืองทำงานที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าลดลง เมื่อความหยาบของผิวฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงกับความหยาบของผิวฟันเฟือง เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงไป ในสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันฟิล์มของสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าลดลง เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ในสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลง ความดันฟิล์มของสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น

Thesis Title	Thermoelastohydrodynamic lubrication of spur gear teeth in line contact with liquid-solid lubricants
Student	Mr. Jesda Panichakorn
Student ID	45060615
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Programme	Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Dr. Mongkol Mongkolwongrojn , Assc. Prof.

ABSTRACT

This research presents the study of thermoelastohydrodynamic characteristics of gear teeth in line contact included surface roughness in spur gear with non-Newtonian liquid-solid lubricants. The time dependent Reynolds equation, energy equation and elastic equation were formulated for compressible fluid. Newton-Raphson method was implemented to obtain the film pressure, film temperature, film thickness, viscosity and density profile in the contact region as well as friction coefficient at various loads , speeds , teeth surface roughness , concentration of solid lubricant in liquid-solid lubricants and size of solid lubricant in liquid-solid lubricants.

The simulation results show that film thickness increase but film pressure decrease when lubricant was liquid-solid lubricant compared that for liquid lubricant. For increasing the surface roughness, film thickness decrease and film pressure profile strongly depended on tooth surface roughness amplitude. As the loads increase, the film pressure, film temperature and friction coefficient increase but film thickness decreases. For increasing of the gear speeds, film temperature and film thickness increase but friction coefficient decrease. For increasing concentration of solid lubricant in liquid-solid lubricants, film thickness increase but film pressure, film temperature and friction coefficient decrease. For increasing size of solid particles in liquid-solid lubricants, the film thickness decrease but film pressure , film temperature and friction coefficient increase due to small load on solid particles.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ พุทธา จินครวั ที่ช่วยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำงานของเฟืองฟันตรง

ขอขอบคุณ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว ที่ช่วยให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม

ขอขอบคุณ โครงการสำนักวิจัยเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูและอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เจษฎา พานิชกรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XXV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 สารหล่อลื่น	4
2.1 น้ำมันหล่อลื่น	4
2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น	10
2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น	11
2.4 สารหล่อลื่นของแข็ง	12
บทที่ 3 ชนิดฟันเฟือง	15
3.1 เฟืองตรง	15
3.2 เฟืองเฉียง	15
3.3 เฟืองดอกจอก	16
3.4 ชุดเฟืองหนอน	16
3.5 วิธีการผลิตเฟือง	17
3.5.1 มิลลิ่งคัตเตอร์	18
3.5.2 แร็คคัตเตอร์	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 ฟิเนียนคัตเตอร์.....	18
3.5.4 ส้อบบิง	19
บทที่ 4 คุณสมบัติวัสดุของพื้นเพื่องและความหยาบผิว	20
4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	20
4.1.1 ความเค้น ความเครียด	20
4.1.2 มอดุลัสความยืดหยุ่น	22
4.1.3 อัตราส่วนปัวซอง	23
4.1.4 ความเหนียว	24
4.1.5 ความแกร่ง	25
4.1.6 ความแข็ง	25
4.2 ความหยาบผิวของพื้นเพื่อง	26
4.2.1 ลักษณะทางเลขาคณิตของพื้นผิว	26
4.2.2 การวัดด้วยปลายปากกาแหลม	27
4.2.3 เครื่องมือวัดผิวที่ไม่มีการสัมผัสโดยตรง	28
4.2.4 เส้นอ้างอิง	29
4.2.5 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องใช้ในการคำนวณพื้นผิว	30
บทที่ 5 การหล่อลื่นเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของพื้นเพื่อง	36
5.1 ลักษณะกายภาพของพื้นเพื่องตรง	36
5.2 สมมุติฐานของเฮิร์ตซ์	38
5.3 สมการเรย์โนลด์	38
5.4 สมการความหนาฟิล์ม	43
5.5 สมการความหนาแน่นและความหนืด	44
5.6 สมการพลังงาน	45
5.7 สมการการนำความร้อนของสารหล่อลื่น	47
5.8 ภาระที่รับ (Load carrying capacity)	47
5.9 สมการสมดุลย์แรง	49
5.10 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 วิธีเชิงตัวเลข	51
6.1 การแก้สมการเรย์โนลด์ โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง	51
6.2 การแก้สมการพลังงาน โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง	52
6.3 วิธีนิวตันราฟสัน	54
บทที่ 7 ผลการจำลอง	59
7.1 การจำลองผลการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรง	60
7.2 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง	73
7.3 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่ฟันเฟืองได้รับ	89
7.4 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ การทำงานฟันเฟือง	107
7.5 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MoS_2	127
7.6 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ MoS_2	138
7.7 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของ สารหล่อลื่นของแข็ง	143
7.8 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio)	152
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	180
8.1 สรุปผลการวิจัย	180
8.2 ข้อเสนอแนะ	182
บรรณานุกรม	183
ภาคผนวก	186
ภาคผนวก ก FLOW CHART การทำงานของโปรแกรม	187
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	189
ประวัติผู้เขียน	193

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าที่ใช้ในการหาดัชนีความหนัก	8
4.1 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น มอดูลัสเฉือน และ อัตราส่วนปัวซอง ของโลหะบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง	22
7.1 แสดงค่าคุณสมบัติของเฟืองขับและเฟืองตาม	59
7.2 แสดงค่าคุณสมบัติของสารหล่อลื่น	59
7.3 แสดงค่าคุณสมบัติของสารหล่อลื่นของแข็ง	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของกราไฟต์	12
2.2 แสดงลักษณะโครงสร้าง PTFE	13
2.3 แสดงลักษณะด้านข้างและส่วนปลายของโมเลกุลของ PTFE	13
2.4 แสดงโครงสร้างของโมลิตินัมไดไฮไดรด์	14
3.1 แสดงลักษณะของพื้นเพื่องตรง	15
3.2 แสดงลักษณะของเพื่องเฉียง	16
3.3 แสดงลักษณะพื้นเพื่องคอกจอก	16
3.4 แสดงลักษณะของชุดเพื่องคั่วหนอน	17
3.5 แสดงการทำงานของเร็คคัตเตอร์	18
3.6 แสดงการทำงานของฮีอบบิง	19
4.1 แสดงเครื่องทดสอบและวัสดุที่ใช้การทดสอบ	21
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	23
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปัวซอง	23
4.4 แสดงความแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวกับวัสดุเปราะ	24
4.5 แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบ	27
4.6 แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบที่อาจทำให้การวัดผิดพลาด	27
4.7 เปรียบเทียบเส้นอ้างอิง 3 แบบ a.) ระบบ M b.) ค่าเฉลี่ย 10 จุด c.) กำลังสองน้อยสุด	30
4.8 แสดงโค้งแอมบอทของพื้นผิวสองแบบที่แตกต่างกัน	32
4.9 แสดงการหาความโค้งน่าจะเป็นจากผิวหยาบที่วัดได้	33
5.1 แสดงลักษณะการขบกันของพื้นเพื่องตรง	36
5.2 แสดงระยะรัศมีวงกลมพิตช์ของเพื่องขับและเพื่องตามของพื้นเพื่องตรง	37
5.3 แสดงแรงที่กระทำต่อออลิเมนต์ของของไหล	39
5.4 แสดงระบบพิกัดและเงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์	40
6.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด	51
7.1 แสดงค่าสัดส่วนของภาระ C_{WT} ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อง	60
7.2 แสดงค่าสัดส่วนของความโค้ง C_{RT} ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อง	61
7.3 แสดงค่าสัดส่วนของความเร็ว C_{UT} ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อง	61
7.4 แสดงค่า SLIP RATIO ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อง	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.5 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ ตำแหน่งทางเข้า ตำแหน่งพิตช์ และที่ตำแหน่งทางออก	63
7.6 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง	63
7.7 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง	64
7.8 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาแน่น ของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง	65
7.9 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาหน้าผกของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง	65
7.10 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง	66
7.11 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด เทียบกับค่า SLIP RATIO ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง	66
7.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง	67
7.13 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นใน ช่วงทางเข้า ของการขบของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน ..	68
7.14 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า ของการขบของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน	68
7.15 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นใน ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับ เมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน	69
7.16 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า ของการขบของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน	69
7.17 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน	70
7.18 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน	71
7.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS ₂ ลงไปในน้ำมัน	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.20 แสดงค่าการรับภาระของอนุภาคที่เติมลงไปใต้น้ำมัน และ อัตราส่วนภาระ ที่พื้นเฟืองได้รับ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง	72
7.21 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	73
7.22 แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	74
7.23 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	74
7.24 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางออก เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	75
7.25 แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออก เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	75
7.26 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออก เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	76
7.27 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	77
7.28 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	77
7.29 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง เมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	78
7.30 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ในช่วงทางเข้า ของการขบของพื้นเฟือง เปรียบเทียบกับ เมื่อเติม MoS_2 ลงใต้น้ำมัน	79
7.31 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ในช่วงทางเข้า ของการขบของพื้นเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS_2 ลงใต้น้ำมัน	79
7.32 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ในช่วงทางออก ของการขบของพื้นเฟือง เปรียบเทียบกับ เมื่อเติม MoS_2 ลงใต้น้ำมัน	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.33	แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ในช่วงทางออก ของการขับของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 80
7.34	แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขับต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวของฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 81
7.35	แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขับต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อพิจารณา ความหยาบของผิวฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 82
7.36	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขับต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อพิจารณา ความหยาบของผิวฟันเฟือง เปรียบเทียบกับเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 82
7.37	แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วง ทางเข้า เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 83
7.38	แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 84
7.39	แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้า เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 84
7.40	แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วง ทางออก เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 85
7.41	แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางออก เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 85
7.42	แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางออก เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 86
7.43	แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขับต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 86
7.44	แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขับต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 87
7.45	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขับต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.46 แสดงการรับภาระของอนุภาค ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟืนเฟือง เมื่อผิวของฟืนเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน	88
7.47 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟืนเฟือง เมื่อผิวของฟืนเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	89
7.48 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟืนเฟือง เมื่อผิวของฟืนเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	89
7.49 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟืนเฟือง เมื่อผิวของฟืนเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	90
7.50 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟืนเฟือง เมื่อผิวของฟืนเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ	90
7.51 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟืนเฟือง	91
7.52 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟืนเฟือง	92
7.53 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟืนเฟือง	92
7.54 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟืนเฟือง	93
7.55 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟืนเฟือง เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ	94
7.56 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟืนเฟือง เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ	94
7.57 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟืนเฟือง เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ	95
7.58 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นกรณีผิวหยาบ เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟืนเฟือง	95
7.59 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อฟืนเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟืนเฟือง	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.60 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นกรณีผิวหยาบ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นเพื่อ	96
7.61 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นเพื่อ	97
7.62 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อ กรณีผิวหยาบ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ	97
7.63 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อ กรณีผิวหยาบ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ	98
7.64 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อ กรณีผิวหยาบ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ	98
7.65 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเพื่อ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	99
7.66 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเพื่อ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	100
7.67 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นเพื่อ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	100
7.68 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นเพื่อ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	101
7.69 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	102
7.70 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	102
7.71 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่อ เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.72 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	103
7.73 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นกรณีผิวหยาบ เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	104
7.74 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	104
7.75 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นกรณีผิวหยาบ เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	105
7.76 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	105
7.77 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น.....	106
7.78 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	107
7.79 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	107
7.80 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	108
7.81 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็ว ในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	109
7.82 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบ ในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	110
7.83 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็ว ในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.84 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบ ในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	109
7.85 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ.....	111
7.86 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ.....	112
7.87 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ.....	112
7.88 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นกรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	113
7.89 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	114
7.90 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นกรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	114
7.91 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	115
7.92 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ.....	115
7.93 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ.....	116
7.94 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ.....	116
7.95 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

7.96	แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	118
7.97	แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	118
7.98	แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	119
7.99	แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน	120
7.100	แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน	120
7.101	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน	121
7.102	แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน	121
7.103	แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิว หยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	122
7.104	แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	123
7.105	แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิว หยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	123
7.106	แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะ การขบของฟันเฟืองเมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.107 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 125	125
7.108 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 125	125
7.109 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 126	126
7.110 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมัน 126	126
7.111 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง 127	127
7.112 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง 128	128
7.113 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง 128	128
7.114 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง 129	129
7.115 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ 129	129
7.116 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ 130	130
7.117 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ 130	130
7.118 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ 131	131
7.119 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง 132	132
7.120 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน กรณีผิวหยาบ ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง 132	132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.121 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	133
7.122 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน กรณีผิวหยาบ ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	133
7.123 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	134
7.124 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	134
7.125 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	135
7.126 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	135
7.127 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด ในการทำงานของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	136
7.128 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	137
7.129 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟือง ที่ความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ	137
7.130 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	138
7.131 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	139
7.132 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	139
7.133 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	140
7.134 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ.....	140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.135 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ.....	141
7.136 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ.....	141
7.137 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS ₂ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ.....	142
7.138 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	143
7.139 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน กรณีผิวหยาบ ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	143
7.140 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	144
7.141 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน กรณีผิวหยาบ ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	144
7.142 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ	145
7.143 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ	145
7.144 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ.....	146
7.145 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS ₂ กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ	146
7.146 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ	147
7.147 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด ในการทำงานของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ	148
7.148 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟือง ที่ขนาดของ MoS ₂ ต่างๆ	148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.149 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด ในการทำงานของฟ้นเฟือง ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ	149
7.150 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟ้นเฟือง	150
7.151 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟ้นเฟือง	151
7.152 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟ้นเฟือง	151
7.153 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟ้นเฟือง	152
7.154 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟ้นเฟือง เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ	152
7.155 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟ้นเฟือง เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ	153
7.156 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟ้นเฟือง เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ	153
7.157 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟ้นเฟือง เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ	154
7.158 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟ้นเฟือง	155
7.159 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟ้นเฟือง	155
7.160 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟ้นเฟือง	156
7.161 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟ้นเฟือง	156

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.162 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ 157	157
7.163 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุดกรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ 157	157
7.164 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ 158	158
7.165 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS ₂ กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อใช้ สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ 158	158
7.166 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว 159	159
7.167 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว 160	160
7.168 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว 160	160
7.169 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นผิว 161	161
7.170 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นผิว 161	161
7.171 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นผิว 162	162
7.172 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว..... 162	162
7.173 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว..... 163	163
7.174 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว..... 163	163
7.175 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผิว ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว 164	164

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.176 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	165
7.177 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง	165
7.178 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	166
7.179 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	166
7.180 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง	167
7.181 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง.....	167
7.182 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง.....	168
7.183 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง.....	168
7.184 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	169
7.185 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	170
7.186 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	170
7.187 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	171

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.188 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	171
7.189 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	172
7.190 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	172
7.191 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	173
7.192 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	173
7.193 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	174
7.194 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	175
7.195 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	175
7.196 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	176
7.197 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	176
7.198 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น	177

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.199	แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น กรณีผิวหยาบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น 177
7.200	แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น 178
7.201	แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น 178
7.202	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น 179
7.203	แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 กรณีผิวหยาบ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อเติม MoS_2 ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น 179

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด , m^2	
b	ความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัส , m	$b = R_0 \left(\frac{8W'_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$
C_{RT}	สัดส่วนความโค้งที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับตำแหน่ง Pitch	$C_{RT} = \frac{R_X}{R_0}$
C_{UT}	สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับตำแหน่ง Pitch	$C_{UT} = \frac{\bar{u}}{u_0}$
C_{WT}	สัดส่วนภาระที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับตำแหน่ง Pitch	$C_{WT} = \frac{w'}{w_0}$
C_p	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาค , J/(kg-K)	
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาค , m	
$d(x)$	ฟังก์ชันความหนาของผิว , m	
$d_p(x)$	ฟังก์ชันความหนาของผิวเพื่องขับ , m	
$d_G(x)$	ฟังก์ชันความหนาของผิวเพื่องตาม , m	
$D(\bar{X})$	ฟังก์ชันความหนาของผิวแบบไม่มีหน่วย	
$D_p(\bar{X})$	ฟังก์ชันความหนาของผิวเพื่องขับแบบไม่มีหน่วย	$D_p(\bar{X}) = Z_M \sin \left(\frac{2\pi \bar{X}}{C_1} \right)$
$D_G(\bar{X})$	ฟังก์ชันความหนาของผิวเพื่องตามแบบไม่มีหน่วย	$D_p(\bar{X}) = Z_M \sin \left(\frac{2\pi \bar{X}}{C_2} \right)$
E	โมดูลัสความยืดหยุ่นของผิว , Pa	
E'	โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของพื้นเพื่อง , Pa	$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1-\nu_A^2)}{E_A} + \frac{(1-\nu_B^2)}{E_B} \right]$
E'_{PS}	โมดูลัสความยืดหยุ่นของพื้นเพื่องกับสารหล่อลื่นของแข็ง , Pa	$\frac{1}{E'_{PS}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\nu_P^2}{E_P} - \frac{1-\nu_S^2}{E_S} \right]$
f_p	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งและผิวสัมผัส	
h	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใดๆ , m	
h_0	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งกึ่งกลาง , m	
$\bar{h}$	ความหนาฟิล์มไร้มิติ	$\bar{h} = h \left(\frac{R_0}{b^2} \right)$
$\bar{h}_0$	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งกึ่งกลางไร้มิติ	$\bar{h}_0 = h_0 \left(\frac{R_0}{b^2} \right)$
$\bar{H}$	ความหนืดเชิงโพลีสากล ของน้ำมันมาตรฐานที่ VI = 100	

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

I_2	ค่ากำลังสองของอัตราความเครียดเฉือน	
K	ค่าคงที่ในสมการเรย์โนลด์	$K = \frac{u_0 \mu_0 R_0^2}{b^3 P_H}$
k	ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่น , W/(m-K)	
k_0	ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศ , W/(m-K)	
$\bar{k}_p$	ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ	$\bar{k} = \frac{k}{k_0}$
K_1	ค่าคงที่ในสมการพลังงาน	$K_{T1} = \left(\frac{\bar{u} \rho_0 C_p b^3}{k_0 R_0^2} \right)$
K_2	ค่าคงที่ในสมการพลังงาน	$K_{T2} = \left(\frac{\eta_0 \bar{u}^2}{k_0 T_0} \right)$
K_3	ค่าคงที่ในสมการพลังงาน	$K_{T3} = \left(\frac{\beta \bar{u} b^3 P_H}{k_0 R_0^2} \right)$
K_4	ค่าคงที่ในสมการพลังงาน	$K_{T4} = \left(\frac{2 f_p u_0 E' b}{k_0 T_0} \right)$
$\bar{L}$	ความหนืดเชิงโพลีแซกัล ของน้ำมันมาตรฐานที่ $VI = 0$	
m_0	พาวเวอร์ลอร์แฟกเตอร์ที่อุณหภูมิอ้างอิง , Pa-s	
$\bar{m}$	ค่าความชัน	
n	ดัชนีเพาเวอร์ลอร์	
N	จำนวนกริดที่แบ่งในการคำนวณ	
p	ความดัน , Pa	
$\bar{P}$	ความดันไร้มิติ	$\bar{P} = \frac{p}{P_H}$
P_H	ความดันสูงสุดในการสัมผัสของ Hertz , Pa	$P_H = E' \left(\frac{W'_0}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$
R_0	รัศมีความโค้งเฉลี่ย ที่ตำแหน่ง Pitch , m	$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_p \sin(\varphi)} + \frac{1}{R_g \sin(\varphi)}$
R_0	รัศมีความโค้งเฉลี่ย ที่ตำแหน่ง Pitch , m	$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{R_{PX}} + \frac{1}{R_{GX}}$
R_p	รัศมีของวงกลมพิตช์ของเฟืองขับ , m	
R_g	รัศมีของวงกลมพิตช์ของเฟืองตาม , m	
R_{PX}	รัศมีความโค้งของผิวเฟืองขับ , m	$R_{PX} = R_p \sin(\varphi) + S$
R_g	รัศมีความโค้งของผิวเฟืองตาม , m	$R_{GX} = R_g \sin(\varphi) - S$

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

R_a	เส้นศูนย์กลางเฉลี่ย , m	
R_q	ค่ารากที่สองของกำลังสอง (RMS)	
S	ระยะการขบของฟันเฟืองตามแนว Line of Action , m	
S_0	อัตราส่วนการเลื่อนไหล	$S_0 = \left(\frac{u_g - u_p}{\bar{u}} \right)$
t	เวลา , s	
$\bar{t}$	เวลาไร้มิติ	$\bar{t} = \left(\frac{u_0}{b} \right) t$
T	อุณหภูมิของสารหล่อลื่น , K	
T_p	อุณหภูมิที่ผิวของเฟืองขับ , K	
T_G	อุณหภูมิที่ผิวของเฟืองตาม , K	
T_0	อุณหภูมิอ้างอิง , K	
u	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x , m/s	
u_{GX}	ความเร็วที่ผิวสัมผัสของเฟืองตาม , m	$u_{GX} = \omega_G R_{GX}$
u_{PX}	ความเร็วที่ผิวสัมผัสของเฟืองขับ , m	$u_{PX} = \omega_P R_{PX}$
$\bar{u}$	ความเร็วเฉลี่ยของผิวฟันเฟืองที่ตำแหน่งใดๆ , m	$\bar{u} = \frac{u_{PX} + u_{GX}}{2}$
u_0	ความเร็วเฉลี่ยของผิวฟันเฟืองที่ตำแหน่ง Pitch , m	
V_f	ปริมาตรในช่วงที่อนุภาคของแข็งสัมผัสกับผิวของฟันเฟือง , m ³	
VI	ดัชนีความหนืด (Viscosity index)	
w'	น้ำหนักที่ตำแหน่งใดๆ ในการขบกันของฟันเฟือง , N/m	
w_0	น้ำหนักที่ตำแหน่ง Pitch ในการขบกันของฟันเฟือง , N/m	
w_p	ภาระที่สารหล่อลื่นของแข็งรับในช่วงสัมผัส , N/m	
W'_0	น้ำหนักไร้มิติที่ตำแหน่ง Pitch	$W'_0 = \frac{w_0}{E'R_0^2}$
x	โคออร์ดิเนต x ตามแนวสัมผัส , m	
$\bar{x}$	ความหนืดเชิงโพลีสากล ของน้ำหนักที่ต้องการหาค่า VI	
$\bar{X}$	โคออร์ดิเนต x ไร้มิติ	$\bar{X} = \frac{x}{b}$
y	โคออร์ดิเนต y , m	
$\bar{Y}$	โคออร์ดิเนต y ไร้มิติ	$Y = \frac{y}{h}$
z	โคออร์ดิเนต z , m	

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

z_M	ค่าความหยาบของผิวพื้นเพียง แบบมีหน่วย , m	
Z_M	ค่าความหยาบของผิวพื้นเพียง แบบไม่มีหน่วย	$Z_M = \frac{z_M}{\left(\frac{b^2}{R_0}\right)}$
z^*	ค่าที่ห่างจากค่าเฉลี่ยที่เลือกไว้	
Z_1	ดัชนีความหนืด-ความดัน	

Greek symbols

$\bar{\theta}$	ค่าอุณหภูมิในรูปไร้มิติ	$\bar{\theta} = \frac{T}{T_0}$
μ	ค่าความหนืดสัมบูรณ์(Absolute viscosity) , Pa-s	
$\bar{\mu}$	ค่าความหนืดในรูปไร้มิติ	$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}$
μ_0	ความหนืดปรากฏของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิง , Pa-s	
τ	ความเค้นเฉือน(Shear stress) , Pa	
ρ	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น , kg/m ³	
ρ_0	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง , kg/m ³	
ρ_p	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นของแข็ง , kg/m ³	
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น ในรูปไร้มิติ	$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$
ψ	ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของความหนาแน่นของการกระจายความสูง	
$\bar{\sigma}$	ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
σ	ความเค้น , Pa	
ε	ความเครียด	
λ	ความเข้มข้นโดยน้ำหนักของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปในน้ำมัน	
φ	Pressure Angle , degree	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน อุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะในเครื่องจักรจำเป็นต้องมีการหล่อลื่น เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดการสูญเสียกำลังการผลิตอันเนื่องจากการเปลี่ยนอุปกรณ์ของเครื่องจักรหรือการปิดซ่อมบำรุง อันเนื่องมาจากการใช้อุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสมกับการทำงาน ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นในอุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องจักรจึงมีความสำคัญเพื่อที่เราจะสามารถออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงาน อุปกรณ์ที่เราใช้ในเครื่องจักรที่พบเห็นได้เช่น ฟันเฟือง แบริ่ง เพลา ลูกเบี้ยว เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของฟันเฟืองตรง เนื่องมาจากฟันเฟืองเป็นปัญหาที่น่าสนใจและประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายประเภทอันได้แก่ ในรถยนต์ ในเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้แต่ในโรงจักรที่ผลิตกระแสไฟฟ้าก็ต้องมีฟันเฟืองช่วยในการส่งกำลัง โดยการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของฟันเฟืองตรงนี้ จะทำการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นที่เป็นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ที่มีการสัมผัสเป็นเชิงเส้นโดยใช้สารหล่อลื่นที่เป็น non-Newtonian Fluid และเป็น Liquid- Solid Lubricant โดยทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง ภาระที่เฟืองฟันตรงได้รับ ความเร็วรอบในการทำงานของเฟือง ความหนาของผิวของฟันเฟือง ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ในน้ำมัน ขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงไป ในน้ำมัน ชนิดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ในน้ำมัน และ อัตราส่วนทดของฟันเฟือง

1.2 บททบทวนวิจัยที่ผ่านมา

ในปี ค.ศ. 1786 Reynolds ได้เขียนสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการไหลและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นและแรงดันของไหลและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนิวโทรเนียนเพื่อใช้จำลองการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก และต่อมาในปี ค.ศ. 1896 Hertz ได้ประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเข้ากับสมการเรย์โนลด์ส ทำให้งานวิจัยทางด้านอีลาสโตไฮโดรไดนามิกมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก

Roland Larsson [1997] ได้ประยุกต์ใช้สมการของ Reynolds เข้ากับปัญหาของฟันเฟืองที่เป็นชนิดตรงโดยคิดกรณีที่สารหล่อลื่นเป็นแบบนอนนิวโทรเนียน ทำให้ได้ค่าที่เข้าใกล้สภาวะการทำงานจริงมากยิ่งขึ้น

D.Y. Hua [1996] ได้ทำการวิจัยการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก โดยใช้ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) ผสมกับเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยสารผสมมีลักษณะคล้ายโคลน เมื่อใช้สารนี้เป็นสารหล่อลื่นจะช่วยลดความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น และยังสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น โดยในการวิจัยจะพิจารณาว่าสารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นแบบ non-Newtonian Fluid ตาม Power law Model

เกษม ธรรมโกศล [2003] ได้ทำการวิจัยการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก โดยใช้สารหล่อลื่น SAE-90 โดยเติม MoS_2 ลงไปที่ความเข้มข้นประมาณ 5 % โดยน้ำหนัก โดยพิจารณาว่า MoS_2 เป็นสารแขวนลอยในสารหล่อลื่น SAE-90 โดยในการวิจัยจะพิจารณาว่าสารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นแบบ non-Newtonian Fluid ตาม Power law Model ผลจากการวิจัยพบว่า ช่วยลดความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น และยังสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามในการวิจัยของทั้งสองกรณี เป็นการวิจัยในเชิงทฤษฎี ในกรณีของลูกกลิ้งกับแผ่นเรียบ โดยไม่พิจารณาผลจากความหยาบของผิวสัมผัส ดังนั้นในการวิจัยนี้ เป็นการนำทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ไปใช้ในการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรง ซึ่งมีความเร็วสัมผัสที่ฟันเฟือง ภาระที่ฟันเฟืองได้รับ ไม่คงที่ตลอดช่วงการทำงาน ในการวิจัยจะพิจารณาผลจากความหยาบของผิวฟันเฟือง เมื่อใช้สารหล่อลื่น SAE-90 เปรียบเทียบกับการใช้สารหล่อลื่น SAE-90 โดยผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อพิจารณาว่าสารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นแบบ non-Newtonian Fluid ตาม Power law Model โดยคิดเป็นการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก แบบสัมผัสเชิงเส้น (Line Contact)

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.3.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของฟันเฟืองตรง ที่มีพฤติกรรมของการหล่อลื่นเป็นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ด้วยสารหล่อลื่นที่เป็น non-Newtonian Fluid และเป็น Solid-Liquid Lubricant โดยจะพิจารณาถึงความดัน, ความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น, ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในการจำลองจะเปลี่ยนค่า ภาระที่เฟืองฟันตรงได้รับ ความเร็วรอบในการทำงานของเฟือง ความหยาบของผิวของฟันเฟือง ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปในน้ำมัน ขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงไป ในน้ำมัน ชนิดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ในน้ำมัน และ อัตราส่วนทดของฟันเฟือง

1.3.2 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการกระจายความดัน ความหนาฟิล์ม น้ำมัน ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นของฟันเฟือง ในสภาวะพลวัตร

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ของฟีนเฟือง ตรงด้วยสารหล่อลื่นที่เป็น non-Newtonian Fluid และเป็น Solid-Liquid Lubricant โดยจะ กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.4.1. ทำการศึกษาถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการทำงานของฟีนเฟือง
- 1.4.2. ทำการศึกษาถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่เฟืองฟีนตรงได้รับ
- 1.4.3. ทำการศึกษาถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงความหยาบของผิวของฟีนเฟือง
- 1.4.4. ทำการศึกษาถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่ เติมลงไปในส่วนน้ำมัน
- 1.4.5. ทำการศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงไป ในน้ำมัน
- 1.4.6. ทำการศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไป ใน น้ำมัน
- 1.4.7. ทำการศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนทดของฟีนเฟือง
- 1.4.8. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีนิวตันราฟสันและแก้สมการ เพื่อศึกษา พฤติกรรมของการหล่อลื่นของฟีนเฟืองตรง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สิ่งที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรม การหล่อลื่นของฟีนเฟือง ตรงที่เป็นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิชาการทางด้าน ไตรโบโลยี (Tribology) และการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลให้มีการหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพ ต่อไป รวมทั้งพัฒนาสารหล่อลื่นที่เป็นแบบ Solid-Liquid Lubricant ซึ่งจะทำให้การสึกหรอที่ผิว ของฟีนเฟืองลดลง ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานออกไปได้ และยังเป็นฐานข้อมูลสำหรับการ วิจัยและพัฒนาสารหล่อลื่นได้ในอนาคต

บทที่ 2

สารหล่อลื่น

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

2.1 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปโดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่น

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่ นั้น แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมันแร่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีพอและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ๆ บางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้คือ

2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้งานหลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีต่ำเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งาน เมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมาก ความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้น และความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของ น้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา เป็นต้น

2.1.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกกลั่น ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซ แก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะ

ไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตา ไขและยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกถันบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สูญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิกมักจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้ สูญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดีพอ

น้ำมันพื้นฐานหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมนั้นสามารถแยกคุณสมบัติได้ 3 พื้นฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับฐานของน้ำมันปิโตรเลียมที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานดังนี้

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานพาราฟินิก (Paraffinic Base Oil) น้ำมันดิบพาราฟินิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไฟสูง
- มีการระเหยตัวต่ำ
- รักษาคุณสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี
- จุดไหลเทสูง
- มีความถ่วงจำเพาะต่ำ
- มีคุณสมบัติหล่อลื่นได้ดี
- เกิดไขได้ดี
- มีค่าดัชนีความหนืดสูง
- ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าแข็ง แต่หุ้ดร่อนได้ง่าย
- โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยากมาก
- มีความต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี
- ฟิล์มน้ำมันเหนียวและแข็งแรง

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานแนฟธิก (Naphthenic Base Oil) น้ำมันดิบฐานแนฟธิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไฟต่ำ
- มีการระเหยตัวต่ำ
- รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร
- มีจุดไหลเทต่ำ
- มีความถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี

- มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ
- มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ
- เมื่อเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว
- การยึดเกาะโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดีเป็นบางส่วน
- มีความต้องการการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบอะโรมาติก (Aromatic Base Oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีค่าดัชนีความข้นใสต่ำ
- มีจุดไหลเทต่ำมาก
- ไม่มีไข
- คุณสมบัติทางการหล่อลื่นไม่ดี
- โครงสร้างการจับตัวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร
- คุณสมบัติในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ
- ไม่รักษาคูสมบัติทางเคมีให้แน่นอน
- มีความถ่วงจำเพาะสูง

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมามีอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้คือ

- **พอลิแอลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin; PAO)** เป็นสารที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดี ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นเพราะราคาถูกและสามารถผลิตได้ง่าย
- **พวงเอสเทอร์ (Ester) ไดเอสเทอร์ (Diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (Complex Ester)** เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ของเครื่องบินไอพ่น นอกจากนี้พวก **ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate Ester)** ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ
- **พอลิโกลีคอล (Polyglycol)** เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ เป็นต้น

- **พวกซิลิโคน (Silicone)** ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ
- **พวกฮาโลเจเนตไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbon)** เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน(chlorofluorocarbons) หรือสารซีเอฟซี(CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจน เพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความอยู่ตัวเชิงความร้อนดีมาก
- **พวกโพลีฟีนิลอีเทอร์ (Polyphenyl Ether)** เป็นสารที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมากถึง 800 องศาเซลเซียส เช่น น้ำมันไฮดรอลิกในยานอวกาศ เนื่องจากมีความอยู่ตัวเชิงความร้อนสูงมาก และมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์ได้ด้วย

2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างในตัวเองอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่

ความหนืด หมายถึงความใสและความข้นของน้ำมัน โดยวัสดุที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันก็จะบางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลยากขึ้น แต่จะมีฟิล์มน้ำมันหนากว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่ด้วยกันหลายระบบแต่ที่นิยมใช้คือเซนติสโตกส์ (Centistokes , cSt)

ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ด้อยรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวน สำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

ดัชนีความหนืด (Viscosity index, VI) ตามธรรมชาติแล้วน้ำมันที่มีความหนืดสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำและจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดเพื่อเป็นการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยถ้าค่าดัชนีความหนืดมีค่าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้าค่าดัชนี

ความหนืดต่ำอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$VI = \left(\frac{\bar{L} - \bar{x}}{\bar{L} - \bar{H}} \right) \times 100 \tag{2.1}$$

เมื่อ

- $\bar{L}$ คือความหนืดเซย์โบลท์สากล (Saybolt Universal Viscosity, SUV) ของน้ำมันมาตรฐาน ที่มีค่า $VI = 0$
- $\bar{H}$ คือความหนืดเซย์โบลท์สากลของน้ำมันมาตรฐาน ที่มีค่า $VI = 0$
- $\bar{x}$ คือความหนืดเซย์โบลท์สากลของน้ำมันที่ต้องการหาค่า VI

โดยที่ค่าของ $\bar{L}$ และ $\bar{H}$ สามารถหาได้จาก ตารางที่ 2.1 [13]

ตารางที่ 2.1 ค่าที่ใช้ในการหาดัชนีความหนืด

SUV at 100 °C $\bar{x}$	SUV at 38 °C		SUV at 100 °C $\bar{x}$	SUV at 38 °C		SUV at 100 °C $\bar{x}$	SUV at 38 °C	
	H	L		H	L		H	L
40	93	107	---	---	---	---	---	---
41	109	137	81	810	1674	121	1643	3902
42	124	167	82	829	1721	122	1665	3966
43	140	197	83	849	1769	123	1688	4031
44	157	228	84	868	1817	124	1710	4097
45	173	261	85	888	1865	125	1733	4163
46	189	291	86	907	1914	126	1756	4229
47	205	325	87	927	1964	127	1779	4296
48	222	356	88	947	2014	128	1802	4363
49	238	389	89	966	2064	129	1825	4430
50	255	422	90	986	2115	130	1848	4498
51	272	456	91	1006	2166	131	1871	4567
52	288	491	92	1026	2217	132	1894	4636
53	308	525	93	1046	2270	133	1981	4705

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

SUV at 100 °C $\bar{x}$	SUV at 38 °C		SUV at 100 °C $\bar{x}$	SUV at 38 °C		SUV at 100 °C $\bar{x}$	SUV at 38 °C	
	H	L		H	L		H	L
54	322	561	94	1066	2322	134	1941	4775
55	339	596	95	1087	2375	135	1965	4845
56	356	632	96	1107	2428	136	1988	4915
57	374	669	97	1128	2481	137	2012	4986
58	391	706	98	1148	2536	138	2036	5058
59	408	743	99	1168	2591	139	2060	5130
60	426	781	100	1189	2646	140	2084	5202
61	443	819	101	1210	2701	141	2108	5275
62	461	857	102	1231	2757	142	2132	5348
63	478	897	103	1252	2814	143	2156	5422
64	496	936	104	1273	2870	144	2180	5496
65	514	976	105	1294	2928	145	2205	5570
66	532	1016	106	1315	2985	146	2229	5645
67	550	1057	107	1337	3043	147	2254	5721
68	568	1098	108	1358	3102	148	2278	5796
69	586	1140	109	1379	3161	149	2503	5873
70	604	1182	110	1401	3220	150	2328	5949
71	623	1225	111	1422	3280	151	2353	6026
72	641	1268	112	1444	3340	152	2378	6104
73	660	1311	113	1466	3400	153	2403	6182
74	678	1355	114	1488	3462	154	2428	6260
75	697	1399	115	1510	3524	155	2453	6339
76	716	1444	116	1532	3585	156	2178	6418
77	734	1489	117	1554	3648	157	2503	6498
78	753	1534	118	1576	3711	158	2529	6578
79	772	1580	119	1598	3774	159	2554	6659
80	791	1627	120	1620	3838	160	2580	6740

2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

1. ช่วยหล่อลื่น ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลา แม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ก็จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2. ช่วยระบายความร้อน คุณสมบัติข้อนี้เป็นสิ่งสำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และระบายความร้อนอื่นเนื่องจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ระบบเกียร์ หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

3. ช่วยรักษาความสะอาด ขณะที่ทำงานที่หล่อลื่นก็ต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย ก็จะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่าง ๆ จากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4. ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้ เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำ หรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลง และไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5. ช่วยกระจายความสกปรก น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายความสกปรกต่าง ๆ ที่มีปนในน้ำมันหล่อลื่นอื่นเนื่องจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่าง ๆ เหล่านั้นรวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นอย่างเหนียว

6. มีสารป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Antioxidant) สารนี้จะช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเครื่องกับออกซิเจนในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันเครื่องจะทำปฏิกิริยาดังกล่าวได้ง่ายและจะทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อเครื่องยนต์

7. มีสารป้องกันการสึกหรอ สารนี้จะช่วยให้ฟิล์มของน้ำมันคงทนต่อแรงเฉือนได้ดี

8. มีสารป้องกันการเกิดฟอง การเกิดฟองของน้ำมันเครื่องภายในห้องเพลาคือข้อเหวี่ยงจะเกิดขึ้นมากเนื่องจากความเร็วสูงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบการหล่อลื่นลดลง สารป้องกันการเกิดฟองจะช่วยทำให้ฟองอากาศละลายตัวได้ง่าย

9. มีสารป้องกันสนิม สารนี้จะช่วยให้น้ำมันเครื่องเป็นตัวเคลือบไม่ให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ทำด้วยเหล็กเป็นสนิมขณะที่เครื่องยนต์หยุดทำงานเป็นเวลานาน ๆ มีการระเหยตัวต่ำ (low volatility) น้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องมีจุดวาบไฟสูง ทำให้เกิดการระเหยตัวต่ำและทนต่อความร้อนสูง ได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองน้ำมันเครื่องขณะเครื่องยนต์ทำงาน

10. มีจุดไหลเทต่ำ (low pour point) เพื่อที่จะนำน้ำมันเครื่องไปใช้งานในที่อุณหภูมิต่ำได้

2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดเกรดเดียวกับชนิดเกรดรวม ซึ่งแต่ละชนิดก็เหมาะสมกับสภาพของงานแต่ละอย่าง ลักษณะที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดมีดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว (Single Viscosity หรือ Single Grade) SAE ได้เป็นผู้ออกมาตรฐานเกี่ยวกับการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิด ถ้าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดต่ำ ความหนืดจะน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดสูง ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นสองชนิดคือ SAE 20 และ SAE 50 จะหมายความว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 มีความหนืดมากกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 20 ที่อุณหภูมิเดียวกัน

น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำกว่าเบอร์ที่แสดงไว้หลัง SAE จะตามด้วยตัว W ซึ่งเป็นการแสดงการทดลองวัดความหนืดที่ 0 องศาฟาเรนไฮต์ (ในกรณีที่ไม่มี W จะทดสอบที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์) ตัวอย่าง เช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 20 และน้ำมันเครื่องชนิด SAE 20 W แสดงว่าน้ำมันเครื่องชนิด SAE 20 W มีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 20 น้ำมันหล่อลื่นชนิดที่มี W ตามท้ายมักจะใช้กับฤดูหนาวหรือในที่ที่มีอากาศเย็น เพื่อช่วยตอนสตาร์ทเครื่องยนต์ที่เย็น ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเกรดเดียวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ได้แก่ SAE 5 W, SAE 10 W, SAE 20, SAE 20 W, SAE 30, SAE 40, SAE 50

2. น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวม (Multi Viscosity หรือ Multi Grade) น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมนี้ อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยกว่าชนิดเกรดเดียว ดังนั้น น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จึงสามารถใช้แทนน้ำหล่อลื่นชนิดเดียวได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 10/50 หมายความว่าที่อุณหภูมิ 0 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จะมีค่าความหนืดเท่ากับน้ำมันเครื่องชนิด SAE 10 W แต่ที่อุณหภูมิ 210 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จะมีค่าความหนืดเท่ากับน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 50 หมายความว่า น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 10 W/50 นี้สามารถใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นต่อไปนี้ได้ เช่น SAE 10 W, SAE 20W, SAE 20, SAE 30, SAE 40 และ SAE 50 เป็นต้น

สาเหตุที่น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมสามารถมีคุณสมบัติได้ดังนี้ ก็เพราะน้ำมันเครื่องชนิดนี้ได้เติมสารประกอบบางอย่างลงไป ซึ่งเรียกว่า สารปรับปรุงค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index Improver หรือ VI Improver) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เรียกว่าโพลีเมอร์ (Polymer) โดยสารนี้จะเข้าไปรวมตัวกับบริเวณส่วนประกอบ (Open Chain) ของโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน เพื่อจะฟอร์มตัวให้เป็นโมเลกุลที่ยาวมาก และตรึงโมเลกุลที่น้ำมันหล่อลื่นมีอุณหภูมิลดลง โมเลกุลที่เป็นสายยาวนี้จะคลายตัวออกไปปนกับโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งทำให้ความหนืดของ

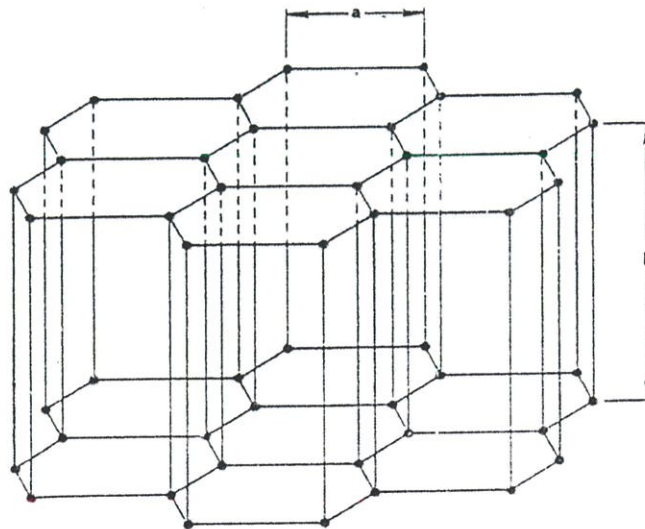
น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นอีก โมเลกุลนี้ก็จะคลายออก ความหนืดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดกรดเดียว

2.4 สารหล่อลื่นของแข็ง

สารหล่อลื่นของแข็งมักจะใช้กับงานอุตสาหกรรมที่น้ำมันหล่อลื่นไม่สามารถทำได้ เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไปหรืองานที่มีความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงาน เป็นต้น

สารหล่อลื่นของแข็งจำพวกผงยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น จาระบีและก๊าซเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นของแข็งทำมาจากวัสดุอนินทรีย์ อาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นของแข็งคั่นระหว่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจใช้ผงสารหล่อลื่นของแข็งผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น สารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

2.4.1 กราไฟต์ (Graphite) กราไฟต์เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไม่เกิดออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นตามรูปที่ 1 ทำให้ค่าความเค้นเฉือนต่ำ หรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำเนื่องจากอะตอมที่จับตัวกันอย่างไม่ถูกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดแรงพันธะหรือแรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ำเกินไปจึงทำให้กราฟิต์มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย กราไฟต์จะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของชั้นกราฟิต์สูงขึ้น เป็นผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่นและกราฟิต์ยังมีโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกันทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีประสิทธิภาพแรงเสียดทานต่ำ

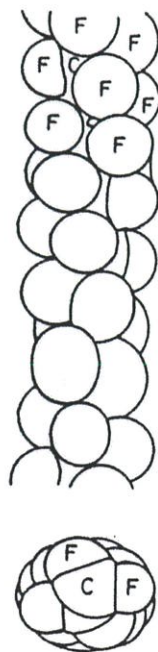


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของกราฟิต์

2.4.2 โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน (Polytetra Fluoroethylen,PTFE) PTFE เป็นสารที่มีความเสียดทานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็งชนิดอื่น PTFE เป็น Fluoroethylen (C_2F_4)_n โดยมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้าง PTFE

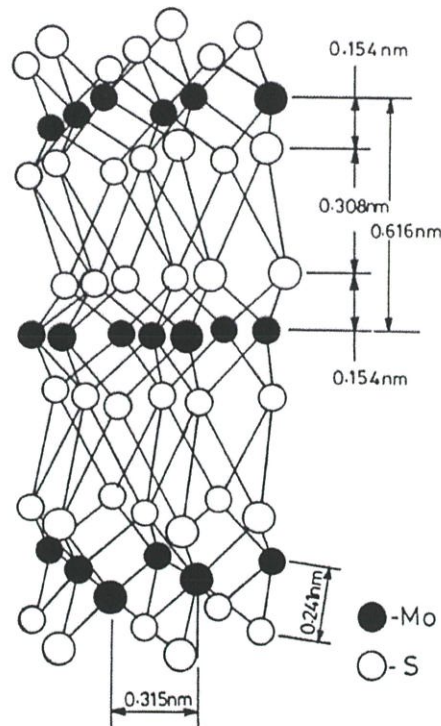


รูปที่ 2.3 ลักษณะด้านข้างและส่วนปลายของโมเลกุล

ซึ่งโครงสร้างจะมีรูปร่างซิกแซก สลับกันเป็นรูปหกเหลี่ยม ด้วยระยะห่างคงที่ 0.562 nm โดยมีคาร์บอนจำนวน 13 อะตอมใน 180° สาเหตุที่ทำให้ PTFE มีความเสียดทานต่ำ คือมีการยึดเกาะของหน้าสัมผัสต่ำและจะมีแรงยึดเกาะในอีกด้านสูง คือถ้าหากจะใช้พลังงานแยกสลาย (dissociation energy) ต้องใช้พลังงานสูงถึง 460 kJ/mol และ PTFE ยังเป็นสารที่ไม่ละลายในสาร

ใดๆ เนื่องจาก PTFE มีสายโซ่คาร์บอนที่เกือบถูอะตอมของ Fluoroethylen ป้องกันเกือบทั้งหมด จึงมีสภาพเป็นเกราะเคลือบของสายโซ่คาร์บอนจึงทำให้สามารถทนต่อสารเคมีได้

2.4.3 โมลิบดีนัมไดไซไฟต์ (Molybdenum disulfide, MoS_2) MoS_2 มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกันกับกราฟไฟต์โดยมี อะตอมของโมลิบดีนัมประกอบด้วยอะตอมของกำมะถันประกอบกันเป็นลำดับ คือ $\text{S}:\text{Mo}:\text{S}:\text{S}:\text{Mo}:\text{S}:\dots$ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของโมลิบดีนัมไดไซไฟต์

การจัดวางของอะตอมมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม แต่ละอะตอมของโมลิบดีนัมจะมีปริซึมรูปสามเหลี่ยมของอะตอมของกำมะถันเรียงโดยรอบเป็นระยะ 0.241 nm ระบายที่อยู่ใกล้กันจะมีระยะห่างของอะตอมของกำมะถันคือ 0.308 nm MoS_2 มีคุณสมบัติใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดีมีอุณหภูมิระเหิดที่ 450°C และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 400°C จะเห็นได้ว่า MoS_2 ไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และไม่เหมาะกับการนำไปใช้เป็นสารหล่อลื่นร่วมกับออกซิเจนและไม่ควรใช้ MoS_2 เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น MoS_2

บทที่ 3

ชนิดของฟันเฟือง

ฟันเฟืองเป็นส่วนหนึ่งในเครื่องจักรที่พบได้ในเครื่องจักรทั่วไป โดยฟันเฟืองจะทำหน้าที่ส่งกำลังและการหมุนจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึง เช่นในการส่งกำลังจากรถยนต์ ในโรงจักรไฟฟ้า เป็นต้น

3.1 เฟืองตรง (Spur gear)

เป็นเฟืองที่มีการส่งกำลังจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึงที่ขนานกัน ส่วนมากเฟืองขับ (driving gears) จะมีขนาดเล็กกว่าเฟืองตาม (driven gears) และมีชื่อเรียกเป็นพิเศษว่า พิเนียน (pinion) ส่วนเฟืองใหญ่เรียกว่าเฟือง (gear) แต่ในการใช้งานบางโอกาสก็อาจใช้เฟืองใหญ่เป็นเฟืองขับก็ได้ โดยในวิชานี้จะทำการศึกษาในกรณีที่ฟันเฟืองเป็นแบบเฟืองตรง

MSG A(B)



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของฟันเฟืองตรง

3.2 เฟืองเฉียง (helical gears)

เป็นเฟือง ที่ฟันเฟืองไม่ขนานกับแกนหมุนของเฟือง แต่เฉียงทำมุมกับเฟือง ดังนั้นแรงที่กระทำกับฟันเฟืองจึงเป็นแบบสามมิติ สามารถที่จะส่งกำลังระหว่างเพลที่ขนานกันหรือเพลที่ทำมุมกันก็ได้ ในการขับเคลื่อนด้วยเฟืองตรง แนวการสัมผัสระหว่างฟันเฟืองจะสัมผัสเป็นเส้น (line contact) ส่วนเฟืองเฉียงการสัมผัสระหว่างฟันเฟืองจะเริ่มสัมผัสเป็นจุด (point contact) และเมื่อเฟืองหมุนไปก็จะเปลี่ยนเป็นการสัมผัสเป็นเส้น เนื่องด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้เองจึงทำให้การสัมผัสของฟันเฟืองของเฟืองเฉียงจึงนุ่มนวลกว่าเฟืองตรง จึงทำให้มีเสียงในการทำงานน้อยลง และแรง

กระแทกก็น้อยลงด้วย ดังนั้นเฟืองเฉียงจึงเหมาะที่จะใช้กับสภาพงานที่มีความเร็วสูง และส่งกำลังมากกว่าเฟืองตรง

SH

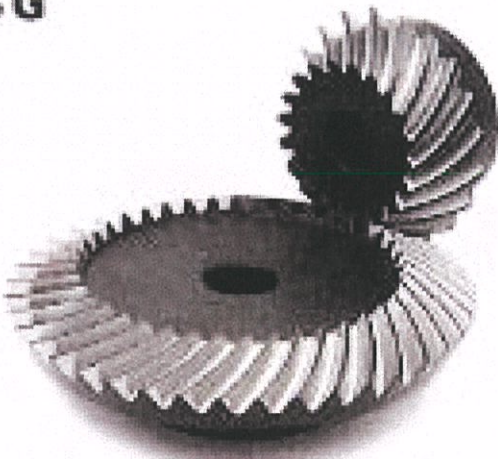


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของเฟืองเฉียง

3.3 เฟืองดอกจอก (bevel gears)

เฟืองดอกจอกเป็นเฟืองที่ใช้ในการส่งกำลังผ่านเพลาคู่ที่ทำมุมใดๆต่อกัน เฟืองดอกจอกอาจจะเรียกอีกอย่างว่าเฟืองกรวยตัด (conical gears) การรับแรงของเฟืองดอกจอกก็คล้ายคลึงกับเฟืองตรงและเฟืองเฉียง เฟืองดอกจอกจะต้องผลิตขึ้นมาเป็นคู่เพื่อใช้เฉพาะงาน และไม่สามารถที่จะสลับการใช้งานกับเฟืองอื่นๆได้ เหมือนกับเฟืองตรง

SBSG



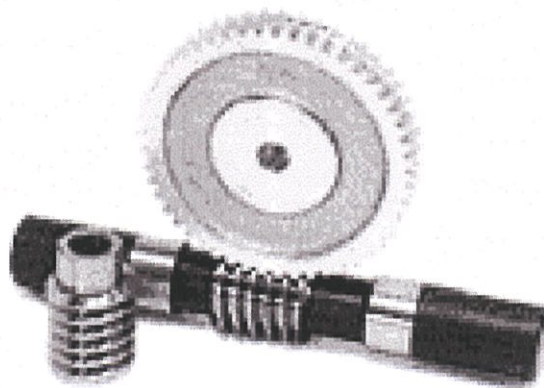
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะฟันเฟืองดอกจอก

3.4 ชุดเฟืองหนอน (worm gear set)

ชุดเฟืองหนอนใช้สำหรับส่งกำลังระหว่างเพลาที่ไม่ขนานกันและไม่ตัดกัน ซึ่งต้องการให้มีอัตราทดสูง เฟืองหนอนประกอบด้วยเกลียวตัวหนอน (worm) และเฟืองหนอน (worm gear) โดยปกติแล้วมักจะใช้ชุดเฟืองหนอนส่งกำลังระหว่างเพลาที่ทำมุมกัน 90°

แม้ว่าจะใช้เฟืองเฉียงส่งกำลังในลักษณะนี้ได้ แต่ก็ไม่สามารถส่งกำลังได้มากเท่ากัน ฟันเฟืองชุดตัวหนอน นอกจากนี้ฟันเฟืองชุดตัวหนอนยังสามารถทำงานด้วยอัตราทดสูงถึง 300 โดยที่ใช้การทดเพียงครั้งเดียว แต่ถ้าใช้เฟืองเฉียงจะเกิดปัญหาค้างในทางปฏิบัติ เช่นจะต้องใช้ฟันเฟืองที่มีจำนวนฟัน 10 ฟันขับเฟืองที่มีฟัน 3000 ฟัน เป็นต้น ข้อเสียของชุดเฟืองหนอนก็คือ ประสิทธิภาพการส่งกำลังจะต่ำและมีความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสี (sliding) ระหว่างฟันเฟืองมากกว่า ทำให้ต้องคำนึงถึงเรื่องระบายความร้อนที่เหมาะสมด้วย

KWGD(L)-AGDL



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของชุดเฟืองตัวหนอน

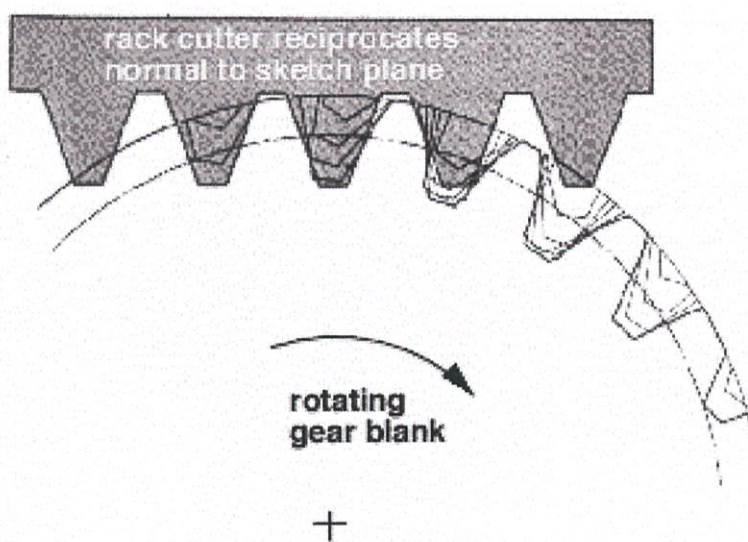
3.5 กรรมวิธีการผลิตเฟือง

การผลิตเฟืองเพื่อใช้ในการด้านกลไกนั้น ทำได้หลายวิธี เช่น การหล่อ การปั๊มขึ้นรูป การแปรรูปด้วยเครื่องจักร และการทำโมลด์พลาสติก เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีนั้น ผู้ผลิตจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิต จำนวนที่ผลิต และชนิดของเฟือง แล้วมาเลือกวิธีไหนจึงจะเหมาะสมและประหยัดที่สุด การผลิตเฟืองนอกจากใช้การหล่อโดยวิธีการต่างๆ เช่น หล่อด้วยแบบทราย เซลล์โมลดิ้ง (Shell Moulding) ดายคาสติง (Die Casting) แล้วยังมีการผลิตเฟืองที่ใช้กันมากคือ การตัดเฟืองด้วยวิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 มิลลิ่งคัตเตอร์ (Milling Cutter) ในวิธีนี้ตัวตัดเฟืองมีชื่อเรียกว่า มิลลิ่งคัตเตอร์ ซึ่งเป็นเฟืองชนิดหนึ่ง ที่มีฟันเป็นรูปตามลักษณะของช่องว่างระหว่างฟันที่จะตัด วิธีการก็คือให้คัตเตอร์หมุน เพื่อตัดโลหะซึ่งจะเป็นช่องว่างระหว่างฟันเฟืองออก หลังจากเสร็จหนึ่งช่องแล้วก็ให้ฟันเฟืองหมุนไปอีกหนึ่งช่องแล้วคัตเตอร์ก็จะตัดโลหะออกอีกหนึ่งช่องเรื่อยไป อุปกรณ์ที่ใช้หมุนเฟืองไป

ครั้งละหนึ่งช่องเรียกว่า จานแบ่ง (Indexing) ซึ่งปรับระยะการหมุนให้สอดคล้องกับจำนวนฟันบนเฟืองได้ตามต้องการ ข้อเสียของการตัดฟันเฟืองในวิธีนี้คือ คัตเตอร์แต่ละอันจะตัดได้เฉพาะจำนวนฟันและพิตช์ที่ต้องการเท่านั้น ถ้าจำนวนฟันเปลี่ยนไปก็ต้องใช้คัตเตอร์อันใหม่ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการตัดเฟืองสูง ในทางปฏิบัติจะไม่มีการเปลี่ยนคัตเตอร์ทุกครั้งที่จำนวนฟันเฟืองที่ต้องการตัดเปลี่ยนไป แต่จะใช้คัตเตอร์อันเดียวสำหรับตัดเฟืองที่มีจำนวนฟันแตกต่างกันประมาณ 8 ฟัน โดยที่พิตช์เท่ากัน ดังนั้นเฟืองที่ตัดโดยวิธีนี้จึงได้เพียงแต่รูปร่างของฟันโดยประมาณเท่านั้น ทั้งนี้เพราะในจำนวนเฟือง 8 อันที่มีพิตช์เท่ากัน แต่จำนวนฟันแตกต่างกัน จะมีเพียงเฟืองเดียวที่รูปร่างของฟันเฟืองตัดได้อย่างถูกต้อง ในกรณีที่ต้องการงานที่มีความแม่นยำสูงมาก ก็จำเป็นต้องใช้คัตเตอร์ที่ถูกต้องในการตัดฟันเฟืองที่ต้องการจริงๆ

35.2 แร็คคัตเตอร์ (Rack Cutter) ในวิธีนี้ตัวตัดฟันเฟืองเป็นแร็คหรือเฟืองซึ่งไม่มีความโค้ง ดังรูปที่ 2.5 ในการทำงานคัตเตอร์จะเลื่อนไปกลับ (Reciprocating) เพื่อค่อยๆ ตัดเนื้อโลหะออกจากเฟืองเปล่า (Gear-Blank) ซึ่งก็คือเฟืองที่ไม่มีฟัน จนกระทั่งวงกลมพิตช์ของเฟือง และคัตเตอร์สัมผัสกัน จากนั้นเฟืองเปล่าก็เลื่อนไปสู่ตำแหน่งถัดไปของฟัน และวิธีการตัดก็กระทำซ้ำเช่นเดิม วิธีการนี้จะได้รูปร่างของฟันเฟืองที่เข้าใกล้รูปร่างที่ต้องการมาก ข้อเสียคือต้องใช้เวลาในการตัดฟันเฟืองมาก เฟืองอันใหญ่มักนิยมใช้ตัดด้วยแร็คคัตเตอร์ ทั้งนี้เพราะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการตัดด้วยวิธีอื่นๆ

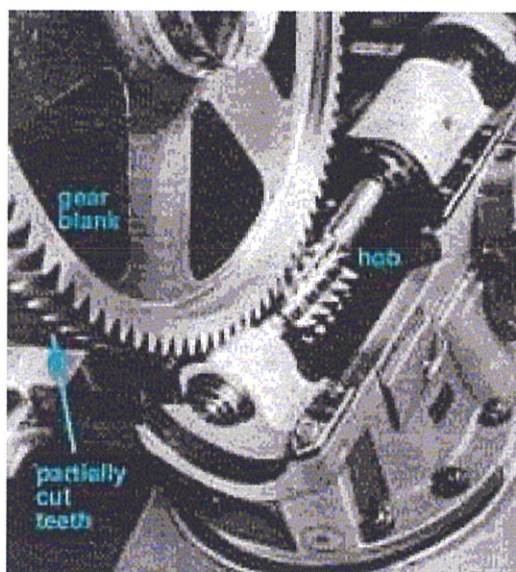


รูปที่ 3.5 แสดงการทำงานของแร็คคัตเตอร์

3.5.3 พินเนียนคัตเตอร์ (Pinion Cutter) วิธีการก็เช่นเดียวกับแร็คคัตเตอร์ แต่คัตเตอร์ที่ใช้เป็นเฟืองอีกอันหนึ่งแทนที่จะเป็นแร็ค วิธีการตัดเฟืองนี้จะให้เฟืองเปล่าค่อยๆ หมุนไป ในขณะที่

เดียวกันคัตเตอร์ก็เลื่อนไปกลับเพื่อตัดโลหะออกจากเฟืองเปล่าในวิธีการนี้จะตัดฟันเฟืองออกเท่ากันเมื่อเฟืองหมุนครบหนึ่งรอบ และเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากวิธีหนึ่ง

3.5.4 ฮีบบิง (Hobbing) วิธีการตัดฟันเฟืองที่เรียกว่าฮีบบิงมีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธีเรีคคัตเตอร์ ข้อแตกต่างกันคือ การใช้ฮีบบซึ่งจะมีลักษณะที่เหมือนเฟืองหนอน(Worm Gear) เป็นตัวตัดแทนเรีค เฟืองเปล่าและฮีบบจะหมุนไปพร้อมกันรอบแกนหมุนของตัวเองอย่างเป็นจังหวะเพื่อให้ตรงกับซี่ฟันที่ต้องการพอดี ข้อดีของวิธีการนี้คือ หลังจากการตั้งจังหวะให้เฟืองและฮีบบหมุนได้แล้ว จะไม่ต้องตั้งฮีบบใหม่อีก



รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของฮีบบิง

บทที่ 4

คุณสมบัติวัสดุของพื้นเฟืองและความหยาบผิว

เนื่องจากพื้นเฟือง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งถ่ายกำลังทำให้พื้นเฟืองอยู่ในสภาวะที่ต้องรับแรงกระทำบ่อยๆส่งผลทำให้พื้นเฟืองมีการสึกหรอหรือเกิดการแตกหัก เพราะฉะนั้นวัสดุที่เลือกมาใช้ทำพื้นเฟืองจึงต้องมีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสามารถทำงานได้ในสภาวะที่เราต้องการโดยไม่มีการแตกหัก จึงเป็นความจำเป็นของนักออกแบบที่จะต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติทางกลของวัสดุเพื่อที่จะสามารถเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้อง

สมบัติทางกลของวัสดุ เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลของแรงกระทำกับการแปรรูปที่เกิดขึ้น สมบัติทางกลที่สำคัญได้แก่ ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ความแข็ง (Hardness) และความแข็งตึง (Stiffness) หรือความสามารถในการคงรูป

การได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางกลทำได้โดยการทดสอบวัสดุ ให้ใกล้เคียงกับสภาพที่รับแรงกระทำในระหว่างใช้งานจริง ปัจจัยที่นำมาพิจารณาเช่น ลักษณะของแรงกระทำ ระยะเวลา นอกจากนี้อาจจะพิจารณาถึงอุณหภูมิที่ใช้งานก็เป็นปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งด้วย และเพื่อที่จะได้ข้อมูลของสมบัติทางกลที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ที่มีแนวทางในการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน และการตีความจากข้อมูลที่ได้ไปในแนวทางเดียวกัน จึงมีหน่วยงานที่ได้รับการรับรองที่ทดสอบวัสดุและทำการเผยแพร่ข้อมูลออกไป ในสหรัฐอเมริกา องค์กรที่มีบทบาทมากที่สุดได้แก่ ASTM (American Society for Testing and Materials)

4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

4.1.1 ความเค้น ความเครียด (Stress-Stain)

ความเค้นและความเครียด (Stress-Stain) เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยใช้แรงกระทำบนหน้าตัดของวัสดุทั้งแรงดึงแรงอัด และ แรงเฉือน โดยค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมถูกนิยามโดยความสัมพันธ์

$$\text{ความเค้น}(\sigma) = \frac{F}{A}$$

$$\text{ความเค้นเฉือน}(\tau) = \frac{F_T}{A}$$

$$\text{ความเครียด}(\epsilon) = \frac{\Delta L}{L_o}$$

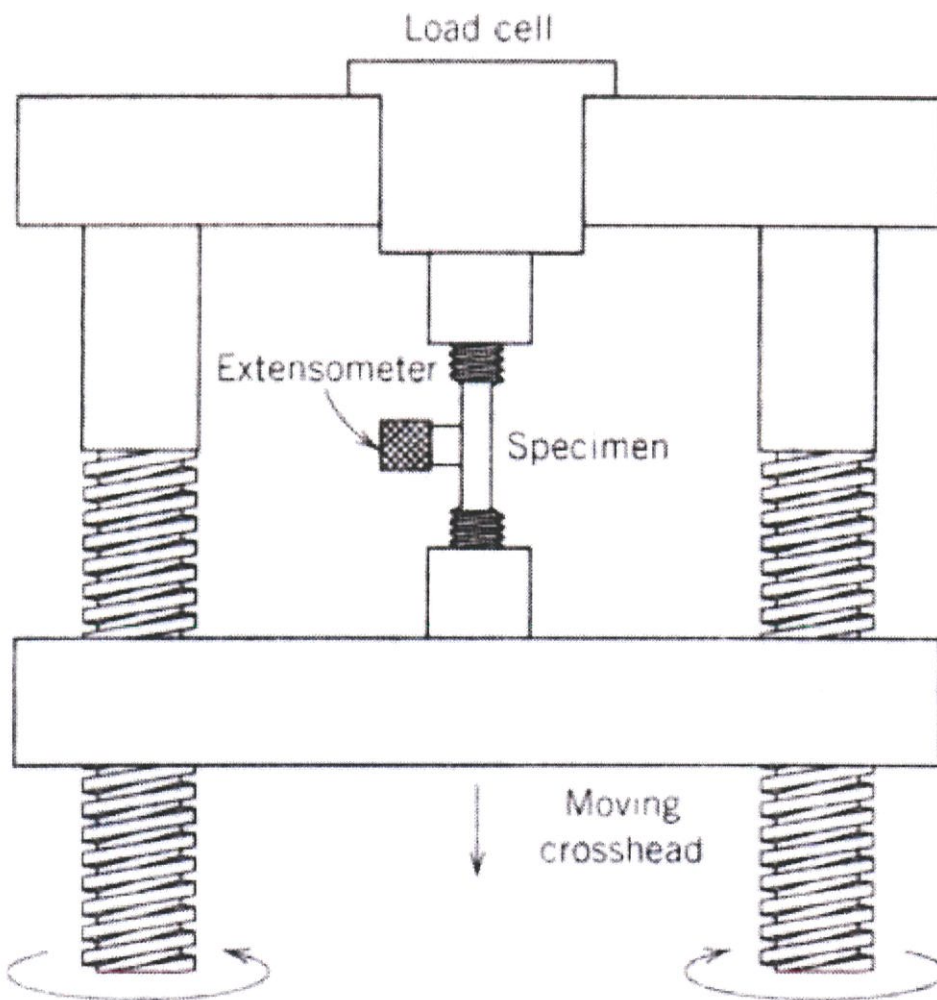
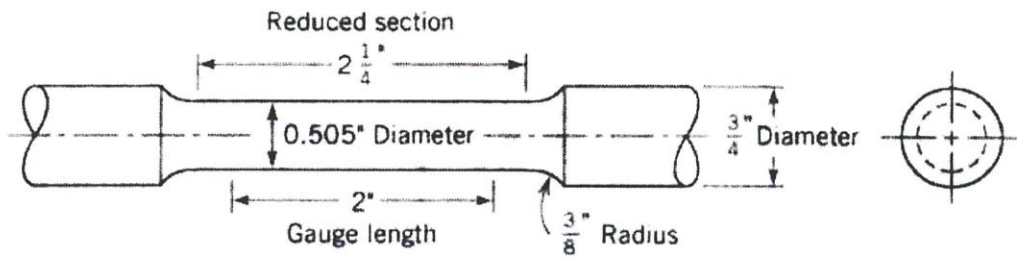
F = แรงกระทำซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

F_T = แรงกระทำซึ่งขนานกับพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของชิ้นทดสอบ (N)

A = พื้นที่หน้าตัดที่แรงกระทำก่อนการทดสอบ (m^2)

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป (m)

L_o = ความยาวก่อนการทดสอบ (m)



รูป 4.1 แสดงเครื่องการทดสอบและวัสดุที่ใช้การทดสอบ

4.1.2 มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

ระดับการแปรรูปหรือเปลี่ยนรูปของโครงสร้างหนึ่งๆจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงกระทำที่กระทำต่อวัสดุ สำหรับโลหะถ้าแรงที่กระทำไม่สูงมากนัก ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงซึ่งกันและกันตามความสัมพันธ์

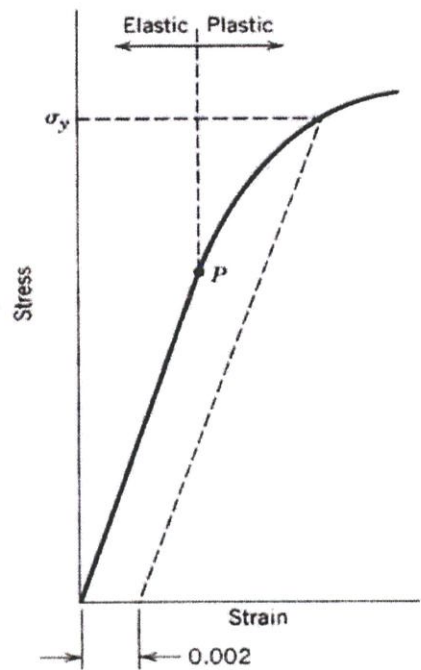
$$\sigma = E\varepsilon \tag{4.1}$$

ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke’s Law) โดยที่ค่าคงที่ของการแปรผัน E เรียกว่า มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) สำหรับโลหะหลักๆ ค่ามอดูลัส นี้มีขนาดอยู่ระหว่าง 45 GPa สำหรับแมกนีเซียม ถึง 407 GPa สำหรับทังสเทน ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะบางชนิดที่อุณหภูมิห้องมีค่าดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น มอดูลัสเฉือน และ อัตราส่วนปัวซองของโลหะบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง

Metal Alloy	Modulus of Elasticity GPa	Shear Modulus GPa	Poisson’s Ratio
Aluminum	69	25	0.33
Brass	97	37	0.34
Copper	110	46	0.34
Magnesium	45	17	0.29
Nickel	207	76	0.31
Steel	207	83	0.30
Titanium	107	45	0.34
Tungsten	407	160	0.28

เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งความเค้นและความเครียดแปรผันตรงซึ่งกันและกันนี้ เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น ซึ่งเมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ดัง รูปที่ 4.2 และค่าความชันของกราฟนี้เองคือค่า มอดูลัสความยืดหยุ่น ค่ามอดูลัสนี้อาจถูกพิจารณาว่าเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งตึง (Stiffness) ของวัสดุในการที่จะต้านทานต่อการผิดรูปไป ยิ่งค่ามอดูลัสมากเท่าไรวัสดุก็ยิ่งมีการผิดรูปน้อยเท่านั้น การแปรรูปแบบยืดหยุ่นนี้เป็นการแปรรูปแบบชั่วคราวเท่านั้น

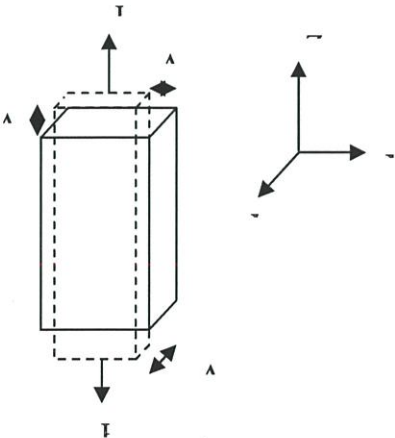


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

4.1.3 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson’s Ratio)

เมื่อทำการทดสอบโดยออกแรงดึงชิ้นงานพบว่าชิ้นงานหรือวัสดุจะมีการยืดตัวในแนวแกน ก็จะมีการบิดในแนวแกนและจะมีการหดตัวในแนวขวางคือ จะมีความเครียดในแนวขวาง อัตราส่วนปัวซองของวัสดุก็คือ อัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวด้านขวางต่อความเครียดตามแนวแกน ตาม รูปที่ 4.3

อัตราส่วนปัวซอง
$$\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปัวซอง

4.1.4 ความเหนียว (Ductility)

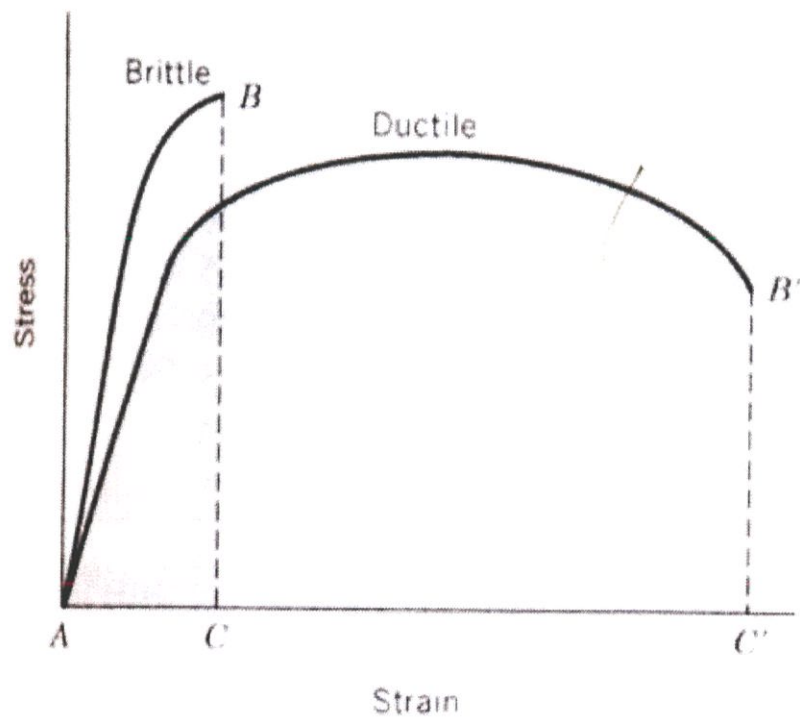
ความเหนียวเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญอีกประการหนึ่ง เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงระดับปริมาณของการแปรรูปถาวรที่จะเกิดขึ้นก่อนวัสดุจะมีการแตกหัก วัสดุที่เกิดการแปรรูปถาวรได้น้อยมาก หรือไม่มีการแปรรูปถาวรเกิดขึ้นเลยก่อนที่วัสดุจะมีการแตกหักภายใต้แรงกระทำเรียกว่าวัสดุนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเปราะ (brittle) และวัสดุที่มีการแปรรูปถาวรมากภายใต้แรงกระทำเรียกว่าวัสดุนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเหนียว (ductile) โดยที่วัสดุที่เหนียวจะมีความปลอดภัยมากกว่าวัสดุที่เปราะ โดยทั่วไปวัสดุจะถือว่าเป็นวัสดุเปราะเมื่อมันแตกหักด้วยความเครียดที่ต่ำกว่า 5% โดยประมาณ

สมบัติความเหนียวสามารถระบุเป็นปริมาณตัวเลขด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation) หรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent Reduction in area)

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว $EL = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \times 100$

เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด $EA = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100$

โดยที่ l_f, A_f คือความยาวและพื้นที่หน้าตัดหลังขึ้นงานขาดหรือแตกหัก และ l_o, A_o คือความยาวและพื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ



รูปที่ 4.4 แสดงความแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวกับวัสดุเปราะ

4.1.5 ความแกร่ง (Toughness)

ความแกร่งเป็นสิ่งที่บอกลักษณะความสามารถของวัสดุในการที่จะดูดซับพลังงานเข้าไปจนกว่าจะมีการแตกหัก ซึ่งคุณสมบัตินี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุและลักษณะของแรงกระทำ เช่นแรงกระทำที่เป็นภาระกรรมจลน์ (Dynamic Loading) หรือ ภาระกรรมสถิต (Static Loading) สำหรับวัสดุที่แกร่งนั้นจะต้องมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวพร้อมกัน แต่โดยทั่วไปวัสดุที่เหนียวจะแกร่งกว่าวัสดุที่เปราะ

4.1.6 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นคุณสมบัติที่บอกลักษณะความต้านทานของวัสดุต่อการเกิดการแปรรูปถาวรที่บริเวณเฉพาะ เช่นบริเวณที่เกิดรอยบุ๋มหรือรอยขีดข่วนที่ผิว ในสมัยแรกๆการทดสอบความแข็งทดสอบโดยนำวัสดุมาทดสอบโดยวัสดุแข็งกว่าจะสามารถขีดข่วนอีกวัสดุหนึ่งให้เป็นรอยได้ซึ่งเป็นการทดสอบในเชิงคุณภาพ ส่วนการทดสอบในเชิงปริมาณเพื่อประมาณค่าความแข็งเป็นตัวเลขถูกพัฒนาขึ้นภายหลัง โดยใช้หัวกด (Indenter) กดลงบนผิวชิ้นงานที่จะทดสอบภายใต้เงื่อนไขควบคุมให้เป็นมาตรฐานได้แก่ แรงที่ใช้กด และความเร็วของการกด จากนั้นวัดขนาดหรือความลึกของรอยกด ที่เกิดขึ้นมาแปลงเป็นค่าความแข็งของวัสดุ ซึ่งรอยกดที่ใหญ่และลึกหมายถึงวัสดุอ่อนและมีความแข็งต่ำ

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) เป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่ถูกนำไปใช้ปฏิบัติบ่อยกว่าแพร่หลายกว่าวิธีอื่นเพราะ เป็นวิธีที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายไม่สูง เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ชิ้นงานไม่แตกหักหรือเสียรูป และสมบัติอื่นของวัสดุสามารถประมาณได้จากค่าความแข็งของวัสดุ โดยการทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Tests) เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษในวิธีนี้จะใช้หัวกดที่เป็นหัวกลมซึ่งทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.588, 3.175, 6.350 และ 12.70 mm และแบบกรวยกลมแหลมซึ่งใช้ทดสอบวัสดุแข็ง ในวิธีนี้ ตัวเลขความแข็งจะได้จากผลต่างของความลึกที่หัวกดกดเข้าไปในผิวชิ้นงานในจังหวะแรกที่กดด้วยแรงกดรอง (Minor Load) กับ จังหวะครั้งที่กดด้วยแรงกดหลัก (major load) โดยแรงกดรองจะใช้แรง 10 kg และแรงกดหลัก 60,100 และ 150 kg

2. การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Tests) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่คล้ายกับ การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ คือใช้หัวกดที่เป็นรูปทรงกลมกดลงบนพื้นผิวชิ้นงานเหมือนกัน หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm แรง

กดที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่างช่วง 500 ถึง 3000 kg โดยเพิ่มทีละ 500 kg และระหว่างการทดสอบจะต้องใช้แรงกดที่เป็นเวลานานตามที่กำหนดคือ 10 ถึง 30 วินาที วัสดุแข็งจะใช้แรงกดมากกว่าวัสดุอ่อน ค่าความแข็งแบบบริเนลล์ HB เป็นตัวเลขที่คำนวณจากขนาดของแรงที่ใช้ในการกดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้น การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดสามารถทำได้โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำที่มีขีดบอกขนาดอยู่ที่เลนส์ของกล้อง จากนั้นจึงนำมาแปลงเป็นเลข HB

3. การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบรูปร่างและวิกเกอร์ส (Knoop and Vickers microhardness Tests) เป็นการทดสอบโดยใช้หัวกดที่มีรูปร่างเป็นแบบพีระมิดกดลงบนชิ้นงาน โดยแรงกดที่ใช้จะต่ำกว่าของวิธีร็อกเวลล์และบริเนลล์มาก โดยแรงกดอยู่ประมาณ 1 ถึง 1000 g รอยกดที่ได้จะทำการวัดโดยการใช้อุปกรณ์วัดขนาดออกมาจากนั้นจึงแปลงขนาดรอยกดเป็นค่าความแข็งออกมา โดยผิวชิ้นงานจะต้องมีการเตรียมอย่างดีโดยการขัดด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดด้วยผงขัด เพื่อผลที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำ

4.2 ความหยาบผิวของพื้นผิว

พื้นผิวของชิ้นงานนับว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการอุตสาหกรรม เนื่องจากชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีการสัมผัสกันจะต้องมีการออกแบบให้มีการสึกหรอให้น้อยที่สุด โดยจะให้มีการหล่อลื่นที่ดีที่สุดแก่ชิ้นงานเพื่อลดการเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซึ่งการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์เป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ดังนั้นผิวสัมผัสจึงมีผลเป็นอย่างมากต่อการหล่อลื่นประเภทนี้ เพราะหากขนาดของความหยาบของผิวสัมผัสมีค่ามากกว่าความหนาฟิล์มก็จะทำให้เกิดการสัมผัสกันของชิ้นส่วนทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น

ถึงแม้ทฤษฎีการออกแบบพื้นผิวจะมีการพัฒนามากขึ้นแต่ก็ยังคงประสบกับปัญหาเรื่องผิวสัมผัสกันอยู่ สิ่งแรกที่จะต้องศึกษาอย่างละเอียดเกี่ยวกับการหล่อลื่นของพื้นผิวก็คือการตรวจวัดลักษณะรูปร่างของผิวหยาบ ผิวเรียบคือผิวที่ราบกับพื้นในหน่วยที่ละเอียด ความหยาบของผิวชิ้นงานจากระบวนการขึ้นรูปเพื่อทำการหล่อลื่นจะมีค่าประมาณ $0.01-10\ \mu\text{m}$. ขณะที่ขนาดของปรมาณูจะประมาณ $0.0001-0.001\ \mu\text{m}$. ซึ่งผิวหยาบจะประกอบด้วยจุดที่สูงและต่ำสลับกันไป โดยทั่วไปจะเรียกจุดที่สูงว่า “ความหยาบ” (Asperity)

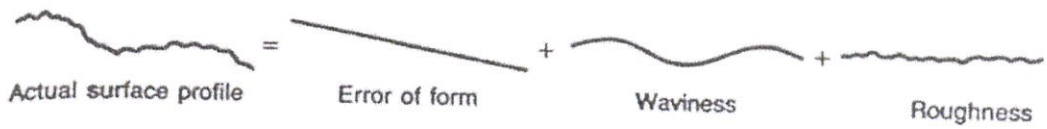
4.2.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว (Geometric characteristics of surfaces)

รูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิว โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ดัง รูปที่ 4.5

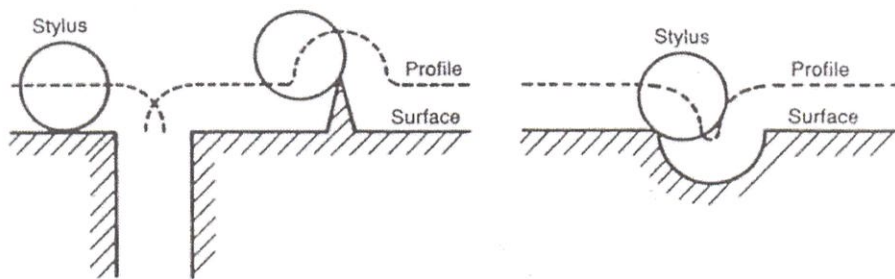
1. ความผิดพลาดของรูปร่าง (Error of form) ผิวที่เบนไปจากรูปแบบที่กำหนดไว้ สาเหตุเนื่องมาจากความผิดพลาดที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต

2. คลื่น (Waviness) คลื่นที่มีเกิดขึ้นจะเป็นแนวยาวในพื้นผิว โดยมักจะเกิดจากความสั่นสะเทือนที่เราไม่ต้องการในเครื่องจักร ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในเครื่องจักรเสมอ

3. ความหยาบ (Roughness) ความไม่สม่ำเสมอที่รวมอยู่ในคลื่นและความผิดรูปจากการผลิต ซึ่งมักจะเกิดขึ้นขณะการตัดหรือการทำผิวสำเร็จ



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบ



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบที่อาจทำให้การวัดผิดพลาด

4.2.2 การวัดด้วยปลายปากกาแหลม (Stylus measurements)

เครื่องมือวัดผิวหยาบที่มีใช้อยู่โดยทั่วไป จะแบ่งออกเป็น 2 อย่างหลักๆ คือ เครื่องมือที่มีการสัมผัสโดยตรง กับแบบที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือที่ทำการวัดผิวด้วยการใช้ปลายเข็มแหลมในการวัดขนาดของความหยาบ โดยจะอาศัยหลักการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแกนเข็มที่วัดขึ้นงานซึ่งจะมีการเคลื่อนขึ้นและลงตามลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัด ในขณะที่แนวแกนเกิดการเคลื่อนขึ้นลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นและแปลงออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล และนำสัญญาณที่ได้มากรองสัญญาณอีกครั้งก่อนที่จะทำการพลอตกราฟ ซึ่งแนวความคิดนี้นำเสนอโดย แอบบอทและไฟล์สโตนในปี 1933

โดยทั่วไปปลายเข็มแหลมจะทำมาจากเพชร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $4\text{ }\mu\text{m}$. และจะมีแรงกระทำคงที่โดยประมาณไม่เกิน 0.0007 N . ซึ่งเป็นไปได้ยากที่ปลายหัวเพชรจะมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวที่ทำการวัด เนื่องจากพื้นผิวที่จะทำการวัดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการวัดจึงอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้จากขนาดของหัวเพชรไม่สัมพันธ์กับพื้นผิวที่ทำการวัด ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงถึงข้อผิดพลาดจากการวัดในพื้นผิวที่มีลักษณะต่างๆ กัน คือกรณีที่เป็นร่องลึกเท่ากับขนาดของปลายเข็มพอดี, กรณีที่เป็นยอดแหลมขึ้นมา และกรณีที่เป็นจุดเว้าเท่าหัวเข็มพอดี ซึ่งแนวเส้นที่ได้จะถูกรวมกับขนาดของหัวเข็มเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะได้

รูปกราฟของพื้นผิวที่แท้จริงจากการวัดค่าด้วยวิธีนี้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังคงได้รับความนิยมสูงความสามารถในการเคลื่อนที่แนวตั้งของปลายเข็มจะอยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 100,000 และแนวระนาบจะอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 5000 หรืออยู่ในอัตราส่วนของแนวตั้ง : แนวราบ=50:1 ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการที่จะเลือกขนาดของการเคลื่อนที่ของปลายเข็มกับลักษณะของพื้นผิวที่จะทำการวัด

4.2.3 เครื่องมือวัดผิวที่ไม่สัมผัสโดยตรง (Some no contacting measurement Devices)

1. ชุดวัดแบบใช้ลม (Pneumatic Devices) เครื่องมือวัดชนิดนี้จะอาศัยหลักการร่วของอากาศที่ปลายของหัววัด โดยหัววัดจะมีลักษณะคล้ายหัวฉีดที่ตรงปลายจะเรียบและแบน ขณะที่หัววัดเคลื่อนที่ไปก็จะมีแรงดันลมออกมาบริเวณไหนที่มีการร่วของลมออกก็แสดงว่าไม่เรียบและมีช่องเล็กๆ อยู่วิธีนี้นิยมใช้วัดพื้นอาคารที่ต้องการผิวเรียบเนื่องจากสามารถทำการวัดได้เร็ว, ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและวัดได้สะดวก อีกทั้งหัววัดยังทนทานต่อสึกหรอเนื่องจากการเสียดสี

2. ชุดวัดแบบเลนส์ (Optical Devices) จะอาศัยหลักการสะท้อนจากแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมาโดยจะคำนวณจากปริมาณของแสงที่มีการสะท้อนกลับซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงลักษณะของพื้นผิวที่วัดได้ วิธีนี้ไม่เหมาะกับการที่จะนำมาใช้กับงานที่มีการเคลื่อนย้ายอยู่เสมอเนื่องจากว่าเลนส์ที่ใช้ในการวัดจะมีความละเอียดอ่อนมาก หากเกิดการเคลื่อนย้ายจะทำให้ตำแหน่งในการตั้งค่าไว้เปลี่ยนไป

3. ชุดกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Electron Microscope Devices) วิธีการวัดแบบนี้จะให้ผลการวัดที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเลนส์ธรรมดา เนื่องจากความยาวของคลื่นจะสั้นมาก ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนทะลุผ่าน (Transmission Electron Microscopy , TEM) โดยลำของอิเล็กตรอนจะทะลุผ่านชิ้นงานที่ทำการวัดผิวและลำแสงจะเกิดการหักเหและกระจายไป และแสดงที่จอภาพเป็นรูปแสดงลักษณะของพื้นผิว วิธีนี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้หาปริมาณการฟุกร่อนของผิวโครงสร้าง โดยปกติแล้วชิ้นงานต้องหนาไม่เกิน $3\ \mu m$.

3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง (Reflection Electron Microscopy , REM) อิเล็กตรอนจะกระจายจากผิวของชิ้นงานและถูกรวมแสง ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า และสัญญาณนี้จะถูกนำมาแสดงเป็นรูปภาพลักษณะผิวของชิ้นงานที่ทำการวัดบนจอมอนิเตอร์ ลำแสงของอิเล็กตรอนที่ยิงออกไปจะทำให้เกิดเป็นจุดโฟกัสซึ่งชัดเจนสแกนขึ้นบนจอ บางทีเรียกว่า “กล้องจุลทรรศน์แบบสแกน” โดยการสแกนแบบนี้สามารถปรับให้มีความละเอียดได้สูงสุดประมาณ $10\ nm$. ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าที่ TEM ทำได้

4.2.4 เส้นอ้างอิง (Reference lines)

ในการคำนวณจะต้องกำหนดตัวแปรเพื่อหาขนาดของความสูงของผิวหยาบ ซึ่งจะต้องมีจุดอ้างอิงว่าความสูงในแต่ละจุดมีขนาดเท่าไร ดังแสดงใน รูปที่ 4.6

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

2. ค่าเฉลี่ยสิบจุด (Ten point average) ค่าเฉลี่ยแบบสิบจุดเป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของการหาตำแหน่งจุดที่สูงที่สุดและจุดที่ต่ำที่สุดอย่างละห้าจุด ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้ก็จะเท่ากับ 10 จุด เป็นเส้นอ้างอิง

3. วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least squares) วิธีนี้เป็นวิธีที่มีพื้นฐานมาจากเส้นอ้างอิงที่เอียงซึ่งมาแทนที่เส้นแนวระดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นหัวใจหลักของการหาวิธีนี้คือการนำค่าผิดพลาดมารวมกับวิธีที่มีอยู่เพื่อหาค่าเอียงของแนวระดับ สามารถเขียนเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

$$z = \bar{m}x + \bar{b} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \bar{m} &= \text{ค่าความชัน} \\ \bar{b} &= \text{ค่าตัดแกน } z \end{aligned}$$

ถ้าเราให้จุดเหล่านี้ คือ $P_1(x_1, z_1), P_2(x_2, z_2), \dots, P_n(x_n, z_n)$ เป็นค่าพิกัดที่แต่ละตำแหน่งของจุดบนแกน x โดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ 1.) ค่าที่ได้จากการวัดที่จุดนั้น 2.) ค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ $z = \bar{m}x + \bar{b}$ ซึ่งเราจะได้ค่าความแตกต่างของทั้งสองส่วนดังนี้

$$\bar{d}_1 = [z_1 - (\bar{m}x_1 + \bar{b})] \dots \dots \dots \bar{d}_n = [z_n - (\bar{m}x_n + \bar{b})] \quad (4.4)$$

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเหล่านี้จะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความถูกต้องมากขนาดไหน ซึ่งถ้า $\sum_{i=1}^N d_i^2 = 0$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการกำหนดสมการมีความถูกต้องแต่ในความเป็นจริงแล้วเป็นไปได้ จึงได้มีการนำวิธีกำลังสองน้อยสุดมาใช้

เส้นอ้างอิงหรือเส้นเฉลี่ยไม่เพียงแต่จะมีความสำคัญกับแนวทิศทางแกน z ยังมีความสำคัญต่อช่วงตัวอย่างการทดสอบด้วย ซึ่งจะแสดงถึงความแตกต่างของผิวหยาบและคลื่น

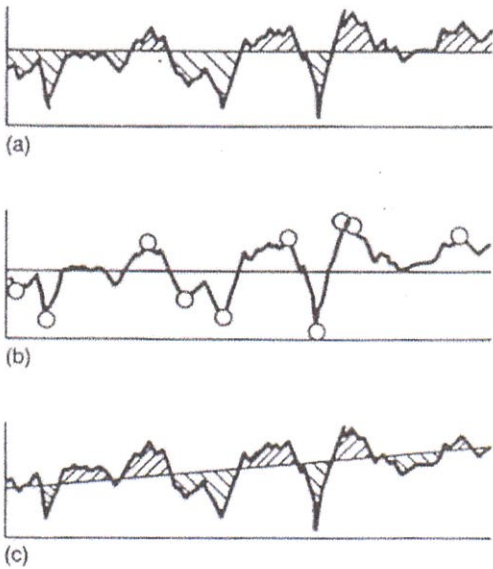
$$\bar{f}(\bar{m}, \bar{b}) = \sum_{i=1}^n d_i^2 \tag{4.5}$$

หรือ

$$\bar{f}(\bar{m}, \bar{b}) = (z_1 - \bar{m}x_1 - \bar{b})^2 + (z_2 - \bar{m}x_2 - \bar{b})^2 + \dots (z_n - \bar{m}x_n - \bar{b})^2 \tag{4.6}$$

ในการที่จะหาค่าของ $\bar{m}$ และค่า $\bar{b}$ สามารถหาได้จาก

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{m}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{b}} = 0 \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบเส้นอ้างอิง 3 แบบ a.) ระบบ M b.) ค่าเฉลี่ย 10 จุด c.) กำลังสองน้อยสุด

4.2.5 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณพื้นผิว

สมมติว่าจะทำการวัดผิวหยาบด้วยเครื่องมือแบบปลายเข็มแหลม ซึ่งเส้นอ้างอิงที่ใช้เป็นแบบเฉลี่ยและแบบกำลังสองน้อยสุด ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ z_i เท่ากับศูนย์ ในการวัดขนาดของผิวหยาบจะนิยมใช้ จะมี 3 แบบคือ

- 1. เส้นศูนย์กลางเฉลี่ย (Centerline Average , CLA) จะใช้สัญลักษณ์ R_a

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i| \tag{4.8}$$

- 2. ค่ารากที่สองของกำลังสอง (RMS) จะใช้สัญลักษณ์ R_q

$$R_q = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2 \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

3. ค่าสูงสุด-ต่ำสุด จะสมมุติให้มีการกระจายของความสูงเป็นแบบเกาส์เซียน ค่า R_q สามารถใช้แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะใช้อธิบายโดยค่า R_l

$$R_l = \max(z) - \min(z) \quad (4.10)$$

กรณีที่มีการกระจายตัวเป็นแบบไซน์ สามารถที่จะหาอัตราส่วนของ $R_q : R_a$ ได้ดังนี้

$$\frac{R_q}{R_a} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (4.11)$$

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

ดังนั้นจะเห็นว่าค่า R_a เพียงอย่างเดียวไม่สามารถระบุลักษณะของผิวได้ ดังนั้นจะต้องระบุค่าความสัมพันธ์ตามแนวแกน z ด้วย ซึ่งเรียกว่า “ช่วงเบร้ง” คือการตัดยอดของผิวหยาบขนานกับแกน z ดัง รูปที่ 4.7 ซึ่งจะอธิบายในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

$$l^* = l_1^* + l_2^* + \dots + l_n^* \quad (4.12)$$

อัตราส่วนของช่วงเบร้ง จะหาได้ดังนี้

$$t_p = \frac{l^*}{l} \quad (4.13)$$

เมื่อ $l =$ ช่วงที่วัด , m .

โค้งแอบบอทหรือที่เรียกกันอีกอย่างคือ โค้งเบร้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แกนแนวดิ่งเป็นอัตราช่วงเบร้งคูณด้วย 100 กราฟเหล่านี้จะบ่งบอกให้ทราบถึงค่าผิวที่เบี่ยงเบนจากเส้นเฉลี่ย ซึ่งกราฟเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่ามีค่าความสูงของผิวหยาบเท่าไร และมีปริมาณเท่าไร ซึ่งรูปร่างของผิวหยาบสามารถที่จะอธิบายในเทอมของฟังก์ชันการกระจายของความสูง ในรูปของสถิติจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

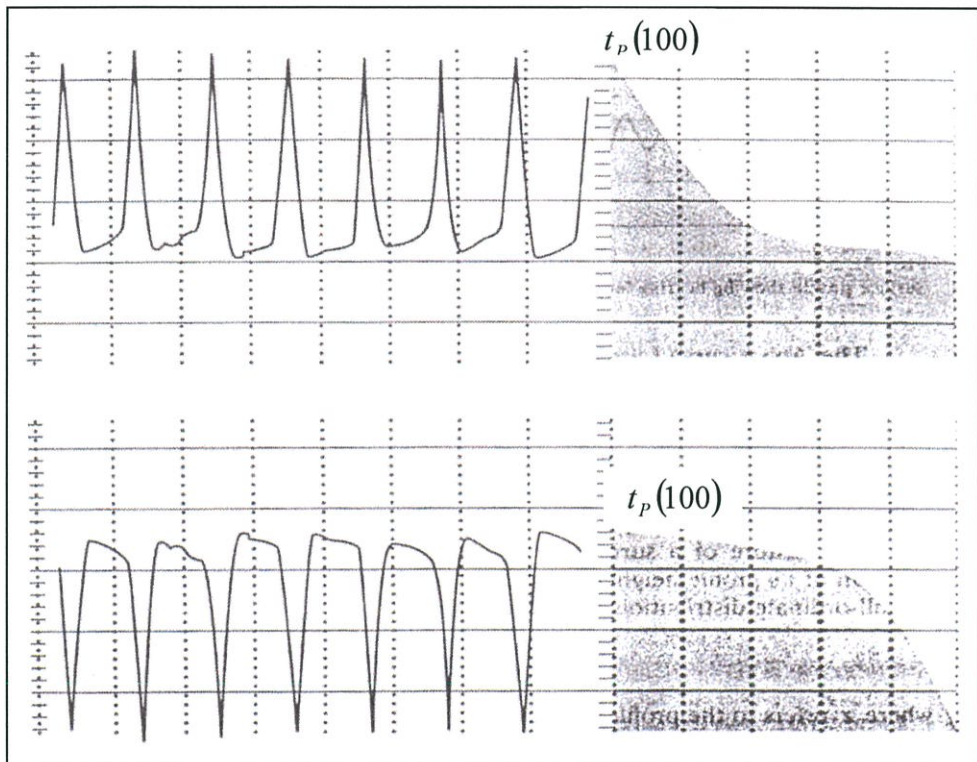
$$\bar{F}(z) = \int_{-\infty}^z \bar{\psi} dz \quad (4.14)$$

เมื่อค่า

z = ค่าความสูงของผิวหยาบที่จุดอ้างอิง

ψ = ฟังก์ชันความน่าจะเป็นซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของการกระจายความสูง

ฟังก์ชันของความน่าจะเป็นอาจจะทำให้เห็นในรูปของอัตราส่วนของความสูงในช่วงที่กำหนดให้ ดังนั้นกราฟแสดงการเบี่ยงเบนจะรวมถึงค่า $z_1, z_2, \dots, z_n$ ที่บางช่วงของจุดต่อและผลรวมของจำนวนของจุดที่ความสูงบางระดับ **รูปที่ 4.8** แสดงวิธีที่ใช้ในการหาโค้งของการกระจายทั้งหมด, โค้งการกระจายใน**รูปที่ 4.8** เป็นโค้งที่เรียบที่สุดสามารถที่จะเขียนเป็นอิทโทแกรม ซึ่งโค้งเรียบนี้จะมีการกระจายเป็นแบบเกาส์เซียน



รูปที่ 4.8 แสดงโค้งแบบบอทของพื้นผิวสองแบบที่แตกต่างกัน

ถ้าแนวความคิดนี้เกี่ยวกับการกระจายความสูงนี้มีความหนาแน่นแบบพาราโบลาหรืออิทโทแกรม ซึ่งค่า R_a สามารถที่จะประมาณจากค่า R_q ถ้าอัตราส่วนของความสูงในช่วง $z_j - \Delta \leq z_j \leq z_j + \Delta$ แทนค่าด้วย $\bar{\psi}_j$ สำหรับ $j = -L, \dots, 0, \dots, L$ ดังนั้นค่าโดยประมาณที่โค้งก็จะเท่ากับสมการ (3.4) และ (3.5) ดังนั้น

$$R_a = \int_{-L}^{+L} |z| \bar{\psi} dz$$

$$R_q = \left(\int_{-L}^{+L} z^2 \bar{\psi} dz \right)^{1/2} \quad (4.15)$$

จากความสัมพันธ์ของเกาส์-ลาปาส สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของความน่าจะเป็น จากการสมมุติจากการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังนี้

$$\bar{\psi} = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp \frac{-(z-z^*)^2}{2\sigma^2} \quad (4.16)$$

เมื่อค่า

σ = เป็นค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน

z^* = เป็นค่าที่ห่างจากค่าเฉลี่ยที่เลือกไว้

โดยปกติแล้วช่วงที่จะเกิดโอกาสคือ $+\infty, -\infty$ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะให้อยู่ในช่วง $\pm 3\sigma$ เพราะโดยประมาณ 99.9 % ของโอกาสที่จะเกิดขึ้นกับพื้นที่ของยอดอาจมีการผิดพลาดเล็กน้อย ขณะที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 4.9 แสดงการหาความโค้งน่าจะเป็นจากผิวหยาบที่วัดได้

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

$$M_n = \int_{-\infty}^{+\infty} z^n \bar{\psi} dz \quad (4.17)$$

ซึ่งสามารถที่จะสังเกตถึงโมเมนต์ 2 เท่าของครึ่ง $\bar{\psi}dz$ จะสมมูลกับเส้น R_a เหลือในสมการ (3.11) หรือ

$$R_a = 2 \int_0^{\infty} z \bar{\psi} dz = 2 \text{ เท่าของโมเมนต์ครึ่งแรกของครึ่ง } \bar{\psi}dz$$

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

$$R_q = \bar{\sigma} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} z^2 \bar{\psi} dz \right)^{1/2} \quad (4.18)$$

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

$$\bar{\alpha} = R_q^{1/3} \int_{-\infty}^{\infty} z^3 \bar{\psi} dz \quad (4.19)$$

ถ้าค่าความสูงกับความลึกของยอดแหลมมีค่าเท่ากันคือห่างจากเส้นอ้างอิงเท่ากันโดยประมาณ ค่าความลาดเอียงก็จะเป็น 0 นอกจากนี้แล้วผิวที่ลึกมากๆ ก็จะเป็นค่าลบ ค่าโมเมนต์ที่ 4 ของ $\bar{\psi}dz$ ก็จะสัมพันธ์กับค่าที่จุดสูงสุดหรือความสูงของการแจกแจงความถี่ที่แต่ละจุดโค้งและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{\beta} = R_q^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 \bar{\psi} dz \quad (4.20)$$

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

สำหรับโค้งที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังสมการที่ (4.16) สามารถเขียนในรูปของโมเมนต์ได้ดังนี้

$$M_n = \frac{1}{\bar{\sigma}(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} z^n \exp \frac{-z^2}{2\sigma^2} dz \quad (4.21)$$

เมื่อค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมาตรฐาน $\bar{\sigma} = R_q$ จากสมการ (3.17) สามารถใช้ได้ ถ้า n เป็นค่าคู่ แต่ถ้า n เป็นค่าคี่สามารถหาได้จาก

$$M_n = \frac{n!}{2^{n/2} (n/2)!} \bar{\sigma}^n \quad (4.22)$$

ค่าตัวแปรบางตัวอาจใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับผิวในฟิล์มของสารหล่อลื่นดังค่าในช่วงที่พบมากดังแสดงข้างล่างนี้

ความหนาแน่นของยอดผิวหยาบ 10^2 ถึง 10^6 peak/mm^2

ค่าระยะห่างของยอดผิวหยาบ 1 ถึง $75 \mu\text{m}$

ค่าความชันของผิวหยาบ 0 ถึง 25°

รัศมีของยอดปลายผิวหยาบ ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10 ถึง $30 \mu\text{m}$

บทที่ 5

การหล่อลื่นแบบโทเมอร์อิลาสโตไฮโดรไดนามิกของฟันเฟือง

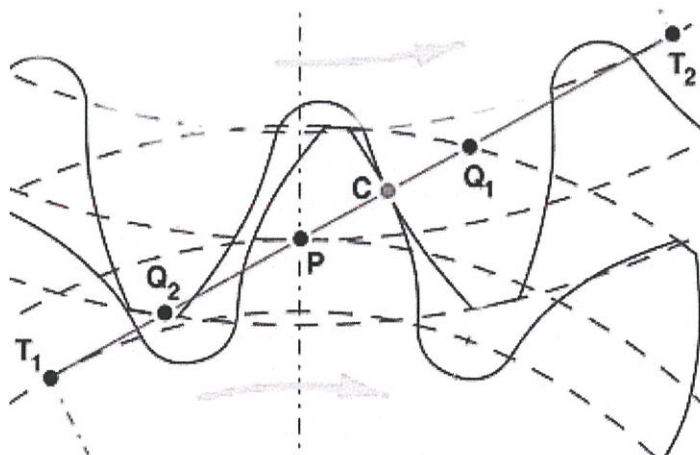
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของฟันเฟือง ในกรณีที่มีการหล่อลื่นเป็นแบบฟิล์มน้ำมันบางมากๆ หรือเป็นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก โดยให้สารหล่อลื่น ที่เป็นน้ำมัน ผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง ซึ่งมีพฤติกรรมที่เป็นแบบนอนนิวโตเนียน เมื่อพิจารณาชนิดของฟันเฟืองเป็นแบบเฟืองฟันตรง เมื่อพิจารณาผลจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการทำงานของฟันเฟือง เข้ามารวมในการคำนวณ ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ ใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เพื่อหาคำตอบ ที่ถูกต้อง

5.1 ลักษณะกายภาพของฟันเฟืองชนิดตรง

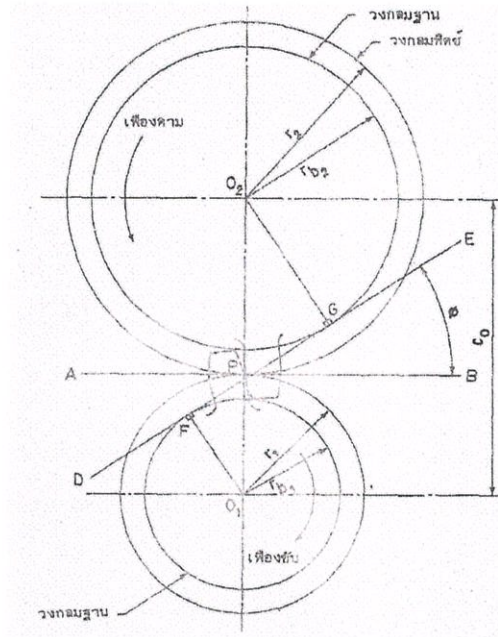
จากลักษณะทางกายภาพของฟันเฟืองตามรูปที่ 5.1 จะได้ระยะที่เฟืองทำการขบกันเท่ากับ ระยะ Q2Q1 โดยที่ฟันเฟืองจะเริ่มขบกันที่จุด Q2 และจะสิ้นสุดที่ จุด Q1 โดยที่จุด P เป็นจุดที่ อยู่ในแนว เดียวกันกับจุดศูนย์กลางของเฟืองขับและเฟืองตามโดยในทางทฤษฎีจะมี มีความเร็วที่ ผิวหน้าสัมผัสเท่ากันและเป็นบริเวณที่รับภาระสูงสุดเรียกว่าจุด Pitch Point และจุด C เป็นจุดที่ ฟันเฟืองสัมผัสกันที่เวลาใด ระยะที่ฟันเฟืองขบกันจะมีค่าเป็นไปตามสมการระยะการขบของ ฟันเฟืองในสมการที่ 5.1

$$S = Q2Q1 = \sqrt{(r_2 + a_2)^2 - (r_2 \cos \varphi)^2} - r_2 \sin \varphi + \sqrt{(r_1 + a_1)^2 - (r_1 \cos \varphi)^2} - r_1 \sin \varphi \quad (5.1)$$

โดยที่ r_1 = รัศมีวงกลมพิตช์ของเฟืองขับ r_2 = รัศมีวงกลมพิตช์ของเฟืองตาม
 a_1 = แอคเคนดัมของเฟืองขับ a_2 = แอคเคนดัมของเฟืองตาม φ = pressure angle



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการขบกันของฟันเฟืองตรง



รูปที่ 5.2 แสดงระยะรัศมีวงกลมพิทช์ของเฟืองขับและเฟืองตามของฟันเฟืองตรง

เมื่อฟันเฟืองเคลื่อนที่เข้าหากัน ความเร็วบริเวณที่ผิวหน้าของการสัมผัสระหว่าง เฟืองขับ และเฟืองตาม จะขึ้นอยู่กับระยะรัศมีความโค้งของฟันเฟือง โดยจะมีค่าขึ้นกับเวลาที่เปลี่ยนไปใน ช่วงเวลาที่ฟันเฟืองทำการขบกัน ความเร็วบริเวณผิวหน้าของการสัมผัสระหว่างเฟืองขับ และเฟืองตาม จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$u_p = \omega_p R_p \quad (5.2)$$

$$u_g = \omega_g R_g \quad (5.3)$$

$$R_p = (r_{b1} \tan \varphi + s(t)) \quad (5.4)$$

$$R_g = (r_{b2} \tan \varphi - s(t)) \quad (5.5)$$

$$r_{b1} = r_1 \cos \varphi \quad (5.6)$$

$$r_{b2} = r_2 \cos \varphi \quad (5.7)$$

$$r_{1,2} = \left(\frac{mN_{p,g}}{2} \right) \quad (5.8)$$

โดยที่ R_p, R_g คือสัดส่วนความโค้งของผิวฟันเฟืองขับ และฟันเฟืองตามบริเวณที่พิจารณาเมื่อ ฟันเฟืองมีการขบกัน

u_p, u_g คือความเร็วที่ผิวหน้าบริเวณที่ฟันเฟืองขบกันของเฟืองขับและเฟืองตาม

ω_p, ω_g คือความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับและเฟืองตาม

r_{b1}, r_{b2} คือรัศมีวงกลมฐานของเฟืองขับและเฟืองตาม

5.2 สมมุติฐานของเฮิร์ตซ์

เนื่องจากการหล่อลื่นแบบฮิสเตรีติกโคโรนาไมก จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของส่วนที่เกิดการสัมผัสกัน ดังนั้น เฮิร์ตซ์จึงได้ทำการพิจารณา ความเค้น และ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของรูปทรงวงรี (Ellipsoidal) สองอันสัมผัสกันโดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่น เพื่อกำหนดรูปแบบของปัญหา สำหรับการคำนวณ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แบร็วทรึงกลม, เพลาข้อเหวี่ยง, ตลับลูกปืน, เฟืองและลูกเบี้ยว โดยมีสมมุติฐานดังนี้

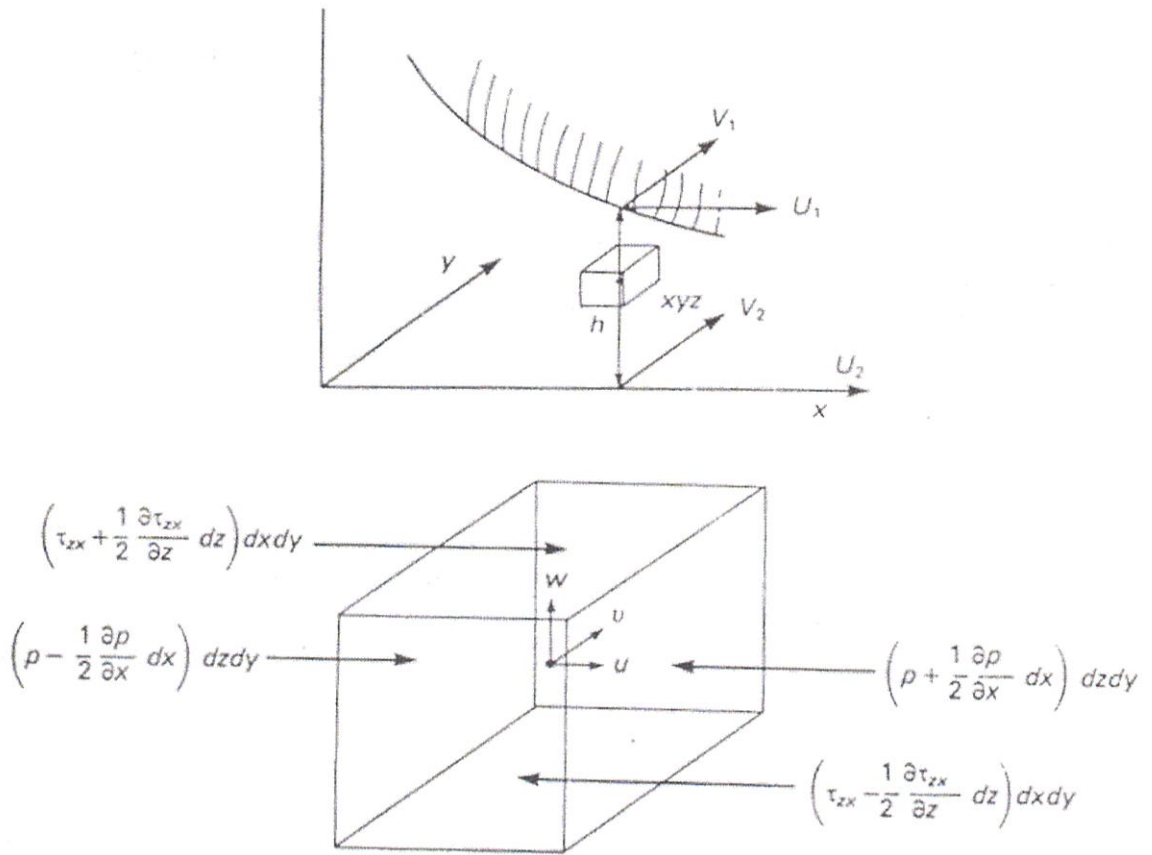
1. วัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุเนื้อเดียวและอยู่ในช่วงที่วัสดุยืดหยุ่น
2. ไม่มีแรงตามแนวสัมผัสระหว่างของแข็ง
3. ช่วงของการสัมผัสจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมี
4. ของแข็งจะอยู่กับที่และอยู่ในสภาวะสมดุล

5.3 สมการเรย์โนลด์

สมการเรย์โนลด์ เป็นสมการที่ใช้ในการหาการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมัน ซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

1. การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ
2. ของไหลที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นซึ่งผสมสารหล่อลื่นของแข็งแล้วจะมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียน
3. ไม่คิดแรงจากน้ำหนักของของไหลและแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล
4. ไม่มีการกลั่นไถลของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน
5. ความหนาของฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย
6. ไม่คิดถึงผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก
7. แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่างของความดันรวมทั้งไม่คิดความเร่งของของไหล
8. อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของไหลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่มีการชนกันระหว่างอนุภาค
9. อนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีขนาดเท่ากันทุกอนุภาค

เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงในชิ้นส่วนของไหล ตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงแรงที่กระทำต่อออลิเมนต์ของของไหล

จากสมมูลของแรงและจากสมมุติฐานที่ 1,2,3 และ 7 ตามแนวแกน x และ z จะลดรูปเหลือ

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.10)$$

จากสมการการไหลของสารแบบนอนนิวโตเนียนคือ

$$\tau_{xy} = \mu^* \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5.11)$$

$$\tau_{zy} = \mu^* \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.12)$$

เมื่อ $\mu^* = \mu^*(I_2)$ และ I_2 คือ second invariant of strain rate หาได้จาก

$$I_2 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (5.13)$$

แทนค่าสมการ (5.11) ลงในสมการ (5.9) แล้วทำการอินทิเกรตสมการ (5.9)

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial x} y + \frac{c_1}{\mu^*} \quad (5.14)$$

และทำการอินทิเกรตสมการ (5.14) อีกครั้งจะได้

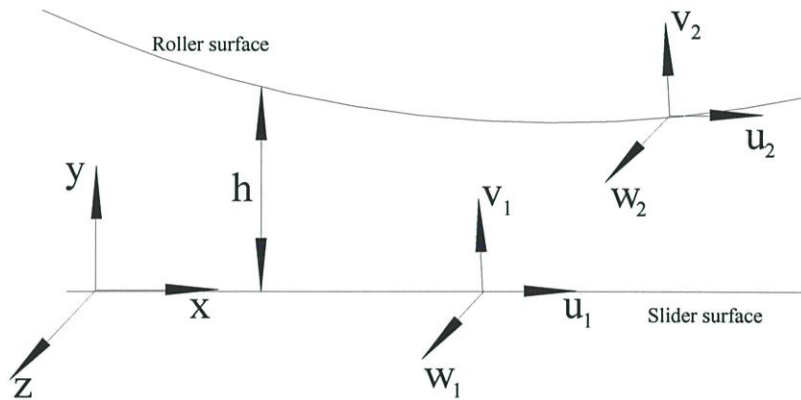
$$u = \frac{\partial p}{\partial x} \int \frac{y}{\mu^*} dy + c_1 \int \frac{dy}{\mu^*} + c_2 \quad (5.15)$$

แทนค่าสมการ (5.12) ลงในสมการ (5.10) แล้วทำการอินทิเกรตสมการ (5.10)

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial z} y + \frac{c_3}{\mu^*} \quad (5.16)$$

$$w = \frac{\partial p}{\partial z} \int \frac{y}{\mu^*} dy + c_3 \int \frac{dy}{\mu^*} + c_4 \quad (5.17)$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ของตามรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงระบบพิกัดและเงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์

$$\text{จะได้ว่า} \quad y=0, u=u_1, \quad v=v_1, \quad w=0 \quad (5.18)$$

$$y=h, u=u_2, \quad v=v_2, \quad w=0$$

จากเงื่อนไขที่ขอบจะได้ว่า

$$u = \left\{ \int \frac{y}{\mu^*} dy - h \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \int \frac{dy}{\mu^*} \right\} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{(u_2 - u_1)}{h} \mu_{e0} \int \frac{dy}{\mu^*} + u_1 \quad (5.19)$$

$$w = \left(\int \frac{y}{\mu^*} dy - h \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \int \frac{dy}{\mu^*} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (5.20)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \frac{1}{\mu_{ei}} = \frac{1}{h^{i+1}} \int_0^h \frac{y^i}{\mu^*} dy \quad \text{เมื่อ } i=0,1,2 \quad (5.21)$$

โดยที่อัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate) คือ

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{y}{\mu^*} - \left(\frac{h}{\mu^*} \right) \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right) \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu^*} \right) \left(\frac{u_2 - u_1}{h} \right) \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \left(\frac{y}{\mu^*} - \left(\frac{h}{\mu^*} \right) \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right) \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (5.23)$$

สำหรับการไหลในสองมิติเราสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5.24)$$

อินทิเกรตสมการ (5.24) เทียบกับ y ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง h ดังนั้น

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dy + \int_0^h \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dy + \int_0^h \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dy + \int_0^h \frac{\partial \rho}{\partial t} dy = 0 \quad (5.25)$$

จาก General rule of Integration

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x}(f(x, y, z)) dy = -f(x, y, z) \Big|_{y=h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h f(x, y, z) dy \quad (5.26)$$

จะได้

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dy = -\rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^h u dy \right) \quad (5.27)$$

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dy = -\rho w_2 \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \int_0^h w dy \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \int_0^h w dy \right) \quad (5.28)$$

ดังนั้น

$$-\rho u_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^h u dy \right) + \rho(v_2 - v_1) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \int_0^h w dy \right) + h \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5.29)$$

เมื่อ

$$\int_0^h w dy = - \left(\frac{h^3}{\mu_{e,2}} - h^3 \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \right) \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (5.31)$$

$$\int_0^h u dy = - \left(\frac{h^3}{\mu_{e2}} - h^3 \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \right) \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + h \left(\frac{u_2 - u_1}{2} \right) \left(1 - 2 \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right) + h \left(\frac{u_2 + u_1}{2} \right) \quad (5.30)$$

แทนค่ากลับเข้าไปในสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

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

$$\rho (v_2 - v_1) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\rho \left(\frac{h^3}{\mu_{e2}} - h^3 \left(\frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \right) \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right) + h \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \left(\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \left(\frac{dp}{dx} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h^3 \left(\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \left(\frac{dp}{dz} \right) \right) =$$

$$\left(\frac{u_2 + u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + \left(\frac{u_2 - u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h \left(1 - 2 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (5.31)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) = \rho \left(-u_2 \frac{\partial h}{\partial x} + (v_2 - v_1) \right) + h \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

สำหรับปัญหาของเฟืองฟันตรง เนื่องจากความกว้างของเฟืองจะยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างของการสัมผัส ดังนั้นการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกนของแกน z จะมีการไหลน้อยมากเมื่อเทียบกับแนวแกน x สมการ (5.31) จึงลดรูปเป็น

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

$$\frac{(u_2 - u_1)}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h \left(1 - 2 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (5.32)$$

เมื่อคิดค่าอ้างอิงต่างๆ และตัวแปรแบบไร้มิติ ที่ตำแหน่ง Pitch Contact จะได้ว่า

$$u_0 = \frac{\omega_g R_g \sin(\varphi) + \omega_p R_p \sin(\varphi)}{2} \quad \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_p \sin(\varphi)} + \frac{1}{R_g \sin(\varphi)}$$

$$E' = \frac{2}{\frac{(1 - \nu_A^2)}{E_A} + \frac{(1 - \nu_B^2)}{E_B}} \quad W'_0 = \frac{w_0}{E' R_0^2}$$

$$P_H = E' \left(\frac{W'_0}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad b = R_0 \left(\frac{8W'_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{PX} = R_p \sin(\varphi) + S \quad R_{GX} = R_g \sin(\varphi) - S$$

$$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{R_{PX}} + \frac{1}{R_{GX}}$$

$$\begin{aligned}
\bar{u} &= \frac{u_{GX} + u_{PX}}{2} & u_{GX} &= \omega_G R_{GX} & u_{PX} &= \omega_P R_{PX} \\
S &= \omega_P R_P t & S_0 &= \frac{u_{GX} - u_{PX}}{\bar{u}} & k_f &= k_0 \bar{k}_P \\
p &= P_H \bar{P} & x &= b \bar{X} & \rho &= \rho_0 \bar{\rho} & h &= \left(\frac{b^2}{R_0} \right) \bar{h} \\
\mu^* &= \mu_0 \bar{\mu} & u &= u_0 u^* & t &= \frac{b}{u_0} \bar{t} & y &= h \bar{y} = \left(\left(\frac{b^2}{R_0} \right) \bar{h} \right) \bar{y}
\end{aligned}$$

แทนค่าลงไปในสมการ (5.32) และทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \bar{X}} \left(\varepsilon \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}} \right) \right) &= K C_{UT} \frac{\partial}{\partial \bar{X}} (\bar{\rho} \bar{h}) + \\
& K C_{UT} \left(\frac{S_0}{2} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{X}} \left(\bar{\rho} \bar{h} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right) + K \frac{\partial}{\partial \bar{t}} (\bar{\rho} \bar{h})
\end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\text{เมื่อ} \quad K = \frac{u_0 \mu_0 R_0^2}{b^3 P_H} \quad (5.34)$$

$$\varepsilon = \bar{\rho} \bar{h}^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right) \quad (5.35)$$

$$C_{UT} = \frac{\bar{u}}{u_0} \quad (5.36)$$

5.4 สมการความหนาฟิล์ม

จากสมการเรย์โนลด์ (5.33) เราจะเห็นว่ามีความแปรอยู่หลายตัวที่ยังไม่ทราบค่า ดังนั้นในปัญหาของฟิโนเฟือง การหาค่าจะเป็นแบบฟิล์มน้ำมันที่บางมากๆ หรือเป็นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ทำให้ผิวของฟิโนเฟืองมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สมการของความหนาฟิล์มน้ำมันจะมีผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฟิโนเฟืองด้วยเพราะฉะนั้นสมการความหนาของฟิล์มน้ำมันจึงเป็นไปตามสมการ

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + d(x) - \frac{2}{\pi E'} \int_{-\infty}^{x_0} p(x') \ln(x - x')^2 dx' \quad (5.37)$$

$$\text{โดยที่} \quad d(x) = d_G(x) + d_P(x) \quad (5.38)$$

เมื่อเทอม $d(x)$ คือเทอมที่แสดงความหยาบผิวของฟิโนเฟืองของผิวเฟืองขับและเฟืองตามลำดับ แทนค่าลงไปในสมการ (5.37) เพื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ โดยใช้เทอมของการ

เปลี่ยนแปลงรูปร่างของพื้นผิวของขั้วและพื้นผิวของตาม Okamura เพื่อให้เกิดความสมดุลของการไหล

$$\bar{h}_i = \bar{h}_0 + \frac{\bar{X}_i^2}{2C_{RT}} + D(\bar{X}_i) - \frac{\Delta\bar{X}}{2\pi} \sum_{j=1}^N \bar{P}_j \ln \left(\left\| \frac{\bar{X}_{i+1} + \bar{X}_i}{2} - \bar{X}_j \right\| \left\| \frac{\bar{X}_{i-1} + \bar{X}_i}{2} - \bar{X}_j \right\| \right) \quad (5.39)$$

$$\text{เมื่อ} \quad D(\bar{X}_i) = D_G(\bar{X}_i) + D_P(\bar{X}_i) \quad (5.40)$$

5.5 สมการความหนาแน่นและความหนืด

พฤติกรรมของน้ำมันหล่อลื่นในการวิเคราะห์แบบเทอร์โมอิลาสโตไฮดรอดนามิกนั้น ความหนืดและความหนาแน่นจะได้รับผลกระทบของความดันและอุณหภูมิ โดย Dowson และ Higginson (1966) [11] ได้ทำการทดลองและกำหนดความสัมพันธ์ของความหนาแน่นโดย

$$\rho = \rho_f \left[1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right] [1 - \beta(T - T_0)] \quad (5.41)$$

$$\text{โดยที่} \quad \rho_f = \frac{\rho_0}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_p} \right)} \quad (5.42)$$

เมื่อ ρ_f คือความหนาแน่นของของผสม (mixture substance) ρ_0 คือความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง และ λ คือเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งโดยน้ำหนัก

เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ จะได้สมการความหนาแน่นไร้มิติ

$$\bar{\rho} = \frac{\left[1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H \bar{P}}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H \bar{P}} \right] [1 - \beta T_0 (\bar{\theta} - 1)]}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_p} \right)} \quad (5.43)$$

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น Roeland (1966) [10] ได้ทำการกำหนดโดย

$$\bar{\mu}_R^* = \exp \left\{ [\ln(\mu_0) + 9.67] \left[-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^Z \right] - \gamma(T - T_0) \right\} \quad (5.44)$$

จากทฤษฎีสารแขวนลอยของ Einstein ได้ตั้งสมมุติฐานว่าสารแขวนลอยทุกชนิดจะพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนและความหนืดเป็นไปตามสมการ

$$\bar{\mu}_s^* = (1 + 2.5N) \quad (5.45)$$

เมื่อ N คือเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่ฟุ้งกระจายในสารทำละลายโดยปริมาตร โดย Rylander ได้กำหนดค่า N ไว้ดังนี้

$$N = \frac{\lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \quad (5.46)$$

ดังนั้นสมการความหนืดจึงอยู่ในรูป

$$\mu^* = \mu_0 \bar{\mu}_R^* \bar{\mu}_s^* \quad (5.47)$$

เนื่องจากสารแขวนลอยมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนจึงใช้แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ (power law model) มาประยุกต์กับสมการความหนืดดังนั้นสมการ (4.64) จะเปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} \mu^* = m_0 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} & \left(1 + \frac{2.5 \lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \right) \\ & \exp \left((\ln \mu_0 + 9.67) \left(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^{2.1} \right) - \gamma (T - T_0) \right) \end{aligned} \quad (5.48)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ จะได้สมการความหนืดไร้มิติ

$$\begin{aligned} \bar{\mu} = \left\{ \left(\frac{m_0}{\mu_0} \right) \left| \frac{u_0 R_0}{b^2} \right|^{n-1} \right\} & \left| \frac{1}{\bar{h}} \right|^{n-1} \left| \frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right|^{n-1} \left(1 + \frac{2.5 \lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \right) \\ & \exp \left((\ln \mu_0 + 9.67) \left(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H \bar{P})^{2.1} \right) - \gamma T_0 (\bar{\theta} - 1) \right) \end{aligned} \quad (5.49)$$

5.6 สมการพลังงาน

การหาการกระจายอุณหภูมิของปัญหาทางเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของของผสมสามารถหาได้จากสมการพลังงาน Khonsari M.M., Hua D.Y. (1994) [1]

$$\rho \frac{D\zeta}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot k \nabla T + \Phi - \nabla \cdot \left(\sum_i j_i \zeta_i \right) + q \quad (5.50)$$

เมื่อ Φ คือ viscous dissipation $\nabla \cdot \left(\sum_i j_i e_i \right)$ คือพจน์ของการทำปฏิกิริยาภายในของของผสม q คือพจน์ของอัตราการเกิดความร้อน (rate of heat generation) ต่อหน่วยของปริมาตร และ ζ คือเอนทัลปีสามารถแทนได้โดย

$$\zeta = e + \frac{p}{\rho} \quad (5.51)$$

เมื่อ e คือพลังงานภายในต่อหน่วยมวล สมมติว่าไม่มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งกับน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้น พจน์ $\nabla \cdot \left(\sum_i j_i e_i \right)$ จึงสามารถตัดทิ้งได้ เราสามารถเขียนสมการ (5.51) ได้ในเทอมของอุณหภูมิได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{1}{\rho} \left[1 + \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right] \frac{Dp}{Dt} + c_p \frac{DT}{Dt} \quad (5.52)$$

จากสมมติฐานของสมการเรย์โนลด์สมการพลังงานจะลดรูปเป็น

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu^* \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) + q \quad (5.53)$$

เนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดบางจึงทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่างผิวสัมผัสกับเม็ดสารหล่อลื่นของแข็ง ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นคือ

$$q = \frac{2f_p w_p (|u_{PX} - \bar{u}| + |u_{GX} - \bar{u}|)}{V_f} = \frac{2f_p w_p |u_{PX} - u_{GX}|}{V_f} \quad (5.54)$$

เมื่อ f_p คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งและผิวสัมผัส w_p คือภาระที่สารหล่อลื่นของแข็งรับในช่วงสัมผัสมีหน่วยเป็น N/m และ V_f คือปริมาตรในช่วงที่อนุภาคของแข็งสัมผัสกับผิวของฟันเฟืองมีหน่วยเป็น m^3

โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผิวของฟันเฟือง [1]

$$T_p(x, 0) = T_0 + \frac{1}{\sqrt{\pi \rho_p C_{p,p} k_p u_p}} \int_{x_{in}}^x k_p \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \frac{dx'}{\sqrt{x-x'}} \quad (5.55)$$

$$T_G(x, h) = T_0 - \frac{1}{\sqrt{\pi \rho_G C_{p,G} k_G u_G}} \int_{x_{in}}^x k_p \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} \frac{dx'}{\sqrt{x-x'}} \quad (5.56)$$

แทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการพลังงานและจัดให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} = & K_{T1} \left(\frac{\bar{\rho} \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} + u^* \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}} \right) - K_{T2} \left(\frac{\bar{\mu}}{\bar{k}_p} \right) \left[\frac{\partial u^*}{\partial y} \right]^2 \\ & - K_{T3} \left(\frac{\bar{\theta} \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{t}} + u^* \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}} \right) - K_{T4} \left(\frac{|SC_{UT}| \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \frac{(\bar{W}_p)}{\left(\int_n^{\text{out}} \bar{h} d\bar{X} \right)} \end{aligned} \quad (5.57)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{T1} &= \left(\frac{\bar{u} \rho_0 C_p b^3}{k_0 R_0^2} \right) & K_{T2} &= \left(\frac{\eta_0 \bar{u}^2}{k_0 T_0} \right) \\ K_{T3} &= \left(\frac{\beta \bar{u} b^3 P_H}{k_0 R_0^2} \right) & K_{T4} &= \left(\frac{2 f_p u_0 E' b}{k_0 T_0} \right) \end{aligned}$$

เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผิวของพื้นเฟืองในรูปแบบไร้มิติ

$$\bar{\theta}_p = 1 + \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_p C_{p,p} k_p b^3 u_0 C_{UT} \left(1 - \frac{S_0}{2} \right)}} \int_{\bar{X}_{IN}}^{\bar{X}_i} \left(\frac{\bar{k}_p}{\bar{h}_i} \right) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{Y}} \right)_{\bar{Y}=0} \frac{d\bar{X}'}{\sqrt{\bar{X}_i - \bar{X}'}} \quad (5.58)$$

$$\theta_G = 1 - \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_G C_{p,G} k_G b^3 u_0 C_{UT} \left(1 + \frac{S_0}{2} \right)}} \int_{\bar{X}_{IN}}^{\bar{X}_i} \left(\frac{\bar{k}_p}{\bar{h}_i} \right) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{Y}} \right)_{\bar{Y}=1} \frac{d\bar{X}'}{\sqrt{\bar{X}_i - \bar{X}'}} \quad (5.59)$$

5.7 สมการการนำความร้อนของสารหล่อลื่น

พฤติกรรมของน้ำมันหล่อลื่นในการวิเคราะห์แบบเทอร์โมฮิดรอลไดนามิก นั้น การนำความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่ฟิล์มน้ำมันได้ Wang (1991) [16] ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนกับความดัน

$$\bar{k}_p = 1 + \frac{1.73 \times 10^{-9} P_H \bar{P}}{1 + 6.91 \times 10^{-10} P_H \bar{P}} \quad (5.60)$$

5.8 ภาระที่รับ (Load carrying capacity) [1]

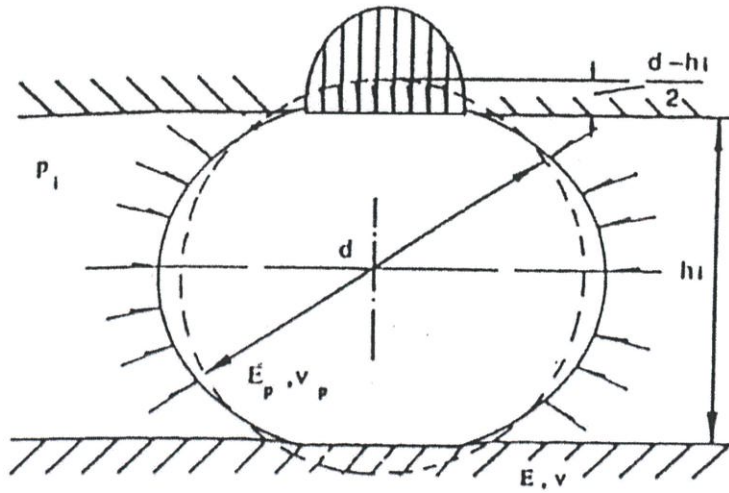
ภาระที่น้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่นของแฉ่งรับสามารถแบ่งออกได้สองส่วนคือ ส่วนที่น้ำมันหล่อลื่นรับและส่วนที่สารหล่อลื่นของแฉ่งรับสามารถเขียนได้ดังนี้

$$w_T = w_f + w_p \quad (5.61)$$

เมื่อ w_T คือภาระรวมที่รับ w_f คือภาระที่น้ำมันหล่อลื่นรับและ w_p ภาระที่สารหล่อลื่นของแฉ่งรับ โดยภาระที่น้ำมันหล่อลื่นได้รับคือ

$$w_f = \int_{x_{in}}^{x_{out}} p dx \quad (5.62)$$

โดยที่ภาระที่สารหล่อลื่นของแฉ่งได้รับจะรับเป็นภาระในแนวตั้งฉาก (normal load) ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัส

สารหล่อลื่นของแฉ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่นหรือในช่วงเสียรูปอย่างถาวรและก็ได้โดยที่ภาระของอนุภาคได้รับในช่วงยืดหยุ่นของอนุภาคแต่ละอนุภาคคือ

$$w_{i,el} = \frac{1}{6} [d_p - h(x)]^{1.5} d_p^{0.5} E_{ps} + p(x) v_p A_{i,el} \quad (5.63)$$

เมื่อพจน์แรกคือผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคกับพื้นเพื่องขับและพื้นเพื่องตาม และพจน์ที่สองแทนการกระจายความดันที่กระทำบนอนุภาค โดยที่ $A_{i,el}$ คือพื้นที่ที่สัมผัสกับผนังของแต่ละอนุภาคและ E_{ps} คือโมดูลัสของความยืดหยุ่นสมมูลของอนุภาคกับผิวสัมผัสคือ

$$\frac{1}{E_{ps}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} - \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right] \quad (5.64)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ความดันที่สัมผัสเฉลี่ยคือ

$$p_m = \frac{w_{i,el}}{\pi a^2} \quad (5.65)$$

เมื่อ a คือรัศมีของวงกลมของพื้นที่สัมผัสที่ถูกกระทำสามารถหาได้จาก

$$a = \left[\frac{3}{4} \frac{w_{i,el} d_p}{E_{ps}} \right]^{1/3} \quad (5.66)$$

โดยทั่วไปขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัส ดังนั้นอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัสจะอยู่ในช่วงเสียดรูปอย่างถาวร การพิจารณาการเสียดรูปอย่างถาวรจะพิจารณาได้ยาก ดังนั้นในที่นี้จะใช้วิธีการประมาณค่าอย่างง่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ของเสียดรูปอย่างถาวรกับความแข็งของวัสดุความสัมพันธ์นี้คือ

$$w_{i,pl} = \pi a^2 H_d \quad (5.67)$$

เมื่อ H_d คือค่าความแข็งของอนุภาคและ a คือรัศมีของวงกลมของพื้นที่สัมผัสที่ถูกกระทำซึ่งจะสมมุติว่ามีขนาดเท่ากับสมการ (5.65)

ภาระรวมที่ทุกอนุภาครับคือ

$$w_p = \sum_i^{N_z} \sum_i^{N_x} w_i \quad (5.68)$$

เมื่อ N_x และ N_z คือจำนวนของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัสในทิศทางในแนวแกน x และ z ตามลำดับสมมุติว่าอนุภาคมีการกระจายอยู่ทั่วและไม่มีการซ้อนกันในช่วงสัมผัสจำนวนของอนุภาคคือ

$$N_j = l_j \sqrt{\left(\frac{V_f}{l_x l_z} \right) \frac{6\lambda}{\pi d_p^3} \frac{\rho_0/\rho_p}{(1-\lambda[1-\rho_0/\rho_p])}} \quad j=1,2 \quad (5.69)$$

เมื่อ V_f คือปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่นของแข็งในช่วงสัมผัส l_j คือความยาวในช่วงที่อนุภาคเสียดรูปและตัวห้อย $j=1,2$ แทนทิศทางในแนวแกน x และ z ตามลำดับ

5.9 สมการสมดุลแรง

เมื่อผสมอนุภาคของสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็งลงไปในน้ำมัน จะพบว่าแรงที่กระทำต่อพื้นจากความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นจะเท่ากับผลรวมการกระจายของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่เกิดขึ้นบนฟิล์มน้ำมัน เมื่อกรณีที่พื้นเฟืองไม่แตะสัมผัสกัน จะได้ว่า

$$w_f = \int_{x_{IN}}^{x_{OUT}} p dx \quad (5.70)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ

$$\int_{\bar{x}_{IN}}^{\bar{x}_{OUT}} \bar{P} d\bar{X} = C_{WT} \left(\frac{W_{TOTAL} - W_{POWDER}}{W_{TOTAL}} \right) \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (5.71)$$

เมื่อ $C_{WT} = \frac{w'}{w_0}$

5.10 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [1]

ในการทำงานของพื้นเฟืองจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในการทำงาน ในกรณีที่ทำการผสมสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็งลงไปน้ำมัน ความเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฟิล์มของน้ำมัน กับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการเสียดสี ของอนุภาคของสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็งกับผิวของพื้นเฟือง จะได้ตามสมการ

$$f_T = \frac{\int_{X_{IN}}^{X_{END}} \tau_{y=0} dx + f_p w_P}{w'} \quad (5.72)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ

$$f_T = \frac{\left(\frac{\mu_0 u_0 R_0}{b} \right) \int_{\bar{x}_{in}}^{\bar{x}_{end}} \left(\frac{\mu^*}{\bar{h}} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right)_{\bar{y}=0} d\bar{X} + f_p E' R_0 W_{PAR}}{\frac{C_{WT} w_0}{l_{GEAR}}} \quad (5.7-)$$

บทที่ 6

วิธีเชิงตัวเลข

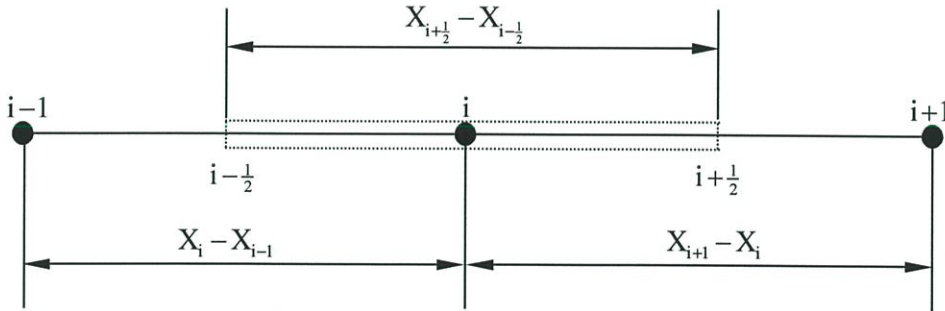
ในบทที่แล้วได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาจะเห็นได้ว่าสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานนั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นในการที่จะแก้ปัญหาจึงเป็นการยากมากที่จะหาค่าแบบเชิงตรง จึงจะทำการจำลองโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วย เพื่อให้การแก้สมการทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

6.1 การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสลับเนื่อง

จากสมการเรย์โนลด์แบบไร้มิติในสมการที่ (5.33)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \bar{X}} \left(\varepsilon \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}} \right) \right) &= KC_{UT} \frac{\partial}{\partial \bar{X}} (\bar{\rho} \bar{h}) + \\ &KC_{UT} \left(\frac{S_0}{2} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{X}} \left(\bar{\rho} \bar{h} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right) + K \frac{\partial}{\partial \bar{t}} (\bar{\rho} \bar{h}) \end{aligned} \quad (6.1)$$

จะเห็นรูปแบบของสมการจะเป็นสมการเอลลิปติกที่อยู่ในรูปของสมการลาปลาซ การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method) [18] สามารถแก้ได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด

ที่ตำแหน่ง i ของสมการที่ (6.1) จะแทนค่าด้วยผลต่างแบบกึ่งกลาง (Central Difference) และแทนค่าด้วยผลต่างแบบถอยหลัง (Backward Difference)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{P}_{i+1} - \bar{P}_i}{\Delta \bar{X}} \right) - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) &= KC_{UT} (\bar{\rho}_i \bar{h}_i - \bar{\rho}_{i-1} \bar{h}_{i-1}) \\ + KC_{UT} \left(\frac{S_0}{2} \right) \left(\bar{\rho}_i \bar{h}_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) - \bar{\rho}_{i-1} \bar{h}_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i-1}}{\bar{\mu}_{e1,i-1}} \right) \right) &+ K \left(\frac{\Delta \bar{X}}{\Delta \bar{t}} \right) (\bar{\rho}_i \bar{h}_i - \bar{\rho}_i^0 \bar{h}_i^0) \end{aligned} \quad (6.2)$$

เมื่อ

$$\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} = \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2} \right) \quad \text{และ} \quad \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} = \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2} \right)$$

จัดรูปของสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} f_i = & \left(\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{P}_{i+1} - \bar{P}_i}{\Delta \bar{X}} \right) - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) - KC_{UT} (\bar{\rho}_i \bar{h}_i - \bar{\rho}_{i-1} \bar{h}_{i-1}) \\ & - KC_{UT} \left(\frac{S_0}{2} \right) \left(\bar{\rho}_i \bar{h}_i \left(1 - 2 \frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right)} \right) - \bar{\rho}_{i-1} \bar{h}_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right)}{\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right)} \right) \right) \\ & - K \left(\frac{\Delta \bar{X}}{\Delta \bar{t}} \right) (\bar{\rho}_i \bar{h}_i - \bar{\rho}_i^0 \bar{h}_i^0) = 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \bar{X}_{IN} & \bar{P} &= 0 \\ \bar{X} &= \bar{X}_{OUT} & \bar{P} &= \frac{d\bar{P}}{d\bar{X}} = 0 \end{aligned}$$

6.2 การแก้สมการพลังงานโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

จากสมการพลังงานในรูปแบบไร้มิติ ตามสมการ (5.57)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{y}^2} = & K_{T1} \left(\frac{\bar{\rho} \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} + u^* \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{X}} \right) - K_{T2} \left(\frac{\bar{\mu}}{\bar{k}_p} \right) \left[\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right]^2 \\ & - K_{T3} \left(\frac{\bar{\theta} \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{t}} + u^* \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}} \right) - K_{T4} \left(\frac{|SC_{UT}| \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \left(\frac{\bar{W}_p}{\int_{in}^{out} \bar{h} d\bar{X}} \right) \end{aligned} \quad (6.4)$$

จากสมการพลังงาน (6.4) ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับความดันที่เกิดขึ้นและค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของสารหล่อลื่น ดังนั้นในการคำนวณเพื่อหาอุณหภูมิจะต้องใช้เวลาและความจำที่คอมพิวเตอร์ต้องใ้้มาก ซึ่งหากพิจารณาให้สมการพลังงานมีการกระจายเป็นแบบพาราโบลา ซึ่งจะทำให้การคำนวณใช้เวลาน้อยลง สามารถที่จะเขียนสมการการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ได้ดังต่อไปนี้ [9]

$$T(x, y) = ay^2 + by + c \quad (6.5)$$

เงื่อนไขขอบคือ

$$\begin{aligned} y=0 & \quad T=T_p \\ y=h & \quad T=T_G \\ T_m &= \frac{1}{h} \int_0^h T(x,y) dy \end{aligned}$$

จากเงื่อนไขขอบ จะได้ว่า

$$T(x,y) = (3T_G - 6T_m + 3T_p) \left(\frac{y}{h}\right)^2 + (-2T_G + 6T_m - 4T_p) \left(\frac{y}{h}\right) + T_p \quad (6.6)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ

$$\bar{\theta} = \frac{T(x,z)}{T_0} = (3\bar{\theta}_G - 6\bar{\theta}_m + 3\bar{\theta}_p) \bar{y}^2 + (-2\bar{\theta}_G + 6\bar{\theta}_m - 4\bar{\theta}_p) \bar{y} + \bar{\theta}_p \quad (6.7)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{y}^2} = 6\bar{\theta}_p - 12\bar{\theta}_m + 6\bar{\theta}_G \quad (6.8)$$

สำหรับสมการพลังงานก็จะแทนค่าแบบผลต่างแบบถอยหลัง (Backward Differences) เนื่องจากเงื่อนไขขอบที่ทราบคือ อุณหภูมิที่ทางเข้า ซึ่งจะกำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และในการแทนค่าเริ่มต้น เมื่อแทนสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยผลต่างแบบถอยหลัง

$$\begin{aligned} (6\bar{\theta}_{p,i} - 12\bar{\theta}_i + 6\bar{\theta}_{G,i}) &= K_{T1} \left(\frac{\bar{\rho}_i \bar{h}_i^2}{\bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \\ &\quad - K_{T2} \left(\frac{\bar{\mu}_i}{\bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right)_i^2 \\ &\quad - K_{T3} \left(\frac{\bar{\theta}_i \bar{h}_i^2}{\bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_i^0}{\Delta \bar{t}} - u_i^* \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \\ &\quad - K_{T4} \left(\frac{|SC_{UT}| \bar{h}^2}{\bar{k}_p} \right) \left(\frac{(\bar{W}_p)}{\left(\int_m^{out} \bar{h} d\bar{X} \right)} \right) \end{aligned} \quad (6.9)$$

จัดรูปแบบของสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}
f_{Ti} = & \left(\frac{\bar{\theta}_{P,i} + \bar{\theta}_{G,i}}{2} \right) - K_{T1} \left(\frac{\bar{\rho}_i \bar{h}_i^2}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \\
& + K_{T2} \left(\frac{\bar{\mu}_i}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial y} \right)_i^2 + K_{T3} \left(\frac{\bar{\theta}_i \bar{h}_i^2}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \\
& + K_{T4} \left(\frac{|SC_{UT}| \bar{h}^2}{12 \bar{k}_p} \right) \frac{(\bar{W}_p)}{\left(\int_{in}^{out} \bar{h} d\bar{X} \right)} - \bar{\theta}_i = 0
\end{aligned} \tag{6.10}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้ $\bar{\theta}_{IN} = 1$

6.3 วิธีนิวตันราฟสัน

ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton – Raphson method) เป็นวิธีที่มีรากฐานมาจากอนุกรมเทย์เลอร์ โดยอนุกรมเทย์เลอร์เป็นอนุกรมที่ใช้ในการหาค่าฟังก์ชันที่ตำแหน่ง x จากค่าของฟังก์ชันและค่าอนุพันธ์ (derivatives) ที่มีอันดับต่างๆ กันของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง x_0 ซึ่งจะหาได้ดังนี้

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0) f'(x_0) \tag{6.11}$$

ดังนั้นสมการ (6.11) จึงเปรียบเสมือนสมการเส้นตรงและจะให้ค่าที่ถูกต้องเสมอหากฟังก์ชันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตรง ในทำนองเดียวกันหากฟังก์ชันที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันสมการพหุนามได้ ก็จะต้องถูกรวมเทอมของเทย์เลอร์ถึงพจน์อนันต์ แต่ในวิธีนิวตัน – ราฟสันจะหารากของสมการ $f(x) = 0$ โดยใช้การประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วยพจน์เพียง 2 พจน์ ดังแสดงในสมการ ต่อไปนี้

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0) f'(x_0) = 0 \tag{6.12}$$

$$x - x_0 = - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \tag{6.13}$$

โดยจะทำการคำนวณซ้ำระหว่างค่าเก่ากับค่าใหม่ที่ได้

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_{k+1} \tag{6.14}$$

$$\Delta x_{k+1} = - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยเช็ค จากสมการ

$$\left| \frac{X_{k+1} - X_k}{X_{k+1}} \right| < \varepsilon \quad (6.15)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานจะเห็นว่าสมการเรย์โนลด์ มีความเป็นไม่เชิงเส้นสูง ดังนั้นในการแก้สมการจึงควรทำให้มีความเป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตันราฟสัน เสียก่อน ดังต่อไปนี้

สำหรับสมการเรย์โนลด์ ตามสมการ (6.3) เมื่อทำการหาอนุพันธ์ เพื่อให้มีความเป็นเชิงเส้น

$$\frac{\partial f_i}{\partial \bar{P}_i} = \frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left\{ \begin{aligned} & \left(\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{P}_{i+1} - \bar{P}_i}{\Delta \bar{X}} \right) - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) - KC_{UT} (\bar{\rho}_i \bar{h}_i - \bar{\rho}_{i-1} \bar{h}_{i-1}) \\ & - KC_{UT} \left(\frac{S_0}{2} \right) \left(\bar{\rho}_i \bar{h}_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) - \bar{\rho}_{i-1} \bar{h}_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i-1}}{\bar{\mu}_{e1,i-1}} \right) \right) \\ & - K \left(\frac{\Delta \bar{X}}{\Delta t} \right) (\bar{\rho}_i \bar{h}_i - \bar{\rho}_i^0 \bar{h}_i^0) \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial \bar{P}_i} = & \left(\frac{1}{\Delta \bar{X}} \right) \left((\bar{P}_{i+1} - 2\bar{P}_i + \bar{P}_{i-1}) \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \bar{P}_i} - \left(\frac{\varepsilon_{i+1} + 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2} \right) \right) \\ & - KC_{UT} \left(\bar{\rho}_i \frac{\partial \bar{h}_i}{\partial \bar{P}_i} + \bar{h} \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) \left(1 + \left(\frac{S_0}{2} \right) \left(1 - 2 \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \right) \right) \\ & + KC_{UT} S_0 (\bar{\rho}_i \bar{h}) \left(\frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \right) \\ & - K \left(\frac{\Delta \bar{X}}{\Delta t} \right) \left(\left(\bar{\rho}_i \frac{\partial \bar{h}_i}{\partial \bar{P}_i} + \bar{h} \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) - \left(\bar{\rho}_i^0 \frac{\partial \bar{h}_i^0}{\partial \bar{P}_i} + \bar{h}_i^0 \frac{\partial \bar{\rho}_i^0}{\partial \bar{P}_i} \right) \right) \end{aligned} \quad (6.17)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \bar{P}_i} = & \left(\left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2,i}} \right) - \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}^2} \right) \right) \left(3\bar{\rho}_i \bar{h}_i^2 \frac{\partial \bar{h}_i}{\partial \bar{P}_i} + \bar{h}_i^3 \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) \\ & + (\bar{\rho}_i \bar{h}_i^3) \left\{ \frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2,i}} \right) - \right. \\ & \left. \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \left(2 \frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) - \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (6.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) = \bar{\mu}_{e0,i} \frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) - \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}^2}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right) \quad (6.19)$$

เนื่องจาก

$$\frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right) = - \int_0^1 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_i^2} \right) \left(\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) d\bar{y} \quad (6.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) = - \int_0^1 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_i^2} \right) \left(\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) \bar{y} d\bar{y} \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2,i}} \right) = - \int_0^1 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_i^2} \right) \left(\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) \bar{y}^2 d\bar{y} \quad (6.22)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial \bar{P}_i} \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{em,i}} \right) = - \frac{\bar{\eta}_i \left((1-n) \left| \frac{1}{\bar{h}_i} \right|^n \right) \left(\frac{\partial \bar{h}_i}{\partial \bar{P}_i} \right) + \left| \frac{1}{\bar{h}_i} \right|^{n-1} \frac{\partial \bar{\eta}_i}{\partial \bar{P}_i}}{\left\{ \left(\frac{m_0}{\mu_0} \right) \left| \frac{\bar{u} R_X}{b^2} \right|^{n-1} \right\} \left(1 + \frac{2.5 \lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1-\lambda) \rho_{PAR}} \right) \left\{ \left| \frac{1}{\bar{h}_i} \right|^{n-1} \bar{\eta}_i \right\}^2} \int_0^1 \left(\frac{1}{\left| \frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right|_i^{n-1}} \right) \bar{y}^m d\bar{y}$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2$ (6.23)

เมื่อ

$$\bar{\eta}_i = \exp \left((\ln \mu_o + 9.61) \left(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i)^{z_1} \right) - \gamma T_0 (\bar{\theta} - 1) \right) \quad (6.24)$$

$$\frac{\partial \bar{\eta}_i}{\partial \bar{P}_i} = \left(Z_1 (\ln \mu_o + 9.61) (5.1 \times 10^{-9} P_H) (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i)^{z_1-1} \right) \bar{\eta}_i \quad (6.25)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} = \left(\frac{b^3 P_H}{u_0 \mu_0 R_0^2} \right) (\bar{h}^2) \left(\frac{\bar{y}}{\bar{\mu}} - \left(\frac{1}{\bar{\mu}} \right) \left(\frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right) \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}} \right) + SC_{UT} \left(\frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}} \right) \quad (6.26)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \bar{P}_i} = \left(\frac{0.6 \times 10^{-9} P_H}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i} \right) \left(1 - \left(\frac{1.7 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i} \right) \right) \frac{(1 - \beta T_0 (\bar{\theta}_i - 1))}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_P} \right)} \quad (6.27)$$

$$\frac{\partial \bar{h}_i}{\partial \bar{P}_i} = - \frac{\Delta \bar{X}}{2\pi} \left(\ln \left(\left| \frac{\Delta \bar{X}}{2} \right|^2 \right) \right) \quad (6.28)$$

สำหรับสมการพลังงาน ตามสมการ (6.10) เมื่อทำการหาอนุพันธ์ เพื่อให้ความเป็นเชิงเส้น

$$\frac{\partial f_{Ti}}{\partial \bar{\theta}_i} = \frac{\partial}{\partial \bar{\theta}_i} \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{\bar{\theta}_i + \bar{\theta}_2}{2} \right) - K_{T1} \left(\frac{\bar{\rho}_i \bar{h}_i^2}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \\ & + K_{T2} \left(\frac{\bar{\mu}_i}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right)_i^2 + K_{T3} \left(\frac{\bar{\theta}_i \bar{h}_i^2}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \\ & + K_{T4} \left(\frac{|SC_{UT}| \bar{h}^2}{12 \bar{k}_p} \right) \left(\frac{(\bar{W}_p)}{\left(\int_n^{out} \bar{h} d\bar{X} \right)} \right) - \bar{\theta}_i \end{aligned} \right\} \quad (6.29)$$

เมื่อจัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{Ti}}{\partial \bar{\theta}_i} = & -K_{T1} \left(\frac{\bar{h}_i^2}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left\{ \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \bar{\theta}_i} + \bar{\rho}_i \left(\frac{1}{\Delta \bar{t}} + \frac{u_i^*}{\Delta \bar{X}} \right) \right\} \\ & + K_{T2} \left(\left(\frac{1}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right)_i^2 \right) \frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \bar{\theta}_i} \\ & + K_{T3} \left(\frac{\bar{h}_i^2}{12 \bar{k}_{p,i}} \right) \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_i^0}{\Delta \bar{t}} + u_i^* \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \right) - 1 \end{aligned} \quad (6.30)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \bar{\theta}_i} = \frac{\left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H \bar{P}_i} \right) (-\beta T_o)}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{PAR}} \right)} \quad (6.31)$$

$$\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \bar{\theta}_i} = - \left\{ \left(\frac{m_0}{\mu_0} \right) \left| \frac{\bar{u} R_X}{b^2} \right|^{n-1} \right\} \left| \frac{1}{\bar{h}_i} \right|^{n-1} \left| \frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} \right|_i^{n-1} \left(1 + \frac{2.5 \lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_{PAR}} \right) (\bar{\eta}_i \gamma T_0) \quad (6.32)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial \bar{y}} = \left(\frac{b^3 P_H}{u_0 \mu_0 R_0^2} \right) (\bar{h}^2) \left(\frac{\bar{y}}{\bar{\mu}} - \left(\frac{1}{\bar{\mu}} \right) \left(\frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right) \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}} \right) + S_0 C_{UT} \left(\frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}} \right) \quad (6.33)$$

$$u_i^* = \int_0^1 \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{b^3 P_H}{u_0 \mu_0 R_0^2} \right) (\bar{h}_i^2) \left(\frac{\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}}{\Delta \bar{X}} \right) \left\{ \int_0^{\bar{y}_j} \frac{\bar{y}}{\bar{\mu}_i} d\bar{y} - \left(\frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \int_0^{\bar{y}_j} \frac{d\bar{y}}{\bar{\mu}_i} \right\} \\ & + S_0 C_{UT} \bar{\mu}_{e0,i} \int_0^{\bar{y}_j} \frac{d\bar{y}}{\bar{\mu}} + C_{UT} \left(1 - \frac{S_0}{2} \right) \end{aligned} \right\} d\bar{y} \quad (6.34)$$

เมื่อแทนค่าการกระจายของอุณหภูมิ เงื่อนไขขอบของสมการพลังงาน

$$\bar{\theta}_{P,i} = 1 + \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_P C_{P,P} k_P b^3 u_0 C_{UT} \left(1 - \frac{S_0}{2}\right)}} \int_{\bar{X}_{IN}}^{\bar{X}_i} \left(\frac{\bar{k}_{P,i}}{\bar{h}_i} \right) (6\theta_i - 2\theta_{G,i} - 4\theta_{P,i}) \frac{d\bar{X}'}{\sqrt{\bar{X}_i - \bar{X}'}} \quad (6.35)$$

$$\theta_{G,i} = 1 - \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_G C_{P,G} k_G b^3 u_0 C_{UT} \left(1 + \frac{S_0}{2}\right)}} \int_{\bar{X}_{IN}}^{\bar{X}_i} \left(\frac{\bar{k}_{P,i}}{\bar{h}_i} \right) (4\theta_{G,i} - 6\theta_i + 2\theta_{P,i}) \frac{d\bar{X}'}{\sqrt{\bar{X}_i - \bar{X}'}} \quad (6.36)$$

จากสมการเรย์โนลด์ (6.17) และสมการพลังงาน (6.30) เราสามารถจัดรูปโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial \bar{P}_i} & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_{Ti}}{\partial \bar{\theta}_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{P}_i \\ \Delta \bar{\theta}_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_i \\ f_{Ti} \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

บทที่ 7

ผลการจำลอง

การศึกษากลศาสตร์ของแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ในเฟืองฟันตรง ที่มีผลที่เกิดจากผิวหยาบที่เฟืองขับ (Pinion) และเฟืองตาม (Gear) เมื่อสารหล่อลื่นเป็นแบบ Liquid – Solid Lubricant โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติของเฟืองขับและเฟืองตาม

คุณสมบัติของฟันเฟือง	เฟืองขับ (Pinion)	เฟืองตาม (Gear)
จำนวนฟันเฟือง	35	105
โมดูล (m)	2	
Pressure Angle (องศา)	20	
ความกว้างของฟันเฟือง (mm)	25	
วัสดุ	UNB C61300	

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

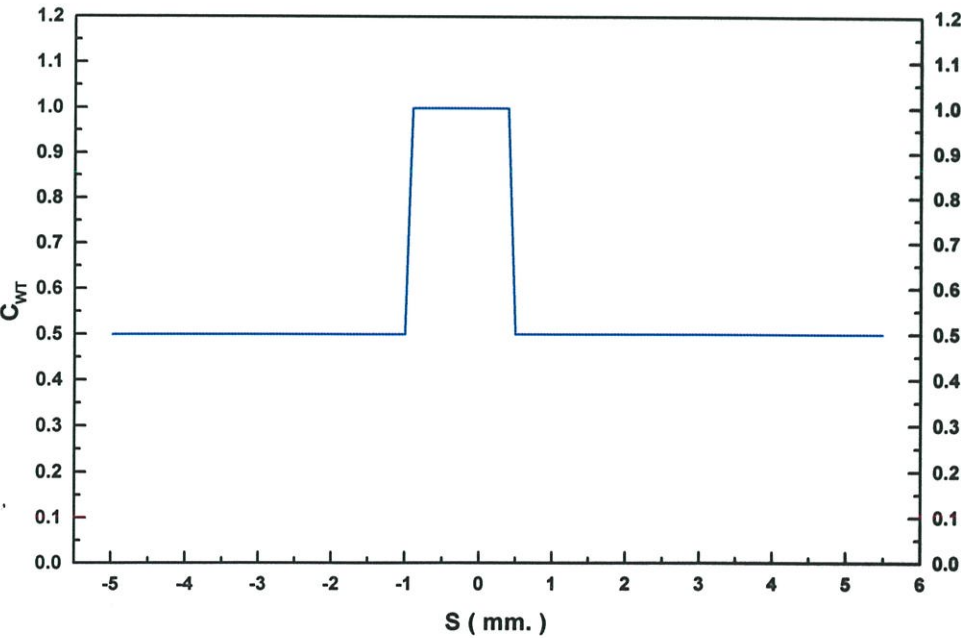
คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	SAE-90
Inlet Temperature (K)	313.15
Inlet Density (kg/m ³)	892.80
Inlet Viscosity (Pa-s)	0.1946304
Viscosity-Pressure Index	0.5685
Viscosity-Temperature Coefficient (K ⁻¹)	0.05763
Coefficient of Thermal Expansivity (K ⁻¹)	0.000740
Specific Heat (kJ/(kg-K))	1870.0
Thermal Conductivity (W/(m-K))	0.126

ตารางที่ 7.3 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นของแข็ง

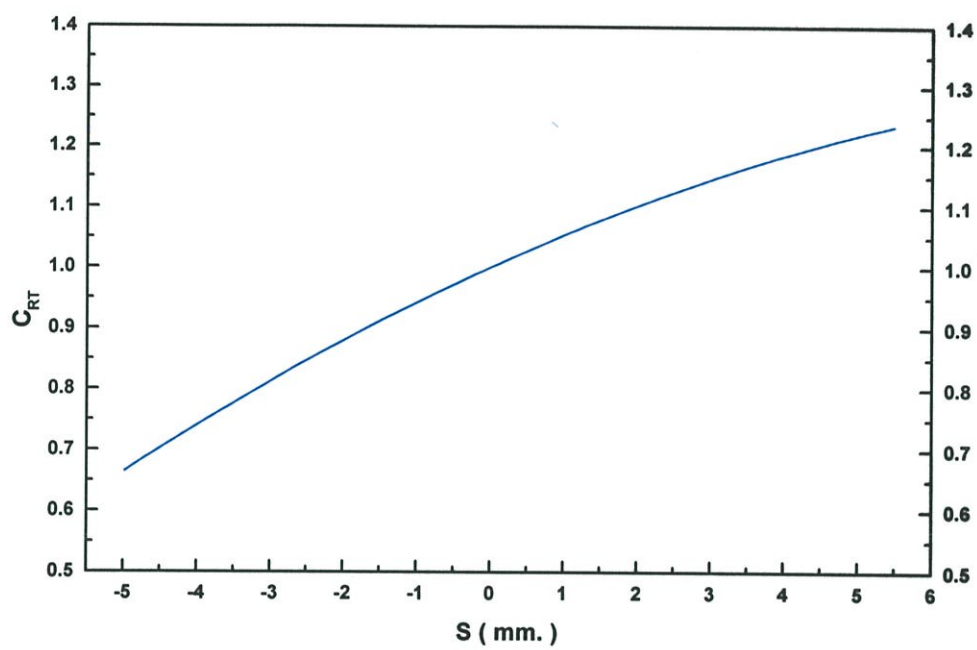
คุณสมบัติของสารหล่อลื่นของแข็ง	MoS ₂	PTFE
Density (kg/m ³)	4800	2652
Hardness (Pa)	3.139x10 ⁹	2.74x10 ⁹
Modulus of Elasticity (Pa)	3.4x10 ¹⁰	2.95x10 ¹⁰
Poisson's Ratio	0.13	0.13
Friction coefficient	0.1	0.125

7.1 การจำลองผลการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรง

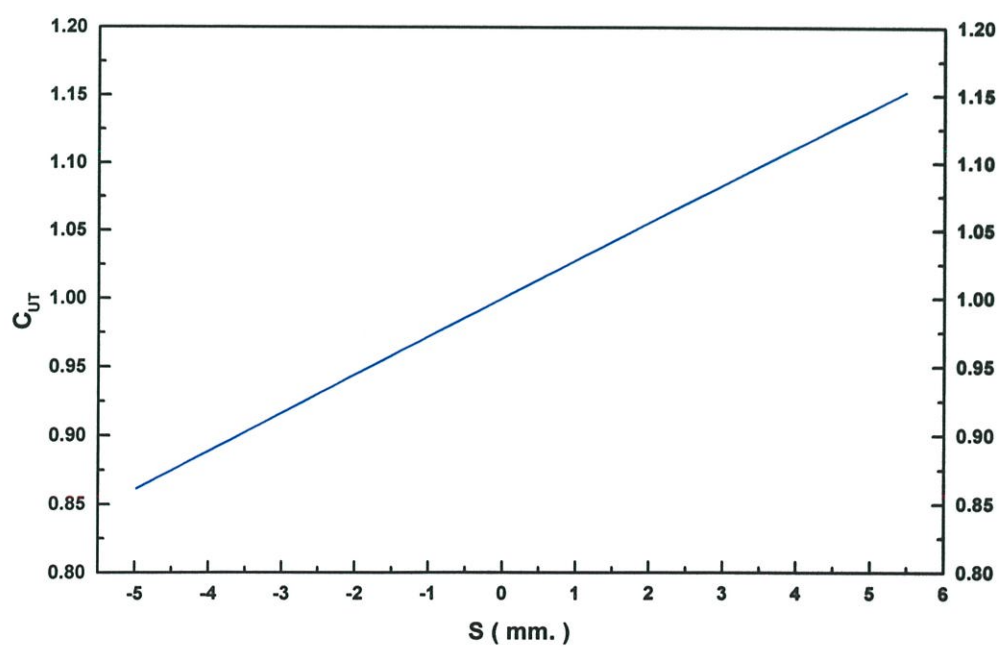
การศึกษาการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรง เมื่อเฟืองรับภาระ 10 kW และทำงานที่ความเร็วรอบของเฟืองขับ 1000 rpm ด้วยสารหล่อลื่น น้ำมันเกรด SAE-90 จะได้ค่าคงที่ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองตาม รูปที่ 7.1 ถึง รูปที่ 7.4



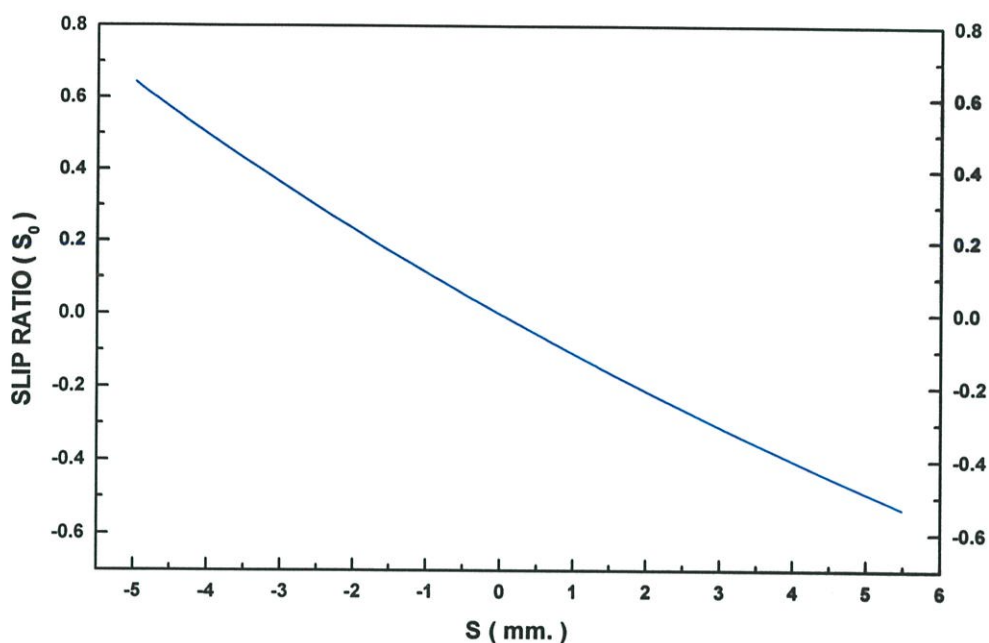
รูปที่ 7.1 แสดงค่าสัดส่วนของภาระ C_{WT} ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.2 แสดงค่าสัดส่วนของความโค้ง C_{RT} ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเพื่อง



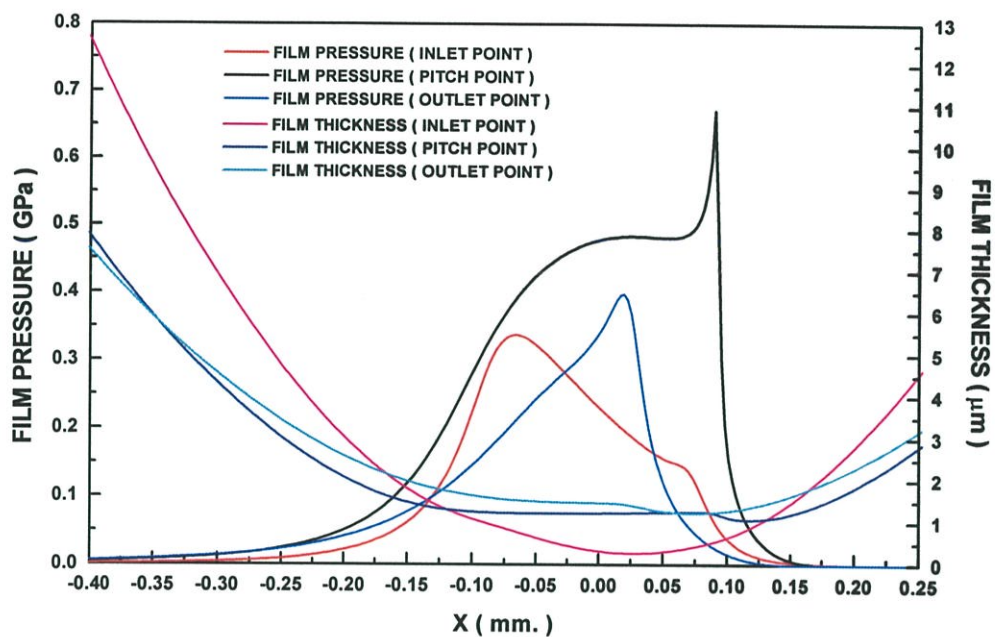
รูปที่ 7.3 แสดงค่าสัดส่วนของความเร็ว C_{UT} ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเพื่อง



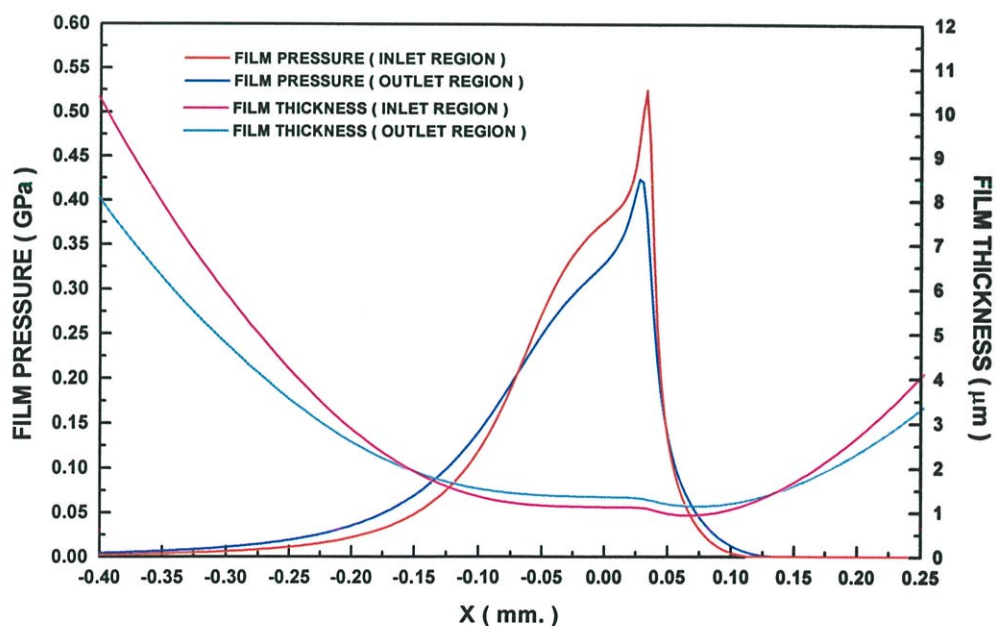
รูปที่ 7.4 แสดงค่า SLIP RATIO ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

เมื่อพิจารณาการทำงานของเฟืองฟันตรง จะพบว่าที่ตำแหน่งฟันเฟือง เริ่มขบกันความดันฟิล์มจะเริ่มก่อตัวทำให้ ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าน้อย จากนั้นความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นดัง รูปที่ 7.5

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าต่างใน ในช่วงทางเข้าและทางออก ของระยะการขบของฟันเฟือง จะพบว่า ในช่วงเข้าของการขบของฟันเฟือง ความดันฟิล์ม ความหนาของฟิล์ม ความหนืด และ ความหนาแน่นของน้ำมันจะมีค่ามากกว่า ในช่วงทางออก ดัง รูปที่ 7.6 ถึง รูปที่ 7.9

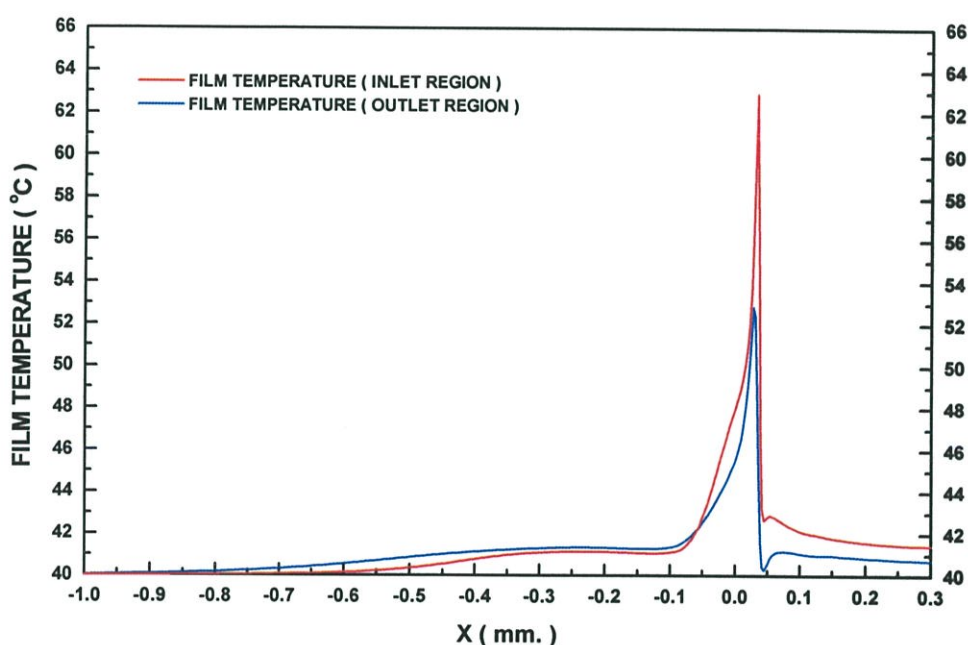


รูปที่ 7.5 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งทางเข้า ตำแหน่งพิทช์และที่ตำแหน่งทางออก

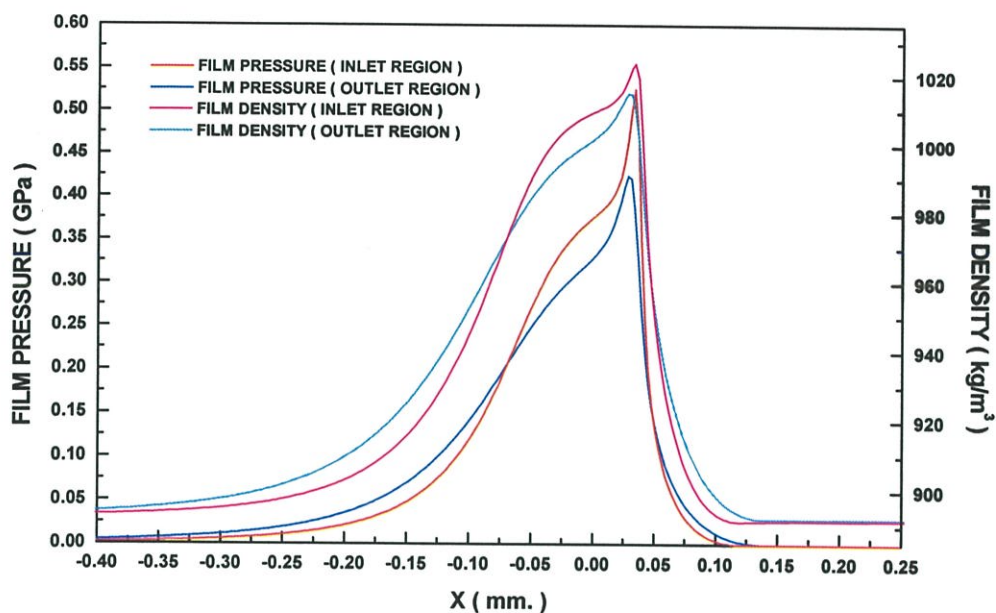


รูปที่ 7.6 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง

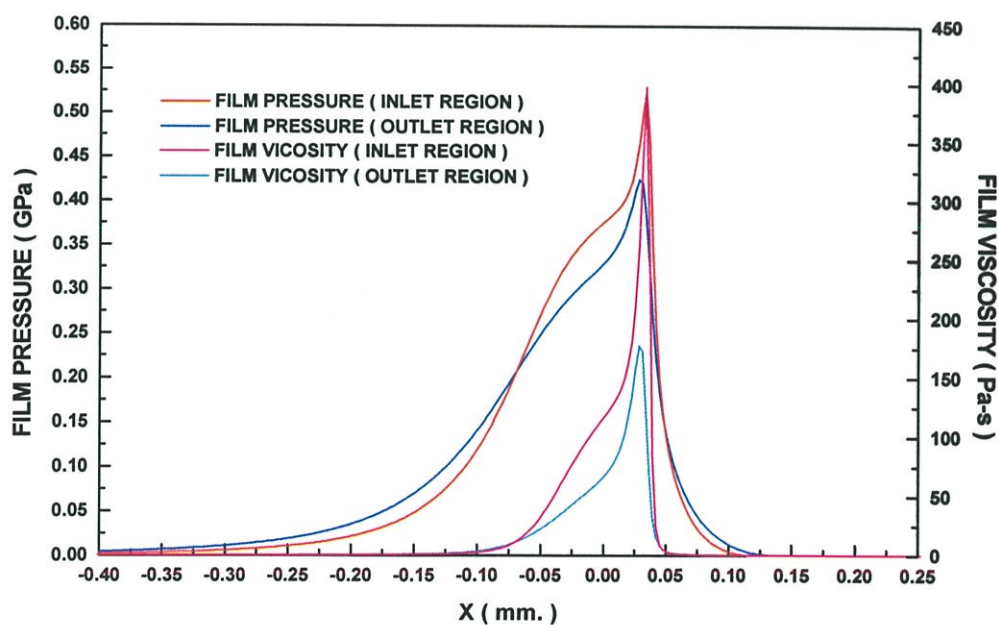
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการขบของฟันเฟือง และจะเริ่มมีค่าลดลงเมื่อ ฟันเฟืองรับภาระเพียง 1 ฟัน จากนั้นความหนาของฟิล์มน้ำมันจะเพิ่มเมื่อฟันเฟืองเริ่มรับภาระ 2 ฟัน เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะพบว่า อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะเป็นไปตาม ค่า Shear Stress ที่เกิดขึ้นกับฟิล์มน้ำมัน หรือค่า Slip Ratio ในการทำงานของฟันเฟือง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่ง Pitch Contact แสดงดัง รูปที่ 7.10 ถึง รูปที่ 7.12



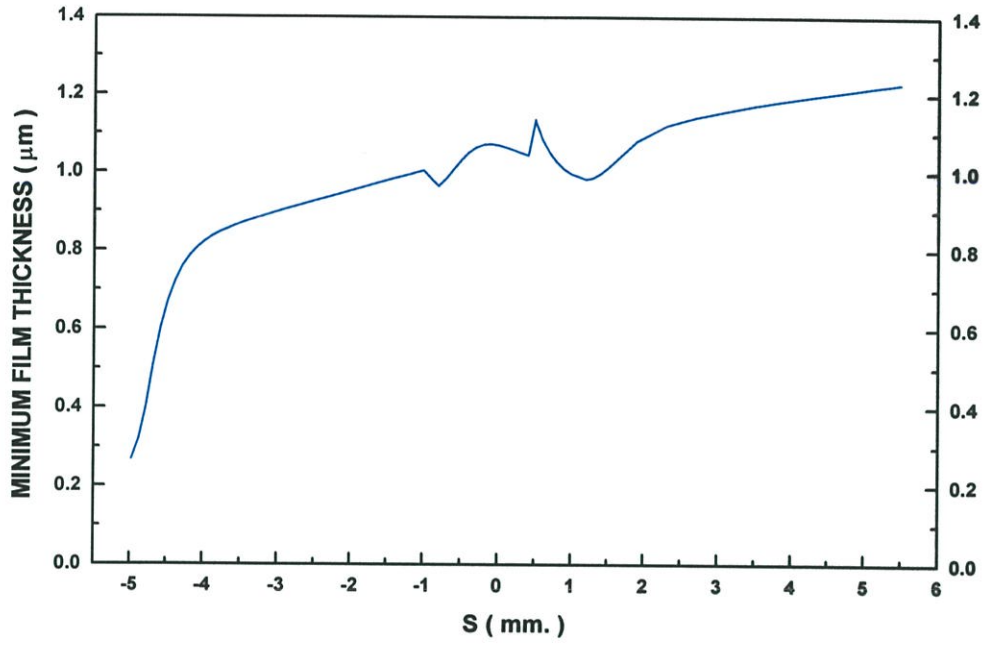
รูปที่ 7.7 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง



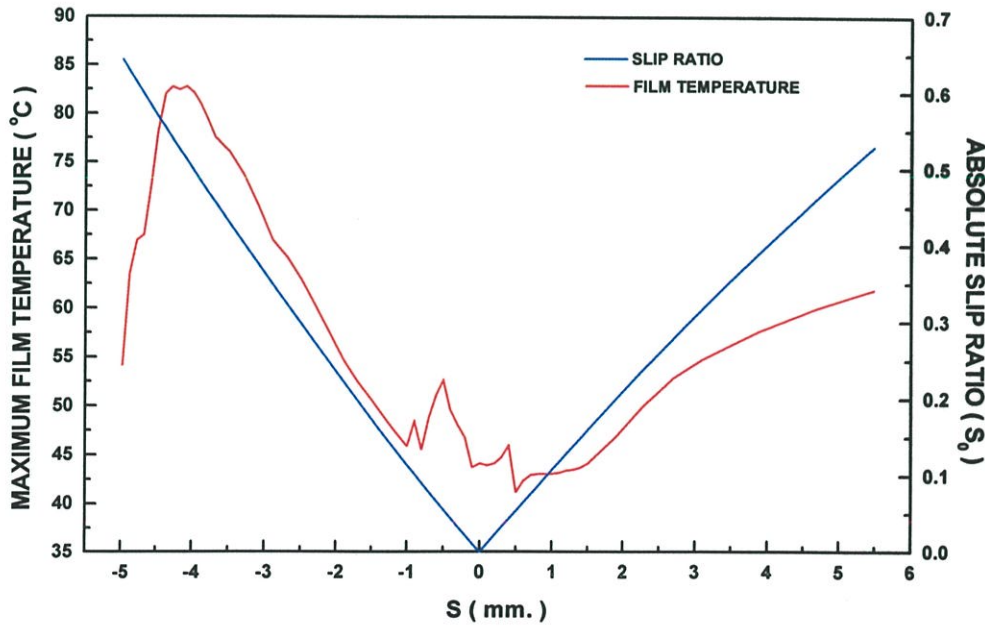
รูปที่ 7.8 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาแน่น ของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง



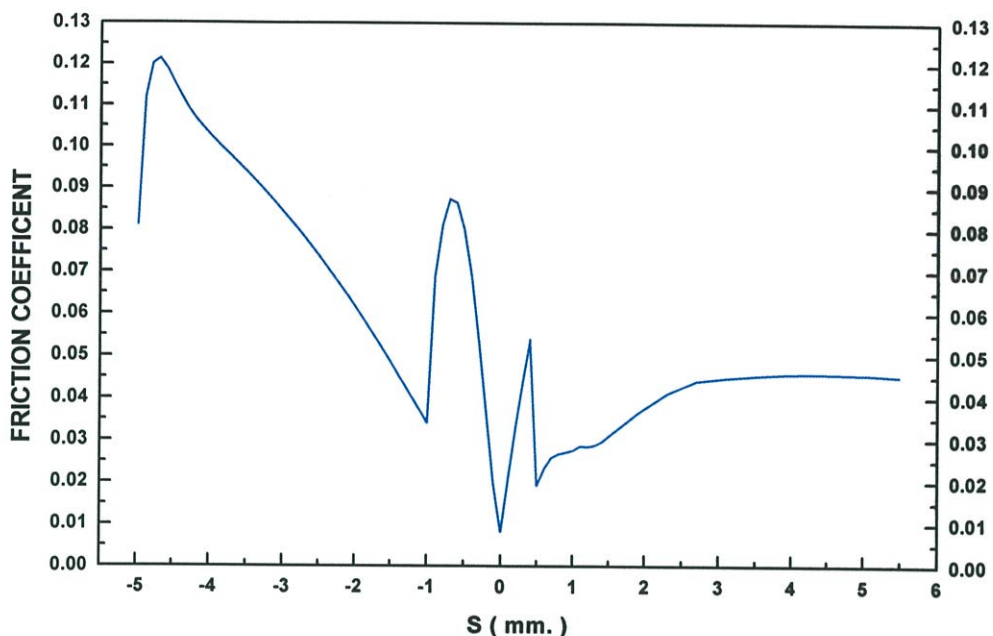
รูปที่ 7.9 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า และ ช่วงทางออก ของการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.10 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



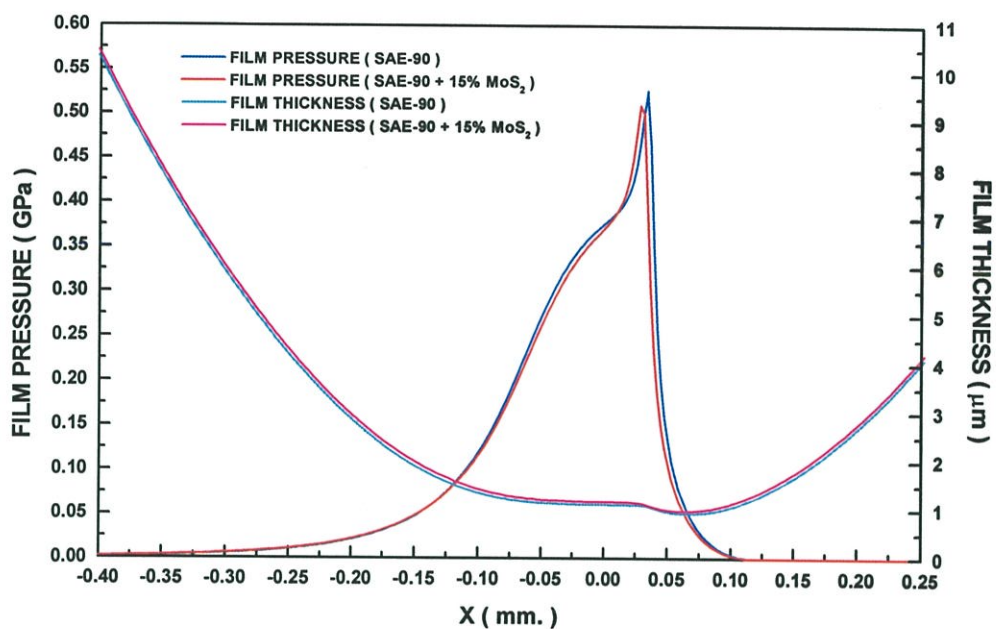
รูปที่ 7.11 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด เทียบกับค่า SLIP RATIO ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



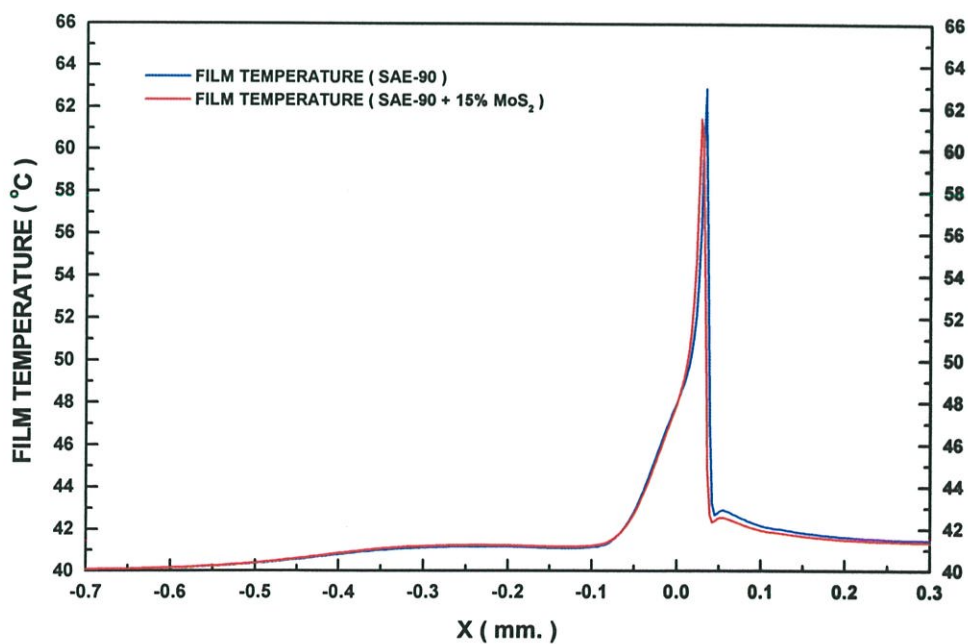
รูปที่ 7.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันทึ่

เมื่อจำลองการศึกษการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรง เมื่อเฟืองรับภาระ 10 kW และทำงานที่ความเร็วรอบของเฟืองขับ 1000 rpm ด้วยสารหล่อลื่น น้ำมันเกรด SAE-90 เทียบกับสารหล่อลื่น น้ำมันเกรด SAE-90 ที่ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยขนาดของ MoS_2 มีขนาด 2 ไมโครเมตร

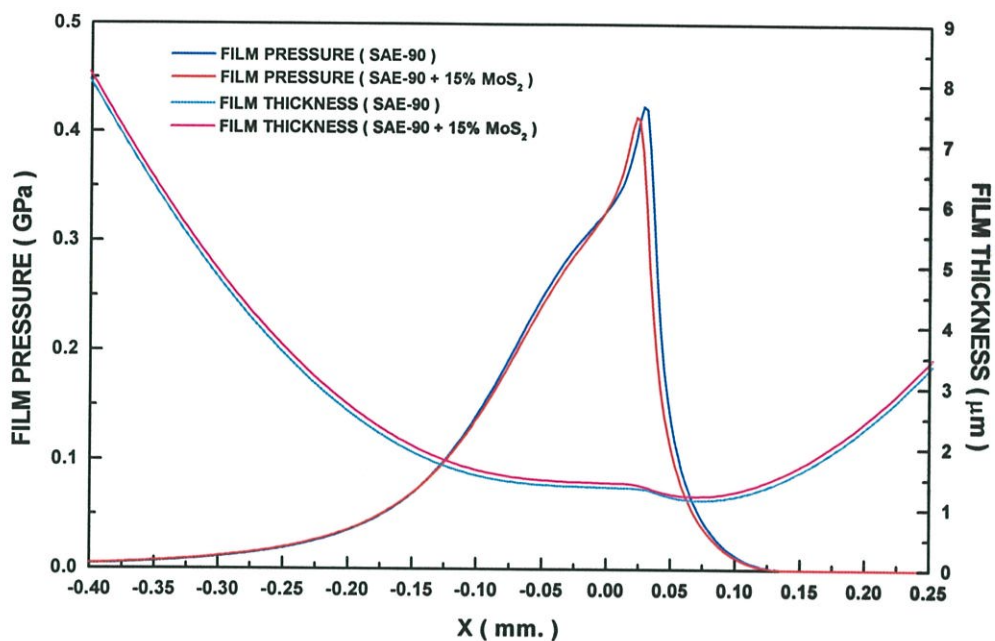
จะพบว่าการผสมสารหล่อลื่นของแข็ง (MoS_2) ลงไปในน้ำมันจะทำให้ความดันฟิล์มของน้ำมันลดลงเนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็ง จะช่วยรับภาระไว้บางส่วน ทำให้ภาระที่ฟิล์มน้ำมันได้รับลดลง จึงทำให้ความดันฟิล์มลดลง และส่งผลทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 7.13 ถึง รูปที่ 7.16



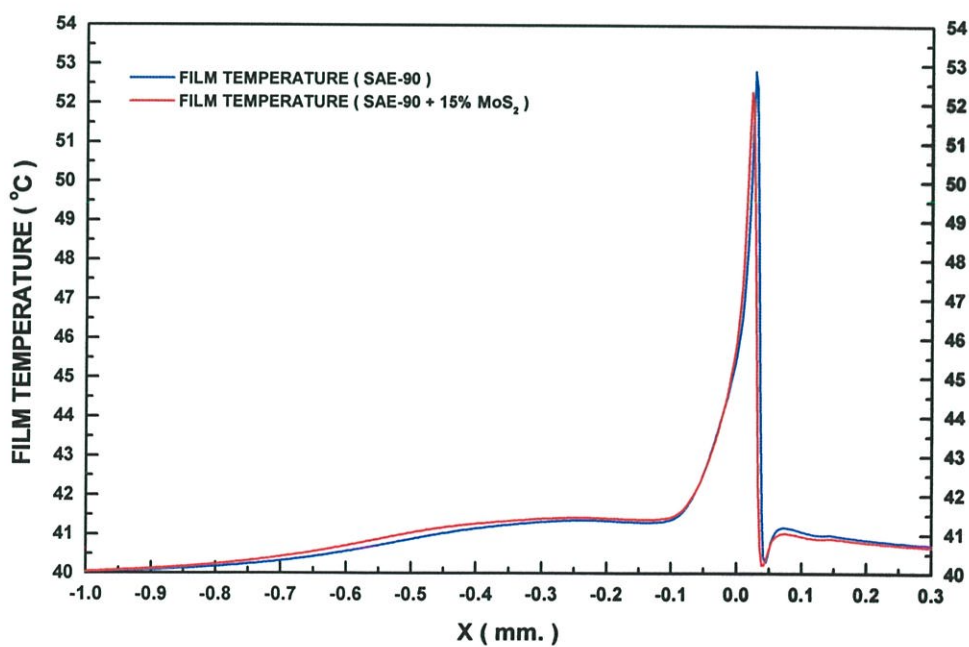
รูปที่ 7.13 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าของการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.14 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าของการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.15 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกของการขบของฟันเฟือง

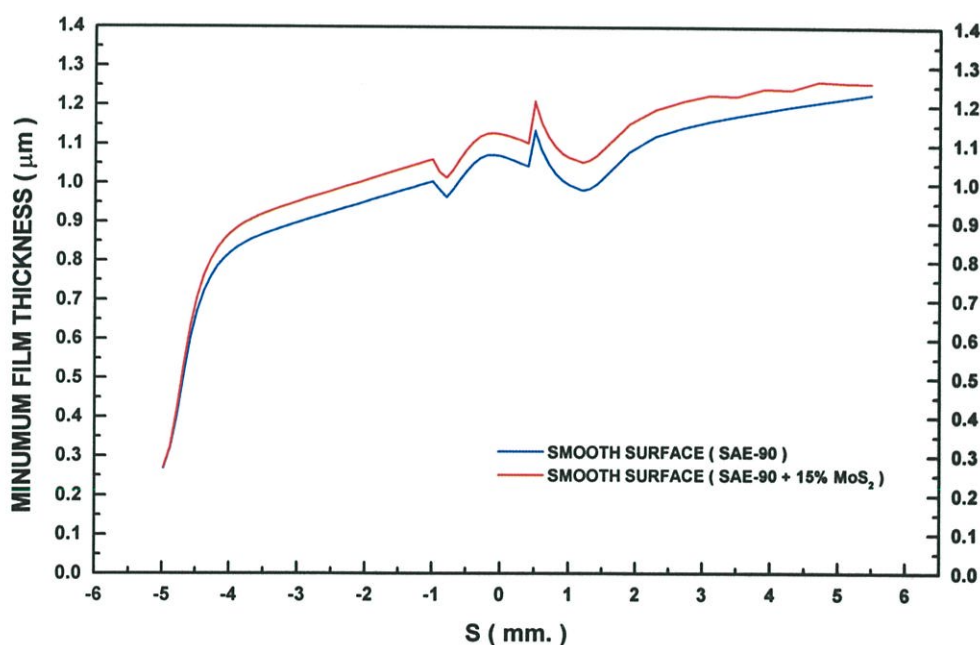


รูปที่ 7.16 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าของการขบของฟันเฟือง

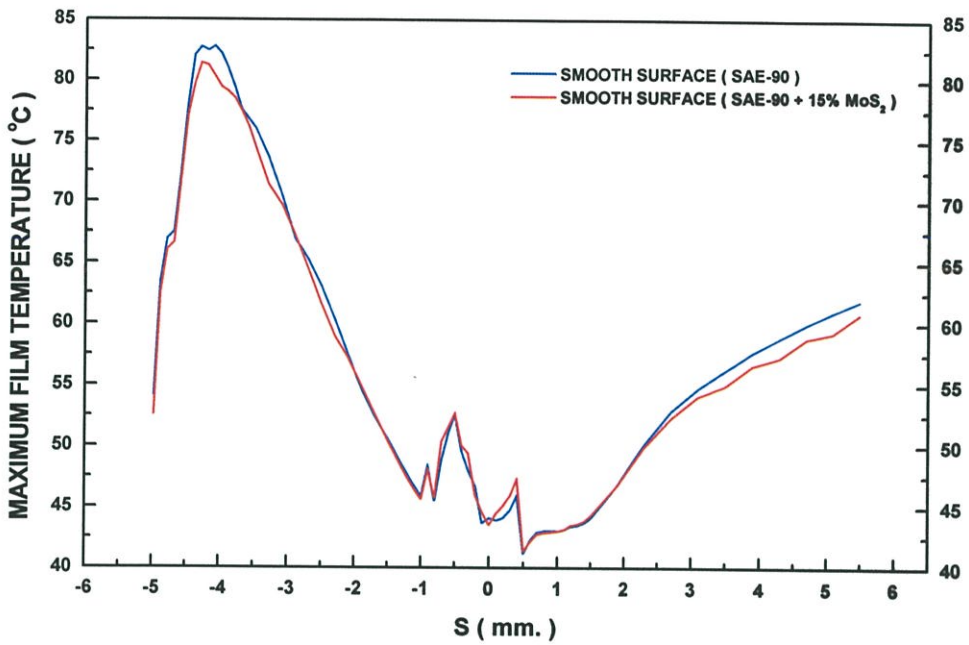
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง ในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น น้ำมันเกรด SAE-90 เทียบกับสารหล่อลื่น น้ำมันเกรด SAE-90 ที่ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยขนาดของ MoS_2 มีขนาด 2 ไมโครเมตร มาพิจารณาจะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันกรณีที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งลงไป จะมีค่าสูงกว่า คุณสมบัติของฟิล์มน้ำมันและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่ง Pitch Contact แสดงดัง รูปที่ 7.17 ถึง รูปที่ 7.19

เมื่อพิจารณาการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะพบว่าเมื่อฟันเฟืองรับภาระ 1 คู่ เปอร์เซ็นต์การรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะมีค่าลดลง เนื่องจากภาระที่ฟันเฟืองได้รับจะเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้สัดส่วนระหว่างภาระที่สารหล่อลื่นของแข็งได้รับต่อภาระทั้งหมดลดลง แสดงดังรูปที่

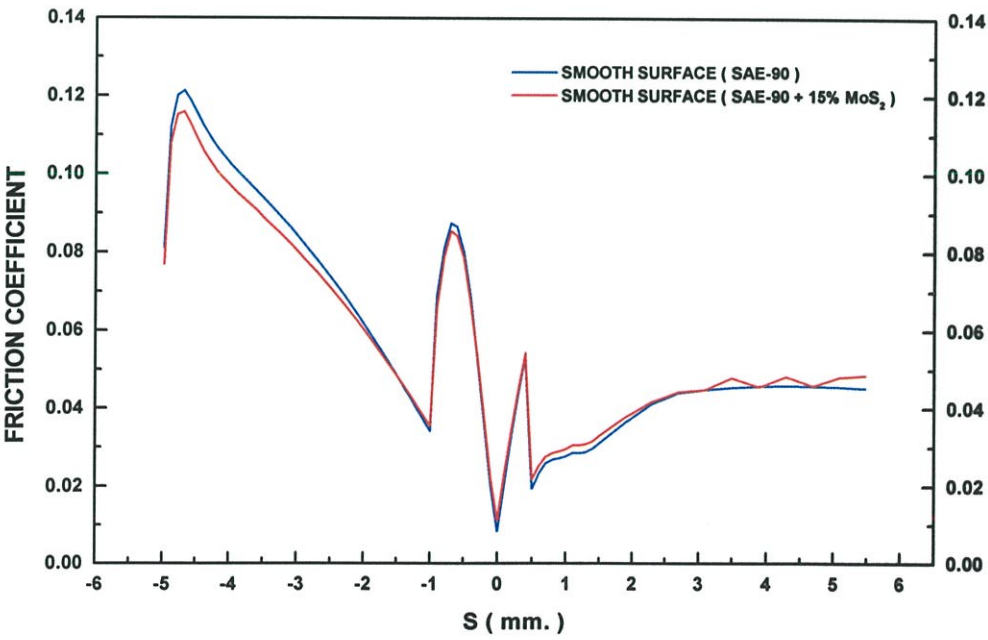
7.20



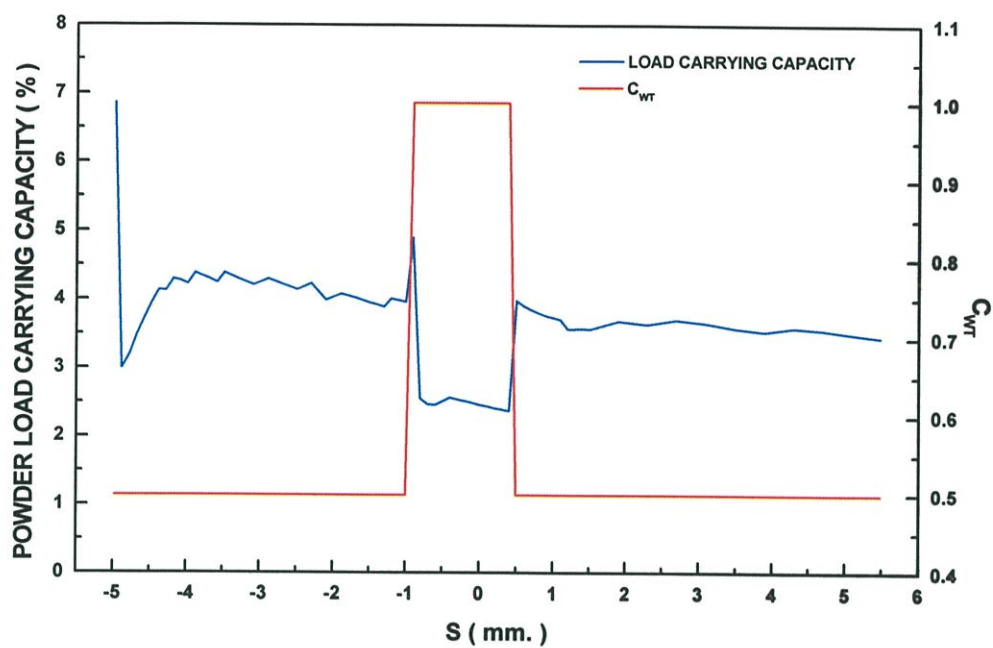
รูปที่ 7.17 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.18 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

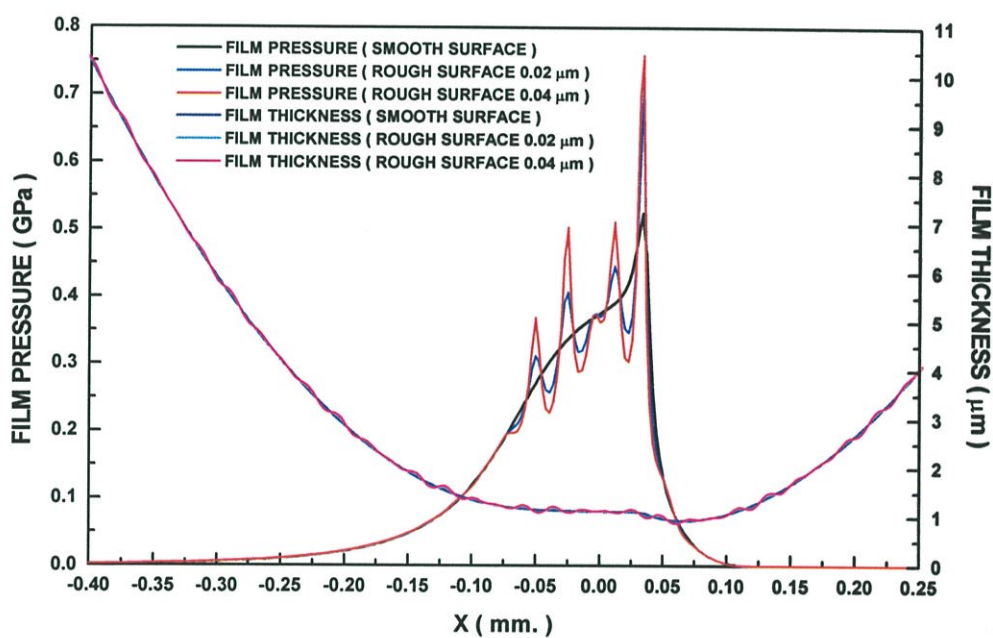


รูปที่ 7.20 แสดงค่าการรับภาระของอนุภาคที่เติมลงไปในน้ำมัน และ อัตราส่วนภาระที่พื้นผิว
ได้รับ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

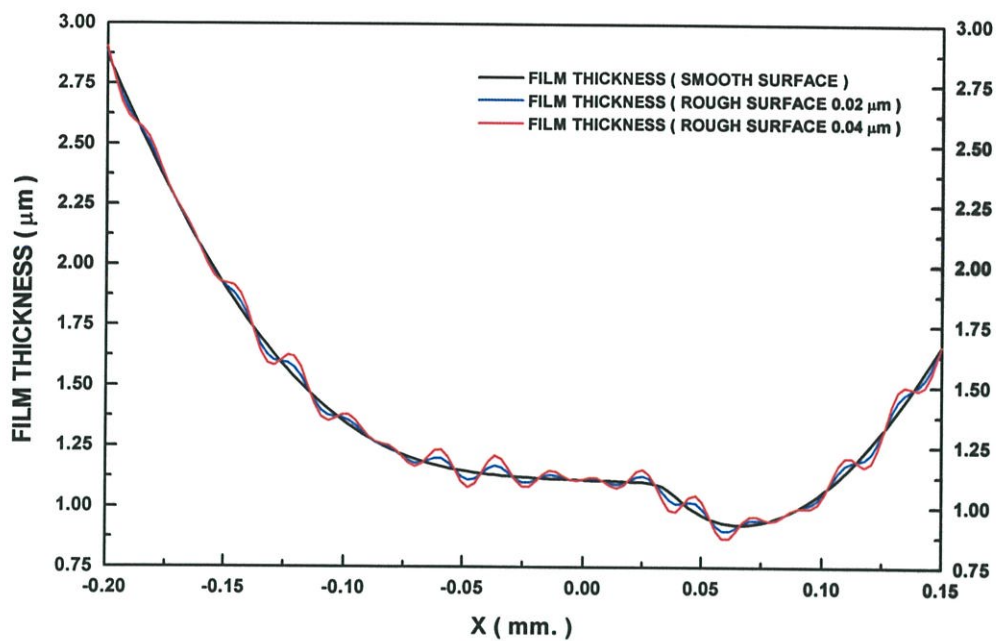
7.2 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของพื้นผิว

7.2.1 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของพื้นผิวในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90

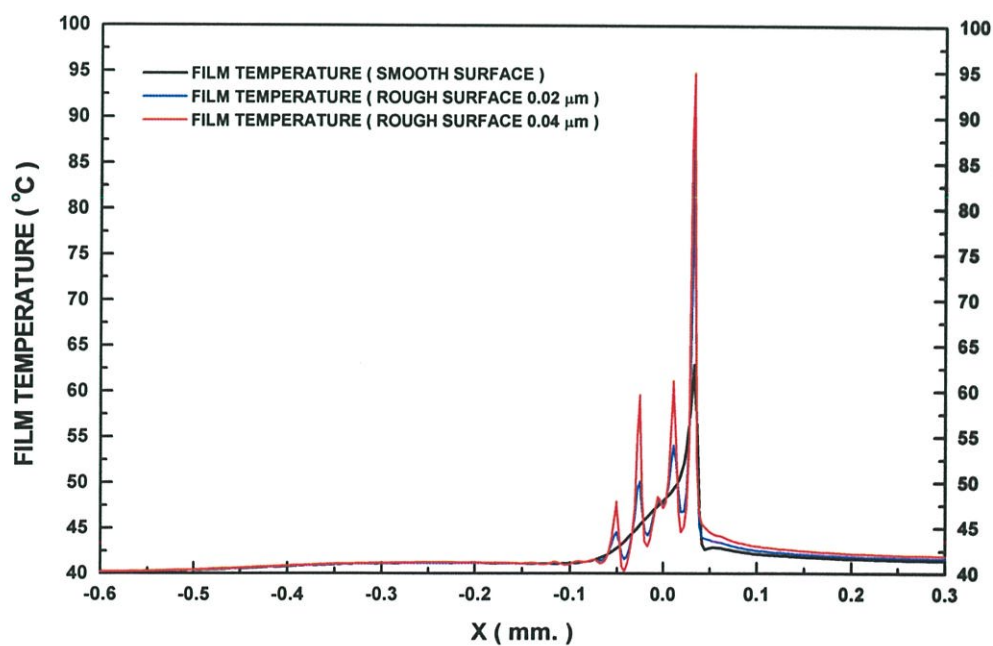
เมื่อเฟืองรับภาระ 10 kW ที่ความเร็วรอบในการทำงานของเฟืองขับ 1000 rpm จะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของพื้นผิวเฟือง แต่ค่าความดันฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงกับความหยาบผิวของพื้นผิวเฟือง ดังรูปที่ 7.21 ถึง รูปที่ 7.26



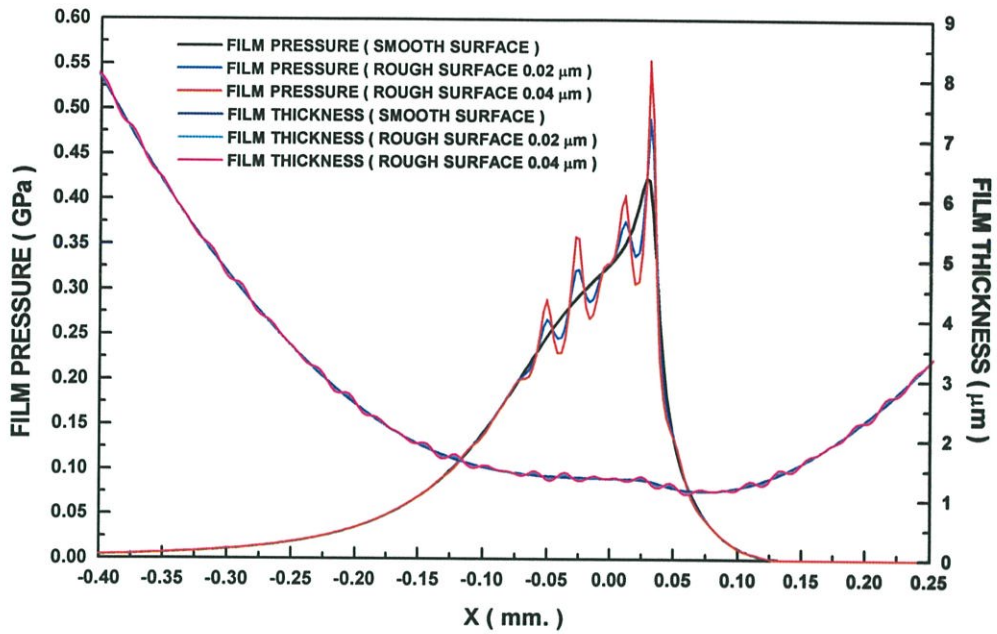
รูปที่ 7.21 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าเมื่อผิวของพื้นผิวเฟืองมีค่าความหยาบผิวต่างๆ



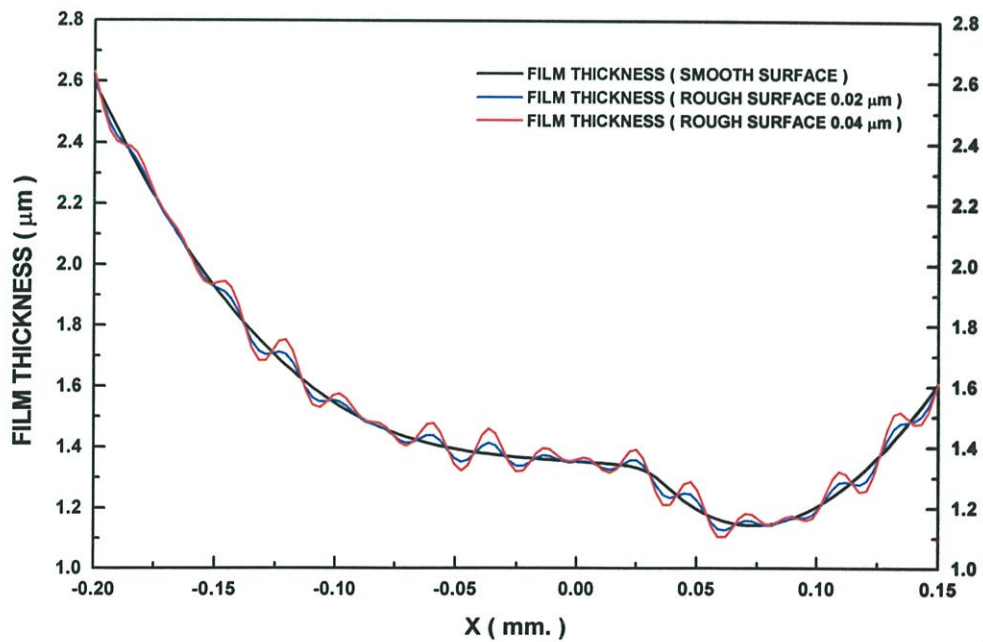
รูปที่ 7.22 แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าเมื่อผิวของพื้นเพื่องมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



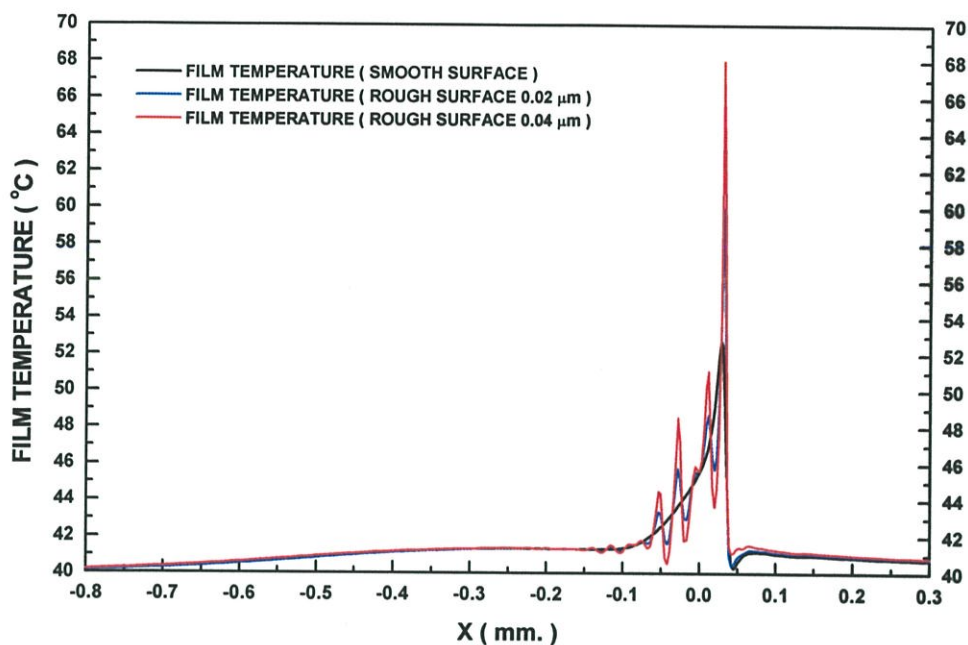
รูปที่ 7.23 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าเมื่อผิวของพื้นเพื่องมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



รูปที่ 7.24 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกเมื่อผิวของพื้นเพื่อกมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

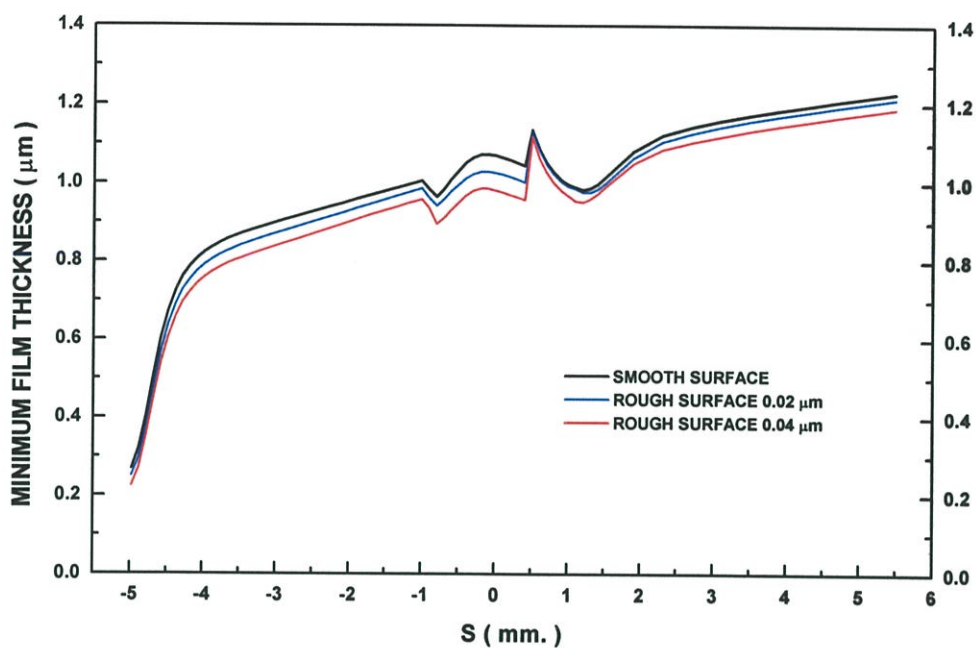


รูปที่ 7.25 แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกเมื่อผิวของพื้นเพื่อกมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

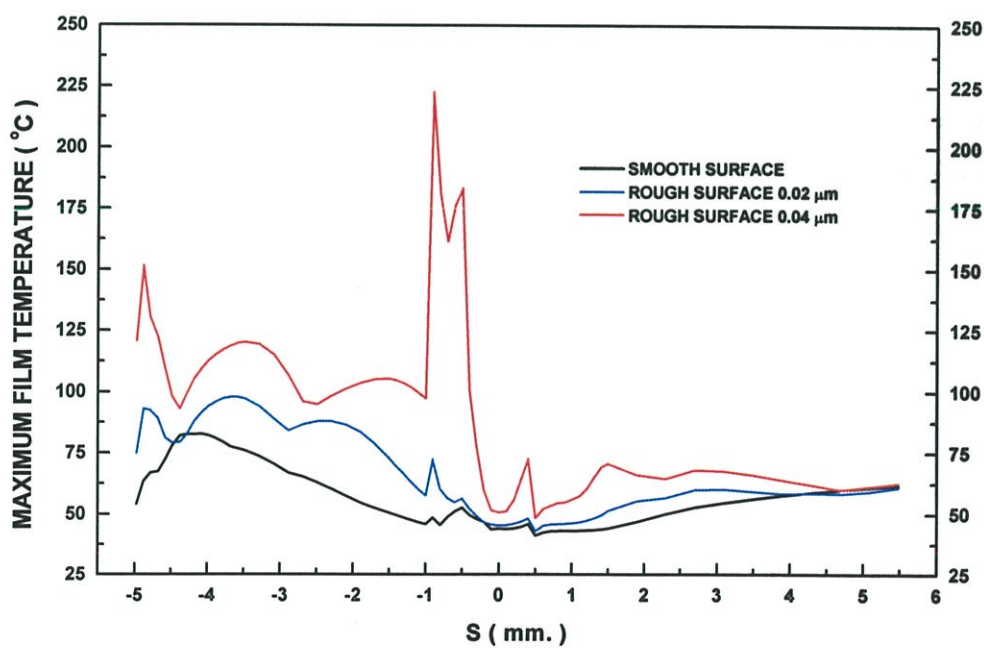


รูปที่ 7.26 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกเมื่อผิวของพื้นเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

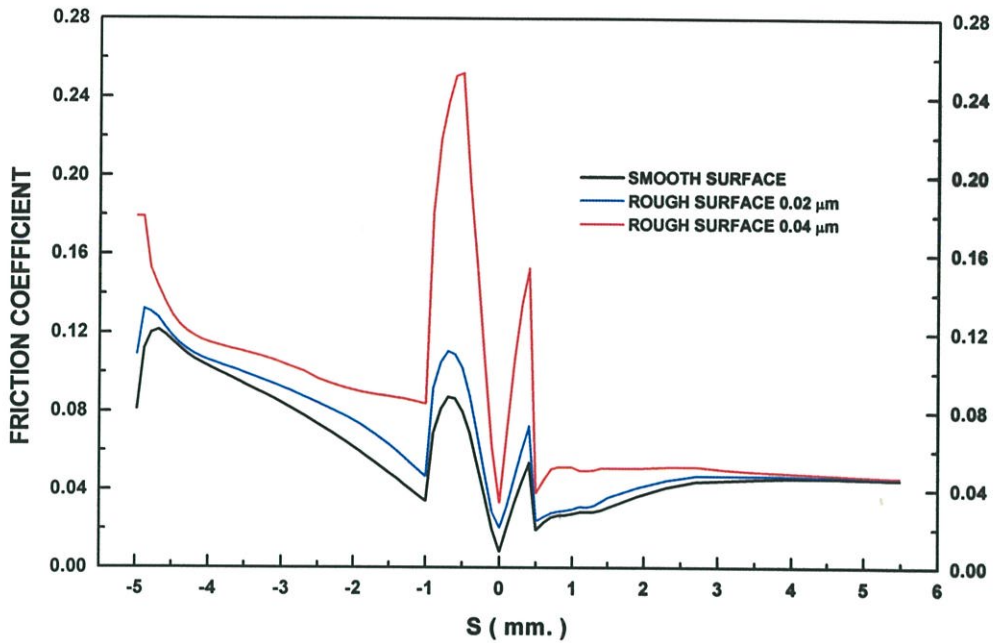
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อความหยาบของผิวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหยาบผิวของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.27 ถึง รูปที่ 7.29



รูปที่ 7.27 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



รูปที่ 7.28 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

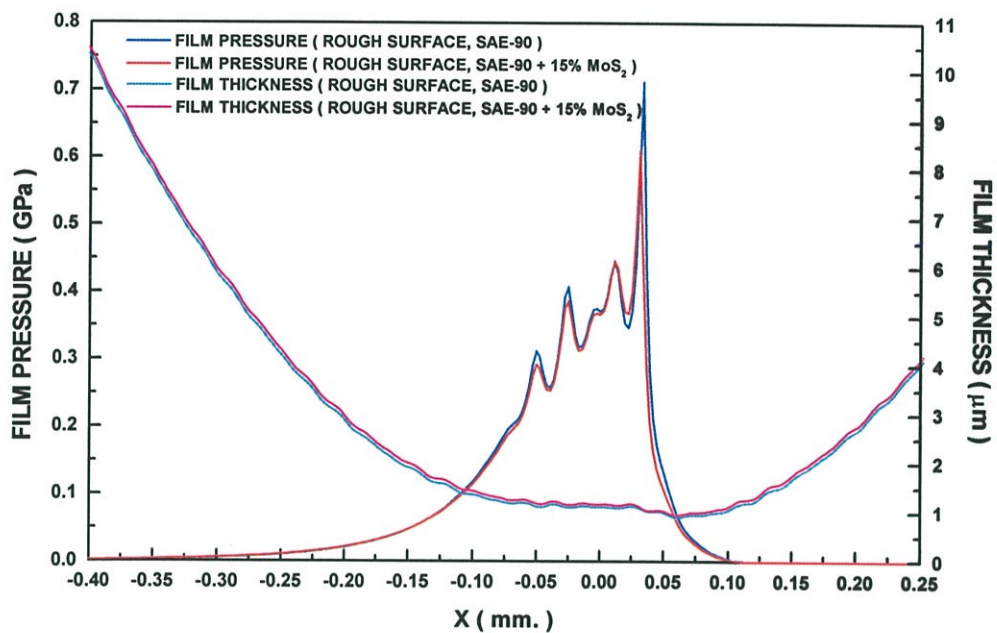


รูปที่ 7.29 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

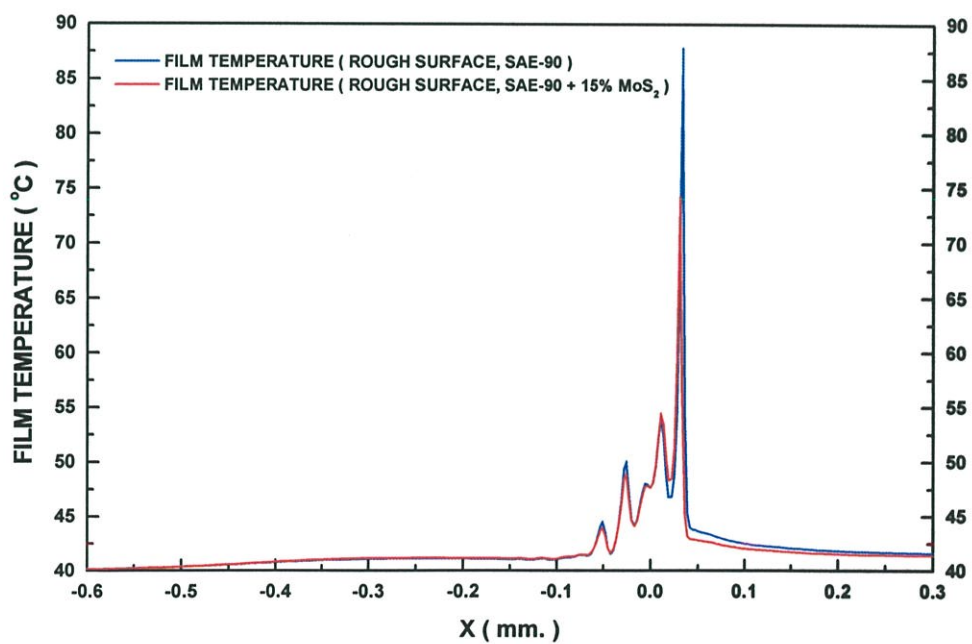
7.2.2 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากความหยาบของผิวฟันเฟืองในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS_2 ลงไปในน้ำมันที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อเฟืองรับภาระ 10 kW ที่ความเร็วรอบในการทำงานของเฟืองขับ 1000 rpm จำลองการสึกกร่อนแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของเฟืองฟันตรง เมื่อเฟืองรับภาระ 10 kW และทำงานที่ความเร็วรอบของเฟืองขับ 1000 rpm ด้วยสารหล่อลื่น น้ำมันเกรด SAE-90 เทียบกับสารหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 ที่ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยขนาดของ MoS_2 มีขนาด 2 ไมโครเมตร ในกรณีพิจารณาผลจากความหยาบของผิวฟันเฟือง ที่มีค่าความหยาบ 0.02 ไมโครเมตร

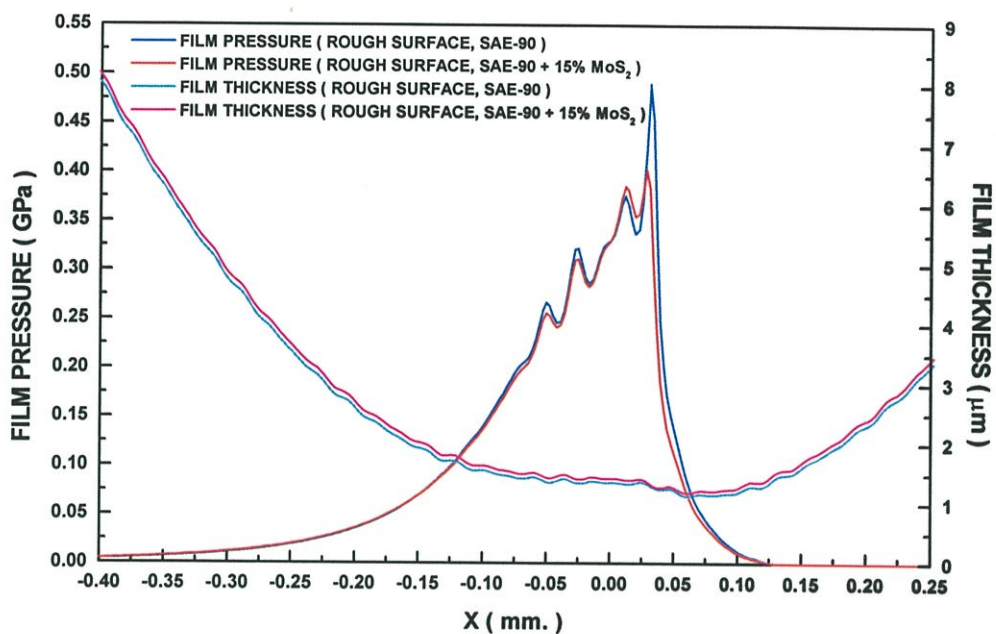
จะพบว่าการผสมสารหล่อลื่นของแข็ง (MoS_2) ลงไปในน้ำมัน ในกรณีที่จะทำให้ความดันฟิล์มของน้ำมันลดลงเนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็ง จะช่วยรับภาระไว้บางส่วน ทำให้ภาระที่ฟิล์มน้ำมันได้รับลดลง จึงทำให้ความดันฟิล์มลดลง และส่งผลทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.30 ถึง รูปที่ 7.33



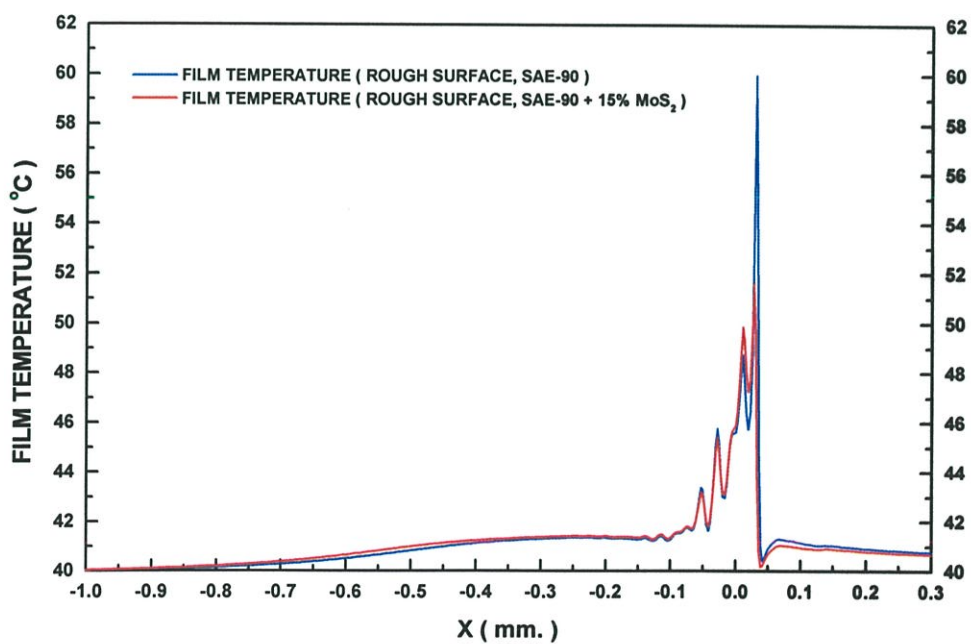
รูปที่ 7.30 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าของการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.31 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้าของการขบของฟันเฟือง

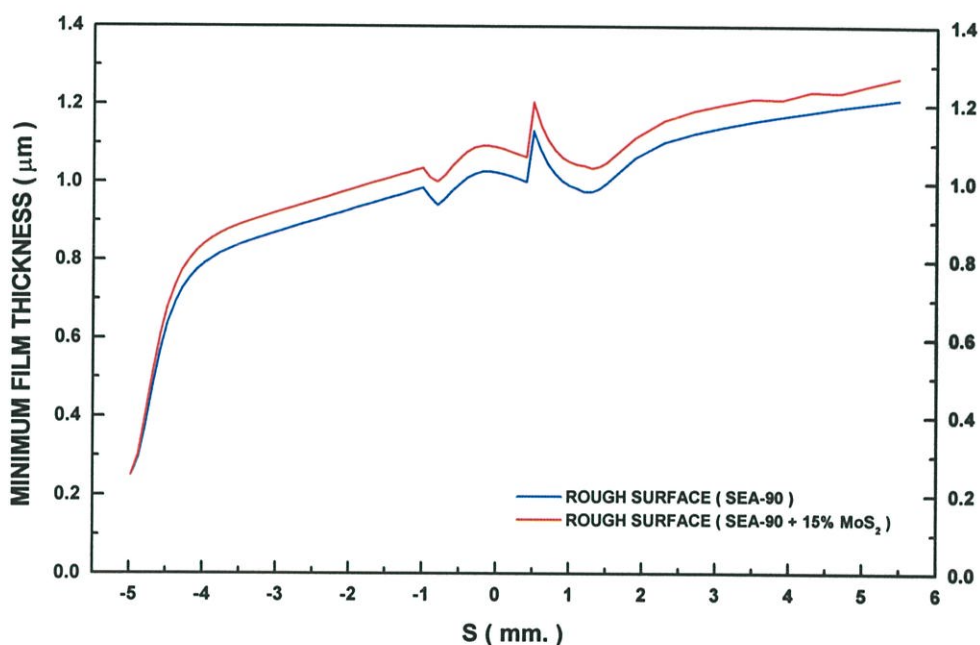


รูปที่ 7.32 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกของการขับของฟันเฟือง

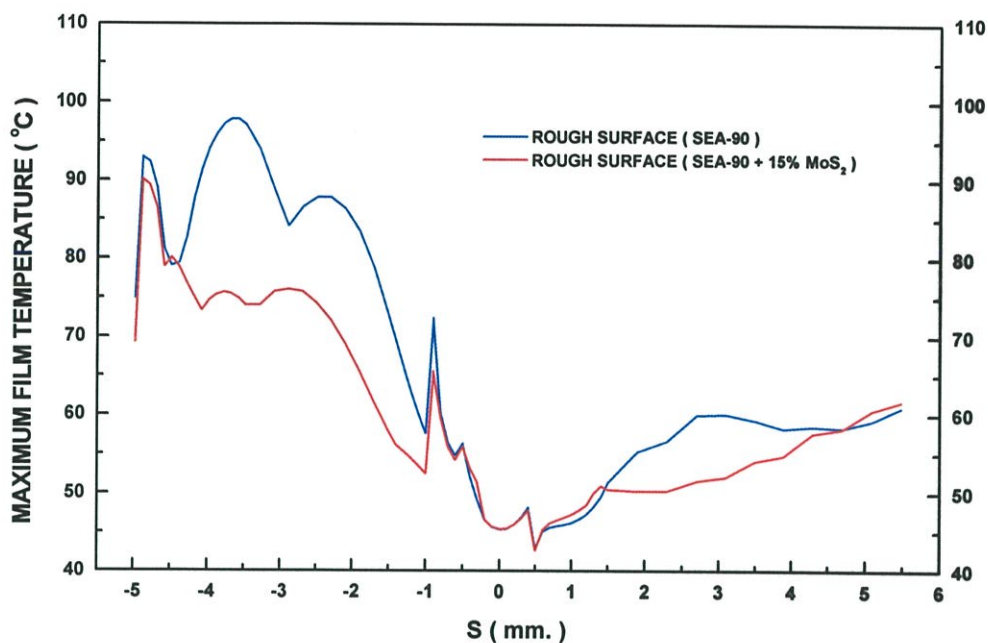


รูปที่ 7.33 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกของการขับของฟันเฟือง

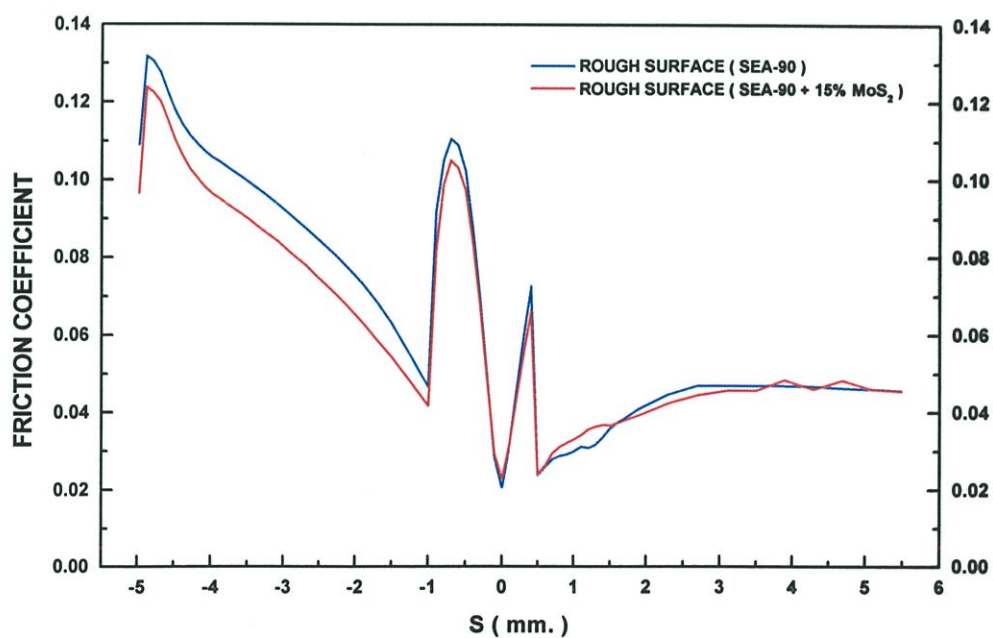
ผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง ในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น น้ำมันเกรด SAE-90 เทียบกับสารหล่อลื่น น้ำมันเกรด SAE-90 ที่ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยขนาดของ MoS_2 มีขนาด 2 ไมโครเมตรในกรณีความหยาบผิว 0.02 ไมโครเมตร มาพิจารณาจะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันกรณีที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งลงไป จะมีค่าสูงกว่า อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่ง Pitch Contact แสดงดัง รูปที่ 7.34 ถึง รูปที่ 7.36



รูปที่ 7.34 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อพิจารณาความหยาบของผิวฟันเฟือง



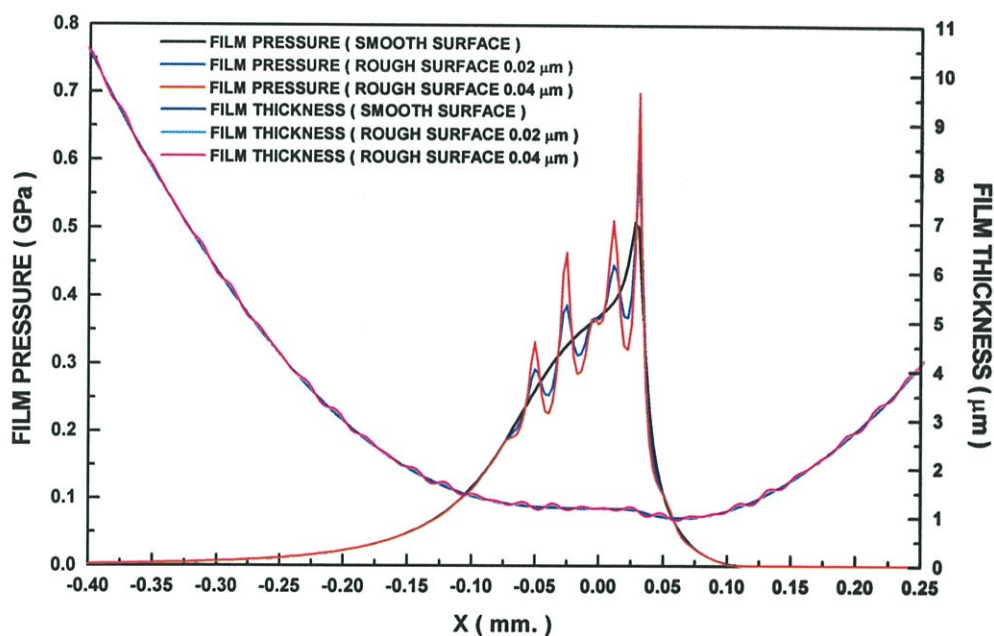
รูปที่ 7.35 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อพิจารณาความหยาบของผิวฟันเฟือง



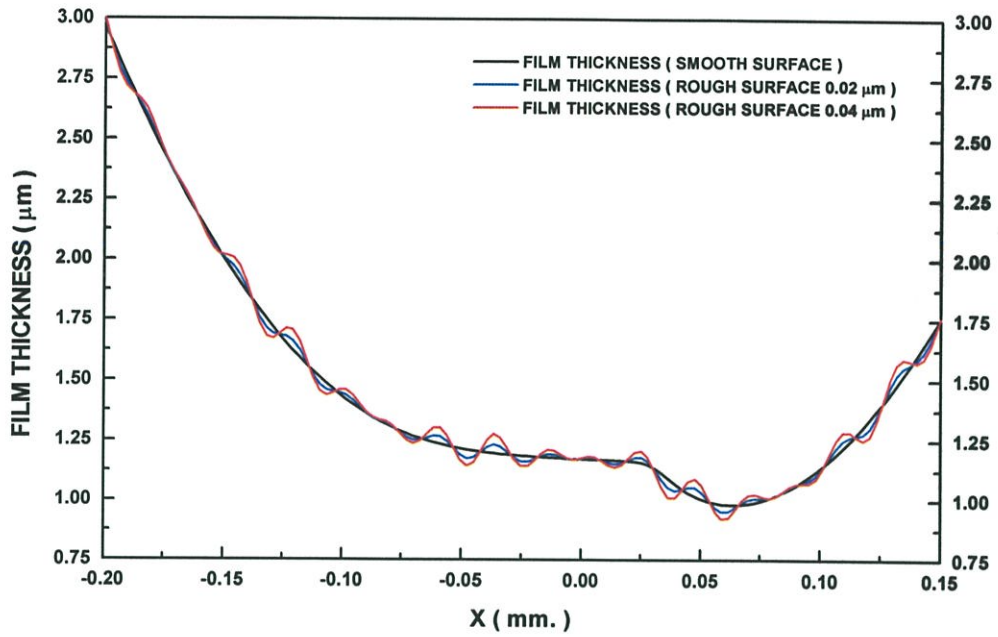
รูปที่ 7.36 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อพิจารณาความหยาบของผิวฟันเฟือง

เมื่อทำการจำลองการหล่อขึ้นของเฟืองฟันตรง เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบของฟันเฟือง จะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของฟันเฟือง เหมือนในกรณีที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 แต่ค่าความดันฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงกับความหยาบของผิวฟันเฟือง ดังรูปที่ 7.37 ถึง รูปที่ 7.42

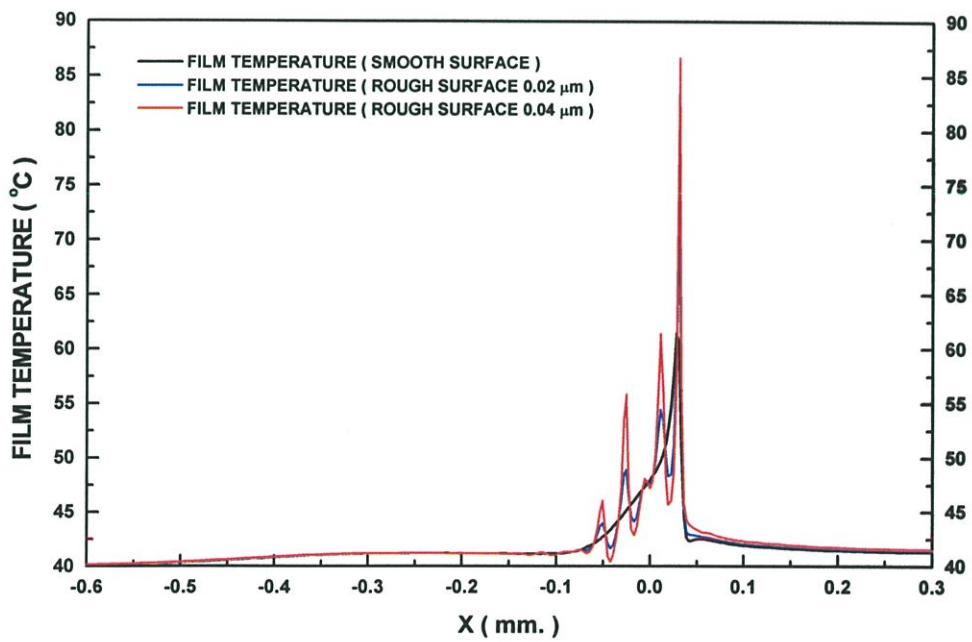
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อความหยาบของผิวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหยาบผิวของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้นและการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหยาบผิวของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.43 ถึง รูปที่ 7.47



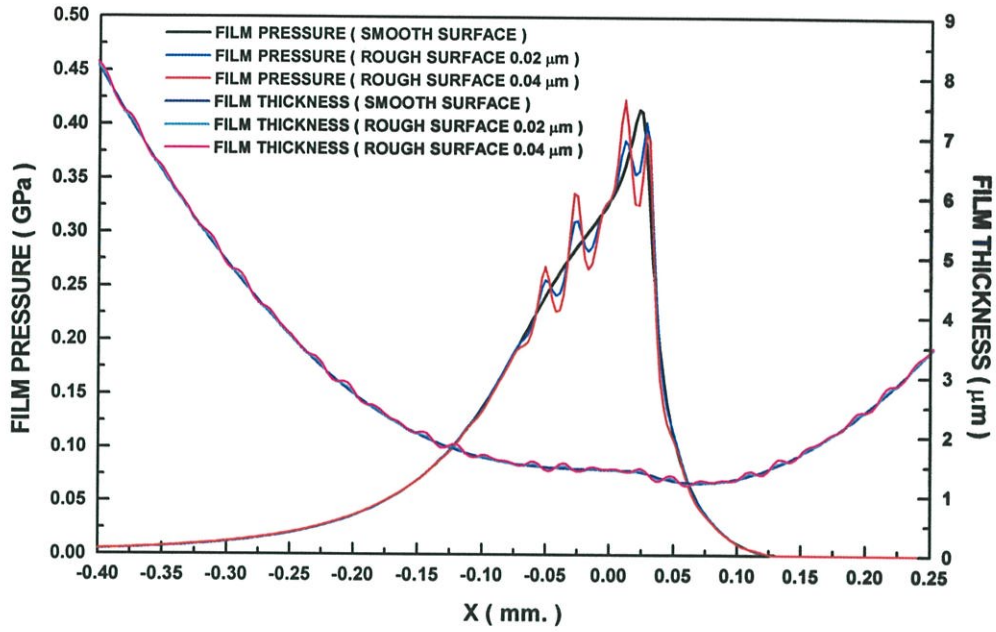
รูปที่ 7.37 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางเข้า เมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



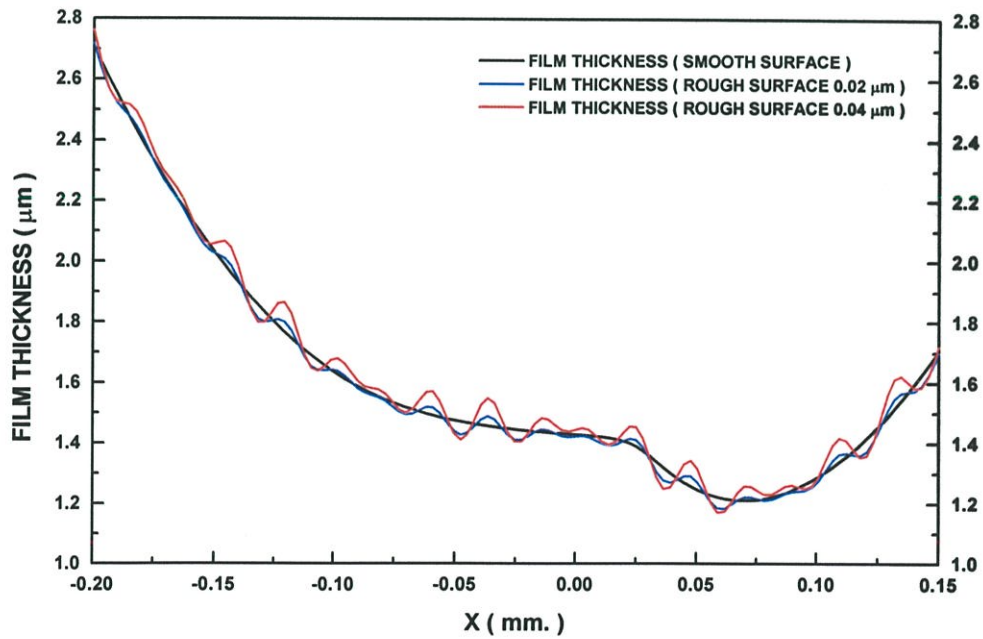
รูปที่ 7.38 แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้าเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



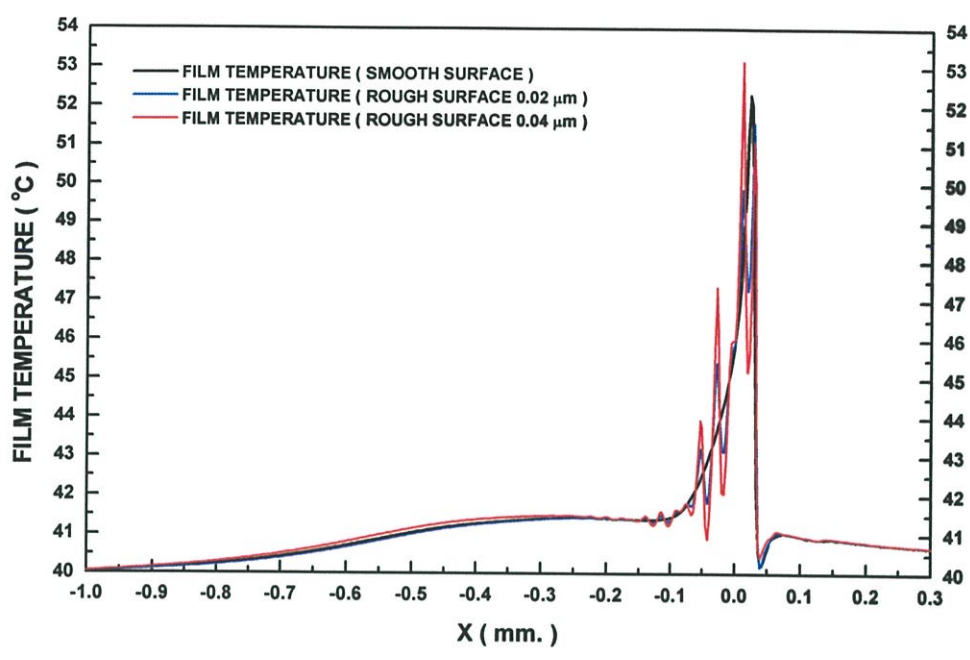
รูปที่ 7.39 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้าเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



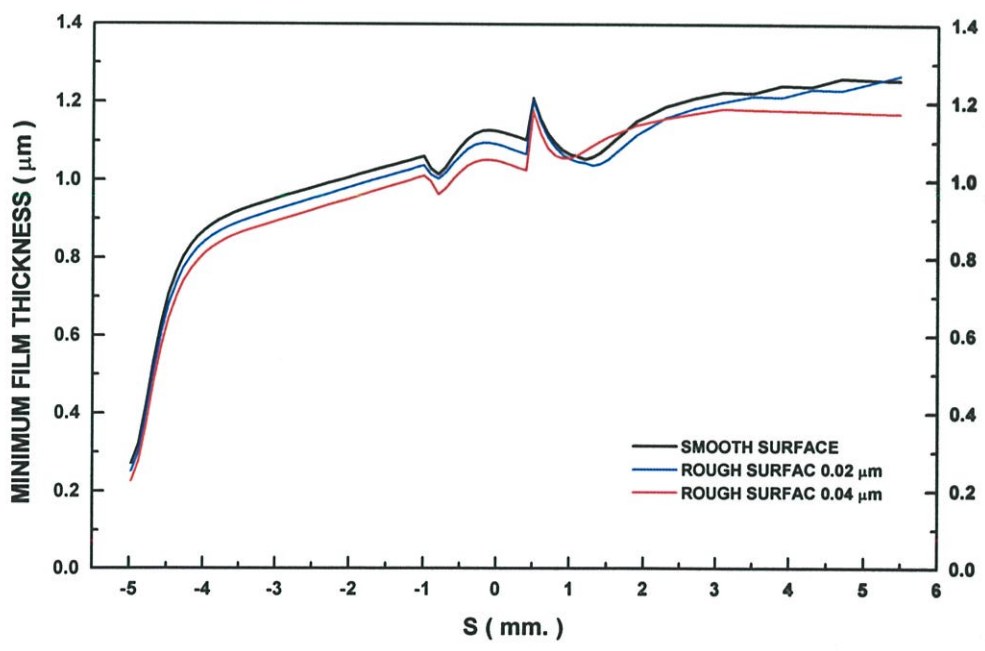
รูปที่ 7.40 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกเมื่อผิวของฟันเพื่องมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



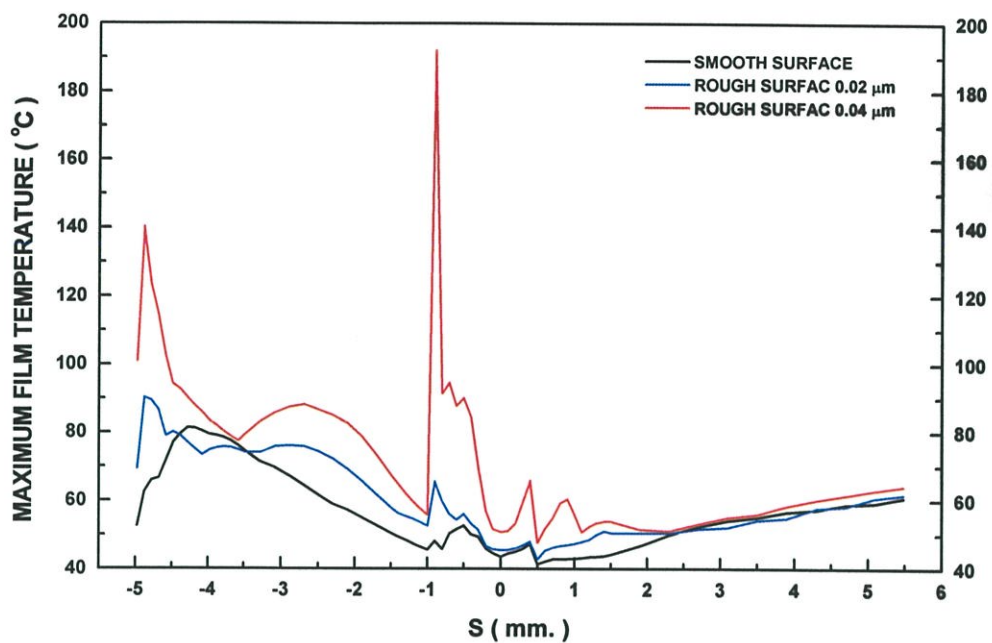
รูปที่ 7.41 แสดงการกระจายของความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงทางออกเมื่อผิวของฟันเพื่องมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



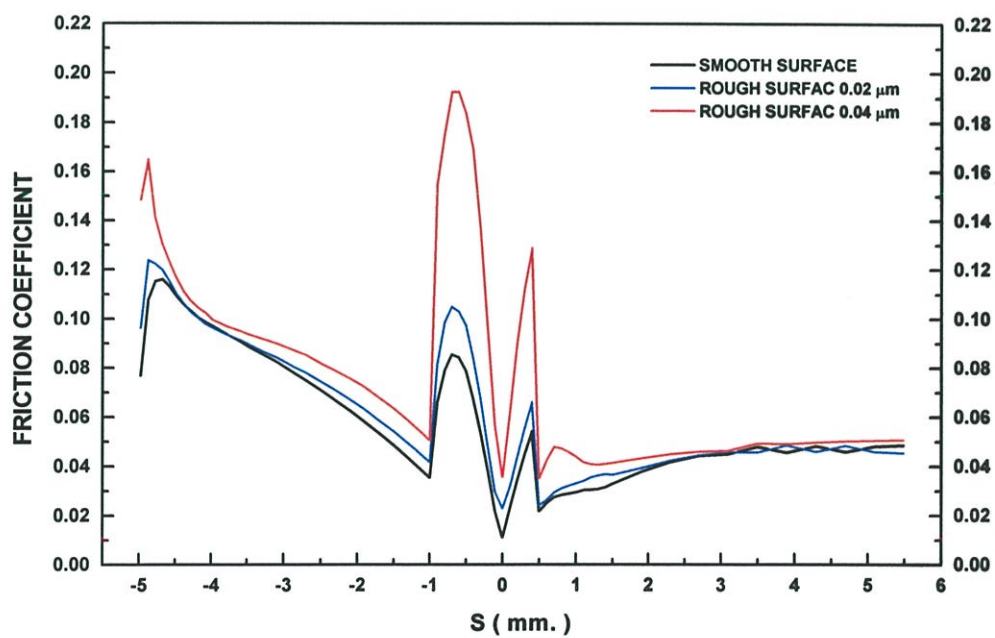
รูปที่ 7.42 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ในช่วงทางเข้าเมื่อผิวของพื้นเพื่องมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



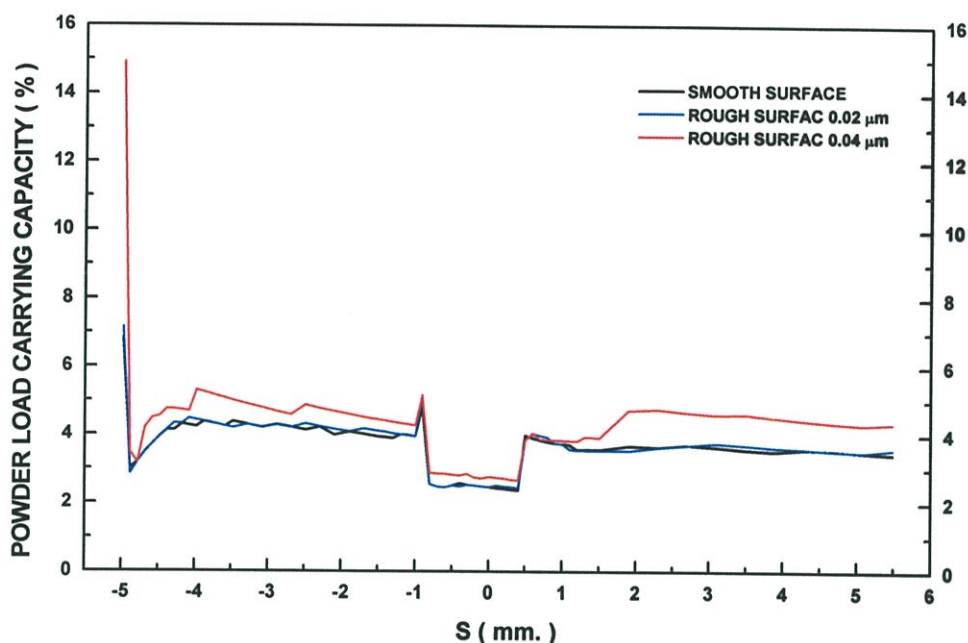
รูปที่ 7.43 แสดงค่าความหนาฟิล์มน้อยสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเพื่องเมื่อผิวของพื้นเพื่องมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



รูปที่ 7.44 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

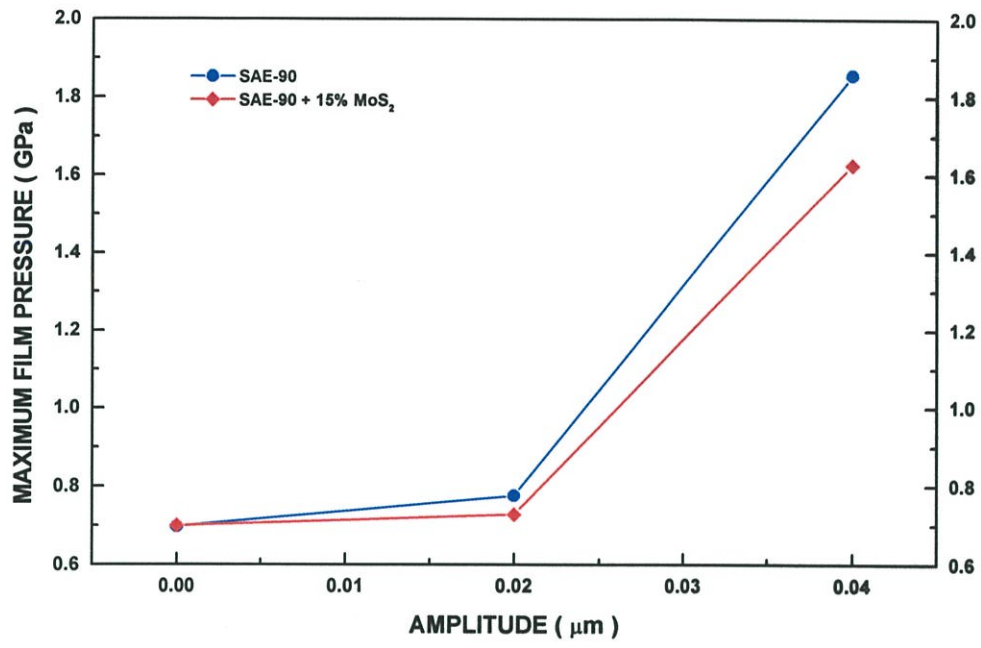


รูปที่ 7.45 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

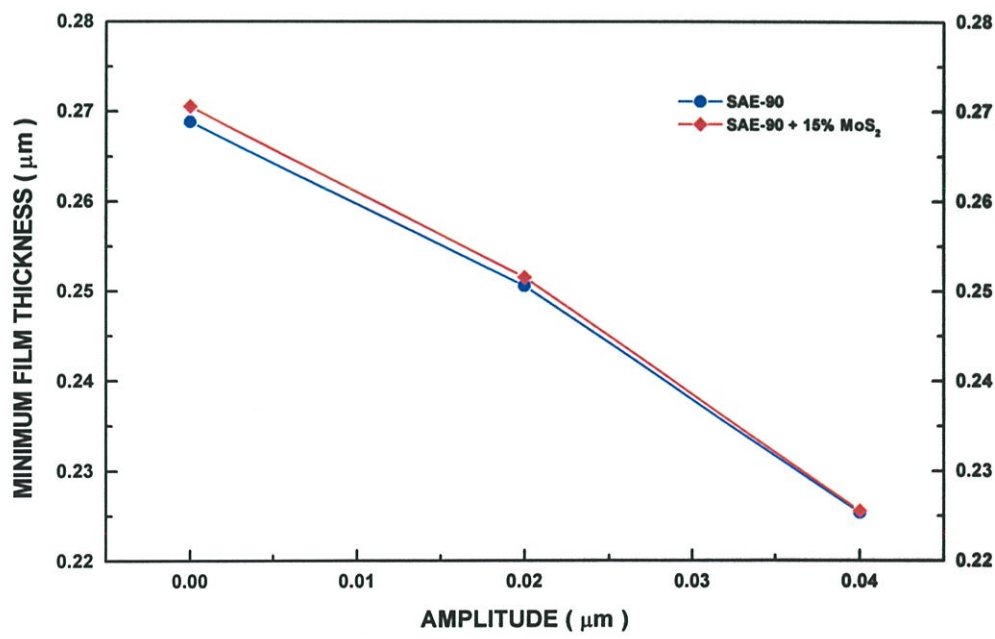


รูปที่ 7.46 แสดงการรับภาระของอนุภาค ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

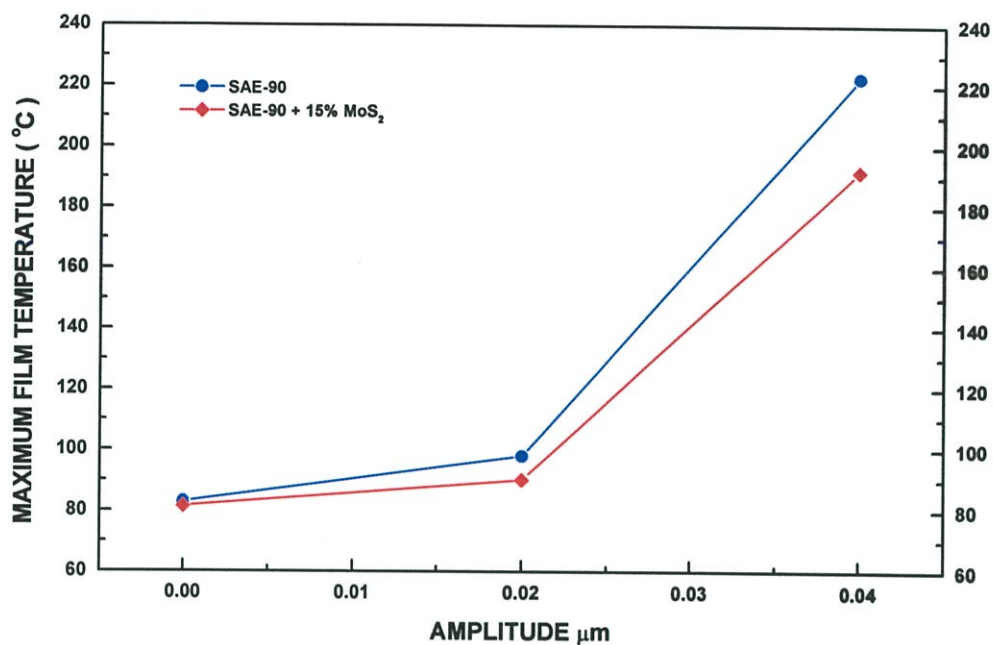
เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ค่าความหยาบผิว จะพบว่าเมื่อความหยาบผิวของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด ในการหล่อลื่นของฟันเฟืองจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลง ทั้งในกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นเป็น น้ำมันหล่อลื่น SAE-90 และ น้ำมันหล่อลื่น SAE-90 ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แสดงดัง รูปที่ 7.47 ถึง รูปที่ 7.50



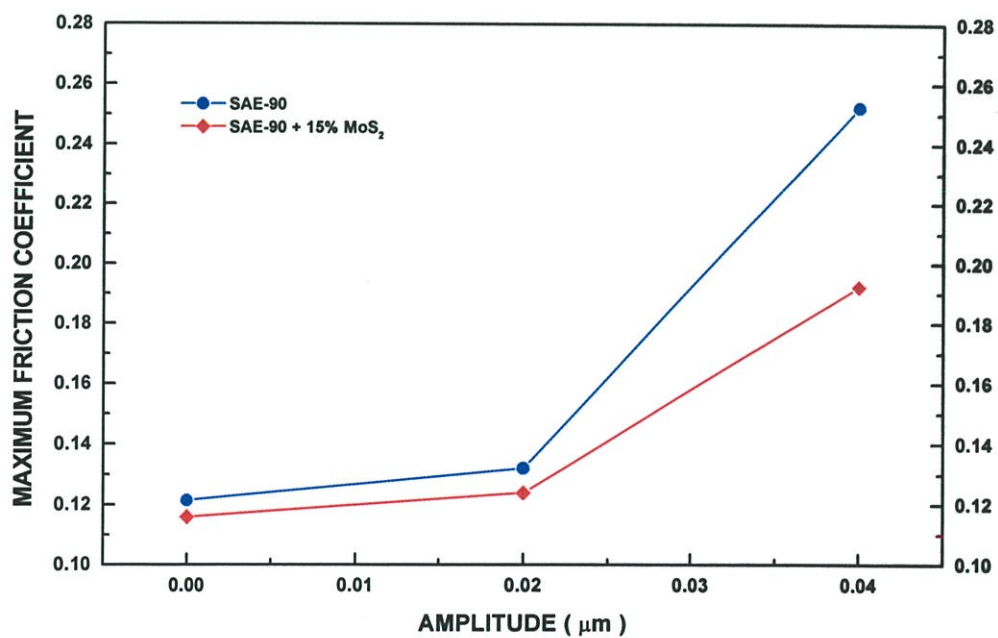
รูปที่ 7.47 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



รูปที่ 7.48 แสดงค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด ในการทำงานของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ



รูปที่ 7.49 แสดงค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

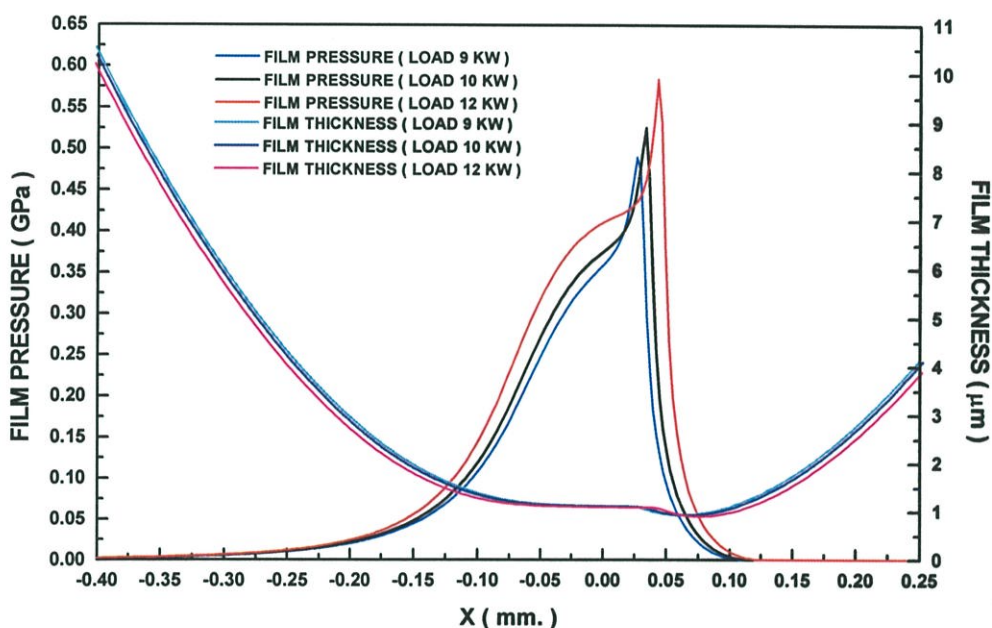


รูปที่ 7.50 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองเมื่อผิวของฟันเฟืองมีค่าความหยาบของผิวต่างๆ

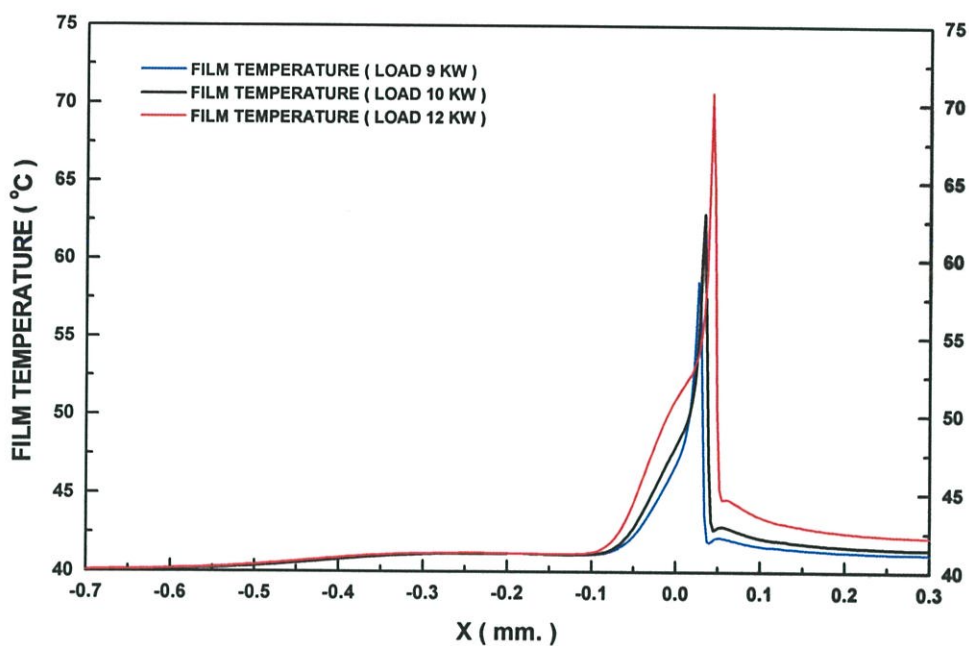
7.3 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นผิวรองรับ

7.3.1 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นผิวรองรับ ในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90

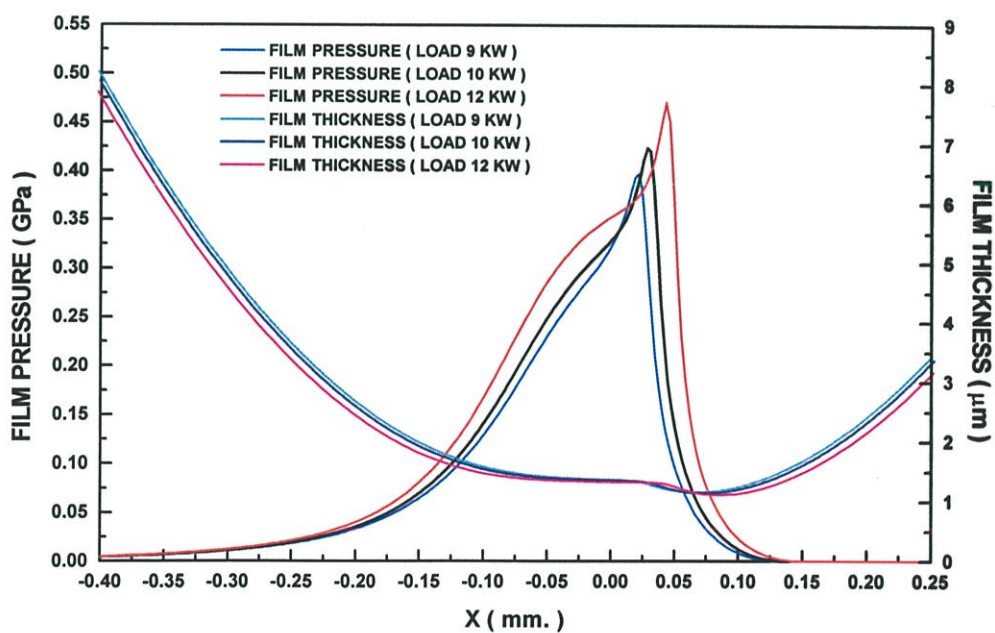
การจำลองผลจะทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นผิวรองรับที่ ภาระ 9 kW , 10 kW และ 12 kW เมื่อไม่คิดผลจากความหนืดของพื้นผิว จะพบว่า เมื่อภาระที่พื้นผิวรองรับเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความดันฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระที่พื้นผิวรองรับ แต่ ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงตามภาระที่เพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.51 ถึง รูปที่ 7.54



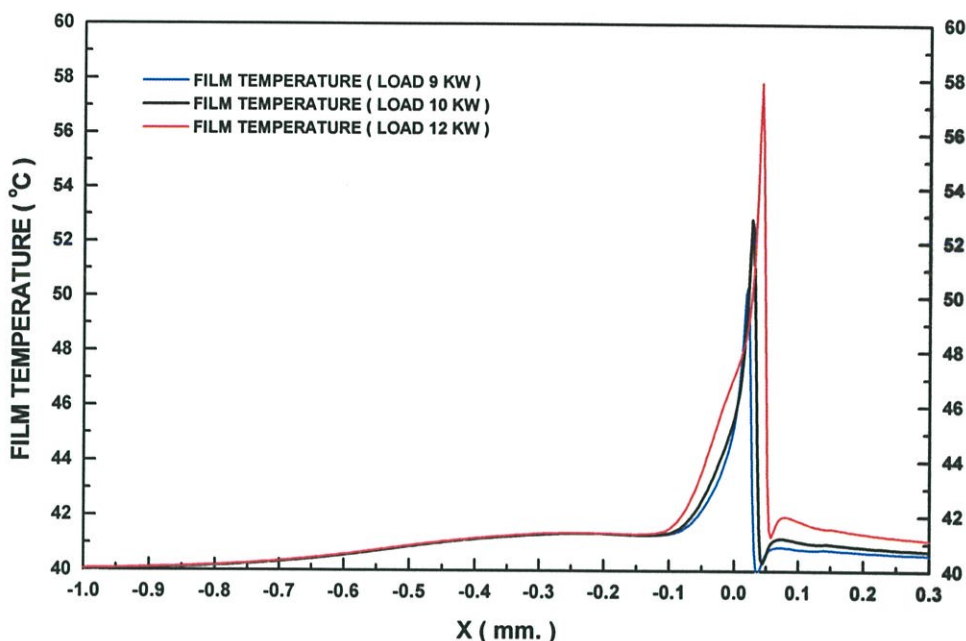
รูปที่ 7.51 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว



รูปที่ 7.52 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเพื่อ



รูปที่ 7.53 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นเพื่อ

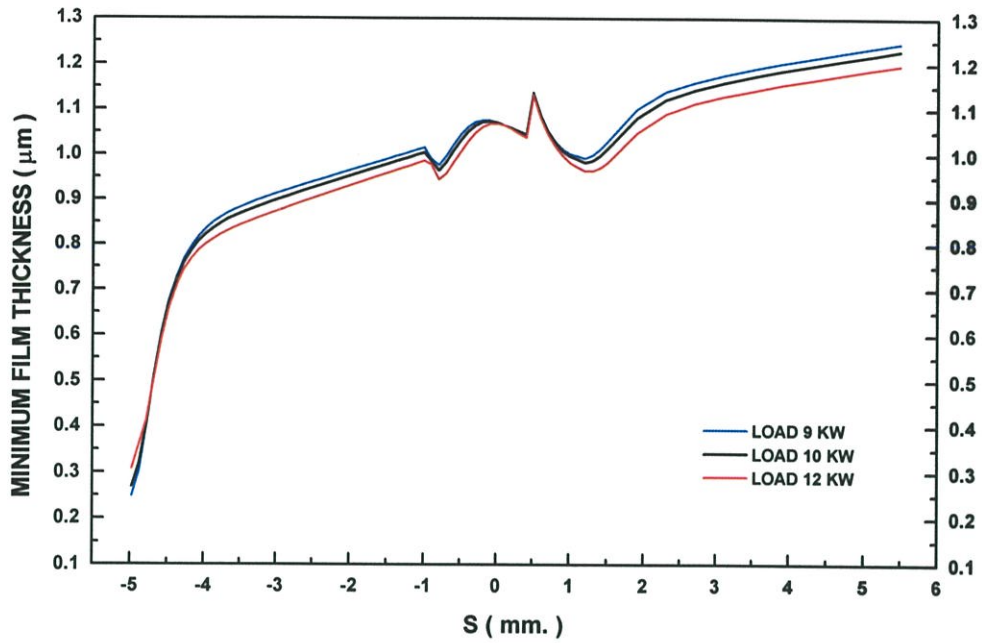


รูปที่ 7.54 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วง ออกเข้าของระยะการขบของพื้นเพื่อ

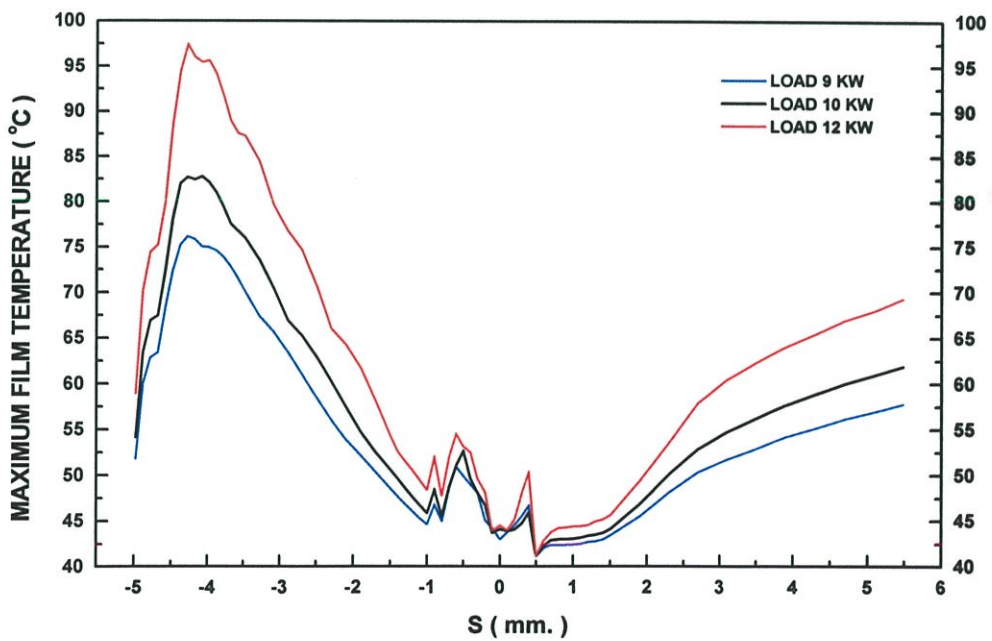
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อภาระที่พื้นเพื่อรับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์ม น้ำมัน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่พื้นเพื่อรับมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.55 ถึง รูปที่ 7.57

การจำลองผลการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรง จะทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นเพื่อรับที่ ภาระ 9 kW , 10 kW และ 12 kW โดย พิจารณาผลจากความหยาบผิวของพื้นเพื่อรับ จะพบว่า เมื่อ ภาระที่พื้นเพื่อรับเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความดันฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่า เพิ่มขึ้นตามภาระที่พื้นเพื่อรับ โดยที่ความดันฟิล์มน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่า เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงกับความหยาบผิวของพื้นเพื่อรับ แต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลง ตามภาระที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของฟิล์มน้ำมันเปลี่ยนแปลงตามความหยาบผิวของพื้นเพื่อรับ แสดงดัง รูปที่ 7.58 ถึง รูปที่ 7.61

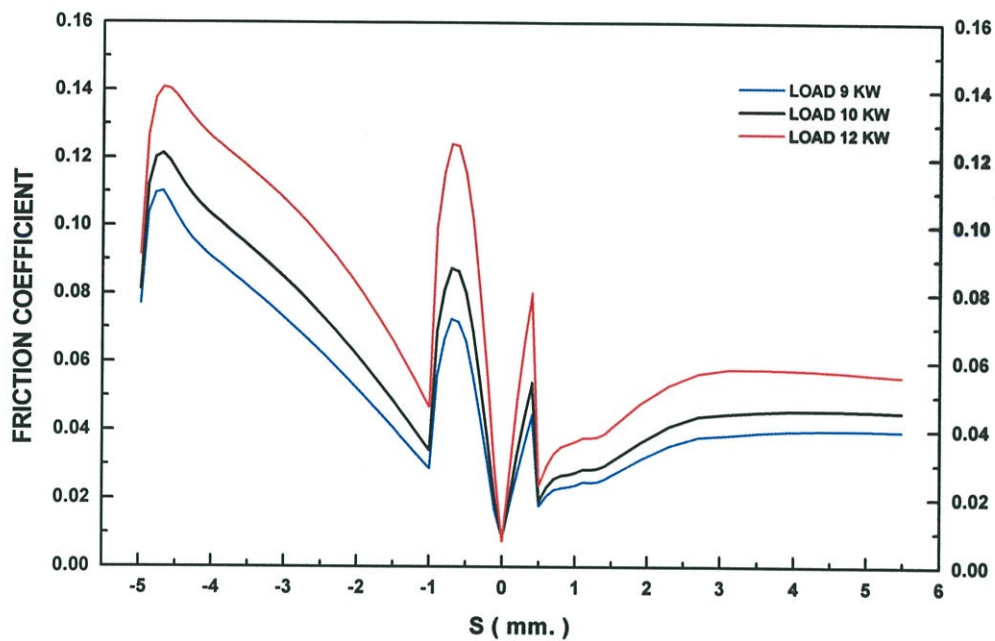
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อภาระที่พื้นเพื่อรับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์ม น้ำมัน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่พื้นเพื่อรับมีค่าเพิ่มขึ้น โดย จะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไม่คิดผลจากความหยาบผิวของพื้นเพื่อรับ แสดงดัง รูปที่ 7.62 ถึง รูปที่ 7.64



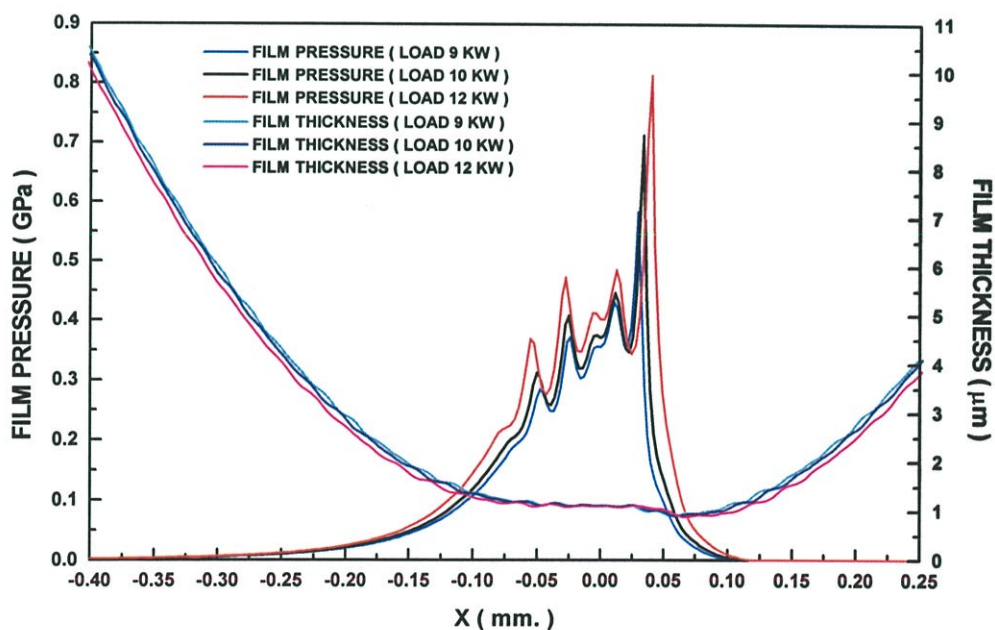
รูปที่ 7.55 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อพื้นเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง



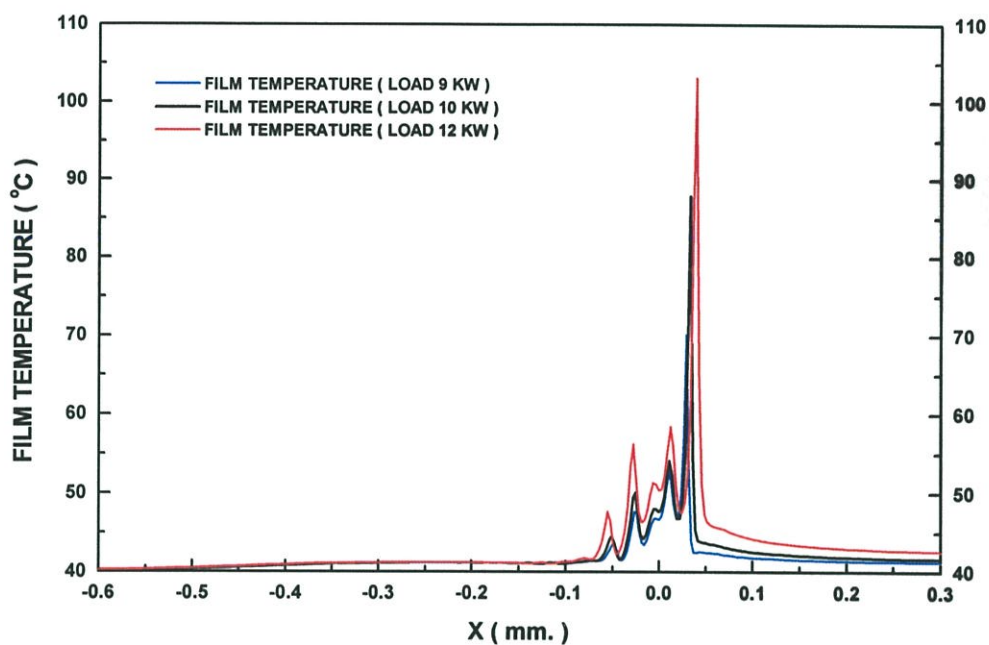
รูปที่ 7.56 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อพื้นเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง



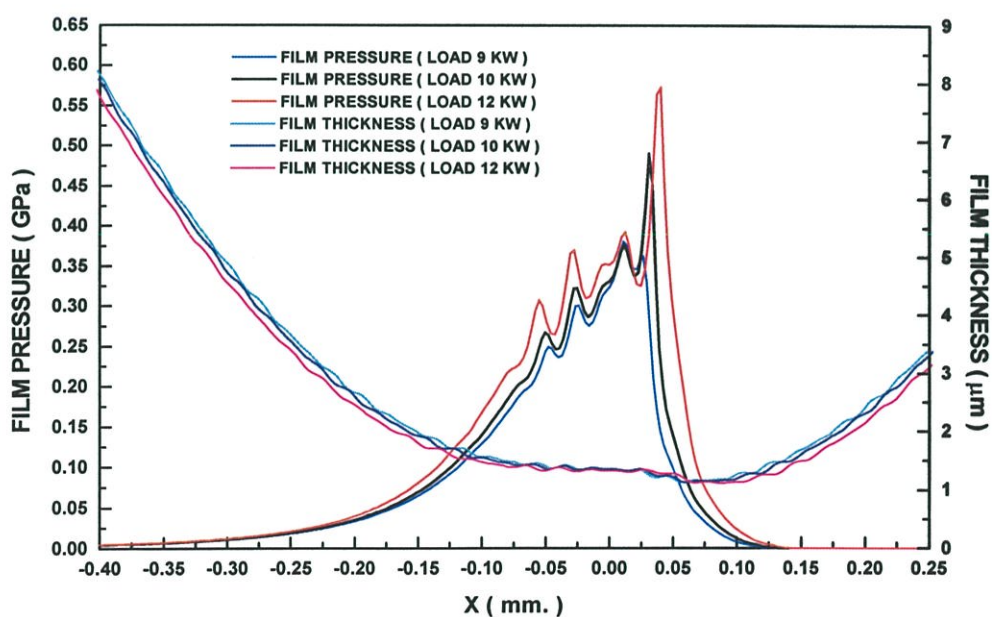
รูปที่ 7.57 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทาน เมื่อพื้นผิวรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว



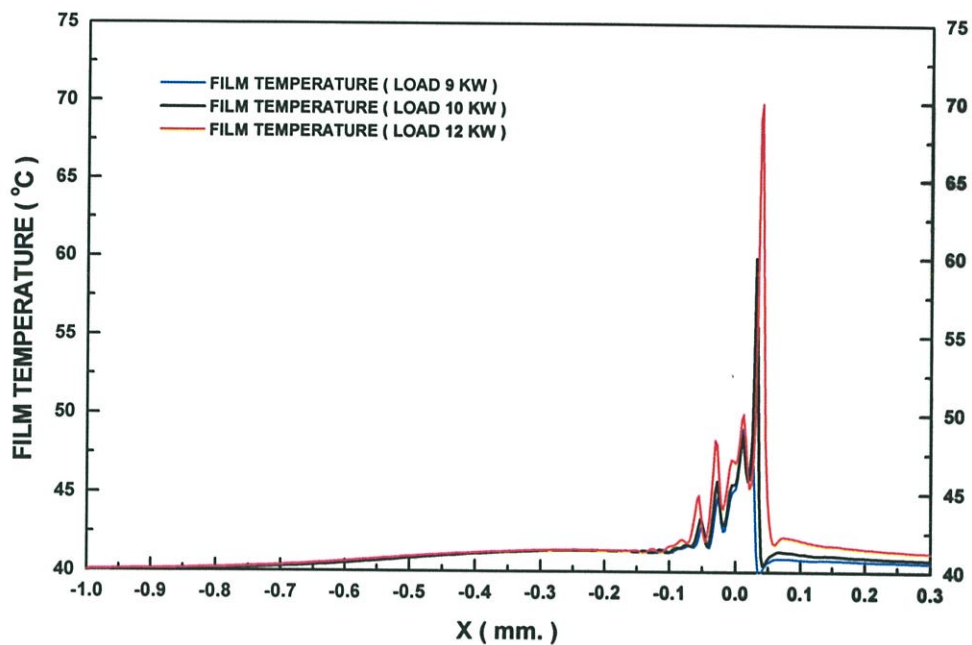
รูปที่ 7.58 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นผิวรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว กรณีผิวพื้นผิวเป็นผิวหยาบ



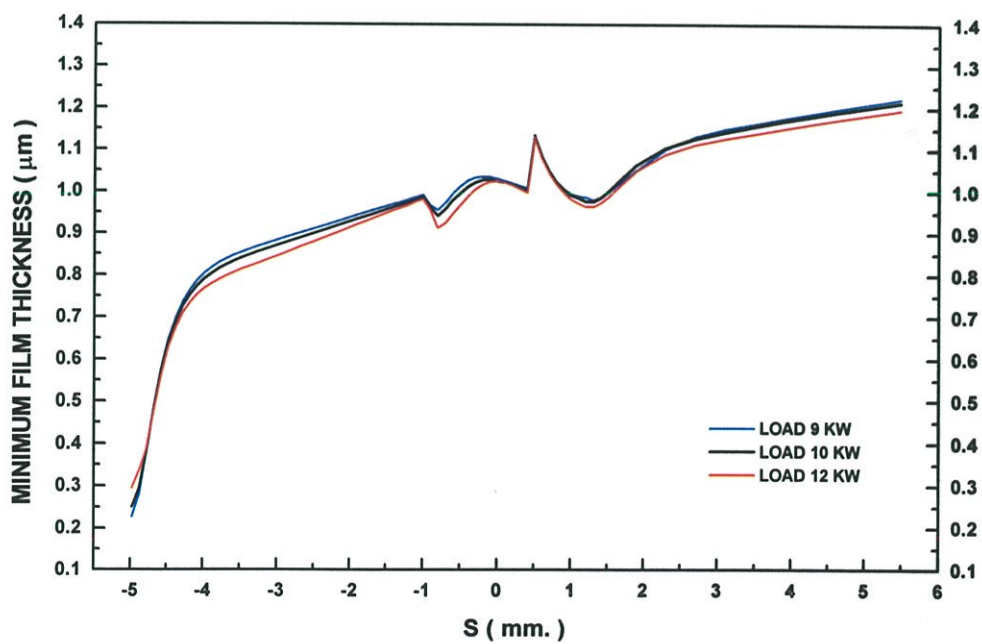
รูปที่ 7.59 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวหยาบ



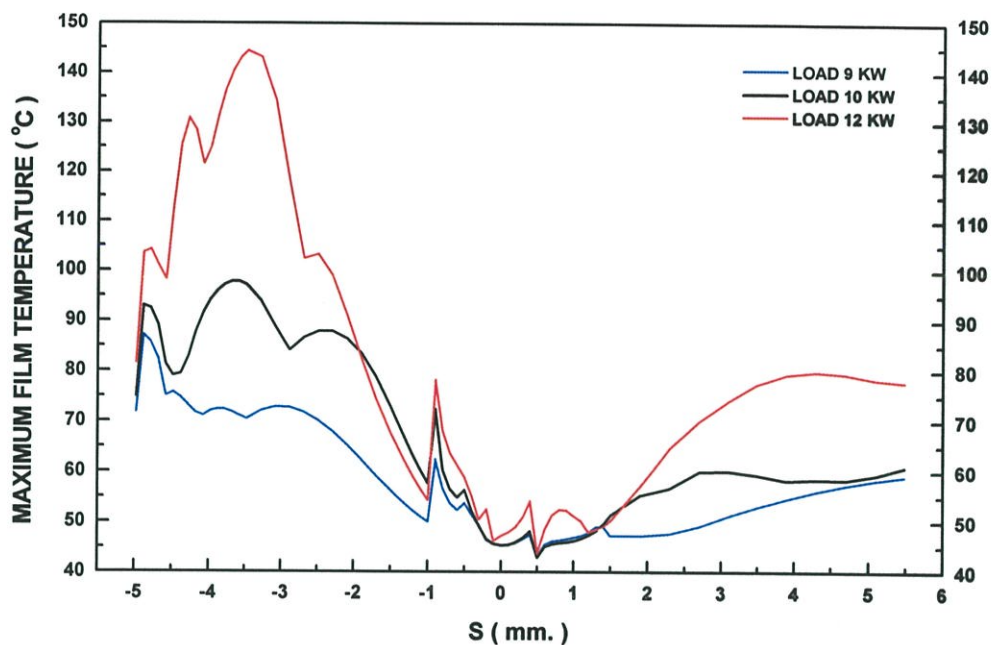
รูปที่ 7.60 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวหยาบ



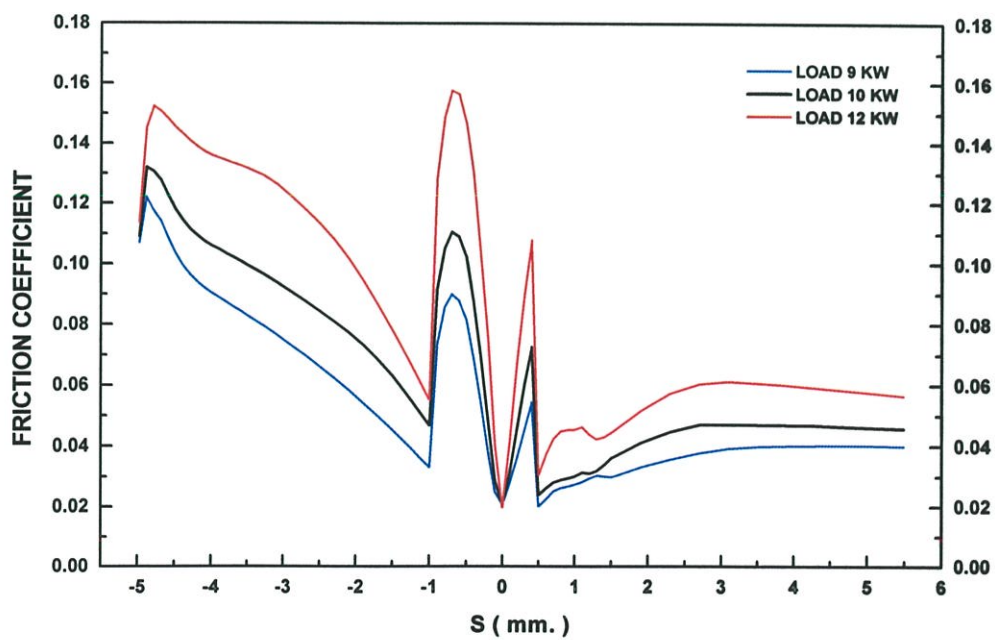
รูปที่ 7.61 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าออกกระยะการขบของพื้นผิว กรณีสภาพพื้นผิวเป็นผิวหยาบ



รูปที่ 7.62 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว กรณีสภาพพื้นผิวเป็นผิวหยาบ



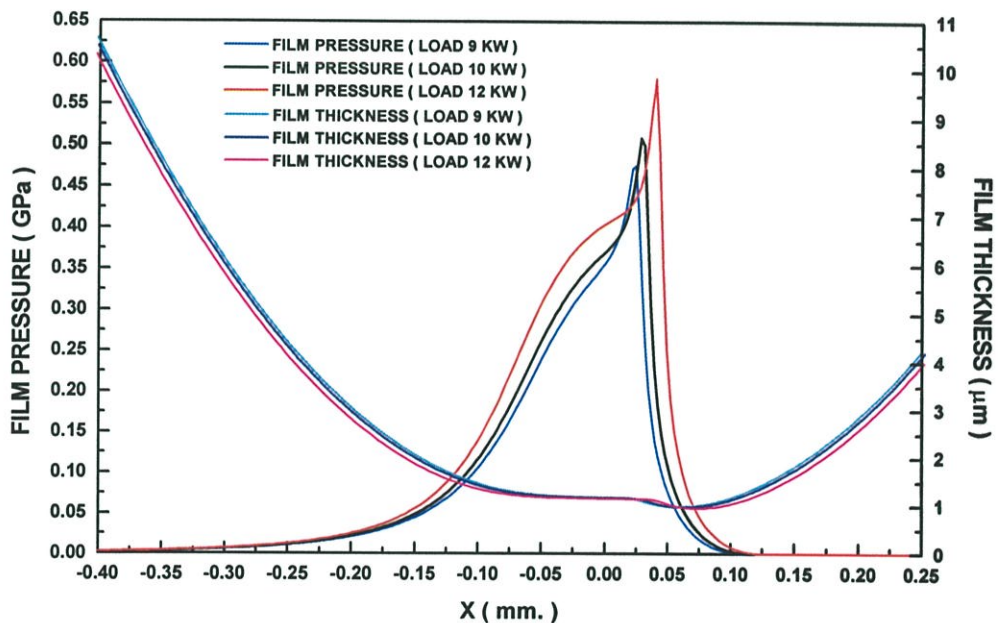
รูปที่ 7.63 แสดงการคำนวณของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อพื้นผิวรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว กรณีผิวพื้นผิวเป็นผิวหยาบ



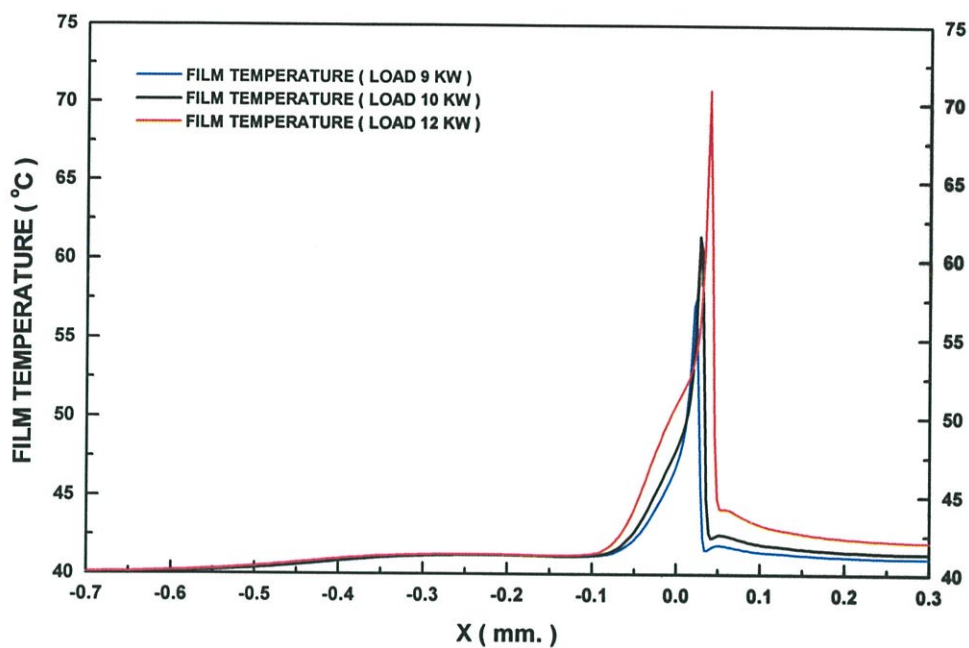
รูปที่ 7.64 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทาน เมื่อพื้นผิวรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว กรณีผิวพื้นผิวเป็นผิวหยาบ

7.3.2 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นเฟืองได้รับ ในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS₂ ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

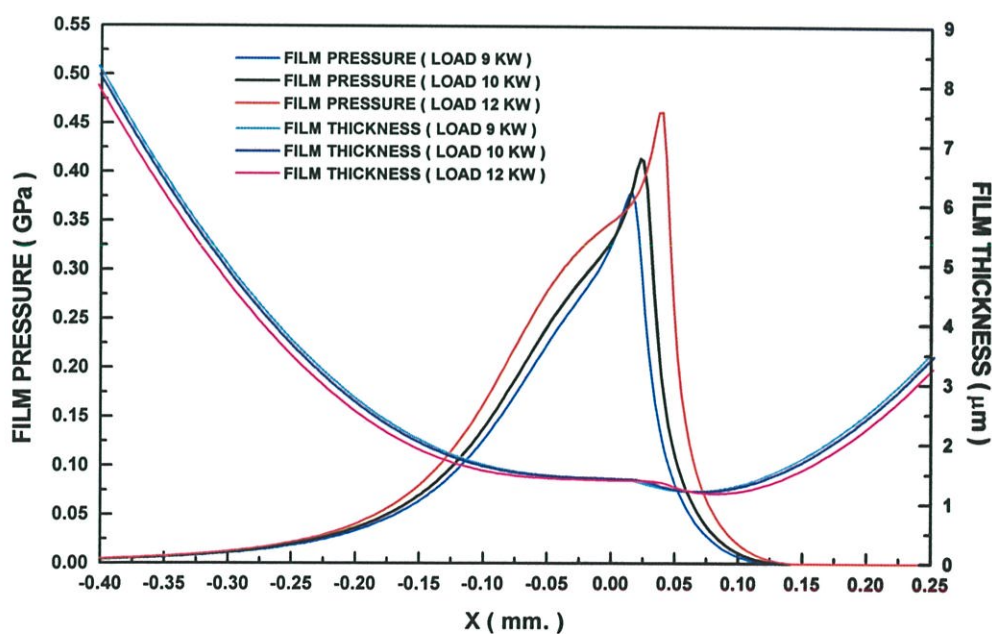
การจำลองผลการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นเฟืองได้รับที่ภาระ 9 kW , 10 kW และ 12 kW ด้วยน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 ที่ผสม MoS₂ ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยขนาดของ MoS₂ มีขนาด 2 ไมโครเมตร เมื่อไม่คิดผลจากความหนาผิวของพื้นเฟือง จะพบว่า เมื่อภาระที่พื้นเฟืองได้รับเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความดันฟิล์มน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระที่พื้นเฟืองได้รับ แต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงตามภาระที่เพิ่มขึ้น แต่จะมีน้อยกว่าในกรณีการใช้ น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 แสดงดัง รูปที่ 7.65 ถึง รูปที่ 7.68



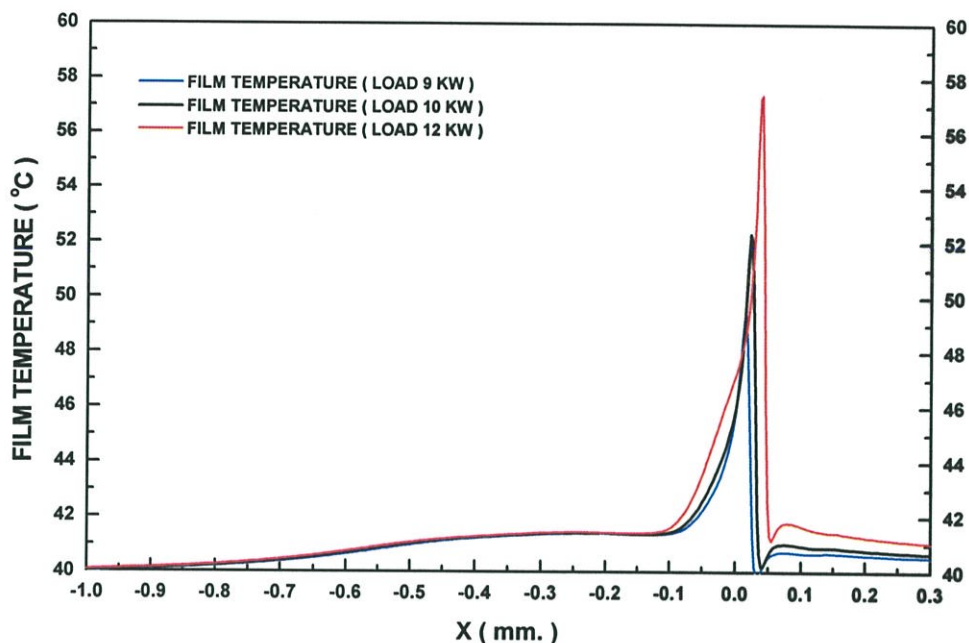
รูปที่ 7.65 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์ม เมื่อพื้นเฟืองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเฟือง กรณีผิวพื้นเฟืองเป็นผิวเรียบ และ ผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน



รูปที่ 7.66 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิฟิล์ม เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเพื่อ กรณีผิวพื้นเพื่อเป็นผิวเรียบและ ผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน



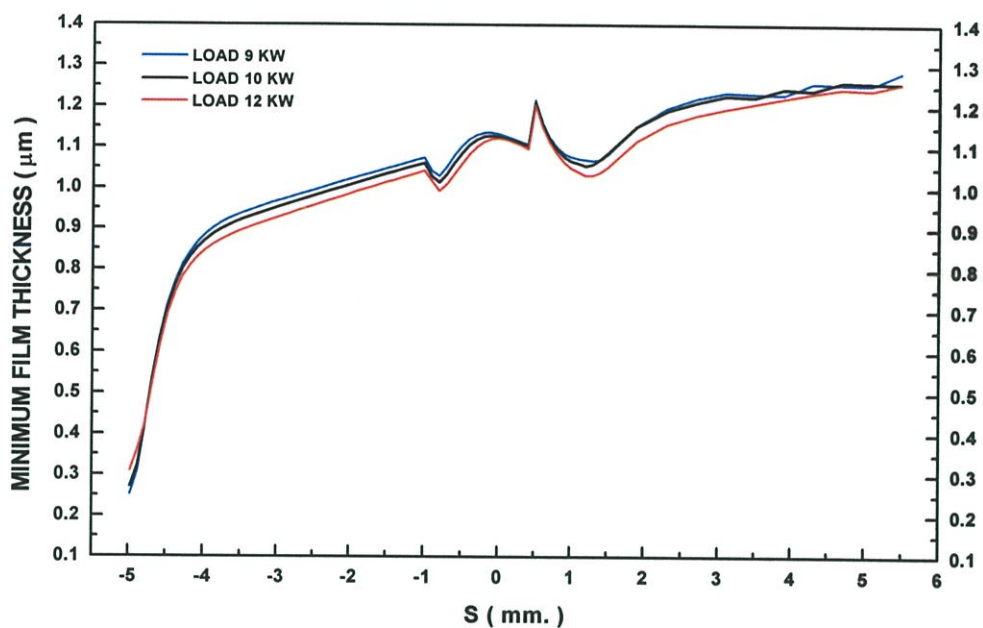
รูปที่ 7.67 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์ม เมื่อพื้นเพื่อรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นเพื่อ กรณีผิวพื้นเพื่อเป็นผิวเรียบและผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน



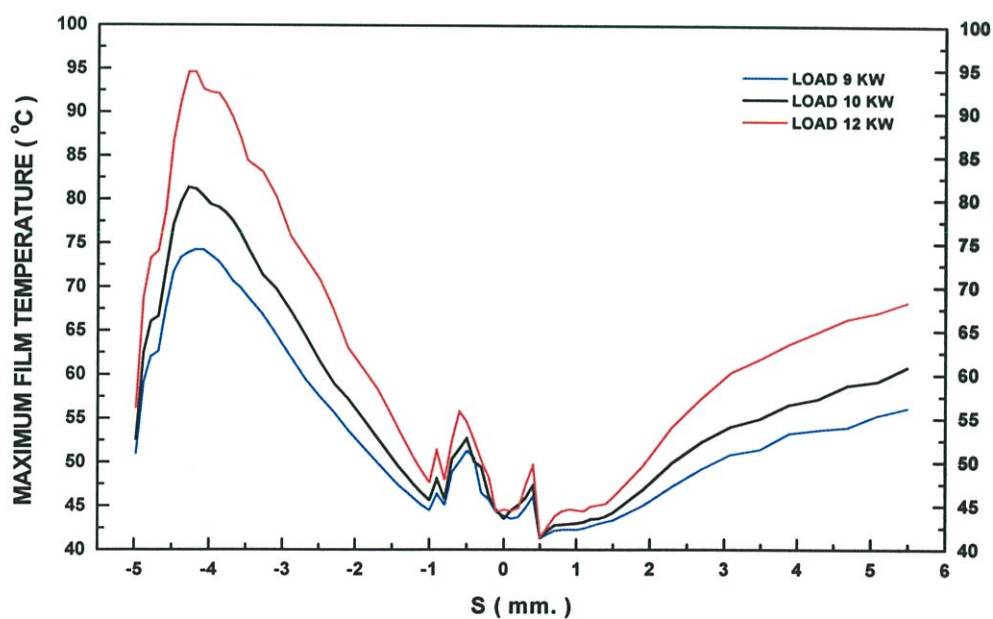
รูปที่ 7.68 แสดงการกระจายของอุณหภูมิฟิล์ม เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นผิว กรณีผิวพื้นผิวเป็นผิวเรียบและ ผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน

เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิวตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อภาระที่พื้นผิวรองรับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์ม น้ำมัน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่พื้นผิวรองรับมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะมีผลน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 และพบว่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งต่อภาระรวม จะมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงค่อนข้างน้อยทำให้จำนวนอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปในช่วง Contact Region เพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อยแต่ภาระรวมที่พื้นผิวรองรับจะเพิ่มขึ้นมาก จึงทำให้อัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งลดลง เมื่อภาระที่พื้นผิวรองรับเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.69 ถึง รูปที่ 7.72

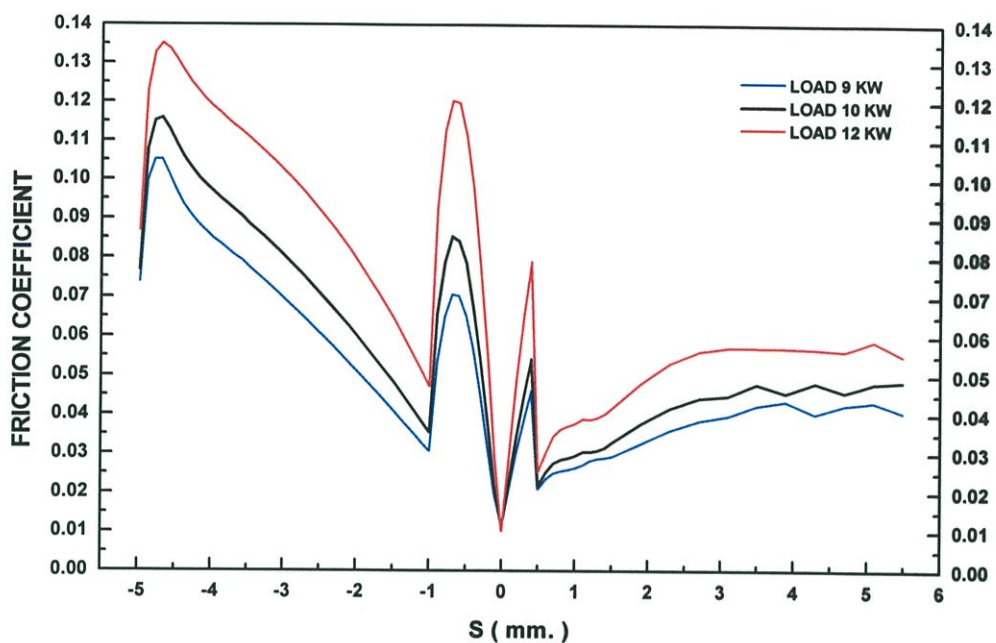
เมื่อทำการจำลองผลการหล่อลื่นของพื้นผิวตรง โดยทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นผิวรองรับที่ ภาระ 9 kW , 10 kW และ 12 kW เมื่อ พิจารณาผลจากความหนาของพื้นผิว จะพบว่า เมื่อภาระที่พื้นผิวรองรับเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความดันฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระที่พื้นผิวรองรับ โดยที่ความดันฟิล์มน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงกับความหนาของพื้นผิว แต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงตามภาระที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของฟิล์มน้ำมันเปลี่ยนแปลงตามความหนาของพื้นผิวแต่จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 แสดงดัง รูปที่ 7.73 ถึง รูปที่



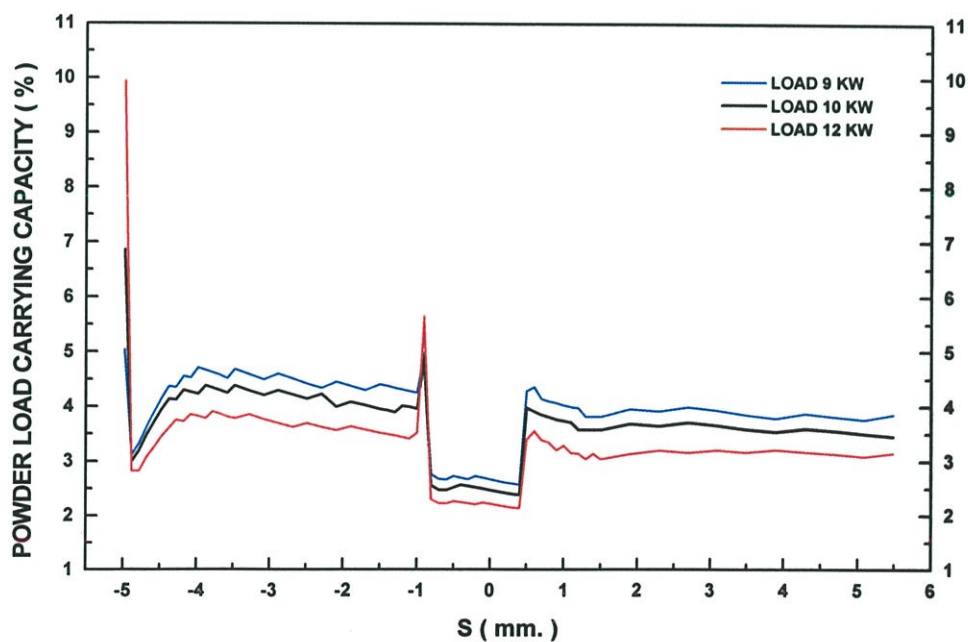
รูปที่ 7.69 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวเรียบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน



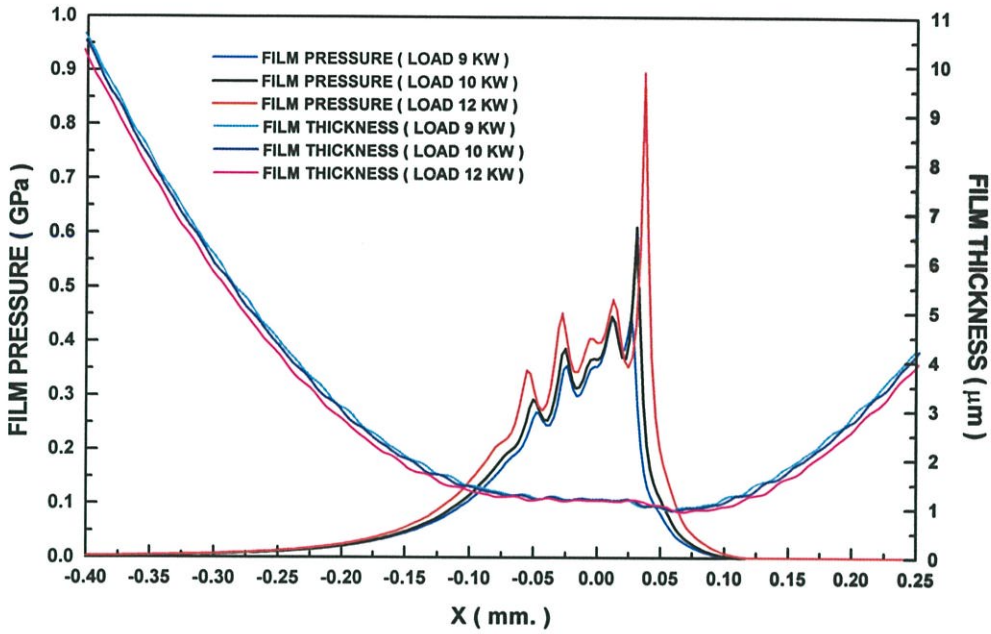
รูปที่ 7.70 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวเรียบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน



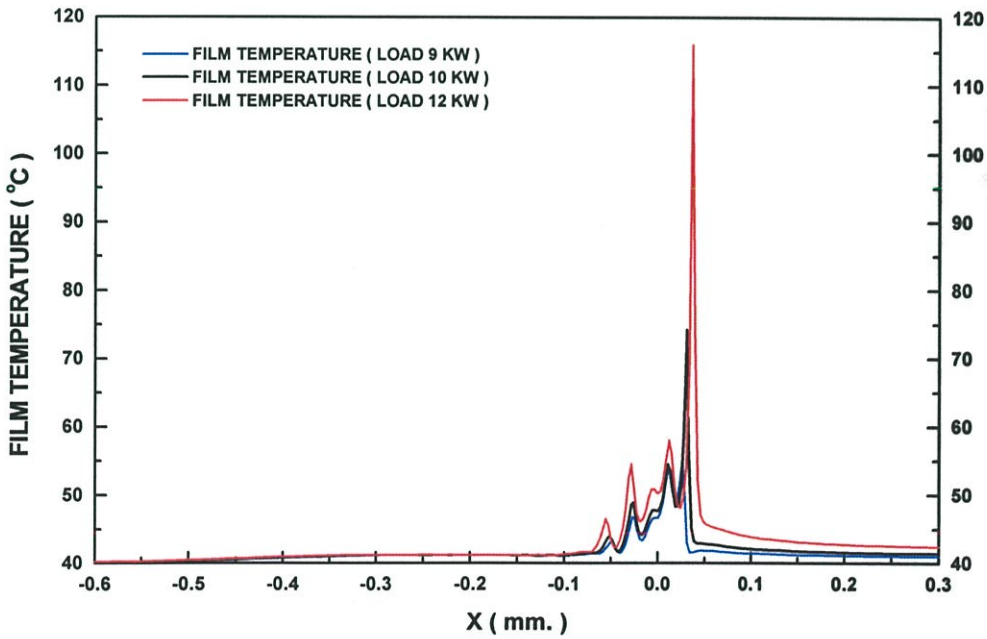
รูปที่ 7.71 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อพื้นเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวเรียบและผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน



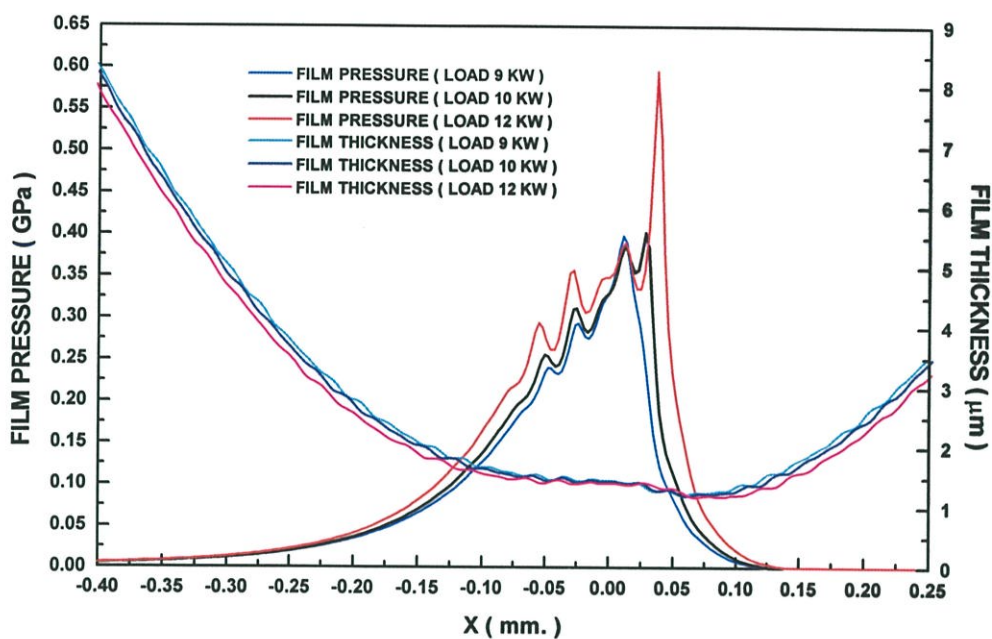
รูปที่ 7.72 แสดงค่าการรับภาระรวมของ MoS₂ เมื่อพื้นเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวเรียบและผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน



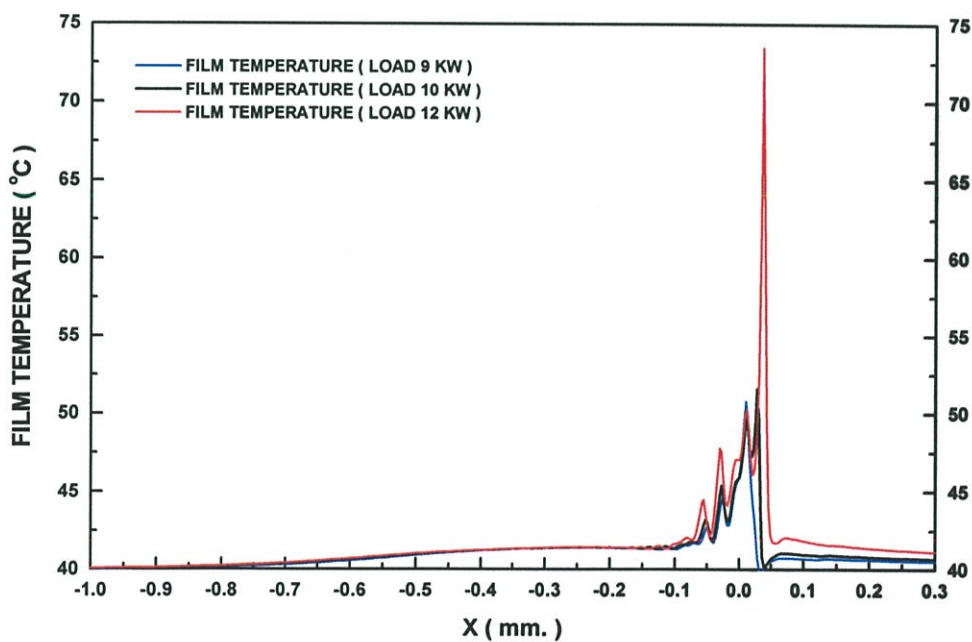
รูปที่ 7.73 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์ม เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว กรณีสภาพพื้นผิวเป็นผิวหยาบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน



รูปที่ 7.74 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิฟิล์ม เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นผิว กรณีสภาพพื้นผิวเป็นผิวหยาบและ ผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน

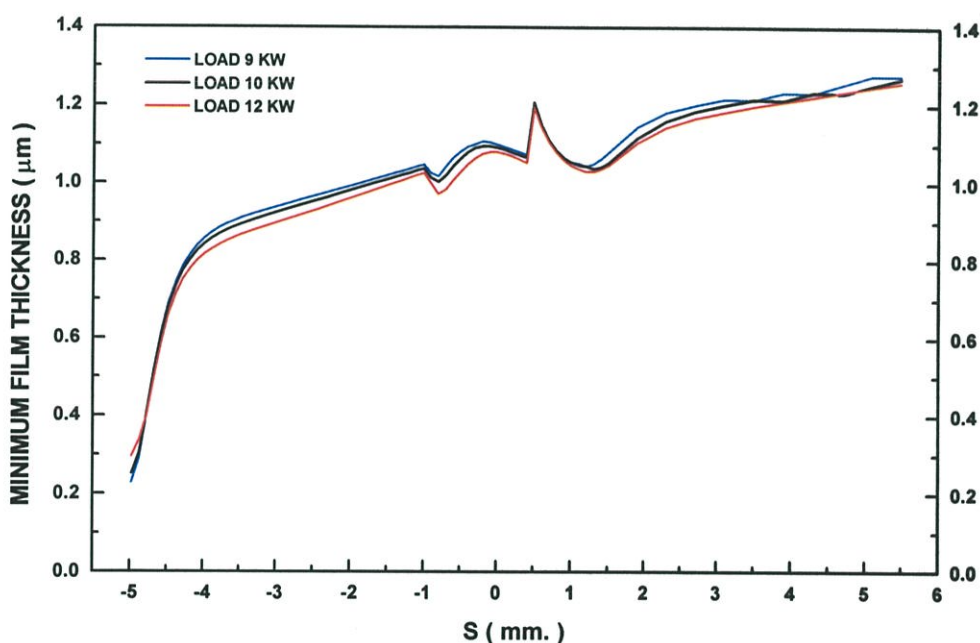


รูปที่ 7.75 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์ม เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นผิว กรณีผิวพื้นผิวเป็นผิวหยาบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน

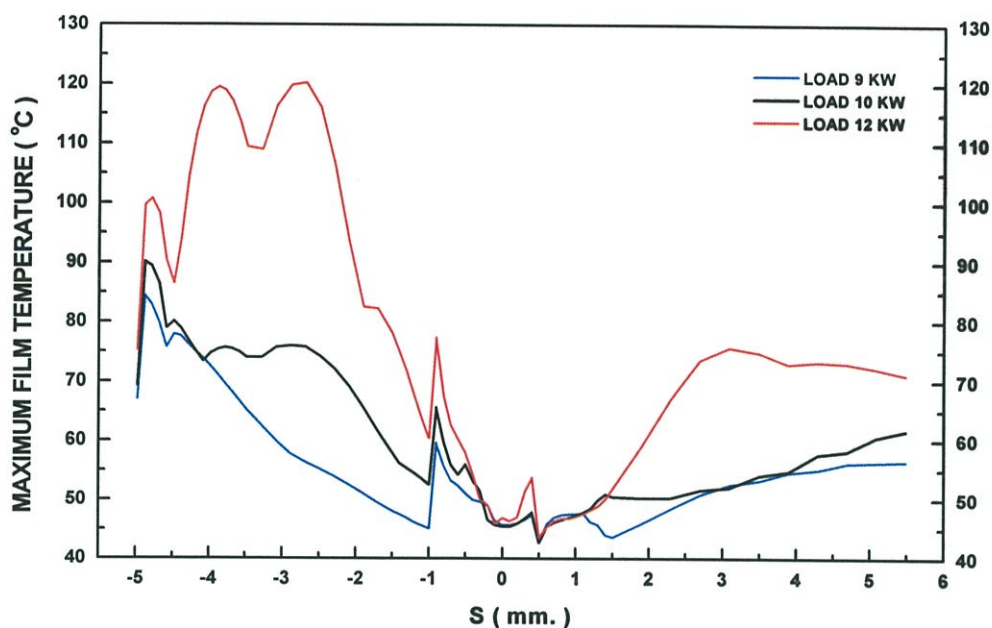


รูปที่ 7.76 แสดงการกระจายของอุณหภูมิฟิล์ม เมื่อพื้นผิวรองรับภาระต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของพื้นผิว กรณีผิวพื้นผิวเป็นผิวหยาบและ ผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน

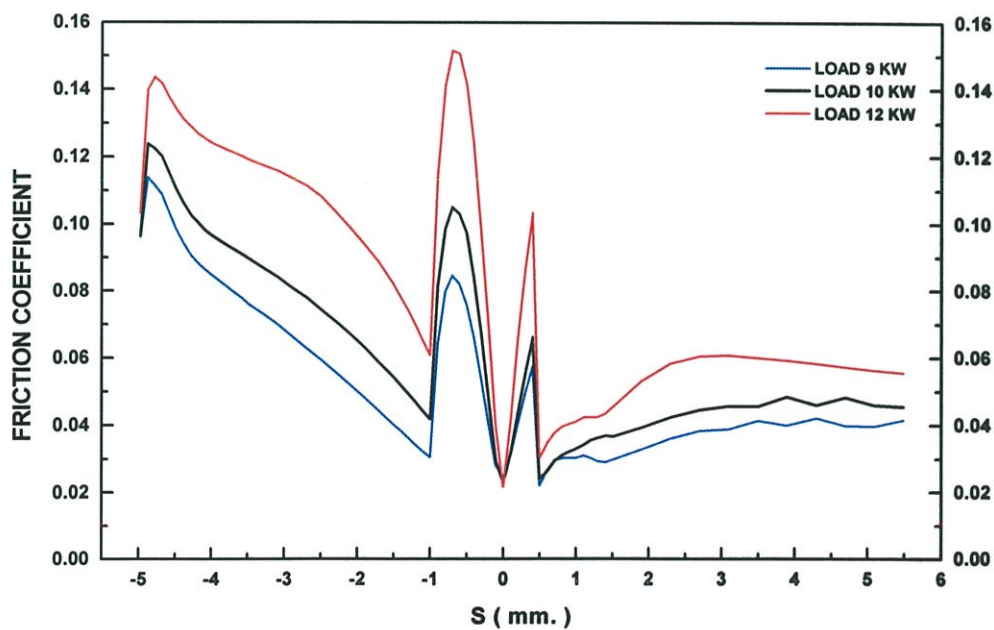
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะมีผลน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 และพบว่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งต่อภาระรวม จะมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงค่อนข้างน้อยทำให้จำนวนอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปในช่วง Contact Region เพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อยแต่ภาระรวมที่ฟันเฟืองได้รับจะเพิ่มขึ้นมาก จึงทำให้อัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งลดลง เมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่นับผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง แสดงดัง รูปที่ 7.77 ถึง รูปที่ 7.80



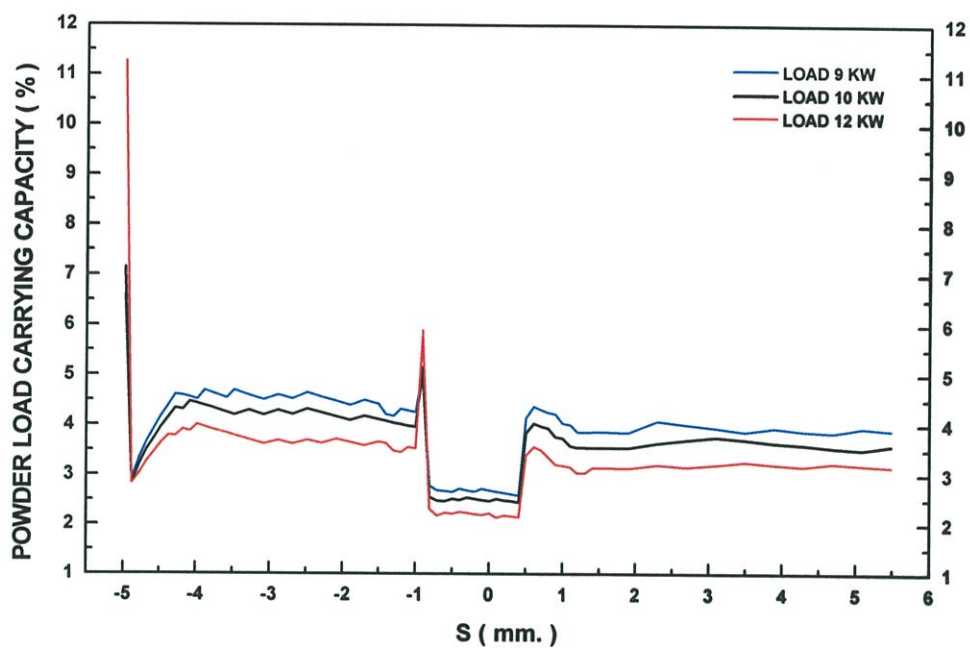
รูปที่ 7.77 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง กรณีผิวฟันเฟืองเป็นผิวหยาบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน



รูปที่ 7.78 แสดงการคำนวณของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อพื้นผิวรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว กรณีสภาพพื้นผิวเป็นผิวหยาบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน



รูปที่ 7.79 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทาน เมื่อพื้นผิวรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว กรณีสภาพพื้นผิวเป็นผิวหยาบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน



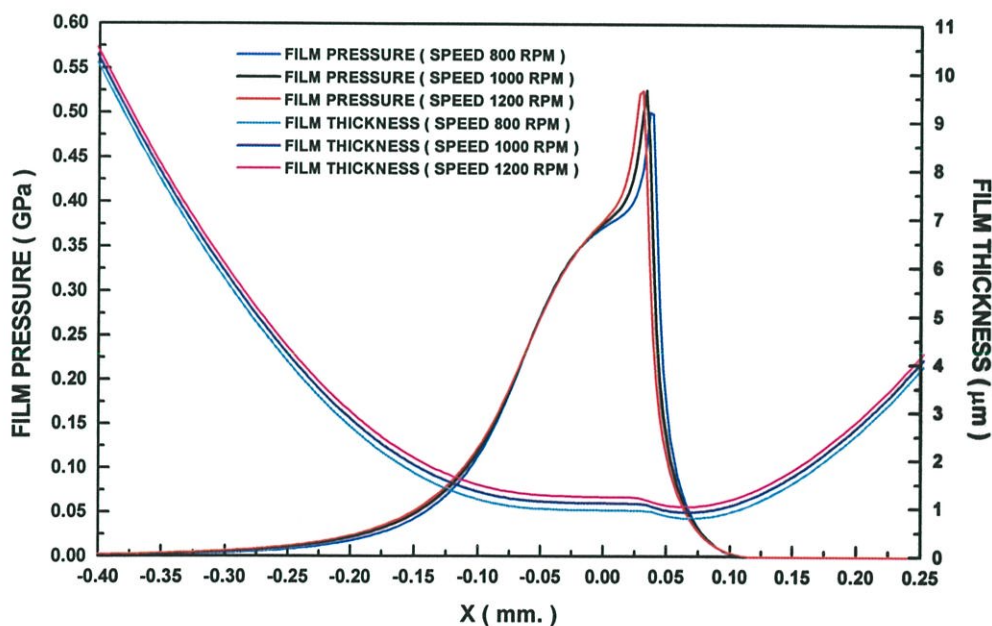
รูปที่ 7.80 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 เมื่อพื้นเฟืองรับภาระต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง กรณีผิวพื้นเฟืองเป็นผิวหยาบและผสม MoS_2 15% ลงไปในน้ำมัน

7.4 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการทำงานพื้นเฟือง

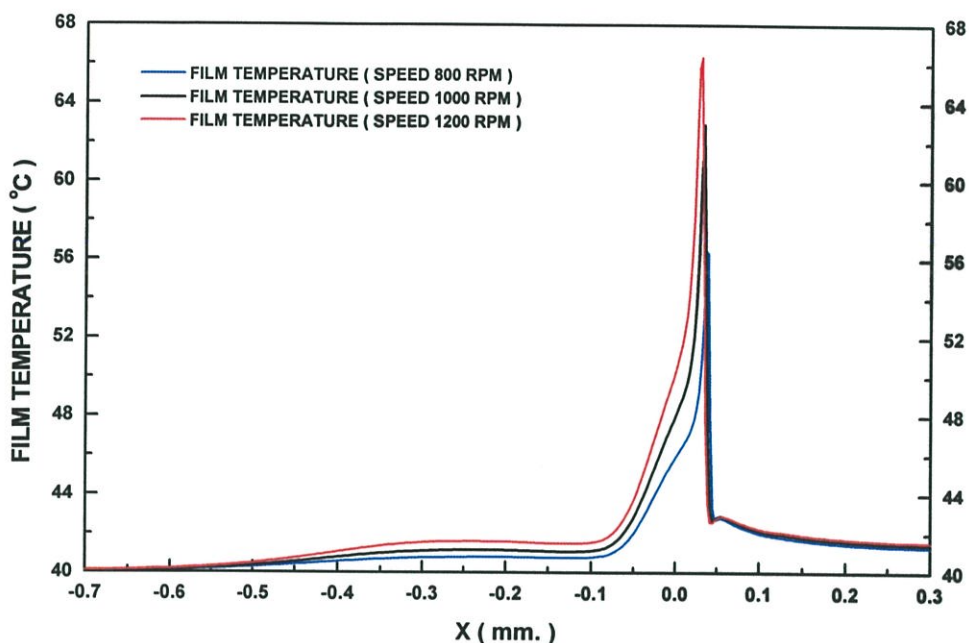
7.4.1 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการทำงานของพื้นเฟือง ในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90

การจำลองผลจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการทำงานพื้นเฟืองที่ 800 rpm , 1000 rpm และ 1200 rpm เมื่อไม่คิดผลจากความหนืดของพื้นเฟือง จะพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟือง แต่ Pressure Spike ที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะเกิดขึ้นก่อน แสดงดัง รูปที่ 7.81 ถึง รูปที่ 7.84

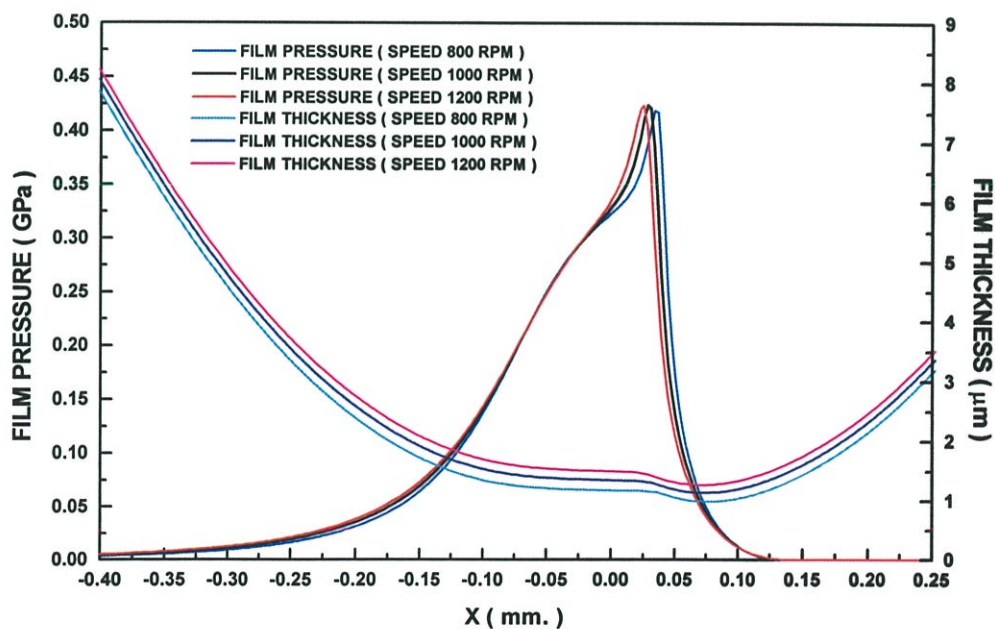
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียง กับตำแหน่ง Pitch Contact เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.85 ถึง รูปที่ 7.87



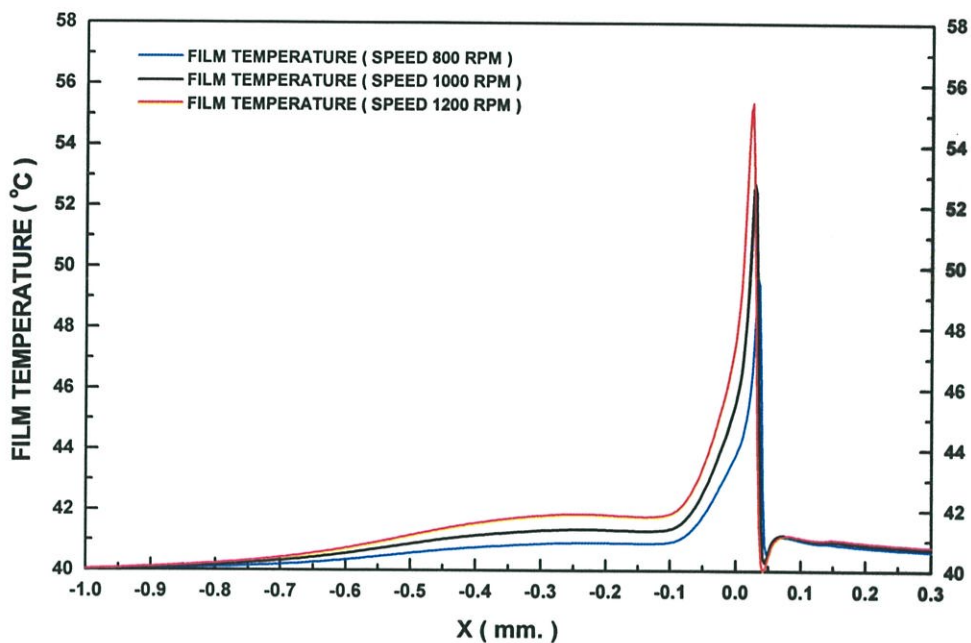
รูปที่ 7.81 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบในการทำงานพื้นเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเฟือง



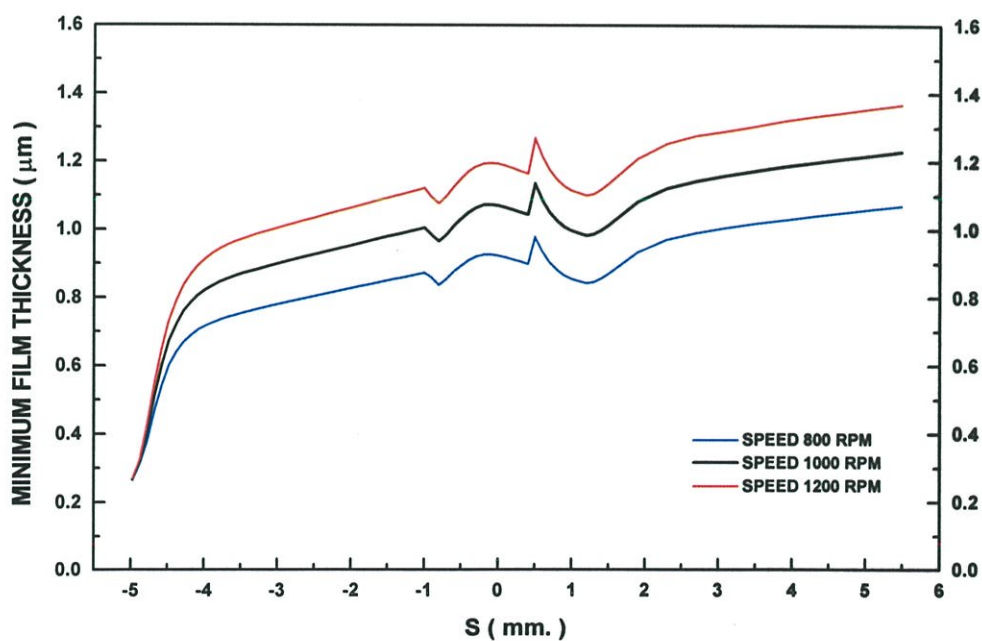
รูปที่ 7.82 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



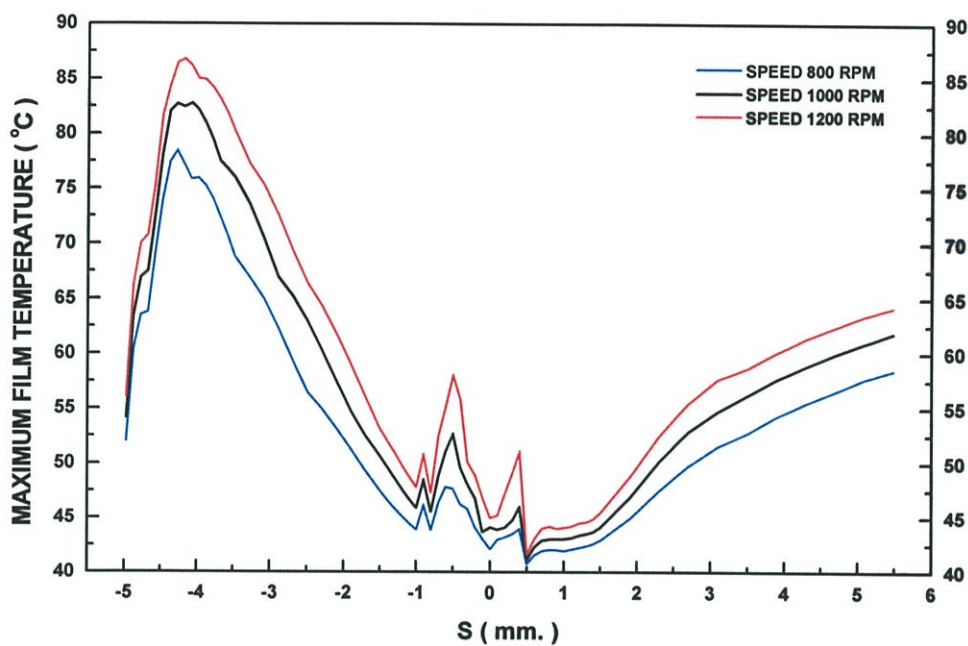
รูปที่ 7.83 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบ ในการทำงานฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



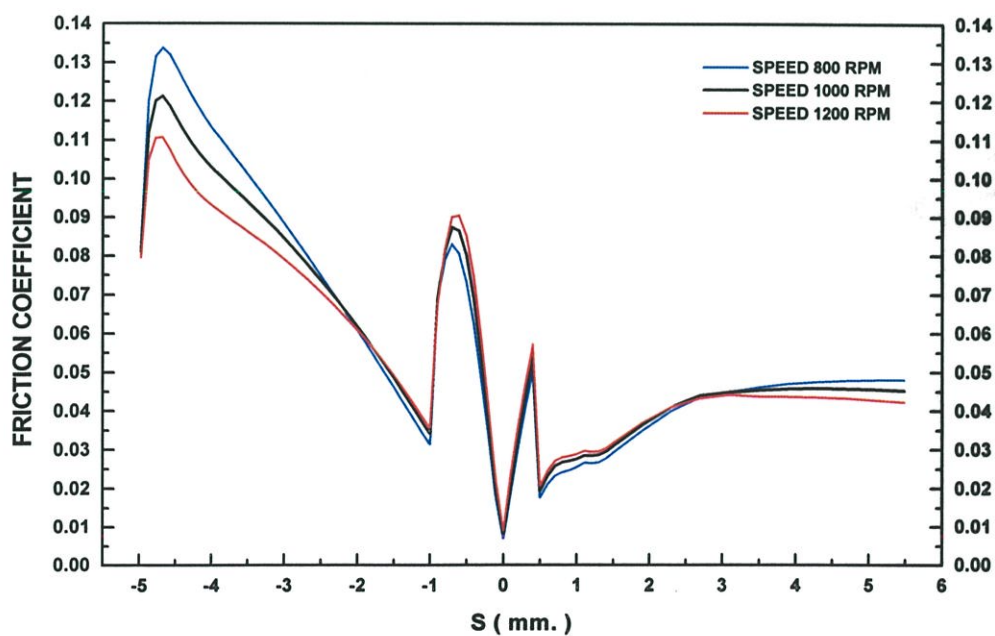
รูปที่ 7.84 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบในการทำงาน
พื้นผิวต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.85 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ที่ความเร็วรอบในการทำงานของ
พื้นผิวต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



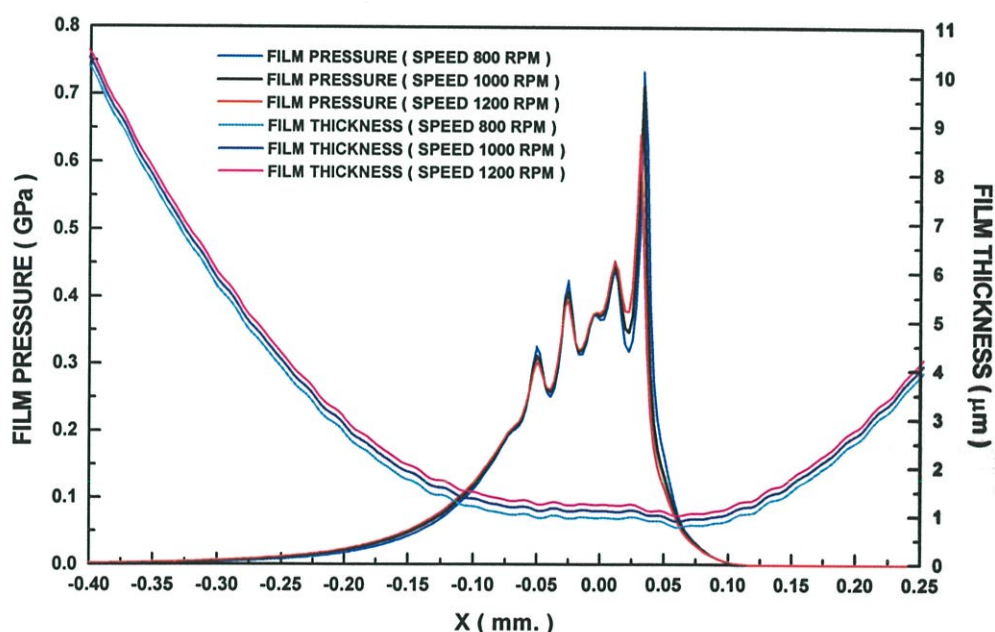
รูปที่ 7.86 แสดงการคำนวณของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



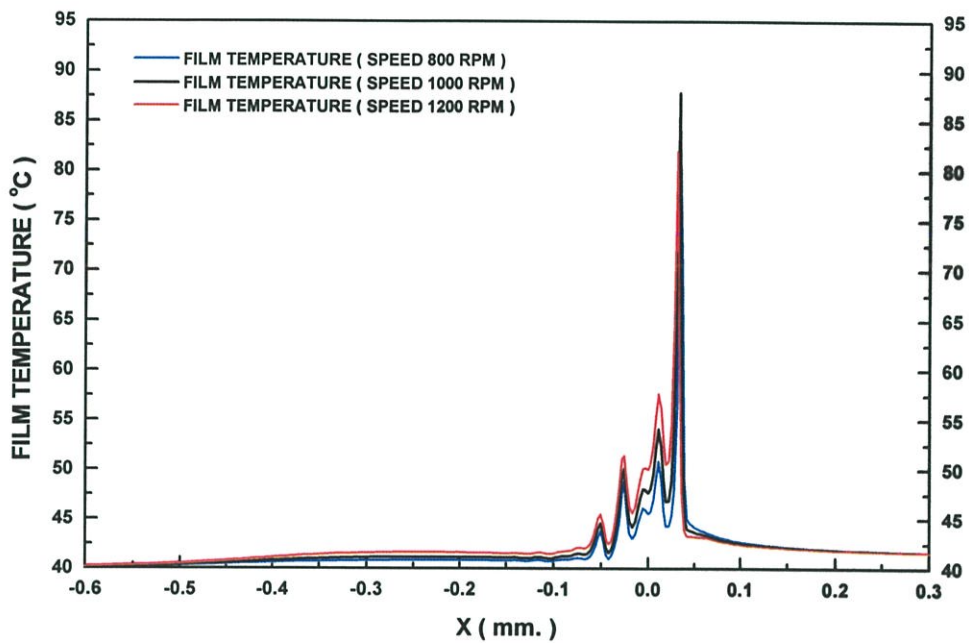
รูปที่ 7.87 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทานที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

เมื่อทำการจำลองผลจะทำการเปลี่ยนแปลง ความเร็วรอบในการทำงานพื้นเฟืองที่ 800 rpm , 1000 rpm และ 1200 rpm เมื่อพิจารณาผลจากความหนาผิวของพื้นเฟืองที่ความหนาผิว 0.02 ไมโครเมตร จะพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟือง แต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาผิวของพื้นเฟือง โดยที่ค่าความดันฟิล์มสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.88 ถึง รูปที่ 7.91

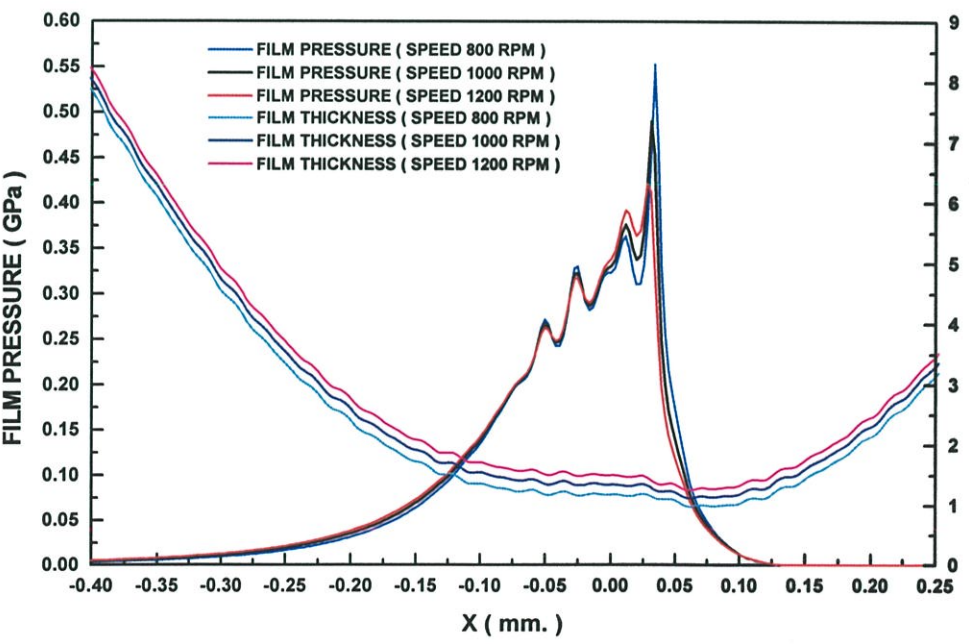
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองพื้นตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ๆ กับตำแหน่ง Pitch Contact เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.92 ถึง รูปที่ 7.94



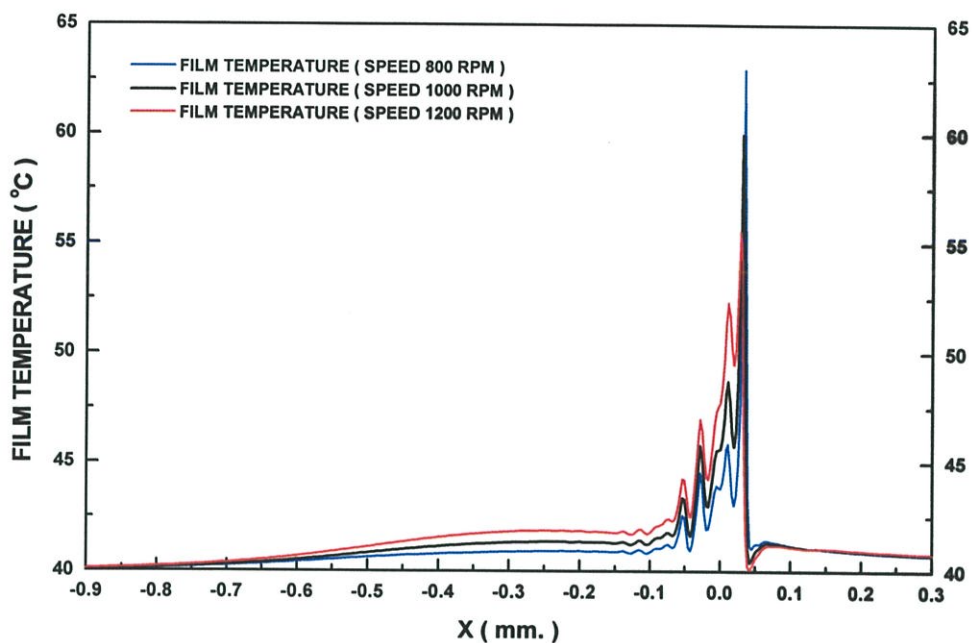
รูปที่ 7.88 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของพื้นเฟือง



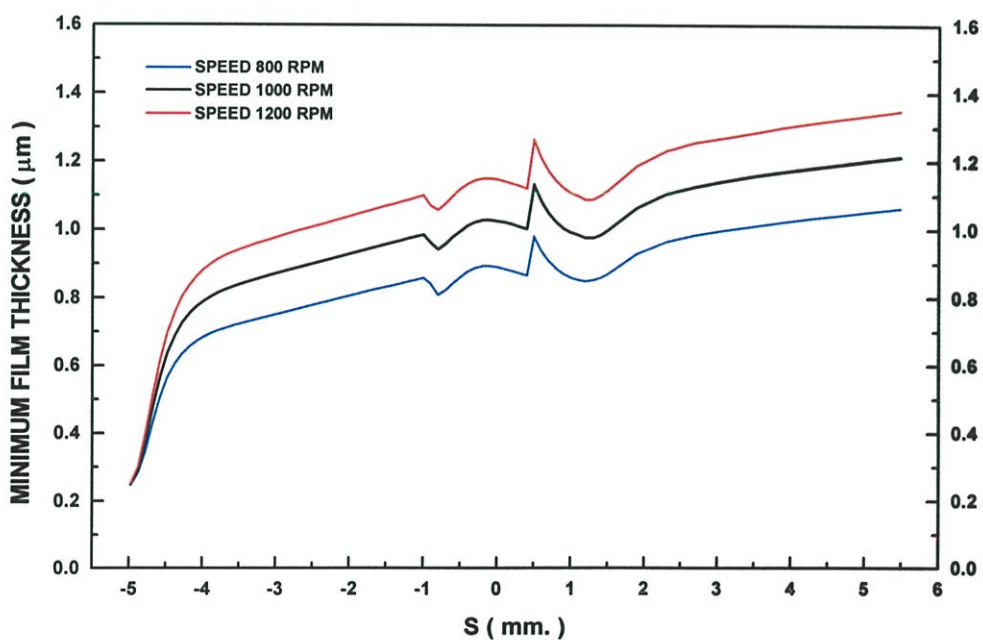
รูปที่ 7.89 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



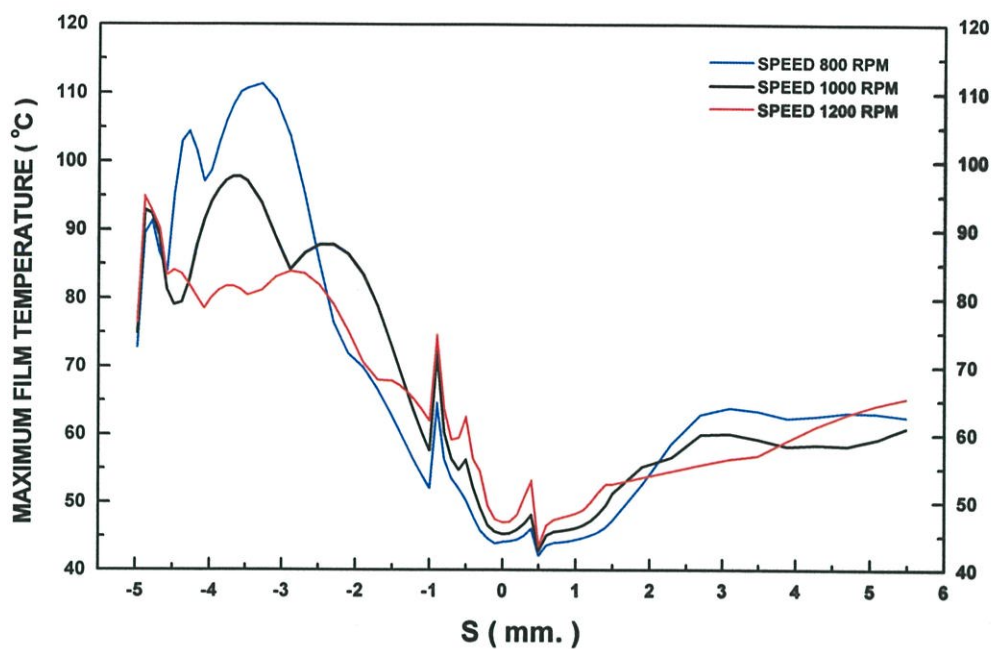
รูปที่ 7.90 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบ ในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



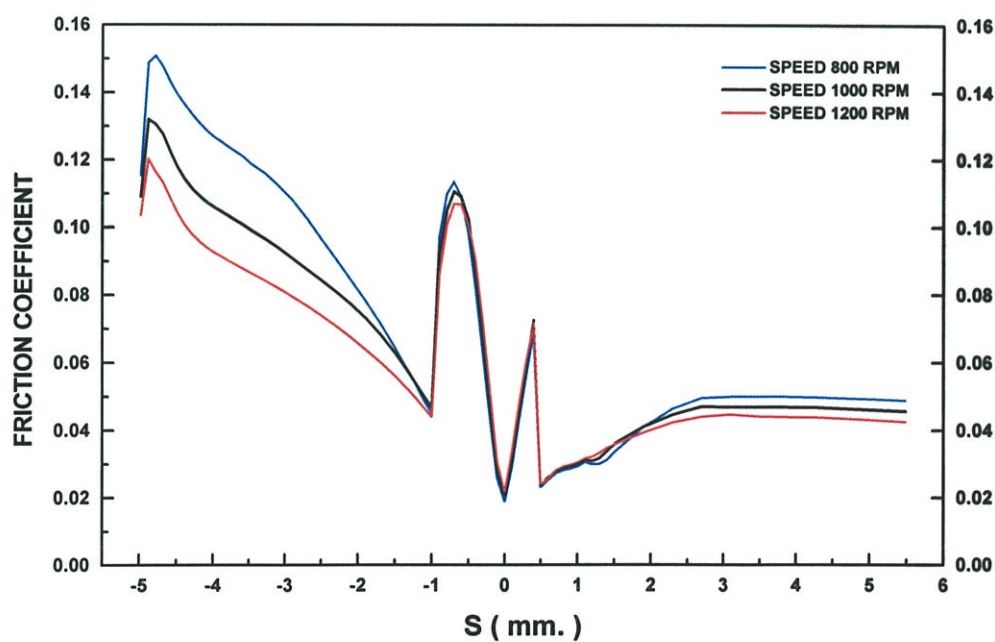
รูปที่ 7.91 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.92 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



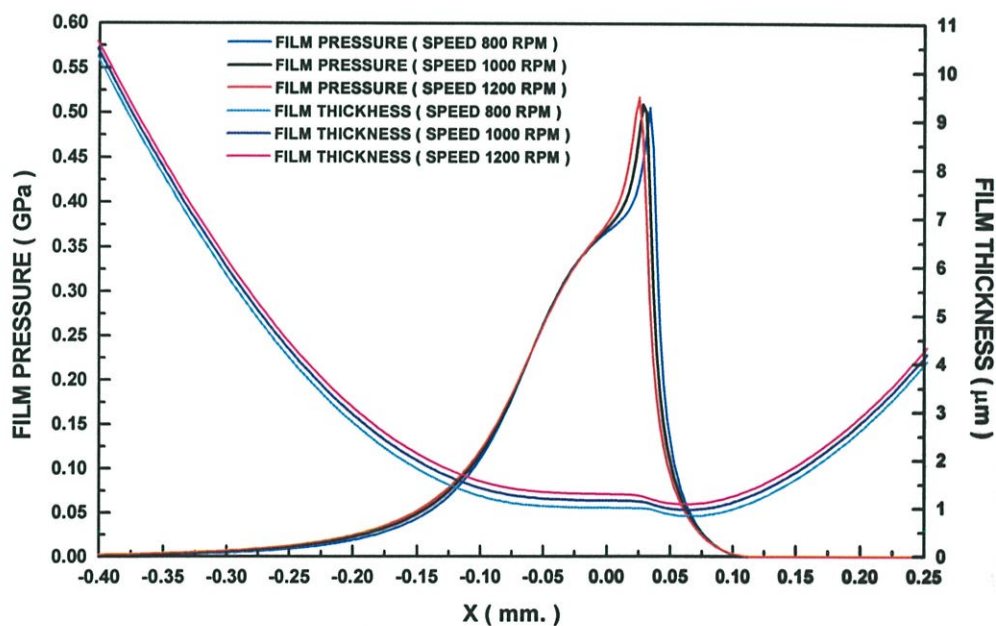
รูปที่ 7.93 แสดงการคำนวณของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



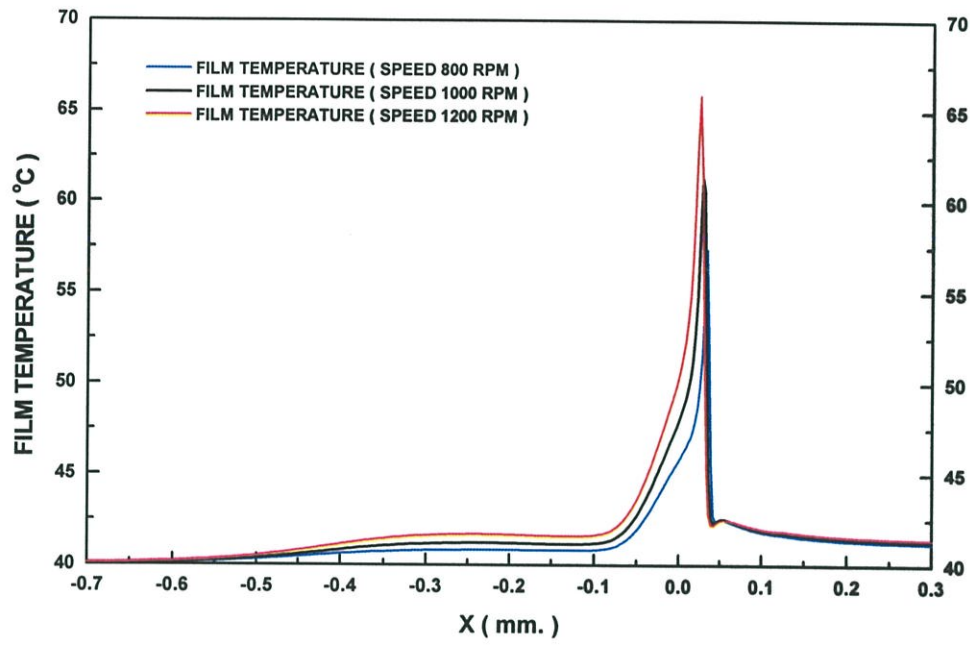
รูปที่ 7.94 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทานที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

7.4.2 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการทำงานของ ฟันเฟืองได้รับ ในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก

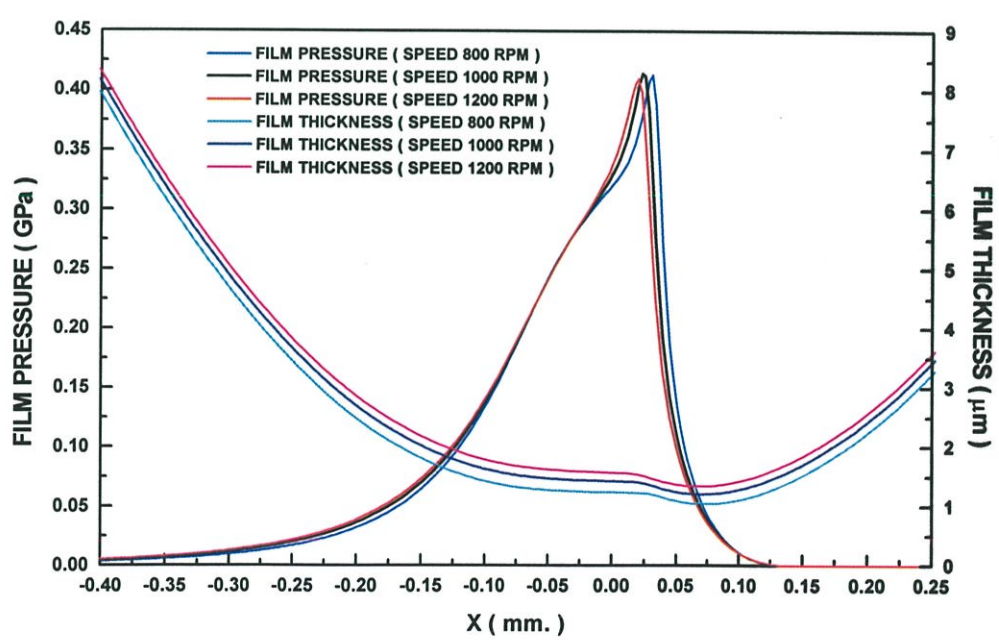
การจำลองผลจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการทำงานฟันเฟืองที่ 800 rpm , 1000 rpm และ 1200 rpm เมื่อไม่คิดผลจากความหนืดของฟันเฟือง จะพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองเพิ่มขึ้นในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟือง แต่ Pressure Spike ที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จะเกิดขึ้นก่อน โดยที่ค่าความหนาของฟิล์มน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่ามากกว่าใน กรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 แสดงดัง รูปที่ 7.95 ถึง รูปที่ 7.98



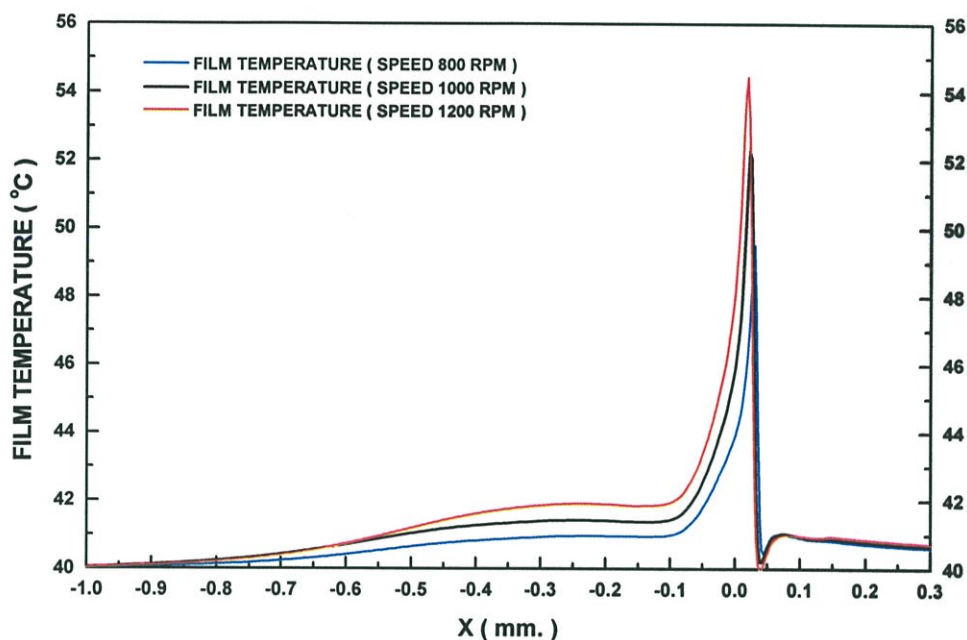
รูปที่ 7.95 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.96 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง

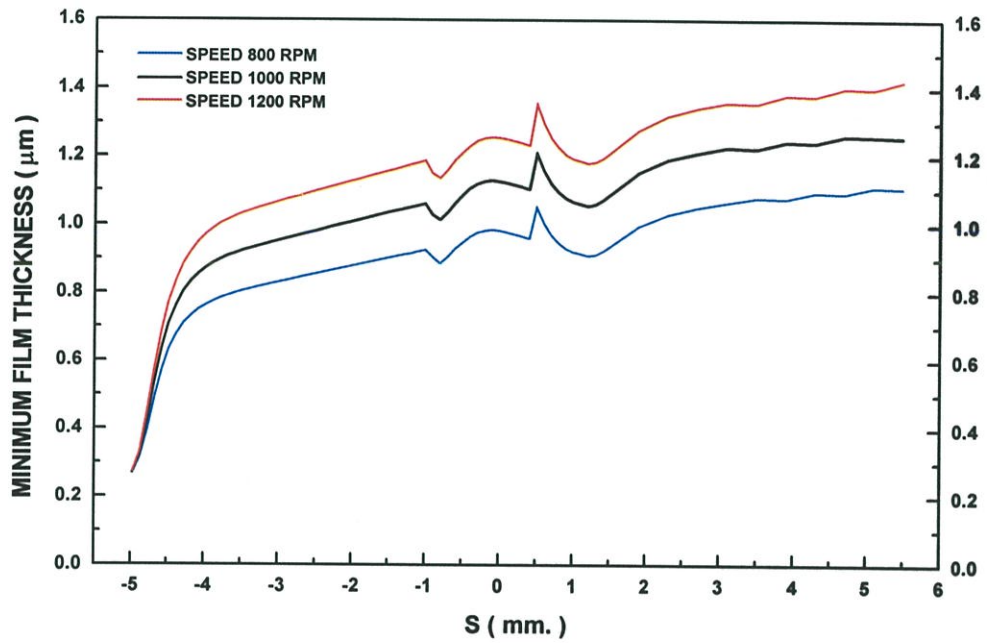


รูปที่ 7.97 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง

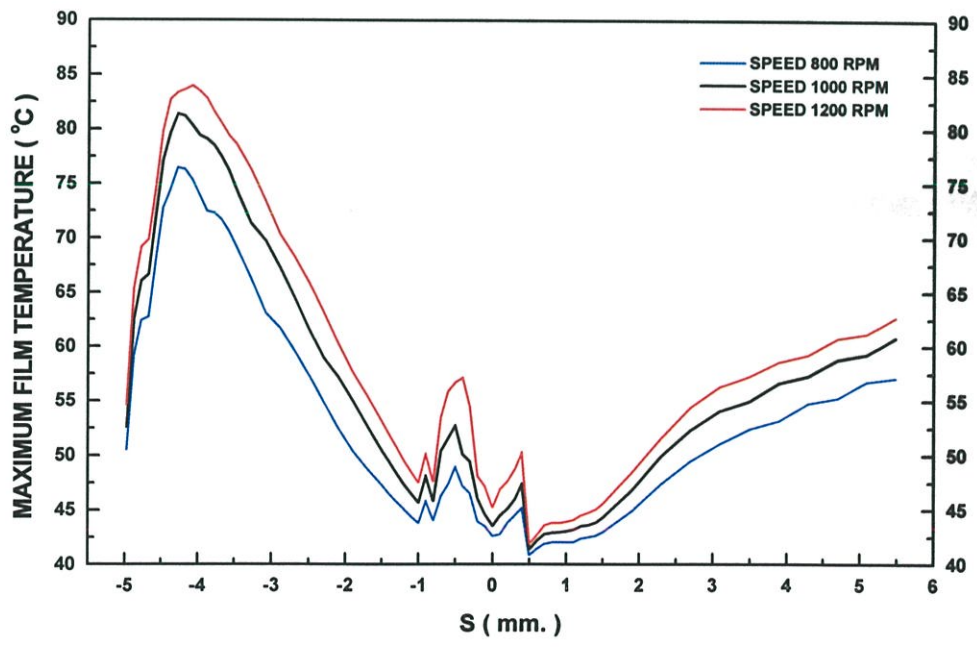


รูปที่ 7.98 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง

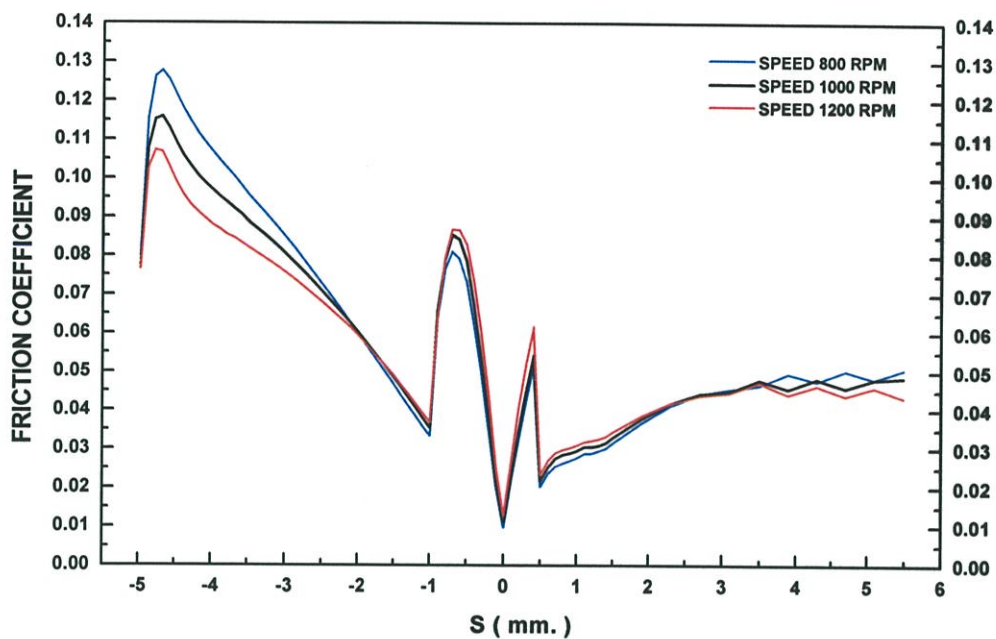
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรงในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาพิจารณาจะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงๆ กับตำแหน่ง Pitch Contact เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาฟิล์ม จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 เมื่อพิจารณาผลการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะพบว่า การรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.99 ถึง รูปที่ 7.102



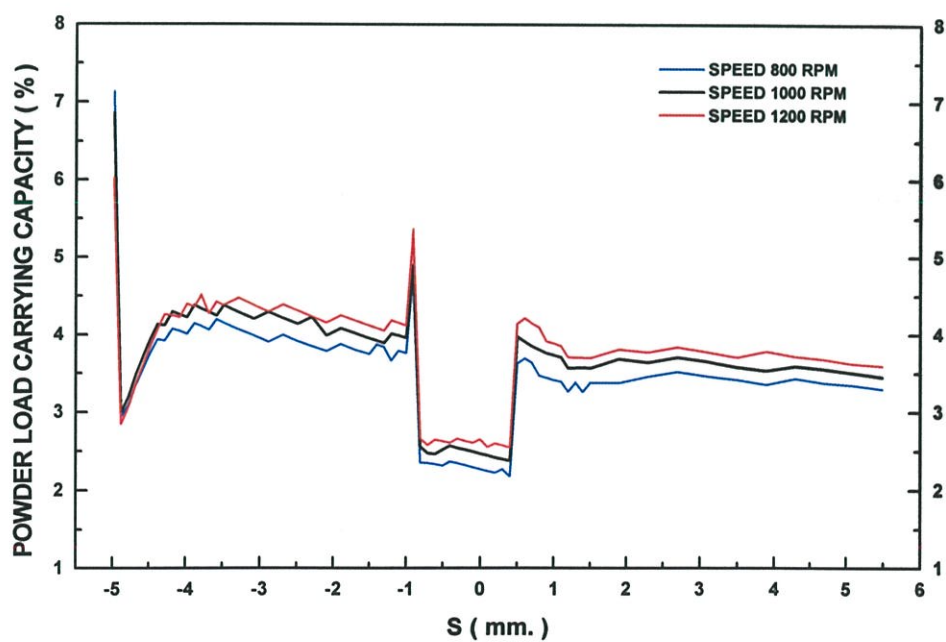
รูปที่ 7.99 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ความเร็วรอบในการทำงานของ
พินเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพินเฟือง



รูปที่ 7.100 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วรอบในการทำงานของ
พินเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพินเฟือง

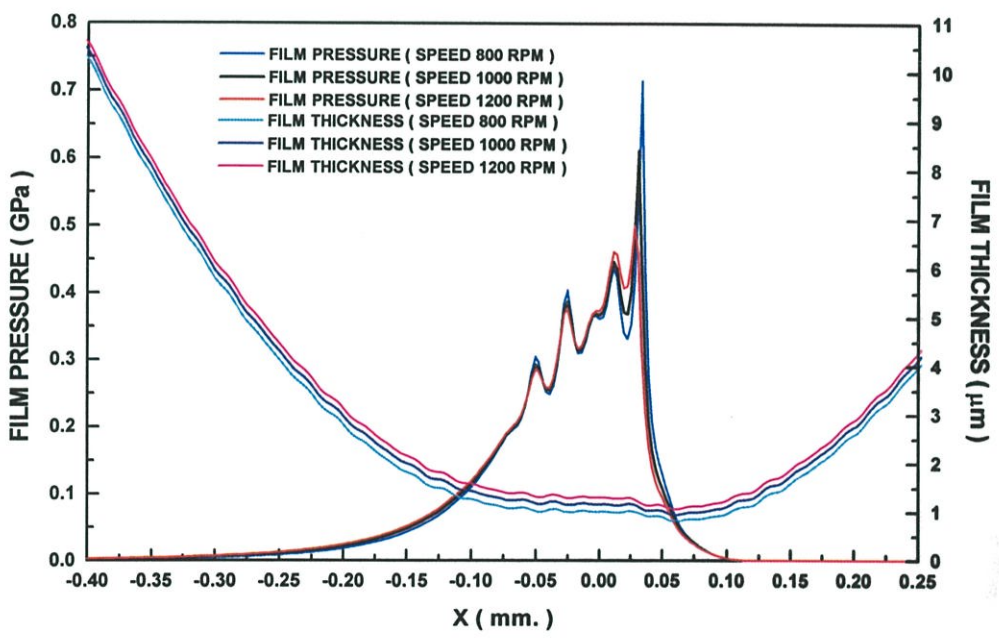


รูปที่ 7.101 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อพื้นเฟืองทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง กรณีผิวเรียบและผสม MoS₂ 15% ลงไปในน้ำมัน

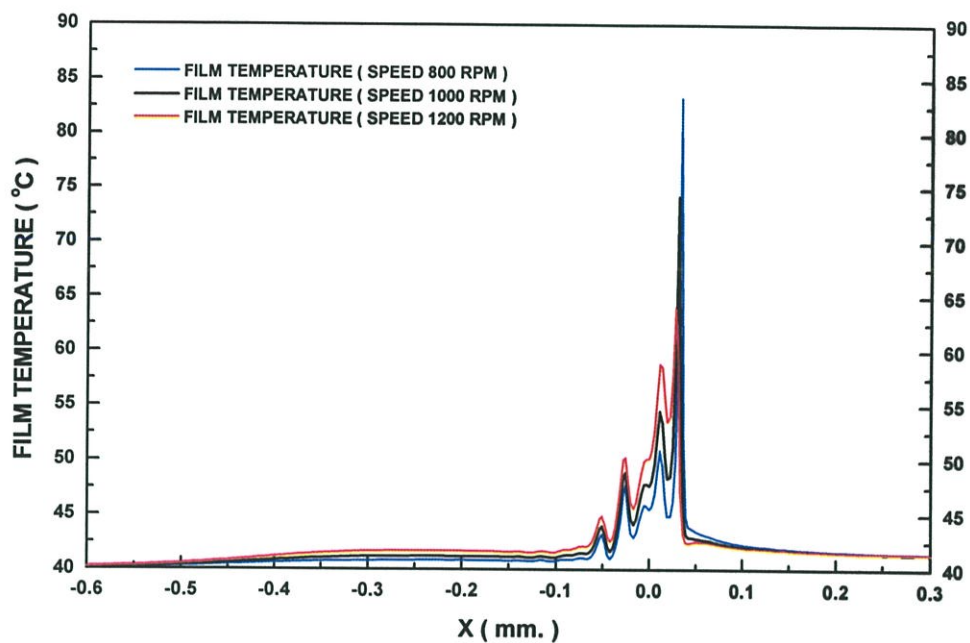


รูปที่ 7.102 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS₂ ที่ความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง

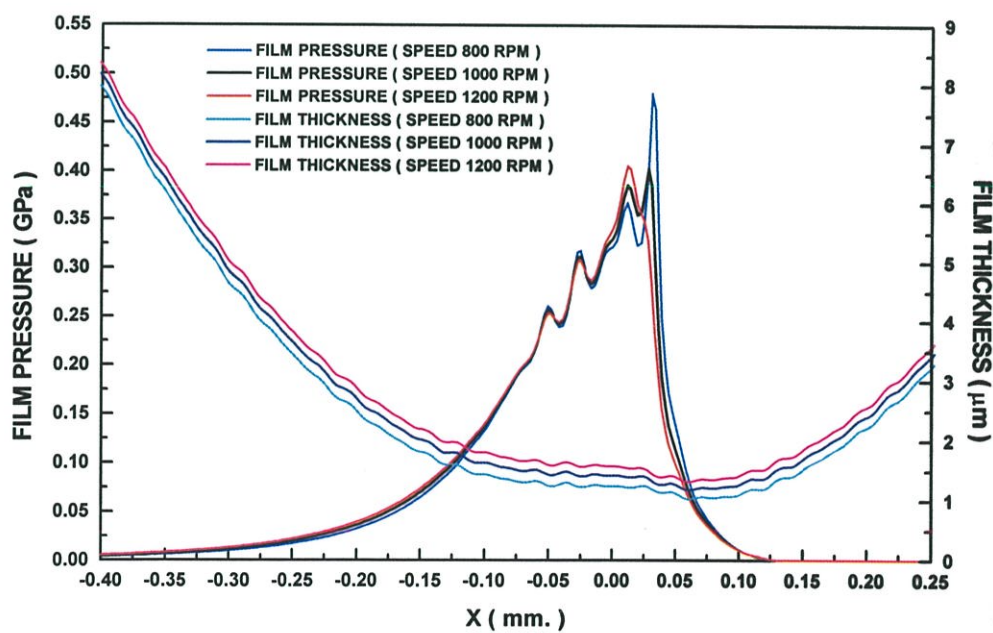
เมื่อทำการจำลองผลจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองที่ 800 rpm , 1000 rpm และ 1200 rpm โดยพิจารณาผลจากความหนาผิวของฟันเฟืองที่ความหนาผิว 0.02 ไมโครเมตร จะพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองเพิ่มขึ้นในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS₂ ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟือง โดยที่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาผิวของฟันเฟือง แต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น SAE-90 แต่ Pressure Spike ที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จะเกิดขึ้นก่อน และการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟือง เพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.103 ถึง รูปที่ 7.106



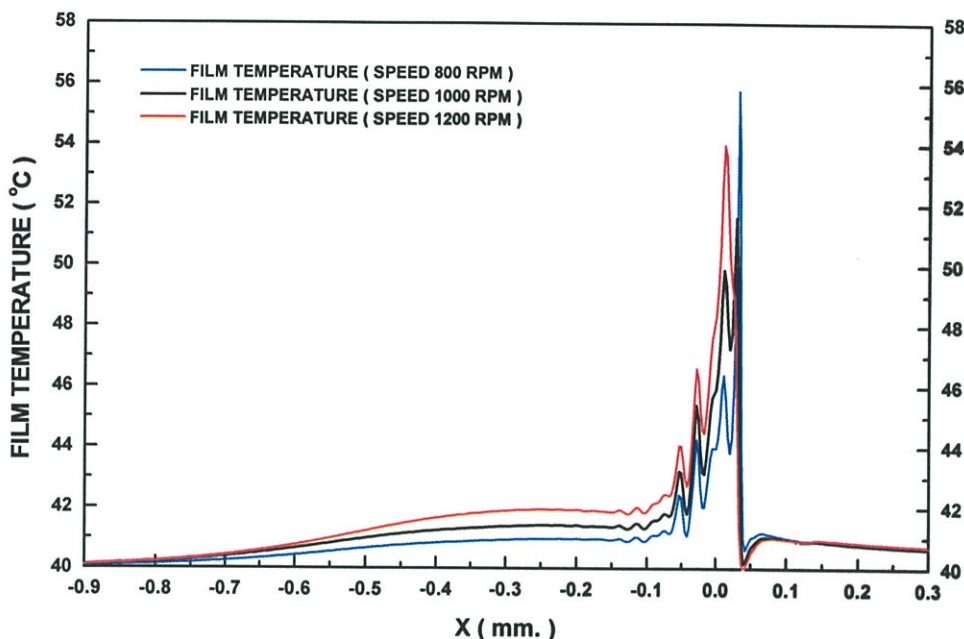
รูปที่ 7.103 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.104 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง

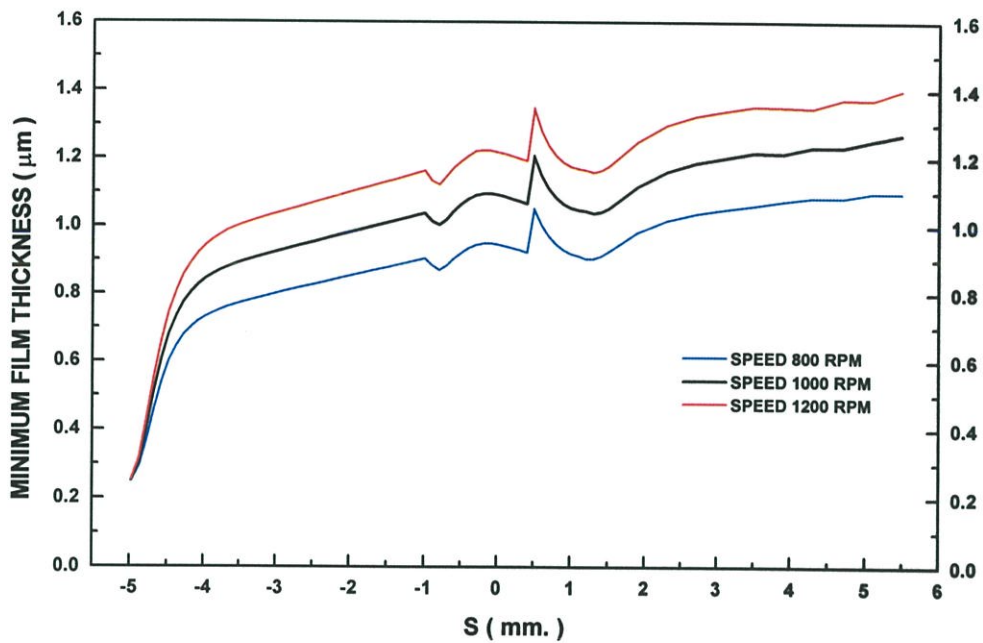


รูปที่ 7.105 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง

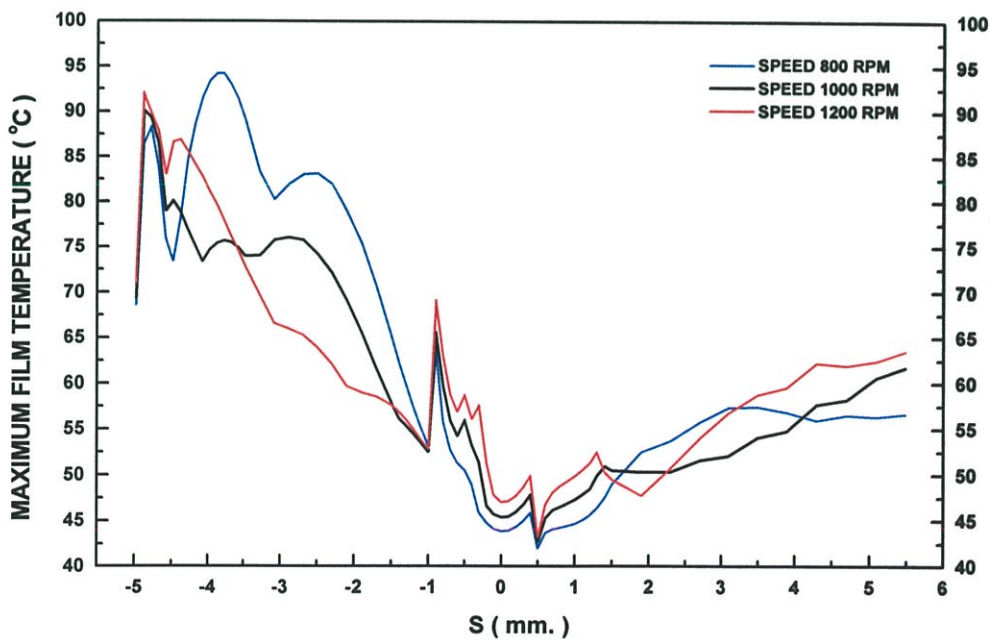


รูปที่ 7.106 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิฟิล์มที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง

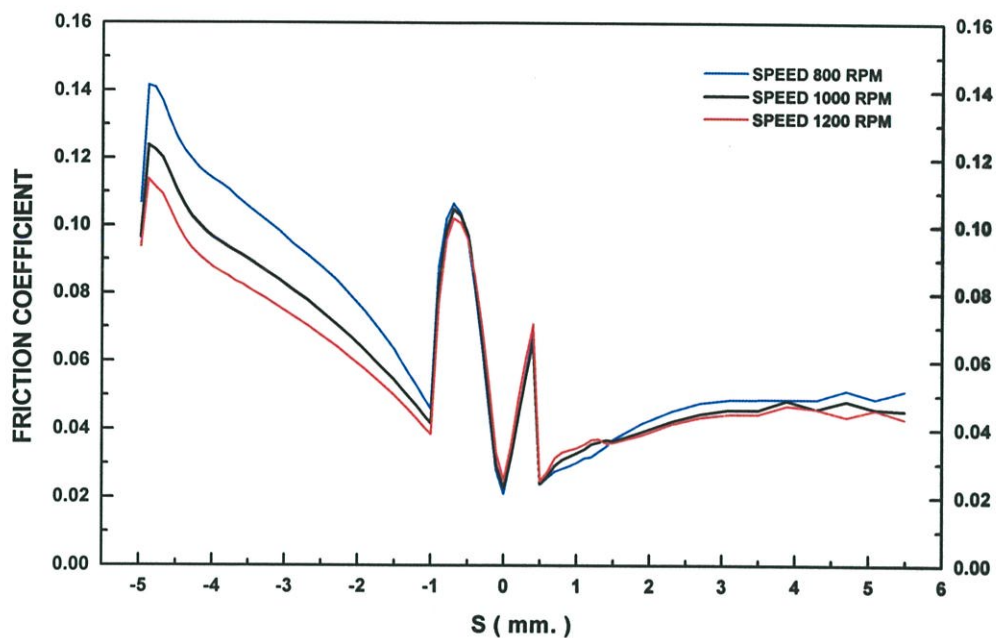
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรงในกรณีที่สารหล่อลื่นเป็น SAE-90 ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาพิจารณา โดยพิจารณาจากความหนาของฟิล์มที่ความหนาผิว 0.02 ไมโครเมตร จะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียง กับตำแหน่ง Pitch Contact เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาฟิล์ม จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 เมื่อพิจารณาผลการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะพบว่า การรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟืองเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.107 ถึง รูปที่ 7.110



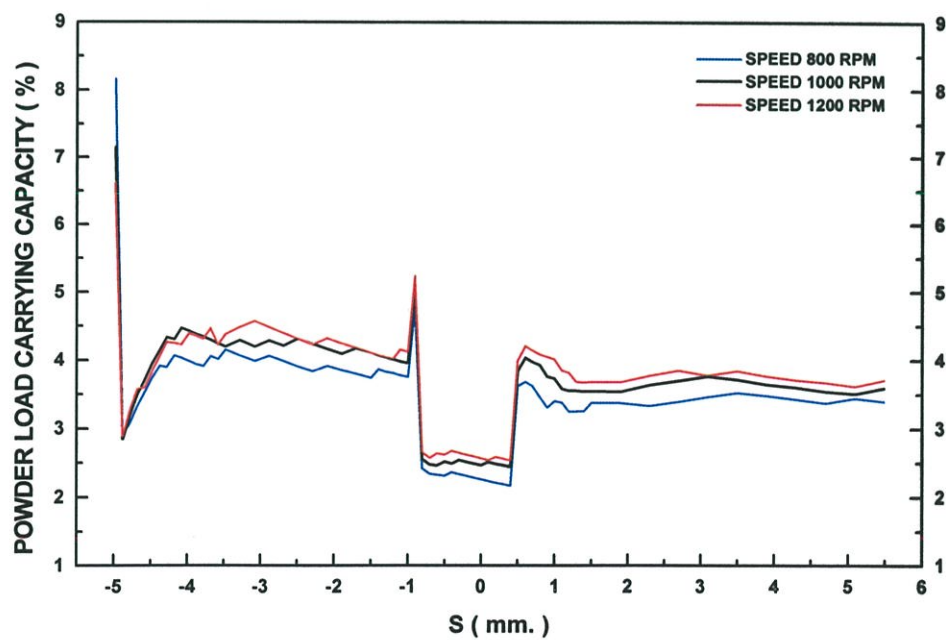
รูปที่ 7.107 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.108 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความเร็วรอบในการทำงานของ ฟันเฟืองต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.109 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟือง
ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



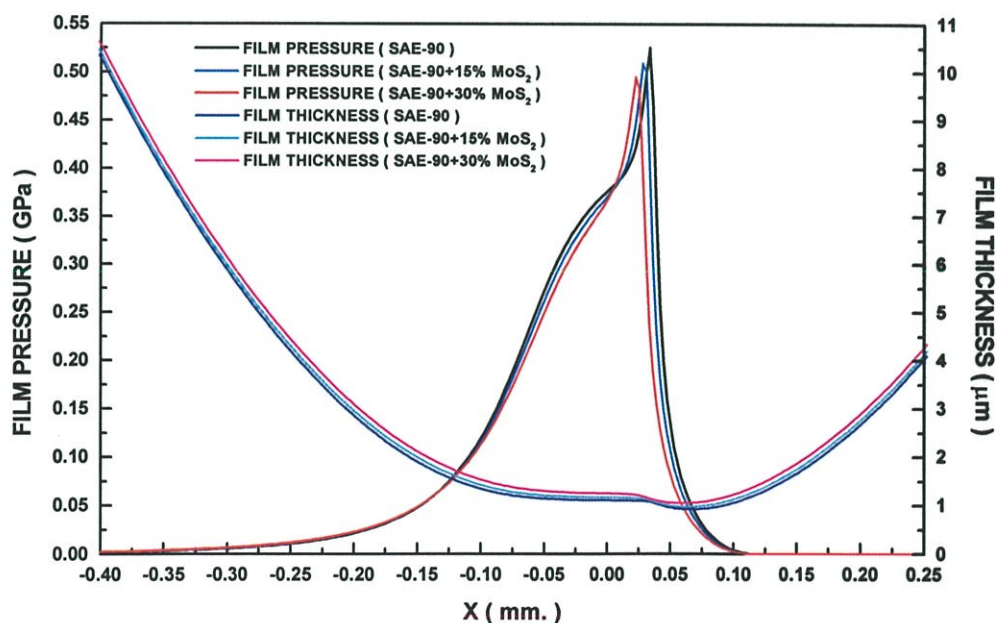
รูปที่ 7.110 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ความเร็วรอบในการทำงานของฟันเฟือง
ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

7.5 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MoS_2

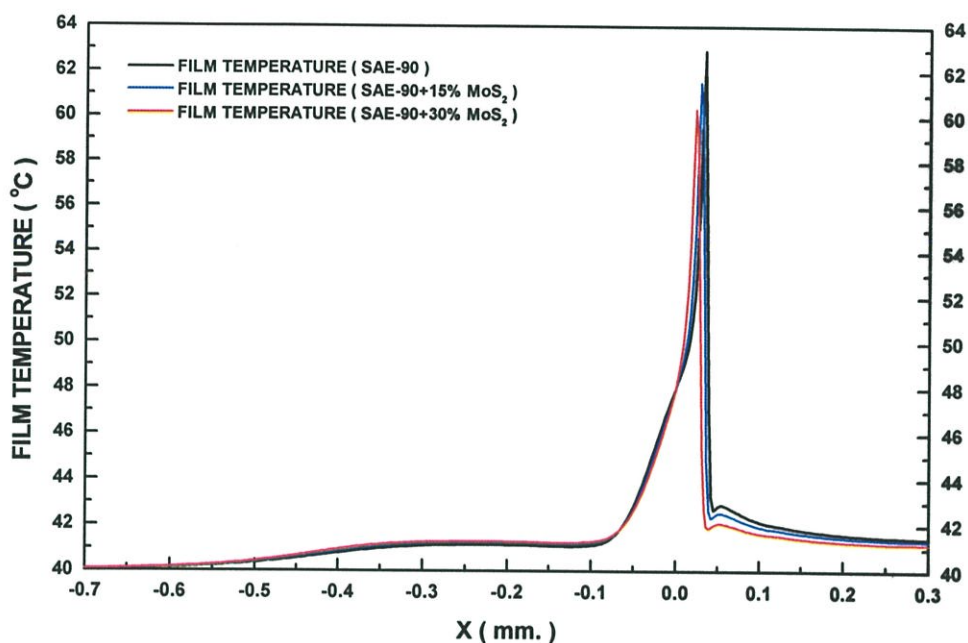
7.5.1 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MoS_2 ในกรณีที่ ไม่คิดผลจากความหนาผิวของพื้นผิว

การจำลองผลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อไม่คิดผลจากความหนาผิวของพื้นผิว จะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เพิ่มขึ้น ความดันฟิล์มของน้ำมันจะลดลงตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.111 ถึง รูปที่ 7.114

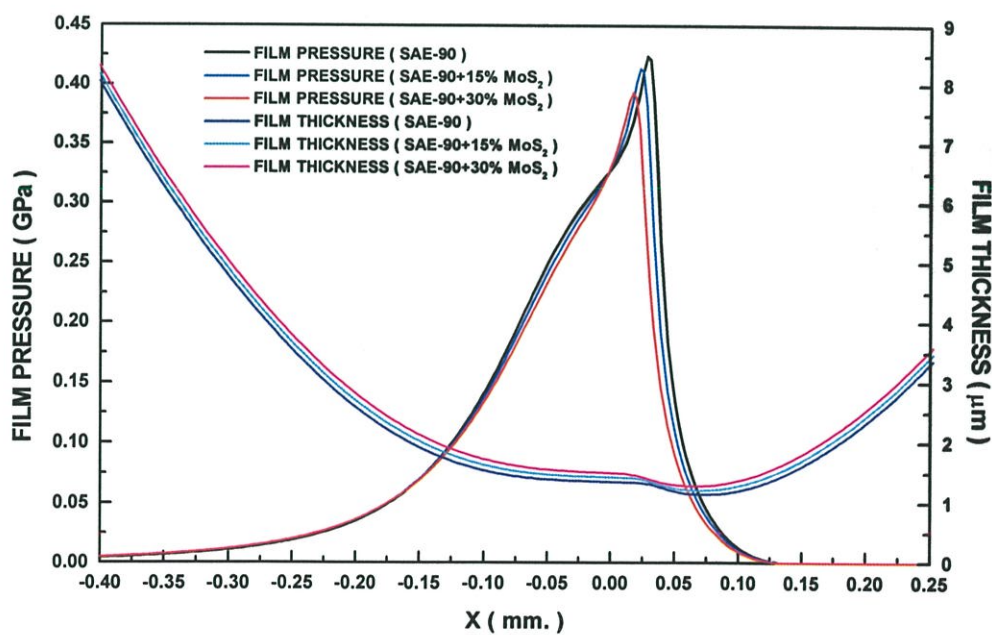
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เพิ่มขึ้น แต่ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียง กับ Pitch Contact จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น และค่าการรับภาระ ของสารหล่อลื่นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.115 ถึง รูปที่ 7.118



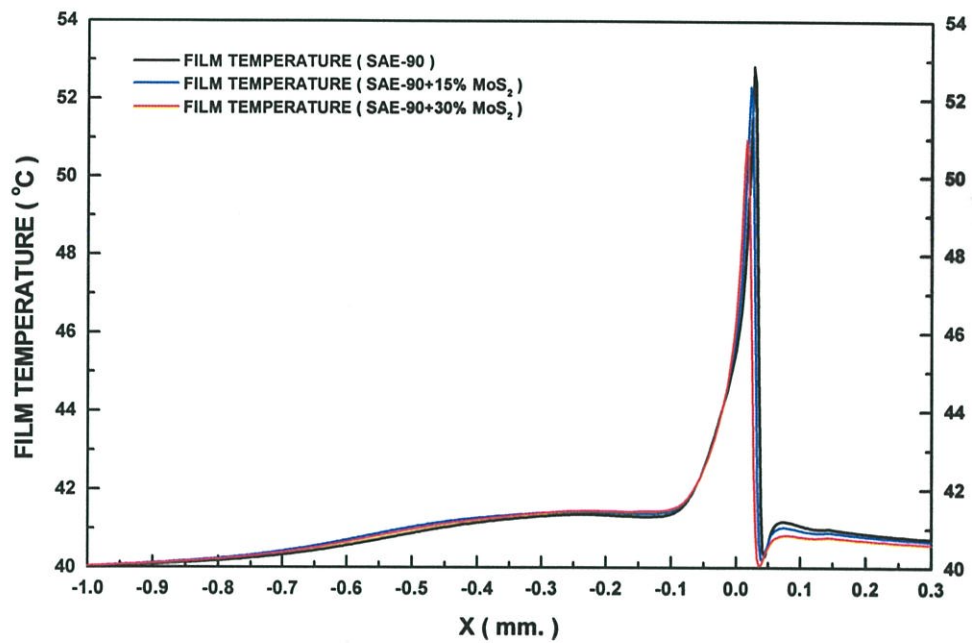
รูปที่ 7.111 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



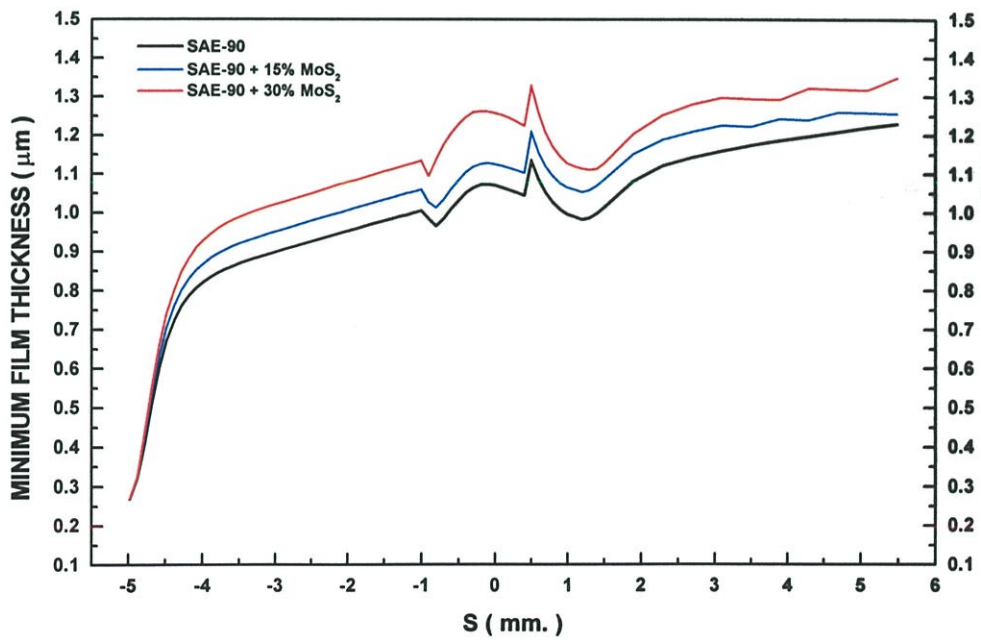
รูปที่ 7.112 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



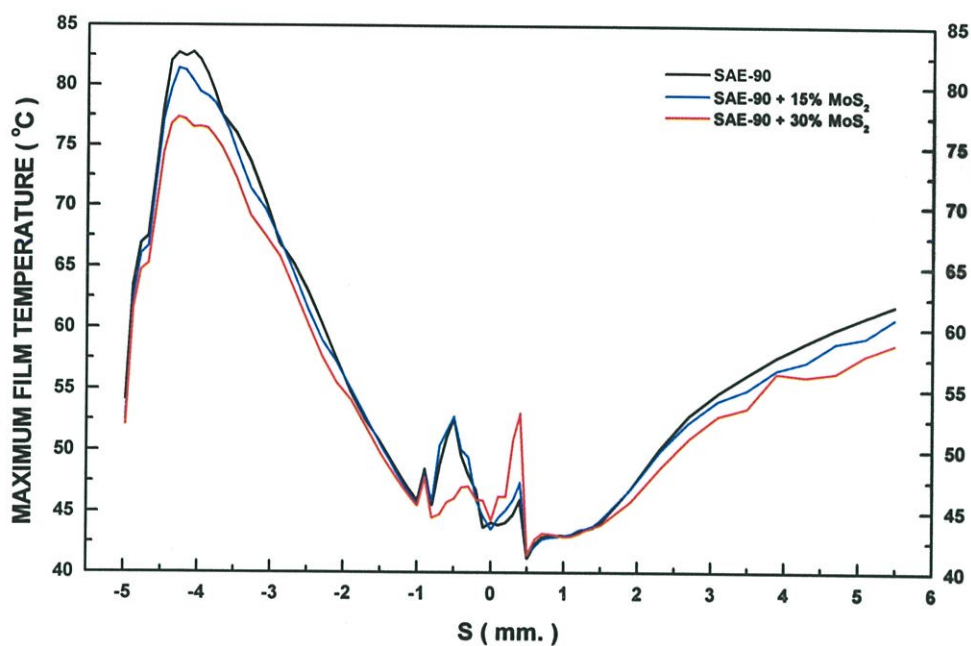
รูปที่ 7.113 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



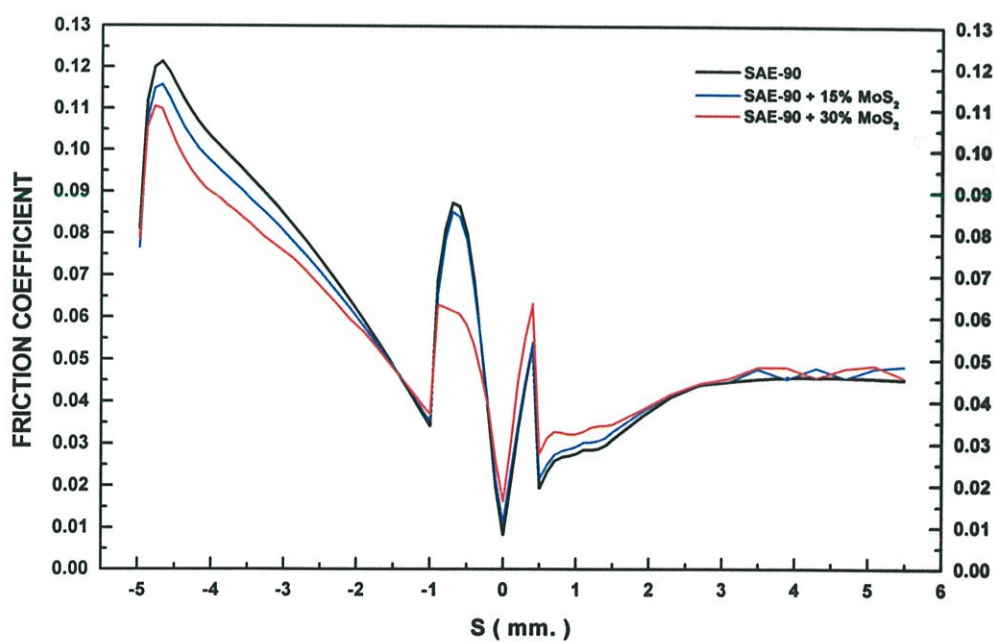
รูปที่ 7.114 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



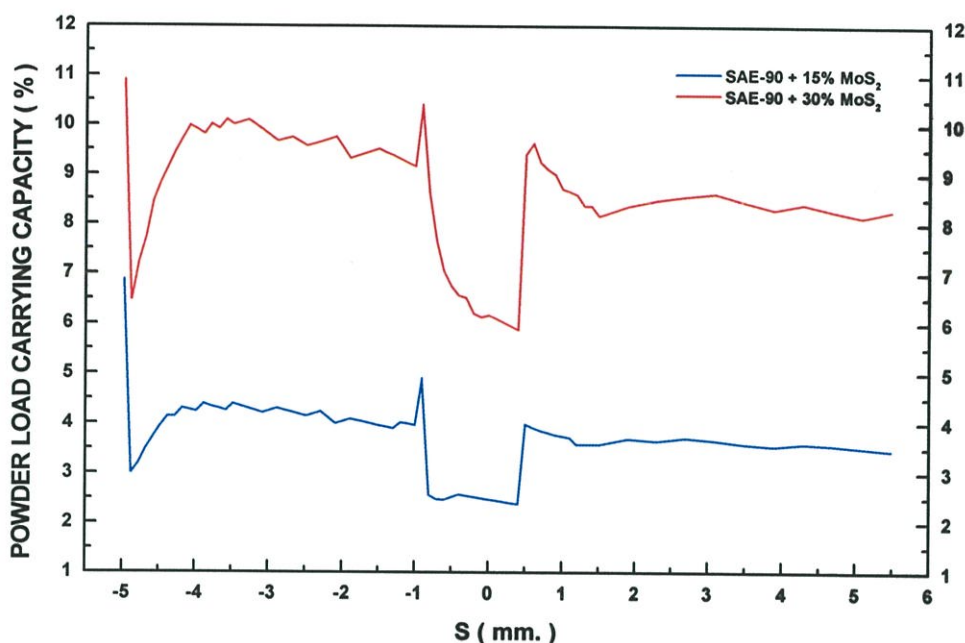
รูปที่ 7.115 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.116 แสดงการคำนวณของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.117 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพการเสียดทานที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

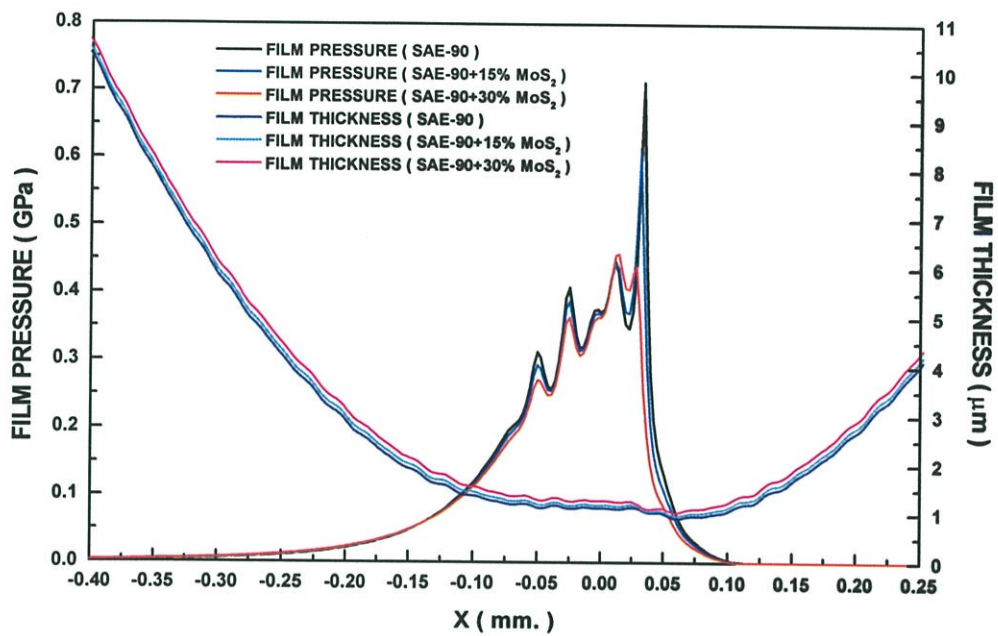


รูปที่ 7.118 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS₂ ที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

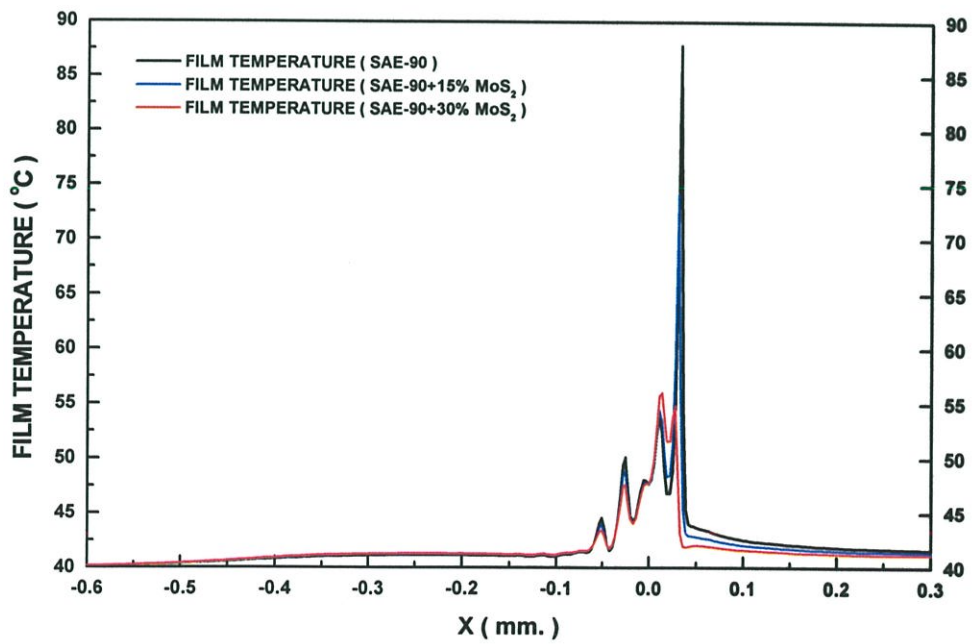
7.5.2 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MoS₂ ในกรณีที่พิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง

การจำลองผลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟืองที่ความหยาบผิว 0.02 ไมโครเมตร จะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เพิ่มขึ้น ความดันฟิล์มของน้ำมันจะลดลงตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.119 ถึง รูปที่ 7.122

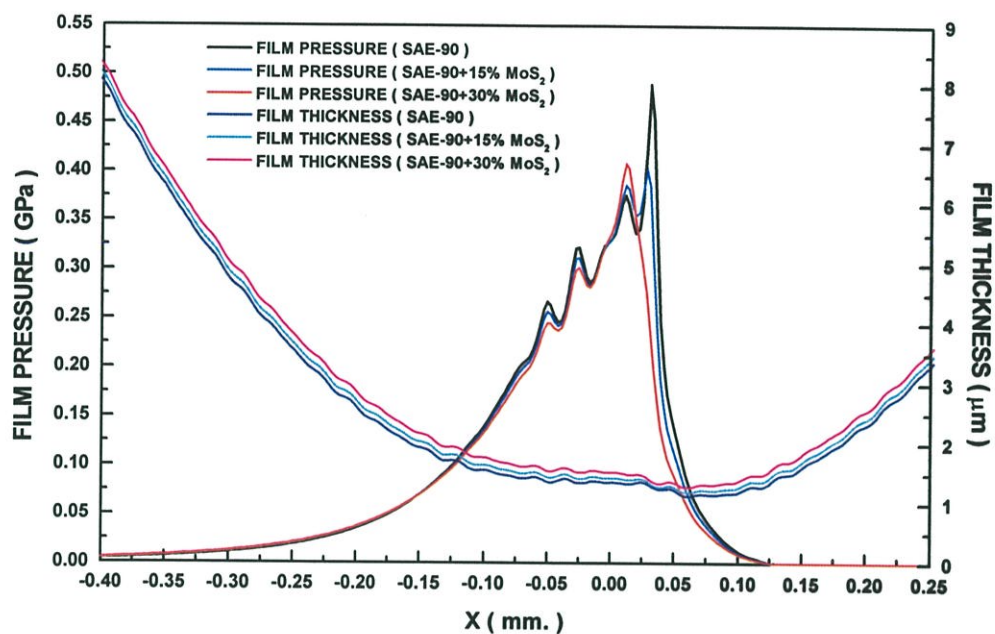
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงๆ กับ Pitch Contact จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น และค่าการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.123 ถึง รูปที่ 7.126



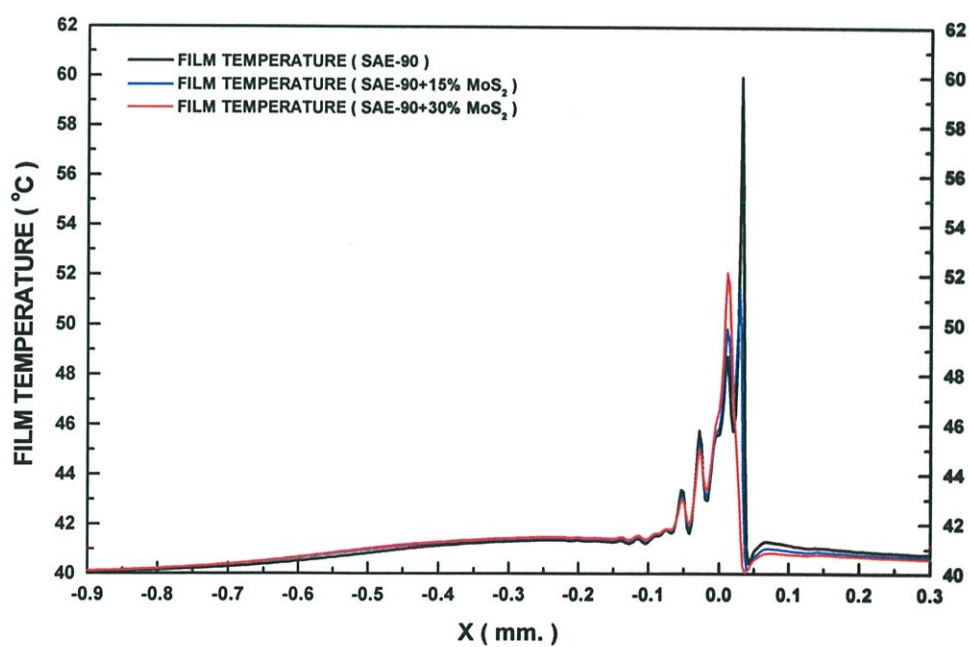
รูปที่ 7.119 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



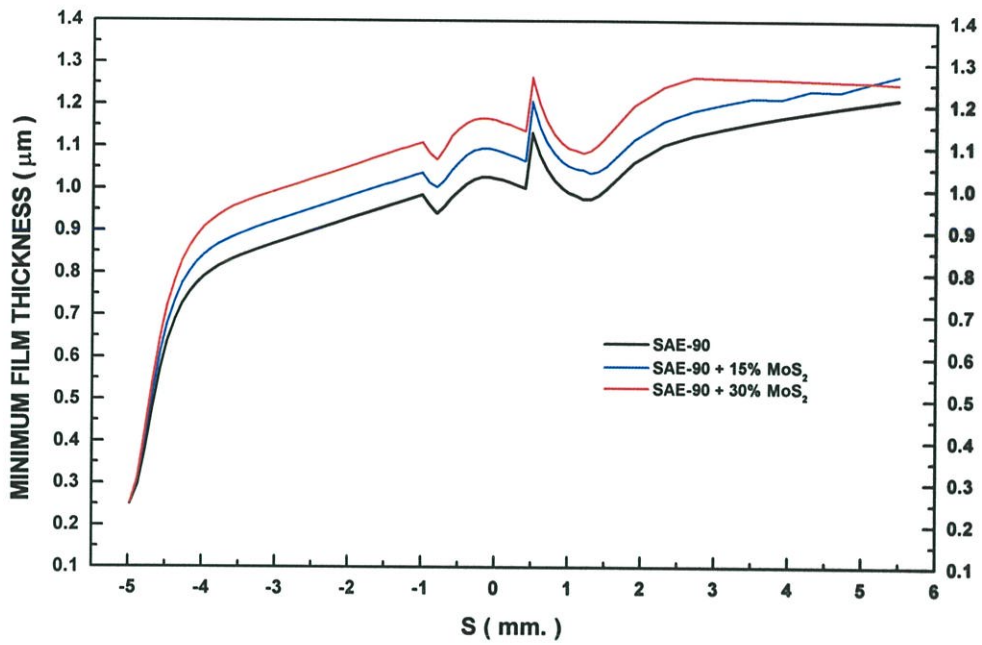
รูปที่ 7.120 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



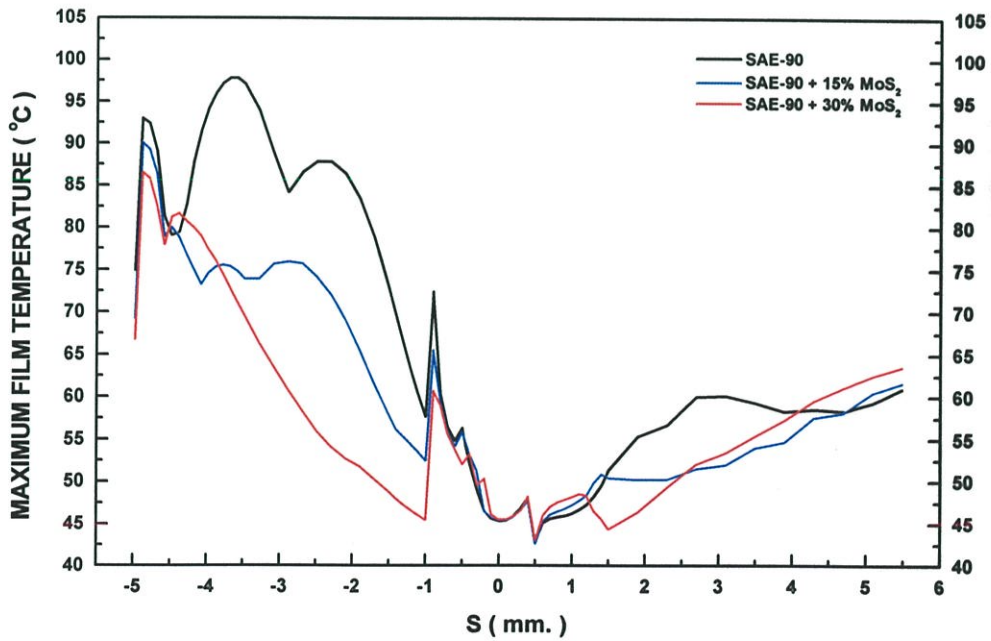
รูปที่ 7.121 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขับของฟันเฟือง



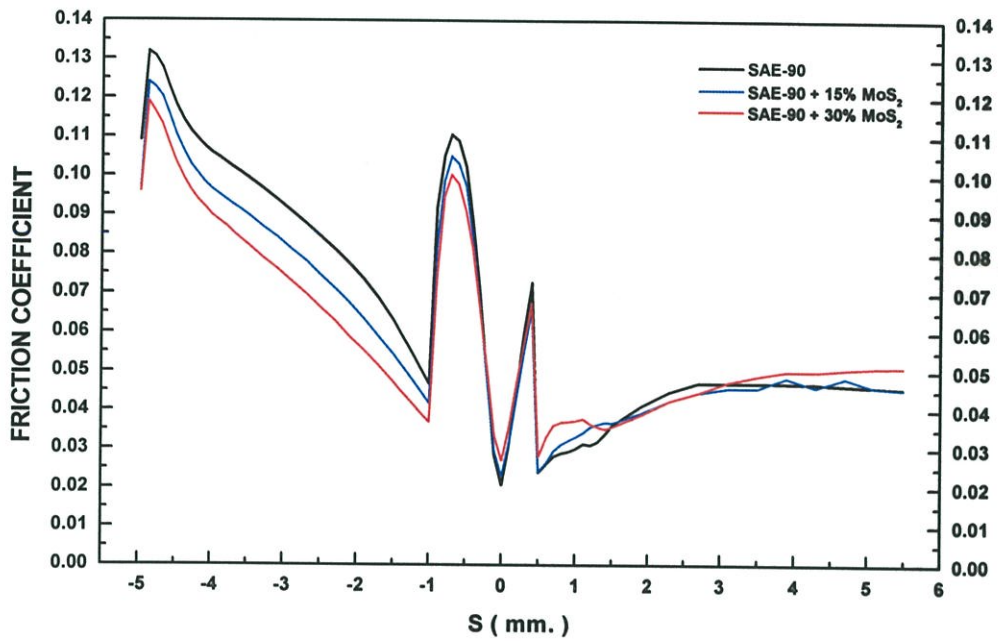
รูปที่ 7.122 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขับของฟันเฟือง



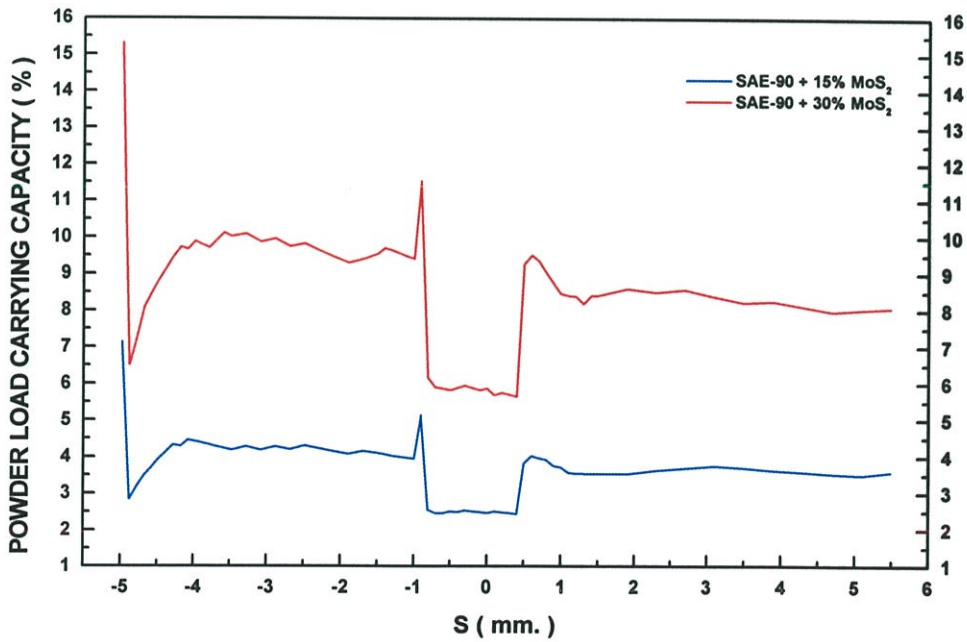
รูปที่ 7.123 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.124 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

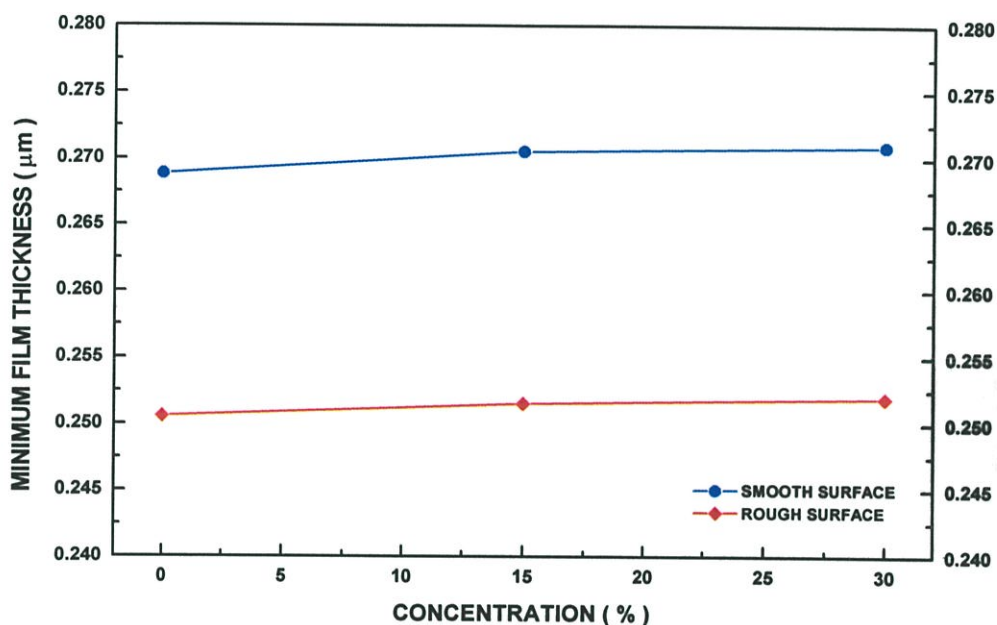


รูปที่ 7.125 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

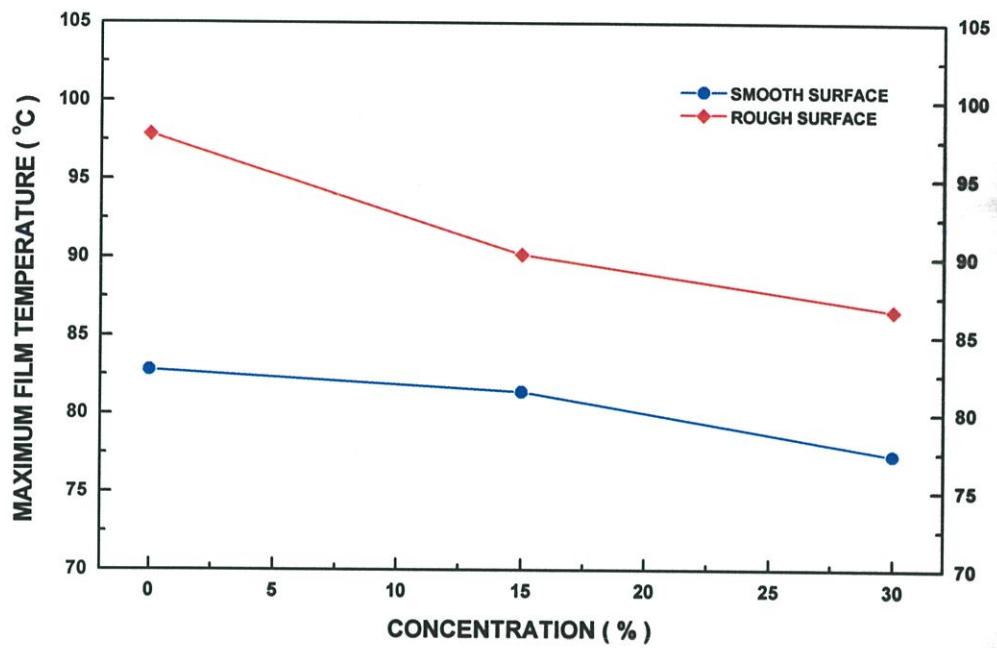


รูปที่ 7.126 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS₂ ที่ความความเข้มข้นของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

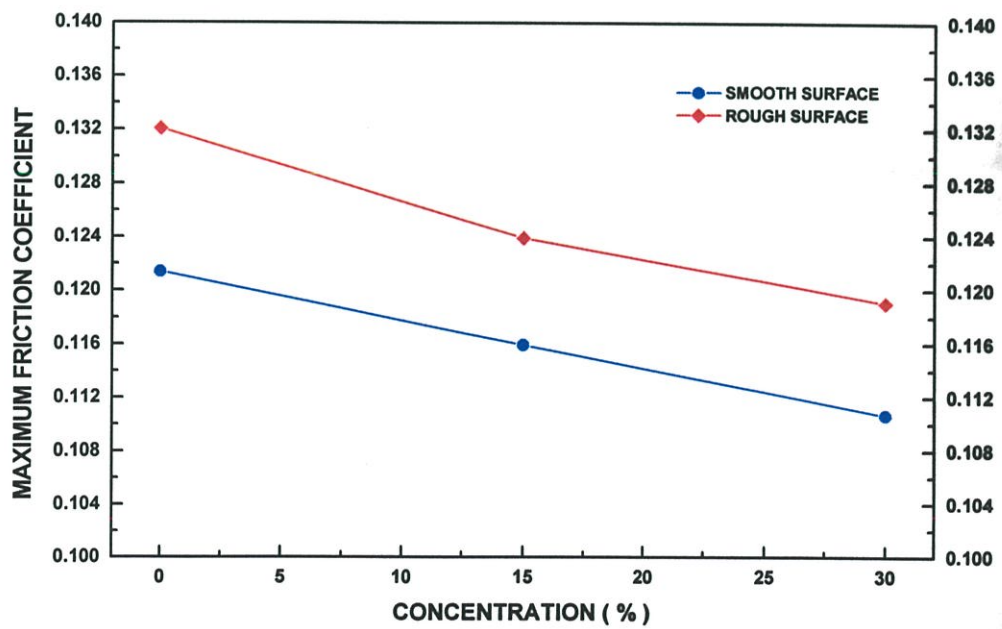
เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นต่างๆของสารหล่อลื่นของแข็ง จะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันมากที่สุด และ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด มีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.127 ถึง รูปที่ 7.129



รูปที่ 7.127 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด ในการทำงานของฟันเฟืองที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ



รูปที่ 7.128 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ



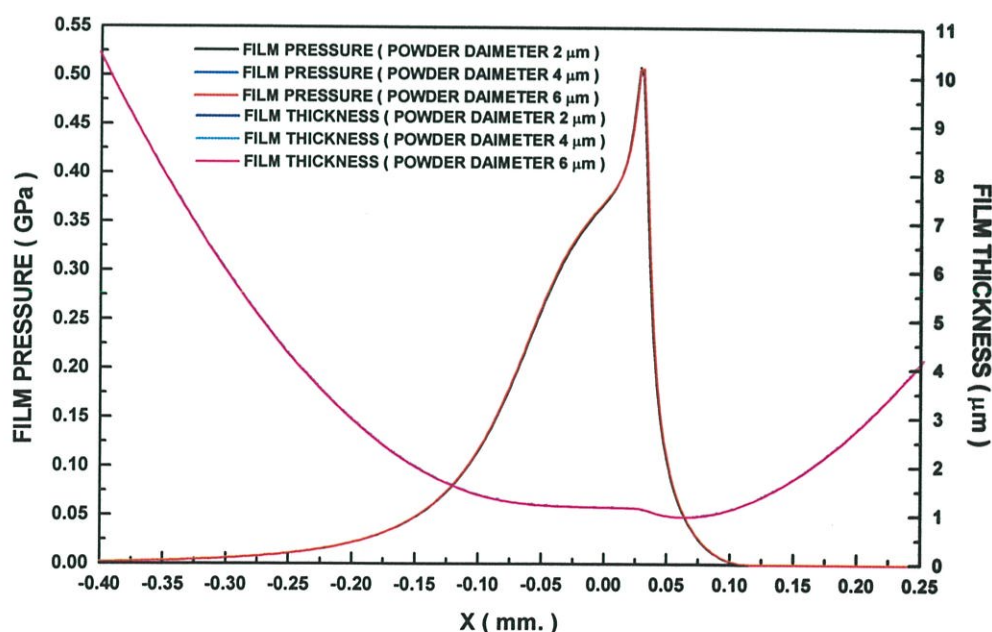
รูปที่ 7.129 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองที่ความความเข้มข้นของ MoS_2 ต่างๆ

7.6 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ MoS_2

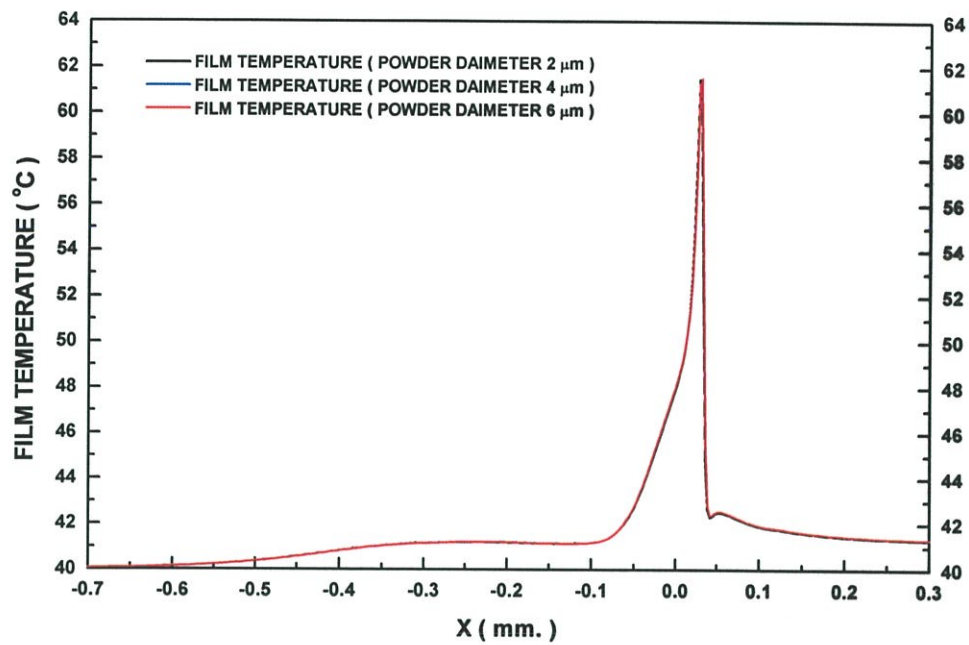
7.6.1 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ MoS_2 ในกรณีที่ไม่นับผลจากความหยาบผิวของพื้นผิว

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของสารหล่อลื่นของแข็ง ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ไมโครเมตร 4 ไมโครเมตร และที่ 6 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยน้ำหนัก เมื่อไม่คิดผลจากความหยาบผิวของพื้นผิว จะพบว่า เมื่อความขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาฟิล์มของน้ำมันลดลง ความดันของฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับที่ขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่ 2 ไมโครเมตร แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าค่อนข้างน้อยมาก แสดงดัง รูปที่ 7.130 ถึง รูปที่ 7.133

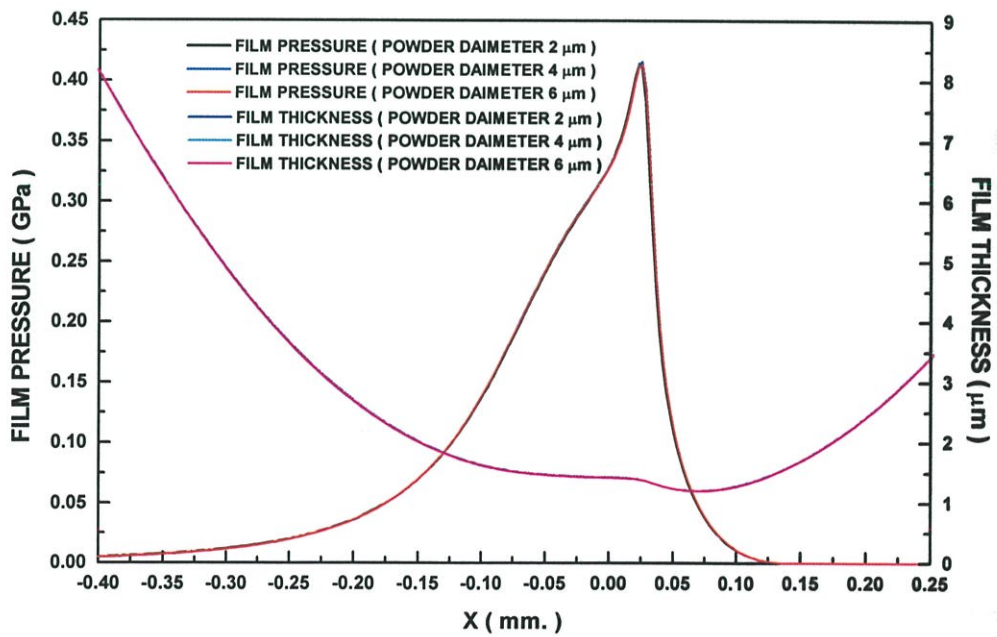
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็ง เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าค่อนข้างน้อยมาก และค่าการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.134 ถึง รูปที่ 7.137



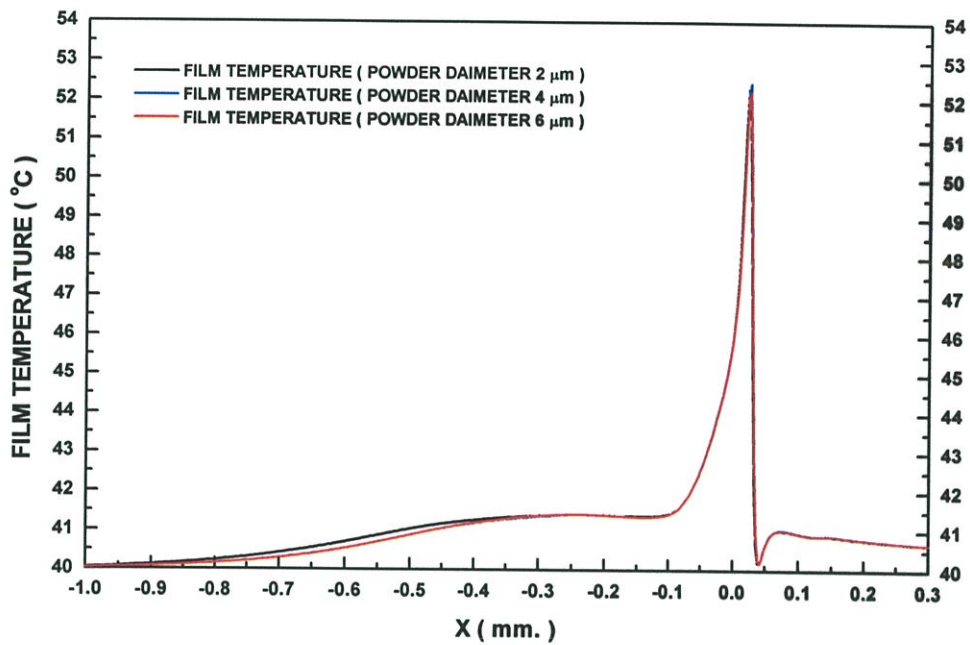
รูปที่ 7.130 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



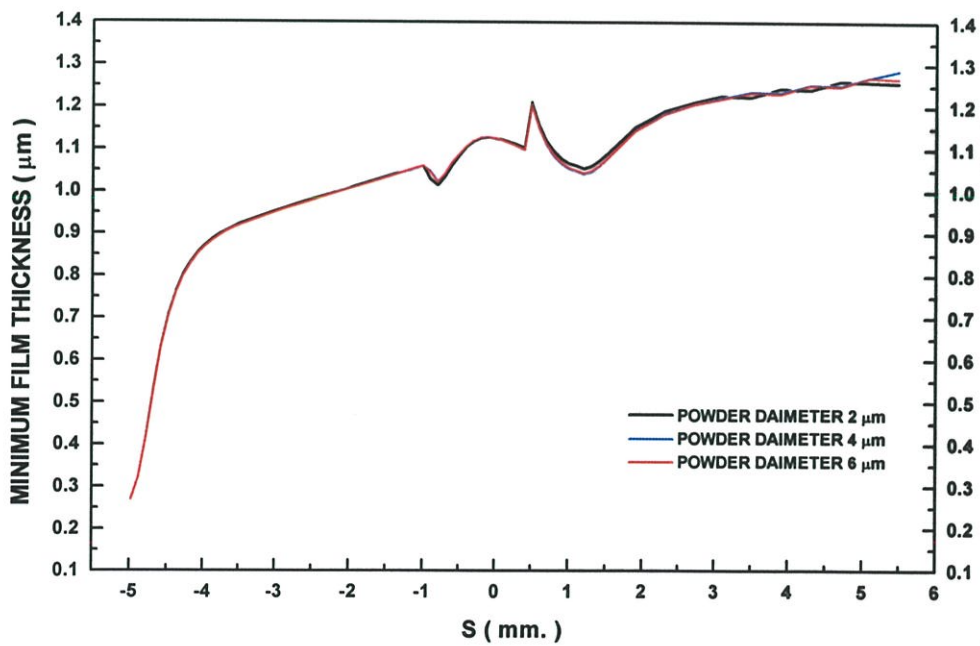
รูปที่ 7.131 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



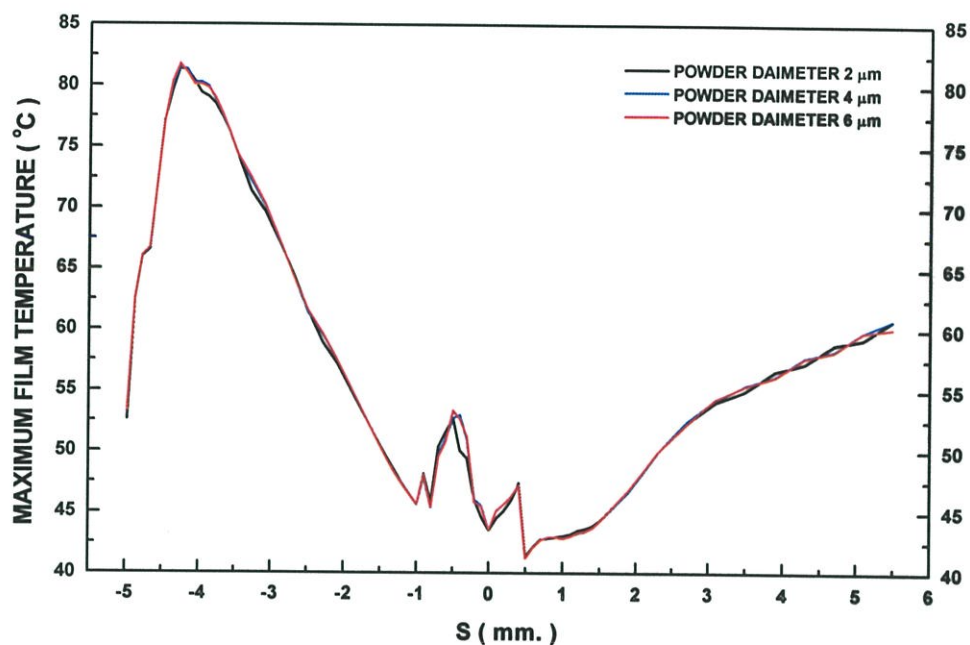
รูปที่ 7.132 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



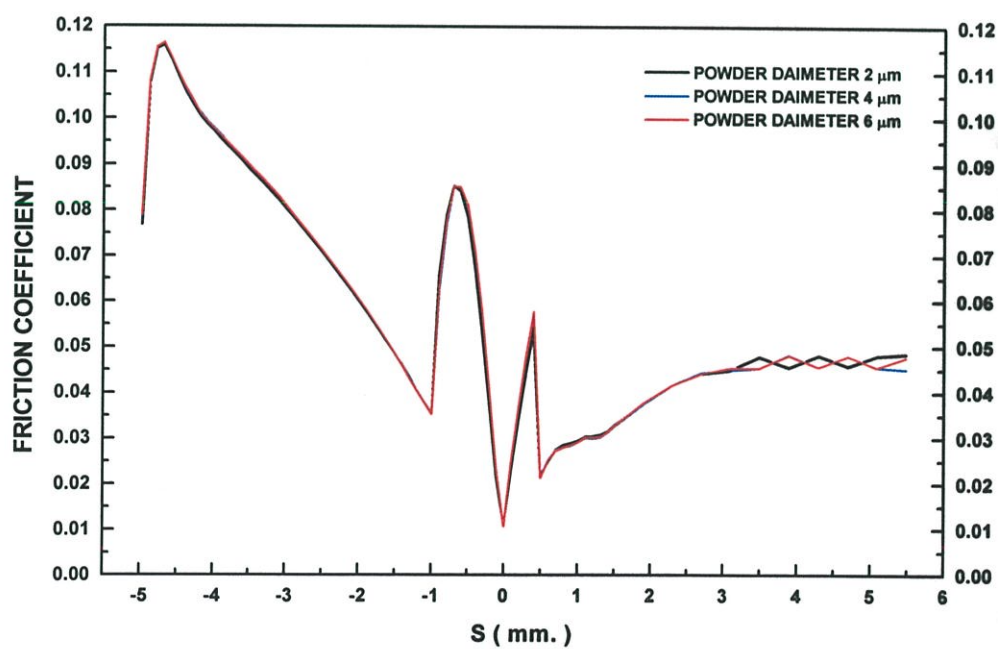
รูปที่ 7.133 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



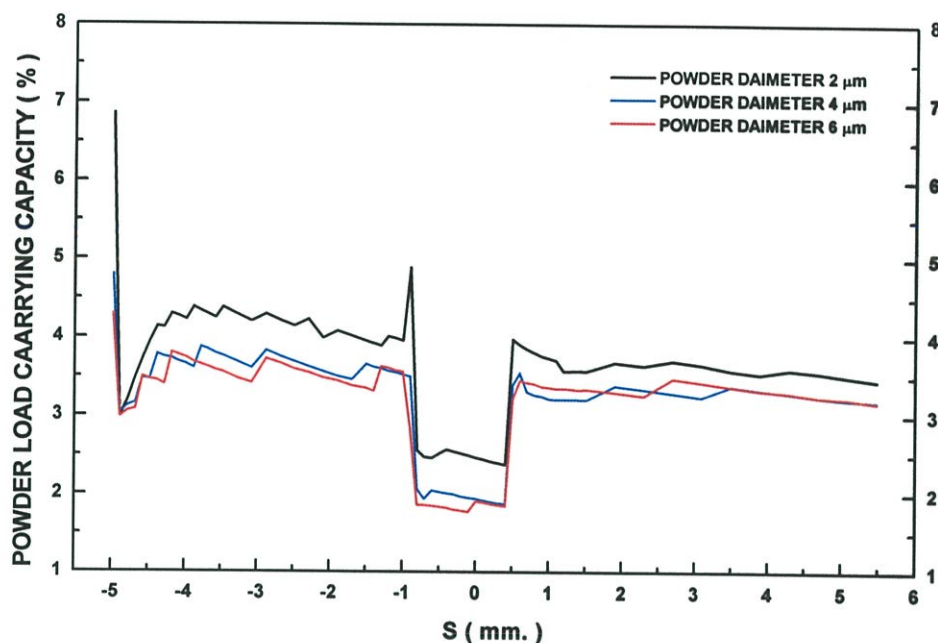
รูปที่ 7.134 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.135 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว



รูปที่ 7.136 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นผิว

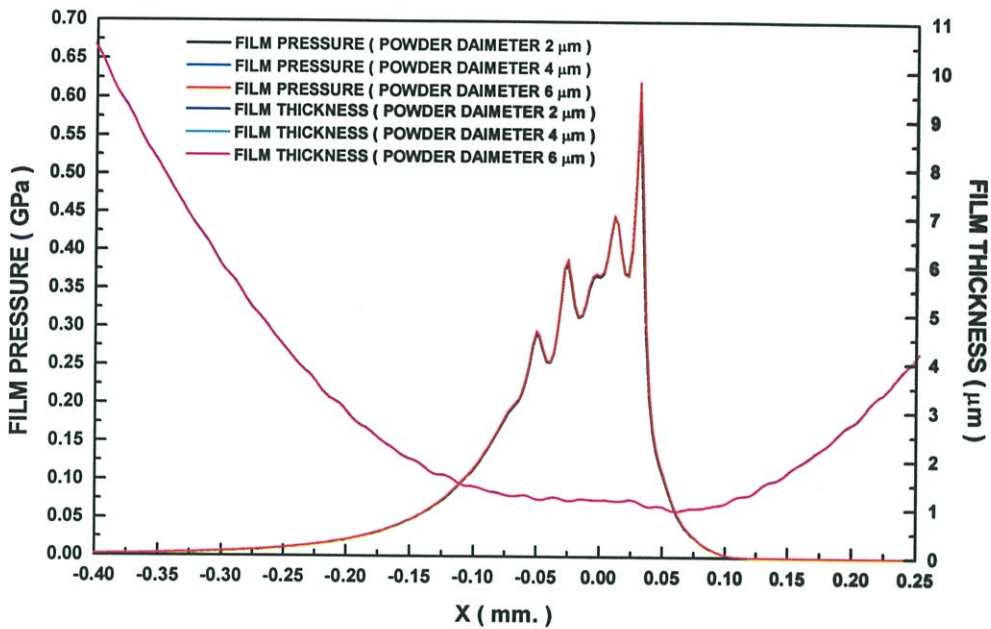


รูปที่ 7.137 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS_2 ที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

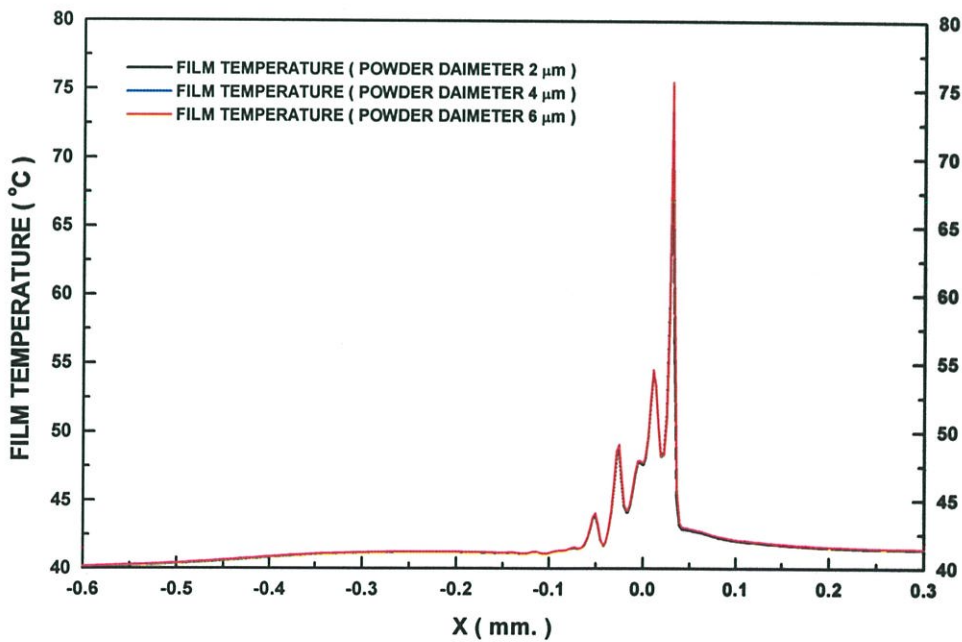
7.6.2 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ MoS_2 ในกรณีพิจารณาผล จากความหยาบผิวของฟันเฟือง

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของสารหล่อลื่นของแข็ง ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ไมโครเมตร 4 ไมโครเมตร และที่ 6 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง จะพบว่า เมื่อความขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาฟิล์มของน้ำมันลดลง ความดันของฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับที่ขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่ 2 ไมโครเมตร แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าค่อนข้างน้อยมาก แสดงดัง รูปที่ 7.138 ถึง รูปที่ 7.141

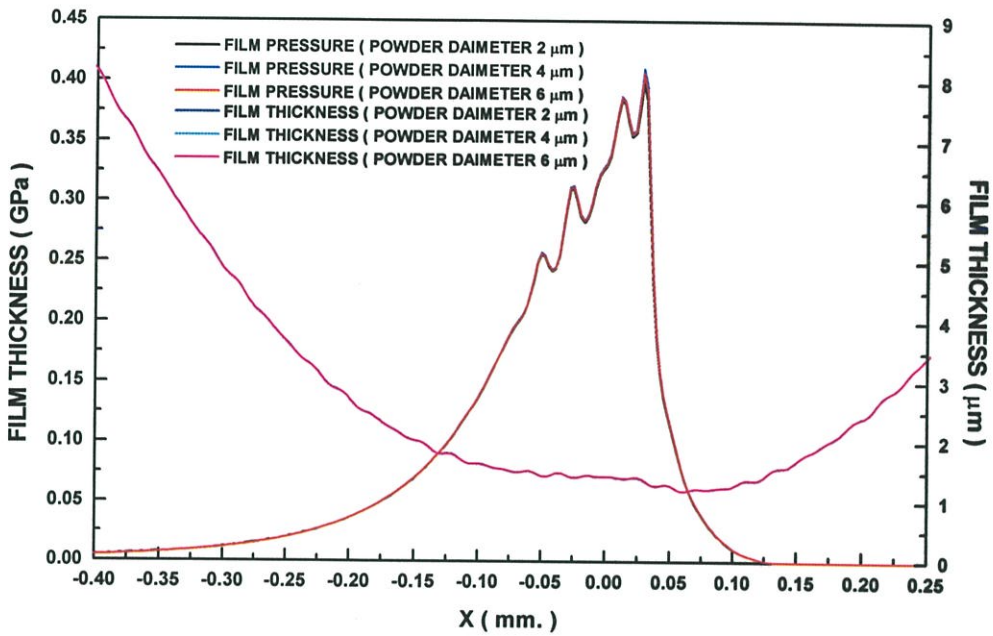
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็ง เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าค่อนข้างน้อยมาก และค่าการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.142 ถึง รูปที่ 7.145



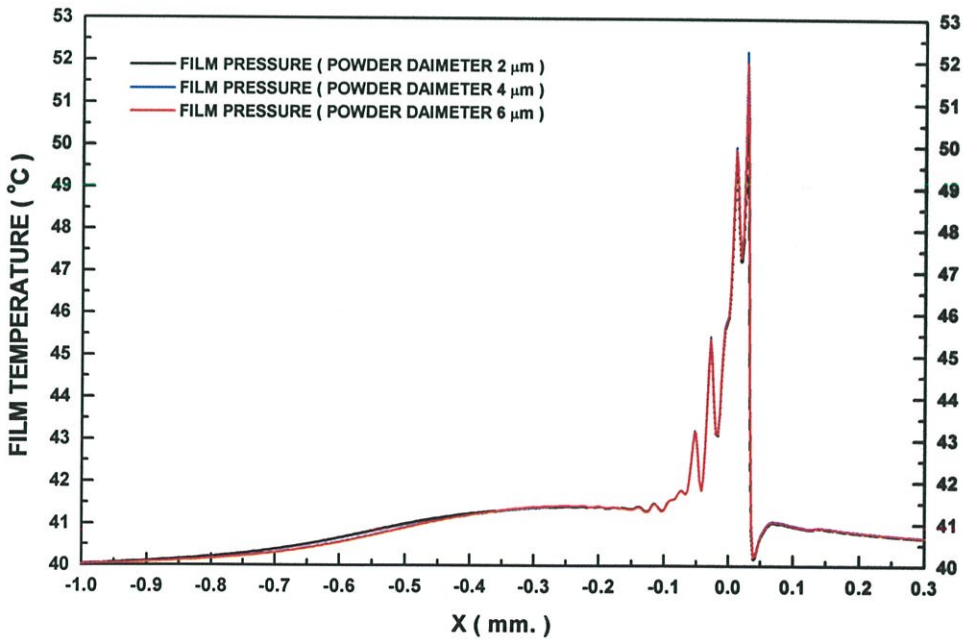
รูปที่ 7.138 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



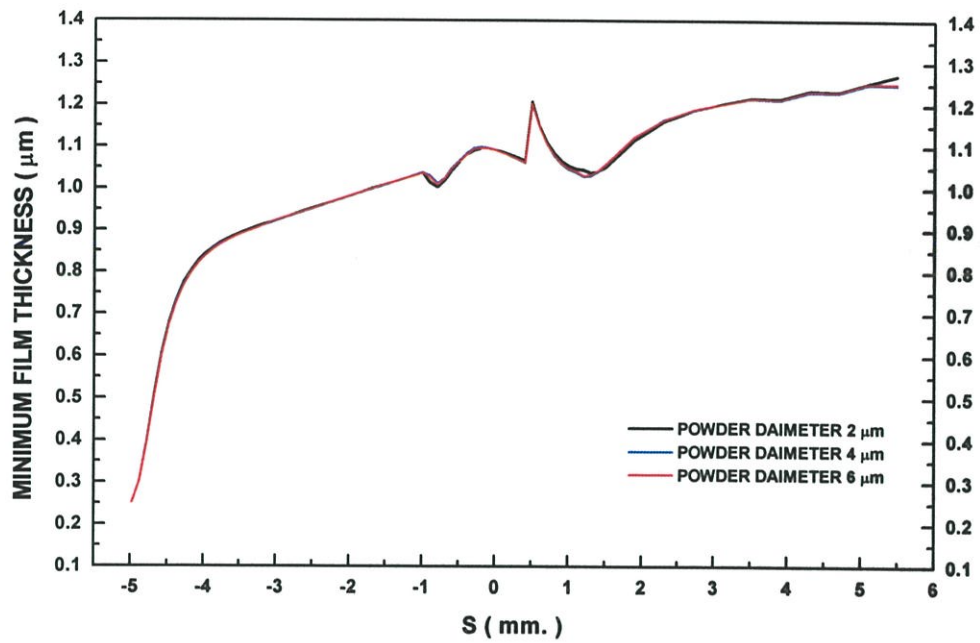
รูปที่ 7.139 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



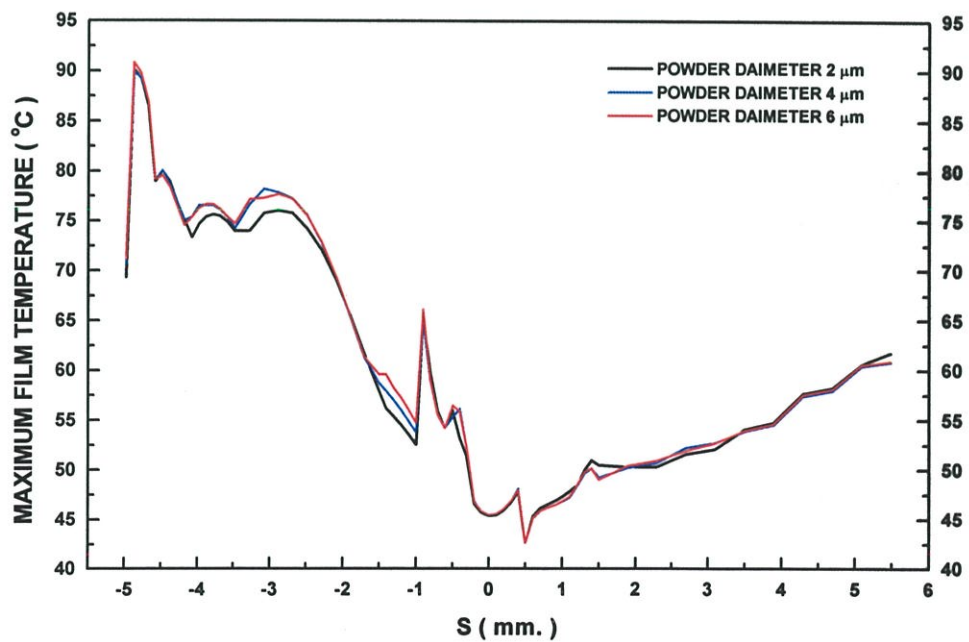
รูปที่ 7.140 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



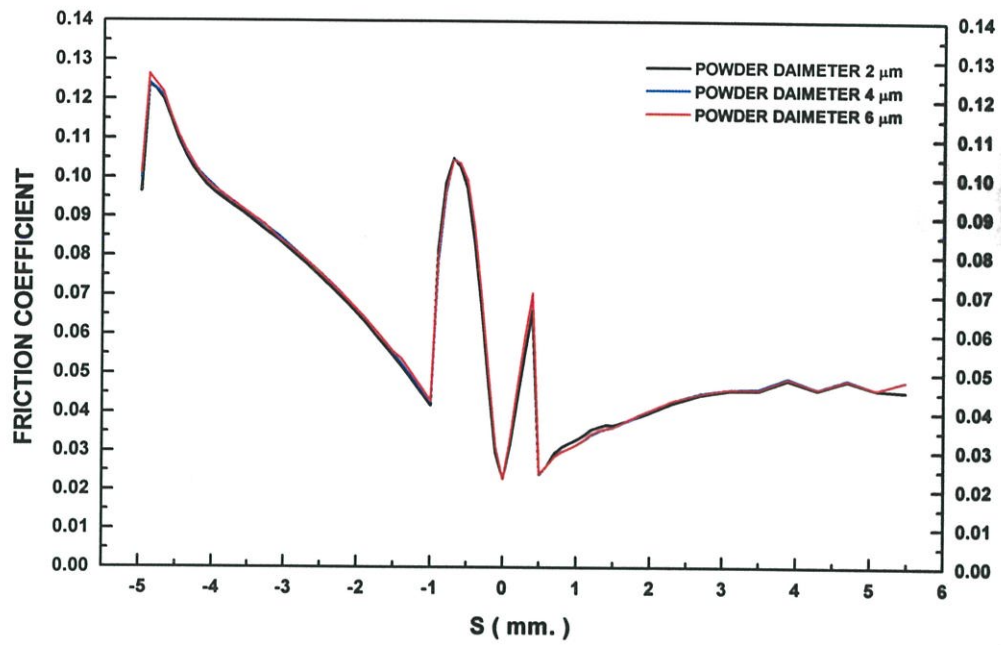
รูปที่ 7.141 แสดงการกระจายของ อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



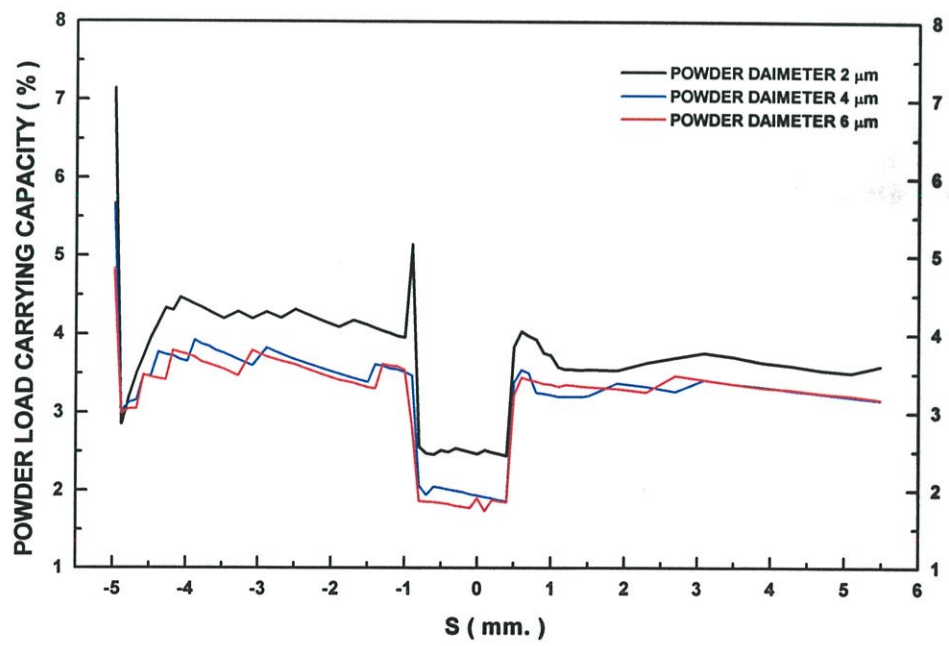
รูปที่ 7.142 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.143 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

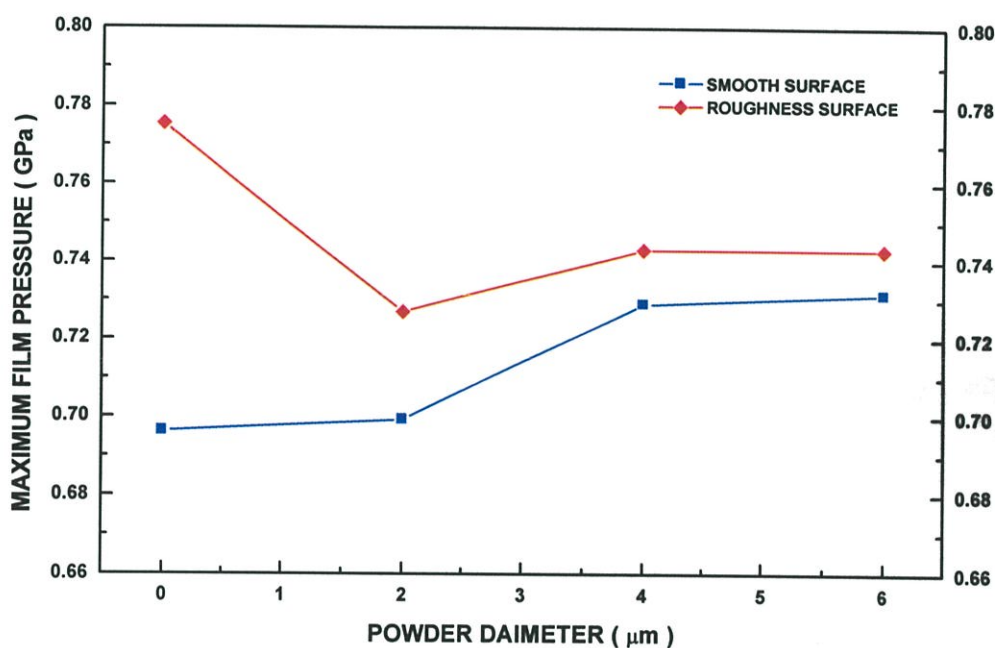


รูปที่ 7.144 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบ
ต่างๆ ของฟันเฟือง

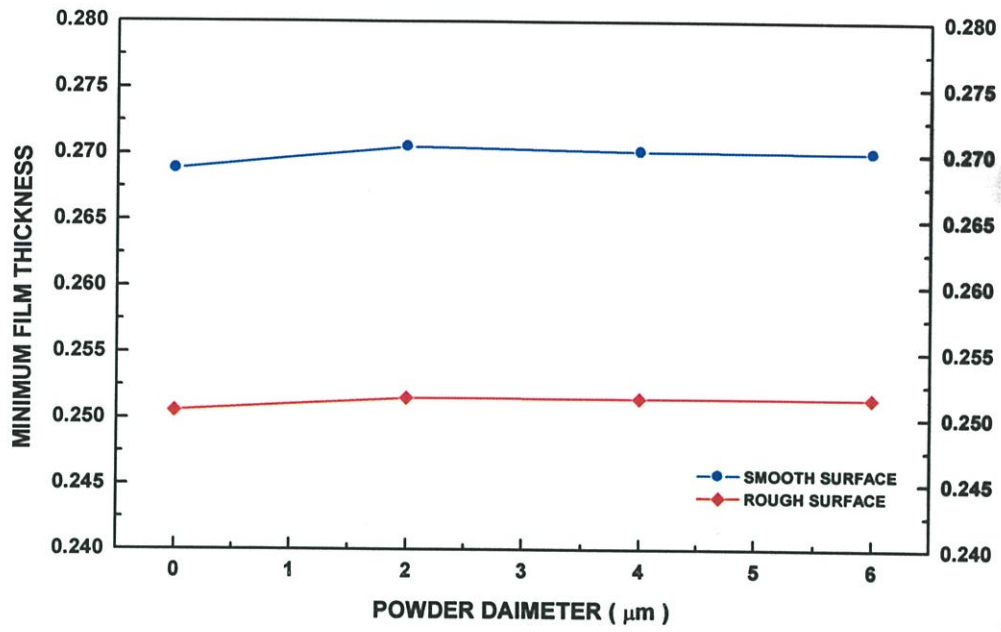


รูปที่ 7.145 แสดงการค่าการรับภาระรวมของ MoS₂ ที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ ที่ระยะการขบ
ต่างๆ ของฟันเฟือง

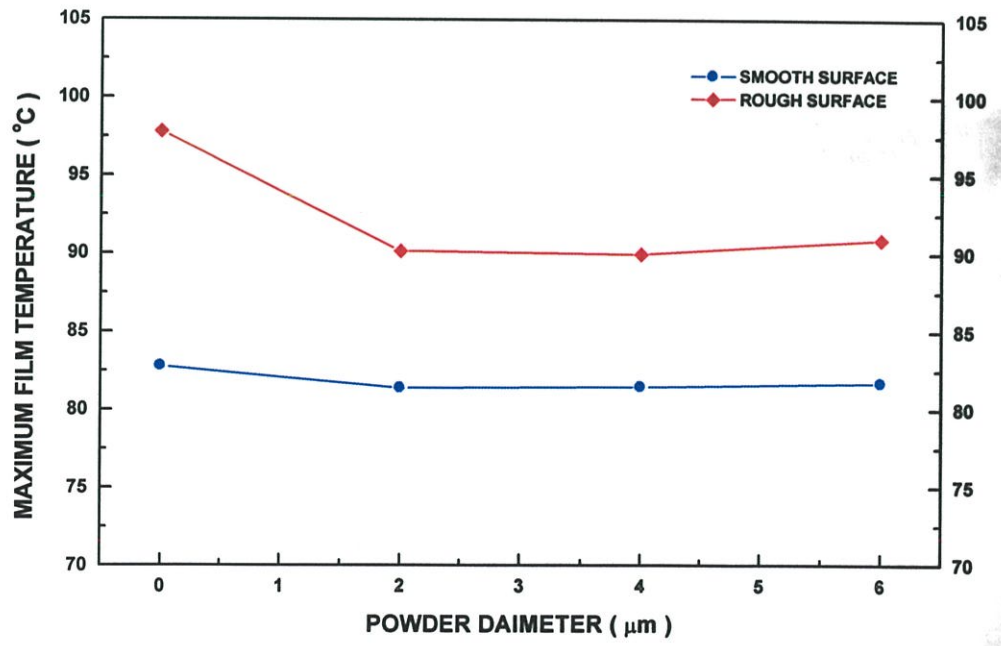
เมื่อทำการเปรียบเทียบ ที่ขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งขนาดต่างๆ จะพบว่า ความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด จะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.146 ถึง รูปที่ 7.149



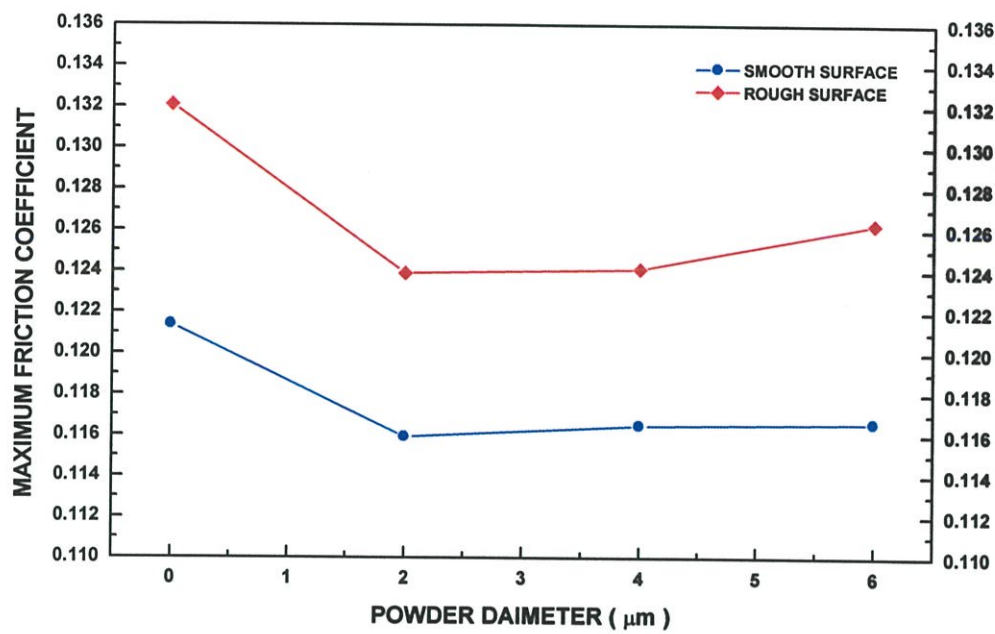
รูปที่ 7.146 แสดงค่าความดันของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ



รูปที่ 7.147 แสดงการคำนวณหาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด ในการทำงานของฟันเฟืองที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ



รูปที่ 7.148 แสดงการคำนวณหาของฟิล์มน้ำมันสูงสุด ในการทำงานของฟันเฟืองที่ขนาดของ MoS_2 ต่างๆ



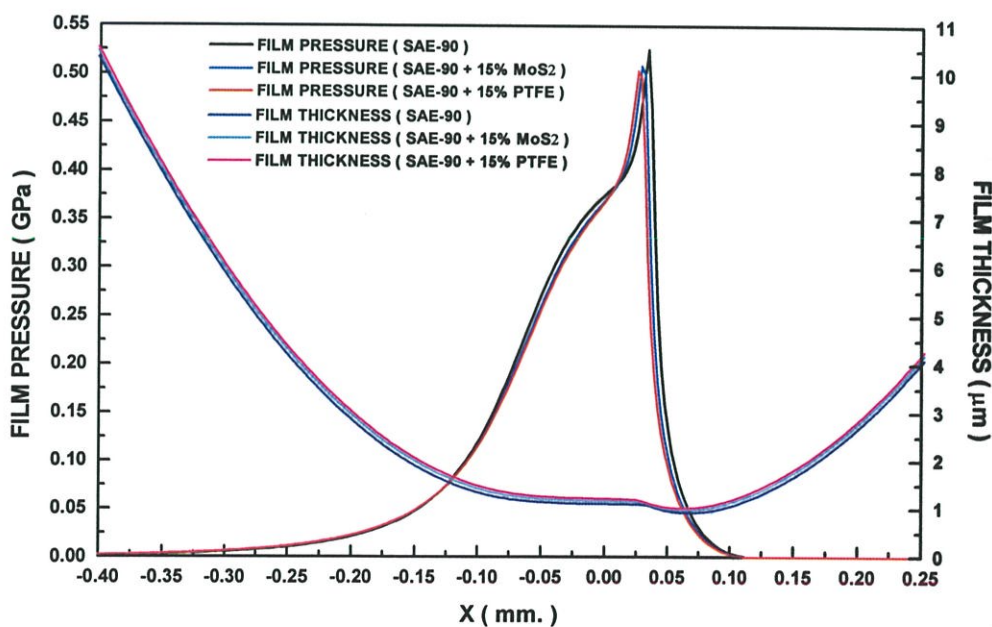
รูปที่ 7.149 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด ในการทำงานของฟีนเฟืองที่ขนาดของ MoS₂ ต่างๆ

7.7 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง

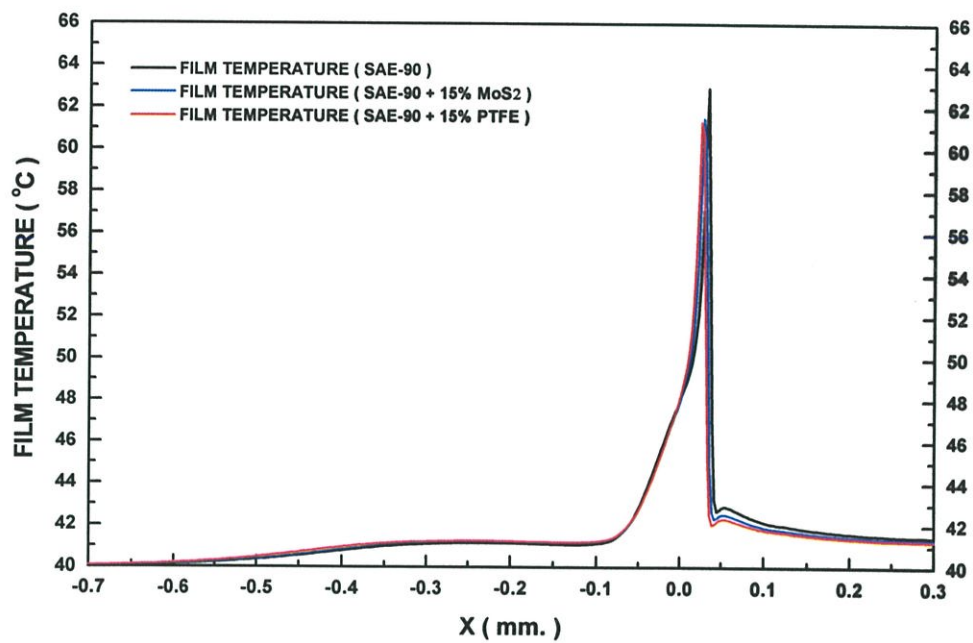
7.7.1 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง ในกรณีที่ไม่คิดผลจากความหนาผิวของพื้นผิว

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง เมื่อใช้ MoS_2 เปรียบเทียบกับ PTFE ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อไม่คิดผลจากความหนาผิวของพื้นผิว จะพบว่า เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE จะทำให้ความหนาฟิล์มของน้ำมันเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะลดลง เนื่องจากภาระที่สารหล่อลื่นของแข็งได้รับเมื่อเป็น PTFE จะมีค่ามากกว่า MoS_2 แสดงดัง รูปที่ 7.150 ถึง รูปที่ 7.153

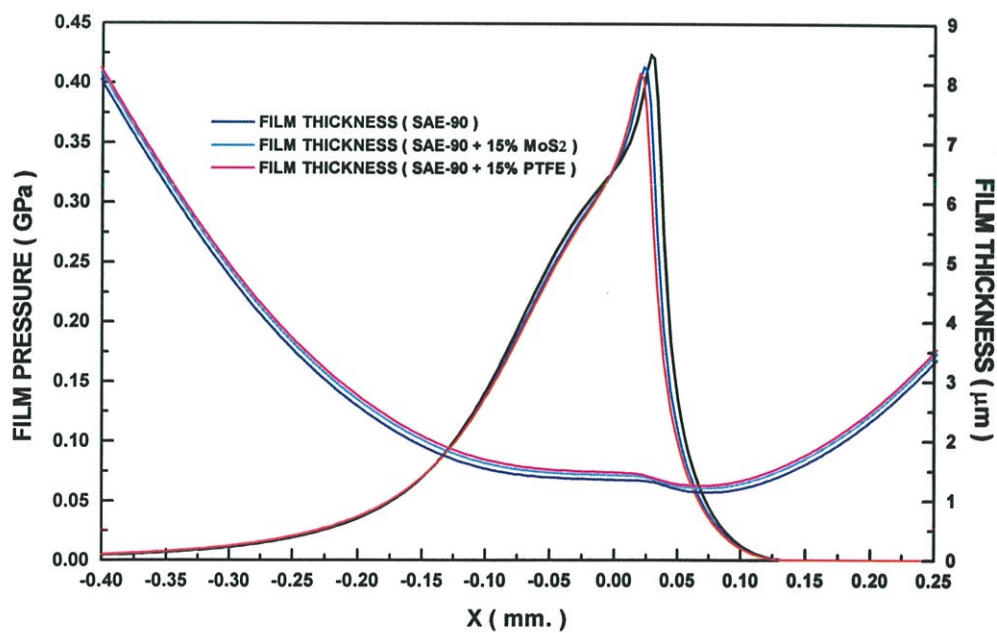
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน ในกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็ง MoS_2 แต่อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่ง Pitch Contact เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็ง MoS_2 และค่าการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE จะรับภาระได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็ง MoS_2 แสดงดัง รูปที่ 7.154 ถึง รูปที่ 7.157



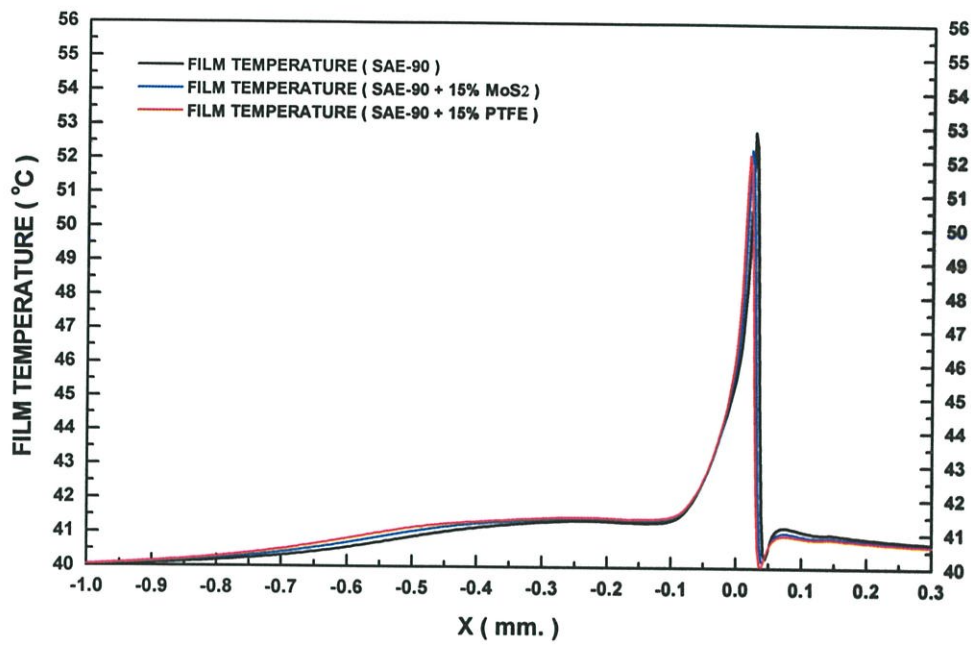
รูปที่ 7.150 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



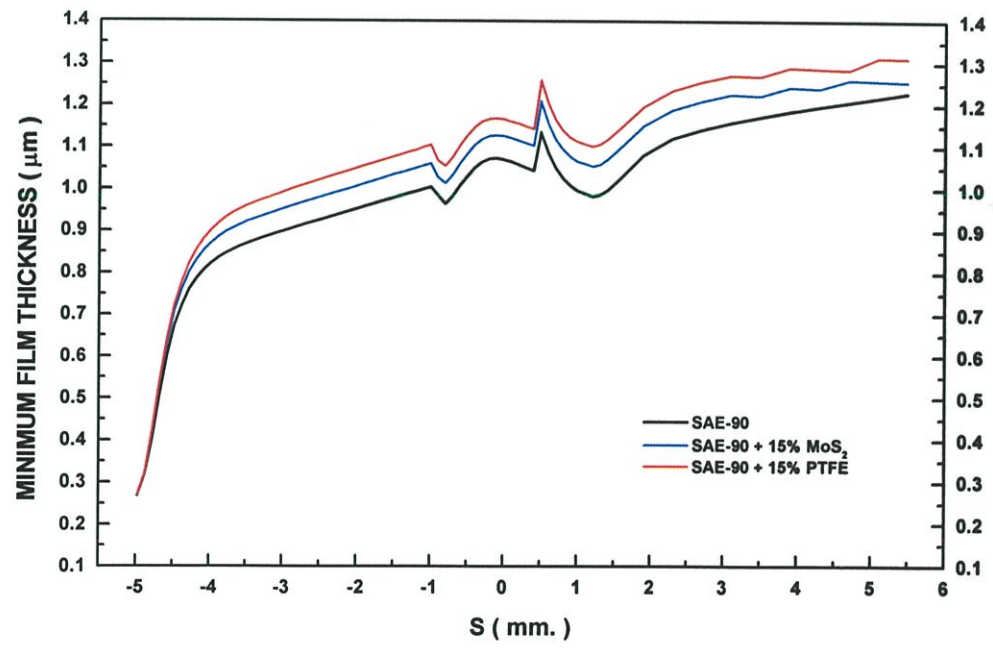
รูปที่ 7.151 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



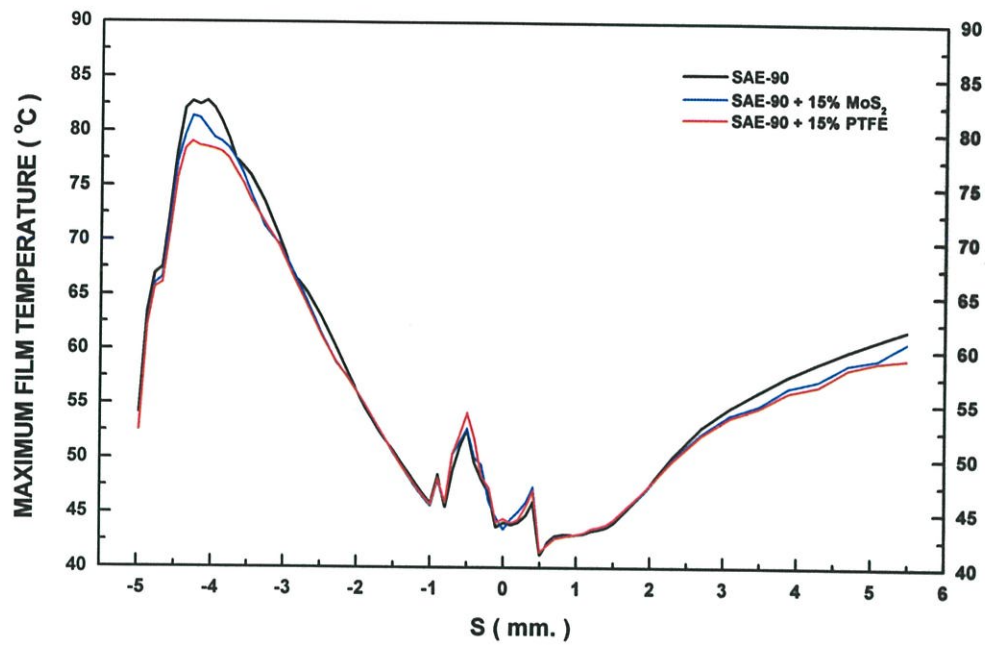
รูปที่ 7.152 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



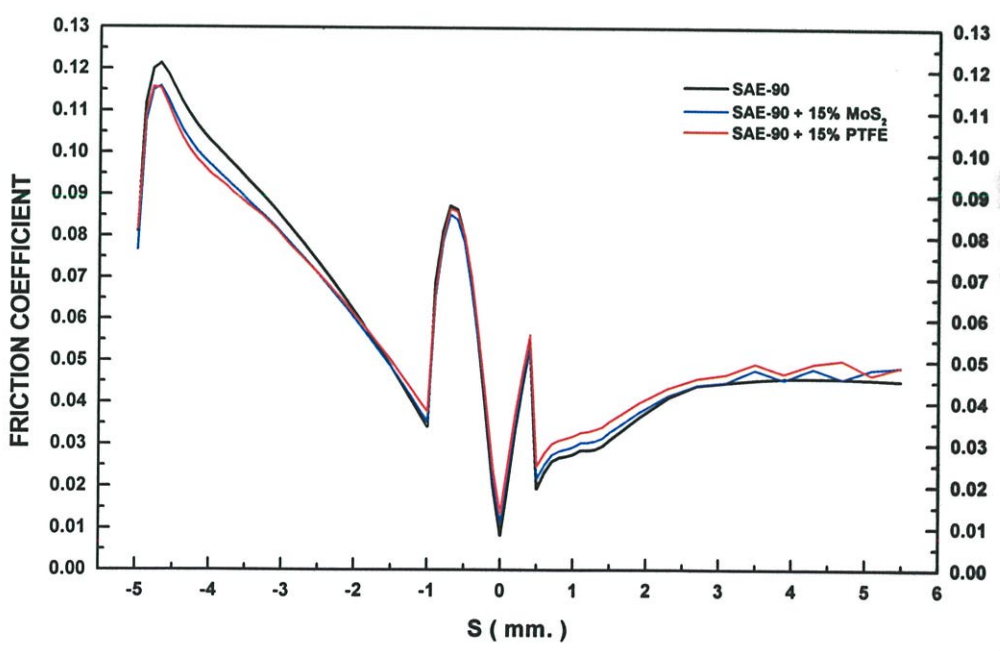
รูปที่ 7.153 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



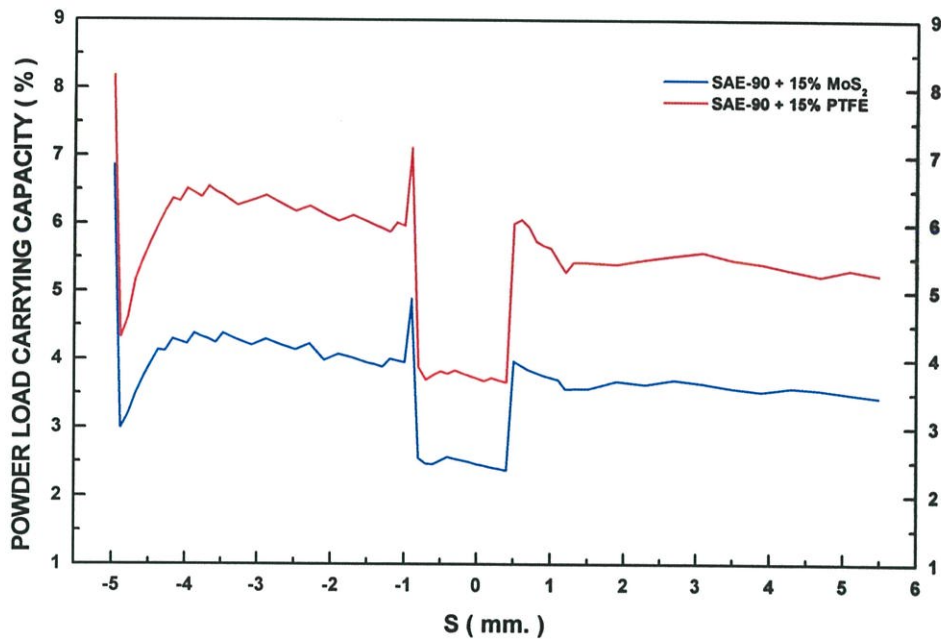
รูปที่ 7.154 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.155 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.156 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

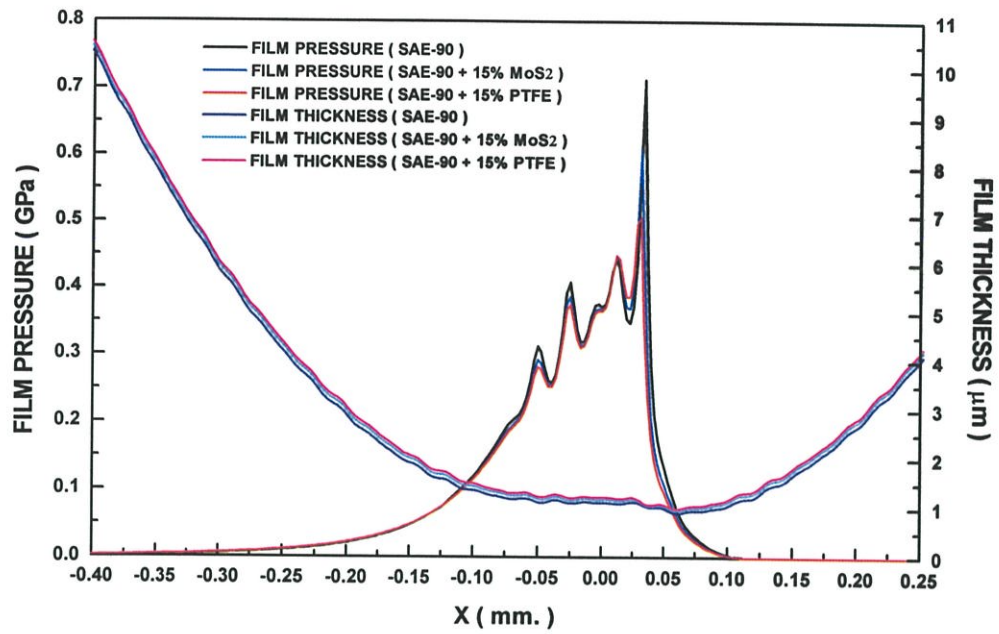


รูปที่ 7.157 แสดงการค่าการรับภาระรวมของสารหล่อลื่นของแข็งเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

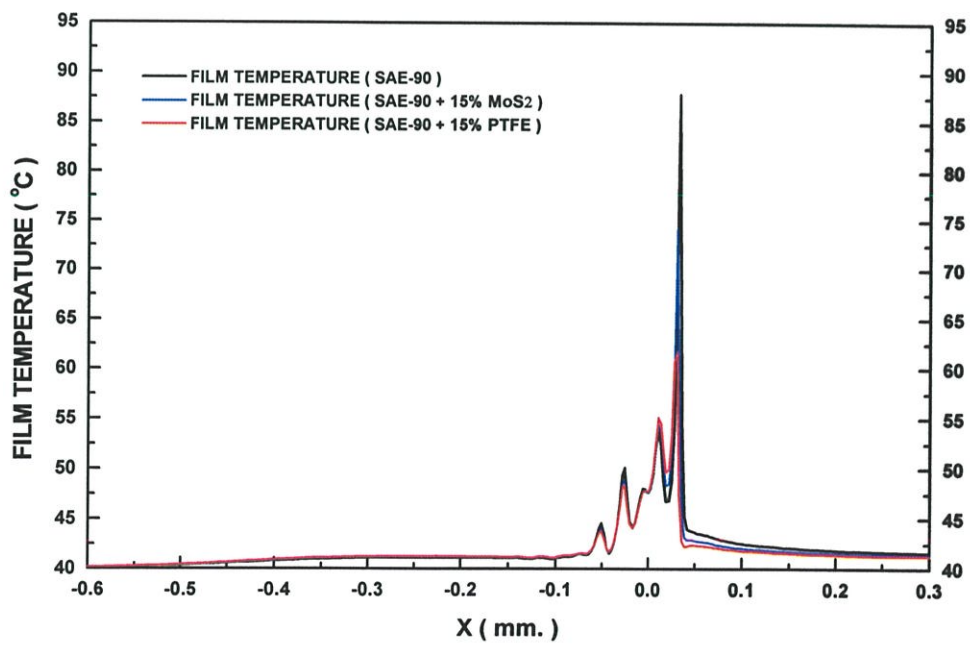
7.7.2 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง ในกรณีที่พิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง เมื่อใช้ MoS_2 เปรียบเทียบกับ PTFE ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง จะพบว่า เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE จะทำให้ความหนาฟิล์มของน้ำมันเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะลดลง แต่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในกรณีที่ไม่นับผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง แสดงดัง รูปที่ 7.158 ถึง รูปที่ 7.161

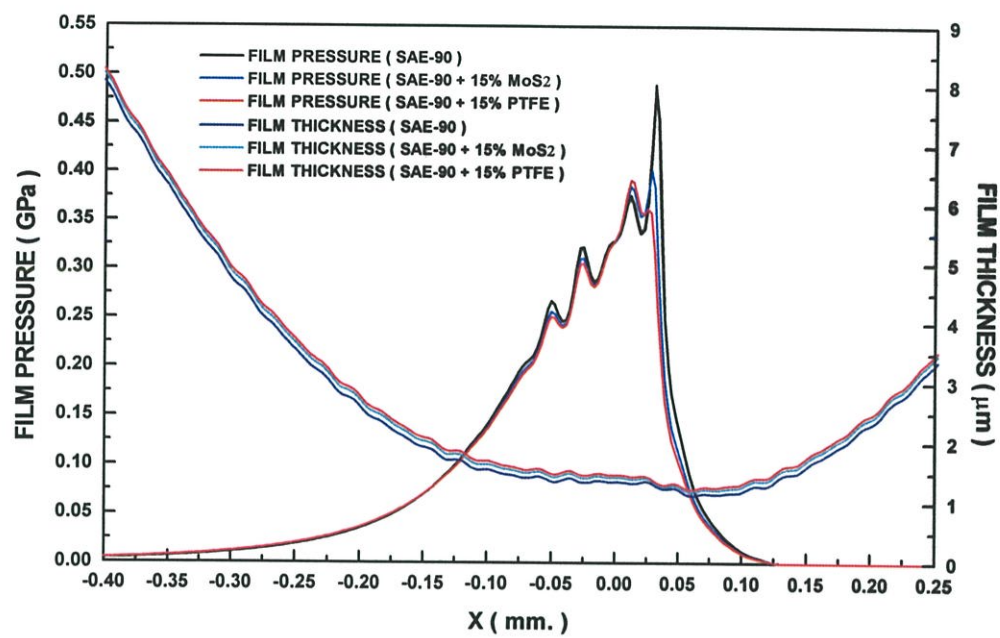
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน ในกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็ง MoS_2 แต่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในกรณีที่ไม่นับผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่ง Pitch Contact เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็ง MoS_2 และค่าการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE จะรับภาระได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็ง MoS_2 แสดงดัง รูปที่ 7.162 ถึง รูปที่ 7.165



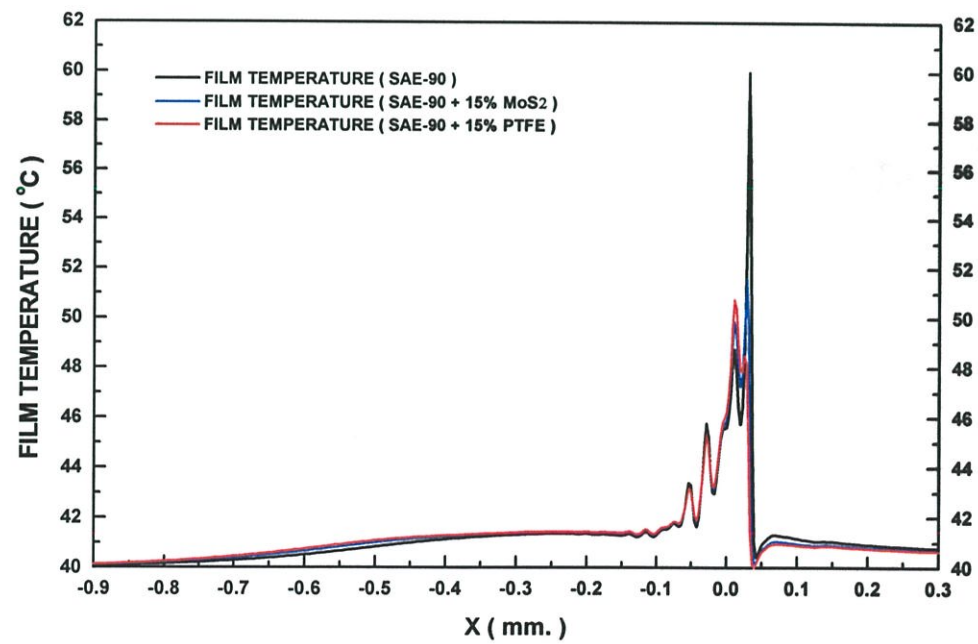
รูปที่ 7.158 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



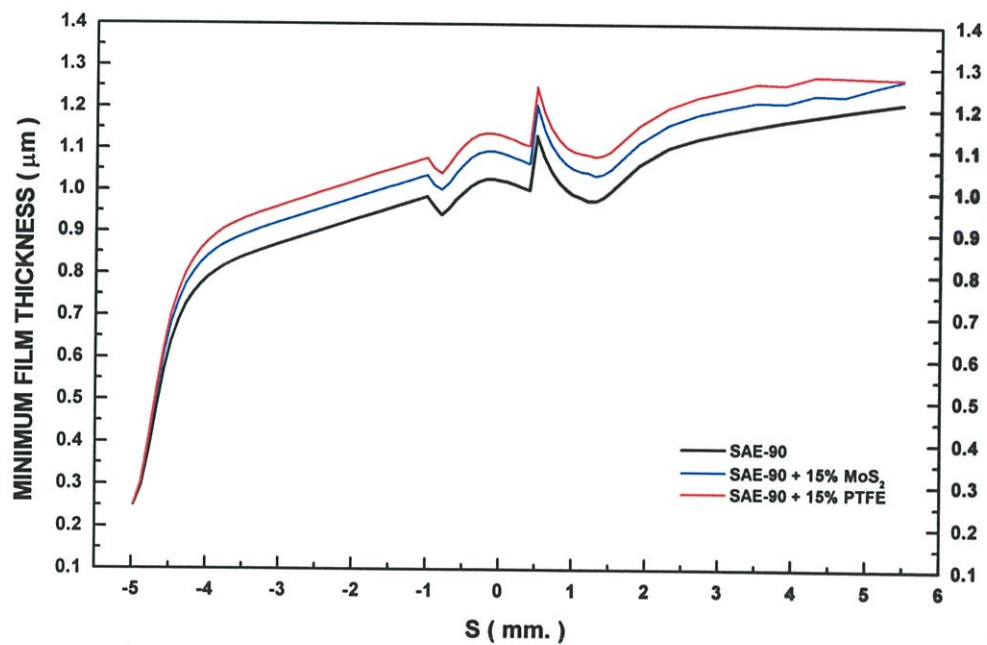
รูปที่ 7.159 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



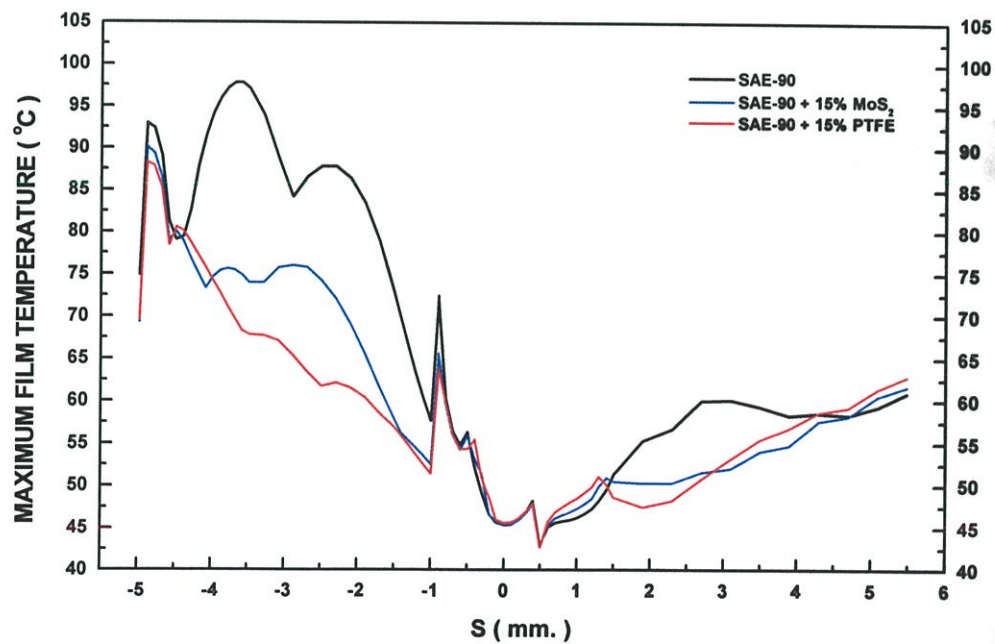
รูปที่ 7.160 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



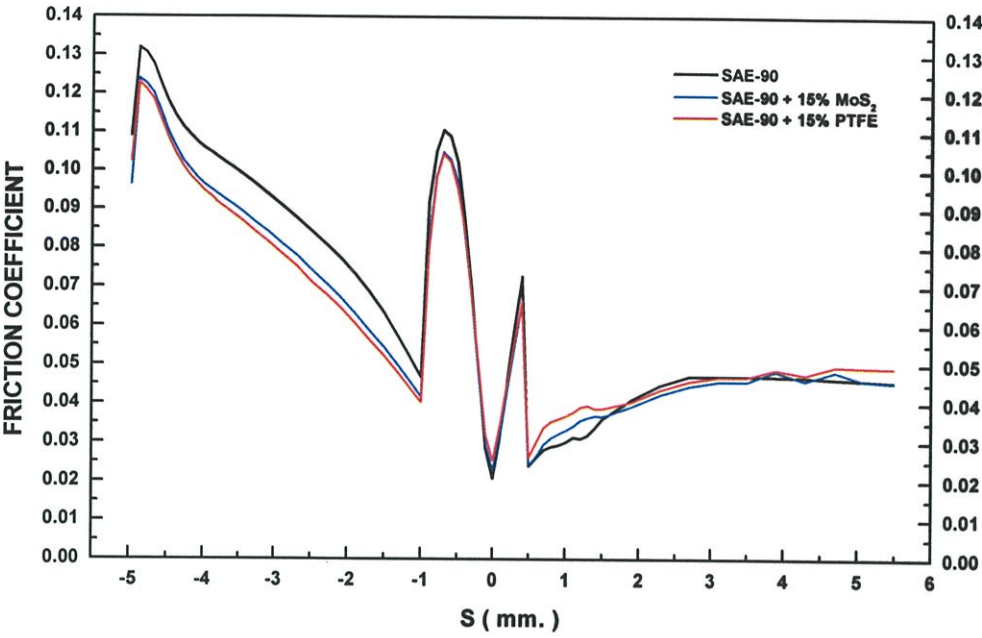
รูปที่ 7.161 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



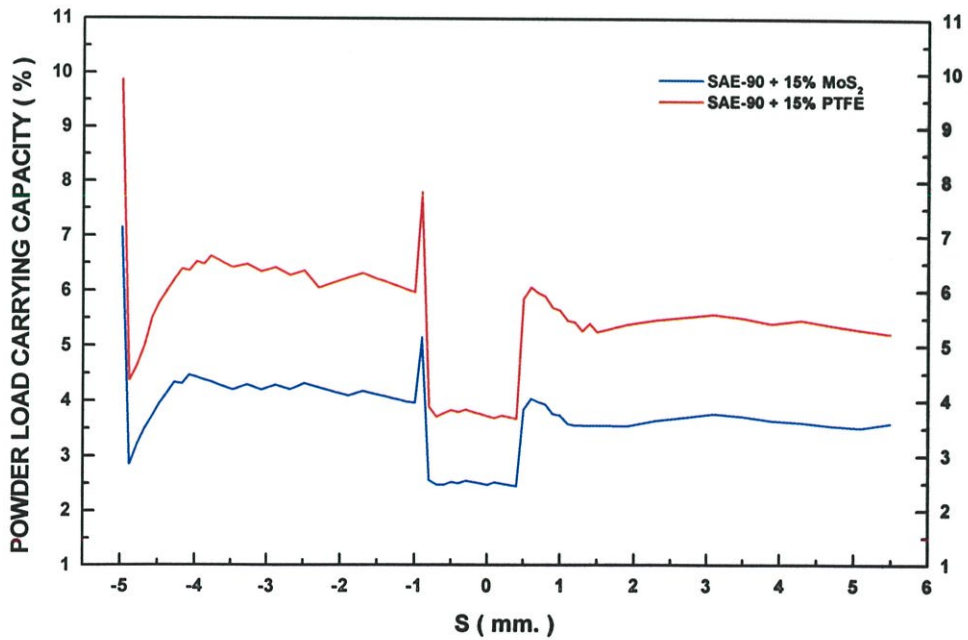
รูปที่ 7.162 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.163 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.164 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.165 แสดงการค่าการรับภาระรวมของสารหล่อลื่นของแข็งเมื่อใช้สารหล่อลื่นของแข็งชนิดต่างๆ ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

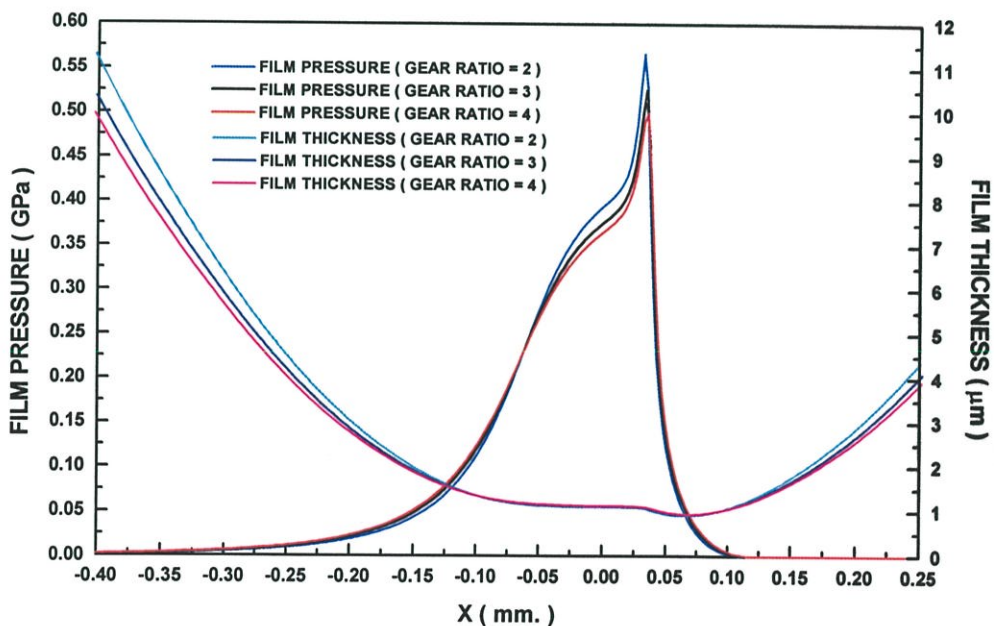
7.8 ผลการจำลองเมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio)

7.8.1 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio)

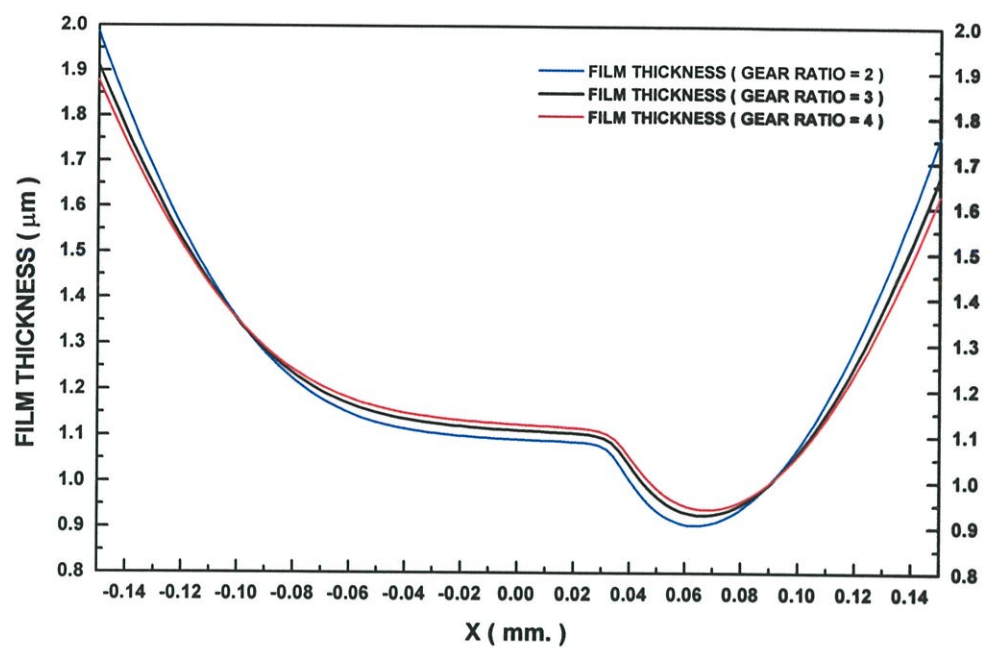
กรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น เกรด SAE-90

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) กรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่น เกรด SAE-90 เมื่อไม่คิดผลจากความหนืดของฟันเฟือง จะพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง จะทำให้ความดันฟิล์มของน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มของน้ำมันจะลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.166 ถึง รูปที่ 7.171

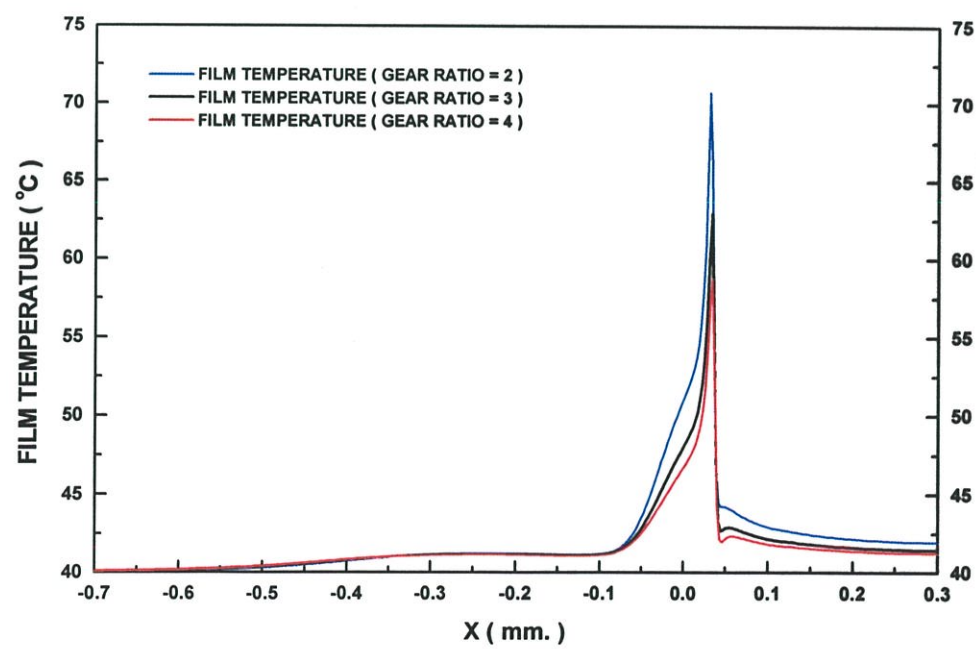
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.172 ถึง รูปที่ 7.174



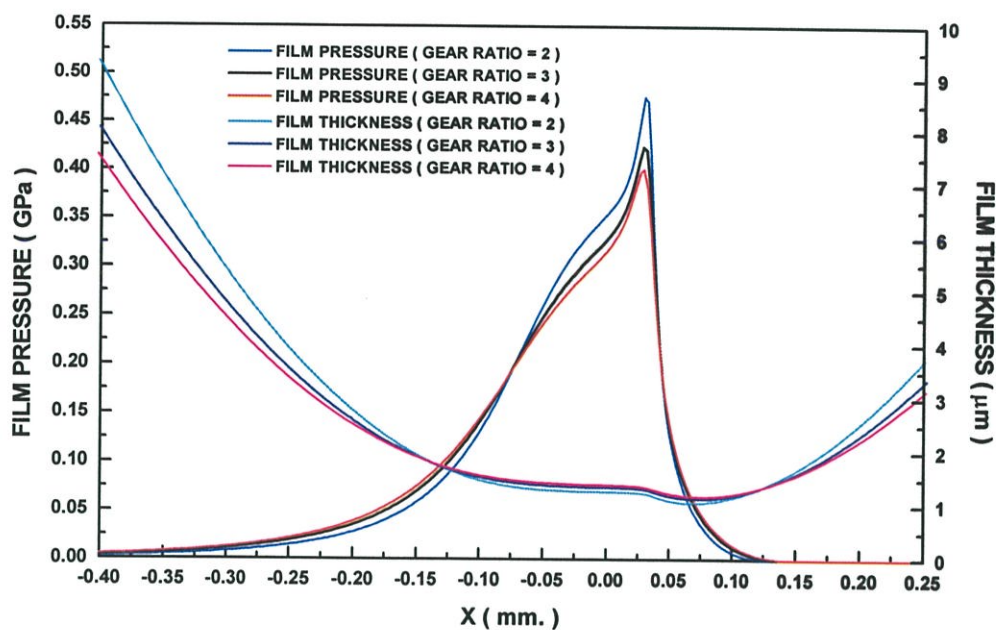
รูปที่ 7.166 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



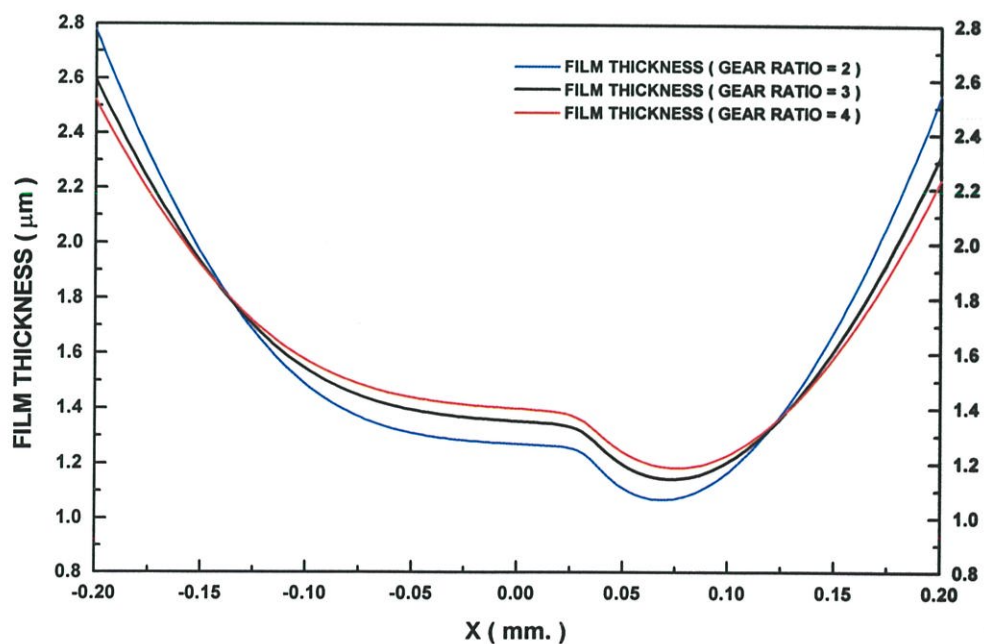
รูปที่ 7.167 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



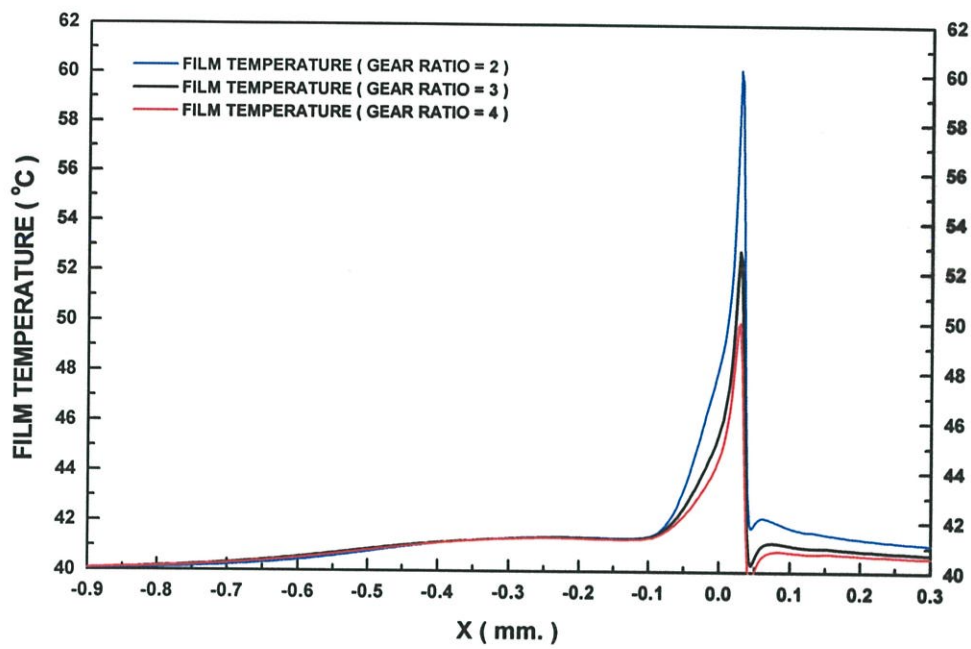
รูปที่ 7.168 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



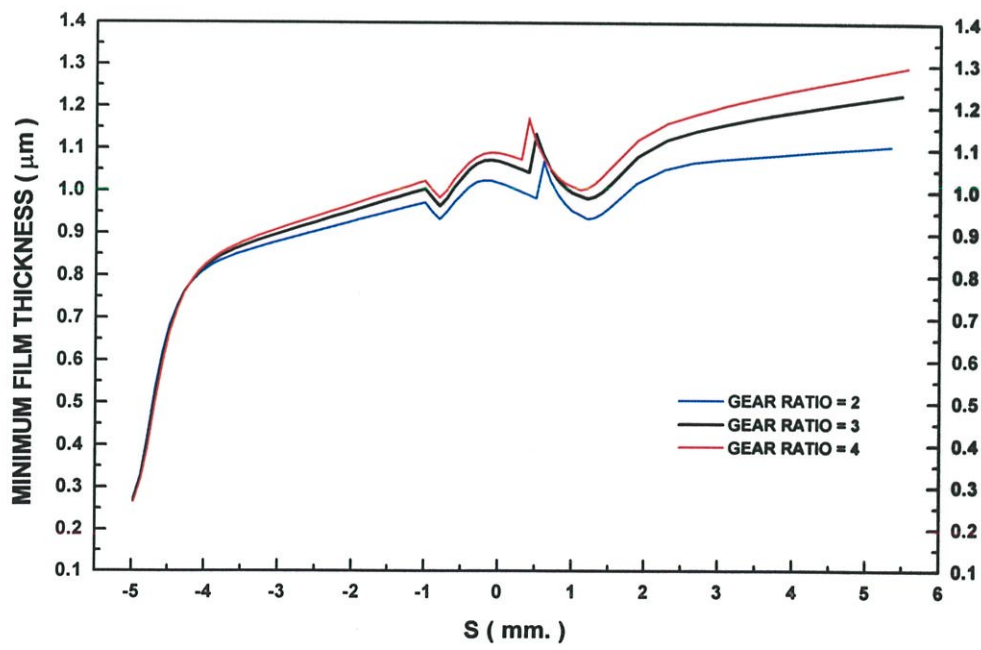
รูปที่ 7.169 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



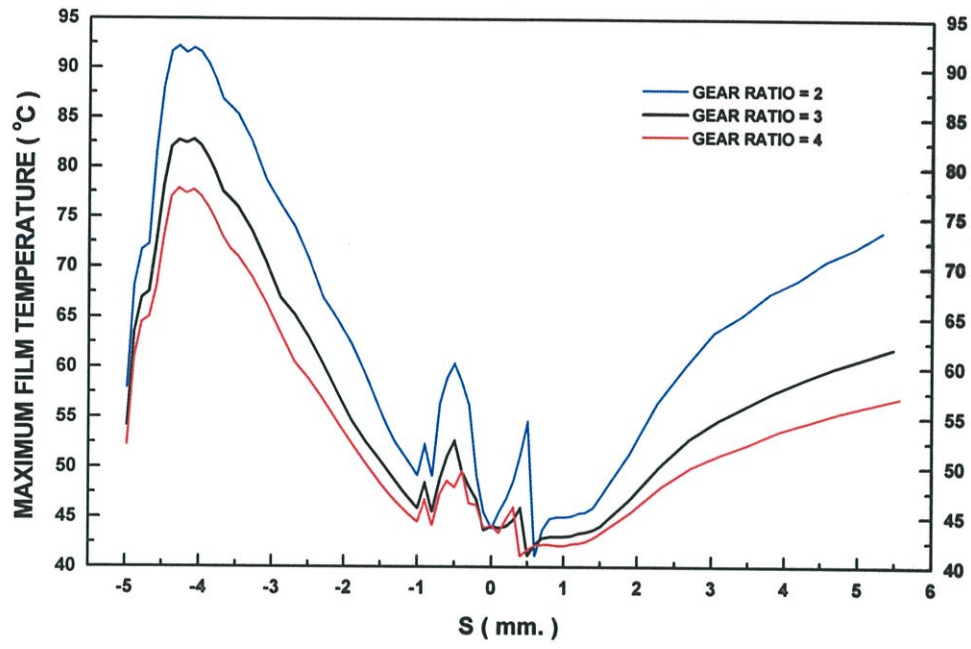
รูปที่ 7.170 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



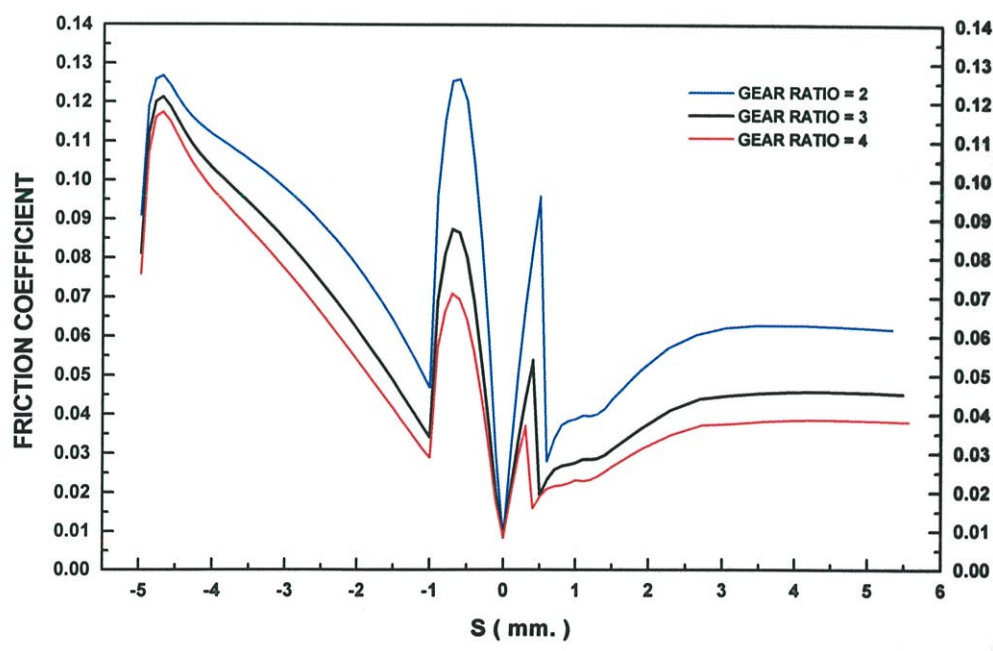
รูปที่ 7.171 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.172 แสดงการคำนวณหาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



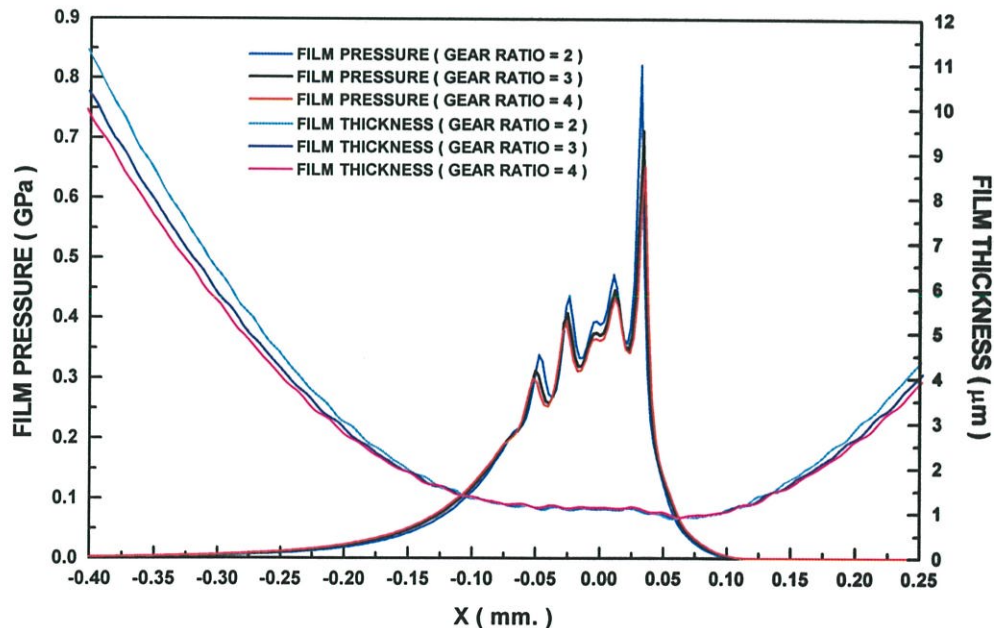
รูปที่ 7.173 แสดงการคำนวณของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่
ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



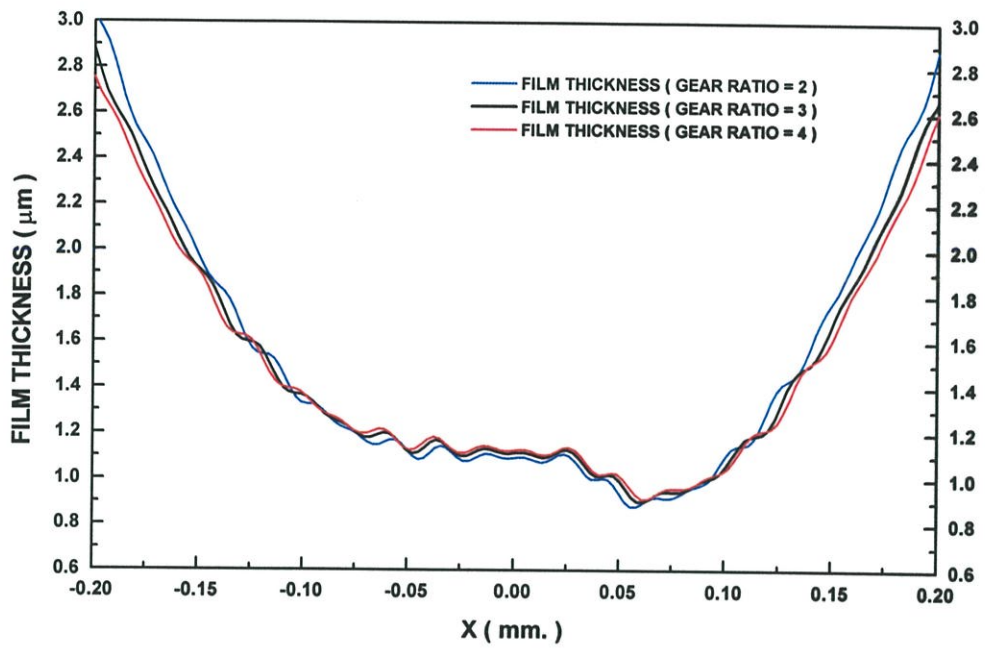
รูปที่ 7.174 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการขบ
ต่างๆ ของฟันเฟือง

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) กรณีที่สารหล่อลื่นเป็น น้ำมันหล่อลื่น เกรด SAE-90 เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง จะพบว่า เมื่อใช้ อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง จะทำให้ความดันฟิล์มของน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน มีค่า เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มของน้ำมันจะลดลงเมื่อใช้ อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ ความดันฟิล์ม น้ำมัน ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความ หยาบผิวของฟันเฟือง แสดงดัง รูปที่ 7.175 ถึง รูปที่ 7.180

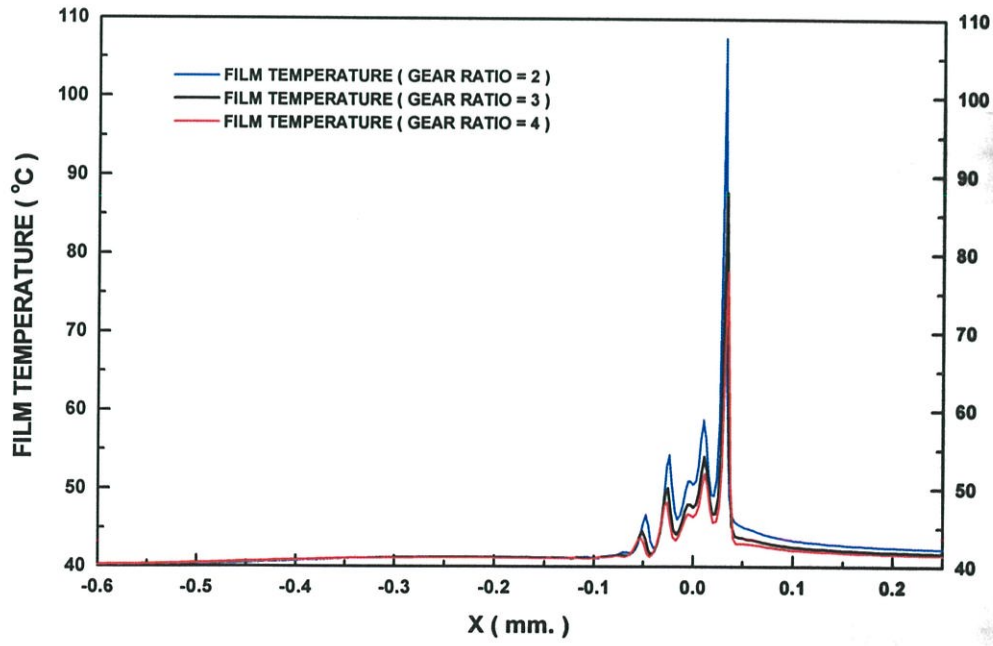
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนา ฟิล์มน้ำมันจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีไม่คิดความหยาบผิวของฟันเฟือง และ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะมีค่ามากกว่าในกรณีไม่คิดความหยาบผิวของฟันเฟือง แสดงดัง รูปที่ 7.181 ถึง รูปที่ 7.183



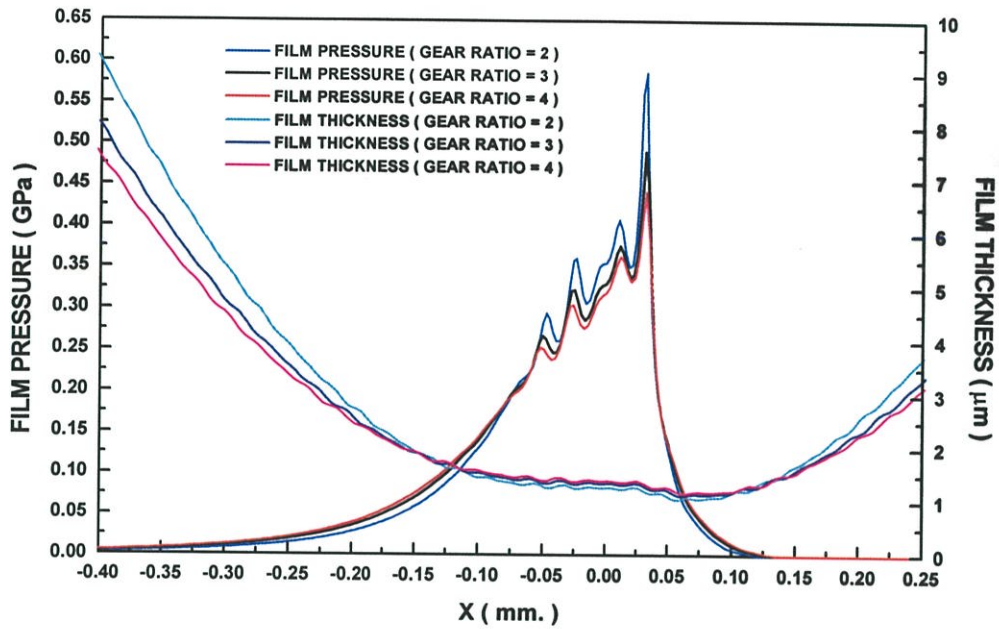
รูปที่ 7.175 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อ เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



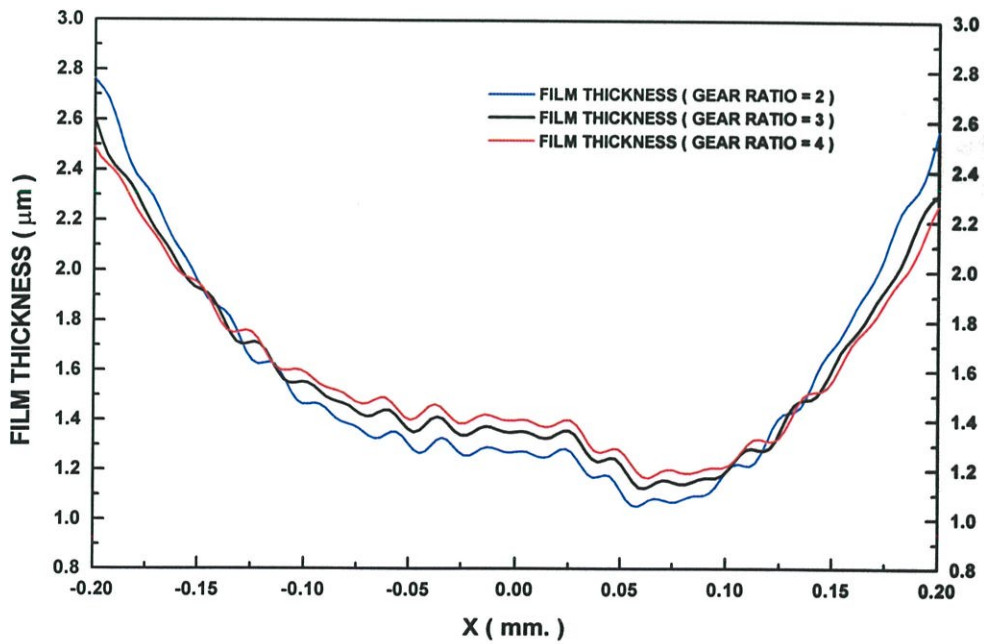
รูปที่ 7.176 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



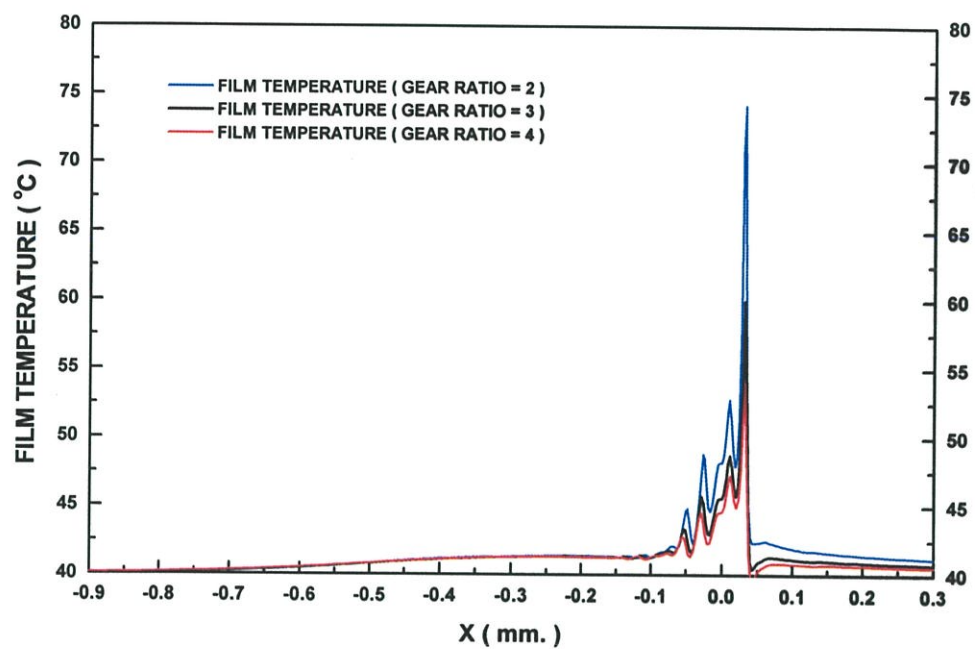
รูปที่ 7.177 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



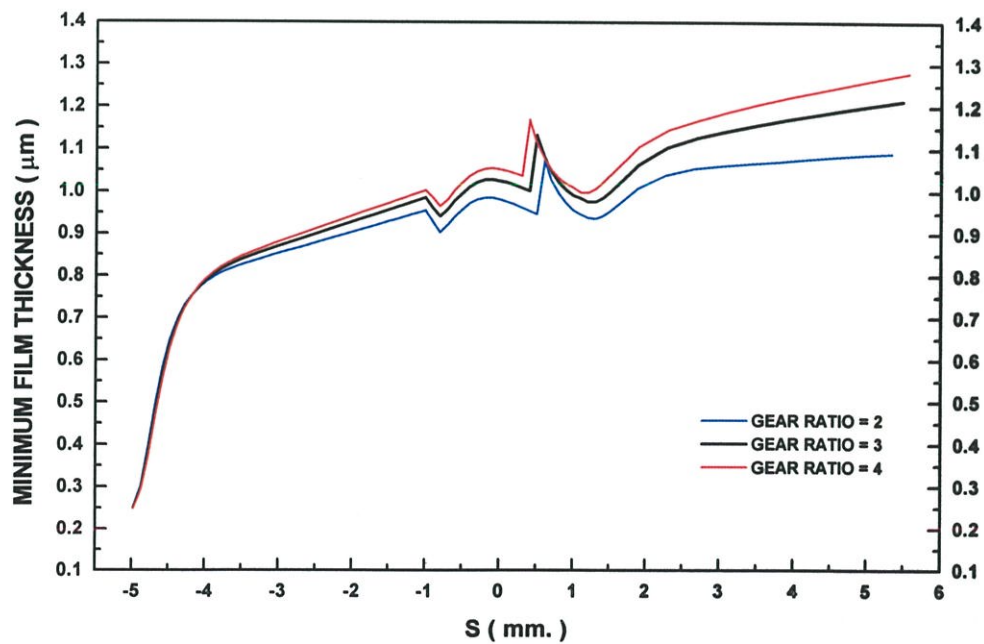
รูปที่ 7.178 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



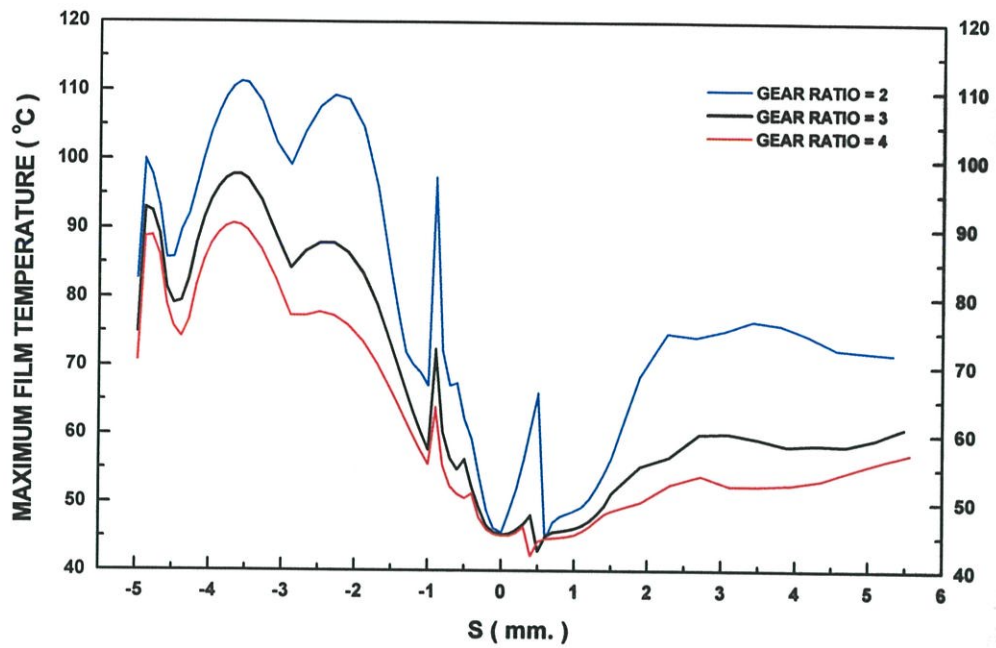
รูปที่ 7.179 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



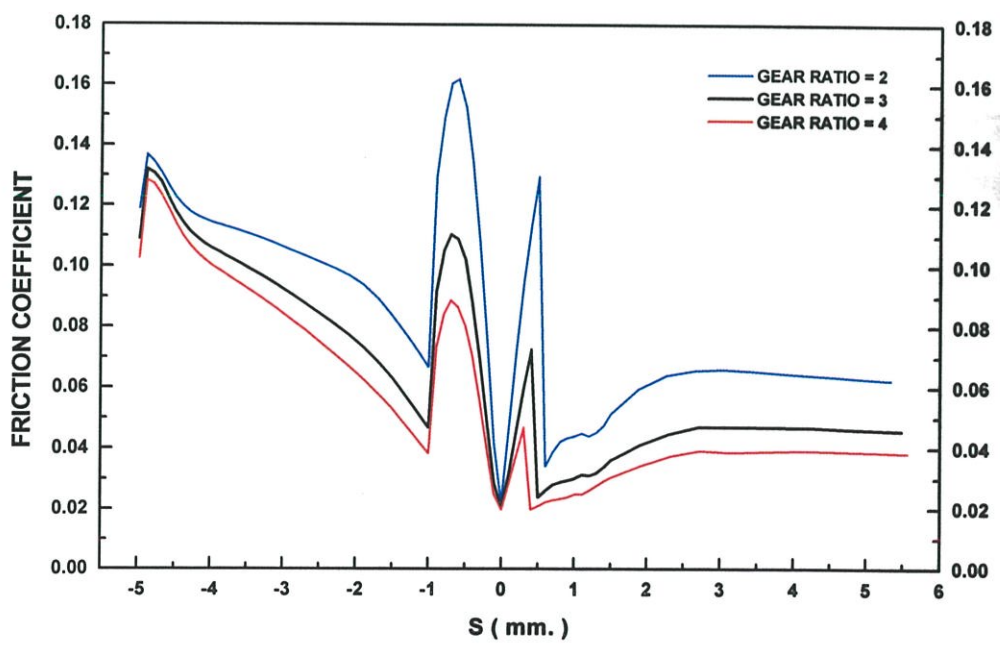
รูปที่ 7.180 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



รูปที่ 7.181 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.182 แสดงการค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

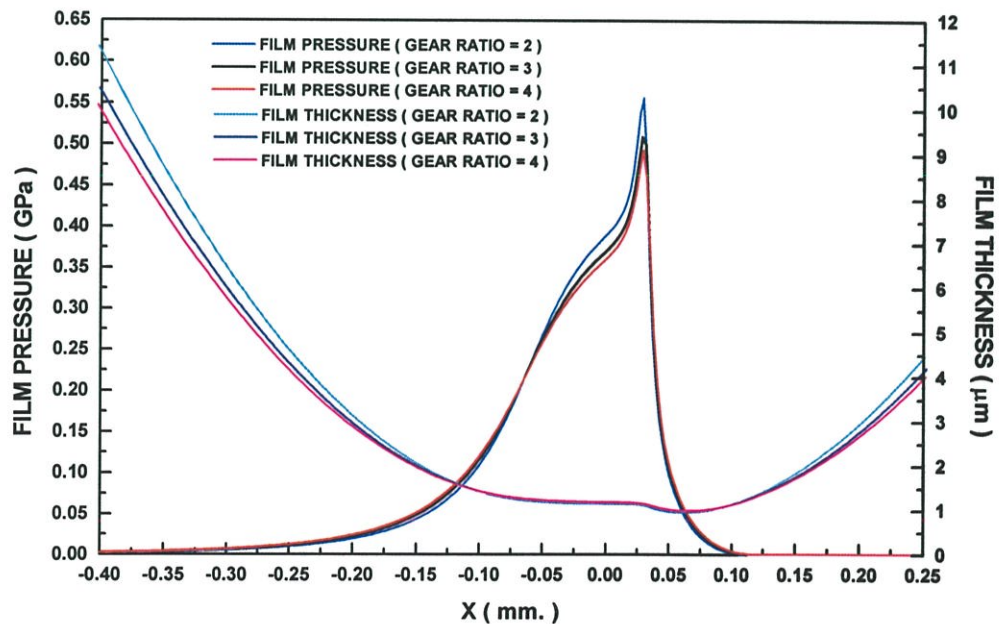


รูปที่ 7.183 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

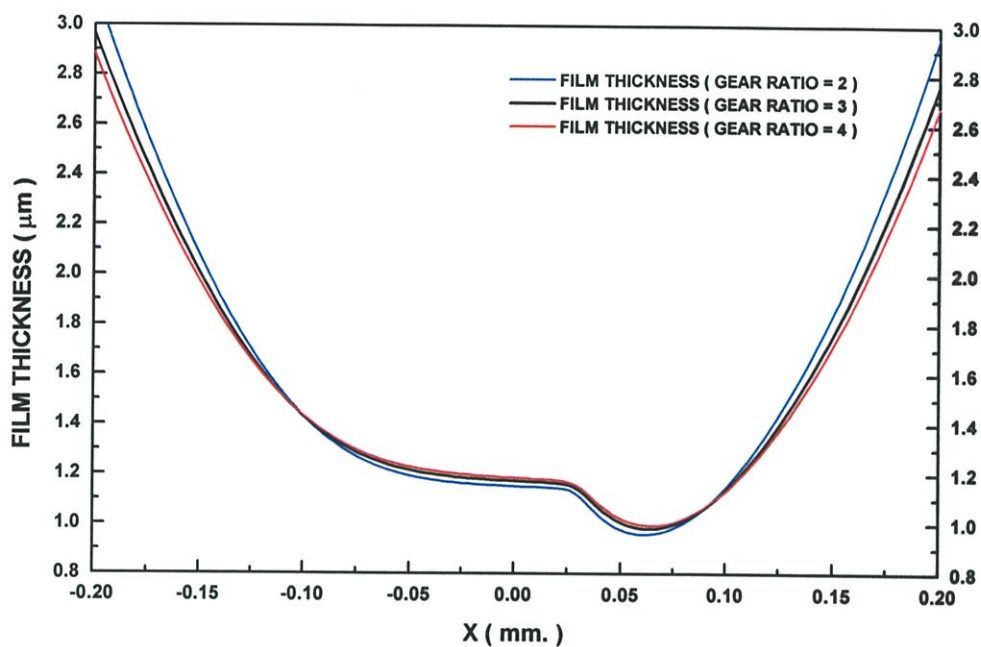
7.8.2 ผลการจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) กรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันเกรด SAE-90 ผสม MoS₂ ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) กรณีที่สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 ผสม MoS₂ ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อไม่คิดผลจากความหนืดของฟลักซ์เฟือง จะพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง จะทำให้ความดันฟิล์มของน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มของน้ำมันจะลดลง เมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาฟิล์มจะมีค่ามากกว่าในกรณีใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 ค่าความดันฟิล์มน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 แสดงดัง รูปที่ 7.184 ถึง รูปที่ 7.189

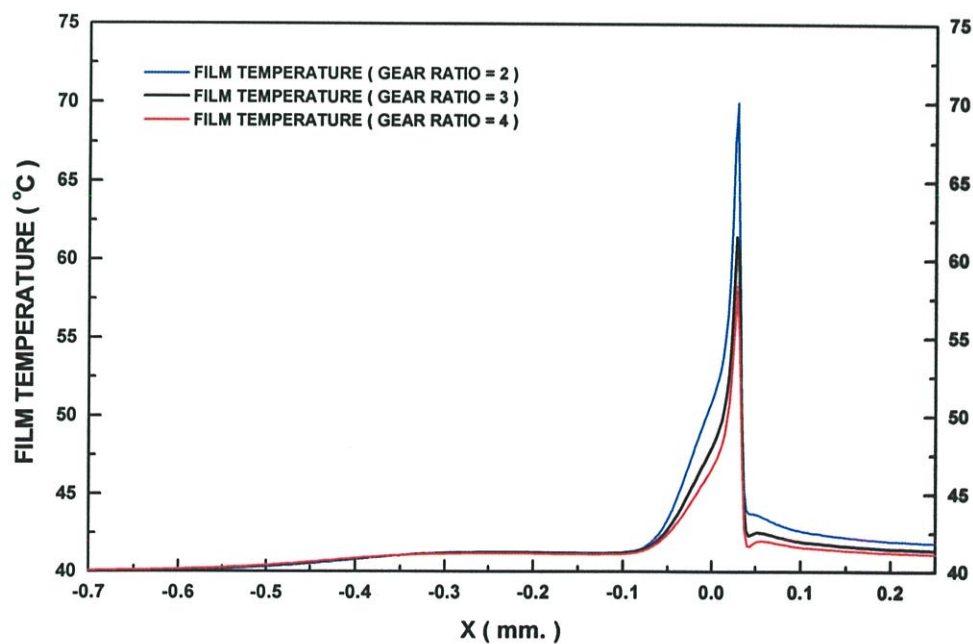
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การความหนาของฟิล์มน้ำมันยังมีค่ามากกว่าเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนเฟืองเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเฟืองเพิ่มขึ้น แสดงดัง รูปที่ 7.190 ถึง รูปที่ 7.193



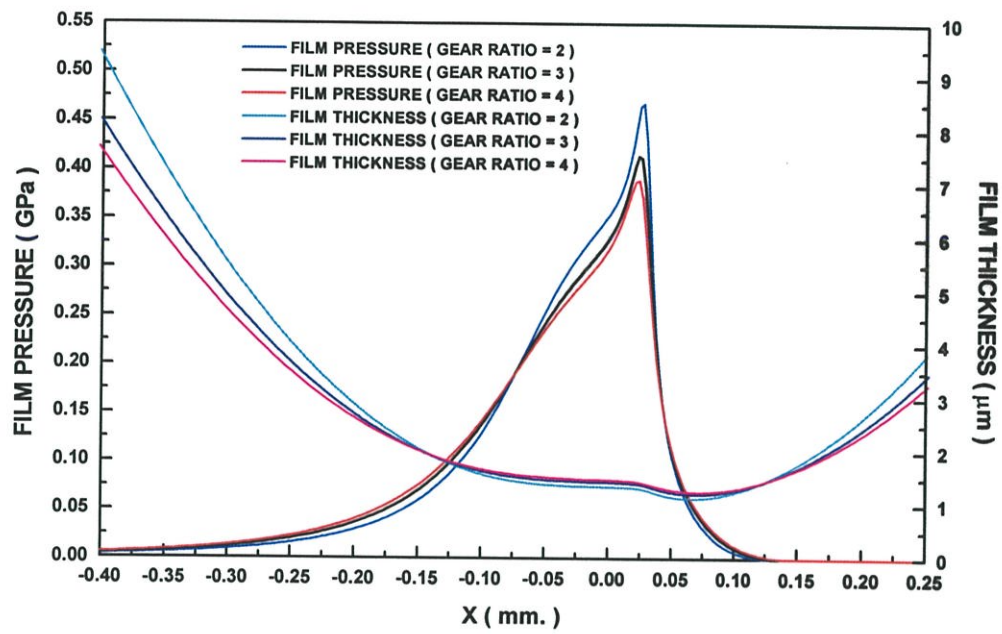
รูปที่ 7.184 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



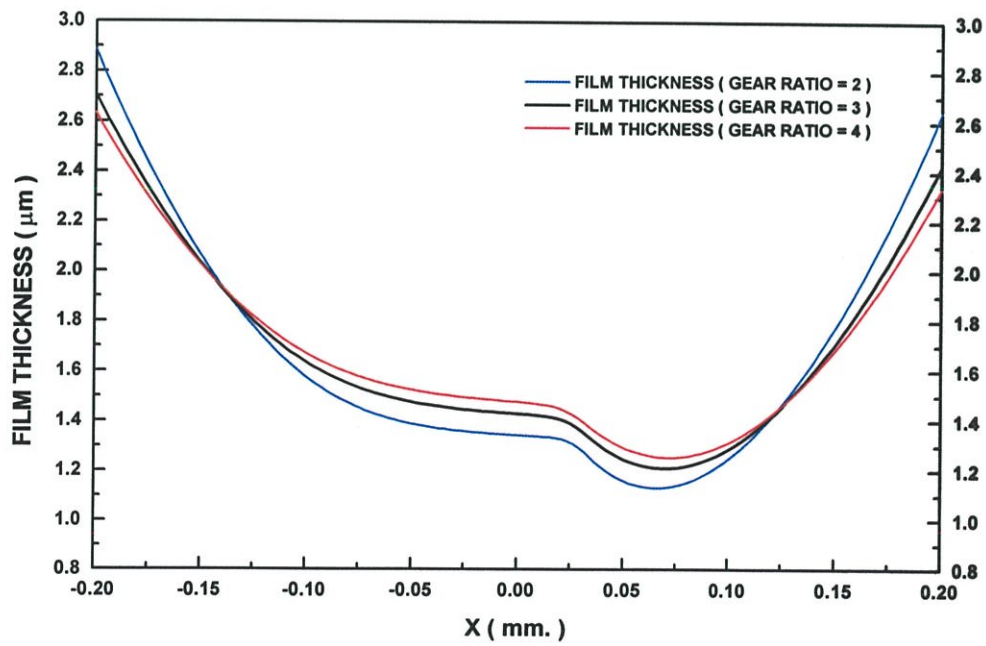
รูปที่ 7.185 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



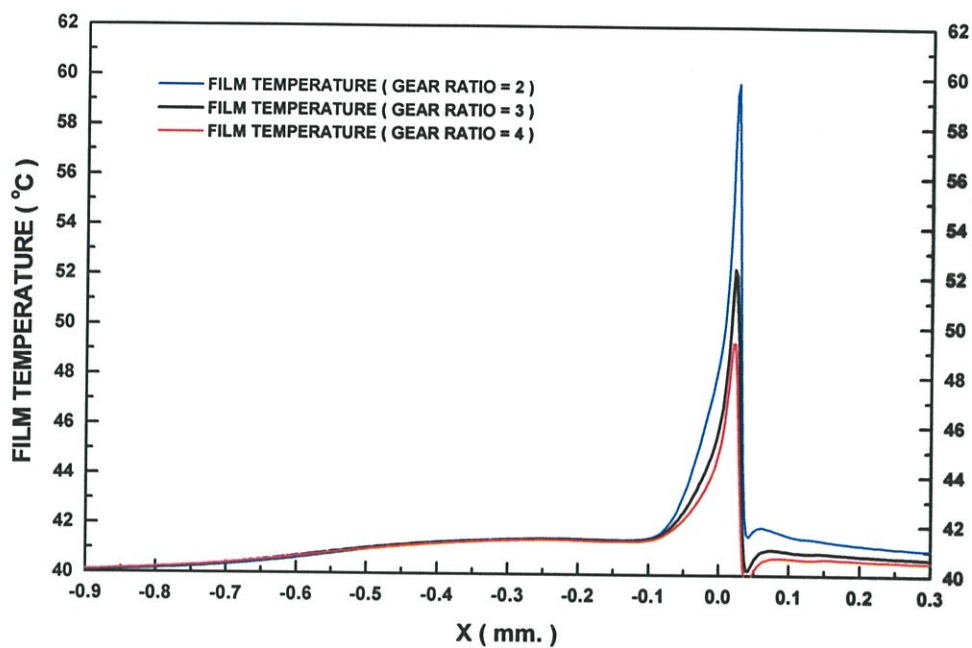
รูปที่ 7.186 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



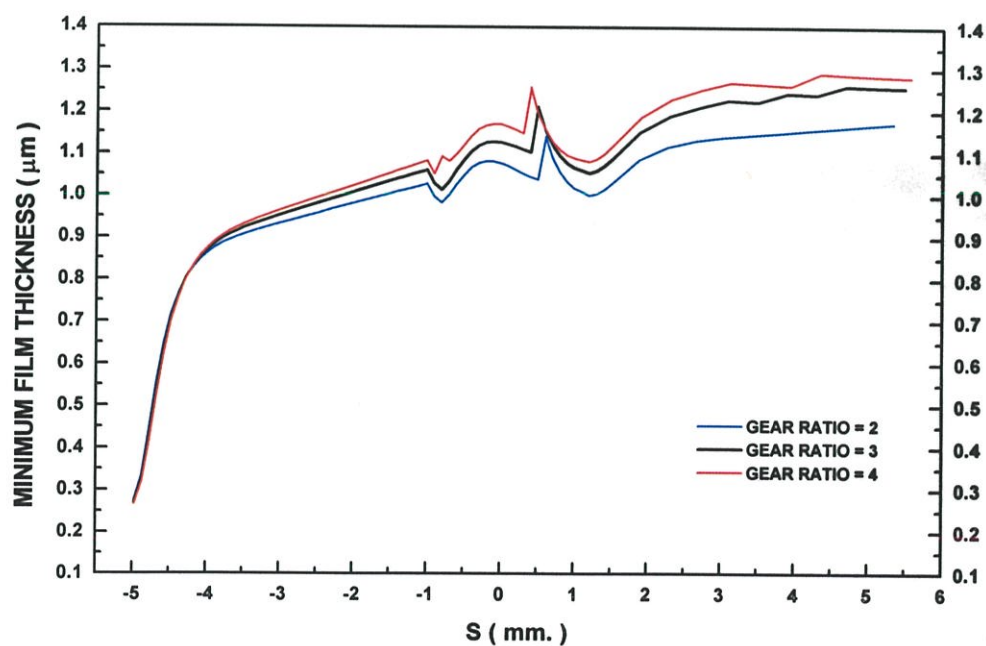
รูปที่ 7.187 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



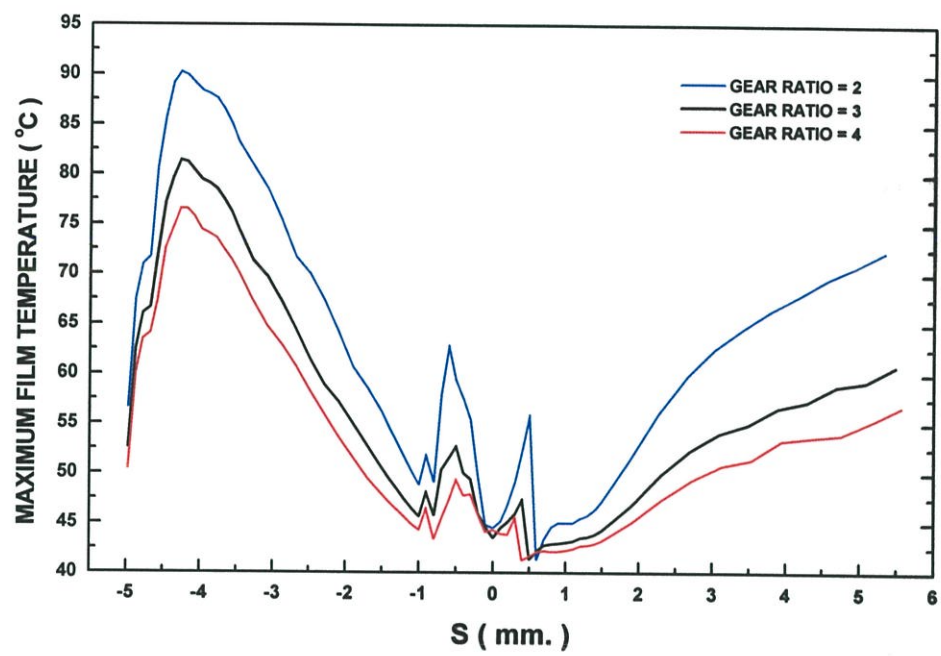
รูปที่ 7.188 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



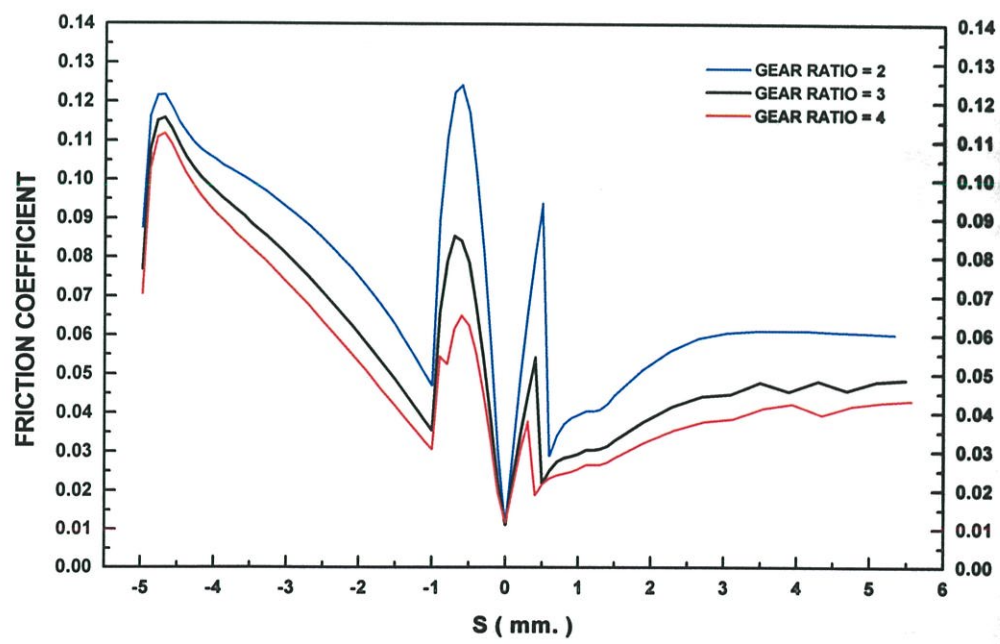
รูปที่ 7.189 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



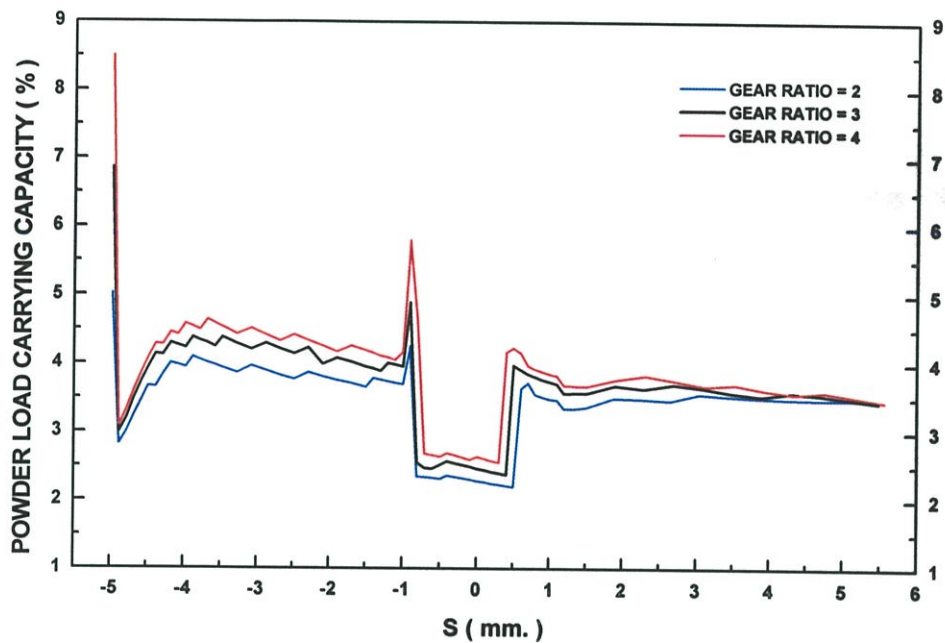
รูปที่ 7.190 แสดงการค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.191 แสดงการคำนวณของฟิล์มน้ำมันสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการ
ขบต่างๆ ของฟันเฟือง



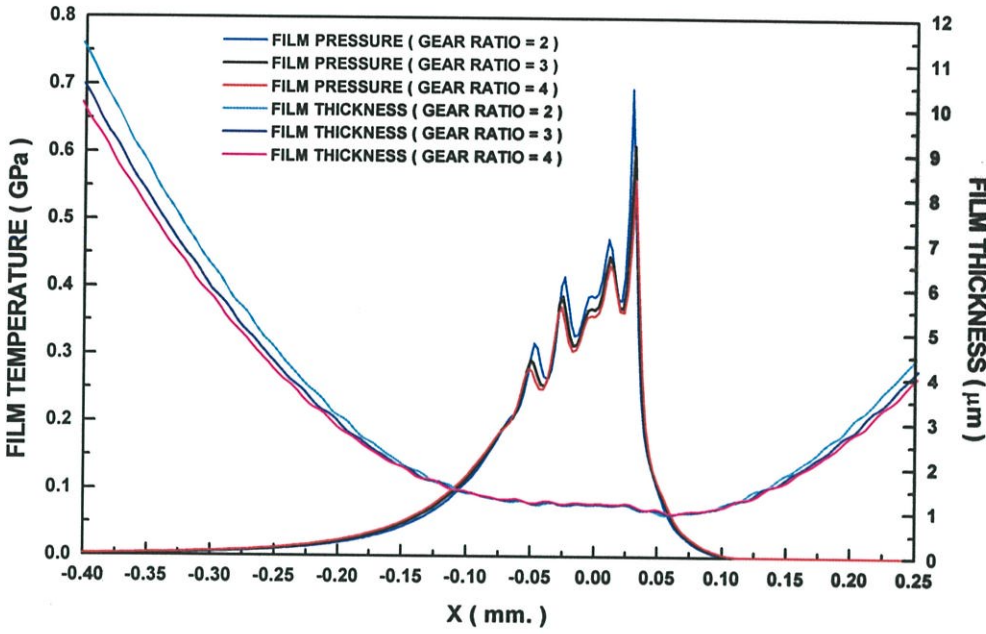
รูปที่ 7.192 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการขบ
ต่างๆ ของฟันเฟือง



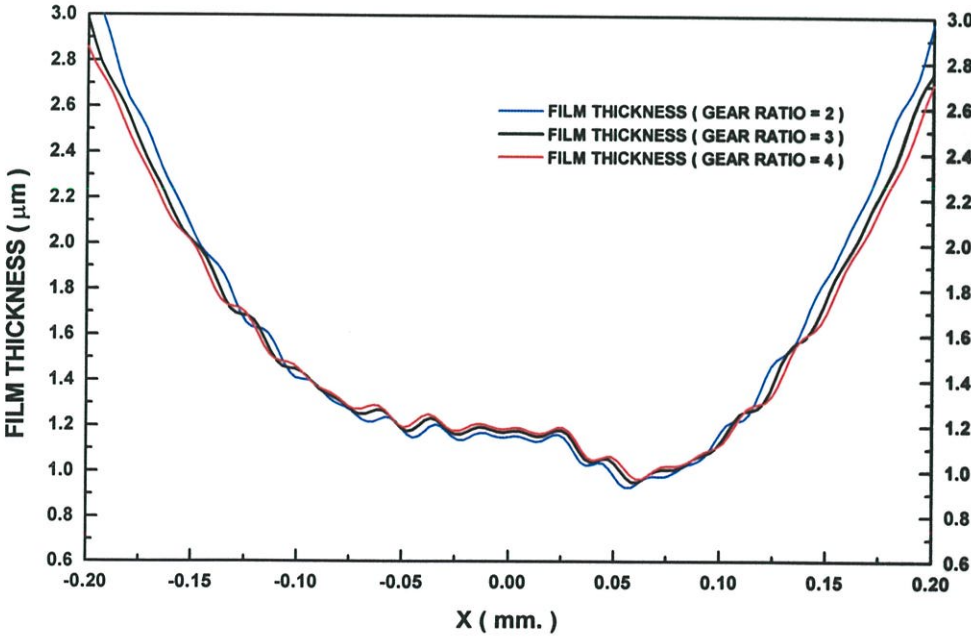
รูปที่ 7.193 แสดงการค่าการรับภาระรวมของสารหล่อลื่นของแข็งเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

การจำลองผล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) กรณีที่สารหล่อลื่นเป็น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-90 ผสม MoS_2 ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาผล จากความหยาบผิวของฟันเฟือง จะพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง จะทำให้ความดันฟิล์ม ของน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่า เพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มของน้ำมันจะลดลง เมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาฟิล์มจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีไม่คิดผลจากความ หยาบผิวของฟันเฟือง ค่าความดันฟิล์มน้ำมันและอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าน้อยกว่าในกรณี ไม่คิดผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง แสดงดัง รูปที่ 7.194 ถึง รูปที่ 7.199

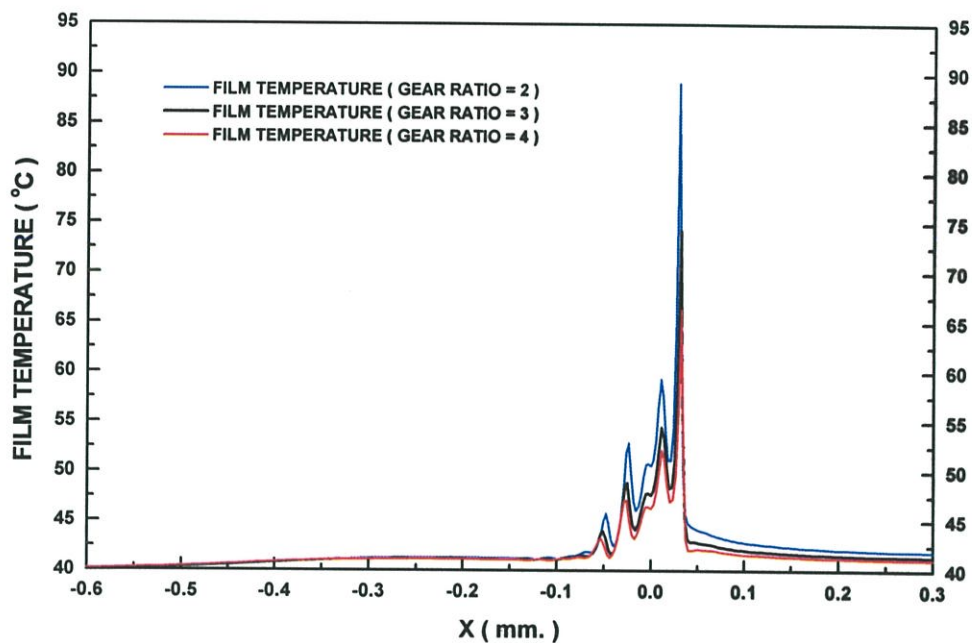
เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลอง ที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองฟันตรง มาพิจารณาจะพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนเฟืองที่มีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อัตราส่วนเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาฟิล์มจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีไม่คิดผลจากความหยาบผิว ของฟันเฟือง อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน เฟืองเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่ามากกว่าในกรณีไม่คิดผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง ค่าอัตราส่วนการ รับภาระของสารหล่อลื่นของแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเฟืองเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่ามากกว่าใน กรณีไม่คิดผลจากความหยาบผิวของฟันเฟือง แสดงดัง รูปที่ 7.200 ถึง รูปที่ 7.203



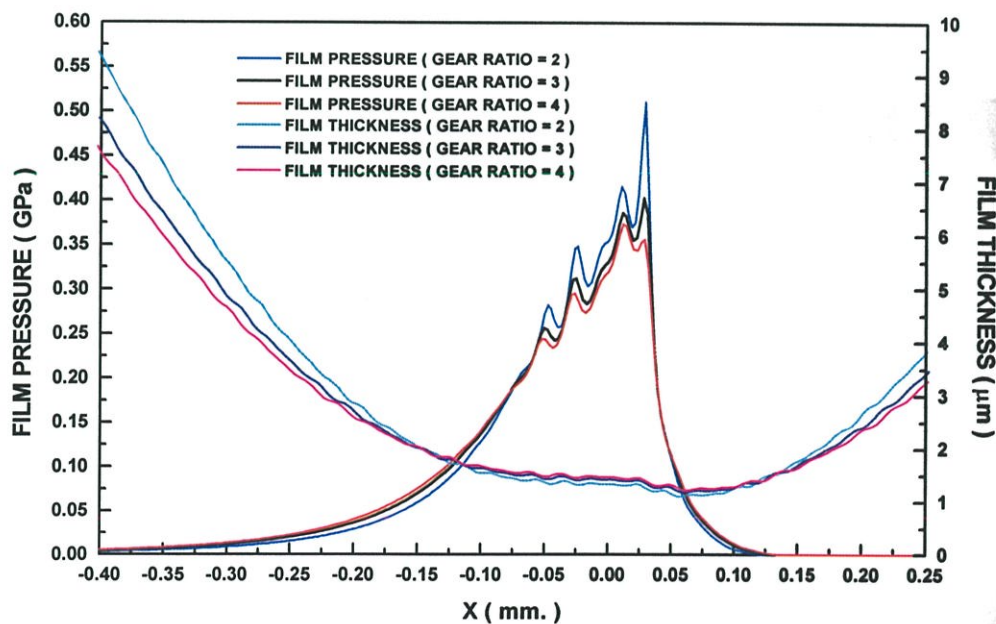
รูปที่ 7.194 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



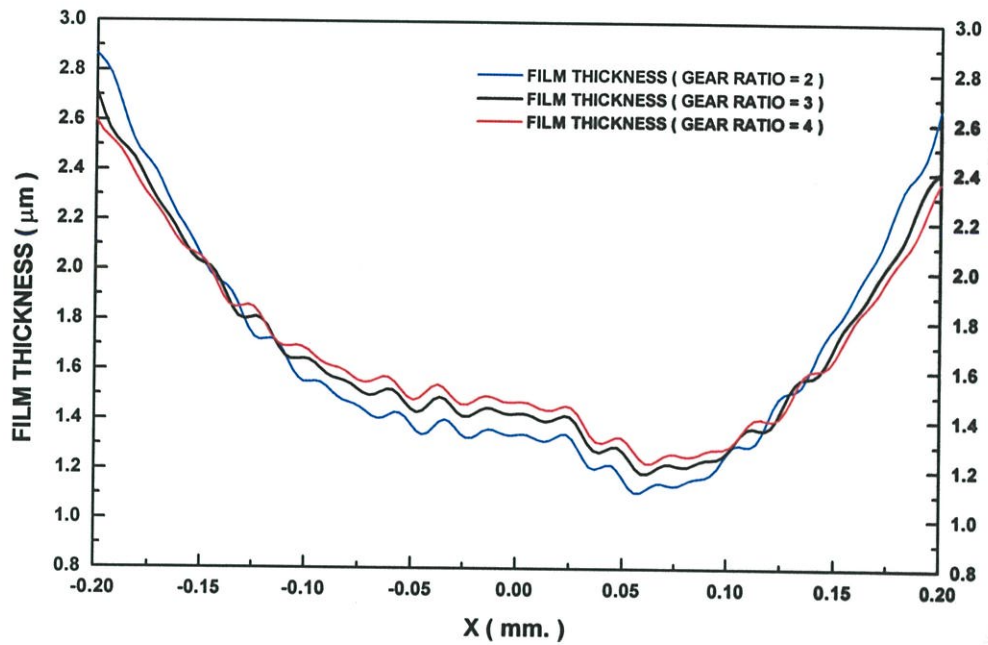
รูปที่ 7.195 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



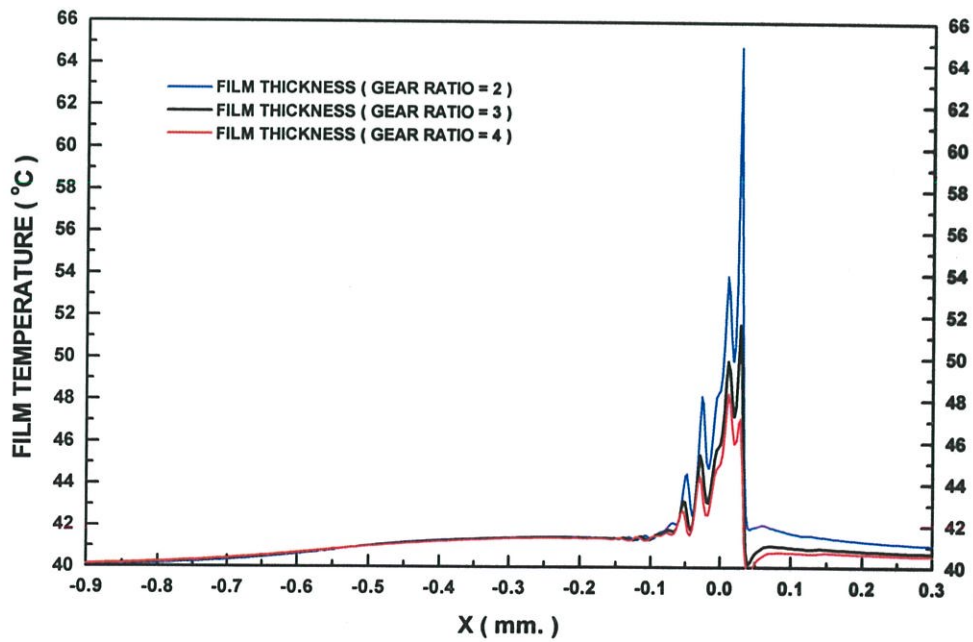
รูปที่ 7.196 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางเข้าของระยะการขบของฟันเฟือง



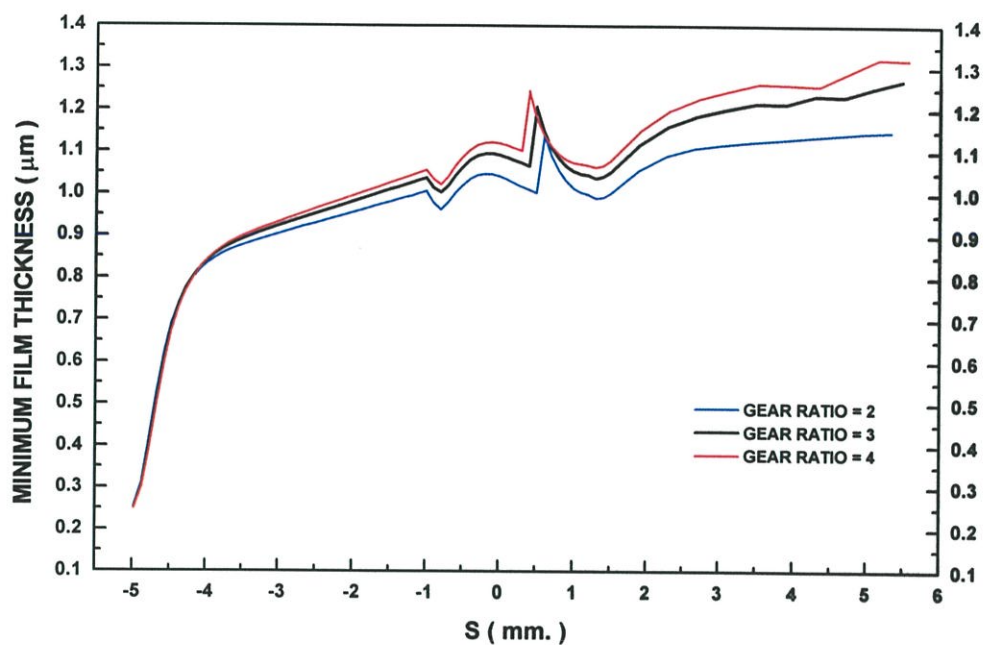
รูปที่ 7.197 แสดงการกระจายของความดันฟิล์ม และ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



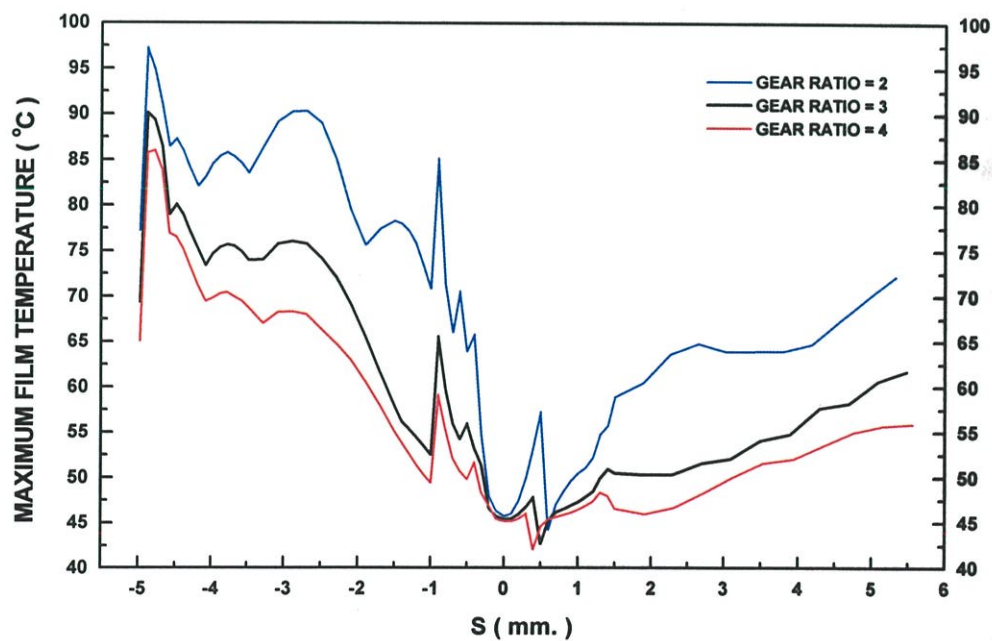
รูปที่ 7.198 แสดงการกระจายของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



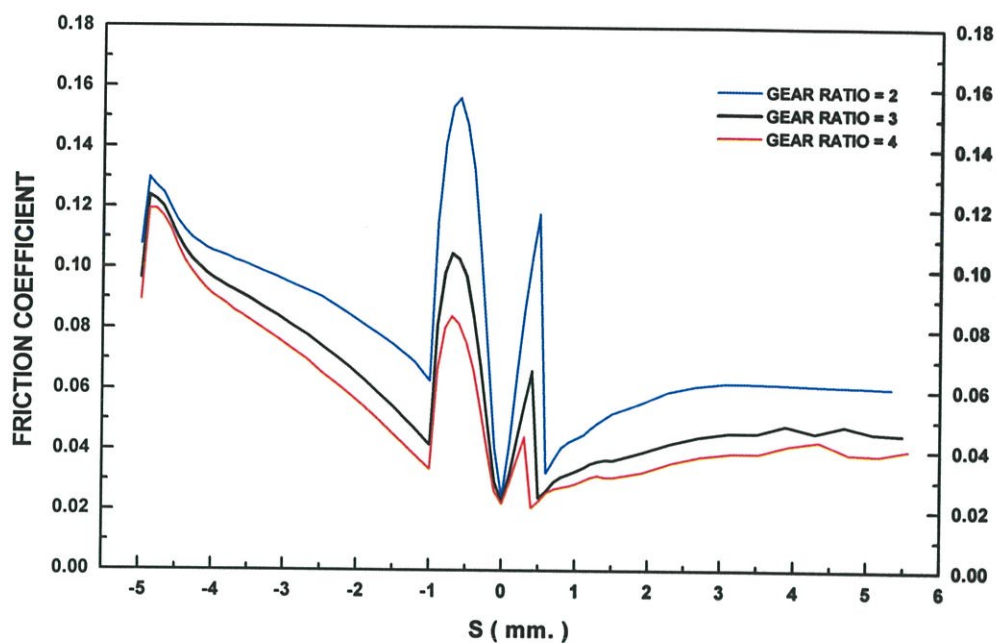
รูปที่ 7.199 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ในช่วงทางออกของระยะการขบของฟันเฟือง



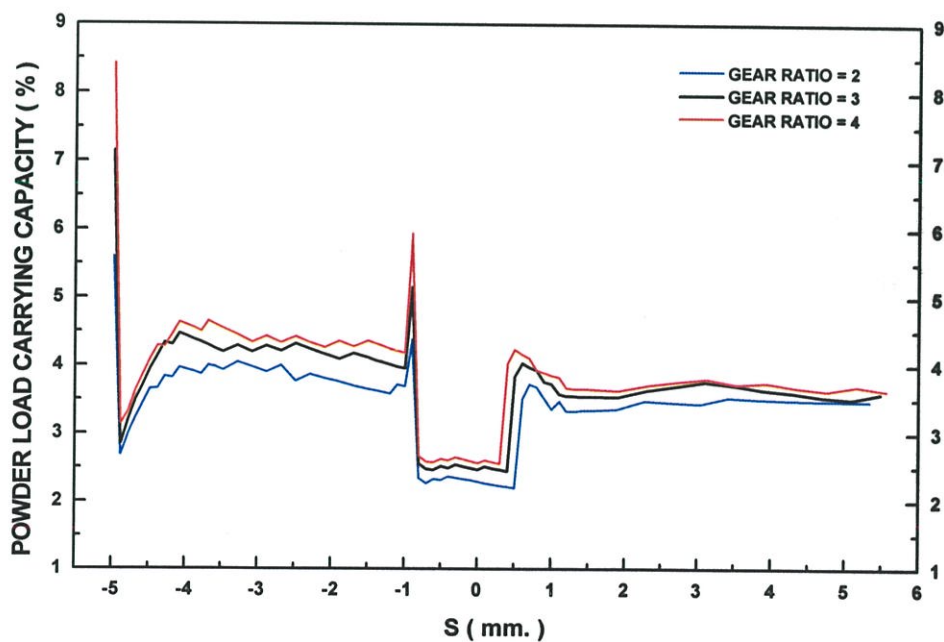
รูปที่ 7.200 แสดงการคำนวณค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่
ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.201 แสดงการคำนวณค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการ
ขบต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.202 แสดงการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง ที่ระยะการขบ
ต่างๆ ของฟันเฟือง



รูปที่ 7.203 แสดงการค่าการรับภาระรวมของสารหล่อลื่นของแข็งเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเฟือง
ที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของฟีนเฟืองตรง เมื่อสารหล่อลื่นเป็นน้ำมันหล่อลื่นผสมสารหล่อลื่นของแข็ง เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟีนเฟือง การคำนวณเชิงตัวเลขทำได้โดยอาศัยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ในการแก้สมการเรย์โนลด์สประยุกต์ และสมการพลังงานประยุกต์ จากการจำลองพฤติกรรมสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

8.1.1 พฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของฟีนเฟืองตรง

- เมื่อทำการพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของฟีนเฟืองตรง จะพบว่าที่ตำแหน่งฟีนเฟือง เริ่มขบกันความดันฟิล์มจะเริ่มก่อตัว ทำให้ ความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าน้อย จากนั้นความหนาของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้น
- อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะเป็นไปตามค่า Shear Stress ที่เกิดขึ้นกับฟิล์มน้ำมัน และภาระที่ฟีนเฟืองได้รับ อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าน้อยสุดเมื่อ ฟีนเฟืองเปลี่ยนจากการขบกัน 1 คู่มาเป็นขบกัน 2 คู่ ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าว Shear Stress ที่เกิดขึ้นกับฟิล์มน้ำมัน และภาระที่ฟีนเฟืองได้รับ มีค่าน้อย
- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการทำงานของฟีนเฟืองจะมีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่ง Pitch Contact
- เมื่อพิจารณาผลจากความหยาบผิวของฟีนเฟือง จะพบว่าความดันฟิล์มของน้ำมัน ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าไปในทิศทางเดียวกับ เมื่อไม่คิดผลจากความหยาบผิวของฟีนเฟือง โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะความหยาบของผิวฟีนเฟือง โดยที่ ความดันฟิล์มของน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมี เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงกับความหยาบของผิวฟีนเฟือง
- เมื่อทำการจำลองผลการหล่อลื่นของฟีนเฟืองโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งลงไป ในน้ำมัน เทียบกับน้ำมันหล่อลื่นปกติ จะพบว่า เมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งลงไป ในน้ำมัน จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ความดันฟิล์มน้ำมัน มีค่าลดลง ทั้งในกรณีที่คิดผลจากความหยาบผิวของฟีนเฟือง และไม่คิดความหยาบผิวของฟีนเฟือง

8.1.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความหยาบผิวของพื้นเพื่อง

- เมื่อผิวของพื้นเพื่องมีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าลดลง เมื่อความหยาบผิวของพื้นเพื่องมีค่าเพิ่มขึ้น
- เมื่อผิวของพื้นเพื่องมีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหยาบผิวของพื้นเพื่องมีค่าเพิ่มขึ้น
- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของพื้นเพื่อง จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหยาบผิวของพื้นเพื่องมีค่าเพิ่มขึ้น
- ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแฉ่ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหยาบผิวของพื้นเพื่องมีค่าเพิ่มขึ้น

8.1.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่พื้นเพื่องได้รับ

- เมื่อภาระที่พื้นเพื่องได้รับเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าลดลง ตามภาระที่พื้นเพื่องได้รับ
- เมื่อภาระที่พื้นเพื่องได้รับเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามภาระที่พื้นเพื่องได้รับ
- เมื่อภาระที่พื้นเพื่องได้รับเพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามภาระที่พื้นเพื่องได้รับ
- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของพื้นเพื่อง จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อภาระที่พื้นเพื่องได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น
- ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแฉ่ง จะมีค่าลดลง เมื่อภาระที่พื้นเพื่องได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น

8.1.4 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเพื่อง

- เมื่อความเร็วรอบในการทำงานพื้นเพื่องเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเพื่อง
- เมื่อความเร็วรอบในการทำงานพื้นเพื่องเพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเพื่อง
- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของพื้นเพื่อง จะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ Pitch Contact เมื่อความเร็วรอบในการทำงานของพื้นเพื่องมีค่าเพิ่มขึ้น

- ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบในการทำงานพื้นเพียงเพิ่มขึ้น

8.1.5 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง

- เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่น
- เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าลดลง ตามความเข้มข้นของสารหล่อลื่นที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่น
- อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ Pitch Contact
- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของพื้นเพียง จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ Pitch Contact
- เมื่อความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น

8.1.6 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของสารหล่อลื่นของแข็ง

- เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าลดลง ความดันฟิล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น ตามขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่น แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมาก
- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของพื้นเพียง จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก
- เมื่อขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งที่เติมลงไปใต้น้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะมีค่าลดลง

8.1.7 ผลจากการเปลี่ยนชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง

- เมื่อสารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE เทียบกับ MoS_2 จะพบว่า การรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น

- เมื่อสารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE เทียบกับ MoS_2 จะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้น
- เมื่อสารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE เทียบกับ MoS_2 จะพบว่าความดันของฟิล์มน้ำมัน มีค่าลดลง
- เมื่อสารหล่อลื่นของแข็งเป็น PTFE เทียบกับ MoS_2 จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของฟันเฟือง จะมีค่าเพิ่มขึ้น

8.1.8 ผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio)

- เมื่ออัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนเฟืองที่เพิ่มขึ้น
- เมื่ออัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) เพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าลดลง ตามอัตราส่วนเฟืองที่เพิ่มขึ้น
- เมื่ออัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) เพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน จะมีค่าลดลง ตามอัตราส่วนเฟืองที่เพิ่มขึ้น
- เมื่ออัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการทำงานของฟันเฟือง จะมีค่าลดลง ตามอัตราส่วนเฟืองที่เพิ่มขึ้น
- เมื่ออัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) เพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการรับภาระของสารหล่อลื่นของแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนเฟืองที่เพิ่มขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีข้อสมมุติฐานคือ ทำการศึกษาในกรณีที่ไม่คิดการไหลออกด้านข้างของสารหล่อลื่น หรือเป็นการไหลออกในทิศทางเดียว ทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมัน ความดันของฟิล์มน้ำมัน และอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน มีค่าผิดพลาดไปบ้างจากค่าที่ควรจะเป็น เพื่อให้ได้พฤติกรรมของการหล่อลื่นที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น ควรจะทำการศึกษาในกรณีที่มีการไหลออกด้านข้างของสารหล่อลื่นด้วย

ปกติในการทำงานของฟันเฟือง บางช่วงขณะจะเกิดการสัมผัสกันระหว่างผิวของฟันเฟือง ทำให้บางส่วนไม่มีฟิล์มน้ำมัน อยู่ระหว่างผิวสัมผัส แต่ในการศึกษางานวิจัยนี้ จะสมมติให้ระหว่างผิวสัมผัส ของฟันเฟือง มีสารหล่อลื่นอยู่ระหว่างกลางตลอดเวลา และไม่มีการสัมผัสกันของผิวฟันเฟือง เพื่อให้ได้พฤติกรรมของการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรงที่ถูกต้องแม่นยำขึ้นควรทำการศึกษาในแบบ Mixed Lubrication

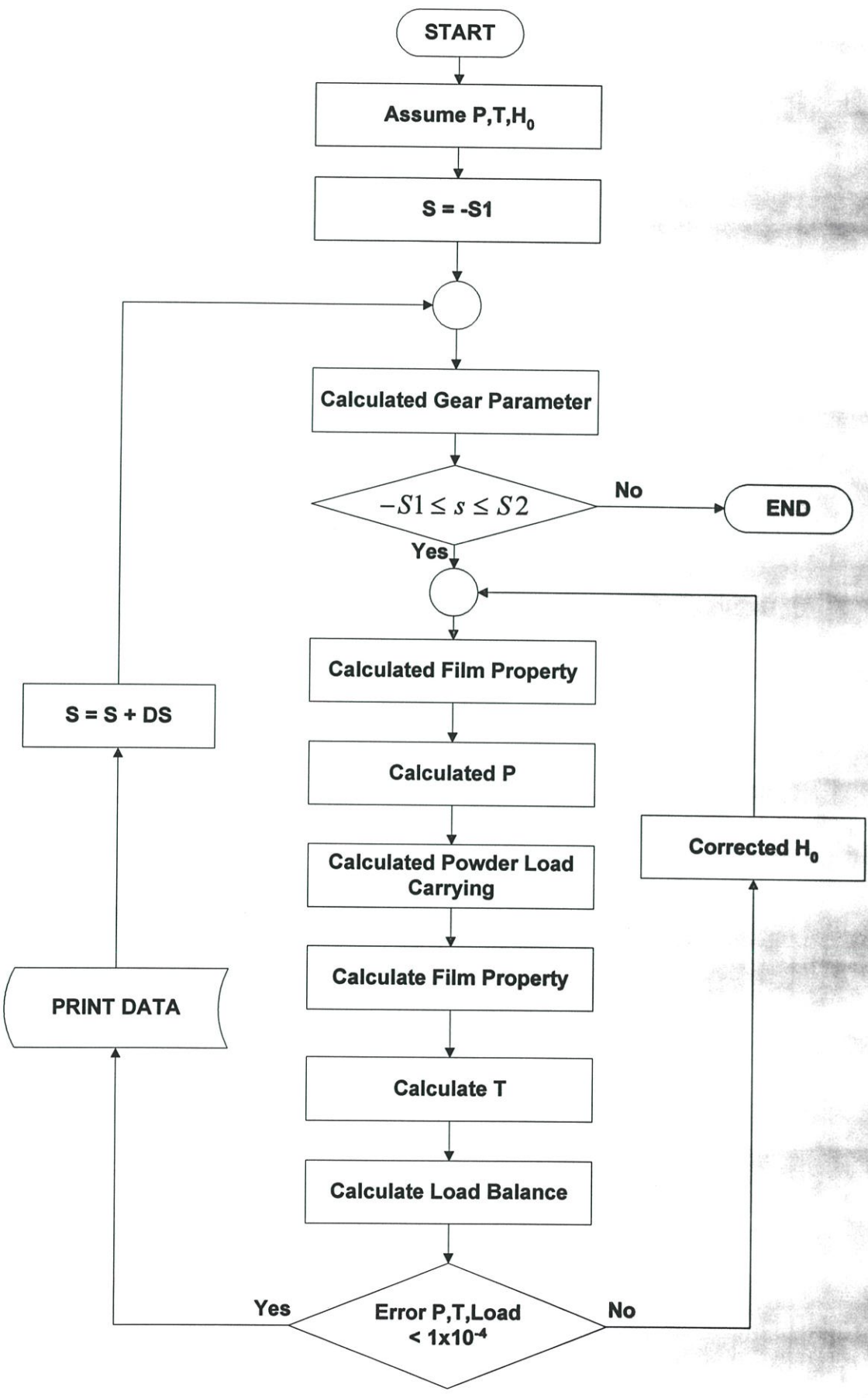
บรรณานุกรม

- [1] D.Y. Hua , M.M. Khonsari , “ **Elastohydrodynamic Lubrication by Powder Slurries** ” ,
Journal of Tribology ” , Vol.118 , pp 67-73 , January 1996
- [2] Khonsari M.M. and Hua D.Y. “ **Thermal Elastohydrodynamic Analysis Using a
Generalized Non-Newtonian Formulation With Application to Bair-Winer
Constitutive Equation.** ” , Tran. ASME. Journal of Tribology , vol. 116 , pp. 37-46 ,
July 1994.
- [3] Youqiang Wang , Hongqi Li, Jingwei Tong, Peiran Yang , “ **Transient thermoelasto-
hydrodynamic lubrication analysis of and involute spur gear** ” , Tribology
International 37 (2004) pp 773-782 , 2004
- [4] Roland Larsson , “ **Transient non-Newtonion elastohydrodynamic lubrication analysis of
an involute spur gear** ” , Wear 207 , pp 67-73 , 1997
- [5] R.T. Lee, H.M. Chu, Y.C. Chiou , “ **Invers approach for calculating pressure and
viscosity in elastohydrodynamic lubrication** ” , Tribology International 35 ,
pp 809-817 , 2002
- [6] Xiaoling Liu, Peiran Yang , “ **Analysis of thermal elastohydrodynamic lubrication of
finite line contact** ” , Tribology International , pp 137-144 , 2002
- [7] Bhattacharjee R.C. and Dast N.C. “ **Power law fluid model incorporated into elasto-
hydrodynamic lubrication theory of line contact.** ” Tribology International, vol. 29 ,
pp. 405-413. , 1996.
- [8] Venner C.H. and Ten Napal W.E. “ **Surface Roughness Effects in an EHL Line Contact.** ”
Tran. ASME. Journal of Tribology , vol. 114. , pp. 616-662. , July 1992
- [9] Salehizadeh H. and Saka N. “ **Thermal non-Newtonian elastohydrodynamic lubrication of
rolling line contacts.** ” Tran. ASME. Journal of Tribology , vol. 113 pp. 481-491. , 1991
- [10] Roelands,C.J.A. “ **Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure
Relationship of Lubricating Oils** ” , Druk , V.R.B.,Groingen , Netherland , 1969
- [11] Dowson,D.,and Higginson,G.R. “ **Elastohydrodynamic Lubrication:The Fundamental
of Roller and Gear Lubrication** ” , Pergamon , Oxford , 1966
- [12] Rylander,H.G. “ **A Theory of Liquid-Solid Hydrodynamic Film Lubrication** ” , ASLE
Journal of the American Society of Lubrication Engineerings , pp.264-271 , 1966

- [13] Khonsari, M.M., Esfahanian, V. , “ **Thermoelastohydrodynamic Analysis of Solid – Lubricated Journal Bearings** ” ASME Journal of Tribology , Vol.110 , pp.367-373 ,1988
- [14] Khonsari, M.M., Wang, S.H., Qi, Y.L. , “ **A Theory of Solid-Liquid Lubrication in Elastohydrodynamic Regime** ” ASME Journal of Tribology , Vol.111 , pp.440-447 , 1989
- [15] Khonsari, M.M. , Wang, S.H. , Qi, Y.L. , “ **A Theory of Thermoelastohydrodynamic Lubrication of Liquid-Solid Lubricated Cylinders** ” ASME Journal of Tribology, Vol.112 , 1990 , pp.259-264
- [16] Hamrock ,B.J. , **Fundamentals of Fluid Film Lubrication** , McGraw-Hill , 1994
- [17] Gohar R. , **Elastohydrodynamics** , New York: JOHN WILEY & SONS, Inc1988.
- [18] ปราโมทย์ เศษอำไพ , ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม , พิมพ์ครั้งที่ 1, 2538 , สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [19] ประเสริฐ เทียนนิมิตร , ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ , ปานเพชร ชินินทร , เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น , บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จก. หน้า 228-247
- [20] มงคล มงคลวงศ์โรจน์,อิโรมู ฮาชิโมโตะ , ทฤษฎีการหล่อลื่น , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2536
- [21] เกษม ธรรมโกศล , อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พ.ศ. 254

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
FLOW CHART การทำงานของโปรแกรม



ภาคผนวก ข.

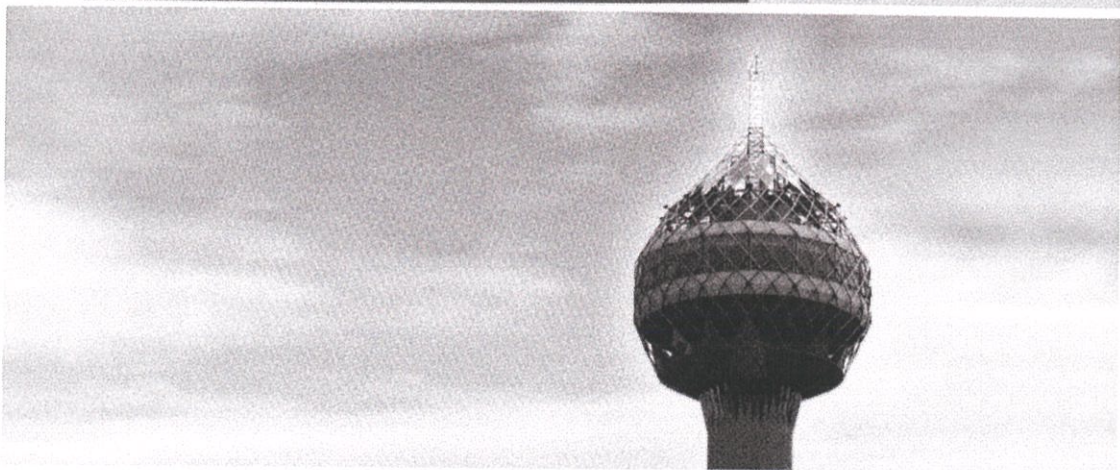
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



ME NETT 20th

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EXTENDED ABSTRACT



การประชุมวิชาการ

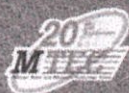
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20

วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549

ณ โรงแรมคาร์ิน โกสตัน วิลเลจ โฮเทล แอนด์ รีสอร์ท

เขาใหญ่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

© Hitachi Global Storage Technologies



The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand
Suranaree University of Technology

AMM056

การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ในเฟืองฟันตรง
Transient Thermoelastohydrodynamic Lubrication in Spur Gear

เจษฎา พานิชกร¹ และ มงคล มงคลวงศ์โรจน์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ โรงเรียนการศึกษานักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-Mail : jesda.pa@gmail.com¹ , kmmongko@kmitl.ac.th²

Jesda Panichakorn¹ and Mongkol Mongkolwongrojn²

Department of Mechanical Engineering , ReCCIT , King Mongkol's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok 10520

Tel : 0-2326-4197 Fax : 0-2326-4198 E-Mail : jesda.pa@gmail.com¹ , kmmongko@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ของฟันเฟืองชนิดตรง ซึ่งสัดส่วนของความโค้งที่ผิวสัมผัสจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทำการศึกษาในกรณีที่มีการหล่อลื่นมีพฤติกรรมแบบนิวโตเนียน การศึกษาในบทความนี้ใช้การจำลองด้วยวิธีคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข โดยใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เพื่อหาการกระจายของความดัน การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความหนืด และการกระจายของความหนาแน่น ของฟิล์มสารหล่อลื่น รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในการทำงานของเฟืองแบบฟันเฟืองตรง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง ภาระที่กระทำ ความเร็วรอบในการทำงานของเฟือง ความหนาของผิวฟันเฟือง และชนิดของสารหล่อลื่น จะพบว่าเมื่อผิวฟันเฟืองเป็นแบบผิวหยาบ การกระจายความดันจะเป็นไปตามการกระจายตัวของความหนาของผิวฟันเฟือง โดยที่ความดันจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของผิวฟันเฟือง เมื่อความเร็วในการทำงานของเฟืองเพิ่มขึ้น ความดันที่ทางออกของการสัมผัส อุณหภูมิของสารหล่อลื่น และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์ความเสียหายจะลดลง เมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับเพิ่มขึ้น ความดันที่ทางออกของการสัมผัส อุณหภูมิของสารหล่อลื่น สัมประสิทธิ์ความเสียหาย จะเพิ่ม ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะลดลง เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารหล่อลื่นที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้น แต่ความดันที่ทางออกของการสัมผัส และสัมประสิทธิ์ความเสียหายจะลดลง

คำสำคัญ : การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก , เฟืองแบบฟันตรง , สมการเรย์โนลด์

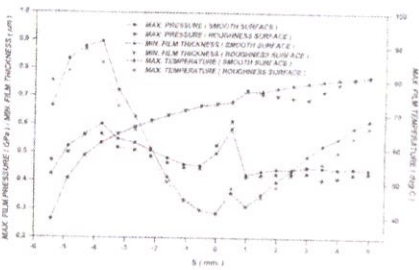
Abstract

This paper present the study of thermoelastohydrodynamic characteristics of gear tooth in line contact included surface roughness in spur gear with Newtonian lubricants. The time dependent Reynolds equation , energy equation and elastic equation were formulated compressible fluid. Newton Raphson method was implemented to obtain the film pressure, film temperature, film thickness, viscosity and density profile in the contact region as well as friction coefficient at various loads , speeds , tooth surface roughness and lubricants. The simulation results show that film pressure profile strongly depended on tooth surface roughness amplitude. For increasing of the gear speeds , film pressure, film temperature and film thickness increases but friction coefficient decreases. For increasing the loads, film pressure, film temperature and friction coefficient increases but film thickness decreases. For the increasing of viscosity of lubricant, film temperature and film thickness increases but film pressure and friction coefficient decreases.

Key word : Thermoelastohydrodynamic lubrication , Spur gear , Time dependent Reynolds equation , Line contact

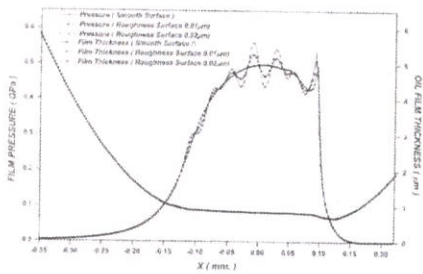
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของฟันเฟืองและสารหล่อลื่น

	PINION	GEAR
จำนวนฟันเฟือง	35	105
โมดูล (m)	2	2
MATERIAL	UNB C61300	UNB C61300
ความเร็วรอบ	800 RPM	
	1000 RPM	
	1200 RPM	
ภาระที่กระทำ	8 kW	
	10 kW	
	12 kW	
สารหล่อลื่น	SAE-40	
	SAE-90	

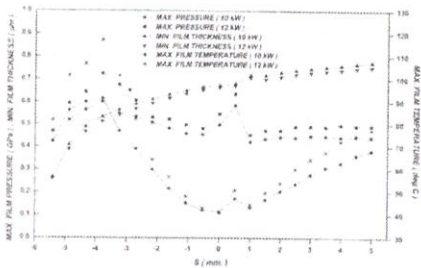


รูปที่ 3 แสดงความดัน อุณหภูมิ และความหนาฟิล์ม
ที่ระยะการชนของเฟือง เมื่อเฟืองที่รับภาระ 10 kW
ความเร็วรอบของเฟือง 1000 rpm

ผลการคำนวณ



รูปที่ 1 แสดงการกระจายของความดันและหนาฟิล์ม ที่ความหนาของ
ผิวฟันเฟืองแต่ละค่า เมื่อเฟืองที่รับภาระ 10 kW
ความเร็วรอบของเฟือง 1000 rpm



รูปที่ 2 แสดงความดัน อุณหภูมิ และความหนาฟิล์ม
ที่ระยะการชนของเฟือง ที่รับภาระต่างๆ
ความเร็วรอบของเฟือง 1000 rpm

[1] Youqiang Wang, Hongqi Li, Jingwei Tong, Peiran Yang , 2004 , Transient thermoelastohydrodynamic lubrication analysis of and involute spur gear , Tribology International 37 (2004) pp 773-782

[2] Roland Larsson , 1997 , Transient non-Newtonian elastohydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear , Wear 207 (1997) pp 67-73

[3] R.T. Lee, H.M. Chu, Y.C. Chiou , 2002 , Invers approach for calculating pressure and viscosity in elastohydrodynamic lubrication , Tribology International 35 (2002) pp 809-817

[4] J. Wang, M. Kaneta, P. Yang , 2005 , Numerical analysis of TEHL line contact problem under reciprocating motion , Tribology International 38 (2003) pp 165-178

[5] Xiaoling Liu, Peiran Yang , 2002 , Analysis of thermal elastohydrodynamic lubrication of finite line contact , Tribology International (2002) pp 137-144

[6] Punit Kumar, S.C. Jain, S. Ray , 2001 , Study of roughness effects in elastohydrodynamic lubrication of rolling line contacts using a deterministic model , Tribology International 34 (2001) pp 713-722

[7] Bernard J. Hamrock , 1994 , Fundamental of fluid film lubrication , McGraw-Hill , Singapore

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายเจษฎา พานิชกรณ์
วัน เดือน ปีเกิด	7 ธันวาคม 2513
สถานที่อยู่	เลขที่ 35 หมู่ 1 ตำบล นางหลง อำเภอ ชะอวด จังหวัด นครศรีธรรมราช 80180
ประวัติการศึกษา	2534 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2535-2548	ตำแหน่ง วิศวกร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ปัจจุบัน	ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย ReCCIT สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	
2549	การหล่อลิ้นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรง (งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20)